Schlussbericht zum Vorhaben

Verbundprojekt: Mikrobohren von Sandwichwerkstoffen (miBoS) – Teilvorhaben: Entwicklung des Laserverfahrens

Richard Stähr

Laser Zentrum Hannover e.V.

Hollerithallee 8

30419 Hannover

Im Rahmen des nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms VI-1

Dritter Programmaufruf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Förderkennzeichen: 20T1926C

Laufzeit des Projektes: 01.08.2020 – 31.08.2024

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung 1

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 1

3 Planung und Ablauf des Vorhabens 2

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 3

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5

6 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 6

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 34

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten 34

9 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 35

10 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 35

11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses 35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Klebschicht auf Glasträger und entnommener Probenfilm. 7

Abbildung 2 Transmissionsspektrum des Klebefilms, rot markiert sind die Laserwellenlänge bei λ = 1030 nm und der zugehörige Transmissionswert. 8

Abbildung 3 Klebschicht auf Glasträger mit Modifikationsspuren nach Bestrahlung. 8

Abbildung 4 Grundaufbau der Laboranlage mit wesentlichen Komponenten und gekennzeichnetem Einbaubereich für die optomechanische Vorrichtung..... 9

Abbildung 5 Umsetzung des Laboraufbaus mit anpassbaren optischen Komponenten im späteren Bereich der Optomechanik. 9

Abbildung 6 Vollständige Nachbildung des Laboraufbaus im optischen Simulationsprogramm ZEMAX. 10

Abbildung 7 Beispiel für die Gegenüberstellung der Ergebnisse von ZEMAX-Simulation vs. Realversuch für die Spotabstände in Abhängigkeit des Fokus Offsets. 11

Abbildung 8 Wendelbohrbearbeitung a) Materialoberfläche mit Bohrungseintritt, b) Materialunterseite mit Bohrungsaustritt, c) Querschliff der Bohrungen. 13

Abbildung 9 Perkussionsbohrbearbeitung a) Materialoberfläche mit Bohrungseintritt, b) Materialunterseite mit Bohrungsaustritt, c) Querschliff der Bohrungen. 13

Abbildung 10 4D-Surfaceplot der Zeitdauer in Sekunden, die zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 16

Abbildung 11 4D-Surfaceplot der Zeitdauer in Sekunden, die zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 16

Abbildung 12 Bezug des Faktors Total energy / Gesamtenergie im Design-of-Experiments Modell zum Prozessfortschritt, entsprechende 3D-Darstellung einer repräsentativen Bohrungsvermessung mittels Laser-Scanning-Mikroskopie. 16

Abbildung 13 4D-Surfaceplot des Energiebedarfs in Joule, der zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 17

Abbildung 14 4D-Surfaceplot des Energiebedarfs in Joule, der zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 17

Abbildung 15 4D-Surfaceplot der Wärmeeinflusszone in mm², die beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 18

Abbildung 16 4D-Surfaceplot der Wärmeeinflusszone in mm², die beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 18

Abbildung 17 4D-Surfaceplot des Taperwinkels in °, der beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen

entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 19

Abbildung 18 4D-Surfaceplot des Taperwinkels in °, der beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet. 19

Abbildung 19 CFK-Sandwich-Probe mit einer Vielzahl von Bohrungen mit Ø 0,5 mm. 20

Abbildung 20 Konzentrationsverlauf der A-/E-Staubfraktion und der Cges. Konzentration bei zwei verschiedenen Laserpozess-Parametern..... 23

Abbildung 20 Partikel-Größenverteilung bei angepasster Erfassung und optimierten Laser-prozessparametern. 24

Abbildung 21 Funktionsweise der Durchschneidkontrolle basierend auf Thermografie..... 26

Abbildung 22 Temperaturverläufe während des Prozesses beim Wendelbohren und Perkussionsbohren. 27

Abbildung 23 Thermografieaufnahmen aus einem Wendelbohrprozess und einem Perkussionsbohrprozess jeweils in nicht durchbohrtem und durchbohrtem Zustand zur Verdeutlichung der Kontrastproblematik. 27

Abbildung 24 a) Aufbau zur Untersuchung einer Durchschneidkontrolle mittels rückseitiger Durchleuchtung, b) durchleuchtete Probe mit Laserschnittfugen und kleinem Steg, c) vergrößerter Surface-Plot der durchleuchteten Probe mit Steg. 28

Abbildung 25 Am LZH angefertigte Probekörper für mechanische Versuche..... 29

Abbildung 26 Auf der Rückseite mit Glasplatte verschlossener Sandwich-Probekörper für Kontaminationsversuche: a) Rückseite vor Bearbeitung, b) Vorderseite nach Bohrbearbeitung, c) Rückseite nach Bohrbearbeitung..... 29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Emissionsrate pro Bohrung / Werkstoff HexPly M21 21

Tabelle 2 A-/E-Staubfraktion in der Bearbeitungskammer 22

Tabelle 3 Prüfergebnisse der PAK-Analytik, Konzentrationen sind kleiner Bestimmungsgrenze 25

Abkürzungsverzeichnis

CF	kohlenfaserverstärkt
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DOE	Diffraktives Optisches Element
DoE	Design of Experiments
FVK	faserverstärkte Kunststoffe
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
INV	INVENT GmbH
KMS	KMS Technology Center GmbH
KRL	KUKA Robot Language
LZH	Laser Zentrum Hannover e.V.
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
POA	Percentage of Open Area
UD	unidirectional
VOC	Volatile Organic Components
WEZ	Wärmeeinflusszone

1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines laserbasierten Verfahrens zur Einbringung von Mikrobohrungen ≤1mm in CFK-Sandwichstrukturen zum Zweck der Schalldämpfung. Dies beinhaltete die Entwicklung neuartiger Hardwarekomponenten und einer speziell darauf ausgelegten Prozessführung, -kontrolle und -steuerung. Die Entwicklungen sollen in einem Bearbeitungskopf resultieren und gemeinsam mit dem Nachweis der Prozess- und Bauteilqualität und einer umfassenden Prozessdatendokumentation den Anforderungen einer künftig angestrebten Anwendung und Qualifizierung im Luftfahrtbereich Rechnung tragen. Durch den Einsatz von Lasern ist eine berührungslose, kraftfreie und verschleißfreie Anfertigung von Bohrungen unterschiedlicher Durchmesser mit einem Werkzeug möglich. Die flexible und schnelle Änderung der Bohrungsdurchmesser sollte im Prozess durch variable Optiken erfolgen und die Erstellung von Bohrungsfeldern mit lokal angepassten Schalldämpfungseigenschaften erlauben. Durch den Einsatz diffraktiver optischer Elemente (DOE) sollten mehrere Löcher in definierten Lochmustern simultan mit verschiedenen Bohrverfahren gefertigt werden und damit das bisherige Defizit unzureichender Prozesszeiten beheben. Ein herausragendes Alleinstellungsmerkmal sollte die angestrebte Fertigung von Bohrungsdurchmessern im Bereich 0,25 bis 1mm mit Prozesszeiten sein, die mit mechanischen Bohrverfahren (nur >1mm) konkurrieren können. Der Einsatz von Sensorik zur Überwachung z.B. von Bohrfortschritt, Überprüfung der DOE–Optiken, Bauteiltemperaturen, Schwingungsdetektion oder Positionsbestimmung von Bauteil und Bearbeitungskopf sollte zur Steigerung der Prozesssicherheit und –qualität beitragen und aktiv Bauteilausschuss vermindern. Die Lösung als vibrationsresistenter, gewichts- und steifigkeitsoptimierter Bearbeitungskopf, in dem alle Komponenten integriert werden, sollte eine spätere Adaption an typische Handhabungstechniken wie Roboter- oder Portalanlagen ermöglichen.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Eine Methode zur Lärmreduktion stellt die dissipative Schalldämpfung durch das Einbringen von Mikrobohrungen in Oberflächen mit dahinterliegenden Hohlräumen dar. Dieses Verfahren kann insbesondere an faserverstärkten Sandwichbauteilen angewendet werden und in Verschalungselementen im Triebwerksbereich oder Kabinenbereich zum Einsatz kommen. Aufgrund von Limitierungen bei konventionellen Verfahren werden neue, innovative Lösungswege für die großflächige Einbringung von Mikrobohrungen erforscht. Ein Ansatz ist die Anfertigung solcher Bohrungen mittels eines Laserbohrverfahrens. Die Vorteile der Laserbearbeitung liegen in der verschleißfreien und kontaktlosen Bearbeitung. Darüber hinaus können geringere Durchmesser realisiert werden und so die Schalldämpfung optimiert werden. Gründe, weshalb das Verfahren bisher keine industrielle Anwendung findet, sind unter anderem in der unzureichenden Prozess- und Anlagentechnik sowie dazugehöriger Verfahrensentwicklung inklusive

Software und Steuerungs- und Überwachungstechnik, welche allesamt auf die Erfordernisse der Bearbeitung von faserverstärkten Sandwichwerkstoffen angepasst sein müssen, zu finden.

Im Rahmen des Teilvorhabens „Entwicklung des Laserverfahrens“ wurde der Laserbohrprozess so weiterentwickelt, dass er für die industrielle Anwendung im Bereich akustischer Bohrungen attraktiv werden sollte. Das Hauptziel des Teilvorhabens schloss neben der optischen Auslegung der Komponenten auf spezielle Anforderungen der Bohrungsgeometrie für Akustikbohrungen auch eine Prozessentwicklung ein, die neben angepassten Prozessstrategien die zugehörige Steuerungssoftware und eine thermografiebasierte Prozesskontrolle umfasste und auf diese Weise die zuvor genannten Unzulänglichkeiten beheben sollte. Das Laserbohrverfahren sollte damit nicht nur industriell anwendbar werden, sondern durch die parallelisierte Bearbeitung mittels Strahlteilung durch diffraktive optische Elemente zugleich auch Prozesszeiten erreichen, die auf dem Niveau konventioneller Prozesse lagen. Die Demonstration der Anwendbarkeit erfolgte in der finalen Phase des Projekts durch die Entwicklung einer Gesamtlösung für den Bearbeitungskopf und die Bearbeitung auf gekrümmten Bauteilen.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Arbeitsplan für das Gesamtprojekt gliederte sich in sechs Hauptarbeitspakete:

HAP0. Projektmanagement
Innerhalb dieses Arbeitspakets wurden organisatorische Belange des Teilvorhabens bearbeitet. Darunter fielen, neben der Koordinierung der Zusammenarbeit mit dem Projektpartner und den assoziierten Partnern, das Erstellen der Jahresberichte, die Planung bzw. Durchführung der Projekttreffen sowie vorbereitende Schritte zur Verwertung der Projektergebnisse wie die Teilnahme an Konferenzen.

HAP1. Optische Auslegung
HAP1 war die Konzeptionsphase des Projekts, in der die optische Auslegung erfolgte und die Zwischenschritte zum Aufbau der Laboranlage durchgeführt wurden, welche das HAP zum Ergebnis hatte. Neben der Auslegung der optischen Komponenten war das Laser Zentrum Hannover (LZH) maßgeblich am Aufbau der Laboranlage beteiligt und unterstützte den Projektpartner KMS Technology Center GmbH (KMS) bei der Evaluierung der optischen Konfiguration sowie bei der Auswahl der DOE und deren Anforderungen an ihre Positionierung.

HAP2. Prozessentwicklung
In HAP2 erfolgte die eigentliche Prozessentwicklung, in deren Zuge das LZH Bohrprozesse entwickelte, die auf die Anwendung mit Scanneroptiken und Festoptiken ausgelegt waren und mit statistischer Aussagekraft hinterlegt wurden. Parallel dazu wurde eine umfassende Software programmiert, über die die gesamte Kommunikation mit den Anlagenkomponenten und dem Sicherheitssystem erfolgen sollte und die dem Nutzer die Erstellung spezieller Prozessroutinen für den Mikrobohrprozess ermöglichte.

HAP3. Prozesskontrolle & Datenmanagement
In HAP3 wurden die Prozesskontrolle und das Datenmanagement erarbeitet, wobei das LZH für die Entwicklung einer thermografiebasierten Durchschneidkontrolle ohne rückseitigen Zugang zum gebohrten Laminat zuständig war. Zusätzlich unterstützte das LZH den Partner KMS bei der Erstellung von optischen Auswerteroutinen und stellte dem Partner INVENT GmbH (INV) Datenschnittstellen und Datenpakete bereit.

HAP4. Qualitätsmanagement & Bauteilprüfung
In HAP4 erfolgte die Verifikation der Ergebnisse durch experimentelle Analysen und Simulationsrechnungen mit dem Ziel, einen optimierten Bohrprozess ohne signifikante Materialschädigung zu entwickeln. Das LZH war maßgeblich für die Anpassung und Optimierung des Bohrprozesses verantwortlich. Neben der Anfertigung von Testkörpern für INV wurde INV auch bei der Erstellung von optischen Auswerteroutinen unterstützt.

HAP5. Prozesshardware & Demonstration
In HAP5 erfolgte die technische Umsetzung und Demonstration der Technologie, bei der das LZH in Zusammenarbeit mit KMS einen Bearbeitungskopf in am LZH vorhandene Anlagentechnik integrierte und gekrümmte Bauteile bearbeitete.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Die Wirksamkeit poröser Strukturen für die Schalldämmung ist bekannt und Stand der Technik. Typische Einsatzfelder sind beispielsweise poröse Wandelemente beispielsweise in Großraumbüros. Ein Material, das gegenüber der umgebenden Luft offene, luftgefüllte Poren aufweist, die ausreichend eng und tief sind, bewirkt für auftreffende Schallwellen einen Dämpfungseffekt, der durch Reibungsvorgänge verursacht wird, die Schallenergie in Wärme umwandeln. Mikroperforierte Absorber (z. B. Lochdurchmesser 1mm oder kleiner) haben ebenfalls einen schalldämmenden Effekt durch Reibung, allerdings ist hier im Gegensatz zu makroperforierten Materialien der Flächenanteil der Löcher durch deren kleinen Durchmesser gering im Vergleich zur Gesamtoberfläche, beispielsweise 1%. Dadurch bleibt der überwiegende Teil des perforierten Materials strukturmechanisch erhalten. Als Beispiel für die Verringerung des

Schalldruckpegels in einem Triebwerk wird bei der Auskleidung von Sekundär- und Turbinenströmungskanal mit einem mikroperforierten Absorber in der Literatur eine Reduktion um ~10dB angegeben.
Zu den konventionellen Verfahren die zur Einbringung von Mikrobohrungen in CFK genutzt werden, zählen das mechanische Bohren und das Stanzen. Beim Stanzen können flächige Bearbeitungen über Walzen realisiert werden, dieses Verfahren eignet sich daher gut für eine Skalierung auf große Flächen. Allerdings werden beim Stanzvorgang hohe Kräfte aufgebracht, was bei der Anwendung auf CFK zu Abplatzungen und Delamination führen kann und insbesondere vor dem Hintergrund von Anwendungen in der Luftfahrt, die hohen Qualitätsanforderungen unterliegen, ein Ausschlusskriterium ist. Zudem ist das Verfahren begrenzt auf die Bearbeitung von Laminaten die erst im Anschluss zum Sandwich Verbund verklebt werden können, was zum teilweisen Verschluss der Bohrungen durch Klebmasse und in der Folge zu einer Verringerung der Percentage of Open Area (POA = Porösität) und einer Verschlechterung der dämpfenden Eigenschaften führt.
Das Einbringen von Mikrobohrungen durch mechanisches Bohren kann am fertigen Sandwich Bauteil erfolgen und wird im großflächigen Maßstab in der Regel über Bohrerarrays realisiert, die bis zu ~20 Bohrungen gleichzeitig in kurzen Prozesszeiten (<2s) anfertigen können. Da die Bohrer vor allem bei CFK starkem Verschleiß unterliegen, müssen diese bei typischen Bohrszenarios für Akustikanwendungen in der Regel nach etwa 0,5m² Bohrfläche (entspricht ~3000 Bohrungen) ausgetauscht werden und verursachen neben den Werkzeugkosten, Stand- und Rüstzeiten. Am Beispiel eines Triebwerks kann die gesamte Fläche mit akustischer Auskleidung laut Literatur bis zu 30m² einnehmen, typische Bearbeitungsflächen mit Akustikbohrungen sind mit ca. 12m² bekannt.
Darüber hinaus liegt die typische Limitierung des Bohrungsdurchmessers bei industrieller Anwendung derzeit bei Ø1 mm, wohingegen geringere Durchmesser durchaus erwünscht wären, da damit eine höhere innere Reibung in der Bohrungsöffnung und eine höhere Porösität erzielt werden kann, was in einer besseren und breitbandigeren Schalldämpfung resultiert.
Das Lasermikrobohren verschiedenster Werkstoffe ist im Rahmen der allgemeinen Lasermikromaterialbearbeitung in vielen Anwendungen vertreten. Hier kommen auch Bearbeitungsköpfe und Verfahren unter Nutzung diffraktiver optischer Elemente zur Erhöhung der Effizienz zum Einsatz, jedoch in Kombination mit Strahlquellen deren Pulsenergien und mittleren Leistungen nicht ausreichen oder in langen Bearbeitungszeiten münden und daher einem sinnvollen Einsatz bei der Bearbeitung von CFK entgegenstehen. Zudem sind optische Parameter verfügbarer Anlagentechnik wie Fokusdurchmesser und Rayleighlänge oder Prozessführungsoptionen wie Leistungsanpassung und Fokusanpassung nicht auf die Erfordernisse der CFK-Bearbeitung angepasst oder in einem steuerbaren System vereinbar. Aktuelle Lösungen im Bereich der Mikrobearbeitung sind somit weder für die Mikrobohrbearbeitung von CFK

noch für die hohen Leistungen und Pulsenergien der Strahlquelle (Ep = 100 mJ, PL,m = 1,5 kW) wie sie im vorliegenden Projekt genutzt werden sollte verfügbar.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Laser Zentrum Hannover e.V. hat das Projekt miBoS in enger Zusammenarbeit mit folgenden Projektpartnern bearbeitet:

- Projektkoordinator: INVENT GmbH (INV)
- KMS Technology Center (KMS)

Die Zusammenarbeit im Projekt miBoS ergibt sich aus der Zusammensetzung der einzelnen Kompetenzen der Projektpartner im Bereich Lasertechnologie (LZH), Herstellung und Prüfung von Sandwichplatten (INV), Prozessentwicklung (LZH, KMS), Prozesskontrolle (LZH, KMS, INV), Qualitätsmanagement und Bauteilprüfung unter luftfahrtrelevanten Randbedingungen (INV), Vorrichtungsbau (KMS) und Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen (KMS, INV).

6 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Hauptarbeitspaket 1: Optische Auslegung

Innerhalb von HAP1 wurden mit den Partnern INV und KMS Probenarten, Materialaufbauten und Probengeometrien definiert. Seitens des LZH sollte sich die Probengröße für die grundlegenden Untersuchungen am verfügbaren Bauraum der Laboranlage orientieren und möglichst kompakt ausgeführt werden. Des Weiteren sollen die Proben einer einfachen Handhabung und Probenpräparation, wie z.B. für Querschliffe, entgegenkommen. Daher wurden von INV für erste grundlegende Versuche flache Laminate aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) in zwei unterschiedlichen Dicken zur Verfügung gestellt. An diesen sollen erste Bohrparameter, Bohrstrategien und thermografische Überwachungsstrategien untersucht werden.

Da Sandwichwerkstoffe eine Klebschicht zur Verbindung des Decklaminats mit der Wabenstruktur beinhalten, wurde durch INV eine reine Klebschicht ohne CFK-Laminat hergestellt. Diese wird zur Ermittlung der optischen Eigenschaften für die Laserwellenlänge verwendet. Im weiteren Verlauf wird an der Klebschicht der Einfluss von Leckstrahlung, welche aus vollständigen oder nahezu vollständigen Bohrungen im Inneren der Wabenstruktur auf die Klebschicht des rückseitigen Laminats trifft, untersucht. Die Klebschicht wurde durch INV aus Herstellungsgründen auf einen Glasträger aufgebracht (siehe Abbildung 1), die Probenentnahme aus der sehr filigranen Schicht erfolgte am LZH mittels einer scharfen Klinge und gleichzeitigem Erwärmen des Probenkörpers.

Die Bewertung der Klebschicht hinsichtlich der optischen Eigenschaften erfolgte anhand der Aufnahme eines Transmissionsspektrums an einem Spektrometer. Ausschlaggebend ist hier vor allem der Wellenlängenbereich der Laserstrahlung, welcher bei $\lambda = 1030$ nm liegt. Die Strahlquelle wird für das Projekt von der Firma TRUMPF Laser GmbH zur Verfügung gestellt. Da in einer ersten Messung kein direkter Transmissionsanteil bei dieser Wellenlänge nachgewiesen werden konnte, wurde die Messung mit einer Ulbrichtkugel wiederholt, welche auch die gestreuten Strahlungsanteile erfasst. Das Transmissionsspektrum ist in Abbildung 2 dargestellt, zur besseren Sichtbarkeit sind die Laserwellenlänge und der zugehörige Transmissionswert mit einer rot gestrichelten Linie gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass ~36% der Strahlung bei $\lambda = 1030$ nm transmittiert werden. In Bezug auf den Lasermaterialbearbeitungsprozess lässt dies folgende Rückschlüsse zu:

1. Da nur indirekte Transmission nachgewiesen werden konnte, wird die transmittierte Strahlung auf eine größere Fläche verteilt, was ein weniger punktuelles Schädigungsverhalten durch eine hohe Strahlungsintensität auf der rückseitigen Klebschicht erwarten lässt. Für kommende Aufbauten zur

Untersuchung der Schädigung kann von einer flächigen Verteilung des transmittierten Strahlungsanteils ausgegangen werden.

2. Durch die Streuung der Strahlung muss auch von einer Wechselwirkung mit dem angrenzenden Wabenmaterial ausgegangen werden.
3. Wird ein vernachlässigbarer reflektierter Strahlungsanteil angenommen, ist der in der Klebeschicht absorbierte Anteil der Strahlung mit ~64% ausreichend hoch, um einen Abtragsvorgang in der Bohrung sicherzustellen (unter der Annahme der Nutzung von typischen Laserleistungen aus vorangegangenen Laserbohruntersuchungen).

In einer weiteren Untersuchung wurde der Fall betrachtet, dass der Laserbohrprozess nach der vollständigen Durchbohrung des Facesheets des Sandwichmaterials nicht gestoppt wird und Strahlung durch die Bohrung auf Klebschicht des rückseitigen Laminats trifft. Die Parameter wurden so gewählt, dass sie der Fokuslage und den Leistungseinstellungen eines realen Prozesses entsprechen. Die Ergebnisse zeigten deutliche Markierungsspuren auf der Klebschicht, selbst wenn Parameter im unteren Leistungsbereich genutzt wurden (siehe Abbildung 3). In später folgenden Versuchen wurden Proben aus Sandwichmaterial angefertigt und mit den dort angewandten Parametern wurden keine Markierungsspuren am Wabenmaterial oder der Klebeschicht beobachtet. Dies wird darauf zurückgeführt, dass ein großer Strahlungsanteil an den Bohrungsflanken absorbiert und gestreut wird und damit nur geringe direkte Strahlungsanteile auf die rückseitige Klebschicht treffen. Erst bei Parametern mit sehr hohen Leistungseinstellungen wurden wieder geringfügige Markierungsspuren beobachtet.

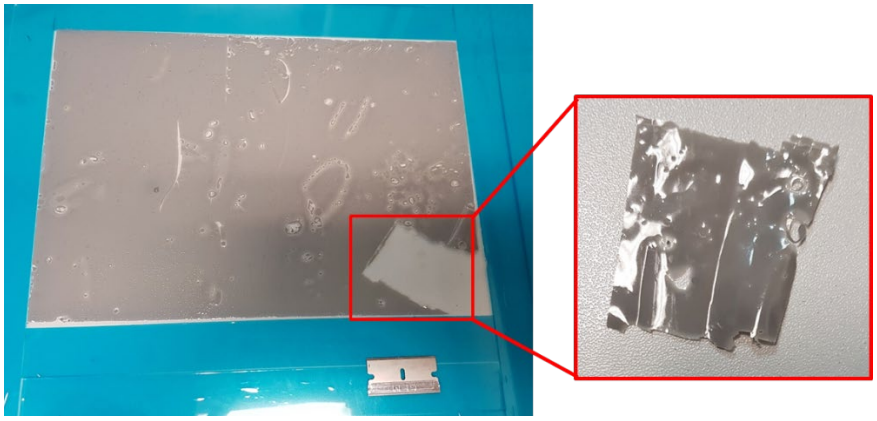

Abbildung 1 Klebschicht auf Glasträger und entnommener Probenfilm.

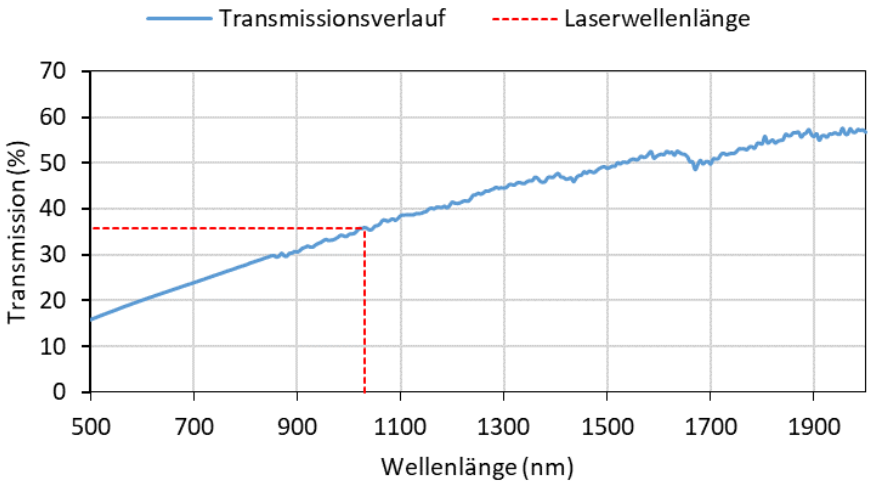

Abbildung 2 Transmissionsspektrum des Klebefilms, rot markiert sind die Laserwellenlänge bei λ = 1030 nm und der zugehörige Transmissionswert.

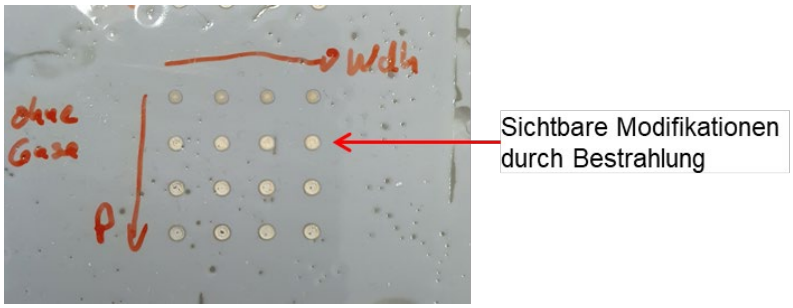

Abbildung 3 Klebschicht auf Glasträger mit Modifikationsspuren nach Bestrahlung.

Der Grundaufbau der Laboranlage am LZH ist mit seinen wesentlichen Komponenten in Abbildung 4 dargestellt. Aufgrund der hohen Leistung der TRUMPF-Strahlquelle und der für die Bearbeitung benötigten Strahlqualität ist das System als Freistrahlsystem ausgeführt. Die Laserstrahlung wird über vier Spiegel (M1-M4) und ein Scannersystem (System aus beweglichen Spiegeln) bis zur Bearbeitungsoberfläche geführt. Der c-förmige Strahlweg ist notwendig, damit das Scannersystem samt Umlenkspiegel M4 und Objektiv an einer z-Achse parallel zum Strahlweg zwischen M3 und M4 verfahren werden und so die Fokusebene an die Werkstückoberfläche angepasst werden kann.

Abbildung 5 zeigt den fertigen Laboraufbau. Die Einbauposition des Laboraufbaus entspricht der Position, an der im späteren Verlauf des Projektes die von KMS & INVENT aufgebaute optomechanische Vorrichtung („Bearbeitungskopf“) eingesetzt werden soll. Der Funktionsumfang des Laboraufbaus beinhaltet wechselbare Vorrichtungen für diffraktive optische Elemente, wechselbare Linsensysteme und koaxial zum Strahlengang

verschiebbare Linsensysteme und bildet somit für die Prozessentwicklung den wesentlichen Funktionsumfang des späteren Bearbeitungskopfes ab.

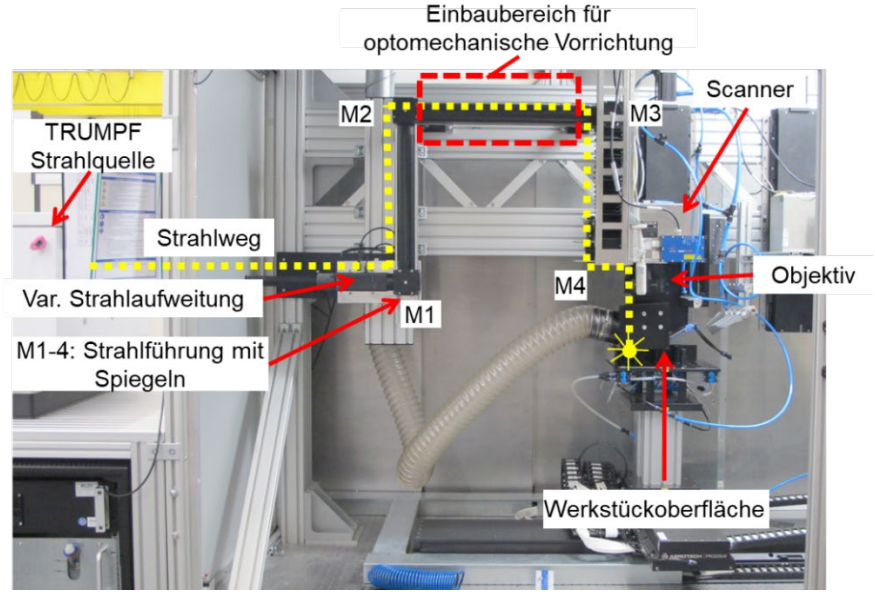

Abbildung 4 Grundaufbau der Laboranlage mit wesentlichen Komponenten und gekennzeichnetem Einbaubereich für die optomechanische Vorrichtung.

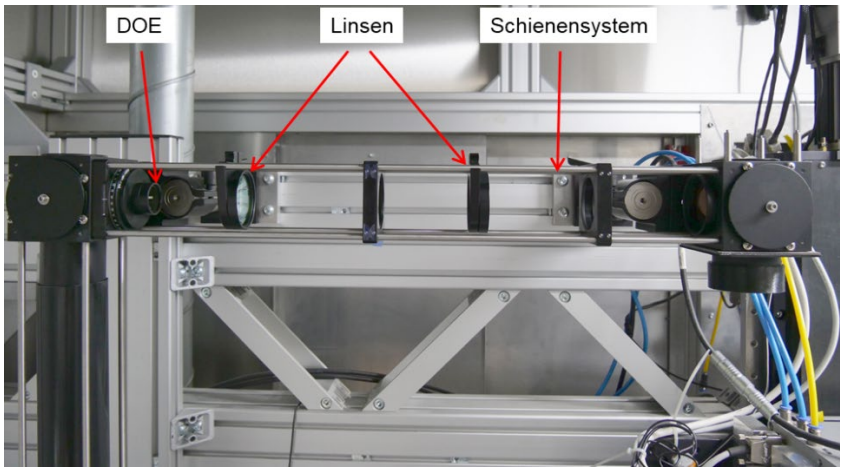

Abbildung 5 Umsetzung des Laboraufbaus mit anpassbaren optischen Komponenten im späteren Bereich der Optomechanik.

Im Rahmen von HAP1 wurde der gesamte Aufbau zu Simulationszwecken in der Software ZEMAX modelliert (Abbildung 6). Die Simulation soll zur präzisen Voraussage der zu erwartenden Spotabstände und Spotdurchmesser, die das spätere Lochmuster definieren, sowie der Fokusdistanz zwischen Objektiv und Werkstück dienen. Zudem soll sie Auskunft über die Einhaltung von geometrischen Randbedingungen wie begrenzenden Aperturen (Scannerapertur, Apertur des Objektivs), begrenzenden

Spiegelflächen (Spiegel M3, M4 und Scannerspiegel) sowie die Einhaltung von Schädigungsgrenzwerten von Linsen und Spiegeln geben. Eingangsvariablen sind hierbei die Einbaupositionen der Linsen L1 sowie L2 sowie die Position des diffraktiven optischen Elements (DOE), welches für die Strahlteilung zuständig ist. Weitere maßgebliche Variablen sind die Spezifikationen des DOE. Dieses beinhaltet die Anzahl der Teilstrahlen, die Anzahl der Dimensionen in denen die Strahlung aufgeteilt wird, die Winkel zwischen den entstehenden Teilstrahlen sowie den Gesamtöffnungswinkel. Weitere wichtige Variablen sind die Brennweiten der Linsen L1 und L2 und die Abstände zwischen den drei genannten optischen Komponenten.

Die komplexe telezentrische f-Theta Fokussieroptik wurde in Form einer Blackbox in das Modell integriert, um präzisere Ergebnisse zu erhalten. Eine Überprüfung der Simulationsergebnisse wurde am realen Aufbau durchgeführt (siehe Abbildung 7). Es konnten Differenzen von ca. 5% zwischen den Simulationsergebnissen und den Realversuchen beim Spotabstand ermittelt werden. Die Abweichungen sind als gering einzuordnen und können auf die Berechnung mit idealisiertem Laserstrahl sowie auf Toleranzen zwischen geometrischen Annahmen und dem realen Aufbau zurückgeführt werden.

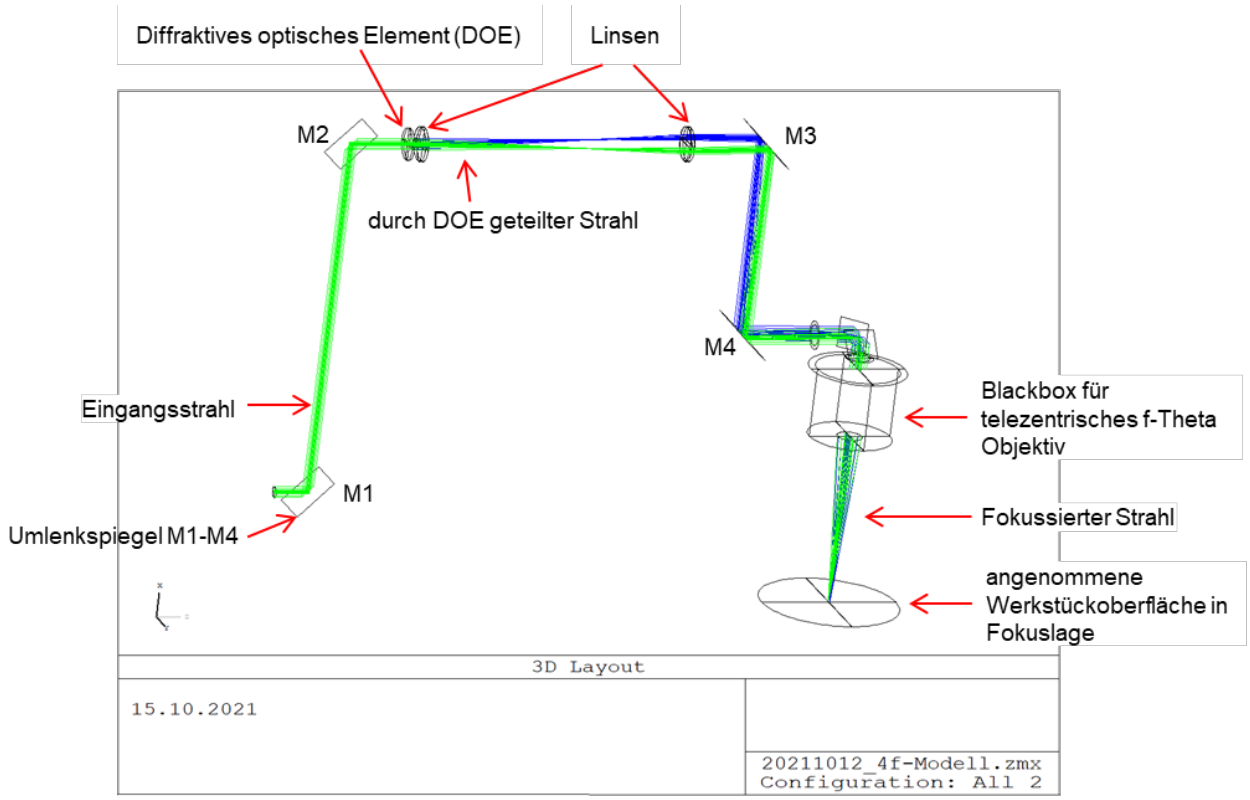

Abbildung 6 Vollständige Nachbildung des Laboraufbaus im optischen Simulationsprogramm ZEMAX.

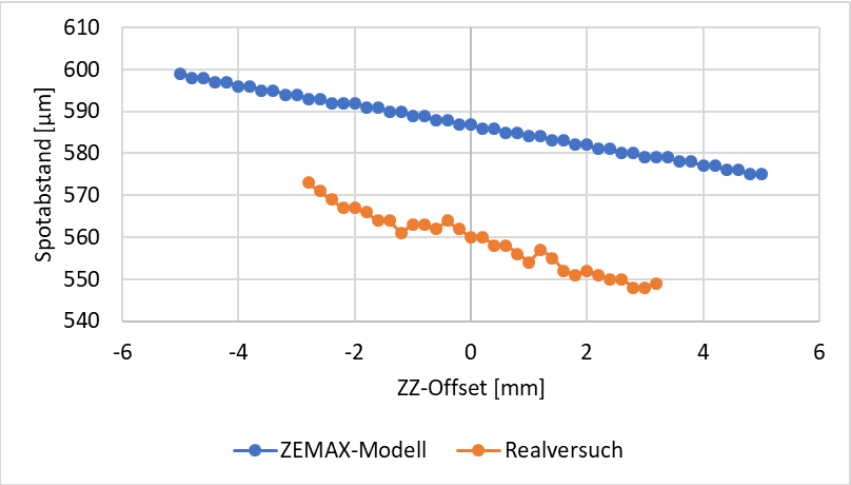

Abbildung 7 Beispiel für die Gegenüberstellung der Ergebnisse von ZEMAX-Simulation vs. Realversuch für die Spotabstände in Abhängigkeit des Fokus Offsets.

Hauptarbeitspaket 2: Prozessentwicklung

Innerhalb der Prozessentwicklung in HAP2 erfolgten Wendelbohrversuche (AP 2.4 Bohrprozessentwicklung für Scannerapplikation) und Perkussionsbohrversuche (AP 2.5 Bohrprozessentwicklung für Festoptik). Das Wendelbohren wurde für größere Bohrungen zwischen Ø 1 mm und 0,75 mm angewendet, da die Spiegelbewegung im Scanner für sehr kleine Kreisbewegungen und hohe Geschwindigkeiten durch den Hersteller nicht ausgelegt ist.

Beim Wendelbohren wurden folgende Beobachtungen gemacht (vgl. Abbildung 8):

- Es konnte eine sehr gute Rundheit der Bohrungen erreicht werden, da die Geometrie maßgeblich durch die Kreisbewegung der Scannerspiegel bestimmt wird. Kommt es, z.B. durch eine ungleichmäßige Energieverteilung im Strahlprofil oder durch richtungsabhängige Wärmeleitung im Material, zu einem ellipsenförmigen Abtrag, kann dieser über eine gegensätzliche Ellipse in der Steuerungssoftware aufgefangen werden.
- An den Bohrungsflanken wurden Taperwinkel von ca. 5° ermittelt (entspricht einer Ø-Differenz zwischen Bohrungseintritt und Austritt ~170 µm bei einer Ø = 1 mm Bohrung). Diese konnten durch die Anwendung einer Fokusnachführung nach jedem Bearbeitungszyklus auf ca. 3° reduziert werden. Die Fokusnachführung erhöht jedoch die Prozessdauer um ~10 %, da sie einen zusätzlichen Prozessschritt darstellt. Bei der Fokusnachführung besteht aber auch erhebliches Optimierungspotenzial, da die Nachführung in größere Distanzschritte über mehrere Bearbeitungszyklen zusammengefasst werden kann. Auch durch die Anpassung des Energieeintrags über der Prozessdauer lässt sich eine Optimierung des Tapers erwarten.

- Auf der Laminatoberfläche sind angrenzend an die Bohrung Modifikationen zu erkennen, die aber im Querschliff keine Tiefenwirkung erkennen lassen.
- Angrenzend an die Schnittflanke ist eine Wärmeeinflusszone zu erkennen, deren mittlere Breite mit < 50 µm (bei einem Pulsüberlapp von 85%) gering ausfällt.

Beim Perkussionsbohren definieren die Spotform und der Spotdurchmesser auf der Materialoberfläche die spätere Bohrungsgeometrie. Folglich wird die zum Materialabtrag zur Verfügung stehende Pulsenergie des Lasers auf die volle Fläche der Bohrung umgelegt. Im Rahmen der Prozessentwicklung wurde ermittelt, dass der optimale Bereich der Energiedichte bei Φ > 300 mJ/mm liegt. Um den optimalen Bereich nicht zu verlassen, ist der Bohrungsdurchmesser bei höchstmöglicher Pulsenergie des Lasers ($E_{p,max}$ = 100 mJ) auf maximal $Ø_{max}$ = 0,65 mm begrenzt. Im vorliegenden Projekt wird das Perkussionsbohren daher zur Bearbeitung kleiner Bohrungen Ø ≤ 0,5 mm eingesetzt. Beim Perkussionsbohren mit maximalem Durchmesser ist folglich auch die Effizienzsteigerung durch Strahlteilung nicht anwendbar, da dabei auch die Pulsenergie und die Energiedichte verringert werden und in einen suboptimalen Bereich fallen.

Darüber hinaus wurden beim Wendelbohren im Rahmen der Untersuchungen folgende Beobachtungen gemacht (siehe Abbildung 9):

- Die Rundheit der Bohrung weist eine leichte Ellipse auf, da sie durch die Energieverteilung im Laserspot geprägt wird. Diese elliptische Form beträgt bis zu 10 % des Bohrungsdurchmessers und lässt sich nicht durch einfache und kosteneffiziente technische Maßnahmen vermeiden oder ausgleichen.
- Die oberflächlichen Modifikationen angrenzend an die Bohrung fallen im Vergleich zum Wendelbohren geringer aus.

Die Wärmeeinflusszone angrenzend an die Schnittflanke fällt im Vergleich zum Wendelbohren bei einer dem Pulsüberlapp äquivalenten Pulsfolge etwas kleiner aus. Die Ursache hierfür wird im vollständig verdampften Materialvolumen beim Perkussionsbohren vermutet, während sich beim Wendelbohren der in der Bohrung verbleibende Bohrkern stark aufheizt.

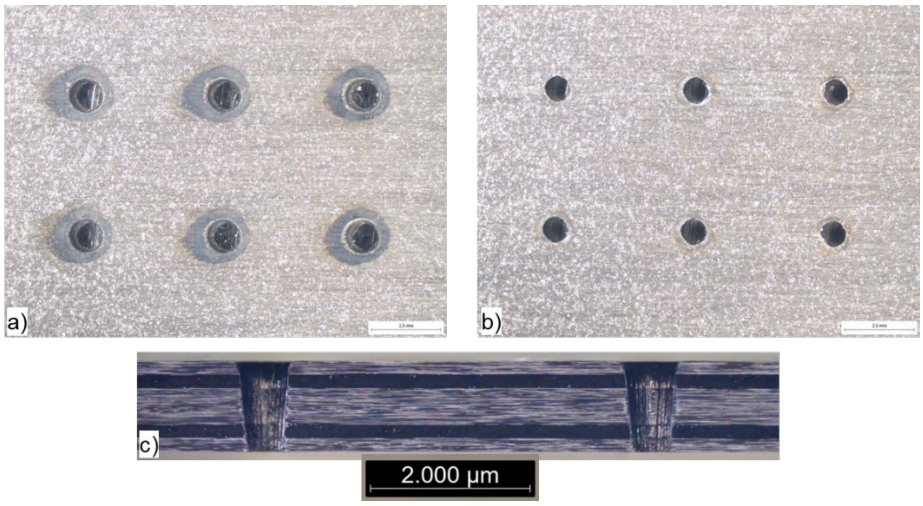

Abbildung 8 Wendelbohrbearbeitung a) Materialoberfläche mit Bohrungseintritt, b) Materialunterseite mit Bohrungsaustritt, c) Querschliff der Bohrungen.

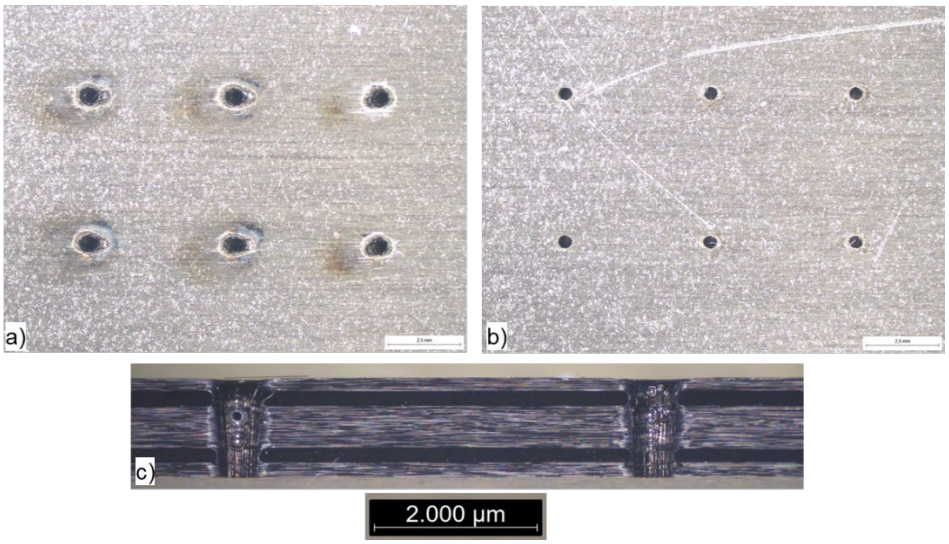

Abbildung 9 Perkussionsbohrbearbeitung a) Materialoberfläche mit Bohrungseintritt, b) Materialunterseite mit Bohrungsaustritt, c) Querschliff der Bohrungen.

Innerhalb des HAP 2 wurde eine statistisch abgesicherte Bohrprozessentwicklung durchgeführt. Es wurden umfangreiche Versuche durchgeführt, die auf einem „Design-of-exeriments“-Ansatz beruhen. Für das Perkussionsbohren und das Wendelbohren wurden die Auswirkung der übergeordneten Parameter Energiedichte, Pulsüberlapp/Pulsfolgen und Gesamtenergieeintrag auf die Qualitätsmerkmale Taperwinkel und Wärmeeinflusszone sowie die Effizienzmerkmale Zeitbedarf pro abgetragenem Volumen und Energiebedarf pro abgetragenem Volumen untersucht. Ein vollfaktorieller Testplan

wurde zur Bestimmung der Haupteffekte gewählt, während zur Optimierung das CentralCompositeFace-Design gewählt wurde, mit dem sich die Anzahl der durchzuführenden Versuche deutlich verringern lässt. Da die Auswertung von Merkmalen wie Abtragtiefe und Taperwinkel über Querschliffe aufwändig, zeitintensiv und auch sehr fehleranfällig ist, erfolgte die Evaluierung der Bohrproben über Laserscanning-Mikroskopie. Diese Messmethode erlaubt es auch das abgetragene Volumen präzise zu bestimmen, um Aussagen zur Abtragseffizienz zu treffen.

Ein beispielhaftes Ergebnis der Untersuchungen ist in Abbildung 10 dargestellt. Hier wird ein 4D-Surfaceplot der Zeitdauer gezeigt, die zum Abtrag eines CFK-Materialvolumens von einem mm³ durch Wendelbohren benötigt wird. Innerhalb der Grafik sind auf der X-Achse die Fluenz und auf der Y-Achse der Überlapp dargestellt. Die Isolinien innerhalb der Grafik stellen Bereiche mit gleicher Zeitdauer dar. Zwischen den Grafiken ändert sich von links nach rechts die eingebrachte Gesamtenergie ('Total energy‘), was dem Prozessfortschritt entspricht, da mit steigender Gesamtenergie typischerweise das abgetragene Material und damit die Bohrungstiefe zunimmt. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 12 verdeutlicht.

Zusätzlich wurde in Abbildung 10 der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt mit einem roten Punkt gekennzeichnet (entspricht der geringsten Zeitdauer zum Abtrag eines mm³ CFK).

Folgende Beobachtungen und Folgerungen lassen sich anhand des 4D-Surfaceplots machen:

1. Am Anfang des Prozesses (Gesamtenergie = 10 J) wird die geringste Zeitdauer pro abgetragenem Volumen bei geringer Fluenz und hohem Pulsüberlapp erreicht.
2. Mit zunehmendem Prozessfortschritt (Gesamtenergie = 27.5 bis 45 J) wandert der optimale Arbeitspunkt in Richtung höherer Fluenzen, der optimale Pulsüberlapp bleibt dagegen unverändert bei hohen Werten. Die Änderung des optimalen Fluenzbereiches kann mit zunehmenden Verlusten mit steigender Bohrungstiefe erklärt werden. Am Anfang des Prozesses wirkt sich eine zu hohe Fluenz negativ aus, da sie ein großes Plasma in der Bearbeitungszone generiert, welches folgende Laserpulse abschirmen kann. Mit Fortschreiten des Prozesses und somit steigender Bohrungstiefe werden Anteile der Strahlung an den Bohrungswänden reflektiert, absorbiert und in Wärme umgesetzt und stehen somit nicht mehr für den Abtrag am Bohrungsgrund zur Verfügung. Mit höherer Fluenz kann diesen Verlusten teilweise entgegengewirkt werden.
3. Insgesamt steigt die Zeitdauer pro abgetragenem Volumen mit zunehmender Prozessdauer. Verluste, welche mit zunehmender Bohrungstiefe durch Reflektionen an den Bohrungswänden oder durch Abschirmung durch abgetragene Partikel innerhalb der Bohrung entstehen, können im Rahmen der durch die Laserspezifikation gegebenen Grenzen nicht vollständig durch eine höhere Fluenz ausgeglichen werden. Der Prozess wird zwangsläufig ineffizienter.

Ähnliche Beobachtungen und Folgerungen wie für das Wendelbohren lassen sich auch für das Perkussionsbohren machen (Abbildung 11). Absolut gesehen ist der vollständige Perkussionsbohrprozess jedoch zeiteffizienter, da der Zeitbedarf für den Abtrag eines mm³ Materialvolumens geringer ist (Perkussionsbohren < 300 s/mm³ vs. Wendelbohren > 500 s/mm³ bei Gesamtenergie = 45 J).

Analog zu den Beobachtungen für die zeitliche Effizienz wurde auch die Energieeffizienz beurteilt (Energiebedarf pro abgetragenem Volumen). Hier konnte beim Wendelbohren ein ähnliches Verhalten beobachtet werden (siehe Abbildung 13). Im Gegensatz dazu fanden sich energetisch optimale Bearbeitungsparameter beim Perkussionsbohren unabhängig vom Prozessfortschritt bei geringen Pulsfolgen und geringen Fluenzen (Abbildung 14).

Bezüglich der Qualität zeigt sich, dass die geringsten Wärmeeinflusszonen unabhängig vom Bohrverfahren und vom Prozessfortschritt bei niedrigen Fluenzen und geringem Pulsüberlapp / geringen Pulsfolgen erreicht werden (vgl. Abbildung 15 & Abbildung 16). Die geringsten Taperwinkel (vgl. Abbildung 17 & Abbildung 18) werden beim Wendelbohren am Anfang des Prozesses bei geringen Fluenzen und mittleren Werten für den Pulsüberlapp beobachtet. Mit Fortschreiten des Prozesses verschiebt sich der optimale Arbeitspunkt aber Richtung höherer Fluenzen. Beim Perkussionsbohren hingegen liegt der optimale Arbeitsbereich bei niedrigen Fluenzen und geringen Pulsfolgen und verschiebt sich auch mit fortschreitendem Prozess nur leicht in Richtung mittlerer Werte für die Fluenz.

Vergleicht man die 4D-Surface-Plots für Qualität und Effizienz stehen sich optimale Parameterbereiche bei bestimmten Szenarios diametral gegenüber, woraus folgt, dass hier ein Kompromiss zwischen Bearbeitungseffizienz und Bearbeitungsqualität eingegangen werden muss.

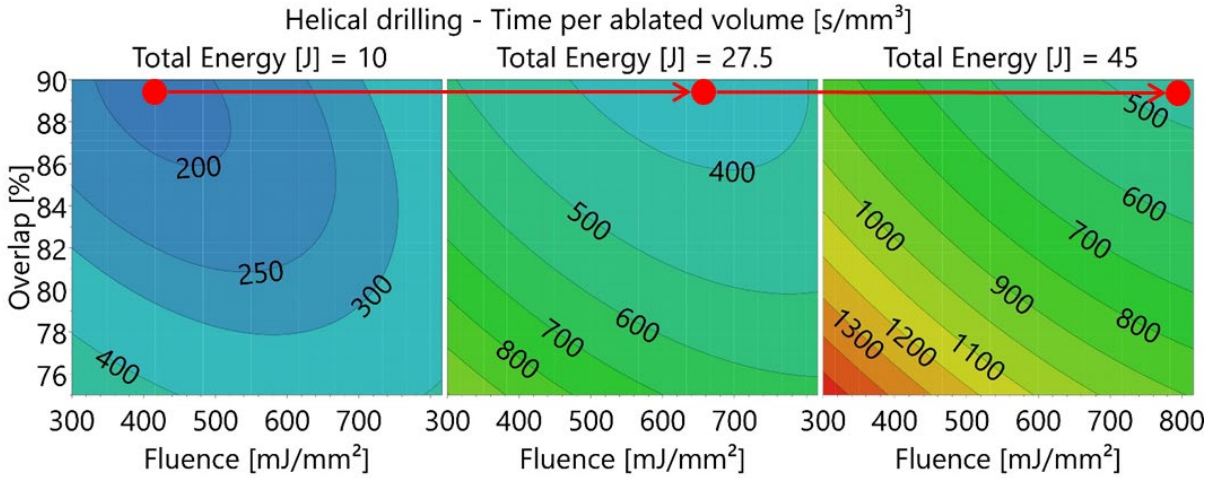

Abbildung 10 4D-Surfaceplot der Zeitdauer in Sekunden, die zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

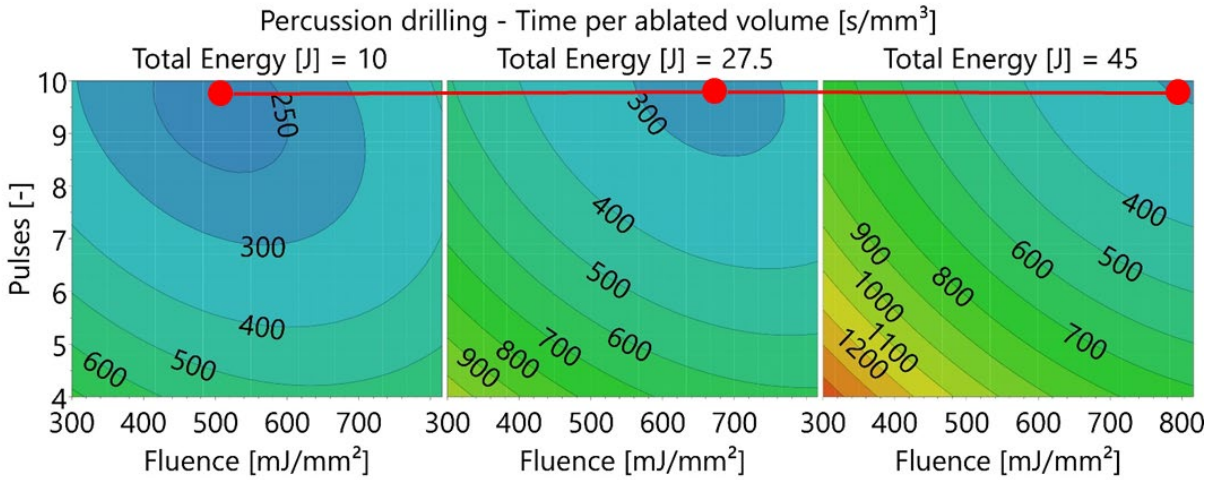

Abbildung 11 4D-Surfaceplot der Zeitdauer in Sekunden, die zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

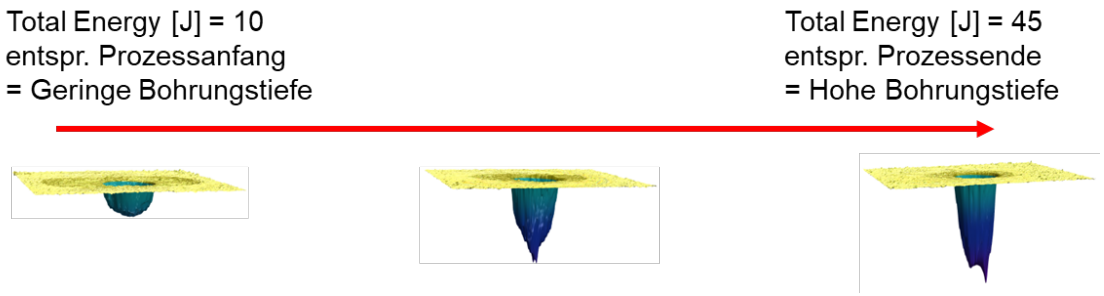

Abbildung 12 Bezug des Faktors Total energy / Gesamtenergie im Design-of-Experiments Modell zum Prozessfortschritt, entsprechende 3D-Darstellung einer repräsentativen Bohrungsvermessung mittels Laser-Scanning-Mikroskopie.

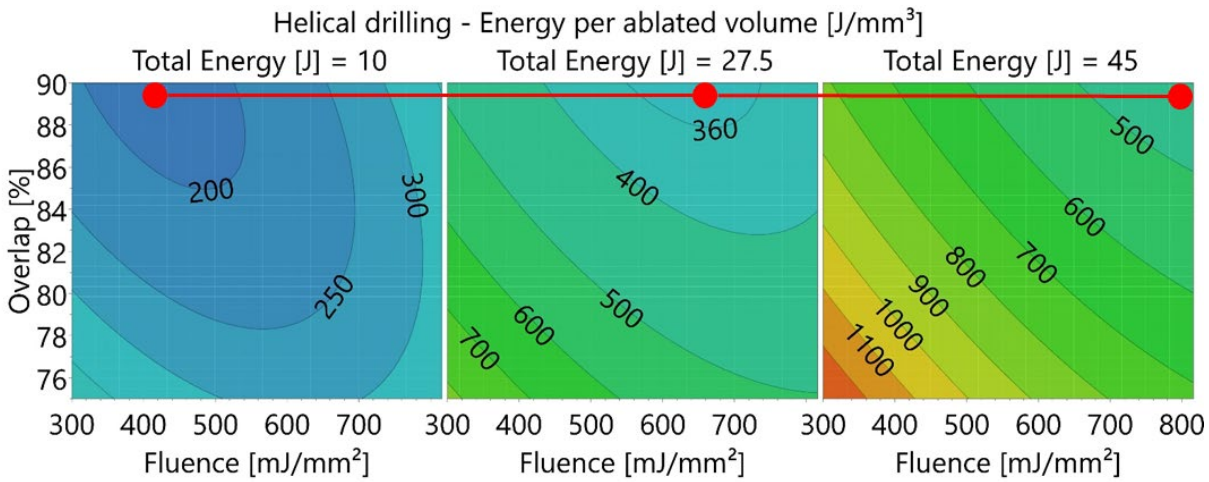

Abbildung 13 4D-Surfaceplot des Energiebedarfs in Joule, der zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

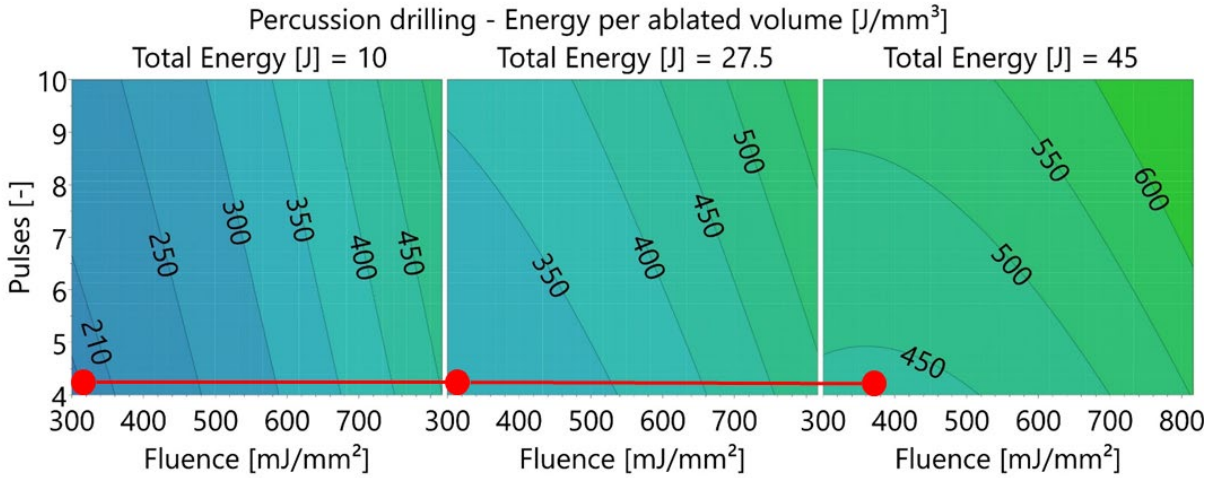

Abbildung 14 4D-Surfaceplot des Energiebedarfs in Joule, der zum Abtrag des Volumens von einem mm³ beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen benötigt wird; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

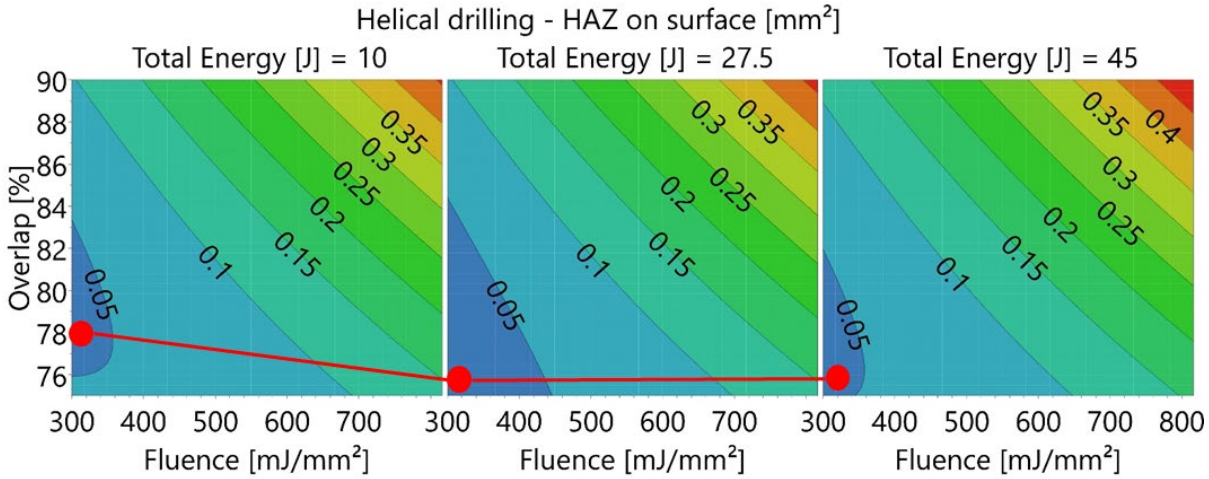

Abbildung 15 4D-Surfaceplot der Wärmeeinflusszone in mm², die beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

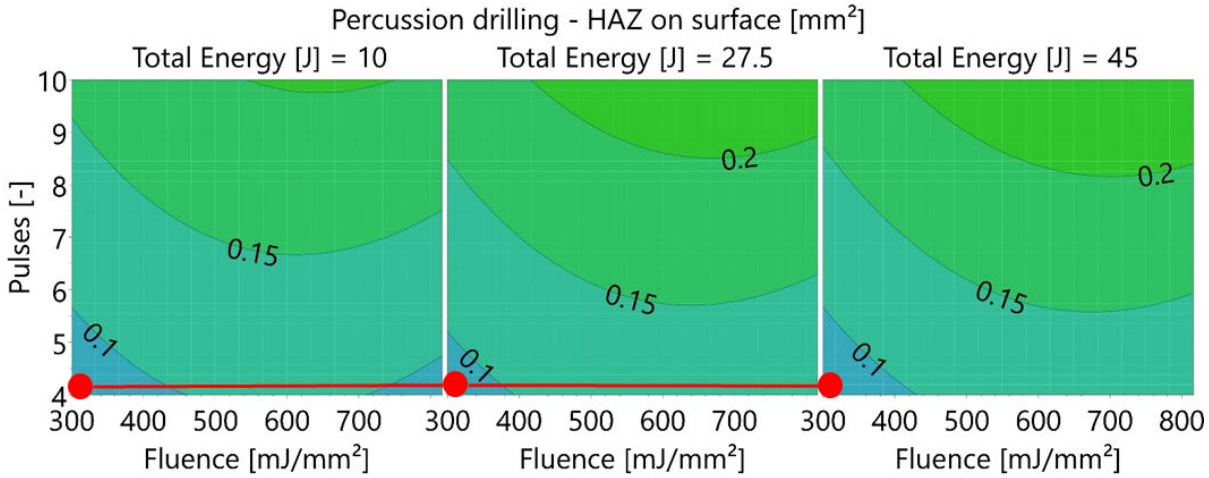

Abbildung 16 4D-Surfaceplot der Wärmeeinflusszone in mm², die beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

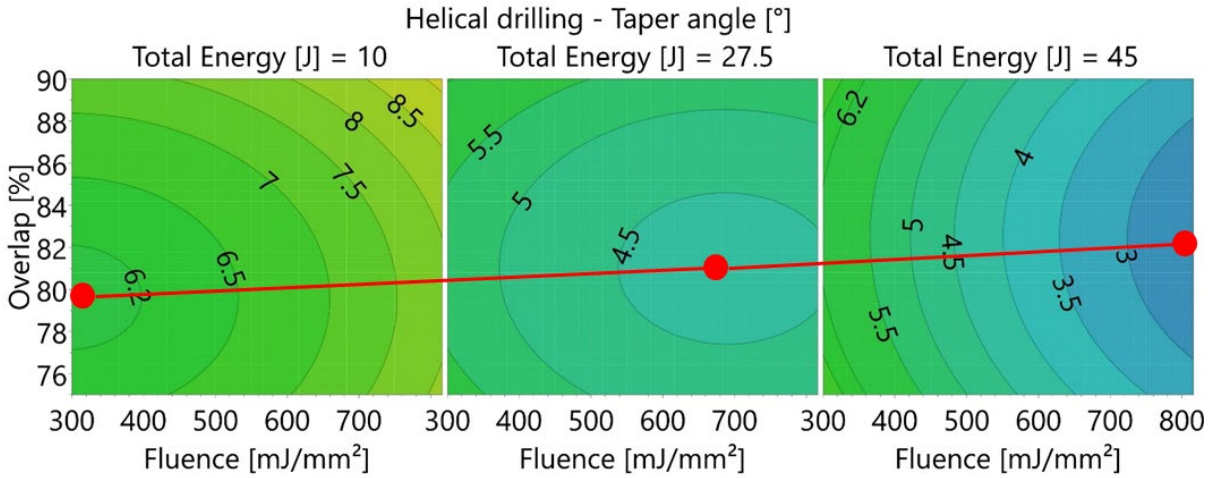

Abbildung 17 4D-Surfaceplot des Taperwinkels in °, der beim Wendelbohren mit unterschiedlichem Pulsüberlapp und unterschiedlichen Fluenzen entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

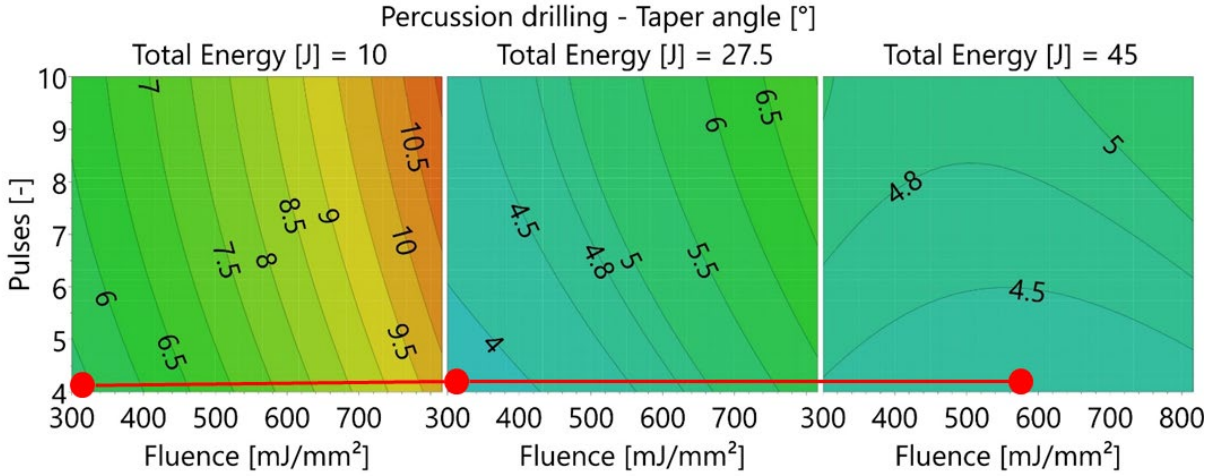

Abbildung 18 4D-Surfaceplot des Taperwinkels in °, der beim Perkussionsbohren mit unterschiedlicher Anzahl an Pulsfolgen und unterschiedlichen Fluenzen entsteht; der optimale Arbeitspunkt für den jeweiligen Prozessfortschritt ist mit einem roten Punkt gekennzeichnet.

Auf Basis der in HAP2 entwickelten Prozesse erfolgte die Anfertigung von Sandwich-Probekörpern nach Vorgabe des Projektpartners INVENT (Abbildung 19).

Abbildung 19 CFK-Sandwich-Probe mit einer Vielzahl von Bohrungen mit Ø 0,5 mm.

Zusätzliche Emissionsuntersuchungen in HAP2

Im Rahmen unabhängiger Untersuchungen wurde festgestellt, dass während der Verarbeitung von Epoxidharzen flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOCs) und an Kohlenstofffasern angelagerte polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs, gemäß der EPA-Richtlinien) entstehen können, welche gesundheitsschädlich sind und zwingend bei der Auslegung des Abluft- und Sicherheitskonzeptes am Arbeitsplatz berücksichtigt werden müssen. Die potenzielle toxische Wirkung dieser Emissionen hängt von der Größe der Partikel ab. Faserbruchstücke in WHO-Dimensionen können lungengängig sein und krebserregende Eigenschaften aufweisen. Erst kürzlich ist der Nachweis gelungen, dass sich während eines Laserbearbeitungsprozesses polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs, gemäß der EPA-Richtlinien) an den Kohlenstofffasern anlagern. Die Inkorporation dieser PAKs durch Verschlucken, Einatmen oder Hautkontakt stellt ein erhöhtes Risiko dar, das bisher nicht untersucht wurde. Daher wurden im Rahmen einer Aufstockung zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um eine präzisere Bestimmung der Art und Quantifizierung der Menge der freigesetzten Emissionen während der Laserbearbeitung, insbesondere hinsichtlich der PAKs, zu ermöglichen.

Die Messungen wurden während eines Laserbohrprozesses am LZH durchgeführt. Hauptaugenmerk war dabei , welche Hauptkomponenten die Maßnahmen zur Abgasreinigung bestimmen. Da sich nahe der Prozesszone die Erfassungseinrichtung für Rauche befindet, ist damit die Erzeugung einer gerichteten Luftströmung gewährleistet.

Die für die Versuche eingestellten Prozessparameter entsprechen, den durch das LZH optimierten und angepassten Werten.

Der Abtragprozess wurde in der Prozesszone unter definierten lufttechnischen Bedingungen durchgeführt. Nach der Erfassung wurde die mit den Rauchen kontaminierte Luft über die Einlaufstrecke einer Messzelle zugeleitet. In dieser findet die isokinetische Probenahme (VDI 2066) statt. Der Absaugvolumenstrom wurde mit Hilfe einer stationären Absaug- und Filtereinheit der Fa. Keller L-Cut Typ 2 mit einem Nennvolumenstrom von 2000-3000 m³/h erzeugt.

Es wurden Versuchsreihen mit Einfachbestimmung für die Aerosole durchgeführt. Die jeweilige Versuchsdauer wurde der Probesammelmedienbeladung angepasst und wurde bei Beginn des Laserprozesses gestartet und bei Beendigung des Prozesses gestoppt. Zur Online-Übersichtsmessung der Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration kam ein Online-Detektor (FID) zum Einsatz. Hierbei wurde die Messzeit über die Bearbeitungsdauer verlängert, um Veränderungen der Konzentration vor, während und nach dem Laserprozess aufzuzeigen. Nach Probenahme auf Planfilter durch das LZH wurde von einem akkreditierten Labor (TÜV Rheinland Energy & Environment GmbH) mit einer entsprechenden instrumentellen Ausstattung die Analyse auf partikelgebundene PAK durchgeführt. Die mittlere eingestellte Luftgeschwindigkeit im Messzellenquerschnitt (Ø 0,1 m) beträgt für alle Versuchsreihen 11 m/s, entsprechend einem Absaugvolumenstrom im Mittel von 310 m³/h bei Raumtemperatur im Rohgas. Mittels eines Testaerosols aus Kohlenwasserstoffen (Textmarker) wurde der Erfassungsgrad bestimmt, so dass von einem Erfassungsgrad der Emissionsprodukte von 95 % bei der Lasermaterialbearbeitung bei nahezu vollständiger Absaugung und effizienter Erfassung ausgegangen werden kann.

Es wurde die Emissionsrate/Quellstärke des Laserprozesses bestimmt und anhand von Berechnungen verifiziert.

Tabelle 1 Emissionsrate pro Bohrung / Werkstoff HexPly M21

Prozessparameter optimiert / Erfassung vollständig	Pyrolysierte Masse mg/Bohrung (berechnet)	Gesamtaerosol (partikelförmig) mg/Bohrung (gemessen)	Organische Gase $C_{ges.}$ mg/Bohrung (gemessen)	Anorganische Gase mg/Bohrung (Rest)
Leitkomponenten		Partikel & Faserbruchstücke	Phenol, Kresole, Aldehyde und Ketone	Kohlenmonoxid & Kohlendioxid
spez. Emissionsrate	2,1	0,0006	0,53	1,6

Dazu wird das Volumen der einzelnen Bohrung mit der Formel für einen Kegelstumpf:

$$V = \frac{h \cdot \pi}{3} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2)$$

mit R= 0,4 mm r= 0,15 mm h= 5,2 mm berechnet und mit der Dichte (1,56 g/cm³ / Angabe des Herstellers) des Laminats HexPly M21 multipliziert. Die so ermittelte gesamte pyrolysierte Masse wird den gemessenen Werten gegenübergestellt.

Ein Vergleich mit den Grenzwerten der TA-Luft ist nicht sinnvoll möglich, da die spezifische Emissionsrate auf die Anzahl Bohrungen bezogen ist. Zur Bestimmung der Quellstärke der Emissionen und Vergleich mit dem Grenzmassenstrom und der Massenkonzentration sind weitere Detailuntersuchungen erforderlich, bei denen der Messstand zur Gewährleistung der Lasersicherheit neu erstellt werden muss.

Die Konzentration der Staubfraktionen wurden in der Prozesskammer gravimetrisch mittels Anreicherung auf Planfiltern bestimmt. Der relative Fehler dabei beträgt 5%.

Tabelle 2 A-/E-Staubfraktion in der Bearbeitungskammer

	A-Fraktion / mg/m³	E-Fraktion / mg/m³
Unvollständige Erfassung	1,02	2,62
Optimierte Laserprozessparameter & vollständige Erfassung	0,69	1,49
ASGW (Allgemeiner Staubgrenzwert)	1,25	10

Der Arbeitsschutzgrenzwert (ASGW) in der Bearbeitungskammer wird bei optimierten Laserprozessparametern und optimierter Erfassung eingehalten.

Der zeitaufgelöste Konzentrationsverlauf der A*-/E**- Staubkonzentration (E-Partikelfraktion = einatembar und A-Partikelfraktion = alveolengängig) und die Gesamtkohlenstoffkonzentration ($C_{ges.}$) wurden ermittelt. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Prozess- und Konzentrationsverlauf (Abbildung 20).

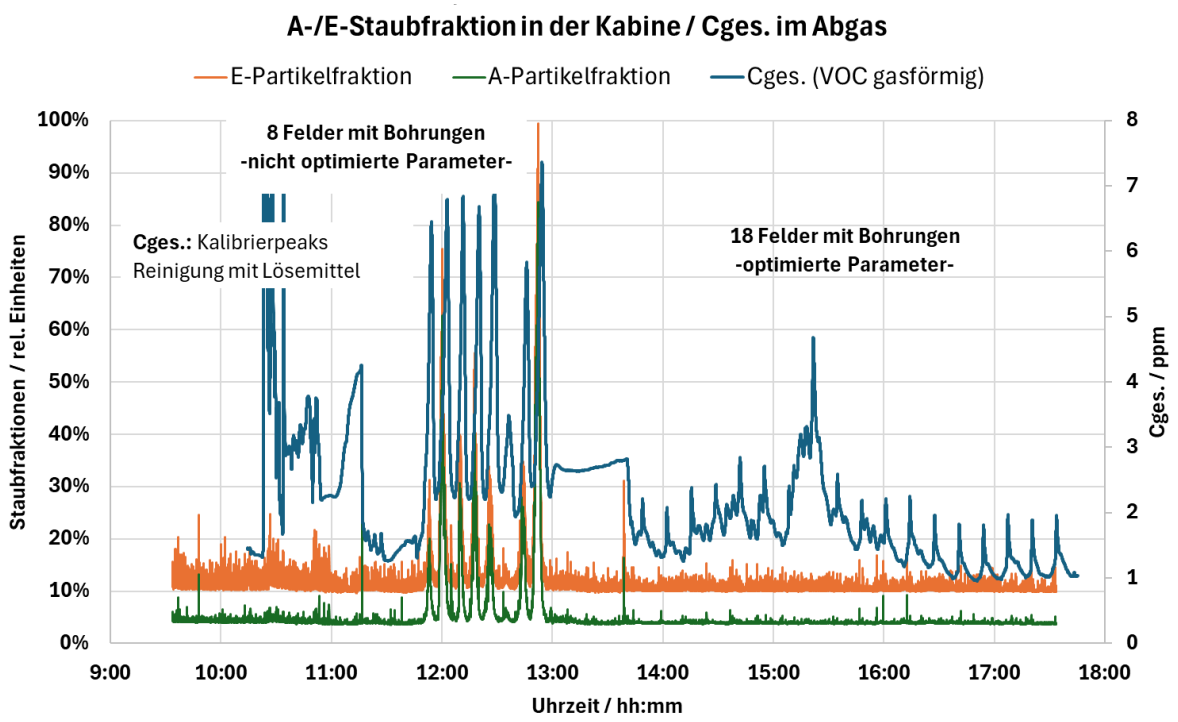

Abbildung 20 Konzentrationsverlauf der A-/E-Staubfraktion und der Cges. Konzentration bei zwei verschiedenen Laserpozess-Parametern

Vor den eigentlichen Versuchen konnte ein Anstieg der $C_{ges.}$ Konzentration auf den Einsatz von Lösemittel zur Reinigung in der Bearbeitungskabine zurückgeführt werden. Aber auch Unregelmäßigkeiten im Prozessverlauf werden bei der Messung der $C_{ges.}$ Konzentration festgestellt. Die Ursache für den Anstieg der Konzentration gegen 15:30 Uhr sind unbekannt, da der Prozess unbeobachtet ablief.

Außerdem wurde die Partikelgrößenverteilung in der Bearbeitungskammer bestimmt (Abbildung 21). Dabei zeigt sich, dass im Fall der optimierten Erfassung im Verhältnis große Partikel (PM10) weniger erfasst werden und in der Bearbeitungskammer verbleiben. Bei der unvollständigen Erfassung verbleiben mehr Partikel < PM4 in der Luft in der Prozesskammer.

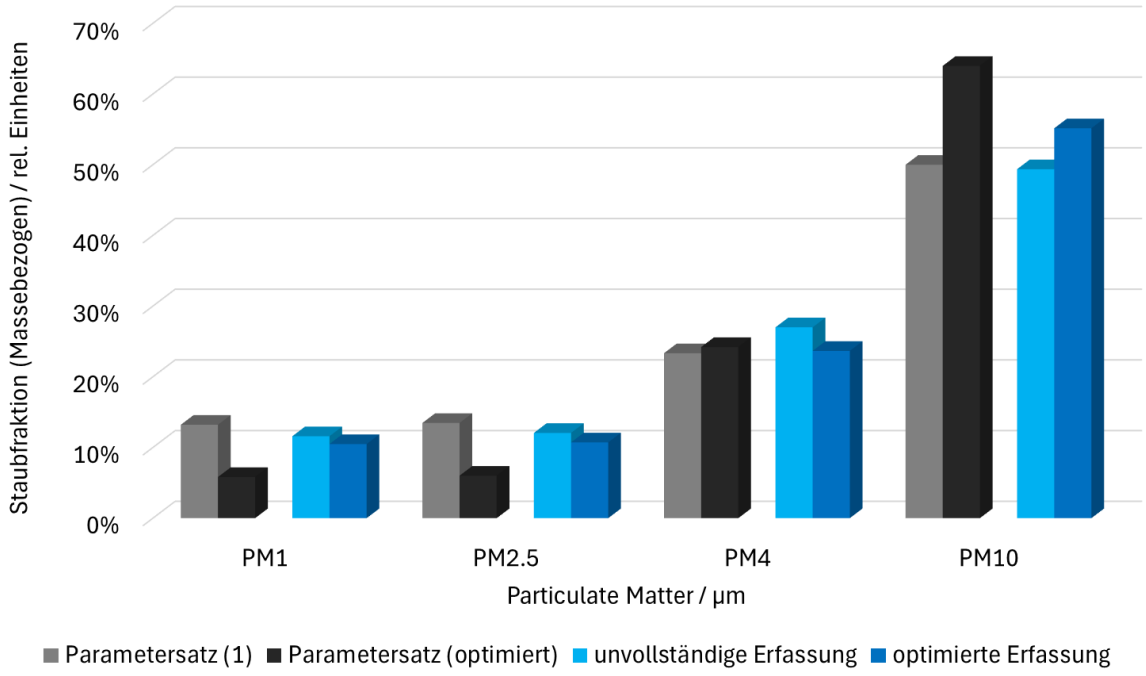

Abbildung 21 Partikel-Größenverteilung bei angepasster Erfassung und optimierten Laser-prozessparametern.

Bei optimierten Prozessparametern für ein bestes Prozessergebnis verschiebt sich das Verhältnis zu den größeren Partikeln (PM10) und es entstehen weniger Partikel der Fraktionen PM1 und PM2,5. Allgemein ist die Partikelgrößenverteilung monomodal mit einem lokalen Maximum bei PM10. Partikel < 1 µm wurden aufgrund der baulichen Gegebenheiten im Versuchsstand (Prozesskammer mit integrierter Messstrecke und Messzelle) nicht bestimmt.

Tabelle 3 Prüfergebnisse der PAK-Analytik, Konzentrationen sind kleiner Bestimmungsgrenze

Probe Nr.		242493/1.	242493/2.	
Probenbezeichnung	**Methode**	**ADM 0**	**ADM 14**	**Einheit**
Naphthalin	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Acenaphthylen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Acenaphthen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Fluoren	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Phenanthren	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Anthracen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Fluoranthen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Pyren	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Benz(a)anthracen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Chrysen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Benzo(b)fluoranthen/ Benzo(j)fluoranthen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Benzo(k)fluoranthen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Benzo(e)pyren	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Benzo(a)pyren	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Dibenz(ah)anthracen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Indenopyren	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.
Benzo(ghi)perylen	IFA 8408[1; PV]	< 0,1	< 0,1	µg abs.

Die Analyse der partikelgebundenen PAK wurde bewertet. Es zeigt sich, dass entgegen der Erwartung, keine PAKs an den Partikel nachgewiesen werden konnten. Aufgrund der geringen Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration (im Mittel < 2 ppm), die mittels FID im Abgas bei optimierten Laserparametern ermittelt wurden, wurde auf weitere Analysen auf organische Substanzen verzichtet.

Folgendes lässt sich aus den Emissionsuntersuchungen als Handlungsempfehlung schlussfolgern: Bei optimierter Erfassung und optimierten Prozessparametern sind die Arbeitsplatzgrenzwerte in der Bearbeitungskammer für die A-/E-Staubfraktion eingehalten. Die Ergebnisse der Analysen dienen damit letztlich der korrekten Auslegung, der an einer Produktionsanlage zu adaptierenden Erfassungs- und Absaugeinrichtungen. Eine Filtration von gasförmigen organischen und anorganischen Gefahrstoffen ist erforderlich. Dieser Filtration ist in der Regel eine Abscheidung von Partikeln vorgeschaltet.

Hauptarbeitspaket 3: Prozesskontrolle & Datenmanagement

Im Rahmen der Entwicklung einer Durchschneidkontrolle in HAP3 wurde eine Software erstellt, welche den Bohrungsfortschritt anhand von Thermografieaufnahmen bewertet (vgl. Abbildung 22). Das Prinzip des Verfahrens basiert auf einer messbaren Temperaturänderung, die bei einer vollständigen Durchbohrung aufgrund der geringeren im Material absorbierten Strahlungsanteile eintritt. Hierfür werden in einer Thermografieaufnahme flexibel und automatisiert alle Bohrungspositionen erkannt. Aus

jeder einzelnen Bohrung wird für jeden Prozessschritt das zentrale Temperaturprofil entnommen und über den Prozessverlauf chronologisch aneinandergereiht und zu *heat(time)maps* verarbeitet. Über eine Kantenerkennung wird eine starke Kontraständerung im Verlauf der *heat(time)maps* erkannt und als Durchbohrung bewertet. Dieses Verfahren erwies sich in den Untersuchungen sowohl für dünne Laminate (AP3.1) als auch für Sandwichwerkstoffe (AP3.2) als effiziente Bewertungsmethode. Herausforderungen treten vor allem bei der Perkussionsbohrbearbeitung von kleinen Bohrungen auf, da der Wärmeeintrag und dessen Veränderung bei Durchbohrung vergleichsweise gering ausfallen und somit auch die Temperaturänderung bzw. der Kontrast im Bildverlauf schwierig zu detektieren sind (vgl. Anhang, Abbildung 23 und Abbildung 24). Das Problem konnte durch die Glättung des Temperaturprofils verringert werden.

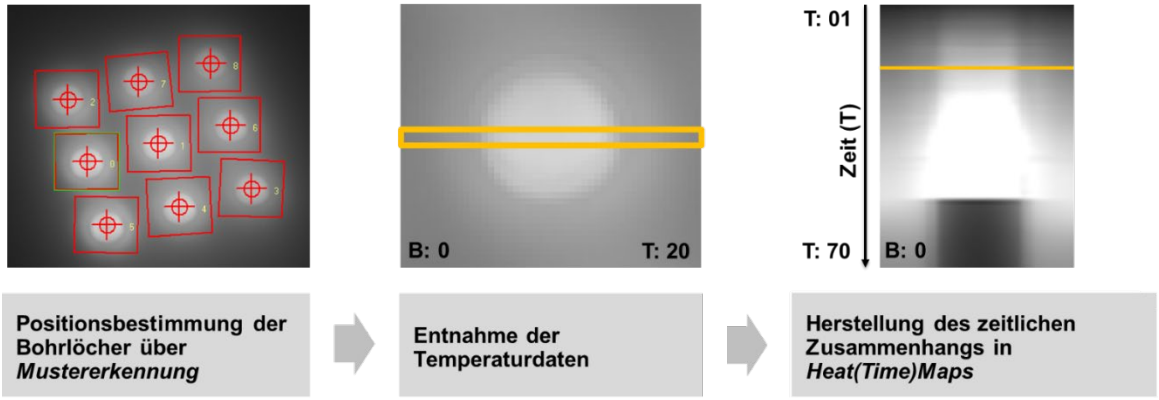

Abbildung 22 Funktionsweise der Durchschneidkontrolle basierend auf Thermografie.

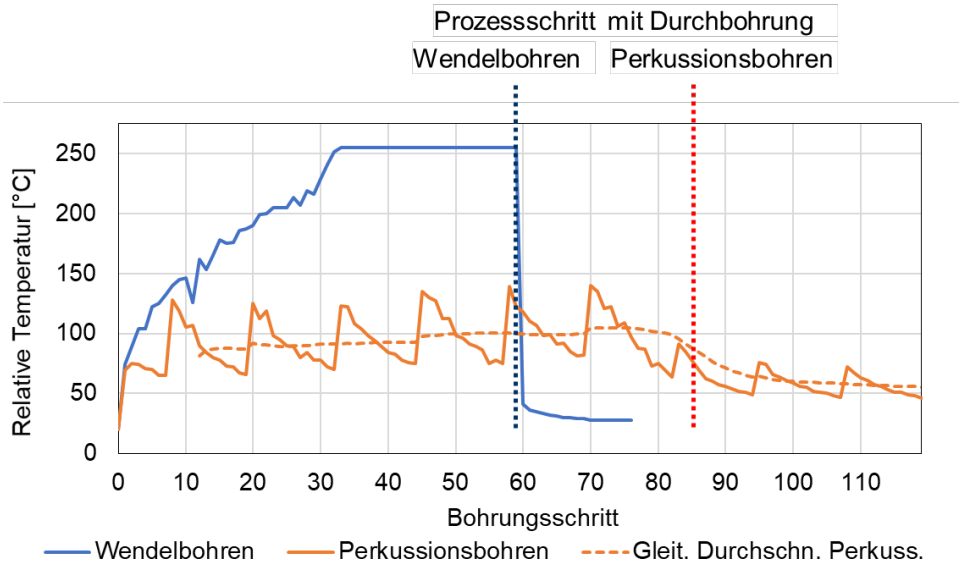

Abbildung 23 Temperaturverläufe während des Prozesses beim Wendelbohren und Perkussionsbohren.

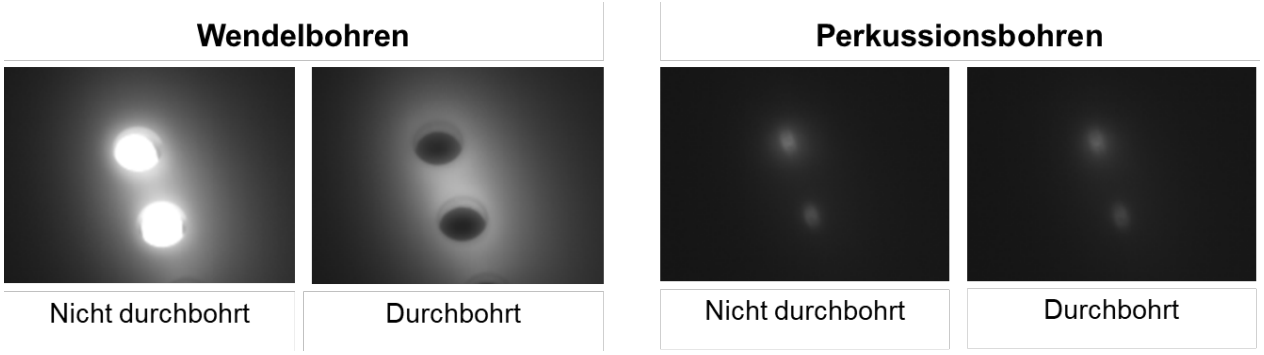

Abbildung 24 Thermografieaufnahmen aus einem Wendelbohrprozess und einem Perkussionsbohrprozess jeweils in nicht durchbohrtem und durchbohrtem Zustand zur Verdeutlichung der Kontrastproblematik.

Neben der auf Thermographie basierenden Durchschneidkontrolle wurde in Zusammenarbeit mit KMS ein weiteres Verfahren evaluiert, das auf der Durchleuchtung von perforierten oder geschnittenen Strukturen basiert. Der grundlegende Versuchsaufbau ist in Abbildung 25a dargestellt und beinhaltet eine Beleuchtungsquelle auf der einen Seite der Probe und ein Kamerasystem auf der gegenüberliegenden Seite. Sobald die Probe durchschnitten oder durchbohrt ist wird die Strahlung der Beleuchtungsquelle von der Kamera erfasst Abbildung 25b. Auf diese Art konnten abhängig von der Entfernung der Kamera von der Probe Strukturen ab 0,1mm über die veränderte Bildintensität erfasst werden, wie in Abbildung 25 am Beispiel eines kleinen Steges, welcher in einer Schnittfuge verblieben ist, gezeigt wird. Diese Durchschneidkontrolle ist im Vergleich zur thermografiebasierten Variante zwar kostengünstiger und einfacher im Aufbau, lässt sich aber aufgrund ihres Funktionsprinzips nur bei rückseitiger Zugänglichkeit nutzen. An dieser Stelle ist die thermografiebasierte Variante wesentlich flexibler, da sie sowohl für dünne Laminate als auch für Sandwichmaterialien ohne Zugang auf der Rückseite genutzt werden kann. Die so entwickelte Durchschneidkontrolle wurde in die Steuerungssoftware eingebunden.

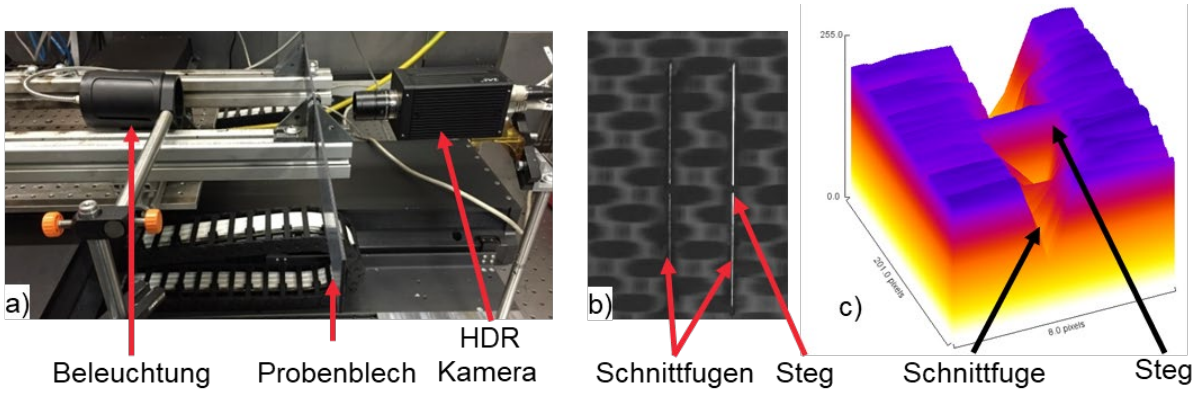

Abbildung 25 a) Aufbau zur Untersuchung einer Durchschneidkontrolle mittels rückseitiger Durchleuchtung, b) durchleuchtete Probe mit Laserschnittfugen und kleinem Steg, c) vergrößerter Surface-Plot der durchleuchteten Probe mit Steg.

Hauptarbeitspaket 4: Qualitätsmanagement & Bauteilprüfung

Innerhalb des HAP 4 erfolgte vornehmlich die Anfertigung von Probekörpern für Untersuchungen zur mechanischen Festigkeit und zur Kontamination innerhalb der Wabenkörper. Diese Probekörper wurden mit Parametern angefertigt, welche in der vorangegangenen Prozessentwicklung in HAP2 und der Optimierung in HAP4 als vorteilhaft identifiziert wurden. Für die Kontaminationsproben wurde ein Probendesign entwickelt, welches eine Sandwichprobe umfasst, an der das rückseitige Facesheet entfällt. Anstelle des Facesheets wird eine Glasscheibe angebracht, die entfernbar ist und eine spätere visuelle und analytische Inspektion erlaubt. Entsprechende Probekörper sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt.

Um die Effizienz durch parallelisierte Bohrbearbeitung weiter zu steigern, wurden neue diffraktive optische Elemente ausgelegt und beschafft. Hierfür wurde im Simulationsmodell, welches in HAP2 aufgebaut wurde, die maximal mögliche Strahlteilung ermittelt, mit der eine bestimmte, für die Bohrbearbeitung ideale Fluenz eingehalten werden kann. Gleichzeitig musste anhand der Simulation sichergestellt werden, dass der divergierende, aufgeteilte Laserstrahl in keinem Bereich des optischen Aufbaus durch zu enge Durchgänge (Aperturen) oder zu kleine Spiegelflächen abgeschnitten wird. In der Auslegung wurden eine 4x4 und eine 5x5-Strahlteilung als passende Aufteilung identifiziert.

Mithilfe des 5x5 DOEs wurde zur Optimierung des Bohrprozesses ein Array aus insgesamt 30x30 Bohrungen auf 1,2mm dickem CFK bearbeitet. Das 5x5 Bohrungsmuster wurde dabei in einem Raster von 6x6 Feldern durch den Scanner repositioniert. Für die Anfertigung der so entstehenden 900 Bohrungen in einem Prozessschritt wurde durch die Anlagensteuerung eine Gesamtdauer von 87s aufgezeichnet, was einer Bohrdauer von <100ms pro Bohrung entspricht. Diese Gesamtdauer beinhaltet neben der reinen Bohrbearbeitung auch die voreingestellte Abkühlphasen zwischen den Wiederholungsschritten, die Berechnung aller Parameter vor dem Prozess, die Fokuspositionierung, Aktivierung/Deaktivierung von Gasen und weitere Schritte, welche die Anlage in Betriebsbereitschaft versetzen.

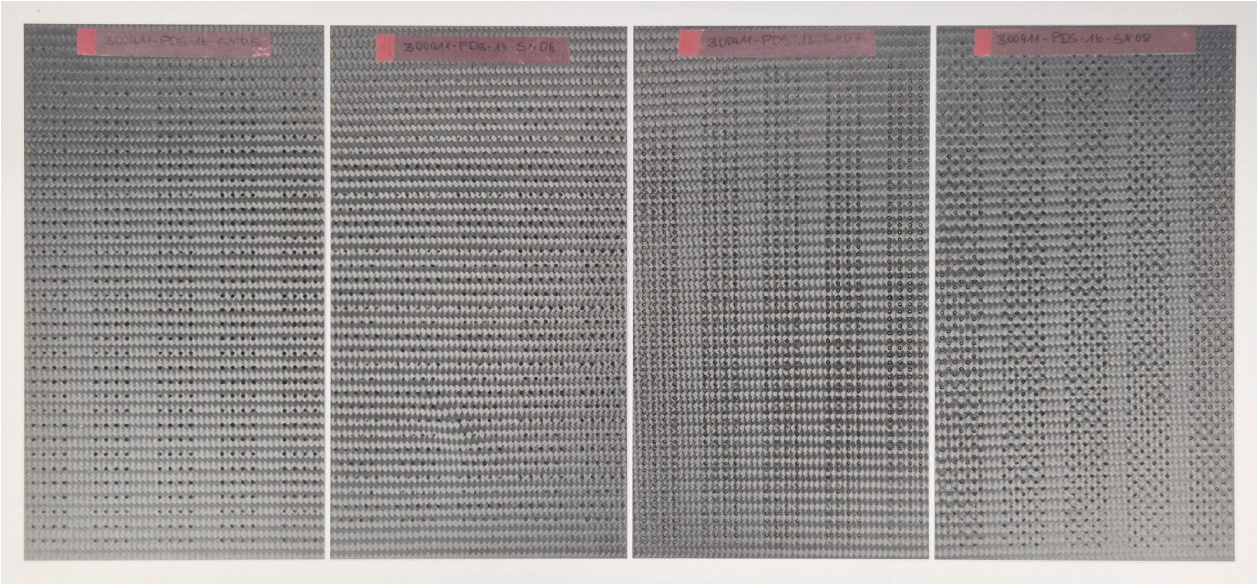

Abbildung 26 Am LZH angefertigte Probekörper für mechanische Versuche.

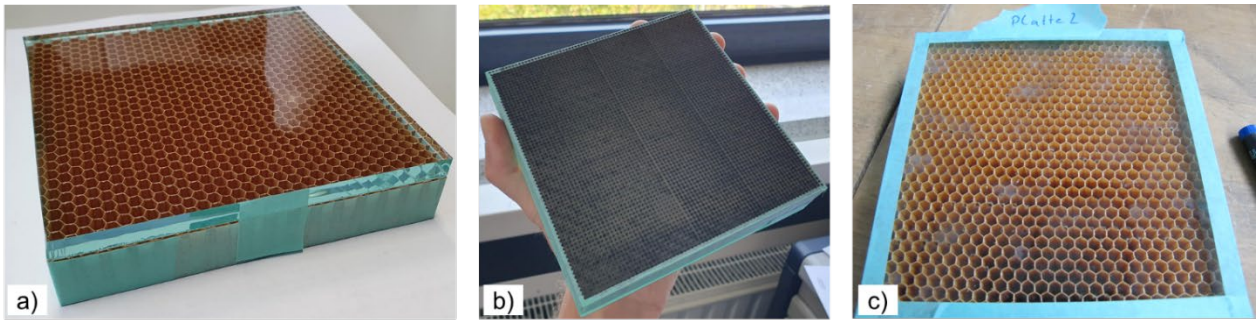

Abbildung 27 Auf der Rückseite mit Glasplatte verschlossener Sandwich-Probekörper für Kontaminationsversuche: a) Rückseite vor Bearbeitung, b) Vorderseite nach Bohrbearbeitung, c) Rückseite nach Bohrbearbeitung.

Hauptarbeitspaket 5: Prozesshardware & Demonstration

Im Rahmen der Entwicklung und des Baus eines Detektors zur Bestimmung der korrekten DOE-Abbildung in AP5.2 wurden nach Abstimmung mit KMS bezüglich Methodik und der Randbedingungen Ergänzungen am Simulationsmodell durchgeführt, um die optimale Einbauposition zu ermitteln sowie die notwendigen Spezifikationen für optomechanische und optische Komponenten zu ermitteln. Als optimale Einbauposition wurde der Bereich hinter dem letzten Umlenkspiegel identifiziert. An diesem Umlenkspiegel wird ein geringer Teil der Strahlung (<0,2%) transmittiert, sodass dieser Anteil nach weiterer

Abschwächung der Intensität durch Filter und einer zusätzlichen Strahlformung durch pcx-Linsen am CCD-Sensor detektiert werden kann (Abbildung 28). An dieser Position des optischen Pfades hat der Laserstrahl den Bearbeitungskopf und damit die Strahlteilung durch den DOE, nachgelagerte Optiken zur Strahlformung und den größtmöglichen Teil der Strahlführung durchlaufen. Damit kann ein Großteil der Komponenten die als Einflussursache für Veränderungen am Strahlprofil infrage kommen abgedeckt werden. Die Aufnahmen werden zur Auswertung des Intensitätsprofils herangezogen, da die Intensitätswerte der Laserstrahlung mit den Graustufen der Abbildung korrelieren (helle Bereiche = hohe Strahlungsintensität) und einen Rückschluss auf die einfallende Energiemenge, die Energieverteilung zwischen den Teilstrahlen und innerhalb der einzelnen Spots erlaubt. Zur besseren Sichtbarkeit und Interpretation werden die Aufnahmen in Abbildung 29 neben einem invertierten Graustufenbild (Bildnegativ) zusätzlich als Surfaceplot dargestellt. In Abbildung 29 a wird die DOE-Abbildung direkt nach dem Einbau des DOE und der optischen Komponenten gezeigt. Es sind deutliche Unterschiede in der Peakhöhe (und damit der Energiemenge) zwischen den vier Einzelspots zu erkennen. Zudem sind im Randbereich der einzelnen Spots Verzeichnungen zu erkennen, die auf eine ungleichmäßige Energieverteilung schließen lassen. Da die optischen Komponenten im Bearbeitungskopf neben ihrer Positionierung in X-Y-Z-Richtung entlang der Strahlachse auch durch eine Verkippung in Bezug auf die Strahlachse einen großen Effekt auf die Energieverteilung haben, muss mit jedem neuen DOE eine aufwändige Justageprozedur durchlaufen werden. Das Ergebnis eines justierten Strahlweges ist in Abbildung 29 b gezeigt. Hier sind die Verzeichnungen verringert und die Intensitätspeaks weitestgehend gleich stark ausgeprägt. Im Rahmen der Projektverlängerung erfolgte im letzten Schritt die Programmierung und Einbindung einer (Teil-) Automatisierten DOE-Bewertung im Steuerungsprogramm, sodass die DOE-Abbildung vor Bearbeitungsstart auf ihre Gleichmäßigkeit überprüft werden kann.

In HAP5 erfolgte die Integration des von KMS und INVENT entwickelten und aufgebauten Bearbeitungskopfes am Versuchsstand im LZH. Die Einbauposition des Bearbeitungskopfes entspricht dabei der Position des vorigen Laboraufbaus. Der aktuelle Aufbau mit Bearbeitungskopf ist in Abbildung 30 dargestellt. Der Bearbeitungskopf wurde durch das LZH mit optischen Komponenten erweitert und im Anschluss mit hohem Arbeitsaufwand justiert. Darüber hinaus wurden die Stellmotoren für die optischen Komponenten mit hohem Programmieraufwand durch das LZH in die Steuerungssoftware integriert.

In Abstimmung mit dem Konsortium erfolgte eine Konzeptänderung vom bewegten Bearbeitungskopf hin zu einem feststehenden Bearbeitungskopf und bewegter Bauteilhalterung und Bauteil, um die herausragenden Spezifikationen des Freistrahl-Lasersystems für die Bohrbearbeitung nutzbar zu machen und eine hohe Effizienz des

Bohrprozesses zu erreichen. Zu diesem Zweck erfolgten am LZH Programmiertätigkeiten zur Kommunikation zwischen eigener Steuerungssoftware und dem Roboter, damit Bewegungsdaten direkt an die Robotersteuerung übermittelt werden können. Zudem wurde das Koordinatensystem des Roboters auf das Koordinatensystem eines feststehenden Werkzeuges (= im Raum feststehender Laserspot) und einem bewegten dreidimensionalen Bauteil am Roboterendeffektor angelernt. Der dafür verwendete Aufbau ist in Abbildung 31 dargestellt. Anstelle des nicht sichtbaren, frei im Raum unter dem Scannersystem liegenden Laserspots wurde zur Einstellung der Koordinatensysteme ein schwebend aufgehängter Metallstift als Indikator genutzt. Die von KMS entwickelte Halterung für gekrümmte Bauteile wurde am Roboterendeffektor montiert. Durch das Anlernen aufeinander abgestimmter Koordinatensysteme kann das Bauteil nunmehr in Bezug auf das Koordinatensystem des Laserspots und des Scannersystems definiert bewegt werden. Zuletzt wurde die Programmierung der Bewegung in Bezug auf das Koordinatensystem und die Bauteilkrümmung so aufeinander abgestimmt, dass der Laserstrahl bei Verfahrbewegungen unter dem Scannerfeld stets orthogonal zur gekrümmten Bauteiloberfläche steht und gleichzeitig der Fokusabstand exakt eingehalten wird. Mithilfe der finalen Programmierung wurde in der finalen Projektphase ein gekrümmtes Sandwichbauteil mit Mikrobohrungen versehen (Abbildung 32).

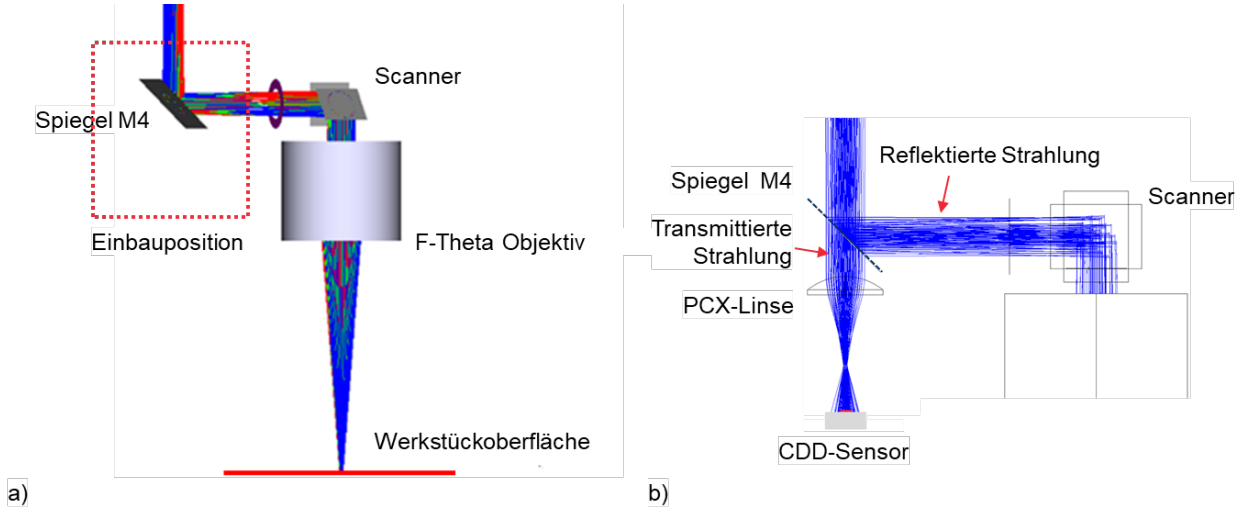

Abbildung 28 Nachbildung des optischen Aufbaus zur Überprüfung der korrekten DOE-Abbildung im Simulationsprogramm ZEMAX; a) Einbauposition im Gesamtkontext, b) Detailansicht mit transmittierten und reflektierten Strahlwegen.

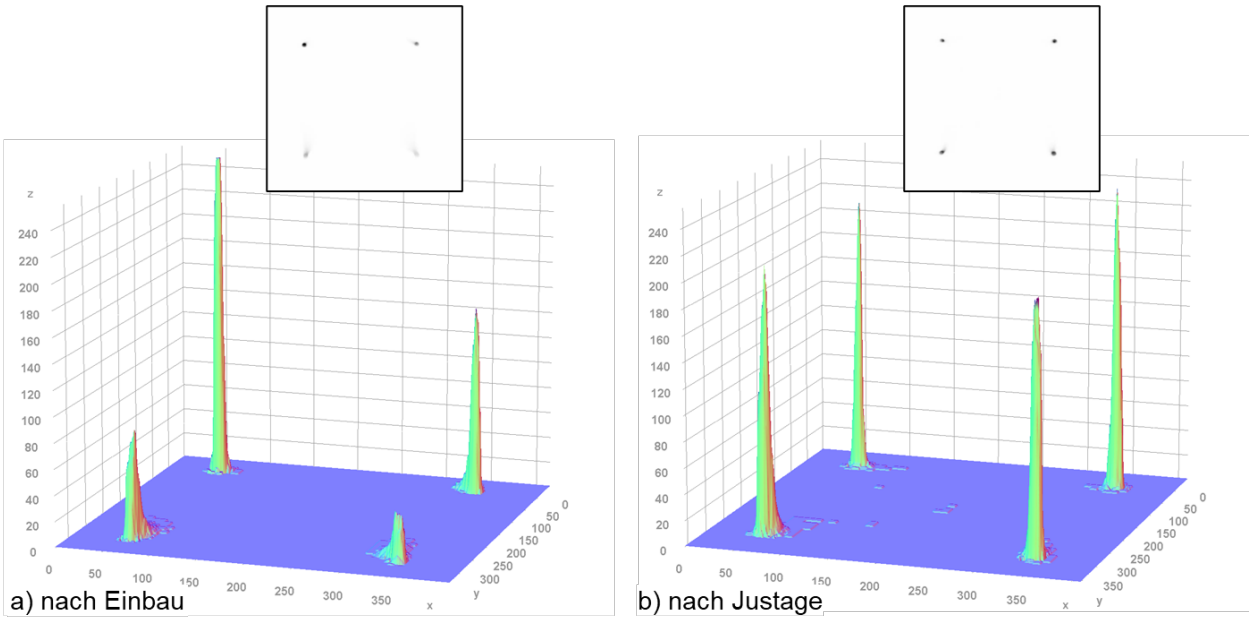

Abbildung 29 Aufnahme (Negativbild) der DOE-Abbildung und zugehöriger Surfaceplot der Aufnahme mit erkennbaren Intensitätslevels der Einzelspots a) nach Einbau des DOEs ohne Justage, b) nach vollständiger Justage des optischen Pfades.

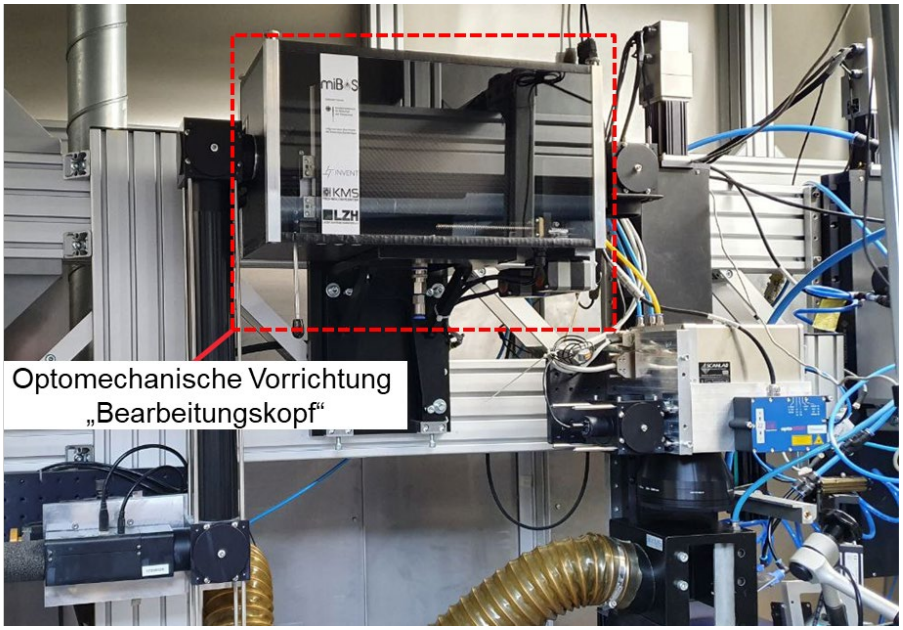

Abbildung 30 Anstelle der Laboranlage in den Anlagenaufbau integrierte optomechanische Vorrichtung mit motorisierten Linsen und DOE-Wechseleinheit.

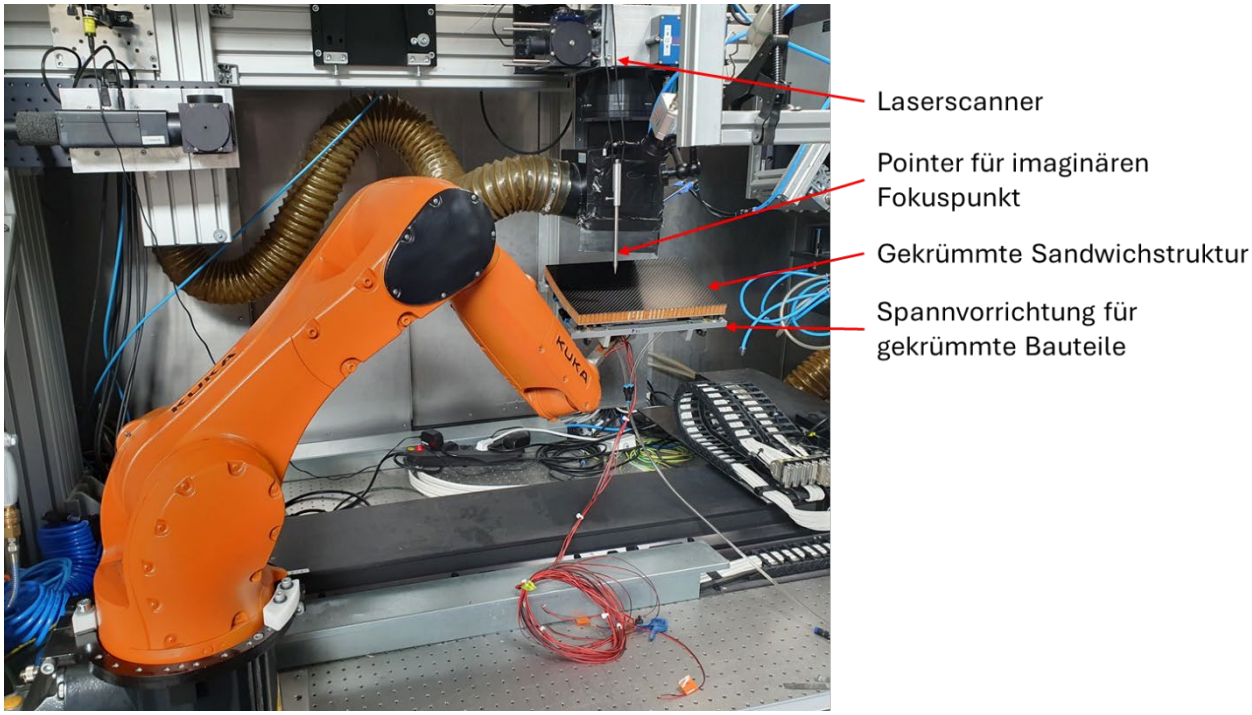

Abbildung 31 In Anlage integrierter Roboterarm mit Spannvorrichtung und gekrümmtem Bauteil.

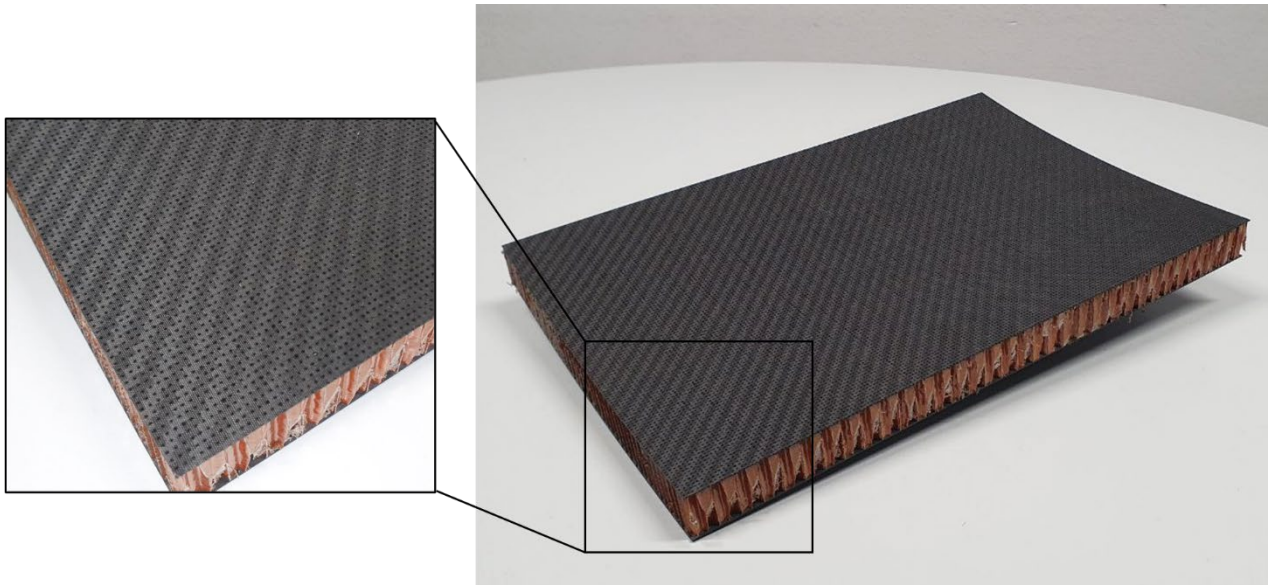

Abbildung 32 Gebohrtes gekrümmtes Demonstratorbauteil.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen im zahlenmäßigen Nachweis sind der im Rahmen des Projektes entwickelten Steuerungs- und Überwachungstechnik zuzuordnen. Dies beinhaltet die Beschaffung der Programmierungssoftware zur Anlagensteuerung und zur Datenaufnahme sowie Datenverarbeitung. Zudem wurden Softwarepakete beschafft, welche die Kommunikation des Roboters mit der Steuerungssoftware ermöglicht, damit die Roboterbewegung mit direkten externen Bewegungsbefehlen ausgeführt werden kann. Für den Aufbau der Durchschneidkontrolle und zur Einhaltung von Temperaturgrenzwerten wurde eine Thermografiekamera angeschafft.

Die Reisekosten stellen einen weiteren wichtigen Punkt im zahlenmäßigen Nachweis dar. Durch die Reisen wurde unter anderem die Teilnahme an Arbeits- und Projekttreffen ermöglicht, auf denen Abstimmungsmaßnahmen zwischen den einzelnen Projektpartnern durchgeführt worden sind. Darüber hinaus wurden die Projekttreffen genutzt, um sich gegenseitig über den aktuellen Stand und die neusten Ergebnisse der Projektpartner zu informieren. Zusätzlich wurde der Austausch von Probenmaterial durch die Projekttreffen erleichtert. Darüber hinaus ermöglichte der Besuch einer führenden Laserkonferenz eine weitreichende Verbreitung der Forschungsergebnisse und führte zu neuen Kontakten.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Das Erreichen der geplanten Projektziele wurde erst durch die Förderung des Forschungsvorhabens durch Beihilfen für FuEuI ermöglicht. Durch die Forschungsförderung wurde es möglich, grundlegende Untersuchungen zu Bearbeitungsstrategien zum Mikrobohren zu erforschen und durch die Anpassung und Optimierung der Prozessführung die Prozesseffizienz auf ein industriell nutzbares Niveau zu heben. Nur durch die enge Zusammenarbeit mit dem Projektpartner konnten diese Ergebnisse erzielt werden. Ohne die Zuwendungen des Förderträgers hätte das LZH als eingetragener Verein die aufgeführten Ergebnisse nicht erbringen können. Die im Projekt entwickelten Bohrstrategien, Prozessbeobachtungs- und Regelungsmaßnahmen sowie die Integration von Überwachungs- und Positioniertechnik in eine umfassende Steuerungssoftware ermöglichen die künftige Nutzung des Lasermikrobohrens als effiziente und industrietaugliche Bearbeitungsmethode von Sandwichwerkstoffen. Durch die Aufstockung konnten zudem komplexe Programmierproblematiken bei der Einbindung des Roboter und eine für den Arbeitsschutz sehr wichtige Emissionscharakterisierung während der Laserbearbeitung in realer Anlagenumgebung durchgeführt werden.

9 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Rahmen des Projektes miBoS wurde ein Grundstein für die künftige Nutzung des Lasermikrobohrens von Sandwich oder Verbundwerkstoffen in industrieller Anwendung gelegt. Zudem wurde ein umfassender Nachweis zur Bearbeitungsqualität und späteren Bauteilfestigkeit geführt. Das LZH hat durch das Projekt die Kenntnisse im Bereich der Laserbearbeitung, der Automatisierung und Prozessführung aber auch im Bereich der Emissionscharakterisierung signifikant ausgebaut. Dieses Wissen wird in Zukunft insbesondere über die Verbindungen des LZH in Fachvereinigungen wie dem Composites United e.V. oder der AVK–Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. aber auch durch die Darstellung auf Messen und Konferenzen weiterverbreitet. Durch diese Kontakte können neue Industriekooperationen in der Luftfahrtindustrie initiiert werden. Darüber hinaus werden die Ergebnisse aus dem Projekt und die damit verbundenen Erkenntnisse zur Bildung weiterer Kooperationen und zur Entwicklung nachfolgender Forschungsprojekte auf nationaler und internationaler Ebene genutzt.

10 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Ein Fortschritt auf dem Gebiet des Lasermikrobohrens von Sandwichmaterialien bei anderen Stellen ist nicht bekannt geworden.

11 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Zusätzlich zur Präsentation im Rahmen von Veranstaltungen mit dem Schwerpunkt Photonik, z. B. Lasermesse – World of Photonics 2023 und Lasys 2022, erfolgte eine Vermarktung des Projektes und von Projektergebnissen insbesondere auf folgenden Veranstaltungen in Form eines eigenen Messauftrittes durch das Laser Zentrum Hannover e.V.:

1. International Conference and Exhibition on Thermoplastic Composites – ITHEC, Bremen, 12.-13.10.2022 und 09.-10.10.2024
2. Hannover Messe 17.-21.4.2023
3. Niedersachsen Aviation Day, Hildesheim, 07.09.2023 und 05.09.2024
4. Jahresnetzwerktreffen Niedersachsen Aviation, Brauschweig am 15.12.2022, Stade am 04.12.2023, Teilnahme am 16.12.2024 in Bremen bereits zugesagt.

Folgende Publikationen wurden auf Basis von Projektergebnissen generiert oder hatten Projektergebnisse zum Inhalt:

1. Verena Wippo, Richard Staehr, Hagen Dittmar, Julian Kuklik, Jan Keuntje, Peter Jaeschke, Stefan Kaierle, Development of innovative laser based processes for the aerospace industry. LASER PROCESSING FOR INDUSTRY - CONFERENCE. Rennes France. 2023
2. R. Staehr, M. Henzler, V. Wippo, P. Jaeschke, S. Kaierle, L. Overmeyer, "Thermal process control for laser micro-drilling of thin CFRP-laminates," Proc. SPIE 11994, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems XI, 1199407 (4 March 2022); doi: 10.1117/12.2607494
3. R. Staehr, V. Wippo, P. Jaeschke, S. Kaierle; Laser microdrilling of CFRP with a nanosecond-pulsed high-power laser. J. Laser Appl. 1 November 2022; 34 (4): 042028. https://doi.org/10.2351/7.0000809
4. R. Staehr; Advanced Laser Micro and Macro Drilling of CFRP for Aerospace Applications, 23rd International Conference on Composite Materials, Belfast, July 30 - August 4, 2023
5. R. Staehr, V. Wippo, P. Jaeschke, S. Kaierle, "Thermal evaluation of a laser microdrilling process for thin CFRP-laminates," Proc. SPIE 12878, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems XIII, 128780H (12 March 2024); https://doi.org/10.1117/12.3001372
6. Stähr, R.; Sommer, L.: Mikrobohren mit dem Laser: Schnell, präzise und verschleißfrei. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 43 / Juni 2024, ISSN: 2198-1922. DOI: https://doi.org/10.48811/phi-24-005.