

Lufthansa Technik AG

Schlussbericht FKZ 20X1902A:

Nachweis der Eignung von Laser Peen Forming in Kombination mit künstlicher Intelligenz für deterministische Umform- und Richtanwendungen bei der Reparatur von Flugzeugbauteilen (LeadPeen)

Verbundvorhaben: LeadPeen - Technologie Leader für Shock Peening für Umform- und Richtanwendung im MRO-Umfeld

Ein Forschungsvorhaben im Rahmen des 6. nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms

Projektlaufzeit: 01.06.2021 – 31.05.2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 20X1902A gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

Abkürzungen	2
Abbildungen	3
I. Kurzdarstellung	4
I.1 Aufgabenstellung	4
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde	5
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor dem Projekt.....	9
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	17
II. Eingehende Darstellung	18
II.1 Zielsetzung und erzielte Ergebnisse	18
II.1.1 HAP 0: Projektmanagement	18
II.1.2 HAP 1 Entwicklung von geometrischen Aufnahme-Tools für Umformanwendungen für ausgewählte MRO-Anwendungsfälle	19
II.1.3 HAP 2: Experimentelle Erhebung von LPF Daten & Analyse der Betriebsfestigkeit .	22
II.1.4 HAP 3: LPF Strategieentwicklung & Durchführung.....	29
II.2 Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	33
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	33
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	33
II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	34
II.6 Veröffentlichungen und Vorträge.....	34

Abkürzungen

CS	Bauvorschriften im Rahmen der Zulassung
AP	Arbeitspaket
CAD	computer-aided design, rechnergestütztes Konstruieren
HAP	Hauptarbeitspaket
IP	Intellectual Property
KI	Künstliche Intelligenz
LHT	Lufthansa Technik AG
LP	Laser Peening
LPF	Laser Peen Forming
LSP	Laser Shock Peening
MRO	Maintenance, Repair & Overhaul
OEM	Original Equipment Manufacturer
TRL	Technology Readiness Level
UA	Unterauftragnehmer
ZAL	Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung

Abbildungen

Abbildung 1: Projektstrukturplan LeadPeen.....	8
Abbildung 2: Beschädigte Turbine am hinteren Rumpf (exemplarisch).....	9
Abbildung 3: Beschädigung durch Vogelschlag (exemplarisch)	10
Abbildung 4: Flächenrückführung mit RhinoReverse (RSI 3D-Systems).....	12
Abbildung 5: Konsortialtreffen LeadPeen, exemplarisch vor Ort bei Konsortialpartner ZAL.....	18
Abbildung 6: Messtechnische Anlagen: ATOS Scanbox, Creaform HandySCAN	20
Abbildung 7: Schadensaufnahme simulierter Defekte an realem Fluggerät	21
Abbildung 8: Konstruktionsprozess Einspannvorrichtung zur Aufnahme von LSP Bauteilen.....	22
Abbildung 9: LPF-erzeugte Krümmungsradien in der Parametervariation: Spotüberlappung	23
Abbildung 10: LPF-erzeugte Krümmungsradien in der Parametervariation: Leistungsdichte	24
Abbildung 11: Exemplarische Versuchsreihe zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit.....	25
Abbildung 12: Exemplarische Vermessung der Oberfläche durch das LHT Materiallabor	26
Abbildung 13: Exemplarische Mikrohärtemessung Vickers durch das LHT Materiallabor	27
Abbildung 14: Exemplarische Schlitze, geätzt, durch das LHT Materiallabor	27
Abbildung 15: Eigenspannungsmessung mittels inkrementeller Borlochmethode.....	28
Abbildung 16: Demonstrator mittels 3D-gedruckter Geometriesimulationen, ZAL.....	30
Abbildung 17: Demonstrator eines physischen Reparaturanteils	31
Abbildung 18: Wöhler-Linien als Resultat der Dauerschwingfestigkeitsversuche	32

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens LeadPeen war es, durch die Untersuchung von Laser Peen Forming (LPF) in Kombination mit künstlicher Intelligenz den Grundstein für die Entwicklung einer neuartigen und effizienten Reparaturdienstleistung zu legen. Laser Shock Peening war bereits vor Projektbeginn eine etablierte Methode zur Oberflächenverbesserung, um die Ermüdungslebensdauer in Metallkomponenten zu verlängern und die Schadenstoleranz zu verbessern. Dabei werden mithilfe von Schockwellen Druckeigenspannungen auf das Material übertragen, die die Rissausbreitung hemmen. Laser Peening kann jedoch ebenfalls zur Oberflächenbearbeitung eingesetzt werden, indem durch plastische Dehnungen gezielt Verformungen erzeugt werden. Das Verfahren gilt hierbei als deterministisch, kontrollierbar und reproduzierbar.

Laser Peen Forming kam bereits vor Antragstellung in der Flugzeugfertigung zum Einsatz. Eine Anwendung im MRO-Umfeld war jedoch nicht bekannt.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen von LeadPeen der Einsatz von LPF für Anwendungsfälle untersucht, wie die Fertigung von passgenauen Ersatzteilen für MRO Anwendungen in mehrdimensionaler Biegung.

Die wesentlichen Erkenntnisse des Projektes sollten hierbei im Nachweis einer ausreichenden Wiederholgenauigkeit des Verfahrens für den Einsatz in der Flugzeugreparatur dienen. Zudem sollten Erkenntnisse über die Nutzung von Methoden künstlicher Intelligenz zur Steuerung des LPF-Prozesses gewonnen werden. Auch wurde im Rahmen des Projekts ein geometrisches Vermessungssystem erarbeitet, um eine Schadensdokumentation zu ermöglichen sowie Daten entsprechend den Anforderungen für die Nutzung im KI-Modell zu generieren. Des Weiteren sollte nachgewiesen werden, dass die gepeenten Werkstoffe u.a. in Hinblick auf Fatigue-Eigenschaften einsatzfähig sein können.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Nicht absehbare Herausforderungen während der Covid-19-Pandemie konnten in gemeinsamer Absprache im Konsortium sowie mit dem Projektträger überwunden werden.

Ein Fokus auf Richten von Luftfahrzeugkomponenten während der Antragstellung wurde nach tiefer theoretischer Evaluation zugunsten von weiteren Anwendungsmöglichkeiten in der Prozesskette eines umfassenden Reparaturproduktes zurückgestellt.

Aufgrund von Anforderungen hinsichtlich einer potentiellen Industrialisierung und dahingehend luftrechtlichen Dimensionen konnten umfangreiche Werkstoffuntersuchungen nicht untervergeben werden, sondern wurden vielmehr LHT-intern sowie beim Forschungspartner ZAL durchgeführt.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben „LeadPeen“ gliederte sich in drei Hauptarbeitspakete (HAP) und 8 Arbeitspakete, der Strukturplan des Vorhabens ist in Abbildung 1 abgebildet.

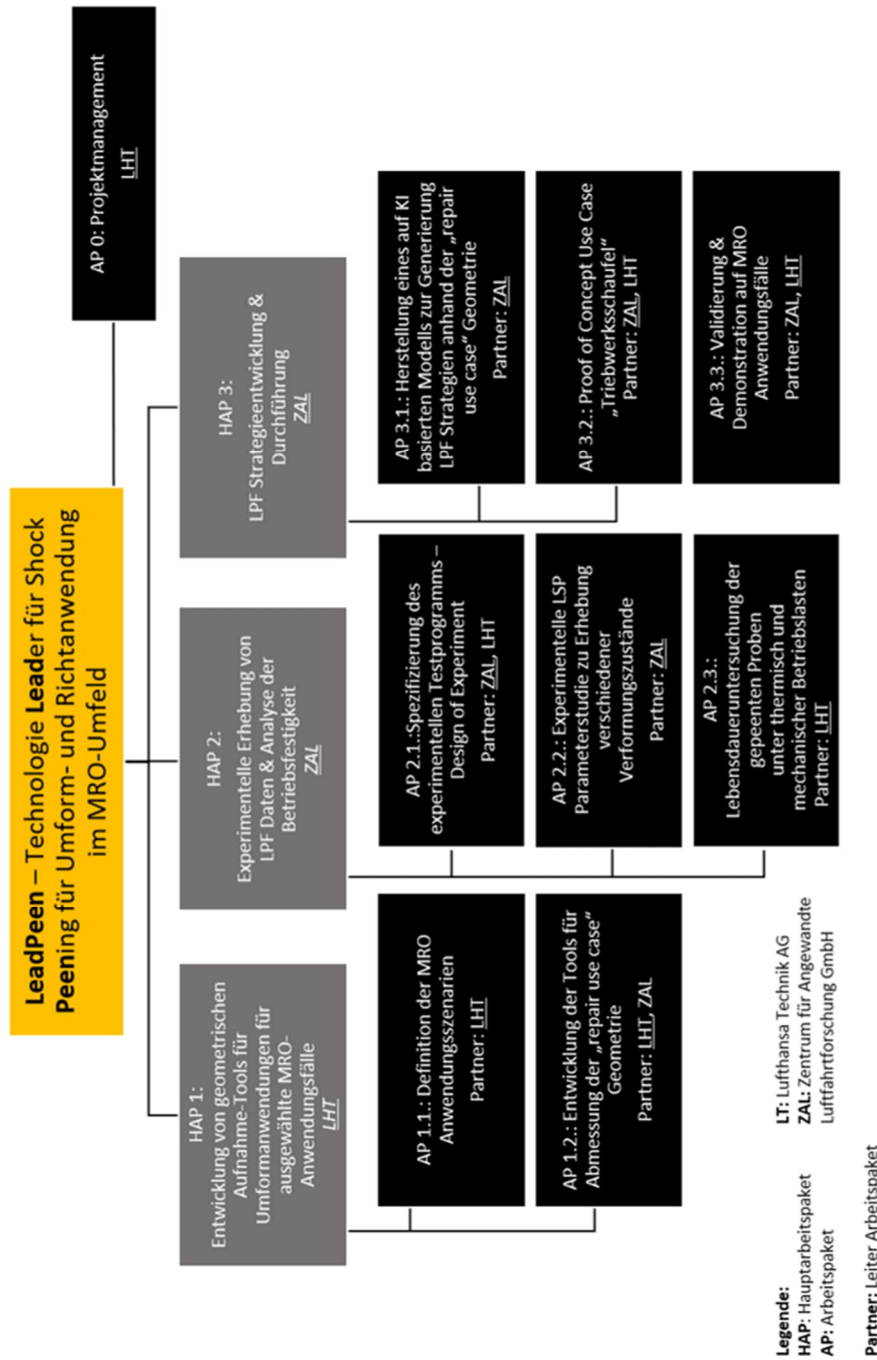


Abbildung 1: Projektstrukturplan LeadPeen

Die LHT als Verbundführerin verantwortete im Rahmen von LeadPeen das übergreifende Projektmanagement.

Im Rahmen von HAP 1 (Entwicklung von geometrischen Aufnahmetools für Umformanwendungen für ausgewählte MRO-Anwendungsfälle) wurden potenzielle Anwendungsfälle für das zu erörternde Verfahren beschrieben und technisch sowie wirtschaftlich bewertet (AP 1.1).

In AP 1.2 wurde ein geometrisches Vermessungssystem erarbeitet, um exemplarisch eine Schadendokumentation „on wing“ zu ermöglichen und Messdaten entsprechend den Anforderungen für die Übersetzung in eine Sollgeometrie mittels LPF zu generieren.

Im HAP 2 (Experimentelle Erhebung von LPF Daten & Analyse der Betriebsfestigkeit) begleitete LHT das ZAL bei der Spezifizierung des experimentellen Testprogramms, um frühzeitig mögliche Hürden in Hinblick auf eine Zulassbarkeit zu identifizieren (AP 2.1). Das ZAL fertigte auf Basis des spezifizierten Testprogramms Probengeometrien aus Neumaterial-Blech. LHT führte Lebensdaueruntersuchung der gepeenten Proben (AP 2.3) durch, um die Betriebsfestigkeit unter mechanischen Lasten zu testen. Zudem wurden die Werkstoffeigenschaften, z.B. in Hinblick auf die Mikrostruktur, ausgewählter Proben untersucht.

Im HAP 3 (Strategieentwicklung & Durchführung) wurde die grundsätzliche Anwendbarkeit von LPF für definierte Anwendungsfälle im MRO-Umfeld untersucht (AP 3.2). Im AP 3.3 erfolgte die Validierung des Verfahrens inkl. des durch das ZAL entwickelten KI-Modells für die intelligente Steuerung des LPF-Prozesses. Die Reparatur eines beschädigten Bauteils mittels eines durch LPF gefertigten Reparaturbauteils wurde beispielhaft demonstriert.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor dem Projekt

Der Stand der Technik gliederte sich bereits vor Antragstellung, bezogen auf das vorliegende Teilvorhaben der LHT, in die folgenden Aspekte:

- a) Instandhaltungs- bzw. Reparaturverfahren für vergleichbare Schäden
- b) Geometrische Vermessungssysteme zur Aufzeichnung von Schäden im MRO-Umfeld
- c) Einsatz von LSP und LPF im MRO-Umfeld

a) Derzeitige Instandhaltungs- bzw. Reparaturverfahren für Schadenbilder mit grundsätzlicher Eignung für eine Richtigung mittels LPF

Das Richten ist grundsätzlich ein Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und lässt sich in die Hauptgruppe zwei ‚Umformen‘ einordnen. Das Richten ist vergleichbar mit Biegen, jedoch besteht der Hauptunterschied darin, dass das Biegen als grobes In-Form-Bringen verstanden werden kann, während das Richten ein exaktes In-Form-Bringen des Werkstücks zum Ziel hat.

Um grundsätzlich für eine Reparatur durch LPF in Frage zu kommen, ist es zwingend erforderlich, dass die Grundstruktur des Verbundwerkstoff des Werkstücks noch intakt ist. Bei der in Abbildung 2 gezeigten beschädigten Turbine am hinteren Rumpf sind der kohlenstofffaserverstärkte (CFK) Grundkörper und am Ende das gesamte Triebwerk in Mitleidenschaft gezogen. Für diesen Fall ist eine aufwändigere Reparatur im Shop notwendig. Die in Abbildung 3 gezeigte Beschädigung hingegen kann mutmaßlich durch einen Doppler repariert werden.

Beim Auftreten eines grundsätzlich geeigneten Schadens werden Bauteile heute oftmals komplett verschrottet, da eine Reparatur nicht wirtschaftlich ist. Bei Vogelschlägen können beispielsweise lediglich ca. 20% der beschädigten Bauteile gerettet werden.



Abbildung 2: Beschädigte Turbine am hinteren Rumpf (exemplarisch)



Abbildung 3: Beschädigung durch Vogelschlag (exemplarisch)

Reparatur durch Doppler

Beim Vorliegen eines Schadensbildes wie in Abbildung 3 aufgezeigt kommt grundsätzlich bereits heute eine Reparatur durch Doppler in Frage.

Ein Doppler besteht aus einer netzartigen Struktur aus Aluminiumblech, die mit Nieten auf der Innenseite der Flugzeughaut befestigt wird. Heute kommen diese Dopplerstrukturen vornehmlich am Flugzeugrumpf zum Einsatz, wo sie gegen den Risswachstum aufgrund von Druck und Druckablassprozessen wirken. Flugzeugrümpfe haben oft eine ausgewiesene Lebenszeit, d.h. eine bestimmte Anzahl von Starts und Landungen, bis sie materialtechnisch den Anforderungen des Luftfahrtbetriebes nicht mehr mit ausreichenden Sicherheitsfaktoren gegen Materialversagen abgesichert konstruiert sind und daher nicht mehr zugelassen sind. Die Stützung der Rumpfstruktur durch einen Doppler kann die Lebenszeit des Rumpfs verlängern. Da Flugzeugrümpfe bzw. Druckkabinen einen großen Durchmesser haben, ist diese Form durch einen Metallbauer gut herstellbar.

Nicht ohne maschinelle Hilfe abbildbar ist jedoch die Fertigung von Dopplern für vergleichsweise kleine Radien, wie zum Beispiel die Flügelkante. Zwar sind Flügelkanten zunächst außerhalb der Druckkabine und unterliegen keinem Druckaufbau- und Ablassvorgängen, jedoch könnte ein entsprechend passgenauer Doppler, z.B. bei einer Beschädigung durch Vogelschlag (vgl. Abbildung 2), als ‚Flicken‘ auf das beschädigte Grundmaterial genietet werden. Hier setzt das Vorhaben LeadPeen an, indem ein Neumaterial-Blech mittels Laser Shock Peenings (LSP) in die korrekte Geometrie gerichtet wird.

Thermisches Richten

Grundsätzlich denkbar ist auch die Reparatur von Schadenbildern analog zur Abbildung 3 durch thermisches Richten. Beim thermischen Richten werden über verschiedenste Quellen thermische Energie (z.B. Flamm- oder Induktionsrichten), oft lokal, in ein Bauteil eingebracht. Durch die lokale Wärmezufuhr dehnt sich der Werkstoff in diesem Bereich aus – es entsteht eine Stauchung im erhitzten Bereich. Mit dem Abkühlen des Bauteils zieht sich der gestauchte Werkstoff zusammen, wobei sich der Werkstoff in die gewünschte Richtung biegen lässt. Bei kontrollierter Anwendung kann ein Richteffekt entstehen. Das Verfahren ist im MRO-Umfeld nicht etabliert, jedoch kommt es erfolgreich im Autoreparaturumfeld oder auch dem Anlagenbau zum Einsatz. Die Grenzen bzw. Nachteile des Verfahrens bestehen jedoch im Entstehen größerer plastischer Verformungen oder im Extremfall gar Rissen im Grundwerkstoff. Hohe manuelle Anteile bei der Umsetzung des Verfahrens schließen menschliches Versagen nicht aus und schränken damit die großtechnische Anwendung ein.

Insgesamt können zahlreiche Reparaturen beschädigter Bauteile heute ausschließlich in einer Werkstatt durchgeführt werden. Hierfür müssen die Bauteile jedoch zunächst demontiert werden. Gleichzeitig besteht kundenseitig vermehrt der Wunsch, Reparaturen direkt am Flieger („on wing“) durchzuführen, um Bodenzeiten zu vermeiden. Hierbei wird das Reparaturspektrum oftmals derart verkleinert, dass es in geplante Bodenzeit passt oder im Rahmen einer möglichst kurzen ungeplanten Bodenzeit umgesetzt werden kann. Auch für Flügelkanten wäre eine „on wing“-Reparatur in vielen Fällen grundsätzlich möglich. Die Umsetzung ist jedoch durch die Verfügbarkeit eines passgenau geformten Ersatzteils, einer entsprechende Biegepresse sowie eines erfahrenen Mechanikers limitiert.

b) Geometrische Vermessungssysteme zur Aufzeichnung von Schäden im MRO-Umfeld

Im aktuellen Reparaturprozess wird ein Bauteil bzw. die Baugruppe zur Schadensaufzeichnung i.d.R. kosten- und zeitaufwändig demontiert und an den Überholungsstandort versandt. Dort werden Schäden in den meisten Fällen nach wie vor auf Basis mit Handmessmitteln, wie z.B. Zollstock, Messschieber oder Messuhr aufgenommen. Oft werden auch Folien aufgelegt und die Umrisse der Beschädigungen aufgezeichnet, die Tiefe in Zahlen ergänzt.

Aktuell werden von Start-ups vereinzelt moderne Abstandssensoren zur optischen geometrischen Vermessung der Schäden auf den Markt gebracht, so z.B.:

- Das Unternehmen ARRIM bietet ein multifunktionales Messgerät, das mit einem Smartphone verbunden wird und auf Basis von Augmented Reality (AR) genutzt werden kann, um die Dimensionen von Geraden, Kreisen, Winkeln und Kurven zu erfassen. Zu den eingesetzten Technologien gehört u.a. ein virtuelles 3D-Koordinatensystem, Laservermessung auf Grundlage von Phasenverschiebung sowie die Erfassung von Bezugspunkten. Diese Technik ist jedoch u.a. auch aufgrund von Abweichung von mehr

als 3 mm noch nicht ausgereift genug, um sie im Bereich der Luftfahrt-MRO einzusetzen. Tests bei Lufthansa Technik konnten die Toleranzen der Herstellerangaben nicht verifizieren.

- o Ebenso mit AR arbeitet das Unternehmen 8tree. Es wurde ein kabelloses und tragbares Gerät entwickelt, um Beulen in der Flugzeugoberfläche zu kartieren und zu vermessen. Das Ergebnis wird dabei direkt auf das Bauteil projiziert, sodass mithilfe verschiedener Farben die Beschaffenheit des Schadens erkennbar wird.
- o Das Unternehmen Creaform ermöglicht die zerstörungsfreie Prüfung von Oberflächen für die Luft- und Raumfahrtbranche auf Basis von Laserinterferometrie. Dafür wurde ein Handscanner sowie eine Software entwickelt, durch die mit einer Abweichung von 0.025 mm Daten erfasst, verarbeitet und in Echtzeit visualisiert werden können, um Oberflächenschäden an Flugzeugen beurteilen und charakterisieren zu können. Hierbei wird die Schadensstelle zunächst mit Aufklebern markiert und anschließend gescannt. Ein zentraler Nachteil des Systems sind u.a. die hohen Kosten bei der Beschaffung der Aufkleber.

Auch für die anschließende Flächenrückführung bestehen vereinzelt innovative Systeme, z.B. RhinoReverse der Firma RSI 3D-Systems, exemplarische Beispielaufgabe siehe Abbildung 4. Hierbei werden Oberflächen von digitalisierten (z.B. gescannten) Objekten in Flächenmodelle mit NURBS-Flächen umgewandelt. Durch diese Flächenrückführung wird die weitere Bearbeitung ermöglicht.

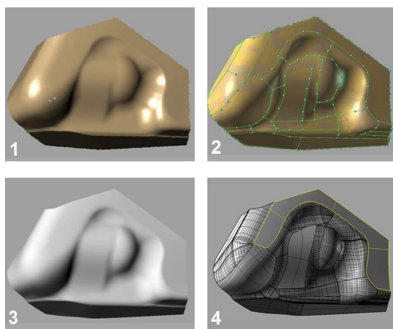


Abbildung 4: Flächenrückführung mit RhinoReverse (RSI 3D-Systems)

Die beschriebenen Systeme werden von einigen MRO-Anbietern eingesetzt, haben sich bisher jedoch nicht flächendeckend durchgesetzt. Gründe hierfür sind u.a. in dem hohen Preis, den Anforderung an den Bediener sowie darin zu sehen, dass die Einsatzmöglichkeiten dieser komplexen Verfahren gegenüber den einfach Handmessverfahren noch sehr begrenzt sind. Darüber hinaus ist für die Schadensaufnahme essenziell, dass die Messung vergleichbar durchgeführt werden kann (u.a. möglichst wenig Mitaufnahme der Umgebung bzw. spätere

Bereinigung dieser). Bei der LHT befinden sich derzeit unter anderen zwei Methoden bereits im Testeinsatz, die im Rahmen des Projekts LeadPeen für die Schadensdokumentation betrachtet und anschließend angepasst werden sollen:

- **Dokumentation auf Basis von Handyfotos**

Bei der Schadensdokumentation mittels Handyfotos erfolgt per se keine Vermessung des Schadens, sondern vielmehr eine Abschätzung der Position und ungefähren Größe der Beschädigung anhand bekannter Abstände anderer Strukturen. Die Detailmaße werden auf Basis eines digitalen Modells, z.B. des vorliegenden Flügeltyps, ermittelt und so ein Flicker mit der idealen Passform geplant, statt wie bisher durch Iteration der Biegung am realen Flügel.

Für die Schadensdokumentation auf Basis von Handyfotos muss jedoch zunächst ein digitales Modell des jeweiligen Bauteils, z.B. Flügelkante, existieren.

- **GOM-System**

Im Bestand der LHT befindet sich ein GOM-System (GOM Sensor Atos Core 200 in Verbindung mit dem Drehtisch Durchmesser 500 mm). Dessen industrielle 3D-Scantechnologie ist ein hochauflösender optischer Digitalisierer, der präzise dreidimensionale Messdaten liefert. Darüber hinaus wird das System zeitnah durch eine Atos ScanBox 4105, einen Roboterarm, welcher die Positionierung des Sensors automatisch durchführen kann, ergänzt. Das bestehende GOM-System kommt in verschiedenen Bereichen zum Einsatz, wird bisher jedoch nicht für die optische Vermessung regulärer MRO-Anwendungen verwendet. Vielmehr wird es bei LHT dazu verwendet, die Form und Lagetoleranzen von Kleinteilen aus Triebwerken im Rahmen des Befundprozesses zu messen. Außerdem kommt es zum Einsatz, um durch Additive Manufacturing sowie konventionell gefertigte Bau- bzw. Ersatzteile zu vermessen.

c) Einsatz von LSP und LPF im MRO-Umfeld

Das Umformen komplexer Geometrien mittels LSP ist zum aktuellen Stand der Technik in der Flugzeugfertigung für Großserien etabliert, da die zeitaufwändige Parameterbestimmung mittels FEM bei Großserien nur einmal für die komplette Bauteilserie durchgeführt werden muss.

Für die Umformung in Kleinserien und für Einzelteile kommen heute manuelle sowie thermische Richtverfahren zum Einsatz. Diese Verfahren sind jedoch im Hinblick auf den Anwendungsfall begrenzt bzw. in zahlreichen Fällen ist ihr Einsatz nicht wirtschaftlich. Manuelles Biegen beispielsweise erfordert entsprechende Ausbildung bei Personal sowie vorgefertigte Biegewerkzeuge, welche sich in entsprechenden Fixkosten und Bearbeitungszeiten niederschlagen. Auch thermische Umformungs- bzw. Richtvorgänge sind prinzipiell in der

Flugzeuginstandhaltung etabliert. Jedoch ist das Verfahren wegen undefinierter Einflussfaktoren und möglicher Gefügeumwandlungen / thermischer Beschädigung auf ein Luftfahrzeugbauteil praktisch kaum anwendbar. Insgesamt ist mit den bekannten, manuellen Umformungsverfahren die benötigte Wiederholgenauigkeit nur schwer erreichbar.

Laser Peen Forming wird heute in der US-Amerikanischen Luftfahrtindustrie durch die Metal Improvement Company erfolgreich bei der Formung der Flügeloberseiten der Boeing 747-8i eingesetzt. Auch werden Teile der F18 Außenhaut erfolgreich mittels LPF geformt. Die Anwendung von LPF im Luftfahrtbereich beschränkt sich derzeit auf die Fertigung von Luftfahrzeugen. Eine Anwendung im MRO-Umfeld ist bisher nicht bekannt. In vielen weiteren Unternehmen, unter anderem im MRO-Umfeld, wird Laser Shock Peening als Verfahren zur Oberflächenverbesserung heute bereits angewendet, wie z. B. bei Rolls-Royce, Toshiba, Metal Improvement Company, LSP Technologies, Boeing und der US Air Force (vgl. Chupakhin et al., 2019).

Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Eigene relevante Patente der LHT sind nicht vorhanden, vielmehr umfangreiches Fachwissen zu MRO und Verfahrensknowhow, auch zu LSP, KI wie auch zu weiteren üblichen Verfahren.

Nachfolgende Patente im Bereich Laser Shock Peening werden zwar als relevant, jedoch nicht als kritisch angesehen, da in allen Fällen eine thematisch andere Fokussierung vorliegt.

Tabelle 1: Ergebnis der Patentrecherche Drittparteien

Patenteigner	Beschreibung	Status
General Electric Co	Laser shock peening within an additive manufacturing process (DE102018114715A1) Die vorliegende Patentanmeldung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zum Laser Shock Peening im Verlauf einer generativen Additive Manufacturing (AM). Diese Verfahren und Vorrichtungen können verwendet werden, um mikrostrukturelle und / oder physikalische Signaturen in hergestellte Objekte einzubetten, und diese eingebetteten chemischen Signaturen können bei der Fälschungsabwehr	29.08.2019, ausstehend

	und bei der Herstellung von Objekten aus verschiedenen Materialien verwendet werden.	
<p>Relevanz für LHT: Das Patent ist im weiteren thematischen Umfeld von LeadPeen anzusiedeln. Eine Verbindung besteht durch die Themen Laser Shock Peening und 3D-Druck. Da das vorliegende Patent keine Reparatur- bzw. Richtvorgänge einschließt, ist keine Einschränkung durch dieses Patent zu erwarten.</p>		
<p>LSP TECHNOLOGIES INC</p>	<p>LASER PEENING PROCESS AND APPARATUS USING A LIQUID EROSION-RESISTANT OPAQUE OVERLAY COATING (US 7868268 B1)</p> <p>Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Verbesserung der Eigenschaften eines festen Materials, indem Stoßwellen dort durchgelassen werden. Für die Bereitstellung dieser Stoßwellen wird die Laserschockbearbeitung eingesetzt. Das Verfahren beinhaltet das Aufbringen einer flüssigen energieabsorbierenden Deckschicht, die beständig gegen Erosion und Auflösung durch die transparente Wasserauflage ist und beständig gegen Trocknung auf einen Teil der Oberfläche des festen Materials ist, und dann das Aufbringen einer transparenten Deckschicht auf den beschichteten Teil des festen Materials. Ein Impuls kohärenter Laserenergie wird auf den beschichteten Teil des Festkörpers gerichtet, um eine Stoßwelle zu erzeugen. Vorteilhaft ist, dass mindestens ein Teil der nicht verbrauchten energieabsorbierenden Auflage in situ an einer weiteren Laserbehandlungsstelle wiederverwendet und/oder für die spätere Verwendung zurückgewonnen werden kann.</p>	<p>Patent erteilt am 11.01.2011</p>
<p>Relevanz für LHT: Das Patent ist im weiteren thematischen Umfeld von LeadPeen anzusiedeln. Eine Verbindung besteht durch die Themen Laser Shock Peening und Oberflächenverbesserung. Da das vorliegende Patent keine Reparatur- bzw. Richtvorgänge einschließt, ist keine Einschränkung durch dieses Patent zu erwarten.</p>		
<p>BOEING</p>	<p>MULTIPLE LASER BEAM PROCESSING (US10239155B1)</p>	<p>Patent erteilt am 26.03.2019</p>

	<p>Hierbei handelt es sich um ein System zum Bearbeiten eines Werkstücks, das eine Vielzahl von Lasern enthält, die jeweils einen Laserstrahlimpuls erzeugen. Das System enthält auch ein Lasersteuermodul, das die zeitlichen Eigenschaften der Laserstrahlimpulse sequenziert. Zusätzlich umfasst das System ein Laserstrahlkompensationsmodul, das ein Nahfeldintensitätsprofil von mindestens einem der Laserstrahlpulse formt und eine Weglänge von mindestens einem der Laserstrahlpulse einstellt. Das System umfasst auch mindestens ein Laserstrahlpositionselement, das die Laserstrahlpulse kombiniert, um einen kombinierten Laserstrahlpulse an einer Oberfläche des Werkstücks zu erzeugen.</p>	
<p>Relevanz für LHT: Das Patent ist im weiteren thematischen Umfeld von LeadPeen anzusiedeln. Eine Verbindung besteht im Hinblick auf den Einsatz von Laserprozesstechnik zur Werkstückformung. Da das Patent jedoch auf eine grundsätzlich unterschiedliche technologische Lösung behandelt, besteht keine Einschränkung für das vorliegende Vorhaben.</p>		
<p>AIRBUS OPERATIONS GMBH</p>	<p>METHOD, USE, SYSTEM AND MOBILE LASER SHOCK TREATMENT STATION FOR LASER SHOCK BLASTING OF A COMPONENT (DE 102017219019 1A)</p> <p>Die vorliegende Erfindung schafft ein Verfahren zum Laserschockstrahlen eines Bauteils, insbesondere an schwierig zugänglichen Stellen, mit den Schritten: Zuführen eines ersten Endes eines flexiblen Lichtleiters, welches in Form einer Lichtleiterbürste mit einer Vielzahl von auseinandergelassenen Lichtleiterfasern ausgebildet ist, zu einer mittels Laserschockstrahlen zu behandelnden Stelle des Bauteils; Generieren von an einem zweiten Ende des Lichtleiters einkoppelnden Laserschockpulsen mittels einer Laserstrahlquelle; und Abgeben der Laserschockpulse mittels der Lichtleiterbürste in eine Prozesszone an der zu behandelnden Stelle des Bauteils. Ferner schafft die vorliegende Erfindung eine Verwendung einer eine Vielzahl von auseinandergelassenen Lichtleiterfasern aufweisenden Lichtleiterbürste zum Laserschockstrahlen eines Bauteils, ein System zum</p>	<p>29.08.2019, ausstehend</p>

	Laserschockstrahlen eines Bauteils sowie eine mobile Laserschockbehandlungsstation für Reparatur oder Nachrüstungsarbeiten mittels Laserschockstrahlen.	
Relevanz für LHT: Das Vorhaben LeadPeen wird durch das vorliegende Patent nicht eingeschränkt da das Patent thematisch anders – auf die Optimierung des LSP für schwer zugängliche Stellen – fokussiert.		

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die im Rahmen von LeadPeen durchgeführte ganzheitlich wissenschaftliche Technologieuntersuchung wurde von einem spezialisierten, breit aufgestellten Konsortium vorgenommen. Als führender MRO-Dienstleister war die Lufthansa Technik AG (LHT) der Verbundkoordinator in LeadPeen. Die von LHT im Projekt zur Verfügung gestellten Erkenntnisse aus dem MRO-Bereich wurden durch das ZAL ergänzt

In regelmäßigen (virtuellen und vor-Ort) Treffen konnten der Projektfortschritt, Konsortium interne Abstimmungen und gemeinsame Untersuchungsansätze diskutiert werden. Diese wurden durch separate anlassbezogene Treffen einzelner Konsortialpartner wie auch des gesamten Konsortiums ergänzt.

Abgerundet wurden die Abstimmungen durch Treffen in den jeweiligen Laboren, Werkstätten bzw. Projekträumen der Konsortialpartner. Dabei wurden auch potenzielle weitere Möglichkeiten der Zusammenarbeit über das vorliegende Projekt hinaus erörtert.

Über einen Unterauftrag wurde mit der LZS GmbH Dresden für Dauerfestigkeitsversuche kooperiert.

Neben dem Konsortium wurde mit keinen weiteren Stellen zusammengearbeitet.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Zielsetzung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Resultate entsprechend der Gliederung laut Antragstellung aufgeführt und beschrieben werden. Neben der Beschreibung im Vergleich zum geplanten Vorgehen soll auch auf zusätzliche, zum Zeitpunkt der Antragstellung noch nicht absehbare und daher auch nicht initial geplante, jedoch umgesetzte Inhalte eingegangen werden.

II.1.1 HAP 0: Projektmanagement

Das HAP 0 diente der übergreifenden Organisation und Koordination des Verbundprojekts und beinhaltet die Gesamtorganisation seitens LHT sowie die übergreifende und projektbegleitende Organisation und Koordination der Partner. Dies stellte sicher, dass das Projekt in enger Abstimmung der Partner untereinander abläuft und Meilensteine sowie gesteckte Projektziele erreicht werden. Die LHT als Verbundführer verantwortete im Rahmen des Vorhabens somit die Organisation der Verbundtreffen. Einladungen zu regelmäßigen Austauschen und Moderation im Konsortium waren Teil des HAP. Der Projektfortschritt konnte nachgehalten und Abweichungen in der Reihenfolge der einzelnen Arbeitspakete und Meilensteine konnte organisiert werden.

Die räumliche Nähe zum Konsortialpartner erlaubte eine Umsetzung ohne Reiskostenaufwände. Seitens LHT wurde Wert auf Einbindung sowohl administrativer als auch produktiver Mitarbeiter gelegt.

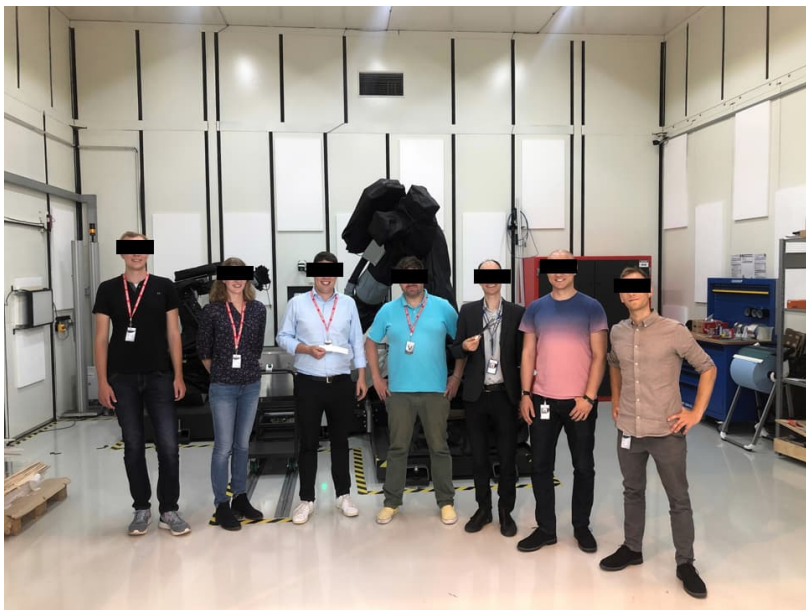


Abbildung 5: Konsortialtreffen LeadPeen, exemplarisch vor Ort bei Konsortialpartner ZAL

Resultat der Arbeiten ist ein wirksames Verfahren zur Projektorganisation, welches sich auch für künftige Zusammenarbeit der Partner eignen kann.

II.1.2 HAP 1 Entwicklung von geometrischen Aufnahme-Tools für Umformanwendungen für ausgewählte MRO-Anwendungsfälle

Im Rahmen von HAP 1 wurden mögliche Anwendungsfälle bewertet sowie ein geeignetes geometrisches Messsystem untersucht.

HAP 1 konnte im Konsortium abgeschlossen werden.

Dazu wurden die folgenden Arbeitspakete bearbeitet.

Für AP 1.1: Definition der MRO Anwendungsszenarien, konnten operativ bedeutsame Kausalketten, Beispielbauteile und Wirkweisen definiert werden. Der Ablauf und die Entscheidungswege für eine neuartige Reparatur inklusive der gesamten Kette vom eingetretenen Schadensfall bis zur Wiederherstellung der Lufttüchtigkeit konnte betrachtet und einbezogen werden. Varianten dabei wurden mit dem Konsortialpartner abgestimmt und definiert.

Dazu wurde aus dem bereits bei LHT operativ in Bearbeitung befindlichen Reparaturspektrum ein Kreis aus Potentialreparaturen extrahiert, diese bewertet und final definiert.

Eine Recherche von luftrechtlicher Vorgabedokumentation wie AMM, CMM und SRM Dokumenten wie auch weiterer Reparaturdokumentationen wurde LHT intern umgesetzt.

Für das Vorhaben konnten bedeutsame Beispielbauteile mit einer Bauteilanalyse evaluiert werden. Grundlage dafür waren sowohl technische als auch wirtschaftliche und rechtliche Zusammenhänge.

Entsprechende Potentialträger für die Demonstration des Ansatzes im Rahmen des Projekts konnten definiert werden.

Es wurde eine Datenbank zu Parametern wie Geometrie, Werkstoff und Reparaturmöglichkeiten sowie Erfahrungen dazu für die Zusammenarbeit im Konsortium konsolidiert. Dazu wurde die über mehrere Jahre vergangener Reparaturen analysiert und in digitaler Form aufbereitet.

In AP 1.2: Entwicklung der Tools für Abmessung der „repair use case“ Geometrie, konnten die Bauteile im Neu und flugfähigen Zustand geometrisch vermessen werden. So konnten gemeinsam mit dem Konsortialpartner mittels LHT seitig bereitgestellten Geräten wie ATOS Scan Box oder CREAFORM HandyScan 3D, wie auch weiteren, Geometrien erfasst werden, siehe Abbildung 6.



Abbildung 6: Messtechnische Anlagen: ATOS Scanbox, Creaform HandySCAN

Parallel dazu wurden historische und zeitaktuelle Schadensfälle aufgenommen und in einer maschinenlesbaren Form abgelegt.

Um eine Schadensaufnahme im realen Luftfahrtumfeld aufnehmen zu können, wurde mit dem ZAL eine Bilderkennung entwickelt und demonstriert. So war es möglich, Schadensfälle mit niedrigschwellig vorhandener Technik aufnehmen und klassifizieren zu können.

Um weitere Schadensbilder nutzen zu können und spätere Erkennung zu testen, wurden mittels für diesen Zweck entwickelter Simulationen auf Originalbauteilen zunächst Markierungen aufgebracht und im Anschluss Schäden detektiert. Diese konnten in die Forschungsdatenbanken separiert eingefügt werden und stellen so eine Erweiterung der Datengrundgesamtheit für weiteres Training des Systems dar.

Die Schadensaufnahme wurde mit realem Fluggerät bei LHT unterstützt, siehe Abbildung 7. Es konnten sowohl Wiederholungen als auch diverse Variationen erprobt werden. Das Versuchsprogramm wurde in Absprache mit dem ZAL entwickelt und in Kooperation umgesetzt.



Abbildung 7: Schadensaufnahme simulierter Defekte an realem Fluggerät

Es konnte gezeigt werden, dass äußerliche Schäden relevanter Größe und dem System bekannter Art für die notwendigen Folgeprozesse hinreichend genau identifizierbar sein können.

II.1.3 HAP 2: Experimentelle Erhebung von LPF Daten & Analyse der Betriebsfestigkeit

Im HAP 2 konnte insbesondere der Konsortialpartner ZAL bei der Gewinnung experimenteller Daten unterstützt werden. Darüber hinaus konnte LHT durch intensive Materialuntersuchungen die Zielparameter für die neuartige Reparaturmethode definieren, sowie die Erreichung quantifizieren.

HAP 2 konnte im Konsortium abgeschlossen werden.

Dazu wurden die folgenden Arbeitspakete bearbeitet.

Für AP 2.1: Spezifizierung des experimentellen Testprogramms – Design of Experiment, konnte der Konsortialpartner ZAL bei seinen Tätigkeiten unterstützt werden. So wurden Annahmen bilateral besprochen, Ergebnisse gemeinsam einem Review unterzogen und Experten verschiedener Fachrichtungen von beiden Konsortialpartnern zur Interpretation herangezogen.

Es konnte unterstützt werden, eine neuartige Spannvorrichtung zur Führung von sich im Prozess geometrisch verändernder Freiformbauteile zu designen und deren Funktionsfähigkeit exemplarisch zu demonstrieren, siehe Abbildung 8.

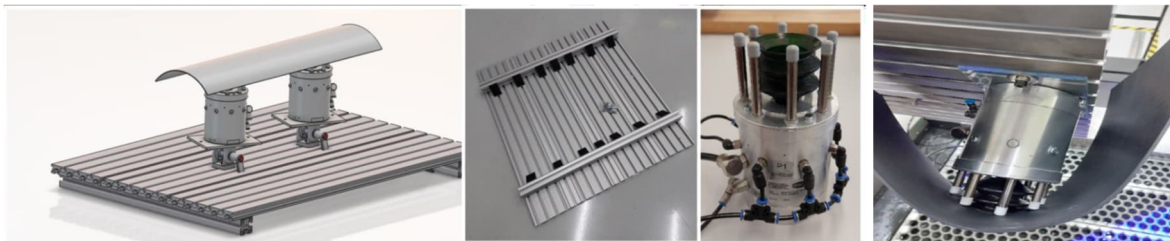


Abbildung 8: Konstruktionsprozess Spannvorrichtung zur Aufnahme von LSP Bauteilen

Zur Durchführung der Probenkampagne konnten artgleiche Werkstoffe zu den Beispielanwendungen von LHT spezifiziert und als Rohmaterial beschafft werden. Es wurde dazu seitens LHT eine Studie zur Materialauswahl erstellt, die die Übertragbarkeit auf das Bauteilspektrum der zu demonstrierenden Reparaturbeispiele darstellbar ist. Es wurden geometrische und werkstofftechnische Dimensionen berücksichtigt. Eine besondere Rahmenbedingung stellen Anforderungen einer luftrechtlichen Zulassung dar.

Da zuliefererseitig für das ZAL handhabbare lager- und transportierbare Tafelgrößen nicht lieferbar waren, hat LHT den Konsortialpartner zudem bei der operativen Auftragsannahme, Einlagerung, Zuschnitt und Versand unterstützt.

Mit AP 2.2, Experimentelle LSP Parameterstudie zu Erhebung verschiedener Verformungszustände, konnte eine umfangreiche Parameterstudie durch das ZAL durchgeführt werden.

Die Kampagne selbst wurde seitens des ZAL unter Berücksichtigung von Anforderungen von LHT erarbeitet, definiert und geplant.

Die Resultate sind exemplarisch in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt.

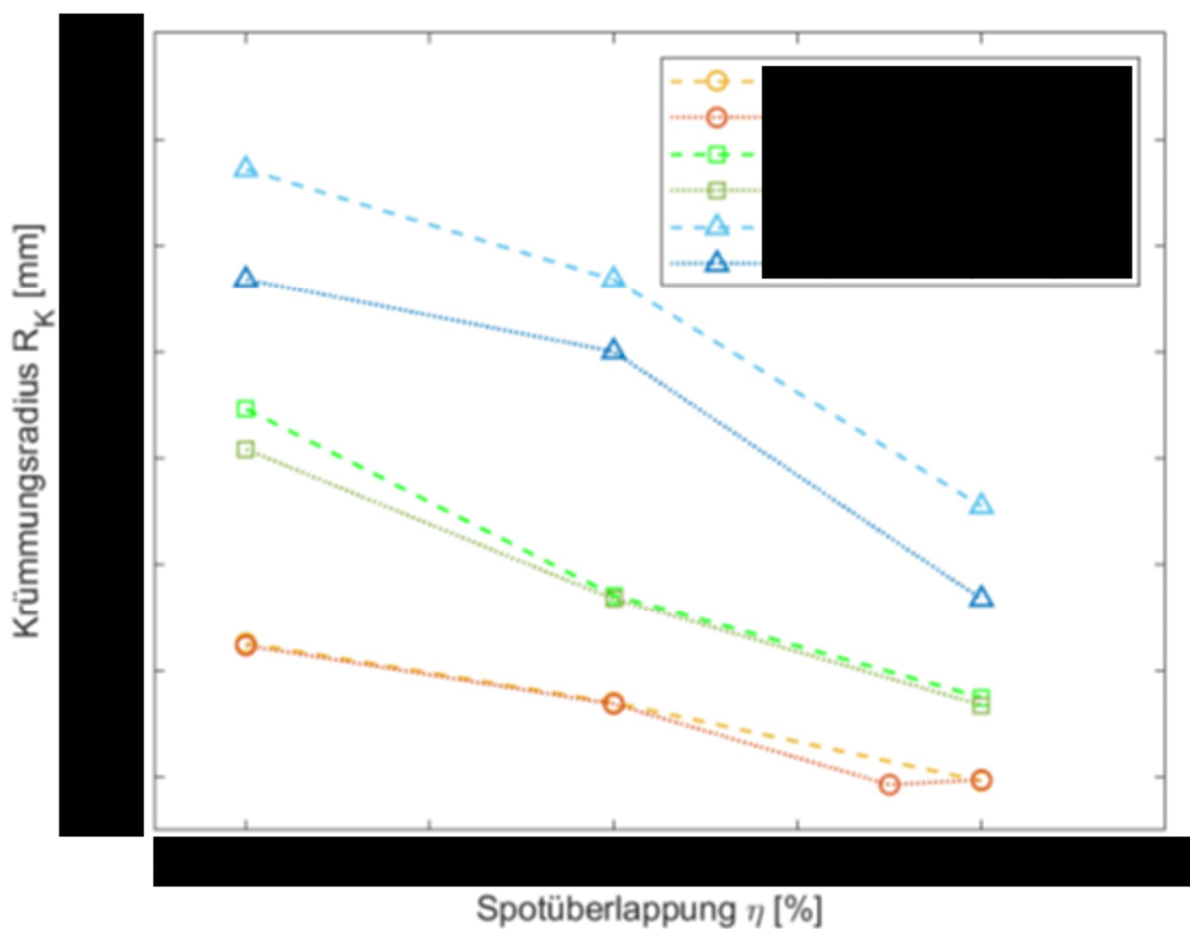


Abbildung 9: LPF-erzeugte Krümmungsradien in der Parametervariation: Spotüberlappung

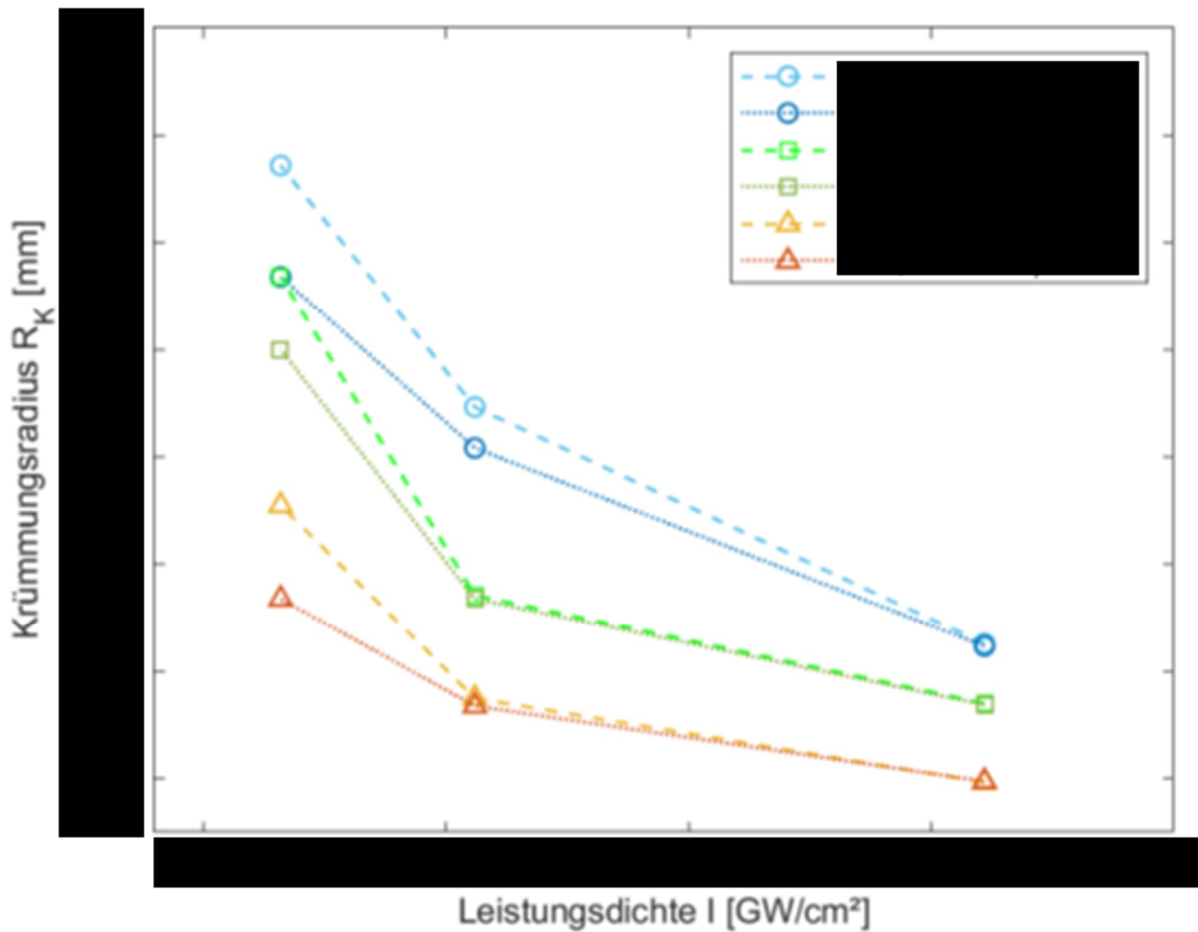


Abbildung 10: LPF-erzeugte Krümmungsradien in der Parametervariation: Leistungsdichte

LHT konnte die Arbeiten begleiten. So war es z.B. möglich, die Arbeiten durch Experten des Werkstofflabors beraten und begleiten zu lassen. Auch Einweisung an Messmitteln der LHT wie z.B. der GOM Scanbox oder CREAform Handy Scan und zugehöriger Software zur Flächenrückführung konnte durchgeführt werden, um die Arbeiten am ZAL zu unterstützen.

Zudem konnte LHT dabei unterstützen, die Resultate der Versuchskampagne zu interpretieren.

Es konnte festgestellt werden, dass die geometrischen Zielstellungen der Versuche erfüllt werden konnten.

Zudem konnte erfolgreich eine Wiederholgenauigkeit in der geometrischen Formung durch das Verfahren LSP in der konkreten Anwendung demonstriert werden.

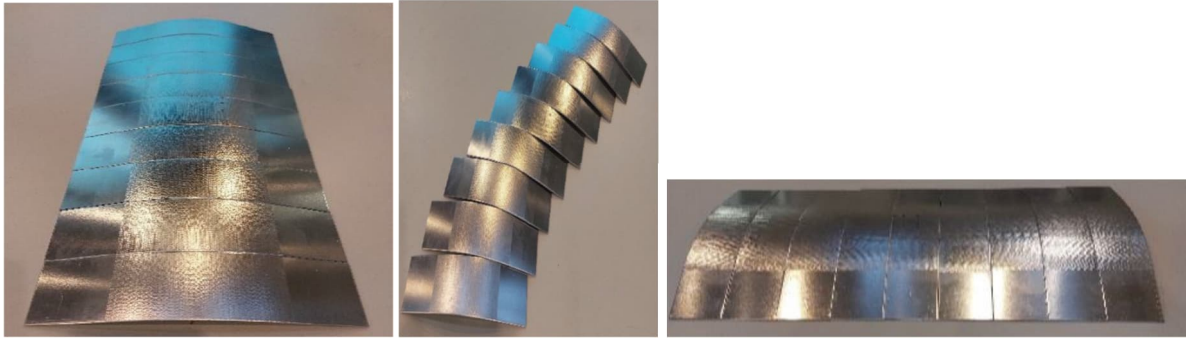


Abbildung 11: Exemplarische Versuchsreihe zur Untersuchung der Wiederholgenauigkeit

In Arbeitspaket 2.3, Lebensdaueruntersuchung der gepeenten Proben unter thermisch und mechanischer Betriebslasten, konnten Materialuntersuchungen durchgeführt werden.

Umfangreiche Materialuntersuchungen konnten abweichend von der Antragstellung anteilig LHT intern sowie beim ZAL durchgeführt werden. Dies war aufgrund erweiterter technischer Möglichkeiten im Konsortium, wie auch der Notwendigkeit eines akkreditierten Prüflabors für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Blick auf mögliche luftrechtliche Verwertung zur Abschätzung einer Zulassung oder einer möglichen Industrialisierung, notwendig sowie zur Unterstützung einer zeitlichen Verzahnung und direkten Rückkopplung in die Umsetzung der Probenkampagne.

Bei gegenseitigen Abstimmungen und Besuchen konnte LHT der Umsetzung des Prüfprogramms beiwohnen und auch vor Ort die Arbeiten prüfen und beraten.

Surface Roughness ██████ x magnification

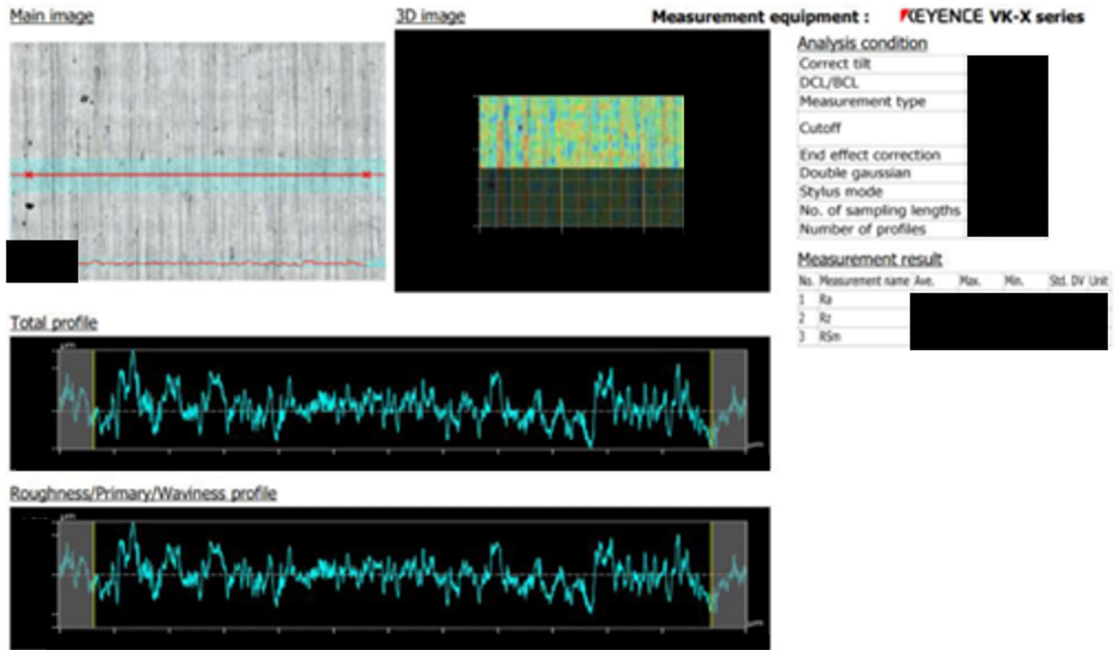


Abbildung 12: Exemplarische Vermessung der Oberfläche durch das LHT Materiallabor

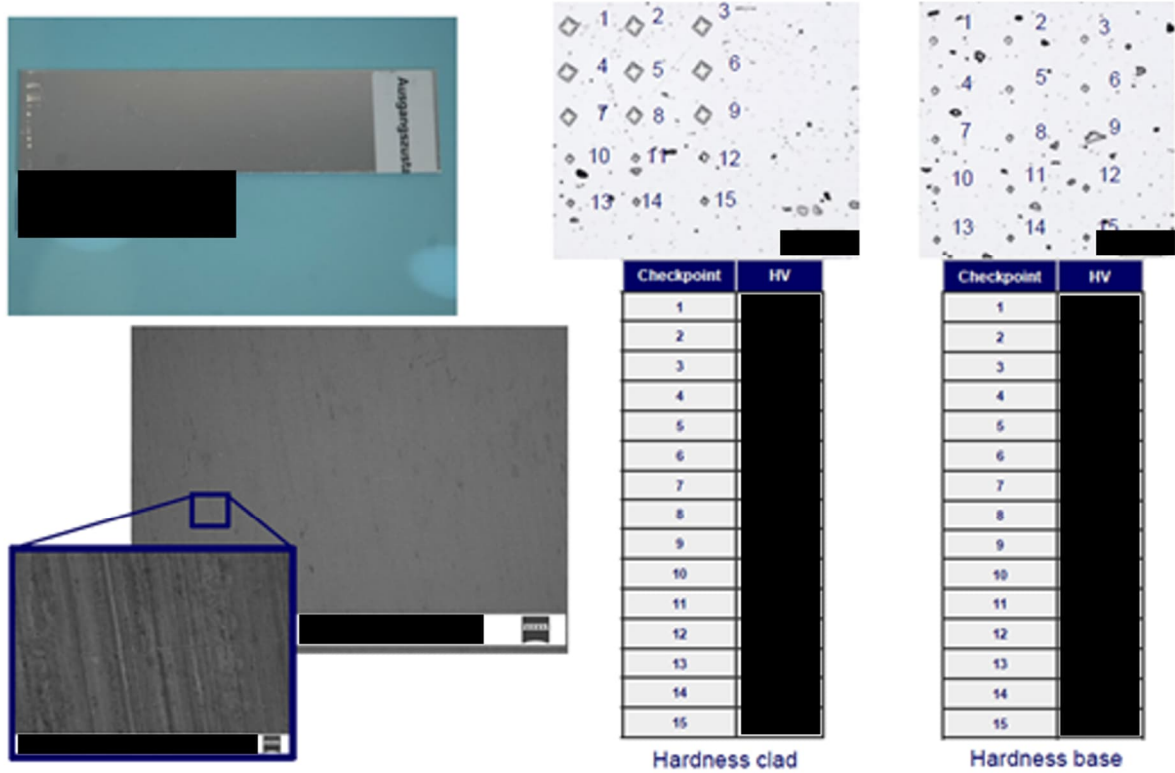
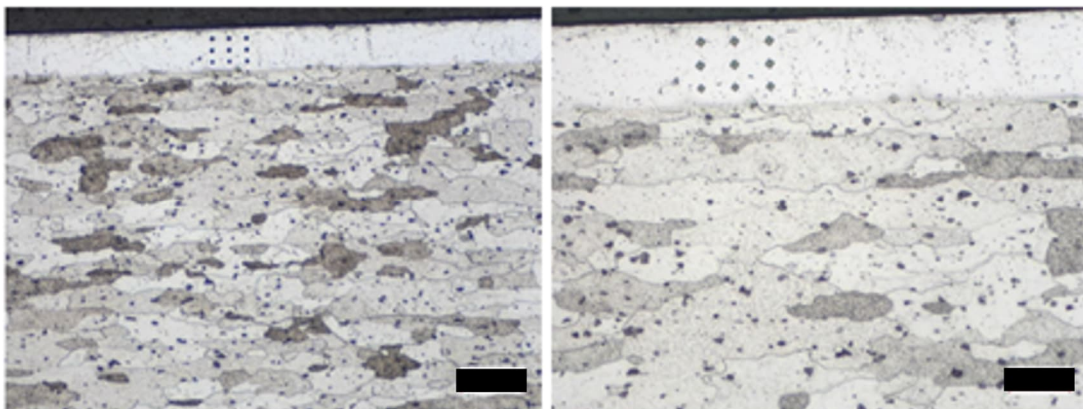


Abbildung 13: Exemplarische Mikrohärtemessung Vickers durch das LHT Materiallabor

Microstructure



Etched with Kroll etchant

Abbildung 14: Exemplarische Schlitze, geätzt, durch das LHT Materiallabor

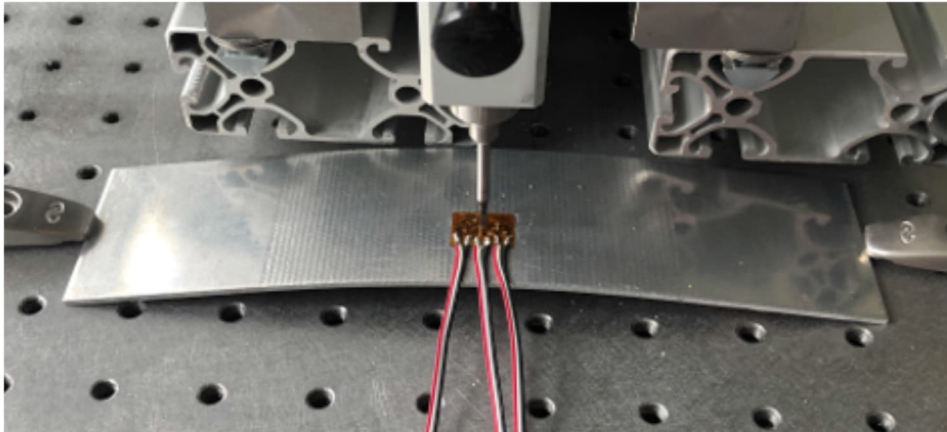


Abbildung 15: Eigenspannungsmessung mittels inkrementeller Borlochmethode

LHT konnte einen Unterauftrag für eine Dienstleistung beim UA LZS GmbH, einem Spin-off der TU-Dresden, in Auftrag geben. Gemeinsam mit Experten der LHT und mit Unterstützung vom ZAL und dem Unterauftragnehmer LZS konnte ein Prüfprogramm definiert werden, welches einen Ausblick für die Demonstration der Zulassbarkeit erlaubt.

Das Materialverhalten konnte im Konsortium beurteilt werden, so konnte auch vorab unerwartetes Materialverhalten interpretiert werden.

II.1.4 HAP 3: LPF Strategieentwicklung & Durchführung

Im HAP 3 konnte die Prozesskette im praktischen On-Wing-Einsatzbeispiel exemplarisch demonstriert werden. Dazu wurden KI-Anwendungen trainiert und getestet, sowie diese in einer umfassenden Produktstrategie gebündelt und in Kombination mit der Reparaturbauteilfertigung demonstriert. Insbesondere die Prozesskette im praktischen On-Wing-Einsatzbeispiel einer MRO Umgebung konnte demonstriert werden.

HAP 3 konnte im Konsortium abgeschlossen werden.

Dazu wurden die folgenden Arbeitspakete bearbeitet.

Mit AP 3.1, Herstellung eines auf KI basierten Modells zur Generierung LPF Strategien anhand der „repair use case“ Geometrie, konnten die generierten Daten insbesondere aus HAP2 unterstützt von LHT am ZAL mittels KI erforscht und in einer umfassenden Prozesskette zu Demonstratoren entwickelt werden.

So wurden in Kooperation mit dem ZAL zum Training für die LSP-Steuerung die Betrachtungsdimensionen

- Energie
- Spotgröße
- Überlapp und
- Layer-Anzahl.

Mit Trainingsdaten entwickelt im AP 2.2 konnte durch das ZAL das Training und der Test erfolgen.

In eine durch das ZAL entwickelte graphische Benutzeroberfläche einer entsprechenden Anwendung konnte LHT UX Know-How derart einfließen, dass eine nutzerfreundliche Anwendung durch produktive Mitarbeiter demonstriert werden konnte.

Des Weiteren wurden Routinen zur Bilderkennung von Beschädigungen erarbeitet. Die durch LHT im AP 1.2 aufgenommenen Daten konnten dafür als Input verwendet werden.

Als Input und zum Test wurden weitere Daten bei LHT erhoben und dem Konsortialpartner zur Verfügung gestellt. Auch die Tests der Systeme wurden durch LHT unterstützt.

Für AP 3.2: Proof of Concept Use Case "Triebwerksschaufel" wurde eine theoretische Betrachtung basierend auf den Daten der Versuchskampagne in AP 2.2 umgesetzt. Zur Verfügung gestellt Bauteile waren Grundlage der Betrachtung im Konsortium.

Im AP 3.3, Validierung & Demonstration auf MRO Anwendungsfälle, konnte das ZAL unterstützt von LHT beispielhaft das Zusammenspiel der gesamten untersuchten Technologiebausteine demonstrieren. Mittels eines trainierten KI-Modells konnten in realitätsnahen Bedingungen an einem zivilen Großflugzeug Beschädigungen mittels Kamertechnik aufgenommen und erkannt werden. Diese wurden mit für das Projekt entwickelnden Datenbanken zu bereits in Vergangenheit real umgesetzten Reparaturen eines mehrjährigen Vergleichszeitraum bei LHT abgeglichen. Basierend darauf konnten Reparaturszenarien abgeleitet werden. Im Folgenden war es möglich zu demonstrieren, wie geometrisch passgenaue Reparaturbauteile mit LSP gefertigt werden können. Bei Vermessungen am ZAL konnte mit Messtechnik der LHT die Wiederholgenauigkeit des Verfahrens nachgewiesen werden.

Simulationen von Reparaturen am ZAL konnten mittels 3D gedruckter Beispiel-Geometrien demonstriert werden. Dabei konnten neben der grundsätzlichen Umsetzbarkeit auch weitere Erkenntnisse zur Vorbereitung und Planung der Gesamtprozesssimulation definiert werden.



Abbildung 16: Demonstrator mittels 3D-gedruckter Geometriesimulationen, ZAL

Die gefertigten Bauteile wurden im Rahmen der Demonstration dann in Exempel Bauteile eingesetzt. Da Rahmenbedingungen eines sonst üblichen in shop Einsatzes unter MRO Bedingungen berücksichtigt wurden, kann die Demonstration der physischen Reparatur als realitätsnah betrachtet werden. Gleichzeitig wurden operative Rahmenbedingungen eines on-Wing Einsatzes bei der Demonstration berücksichtigt.



Abbildung 17: Demonstrator eines physischen Reparaturanteils

LHT konnte eine Demonstration der Wirtschaftlichkeitsrechnung für das Reparaturkonzept umsetzen.

Bei Demonstration einer exemplarischen luftrechtlichen Zulassung wurden nach Aufarbeitung der luftrechtlichen Rahmenbedingungen insbesondere die werkstofftechnische Dimension betrachtet. Hierzu wurden Anforderungen an die Reparaturwerkstoffe mit den Ergebnissen aus AP 2.3 konsolidiert.

Neben theoretischer logischer Betrachtung, Belegung aus statischen Materialversuchen und vergleichenden Studien waren Dauerfestigkeitsversuche eingeordnet. Diese wurden beim UA Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH in Dresden beauftragt und gemeinsam mit Experten des ZAL und LHT spezifiziert.

Basierend darauf konnte eine Wahrscheinlichkeit der luftrechtlichen Zulassbarkeit des demonstrierten Gesamtprozesses evaluiert werden.

Es konnte ein Ausblick zur Umsetzung der Reparatur abgeleitet werden.

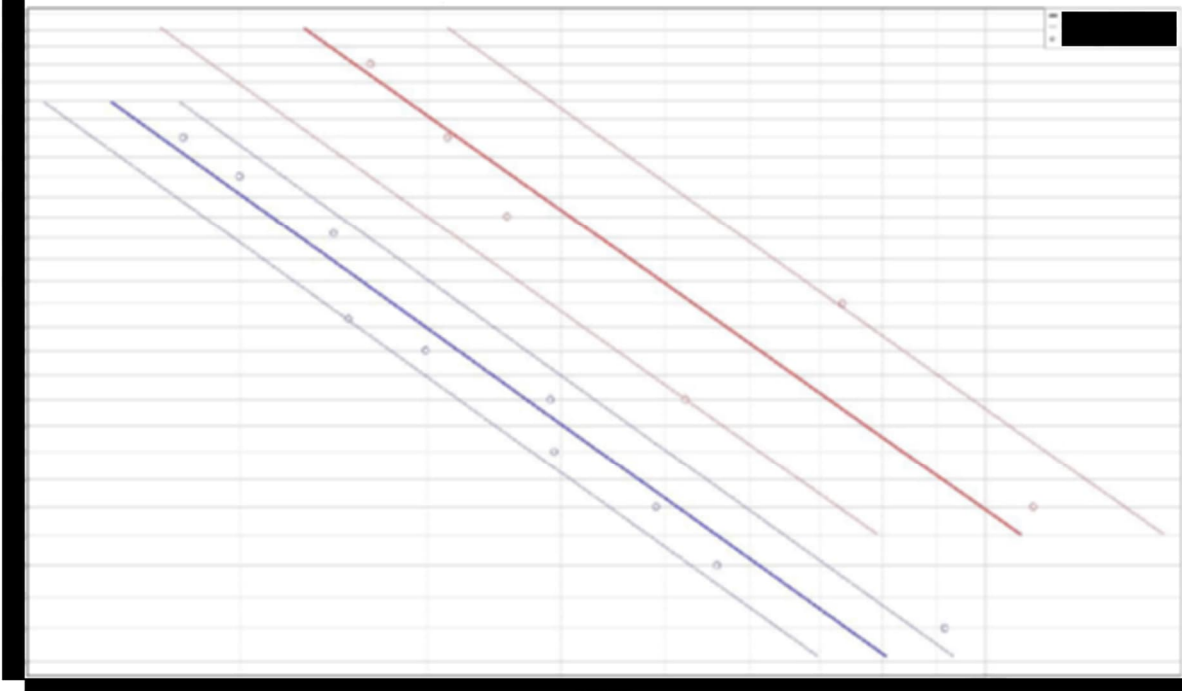


Abbildung 18: Wöhler-Linien als Resultat der Dauerschwingfestigkeitsversuche

II.2 Erläuterung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der weit überwiegende Teil der Kosten in der Nachkalkulation ist im Bereich Personalkosten angefallen, diese machen 85% der Gesamtkosten aus. Weitere 10% der Kosten sind in Form von Materialkosten für die Durchführung der vielen Peening-Versuche angefallen; hinsichtlich der Relevanz für Anwendung und auch Zulassbarkeit wurde bewusst Material nach Flugzeugbau-Spezifikation beschafft und verwendet. Die übrigen Kosten stehen im Zusammenhang mit der Unterbeauftragung von Werkstoffanalysen durch ein externes Labor.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben war notwendig, um den Einsatz von LSP im MRO Umfeld erstmalig zu untersuchen. Die Einbindung in die komplexe Prozesskette wäre in theoretischer Betrachtung nicht möglich gewesen. LHT hätte ohne den Konsortialpartner ZAL insbesondere im Bezug zum untersuchten Verfahren LSP nicht die notwendigen Kompetenzen und Betriebsmittel für eine eigenständige Untersuchung bieten können. Auch wenn eine wirtschaftliche Umsetzung bereits zum Zeitpunkt der Antragstellung als wahrscheinlich erschien, hätten bestehende Unsicherheiten und das TRL-Level nicht für eine Industrialisierung ohne vorherige Untersuchung in Form eines Forschungsvorhabens gesprochen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die geleistete Arbeit stellt einen Meilenstein für LHT dar in der Bewertung der betrachteten Technologien mit Blick auf die mögliche Industrialisierung im Projektanschluss. So wäre es ohne den Projektrahmen nicht möglich gewesen, die Kombination aus Verfahrensentwicklung, KI und umfangreichen Testkampagnen in Summe zu evaluieren. So war es im Rahmen des Vorhabens möglich, aus Kombination der betrachteten Technologien die Umsetzung einer komplexen Prozesskette und deren gesammelten Vorzüge kumuliert zu abstrahieren.

II.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind dem Konsortium keine relevanten alternativen Ansätze bei Wettbewerbern oder in der Forschung bekannt.

Parallel sind kontinuierliche Weiterentwicklungen von LSP Verfahren wie auch KI, Bilderkennung, Schadensaufnahme und Datenbanktechnologie in Forschung und Industrie zu beobachten, jedoch ohne direkten Einfluss auf das vorliegende Vorhaben.

II.6 Veröffentlichungen und Vorträge

Es wurden bisher keine klassischen Veröffentlichungen durch LHT im Kontext des Forschungsprojektes durchgeführt.