Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12

Automatisiertes einbringen metallischer Inserts im roboterbasierten hybriden Fertigungsprozess

Insert-Einbringung für die hybride Fertigung

T. Herrmann, M. Paes

ZUSAMMENFASSUNG Dieser Beitrag befasst sich mit der Entwicklung einer Vorrichtung, mit der eine Standard-Fräsmaschine metallische Gewindeeinsätze (vollautomatisiert) in beliebige Bauteile einsetzen kann. Dabei werden zunächst Voruntersuchungen für Prozessparameter angestellt, gefolgt von der systematischen Entwicklung der Vorrichtung. Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Validierung und dabei durchgeführten Versuchen zur Festigkeit der erzielten Verbindungen.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Automatisierung, Fügetechnik

Insert processing for hybrid manufacturing – Automatic processing of metallic inserts in robot-based hybrid manufacturing

ABSTRACT This article deals with the development of a device which helps a standard milling machine to insert metallic thread inserts (fully automated) into any components. First, there are preliminary investigations for process parameters carried out, followed by the systematic development of the device. The work concludes with the validation and with tests on the strength of the connections achieved.

1 Motivation

Die Fertigung in Deutschland und im europäischen Raum befindet sich im ständigen Wandel. Starre Prozesse der Massenfertigung werden dabei abgelöst durch flexible Fertigungssysteme, auf denen nicht mehr immer gleiche, sondern (teil-)individualisierte, spezifisch auf den Kundenwunsch angepasste Produkte hergestellt werden [1]. Mit diesem Wandel der Endprodukte und der sie erzeugenden Fertigungssysteme entstehen gleichzeitig neue Anforderungen an die Anpassbarkeit und Modularisierbarkeit dieser Systeme. So ist es nicht mehr akzeptabel, dass individuelle Fertigungsvorrichtungen mehrere Wochen von der Konstruktion, Umsetzung und Optimierung bis hin zum Einsatz benötigen [2]. Vorrichtungen müssen schnell hergestellt werden können und dabei anpassbar, verschleißfest und mit Blick auf zukünftige Gesetzgebung auch möglichst klimaneutral und recyclefähig sein [3].

Eine aktuelle Möglichkeit, diese Flexibilität zu erhalten, ist die hybride Fertigung. Dabei werden die Vorrichtungen mit einem großformatigen, additiven Fertigungsverfahren gedruckt und dann zerspanend nachbearbeitet. Dies bietet zum einen den Vorteil, nur dort Material aufzutragen, wo dies benötigt wird, und zum anderen den Vorteil, die benötigten Toleranzen und Oberflächengüten durch die spanende Nachbearbeitung erreichen zu können.

Ein Problem dabei ist, dass es noch keine Möglichkeit gibt, in einem vollautomatisierten Prozessablauf verschleißfeste semipermanente Verbindungen in die Bauteile einzubringen. Bisherige Prozesse setzen auf manuelle Intervention durch den Bediener oder auf maschinenspezifisch angepasste Vorrichtungen, die nicht ohne weiteres auf andere Maschinen übertragen werden können.

Um dieses Problem zu lösen, wird im Folgenden die Entwicklung einer Vorrichtung aufgezeigt, mit der es maschinenunabhängig möglich sein wird, verschleißfeste Gewinde in hybrid gefertigte Bauteile einzubringen.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt, was unter großformatiger, additiver Fertigung zu verstehen ist. Es wird auf zwei im Rahmen der Entwicklung verwendete Kunststoffe und deren Eigenschaften eingegangen. Abgeschlossen wird mit einem Überblick über momentan verwendete Verfahren zur Gewindefertigung und deren Vor- und Nachteile.

2.1 Großformatige, additive Fertigung

Die additive Fertigung hat sich in den letzten Jahren sukzessive im Maschinenbau etabliert. Sie bietet das Potenzial, Bauteile, welche schwer und langwierig zu fertigen sind, vergleichsweise kurzfristig bereitzustellen. Zudem ist die additive Fertigung materialeffizient und damit kostengünstiger als andere Herstellungsverfahren im Maschinenbau. Die additiven Fertigungsverfahren gehören zur Gruppe der urformenden Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [4]. Wie **Bild 1** zeigt, zählt dieses Fertigungsverfahren zur Untergruppe Strangpressen (Extrudieren).

Der Überbegriff additive Fertigung beschreibt jene Technologien, die als 3D-Druck bezeichnet werden. Dabei werden Bauteile durch das schichtweise Auftragen von Material hergestellt. Die Maschinenbefehle zur Fertigung der Bauteile werden durch eine Software, den Slicer, generiert. Der Slicer erstellt aus einem 3D-Modell den entsprechenden G-Code, der die Verfahr-Befehle

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

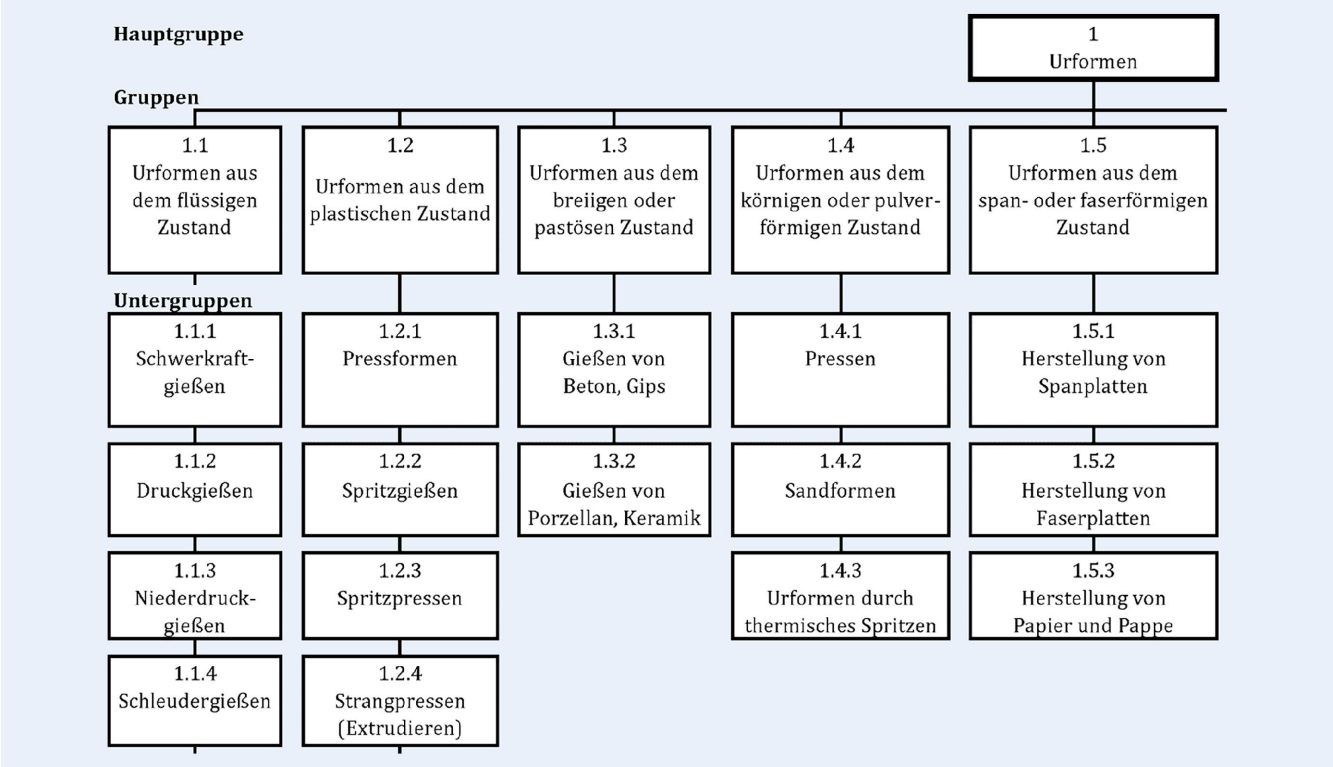

Bild 1. Ausschnitt der Fertigungsverfahren nach DIN 8580. *Grafik: [4]*

an die Maschine beschreibt. Bei den Extrusionsverfahren wird das Grundmaterial, welches in Staub-, Granulat-, und Strangform vorliegt, aufgeschmolzen und auf einer Druckplatte schichtweise aufgetragen (siehe unten Bild 2.2). Durch den schichtweisen Aufbau ist es möglich, Strukturen und Formen zu fertigen, die mit konventionellen Verfahren nicht herzustellen wären. Zudem kann materialsparend gearbeitet werden, was zu geringerem Gewicht führt. Negative Aspekte sind hingegen die hohen Toleranzen und die schlechte Oberflächengüte.

Großformatige, additive Fertigung beschreibt Anlagen, welche eine Material-Austragsrate von über 2 kg/h aufweisen und Bauvolumen von teils mehreren Kubikmetern ermöglichen [5]. Im Vergleich besitzen übliche Fused Layer Modelling (FLM)-Desktop-Drucker eine Material-Austragsrate von < 0,1 kg/h [6] und ein Bauvolumen < 0,1 m^3 [7]. In der großformatigen, additiven Fertigung mittels Extrusion sind häufig verwendete Bezeichnungen, die teils für spezifische Prozessvarianten stehen: Screw Extrusion Additive Manufacturing (SEAM), Large Format Additive Manufacturing (LFAM), Big Area Additive Manufacturing (BAAM) und Large Scale Additive Manufacturing (LSAM).

2.2 Verwendete Materialien

In der additiven Fertigung mittels SEAM werden, wie auch beim FLM-Druck, thermoplastische Polymere verwendet. Diese sind bevorzugt faserverstärkt mit 30–40 % Faseranteil ausgeführt, da die Faserverstärkung aufgrund der Änderung des Schwindungsverhaltens längs und quer zur Faserrichtung den Verzug des Bauteils im Druckprozess verhindert [8]. Auch sind die besseren mechanischen Eigenschaften wie höhere Zugfestigkeit und höhere Biegesteifigkeit des Materials für die späteren Bauteile vorteilhaft und erlauben es, Material und damit Gewicht einzusparen [9].

Dennoch gibt es bei diesen Materialien Herausforderungen in Verbindung mit ihrer additiven Verarbeitung . So sind sie im Vergleich zu metallischen Bauteilen wenig verschleißfest und besitzen aufgrund des Herstellungsprozess stark anisotrope Eigenschaften. So variieren Zugfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit und auch Oberflächenrauheit je nach Bauteilausrichtung teilweise um mehr als 50 % [10]. Auch bedeutet eine verringerte Verzugsneigung nicht zwangsläufig, dass es keinerlei Bauteilverzug im Druckprozess gibt. Somit ist es sinnvoll, übergroße Bauteile nachträglich aus mehreren Einzelkomponenten zusammenzusetzen, auch um bei Prozessfehlern eine geringere Menge an Materialausschuss zu erhalten. Bisher verwendete Methoden wie etwa Kleben sind aber unzureichend und benötigen viele manuelle Prozessschritte [11]. Auch bereiten Klebstoffe aufgrund der Einbringung von Fremdmaterialien, die sich beim Recycling ähnlich wie das Basismaterial verhalten und somit nur sehr schwer trennbar sind, große Probleme in einer klimaneutralen, automatisierten Prozesskette [12]. Der folgende Abschnitt geht daher auf Möglichkeiten ein, wie (semi-)permanente Verbindungen in faserverstärkten Kunststoff (FVK)-Thermoplastbauteilen mittels Gewinde hergestellt werden können.

Zwei Materialien kamen zur Anwendung: Zum einen „Colofabb XT-CF20“ mit einem Schmelzpunkt von 235–255 °C [13], um für die Vorversuche Testbauteile im FDM-Verfahren herzustellen. „Akromid B3 ICF 40 schwarz“ wurde zur abschließenden Validierung mit einem Schmelzpunkt von 220 °C [14] verwendet.

2.3 Innengewindefertigung in der additiven Fertigung

Dieser Abschnitt präsentiert drei Verfahren, die sich generell für die Fertigung von Innengewinden eignen, um thermoplastische Bauteile (semi-)permanent miteinander zu verbinden.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

2.3.1 Direktdrucken von Gewinden

Hier wird die Gewindeform beim Druckprozess direkt in das Bauteil miteingearbeitet. Dies benötigt Fertigungsgenauigkeiten bei Strangbreiten und Schichthöhen, welche deutlich kleiner sind als das herzustellende Gewinde. Ein M6-Gewinde ist beispielsweise im Direktdruck herstellbar bei 0,4 mm Strangbreite und 0,09 mm Schichthöhe [15]. Mit den üblichen Prozessparametern beim SEAM mit 5 mm Strangbreite und 1 mm Schichthöhe können erst Gewindegrößen ab etwa M36 gefertigt werden. Daher scheidet diese Methode für die großformatige, additive Fertigung aus.

2.3.2 Konventionelles Gewindeschneiden

Hierbei wird das Bauteil zunächst gedruckt und anschließend werden an den gewünschten Stellen passende Kernlöcher durch Bohren eingebracht, in welche dann mit einem Gewindeschneider die Gewindeform eingeschnitten wird. Kernlochgrößen sind dem Tabellenbuch Metall zu entnehmen [16]. Bei Fräsmaschinen mit Hochgeschwindigkeitsspindel kommen meist Gewindewirbler anstelle von Gewindeschneidern zum Einsatz. Vorteil dieser Methodik ist der Verzicht auf sämtliche Zusatzmaterialien im Bauteil, die zunächst hohe Genauigkeit und auch die Vollautomatisierbarkeit des Prozesses. Nachteilig ist, dass diese Gewinde zwar belastbar, aber nicht verschleißfest sind, wie sich aus der Verschleißfestigkeit von Kunststoffen gegenüber Metallen ableiten lässt [17]. Nach mehrmaliger Benutzung zeigen sie eindeutige Ermüdungsspuren, was für Fertigungsvorrichtungen nicht akzeptabel ist, vor allem wenn es sich um häufig verwendete Anschraubpunkte zur Bauteilbefestigung handelt.

2.3.3 Einpressen von Gewindeeinsätzen

Alternativ zum direkten Gewindeschneiden können auch metallische Gewindeeinsätze in das Bauteil eingesetzt werden. Dies geschieht bei additiv gefertigten Bauteilen meist über manuelles Eindrehen oder Einschmelzen der Gewindeeinsätze unter Verwendung eines Lötkolbens oder ähnlicher Einrichtungen [18–20]. Dies heißt, dass nun zwar verschleißfeste, metallische Gewinde vorhanden sind, die Prozesskette aber, wie bereits beim Verkleben, manuelle Arbeitsschritte aufweist.

Es gibt zwar Vorrichtungen, die den Einschmelzvorgang führen und teilautomatisieren, diese sind jedoch nur unter großem Aufwand in bestehende Fertigungsanlagen integrierbar. Optimal wäre es, die Gewindeeinsätze mit einer Vorrichtung, die in eine Standard-Fertigungsmaschine eingewechselt werden kann, ohne Modifikation der Maschine automatisiert einbringen zu können. Der Weg zur Entwicklung und Umsetzung einer solchen Vorrichtung wird im Folgenden aufgezeigt.

3 Verwendete Anlagen und Versuchseinrichtungen

Nachdem zuvor aufgezeigt wurde, wie großformatige, additive Fertigung grundlegend funktioniert und welche Materialien sowie Prozesse relevant sind, beschreibt dieses Kapitel, welche Anlagen/Versuchseinrichtungen zum Einsatz kamen und welche relevanten Eigenschaften diese aufweisen. So soll sichergestellt werden, dass etwaige Messergebnisse mit den Ergebnissen anderer wissenschaftlicher Arbeiten vergleichbar sind.

3.1 Hybride Fertigungsanlage

Unter hybrider Fertigung wird die Kombination mehrerer Fertigungstechnologien zu einem ganzheitlichen und automatisierten Gesamten verstanden. Im vorliegenden Fall ist dies die Kombination aus großformatiger, additiver Fertigung im SEAM-Verfahren mit der zerspanenden Nachbearbeitung. Großformatige, additive Fertigung bedeutet Bauteilgrößen bis zu 1500 x 1500 x 750 mm und Bauteilgewichte bis zu 100 kg. Umgesetzt wurde diese Prozesskombination an einer hybriden Fertigungszelle am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.

Die hybride Fertigungszelle besteht aus zwei Knickarmrobotern: Kuka „KR60“ und Kuka „KR600“. Der Kuka KR60-Roboter trägt dabei das SEAM-Druckaggregat, mit dem 5 mm breite und 1 mm hohe Stränge an thermoplastischem Kunststoff aus Granulat erzeugt werden können [21]. Der Kuka KR600-Roboter trägt eine 30 000 1/min Frässpindel mit HSK-63F-Werkzeugaufnahme, mit der die Nachbearbeitung der Bauteile realisiert wird. Die hybride Fertigungszelle wird über eine Siemens „Sinumerik One“ gesteuert. Das System verhält sich steuerungstechnisch äquivalent zu einer Fräsmaschine mit sechs Achsen, daher können sämtliche Werkzeuge und Prozesse, die zur Anwendung kommen direkt auf andere NC-Maschinen übertragen werden. **Bild 2** zeigt eine Übersicht der Anlage.

Im Bildvordergrund ist unten der Aufspanntisch zu sehen (3000 mm x 1500 mm), darauf eine beheizbare Vakuum-Spannvorrichtung mit einem 60-kN-Kraftsensor für die additive oder hybride Fertigung. Rechts im Bild befindet sich der Kuka KR600-Roboter mit der Frässpindel und links im Bild befindet sich der Kuka KR60-Roboter mit dem SEAM-Aggregat.

SEAM ist ein vom Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU entwickelter Prozess, bei dem thermoplastisches Polymer, das in Form von Granulat vorliegt, in einem Extruder aufgeschmolzen und in Form von Strängen auf einer Bauplatte abgelegt wird, wie es auch bei anderen LFAM-Prozessen geschieht [22]. Die Besonderheit beim SEAM-Prozess liegt in einem Doppel-Düsensystem bestehend aus einer Hauptdüse sowie einer Bypassdüse, durch die der Materialaustrag im Prozess dynamisch geregelt werden kann [23]. Die Extruderschnecke läuft dabei mit konstanter Geschwindigkeit und durch gezieltes Öffnen/Schließen der Haupt- und Bypassdüse wird die Strangablage bei nahezu konstantem Austragsdruck erreicht. Dies hat eine hohe geometrische Genauigkeit der abgelegten Stränge zur Folge.

Typische Strangparameter beim SEAM sind 5 mm Strangbreite, 1 mm Stranghöhe bei Verwendung einer Tellerdüse mit 3 mm Innendurchmesser und 8 mm Schilddurchmesser. Im Vergleich dazu sind bei der kleinformatigen, additiven Fertigung mittels FLM Strangbreiten von 0,4 mm bei Schichthöhen von 0,2 mm üblich.

3.2 Prüfstände und Messtechnik

Für sämtliche Zugversuche im Rahmen der Entwicklung kam eine 1-Säulen-Universalprüfmaschine „FMT-319“ von Alluris in Kombination mit einem Kraftaufnehmer „FMT-318.FUK5“ zum Einsatz. Diese ist mit einem 5-kN-Zug-/Druckkraftaufnehmer

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

ausgestattet und kann auch mechanisch maximal eine Zug-/Druckkraft von 5 kN aufbringen. Während der Versuche können sowohl die Traversenposition (Auflösung 0,01 mm, Genauigkeit 0,01 mm) [24], die Prüfzeit als auch die Kraftwerte (Auflösung 1 N, Genauigkeit 0,5 % Mw. nach DIN ISO 7500–1) [25] automatisiert von der Maschine aufgezeichnet werden.

Um während des Einpressens die Temperatur der einzelnen Komponenten überwachen zu können, kam für sämtliche Versuche eine Wärmebildkamera vom Typ „FLIR T1030sc“ zum Einsatz. Da der Gesamtaufbau aus vielen verschiedenen Komponenten und unterschiedlichen Materialien besteht (Stahl, Messing, PEEK, PTFE) und keine nachträgliche Anpassung an die unterschiedlichen im Bild vorkommenden Emmisionsgrade durchgeführt wurde, sind sämtliche erfassten Temperaturen nur als qualitative Werte zu verstehen. Da die Temperatur der Buchsen von großer Bedeutung war, wurde der Emissionsgrad an der Kamera nach Tabellenwerten auf den Emissionsgrad von oxidiertem Messing ($\varepsilon = 0{,}61$) [26] eingestellt.

Für die Validierung der erreichten Einpresskräfte kam ein Kistler Mehrkomponenten-Dynamometer vom Typ „9255C“ zum Einsatz. Diese besitzt in der relevanten Kraftrichtung (Fz) einen Messbereich von 0–60 kN bei einer Linearität von $<\pm 0{,}5$ % FSO und einer Ansprechschwelle von < 0,01 N [27].

Für die Vorversuche kam zur Gewichts-/Kraftmessung eine Waage des Typs „OK. OKS 3220“ zum Einsatz. Sie besitzt einen Messbereich von 0–5000 g und eine Auflösung von 1 g [28].

3.3 Gewindeeinsätze

Für die Versuche der Gewindegrößen M3–M8 kamen Gewindeeinsätze des Unternehmens 3DJAKE zum Einsatz [29]. Bei diesen handelt es sich um Messingeinsätze mit gepfeilter Rändelung, dargestellt in **Bild 3**.

Für die Kernlochdurchmesser der Löcher zum Einpressen wurden die Daten nach **Tabelle 1** verwendet, basierend auf den Herstellerangaben.

4 Methodik

Die Vorgehensweise zur Entwicklung der Einpressvorrichtung orientiert sich an der VDI 2221 „Entwicklung technischer Produkte und Systeme – Modell der Produktentwicklung“ [30]. **Bild 4** zeigt das verwendete Modell der Produktentwicklung.

Die Produktentwicklung wird nach der Richtlinie in neun Schritte aufgeteilt [30], die im Rahmen dieser Arbeit zu sieben Schritten zusammengefasst wurden. Sie werden im Folgenden aufgezählt und im Kontext der Arbeit erläutert. Die Schritte 5 und 6 wurden in Schritt 2 integriert, um direkt aus den Anforderungen Teilfunktionen zu erhalten und diese modular-iterativ zu optimieren. Damit wurde der Entwicklungsprozess für das Einzelprodukt entscheidend verschlankt. Auch wurde der vorletzte Schritt 6 „Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben“ nur im Rahmen von direkten Tests der Vorrichtung an der Maschine dokumentiert, da es sich noch nicht um ein Endkundenprodukt handelt, sondern um einen Prototyp.

Manche der verwendeten oder festgelegten Parameter wie etwa Einpresstemperaturen und benötigte Einpresskräfte waren zunächst unbekannt. Daher wurden zeitparallel zur methodischen Produktentwicklung Vorversuche zur Ermittlung der Verarbeitungsparameter durchgeführt. Diese sind im anschließenden Kapitel samt den Validierungsergebnissen genauer erläutert.

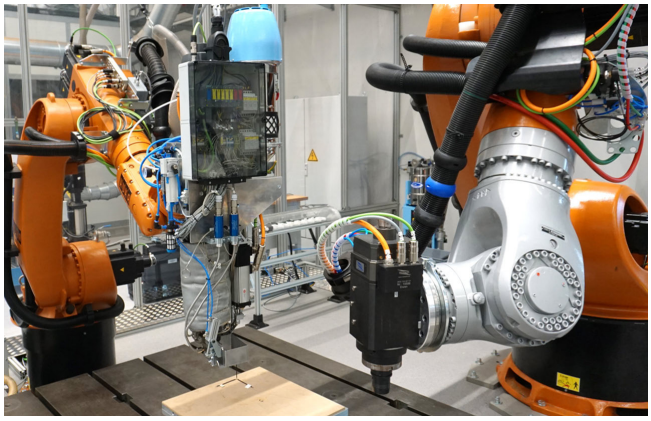

Bild 2. Hybride Fertigungszelle am Fraunhofer IPA. *Foto: Fraunhofer IPA*

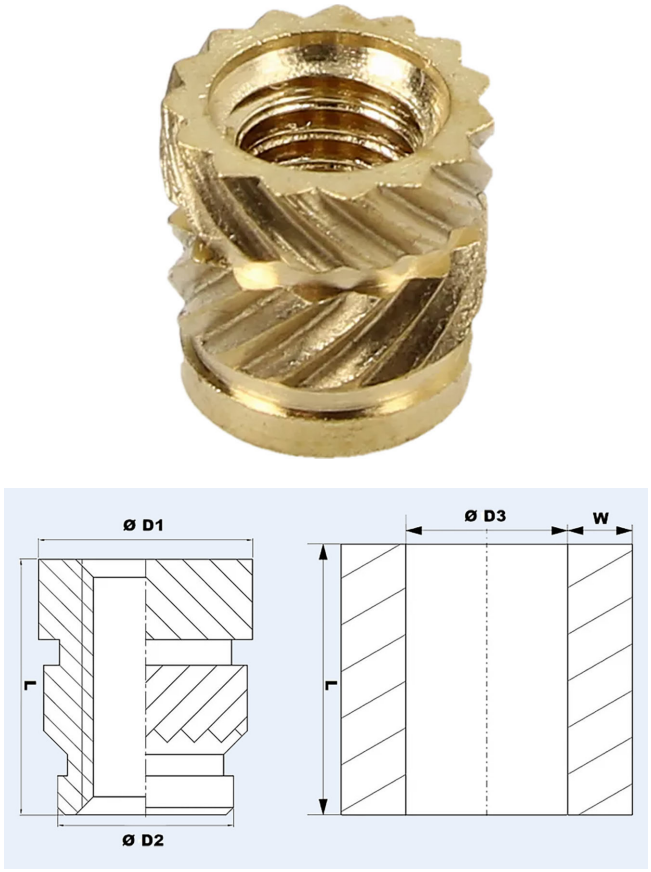

Bild 3. Gewindeeinsatz (oben) und Maßzeichnung (links unten) sowie Zeichnung des Bauteils am Einsatzpunkt (rechts unten). *Grafik: [29]*

4.1 Klären und Präzisieren des Problems

In Schritt 1 wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt, in der zunächst gegebene Parameter, technologische Daten und Anforderungen zur universellen Verwendbarkeit des Werkzeugs festgehalten sind. Die dabei ermittelten Daten sind in **Tabelle 2** zu sehen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle 1. Größen der Gewindeeinsätze und notwendiger Durchmesser der Einpressgeometrie (in Anlehnung an [29]).

Gewindegröße	Ø D1 in mm	Ø D2 in mm	Ø D3 in mm	L (+1 mm) in mm	W (mind.) in mm
M3	4,6	3,9	4	5,7	1,6
M4	6,3	5,5	5,6	6,35	2,1
M5	7,1	6,3	6,4	9,5	2,6
M6	8,7	7,9	8	12,7	3,3
M8	10,24	9,5	9,6	12,7	4,5

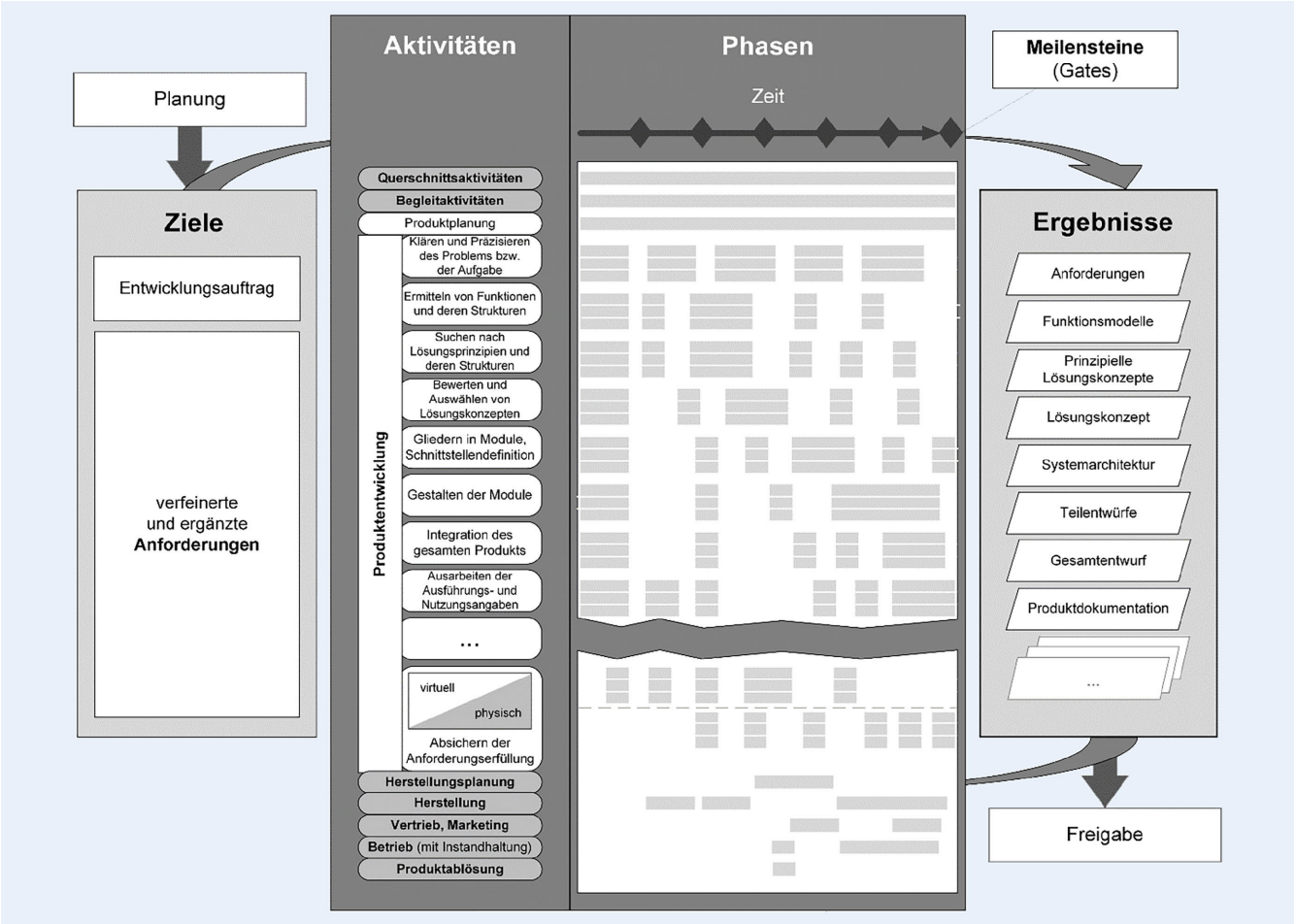

Bild 4. Spezifisches Modell eines Produktentwicklungsprozesses. *Grafik: [30]*

4.2 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

Aus den Anforderungen in Abschnitt 4.1 (Tabelle 2) wurde abgeleitet, welche Funktionen das Werkzeug besitzen muss, um für die vorliegende Aufgabe geeignet zu sein. Dabei wird jede Anforderung durch eine oder mehrere Teilfunktionen abgedeckt. Zu sehen ist dies in **Tabelle 3**.

Die Zuweisung oder Übernahme einer Funktion ist in der letzten Spalte jeweils kenntlich gemacht. Für diese Teilfunktionen wurden im folgenden Schritt Einzellösungen gesucht, mit denen sie umgesetzt werden können.

4.3 Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

Für die Suche nach Lösungsprinzipien wurden umfangreiche Recherchen zu bereits bekannten Systemen und technischen Umsetzungen durchgeführt. Aufgrund des großen Umfangs können diese nicht vollständig dargestellt werden. Die Struktur der Teilfunktionen ist so aufgebaut, dass jeder mögliche Lösungsansatz unabhängig von den Lösungsansätzen der anderen Teilfunktionen betrachtet wird.

4.4 Bewerten und Auswahl von Lösungskonzepten

Die in Schritt 3 ermittelten Einzellösungen wurden abschließend unter Verwendung eines morphologischen Kastens mit-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 2. Anforderungsliste an das Werkzeug.

Nr.	Beschreibung	Wert/Akzeptanzkriterium
1	Verarbeitbare Größen an Gewindeeinsätzen	M3 - M10
2	Möglichst wenig Modifikationen um verschiedene Gewindegrößen zu greifen	-
3	Material der Gewindeeinsätze	Messing
4	Maschinentyp in welchen die Vorrichtung integrierbar sein muss	Fräsmaschinen (steuerungsunabhängig)
5	Werkzeugaufnahmen in welche die Vorrichtung direkt einsetzbar sein muss	HSK F 63
6	Materialien, in welche Gewindeeinsätze integrierbar sein sollen	Standard Thermoplaste für SEAM (Schmelztemperatur bis 300 °C)
7	Maximale Abmaße des Werkzeugs	Ø 85 mm x 200 mm Ø 200 mm x 200 mm (benötigt 3 Werkzeugplätze)
8	Maximales zulässiges Werkzeuggewicht	5 kg
9	Möglichst kosteneffizienter Aufbau	-
10	Verhindern übermäßigen Wärmeeintrags in die Spindel → Maximale Flanschtemperatur	50 °C
11	Werkzeugwechselzeit vergleichbar mit typischen Fräswerkzeugen	< 1 Minute
12	Vollautomatisierung des Prozess (Materialnachschub ohne manuelle Intervention)	10 Gewindeeinsätze

Tabelle 3. Ermittelte Teilfunktionen und deren Struktur.

Nr.	Teilfunktionen/Zusammenfassung	Zuweisung zu Anforderung(en)
1	Greifen der Gewindeeinsätze	1,2,3,12
2	Erwärmen der Gewindeeinsätze	3,6,10
3	Einpressen der Gewindeeinsätze	1,2,3,4,5
4	Energiezufuhr	4,6
5	Werkzeugwechsel der Endeffektoren(Greifer)	4,5,7,8,11
6	Wärmeentkopplung	10
7	Magazin / Materialvorrat	1,2,3,12

einander kombiniert, um passende Lösungsansätze zu identifizieren. Der morphologische Kasten, versehen mit drei betrachteten Lösungsvarianten, ist in **Tabelle 4** dargestellt.

Insgesamt wurden drei Lösungsvarianten gebildet (A, B, C), welche anschließend bewertet wurden. Die Konzeptbewertung ist dabei zusammengefasst in **Tabelle 5**.

Die vergebenen Punktzahlen reichten von 0 (entspricht nicht den Anforderungen) bis 5 (optimale Lösung). Diese Punktzahlen wurden vor der Auswertung mit einer Gewichtung, welche im Bereich zwischen 1 (nicht direkt zur Erreichung der Zielsetzung) und 5 (kritisch zur Erreichung der Zielsetzung) liegt, multipliziert, um die erreichte Punktzahl der Lösungen zu erhalten.

Dabei wurde Konzept B mit der höchsten Punktzahl bewertet und somit für die weitere Entwicklung ausgewählt. Gründe sind zum einen die einfache Umsetzbarkeit des Systems, da viele dafür nötige Komponenten bereits im Rahmen vorhandener Prüfstandsaufbauten und Ersatzteile für die additive Fertigung mittels FLM zur Verfügung standen. Zum anderen spricht für dieses Konzept die geringe zu erwartende Zeit eines Arbeitsgangs. Wenn sich das Heizelement mit seiner im Vergleich zum Insert hohen thermischen Masse auf Betriebstemperatur befindet, können sehr schnell mehrere Inserts hintereinander ohne Verzögerung eingebracht werden. Auch die Einfachheit des Werkzeugwechsels und eine mögliche kompakte Bauweise prädestinierten diese Ausführungsvariante.

4.5 Integration des gesamten Produkts

Zur Integration des gesamten Produkts wurden zunächst sämtliche Bauteile/Komponenten dreidimensional in der CAD-Software „SolidWorks“ modelliert und iterativ optimiert. Danach wurden die Normteile/Zukaufteile bestellt und Einzelbauteile gefertigt. Umgesetzt wurde die Konstruktion als Parallelgreifer, dargestellt in **Bild 5**, welcher pneumatisch betätigt und elektrisch angesteuert wird. Das Erwärmen der Gewindeeinsätze wurde ebenfalls elektrisch realisiert.

Eine wichtige Anforderung an diese Konstruktion ist die Integration in eine HSK-63-F-Werkzeugspindel (1). Dadurch kann

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 4. Morphologischer Kasten zur Ermittlung dreier möglicher Konzepte.

Nr.	Teilfunktion	Lösungsansatz				
		1	2	3	4	5
1	Greifen der Gewindeeinsätze	Greifmechanismus mittels elektrischem Antrieb	Greifmechanismus mittels pneumatischem Antrieb	Außengewinde	Magnetisch	Vakuum
2	Erwärmen der Gewindeeinsätze	Infrarot	Induktion	Heizelemente		
3	Einpressen der Gewindeeinsätze	Hohe Temperatur, niedriger Einpressdruck	Temperatur bis max. Schmelztempertaur, zusätzlicher Einpressmechanismus			
4	Energiezufuhr	Kabelverbindung	Schleifkontakt	Interner Speicher (Akku)		
5	Werkzeugwechsel der Endeffektoren (Greifer)	Madenschauben / Klemmung	Verschraubung	Klemmverschluss		
6	Wärmeentkopplung	Isolation	Aktive Kühlung	Kontaktfläche	Mehrfach-Kombination	
7	Magazin / Materialvorrat	Internes Magazin	Externes Magazin			

C B A

Tabelle 5. Bewertungstabelle der drei Konzepte.

Bewertungskriterium	Lösungskonzept			Gewichtung
	A	B	C	
Umsetzbarkeit	5	5	2	5
Einfachheit der Konstruktion	2	4	5	2
Zeit eines Arbeitsgangs	2	5	4	5
Einfachheit Werkzeugwechsel	2	4	5	3
Kosten	2	4	5	1
Griffkraft	4	4	5	2
Arbeitssicherheit / Notwendigkeit zusätzliche Sicherheitseinrichtungen	5	3	1	2
Kompakte Bauweise	4	3	2	4
Summe	81	100	80	

diese Konstruktion in eine Frässpindel eingewechselt werden und so in Fräsmaschinen und der hybriden Fertigungszelle zum Einsatz kommen.

Die Gewindeeinsätze werden mittels Greifzangen (5) aufgenommen, welche durch horizontal ausgerichtete Pneumatikzylinder (3) aktuiert werden. Ein Messingstempel (7) wird mit einer 50-W-Heizpatrone (9) erwärmt. Ein PT1000-Temperatursensor (8) in Kombination mit einem PID-Regler regelt die Temperatur auf die zuvor festgelegten 260 °C. Auf dem Messingstempel ist die passive Kühlung (6) montiert, auf der zur thermischen Entkopplung der Pneumatikzylinder ein Bauteil aus PEEK zur Isolation (4) geschraubt ist. Die Gewindeeinsätze werden mit dem Messingstempel, welcher mit einem vertikal ausgerichteten Pneumatikzylinder (3) aktuiert wird, eingepresst. Die Pneumatikzylinder sind über Halterungen (2) mit der Werkzeugaufnahme verbunden.

Für die Realisierung der pneumatischen Aktuierung wurden doppelwirkende Direktmontagezylinder verwendet, die einen Verfahrweg von 15 mm für die Greifzangen und 20 mm für die Einpressvorrichtung besitzen. Für das Greifen sowie das Einpressen wurde jeweils ein 4/2 Wegeventil mit elektrischer Betätigung und Federrückstellung verwendet.

Für die Validierung wurde das Material „Akromid B3 ICF 40“ verwendet, das mit dem SEAM-Extruder gedruckt wurde. Um die

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

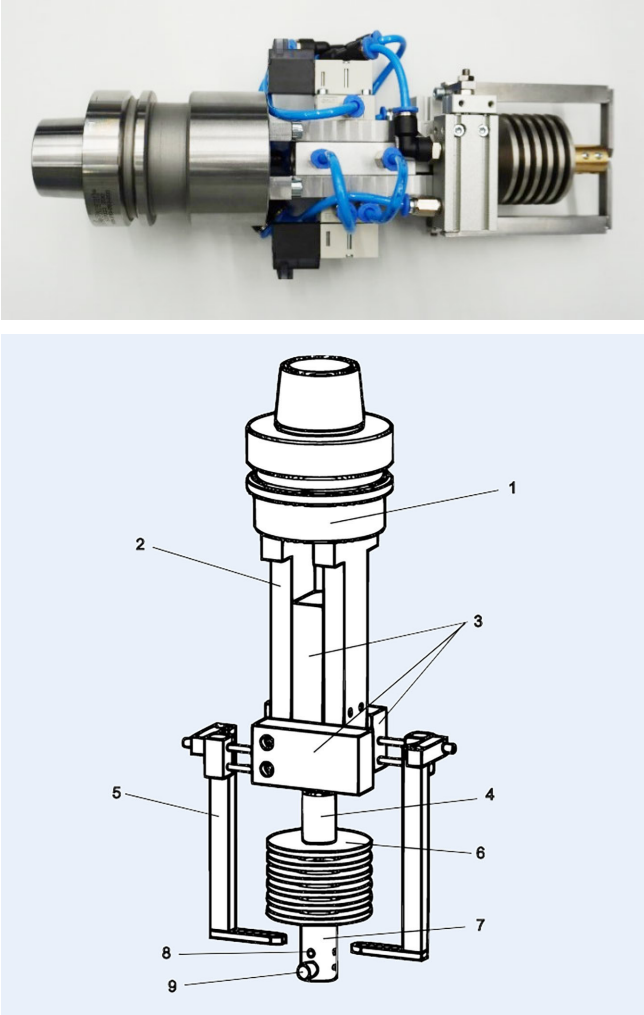

Bild 5. Fertiggestelltes Einpresswerkzeug (oben) und Darstellung im CAD (unten). *Foto: Fraunhofer IPA*

beiden verwendeten Materialien besser vergleichen zu können, wurden zunächst jeweils fünf Gewindeeinsätze unter gleichen Bedingungen eingepresst und mit der Alluris Zugprüfmaschine wieder herausgezogen.

4.6 Absichern der Anforderungserfüllung

Um die Anforderungserfüllung abzusichern, wurde eine Testreihe mit dem Werkzeug in der hybriden Fertigungszelle durchgeführt. Dabei wurden mehrere Gewindebuchsen eingepresst und zeitparallel Kräfte und Temperaturen aufgezeichnet. Um die Vergleichbarkeit der hergestellten Verbindung aus Gewindebuchse und Druckmaterial sicherzustellen, folgten abschließend Zugversuche mit den eingepressten Buchsen.

5 Ermittlung von Verarbeitungsparametern

Um Verarbeitungsparameter wie Temperatur und Druck, mit der die Gewindeeinsätze eingesetzt werden, festzulegen, wurden Vorversuche durchgeführt. In den Vorversuchen wurden Gewindeeinsätze mit verschiedenen Größen mit unterschiedlichen Temperaturen und Drücken in Testbauteile eingepresst. Für die Testbauteile wurden aus dem Material „XT-CF20“ von Colorfabb

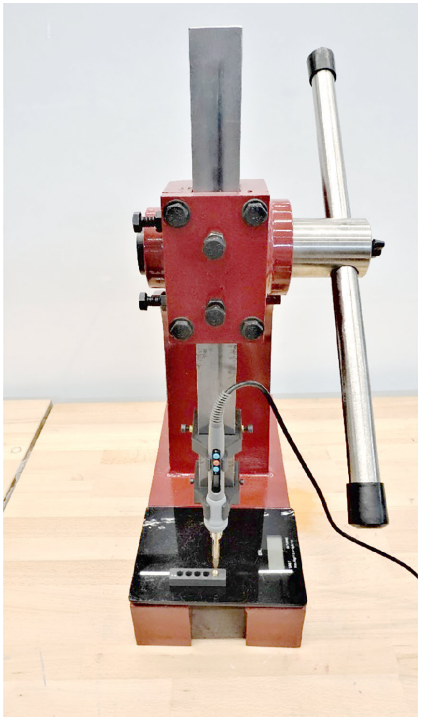

Bild 6. Einpressen der Gewindeeinsätze mittels eines Lötkolbens, befestigt an einer Drehdornpresse *Foto: Fraunhofer IPA*

Rechtecke mit jeweils fünf Löchern gedruckt. Die Maße der Löcher entsprachen den laut Gewindebuchsenhersteller [29] optimalen Maßen für das Einpressen der Gewindeeinsätze, siehe Tabelle 1. Das verwendete Material hatte eine Drucktemperatur von 240 °C–260 °C, weshalb als Einpresstemperaturen 220 °C, 240 °C, 260 °C und 280 °C für Tests ausgewählt wurden. Der Testaufbau ist in **Bild 6** dargestellt.

Um die Gewindeeinsätze identisch auszurichten, wurden diese mit einem Lötkolben, der an einer Drehdornpresse befestigt ist, eingepresst. Durch den Aufbau konnte die Vergleichbarkeit dieser Einsätze bei den folgenden Versuchen gewährleistet werden. Der Lötkolben hat eine einstellbare Temperatur und einen speziellen Aufsatz, um die Gewindeeinsätze aufstecken zu können. Um die Einpresskraft zu messen, wurde eine Waage des Typs „OK. OKS 3220“ in den Versuchsaufbau integriert. Die gemessene Gewichtskraft wurde anschließend in eine Druckkraft umgerechnet. Die gemessenen Kräfte dienen der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse und geben einen Richtwert, der bei der technischen Umsetzung erreicht werden soll. Die Zeit des Einpressvorgangs wurde mit einer Stoppuhr gemessen.

Bei den Versuchen wurde eine maximale Gewichtskraft von 5 kg (entspricht circa 50 N) gemessen. Die Einpresszeit entsprach 20 Sekunden bei maximaler Temperatur und Druck und 3 Minuten bei einer Gewichtskraft von 2 kg und einer Temperatur von 220 °C. Eine Übersicht der Versuchskonfigurationen findet sich in **Tabelle 6**.

In anschließenden Zugversuchen mit der zuvor beschriebenen Alluris Zugprüfmaschine wurden die eingepressten Gewindeeinsätze herausgezogen und die verschiedenen Parameter anhand der Testergebnisse miteinander verglichen.

Diese Versuche wurden für die Gewindegrößen M3, M4 und M5 vollständig durchgeführt. Bei Verwendung größerer Gewindeeinsätze kam es bei den Zugversuchen zur vollständigen Zerstörung der Testbauteile, sodass keine aussagekräftigen Vergleichswerte ermittelt werden konnten. Die M3-Gewindeeinsätze

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Tabelle 6. Übersicht Versuchskonfigurationen der Vorversuche.

Nr.	Temp.T/°C Soll	Temp.T/°C Gemessen	Überlapp Mindestabst.	Einpress-Kraft F/N	Zeit einpress. t/s	Zeit aufheiz. t/s
1	200	-	Ja	-	-	-
2	240	236	Nein	49	30	-
3	220	220	Ja	39	68	48
4	220	220	Ja	49	42	72
5	220	221	Nein	29	65	178
6	240	236	Ja	29	39	84
7	280	282	Nein	49	28	98
8	280	272	Ja	29	28	195
9	260	230	Ja	49	25	86
10	260	260	Nein	49	23	95
11	240	244	Ja	29	43	108
12	260	254	Nein	29	42	99
13	260	276	Nein	49	24	-
14	260	257	Ja	29	30	98
15	280	276	Nein	49	-	100
16	240	266	Ja	49	30	106
17	280	277	Ja	49	22	93
18	240	238	Nein	29	51	63
19	220	224	Nein	29	86	42
20	280	275	Nein	49	25	130
21	240	241	Nein	29	50	65
22	260	253	Ja	49	28	102
23	220	225	Nein	29	56	90
24	280	289	Ja	29	24	107
25	320	301	ja	49	20	200
26	350	320	nein	49	15	147

wurden bei den Zugversuchen herausgezogen ohne das Bauteil zu beschädigen. Bei den M4- und M5-Gewindeeinsätzen war das Ergebnis gemischt. Die Gewindeeinsätze wurden zum Teil ohne Zerstörung herausgezogen, andere Zugversuche beschädigten das Testbauteil oder zerstörten dieses sogar komplett. Bei den zerstörten Testbauteilen hatte die Zwischenschichthaftung des Druckes nachgegeben, wodurch sich die einzelnen Druckschichten voneinander gelöst hatten, siehe **Bild** 7.

Um die Ergebnisse der jeweiligen Gewindegröße miteinander zu vergleichen, wurden Diagramme erstellt, welche den Zugkraftverlauf über den Verfahrweg darstellen. Exemplarisch ist das Diagramm der Zugversuche von M5 Gewindeeinsätze in **Bild 8** dargestellt.

Die gemittelten Messwerte für die Temperaturstufe von 220 °C sind unregelmäßig und stufig. Dies deutet auf eine unzureichende Aufschmelzung des umliegenden Materials hin, weshalb der Gewindeeinsatz durch Reibung gehalten wird und keinen kompletten Formschluss erreicht. Durch das Lösen der Reibung schnellt der Gewindeeinsatz schlagartig nach oben, ähnlich dem Stick-Slip-Effekt. Bei den gemittelten Messwerten bei 280 °C ist hingegen eine regelmäßige Kurve abgebildet. Diese fällt aber im Gegensatz zu den Kurven von 240 °C und 260 °C schneller ab und hat zudem eine geringere maximale Zugkraft. Die geringere Zugfestigkeit zeigt, dass eine Temperatur von 280 °C das Material bereits zu stark aufschmilzt, wodurch das um den Gewindeeinsatz liegende Druckmaterial beeinträchtigt wurde. Die Ergebnisse der Temperaturen 240 °C und 260 °C unterscheiden sich nur geringfügig. Daher wurde die Einpresstemperatur von 260 °C als die ideale Temperatur mit Blick auf die geringere Einschmelzzeit festgelegt.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Bild 9 zeigt die maximale Zugkraft für die Gewindegrößen M3–M5 sowie die maximale Zugkraft pro mm² Hüllfläche unter der Vereinfachung, dass die Außenfläche der Gewindebuchse einem Zylinder entspricht. Die M3-Gewindeeinsätze hatten die größte Zugkraft pro Umfangsfläche. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Zugversuchen keine Testbauteile zerstört wurden, wohingegen bei den M4- und M5-Gewindeeinsätzen einige Bauteile zerstört wurden. Die zerstörten Testbauteile hielten weniger Zugkraft stand als sauber herausgezogene Gewindeeinsätze. Dies führte zu einer geringeren maximalen Zugkraft.

6 Entwicklung des Einpressprozesses und Validierung

Das Diagramm in **Bild 10** zeigt, dass das Material Akromid B3 ICF 40 deutlich spröder ist, als das zuvor verwendete XT-CF20. Als Spitzenwert erreicht es eine deutlich höhere maximale Zugkraft. Zudem ist beim Einpressen der Gewindeeinsätze aufgefallen, dass die Einpresstemperatur von 260 °C zu niedrig für das Material Akromid B3 ICF 40 ist. Daher wird für die Validierung die Einpresstemperatur auf 280 °C erhöht.

Bild 7. Zerstörte Bauteile M3 (unten), M4 (Mitte) und M5 (oben) mit Versagen der Zwischenschichthaftung. *Foto: Fraunhofer IPA*

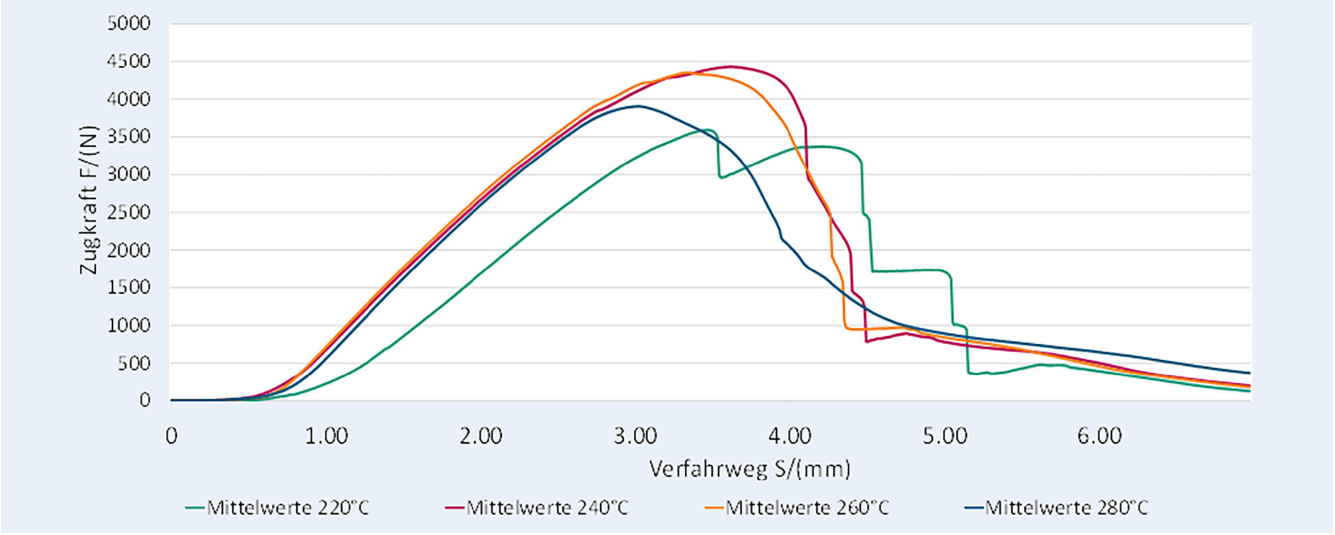

Bild 8. Kraft-Weg-Verlauf für die Zugversuche an M5-Gewindeeinsätzen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

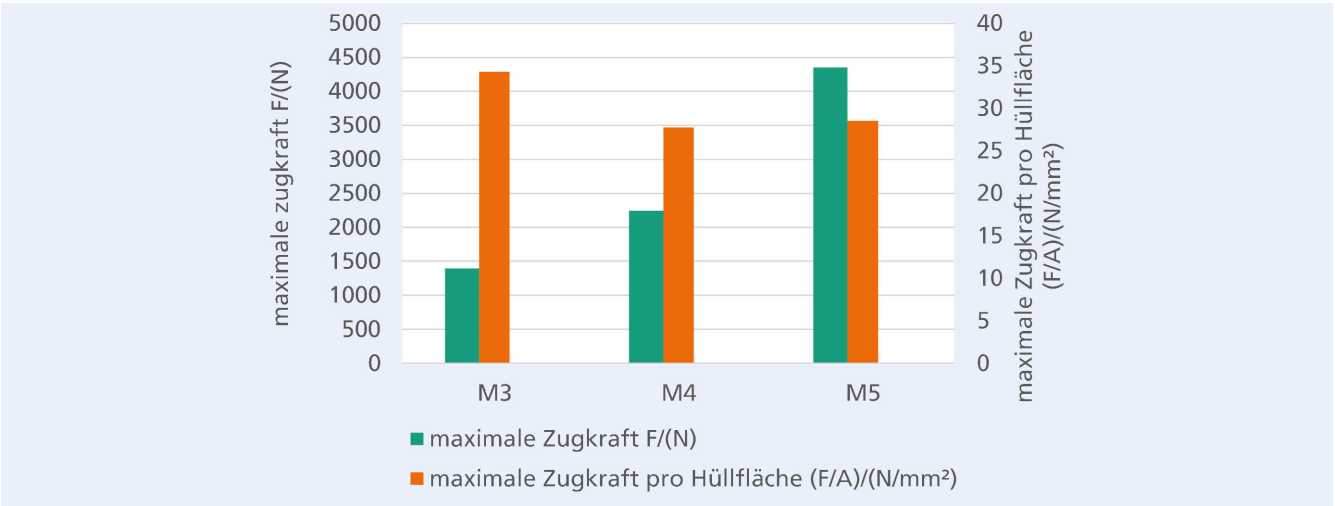

Bild 9. Maximale Auszugskraft bezogen auf die Umfangsfläche der Gewindeeinsätze. *Grafik: Fraunhofer IPA*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

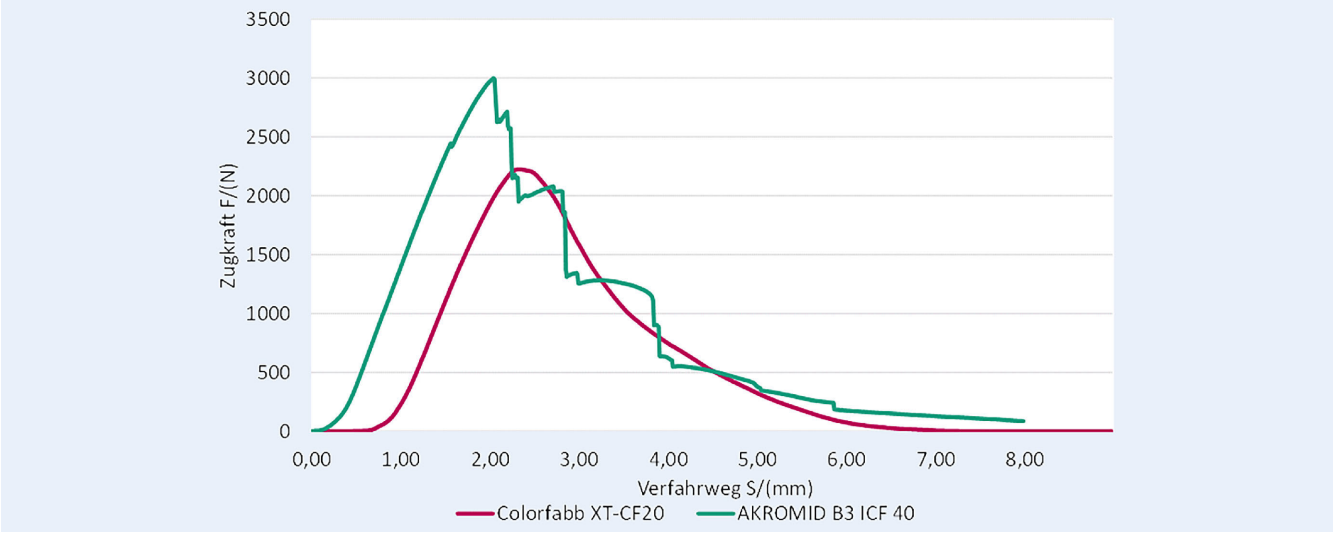

Bild 10. Kraft-Weg-Verlauf des Materialvergleichs bei M5-Gewindeeinsätzen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

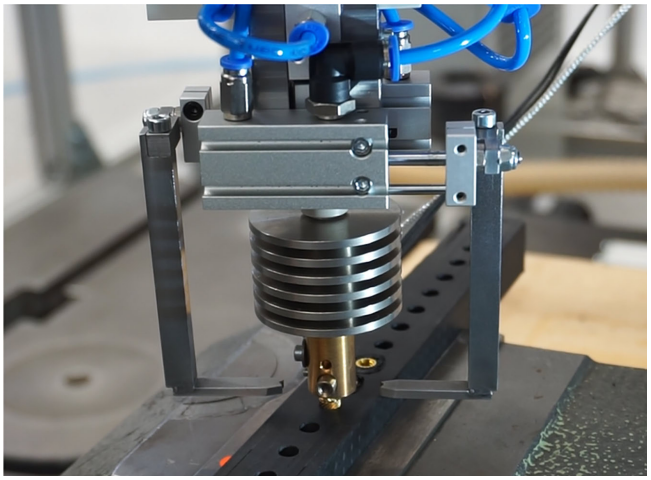

Bild 11. Fertiggestellte Einpressvorrichtung in Verwendung an der hybriden Fertigungszelle. *Foto: Fraunhofer IPA*

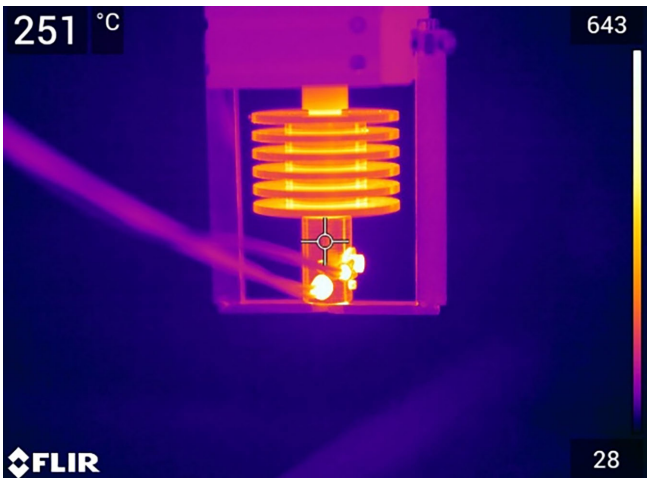

Bild 12. Qualitative Wärmebildaufnahme der Einpressvorrichtung nach dem Aufheizen *Foto: Fraunhofer IPA*

Für die Validierung des Systems wurde der gefertigte Greifer in den Kuka KR600-Roboter der hybriden Fertigungsanlage eingewechselt und die elektrischen Kabel an die Steuereinheit des Roboters angeschlossen. Die Ansteuerung des Greifers geschah mittels NC-Code-schaltbaren, digitalen I/O-Einheiten am KR600. Die Druckluft wurde durch die Innenkühlung der Spindel bereitgestellt. **Bild 11** zeigt den Versuchsaufbau.

Es wurden Testbauteile mit dem SEAM-Extruder gedruckt, plangefräst und mit Grundbohrungen für die entsprechenden Gewindeeinsätze versehen.

Zunächst wurde der Messingstempel auf 280 °C erwärmt. Mit einer Wärmebildkamera wurde überprüft, ob die Einpresstemperatur erreicht wurde. Der angenommene Emissionswert an der Wärmebildkamera entsprach oxidiertem Messing mit $\varepsilon = 0{,}61$. Da es sich bei dem eingestellten Wert um einen Tabellenrichtwert handelt, sind die gezeigten Temperaturwerte für alle Komponenten außer der Druckstempelbuchse nur qualitativer Natur, wie in **Bild 12** zu sehen.

Auf dem Wärmebild ist zu erkennen, dass der Pneumatikzylinder nicht erwärmt wurde und somit die verwendeten Kühlmaßnahmen ausreichend sind. Das Heizelement und der Temperatursensor zeigen eine ungewöhnlich hohe Temperatur an, was aber auf die unterschiedlichen Emissionswerte der Materialien zurückzuführen ist.

Es wurden 10 M5-Gewindeeinsätze getestet, da diese bereits bei den Vortests gleiche Daten lieferten. Die Versuche verliefen ohne Probleme mit dem Prototyp und die Gewindeeinsätze konnten nacheinander erfolgreich erwärmt und eingepresst werden. Zeitlich lag ein Arbeitsgang bei circa einer Minute. In **Bild 13** ist ein Arbeitsvorgang mit den verschiedenen Schaltzuständen/Abläufen grafisch dargestellt.

Eine Kraftmessung, die mit dem Mehrkomponenten-Dynamometer Kistler 9255C der hybriden Fertigungsanlage durchgeführt wurde, bestätigt, dass die 50 N, die in den Vortests verwendet wurden, erreicht wurden. Der Kraftverlauf ist in **Bild 14** dargestellt.

An den Druckspitzen im Verlauf ist klar zu erkennen, dass der Druckstempel bei circa Sekunde 40 mit dem Einpressen des Inserts begann und dass die Gewindebuchse nach circa 180 Sekunden begann, sich selbstständig zur Bohrung auszurichten.

In anschließenden Zugversuchen wurden mit der Alluris Zugprüfmaschine die Gewindeeinsätze herausgezogen, um einen Ver-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

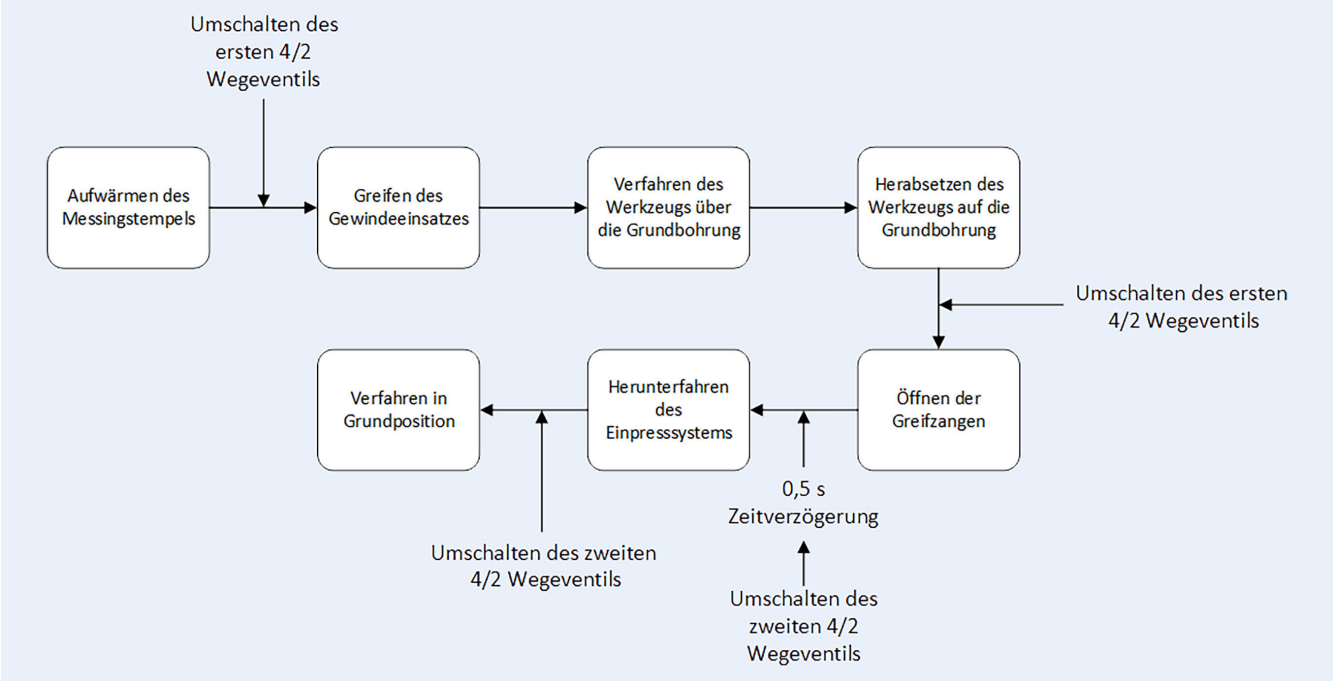

Bild 13. Ablauf eines Einpressvorgangs. *Grafik: Fraunhofer IPA*

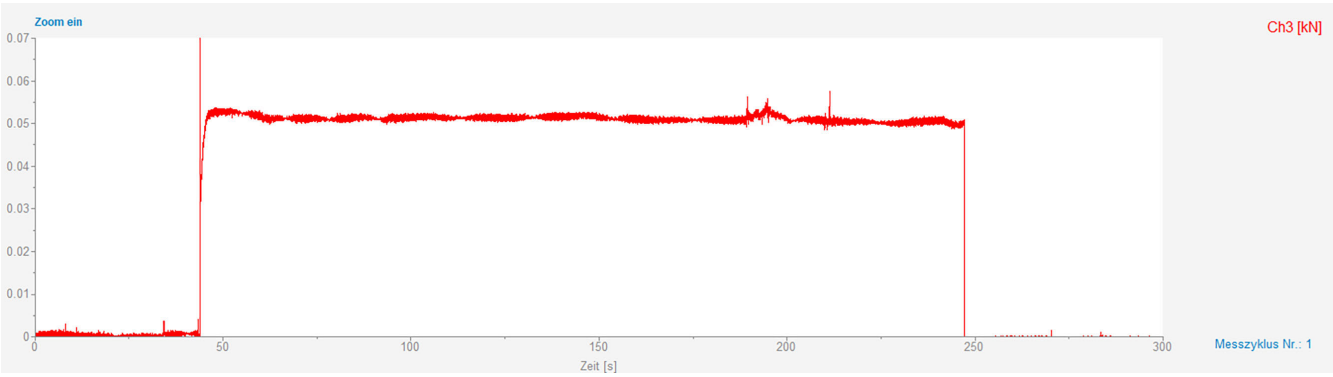

Bild 14. Kraftverlauf bei den Validierungsversuchen (exemplarisch von einem Test zur Funktionsfähigkeit des Prototyps, verlängerte Einpresszeit bei verringerter Temperatur im Vergleich zum normalen Ablauf). *Grafik: Fraunhofer IPA*

gleich mit den Ergebnissen aus den Vorversuchen zu erzielen. Diese Ergebnisse sind in **Bild 15** dargestellt. Zusätzlich zeigt **Bild 16** ein Bauteil nach durchgeführtem Zugversuch.

Acht der zehn Gewindeeinsätze konnten nicht mit der Zugprüfmaschine herausgezogen werden, da ihre maximale Zugkraft von 5000 N nicht ausreichend war. Bei den Zugversuchen, bei denen der Gewindeeinsatz herausgezogen wurde, ist zudem das Material gesplittert, wie in Bild 16 zu sehen, allerdings wurde insgesamt eine Steigerung der Zugkraft gemessen. Dies zeigt, dass die eingepressten Gewindeeinsätze der Bauteile ab einer Größe von M5 mehr Zugkraft aushalten als die Bauteile selbst.

Die Validierung war somit erfolgreich und zeigt, dass mit diesem Werkzeug metallische Gewinde automatisiert in Druckbauteile integriert werden können. Die ideale Einpresstemperatur entsprach der oberen Drucktemperatur beider Materialien.

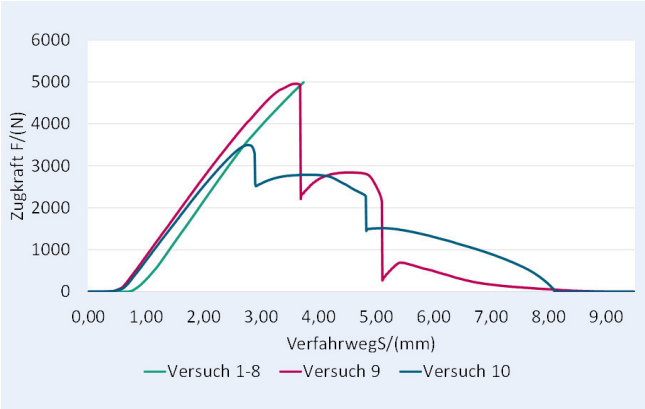

Bild 15. Kraft-Weg-Verlauf bei Validierungsversuchen mit M5-Gewindeeinsätzen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Vorrichtung entwickelt, mit der Gewindebuchsen in einem Verarbeitungsprozess in hybrid gefertigte Bauteilen eingebracht werden können, ohne eine Prozessunterbrechung in Kauf nehmen zu müssen.

Dazu wurde zunächst in Anlehnung an VDI 2221 methodisch ein abgewandelter Produktentwicklungsprozess durchlaufen. Dieser wurde begleitet von Vorversuchen, um wichtige, noch nicht bekannte Verarbeitungsparameter für den Einsatz von Gewindebuchsen zu ermitteln. Im Anschluss wurde die entwickelte Vorrichtung konstruiert und mit einem Demonstrator umgesetzt. Den Abschluss bildeten dann die Validierung und Überprüfung der Funktionsfähigkeit.

Bezüglich der Einbringung der Gewindeeinsätze und erreichbaren Festigkeiten wurden dabei bei 5 mm Gewindedurchmesser mit >5 kN bedeutend höhere Werte erreicht, als bei Direktverschraubungen mit maximal 1,2 kN möglich sind [31]. Auch wurde demonstriert, dass die Einbringung mittels des vorgestellten Ablaufs reibungslos funktioniert.

Zwei Herausforderungen haben sich im Laufe des Projekts ergeben. Zum einen ist die direkte Einbindung eines Werkzeugs in die Energieversorgung/Steuerung der Maschine ein noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem. Hier besteht noch Bedarf an einer kostengünstigen, einfach nachrüstbaren Lösung, über die elektrische oder pneumatische Verbindungen an ein Werkzeug in Frässpindeln realisiert werden können.

Das zweite Problem ist die Umsetzung eines geeigneten Magazins, um mehrere Größen an Gewindeeinsätzen aufnehmen zu können und diese im Prozess bereitzustellen.

Eine wissenschaftlich interessante Feststellung ist, dass bei beiden verwendeten Thermoplasten die optimale Einpresstemperatur der maximal angegebenen Verarbeitungstemperatur entsprach. Hier sind weitere Tests mit anderen Materialien von Interesse, um herauszufinden, ob es sich um einen allgemeinen Zusammenhang handelt oder ob dies materialspezifisch ist. Damit könnten in Zukunft eine individuelle Einstellung und Tests zur Ermittlung geeigneter Verarbeitungsparameter entfallen.

Bild 16. Gesplittertes Testbauteil mit eingeschmolzenen Gewindebuchsen nach Zugversuchen. *Foto: Fraunhofer IPA*

Literatur

[1] Foith-Förster, P.; Bauernhansl, T.: Axiomatic design of matrix production systems. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1174 (2021) 1, #12022

[2] Stratasys Ltd.: Werkzeuge und Vorrichtungen: Profitablere Produktion. Stand: 2020. Internet: www.cinteg.de/files/3d-druck/case-studies/jigs-and-fixtures-profitable-production---de-fdm-white-paper.pdf. Zugriff am 01.10.2024

[3] Center for Digital Technology and Management: The Future of Waste Management. Trend Report 2021. Stand: 2021. Internet: www.cdtm.de/wp-content/uploads/2023/03/Trend-Report-F21-The-Future-of-Waste-Management.pdf. Zugriff am 01.10.2024

[4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 8580: Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth Verlag 2022

[5] Autodesk GmbH: „Barriers to Entry" for Large-Format Additive Manufacturing. Class. Stand: 2020. Internet: www.autodesk.com/autodesk-university/class/Barriers-Entry-Large-Format-Additive-Manufacturing-2020. Zugriff am 01.10.2024

[6] Prusa Research a.s.: Prusa Knowledge Base. Max volumetric speed. Internet: help.prusa3d.com/article/max-volumetric-speed_127176. Zugriff am 01.10.2024

[7] Prusa Research a.s.: Original Prusa MK4S 3D-Drucker. Technische Daten. Internet: www.prusa3d.com/de/produkt/original-prusa-mk4s-3d-drucker-5/ . Zugriff am 01.10.2024

[8] Schwartz, F.; Rieck, M.: Auf dem Boden bleiben. Faserverstärkung minimiert Verzug großformatiger Bauteile. Stand: 2023. Internet: a.storyblok.com/f/170886/x/a7abb6d58f/i-pdf-akro-plastic-kunststoffe_2023_10_.pdf. Zugriff am 01.10.2024

[9] Hipke, T.; Uhlig, C.: Innovation im Werkzeugbau. Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) im Einsatz. Stand: 2012. Internet: www.iap.fraunhofer.de/content/dam/iap/de/documents/FB6/FVK-Werkzeug_Fraunhofer-IAP.pdf. Zugriff am 01.10.2024

[10] Abdelrhman, A. M.; Wei Gan, W.; Kurniawan, D.: Effect of part orientation on dimensional accuracy, part strength, and surface quality of three dimensional printed part. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 694 (2019) 1, #12048

[11] Post, B.; Chesser, P.; Lind, R. et al.: Feasibility of using Big Area Additive Manufacturing to Directly Manufacture Boat Molds. Technical Report. United States: n. p., 2018, doi.org/10.2172/1427645

[12] Onusseit, H.: The influence of adhesives on recycling. Resources, Conservation and Recycling 46 (2006) 2, pp. 168–181

[13] colorFabb: Technical Data Sheet XT-CF20. Stand: 2022. Internet: colorfabb.com/media/datasheets/tds/colorfabb/TDS_E_ColorFabb_XT_CF20.pdf. Zugriff am 01.10.2024

[14] Akro-Plastic GmbH: Akromid B3 ICF 40 AM schwarz (8236). Stand: 2024. Internet: akro-plastic.com/de/product/akromid-b3-icf-40-am-schwarz-8236-de. Zugriff am 01.10.2024

[15] Nefelov, I. S.; Baurova, N. I.: Formation of Threaded Surfaces in the Components Produced by 3D Printing. Russian Metallurgy (Metally) 2017 (2017) 13, pp. 1158–1160

[16] Gomeringer, R.; Kilgus, R.; Menges, V. et al.: Tabellenbuch Metall. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel 2005

[17] Novakova, A.; Brozek, M.: Selected plastics wear resistance. Engineering for rural development 13 , Jelgava, Lettland, 2014, pp. 187–193

[18] Warren, M.: Installation Press for Heat Set Inserts. Stand: 2021. Internet: egrove.olemiss.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2655&context=hon_thesis. Zugriff am 01.10.2024

[19] Kastner, T.; Troschitz, J.; Vogel, C. et al.: Investigation of the Pull-Out Behaviour of Metal Threaded Inserts in Thermoplastic Fused-Layer Modelling (FLM) Components. Journal of Manufacturing and Materials Processing 7 (2023) 1, #42, doi.org/10.3390/jmmp7010042

[20] Formlabs GmbH: Leitfäden. 3D-Druck von Gewinden und Nutzung von Gewindeeinsätzen in 3D-gedruckten Teilen. Internet: formlabs.com/de/blog/schraubgewinde-fuer-3d-Druckteile/. Zugriff am 01.10.2024

[21] Kausch, M.: Ultraschneller-3D-Druck-unter-Einsatz-von-Standard-Granulat. Infoblatt. Stand: 2019. Internet: www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/de/documents/Infoblatt/Infoblatt-Ultraschneller-3D-Druck-unter-Einsatz-von-Standard-Granulat.pdf. Zugriff am 01.10.2024

[22] Vicente, C. M. S.; Sardinha, M.; Reis, L. et al.: Large-format additive manufacturing of polymer extrusion-based deposition systems: review and applications. Progress in Additive Manufacturing 8 (2023) 6, pp. 1257–1280

[23] Fraunhofer IWU: SEAM – Industrieller Highspeed-3D-Druck für Hochleistungskunststoffe. Stand: 2023. Internet: www.iwu.fraunhofer.de/de/forschung/leistungsangebot/produktion-jetzt/seam-industrieller-highspeed-3d-druck-fuer-hochleistungskunststoffe.html. Zugriff am 01.10.2024

[24] Alluris GmbH & co. KG: FMT-319BU. Basiseinheit zu Prüfmaschinen. Stand: 2019. Internet: www.alluris.de/sites/default/files/2022–08/bda_fmt-319_DE-manual.pdf. Zugriff am 01.10.2024

[25] Alluris GmbH & co. KG: Q-Force, Kraftaufnehmer für Prüfmaschinen(FMT-318). Stand: 2020. Internet: www.alluris.de/media/db_fmt-318_DE.pdf. Zugriff am 01.10.2024

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

[26] InfrarotTec Systems: Emissionsgrad Tabelle. Internet: www.flir-infrarotkameras.de/FLIR-Technik-und-Funktionen/Emissionsgrad-Tabelle. Zugriff am 01.10.2024
[27] Kistler Gruppe: Mehrkomponenten-Dynamometer. Typ 9255C. Stand: 2018. Internet: kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003–051d.pdf. Zugriff am 01.10.2024
[28] Imtron GmbH: Küchenwaage OK. OKS 3220. Datenblatt. Internet: www.ok-online.com/fileadmin/user_upload/ok/Downloads/Haushalt/OKS_3220/OKS_3220.zip. Zugriff am 01.10.2024
[29] niceshops GmbH: Gewindeeinsätze 3DJAKE. Internet: www.3djake.de/3djake/gewindeeinsaetze-50er-set. Zugriff am 01.10.2024
[30] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 2221 Blatt 2. Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2019
[31] Hellmig, R. J.; Dieckmann, V.: Leichtbau bei der Kunststoff-Direktverschraubung. ATZproduktion 4 (2011) 2, S. 26–31

Tobias Herrmann, M.Sc.
tobias.herrmann@ipa.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-1953
Foto: Fraunhofer IPA

Marvin Paes, B.Eng.
marvin.paes@ipa.fraunhofer.de
Foto: Autor

Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-09-12 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY