



Fachlicher Abschlussbericht

Aachener Innovationscluster AdaM - Adaptive Produktion für Ressourceneffizienz in Energie und Mobilität

Berichtersteller: Dipl.-Ing. Daniel Schraknepper
Dipl.-Phys. Marco Goebel

Mit Beiträgen weiterer Mitarbeiter der beteiligten Institute



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



Unterstützt durch das Land
Nordrhein-Westfalen

Inhalt

1	Zielsetzung und Motivation	2
1.1	Zielsetzung	2
1.2	Herangehensweise und Projektstruktur	4
2	Übergeordnete gemeinsame Entwicklungen	5
2.1	Prozesskette Leitschaukelcluster	5
2.2	Prozesskette zur Multi-BliR-Reparatur	8
3	Beschreibung der durchgeführten vorwettbewerblichen Arbeiten	10
3.1	Technologiecluster CAx-Technologies	10
3.2	Technologiecluster Laser	19
3.3	Technologiecluster Machining	64
3.4	Technologiecluster Design	78
3.5	Technologiecluster Roadmapping	83
4	Darstellung der Teilprojekte die nicht zum Erfolg geführt haben	85
5	Übersicht technologiespezifischer Ergebnisse	87
6	Getätigte Investitionen	88
7	Außendarstellung, Marketing und Veröffentlichungen	88
8	Auswirkungen auf den Standort NRW & Ausblick	91
9	Zusammenfassung	94
10	Anhang	96
10.1	Technologiespezifische Ergebnisse Cluster C	96
10.2	Technologiespezifische Ergebnisse Cluster L	98
10.3	Technologiespezifische Ergebnisse Cluster M	102
10.4	Technologiespezifische Ergebnisse Cluster D	104
10.5	Tabellarische Übersicht der durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten und Dissertationsvorhaben	105
10.6	Tabellarische Übersicht der in AdaM entstandenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Beiträge in Fachzeitschriften	107

1 Zielsetzung und Motivation

1.1 Zielsetzung

Bedingt durch das weltweite Bevölkerungswachstum und den zunehmenden Wohlstand wird es langfristig zu einem weltweiten Energieengpass kommen. Trotz massiver Entwicklung alternativer Technologien im Bereich der regenerativen Energien wird aktuellen Prognosen zufolge ein Großteil der Energieversorgung auch weiterhin durch fossile Energieträger gedeckt werden müssen. Um dem entgegen zu wirken, setzen viele Länder auf die Strategie der Brennstoffdiversifizierung auf Basis unterschiedlicher Primärenergieträger. Hieraus leitet sich auch der eindeutige Trend in der Energiepolitik zur Effizienzsteigerung, Diversifizierung und Dezentralisierung in der Energieversorgung ab, was aktuell insbesondere auf der Ebene der Turbomaschinenteknologie zu erheblichem Entwicklungsbedarf führt.

Nicht nur in der Energieversorgung, sondern auch im Bereich der Mobilität, vornehmlich im Automobil- und Flugzeugbau, müssen die Hersteller zeitnah neuartige Antriebskonzepte mit deutlich reduzierten Emissionswerten und geringerem Treibstoffverbrauch entwickeln und zur Marktreife bringen. Im Vordergrund stehen hierbei neue Triebwerkstechnologien sowie Turboladersysteme für schadstoffarme Verbrennungsmotoren. Somit sind aufgrund des Klimawandels und der daraus resultierenden klima- und umweltpolitischen Ziele die Turbomaschinenhersteller im besonderen Maße gefordert.

Neben dem starken Innovationsdruck in der Entwicklung effizienterer Turbomaschinen rücken die Fragen der technischen Realisierbarkeit sowie der Herstellbarkeit der zum Teil extrem anspruchsvollen Turbomaschinenkomponenten in den Vordergrund. Hinzu kommen die aufgrund der starken Produktdiversifizierung zunehmende Variantenvielfalt, sowie die deutlich kürzeren Lieferzeiten. Hierauf muss die Produktionstechnik mit neuartigen Lösungsansätzen reagieren, unter Berücksichtigung sowohl wirtschaftlicher als auch ökologischer Gesichtspunkte.

Hier setzt der Innovationscluster für ressourceneffiziente, adaptive Produktion von Turbomaschinen auf den Gebieten Energie und Mobilität – im Englischen „Adaptive Manufacturing“ (AdaM), an. Die übergeordnete Zielsetzung des Innovationsclusters ist es, einen wesentlichen Beitrag zur **nachhaltigen Steigerung der Ressourceneffizienz in den Bereichen der Energieversorgung und der Mobilität** zu leisten.

Im Vordergrund der Entwicklungen steht hierbei die technische Realisierung innovativer Turbomaschinenkonzepte sowie neuartiger Designs von Turbomaschinen-Komponenten, über die ein messbarer Beitrag zur Steigerung des Wirkungsgrades und zur Reduzierung der CO₂-Emission im Energiewandlungsprozess erreicht werden kann.

Erreicht werden soll dies durch die Entwicklung **flexibler und gleichzeitig robuster Herstellungs- und Reparaturketten** sowie leicht **anpassbarer Einzeltechnologien für die Produktion von Turbomaschinen**. Die Bewertung der Ressourceneffizienz soll dabei im Projekt integriert im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung erfolgen und die Aspekte Herstellung, Betrieb und Reparatur der Turbomaschinen mitberücksichtigen, vgl. Abbildung 1.

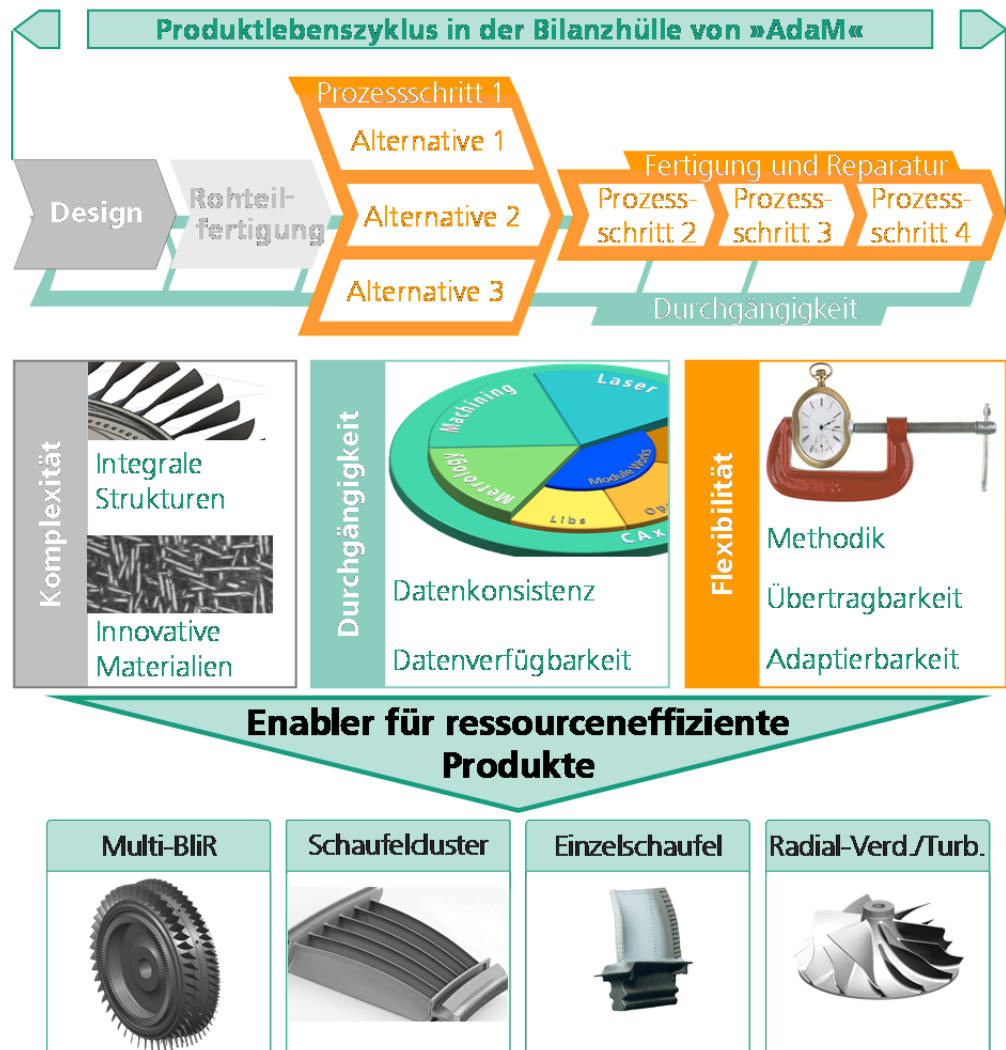


Abbildung 1: Flexible Prozesskettenvariation im Produktlebenszyklus komplexer Produkte

Forschungs- und Entwicklungsbedarf liegt dabei primär in der Befähigung der Unternehmen, Einzelprozesse und Prozessketten für die Herstellung und Reparatur von Turbomaschinenkomponenten schnell und sicher auszulegen. Weiterhin müssen Prozessketten flexibel gestaltbar sein, so dass unternehmensinterne Ressourcen oder Kernkompetenzen der Zulieferer problemlos in die Prozesskette zur Bearbeitung neuer Produktvarianten integrierbar sind. Im Vordergrund stehen hierbei die zunehmend komplexen Schaufelkomponenten, wie z.B. das Blade Integrated Disk (BLISK). Die Ergebnisse werden unter dem Begriff

der „**adaptiven Produktion**“ zusammengefasst. Diese soll im Rahmen des Innovationsclusters „AdaM“ die Realisierung neuartiger „**ressourceneffizienter Turbomaschinen**“ ermöglichen.

Die zugehörigen Entwicklungen erfolgen in enger Kooperation mit führenden Unternehmen aus Nordrhein-Westfalen wie z.B. mit MAN Diesel & Turbo SE in Oberhausen, sowie mit zahlreichen klein- und mittelständischen Zulieferfirmen. Somit wird mit dem Innovationscluster für die beteiligten OEMs und Zulieferer im Wirtschaftsraum NRW eine einzigartige Plattform geschaffen, die durch die Entwicklung von „adaptiven und ressourcenschonenden Produktionstechnologien“ die Wettbewerbsposition des Landes NRW und der beteiligten Unternehmen nachhaltig sichert und ausbaut.

1.2 Herangehensweise und Projektstruktur

Zur parallelisierten und synchronisierten Durchführung der technologischen Entwicklungen erfolgt eine Einteilung der behandelten Themen in vier Technologiecluster (Abbildung 2).

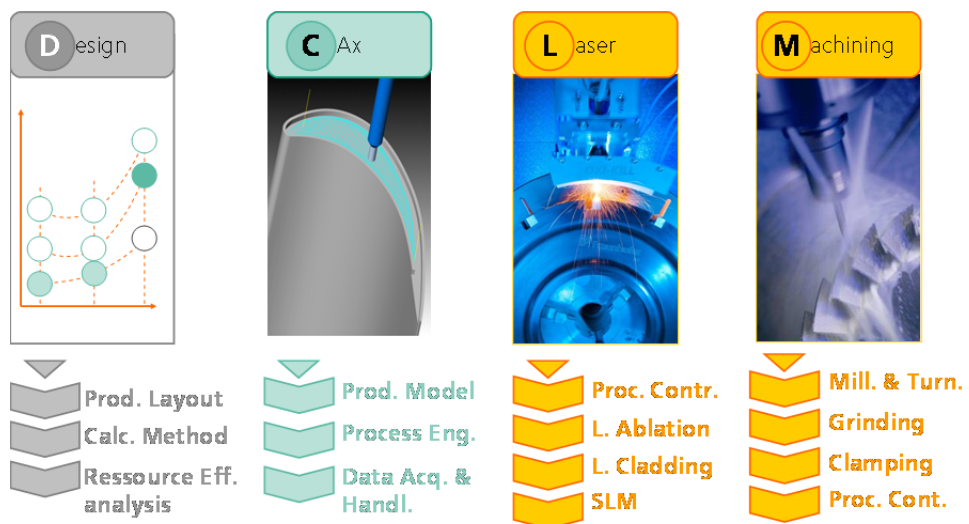


Abbildung 2: Projektstruktur in 4 Technologieclustern mit spezifischen Technologien

Die Durchgängigkeit der Daten wird durch die Technologiecluster Design (Definition der Schnittstelle zwischen Entwurf und Produktion) und CAx (Definition der Schnittstellen zwischen den Einzeltechnologien) adressiert (grau bzw. grün in Abbildung 2). Im Technologiecluster Design wird ferner die ganzheitliche Bewertung aus fertigungstechnischer und aerodynamischer Sicht angestrebt. Die Technologiecluster Laser und Machining fokussieren auf die innovativen Einzeltechnologien der Lasermaterialbearbeitung und der Flexibilität der zerspanenden Einzeltechnologien (orange in Abbildung 2). Den Technologieclustern sind jeweils drei bis vier Subcluster untergliedert. Die Subcluster sind entweder spezifische Methoden zur Analyse und Bewertung, Algorithmen für Datenhandhabung oder Einzeltechnologien. Jedes Subcluster stellt ein Arbeitspaket dar, das in Unterarbeitspakete mit Meilensteinen gegliedert ist.

2 Übergeordnete gemeinsame Entwicklungen

Die im Rahmen von AdaM entwickelten Technologien und Methoden wurden an verschiedenen Bauteilen demonstriert. Zwei Komponenten mit außerordentlicher Geometriekomplexität standen hierbei besonders im Fokus: das Leitschaufelcluster und die Multi-BliR. Beide Demonstratoren dienen dazu, um insbesondere hausübergreifende Prozessketten zu etablieren, zu optimieren und zu demonstrieren. Es kamen jeweils unterschiedliche Einzeltechnologien aus verschiedenen Subclustern zur Anwendung. Diese werden in Kapitel 3 näher beschreiben. Im Folgenden wird auf den übergeordneten Nutzen und die zentralen Innovationen der Technologien und Prozessketten fokussiert.

2.1 Prozesskette Leitschaufelcluster

Die Realisierung neuer Turbomaschinenkomponenten erfolgt in einem Spannungsfeld aus aerodynamisch optimalem Design und wirtschaftlicher Fertigung. Eine Top-Down Entwicklung des Bauteildesigns ohne Kenntnisse neuer Fertigungstechnologien ist dabei typischerweise in den Unternehmen anzutreffen. Die Reduktion des Energiebedarfs zum Betrieb von Turbomaschinen kann jedoch nur durch die Verzahnung von Design und Fertigung erfolgen. Innerhalb von AdaM wurde diese Herausforderung angenommen und im Rahmen von gemeinschaftlichen Arbeiten zwischen dem Fraunhofer ILT, dem Fraunhofer IPT und dem IST der RWTH Aachen anhand der Prozesskette Leitschaufelcluster adressiert.

Bei dem Leitschaufelcluster handelt es sich um eine neue, bisher nicht umgesetzte Designvariante eines Verdichterstators. In der konventionellen Ausführung werden bisher einzelne Schaufelsegmente mit je zwei Schaufeln aus dem Vollmaterial gefräst und später im Gehäuse der Gasturbine zu einem Statorring angeordnet. Die Umsetzung eines Clusters, bestehend aus insgesamt 12 Schaufeln, scheiterte bisher an den vorhandenen Fertigungstechnologien, da die Schaufeln eng aneinander angeordnet sind. Die gesamte Prozesskette Leitschaufelcluster ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Die Prozesskette beginnt mit der Analyse und Optimierung der Geometrie in Bezug auf die aerodynamische Auslegung. Unter Berücksichtigung neuer Designmöglichkeiten durch die additive Fertigung wurden vom IST der RWTH verschiedenen Schaufelanordnungen und Geometrievariationen simuliert. Berücksichtigt wurden dabei insbesondere auch die spezifischen Oberflächengüten und Toleranzen, die sich durch verschiedene Fertigungsprozesse ergeben. Im Ergebnis konnten konkrete **Empfehlungen zu Optimierung der Geometrie** abgeleitet werden, vgl. Kapitel 3.4. Es sind demnach signifikante Potenziale vorhanden, die sich durch Anwendung der SLM-Technologie realisieren lassen.

Eine der Stärken des SLM-Verfahrens ist der Aufbau komplexer Strukturen, für deren konventionelle Fertigung keine Zugänglichkeit gegeben ist. Im Zuge von AdaM wurde die Technologie des SLM weiterentwickelt und für Fe- und Ni-

Basis Legierungen demonstriert. Ein deutlicher Produktivitätssprung kann demnach durch die Nutzung des **adaptiven SLM** erzielt werden, vgl. Kapitel 3.2.1. Das Verfahren zeichnet sich aus durch eine lokale Anpassung von Strahlintensität und Strahlquerschnitt zur Adaption von Aufbaurrate und Einstellung variabler Oberflächengüte. Dort, wo keine Funktionsoberflächen erzeugt werden oder eine anschließende Nachbearbeitung erforderlich ist, wird die Aufbaurrate maximiert. An Stellen mit hohen Anforderungen an Ra und Rz-Werte wird die Oberflächengüte gesteigert. Durch die adaptive Strategie konnte die Produktivität des Verfahrens verdoppelt werden. Ebenso wurden Demonstratoren mit internen Gitterstrukturen hergestellt, die zu einer signifikanten Gewichtsreduktion um 30 % führen.



Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der Prozesskette zur Fertigung des Leitschaukelclusters mittels SLM

Aufgrund der anspruchsvollen Anforderungen an die Oberflächengüte und die Formtoleranz der Strömungs- und Funktionsflächen ist eine **nachfolgende Feinbearbeitung** des generativ gefertigten Bauteils unerlässlich. Hierzu kommen grundsätzlich verschiedenen Verfahren wie das Fräsen, die elektrochemische Bearbeitung oder das Gleitschleifen in Frage. Aus der Kombination verschiedener Verfahren und ihrer Anordnung ergeben sich über 42 mögliche Varianten. Diese wurden, teils auch durch praktische Versuche flankiert, bewertet. Durch die Einbindung externer Partner konnten neue Kompetenzen mit in das Konsortium aufgenommen werden. Zur Verknüpfung der additiven Fertigung mit der adaptiven Fräsbearbeitung von Funktionsflächen wurden unterschiedliche Referenzierungskonzepte entwickelt und überprüft. Aus der Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Instituten konnten wichtige Impulse für eine Weiterentwicklung adaptiver Prozessketten abgeleitet werden.

Die Ressourceneffizienz im Produktlebenszyklus wird nicht nur durch den Betrieb des Bauteils, welches sich durch Werkstoff und Geometrie auszeichnet, bestimmt. Die Vielzahl verschiedener Fertigungsrouten variiert deutlich, bspw. im Hinblick auf den Primärenergiebedarf der eingesetzten Prozesse und Hilfsstoffe. In AdaM wurde eine neue **Methode zur kombinierten Bewertung von Komponenten aus Design- und Fertigungssicht** entwickelt, vgl. Kapitel 3.4. Diese umfasst die Fertigungs- und die Designsicht. Erstmals sind dazu umfassende Daten zum Energiebedarf für verschiedenen Prozessschritte aufge-

zeichnet und analysiert worden, insbesondere auch für den SLM Prozess. Damit ist ein wichtiger Baustein erfüllt zur Bewertung von Prozesskettenalternativen. Es konnte demnach für den konkreten Untersuchungsfall ermittelt werden, dass aus ganzheitlicher Sicht eine neue Designvariante des Leitschaufelclusters mit Deckband durch Fertigung mittels SLM die Anforderungen optimal erfüllt. Die Bewertungsmethode kann dabei individuell auf die jeweiligen Randbedingungen der Unternehmen angepasst werden.

Abschließend sind die zentralen Entwicklungen und Ergebnisse im Rahmen der Prozesskette Leitschaufelcluster aufgezeigt:

- Signifikanter Beitrag zum Einsatz des SLM in der Serienfertigung durch Produktivitätssteigerung und Prozesskettenintegration
- Aerodynamische Optimierung strömungstechnischer Kennwerte des Leitschaufelclusters um bis zu 30 % unter Berücksichtigung der Potenziale alternativer Fertigungsstrategien (bspw. additiver Fertigung)
- Entwicklung einer neuen Bewertungsmethode zur ganzheitlichen Betrachtung von Design- und Fertigungssicht
- Erstmaliges Aufzeigen einer komplexen Prozesskette zur Fertigung von Strömungsbauteilen mittels SLM

2.2 Prozesskette zur Multi-BliR-Reparatur

Auf Grund der für Firmen immer komplexer werdenden Abläufe in Fertigung und Reparatur existiert ein großer Bedarf im Aufbau flexibler, auf Eingangsgrößen reagierender Prozessketten. Diese sollen während der Fertigung und Reparatur anpassungsfähig auf Störgrößen reagieren und Einzeltechnologien in Abhängigkeit von der Aufgabenstellung integrieren. Am Beispiel der Reparatur einer Multi-BliR ist im Rahmen von AdaM eine solche Prozesskette entwickelt und dargestellt worden (vgl. Abbildung 4). Eine Multi-BliR steht als mehrstufiger, integral verbauter Kompressor stellvertretend für geometrisch hochanspruchsvolle und während des Betriebes hoch beanspruchte Turbomaschinenkomponenten.



Abbildung 4: Darstellung der Prozesskette und der Abfolge der Prozessschritte zur Reparatur einer Multi-BliR.

Da während des Betriebes einer Multi-BliR betriebsbedingt große thermische und mechanische Belastung auf das Bauteil wirken, ist im Reparaturfall in der Regel die vorliegende Ist-Geometrie jeder Schaufel – sowohl in Lage als auch in Geometrie – signifikant von der ursprünglichen CAD-Geometrie verschieden. Daher ist für die Reparatur einer Multi-BliR eine individuelle Betrachtung jedes Bauteils und teilweise sogar jeder Schaufel zwingend erforderlich. Abgeleitet daraus sind je nach Reparaturfall – zum Beispiel an Schaufelspitzen, an Ein- bzw. Austrittskanten oder an Schaufelecken – unterschiedliche Fräs- und Schweißprozesse selbst für eine Schaufelgeometrie bezüglich Strategie und Prozessführung erforderlich.

Durch die Verknüpfung der Technologiecluster und Einzeltechnologien der Cluster CAx, Machining und Laser ist eine Reparaturprozesskette für Multi-BliR realisiert worden. Die spezifischen Beiträge je Technologiecluster sind im Folgenden skizziert und in Kapitel 3 im Detail dargestellt.

CAx: Geometrierfassung und Werkzeugbahnplanung

Da die Ist-Geometrie von der ursprünglichen CAD-Geometrie abweicht, ist ein Reverse Engineering je Schaufel erforderlich. Die Grundlage hierfür und für alle weiteren Fräs- wie auch Laseroperationen ist eine konsistente und durchgängige Datenbasis. Hierzu sind am Beispiel eines Multi-BliR Segmentes mehrere

Schadensfälle mittels Streifenlichtprojektion und optischem Kohärenzradar (OCR) vor und nach dem Laserauftragschweißen gemessen und digitalisiert worden. Basierend auf diesen Daten ist mit Hilfe des Inputs der Einzeltechnologien Fräsen und Laserauftragschweißen je Reparaturfall eine Werkzeugbahnprogrammierung für alle Prozesskettenschritte durchgeführt und im CAX-Framework systematisch hinterlegt worden, so dass diese anwendungsspezifisch verfügbar sind. Zur Planung der Werkzeugbahn beim Fräsen wird das ursprüngliche CAD-Modell an die Ist-Geometrie der Schaufel (repräsentiert durch die Messdaten) angepasst. Gegenüber der Nutzung von Messdaten als Basis für die Programmierung wird die Fehleranfälligkeit reduziert und die Bahnqualität optimiert.

Machining: Bauteilvorbereitung und Nachbereitung mittels Fräsen

Die Einzeltechnologie Fräsen ist in der Prozesskette wie die Messtechnik zweimal vertreten: zur Vorbereitung zum Laserauftragschweißen sowie zur Rekonturierung der Schaufeln nach dem Schweißprozess. Der Fräsprozess muss den langauskragenden, nachgiebigen Kompressorschaukeln und der wechselnden Geometrie sowie nach dem Laserauftragschweißen der lokalen Aufmaßsituation flexibel angepasst werden. Aufgrund der lokalen Bearbeitung vornehmlich im Bereich der Schaufelspitzen werden die Schaufeln zu Schwingungen angeregt, welche zu Oberflächenschäden führen können. Daher ist ein flexibles Spannsystem entwickelt worden, welches automatisiert in verschiedenen Höhen auf die Schaufeln appliziert werden kann. Mittels dieses Spannsystems werden einzelne Kompressorschaukeln gegeneinander verspannt, Schwingungen gedämpft und somit größere Oberflächengüten erzielt.

Laser

Je nach Reparaturanwendung ist die aufzuschweißende Geometrie sehr unterschiedlich. Daher sind in Abhängigkeit der Geometrie Bearbeitungsstrategie und Prozessparameter anzupassen. Da diese Anpassungen in der Regel experimentell erfolgen und einen großen Aufwand darstellen, ist hierzu im Rahmen von AdaM ein Technologieprozessor (vgl. AP5.1) entwickelt worden, welcher in Abhängigkeit der vorliegenden Bauteilgeometrie und Werkstoffkombination – das heißt Substratwerkstoff und Zusatzwerkstoff – Vorschläge zur Bearbeitungsstrategie und Prozessparameter zur Verfügung stellt. Am Beispiel von zwei Schaufelgeometrien und Schadensfällen werden in Absprache mit dem Technologiecluster Machining bauteilspezifisches Aufmaß und eine Werkstoffkombination festgelegt. Die erarbeitete Bearbeitungsstrategien und Prozessparameter werden durch Prozessdiagramme dargestellt und dem Technologiecluster CAX zur Verfügung gestellt.

3 Beschreibung der durchgeführten vorwettbewerblichen Arbeiten

Eine den Subclustern zugeordnete Übersicht technologiespezifischer Ergebnisse kann dem Anhang (vgl. Kapitel 10) entnommen werden.

3.1 Technologiecluster CAx-Technologies

Das Technologiecluster »CAx-Technologies« teilt sich in drei Subcluster auf, die wiederum weitere untergeordnete Themenfelder umfassen. Der Subcluster »Production Data Model« beschäftigt sich mit der Verwaltung und Ermittlung produktindividueller Daten, die entlang des gesamten Produktlebenszyklus anfallen und in Technologiedatenbanken abgelegt werden. Der Subcluster »Model-based Process Engineering« bildet das Laufzeitmodell des CAx-Systems ab. Er baut auf dem »Production Data Model« auf und behandelt die Konzeption eines intelligenten grafischen Softwaremodells, das eine umfassende benutzerfreundliche Planung sowie Verifizierung von CAx-Prozessketten ermöglicht. Der Subcluster »Data Acquisition and Handling« bezieht sich auf die Erfassung verschiedener Messdaten mit spezialisierter Sensorik sowie auf deren individueller Auswertung und effizienter Nutzung mit dem Ziel einer adaptiven Prozessauslegung.

3.1.1 Subcluster »Production Data Model«

AP1.1: Design Metamodel

Ein Design-Metamodell eröffnet die Möglichkeit, für verschiedene Produktvarianten oder eine bauteilindividuelle Bearbeitung eine Datenbasis bereitzustellen, die eine automatisierte Neukonfiguration von Prozessketten ermöglicht. In aktuell verwendeten Produktionsabläufen werden in der Regel jedoch solche modellbasierten Ansätze nicht verwendet. Vielmehr wird für jede zu fertigende Produktvariante eine manuelle Neukonfiguration durchgeführt und diese in die Produktionssteuerung eingepflegt. Damit wird eine automatisierte Durchführung von Prozesskettenabläufen erschwert.

Im Rahmen des AP1.1 »Design Metamodel« wurde eine Methodik zur Kategorisierung und Wiederverwendung von wiederkehrenden adaptiven Fertigungsaufgaben entwickelt. Dazu wurde eine Vorgehensweise zur Integration von Technologieinformationen, die für eine CAx-basierte Planung von adaptiven Fertigungsprozessen erforderlich sind, in ein 3D-CAD-Modell mittels eines Design Metamodels erstellt. Eine Möglichkeit zur Veranschaulichung und Integration des Design Metamodels in ein 3D-CAD-Modell ist der Feature-basierte Ansatz. Dieser ist bereits etabliert im Bereich der CAD-Konstruktion und der konventionellen Fertigung. Allerdings war es innerhalb von AdaM notwendig, den Feature-basierten Ansatz für die adaptive Fertigung zu erweitern. Vorteile, die sich hierdurch ergeben, sind zum einen eine standardisierte CAx-basierte Planung von adaptiven Fertigungsprozessen, wodurch eine Reproduzierbarkeit der Bearbeitungsergebnisse gewährleistet wird und zum anderen eine Wiederverwendbarkeit von erfahrungsbasierten Wissen. Damit diese Vorteile entlang

des gesamten Produktlebenszyklus genutzt werden können, ist eine Schnittstelle zwischen den CAx-basierten Softwaresystemen und Datenbanken erforderlich, die eine konsistente Handhabung des Design Metamodels erlaubt. Als Lösungsansatz wurde ein Framework gewählt, welches als Schnittstelle dient, um Unabhängigkeit von den Datenformaten der kommerziell vertriebenen CAx-Software- und Datenbanksystemen zu gelangen. Ausgehend von dem CAx-Framework werden die einzelnen CAx-Softwaresysteme, bspw. für die Prozesse Fräsen und Laserauftragsschweißen, zu einer durchgängigen CAx-Prozesskette verknüpft sowie die relevanten Fertigungsinformationen mit Hilfe des Design Metamodel den einzelnen Prozessschritten bereitgestellt und gesichert.

Die Umsetzung wurde mit einer adaptiven Reparatur-Prozesskette für eine Multi-Blir an drei unterschiedlichen Reparaturfällen demonstriert. Zu diesem Zweck wurde zunächst das Design Metamodel mit den erforderlichen Fertigungsinformationen wie bspw. Reparatur-Features für die definierten Schadensfälle erweitert. Die hinterlegten Algorithmen wurden von »Funktionsbausteinen« für die Berechnung geeigneter Werkzeugbahnen für Fräs- und Laserauftragsschweißprozesse verwendet. Damit können z.B. Tip-Flächen einer Turbinenschaufel erkannt, der schadhafte Bereich bestimmt und Hilfsgeometrien zur Werkzeugwegberechnung erzeugt werden. Im Rahmen der Validierung auf Basis des CAx-Frameworks wurde erfolgreich gezeigt, dass die für den jeweiligen Prozessschritt erforderlichen Fertigungsinformationen vollständig entnommen wurden und somit eine nach technologischen Aspekten geeignete Werkzeugbahn berechnet werden konnte.

AP1.2: Virtual Machining Model

Die virtuelle Darstellung des Bearbeitungsvorganges erlaubt eine Prüfung und Optimierung der Einstellungen, bevor die reale Bearbeitung auf der Fertigungsmaschine stattfindet und damit kostbare Maschinenzeit belegt. Bei Prozessen, bei denen die Anstellung des Werkzeugs konstant ist, sind Lösungen dafür einfach analytisch erreichbar. Im Anwendungsfeld des Turbomaschinenbaus werden jedoch in der Regel freigeformte Flächen wie Flügelprofile von Turbinenschaufeln bearbeitet. Hier ist bei einer variablen Aufmaßsituation eine Bestimmung der Eingriffssituation des Werkzeugs nicht mehr analytisch möglich.

Im Rahmen des Innovationsclusters AdaM wurde eine Simulationsumgebung weiterentwickelt, die die virtuelle Berechnung der Eingriffsbedingungen eines Fräswerkzeugs während der 5-Achs-Bearbeitung erlaubt. Darauf aufbauend kann die Belastung des Werkzeugs abgeschätzt werden. In Abbildung 5 ist die Benutzerschnittstelle der entwickelten Anwendung zu sehen. Die Berechnung der Eingriffswinkel und Schnitttiefen für komplexe 5-Achs-Prozesse ist möglich.

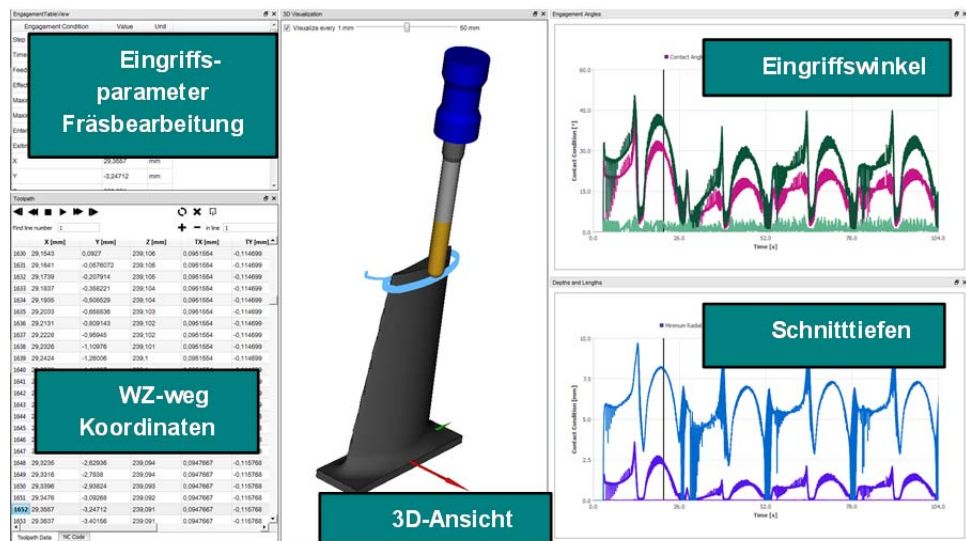


Abbildung 5: Bildschirmfoto der Makrosimulation zur Bestimmung von Werkzeugeingriffsbedingungen während Fräsoperationen

Variable Aufmaßsituationen werden durch die Eingabe von entsprechenden STL-Daten der Oberflächengeometrie berücksichtigt. In der Zusammenarbeit mit den Industriepartnern im AdaM-Cluster konnten mit Hilfe dieses Tools wertvolle Prozessinformationen (überhöhte Eingriffstiefe oder zu große Umschlingungswinkel) ermittelt werden, die als Grundlage zur Optimierung der Fräsoperation dienen.

AP1.3: Production Technology Information

Für die wirtschaftliche Fertigung von neuen Bauteilgeometrien und neuartigen Werkstoffen sind zuverlässige Prozessdaten wichtig. Bei der Einführung eines neuen Prozesses werden Versuchsreihen durchgeführt, die diese Prozessdaten erzeugen. Eine schnelle und nahe Anbindung dieser Daten an die spätere Produktion war vor Start des AdaM-Clusters nicht gegeben, da die Daten nicht zentralisiert und übersichtlich abliegen. Daher wurden innerhalb des Projekts Arbeiten zur Herstellung dieser Verbindung durchgeführt.

Der Zustand vor AdaM war, dass die Produktionsdaten, die für die Fräs- und Laserbearbeitung für die adaptive Prozesskette notwendig sind und bei Vorversuchen und Messreihen erzeugt werden, bisher individuell gespeichert werden. Das Format und der Umfang der jeweiligen Dokumentation sind nicht bekannt und so ist eine nachträgliche Suche und Auswertung über viele Datensätze schwierig. Im AdaM-Innovationscluster wurde ein XML-Datenformat entwickelt, in dem alle relevanten Daten für die Bearbeitung von Komponenten aus dem Turbomaschinenbau enthalten sind. Die Struktur der zugehörigen Datenbank ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

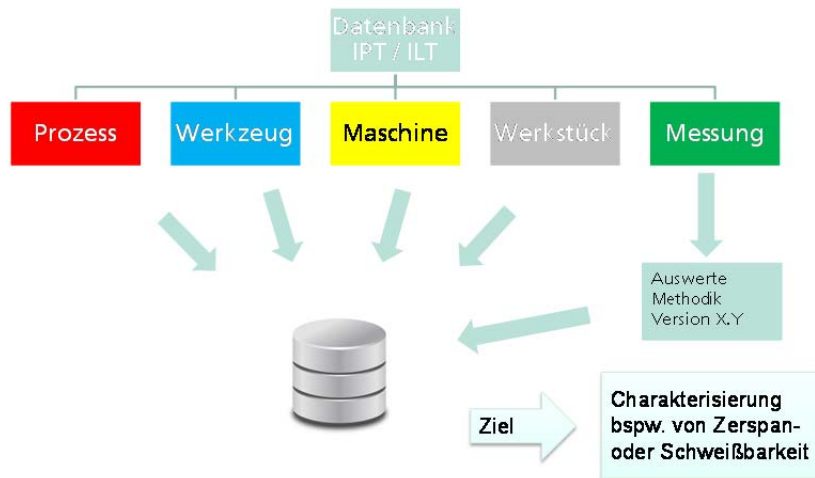


Abbildung 6: Datenstruktur der Technologiendatenbank

Es wurde Wert gelegt auf eine enge Anbindung an vorhandene DIN-Normen (z.B. DIN6580), um eine Zweideutigkeit zu vermeiden. Diese XML-Struktur wurde in der Aufzeichnung von Prozesskraftdaten an einem Grundlagenprüfstand des Fraunhofer IPT implementiert. Das verwendete System basiert auf einer National Instruments Infrastruktur, zusammen mit SQL-basierter Datenbanktechnologie. Damit ist ein Transfer in industrielle Einsatzgebiete möglich.

Zusammengefasst sind wesentlichen Ergebnisse im Subcluster »Production Data Model«:

- „Design Metamodel“: Vorgehensweise zur Integration von Technologieinformationen in ein 3D-CAD-Modell
- Konstruktion von Reparatur-Features unter Verwendung von Siemens NX zur Konstruktion von parametrisierten Hilfsgeometrien
- Weiterentwicklung der Software „SimCutPro“ zur virtuellen Berechnung der Eingriffsbedingungen bei komplexen 5-Achs-Prozessen
- XML-Datenaustauschformat, welches die Speicherung der Prozess-, Maschinen-, Bauteil- und Organisationsdaten ermöglicht.

3.1.2 Subcluster »Model-Based Process Engineering«

AP2.1: Flexible Programming of Adaptive CAx Process Chains

Innerhalb des Subclusters wurden in diesem Arbeitspaket anhand der Anforderungsspezifikation Methoden zur Programmierung von adaptiven Fertigungsprozessketten erarbeitet. Aufgrund ihrer Komplexität konnten adaptive Fertigungsprozessketten mit herkömmlichen CAD/CAM Systemen nicht ohne manuelle Eingriffe programmiert werden. Dabei ist Adaptivität als geometrische Adaptivität oder als Adaption an Bauteilvarianten zu verstehen. Ein Grund hierfür war die heterogene Systemlandschaft in der Industrie und das notwendige

Zusammenspiel verschiedener Systeme für eine adaptive Fertigung. Im einfachsten Fall müssen Bearbeitungsprozesse nur auf Messdaten angepasst ablaufen. In realen Reparaturprozessketten müssen dagegen je nach Schadensfall des einzelnen Bauteils alternative Prozessabfolgen durchgeführt werden.

Zur Lösung der Problematik wurden während der Laufzeit des Projekts die Grundlagen für den Ansatz des »Model-based Process Engineering« geschaffen. Dabei wurde der »Funktionsbaustein Ansatz« (basierend auf Standard (IEC 61499)) als Ausgangsbasis für die spezielle Modellierung gewählt und um mehrere Aspekte erweitert, die im Folgenden erläutert werden. Das Prozesswissen kann über die adaptive Fertigungsprozesskette zentral erfasst werden und es lassen sich verschiedene Softwaresysteme zu einer adaptiven Fertigungsprozesskette zusammenschalten und programmieren (siehe Abbildung 7).

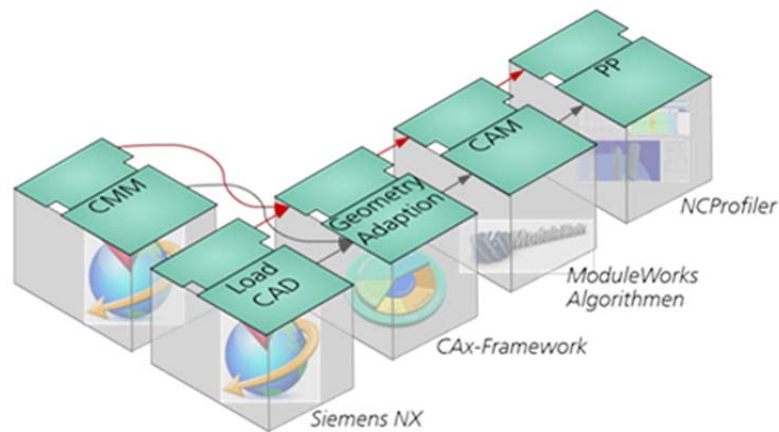


Abbildung 7: Beispiel einer adaptiven Fertigungsprozesskette mit Funktionsbausteinen und unterschiedlichen Softwaresystemen

Außerdem wird der Anwender durch den neuen Ansatz in die Lage versetzt, die Komplexität handhaben, alternative Abläufe planen, stetige Optimierung durchführen und auf neue Anforderung (z.B. eine neue Schadensklasse am Bauteil) reagieren zu können. Die industrielle Umsetzung kann in verschiedenen Branchen auf den bereits vorhandenen Systemen durchgeführt werden.

Die oben genannten Aspekte, um die der Funktionsbausteinansatz in AdaM erweitert wurde, beinhalten zum einen »Generic Process Blocks for Manufacturing« (GPBM) (siehe Abbildung 8). Diese unterstützen den Anwender darin, Weiterentwicklungen der adaptiven Fertigungsprozessketten zu beherrschen [Spoc14]. Über das bereits im Projekt »TurPro« weiterentwickelte CAx-Framework lässt sich der GPBM-Ansatz auch in existierende CAD/CAM-Systeme integrieren und somit wird die Programmierung von adaptiven Prozessketten auch im Industrieumfeld mit den genannten Vorteilen ermöglicht.

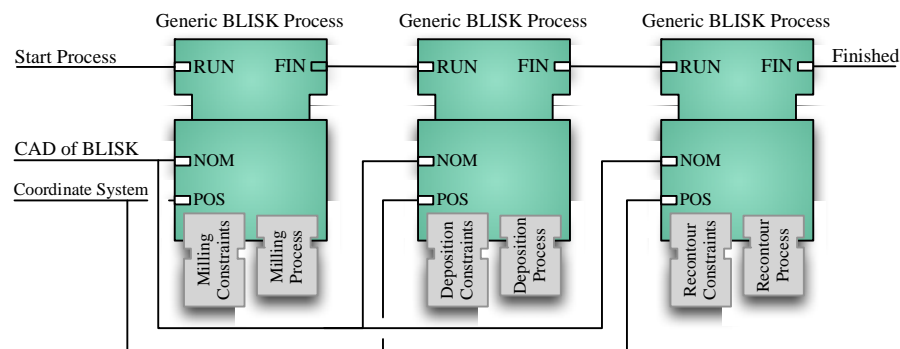


Abbildung 8: Beispiel-Reparaturprozesskette einer BLISK mittels GPBM

Gerade in der adaptiven Fertigung ist eine durchgängige Darstellung der Produktionsdaten essenziell für eine wirtschaftliche Prozessvorbereitung. Die Zugänglichkeit zu Technologiedatenbanken und PDM-Systemen wird in der modernen Fertigung immer wichtiger (»Industrie 4.0«). Zur Ermöglichung dieser Anforderungen wurde weiterhin der Funktionsbausteinansatz um »Daten-Manifeste« erweitert [Kloc15]. Diese helfen, Datenverluste an Schnittstellen zwischen verschiedenen CAx Systemen bei adaptiven Fertigungsprozessketten zu vermindern. Hierfür werden die verfügbaren Datenformate an System-schnittstellen explizit spezifiziert. Dies ermöglicht es, den Datenaustausch über optimale Austauschformate automatisch durchzuführen. Zusätzlich kann mittels der Daten-Manifeste sichergestellt werden, dass erforderliche Informationen zwischen den verschiedenen Systemen übertragen werden können.

Des Weiteren wurden Repair Features definiert, die in Kombination mit Funktionsbausteinen eine Programmierung von Reparaturprozessketten ermöglichen und sich somit dynamisch an den Schadensfall anpassen können [Spoc15].

AP 2.2: Standardisierte CAx Evaluation and Migration Method

Im Rahmen des AdaM-Innovationscluster wurde eine Bewertungsmethodik für die standardisierte Bewertung von CAx-Prozessketten entwickelt [Schu15]. Diese Bewertung wurde in der Vergangenheit oft individuell und subjektiv durchgeführt. Die Folge waren heterogene Softwareumgebungen und Datenverluste bei der Übertragung von Prozess bzw. Bauteildaten von einem Prozessmodul zum nächsten. Die hier entwickelte Methodik erlaubt die objektive Bewertung der einzelnen CAx-Komponenten und Software-Module. Die Verkettung der einzelnen Module stellt die gesamte Prozesskette dar. Die hinterlegte Auswertung summiert die Bewertungen der jeweiligen CAx-Module für die möglichen Prozesspfade und ist so in der Lage, die günstigste Prozesskette zu bestimmen. Der Benutzer kann die Priorisierung der Optimierungsziele Zeit, Kosten, Bauteilqualität oder Ressourceneffizienz wählen. Zur Unterstützung dieser Bewertung steht eine Software bereit, Abbildung 9. Im Rahmen des AdaM-Innovationsclusters ist dieses Tool in Industrieprojekten innerhalb Adams zur Prozesskettenbewertung eingesetzt worden.



Abbildung 9: Software-Tool zur Bewertung von CAX-Prozessketten

Zusammengefasst sind wesentlichen Ergebnisse im Subcluster »Model-Based Process Engineering«:

- Entwicklung der Software CAX-PK-Designer für die standardisierte Bewertung von CAX-Prozessketten
- Erweiterung der Methode »Funktionsbaustein Ansatz« zur Verknüpfung verschiedener Softwaresysteme zu einer adaptiven Fertigungsprozesskette

3.1.3 Subcluster »Data Acquisition and Handling«

AP3.1: Metrology Systems

Der Schwerpunkt des Subclusters Metrology Systems lag auf der Entwicklung eines neuen Sensors zur Erfassung von geometrischen Merkmalen auf Basis der optischen Kohärenztomographie. Die Möglichkeiten des optischen Kohärenzsensors (OCR), insbesondere die Erfassung von kleinen Geometrien mit hohen Aspektverhältnissen, wurden anhand der Messung von Orientierungen einzelner Kühlbohrungen einer Gasturbinenschaufel demonstriert, vgl. Abbildung 10. Hierfür wurde ein OCR System welches speziell auf die Messung von Oberflächen ausgelegt worden ist aufgebaut. Das System besteht aus einem Messkopf der zur Erweiterung des Messbereiches mit zwei galvanischen Spiegeln ausgestattet wurde sowie eine Auswerteeinheit mit einem speziell für die Oberflächenscans optimierten Reflektometer. Des Weiteren wurden alle Lichtleiter-, und Kabelverbindungen auf die Handhabung des Sensorkopfes optimiert. Durch die Entwicklung des OCR Sensors wurde erstmalig eine Messung von kleinen geometrischen Features wie Kühlbohrungen möglich, welche mit herkömmlichen Lichtschnittsensoren nicht realisiert werden kann.

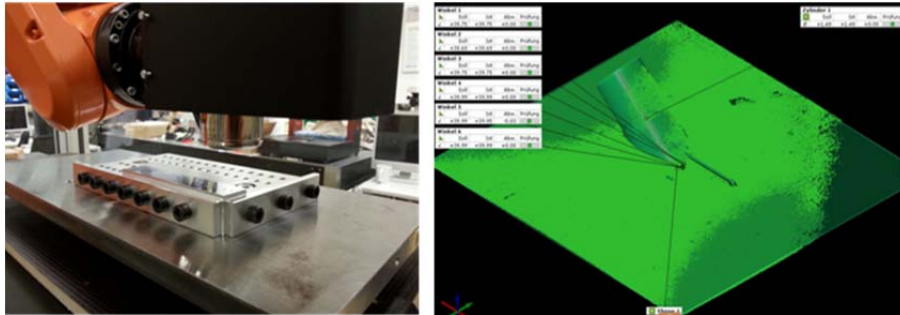


Abbildung 10: Anwendung des OCR-Sensors zur Messung von Kühlbohrungsorientierung und Auswertung

Im weiteren Projektverlauf wurde aufgrund der starken Abhängigkeit zwischen Sensorpositionierung zur Oberfläche und Messergebnis eine roboterbasierte Lösung aufgebaut. Hierfür ist ein neuer Sensorkopf gebaut und in einem Gehäuse untergebracht worden, das eine Anbindung an einen Sechsarml-Knick-Roboter ermöglichte. Des Weiteren konnte die Eindringtiefe des Sensors durch eine Anpassung der Optik von 2,53 mm auf 3,5 mm erhöht werden. Die Erweiterung der Eindringtiefe erlaubte eine Steigerung der Reproduzierbarkeit um 15 %, da die Bohrung hierdurch entlang der gesamten Materialstärke der Turbinenschaufelwand gemessen werden konnte.

Für die Validierung des Sensors wurde ein definierter Probekörper mit Bohrungen unter verschiedenen definierten Winkeln gefertigt. Anschließend wurden verschiedene Winkelstellungen des Sensors gegenüber der Bohrungsachse analysiert und ein Parameterfenster für die Sensorpositionierung definiert. Die Messtechnik kam an weiteren Probekörpern zum Einsatz, um die Verifikation dieser anhand von Testmessungen abzusichern. Das im Projekt entwickelte OCR kann die Orientierung von Kühlbohrungen reproduzierbar mit einer maximalen Abweichung von 1° messen.

AP3.2: Data Acquisition

Die Akquise der Messdaten vom OCR wurde im Projekt um eine Auswertesoftware erweitert. Da es sich bei OCR um ein tomographisches Messsystem handelt, welches bei semi-transparenten Materialien ein Messvolumen von 8mm x 8mm x 3,5mm abdeckt, ist eine Software programmiert worden, die aus den Messdaten die erste Reflektion extrahiert. Diese entspricht bei nicht transparenten Materialien, wie sie im Turbomaschinenbau vorzufinden sind, der Oberfläche. Die Messdaten lagen ursprünglich als tomographische Schnitte des Messvolumens vor und wurden, mittels einer speziell dafür entwickelten Software, in eine Tabelle konvertiert. Der Unterschied wird durch Abbildung 11 verdeutlicht. Diese Tabelle beinhaltet die Oberflächenpunkte und wird in eine Punktwolke umgewandelt. Anschließend ist die Sensordatenfusion der Messwerte des OCR mit den Werten aus einer Messung mittels Streifenlichtprojektion durchgeführt worden, was Voraussetzung für die Verwendung durch die Projektpartner ist.

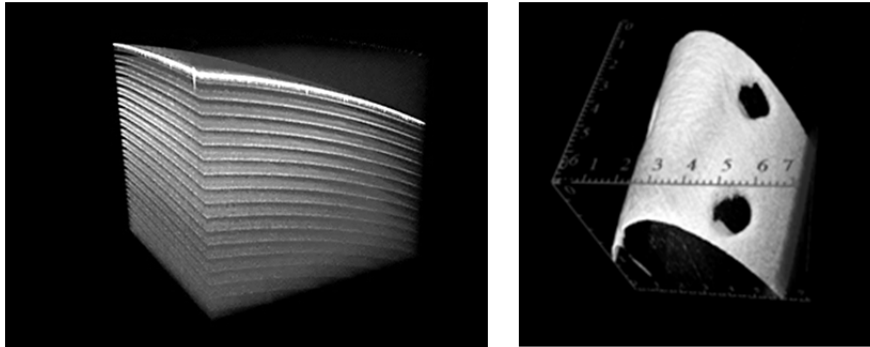


Abbildung 11: Links: Tomografische Messung mit einem OCR-Sensor. Rechts: Oberflächenmessdaten zu einer Turbinenschaufel.

Die Auswertung der durch das OCT gewonnenen Messdaten wurde auf zwei verschiedene Messstrategien ausgeweitet. Bei mechanisch hergestellten Bohrungen wurde für die Evaluierung der Messdaten ein Zylinder verwendet. Dieser gibt anhand der Messdaten die Orientierung der Bohrung wieder. Bei den gelasteten Bohrungen wurde aufgrund der Bohrungsaufweitung am Bohrungseinlauf ein Kegel als geometrische Hilfsstruktur verwendet.

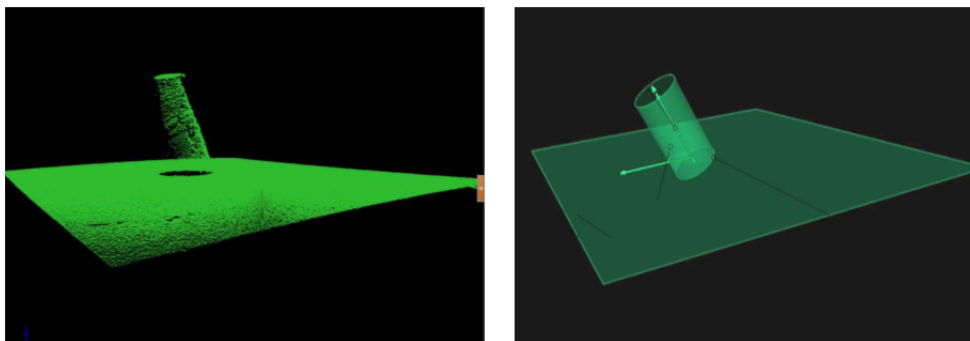


Abbildung 12: Links: Punktwolke einer Bohrungsgeometrie. Rechts: Auswertung der Bohrungsorientierung

Hiermit wurde die Möglichkeit geschaffen, mit der verwendeten Vergleichsgeometrie auf die Eigenschaften des Fertigungsprozesses einzugehen. Im Rahmen eines bilateralen Projektes findet eine weitere Optimierung statt.

Neben bilateralen Aktivitäten wird der Demonstrator für weitere Systemtests genutzt. Hierbei liegt der Fokus insbesondere in der Bereitstellung von Messdaten, die zur vollständigen Planung der einzelnen Prozessmodule in den CAX-Tools vorhanden sein müssen. Die Planung kann durch die Fusion von herkömmlichen Daten und den Messdaten der neu entwickelten Messtechnik erfolgen.

AP3.3: Data Handling

Das Data Handling in Bezug auf die Messdaten stellt sich als relativ einfach heraus. Es werden für die Berechnung der Werkzeugwege ausschließlich geometrische Daten erfasst und transportiert, so dass die Daten x,y,z-Koordinaten mit einer ausreichenden Genauigkeit transportieren müssen. Die erfassten Daten

werden entweder als Punktwolken oder aber als STL Daten in das CAx-Framework eingelesen. Im ersten Fall wird ein ASCII-Format verwendet, welches die x,y und z-Werte mit mindestens 6 signifikanten Stellen überträgt, was für die verwendeten Genauigkeiten ausreichend ist. Die Übertragung von STL-Daten kann binär oder als Textdatei geschehen. Beide Datenformate können weiterverarbeitet werden.

Nachdem alle Arbeiten erfolgreich abgeschlossen wurden konnte die vorhandene Messtechnik zur Qualitätssicherung von Turbomaschinenkomponenten um einen Sensor für kleine geometrische Feature erweitert werden. Hierdurch wird eine Erweiterung der automatisierten Reparaturkette um den Aspekt des Öffnens von Kühlbohrungen in Turbinenschaufeln erweitert. Durch die Messung der Kühlbohrungsorientierung wurde eine Möglichkeit geschaffen, verschlossenen Kühlbohrungen auch bei einem Verzug der Turbinenschaufel mittels eines Laserbohrprozesses neu zu öffnen.

Zusammengefasst sind wesentlichen Ergebnisse im Subcluster »Data Acquisition and Handling«:

- Anwendung eines OCR-Sensors auf Turbinenschaufeln zur Erfassung von geometrischen Merkmalen auf Basis der optischen Kohärenztomographie
- Anbindung des OCR-Sensors an einen Knickarm-Roboter mittels neuem Gehäuse zur Sensorpositionierung
- Entwicklung einer Software zur Extraktion der Reflektion aus den Messdaten einer OCR-Messung
- Entwicklung einer OCR-Messmethode auf Basis des Teach-in eines Roboters für das Reopening von Kühlbohrungen

3.2 Technologiecluster Laser

Ein übergeordnetes Ziel dieses Technologieclusters lag darin, die Adaptivität von Einzeltechnologien wie SLM und Laserauftragschweißen (LA) bezüglich verwendeter Werkstoffe, erzielbarer Geometriefeatures und Prozessführung zu verbessern. Das Subcluster »Laser Cladding« ist bei diesen Entwicklungen durch das Subcluster »Process Control« bezüglich Untersuchungen zur Charakterisierung und Prozessüberwachung während des LA unterstützt worden. Des Weiteren werden erstmals grundlegende Untersuchungen zum Kurzpuls-Laserabtrag im Subcluster »Laser Ablation« durchgeführt.

3.2.1 Subcluster »SLM«

Die Entwicklung von Methoden zur werkstoff-, geometrie- und funktionsabhängigen Adaption von Bearbeitungsstrategien und Verfahrensparametern stand im Rahmen für das Subcluster SLM im Vordergrund. Bezogen auf die praktische Umsetzung in diesem Subcluster sollte das Ziel durch die Betrachtung der kompletten Fertigungskette, vom Bauteildesign über Adaption von

Bearbeitungsstrategien und Verfahrensparametern bis zur Ermittlung von mechanischen Kennwerten und der Nachbearbeitung erreicht werden.

AP4.1: Adaptives Bauteildesign

In diesem Arbeitspunkt steht die Kooperation zwischen dem Technologiecluster Design und dem Subcluster SLM im Vordergrund. Dabei wird der Arbeitspunkt AP4.1 bezogen auf das Subcluster SLM in drei weitere Punkte untergliedert:

1. Das Technologiecluster Design ist über die allgemeinen Grenzen des SLM Verfahrens sowie über Zusammenhänge von Geometrie und korrelierender Bauteilqualität informiert worden.
2. Analyse, Bewertung und Fertigung verschiedener Designvarianten des ausgewählten Demonstrators „Leitschaufeln einer Gasturbine“
3. Eine Kostenanalyse für die generative Bauteilfertigung eines Leitschaufelclusters durchgeführt und die technologiespezifischen Kostenanteile aufgezeigt worden

Zu 1)

Gemäß Antrag ist das Technologiecluster Design anhand des in AdaM eingesetzten Werkstoffes Inconel IN718 über die charakteristischen Merkmale des SLMs informiert worden. Im Fokus stand dabei die Auskunft über geometrische Spezifikationen wie erreichbare minimale Wandstärke, Oberflächenrauheit und erzielbare Maßhaltigkeit, sowie Prozessspezifikationen wie erreichbare theoretische Dichte bei gegebenen Verfahrensparametern und typische Prozesszeiten. Weiterhin begleitete das Subcluster SLM das Technologiecluster bei der Aufnahme der aktuellen Fertigungskette der Herstellung von Leitschaufeln einer Gasturbine beim Projektpartner MAN Diesel und Turbo SE vor Ort und unterstützte bei der Ermittlung von Fertigungs- und Designmessgrößen.

Zu 2)

In Abbildung 13 sind die im Innovationscluster AdaM betrachteten Designvarianten der Leitschaufeln einer Gasturbine dargestellt. Die Aufgabe für das Subcluster SLM bestand darin, die beiden Designvarianten des Leitschaufelclusters hinsichtlich der Fertigung mittels SLM auf technische Machbarkeit zu prüfen und mögliche kritische Bereiche zu analysieren und ggf. in enger Abstimmung mit dem Technologiecluster Design abzustimmen.

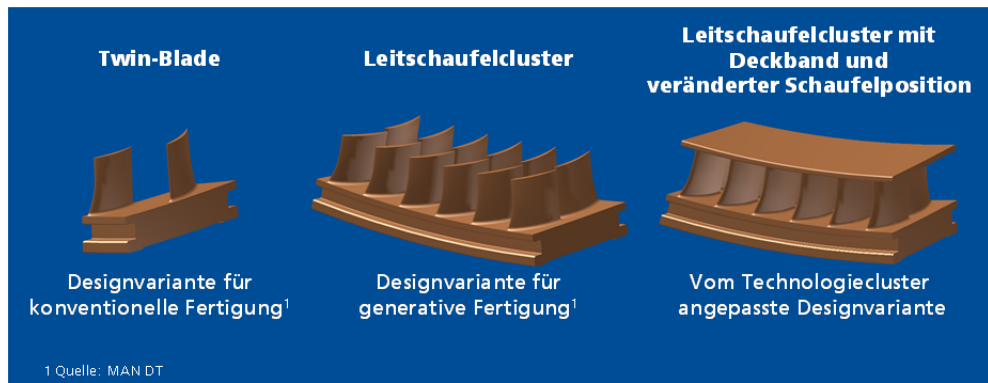


Abbildung 13: Darstellung der in AdaM betrachteten Designvarianten der Leitschaufeln einer Gasturbine.

Für das Leitschaufelcluster ohne Deckband wird der Schaufelfuß für den SLM-Prozess angepasst und mit einer festen Anbindung zur Substratplatte versehen (Abbildung 14a). Bzgl. der SLM-Fertigung der Leitschaufeln werden keine kritischen Bereiche erkannt. Für die Designvariante Leitschaufelcluster mit Deckband und veränderter Schaufelposition wird eine Änderung der Schaufelgeometrie bzw. -position als unkritisch erachtet. Durch die Designänderung „Deckband“ entstehend für den SLM-Prozess ungünstige Überhänge die zu minimieren oder abgestützt werden müssen. Durch eine Anpassung der Orientierung sowie Nutzung von Stützstrukturen konnte ein Leitschaufelcluster mit Deckband erfolgreich gefertigt werden (Abbildung 14b)).

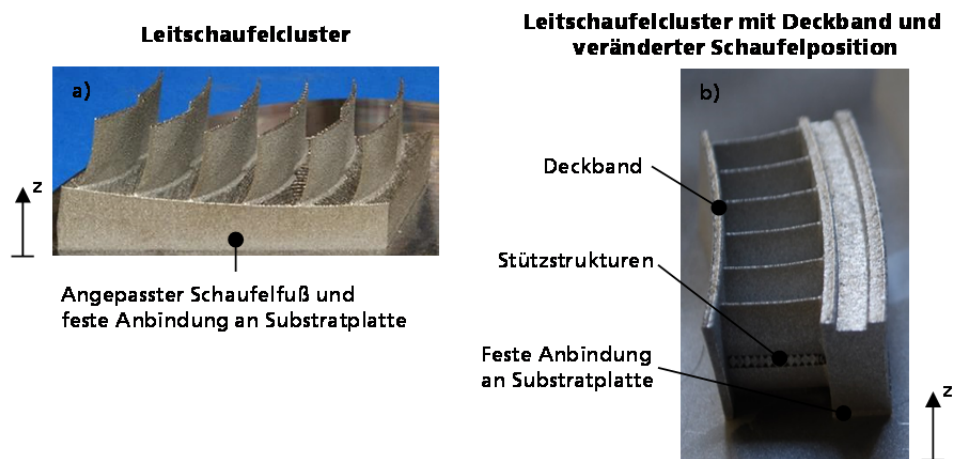


Abbildung 14: SLM-gefertigte Designvarianten des Leitschaufelclusters.

Zu 3)

Das Leitschaufelcluster ist mit verschiedenen SLM-Anlagen gefertigt und der Energie- und Materialverbrauch sowie die Fertigungszeit messtechnisch erfasst worden (Abbildung 15). Die Daten sind zur weiteren Verarbeitung an das Technologiecluster »Design« übermittelt worden.

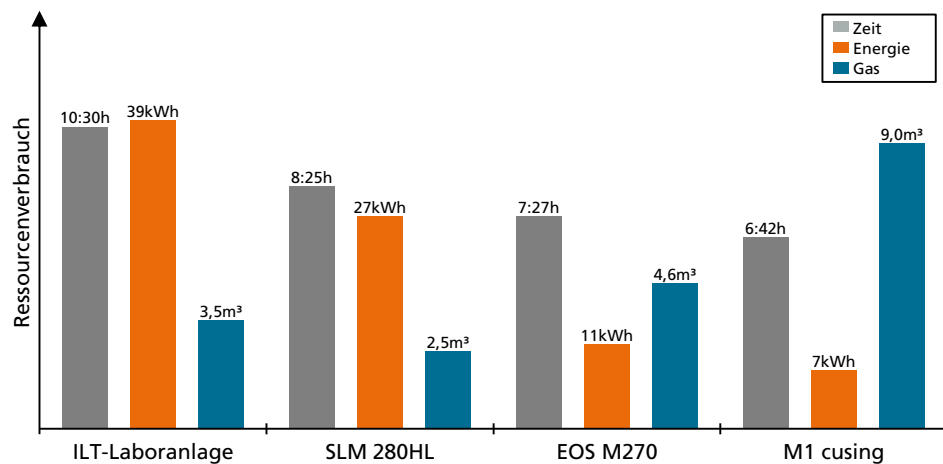


Abbildung 15: Balkendiagramm zur Darstellung der verbrauchten Ressourcen bei der Fertigung eines Leitschaufelclusters auf verschiedenen SLM-Anlagen

Durch die Bearbeitung der oben genannten Punkte sind möglichen Designvarianten des Leitschaufelclusters bezüglich der SLM-Fertigung hinsichtlich technologischer Grenzen, Designmöglichkeiten und dem Energie- und Ressourcenbedarf analysiert worden. Damit ist AP4.1 erfolgreich abgeschlossen worden.

AP4.2 Adaption der SLM-Prozessführung

Für eine Adaption der SLM-Prozessführung sind Verfahrensparameter am Werkstoff Inconel IN718 ermittelt worden. Auf der einen Seite sind Verfahrensparameter für einen „kleinen Strahl“ ($d_s = 200\mu\text{m}$) und kleine Schichtdicken bestimmt, die eine SLM-Fertigung mit großer Oberflächenqualität –d.h. Rauheit $R_a \leq 20\mu\text{m}$ – aber eine lange Prozesszeit bedingen erzielen. Auf der anderen Seite wurden Verfahrensparameter für einen „großen Strahl“ ($d_s = 1000\mu\text{m}$) und große Schichtdicken identifiziert, die eine SLM-Fertigung mit kurzer Prozesszeit ermöglichen, aber eine kleine Oberflächenqualität erzielen. Verfahrensparameter und Aufbaustrategien sind für beide Strahldurchmesser angepasst worden, so dass Bauteildichten $\rho \geq 99,5\%$ erzielt werden konnten. Des Weiteren sind für diese Strahldurchmesser die erzielbaren mechanischen Kennwerte ermittelt worden (vgl. AP4.4). In Abbildung 16 ist ein Auszug aus der durchgeführten Verfahrensparametervariation dargestellt. Sowohl für die Schichtdicke $D_s = 150\mu\text{m}$ als auch für die Schichtdicke $300\mu\text{m}$ und $450\mu\text{m}$ werden Probekörper mit einer Dichte von $\rho \geq 99,5\%$ gefertigt. Beispielhaft ist ein Querschleiff mit einer Dichte von $\rho \geq 99,5\%$ in Abbildung 16 dargestellt. Ein Maß für die Prozessgeschwindigkeit ist mit der theoretischen Aufbaurrate gegeben. Die theoretische Aufbaurrate ist das Produkt aus Scangeschwindigkeit, Schichtdicke und Spurabstand. Für die Verfahrensparameter, mit denen der dargestellte Querschleiff gefertigt wurde, ergibt sich eine theoretische Aufbaurrate von $11,25\text{mm}^3/\text{s}$.

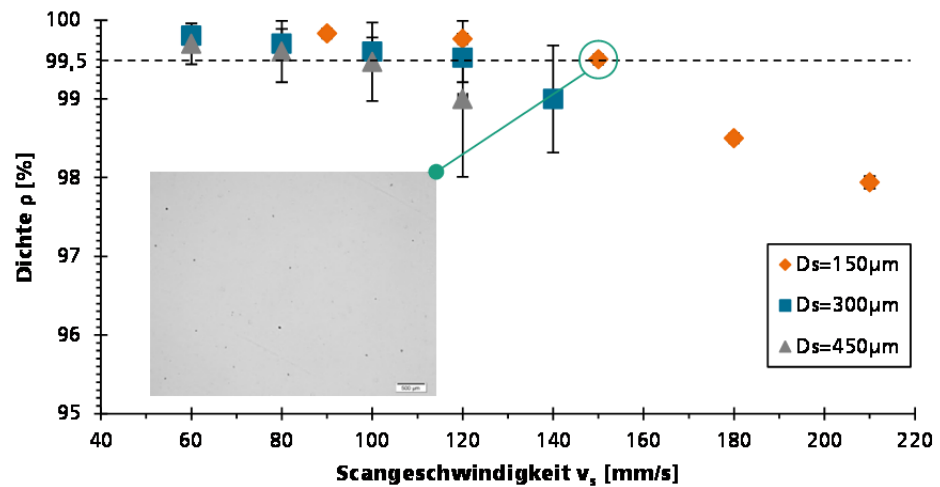


Abbildung 16: Darstellung der ermittelten Dichte ρ über der Scangeschwindigkeit bei verschiedenen Schichtdicken D_s – Sonstige Verfahrensparameter: $P_L=920\text{W}$, $d_s=1\text{mm}$, $\Delta y_s=500\mu\text{m}$

AP 4.3: Adaption Werkstoff

Die Zielsetzung in AP4.3 ist die Entwicklung einer Methodik zur vereinfachten Erweiterung des verarbeitbaren Werkstoffspektrums durch eine Adaption der Verfahrensparameter an charakteristische Werkstoffparameter (wie z.B. Schmelztemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Absorptionsgrad etc.). Zwei Arbeitspunkte wurden aus dieser Zielsetzung abgeleitet:

1. Erstellung einer Datensammlung, in der alle bereits mit SLM verarbeiteten Werkstoffe und die zugehörigen Verfahrensparameter innerhalb der SLM-Gruppe des ILT systematisch erfasst werden. Im Laufe des Projektes wird die Implementierung einer Datenbank gemeinsam mit LA durchgeführt (siehe Kapitel 3.2 AP 5.2). In AP 4.3 wurden die Datensammlungen für verschiedene Werkstoffe (IN718, Hastelloy X und Al-Si10Mg), die als Stützpunkte für die Simulation dienen, erarbeitet.
2. Erstellung eines physikalischen Modells, welches eine prädikative Aussage über SLM-Verfahrensparameter für einen bisher nicht untersuchten Werkstoff ermöglicht. Zur Verifizierung des Modells werden ausgewählte Stützpunkte aus der Datensammlung verwendet.

Adaption Werkstoff a)

Ein Konzept der werkstoffabhängigen Adaption wurde entwickelt und ist in der Abbildung 17 dargestellt.

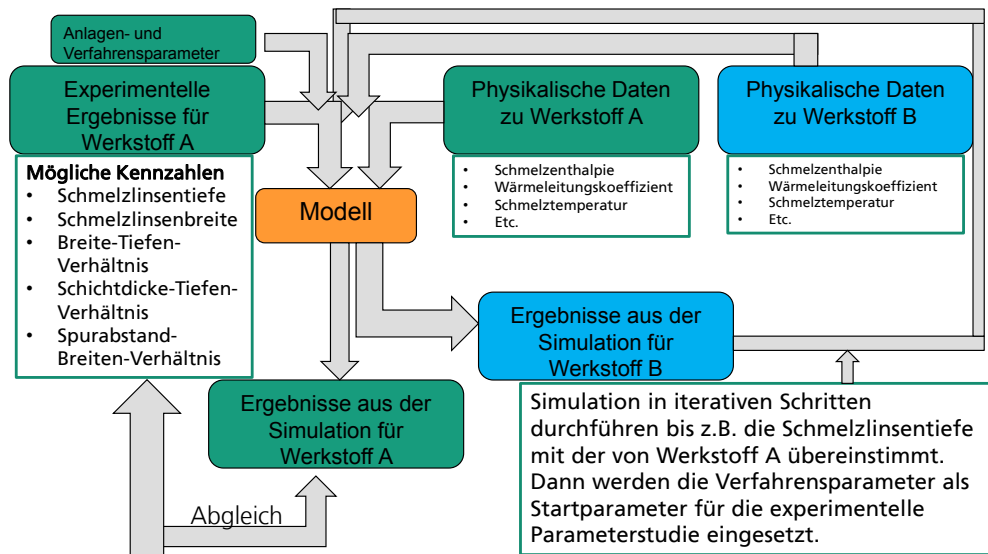


Abbildung 17: Konzept zur werkstoffabhängigen Adaption der Verfahrensparameter

Dabei ist der Werkstoff A ein bereits erfolgreich mit SLM verarbeiteter Werkstoff und Werkstoff B ein bisher noch nicht mit SLM verarbeiteter Werkstoff. Die Eingangsgrößen für das Modell sind die verwendeten r Verfahrensparameter (z.B. Laserleistung, Leistungsdichteverteilung, Schichtdicke, etc.) und die thermo-physikalischen Daten zum Werkstoff A. Mittels der Simulation werden Temperaturfelder des Schmelzprozesses berechnet. Daraus können die Schmelzisotheime berechnet und die Schmelzbadgeometrie in Breite und Tiefe abgeleitet werden. Die genaue Beschreibung des Konzepts befindet sich im vierten Zwischenbericht. Die Validierung des Modells erfolgte durch Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Schmelzlinientiefe und -breite für die Werkstoffe In718, Hastelloy X und AlSi10Mg für verschiedene Verfahrensparameter. Die experimentelle Bestimmung von Schmelzlinientiefe und -breite erfolgt durch Bildung des Mittelwerts aus der Vermessung von mindestens 25 Schmelzlinien am Querschliff der Proben. Dabei liegt die Standardabweichung, beispielhaft für den Werkstoff IN718, für die Schmelzlinienbreite im Bereich von 5-6% und für die Schmelzlinientiefe im Bereich von 9-19%.

Als mögliches Bewertungskriterium zur Identifikation geeigneter Verfahrensparameter über die Beschreibung der Schmelzliniengeometrie wurden die beiden Kennzahlen aus den Verhältnissen Schmelzlinientiefe zu Schichtdicke und Schmelzlinienbreite zu Spurabstand identifiziert. Es konnte z.B. für den Werkstoff IN718 gezeigt werden, dass für drei unterschiedliche kommerzielle SLM Anlagen (jeweils mit einer Laserleistung von <400W und gaußförmigem Intensitätsprofil) und unterschiedlichen Verfahrensparametern, mit denen jeweils eine Dichte der Proben von >99,8% erzielt wird, die Kennzahl aus dem Verhältnis von Schmelzlinientiefe zu Schichtdicke typischerweise im Bereich von 2,6-3,4 und die Kennzahl aus Schmelzlinienbreite zu Spurabstand im Bereich von 1,5-1,8 liegt.

Mit diesen Kennzahlen kann eine Bewertung der Ergebnisse aus der Simulation vorgenommen werden. Mit Hilfe der Datenbank (Kap. 3.2 AP5.2) können die Kennzahlen für bereits verarbeitete Werkstoffe abgelegt und für die Bewertung der Simulationsergebnisse herangezogen werden. In einem nächsten Entwicklungsschritt müssen die Kennzahlen für andere Werkstoffe ermittelt und diese Kennzahlen bezüglich ihrer Werkstoffabhängigkeit skaliert werden.

Adaption Werkstoff b)

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Erstellung eines Simulationstools, mit dem rechnerunterstützt der experimentelle Aufwand für die Übertragung von Prozessfenstern zwischen verschiedenen Werkstoffen reduziert werden kann. In der Literatur wird für die Simulation des SLM Prozesses standardmäßig das sogenannte Zweiphasenmodell (Abb. 10) verwendet. Darunter versteht man einen Kontinuumsansatz für die zwei Phasen Pulverpartikel und Werkstoff, bei dem die Partikel in ihrer Geometrie aber nicht diskret berücksichtigt werden. Der wesentliche Unterschied zwischen den zwei Phasen liegt in der Regel in der um zwei Größenordnungen kleineren Wärmeleitfähigkeit der Partikelschicht (vgl. Abbildung 18). Diese Wärmeleitfähigkeit ist werkstoffunabhängig, aber abhängig vom Prozessgas und Gasdruck; da der Wärmetransport in der Pulverschüttung im Wesentlichen durch Strahlung und Konvektion stattfindet. Beim Vergleich experimenteller Ergebnisse bzgl. der Spurgeometrie zeigt sich allerdings, dass die Schmelzbaddtiefe auf Basis des Zweiphasenmodells gemäß Literatur nur bis auf 60% reproduziert werden kann. Das ist zu ungenau, gerade wenn man beabsichtigt, diese Temperaturfeldberechnungen als Basis für Spannungsberechnungen zu nutzen, da dann der Einfluß auf den Spannungszustand der darunter liegenden Schichten erheblich unterschätzt wird.

2 Phasen Modell **Pulver**/Substrat

- **Wärmeleitungsgleichung**
- **Randbedingungen:**
 - Thermalisierung der optischen Energie
 - Vorwärmtemperatur T_u
- **Wärmeaustausch Umgebung:**
 - Strahlungsverlust
- **Wärmeleitung Pulver [ROM07]:**
 - $\lambda_{\text{Pulver}} = 0.3 \text{ W/mK}$ (konstant)

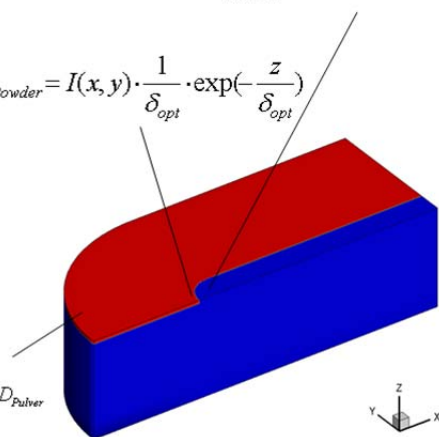
$$q_{\text{Melt}} = I(x, y) \cdot \delta(z)$$

$$q_{\text{radiation}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T + 273.15)^4$$

$$q_{\text{Powder}} = I(x, y) \cdot \frac{1}{\delta_{\text{opt}}} \cdot \exp\left(-\frac{z}{\delta_{\text{opt}}}\right)$$

$$D_{\text{Pulver, Simulation}} = \text{Schütttdicke} \cdot D_{\text{Pulver}}$$

$$D_{\text{Pulver}} = z \cdot \sum_{k=0}^{i-1} (1-a)^k$$



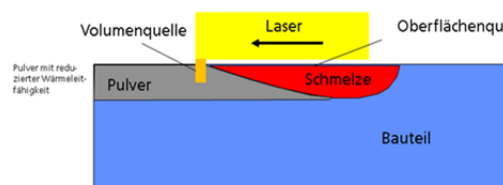
[ROM07]: M. Rombouts: „Selective laser sintering/melting of iron based powders“, PhD Thesis, K.U. Leuven, 2007.

Abbildung 18: Zweiphasenmodell gemäß Literatur

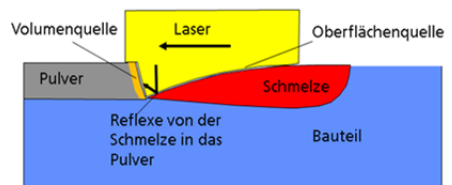
Deswegen ist das unter AP. 5.3 entwickelte Simulationstool so modifiziert worden, dass die SLM relevanten Randbedingungen berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 19). Die wichtigste Änderung zum Standardmodell gemäß Literatur betrifft die Berücksichtigung der gekrümmten Ausbildung der Schmelzbadoberfläche. Dies führt dazu, dass die Laserleistung an der Schmelzfront auf einem verglichen mit dem Standardmodell tieferen Höhenniveau eingekoppelt wird und damit eine tiefere Aufschmelzung des Grundmaterials verursacht (vgl. Abbildung 19, rechts). Die Abweichungen bzgl. Schmelzbadbreite und -tiefe zwischen den experimentellen und den modelltheoretischen Ergebnissen liegen für das modifizierte Modell unter 10% und sind damit ausreichend genau.

2 Phasen SLM Kontinuumsmodell

Standard Modell Literatur



Modifiziertes Modell



- Berechnung der Schmelzbadoberfläche auf Basis der Kapillarkräfte bzw. der Druckbilanzgleichung
- Thermalisierung der optischen Energie auf Basis einer Direktbestrahlung
 - der Schmelzbadoberfläche und
 - im Überlappbereich Strahl Partikel und
 - den Rückreflexen von der Schmelze in die Partikel

Abbildung 19: Übersicht der Modelle. Links: Zweiphasenmodell; rechts: modifiziertes Modell für das SLM-Verfahren

Signifikante Abweichungen werden für Strahldurchmesser kleiner 80 μm erzielt. Das Verhältnis Schmelzbadbreite zu Schmelzbadtiefe (Abbildung 20) lässt sich auch mit dem modifizierten Modell nicht annähernd reproduzieren.

- **Verfahrensparameter:**

Laserleistung: $P_L=195\text{W}$, $d_s\approx 82\mu\text{m}$ (Gauß), Spurbstand: $\Delta y_s=90\mu\text{m}$, Schichtdicke: $D_s=30\mu\text{m}$, Scangeschwind.: $v_{\text{scan}}=1200\text{mm/s}$

- **Schmelzbadabmessungen**

Breite: $142 \pm 13 \mu\text{m}$, Tiefe: $89 \pm 16 \mu\text{m}$,

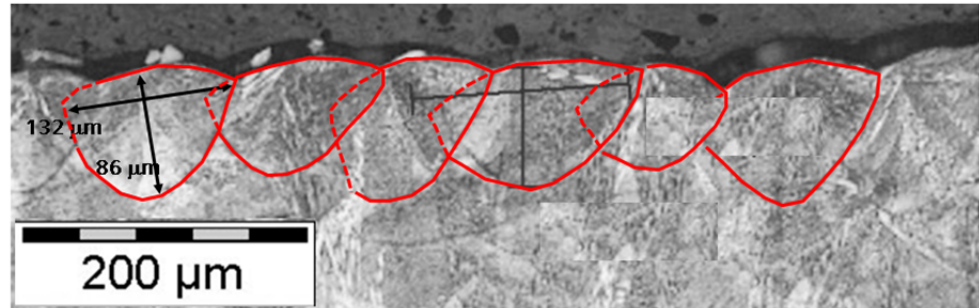
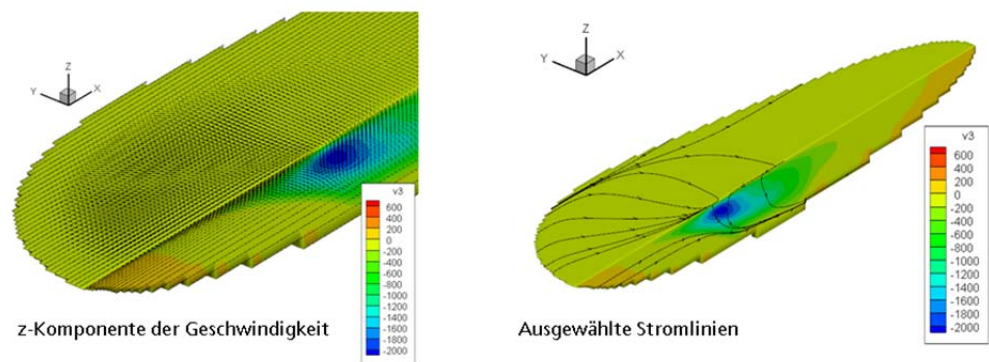


Abbildung 20: Experimentelle Ergebnisse: Schmelzbadlinseneines SLM-Prozesses. Werkstoff: IN718

Das geringe Aspektverhältnis von Schmelzbadbreite zu Schmelzbadtiefe ist entweder Folge der sogenannten Marangonikonvektion oder das Resultat der Ausbildung einer Dampfkapillare.



- Geschwindigkeit in z-Richtung beträgt bis zu 2 m/s
- Erhöhung der Schmelzbadtiefe beträgt aber bei $25 \mu\text{m}$ für reine Wärmeleitung nur $5 \mu\text{m}$
- Marangonikonvektion kann experimentelles Ergebnis bzgl. Schmelzbadtiefe und -breite nicht erklären
- Modellerweiterung auf Ausbildung einer Dampfkapillaren erforderlich

Abbildung 21: Schmelzbadgeometrie mit Marangonikonvektion. Parameter: siehe Abbildung 20

Beide Erklärungsansätze wurden untersucht. Die Berücksichtigung einer Marangonikonvektion mit positiven Oberflächenspannungskoeffizienten führt zu ei-

ner nur geringen Erhöhung der Schmelztiefe. Das heißt, dass die experimentell erzielte Einschmelztiefe durch eine Marangonikonvektion nicht ausreichend erklärt werden kann. Daher wurde eine Modellerweiterung bezüglich der Ausbildung einer Dampfkapillare durchgeführt. Bei der modelltheoretischen Berechnung der Licht-Pulverbett-Wechselwirkung wird ein Verdampfungsanteil von ca. 72 % bezogen auf die eingestrahelte Leistung (Abbildung 22) ermittelt.

Bei der Ausbildung einer Dampfkapillare beim SLM wird in der Regel modelltheoretisch eine sogenannte Goldak Quelle verwendet. Die freien Parameter einer Goldak (Volumen-) Quelle werden dabei so angepasst, dass die Schmelzbadgeometrie im Querschliff reproduziert wird. Deswegen hat das Modell keinen prädikativen Charakter bzgl. der Schmelzbadgeometrie, da der Parameterfit für jede Parameterkombination neu durchgeführt werden muss. Die Temperaturen innerhalb der Schmelze sind irrelevant bzw. unphysikalisch, da nur die Temperaturzyklen in der festen Phasen für die Ausbildung von Spannungen relevant sind. Zur Vermeidung dieser Defizite ist ein neuer Ansatz entwickelt worden. Bei diesem Ansatz wird die Phasengrenzfläche flüssig/gasförmig so bestimmt, dass auf Basis der Wärmeleitungsgleichung die Verdampfungstemperatur auf der Phasengrenzfläche erzeugt wird.

Mit diesem Kapillarmodell werden die experimentellen Schmelzbadabmessungen modelltheoretisch auf $\pm 10\%$ reproduziert. Im Vergleich zu den Ergebnissen mit der Goldak Quelle zeigen sich ähnliche Schmelzbadabmessungen im Querschliff, aber signifikant unterschiedliche Erstarrungsbedingungen auf der

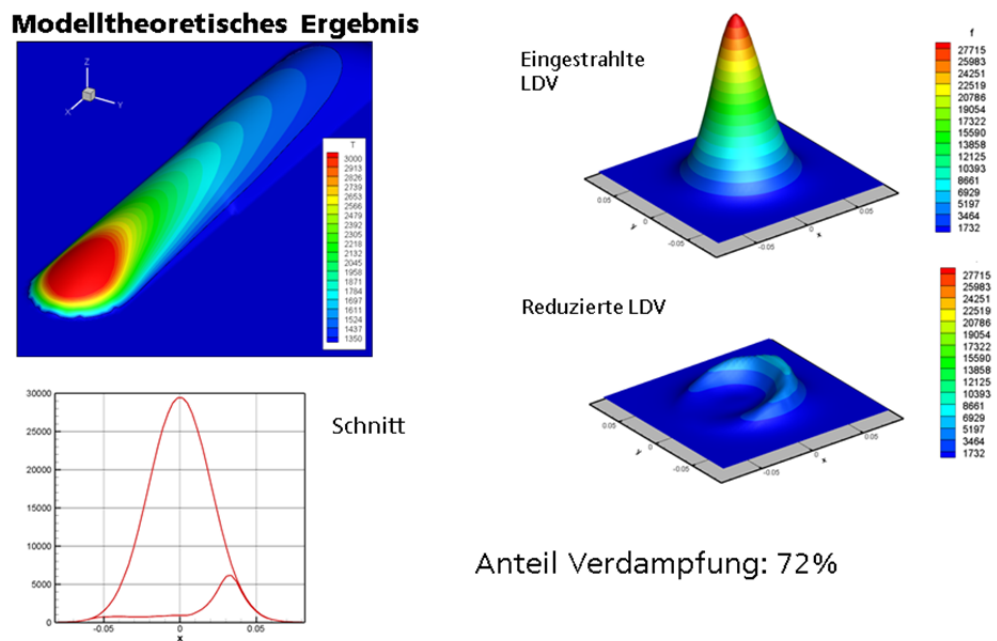


Abbildung 22: Modelltheoretisches Ergebnis: Parameter s. Abbildung 20

Erstarrungsfront (Abbildung 23), eine erheblich größere Schmelzbadausdehnung in Verfahrerrichtung .

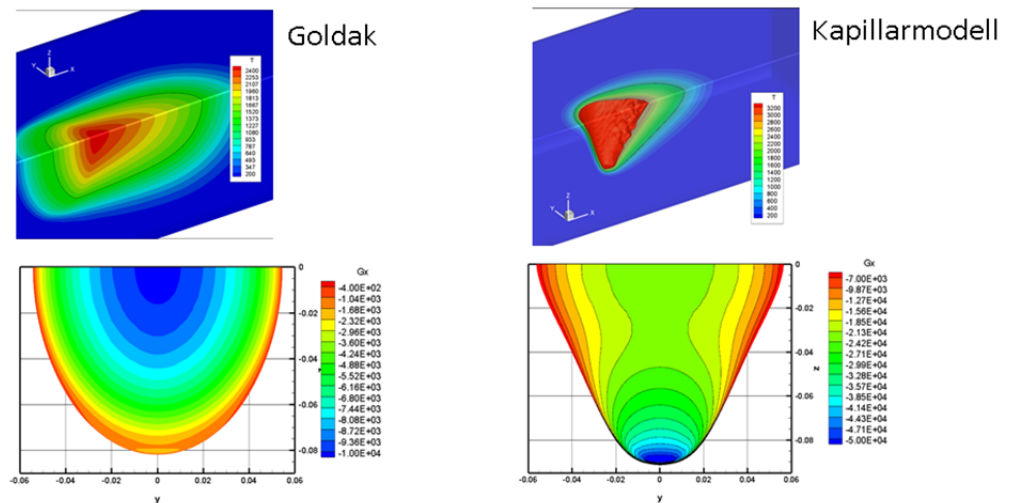


Abbildung 23: Vergleich Schmelzbadgeometrie und Temperaturgradient in Verfahrerrichtung. Links: Goldak Quelle, rechts: Kapillarmodell. Parameter: vgl. Abbildung 20

Zusammenfassend können bzgl. der modelltheoretischen Arbeiten zum SLM folgende Punkte festgehalten werden:

- Das für AP5.3 entwickelte LA-Simulationstool (vgl. AP 5.3) ist für das SLM-Verfahren modifiziert worden, so dass damit experimentelle SLM-
- Ergebnisse für ausgewählte Verfahrensparameter für IN718 modelltheoretisch reproduziert werden können.
- Um Unterschiede zwischen modelltheoretischen- und experimentellen Ergebnissen bezüglich der Einschmelztiefe zu reproduzieren sind weitere Modellmodifikationen untersucht worden: Marangoni-Strömung und Dampfkapillarbildung
- Eine Marangoni-Strömung erklärt nicht die hohen Umschmelztiefen bei kleinen Strahldurchmessern und hohen Scangeschwindigkeiten. Daher ist die Dampfkapillarbildung weiter untersucht worden
- Die Dampfkapillarbildung ist modelltheoretisch durch eine Goldak Quelle und ein eigenentwickeltes Dampfkapillarmodell untersucht worden.
- Das Kapillarmodell erfordert keine Anpassungen im Vergleich zur Goldak Quelle und hat damit einen prädikativen Charakter.

Zwei Modellvarianten sind entwickelt worden, mit der der Transfer bzw. die Adaption des Prozesses auf andere Werkstoffe rechnerunterstützt durchgeführt werden kann. Hiermit sind die Arbeiten.

AP4.4 Mechanische Eigenschaften

In diesem Arbeitspunkt werden die mechanischen Eigenschaften für hohe Aufbauraten und für die in AP4.2 beschriebene adaptive SLM-Prozessführung bestimmt. Zum Vergleich mit einer konventionellen Prozessführung werden auch die mechanischen Eigenschaften von konventionell gefertigten Probekörpern bestimmt. In Abbildung 24 ist der Weg von der Erstellung von Probekörper bis zur Analyse der mechanischen Kennwerte dargestellt. Für alle drei Prozessführungen (konventionell, hohe Aufbaurrate und adaptiv) werden die mechanischen Eigenschaften sowohl ohne als auch mit Wärmebehandlung bestimmt.

Die Wärmebehandlung besteht aus einem Lösungsglühen und einem zweistufigen Auslagern nach der AMS5662-Norm.



Abbildung 24: Weg von Erstellung der Probekörper bis zur Analyse der mechanischen Kennwerte

Eine Übersicht über die verwendeten Verfahrensparameter zur Fertigung der Probekörper und über die Rahmenbedingungen der Zugversuche ist in folgender Tabelle angegeben:

	Konventionell »kleiner Strahl«	Hohe Aufbaureate »großer Strahl«	»Adaptiv«
Werkstoff	Nickelbasislegierung IN718		
Laserleistung P_L	200W	920W	200 bzw. 920W
Strahl-Ø d_s	200µm	1000µm	200 bzw. 1000µm
Scangeschw. v_s	400mm/s	150mm/s	400 bzw. 150mm/s
Schichtdicke D_s	30µm	150µm	30 bzw. 150µm
Spurabstand Δy_s	150µm	500µm	150 bzw. 500µm
Aufbauichtung	stehend	stehend	stehend oberer Teil: großer Strahl unterer Teil: kleiner Strahl
Anzahl d. Proben	6 ohne WB + 6 mit WB		
Probengeometrie	DIN EN ISO 50125 – B5x25		
Zugversuch	DIN EN ISO 6892-1:2009		
Prüftemperatur	Raumtemperatur		

Tabelle 1: Parameter zur Probenherstellung und der Zugversuche

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 25 dargestellt. Die Zugfestigkeit R_m für die verschiedenen Prozessführungen betragen ohne Wärmebehandlung im Durchschnitt über 800 MPa. Die Bruchdehnung A beträgt für den kleinen Strahl und den großen Strahl Durchschnitt $A \geq 20\%$. Hingegen fällt die Bruchdehnung für »adaptiv« ab. Diese liegt im Durchschnitt bei $A \geq 10\%$.

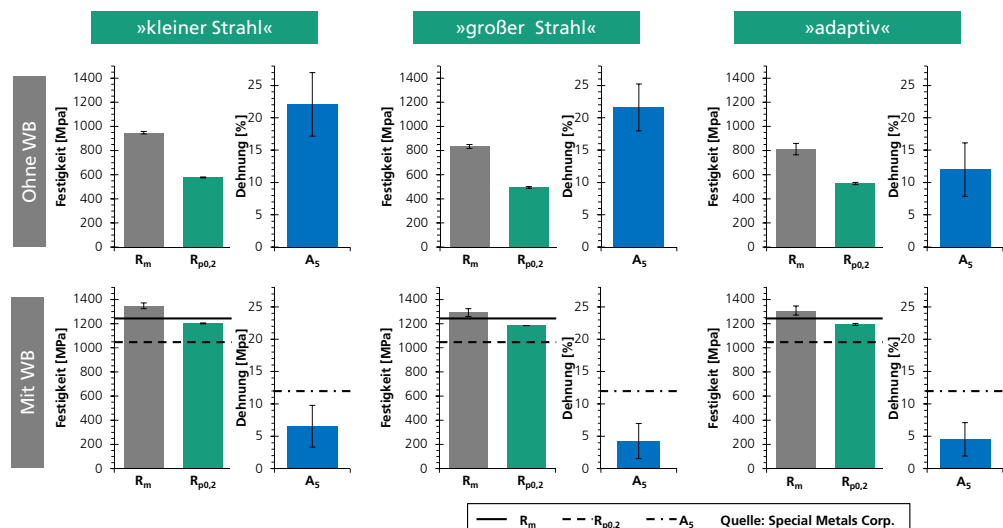


Abbildung 25: Darstellung der Zugfestigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A_5 für verschiedene Prozessführungen mit und ohne Wärmebehandlungen für den Werkstoff IN 718

Die Ursachen für die höhere Zugfestigkeit und die höhere Bruchdehnung des kleinen Strahls liegt an den jeweiligen Korngrößen. Ein feinkörniges Gefüge

führt im Vergleich zu einem grobkörnigen Gefüge zu einer höheren Zugfestigkeit und zu einer höheren Bruchdehnung. Eine mögliche Ursache für die Abnahme der Bruchdehnung von »adaptiv« könnte an Anbindungsfehlern liegen, die im Übergangsbereich zwischen dem kleinen und dem großen Strahl entstehen können. Durch eine dreistufige Wärmebehandlung (Lösungsglühen + zweistufiges Auslagern) nach AMS 5662 werden γ' und γ'' -Ausscheidungen an den Korngrenzen gebildet. Dadurch wird für alle Prozessführungen eine Zugfestigkeit R_m mit Wärmebehandlung von $\geq 1250\text{MPa}$ erzielt. Damit übersteigen die SLM-gefertigten, wärmebehandelten Proben die Zugfestigkeit der Referenz (geschmiedetes wärmebehandeltes IN718) der Special Metals Corporation. Die Bruchdehnung der SLM-gefertigten wärmebehandelten Proben ist im Durchschnitt um 5% kleiner als die Referenz. Eine mögliche Ursache für die verschiedenen mechanischen Eigenschaften von SLM-gefertigten und geschmiedeten Proben könnte aus dem durch den jeweiligen Prozess erzeugten typischen Gefüge (Korngröße und Kornorientierung) resultieren.

Mit den beschriebenen Ergebnissen wurden die mechanischen Eigenschaften für eine Prozessführung mit hohen Aufbauraten und für die in AP4.2 beschriebene adaptive Prozessführung bestimmt. Damit wurde der Meilenstein MS4.5 „Mechanische Eigenschaften“ erreicht und der Arbeitspunkt AP4.4. ist erfolgreich abgeschlossen.

AP4.5 Nachbearbeitung

Aufgrund der typischen hohen Oberflächenrauheit ($R_z \geq 20\mu\text{m}$) von SLM-gefertigten Bauteilen ist eine Nachbearbeitung der Funktionsflächen des Demonstrators Leitschaufelcluster nötig. Die Funktionsflächen des Leitschaufelclusters wurden in zugängliche (Schaufelfuß) und schwer zugängliche Flächen (Schaufeln) untergeteilt, die aufgrund der technischen Randbedingungen eine Anwendung von unterschiedlichen Nachbearbeitungsverfahren und –strategien erfordern.

Zur Nachbearbeitung der zugänglichen Passflächen des Schaufelfußes bietet sich infolge wirtschaftlicher und technischer Vorteile eine frästechnische Bearbeitung an. Zur Realisierung einer durchgängigen Datenketten und einer Transformation des scannerbasierten Koordinatensystems der SLM-Anlage in das mechanische Koordinatensystem der Fräsmaschine wurden verschiedene Referenzierungskonzepte untersucht. Vor dem Hintergrund, dass die Prozesskette für die Serienfertigung des Leitschaufelcluster für kleine bis mittlere Stückzahlen ausgelegt wird, wird im Folgenden nur auf das wirtschaftlichste der untersuchten Konzepte eingegangen. Bei diesem Konzept wurde eine Hilfsgeometrie während des SLM-Prozess parallel zur Fertigung des Leitschaufelcluster mitgebaut. Das Einmessen dieser Hilfsgeometrie im Koordinatensystem der Fräsmaschine erlaubt die Transformation vom Koordinatensystem der SLM-Maschine und die Anpassung der Fräsbearbeitung an die Ist-Geometrie des SLM-Bauteils. Die Untersuchungen und Umsetzungen der verschiedenen Referenzierungskonzepte wurden gemeinsam mit dem Technologiecluster Machining erarbeitet und durchgeführt.

Eine Fräsbearbeitung der schwerzugänglichen Schauffelflächen ist aufgrund der Zugänglichkeit technisch schwer zu realisieren und dementsprechend mit einem besonders hohem wirtschaftlichen Aufwand verbunden. Die im Folgenden genannten Verfahren besitzen das wirtschaftliche Potential die schwer zugänglichen Flächen nach den technischen Anforderung zu bearbeiten: Strahlen, Gleitschleifen, Strömungsschleppscheifen und MMP-Technology. Mit Unterstützung des Clusters Roadmapping wurden diese Verfahren im Rahmen des dritten Workshops anhand des Demonstrators Leitschaufelclusters auf die erzielbare Oberflächenrauheit untersucht. Die Verfahren haben gemein, dass die Ausgangsqualität (geringe Rauheit und hohe Form- und Lagegenauigkeit) der SLM-Fläche entscheidenden Einfluß auf das Ergebnis der Nachbearbeitung hat: je höher die Oberflächenqualität des SLM-Bauteils, desto höher die Oberflächenqualität der Nachbearbeitung. In Abbildung 26 ist das Ergebnis der Nachbearbeitung der Leitschaufelcluster mittels MMP-Technology dargestellt. Hier wurden die kleinsten Rauheitswerte erreicht.

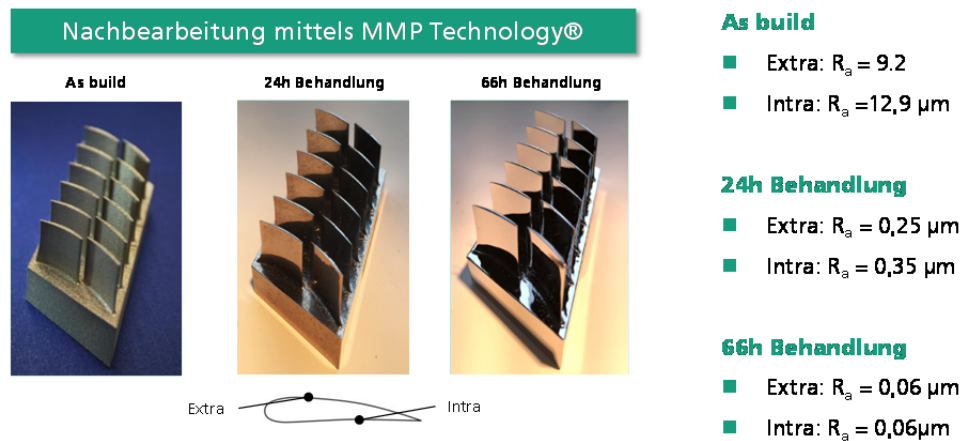


Abbildung 26: Darstellung der Nachbearbeitung mittels MMP-Technology

AP4.6 Demonstrator

Das Subcluster SLM wird mit der Fertigung des im Technologiecluster Design ausgewählten Demonstrators abgeschlossen. Hierbei sollen insbesondere die Entwicklungen aus AP4.2 Adaption der SLM-Prozessführung und AP4.5 Nachbearbeitung angewendet werden. In Bezug auf die adaptive SLM-Prozessführung im Vergleich zur konventionellen Prozessführung soll die Verringerung der Fertigungszeit und der –kosten ermittelt werden.

Zur Fertigung des Leitschaufelcluster wurde die in Abbildung 27 dargestellte Prozesskette angewendet. Im ersten Schritt wird das Leitschaufelcluster mit der angepassten Geometrie – d.h. mit Aufmaß an den in AP4.1 und AP4.5 beschriebenen Flächen – mit der adaptiven SLM-Prozessführung gefertigt. Im zweiten Schritt wird zur Reduzierung der während des SLM-Prozess eingebrachten Eigenspannungen und zur Einstellung der mechanischen Eigenschaften eine Wärmebehandlung durchgeführt. Im dritten Schritt wird das Leitschaufelcluster von der Substratplatte mittels Drahterodieren getrennt. Im vierten Schritt wird der Schauffelfuß durch das Technologiecluster Machining spanend nachbearbei-

tet und die Passflächen nach technischer Zeichnung auf Maß gebracht. Im letzten Schritt werden die schwer zugänglichen Schauffel­flächen mittels MMP-Technology nachbearbeitet.



Abbildung 27: Darstellung der generativen Prozesskette zur Fertigung des Leitschaufelclusters

Mit der Umsetzung der Prozesskette werden die Entwicklungen aus AP4.2 und AP4.5 erfolgreich in die Praxis überführt.

Des Weiteren wurde der Demonstrator Leitschaufelcluster mit verschiedenen Prozessführungen gefertigt und die benötigte Fertigungszeit sowie der Energie- und Ressourcenverbrauch ermittelt. Die Untersuchungen werden an einer ILT Laboranlage durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 28 aufgeführt.

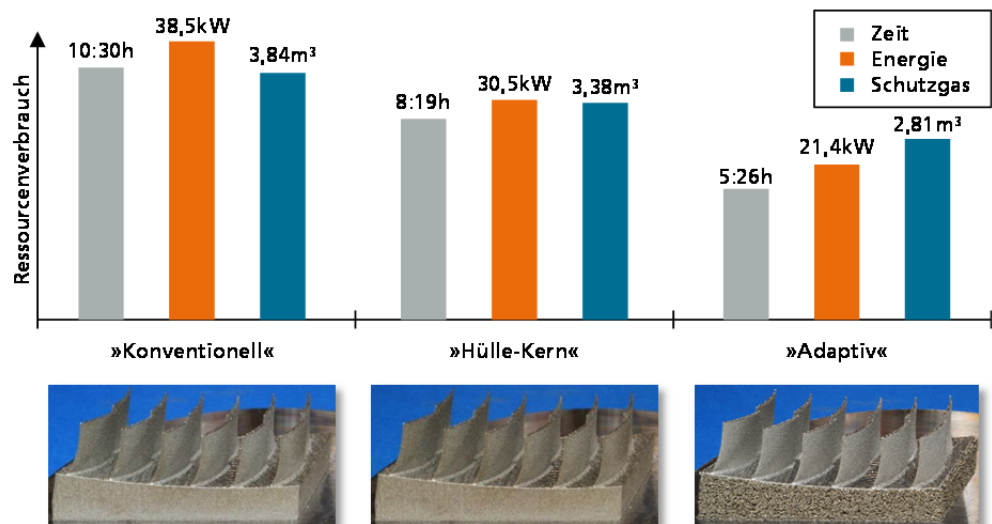


Abbildung 28: Darstellung des Energie- und Ressourcenverbrauchs für die generative Fertigung des Leitschaufelclusters mit verschiedenen Prozessführungen

Mit der adaptiven SLM-Prozessführung kann sowohl die Fertigungszeit als auch der Energie- und der Schutzgasverbrauch im Vergleich zur konventionellen und

zur Hülle-Kern-Prozessführung reduziert werden. So wird zum Beispiel die Fertigungszeit bei der Fertigung eines Leitschaukelclusters mit der adaptiven SLM-Prozessführung im Vergleich zur konventionellen Prozessführung um etwa den Faktor 2 verringert. Auf Grundlage der ermittelten Daten wird ein Szenario Serienfertigung zur Bestimmung der Kosten pro Leitschaukelcluster für die verschiedenen Prozessführungen errechnet. In Abbildung 29 sind Annahmen und Randbedingungen sowie die geschätzten Kosten für zwei Szenarios zur Serienfertigung von Leitschaukelclustern dargestellt. Der angegebene Preis pro Leitschaukelcluster bezieht sich dabei auf die Fertigung von 13 Leitschaukelclustern pro Baujob. Die ermittelten Kosten beziehen sich allein auf die SLM-Fertigung. Die Kostenanteile der Nachbearbeitung sind hier nicht eingerechnet, da diese im Technologiecluster Design betrachtet werden.

Investition Anlage	
»Konventionell«	450.000,-€
»Adaptiv«	635.000,-€

Kosten		Annahmen & Randbedingungen	
Energie	0,14 €/kWh	Abschreibungszeit	4 a
Schutzgas Argon	0,1 €/m ²	Arbeitstage/a	220 d
Service	5%/a von Invest	Bauteilvolumen	35,74 cm ³
Personal	45,0 €/h	Pulververlustfaktor	50 %
Pulver	70,0 €/kg	Fläche Anlage	20 m ²
Fläche	140 €/mm ² *a	Rüstzeit pro Job	2h
Verbrauchsmaterial	100 €/Job		

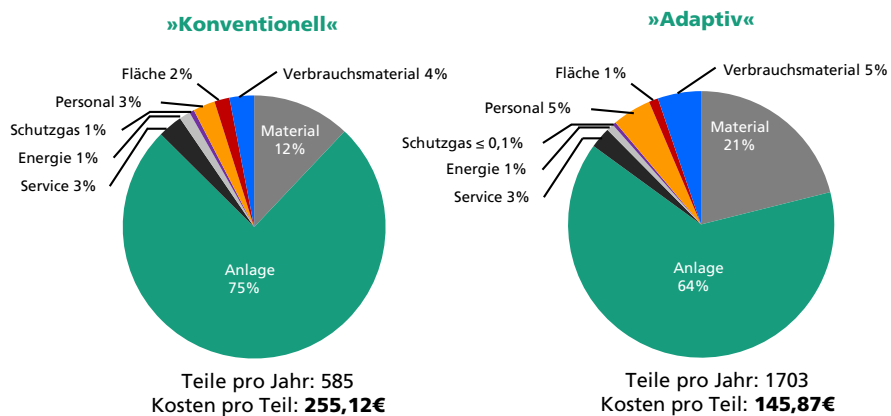
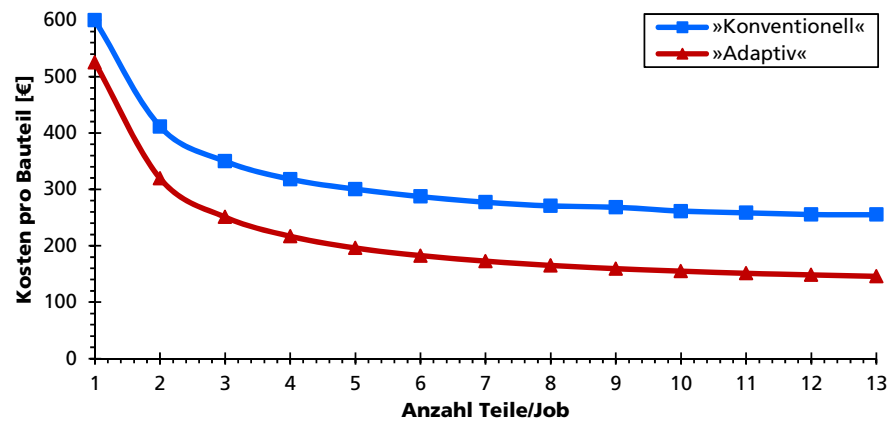


Abbildung 29: Tabelle der Annahmen und Randbedingung zum Szenario einer Serienfertigung von Leitschauelclustern (oben). Darstellung der Kostenanteile je Szenario „Adaptiv“ bzw. „Konventionell“ (unten)

Zusammenfassung Subcluster »SLM«

Ein wesentlicher Erfolg des Subcluster SLM besteht in der Entwicklung und Anwendung der adaptiven SLM-Prozessführung. So wurde zum ersten Mal die Prozessführung beim SLM unter Berücksichtigung der gesamten Prozesskette ausgelegt und führt bei der Anwendung am Demonstrator Leitschaukelcluster zu einer Reduzierung der Prozesszeit beim SLM um den Faktor 2. Des Weiteren wurden für eine derartige Prozessführung und eine Prozessführung für hohe Aufbauraten die mechanischen Eigenschaften bestimmt. Zusammen mit anderen Technologieclustern wurden Verfahren und dazugehörige Konzepte zur Nachbearbeitung des technisch anspruchsvollen Demonstrators Leitschaukelcluster sowohl für zugängliche als auch für schwer zugängliche Flächen untersucht. Als Resultat dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die generative Prozesskette zur Fertigung des Leitschaukelclusters die technischen Kriterien erfüllt. Durch die Aufnahme des Zeit-, Energie- und Materialeinsatz bei der generativen Fertigung des Leitschaukelclusters mittels SLM konnte ein realistischer Business-Case dargestellt werden, der erhebliches wirtschaftliches Einsparpotential aufweist.

3.2.2 Subcluster »Vergleich SLM & LMD«

Ein Vergleich der laserbasierten generativen Fertigungsverfahren Selective Laser Melting (SLM) und Laserauftragschweißen (LMD) sind auf Wunsch der Industrieteilnehmer als weiteres Subcluster des Technologieclusters Laser aufgenommen worden. Die Arbeitspakete des Subcluster »Vergleich SLM & LMD« sind in Abstimmung mit dem Industriekonsortium wie folgt definiert worden:

- SLM&LMD AP 1: Verfahrensgrundlagen und Prozessdomänen
- SLM&LMD AP 2: Vergleich erzielbare Geometrien
- SLM&LMD AP 3: Vergleich mechanischer Eigenschaften & Gefüge

Alle Arbeiten sind mit dem Werkstoff Inconel 718 durchgeführt worden. Ziel der Arbeiten in diesem Subcluster ist es, eine Entscheidungsbasis für eine anwendungsspezifische Verfahrensauswahl zu erarbeiten.

SLM&LMD AP 1: Verfahrensgrundlagen und Prozessdomänen

Im Subcluster Vergleich SLM & LMD wurde zu Beginn der Arbeiten der Stand der Technik hinsichtlich der jeweiligen Verfahrensgrundlagen, Prozessdomänen und erzielbaren Aufbauraten adressiert. Grundsätzlich unterscheiden sich die Verfahren SLM und LMD durch die Art der Zufuhr des pulverförmigen Werkstoffs. Bei dem Verfahren SLM liegt der Werkstoff in einem Pulverbett vor und wird schichtweise per Bürste oder Schieber aufgetragen. Bei dem Verfahren LMD wird der Werkstoff per Pulverdüse in das Schmelzbad eingebracht. Aus der Art der Pulverzufuhr ergeben sich spezifische verfahrensinhärente Eigenschaften bezüglich der herstellbaren Bauteile. Das Verfahren SLM ermöglicht die Herstellung sehr komplexer Bauteile mit Hohlstrukturen. Die Bauteilgröße

wird durch die Größe der Prozesskammer begrenzt. Das Verfahren LMD eignet sich zum Aufbau von Geometrien auf nahezu beliebigen 3D-Oberflächen. Überhänge lassen sich lediglich bedingt realisieren. Die Größe der Bauteile wird durch die Verfahrswege der eingesetzten Werkzeugmaschine begrenzt.

Als Produktivitätskriterium für beide Verfahren kann die theoretische Aufbaurrate herangezogen werden. Folgende theoretische Aufbauraten können für den Werkstoff Inconel 718 mit beiden Verfahren erzielt werden:

Für das Verfahren LMD läßt sich mit angepassten, am ILT erarbeiteten Parametern ($P_L = 5250 \text{ W}$, $v = 4000 \text{ mm/min}$, $d_L = 4 \text{ mm}$) eine maximale Aufbaurrate von $146,7 \text{ mm}^3/\text{s}$ erreichen. Für das Verfahren SLM liegt die maximale Aufbaurrate bei ca. $15 \text{ mm}^3/\text{s}$ (mit $P_L = 900 \text{ W}$, $v = 9000 \text{ mm/min}$, $d_L = 1 \text{ mm}$).

Für beide Verfahren sind am ILT erarbeitete, angepasste Parametersätze zur Verarbeitung des Werkstoffs Inconel 718 zusammengetragen worden. Die Parametersätze sind in Abbildung 30 anhand der Größen Laserleistung, Vorschub-/Scangeschwindigkeit und Strahldurchmesser in der Bearbeitungsebene dargestellt.

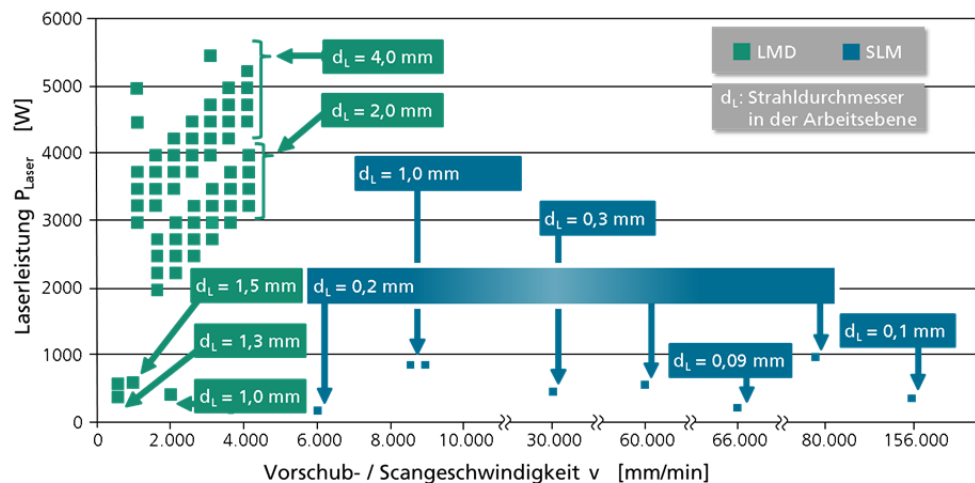


Abbildung 30: Angepasste Verfahrensparameter für den Werkstoff Inconel 718

Zur Verarbeitung des Werkstoffs Inconel 718 können für das Verfahren LMD typischerweise Vorschubgeschwindigkeiten bis zu ca. 4000 mm/min eingesetzt werden. Dabei werden Laserleistungen bis ca. 5400 W verwendet. Bei dem Verfahren SLM skaliert die Scangeschwindigkeit zwischen 6000 und 156.000 mm/min . In der Regel werden Laserleistungen bis ca. 1000 W verwendet.

SLM&LMD AP 2: Vergleich erzielbare Geometrien

Die mit beiden Verfahren erzielbaren geometrischen Eigenschaften werden anhand fünf einfacher Testgeometrien (Hohlquader, Hohlzylinder, Vollquader, Vollzylinder, Steg) bestimmt. Dabei werden je Verfahren zwei Parametersätze verwendet. Als Bewertungskriterien dienen Kenngrößen entsprechend der Norm DIN EN ISO 1101. Die Vermessung erfolgt taktil mit einem Koordinaten-

messgerät (siehe Abbildung 31). An allen Testgeometrien konnte ermittelt werden, dass sich mit dem Verfahren SLM bei Verwendung eines Strahldurchmessers von $d_L = 100 \mu\text{m}$ die größten Genauigkeiten erreichen lassen. Diese liegen bei ca. $\leq 50 \mu\text{m}$ für alle Bewertungskriterien. Bei Verwendung eines Strahldurchmessers von $d_L = 1000 \mu\text{m}$ liegen die Genauigkeiten bei dem Verfahren SLM im Bereich von ca. $200 \mu\text{m}$. Bei dem Verfahren LMD liegen die mit den ausgewählten Parametern erzielten Genauigkeiten deutlich über den mit dem Verfahren SLM erzielbaren Genauigkeiten. Größte Werte der Formtoleranzen werden für das Verfahren LA jeweils bei Messung in Aufbaurichtung (Z-Orientierung) ermittelt.

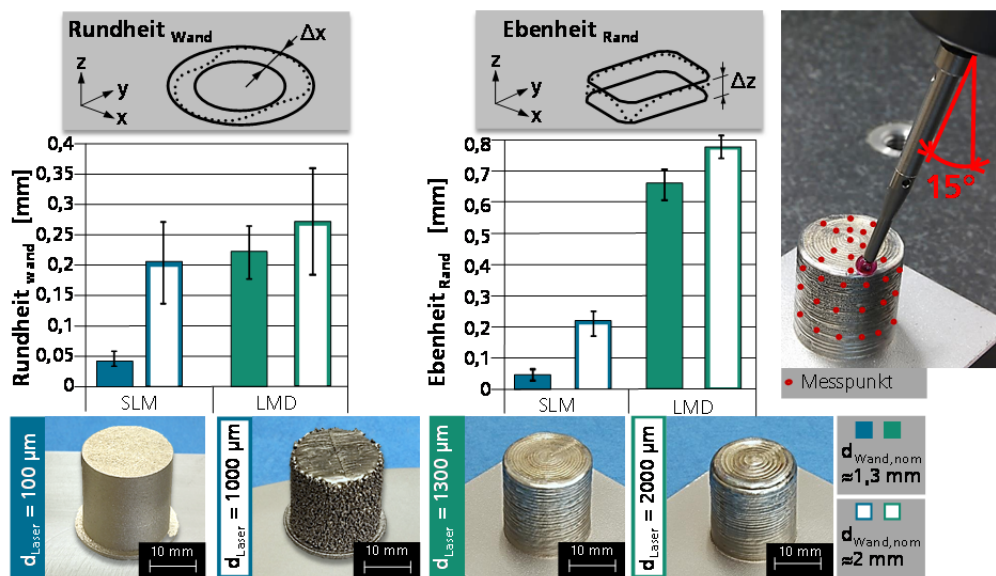


Abbildung 31: Taktile Bestimmung der Formtoleranzen anhand von Testgeometrien

Neben der Bestimmung der Formtoleranzen wurde an den Testgeometrien ebenfalls eine Bestimmung der Oberflächenrauigkeiten vorgenommen. Dabei wurde je Bauteil sowohl in vertikaler (Z-Orientierung) als auch in horizontaler Richtung (X-Y-Orientierung) gemessen. Die mit dem Verfahren SLM ($d_L = 100 \mu\text{m}$) hergestellten Testgeometrien zeigten eine sehr homogene Oberfläche. Eine Richtungsabhängigkeit der R_a -Werte kann nicht festgestellt werden ($R_{a,\text{horizontal}} \approx R_{a,\text{vertikal}} \approx 7 \mu\text{m}$). Bei Verwendung eines Strahldurchmessers $d_L = 1000 \mu\text{m}$ können an der Bauteiloberfläche zahlreiche Anhaftungen festgestellt werden, die die Oberflächenrauigkeit signifikant beeinflussen ($R_{a,\text{horizontal}} = 99,5 \mu\text{m}$, $R_{a,\text{vertikal}} = 89,1 \mu\text{m}$).

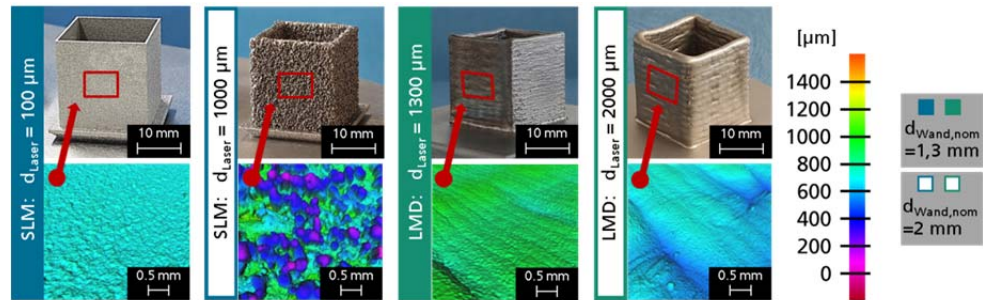


Abbildung 32: Optische Bestimmung der Oberflächenrauigkeiten

Die Oberflächen der mit dem Verfahren LMD ($d_L = 1300 \mu\text{m}$) hergestellten Testgeometrie weisen eine wellige Struktur auf. Die R_a -Werte weisen eine Richtungsabhängigkeit auf ($R_{a,\text{horizontal}} = 4 \mu\text{m}$, $R_{a,\text{vertikal}} = 6 \mu\text{m}$). Bei Verwendung eines Stahldurchmessers $d_L = 2000 \mu\text{m}$ bleibt die Richtungsabhängigkeit bestehen. Die R_a -Werte sind nahezu identisch zu den R_a -Werten der mit $d_L = 1300 \mu\text{m}$ hergestellten Proben (siehe Abbildung 32).

SLM&LMD AP 3: Vergleich mechanischer Eigenschaften & Gefüge

Für die Bestimmung der Werkstofffestigkeit bei statischer Belastung werden mit den Verfahren SLM und LMD liegende Proben aufgebaut. Die Proben werden sowohl mit Wärmebehandlung (nach AMS 5662, siehe AP 4.4) als auch ohne Wärmebehandlung getestet. Die Probenherstellung erfolgte mit identischem Pulverwerkstoff (gleiche Kornfraktion und Charge).

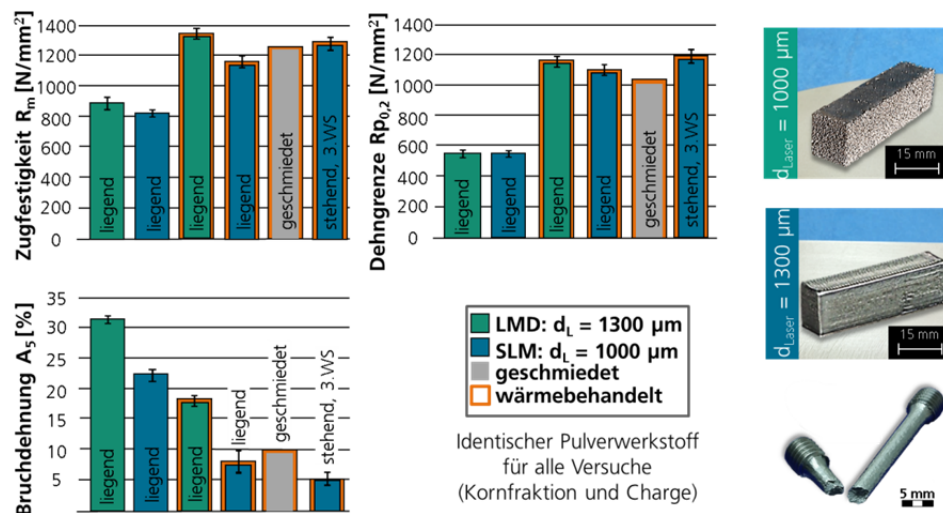


Abbildung 33: Mechanische Festigkeiten bei statischer Belastung

Die mit dem Verfahren LMD hergestellten, wärmebehandelten Proben weisen für die Zugfestigkeit, Dehngrenze und Bruchdehnung jeweils größere Werte als die mit dem Verfahren SLM hergestellten Proben auf. Für alle drei Bewertungsgrößen liegen die Werte der mit dem Verfahren LMD hergestellten, wärmebe-

handelten Proben über den Referenzwerten geschmiedeter Proben (siehe Abbildung 33).

Werkstoffgefüge

Die Gefüge der mit beiden Verfahren hergestellten Proben stellen sich in geätztem Zustand sehr unterschiedlich dar. Insbesondere können Unterschiede in der Korngrößenverteilung festgestellt werden. Das Gefüge der mit dem SLM-Verfahren ($d_L = 100 \mu\text{m}$) hergestellten Probe zeigt eine homogene, feinkörnige Gefügestruktur. Bei Verwendung eines Stahldurchmessers $d_L = 1000 \mu\text{m}$ entstehen im Gefüge stark längliche Körner, die über viele Schichten wachsen.

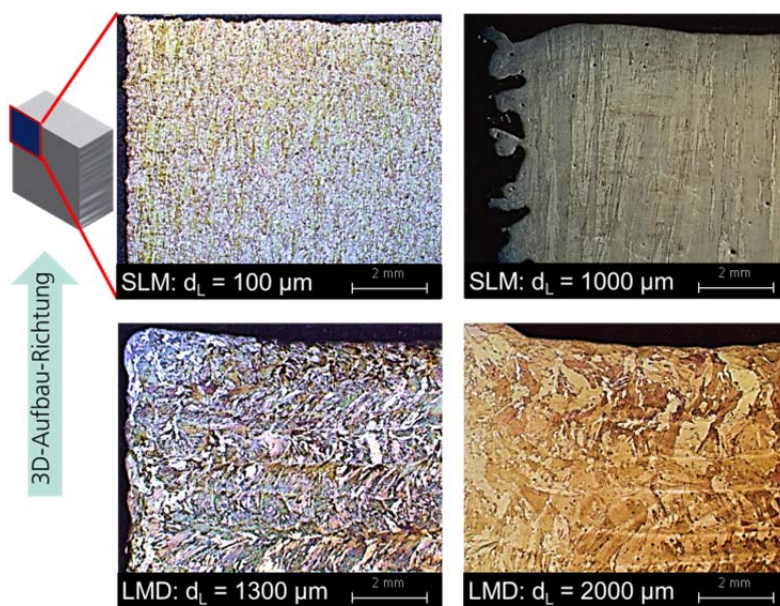


Abbildung 34: Geätzte Querschliffe von additiv gefertigten Inconel 718-Proben

Das Gefüge der mit dem Verfahren LMD ($d_L = 1300 \mu\text{m}$ und $d_L = 2000 \mu\text{m}$) hergestellten Proben unterscheidet hinsichtlich der Kornstruktur deutlich von den mit dem Verfahren SLM hergestellten Proben (siehe Abbildung 34). Bei den mit dem Verfahren LMD hergestellten Proben sind die Körner stehend, in Bau-Richtung geneigt orientiert. Die Länge der einzelnen Körner entspricht in etwa einer Schichtdicke.

3.2.3 Subcluster »Laser Cladding«

Zur Adressierung der übergeordneten Ziele des Subclusters Laser Cladding (Laserauftragschweißen), nämlich der werkstoff- und geometriespezifischen Bearbeitung, sind im Rahmen von AdaM mehrere Softwaretools entstanden, die unabhängig voneinander eingesetzt und benutzt werden können.

Durch einen modularen Aufbau sind einzelne Softwaretools zur Modellierung des Laserauftragschweißprozesses (AP5.3) und eine für das Laserauftragschweißen angepasste Datenbank (AP5.2) entwickelt worden. Am Beispiel von Schaufelspitzengeometrien sind Verfahrensparameter und Bearbeitungsfälle zum Laserauftragschweißen von einer Nickel- (IN718) und einer Stahllegierung (17-4PH) experimentell untersucht worden (AP5.4). Die experimentellen Ergebnisse bilden die Datenbasis für die Datenbank und dienen gleichzeitig zur Validierung der modeltheoretisch erzielten Ergebnisse.

AP5.1: Technologieprozessor

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Erarbeitung eines Konzeptes und Anforderungsprofils für einen Technologieprozessor; mittels dessen ein Endnutzer mit geringen Vorkenntnissen zum Laserauftragschweißen anwendungsspezifisch – d.h. abhängig von Geometrie und Werkstoff – Startwerte für Bearbeitungsstrategien und Verfahrensparameter zum Laserauftragschweißen von Schaufelspitzen zu Reparaturzwecken oder zur generativen Fertigung ermitteln kann (vgl. Abbildung 35), um somit die Gesamtprozessentwicklungszeit signifikant zu verkürzen.

Zur Erstellung eines Anforderungsprofils für den Technologieprozessor sind für den Anwendungsfall Schaufelspitzenreparatur eine Anlage, eine Strahlquelle und Pulverzufuhrdüsen, zwei Pulverzusatzwerkstoffe (Nickellegierung IN718 und ein Stahl 17-4PH) sowie Bearbeitungsstrategien und zugehörige Verfahrensparameterbereiche im Hinblick auf den definierten Demonstrator Multi-BliR identifiziert worden.

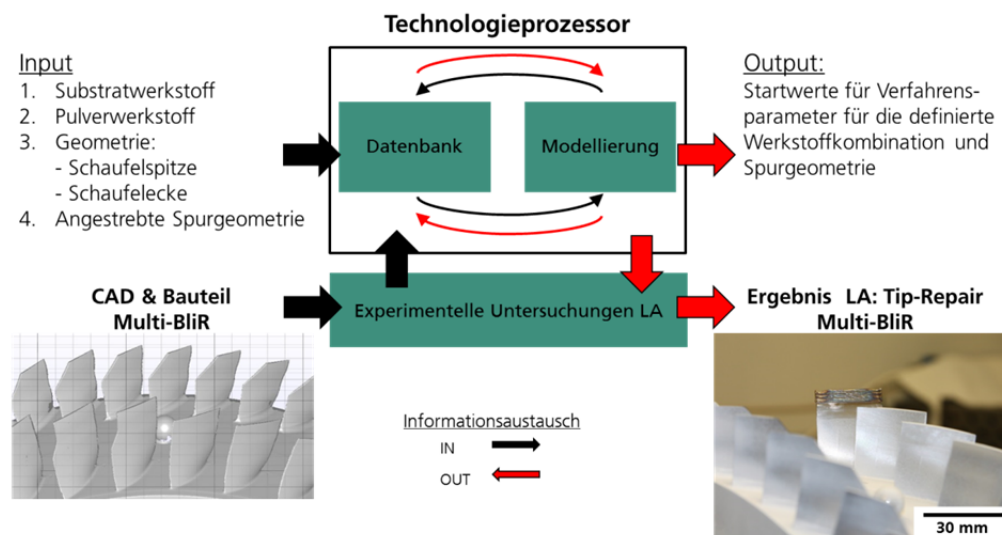


Abbildung 35: Darstellung des Informationsflusses und Funktionsprinzips des Technologieprozessors am Beispiel einer Schaufelspitzen- und einer Schaufeleckenreparatur einer Multi-BliR.

Aus diesem Anforderungsprofil ist der prinzipielle Aufbau des Technologieprozessors abgeleitet worden.

Durch einen modularen Aufbau, bestehend aus einer Datenbank und einem Simulationsmodul kann ein Endnutzer nach vorhandenen Datensätzen zu Ver-

fahrensparametersätzen in Abhängigkeit einer definierten Materialkombination (Substrat und Pulver) und Geometrie (Schaufeln oder Ebenen) suchen. Falls keine Datensätze in der Datenbank hinterlegt sein sollten, können aus vorhandenen experimentellen Ergebnissen interpoliert oder Startparameter zum Laserauftragschweißen durch das Modellierungsmodul berechnet werden.

Wobei sowohl Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen als auch Modellierungsergebnisse in der Datenbank hinterlegt werden können. Experimentelle Ergebnisse dienen sowohl als Datenbasis für die Datenbank als auch zur Überprüfung von Modellierungsergebnissen.

Ein auf die Reparatur von Schaufelspitzen angepasstes Anforderungsprofil des Technologieprozessors ist somit erstellt und AP5.1 erfüllt worden.

AP5.2: Datenbank

Die Motivation zur Datenbankerstellung liegt zum einen darin begründet, das auf viele Personen verteilte Prozesswissen zum Laserauftragschweißen (LA) systematisch, zentral und einheitlich zu dokumentieren (Wissensmanagement). Zum anderen wird durch die digitale Ablage der Daten in einer Datenbank eine Datenbasis geschaffen auf die Softwarewerkzeuge (z. B. Technologieprozessor, AP 5.1) zugreifen können.

Datenbanken speziell für das LA im praktischen/industriellen Einsatz sind nicht bekannt bzw. nicht in der Literatur erwähnt und werden mit AdaM erstmals eingeführt.

In AdaM werden bereits vorhandene und neue Ergebnisse aus dem Bereich des Turbomaschinenbaus (Ni- und Fe-Basis-Legierungen) in die Datenbank eingepflegt. Hierzu sind 3 Teilziele in AdaM definiert worden:

1. Erarbeitung einer Datenbankstruktur
2. Umsetzung in eine Datenbank
3. Kompilierung von Daten zum LA (aus AP5.4)

Zur Erarbeitung der Datenstruktur werden, durch intensive Diskussion mit Anwendern des Laserauftragschweißens, die relevanten Parameter erfasst und strukturiert. Zunächst wurde eine Grobgliederung der Parameter erstellt, welche anschließend in mehreren Stufen weiter ausdetailliert wurde. Exemplarisch wird hier der Unterpunkt „Equipment“ dargestellt (Abbildung 36).

Aufgrund der umfangreichen Datenstruktur hat sich durch Diskussionen mit den zukünftigen Anwendern ergeben, dass eine umzusetzende Datenbank nur dann erfolgreich eingeführt werden kann, wenn gleichzeitig eine interaktive und benutzerfreundliche Bedienoberfläche entwickelt wird. Aus diesem Grunde ist das Konzept eines elektronisch geführten Prozessdatenblatts (kurz: PDB) entwickelt worden. Dieses elektronische PDB soll die bisher unterschiedlich und

handschriftlich geführten PDBs ersetzen. In den elektronischen PDBs kann z. B. die Gliederung der ersten Stufe „Equipment“ mit den zugehörigen Untergliederungen als „Maschinenvorlage“ hinterlegt werden.

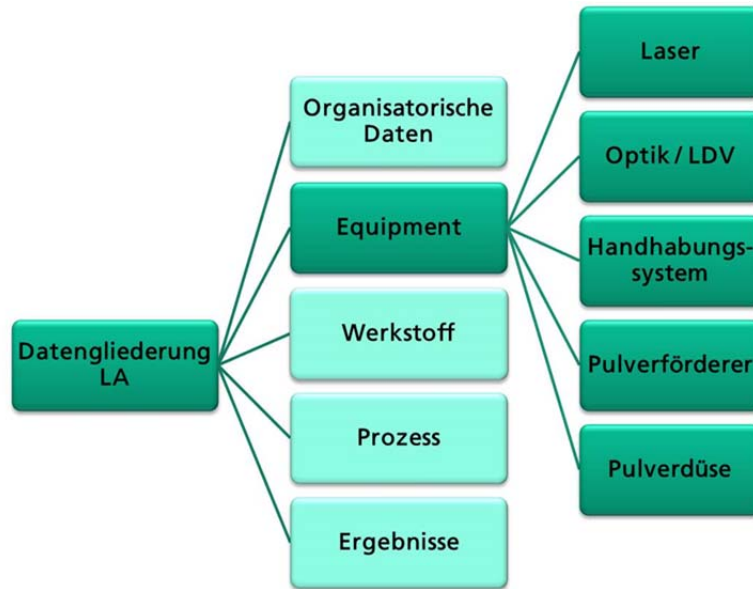


Abbildung 36: Grobgliederung der Datenstruktur für das Laserauftragschweißen (LA)

Der Benutzer kann durch wenige Eingaben das verwendete Equipment auswählen und alle erforderlichen Einträge zum Equipment werden automatisch in der Datenbank übernommen (vgl. Abbildung 37). Dies trägt zur Vereinheitlichung und lückenlosen Dokumentation bei.

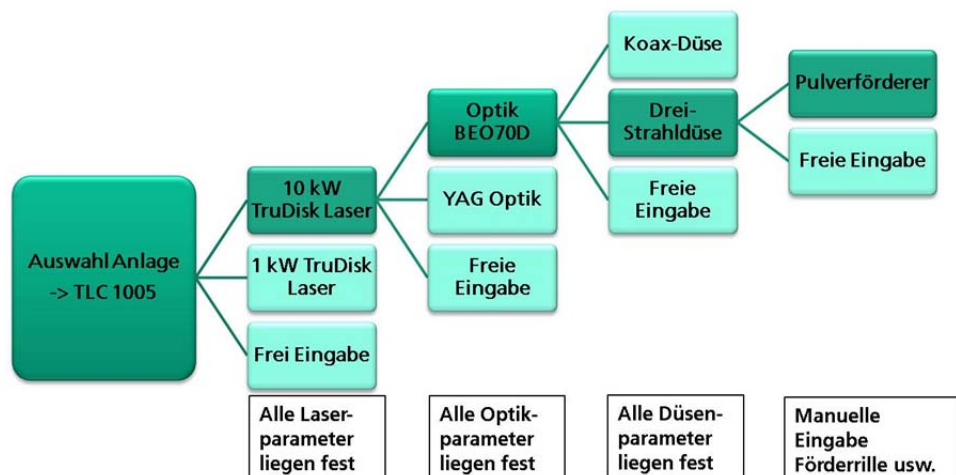


Abbildung 37: Konzept der Maschinenvorlagen am Beispiel der Gliederungsstufe „Equipment“.

Bei der Erstellung der Datenbank wurde die zukünftige Erweiterbarkeit berücksichtigt, so dass sie auch über AdaM hinaus genutzt werden kann. Zur Umsetzung der Datenbank wurde das Datenbanksystem „Granta MI“ der Firma Granta Design beschafft und die erarbeitete Datenstruktur in das Datenbanksystem eingepflegt. In Abbildung 38 ist ein Screenshot der Benutzeroberfläche des Datenbanksystems mit Beispieldaten dargestellt. Auf der linken Seite von Abbildung 38 ist der Navigationsbaum, der die Datenstruktur abbildet und rechts das Ansichts- bzw. Eingabefenster für Daten dargestellt. Die erste Version der Datenbank wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Granta Design erstellt. Hierzu werden schwerpunktmäßig

- die Datenstruktur angepasst, d. h. für LA relevante Parameter werden ergänzt
- Verknüpfung zwischen Verfahrens- und Ergebnisparametern werden erstellt um eine Korrelation zwischen diesen abzubilden
- Import bzw. Export für Verfahrens- und Ergebnisgrößen werden erstellt und experimentelle Ergebnisse aus dem Arbeitspaket AP 5.4 in die Datenbank überführt.

Des Weiteren wurde ein auf XML-Daten basiertes Austauschformat in Kooperation mit dem Cluster CAX entwickelt. Damit können relevante Verfahrensdaten innerhalb einer Prozesskette in einem Datenformat gesammelt und zwischen den Clustern CAX und Laser ausgetauscht werden.

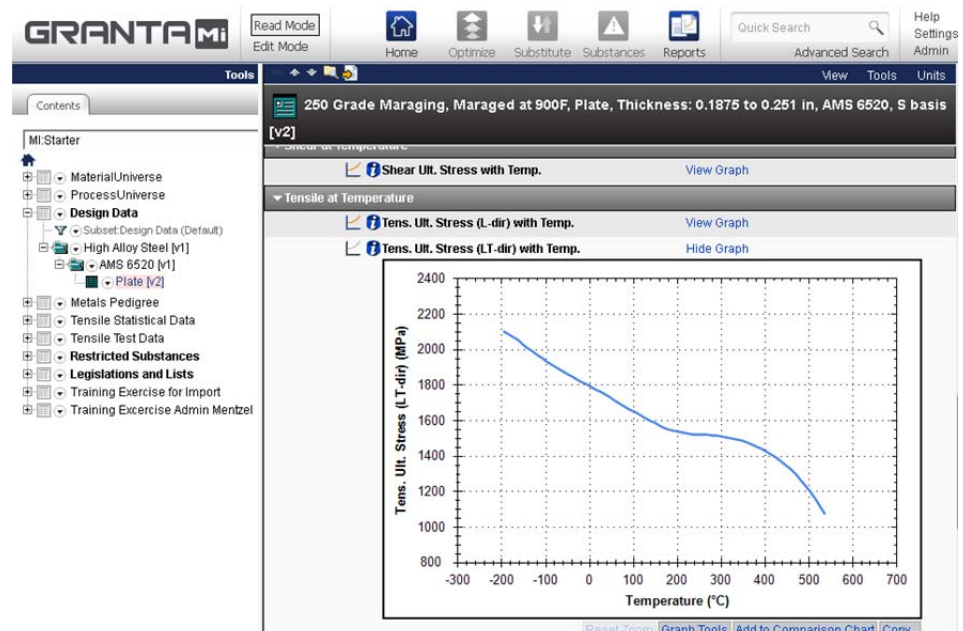


Abbildung 38:

Screenshot der Software Granta MI im Webbrowser. Links: Navigationsbaum, der die Datenstruktur abbildet. Rechts: Ansichts- bzw. Eingabefenster für Datensätze.

Mit Vorstellung des Datenbankprototyps zum 4. AdaM Workshop sind alle in AP5.2 definierten Arbeitspunkte erfolgreich abgeschlossen worden.

AP 5.3: Modellierung

Das Laserauftragschweißen stellt mathematisch ein freies Randwertproblem dar, bei dem das Temperaturfeld und die Spurgeometrie als gekoppelte Lösung der Wärmeleitungsgleichung, einer Massenbilanzgleichung und der Young-Laplace Gleichung berechnet werden. Zu Beginn des Projektes existierte ein quasistationäres Modell für das mathematische Problem, das aber als Input noch die Querschnittsgeometrie der Spur voraussetzte. Da sich aber beispielsweise bei der Bearbeitung einer Schaufelspitze von einer Blisk oder einer Kompressorschaukel entlang der Bahn das Schaufelprofil und damit das Abschreckvolumen der Schmelze für die thermalisierte optische Energie kontinuierlich ändert, ist die Berechnung eines quasistationären Zustandes nicht zielführend. Vielmehr erfordert diese Situation von einer rechnergestützten Verfahrensentwicklung eine zeitaufgelöste Integration der Modellgleichungen für Einzelbahnen und Bahnen in Überlappbearbeitung. Dies ist in diesem Projekt geleistet worden. Die numerische Integration der nichtlinearen partiellen Differentialgleichung wurde mit der Methode der Finiten Elemente durchgeführt.

Zur Lösung des freien Randwertproblems sind neben tabellierten Materialkennwerten weitere Informationen zur Leistungsdichteverteilung, zur Pulverpartikeldichteverteilung der eingesetzten Pulverzufuhrdüse sowie die eingestellten Verfahrensparameter erforderlich. Hierzu sind im Rahmen von AdaM folgende Softwaretools entwickelt worden:

- LDV_LAB
- PDV_LAB
- FRP_LMD.

LDV_LAB

Das Modell erfordert eine ortsaugelöste Darstellung der Kaustik des Laserstrahls. Die Messergebnisse auf Basis beispielsweise der Geräte der Firma Primes bzw. Spiricon sind dafür nicht geeignet, da die eigentlichen Ergebnisse mit einem Rauschen durchsetzt sind. Die Angabe des Strahldurchmessers als Ergebnis der Auswertesoftware der verschiedenen Messgeräte entlang der Strahlachse ist unzureichend, da das Strahlprofil einen signifikanten Einfluß auf das Temperaturfeld hat.

Daher ist eine eigene Auswertesoftware mit dem Namen „LDV_LAB“ entwickelt worden (Abbildung 39). Diese besitzt eine Schnittstelle zu den Datenformaten der Primes und Spiricon Messgeräten. Die Software entfernt das Datenrauschen bzw. den Untergrund aus der eingelesenen Intensitätsmatrix und erstellt auf Basis einer parametrischen Approximation mit zwei freien Parametern eine Strahlcharakterisierung durch einen Strahldurchmesser und eine Flankensteilheit. Die Qualität der Approximation lässt sich am Bildschirm prüfen.

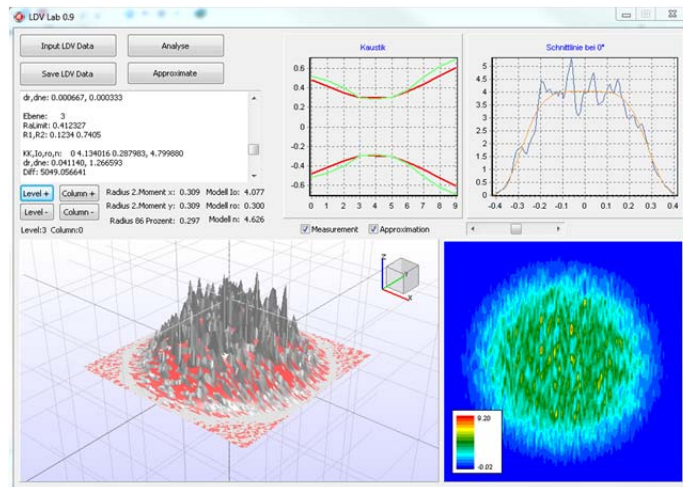


Abbildung 39: Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche des LDV_LAB zur Analyse der Laserleistungsdichteverteilung.

PDV LAB

Zur Analyse der Partikeldichte und der Partikel-Laserstrahl Wechselwirkung ist ein Simulationstool mit grafischer Benutzeroberfläche entwickelt worden: „PDV_LAB“ (Abbildung 40). Auf Basis der Partikeldichte bzw. -matrix an ausgewählten z-Positionen entlang der Strahlpropagationsrichtung und des Pulvermassenstroms werden mit der Software die Partikelgeschwindigkeit, die Partikeltemperatur, die Partikeldichte und die transmittierte Leistungsdichteverteilung in der Prozesszone berechnet.

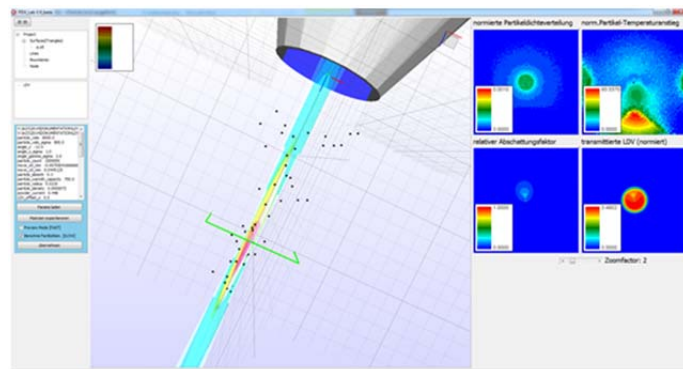


Abbildung 40: Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche von PDV_LAB.

FRP_LMD

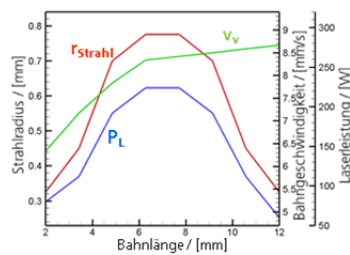
Die Ergebnisse des LDV_Lab und des PDV_LAB fließen als Randbedingungen in die numerische Integration der zugrundeliegenden Modellgleichungen für das Randwertproblem ein. Diese Integration wird mit dem Programm „FRP_LMD“ durchgeführt.

Das Programm ist in Fortran 95 geschrieben, da für rechenintensive Aufgabenstellungen Fortran nach wie vor in der Rechengeschwindigkeit gegenüber C++

einen erheblichen Vorteil hat.

Die Ergebnisse werden in einem Datenformat ausgegeben, das von gängigen Analyseprogrammen wie beispielsweise „Tecplot“ oder „Paraview“ für die graphische Aufbereitung von wissenschaftlichen Daten eingelesen werden kann. Mit dem Programm FRP_LMD steht jetzt ein Simulationstool zur Verfügung, das unter Berücksichtigung der relevanten physikalischen Prozesse für das pulverbasierte Laserauftragschweißen in der Lage ist, das Temperaturfeld und die Spurgeometrie selbstkonsistent für Einzel- und Überlappspuren zu berechnen. Das Tool FRP_LMD kann unter anderem dazu genutzt werden, die Verfahrensparameter für den Anwendungsfall des generativen Aufbaus eines dünnwandigen Bauteils – wie zum Beispiel einer Blisk-Schaufel – mit ortsabhängiger Profilbreite einzugrenzen. Hierzu werden der Strahldurchmesser, die Laserleistung und die Verfahrensgeschwindigkeit wegababhängig angepasst (Abbildung 41).

Ergebnis bzgl. Spurweite bei wegababhängiger Anpassung der Laserleistung der Verfahrensgeschwindigkeit und des Strahldurchmessers



- Spurbreite wird wegababhängig reproduziert
- Approximativ konstante Spurbreite

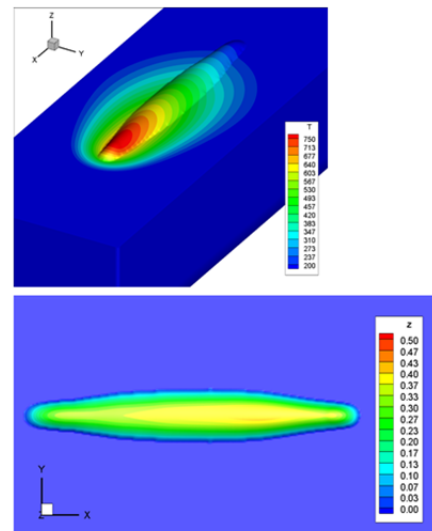
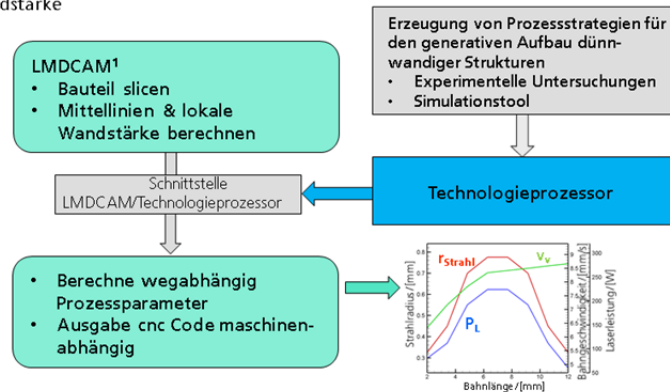


Abbildung 41: Berechnung eines Parametersatzes zum Laserauftragschweißen einer Einzelspur für wegababhängige Spurbreiten bei annähernd konstanter Spurbreite (links). Screenshot des Temperaturverlaufes T (rechts oben) und der erzielten Spurbreite z (rechts unten) einer zeitaufgelösten Berechnung einer Einzelspur für wegababhängige Spurbreiten.

Die aus diesem Softwaretool erhaltenen Ergebnisse bzgl. der Verfahrensparameter werden über eine Schnittstelle einem CAM Programm – zum Beispiel „LMDCAM“ – zur Ausgabe von Werkzeugbahnen für das Laserauftragschweißen zur Verfügung gestellt. Auf Basis von zuvor berechneten Mittelpunktspuren und der lokalen Wandstärke die erforderlichen Verfahrensparameter wegababhängig, unter Zuhilfenahme der Prozessdiagramme berechnet und den resultierenden CNC-Maschinencode ausgegeben (Ablauf vgl. Abbildung 42).

Datenkette für den generativen Aufbau eines dünnwandigen Bauteils mit lokal variierender Wandstärke



*Flemmer J., Pirch N., Drinck F., „LMDCAM2: Software tool for near-net repair, cladding and built-up by laser metal deposition“, 2015 ASME Manufacturing Science and Engineering Conference(MSEC) June 8-12, 2015, Charlotte, North Carolina, USA

Abbildung 42: Datenkette für den generativen Aufbau eines dünnwandigen Bauteils mit lokal variierender Wandstärke

Die mit dem Simulationstool berechneten Spurgeometrien und Aufmischungen zeigen bisher eine gute Übereinstimmung im Vergleich zu experimentellen Ergebnissen (Abbildung 43).

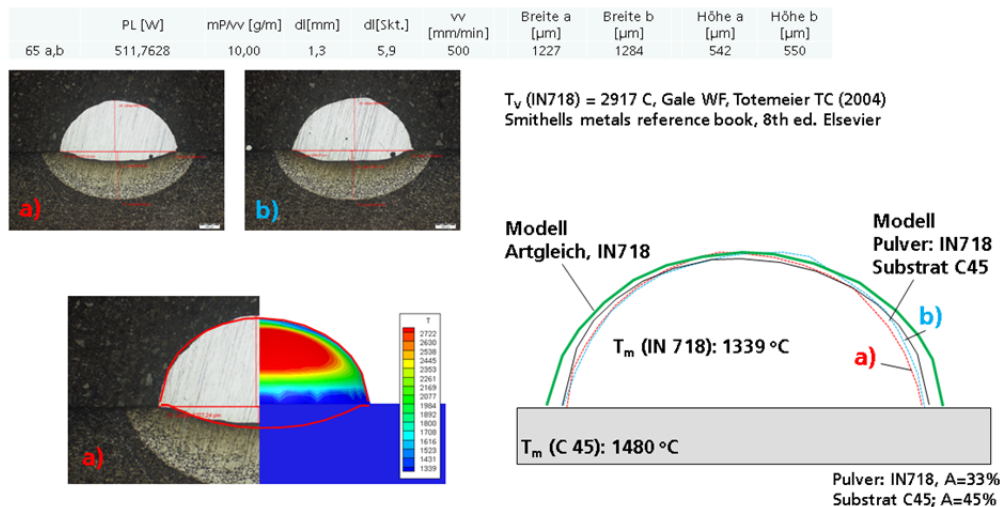


Abbildung 43: Vergleich Spurgeometrie und Aufmischung modelltheoretisch und experimentell.

Die Gültigkeitsgrenzen des Modells zur Ermittlung von beispielsweise Fehlergrenzen sind bisher nicht systematisch untersucht worden. Das heißt, wie genau beispielsweise die Leistungsdichteverteilung, die Partikeldichte, die Partikelgeschwindigkeit, insgesamt die Partikelcharakteristika vorgegeben werden müssen, um Prozessergebnisse wie Spurgeometrie, Aufmischung, Prozesstemperatur und Erstarrungsbedingungen innerhalb einer definierten z.B. einer $\pm 10\%$ Grenze vorhersagen zu können ist noch zu untersuchen.

Die in AP5.3 definierten Arbeitspakete sind damit erfolgreich abgeschlossen worden.

AP5.4: Laserauftragschweißen

Zur Adressierung der übergeordneten Ziele des Subclusters »Laser Cladding« (deutsch: Laserauftragschweißen, abgekürzt: „LA“), nämlich der werkstoff- und geometriespezifischen Bearbeitung, sind die Arbeiten in diesem AP in zwei weitere Arbeitspunkte unterteilt worden:

- Werkstoffadaption und Darstellung der Ergebnisse zum LA
- Entwicklung von Adaptionalgorithmen zur Geometriadaption.

Die experimentellen Untersuchungen zum LA dienen einerseits dazu die Arbeitspakete AP5.2 und AP5.3 mit einer konsistenten Datenbasis zu versorgen; andererseits dienen die Ergebnisse dazu Adaptionalgorithmen für die Anpassung von LA-Verfahrensparametern zu entwickeln (vgl. Kapitel 2: Reparaturprozesskette Multi-BliR). Hierzu sollen Startwerte für Verfahrensparameter und Bearbeitungsstrategien für die Reparatur mittels LA von Schaufelspitzengeometrien – wie zum Beispiel Kompressorschaukeln – experimentell ermittelt werden.

Zum Aufbau von Datensätzen für die Arbeitspakete AP5.1 bis AP5.3 und zur Entwicklung von Ansätzen zur Werkstoff- und Geometriadaption zum Laserauftragschweißen sind für zwei Pulverzusatzwerkstoffe – Inconel 718 (IN718) und 17-4PH – und zwei Substratgeometrien – Ebenen und dünne Stege – mittels statistischer Versuchsmethodiken Versuchspläne zum Aufschweißen von Einzelspuren und Stegen entwickelt worden. Hierzu sind die 4 Hauptverfahrensparameter Laserleistung PL, Vorschubgeschwindigkeit vv, Pulvermassenstrom mp und Laserstrahldurchmesser dL systematisch nach Versuchsplänen variiert worden. Diese Versuchspläne sind im Laufe des Vorhabens vollständig abgearbeitet worden, so dass mehr als 300 Versuche zum Aufschweißen von Einzelspuren und Stegen mittels LA durchgeführt und metallografisch untersucht worden sind.

Werkstoffadaption und Darstellung der Ergebnisse zum LA

Um Schweißergebnisse möglichst anschaulich für Endnutzer darstellen zu können sind Prozessdiagramme entwickelt worden. Mittels diesen können Schweißergebnisse bezüglich der erzielten Spurgeometrie – zum Beispiel Spurbreite und Spurbhöhe – für konstante Strahldurchmesser dL und konstante Vorschubgeschwindigkeiten vv dargestellt werden (vgl. Abbildung 44).

Prozessdiagramm für Einzelspuren IN718 auf Ebenen für $dL=1,3$ mm bei $v_v=500$ mm/min

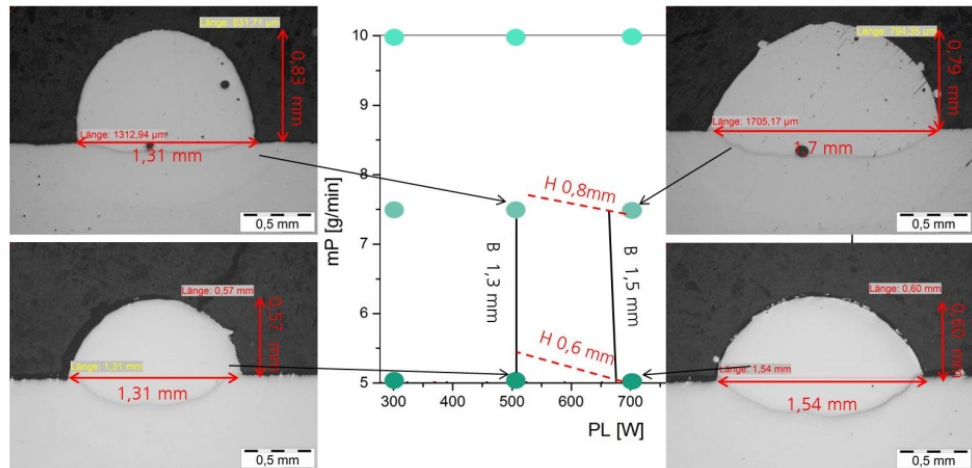


Abbildung 44: Aufstellen eines Prozessdiagrammes durch 9 Stützstellen. Interpolierte Spurbreiten B sind in schwarzen-durchgezogenen Linien, Spurbhöhen H sind in rot-gestrichelten Linien dargestellt.

Jeder Punkt in Abbildung 44 entspricht dabei einem durchgeführten Versuch. Die Versuche dienen als Stützpunkte zur Interpolation der Spurgeometrien zwischen diesen. Die Spurbreiten werden in schwarzen-durchgezogenen Linien, die Spurbhöhen in roten-gestrichelten Linien dargestellt (vgl. Abbildung 45).

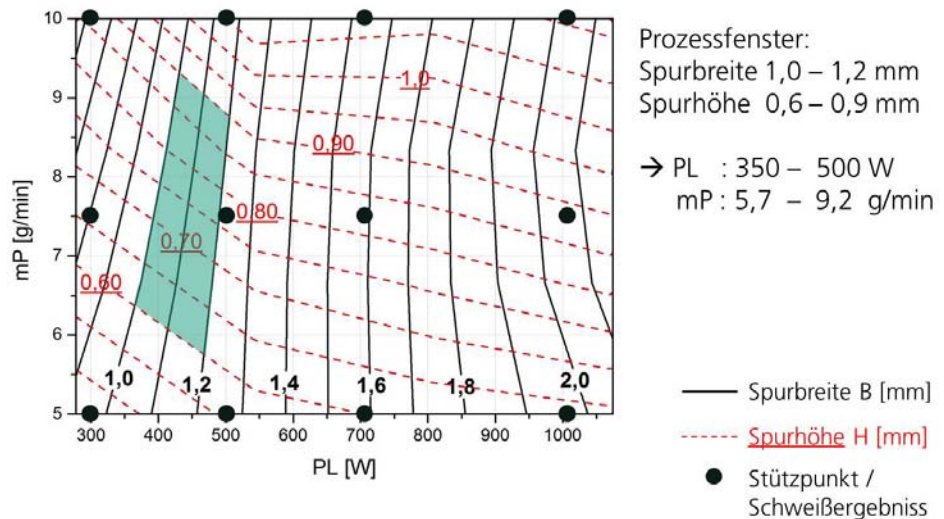


Abbildung 45: Darstellung eines Prozessdiagrammes für Einzelspuren IN718 auf Ebenen, bei einem Strahldurchmesser $dL=1,3$ mm. In grün ist ein Prozessfenster für 1,0-1,2 mm breite und 0,6-0,9 mm hohe Spuren dargestellt. Die Verfahrensparameter für Laserleistung PL und Pulvermassenstrom mP können unmittelbar aus dem Diagramm abgelesen werden.

Je Zusatzwerkstoff -d.h. Inconel 718 und 17-4PH- sind Prozessdiagramme für Vorschubgeschwindigkeiten von $v_v=250 - 750$ mm/min und Strahldurchmessern von $dL= 1,0 - 3,0$ mm erstellt worden. Durch einen Vergleich der Prozess-

diagramme für IN718 und 17-4PH ist eine Werkstoffadaption bzw. eine Einschätzung der erzielbaren Spurgeometrie in Abhängigkeit der eingestellten Verfahrensparameter und des ausgesuchten Zusatzwerkstoffes möglich. Aus Abbildung 46 können beispielsweise Prozessfenster zu LA von 1,2 - 1,5 mm breiten und 0,6 - 0,8 mm hohen Spuren abgelesen werden.

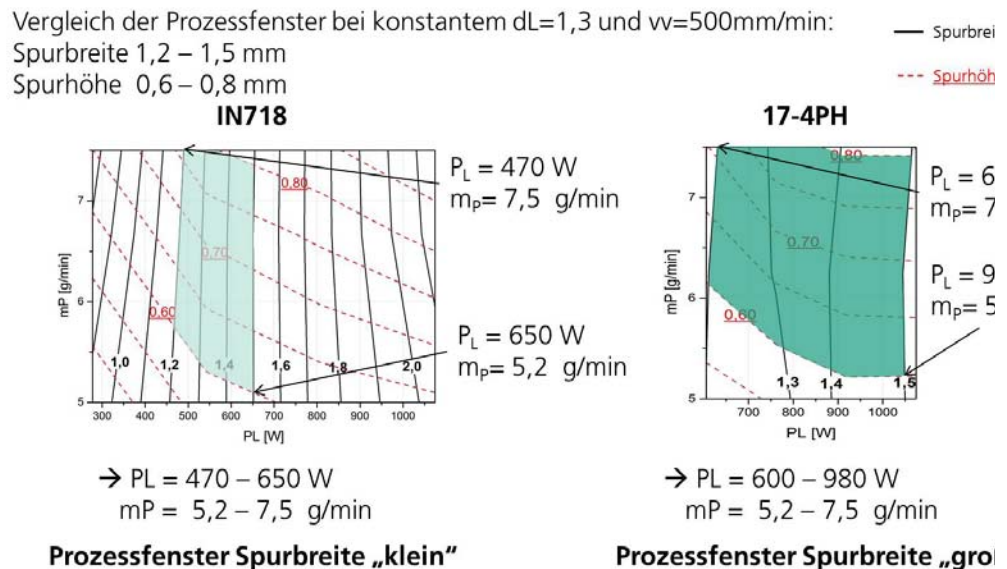


Abbildung 46: Vergleich der Prozessfenster beim LA von Einzelspuren bezüglich der Spurbreite und Spurbhöhe. In grün sind Verfahrensparameterfenster für 1,2-1,5 mm breite und 0,6-0,8 mm hohe Spuren dargestellt.

Aus Abbildung 46 folgt, dass bei gegebener Vorschubgeschwindigkeit und Strahldurchmesser, für eine definierte Spurgeometrie, nicht nur eine kleinere Laserleistung sondern auch ein kleineres Laserleistungsintervall bei der Verarbeitung von IN718 im Vergleich zu 17-4PH erforderlich ist.

Entwicklung von Adaptionalgorithmen zur Geometrieadaption

Da der Aufwand zur Erstellung der in Arbeitspunkt „Werkstoffadaption und Darstellung der Ergebnisse zum LA“ sehr groß ist und nicht für jede Parameterkombination Versuche vorliegen sind basierend auf experimentell durchgeführten Versuchen weitere Diagramme entwickelt worden, mittels derer zwischen vorliegenden Versuchsergebnissen und Geometrietypen – d.h. Ebene und dünne Stege – interpoliert werden kann.

Ein solches Interpolationsdiagramm ist in Abbildung 47 dargestellt. Daraus sind Einstellungen von Verfahrensparametern zum LA in Abhängigkeit des Substratgeomtrietyes abzulesen. So ist beispielsweise zum Aufschießen von Spurbreiten B mit $B=d_L > 1,0\text{ mm}$ auf ebenen Substratgeometrien (vgl. Abbildung 47, schraffierter Bereich) stets eine größere Laserleistung erforderlich als auf dünnen Stegen (Abbildung 47, kariierter Bereich). Dies ist auf eine kleinere Wärmeabfuhr in dünnen Stegen im Vergleich zu ebenen Substraten zurückzuführen.

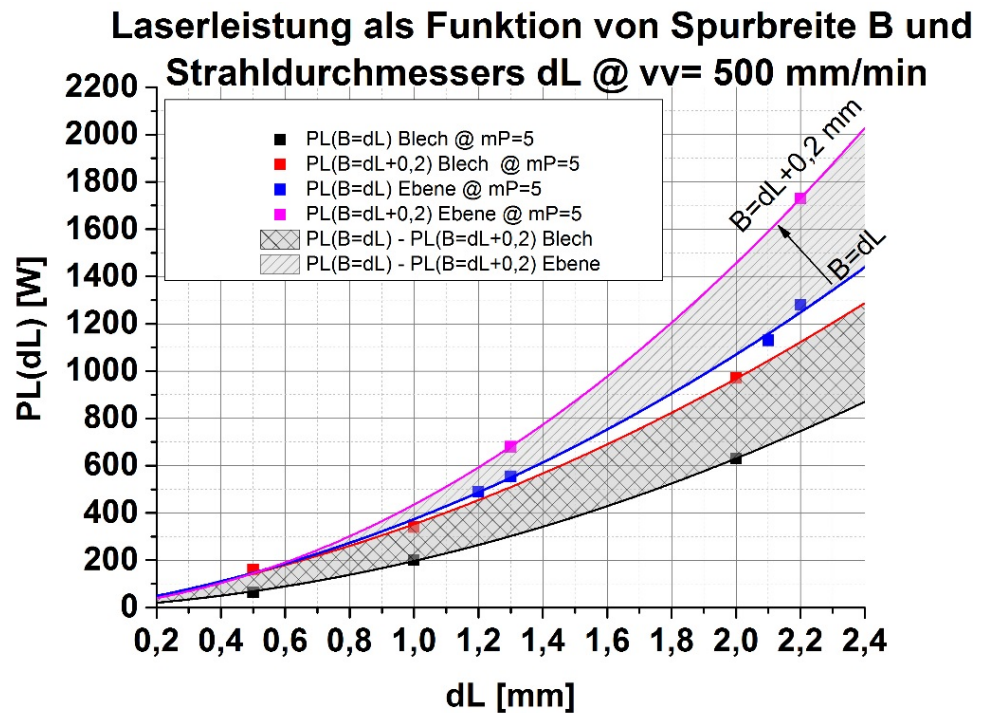


Abbildung 47: Interpolationsdiagramm für die Laserleistung PL in Abhängigkeit des Strahldurchmessers dL für Einzelspuren IN718 auf ebenen und dünnen Substratgeometrien. Exemplarisch dargestellt ist ein Interpolationsdiagramm für eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_v = 500$ mm/min und Pulvermassenstrom $m_P = 5$ g/min. Die schraffierten bzw. karierten Bereiche entsprechen Spurbreiten von $B = dL$ bis $B = dL + 0,2$ mm.

Durch die Aufarbeitung der Schweißergebnisse in Prozess- und Interpolationsdiagramme und die Verwendung dieser Diagramme zur Verfahrensparameteradaption für die Multi-BliR Reparatur (siehe Kapitel 2) werden alle Arbeiten in AP5.4 und alle Meilensteine erreicht.

Zusammenfassung Subcluster »Laser Cladding«

Zur Reduktion des experimentellen Aufwandes, zur Verkürzung der Entwicklungszeit und Darstellung von Prozess-Know-How im LA werden im Rahmen von AdaM Tools entwickelt, welche eine werkstoff- und geometriespezifische Bearbeitung von Reparaturaufgaben ermöglichen. Im Einzelnen sind dies:

- Die Entwicklung eines Konzeptes „Technologieprozessor“ (AP 5.1), welcher modular aus einer Datenbank (AP5.2) und Simulationstools (AP5.3) aufgebaut ist.
- Eine für das LA angepasste Datenbank (AP5.2) welche mit einer Datenbasis zum LA einer Nickelbasislegierung (IN718) und eines Stahls (17-4PH) ausgestattet ist.
- Zwei Softwaretools, welche die Charakterisierung des Laserstrahls und des Pulvergasstrahles ermöglichen. Ein Tool, welches zur modelltheoretischen Berechnung von LA Prozessergebnissen (wie Spurgeometrie, Er-

starrungsbedingungen, Temperaturverteilungen, etc.) verwendet werden kann.

- Prozessdiagramme, welche die Darstellung und Interpolation von experimentell ermittelten Schweißergebnissen für Einzelspuren und Stegen auf ebenen und dünnen Substratgeometrien zur Werkstoff- und Geometrieadaption ermöglichen.

3.2.4 Subcluster »Process Control«

Zielsetzung im Subcluster Process Control ist die Überwachung von Eingangs-, Prozess- und Ergebnisgrößen beim Laserauftragschweißen. Diese Informationen werden zur Umsetzung der adaptiven Produktion sowohl für die Prozessauslegung (offline) als auch für die Prozessführung (online) bereitgestellt. Hieraus ergaben sich folgende Aufgaben:

Die Charakterisierung des Pulvergasstrahls (AP 6.1) als Prozesseingangsgröße, die offline zu Dokumentationszwecken und als Eingangsgröße für die Prozessmodellierung (vgl. AP5.3: PDV_LAB) zur Verfügung gestellt wird. Die Überwachung der Schmelzbadgeometrie (AP 6.2), eine Prozessgröße, die offline für die Unterstützung der Prozessentwicklung verwendet wird. Sowie die Vermessung der Prozessgrößen Schmelzbadbreite und –position und der Ergebnisgröße „Schweißnahhöhe“, die online als Basis für die adaptive Prozessführung bereitgestellt werden. Diese Arbeiten werden im Rahmen von AP 6.3 „Integriertes Sensorsystem zur Pre-, In- und Post-Prozessüberwachung“ durchgeführt.

AP6.1: Charakterisierung des Pulvergasstrahls

Am Fraunhofer ILT wurde ein Verfahren zur Vermessung des Pulvergasstrahls von Pulverzufuhrdüsen für das Laserauftragschweißen entwickelt. Bei dem Verfahren werden mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Videos einzelner Schichten des Pulvergasstrahls aufgenommen und analysiert. Für die Berechnung der Partikeldichteverteilung ist es notwendig, die Partikel in den Einzelbildern der Videos detektieren zu können. Dies ist für einen Teil der im Projekt verwendeten Dreistrahlprüfstände, mit dem bisher zur Verfügung stehenden Aufbau nicht gegeben gewesen. Daher ist im Rahmen des Projekts ein an diese Anforderungen angepasstes System aufgebaut worden. Hierzu ist u.a. ein neuer Beleuchtungslaser entwickelt worden, der eine geringere Höhe der zu vermessenden Schicht (200µm), eine höhere Leistung (10W) sowie einen Pulsbetrieb ($> 2 \mu\text{s}$) zur Verfügung stellt. Da sich bei diesen Parametern weniger Partikel im Messvolumen während der Belichtungszeit befinden (vgl. Abbildung 48), können diese durch die folgende Bildverarbeitung eindeutig detektiert werden. Dies wird beim Vergleich von Einzelbildern in Abbildung 48 deutlich. Damit ist die Voraussetzung für die zuverlässige Vermessung der Partikeldichteverteilung, auch bei Prozessen mit hohen Partikeldichten, gegeben.

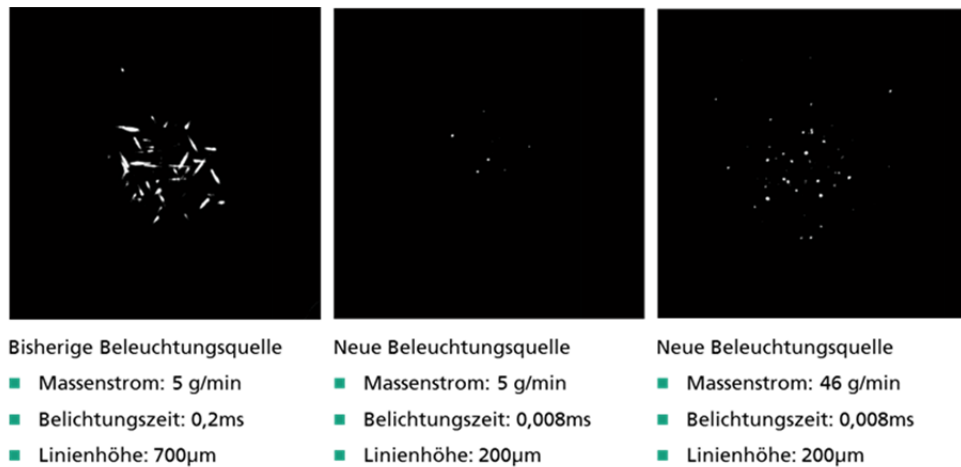


Abbildung 48: Vergleich von Einzelbildern mit den verschiedenen Beleuchtungsquellen

Die Ergebnisse sind in die Arbeitspakete Technologieprozessor LA (AP1), Datenbank (AP2) und Modellierung (AP3) des Subclusters Laserauftragschweißen eingeflossen. Die Daten der Partikelverteilung können in das, in AP5.3 entwickelte, PDV_LAB zur Charakterisierung des Pulvergasstrahls eingelesen und ausgewertet werden. Hierdurch können die Methoden zur Beschreibung der Dichteverteilungen abgeglichen und Erkenntnisse über die Absorption der Laserstrahlung im Pulver gewonnen werden.

Die Messtechnik ist im Rahmen des Projektes verwendet worden, um Düsen zu charakterisieren und vergleichbar zu machen. Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung geeigneter Kennzahlen, die aus den Messungen der Partikeldichteverteilung extrahiert werden (Meilenstein MS6.1). Neben den bisher definierten Kennzahlen, wie Abstand des Pulverfokus von Düsenausgang, Position des Pulverfokus relativ zur Pulverdüse, Durchmesser des Pulverfokus sind weitere Kennzahlen, wie „Rayleighlänge des Pulvergasstrahls“, Gleichmäßigkeit der Partikelverteilung oder Partikeldichteverteilung im Fokus (vgl. Abbildung 49) untersucht worden. Die Beschreibung der Partikelverteilung im Fokus ist an die Anforderungen der Prozessentwicklung angepasst worden.

Für die wirtschaftliche Prozessauslegung spielt der Pulverwirkungsgrad eine wesentliche Rolle. Die in Abbildung 49 dargestellte Aufbereitung und Visualisierung der Messergebnisse ermöglicht es dem Anwender den Durchmesser des Laserstrahls auf den des Pulverfokuses aufeinander abzustimmen.

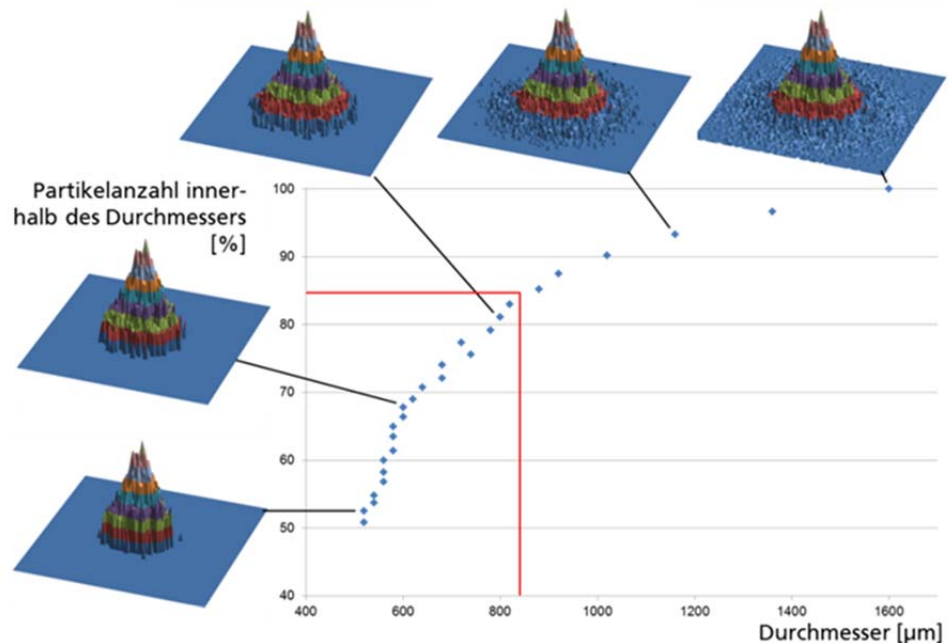
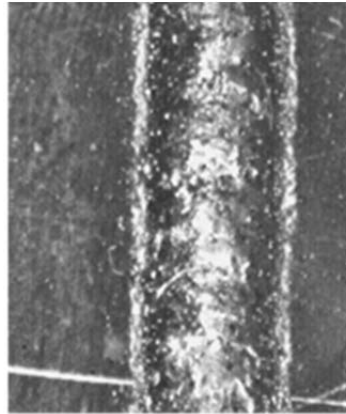


Abbildung 49: Anwendungsorientierte Beschreibung der Partikeldichteverteilung im Pulverfokus

AP6.2: Online-Überwachung der Schmelzbadgeometrie

Bei der Übertragung eines entwickelten LA-Schweißprozesses auf ähnliche Bauteile führen veränderte Randbedingungen zu einem erheblichen Aufwand, da es zu Abweichungen im Prozessverlauf und damit im Prozessergebnis kommen kann. Das definierte Einstellen einer Soll-Schmelzbadgeometrie kann für die Übertragung eines entwickelten Prozesses genutzt werden, um auf diesem Weg die gewünschte Qualität zu erzielen. Am Fraunhofer ILT ist ein Messverfahren entwickelt worden, das aufgrund einer zusätzlichen Prozessbeleuchtung unabhängig von Intensitäten und Schwellwerten ist und damit die Übertragung von Messwerten aus verschiedenen Anlagen und Prozessen erlaubt. Im Rahmen des Projektes ist das Verfahren genutzt worden, um bei Parameterstudien die Schmelzbadgeometrie zu analysieren, zu dokumentieren und mit den Prozessergebnissen zu korrelieren.

Das bisher zur Verfügung stehende System arbeitete mit einer lateralen Beleuchtung von 24 Hochleistungs-LED's und weisen eine entsprechend große Störkontur (äußerer Durchmesser 200mm) auf. Durch neue Entwicklungen im Bereich der VCSEL (Vertical-Cavity-Surface-Emitting-Laser) steht mit diesen Bauelementen eine interessante Alternative für eine Prozessbeleuchtung zur Verfügung, um den benötigten Bauraum zu reduzieren und gleichzeitig die Beleuchtungsstärke (4W) signifikant zu erhöhen. Wie in Abbildung 50 erkennbar, kann so die gleiche Bildqualität mit deutlich weniger Beleuchtungsquellen und gleichzeitig reduzierter Belichtungszeit, erreicht werden.



- 24 LED's á 0,2W
- Abstrahlwinkel: 180°
- Belichtungszeit: 500µs



- 4 VCSEL á 4W
- Abstrahlwinkel: 14°
- Belichtungszeit: 30µs

Abbildung 50: Vergleich einer beleuchteten Schweißnaht mit LED und VCSEL

Dies macht VCSEL zu einer idealen Beleuchtungsquelle von Laserprozessen. Im Rahmen des Projektes ist ein neues Beleuchtungsmodul auf VCSEL-Basis entwickelt, aufgebaut und erprobt worden. Wie im Abbildung 51 erkennbar, konnte die Störkontur signifikant reduziert werden, um den Einsatz im industriellen Umfeld zu ermöglichen.

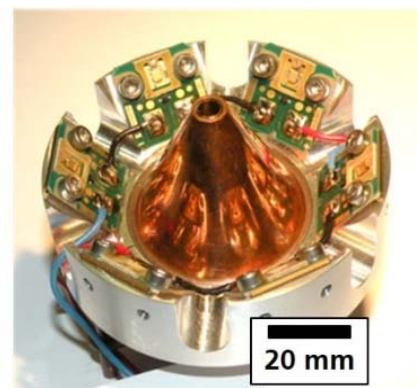
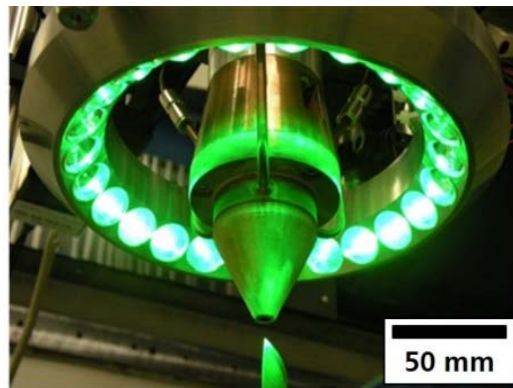


Abbildung 51: Beleuchtungsmodule, Ring mit 24 High Power LED's (links), Ring mit 6 VCSEL (rechts)

AP6.3:

Integriertes Sensorsystem zur Pre-, In- und Post Prozessüberwachung

Das Verfahren zur Überwachung der Schmelzbadgeometrie mittels Fremdbeleuchtung, wie es in AP6.2 eingesetzt wird, ist auf die Sichtbarkeit einer vorhandenen Bauteilgeometrien angewiesen. Im Projektverlauf ergab sich, dass die zur Demonstration ausgewählte Bauteil und Anwendungsfall – nämlich die Schaufelspitzenreparatur einer Multi-BliR mittels Laserauftragschweißen – diese Anforderungen nicht ausreichend erfüllen, daher sind in AP6.3 andere Überwa-

chungsverfahren untersucht worden. Mit der Überwachung der thermischen Emissionen des Laserauftragschweißprozesses ist durch Mehraufwand dieses Verfahren prototypisch umgesetzt und die Eignung als Messsignal nachgewiesen worden.

Die Überwachung der thermischen Emissionen aus dem Prozess ist genutzt worden, um das integrierte Sensorsystem aufzubauen. In Abbildung 52 sind Einzelbilder von Videoaufnahmen bei Schweißungen auf Stegen mit der Breite 0,5 mm, 1 mm und 2 mm dargestellt. Aus diesen Videos werden mit entsprechenden Algorithmen die jeweilige Position des linken und des rechten Randes des Schmelzbades, sowie die Breite des Schmelzbades ermittelt.

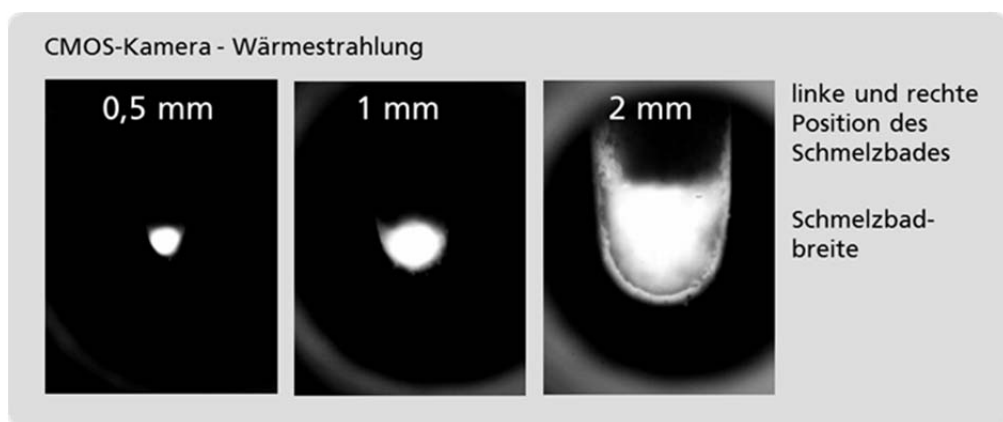


Abbildung 52: Überwachung der emittierten Wärmestrahlung

Des Weiteren können mit diesem System sowohl die Position des Bauteils als auch die Position des Bearbeitungslasers vermessen und dokumentiert werden. Parallel zum kamerabasierten Überwachungssystem ist ein Triangulationssensor an die Schweißoptik angebracht worden, der im Nachlauf der Bearbeitung die Höhe der aufgetragenen Schweißnaht vermisst. Mit diesen Sensorsignalen stehen alle Informationen zur Verfügung, die für die Umsetzung einer adaptiven Prozessführung von Schweißlage zu Schweißlage erforderlich sind. Die Position des Schmelzbades relativ zur Position von Bauteil und Bearbeitungslaser ermöglicht eine Korrektur der Schweißbahn im Falle eines Verzuges des Bauteils. Die Informationen über Breite und Höhe der Schweißnaht erlauben eine lagenweise Anpassung von Verfahrensparametern, wie Laserleistung oder Pulvermassenstrom. Im Rahmen von experimentellen Versuche zum LA (siehe AP5.4) sind Messungen an Einzelspuren und Stegen auf dünnen Substratgeometrien durchgeführt und Ergebnisse dieser Messungen im Rahmen eines AdaM-Workshops vorgestellt worden (vgl. 2. Zwischenbericht). Aus den Messsignalen kann zum Beispiel die Position der aufgeschweißten Lagen eines Steges, sowie die Schweißspurbreite und Schweißspurhöhe in Abhängigkeit der Lagenanzahl zur Verfügung gestellt werden.

Neben dem Aufbau einer geeigneten Hardware ist eine Software zur Datenakquise und -auswertung, eine GUI zur Parametrisierung und Visualisierung, sowie eine Anbindung an eine Anlage zum LA entwickelt worden. Über die GUI

können beispielsweise wichtige Einflussparameter auf den Prozess eingerichtet und dokumentiert werden. Dazu gehört die Positionen des Laserstrahls, des Pulverfokuses und der Düsenaustrittsöffnung relativ zur Position des Bauteils zu dokumentieren und im Livebild anzuzeigen (Abbildung 53).

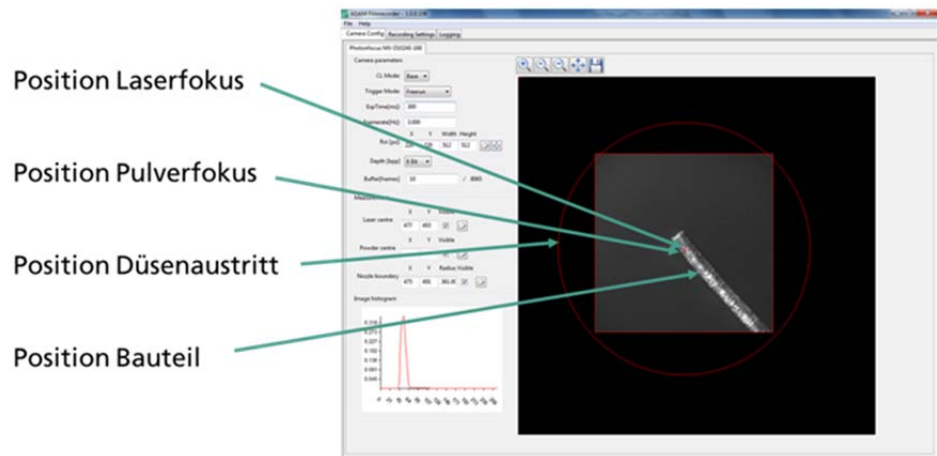


Abbildung 53: GUI des integrierten Sensorsystems

Zusammenfassung des Subclusters »Process Control«

Im Rahmen von AdaM sind folgende Arbeiten durchgeführt worden:

- AP6.1 – Entwicklung einer Vorgehensweise, eines Aufbaus und Kennzahlen für Pulverzufuhrdüsenzertifikate zur Automatisierten Vermessung der Partikeldichteverteilung unter standardisierten Messbedingungen
- AP 6.2 – Entwicklung eines kompakten Beleuchtungsmoduls auf VCSEL-Basis zur Prozessüberwachung der Schmelzbadgeometrie beim Laserauftragschweißen
- AP 6.3 – Entwicklung eines Integriertes Sensorsystem zur koaxiale Überwachung der thermischen Emissionen des Laserauftragschweißprozesses für eine echtzeitfähige Überwachung von Schweißergebnissen und des Verzuges während des LA; wie die Schmelzbadposition auf dem Bauteil (Verzug) und die Schmelzbadbreite ist durchgeführt worden
- AP6.3 – Entwicklung einer Software zur Dokumentation der Positionen von Laserstrahl- und Pulverfokusposition, Düsenapertur, sowie Bauteilpositionierung und Schmelzbadgeometrie

3.2.5 Subcluster »Laser Ablation«

AP7.1: Definition von Prozessdomänen

Im Subcluster Laser Ablation ist der Einsatz von kurz und ultrakurz gepulster (UKP) Laserstrahlung zum Materialabtrag und zur Oberflächenstrukturierung für die Werkstoffe IN718 und Ti 6246 adressiert worden. Für Pulsdauern von 10 ns bis 1,5 ps ist der Laserabtragprozess hinsichtlich erzielbarer Produktivität und Qualität untersucht worden.

Als Produktivitätskriterium ist die Volumenabtragsrate, als Qualitätskriterien die Oberflächenrauheit und die resultierende Schmelzfilmdicke betrachtet worden. Dabei konnten in Abhängigkeit der Verfahrensparameter charakteristische Domänen hinsichtlich dieser Kriterien identifiziert werden. Grundsätzlich besteht der Zusammenhang, dass größere Laserleistungen zwar zu größeren Abtragsraten führen, aber gleichzeitig auch die thermische Beeinflussung und die Oberflächenrauheit durch Schmelzaufwürfe oder durch das Auftreten von selbstorganisierten Mikrostrukturen größer wird. Für UKP-Laserstrahlung wird die Besonderheit beobachtet, dass hinsichtlich der Oberflächenrauheit eine Prozessdomäne existiert, in der bei vergleichsweise großer mittlerer Leistung durch Erzeugung eines dünnen Schmelzfilms an der Oberfläche eine Oberflächenrauheit $R_a < 2 \mu\text{m}$ realisiert werden kann. Diese Prozessdomäne bildete im Projektverlauf den Ausgangspunkt, um einen UKP-Abtragprozess mit gesteigerter Abtragsrate zu entwickeln.

AP7.2: Maximierung der Abtragsraten

Bei der Maximierung der erzielbaren Abtragsraten für eine Pulsdauer von 10 ns, ist beobachtet worden, dass bei diesen Pulsdauern starke Abschirmeffekte auftreten, die die Abtrageffizienz begrenzen. Aus diesem Grund ist diese Pulsdauer ungeeignet, um große Abtragsraten bei der Bearbeitung von IN718 und Ti 6246 zu erzielen. So beträgt bei Verwendung von ns gepulster Laserstrahlung mit 35 W mittlerer Leistung die maximal erzielte Abtragsrate für IN718 $1,1 \text{ mm}^3/\text{min}$ und für Ti 6246 $0,8 \text{ mm}^3/\text{min}$.

Für UKP-Laserstrahlung ist ausgehend von der Identifikation geeigneter Prozessdomänen, die Skalierung der Abtragsrate über einen neuen Prozessansatz verfolgt worden. Dazu werden die Verfahrensparameter so gewählt, dass beim Abtragprozess ein dünner Schmelzfilm am Abtraggrund entsteht, durch den die Bildung von unregelmäßigen Mikrostrukturen verhindert wird. Andererseits muß das Auftreten von zu stark ausgeprägten Schmelzfilmen und unkontrolliertem Schmelzaufwurf verhindert werden, um einen möglichst homogenen Abtraggrund zu erzeugen. Die maximal erreichte Abtragsrate für IN718 beträgt $8,5 \text{ mm}^3/\text{min}$ bei einer Oberflächenrauheit von $R_a < 1,7 \mu\text{m}$. Für Ti 6246 beträgt die maximale Abtragsrate $8 \text{ mm}^3/\text{min}$ bei $R_a < 1,6 \mu\text{m}$.

Durch das ermittelte Prozessfenster für maximierte Abtragsraten („Hochrateabtrag“) lassen sich die Prozesszeiten beim UKP-Laserabtrag im Vergleich zum Stand der Technik um einen Faktor 20 verkürzen. Der resultierende Schmelzfilm kann optional in einem zweiten Prozessschritt (ähnlich dem Schlichten), der auf der Nachbearbeitung mit konventionell verwendeten Verfahrensparametern beruht („Präzisionsabtrag“), entfernt werden. In Abbildung 54 a) ist die Nachbe-

arbeitung eines per SLM gefertigten Quaders dargestellt. In Abbildung 54 b) ist das Ergebnis eines solchen Prozesses exemplarisch für den Abtrag einer Mockup-Schaufelgeometrie für IN718 gezeigt. Die Bearbeitungszeit für die gezeigte Struktur beträgt 4.5 Stunden. Durch Laserabtrag konnte der Mittenrauwert von $R_a \approx 20 \mu\text{m}$ auf $R_a \approx 4,5 \mu\text{m}$ verkleinert werden.

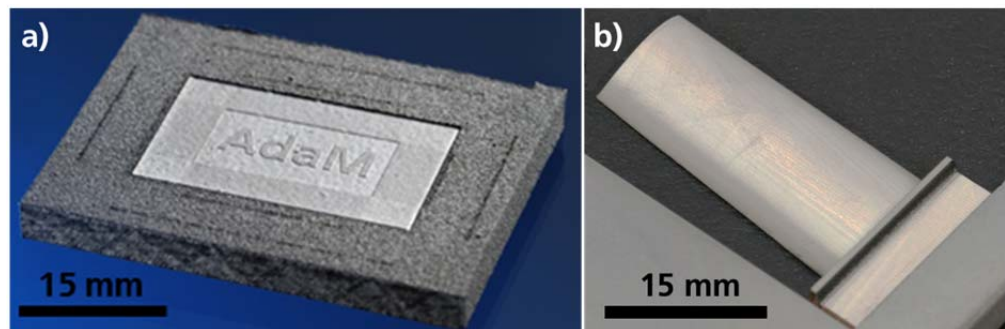


Abbildung 54: a) UKP-Laserabtrag an per SLM hergestelltem Quader aus In718. Die Oberflächenrauheit konnte von $R_a = 20 \mu\text{m}$ auf $R_a = 4 \mu\text{m}$ verkleinert werden. b) UKP-Laserabtrag einer Schaufelgeometrie aus Vollmaterial (IN718). Die Bearbeitungszeit beträgt 4.5 Stunden.

AP7.3: Charakterisierung von Oberflächen und Randschichten

Der thermische Einfluss der Laserabtragprozesse ist mittels Querschliffen analysiert worden. In Abbildung 55 sind Querschliffe von abgetragenen Kavitäten auf IN718 mit verschiedenen Vergrößerungen (links) und für verschiedene Pulsdauern (rechts) dargestellt.

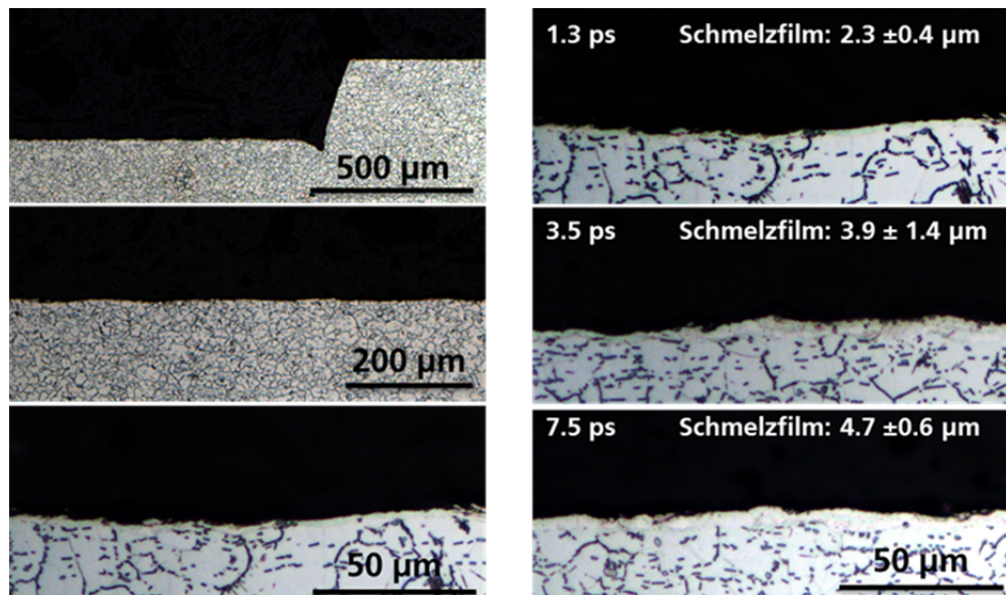


Abbildung 55: Querschliffe von mittels Laserabtrag erzeugten Kavitäten in verschiedenen Vergrößerungen (links) und für verschiedene Pulsdauern (rechts).

Bis auf einen dünnen Schmelzfilm mit einer Dicke unter 6 µm wird hierbei keine Beeinflussung des Gefüges festgestellt. Bezüglich der ermittelten Schmelzfilmdicken kann eine Tendenz hin zu kleineren Schmelzfilmdicken für die Verwendung von kleineren Pulsdauern abgeleitet werden. Kleine Pulsdauern bis in den Bereich von einer Pikosekunde vergrößern also nicht nur die erreichbare Abtragsrate, sondern führen gleichzeitig zu reduzierten Schmelzfilmen. Die Schmelzfilmdicken beim Abtrag mit ns gepulster Laserstrahlung betragen zwischen 7 µm und 14 µm. Per energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) wird für die Verwendung von ns gepulster Laserstrahlung starke Oxidation an den bearbeiteten Oberflächen gemessen. Für UKP-Laserstrahlung mit vergleichsweise großer mittlerer Leistung (bis 70 W - „Hochrateabtrag“) wird ebenfalls eine Oxidation der Oberfläche detektiert, allerdings ist der Sauerstoffanteil um einen Faktor 3 kleiner. Oberflächen, die beim UKP-Abtrag mit vergleichsweise kleiner mittlerer Leistung (bis 3W - Präzisionsabtrag) erzeugt werden, weisen keine Oxidationen auf.

AP7.4: Herstellung von texturierten Oberflächen

Der Begriff „Texturierte Oberflächen“ bezeichnet Oberflächen, auf denen funktionale Strukturen aufgebracht sind. Mögliche Anwendungen solcher Strukturen sind Oberflächen, die Schmutz abweisen, Eisbildung verhindern oder besonders gute Benetzbarkeit für Schmierstoffe aufweisen. Oberflächenstrukturen können in statistische und deterministische Strukturen unterteilt werden. Statistische Strukturen bezeichnen in diesem Zusammenhang selbstorganisierte Strukturen, die sich beim Ultrakurzpuls-Laserabtrag für bestimmte Verfahrensparameter mit unterschiedlicher Morphologie ausbilden. Deterministische Strukturen bezeichnen dagegen Strukturen, die durch direkte Strukturierung kontrolliert hergestellt werden. Da es sich um sehr grundlegende Untersuchungen handelt, werden die Strukturen zunächst charakterisiert, indem der Kontaktwinkel gemessen wird, der sich beim Kontakt mit Wasser einstellt (siehe Abbildung 56). Dies ist ein Maß für die Benetzbarkeit der Oberfläche und zeigt wie die Oberflächeneigenschaften grundlegend durch die Strukturierung beeinflusst werden können. Durch statistische Oberflächenstrukturierung konnte durch Variation der Verfahrensparameter Kontaktwinkel zwischen 20° und 126° und auf IN718 und für Ti 6246 Kontaktwinkel zwischen 24° und 92° eingestellt werden. Durch die gezielte, deterministische Oberflächenstrukturierung konnten für IN718 Kontaktwinkel zwischen 20° und 125° demonstriert werden.

Mit der Herstellung und Charakterisierung der in AP7.4 gefertigten Oberflächenstrukturen sind alle Arbeitspakete des Subclusters »Laser Ablation« erfolgreich abgeschlossen worden.

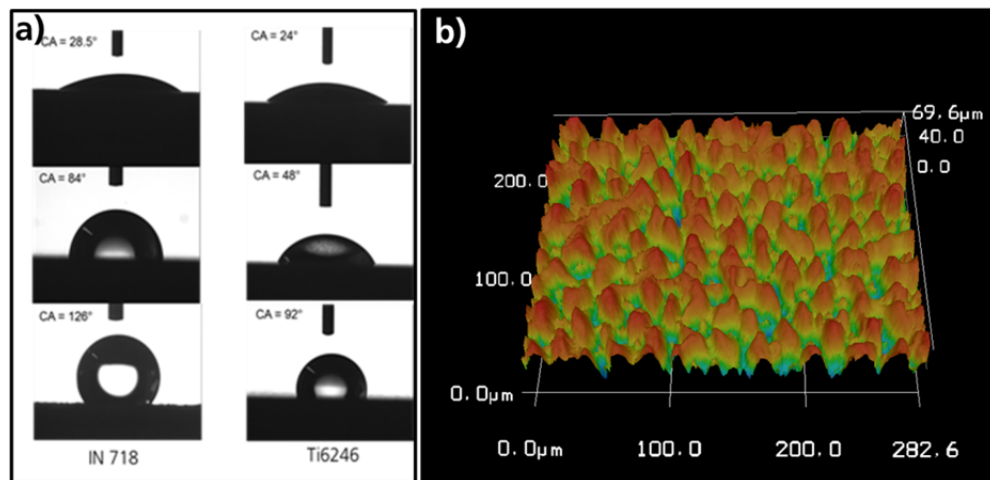


Abbildung 56: a) Kontaktwinkelmessungen für unterschiedliche statistische Oberflächenstrukturen auf IN718 und Ti 6246. b) 3D-Darstellung einer typisch statistischen Oberflächenstruktur auf Ti 6246

Zusammenfassung des Subclusters »Laser Ablation«

Im Rahmen von AdaM sind folgende Arbeiten durchgeführt worden:

- Erstmals ist für die Werkstoffe IN718 und Ti 6246 das Abtragen mittels kurzpuls Laserstrahlquellen adressiert worden. Für Pulsdauern von 10 ns bis 1,5 ps ist der Laserabtragprozess hinsichtlich erzielbarer Produktivität und Qualität untersucht worden.
- Die maximale Produktivität, bei gleichzeitig großer Oberflächengüte, konnte mittels einer UKP-Laserstrahlquelle erzielt werden. Die Abtragraten liegen bei 8 mm³/min für Ti 6246 bzw. bei 8,5 mm³ für IN718. Dies liegt um einen Faktor 20 über dem Stand der Technik. Die Oberflächenqualität liegt dabei für Ti6246 bei Ra < 1,6 µm; für IN718 bei Ra < 1,7 µm.
- Die Entstehung und Dicke von Schmelzfilmen während des kurzpuls Laserabtrags ist untersucht worden. Bei Verwendung von ps-Laserstrahlung werden typische Schmelzfilmdicken zwischen 2 und 7 µm ermittelt. Bei Verwendung von ns-Laserstrahlung sind die Schmelzfilmdicken größer. Entstehende Schmelzfilme können durch einen nachgelagerten Feinabtrag mittels UKP-Laserstrahlung entfernt werden.
- Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von funktionellen Oberflächen mittels UKP-Laserstrahlung sind durchgeführt worden. Für In718 und Ti-6246 sind durch Anpassung von Verfahrensparametern die Kontaktwinkel vergrößert worden (vgl. Abbildung 56). Dies kann zum Beispiel zur Erzeugung von hydrophoben Oberflächenstrukturen eingesetzt werden.

3.3 Technologiecluster Machining

Des Technologiecluster »Machining« gliedert sich in folgende Subcluster auf:

- Milling & Turning (Zerspantechnologie)
- Grinding (Zerspantechnologie)
- Clamping (Spanntechnologie)
- Process Control (Prozessüberwachung)

3.3.1 Subcluster »Milling & Turning«

Die Zielsetzung des Subclusters Milling & Turning ist es, Methodiken und Hilfsmittel bereitzustellen, um Prozessauslegung systematisch betreiben zu können und somit flexibel auf Produktinnovationen reagieren zu können. Weiterhin ist die mehrachsige Strategieentwicklung wesentlicher Bestandteil, um gezielt bestimmte Bauteileigenschaften wie bspw. die Oberfläche einzustellen. Der Subcluster »Milling & Turning« (AP8) ist in vier Arbeitspakete unterteilt.

AP8.1: Analytik der Eingriffsbedingung

Innerhalb von AP 8.1 wurden mikrogeometrische Modelle entwickelt, um die Spannungsgeometrie für komplexe Fräsoperationen analytisch berechnen zu können. Die Geometrie des je Schneide zu zerspanenden Materials lässt sich bspw. durch Spannungsbreite, -dicke und weitere Kenngrößen beschreiben. Diese Kenngrößen dienen zur Bewertung der Eingriffssituation und als Basis für die Kalkulation der auftretenden Zerspankraft. Grundsätzlich handelt es sich dabei um eine detaillierte Betrachtung der Zustandsgrößen für einen bestimmten Punkt auf der Werkzeugbahn. Das Vorgehen zur Analyse vollständiger NC-Bahnen ist in AP1.2 dargestellt. Die Umsetzung in einer Software und exemplarische Ergebnisse zeigt die folgende Abbildung.

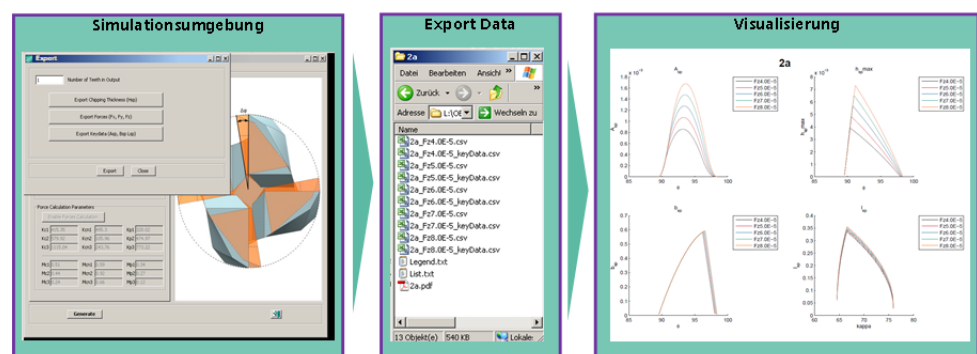


Abbildung 57: Berechnungssoftware zur Kalkulation von Spannungsgeometrien für komplexe Fräsprozesse

Die Modellbildung ist abgeschlossen und die Ergebnisse wurden durch Experimente validiert. Des Weiteren wurde das abbildbare Werkzeugspektrum erweitert, z.B. um Tonnenfräser und Mehrschneidenwerkzeuge. Die Softwareumgebung erzeugt Ausgabedaten in einem austauschbaren Datenformat (csv-

Daten). Das System befindet sich aktuell in der Erprobungs- und Optimierungsphase. Weiterhin finden derzeit Arbeiten statt zur Verbindung der beiden Simulationsmodelle (Makro- und Mikrosimulation). Hierbei werden zunächst die makrogeometrischen Eingriffsbedingungen numerisch im Makromodell (vgl. Kapitel 3.1.1) berechnet. Die Ergebnisse hieraus sind die Eingangsgrößen für das Mikromodell, welches analytisch die mikrogeometrischen Eingriffsbedingungen berechnet. Durch diese Kombination ist es möglich, für umfangreiche und komplexe NC-Programme und verschiedenen Werkzeuggeometrien die Eingriffsbedingungen und -größen exakt zu bestimmen.

AP8.2: Mehrachsige Hochleistungsbearbeitung für verschiedene Anwendungen

In AP8.2 wurden zwei Prozesse mit industrieller Relevanz und Potenzial zur Einsparung von Ressourcen entwickelt und optimiert. Hierbei handelt es sich zum einen um eine Weiterentwicklung der konventionellen Drehbearbeitung, zum anderen um die Adaptierung des trochoidalen Fräsens auf neue Bauteile.

Anwendung: Drehbearbeitung

Das Hinzufügen von zusätzlichen Bewegungsachsen zu bestehenden Verfahren führt in der Regel zu einer Steigerung der Flexibilität welche sich wiederum in wirtschaftliche Vorteile transferieren lässt. In AdaM wurde deshalb das konventionelle (zweiachsige) Drehverfahren um eine dritte Bewegungsachse (dreiachsiges Drehen) erweitert. Die hierdurch entstehenden wirtschaftlichen Vorteile überwiegen bei den hochkomplexen, schwer zu zerspanenden Turbinenkomponenten in der Regel die notwendigen Investitionen.

Innerhalb von AdaM wurde der Prozess des simultanen dreiachsigen Drehens weiterentwickelt. Um diesen auch für industrielle Anwender nutzbar zu machen, wurde in AdaM eine Regel- und Modellbasierte Methodik zur Auslegung des Prozesses entwickelt bzw. verifiziert. Diese erlaubt es dem industriellen Anwender, wichtige Zielgrößen, wie z.B. Zerspankraft, Werkzeugverschleiß, Oberflächengüte etc. vorherzusagen und den Prozess systematisch entsprechend auszulegen bzw. anzupassen.

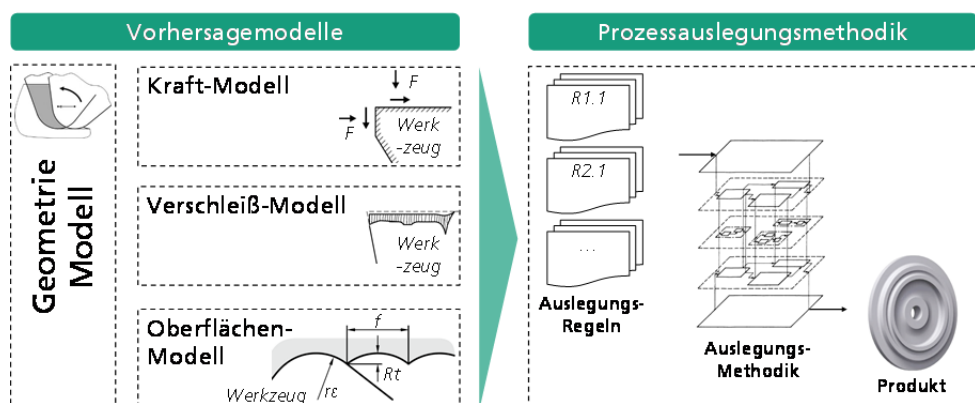


Abbildung 58: Modellbasierte Auslegungsmethodik für das simultane dreiachsige Drehen

Im bilateralen Teil von AdaM wurde das Verfahren des simultanen dreiachsigen Drehens beim industriellen Anwender getestet und erprobt. Es wurde gezeigt, dass die Werkzeugkosten durch das Verfahren um mehr als die Hälfte reduziert werden können. Weitere Vorteile sind:

- ~60% weniger Wendeschneidplatten
- ~15% kürzere Bearbeitungszeit
- ~20% weniger Gesamt-Bearbeitungskosten

Infolgedessen wird das Verfahren derzeit in die Serienfertigung implementiert.

Anwendung: Fräsbearbeitung

Für die Erzeugung der komplexen Schaufelgeometrie der Multi-BLiR ist vor AdaM lediglich die konventionelle Nutfrässtrategie im Bereich des Schruppens zum Einsatz gekommen. Alternative Bearbeitungsstrategien sind trotz der Potenziale zur Effizienzsteigerung, die bereits anhand anderer Komponenten wie z.B. bei Radialverdichtern gezeigt werden konnten, nicht betrachtet worden.

Im Rahmen von AdaM wurde nun die Adaptierung alternativer Schrubbearbeitungsstrategien realisiert. Sowohl die Tauchfräsbearbeitung, als auch die trochoidale Taumelfräsbearbeitung wurden als alternative Schrubbearbeitungsstrategien erprobt, vgl. Abbildung 59. Die trochoidale Taumelfräsbearbeitung ist dabei mit einer speziellen Software ausgelegt worden, die vom Fraunhofer IPT entwickelt wurde und in AdaM an die Anforderungen der vorliegenden Bauteilgeometrie angepasst wurde. Insbesondere durch die Anwendung der Taumelfräsbearbeitung konnte die Prozessflexibilität, -wirtschaftlichkeit und -sicherheit im Vergleich zum konventionellen Prozess deutlich gesteigert werden.

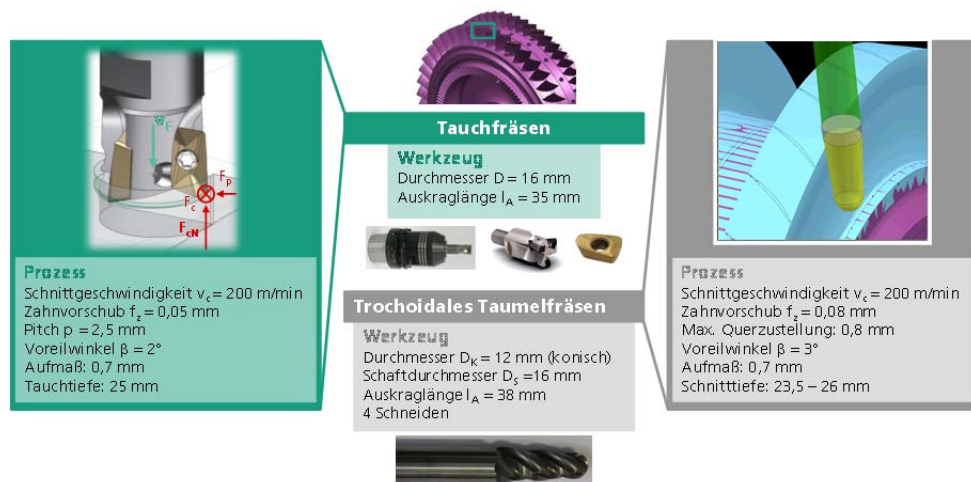


Abbildung 59: Adaptierung des Tauchfräsens und des trochoidalen Taumelfräsens auf die Multi-BLiR

AP8.3: Methodenbasierte Prozessauslegung

Im industriellen Standard werden Zerspankennwerte für die Bearbeitung neuer Werkstoffe in iterativen und damit langwierigen Zerspanversuchen und auf Basis von Erfahrungswissen ermittelt. Um dem Prozessplaner schnell Zerspanungskennwerte an die Hand geben zu können, wurde eine methodische Vorgehensweise zur Fräsprozessauslegung von Turbomaschinenlegierungen implementiert. Die Zerspanungskennwerte (z.B. Zerspankräfte, -temperaturen und Kennwerte der Spanbildung sowie Bauteiloberflächenintegrität) werden mittels **einer systematischen und standardisierten Vorgehensweise** im Vorfeld zu Versuchen auf Werkzeugmaschinen ermittelt. Hierdurch kann zum einen die Dauer der Prozessauslegung reduziert und zum anderen die Leistungsfähigkeit der Einzelbearbeitungsprozesse verbessert werden.

Die Gesamtvorgehensmethodik zur methodischen Prozessauslegung ist in Abbildung 60 illustriert. Im Rahmen eines industriellen Fallbeispiels zur Zerspanbarkeitsanalyse zweier Nickelbasislegierungen (NiCr19NbMo und Inconel 718 DA) konnte diese verifiziert werden. Die Methodik wurde, auch durch die Anmerkungen aus dem Konsortium, stückweise optimiert.

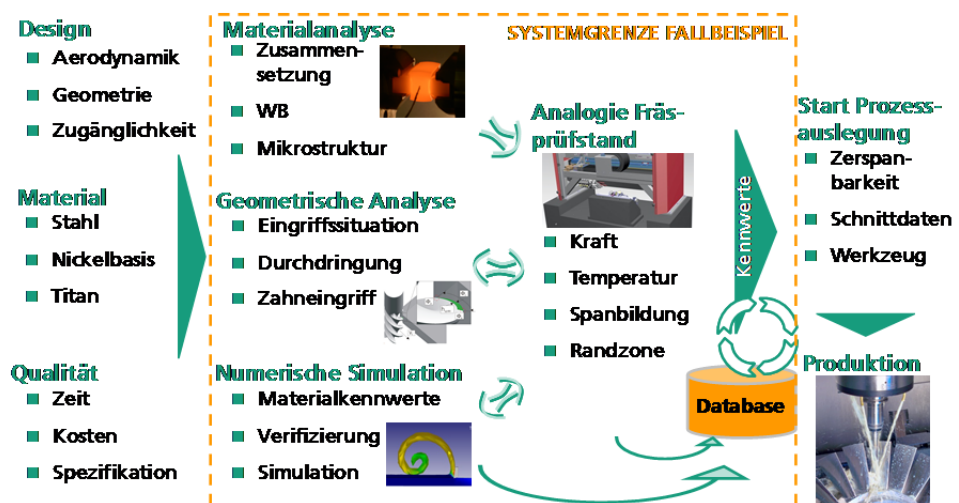


Abbildung 60: Gesamtvorgehensweise zur Prozessauslegung

Auf Basis der industriell definierten Spezifikationen hinsichtlich Bauteildesign und -material sowie Qualität wird während der „Materialanalyse“ das mechanische Verhalten der zu bearbeitenden Werkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur und Dehnrates ermittelt. Hierdurch finden zerspanungsspezifische Belastungen, wie sie in realen Fräsprozessen relevant sind, schon zu Beginn der Prozessauslegung Berücksichtigung. Die „Geometrische Analyse“ liefert, in Abhängigkeit der Prozessdaten (Frässtrategie und Schnittparameter) und Werkzeugspezifikation, die Spanungsgeometrie eines zu bearbeitenden Spans des Realprozesses, vgl. Kapitel. Dieser Span wird auf dem „Analogie-Fräsprüfstand“ in einer translatorischen Bewegung (ähnlich dem Hobelprozess) zerspannt. Hier-

bei ist es auf Grund der guten Zugänglichkeit des Prüfstands möglich, die Zerspanungskennwerte bei gegebenem Material sowie Werkzeug- und Prozessdaten zu ermitteln. Diese können weiterhin als Eingangsgröße für die entwickelten analytischen Zerspankraft- und Temperatur- bzw. numerischen Modelle („Geometrische Analyse“ bzw. „Numerische Simulation“) genutzt werden, um auch für weitere Kombinationen von Werkzeugspezifikationen (z.B. eine Variation der Werkzeugschneidkante (siehe AP8.1)) und Schnittdaten schnell und zielgerichtet Rückschlüsse auf das Prozessleistungsverhalten zu ziehen. Um eine Vergleichbarkeit der ermittelten Zerspanungskennwerte sicherzustellen und damit die gewonnenen Erkenntnisse direkt für die CAx-Umgebung zugänglich zu machen, können diese in standardisierten Datenverwaltungsmodellen und Datenbankstrukturen gespeichert werden. Als Ergebnis liefert die Vorgehensweise, beispielsweise für die qualitative Zerspanbarkeitsanalyse der angezeigten Nickelbasislegierungen, eine erste Einschätzung ihrer Bearbeitbarkeit unter gegebenen Bedingungen. Auf dieser Grundlage kann eine Eingrenzung der Schnittdaten und Werkzeugspezifikationen für die nachfolgende Prozessauslegung erfolgen.

Die entwickelte Methodik findet derzeit, über das bereits angesprochene industrielle Fallbeispiel zur Zerspanbarkeitsanalyse hinaus, in bilateralen Arbeitspaketen in AdaM Anwendung.

AP8.4: Prozessdämpfung in der Bearbeitung labiler Bauteile

Die übergeordnete Zielsetzung des Arbeitspakets 8.4 war die prozessstabilere Bearbeitung von dünnwandigen bzw. labilen Bauteilen. Gemäß dem Stand der Technik wurde die Vermeidung von instabilen Prozessen bei der Schlichtfräsbearbeitung bisher vor allem mittels Trial-and-Error-Auslegung erreicht, was unkontrollierbare und unwirtschaftliche Bearbeitungen sowie Ausschuss-Bauteile zur Folge haben kann.

Auf Basis einer »Systemanalyse« wurde im ersten Schritt ein Überblick der Demonstratoren mit ihren Herausforderungen bzgl. der Bearbeitung geschaffen. Wichtige Anwendungsfälle sind beispielsweise die Endbearbeitung von labilen Multi-BliR-, Blisk- oder Radialverdichter-Schaufeln sowie die Reparatur von Schaufelspitzen. Im Rahmen der »Analyse möglicher Strategien« wurde überprüft, was im Bereich der Fräsbearbeitungsstrategien und -werkzeugtechnik zu einer besseren Prozessstabilität bzw. Prozessdämpfung beitragen kann (Stellgrößen bzw. Strategien: z.B. Werkzeugmikrogeometrie, -auskraglänge und -einspannung, Drehzahlvariation sowie Gleich- und Gegenlaufräsen).

Im Rahmen der »Systematik der Prozessauslegung« wurde eine auf andere Bauteile übertragbare Methodik zur Identifikation von relevanten Stellgrößen bzw. Strategien für die Bearbeitung von dünnwandigen bzw. labilen Bauteilen entwickelt. Hierbei wurde auf Grundlage einer geometrischen Auslegung mittels FEM ein Analogieversuchsstand mit einem an ein Realbauteil (Multi-BliR-Schaufel) angepassten dynamischen Verhalten aufgebaut. Auf dieser Basis wurde an Analogiebauteilen aus Ti-6Al-4V (Ti64) eine Sensitivitätsstudie durchgeführt, welche ein tieferes Prozessverständnis der Fräsbearbeitung von Multi-

BliR- oder Blisk-Schaukeln ermöglicht. Abbildung 61 gibt eine zusammenfassende Übersicht zum Einfluss der untersuchten Strategien bzw. Stellgrößen auf die Prozesskraft sowie Oberflächenqualität und somit Prozessstabilität. Beispielsweise ist ersichtlich, dass Werkzeuge mit einem großen Schneidkantenradius einerseits die Prozesskraft erhöhen, andererseits aber auch eine bessere Oberflächenqualität und somit Prozessstabilität bewirken.

Stellgröße / Ergebnisgröße	r_β ↑	K ↑	L_k ↑	Wkzg. Aufnahme	Einsatz einer SV	Faktor x ↑	ME ↑
Maximale resultierende Zerspankraft $F_{res,max}$	↑	●	↑	↔	↓	↔	↔
Oberflächenqualität (Prozessstabilität)	↑	↑	↓	↔	↑	↔	↑

● Neutral/ kein/ geringer Einfluss	↔ Wechselnder/ starker Einfluss	↑ Steigt/ positiver Einfluss	↓ Sinkt/ negativer Einfluss
--	---	--	---

Abbildung 61: Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensitivitätsstudie

Ziel der Untersuchungen war die Identifikation diverser Stellgrößen hinsichtlich ihrer Signifikanz für zuvor definierte Zielgrößen (Prozesskräfte, -dynamik und die erzeugte Bauteiloberfläche) an drei verschiedenen Messebenen der Analogiegeometrie. Die Stellgrößen Werkzeugmikrogeometrie (Schneidkantenradius und K-Faktor), Werkzeugauskraglänge, Werkzeugeinspannung und der Vergleich Gleichlauf/ Gegenlauf standen bei den Versuchen im Fokus. Ausgehend von einem anwendungsnahen Referenzversuch ($r_\beta < 10 \mu\text{m}$, K-Faktor < 1 , $L_k = 42 \text{ mm}$, Werkzeugaufnahme Schunk) wurde bei den Versuchen immer nur eine Stellgröße variiert und so ihre Auswirkung auf den Prozess isoliert analysiert und dokumentiert.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudie trugen dazu bei, eine Auslegungsmethodik hinsichtlich erhöhter Prozessdämpfung bzw. -stabilität auf Basis theoretischer Stabilitätskarten zu erarbeiten, die sich auf alternative Geometrien und Materialien übertragen lässt. Auf Basis eines für den betrachteten Anwendungsfall geeigneten Kraftmodells aus der Literatur sowie experimentell bestimmten modalen Parametern von unterschiedlichen Systemzuständen (z.B. vorgeschichtetes oder geschichtetes Bauteil) können theoretische Stabilitätskarten für ausgewählte Bearbeitungspunkte auf einem Bauteil approximiert und analysiert werden. Darauf aufbauend kann beispielsweise abhängig von unterschiedlichen Zuständen der Werkzeugmikrogeometrie oder der eingestellten Drehzahl ein optimierter Bearbeitungspunkt für den betrachteten Fräsprozess ausgewählt werden.

Ein Eingangsparameter für die Bestimmung der Stabilitätsgrenzen sind Zerspankraftkoeffizienten, welche auf Basis eines geeigneten Zerspankraftmodells bestimmt werden. Abbildung 62 veranschaulicht den Einfluss der Werkzeugmikrogeometrie auf die verschiedenen Zerspankraftkoeffizienten. Ersichtlich ist, dass die Schnittkraftkoeffizienten bei steigendem Schneidkantenradius größer werden, dagegen verhalten sich die Reibungskraftkoeffizienten umgekehrt.

Weiterhin ist der Einfluss von der Schnitttiefe $a_{p,n}$ sowie dem Bauteilwerkstoff (X3CrNiMo13-4 und Ti-6Al-4V) auf die Zerspankraftkoeffizienten dargestellt.

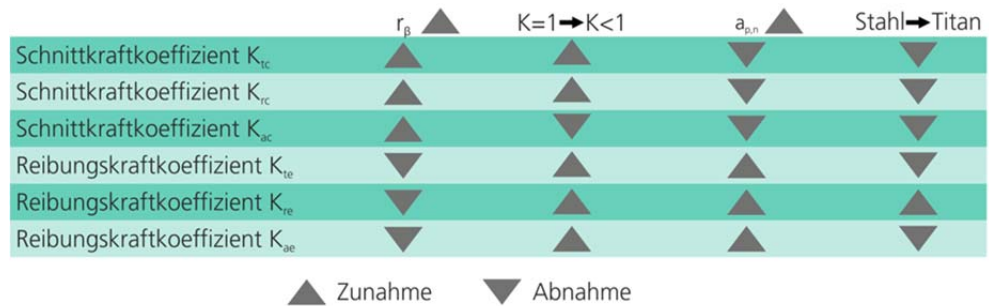


Abbildung 62: Einflüsse auf die Zerspankraftkoeffizienten

Neben den Zerspankraftkoeffizienten fließt die experimentell bestimmte Nachgiebigkeit von Werkstück und/ oder Werkzeug mit in die Stabilitätsanalyse ein. Abbildung 63 zeigt beispielhaft für eine Variation der Werkzeugmikrogeometrie die resultierenden Stabilitätsgrenzen für einen Bearbeitungspunkt auf einer Multi-BliR- oder Blisk-Schaufelspitze. Durch eine angepasste Werkzeugmikrogeometrie kann die systemanregende Zerspankraft und somit die Prozessstabilität stark beeinflusst werden kann. Für den hier dargestellten Fall bewirkt eine Vergrößerung des Schneidkantenradius eine um bis zu 50% höhere Stabilitätsgrenze. Durch eine geeignete Kombination aus Werkzeugmikrogeometrie und -einspannung konnten für den betrachteten Fall die Stabilitätsgrenzen um bis 60% erhöht werden. Weiterhin wurde dargestellt, dass die Stabilitätsgrenzen entlang der Fräsbahn auf verschiedenen Bearbeitungspunkten entlang der Schaufelspitze um bis zu 30% variieren.

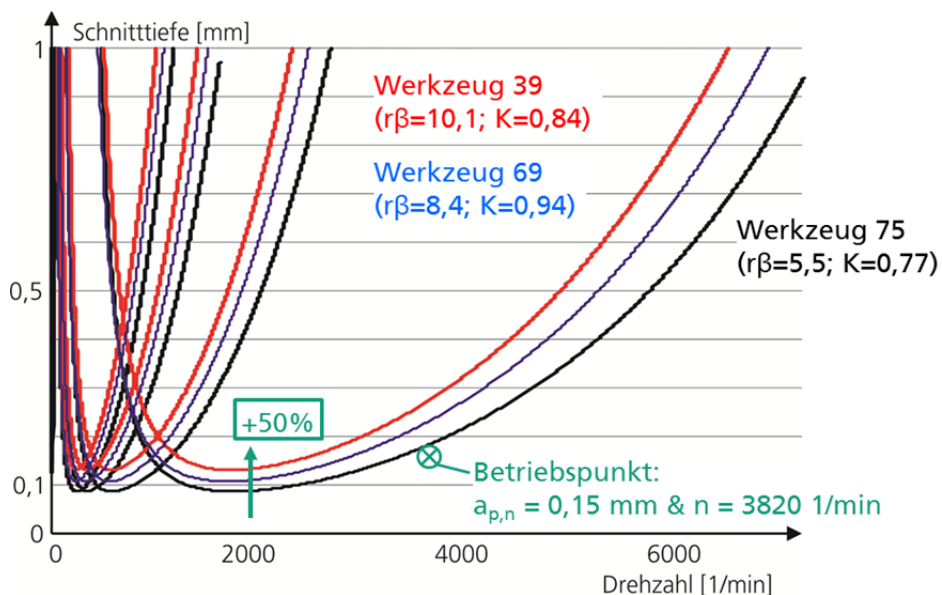


Abbildung 63: Einfluss der Werkzeugmikrogeometrie auf Stabilitätsgrenzen

Die Erkenntnisse aus den Stabilitätsanalysen bzw. die »Systematik der Prozessauslegung« wurden in »Anwendungsuntersuchungen« sowie im Rahmen des finalen AdaM Workshops auf die Fertigung bzw. Reparatur der Multi-BliR-Schaufeln übertragen bzw. demonstriert.

Die »Implementierung in das CAx-Framework« ist über ein kompiliertes CAM-Modul möglich, bis dato wurde der Entwicklungsstand basierend auf MATLAB realisiert. Für die Zukunft nach AdaM ist ein separates CAM-Modul denkbar, welches auf den hier vorgestellten Ergebnissen aufbaut.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mithilfe von AdaM ein tieferes Prozessverständnis für die Schlichtfräsbearbeitung (beispielsweise bei der Fertigung und Reparatur von Multi-BliR- oder Blisk-Schaufeln) erarbeitet werden konnte. Durch die Ergebnisse und Erkenntnisse der systematischen Analysen zum Einfluss signifikanter Stellgrößen sowie theoretischen Stabilitätsanalysen konnte ein Beitrag zu einer Auslegungsstrategie für eine optimierte, prozessstabilere Schlichtfräsbearbeitung geleistet werden.

Zusammengefasst sind wesentliche Ergebnisse des Subclusters:

- Weiterentwicklung einer Software zur analytischen Berechnung der Eingriffsbedingen einzelner Schneiden im Fräsprozesse
- Weiterentwicklung einer Methodik zu Berechnung der Spanungsgeometrie beim simultanen dreiachsige Drehen
- Weiterentwicklung einer Methodik zu Berechnung des Werkzeugverschleißes beim simultanen dreiachsige Drehen
- Weiterentwicklung einer Methodik zu Berechnung der Zerspankräfte beim simultanen dreiachsige Drehen
- Adaptierung der trochoidalen Taumelfräsbearbeitung auf die komplexe Schaufelgeometrien der Multi-BLiR
- Entwicklung einer standardisierten und wissensbasierten Methode zur schnellen und flexiblen Auslegung von Zerspanprozessen
- Beitrag/ Weiterentwicklung zu einer Auslegungsmethodik für die Schlichtfräsbearbeitung labiler Bauteile

3.3.2 Subcluster »Grinding«

Ziel des Subclusters »Grinding« war es, automatisierte Lösungen zur Feinbearbeitung von Turbomaschinenkomponenten zu entwickeln und zu evaluieren.

Feinbearbeitungsverfahren, die zur Erfüllung der Anforderungen an die Oberflächenqualität als oftmals letzter Schritt in einer Prozesskette (z.B. Sägen/ Fräsen/ Schleifen) notwendig sind, wurden vor Projektstart überwiegend manuell durchgeführt. Die adaptiven Fertigkeiten des Werkers wie Feingefühl und Augenmaß und eine jahrelange Erfahrung sind dabei zwingend erforderlich und konnten vor Projektbeginn beim Endanwender weder wirtschaftlich noch pro-

zessischer durch automatisierte Verfahren abgebildet werden. Jedoch basierte das Ergebnis der manuellen Feinbearbeitung ausschließlich auf dem individuellen Geschick des Handwerkers, so dass der Prozess weder definiert noch reproduzierbar war.

AP9.1: Schleiftechnologische Basis

Der Stand der Technik zur Feinbearbeitung von Turbomaschinenkomponenten und adäquater Automatisierungskonzepte wurde in Form von Literaturrecherchen sowie Fachgesprächen mit OEMs im Turbomaschinenbau und Systemanbietern im Bereich der Automatisierung erarbeitet. Als relevantes Ergebnis ist zusammenfassend festzuhalten, dass sowohl die Entwicklung einer roboterbasierten als auch einer maschinenintegrierten Automatisierungslösung als anwendergerecht eingestuft wurden. So wurde eine rasche und effiziente Verbreitung der Entwicklungsergebnisse je nach individueller Infrastruktur in der Produktion beim Endanwender erwartet. Die zu dem Zeitpunkt vorhandenen, markterhältlichen Roboteranlagen oder auch Maschinenkonzepte vermochten jedoch nicht, automatisierte und adaptive Feinbearbeitungsprozesse adäquat abzubilden. Es fehlte systemunabhängig vor allem an Prozesswissen und markterhältlichen adaptiven Werkzeughaltern, so dass es nicht möglich war, den Materialabtrag zu bestimmen und die Werkzeug- bzw. Werkstückführung an schwankende Bauteilgeometrien, Referenzierungsfehler und unvermeidbaren Werkzeugverschleiß anzupassen.

AP9.2: Prozessentwicklung automatisierte Feinbearbeitung

Zur Entwicklung der adaptiven Feinbearbeitungsprozesse wurden innerhalb des AP9.2 zwei Versuchsstände errichtet. Es wurde jeweils ein Versuchsstand zur roboterbasierten Feinbearbeitung und zur Werkzeugmaschinenintegrierten Feinbearbeitung errichtet (siehe Abbildung 64).

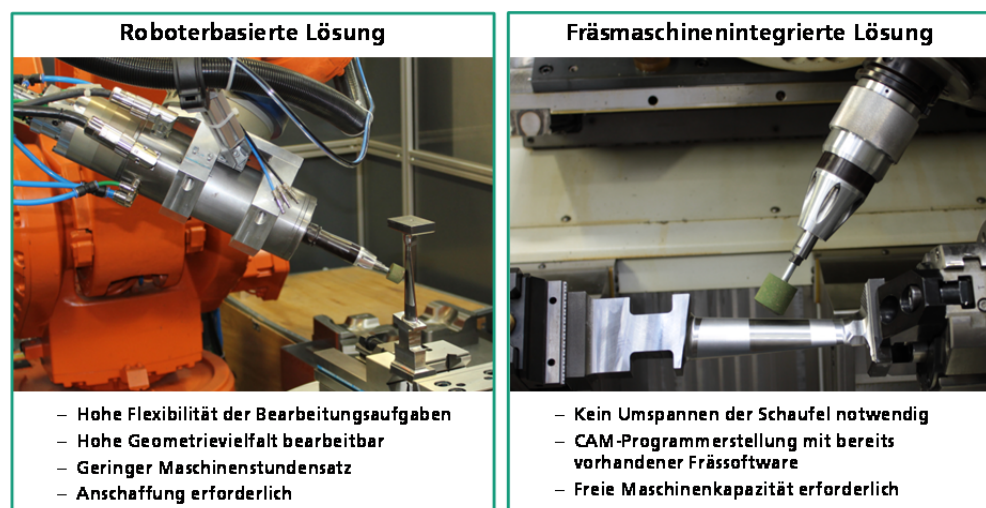


Abbildung 64: Entwickelte Automatisierungskonzepte zur Feinbearbeitung

Die roboterbasierte Lösung bietet Vorteile in der höheren Flexibilität der Bearbeitungsaufgaben. So konnten beispielsweise werkstückgeführte und kraftge-

regelte Bandschleifprozesse, aber auch werkzeuggesteuerte Schleifprozesse mit gummigebundenen Schleifstiften in dieselbe Roboterzelle integriert werden. Dadurch ist es dem potenziellen Endanwender möglich, eine große Geometrie- und Werkstoffvielfalt bei einem relativ geringen Maschinenstundensatz im Vergleich zu einer Werkzeugmaschine ähnlicher Größe endzubearbeiten. Als Herausforderung bei Implementierung der Roboterlösung in die Produktion wurden die Anschaffung inkl. Initialaufwände zur Schulung des Personals in bis dato nicht verwendeter Robotersoftware (CAM und Postprocessor/ Steuerung) identifiziert.

Der Vorteil der maschinenintegrierten Lösung liegt in der Reduktion der Durchlaufzeit basierend auf der Tatsache, dass nach der vorangehenden Fräsbearbeitung kein Umspannen der Schaufel notwendig ist, da die Feinbearbeitung im selben Spannsystem und in der selben Maschine erfolgt. Ein weiterer Vorteil bei der Implementierung der automatisierten Feinbearbeitung durch Maschinenintegration ergibt sich dadurch, dass zur Programmierung des Schleifwerkzeugs vorhandene Fräs-CAM-Software verwendbar ist. Es entfällt eine Implementierungshürde, da das Personal vorhandene Software verwenden kann und somit Aufwände reduziert werden können. Dabei ist zu beachten, dass entsprechende Maschinenkapazität für die integrierte Feinbearbeitung eingeplant werden muss.

AP9.3: Optimierung der Verfahrenskombination Fräsen/ Feinbearbeitung

Für die Prozessentwicklung und die Optimierung der Verfahrenskombination Fräsen/ Feinbearbeitung (AP9.3) wurden axial nachgiebige Werkzeugaufnehmer entwickelt. Die Lösung wurde so modular gestaltet, dass der Halter für unterschiedliche Spindelschnittstellen wie HSK-A63 oder HSK-A32 einsetzbar ist. Dadurch ist es möglich, den Halter sowohl zur robotergestützten als auch zur fräsmaschinenbasierten Feinbearbeitung zu verwenden. Unterschiedliche Prototypen wurden konstruiert und gefertigt. Die Funktion der Halter konnte durch Schleifversuche, Oberflächen- und Kraftmessungen überprüft werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Halter zur Automatisierung der Feinbearbeitung geeignet ist. Die Optimierung der Verfahrenskombination aus Fräsen und Feinbearbeitung wird derzeit auch in bilateralen Projekten durchgeführt.

AP9.4: Anwendungsuntersuchung / Strategieentwicklung

Zur Umsetzung der ermittelten Erkenntnisse wurde eine Demonstratorschaukel aus X20Cr13 Stahl in AP9.4 bearbeitet (Abbildung 65). Die Rauheitswerte von $R_a \sim 0,4 \mu\text{m}$, $R_z \sim 3 \mu\text{m}$ und das optische Erscheinungsbild der automatisiert geschliffenen Fläche der Turbinenschaukel entsprachen dabei den Anforderungen, ebenso wie die Prozesszeit bzw. Flächenrate von $\sim 12 \text{ cm}^2/\text{min}$.

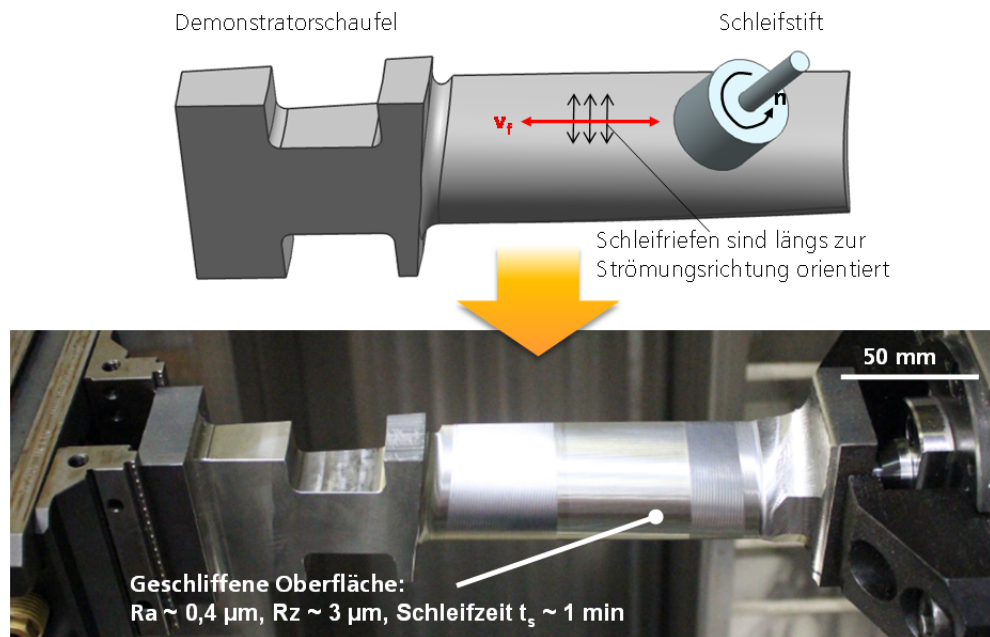


Abbildung 65: Bahnstrategie und Ergebnis der Bearbeitung des Turbinenschaufeldemonstrators

Zusammengefasst sind wesentliche Ergebnisse des Subclusters:

- Prozessentwicklung zur automatisierten Feinbearbeitung von Einzelschaufeln mit adaptiven Werkzeughaltern (Entwicklung, Prototyp) unter Nutzung von adaptiven Werkzeughaltern mit einer definierten Anpresskraft.
- Konzeptentwicklung und zu Teilen prototypischer Aufbau einer flexiblen Roboterzelle zur Feinbearbeitung von Einzelschaufeln

3.3.3 Subcluster »Clamping«

AP10.1: Prozesskettenspezifische Spannmittel

Ziel des Arbeitspaketes »Prozesskettenspezifische Spannmittel« war es, Spannsysteme zu entwickeln, die einerseits als Referenz innerhalb der Prozessabfolge dienen und andererseits den technologischen Anforderungen der Bearbeitungsprozesse (Prozesskraft, Dämpfung etc.) gerecht werden.

Schwingungen bei der Bearbeitung von Schaufeln können sowohl im Fall der Fertigung, als auch im Fall der Reparatur auftreten. Im Subcluster Clamping wurde ein Konzept erarbeitet und realisiert, das die auftretenden Schwingungen effektiv reduziert und eine produktive Bearbeitung ermöglicht. Dieses System wurde im Rahmen der Prozesskette Multi-BliR demonstriert. In diesem Teil des Subclusters »Clamping« wurde sich speziell auf die Reparaturprozesskette für Blisken konzentriert. Dazu wurde ein neues, anpassungsfähiges Spannsystem zur Bauteilreferenzierung und Stabilisierung von Schaufeln entwickelt und als Prototyp umgesetzt, Abbildung 66. Die Dämpfung von Titanblisken beträgt

mit dem Spannsystem 12,5 Prozent, ohne das System liegt sie bei 0,027 Prozent.

Das Spannsystem wird entweder manuell oder von der Werkzeugspindel der Bearbeitungsmaschine seitlich auf die Schaufeln der BLISK geschoben. Von beiden Seiten legen sich federgelagerte Klemmen automatisch an die Schaufel. Die Kräfte sind auf beiden Seiten gleich hoch, so dass keine mechanischen Verzüge durch den Einspannvorgang entstehen. Sobald die Elemente richtig positioniert sind, werden sie hydraulisch verklemmt, ohne die Lage zu verändern. Auf diese Weise wird das Werkstück in der bauteilspezifischen Lage spannungsfrei gehalten, »wie eingegossen«.



Abbildung 66: Nutzung eines Spann- und Stabilisiersystems (links) zur prozessstabilen Schlichtfräsbearbeitung einer Multi-BLIR. Das stabilisierende Spannsystem ermöglicht signifikant erhöhte Schnittgeschwindigkeiten und Oberflächengüten. Rechts: Systemtest mit einem ersten Prototyp aus Kunststoff.

Das Spannsystem ist derart gestaltet, dass es neben der mechanischen Unterstützung der dünnwandigen Schaufeln hohe Dämpfungseigenschaften besitzt, die zusätzlich Schwingungen reduzieren. Damit wird die mechanische Bearbeitung dünnwandiger Strömungsbauteile bei noch höheren Schnittgeschwindigkeiten mit den gewünschten Oberflächengüten ermöglicht.

Zudem kann das Spannsystem bei Bedarf als Referenz für die Reparatur mittels Laserauftragschweißen (Laser Material Deposition LMD) dienen. Dazu definieren mechanisch hervorstehende Geometrielemente auf dem fest montierten Spannsystem ein durchgängiges Koordinatensystem für die Reparaturprozesskette. Alle nacheinander ablaufenden Bearbeitungsoperationen können nach Montage des Spannsystems auf Basis dieses Koordinatensystems durchgeführt werden. Die unterschiedlichen Operationen (Geometriedatenerfassung, Materialabtrag der Schadstelle, Materialauftrag per LMD und anschließende Wiederherstellung der ursprünglichen Geometrie durch Fräsbearbeitung) erfolgen somit auf einer einheitlichen Datenbasis und Referenz.

Das neuartige Spannsystem für Verdichter BLISKen wurde als vorwettbewerbliche Entwicklung zum Patent angemeldet.

AP10.2: Modularisierung der Spannsysteme

Ziel des Arbeitspaketes »Modularisierung der Spannsysteme« war es, Konzepte zu entwickeln, mit denen Spannsystem und Spannprinzipien auf eine einfache

Art und Weise skaliert werden können, um den Nutzungsbereich angepasster Spanntechnik zu erweitern.

Die Anzahl benötigter Spannsysteme kann bei Industriebereichen mit einem breiten Teilespektrum und hoher Geometrievielfalt der Werkstücke sehr umfangreich werden, so dass gleichsam große Investitionen in Spanntechnik benötigt werden, insbesondere wenn der Einsatz automatisierter Spannsysteme angezeigt ist. In der Folge kann sehr häufig das Potenzial automatisierter Spanntechnik aus Kostengründen nicht ausgeschöpft werden. Der Einsatz einfacher Spannmittel zieht jedoch in der Regel einen hohen manuellen Aufwand in den Rüst- und Nebenzeiten nach sich. Im Arbeitspaket Modularisierung der Spannsysteme wurde diesem Mechanismus entgegengewirkt, in dem Konzepte entwickelt wurden, mit denen automatisierte Spannsysteme auf ein breiteres Bauteilspektrum anwendbar sind. Kern des Konzeptes sind die Gestaltung standardisierter Schnittstellen der Module untereinander sowie eine freie Skalierbarkeit der einzelnen Module. Demonstriert wurde das Konzept der modularisierten Spannsysteme am Beispiel des entwickelten BLISK Spannsystems, vgl. Abbildung 67.

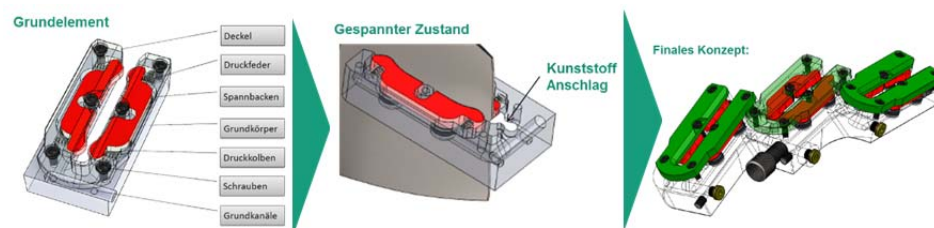


Abbildung 67: Frei skalierbares Modularisierungskonzept für das BLISK Spannsystem

Das spezialisiert auf die Demonstrationsgeometrie entwickelte BLISK Spannsystem wurde anhand des Modularisierungskonzeptes folgend so erweitert, dass es auf andere BLISK-Geometrien anwendbar ist. Spannsysteme mit angepasster Geometrie aus dem Baukastensystem finden als Prototypen Anwendung und werden zurzeit noch bilateral erprobt.

Die modularisierten Spannsysteme ermöglichen deutlich reduzierte Konzept- und Designphasen für die Bereitstellung angepasster Systeme und lassen sich auf ein breites Produktspektrum anwenden.

Zusammengefasst sind wesentliche Ergebnisse des Subclusters:

- Entwicklung und Patentierung eines neuen Spann- und Stabilisiersystems (Prototyp) zur Bauteilreferenzierung und Stabilisierung von Blisk-Schaufeln
- Modularisierungskonzepte zum modularen Design von Spannsystemen, mit standardisierten Schnittstellen der Module bei freier Skalierbarkeit

3.3.4 Subcluster »Processcontrol«

Um Fertigungsprozesse am Limit der Produktivität unter Einhaltung konstanter Prozessergebnisse zu führen, muss Prozessstabilität sichergestellt werden. Insbesondere bei der Bearbeitung von dünnwandigen Bauteilen wie Blisks, BLiRs oder Einzelschaufeln, treten vielfach Instabilitäten in Form von Prozessschwingungen auf, die schlechte Oberflächengüten zur Folge haben. Aufgrund der hohen Komplexität spanender Fertigungsverfahren können jedoch nicht alle stabilitätsbeeinflussenden Prozesseingangsgrößen in der Prozessauslegungsphase berücksichtigt werden. Beispiele sind Chargenschwankungen im bearbeitetem Werkstoff oder das dynamische Verhalten von Werkzeugmaschinen im Betrieb. Um auch unter sich ändernden Randbedingungen Prozesse stabil bei hoher Produktivität zu führen, ist im Subcluster »Processcontrol« eine Prozessüberwachung entwickelt worden, die quantitative Größen zur Bewertung der Prozessstabilität in Echtzeit liefert. Diese Größen bilden im Subcluster »Milling & Turning« eine Grundlage für Optimierungsaufgaben und die Möglichkeit zur Prozessregelung.

Auf Basis einer durchgeführten Anforderungsanalyse innerhalb AdaMs ist die eine Messstrecke entwickelt worden, die zum Ziel hat Prozessschwingungen in Echtzeit zu bewerten. Konventionelle Prozessüberwachungslösungen, die auf Basis maschineninterner Daten arbeiten, erlauben keine Bewertung der Prozesse im Frequenzbereich, da die erforderlichen Abtastraten erreicht werden. Die Bewertung im Frequenzbereich ist jedoch erforderlich zur Bewertung von Prozessschwingungen. Daher wurde eine Datenakquise in Kombination mit externen Sensoren genutzt. Als Sensoren eignen insbesondere Beschleunigungssensoren, die Signale mit einer hohen Qualität liefern, jedoch eine Verkabelung im Bearbeitungsraum erfordern. Weiterhin kamen Mikrofone zum Einsatz, deren Signale gut mit den Signalen von Beschleunigungssensoren korrelieren. Die Ansteuerung der Prozessüberwachung erfolgt durch Befehle im Teileprogramm der NC-Steuerung. Hierdurch wird erreicht, dass nur Daten während der Hauptzeiten des Prozesses aufgezeichnet werden.

Die hohen erreichbaren Abtastraten ermöglichen Analysen sowohl im Zeitbereich, als auch im Frequenzbereich. Ebenso ist eine gemeinsame Zeit-Frequenzanalyse durchführbar. Diese gestattet die Identifikation der im Prozess dominanten Frequenzen und den Rückschluss auf den momentanen Prozesszustand. Zur Reduktion der anfallenden Datenmengen ist es möglich, bestimmte Kennwerte (bspw. Mittelwerte, Standardabweichungen, Amplituden oder Energiedichten) in ausgewählten Frequenzbändern der Messungen zu speichern. Zur Visualisierung ist eine Software entwickelt worden, die alle relevanten aufgezeichneten Prozessüberwachungsdaten dem Maschinenbenutzer während der Bearbeitung kompakt darstellt. Eine Benutzerschnittstelle bietet dem Nutzer einfache Möglichkeiten zur Konfiguration der Überwachungsstrategie. Vom Nutzer gewählte Parameter werden vor dem Einsatz des Prozessüberwachungssystems validiert. Fehlkonfigurationen werden vermieden.

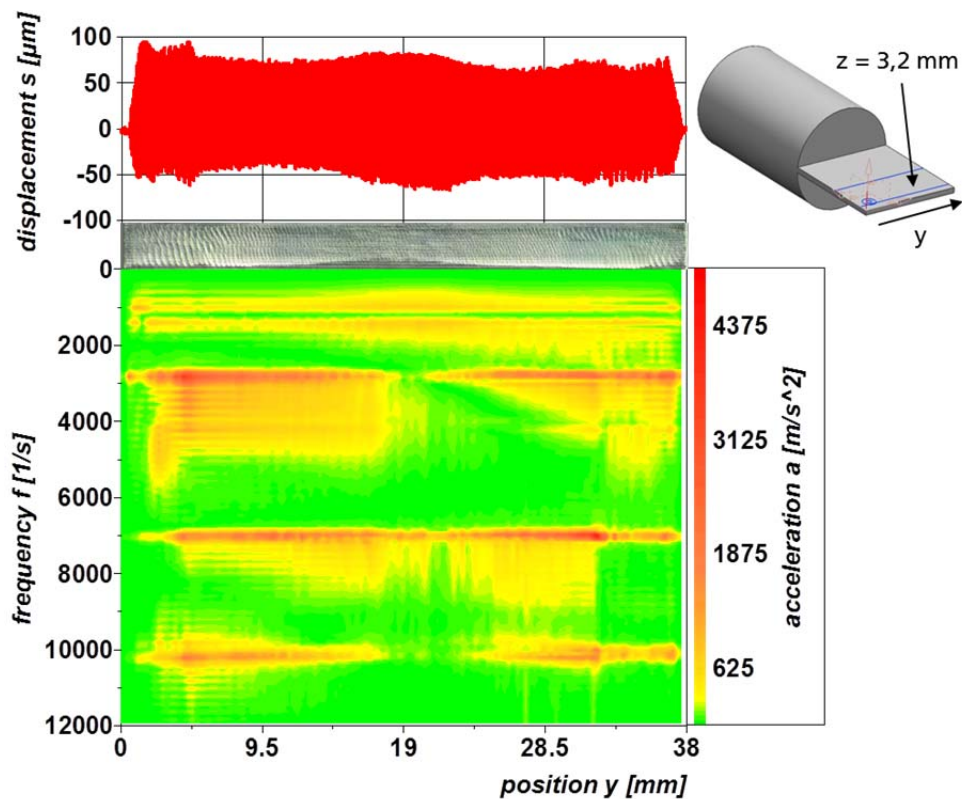


Abbildung 68: Auswertung der Prozessüberwachung im Frequenzbereich

Die entwickelte Prozessüberwachung ist nach Fertigstellung im Subcluster »Milling & Turning« eingesetzt worden um neuartige Prozessstrategien & Werkzeuge zu bewerten. Im Projektverlauf von AdaM hat sich die entwickelte Lösung als robust erwiesen.

Zusammengefasst ist das wesentliche Ergebnis des Subclusters:

- Anwendung und Weiterentwicklung einer Prozessüberwachung; im Speziellen die Entwicklung eines Softwaremoduls zur Auswertung des Schwingverhaltens im Frequenzbereich zur Bewertung der Prozessstabilität bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Komponenten

3.4 Technologiecluster Design

Im Technologiecluster »Design« wurde eine kombinierte Betrachtung von Fertigungstechnologien aus Produkt- und Fertigungssicht durchgeführt. Anhand des Leitschaufelclusters von MAN als Demonstrators (vgl. AP 12.1) wurden die Möglichkeit einer Geometrieoptimierung sowie die Machbarkeit einer Fertigung untersucht, siehe Abbildung 69.

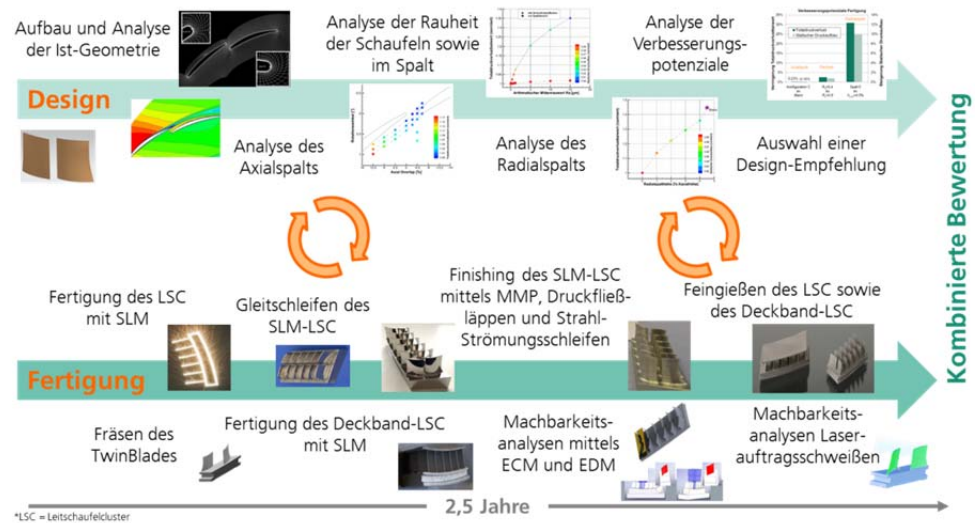


Abbildung 69: Überblick der durchgeführten Tätigkeiten im Cluster Design

Design-Optimierung des Leitschaufelclusters

Das Institut für Strahlantriebe und Turboarbeitsmaschinen (IST) der RWTH Aachen wurde im Rahmen des Clusters Design damit beauftragt, das aktuelle Design des Demonstrators zu bewerten und eine optimierte Gestaltung des Leitschaufelclusters zu entwickeln, vgl. AP 12.2. Dafür wurde ein Schaufelpaar des Leitschaufelclusters, im Folgenden als »Tandemstator« bezeichnet, näher untersucht. Zur Bewertung und Optimierung des Tandemstators wurden drei Designmerkmale herangezogen:

- Tandemspaltabstand
- Rauheit
- Nabenspalthöhe

Bei den Parameterstudien wurden als Bewertungskenngrößen der Totaldruckverlust über den Tandemstator sowie der statische Druckaufbau herangezogen. So konnte eine aerodynamisch optimierte Tandemkonfiguration ermittelt werden, die auch die fertigungstechnischen Anforderungen erfüllt. Abbildung 70 stellt die einzelnen Verbesserungspotenziale der untersuchten Parameter bezüglich des Totaldruckverlustbeiwerts sowie des statischen Druckaufbaus des Tandemstators in Hinblick auf die drei zuvor genannten geometrischen Untersuchungsmerkmale dar.

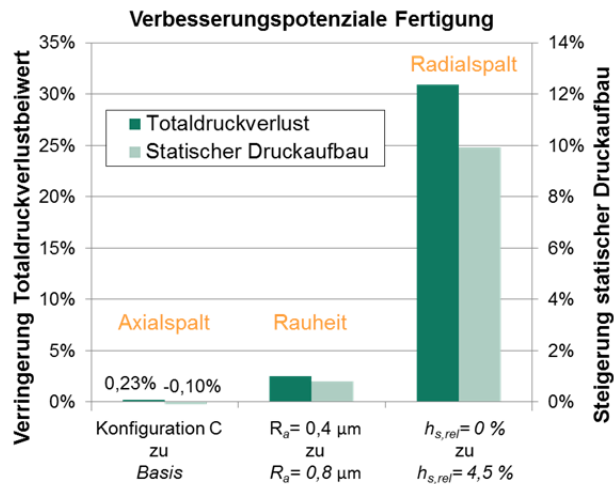


Abbildung 70: Verbesserungspotenziale zur untersuchten Tandemgeometrie durch die Fertigung

Links im Diagramm ist das Verbesserungspotential hinsichtlich der Modifikation des Tandemspalts dargestellt. Hier wurde eine optimierte Geometrieconfiguration als Vergleich zur Basisgeometrie herangezogen, welche einen größeren Tandemspalt mit Zugänglichkeit zur Fräsbearbeitung gewährleistet. Es ist zu erkennen, dass in diesem Fall keine relevanten Verbesserungspotenziale entstehen. Hingegen bietet das Absenken der Oberflächenrauheit des Tandemstators vom ursprünglichen Wert $R_a=0,8\mu\text{m}$ auf $R_a=0,4\mu\text{m}$ ein deutlich größeres Optimierungspotential bezüglich der aerodynamischen Performance (2,5% verringerter Totaldruckverlust). Eine solche Reduktion der Rauheit könnte beispielsweise durch eine Feinbearbeitung des Bauteils mit Hilfe des Electrochemical Machining (ECM) oder des Micro Machining Process (MMP) von BinC Industries SA erreicht werden. Das größte Optimierungspotential weist jedoch der Radialspalt der Tandembeschaufelung auf. Hier ist der Vergleich zwischen dem ursprünglichen Basisspalt von 4,5% der Schaufelhöhe zur Spalthöhe „Null“ dargestellt. Die Spalthöhe „Null“ wurde in der numerischen Simulation vereinfacht durch einen infinitesimal kleinen Radialspalt angenähert. In der praktischen Anwendung korreliert dies mit dem Einsatz eines Deckbandes. Die derart vereinfachte Umsetzung zeigt das große Verbesserungspotential (31% verringerter Totaldruckverlust) und motiviert hierdurch die detailliertere Untersuchung einer Deckbandkonfiguration. Die Fertigung eines Leitschaufelclusters mit Deckband wurde im Cluster Design ebenfalls umgesetzt. Für die Herstellung eines solchen Tandemstators mit Deckband bietet sich beispielsweise ein additives Verfahren wie das Selective Laser Melting (SLM) an.

Anhand der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse konnten aus aerodynamischer Sichtweise optimierte Designvarianten für den Tandemstator erarbeitet werden. Dabei wurde ebenso auf die fertigungstechnische Umsetzbarkeit geachtet. Auf diesem Weg wurde gezeigt, dass aus aerodynamischer Perspektive und damit im Sinne eines reduzierten Treibstoffverbrauchs im Betrieb, die Oberflächenrauheit möglichst zu minimieren ist und der Einsatz innovativer Feinbearbeitungstechnologie wie ECM und MMP zu empfehlen ist. Wei-

terhin sollte der Radialspalt möglichst minimiert werden, wodurch der Einsatz eines Leitschaufelcluster mit Deckband attraktiv ist. Mittels des additiven Fertigungsverfahrens SLM kann die Herstellung eines Leitschaufelclusters mit Deckband erreicht werden, wodurch eine verbesserte Ressourceneffizienz der Turbine im Betrieb möglich ist.

Bewertung des Leitschaufelclusters aus Design- und Fertigungssicht

Für die Untersuchungen zur Fertigung des Leitschaufelclusters, vgl. AP 12.3, fanden im Rahmen des Clusters Design entsprechende Tätigkeiten in den Technologieclustern »Laser« und »Machining« statt. Weiterhin konnten im Rahmen von AP 12.3 verschiedene Technologien zur Fertigung und Feinbearbeitung des Leitschaufelclusters identifiziert werden, welche anhand von praktischen und theoretischen Untersuchungen auch umgesetzt wurden, siehe Abbildung 69.

Erstmal wurden innerhalb des Clusters Design Untersuchungen der Ressourceneffizienz verschiedener Fertigungsketten für verschiedene Designvarianten des Leitschaufelclusters durchgeführt. Hierfür wurden mit Hilfe eigens gemessener und bereits vorhandener Parameter Analysen in der Ökobilanz-Software GaBi vorgenommen. Dabei wurde die Fertigung von sechs Twin Blades (TB) und einem Leitschaufelcluster (LSC) verglichen, siehe Abbildung 71.

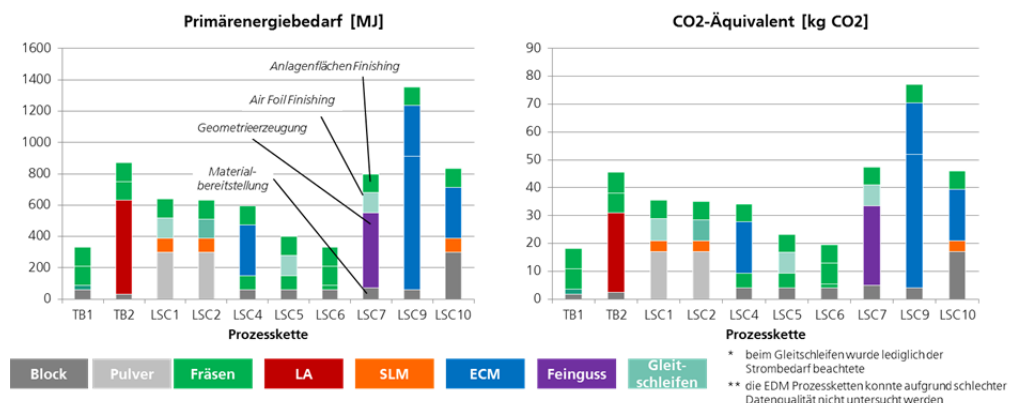


Abbildung 71: Ressourceneffizienzvergleich der untersuchten Prozessketten.

Das Direct Current Electrochemical Machining (DC-ECM) besitzt als Schruppverfahren im Vergleich zu den anderen Fertigungstechnologien einen sehr hohen Primärenergiebedarf um die Grundgeometrie des Leitschaufelclusters herzustellen, z.B. ca. 28mal so viel Primärenergie wie Fräsen. Weiterhin benötigt die Herstellung des Pulvers für die additiven Verfahren ca. 5mal so viel Primärenergie wie die Herstellung eines Metallblocks. Im Sinne einer Ressourceneffizienz aus Fertigungssicht ist die Herstellung von sechs Twin Blades mittels Fräsen zu empfehlen, da in Summe nur eine Primärenergiebedarf von ca. 330MJ benötigt werden. Weiterhin wurde die CO₂-Produktion während der Fertigung analysiert, welche wie zu erwarten stark mit dem Primärenergiebedarf korreliert.

Des Weiteren wurden im Cluster Design eine neue Bewertungsmethode entwickelt, um die verschiedenen Designvarianten und die dazugehörigen Fertigungsketten kombiniert aus Design- und Fertigungssicht zu bewerten. Durch die kombinierte Bewertung können die Wirkzusammenhänge der Designanforderung und des Fertigungsaufwands dargestellt werden. Für die Bewertung werden ein Design- und ein Fertigungsfaktor jeweils aus mehreren Bewertungskriterien mittels der Methode des »Analytic Hierarchy Process (AHP)« gebildet. Als Designkriterien für die Berechnung des Designfaktors wurden der Totaldruckverlustbeiwert, der statische Druckaufbau, die Montagefähigkeit sowie die Oberflächengüte verwendet. Als Fertigungskriterien für die Berechnung des Fertigungsfaktors wurden die Produktionskosten, der Energieverbrauch, Materialverbrauch und die Fertigungsdauer herangezogen. Im Bewertungstool können die einzelnen Bewertungskriterien mittels Paarvergleich unterschiedlich gewichtet werden, wodurch die Faktoren neu berechnet werden. Hierdurch lässt sich die Bewertung auf unternehmensindividuelle Anforderungen anpassen. In Abbildung 72 sind die Ergebnisse mit gleicher Gewichtung der Bewertungskriterien dargestellt.

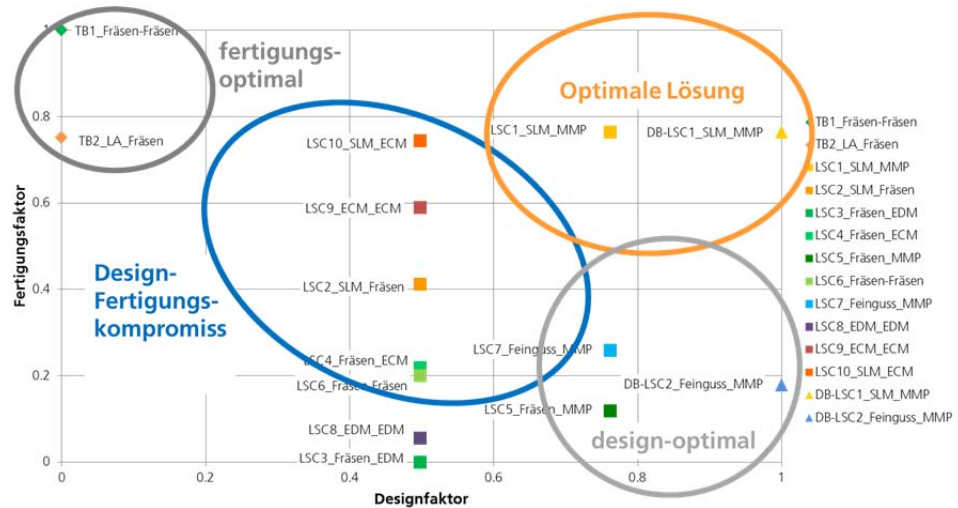


Abbildung 72: Kombinierte Bewertung aus Design- und Fertigungssicht bei gleicher Gewichtung der Bewertungskriterien

Als »beste« Lösung ist aus Design- und Fertigungssicht die Fertigung eines Leitschaufelclusters mit Deckband mittels SLM, MMP und Fräsen (DB-LSC1_SLM_MMP) zu empfehlen, da bei einem maximalen Designfaktor von $DF=1$ gleichzeitig auch ein guter Fertigungsfaktor von $FF=0,764$ erreicht wird. Aus reiner Fertigungssicht ist hingegen die Fertigung von sechs Twin Blades mittels Fräsen (TB_Fräsen_Fräsen) am besten geeignet ($FF=1$). Jedoch wird als Designfaktor für das Twin Blade im Vergleich zu den anderen Designs des Leitschaufelclusters (LSC und DB-LSC) nur $DF=0$ erzielt. Die Bewertung zeigt, dass hinsichtlich Geometrieoptimierung und fertigungstechnischer Machbarkeit Kosten-Nutzen-Kompromisse zu beachten sind.

Anhand der durchgeführten Arbeiten konnten erstmals die ökologischen Einflüsse verschiedener Designvarianten und Fertigungstechnologien dargestellt werden. Aus Sicht einer ressourceneffizienten Fertigung ist die Herstellung von Twin Blades mittels Fräsen zu empfehlen. Weiterhin konnten mittels des entwickelten Bewertungstools die Einflüsse der Designanforderungen auf die Fertigungsaufwände kombiniert bewertet werden, um die Potenziale der verschiedenen Fertigungstechnologien aufzuzeigen. Aus Design- und Fertigungssicht ist ein Leitschaufelcluster mit Deckband zu empfehlen. Hierfür besteht die Prozesskette aus der Geometrieerzeugung mittels SLM, der Feinbearbeitung der Schaufeln mittels MMP und der Feinbearbeitung des Fußes mittels Fräsen. Durch dieses Leitschaufelcluster mit Deckband ist ein geringerer Treibstoffverbrauch im Betrieb bei gleichzeitig vergleichsweise geringen Fertigungskosten möglich. Neue innovative Fertigungsfahren, wie das SLM, eignen sich daher für die Fertigung von verbesserten Turbomaschinenkomponenten.

Die Untersuchungen hinsichtlich der Designbewertung (MS12.3), der Fertigung (MS 12.4) sowie der Zusammenführung der Design- und Fertigungsdaten (MS12.5) konnten im Zeitrahmen abgeschlossen werden.

Zusammengefasst sind wesentliche Ergebnisse des Subclusters:

- Simulationsmodell: Aufbau eines AUTOGRID-Rechennetzes zur gegebenen 3D-Tandem-Statorgeometrie und des zugehörigen Simulationssetups für den Strömungslöser TRACE
- Aerodynamische Bewertung von Tandemspalt, Radialspalt sowie Oberflächenrauheit des Leitschaufelclusters anhand von CFD-Simulationsergebnissen
- Entwicklung eines kombinierten Bewertungsmodells aus Design- und Fertigungssicht in Excel unter Anwendung der AHP-Methode zur Darstellung der Wirkzusammenhänge zwischen Designanforderung und Fertigungsaufwand
- Aufbau von Ressourcenmodellen für verschiedene Prozessketten in der Software GaBi zur ökologischen Bewertung verschiedener Fertigungsketten des Leitschaufelclusters

3.5 Technologiecluster Roadmapping

Im Rahmen des Technologieclusters Roadmapping wurden zur Sicherung und Erweiterung des aktuellen Turbomaschinen-Netzwerks in AdaM potenzielle Themen für zukünftige Entwicklungsprojekte identifiziert. Dafür wurden einerseits die Partner aus AdaM sowie andererseits externe Technologieunternehmen eingebunden.

Im Rahmen von AP 13.1 zur Identifikation neuer Forschungsthemen wurden innerhalb des AdaM Konsortiums als Haupttreiber die Turbomaschinen-OEMs adressiert. Auf Grundlage ihrer Kenntnisse zu den zukünftigen Trends und Herausforderungen in der Produktentwicklung wurden mittels Workshops neun

Themengruppen mit potenziellen Themen für die zukünftige Produktionsforschung identifiziert und strukturiert, siehe Abbildung 73.



Abbildung 73: Erarbeitete Projektvorschläge für die zukünftige Zusammenarbeit

Basierend auf den identifizierten Themen konnten vier konkrete Projektvorschläge für zukünftige Zusammenarbeiten erarbeitet werden, siehe Abbildung 74:

1. Prozessadaptierte Werkzeuggestaltung
2. Methodische Prozesskettenbewertung für das Slotting
3. Leitfaden zur Identifikation von Bauteilen und Anwendungen für das SLM
4. Qualifizierung & Qualitätssicherung für AM Pulver

Projektvorschlag 1
Prozessadaptierte Werkzeuggestaltung


Spanende und abtragende Fertigung	Additive Fertigung	Lasermaterialbearbeitung
Robuste und adaptive Prozessketten	Reparatur Prozessketten	Automatisierte und durchgängige Prozessketten
Messtechnik und Datenmanagement	Werkzeugmaschinen Qualifizierung	Prozessbewertungen, Lebenszyklusanalysen und Qualitätssicherung

Ziel

- Steigerung der Produktivität und Stabilität von Zerspanprozessen
- Schnelle Auslegung und Auswahl von prozessspezifisch optimierten Werkzeugen
- Erweiterung des Prozessverständnisses

Mögliche Vorgehensweise

- Auswahl & Clustering von repräsentativen Prozesszielgrößen
- Identifikation von relevanten Werkzeugmerkmalen
- Analyse des Einflusses der Werkzeugmerkmale auf die Prozesszielgrößen
- Aufbau von Merkmalkatalogen zur Auswahlempfehlung von Werkzeugen
- Ermittlung von Anforderungen an eine reproduzierbare Werkzeugherstellung



Projektvorschlag 2
Methodische Prozesskettenbewertung für das Slotting

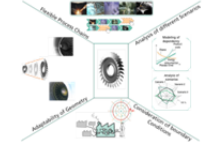
Spanende und abtragende Fertigung	Additive Fertigung	Lasermaterialbearbeitung
Robuste und adaptive Prozessketten	Reparatur Prozessketten	Automatisierte und durchgängige Prozessketten
Messtechnik und Datenmanagement	Werkzeugmaschinen Qualifizierung	Prozessbewertungen, Lebenszyklusanalysen und Qualitätssicherung

Ziel

- Identifikation der wirtschaftlichsten Fertigungsroute für Turbo-Bauteile
- Berücksichtigung neuer Slotting-Technologien
- Ableitung von bauteilspezifischen Produktionskosten und -zeiten

Mögliche Vorgehensweise

- Festlegung eines repräsentativen Bauteilmerkmals für die Betrachtung
- Darstellung der technologiespezifischen Einsatzgrenzen
- Datenaufnahme und -verdichtung
- Ökon./Ökol. Bewertung und Life-Cycle-Betrachtung



Projektvorschlag 3
Leitfaden zur Identifikation von Bauteilen und Anwendungen für das SLM

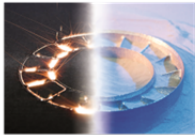
Spanende und abtragende Fertigung	Additive Fertigung	Lasermaterialbearbeitung
Robuste und adaptive Prozessketten	Reparatur Prozessketten	Automatisierte und durchgängige Prozessketten
Messtechnik und Datenmanagement	Werkzeugmaschinen Qualifizierung	Prozessbewertungen, Lebenszyklusanalysen und Qualitätssicherung

Ziel

- Erarbeitung einer systematische Vorgehensweise zur Erkennung von Anwendungspotentialen für AM

Mögliche Vorgehensweise

- Entwicklung eines Kriterienkatalogs zur Erkennung geeigneter Bauteile/Baugruppen
- Identifikation von Wettbewerbsvorteile
- Begleitung einer Umsetzung an ausgewählten Demonstratoren



Projektvorschlag 4
Qualifizierung & Qualitätssicherung für AM Pulver

Spanende und abtragende Fertigung	Additive Fertigung	Lasermaterialbearbeitung
Robuste und adaptive Prozessketten	Reparatur Prozessketten	Automatisierte und durchgängige Prozessketten
Messtechnik und Datenmanagement	Werkzeugmaschinen Qualifizierung	Prozessbewertungen, Lebenszyklusanalysen und Qualitätssicherung

Ziel

- Qualifizierung von Pulverwerkstoffen
- Quantifizierung des Einflusses d. Pulvereigenschaften auf den Prozess
- Qualitätssicherung

Mögliche Vorgehensweise

- Herstellung einer Modelllegierung durch verschiedene Herstellungsverfahren
- Screening der Prozessergebnisse in Abh. d. Herstellungsverfahrens: z.B. Morphologie, Chemie, Dichte, Kosten, ...
- Identifikation von Einflussparametern
- Ableiten von Maßnahmen zur Qualitätssicherung

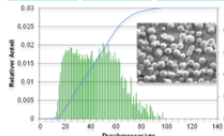


Abbildung 74: Erarbeitete Projektvorschläge für die zukünftige Zusammenarbeit

Im Rahmen von AP 13.2 wurde am 13. November 2014 ein Workshop zum Thema »Super Finishing« veranstaltet. Durch diese Plattform konnten neue, aktuell in AdaM nicht betrachtete Themen gemeinsam mit den AdaM Partnern sowie externen mittelständischen Technologieunternehmen diskutiert und mögliche zukünftige Zusammenarbeiten identifiziert werden, vgl. 3. Zwischenbericht. Für den Workshop wurden folgenden Firmen eingeladen: Micro Technica Technologies GmbH, MyTOS GmbH, First Surface GmbH (BinC Industries SA), C.F.K. CNC-Fertigungstechnik Kriftel GmbH, Rösler Oberflächentechnik GmbH sowie Insys Industriesysteme AG. Die vorgestellten Ergebnisse der externen Partner zeigen, dass für komplexe additiv gefertigte Bauteile auch neue Feinbearbeitungsverfahren wie das MMP von BinC Industries SA notwendig sind. Bei konventionellen Verfahren wie dem Gleitschleifen können fertigungstechnische Probleme aufgrund der Zugänglichkeit auftreten. In Zukunft soll die Feinbearbeitung von SLM gefertigten Bauteilen mit den identifizierten Partnern weiter im Detail untersucht werden.

Basierend auf den AdaM Tätigkeiten in AP 13.1 und AP 13.2 sowie weiteren parallelen Tätigkeiten konnte als Anschlussentität zu AdaM der Aufbau eines Turbomaschinen Zentrums in Aachen mit dem Namen ICTM (International Center for Turbomachinery Manufacturing) erfolgreich gestartet werden. Initiatoren des ICTM sind die Fraunhofer Institute IPT und ILT mit Unterstützung der Lehrstühle WZL und LLT der RWTH Aachen University. Fokus des ICTM ist die Produktion und Reparatur von Turbomaschinenkomponenten, wobei Wechselwirkungen aus Design und Material ebenso einfließen. Daher sollen in Zukunft auch weitere Forschungsinstitute eingebunden werden. Das Konsortium des Turbomaschinen Zentrums ICTM wird aus Mitgliedern des AdaM Konsortiums sowie aus weiteren nationalen und internationalen Firmen bestehen. Die Gründungsveranstaltung des ICTM findet am 28. Oktober 2015 in Aachen statt.

Insgesamt konnten die Tätigkeiten hinsichtlich der Identifikation neuer Forschungsthemen (MS13.1) und der Integration weiterer Interessengruppen (MS 13.2) im Zeitrahmen abgeschlossen werden.

4 Darstellung der Teilprojekte die nicht zum Erfolg geführt haben

Alle zur Erzielung des Gesamtziels erforderlichen Arbeiten konnten abgeschlossen werden. Vereinzelt sind geplante Entwicklungen nicht im Rahmen der Projektlaufzeit abschließend fertiggestellt worden bzw. aufgrund von Interessensverlagerungen im Konsortiums durch andere Entwicklungen substituiert worden. Im Folgenden wird auf einzelne Arbeitspakete eingegangen, welche nicht in Gänze bearbeitet werden konnten:

Technologiecluster CAx, Subcluster »Production Data Model«

Innerhalb des Subclusters Production Data Model (AP wurde zur standardisierten Datenverwaltung eine Technologiedatenbank entwickelt und vorgestellt. Das Hinterlegen von Parameterkombinationen für spezifische Bauteilbereiche in

dieser Technologiedatenbank ist nicht abgeschlossen und erfolgt vielmehr sukzessiv auf Basis weiterer Arbeiten. Mit dem Grundgerüst ist jedoch die wesentliche Voraussetzung getroffen, die Daten schnell zu verarbeiten.

Technologiecluster CAx, Subcluster »Data Acquisition and Handling«

Das Konzept des vorhandenen CAx-Moduls für den maschinenintegrierten Laser-Scanner sollte im Innovationscluster AdaM weiterentwickelt werden. Dieses Konzept wurde im Rahmen von AdaM nicht weiterverfolgt, da sich das Interesse der Projektpartner in Richtung der neuen Messmethoden wie z. B. des optischen Kohärenz Radars (OCR) verlagert hat. Für das maschinenintegrierte Laserscanning konnten trotz fortgesetzter Bemühungen keine Projektpartner gefunden werden.

Technologiecluster Laser, Subcluster »Laser Cladding«

Während des Projektverlaufs stellte sich heraus, dass die Entwicklung eines „Zeitabhängigen Modells zum LA“ einen größeren zeitlichen Aufwandes und weiterer grundlegender Arbeiten bedurfte. Die Arbeiten zur (laut Antrag) zweiten Stufe des AP5.3 – nämlich die „Thermomechanische Modellrechnung“ – konnten daher aus Zeit- und Kapazitätsmangel nicht bearbeitet werden. Im Gegenzug sind Kapazitäten in den Arbeitspunkt AP4.3 „Adaption Werkstoff“ eingeflossen und mehrere Modifikationen des oben angesprochenen zeitabhängigen Modells durchgeführt worden. Hierdurch sind auch für SLM-Prozesse erste modelltheoretische prädikative Beschreibungsansätze bzgl. Spurbreite und Spurtiefe einschließlich der lokalen Erstarrungsbedingungen erarbeitet worden. Zudem wurde über den Rahmen hinaus eine modelltheoretische Beschreibung für die Prozessbedingungen abgeleitet, bei dem sich eine Dampfkapillare ausbildet. In der Literatur wird für die modelltheoretische Beschreibung die sogenannte Goldak Volumenquelle verwendet. Diese erfordert eine Anpassung verschiedener mathematischer Parameter so, dass im Ergebnis die experimentelle und modelltheoretische Spurgeometrie übereinstimmen. Modelle auf dieser Basis haben deswegen grundsätzlich keinen prädikativen Charakter. Bei der neu entwickelten Methode wird die Geometrie der Dampfkapillaren unter der Bedingung abgeleitet, dass auf dieser die Verdampfungstemperatur erzielt wird. Im Vergleich experimenteller und modelltheoretisch bestimmter Spurgeometrien zeigt sich eine ausreichend gute Übereinstimmung. Damit steht auch für den Fall der Ausbildung einer Dampfkapillaren ein prädikatives Modell für das SLM-Verfahren zur Verfügung.

5 Übersicht technologiespezifischer Ergebnisse

Im Rahmen von Adam sind in Summe ca. 50 technologiespezifische Ergebnisse erzielt worden. Auf diese wird im Anhang dieses Berichtes nach Technologieclustern sortiert eingegangen (siehe Anhang, Kapitel 10.1 bis 10.4). Die darin aufgeführten Ergebnisse und Umsetzungen sind von prototypischer Natur und stellen eine Weiterentwicklung des vorhandenen Stands der Technik und des IP (intellectual property) der Fraunhofer-Institute IPT und ILT dar. Generell wird eine Weiterentwicklung der hier vorgestellten technologiespezifischen Ergebnisse über den Rahmen von AdaM hinaus angestrebt.

Eine technologische Implementierung und Umsetzung vor Ort bzw. ein Installations- und Software-Support übersteigen den Rahmen von AdaM. Falls erforderlich, können jedoch weitere bilaterale Abstimmungen erfolgen.

6 Getätigte Investitionen

Eine Übersicht mit den getätigten Investitionen ist dem Fördermittelgeber bereits zugegangen. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht weiter auf diesen Punkt eingegangen.

7 Außendarstellung, Marketing und Veröffentlichungen

Das übergeordnete Ziel aller Informations- und Außendarstellungsmaßnahmen war es, über die im Rahmen des NRW-Ziel-2 geförderten Projektes AdaM durchgeführten Entwicklungen zu informieren und der breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Dabei wurden Zielgruppen wie private und öffentliche Investoren, relevante regionale Einrichtungen und Multiplikatoren sowie die breite Öffentlichkeit der Gesellschaft zur Kommunikation der Aktivitäten und Ergebnisse des Innovationsclusters AdaM adressiert. Zur Verbreitung der Ergebnisse genutzt wurden internationale Messeauftritte und Konferenzen, individuell zum jeweiligen Projektergebnis verfasste und an spezielle Verteiler versendete Pressemitteilungen, Artikel in der Branchen- und Fachpresse, sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen. Darüber hinaus ist eine eigens erstellte Internetseite (<http://www.innovationscluster-adam.de/>) zur Veröffentlichung der in AdaM erzielten Ergebnisse eingerichtet worden.

Im Folgenden wird auf Messeauftritte, Konferenzen, Veröffentlichungen und durchgeführte wissenschaftliche Arbeiten eingegangen.

Messeauftritte

Eine zielgerichtete Präsentation der Ergebnisse im Umfeld der Luftfahrt konnte durch die aktive Teilnahme an den Luftfahrtmessen **ILA Berlin Air Show** im Jahr 2014 sowie **International Paris Air Show** im Jahr 2015 erfolgen. Beide Messen gehören zu den größten und wichtigsten Messen der Branche und werden durch internationales Fachpublikum besucht. Im Vordergrund des Messeauftritts standen die beiden Prozessketten zum Leitschaukelcluster und zur Multi-BliR, vgl. Kapitel 2. Im Rahmen der Paris Air Show wurde die Ausstellung durch die Vorstellung von Fachvorträgen abgerundet. Die Messepräsenz kann resümierend als durchweg positiv bewertet werden, da auf der Basis der AdaM Ergebnisse Kontakt zu vielen interessierten Firmen aufgebaut werden konnte.

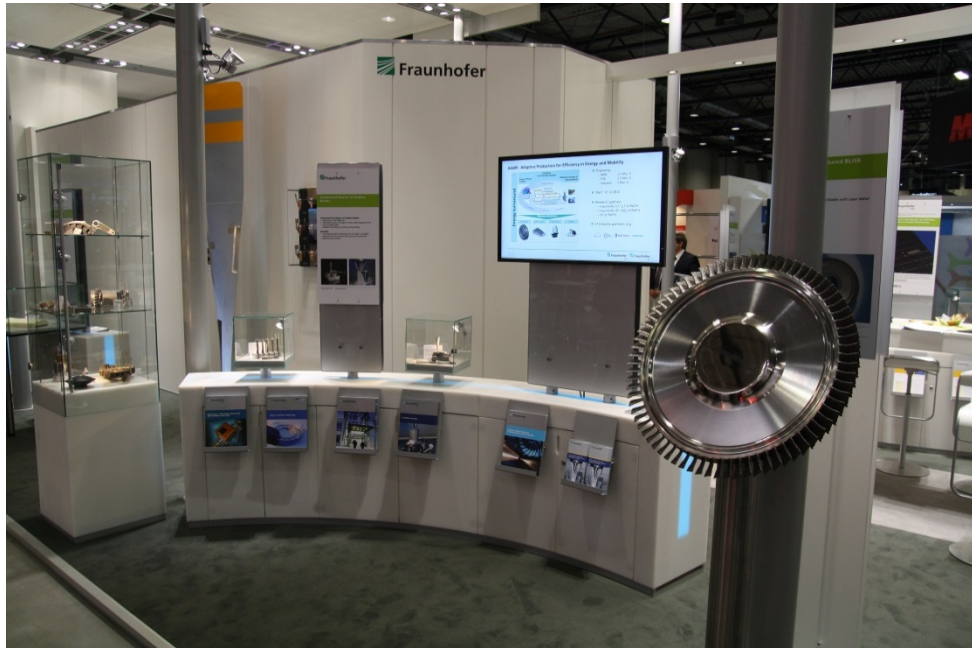


Abbildung 75: Messestand des Innovationsclusters AdaM im Rahmen der ILA 2014, Berlin

Konferenzen

Höhere Effizienz und niedrigere Emissionswerte sind die zentralen Ziele der Anwendung neuester technologischer und fertigungstechnischer Entwicklungen, die den rund 240 Teilnehmern der **International Conference on Turbomachinery Manufacturing ICTM** vom 25. bis 26. Februar 2015 präsentiert wurden. Auf der ICTM-Konferenz in Aachen sprachen hochrangige Experten, vorwiegend aus den Bereichen Luft- und Raumfahrt sowie Energiegewinnung (MTU Aero Engines, MAN Diesel & Turbo, Rolls-Royce Deutschland, Siemens, Alstom, Pratt & Whitney und andere). Weitere Beiträge leisteten Vertreter von Systemlieferanten, die direkt Neuentwicklungen in Praxisanwendungen implementieren, sowie von FuE-Organisationen, die an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Einsatz von Turbomaschinen tätig sind (GE Global Research, Fraunhofer IPT und ILT). Auf der Konferenz wurden ebenfalls Live-Demonstrationen an den beteiligten Fraunhofer-Instituten durchgeführt. Bei den Live-Demonstrationen an Fraunhofer IPT und ILT hatten die Teilnehmer die Gelegenheit, das Konzept der durchgängigen Produktionsketten anhand ausgewählter Beispiele zu erleben. Gegenüber der ersten ICTM-Konferenz im Jahr 2011 ist das Teilnehmerfeld im nun dritten Jahr deutlich angewachsen.

Eine weitere zentrale Konferenz mit besonderem Fokus auf der Lasertechnologie ist der **International Laser Technology Congress in Aachen, AKL**. Mit über 600 Teilnehmern, rund 90 Referenten und über 40 Sponsoren hat sich der AKL in Europa als führendes Forum für angewandte Lasertechnik in der Produktion etabliert. Auf dem AKL 2014 konnten dem Fachpublikum aus Laserherstellung und –anwendung Forschungsergebnisse aus dem AdaM-Innovationscluster an spezifischen Prüfständen nicht nur erläutert, sondern

auch im Prozess demonstriert werden. Darunter wurden aktuelle Ergebnisse des Innovationsclusters AdaM aus dem Technologiecluster Laser zu den Technologien SLM „Productivity Increase by Using Adaptive SLM Process Strategy“, Laserauftragschweißen „Development of a Technology Processor for Laser Metal Depositon“ und Prozessüberwachung „Certification of Powder Nozzles for LMD“ vorgestellt.

Seit mehr als 65 Jahren befasst sich das **Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (AWK)** mit den aktuellen Entwicklungen der Produktionstechnik, die nun durch „Industrie 4.0“ eine neue Dynamik erfahren. Das Forscher-Team des AdaM-Innovationsclusters konnte im Rahmen des AWK vom 22. bis 23. Mai 2014 dem internationalen Fachpublikum eine durchgängige Prozesskette zur Fertigung und Reparatur von Turbomaschinenkomponenten nicht nur mit einem Vortrag, sondern auch live in den Maschinenhallen von Fraunhofer ILT und IPT präsentieren.

Veröffentlichungen und Außendarstellung

Ergebnisse des Fraunhofer-Innovationsclusters AdaM sind durch mehr als 25 Artikel in Fachzeitschriften und wissenschaftlicher Fachliteratur, sowie durch Vorträge auf Konferenzen und Messen veröffentlicht worden (siehe Anhang 10.5). Den Publizitätsvorschriften wurde in den Pressemeldungen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen genüge getan durch die Nennung des Förderkennzeichens sowie das Einfügen des EFRE-Logos. Letzteres wurde beim Versand zusätzlich als jpg-Datei an unseren Presseverteiler mitverschickt.

Wissenschaftliche Arbeiten

Als ein weiterer wichtiger Aspekt der Außendarstellung sind die Erstellung wissenschaftlicher Arbeiten zu nennen, welche die gewonnenen Erkenntnisse und erzielten Erfolge dokumentieren und Forschern zugänglich machen. Hierzu sind in allen Technologieclustern wissenschaftliche Arbeiten durchgeführt worden und Dissertationsideen entstanden. Unter den durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten sind mehr als 15 Bachelor- und Masterarbeiten entstanden (vgl. Anhang 10.5). Diese leisteten an den beteiligten Fraunhofer-Instituten IPT und ILT, sowie an den Lehrstühlen WZL und LLT der RWTH Aachen University einen Beitrag zur Entwicklung von Einzeltechnologien.

8 Auswirkungen auf den Standort NRW & Ausblick

Auswirkungen auf den Standort NRW

Die im Innovationscluster AdaM erzielten Ergebnisse haben deutliche Auswirkungen auf den Standort Nordrhein-Westfalen zur Folge. Zum einen werden neue Technologie und Prozesse bilateral bei den AdaM Partnern implementiert und führen dort zur deutlichen Steigerung von Ressourceneffizienz, Prozessstabilität und Wirtschaftlichkeit. Die Fraunhofer-Institute setzten hierbei die in AdaM erzielten Ergebnisse beim Kunden um, so dass das Industriekonsortium von den implementierten Technologien durch Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit im Weltmarkt profitiert. Dies sichert insbesondere Arbeitsplätze in Produktion und die angebundener Infrastruktur am Standort Deutschland. Beispiele für solche bilaterale Implementierungen sind ein Spann- und Stabilisiersystem für Blisken, die neue Prozessführung des simultanen dreiachsigen Drehens, die Umsetzung eines Zweistrahlkonzeptes mittels einer Strahlquelle für SLM-Maschinen und die Entwicklung eines Messsystems für Pulverzufuhrdüsen.

Die technologischen Ergebnisse werden unter anderem auch durch Technologiedatenbanken und Softwaremodule verfügbar und handhabbar gemacht. Im Hinblick auf die beteiligten Fraunhofer-Institute entstanden durch die Aktivitäten Dissertationsideen und diverse Diplom-, Studien-, Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten, welche in Kapitel 10.5 im Anhang aufgeführt sind.

Ein Beispiel für die Verstetigung von Forschungsarbeit und die Schaffung neuer Arbeitsplätze ist die Gründung der Innoclamp GmbH aus dem Fraunhofer IPT heraus. Bei dem Unternehmen handelt es sich um ein junges Spin-off, das sich auf die Konstruktion und die Fertigung von Spannsystemen für die Fertigung und Reparatur von Turbomaschinen konzentriert. Durch die Unternehmensgründung sind auch langfristig ein Transfer von Wissen und die Bereitstellung von Technologieprodukten im Feld der Spanntechnik gewährleistet.

Ausblick

Die Zusammenarbeit aus den beiden Fraunhofer Innovationsclustern TurPro und AdaM hat die Position der beteiligten Institute nachhaltig gefestigt und damit die Bedeutung dieser Form der Kooperation bestätigt. Im Rahmen der institutiensübergreifenden Zusammenarbeit erfolgte eine strategische Technologieentwicklung mit den Partnern, die sowohl auf dem breiten Portfolio der F&E Kompetenzen an den Instituten, als auch auf dem abgestimmten Roadmapping mit den Partnern fußte. Weiteres Erfolgsmerkmal, das durch die Kooperation in den Innovationsclustern erreicht werden konnte, ist die durchgängige Verzahnung aller Teilprojekte und F&E Arbeiten. Diese konsortiale Zusammenarbeit brachte für die Partner spürbare Synergien hervor.

Aufbauend auf den Erfolg von TurPro und AdaM setzen die beteiligten Institute ihre Zusammenarbeit zukünftig im Rahmen ihrer gemeinsamen Initiative „International Center for Turbomachinery Manufacturing - ICTM Aachen“ fort. Im Rahmen der ICTM Partner Community werden sie dabei auch das existierende

Netzwerk einbeziehen und ausdehnen, um dadurch gemeinsamen mit den interessierten Industriepartnern weiterhin die Potenziale der konsortialen Zusammenarbeit auszuschöpfen.



Abbildung 76: Überführung der Innovationscluster in das Netzwerk des ICTM

Vorrangiges Ziel des ICTM Aachen ist es, technologische Innovationen zielgerichtet zu realisieren und zügig in industrielle Anwendungen zu überführen, um den angeschlossenen Industriepartnern einen nachhaltigen Technologievorsprung im internationalen Umfeld zu ermöglichen. Das ICTM Aachen ermöglicht den Zugriff auf das gesamte Kompetenzportfolio der beteiligten Institute und beschleunigt die Abstimmung von F&E Projekten zur Herstellung und Reparatur von Turbomaschinen.

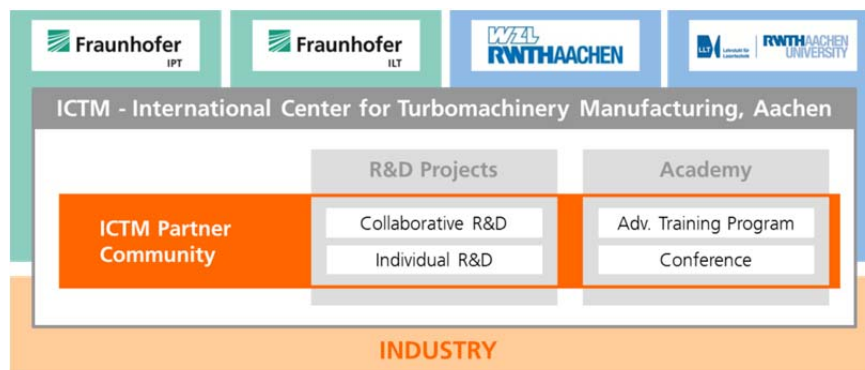


Abbildung 77: Struktur des ICTM

In Ergänzung zur bilateralen Zusammenarbeit in individuellen F&E Projekten ist das ICTM Aachen in besonderer Form auch auf die Durchführung von Gemeinschaftsforschungsprojekten im vorwettbewerblichen Bereich ausgerichtet. Zu diesem Zweck bildet das ICTM Aachen eine Arbeitsgemeinschaft mit Industrieunternehmen. Alle Industriepartner dieser sogenannten ICTM Partner Community werden in die Ausgestaltung der Gemeinschaftsforschungsprojekte einbezogen und haben Anteil an den Ergebnissen. Fokus der Aktivitäten in der Arbeitsgemeinschaft liegt auf vorwettbewerblichen F&E Themen, die eine große Schnittmenge der Interessen der beteiligten Industriepartner abbilden und durch konsortiale oder multilaterale Zusammenarbeit entsprechende Synergien ermöglichen.



Abbildung 78: Beteiligte Parteien am ICTM

Die F&E Institute des ICTM Aachen (d.h. das Fraunhofer IPT, das Fraunhofer ILT, das WZL der RWTH Aachen und der LLT der RWTH Aachen) führen die Entwicklungstätigkeit im Rahmen der Collaborative R&D für die ICTM Partner Community aus. Finanziert werden die Arbeiten innerhalb der ICTM Partner Community über Grundbeiträge der ICTM Partner Community. Das Netzwerk geht somit von einem rein industriefinanzierten Kern aus.



Abbildung 79: Zyklus der Projekttreffen und Projektbearbeitung

Anders als die beiden jeweils auf drei Jahre beschränkten Innovationscluster AdaM und TurPro, ist die ICTM Partner Community auf langfristige Kontinuität ausgerichtet. Grundlage für die Gemeinschaftsforschung sind jährlich wiederkehrende Zyklen, in denen jeweils aus relevanten Themen entsprechende F&E Projekte abgeleitet und durch die Institute bearbeitet werden. Maßgeblich durch die Einbindung eines Lenkungsreises wird dazu auch eine Mittel- und Langfristplanung zukünftiger F&E-Themen entwickelt und verfolgt, aus der sich für jeden Partner Orientierung und individuelle Planungsoptionen ergeben.

Der Austausch über die Ergebnisse aus der Gemeinschaftsforschung und die gemeinsame Festlegung der F&E Projekte für das jeweilige Folgejahr findet auf der Hauptversammlung der ICTM Partner Community statt, an der alle Partner teilnehmen werden (Annual R&D Meeting).

Neben den F&E Projekten werden die Institute im Rahmen des ICTM mit einem maßgeschneiderten Seminarprogramm auch auf spezifische Bedarfe für die Fort- und Weiterbildung eingehen. Darüber hinaus richtet das ICTM Aachen auch weiterhin die bereits etablierte und im Rhythmus von zwei Jahren stattfindende ICTM Conference aus.

9 Zusammenfassung

Das zentrale Ziel des Innovationsclusters AdaM, einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Steigerung der Ressourceneffizienz in den Bereichen der Energieversorgung und der Mobilität zu leisten, wurde erreicht. Gegenüber dem ersten regionalen Cluster mit dem Fokus auf der „Produktion und Reparatur von Turbomaschinen“, TurPro, wurde der inhaltliche Fokus u.a. um die Aspekte der Ressourceneffizienzbetrachtung und der Adaptivität von Einzeltechnologien und Prozessketten deutlich erweitert. Vorwettbewerblich gelang es, zentrale Technologien wie die additive Fertigung oder die Hochleistungszerspanung für den Turbomaschinenbau weiterzuentwickeln und auf ein für die Anwendung ausreichendes Technologielevel zu heben. Innerhalb der bilateralen Projekte konnten aufbauend auf vorwettbewerblichen Forschungsergebnissen unternehmensspezifische Implementierungen und Anpassungen der Technologien erfolgen. Die Trennung der bilateralen Projekte von den vorwettbewerblichen Arbeiten war dabei die Basis für die erfolgreiche Zusammenarbeit konkurrierender Unternehmen. Seitens der Industriepartner wurden insbesondere die erfolgreich durchgeführten bilateralen Projekte, deren Ergebnisqualität und die Darstellung der vorwettbewerblichen Ergebnisse als sehr positiv bewertet.

Anhand des Demonstrators „Leitschaufelcluster“ wurde eine Fertigungsprozesskette von Design über die generative Fertigung mittels SLM bis zur Nachbearbeitung untersucht und demonstriert. Dabei wurden mittels einer kombinierten Bewertungsmethodik unterschiedliche Prozessketten aus Design- und aus Fertigungssicht bewertet und auf Basis umfassender Verbrauchsmessungen deren spezifischer Energie- und Ressourcenverbrauch untersucht. Durch die Anwendung des Selective Laser Melting SLM wurde das neuartige Design eines Verdichterstatorsegmentes ermöglicht, welches das Potenzial zur Verbrauchsreduktion gegenüber der bisherigen Bauweise und somit zur Reduzierung der CO₂-Emmission bietet. Am Beispiel der Prozesskette „Multi-BliR“ wurde die adaptive Kombination von Einzeltechnologien zur Fertigung und Reparatur demonstriert. Darunter fallen u.a. das simultane Dreiachs-drehen, die Prozessführung für die stabilisierte Schlichtfräsarbeit, die Nutzung des Technologieprozessors für adaptive Reparaturschweißungen mittels Laserauftragschweißen, die Anwendung eines neuen Spann- und Stabilisierungssystems für die prozesssichere Nachbearbeitung der Schaufeln und die optische Messtechnik. Die erfolgreiche Demonstration einer Reparatur von mehrstufigen Verdichterbauteilen ist dabei eine Grundvoraussetzung zur Verlängerung des Lebenszykluses von Turbomaschinenbauteilen.

Diese und andere Ergebnisse wurden durch wissenschaftliche Veröffentlichungen, Vorträge, Messeauftritte und die erfolgreiche Fortführung der ICTM Konferenz am Standort Aachen publiziert und vorgestellt. Am Beispiel der zunehmenden Teilnehmeranzahl der ICTM Konferenz zeigt sich, dass das aufgebaute Technologiewissen in großem Maße auch außerhalb des AdaM-Konsortiums von der Industrie in Anspruch genommen wird.

Der Erfolg der konsortialen Kooperation und die zunehmende Nachfrage nach Forschungsk Kooperation und Technologieentwicklung sind die Basis für die Gründung des „International Center for Turbomachinery Manufacturing - ICTM Aachen“. Das Zentrum fußt auf dem erworbenen Wissen aus den Innovationsclustern TurPro und AdaM und der eng verzahnten Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Fraunhofer-Instituten IPT und ILT, sowie den Lehrstühlen WZL und LLT der RWTH Aachen University. Die Zielsetzung des ICTM ist es, im Rahmen einer langfristigen Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und der Industrie technologische Innovationen zielgerichtet zu realisieren und zügig in industrielle Anwendungen zu überführen. Die Zusammenarbeit in den Innovationsclustern zieht damit einen nachhaltigen Nutzen für den Standort Aachen und die regionale Branche des Turbomaschinenbaus nach sich.

10 Anhang

10.1 Technologiespezifische Ergebnisse Cluster C

Cluster C: CAx; Subcluster Production Data Model			
Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
„Design Metamodel“: Vorgehensweise zur Integration von Technologieinformationen in ein 3D-CAD-Modell	Integration von Fertigungsinformationen in ein CAD-Modell. Oberflächenqualitäten, Toleranzen und Fertigungsinformation / -anforderungen werden über die PMI-Funktionalität von Siemens NX eingetragen.	1.1	Tobias Huwer
Konstruktion von Reparatur-Features	Verwendung von Siemens NX zur Konstruktion von parametrisierten Hilfsgeometrien, die eine flexible Bahnplanung an schadhafte Bauteilbereichen ermöglicht.	1.1	Tobias Huwer
„SimCutPro“: Makrosimulation zur virtuellen Berechnung der Eingriffsbedingungen	Weiterentwicklung und Anwendung der am IPT entwickelten Software zur Berechnung der Eingriffsbedingungen bei komplexen 5-Achs-Prozessen im Kontext des Themenbereichs Turbomaschinenbaus.	1.2	Diana Suárez-Martel
XML-Datenformat als Datenaustauschformat	Datenformat, welches die Speicherung der Prozess-, Maschinen-, Bauteil- und Organisationsdaten ermöglicht. Ziel ist die Erstellung einer Technologiedatenbank	1.3	Dr. Thomas Bobek

Cluster C: CAx; Subcluster Model-based Process Engineering

Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Software „CAx-PK-Designer“ für die standardisierte Bewertung von CAx-Prozessketten	Entwicklung eines Bewertungstools für CAx-Prozessketten. Eine objektive Bewertung wird durch eine kennzahlbasierte Bewertung verschiedener Prozessvarianten ermöglicht.	2.2	Dr. Pascal Schug
Erweiterung der Methode »Funktionsbaustein Ansatz«	Verknüpfung verschiedener Softwaresysteme zu einer adaptiven Fertigungsprozesskette	2.1	Gunter Spöcker

Cluster C: CAx; Subcluster Data Acquisition and Handling

Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Sensordaption: Anwendung des OCR Sensors	Erfassung von geometrischen Merkmalen auf Basis der optischen Kohärenztomographie	3.1	Kurt Rämer, Michael Kulik
Sensoranbindung an einen Roboter	Anbindung an einen Sechssachs-Knickarm-Roboter zur Sensorpositionierung über ein neu konstruiertes Gehäuse	3.1	Kurt Rämer, Michael Kulik
Konvertierungssoftware zur Messdatenauswertung	Software zur Extraktion der Reflektion aus den Messdaten einer OCR-Messung	3.2	Kurt Rämer, Michael Kulik
Methode zur Messbahnplanung	OCR-Messmethode auf Basis des Teach-in eines Roboters für das Reopening von Kühlbohrungen	3.2	Kurt Rämer, Michael Kulik

10.2 Technologiespezifische Ergebnisse Cluster L

Cluster L: Laser; Subcluster SLM			
Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Entwicklung einer adaptiven SLM-Prozessführung	SLM-Prozessführung zum Aufbau eines Leitschaufelclusters, welche in Abhängigkeit von Bauteilfeaturen große Oberflächengüte auf Funktionsflächen und große Aufbauraten für nachzuarbeitende Geometrien erzielt.	4.2	Anders Such
Qualifizierung der adaptiven SLM-Prozessführung	Prozessparameter, mechanische Kennwerte, Bestimmung des Zeit- und Energiebedarfs bei Verwendung der adaptiven SLM-Prozessführung am Beispiel eines Leitschaufelclusters für den Werkstoff Inconel 718	4.4	Anders Such
Kosten- und Business Case Analyse zur generativen Fertigung	Kosten- und Business Case Analyse zur generativen Fertigung von Leitschaufelclustern mittels adaptiver SLM-Prozessführung für den Werkstoff Inconel 718	4.1	Anders Such
Simulationstool zur modelltheoretischen Beschreibung eines SLM-Prozesses	Modifikation des LA-Simulationstools FRP_LMD zur prädikativen modelltheoretischen Beschreibung eines SLM-Prozesses bei der Verarbeitung des Werkstoffes Inconel 718	4.3	Dr. Norbert Pirch
Datenbankstruktur und Basisdatensätze SLM	Prototyp einer Datenstruktur für das SLM. Anlagenspezifische Prozessparameter zum SLM von Hastalloy X, AISi10 und Inconel 718.	4.3	Shen
Prozesskette generativ gefertigte Leitschaufelcluster	Vorstellung und Demonstration einer prototypischen Prozesskette zur generativen Fertigung eines Leitschaufelclusters aus Inconel 718. Die Endbearbeitung der Funktionsflächen ist durch externe Firmen mittels bspw. MMP-Technologie, Strömungsschleppschleifen und EDM/ECM erfolgt.	4.5, 4.6	Anders Such, Daniel Schraknepper

Cluster L: Laser, Subcluster LA			
Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
LA Technologieprozessor	Konzept zur Erstellung eines modular aufgebauten Softwaretools zur Ausgabe von Prozessparameterstartwerten für das LA in Abhängigkeit von Werkstoff und Geometrie	5.1	Marco Göbel
Anpassung Granta MI-Datenbanksystem für die laserbasierten generativen Fertigungsverfahren SLM & LA	Auf die Technologien SLM & LA angepasste Datenbank inklusive Datenbankstruktur der Firma Granta. Zur Nutzung der Datenbank und Implementierung der Datenbankstruktur ist eine Lizenz und Servicedienstleistung der Firma Granta erforderlich.	5.2	Frank Mentzel
Datenbankstruktur und Basisdatensätze LA	Datenstruktur und Prozessparameter für das LA von Einzelspuren und Stegen für die Werkstoffe Inconel 718 und 17-4PH.	5.2	Frank Mentzel
"LDV_LAB" Leistungsdichte Analysetool	Softwaretool zur Analyse und Darstellung von Leistungsdichtemessungen (derzeit unterstützte Geräte: Primes Fokus Monitor, Spiricon Mikroskopmonitor)	5.3	Dr. Norbert Pirch
"PDV_LAB" Partikeldichte Analysetool	Softwaretool zur Analyse und Darstellung von Messungen zur Partikeldichteverteilung von Pulverzufuhrdüsen. Derzeit unterstütztes Messgerät: ILT-PGSA (vgl. AP6.1)	5.3	Dr. Norbert Pirch
"FRP_LMD" Numerischer Integrator	Erweiterung eines am ILT entwickelten Fortran95-Codes zur numerischen Lösung des freien Randwertproblems bzw. der für das LA zugrundeliegenden Modellgleichungen. Liefert Temperatur, Geometrie und Erstarrungsbedingungen von Schmelzbädern. Keine Stand-alone-Software.	5.3	Dr. Norbert Pirch
Entwicklung von Prozessdiagrammen	Weiterentwickelte Methode zur Darstellung von experimentell ermittelten LA Prozessergebnissen (wie z.B. Einzelspurgeometrie, Beschichtungsverhältnis, etc.) in Abhängigkeit von Prozessparametern, Zusatzwerkstoff und Geometrie.	5.4	Marco Göbel
LA Prozessdiagramme	Prozessdiagramme für Einzelspuren und Stege zum LA auf ebenen und dünnwandigen Substraten in Abhängigkeit der Prozessparameter: Strahldurchmesser, Vorschubgeschwindigkeit, Pulvermassenstrom und Laserleistung. Untersuchte Werkstoffe Inconel 718 und 17-4PH.	5.4	Marco Göbel
Systematik zur profiltun-angepassten Schaufelspitzenreparatur mittels LA	Vorgehen zur Identifikation von LA-Prozessparametern zur profiltun-angepassten Schaufelspitzenreparatur mittels Prozessdiagrammen am Beispiel einer Multi-BliR Schaufelspitze und einer Schaufelecke (vgl. AdaM-Abschlussworkshop)	5.4	Marco Göbel

Cluster L: Laser; Subcluster Vergleich SLM & LMD			
Bezeichnung	Kurzbeschreibung	AP	Ansprechperson
Vergleich von laserbasierten generativen Fertigungsverfahren SLM und LA	Vergleich der Technologien SLM und LA mit identischem Zusatzwerkstoff Inconel 718. Vergleich von mittels SLM und LMD gefertigten Testgeometrien hinsichtlich der erzielbaren Auftragraten, Oberflächengüten und Gefüge.	SLM& LMD 1	Moritz Alkhayat
Ermittlung und Vergleich der statischen mechanischen Kennwerte und des Gefüges von laserbasierten generativen Fertigungsverfahren	Statische mechanische Kennwerte von mittels SLM & LMD aufgebauten Prüfkörpern und zugehörige Gefügeanalysen für den Werkstoff Inconel 718. Aufbereitung der Ergebnisse sortiert nach Technologie und Prozessparametern (inkl. adaptive SLM-Prozessführung)	AP4.1, SLM& LMD 2	Anders Such, Moritz Alkhayat

Cluster L: Laser; Subcluster Prozessüberwachung			
Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
PGSA – Pulver-GasStrahl-Analyse	Prototypischer Versuchsaufbau eines Messgerätes zur Ermittlung der Pulverpartikeldichte von Pulverzufuhrdüsen durch orts aufgelöste Kurzzeitbeleuchtung der Pulvergasstrahlkaustik	6.1	Stefan Mann
Versuchsaufbau und Kennzahlen für Pulverzufuhrdüsenzertifikate	Versuchsaufbau und Kennzahlen zur Charakterisierung der Pulverpartikeldichte von Pulverzufuhrdüsen mittels eines PGSA unter standardisierten Messbedingungen.	6.1	Stefan Mann
VCSL-Beleuchtungs-modul zur Prozessüberwachung	Prototyp eines kompakten laserbasierten Beleuchtungsmoduls zur koaxialen Prozessüberwachung beim LA.	6.2	Stefan Mann
Integriertes Sensorsystem zur koaxialen Prozessüberwachung beim LA	Prototypisches koaxiales, IR-kamerabasiertes Prozessüberwachungskonzept zur Aufnahme der Wärmestrahlung für die automatisierte Prozessüberwachung von Geometrie und Position der Schmelze beim LA von Schaufelspitzen.	6.3	Stefan Mann
Entwicklung einer Software zur Dokumentation von Ergebnissen aus Prozessüberwachung beim LA	Prototyp einer Software mit grafischer Benutzeroberfläche zur Dokumentation und Darstellung von koaxial aufgenommenen Messgrößen aus der Prozessüberwachung beim LA. Keine Stand-alone-Software.	6.3	Stefan Mann

Cluster L: Laser; Subcluster Laser Ablation			
Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Evaluation der Technologie des kurzpuls-Laserabtrags	Grundlagenuntersuchungen zum Laserabtrag von Inconel 718 und Ti-64 durch nano-,piko- und femtosekunden Laserstrahlquellen. Bestimmung von Prozessdomänen zum Abtrag mit minimierter Schmelzfilmdicke.	7.1	Johannes Finger
Wirtschaftliche Bewertung des Laserabtrags für die Oberflächenbearbeitung	Kosten- und Produktivitätsanalyse zum Laserabtragen. Ergebnisse für Inconel 718 in Abhängigkeit des Strahlquellentypes (ns-, ps- oder fs-Laser), des erzielbaren Abtragsvolumens pro Minute und der Oberflächen bei gegebenen Invest- und Maschinenstundenkosten.	7.2	Johannes Finger

10.3 Technologiespezifische Ergebnisse Cluster M

Cluster M: Machining; Subcluster Milling & Turning			
Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Software zur analytischen Berechnung der Eingriffsbedingen	Weiterentwicklung einer Software zur analytischen Berechnung der Eingriffsbedingungen (Spanungsgeometriekenngößen) einzelner Schneiden im Fräsprozesse für komplexe Werkzeuge wie Vollradiusfräser	8.1	Diana Suárez-Martel, Daniel Schraknepper
Methodik zu Berechnung der Spanungsgeometrie	Weiterentwicklung einer Methodik zu Berechnung der Spanungsgeometrie beim simultanen dreiachsigen Drehen, die die Berechnung der geom. Durchdringung beim 2- und 3-Achsdrehen ermöglicht	8.2	Dr. Florian Degen
Methodik zu Berechnung des Werkzeugverschleißes	Weiterentwicklung einer Methodik zu Berechnung des Werkzeugverschleißes beim simultanen dreiachsigen Drehen, die die Berechnung der Verschleißverteilung beim 2- und 3-Achsdrehen ermöglicht	8.2	Dr. Florian Degen
Methodik zu Berechnung der Zerspankräfte	Weiterentwicklung einer Methodik zu Berechnung der Zerspankräfte beim simultanen dreiachsigen Drehen, die die Berechnung der Kraftkomponenten beim 2- und 3-Achsdrehen ermöglicht	8.2	Dr. Florian Degen
Adaptierung des trochoidalen TaumelfräSENS auf die Multi-BLiR	Adaptierung der trochoidalen TaumelfräSBearbeitung auf die komplexe Schaufelgeometrien der Multi-BLiR als alternative Schruppstrategie für komplexe Schaufelgeometrien	8.2	Gregor Smyczek
Vorgehensmethodik zur ganzheitlichen Prozessauslegung	Weiterentwicklung einer standardisierten und wissensbasierten Methode zur schnellen und flexiblen Auslegung von Zerspanprozessen	8.3	Dr. Florian Degen
Beitrag/ Weiterentwicklung zu einer Auslegungsmethodik für die SchlichtfräSBearbeitung labiler Bauteile	Nutzung theoretischer Stabilitätskarten für ausgewählte Bauteil-Bearbeitungspunkte, um prozessstabilere Prozesse zu approximieren/ erreichen	8.4	Alexander Schäfer

Cluster M: Machining; Subcluster Grinding

Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Entwicklung, Prototyp: Prozessentwicklung zur automatisierten Feinbearbeitung von Einzelschaukeln mit adaptiven Werkzeughaltern	Prototypisch entwickelte Feinbearbeitungsprozesse für den Einsatz von adaptiven Werkzeughaltern mit einer definierten Anpresskraft. Die Anpresskraft kann dabei entweder mittels mechanischer Federpakete oder mittels Druckluft eingestellt werden und die Halter können über HSK-Schnittstellen in Werkzeugmaschine und Roboter integriert werden, so dass Einzelschaukeln feinbearbeitet werden können	9.2 / 9.3 / 9.4	Arne Kretschmer
Flexible Roboterzelle zur Feinbearbeitung von Einzelschaukeln	Konzept (und in Teilen Prototyp) einer flexiblen Roboterzelle als Lösung zur automatisierten Feinbearbeitung unter Nutzung von robotergeführten Spindeln oder Einzelschaukeln	9.2	Arne Kretschmer

Cluster M: Machining; Subcluster Clamping

Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Spannsystem für Verdichterscheiben in BLISK-Bauweise	Ein neues, anpassungsfähiges Spannsystem zur Bauteilreferenzierung und Stabilisierung von Schaukeln wurde entwickelt, als Prototyp umgesetzt und zum Patent angemeldet. Die Dämpfung von Titanblisken beträgt mit dem Spannsystem 12,5 Prozent, ohne das System liegt sie bei 0,027 Prozent.	10.1	Roman Kalocsay
Modularisierungskonzept für Spannsysteme	Konzepte zum modularen Design von Spannsystemen, mit standardisierten Schnittstellen der Module bei freier Skalierbarkeit	10.2	Roman Kalocsay

Cluster M: Machining; Subcluster Processcontrol

Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Anwendung und Weiterentwicklung einer Prozessüberwachung	Softwaremodul zur Auswertung des Schwingverhaltens im Frequenzbereich zur Bewertung der Prozessstabilität bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Komponenten	11.1	Simon Rekers

10.4 Technologiespezifische Ergebnisse Cluster D

Cluster D: Design			
Bezeichnung	Umfang der erzielten Ergebnisse	AP	Ansprechperson
Simulationsmodell	Aufbau eines AUTOGRID-Rechnernetzes zur gegebenen 3D-Tandem-Statorgeometrie und des zugehörigen Simulationssetups für den Strömungslöser TRACE	12.2	Matthias Binz
Aerodynamische Bewertung des Leitschaufelclusters	Aerodynamische Bewertung von Tandemspalt, Radialspalt sowie Oberflächenrauheit des Leitschaufelclusters anhand von CFD-Simulationsergebnissen	12.2	Matthias Binz
Bewertungsmodell	Entwicklung eines kombinierten Bewertungsmodells aus Design- und Fertigungssicht in Excel unter Anwendung der AHP-Methode zur Darstellung der Wirkzusammenhänge zwischen Designanforderung und Fertigungsaufwand	12.4	Sebastian Wölk
Aufbau eines Ressourcenmodells	Aufbau von Ressourcenmodellen verschiedener Prozessketten in der Software GaBi zur ökologischen Bewertung verschiedener Fertigungsketten des Leitschaufelclusters	12.4	Sebastian Wölk

10.5 Tabellarische Übersicht der durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten und Dissertationsvorhaben

Liste der im Rahmen von AdaM entstandenen Dissertationen und -vorhaben

Nr.	Titel	Art	Autor
1	Macroscopic Simulation of Multi-Axis Machining Processes	Dissertation	Meysam Minoufekr
2	Modellierung, Bewertung, Analyse und Optimierung von CAx-Prozessketten	Dissertation	Pascal Schug
3	Methodische Fräsprozessauslegung für die Bearbeitung hochwarmfester Werkstoffe	Dissertation	Marc Busch
4	Arbeitstitel: „Abtragen von In718 und Ti6246 mittels kurzpuls Laserstrahlung“	Dissertationsvorhaben	Johannes Finger
5	Arbeitstitel: „Adaptive SLM-Prozessführung für Turbomaschinenkomponenten“	Dissertationsvorhaben	Anders Such

Liste der im Rahmen von AdaM durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten

Nr.	Titel	Art	Autor	Ansprechperson
1	Modellbasierte Untersuchung der Zerspankräfte beim simultanen dreiachsigen Drehen	Bacheloararbeit	Peter Lingnau	Florian Degen
2	Technologische Untersuchungen zur Oberflächenbildung beim simultanen dreiachsigen Drehen	Masterarbeit	Peter Lingnau	Florian Degen
3	Systematische Analyse zur prozessstabilisierten Schlichtfräsbearbeitung von Blisk-Schaufeln	Masterarbeit	Frederieke Reiners	Alexander Schäfer
4	Technologische Untersuchung und Modellierung der Werkzeugverschleißentwicklung beim simultanen dreiachsigen Hochleistungsdrehen	Bacheloararbeit	Alexander Wurbs	Florian Degen
5	Systematische Auswahl und Anwendung eines Zerspankraftmodells für die Schlichtfräsbearbeitung	Bacheloararbeit	Markus Landwehr	Alexander Schäfer
6	Prozessentwicklung zur automatisierten Feinbearbeitung des Profils von Dampfturbinenschaufeln mit gummigebundenen Schleifstiften	Masterarbeit	Jainesh Prajapati	Arne Kretschmer
7	Entwicklung einer schwingungsdämpfenden Spannvorrichtung zur Bearbeitung von Turbinenschaufeln	Masterarbeit	Christian Kolvenbach	Roman Kalocsay

8	Untersuchung zur adaptiven SLM-Prozessführung am Werkstoff IN718	Diplomarbeit	Anders Such	Anders Such
9	Qualifizierung des hochlegierten Stahls X22CrMoV12-1 für den SLM-Prozess	Projektarbeit	Felix Pastors, Malte Schinkel	Anders Such
10	Untersuchungen zur Prozesszeitreduzierung durch adaptive Prozessführung beim SLM von IN718	Diplomarbeit	Nils Henkel	Anders Such
11	Untersuchung des Ressourceneinsatzes für verschiedene SLM-Prozessführungen bei der Fertigung eines Leitschaufelclusters	Masterarbeit	Jonas Mersch	Anders Such
12	Einfluss der SLM-Prozessführung auf die Nachbearbeitung von Gasturbinenleitschaufeln aus IN718	Masterarbeit	Lukas Welschhof	Anders Such
13	Untersuchungen zur generativen Fertigung mit der Nickelbasislegierung IN718	Masterarbeit	Evgeniy Khavkin	Moritz Alkhayat
14	Einfluss der Rohmaterialqualität auf das Bearbeitungsergebnis beim Laserauftragschweißen	Masterarbeit	Max Mütter	Marco Göbel
15	Ermittlung des Einflusses der Prozessführung auf die mechanischen Kennwerte beim LMD von Stahllegierungen	Masterarbeit	Kamil Kopczynski	Marco Göbel
16	Übertragung von LA-Prozessen zwischen zwei Anlagen durch Prozessdiagramme	Bachelorarbeit	Marouan Allouche	Marco Göbel
17	Integration des Freien Randwertproblems beim Pulver Laserauftragschweißen	Masterarbeit	Jonas Zylinski	Dr. Norbert Pirch

10.6 Tabellarische Übersicht der in AdaM entstandenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Beiträge in Fachzeitschriften

[Dege14] Degen F.: Presentation of a Novel "Simultaneous Three Axis Turning" Process for Time and Cost Efficient Machining of Turbine Components Made of Difficult-to-Machine Super Alloys. In: Procedia CIRP 24, 2014. 5th Machining Innovations Conference (MIC), 2014, S. 32-37

[Edde14] Eddershaw T.: More efficient jet engines produced by additive manufacturing. In: Laser Systems Europe, 2014 (3), S. 32

[Fech14] Fecht, N.: Wann drucken wir Flugzeuge? In: BBR, 2014 (05). URL: <http://www.bbr.de/index.cfm?pid=1646&pk=146285#.VfBKvmccRaQ> [Stand: 09.09.2015]

[Fech14] Fecht, N.: Adaptive Processes for the Aircraft Engines of Tomorrow. In: Laser Technik Journal, 2014 (5), S. 14-15

[Gass14] Gasser, A.: Fertigen und Instandsetzen mit generativen Laserverfahren. In: MM Maschinenmarkt, 2014 (09), S. 44-47

[Hart14] Hartbrich I.: Airbus geht neue Wege in der Flugzeugproduktion. In: VDI Nachrichten, 2014 (05). URL: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Airbus-geht> [Stand: 09.09.2015]

[Joka15] Joka H.: Die neue Produktionswelt formt Teile additiv statt subtraktiv. Schaufeln backen. In: Industrieanzeiger. URL: http://www.industrieanzeiger.de/technik-/article/32571342/40865320/Schaufler-backen/art_co_INSTANCE_0000/maximized/ [Stand: 09.09.2015]

[Kloc15] Klocke F.; Spöcker G.; Huwer T.; Bobek T.; Arntz K.: Reducing data loss within adaptive process chains in the context of commonly-used CAx systems. Production Engineering, 2015 (9) 3, S. 307–316

[M&T15] M&T Metallhandwerk: Neuartiges Spannsystem spart Kosten beim Bau von Flugzeugturbinen. URL: <http://www.mt-metallhandwerk.de/kosten-sparen-beim-bau-von-flugzeugturbinen/150/34524/> [Stand: 09.09.2015]

[MAV15] MAV, 2015 (07/08): Effizientere Flugzeugtriebwerke, S. 70-71

[Meys15] Minoufekar M.: Macroscopic Simulation of Multi-Axis Machining Processes, Apprimus Verlag 2015 (ISBN978-3-86359-303-2)

[Schr15] Schraknepper D., Schäfer A.: Finish Machining of Complex Blade Geometries. ICTM 2015, Session 6 – Machining Technologies, Februar 25.-26. 2015, Aachen, Deutschland

[Schr15] Schraknepper, D.: Cluster für höhere Ressourceneffizienz. In: Industrieanzeiger, 2014. URL: <http://www.industrieanzeiger.de/fertigung/-/article/32571342/39865146/> [Stand: 09.09.2015]

[Schu14] Schuh G.; Wölk S.; Schraknepper D.; Such, A.: Approach for an Integrative Technology Assessment Method Combining Product Design and Manufacturing Process. In: International Journal of Social, Management, Economics and Business Engineering Vol. 8, 2014 (11), S. 3223-3228

[Schu15] Schug P: Modellierung, Bewertung, Analyse und Optimierung von CAx-Prozessketten, Apprimus Verlag 2015 (ISBN978-3-86359-339-1).

[Scop15] Scope Online: Innovationscluster AdaM auf der ILA Berlin. Adaptive Verfahren für Flugzeugtriebwerke. URL: <http://www.scope-online.de/produktionstechnik-werkzeugmaschinen/innovationscluster-adam-auf-derr-ila-berlin-adaptive-verfahren-fuer-flugzeugtriebwerke-von-morgen.htm> [Stand: 09.09.2015]

[Spoc15] Spöcker G.; Schreiner T.; Huwer T.; Arntz K.: Programming of adaptive repair process chains using repair features and function blocks. Journal of Computational Design and Engineering, 2015, doi:10.1016/j.jcde.2015.06.012

[Spoc14] Spöcker G.; Bobek T.; Glasmacher L.; Klocke F.: Towards a CAx-Framework for Adaptive Programming Using Generic Process Blocks for Manufacturing. In: New Production Technologies in Aerospace Industry, 2014. Proceedings of the 4th Machining Innovations Conference, 2014, S. 153–162

[West14] Der Westen: Not und Neigung machen erfinderisch, 01/2014. URL: <http://www.derwesten.de/staedte/muelheim/not-und-neigung-machen-erfinderisch-id8850073.html> [Stamd: 09.09.2015]

[Wolk14] Wölk S.; Schraknepper D.: Die Effizienz im Fokus. In: Werkstatt und Betrieb, 2014 (12), S. 88-91

[VDIZ14] VDI-Z, 2014 (5): International Conference on Turbomachinery Manufacturing, S. 76

***** ILT *****

[Alka14] Alkhayat, M.; Khavkin, E.; Gasser, A.; Meiners, W.; Kelbassa, I.: **Comparison of geometrical properties of parts manufactured by powder bed based (SLM) and powder fed based (LMD) laser additive manufacturing technologies**

Proceeding of ICALEO 2014, San Diego, CA, USA, October 19-23

[Gass15] Gasser, A.:

New Developments in Laser Metal Deposition for Repair Applications of Turbo-Engine Component

Turbine Forum 2015, April 22 - 24, 2015, Nizza / Frankreich

[Fing15] Finger, J., Kalupka C., Reininghaus, M.:

High power ultra-short pulse laser ablation of IN718 using high repetition rates

J. Materials Processing Technol. 226 (Dec.), 221-227 (2015)

[Fing14] Finger, J., Reininghaus, M.:

Effect of pulse to pulse interactions on ultra-short pulse laser drilling of steel with repetition rates up to 10 MHz

Opt. Expr. 22 (15), 18790-18799 (2014)

[Pirc14] Pirc, N., Zielinski, J.:

Spatial Resolved Laser Beam Diagnostics for Material Processing

6th PRIMES Workshop, September 10-11. 2014, Darmstadt/ Deutschland

[Such15] Such, A.:

Increase of Productivity by Adaptive Selective Laser Melting

ICTM 2015, Session 6 – Laser Technologies, Februar 25.-26. 2015, Aachen, Deutschland