

Abschlussbericht

RpTDuro

Förderkennzeichen: KK5054609 LL1 – Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte
Forschung e.V.

Projektlaufzeit: 01.06.2022 – 31.05.2024

Projektpartner: Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
K&M Präzisionstechnik in Kunststoff und Metall GmbH

Der vollständige Bericht ist vertraulich

Inhaltsverzeichnis

1	Arbeitspaket 1	2
2	Arbeitspaket 2	4
3	Arbeitspaket 3	9
4	Arbeitspaket 4	11
5	Arbeitspaket 5	12
6	Arbeitspaket 6	14
7	Arbeitspaket 7	16
8	Arbeitspaket 8	18
9	Arbeitspaket 9	20
10	Arbeitspaket 10	22
11	Anhänge.....	24

1 Arbeitspaket 1

1.1 Erarbeitung der Anforderungen

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 liegt der Schwerpunkt auf der Definition und Optimierung der Anforderungen an die Formeinsätze, die für die nachfolgenden Prozessschritte notwendig sind. Dieses Arbeitspaket umfasst die enge Zusammenarbeit zwischen K&M Präzisionstechnik in Kunststoff und Metall GmbH (K&M) und Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. (HS), um die Spezifikationen und Bedürfnisse für die Formeinsätze präzise zu bestimmen und zu dokumentieren. Das Ziel ist es, sicherzustellen, dass die Formeinsätze den Anforderungen der jeweiligen Prozessschritte optimal entsprechen und die Gesamtqualität und Effizienz des Produktionsprozesses steigern.

Ein zentraler Bestandteil der Anforderungen ist die Haftung der Epoxy Molding Compound (EMC) Formmassen auf den metallischen Formeinsätzen. Diese Haftung ist entscheidend für die Integrität und Leistungsfähigkeit der Formeinsätze während der späteren Anwendung. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurden nach eingehender Beratung und Analyse durch die Lieferanten EMC-Materialien ausgewählt, die sowohl für die Spritzgusstechnologie (SPG) als auch für die Film-Assisted Molding Technologie (FAM) geeignet sind. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass die verwendeten EMC-Materialien Standardprodukte sind, die in großen Mengen verfügbar sind. Dies gewährleistet nicht nur eine hohe Verfügbarkeit, sondern auch Gleichmäßigkeit in der Qualität der Formeinsätze.

Zusätzlich zur Auswahl der EMC-Materialien wurde von K&M eine Materialanalyse durchgeführt. Hierbei wurden verschiedene Aspekte wie die thermischen und mechanischen Eigenschaften der Materialien, ihre Verarbeitbarkeit und ihre Langzeitstabilität berücksichtigt. Diese umfassende Analyse stellt sicher, dass die gewählten Materialien den hohen Anforderungen der Formeinsätze entsprechen und die gewünschten Leistungsmerkmale aufweisen.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Arbeitspakets war die Durchführung einer detaillierten Recherche zur möglichen Nachbearbeitung und Beschichtung der Formeinsätze. Hierbei wurden verschiedene Beschichtungstechnologien recherchiert, die dazu beitragen können, die Lebensdauer der Formeinsätze zu verlängern und deren Leistung zu optimieren. Diese Recherche umfasste sowohl die Bewertung von Standardbeschichtungen als auch innovativen Lösungen, die potenziell Vorteile für die spezifischen Anforderungen des Projekts bieten können. Die Ergebnisse dieser Recherche wurden systematisch dokumentiert und sind in Tabelle 1 zusammengefasst, die einen detaillierten Überblick über die untersuchten Beschichtungsoptionen und deren Eigenschaften bietet.

Tabelle 1: Dokumentation der Ergebnisse aus AP 1

EMC Material für SPG	EMC Material FAM	3D Druck Material	Mögliche Nachbearbeitungen/ Beschichtungen
Raschig EP 3681 E	Solepoxy OP 2000	Titan	Gleitschleifen
		AlSi10Mg	Sandstrahlen
		1.4542	Elektropolieren
			Thermisch entgraten
			Strömungsschleifen
			DLyte verfahren

Zur Unterstützung der Konstruktion bei HS hat K&M einen umfassenden Design-Katalog für das Selektive Laserschmelzen (SLM)-Verfahren erstellt. Dieser Katalog bietet detaillierte Informationen zu den grundlegenden Eigenschaften des SLM-Verfahrens und enthält spezifische Konstruktionsrichtlinien, die für die effiziente Gestaltung der Formeinsätze erforderlich sind. Besonders hervorgehoben werden die Bauteilorientierung und die Supportstrategien, die für die erfolgreiche Implementierung des Verfahrens von entscheidender Bedeutung sind. Der Design-Katalog ermöglicht es, die Formeinsätze bereits in der Konstruktionsphase so zu gestalten, dass sie sowohl den funktionalen Anforderungen als auch den drucktechnischen Anforderungen gerecht werden. Dieser Katalog kann aus den Anhängen 1-12 ab Seite 24 entnommen werden.

Die Anwendung des Design-Katalogs bringt mehrere signifikante Vorteile mit sich:

- **Kostenreduktion:** Durch die optimierte Konstruktion und Auswahl der Materialien können die Produktionskosten erheblich gesenkt werden. Die Vermeidung von überflüssigen Materialien und die Reduzierung von Nachbearbeitungsaufwänden tragen zur Kosteneffizienz bei.
- **Verbesserte Oberflächenqualität:** Eine präzise Auslegung der Formeinsätze gemäß den Konstruktionsrichtlinien führt zu einer deutlich verbesserten Oberflächenqualität. Dies ist besonders wichtig für die Endanwendung der Formeinsätze und wirkt sich positiv auf die Gesamtleistung aus.
- **Reduzierung von Nachbearbeitungsprozessen:** Die gezielte Vermeidung von Unterstützungselementen und die Optimierung der Bauteilorientierung verringern den Bedarf an aufwendigen Nachbearbeitungsprozessen. Dies spart Zeit und Ressourcen und erhöht die Effizienz des Produktionsprozesses.

Zusätzlich wurde ein detailliertes Schema entwickelt, das den typischen Prozessablauf bei der Herstellung der gedruckten Formeinsätze veranschaulicht (siehe Abbildung 1). Diese visuelle Darstellung dient als hilfreiches Werkzeug, um den komplexen Produktionsprozess zu verstehen und zu kommunizieren. Sie bietet eine klare Übersicht über die einzelnen Schritte, von der Konstruktion der Formeinsätze bis hin zur finalen Fertigung und Qualitätssicherung.

Insgesamt liefert das Arbeitspaket 1 wertvolle Erkenntnisse und eine Grundlage für die folgenden Schritte des Projekts. Durch die umfassende Analyse und die sorgfältige Dokumentation der Ergebnisse wird sichergestellt, dass die Formeinsätze den hohen Anforderungen des Produktionsprozesses entsprechen und zur Optimierung der Gesamtproduktion beitragen.

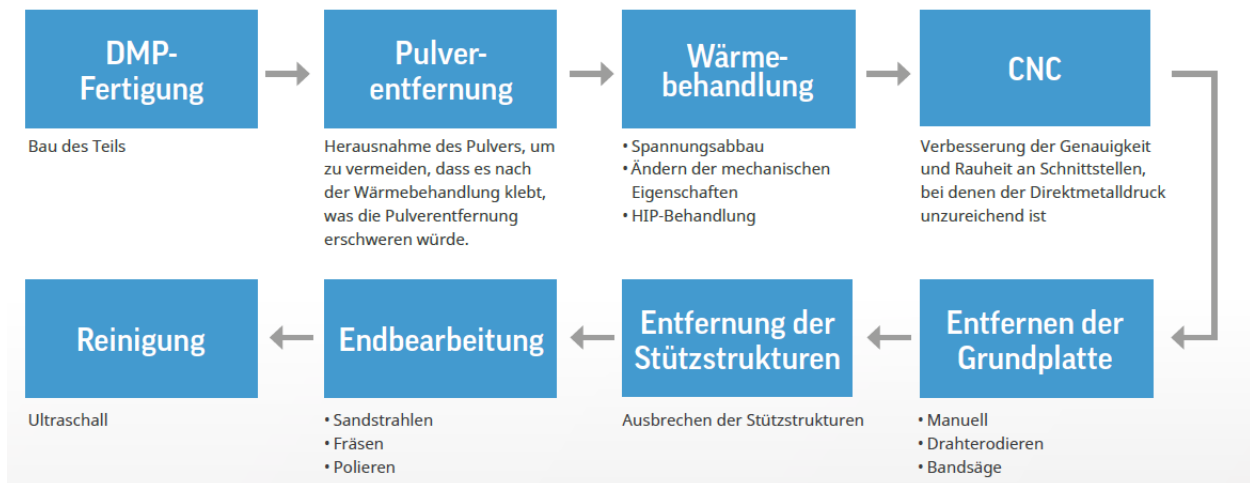


Abbildung 1: Typischer Prozessablauf

2 Arbeitspaket 2

2.1 Testsubstrat für die Haftungsuntersuchungen

Für die Untersuchungen zur Haftung von Epoxy Molding Compound (EMC) Formmassen auf metallischen Oberflächen wurde ein Testsubstrat bei Hahn-Schickard (HS) konstruiert und im STL-Format an K&M übermittelt. Dieser Schritt war notwendig, um die Haftungseigenschaften der EMC-Materialien auf verschiedenen metallischen Untergründen präzise zu evaluieren. Zusätzlich wurde von HS ein Formeinsatz für ein bestehendes HS-Stammwerkzeug entworfen und gefertigt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, links).

Im Rahmen der Erstbewertung stellte der Projektpartner K&M Testsubstrate aus verschiedenen metallischen Materialien her, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, rechts, zu sehen ist. Diese Testsubstrate wurden unter Verwendung identischer Druckparameter erstellt, um geeignete Materialien für die Haftung der EMC-Formmassen zu identifizieren. Hierbei wäre eine schlechte Haftung von Vorteil, da dann eine leichtere Entformung der Bauteile ermöglicht wird. Der Herstellungsprozess der Testsubstrate wurde auf Basis der Cone- und Wall-Support-Methoden durchgeführt. Es zeigte sich, dass der Einsatz von Solid-Support-Methoden nicht erfolgreich war, da die Testsubstrate aus Edelstahl und Titan nach der additiven Fertigungssignifikant verzogen sind. Die Solid-Support-Methoden führten zu einer unzureichenden Stabilität, was zu unerwünschtem Verzug der Testsubstrate führte.



Abbildung 2: links: Haftkegeleinsatz; rechts: gedruckte Testplättchen

Trotz der Anwendung der Cone- und Wall-Support-Methoden konnten Schrumpflinien nicht vollständig vermieden werden. Schrumpflinien entstehen typischerweise durch Volumenänderungen während des Druckprozesses oder durch Bohrungen, die zu Verformungen im Bauteil führen. In diesem Fall sind die Schrumpflinien auf die ungleichmäßige Wärmeabfuhr und die im Material entstehenden inneren Spannungen zurückzuführen. Darüber hinaus war es nicht möglich, den Verzug Abbildung 3 bei den Edelstahlsubstraten vollständig zu verhindern. Die detaillierten Ergebnisse und Beobachtungen sind in Abbildungen (Abbildung 4, Abbildung 5, Abbildung 6) dargestellt.



Abbildung 3: Testsubstrat Edelstahl Verzug

RpTDuro

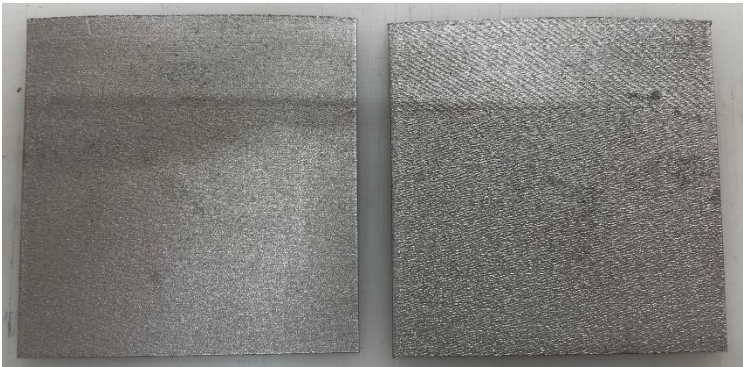


Abbildung 4: Testsubstrate Edelstahl



Abbildung 5: Testsubstrate Titan

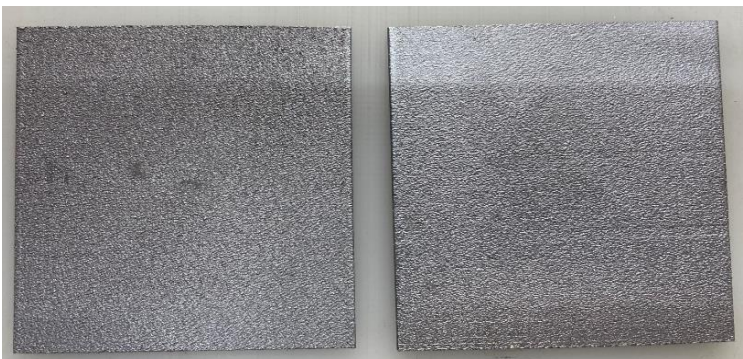


Abbildung 6: Testsubstrate Aluminium

Die Testsubstrate wurden von K&M mit einer Schichtstärke von 30 μm gedruckt. In dieser Phase des Projekts wurde ausschließlich der Support entfernt, um die grundlegenden Eigenschaften der Testsubstrate zu erfassen. Weitere Nachbearbeitungsschritte wurden zu diesem Zeitpunkt nicht durchgeführt, um eine unverfälschte Analyse der anfänglichen Beschaffenheit der Testsubstrate zu ermöglichen.

RpTDuro

Die Erkenntnisse aus diesen Tests sind entscheidend für die weiteren Schritte des Projekts, da sie wichtige Informationen zur Haftung und zur Materialauswahl liefern. Sie ermöglichen eine fundierte Bewertung der EMC-Formmassen und deren Anpassung an die Anforderungen der metallischen Formeinsätze.

2.2 Vermessung der gedruckten Einsätze

2.2.1 Mitaka-Lasermikroskop

Für die Bestimmung der Oberflächenrauheit der gedruckten Einsätze wurde das Mitaka-Lasermikroskop MLP-3 verwendet (siehe Abbildung 7). Dabei wurde die Rauheit der Oberfläche sowohl von der Vorderseite als auch von der Rückseite der Testplättchen gemessen. Die Rauheit wurde durch eine 2D-Profilmessung bestimmt. Das Mikroskop ist mit einem Drehtisch ausgestattet, der sich in x- und y-Richtung bewegen lässt. Auf diesem Tisch wurden die Testplättchen positioniert.

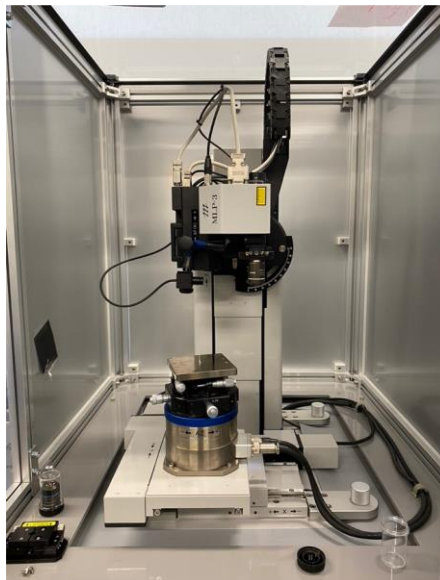


Abbildung 7: Mitaka MLP-3 Lasermikroskop

Die Auswertung der Messungen erfolgte mit dem Analyseprogramm Mitaka Map ST 7.4. Mit diesem Programm konnten Diagramme und Tabellen zu den Rauheitswerten erstellt werden. Einzelne Bereiche der Profilmessung wurden extrahiert, um die Oberflächenrauheit zu bestimmen. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Materialtyp und Oberflächenrauheit

Materialtyp	Oberflächenrauheit (Ra in μm)	
	Position 1	Position 2
Titan 1 Vorderseite	7,63	5,76
Titan 1 Rückseite	10,12	6,24

AlSi10Mg Vorderseite	11,03	8,87
AlSi10Mg Rückseite	10,00	7,10
1.4542 Vorderseite	5,84	6,86
1.4542 Rückseite	6,62	7,73
Titan 2 „Schrumpflinien“ Vorderseite	11,05	7,12
Titan 2 „Schrumpflinien“ Rückseite	7,32	6,86

2.2.2 Abmusterung der Testplättchen

Zur Erstevaluation wurde der Haftkegeleinsatz in das Stammwerkzeug der FAM-Anlage UniStar eingebaut. Die gedruckten Testplättchen wurden nacheinander als Einlegeteil in das Werkzeug eingelegt und abgemustert.

Nach Vorversuchen für eine Parameterstudie wurden die am besten geeigneten Prozessparameter ausgewählt und für die folgenden Versuche genutzt. Die Abmusterung erfolgte dann mit folgenden Parametern:

- Werkzeugtemperatur: 170°C
- Transferzeit: 18,9 s
- Transferdruck: 8 bar
- Aushärtungsdruck: 30 bar

Ein Pellet wurde in die dafür vorgesehene Vorratswanne eingelegt, und der Durchlauf wurde gestartet. Während der Transferzeit schließt das Werkzeug, der Kolben fährt herunter und drückt mit dem Transferdruck die zuvor eingelegten Pellets in die Kavität. In der Aushärtephase des Kunststoffes wird der eingestellte Aushärtungsdruck von 30 bar gehalten. Das fertige Bauteil kann nun entnommen werden. Insgesamt wurden mit dem Werkzeugeinsatz 8 Bauteile hergestellt.

Nach dem Aufbau des Haftkegelwerkzeugs wurden die Testsubstrate in das Werkzeug eingelegt und mit dem Material OP 2000 von Solepoxy abgemustert. Es zeigte sich, dass das EMC-Material auf allen Testsubstraten stark haftete was durch manuelle Scherversuche getestet wurde. Deshalb wurde auf weitere Haftfestigkeitsuntersuchungen verzichtet (siehe Abbildung 8).

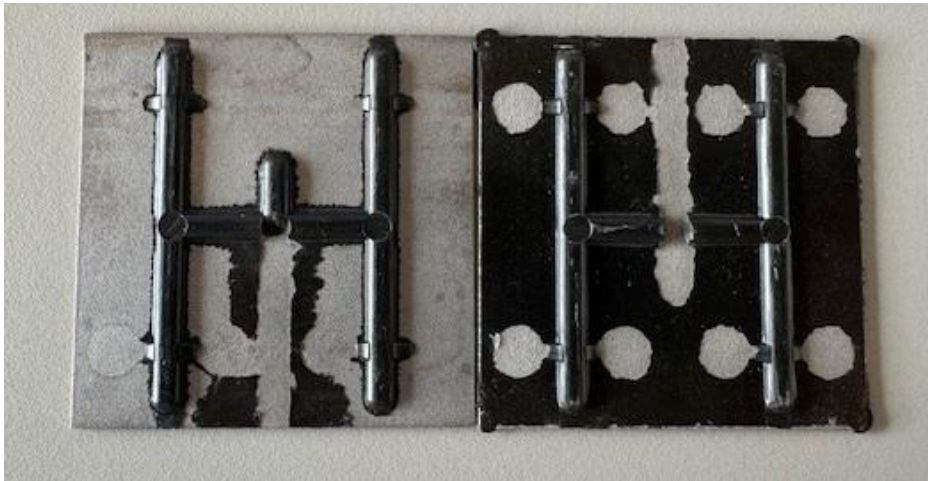


Abbildung 8: Testplättchen nach manueller Charakterisierung der Haftfestigkeit.

3 Arbeitspaket 3

In diesem Arbeitspaket wurde das 3D-Druckverfahren auf Basis der Ergebnisse aus AP2 hinsichtlich der zu erzielenden Oberflächenstruktur und Rauheit optimiert. Ziel war es, eine für die EMC-Verarbeitung optimierte Oberfläche zu erzeugen. Dazu wurden neue Testsubstrate mit geänderter Druckstrategie nach dem Design-Katalog aus AP1 gedruckt.

Bei der Eingangskontrolle wurden die Oberflächenrauheiten der Testsubstrate ebenfalls mit dem Mitaka-Lasermikroskop MLP-3 bei HS vermessen. Die einzelnen Messwerte können aus Tabelle 3 entnommen werden. Als Fazit der Optimierung zeigt sich, dass die Rauheitswerte gesenkt werden konnten. Besonders bei dem Material 1.4542 konnte eine deutliche Verringerung erreicht werden.

Tabelle 3: Materialtyp und Oberflächenrauheit

Materialtyp	Oberflächenrauheit (Ra in μm)	
	Position 1	Position 2
Titan 1 Vorderseite	6,82	4,59
Titan 1 Rückseite	9,98	7,88
1.4542 Vorderseite	3,11	3,89
1.4542 Rückseite	4,12	4,87

Untersuchung und Ergebnisse zur Haftfestigkeit

Mit den optimierten Substraten aus dem AP 2 wurden Haftfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt.

Da keine einheitliche DIN-Norm für die Haftfestigkeitsuntersuchung von EMCs auf Oberflächen existiert, wurde im Rahmen dieser Untersuchung eine spezifische Prüfvorschrift entwickelt. Ziel war es, die Haftfestigkeit durch Messung der Scherkraft auf einen zylindrischen Prüfkörper zu ermitteln und als Scherspannung darzustellen. In Abbildung 4 ist das Prüfverfahren schematisch dargestellt.

Ein Schermeißel bewegt sich mit einer Höhe von 50 µm bis 500 µm und einer Schergeschwindigkeit von 50 µm/s bis 100 µm/s auf den Prüfkörper, bis dieser versagt und von der Oberfläche abbricht. Die dabei gemessene Kraft F wird gemäß Gleichung 3.1-1 verwendet, um die Scherspannung σ_{scher} zu berechnen. Die Scherfläche A_{scher} hat einen Radius r von 2,5 mm, und der Prüfkörper besitzt eine Höhe h von 2 mm.

$$\sigma_{\text{scher}} = \frac{F}{A_{\text{scher}}} = \frac{F}{\pi r^2} \quad \text{Gl.3.1-1}$$

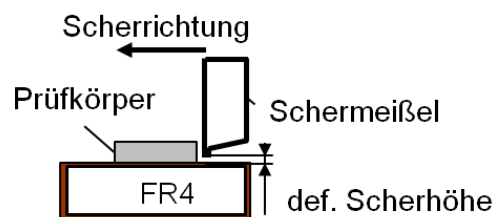


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Haftfestigkeitsuntersuchung

Die Haftfestigkeitsuntersuchung ergab, dass das Testsubstrat aus 1.4542 eine geringe Anhaftung mit dem EMC aufwies (Tabelle 4). Diese Kombination wird im späteren Verlauf des Projekts für die 3D-gedruckten Einsätze in der FAM-Technologie verwendet.

$$A_{\text{scher}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 5\text{mm}^2}{4} = 36,32\text{N} \quad \text{Gl-3.1-2}$$

Tabelle 4: Ergebnisse zur Scherspannung

Materialtyp	Scherspannung (σ_{scher} in N/mm)
Titan 1	21,21
AlSi10Mg	18,15
1.4542	2,14
Titan 2 „Schrumpflinien“	14,5

Mit diesen Ergebnissen konnten die Vorversuche abgeschlossen werden. Das Material 1.4542 hat sich als geeignet für die additiv gefertigten Formeinsätze erwiesen und wird für die weiteren Versuche der Elektronikverkapselung verwendet.

4 Arbeitspaket 4

In diesem Arbeitspaket wurde ein elektronisches Bauteil entwickelt, das im Verlauf des Projekts mittels der FAM-Technologie verkapselt werden soll. Als Substratträger wurde eine Leiterplatte ausgewählt (Abbildung 10), die eine Glasübergangstemperatur von mindestens 170°C aufweist und einen vierlagigen Aufbau besitzt. Diese Wahl wurde getroffen, um sicherzustellen, dass es bei der Duroplastverarbeitung, bei Temperaturen zwischen 160 und 180°C, nicht zu einer Verformung des Substratträgers aufgrund von Temperatureffekten kommt. Für die Verkapselung wurde eine Kuppelgeometrie gewählt, um die Ergebnisse später auf Optikanwendungen übertragen zu können (Abbildung 11).

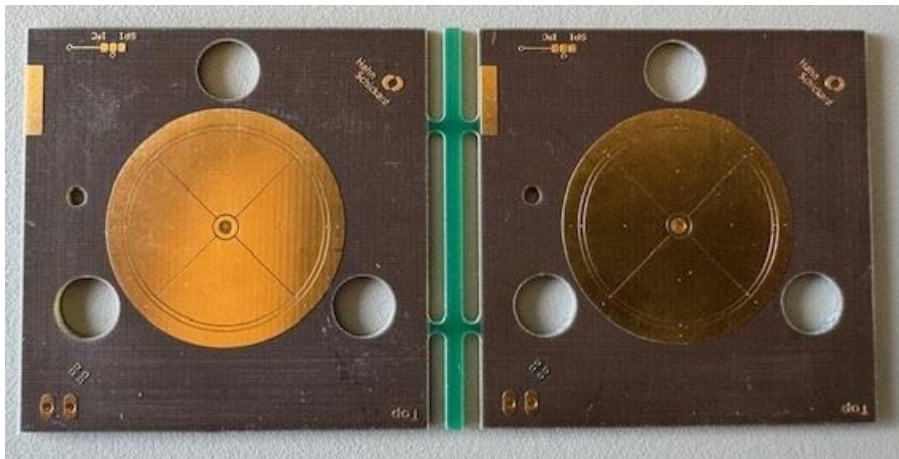


Abbildung 10: Leiterplatte für die Verarbeitung im FAM Prozess

Des Weiteren wurden in diesem Arbeitspaket ein Stammwerkzeug für die Elektronikverkapselung entwickelt, konstruiert und gefertigt (siehe Abbildung 12). Zur Fertigung der einzelnen Komponenten wurden CAD-Modelle und CAM-Daten erstellt. Die Herstellung erfolgte in der Werkstatt des HS-Instituts. Für das Stammwerkzeug wurde Werkzeugstahl 1.2709 verwendet. Der modulare Aufbau des Werkzeugs ermöglicht einen einfachen Austausch der Formeinsätze. Die Formeinsätze können im neuen Stammwerkzeug während des Herstellungsprozesses durch Lösen der vier Schrauben ausgetauscht werden. Dies ermöglicht eine erhebliche Zeitersparnis beim Austausch der Einsätze und erlaubt es, mehrere Iterationsschritte in kurzer Zeit zu untersuchen. Während der Konzeptions- und Konstruktionsphase wurde HS von K&M hinsichtlich 3D-Druck-Technologie unterstützt.

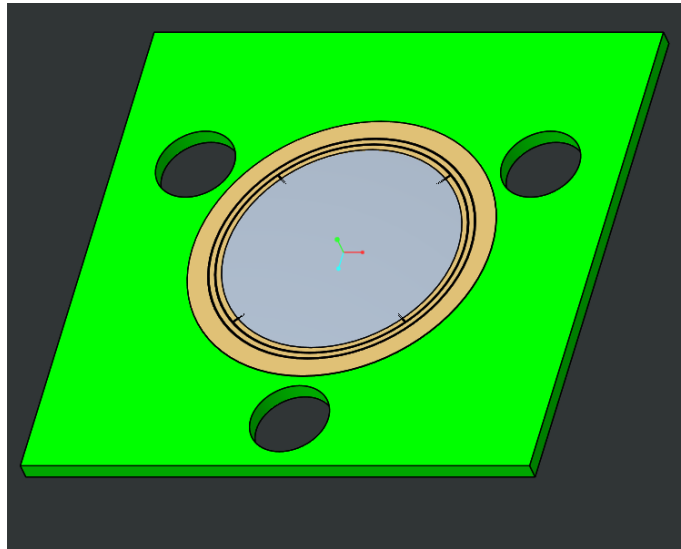


Abbildung 11: Bauteilkonzept: grün= Leiterplatte; grau= EMC

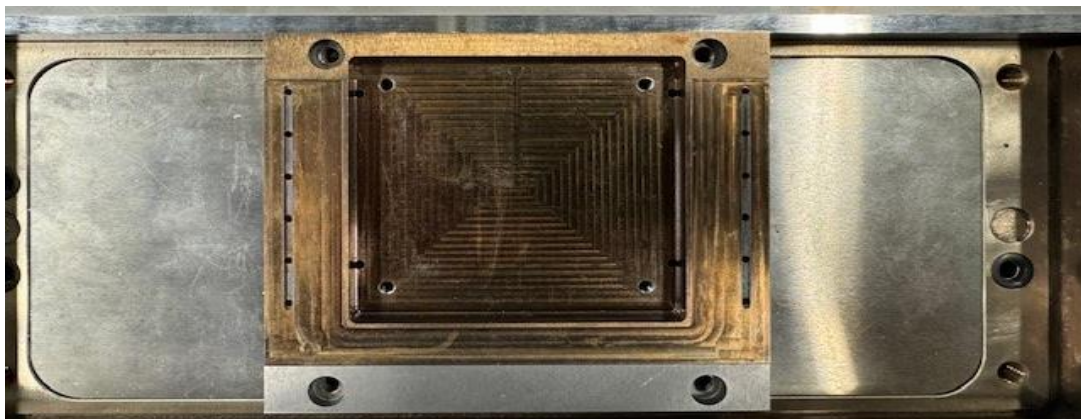


Abbildung 12: Stammwerkzeug FAM-Technologie

5 Arbeitspaket 5

Optimierung und Herstellung generativ gefertigter Formeinsätze für die FAM-Technologie

Die Konstruktion des Werkzeugeinsatzes wurde mithilfe des CAD-Programms Creo Parametric 6.0 durchgeführt. Zunächst wurde ein detailliertes CAD-Modell des Werkzeugeinsatzes erstellt und dazugehörige technische Zeichnungen angefertigt. Die Baugruppe des Stammwerkzeugs, in die der konstruierte Werkzeugeinsatz integriert werden sollte, wurde in AP 4 konstruiert und

RpTDuro

aufgebaut. Der Werkzeugeinsatz für das Stammwerkzeug der FAM-Anlage besteht aus zwei Teilen, die zusammengefügt werden: einem rechteckigen Rahmen und einem runden Insert, das in den Rahmen eingelegt wird und an der Oberseite eine Kavität aufweist.

Es wurden drei CAD-Modelle erstellt:

- 1x Rahmen.prt
- 1x Insert.prt
- 1x Moldkappe.prt

Frühere Entwürfe der Konstruktion beinhalteten unterschiedliche Konzepte für das Vakuumsystem. Der Rahmen wurde nahezu quadratisch mit den Maßen 56,9 mm x 59,9 mm konstruiert und verfügt an den Außenkanten über zurückgesetzte Flächen. Diese schaffen Spalte, in die die Vakuumkanäle münden, um im Werkzeug eingebaut das Ansaugen der Folie im FAM-Prozess zu ermöglichen. Abbildung 13 zeigt den zweiteiligen Aufbau.

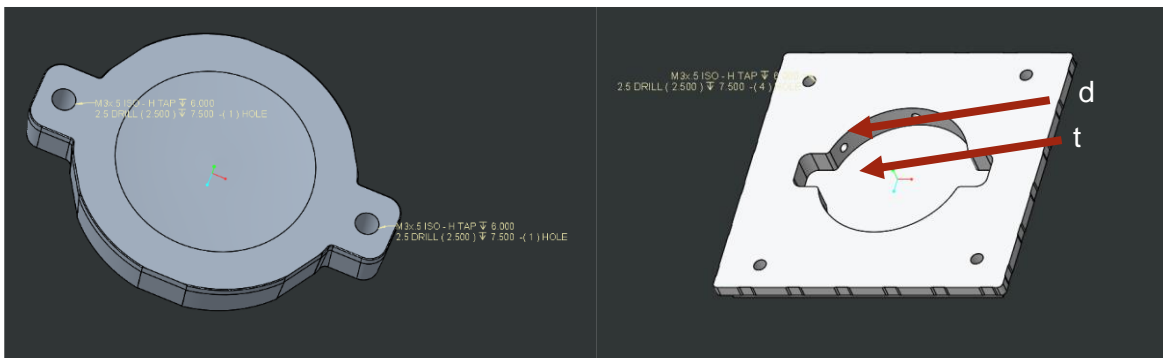


Abbildung 13: links: Insert; rechts: Rahmen

An der Oberseite des Rahmens befindet sich eine 5,1 mm tiefe (t) Tasche mit einem Durchmesser (d) von 30 mm. Seitlich der Tasche sind rechts und links jeweils Aussparungen vorhanden, die als Ansätze für das Insert dienen und dieses gegen Drehbewegungen fixieren. Rund um die große Bohrung sind sechs kleine Bohrungen eingebracht, die Teil des integrierten Vakuumsystems im Werkzeug sind. Diese kleinen Bohrungen haben einen Durchmesser von 2,2 mm und verlaufen zunächst parallel zur Oberfläche, bevor sie im 90°-Winkel nach unten abbiegen und an der Unterseite des Rahmens austreten. Der Rahmen hat insgesamt eine Bauteilhöhe von 5,6 mm.

Das Insert, wie in Abbildung 14 dargestellt, ist ein zylinderförmiges Bauteil mit einer Höhe von 5,1 mm und einem Durchmesser von 30 mm. Es verfügt über zwei Ansätze zur Fixierung im Rahmen, die in einem Winkel von 180° zueinander angeordnet sind. In diesen Ansätzen befinden sich Bohrungen, in die nachträglich Gewinde geschnitten werden können. Dadurch kann das Insert bei Bedarf mit zwei Schrauben leicht aus dem Rahmen entfernt werden. Der Abstand zwischen Insert und Rahmen beträgt 0,1 mm, was einem Mittelwert von 0,5 mm

RpTDuro

entspricht. Zur Erleichterung der Montage ist das Insert ab einer Distanz von 1 mm zur Oberseite konisch mit einem Winkel von 5° ausgeführt Abbildung 15.

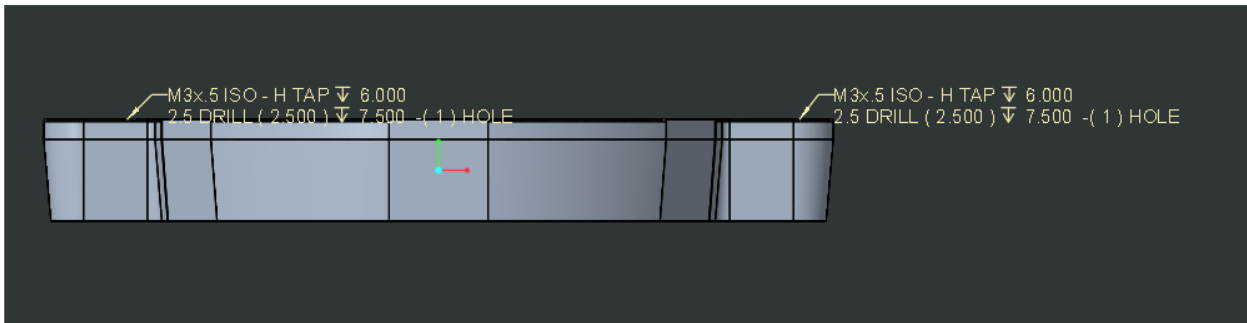


Abbildung 14: Front-Ansicht des Inserts

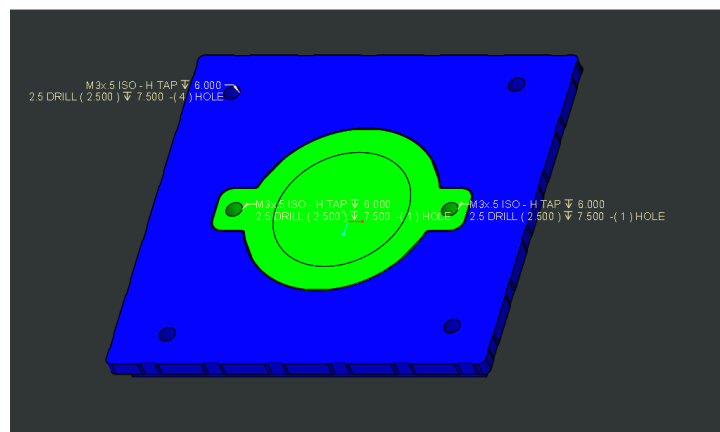


Abbildung 15: Baugruppe, bestehend aus Rahmen und Insert

6 Arbeitspaket 6

Konstruktion und Fertigung

In diesem Arbeitspaket wurde ein modulares Stammwerkzeug für die Verarbeitung von EMC Formmassen im Duroplastspritzguss (DSG) entwickelt, konstruiert und gefertigt. Die Umsetzung dieses Arbeitspakets beinhaltete mehrere wesentliche Design- und Fertigungsaspekte, die auf die spezifischen Anforderungen der Duroplastverarbeitung abgestimmt wurden. Im Folgenden sind die wichtigsten Realisierungen und deren Vorteile zusammengefasst:

- **Rahmenplatte mit Aussparung:** Die Konstruktion des Stammwerkzeugs umfasst eine spezielle Rahmenplatte, die mit einer gezielten Aussparung versehen wurde. Diese Aussparung dient dem Zweck, die Zugangsmöglichkeiten zu den Formeinsätzen zu erleichtern und eine effizientere Handhabung der Wasserschläuche zu ermöglichen, die

für die Temperierung der Formeinsätze notwendig sind. Die Rahmenplatte ist mit vier Bohrungen ausgestattet, die für die Wasserzufuhr zur Temperierung der Platte verwendet werden. Diese Maßnahme stellt sicher, dass die Temperaturkontrolle während des Spritzgussprozesses präzise durchgeführt werden kann, was für die Qualität der Duroplastverkapselung von entscheidender Bedeutung ist.

- **Modularer Aufbau der Auswerferplatte:** Die Auswerferplatte wurde in zwei separate Teile gegliedert, was eine flexible und zeitsparende Handhabung ermöglicht. Durch diese Konstruktion kann der Maschinenbediener die Formeinsätze und die modifizierte Auswerferplatte im eingebauten Zustand des Werkzeugs einfach austauschen. Der Austausch erfolgt durch das Lösen von Schrauben, ohne dass das gesamte Werkzeug von der Spritzgussmaschine abgebaut oder vollständig zerlegt werden muss. Dies reduziert signifikant die Umrüstzeiten und erhöht die Effizienz des Fertigungsprozesses. Abbildung 16 veranschaulicht den modularen Aufbau und die einfache Handhabung der Auswerferplatte.
- **Zugang der Wasserschläuche:** Die Rahmenplatte ist so gestaltet, dass die vier Aussparungen eine effiziente Führung der Wasserschläuche zu den Formeinsätzen ermöglichen. Diese Aussparungen sind so positioniert, um den Zugang der Schläuche zu den relevanten Bereichen der Formeinsätze zu optimieren. Dies trägt zur verbesserten Kühlung und Temperaturregulierung während des Produktionsprozesses bei, was wiederum die Verarbeitungsqualität und die Lebensdauer der Werkzeuge positiv beeinflusst.

Die übrigen Komponenten des Werkzeugs bleiben unverändert. Die durch die vorgenommene Konstruktion und Fertigung erzielten Anpassungen und Verbesserungen bieten eine erhebliche Zeitersparnis in der Praxis und optimieren den gesamten Produktionsablauf.

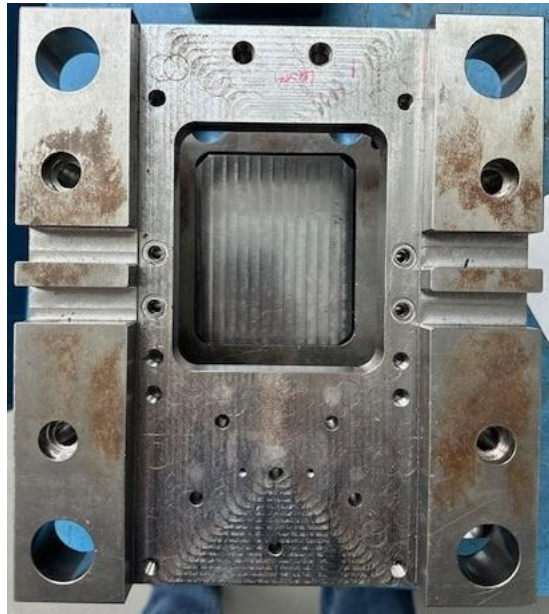


Abbildung 16: Modifizierte Rahmen- und Auswerferplatte

7 Arbeitspaket 7

7.1 Konstruktion und Fertigung der Formeinsätze

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein Bauteilkonzept (Demonstrator) für das Package entwickelt, welches für den Spritzguss abgestimmt wurde (Abbildung 17). Der Demonstrator besteht aus einer Leiterplatte und Ankontaktierungselementen, die im Spritzgussprozess mittels EMC vollständig verkapselt werden sollen. Die Konstruktionsrichtlinien für das Bauteil basieren auf den gesammelten Erfahrungen der Gruppen aus den Bereichen Simulation, Werkzeugbau und Konstruktion bei HS.

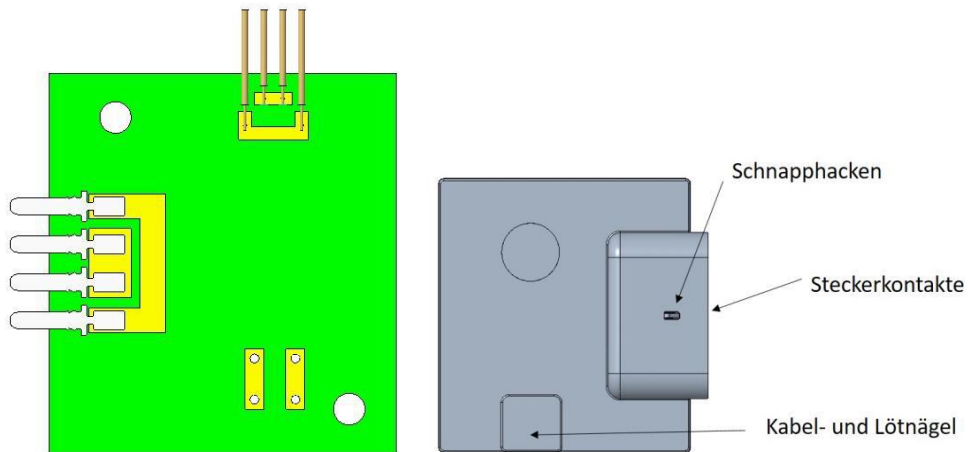


Abbildung 17: links: bestückte Leiterplatte; rechts: Bauteilkonzept

7.2 Werkzeugfertigung

Die Fertigung der einzelnen Werkzeugkomponenten erfolgte in der Werkstatt von HS (Abbildung 18).

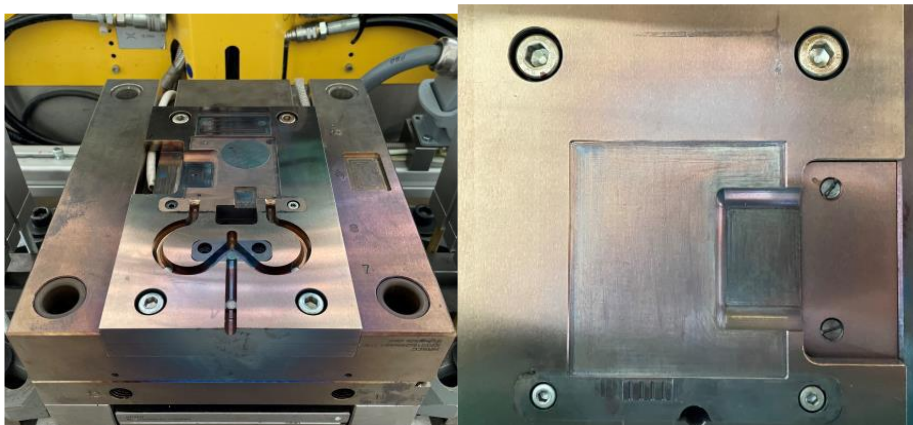


Abbildung 18: links: Auswerferseite; rechts: Düsenseite

Zusätzlich zu den Formeinätzen wurde noch ein weiteres zweiteiliges Einsatz gefertigt, Abbildung 19. Diese Einsätze werden im zusammengebauten Zustand im Einlegeprozess in das Spritzgusswerkzeug eingelegt. In einem der beiden Einsätze wurde die Geometrie der Steckerkontakte hineingefräst, damit diese dort eingelegt und im Spritzgusswerkzeug positioniert werden können (Abbildung 19).

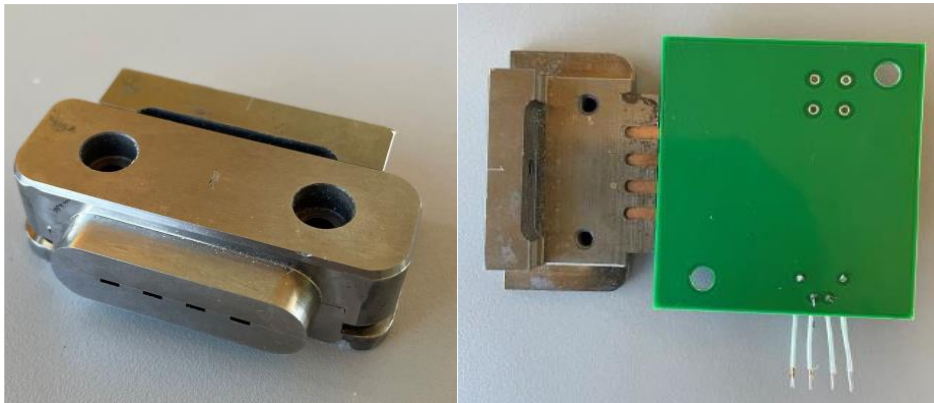


Abbildung 19: Zweiseitiger Einsatz zur Realisierung der Umspritzung am Steckerkontakt

Um die konturnahe Temperierung zu untersuchen wurde der Einsatz nochmals aus 1.4542 im 3D-Druck hergestellt (Abbildung 20).

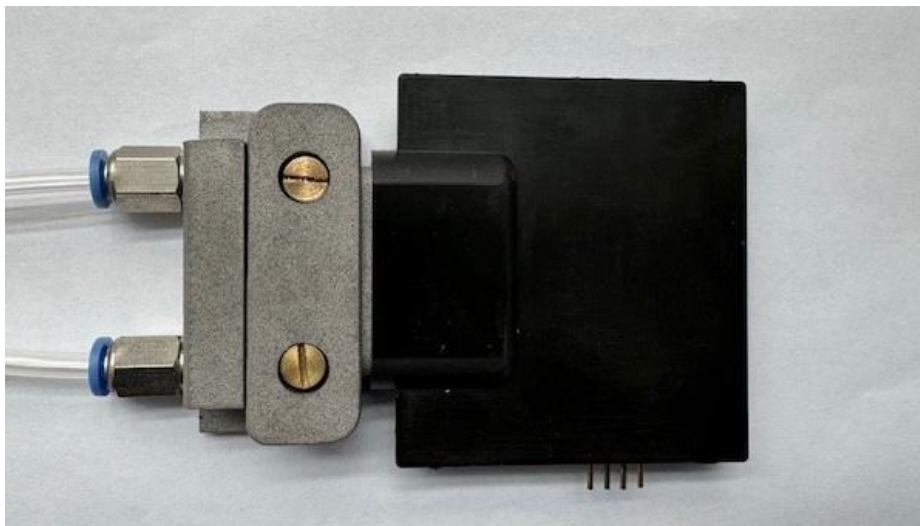


Abbildung 20: Schieberelement aus dem 3D Druck mit konturnaher Temperierung

8 Arbeitspaket 8

8.1 Entwicklung des FAM-Prozesses

Die Parameter für den FAM-Prozess mit den generativ gefertigten Formeinsätzen werden am HS für die in AP 1 ausgewählten EMC-Formmassen ermittelt.

Für die Abmusterung wurden folgende Parameter eingestellt:

- Werkzeugtemperatur 170°C
- Transferzeit: 18,9 s

RpTDuro

- Transferdruck: 8 bar
- Aushärtungsdruck: 30 bar

8.2 Abmusterung der Bauteile:

Zur Abmusterung wurden das Insert und der Rahmen zusammen in das Stammwerkzeug an der FAM-Anlage eingebaut.

Zur Abmusterung wurden das Insert und der Rahmen zusammen in das Stammwerkzeug an der FAM-Anlage eingebaut. Es wurde an der oberen Werkzeughälfte die 100 µm dicke Folie verwendet und an der unteren Werkzeughälfte die 50 µm dicke Folie. Zur Verarbeitung wurde der Duroplast EME-G770 Type E in Form von Pellets verwendet. Zuerst wurden zwei Pellets in die dafür vorgesehene Vorratswanne eingelegt und der Durchlauf wurde gestartet. Das Werkzeug schließt, während der Transferzeit fährt der Kolben herunter und drückt mit dem Transferdruck die zuvor eingelegten Pellets in die Kavität. Während der Aushärtephase des Kunststoffs wurde der entsprechend eingestellte Aushärtungsdruck von 30 bar gehalten. Nach dem Aushärten des Kunststoffs öffnet das Werkzeug, die Vakuumsaugung schaltet ab und die Folie löst sich vom Werkzeug. So kann das fertige Bauteil entnommen werden.

Das dabei hergestellte Bauteil kann aus Abbildung 21 entnommen werden.



Abbildung 21: Bauteil aus FAM mittels gedruckten Einätzen

9 Arbeitspaket 9

9.1 Charakterisierung FAM Prozess

9.2 Vermessung der gedruckten Werkzeugeinsätze

Bevor der gedruckte Werkzeugeinsatz für Versuche verwendet und in die FAM-Anlage eingebaut wurde, wurden die beiden gelieferten Einzelteile vermessen. Hauptsächlich wurden die Oberflächenrauheit und die Kuppelgeometrie erfasst und dokumentiert. Die Bauteile wurden vom Lieferanten nicht speziell nachbearbeitet; lediglich die Stützstruktur wurde entfernt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen präsentiert und interpretiert, die mit dem WLI (Weißlichtinterferometer), dem Lasermikroskop und der 3D-Kamera durchgeführt wurden.

9.3 Bestimmung der Rauheit durch WLI

Die Tabelle 5 zeigt die gemessenen Ra-Werte in Mikrometern (μm). Es wurden am Insert sowie an den Proben an jeweils zwei Stellen Messungen vorgenommen. Die Messstellen 1 und 2 sind in Abbildung 22 entsprechend markiert.

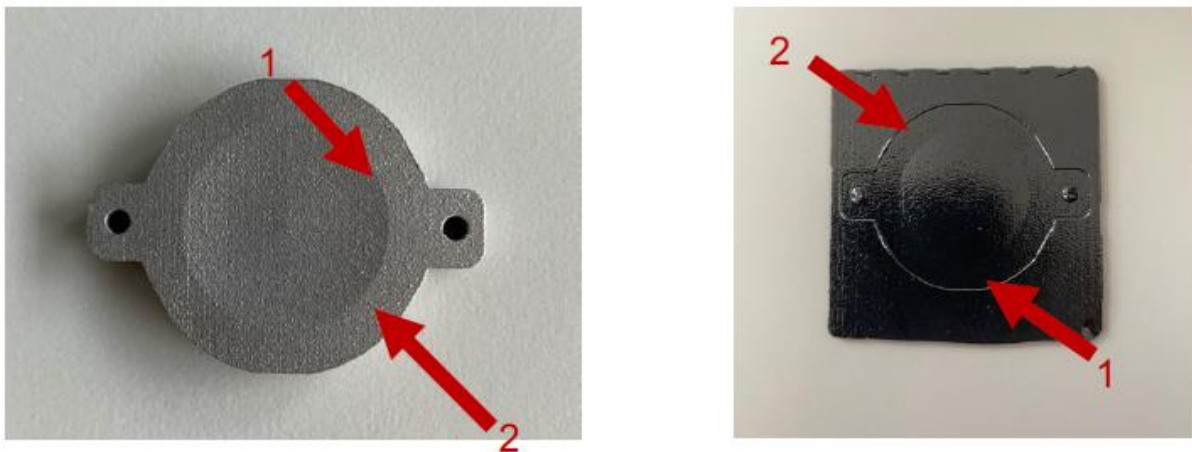


Abbildung 22: links: WLI-Messung Insert; recht: WLI-Messstellen Probe

Tabelle 5: Ergebnisse der Messung durch WLI

Wert	Probenreihe und Probennummer	Messstelle	Ra [μm]
1	Insert	Kavität Rand (1)	3,21
2	Insert	Kavität mittig (2)	3,55
3	Probenreihe 2 – Probe 1	Kavität (1)	0,66
4	Probenreihe 2 – Probe 1	Ebene Stelle (2)	1,7
5	Probenreihe 2 – Probe 5	Kavität (1)	2,25
6	Probenreihe 2 – Probe 5	Ebene Stelle	3,14
7	Probenreihe 3 – Probe 1	Kavität (1)	0,95
8	Probenreihe 3 – Probe 1	Ebene Stelle (2)	0,61
9	Probenreihe 3 – Probe 2	Kavität (1)	0,78
10	Probenreihe 3 – Probe 3	Ebene Stelle (2)	0,83

Die am Insert gemessenen Ra-Werte liegen zwischen 3,21 μm und 3,55 μm . Laut Datenblatt des Anbieters für den verwendeten Werkzeugstahl 1.2709 sind Ra-Werte von 4 bis 7 μm angegeben. Wie erwartet, ist die Oberfläche der gedruckten Bauteile relativ rau. Die angegebenen Werte von Ra 4-7 μm gelten für Bauteile direkt nach dem Bauprozess. Die Teile, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, wurden nach dem Bauprozess kurz sandgestrahlt und gleitgeschliffen, was zu den Abweichungen von Ra 0,45 μm bis Ra 0,79 μm führen kann. Zum Vergleich zeigen Werte aus der Literatur, dass durch konventionelle Fertigungsverfahren wie Drehen oder Fräsen bearbeitete Oberflächen Ra-Werte bis zu 0,8 μm erreichen können. Somit ist die Oberfläche, die durch additive Fertigung hergestellt wurde, etwa fünfmal rauer.

Die gemessenen Werte für die Proben sind teils ungewöhnlich niedrig, was möglicherweise an unzureichenden Messpunkten liegt. Bei einigen Messungen konnte kein optimales Interferenzmuster gefunden werden. Gründe hierfür könnten die Wahl des Objektivs, das effektive Gesichtsfeld oder die unzureichende Eignung des Materials für die Wellenlänge des Lichtes bei WLI-Messungen sein. Die Werte 4, 5 und 6 liegen zwischen Ra 1,7 μm und Ra 3,14 μm . Diese Werte stammen aus der Probenreihe 2, bei der eine 50 μm dicke Folie im Verarbeitungsprozess an der FAM-Anlage verwendet wurde. Wie erwartet, weisen diese Proben aufgrund der Folie eine geringere Rauheit auf als das Insert. Die Werte der Probenreihe 3, bei der eine 100 μm dicke Folie verwendet wurde, sind niedriger als die der Probenreihe 2, was den Erwartungen entspricht.

9.4 Bestimmung des Radius der Moldkappe Mitaka

Bei der Auswertung der 2D-Profilmessungen, die mit dem Mitaka Lasermikroskop durchgeführt wurden, konnte unter anderem der Radius der Moldkappe ermittelt werden. Dazu wurde eine 2D-Profilmessung mittig am Bauteil aufgenommen. Anschließend wurde an der Messkurve durch das Setzen von zwei Punkten eine Linie angepasst, die in Form eines Kreisbogens entlang der gemessenen Kurve verläuft. Diese Linie wurde mittels der Methode der kleinsten

RpTDuro

Quadrate optimiert, wodurch der Radius dieser Linie näherungsweise dem Radius der Moldkappe entspricht.

Tabelle 6 zeigt die durch Näherung bestimmten Radien der Proben und des Inserts sowie den im CAD-Modell festgelegten Radius zum Vergleich. Am Insert wurden aufgrund der zwei durchgeführten Messungen zwei Radien ermittelt.

Tabelle 6: Radien des Inserts und der gemessenen Proben

Probe	CAD	Insert	Insert	1	5	10	1	2	3
Probenreihe	-	-	-	2	2	2	3	3	3
Radius [mm]	85	86,04	88,83	78,23	91,27	82,28	88,97	80,97	87,86

10 Arbeitspaket 10

10.1 Charakterisierung DSG Prozess

In diesem Kapitel wurde die Charakterisierung der verkapselten Komponenten, die mittels Epoxy Molding Compound (EMC) hergestellt wurden, untersucht. Die Untersuchung konzentrierte sich auf gefräste und gedruckte Einsätze, die in das Werkzeug eingelegt wurden, um Kunststoffbauteile zu fertigen. Die Charakterisierung erfolgte primär durch Sichtprüfung der verkapselten Einsätze.

- **Gefräste Einsätze:** Bei der Sichtprüfung der gefrästen Einsätze wurden mehrere Mängel festgestellt. Insbesondere waren Beschädigungen an den Steckerkontakten sichtbar, die auf eine unzureichende Präzision und Nachbearbeitung der gefrästen Einsätze hindeuten. Darüber hinaus wies das Kunststoffbild bei der Herstellung mit den gefrästen Einsätzen Inhomogenitäten auf, was auf Unregelmäßigkeiten im Material oder im Fertigungsprozess hinweist. Dies kann nur durch optimierte Temperierung verbessert werden. Diese Mängel könnten die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der verkapselten Komponenten negativ beeinflussen (Abbildung 23, links).
- **Gedruckte Einsätze:** Im Vergleich dazu wurden bei den gedruckten Einsätzen bessere Ergebnisse erzielt. Die gedruckten Einsätze erhielten eine konturnahe Temperierung, bei der sie gezielt temperiert und separat vom Werkzeug angesteuert wurden. Diese präzise Temperierung führte zu einer gleichmäßigeren und hochwertigeren Verarbeitung des Materials. Die Sichtprüfung zeigte, dass die gedruckten Einsätze keine nennenswerten Beschädigungen aufwiesen und ein homogeneres Kunststoffbild zeigen. Dies deutet auf eine bessere Materialqualität und eine genauere Fertigung hin, was zu insgesamt besseren Ergebnissen im Vergleich zu den gefrästen Einsätzen führte (Abbildung 23, rechts).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die gedruckten Einsätze durch die gezielte Temperierung und die damit verbundene präzisere Verarbeitung überlegen waren. Diese Erkenntnisse verdeutlichen die Vorteile der additiven Fertigungstechnologie bei der Herstellung von Einsätzen für die Kunststoffverarbeitung.



Abbildung 23: links: Bauteil mit gefrästen Einsätzen hergestellt; rechts: Bauteil mit gedrucktem Einsatz und konturnaher Temperierung hergestellt

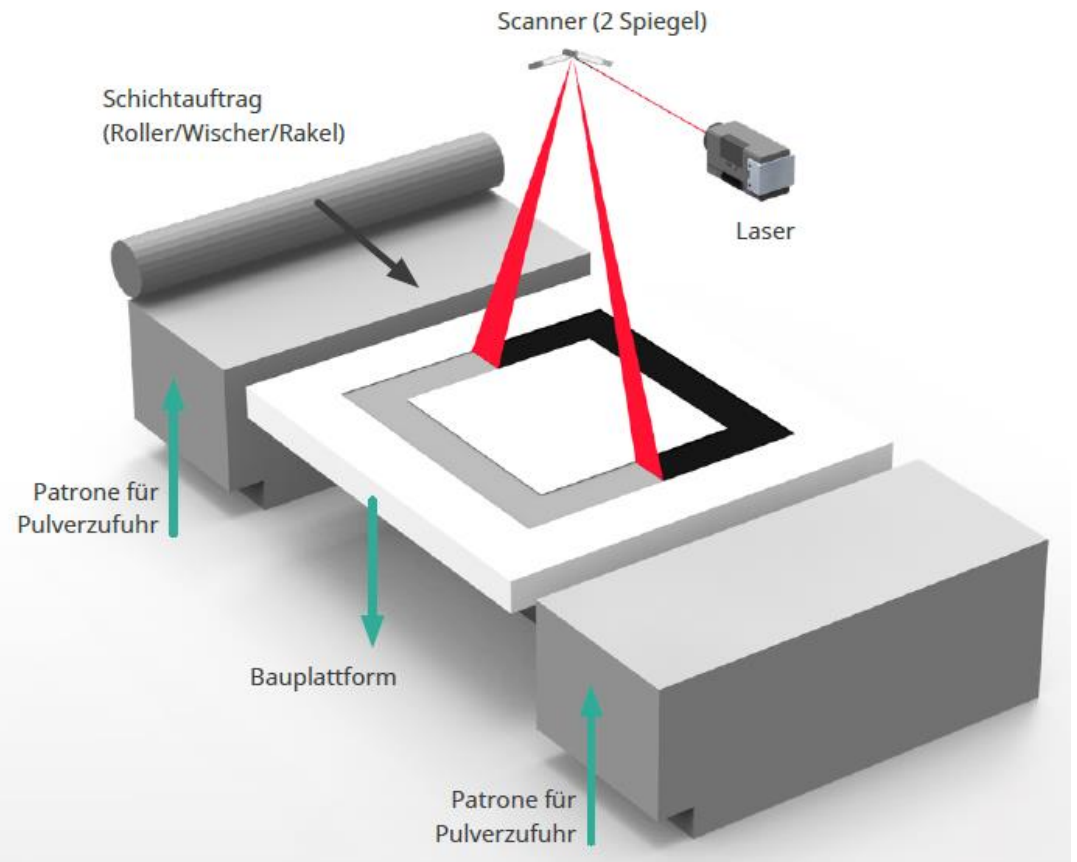
11 Anhänge

Anhang 1: Der Druckprozess

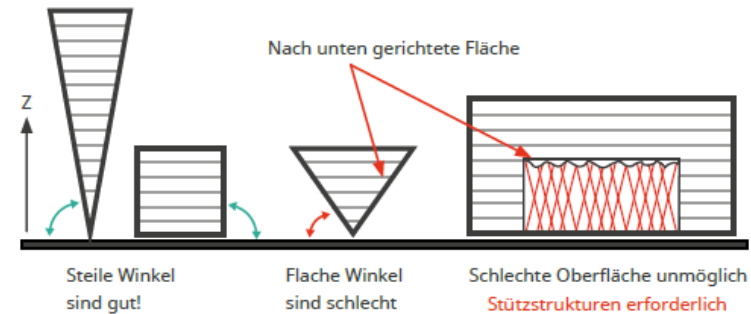
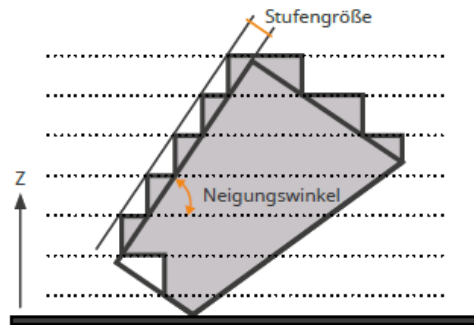
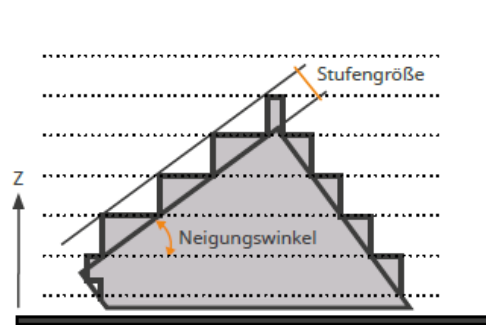
- Keine Bindemittel, keine Zusätze
- Hochleistungslaser -> vollständig dichte Teile (bis zu > 99,9 %)
- Hohe Genauigkeit (Schichten bis herunter zu 10 µm)
- Prozessphysik mit extrem schneller Abkühlung
- Einzigartige superfeine Mikrostruktur
- Ausgezeichnete mechanische Eigenschaften
- Direktes Drucken von CAD-Modellen



Gefüge von LaserForm Ti Gr5 (A) wie gebaut, d.h. direkt aus dem DMP-Drucker entnommen, ohne nachfolgendes Spannungsfreiglühen oder weitere Wärmebehandlung zur Verbesserung des Gefüges.



Anhang 2: Auswirkungen auf die Qualität



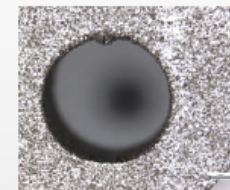
Die Oberflächenqualität beim Direktmetalldruck ist abhängig von der Ausrichtung der Oberfläche

Der Treppenstufeneffekt, der allen additiven Schichtherstellungstechnologien eigen ist, kann durch den Aufbau von stärker vertikalen oder aber perfekt horizontal ausgerichteten Flächen verringert werden.

Auf nach oben gerichteten Flächen ist dieser Effekt deutlich sichtbar und wichtig.

Auf nach unten gerichteten Flächen ist der Schlackenbildungseffekt in den meisten Fällen größer als der Treppeneffekt. Schlacke ist die unerwünschte Menge an geschmolzenem Material und Teilchen als Folge des Schmelzens auf losem Pulver.

- Je flacher der Winkel, desto größer die Schlackenbildung, und dadurch schlechtere Oberflächenqualität.
- Flache Winkel erfordern eine Stützstruktur
- Gestützte Flächen sind von schlechterer Qualität

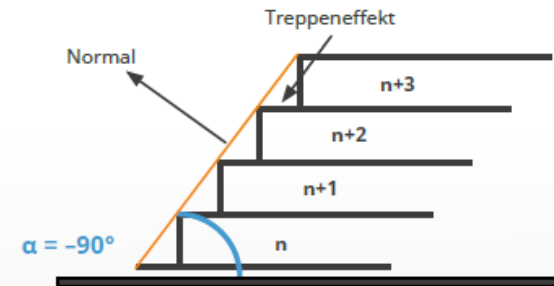
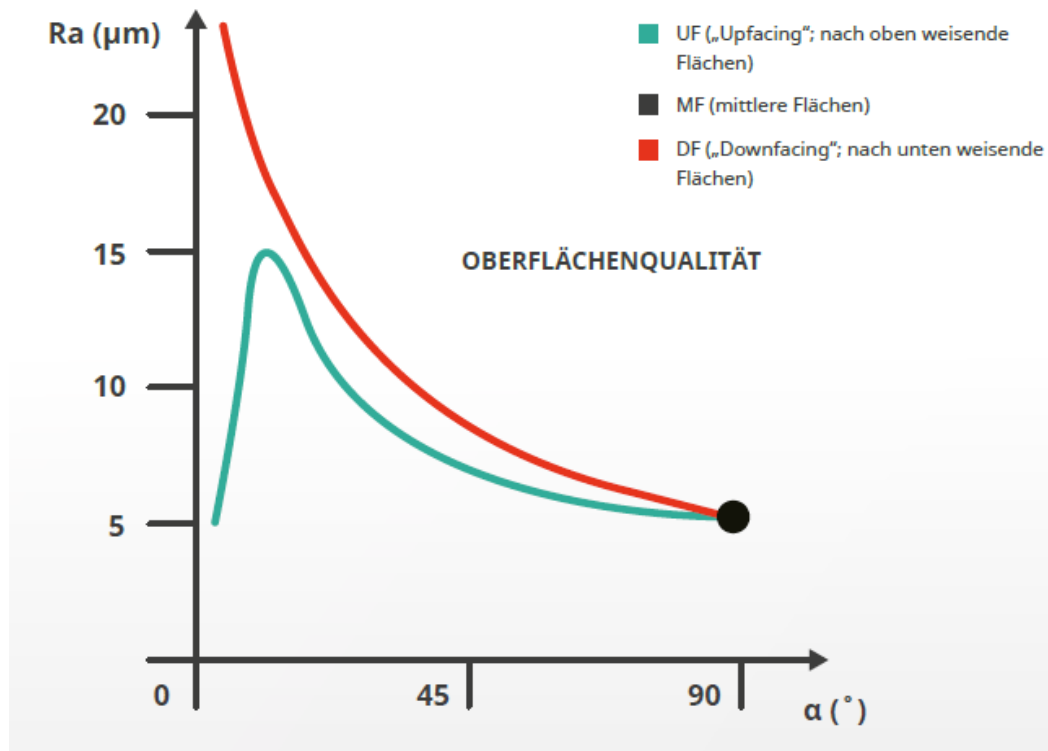


Schlackenbildung:

Bei nach unten gerichteten Oberflächen sackt die geschmolzene Schicht durch das darunter liegende lose Pulver, was zur Bildung von Schlacke führt.

Anhang 3: Auswirkungen auf die Qualität

Oberflächenqualität je nach Art der Oberfläche und Winkel



Anhang 4: Grundprinzipien

Warum gibt es thermische Spannungen im Bauteil?

- Hohe Schmelztemperaturen
z. B. Titan: 1650 °C; Edelstahl: 1200 °C
- Schnelle Kühlraten (< 1 ms – 100°C)
- Spannungen sammeln sich über alle Schichten an, weil bei jedem Druck einer Schicht die oberen Schichten mehrfach erwärmt und abgekühlt werden. Ausdehnung und Schrumpfung, blockiert durch bereits verfestigte Schichten, verursachen Restspannungen.
- Das Verformungsverhalten ist werkstoffspezifisch.

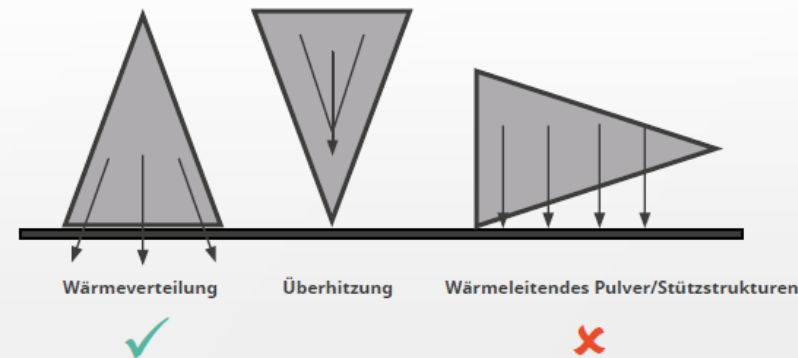
Wichtige Einflüsse auf derartige Belastungen

$\sigma_T \sim A$ Die thermische Spannung ist proportional zur geschmolzenen Oberfläche. Um dies zu mildern:

- Reduzieren Sie die zu schmelzende Fläche pro Schicht
- Stellen Sie sicher, dass die längste Ausdehnung des Teils entlang der Z-Achse liegt
- Sorgen Sie für eine hohe Anzahl von kleinen Abschnitten, was besser ist als ein großer Abschnitt

$\sigma_T \sim \Delta T$ Die thermische Spannung ist proportional zum Temperaturabfall während der Verfestigung.

Achten Sie auf eine gute Wärmeübertragung zur Grundplatte und zur Maschine. Je besser die Wärme übertragen wird, desto weniger wird sich ein Teil verziehen.



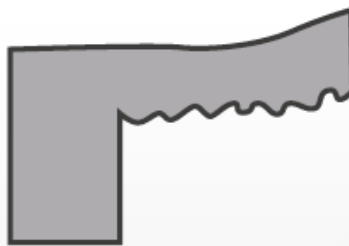
Anhang 5: Thermische Belastung

Umgang mit thermischen Spannungen

- Restspannungen führen zu Teilen, die zum Verziehen neigen.
- Stützstrukturen sind erforderlich, um Verformungen zu vermeiden und ein Teil in Form zu halten.
- Die Spannungen bleiben nach dem Bauen im Teil – wenn die Stützstrukturen sofort entfernt werden, geht das Teil dennoch in die gewünschte Position.
- Eine Wärmebehandlung ist nach der Pulverentfernung und vor der Entfernung von der Plattform und der Stützstrukturen erforderlich, damit die Spannungen sich lösen.



ENTWICKELTES MODELL



VERFORMUNG UND
SCHLACKENBILDUNG

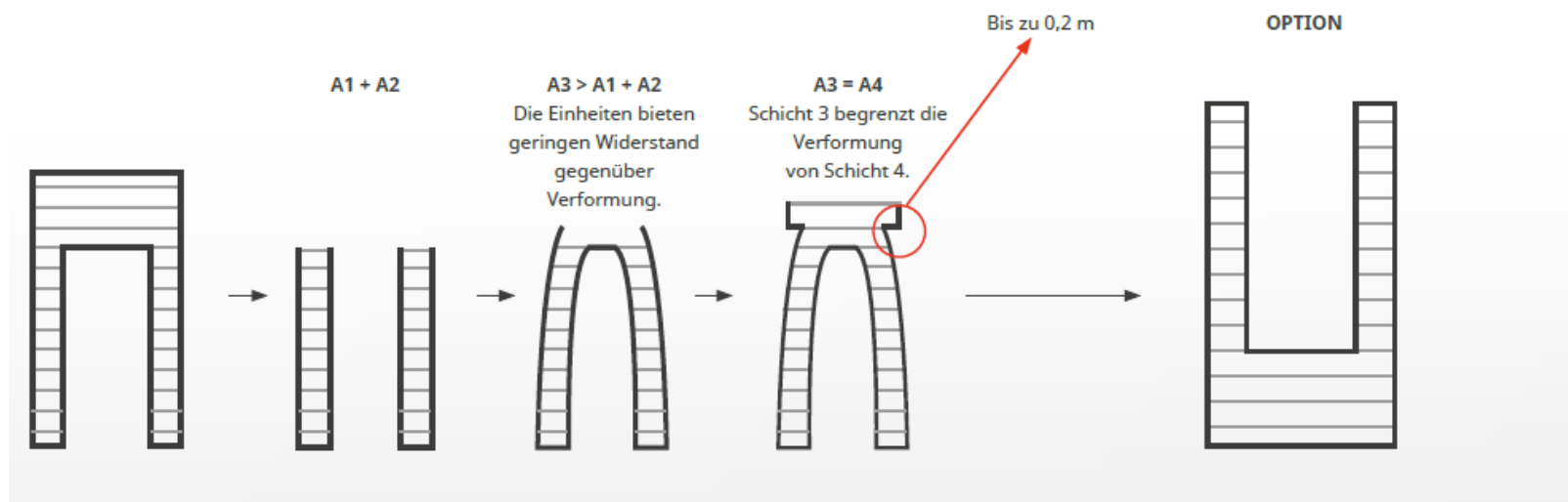


STÜTZSTRUKTUR

Anhang 6: Schrumpfungslinien

Schrumpfungslinien erscheinen, wenn zwei getrennte Einheiten zu einer Schicht verbunden werden

- Die Verbindungsfläche schrumpft und zieht die beiden Einheiten zueinander.
- Die nächste Ebene wird wieder auf die Originalmaße gedrückt.
- Im Teil sichtbare Linie
- Typisch auf Brücken/innenliegenden Kanälen

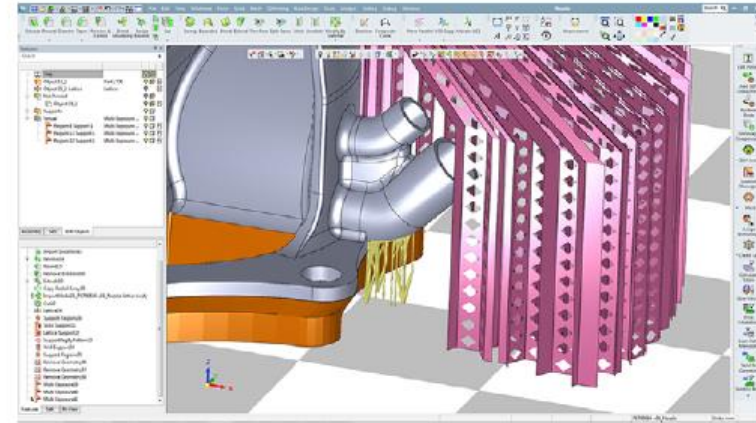


Anhang 7: Stützstrukturen

Stützstrukturen sind notwendig, um Schlackenbildung, Verformung und Schrumpfungslinien zu minimieren

- Weniger Schlackenbildung in den nach unten gerichteten Regionen
- Bessere Wärmeübertragung durch feste Stützstrukturen
- Verhindern Verformungen und halten das Teil fest am Ort
- Minimieren Schrumpfungslinien

Es gibt eine Vielzahl möglicher Stützstrukturen. Hier sind einige Beispiele:



Wandstützen



Volumen-
körperstützen



Gitterstützen



Feste
Wand



Kegel-
stütze



Manueller
Kegel



Seiten-
stütze



Mehrfache
Lage

- Blockstützen sind gut gegen Schlackenbildung
- Für die Wärmeübertragung werden solide Stützstrukturen benötigt, um Verformungen zu verhindern und Schrumpfungslinien zu reduzieren

Anhang 8: Teileausrichtung

Wie das Teil im Hinblick auf dessen allgemeine Qualität auszurichten ist hängt hauptsächlich von den nach unten gerichteten Flächen ab.

Nach unten gerichtete Flächen sind die schlechtesten Flächen mit einer hohen Rauheit des Teils. Ganz allgemein kann man sagen, dass die Qualität des Teils durch Verringerung der nach unten gerichteten Flächen erhöht wird.

Nach unten gerichtete Flächen sind die Flächen unterhalb des selbsttragenden Winkels (α).

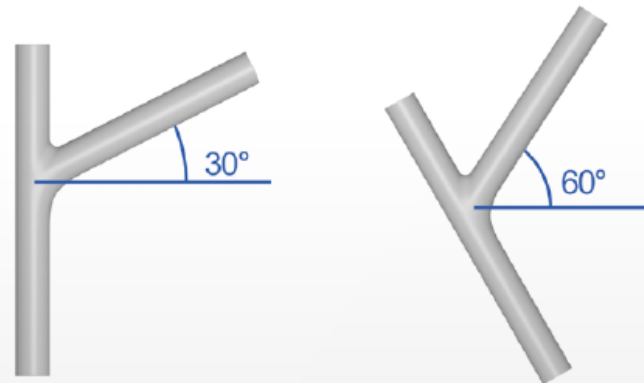
Der selbsttragende Winkel hängt vom Material und Druckverfahren ab.

- Ti-Legierungen $\alpha = 40-45^\circ$
- Stahl, CoCr, Aluminium-Legierungen $\alpha = 50-55^\circ$

Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für diese Situation.

Das linke Teil hat einen Schenkel, der mit der Bauplatte einen Winkel von 30° bildet, sodass dieser Schenkel abgestützt werden muss (weil er unterhalb des selbsttragenden Winkels liegt)*.

Wird dasselbe Teil um 30° gedreht, erkennt man, dass der Schenkel einen 60° -Winkel mit der Bauplatte bildet. Demzufolge muss in diesem Bereich keine Stützstruktur eingefügt werden, wodurch die Gesamtqualität dieses Teils steigt.



*Metalldrucker mit einem Rollensystem wie ProX DMP 100, 200 und 300 können bei Ti Winkel bis zu 30° erreichen.

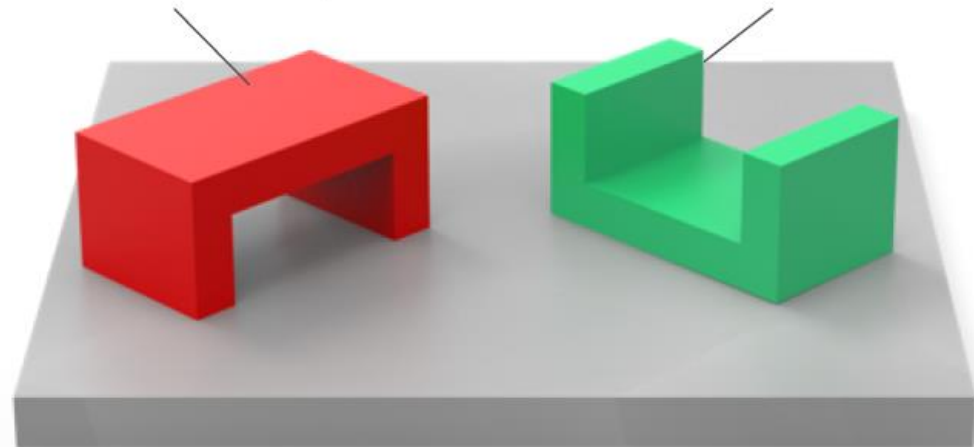
Anhang 9: Teileausrichtung

Vermeiden Sie große Überhänge oder große nach unten gerichtete Bereiche.

Die Teile werden viel besser aufgebaut, wenn Sie mehr mittlere und nach oben gerichtete Bereiche statt nach unten gerichtete Bereiche haben.

Vermeiden Sie nach unten gerichtete Flächen schon beim Design

Die richtige Ausrichtung kann helfen, nach unten gerichtete Flächen zu vermeiden.



Die rot markierte Ausrichtung ist wegen des großen Überhangs schlecht.

Die grün markierte Ausrichtung ist gut, weil das Teil unmittelbar auf der Grundplatte aufgebaut wird und keinen nach unten gerichteten Bereich hat.

Anhang 10: Teileausrichtung

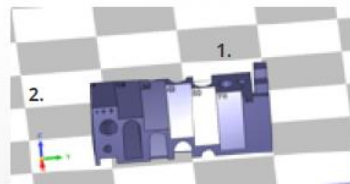
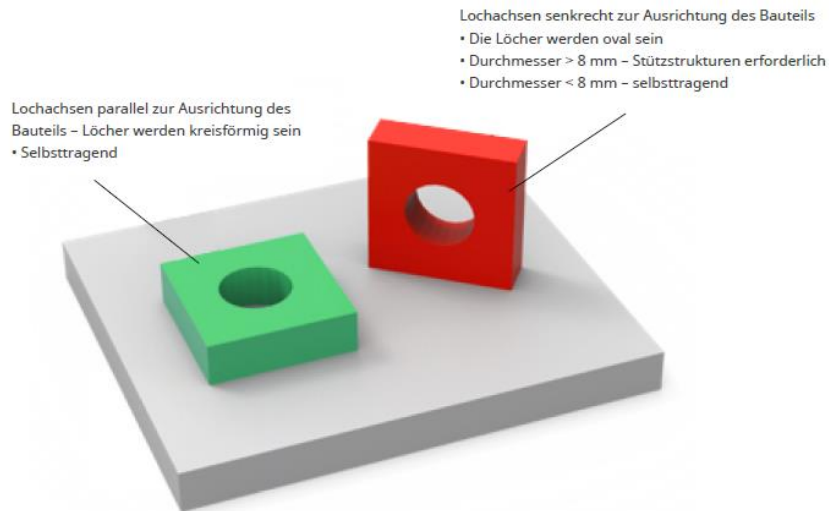
TEILEAUSRICHTUNG

Besondere Merkmale

Die Qualität von Druckmerkmalen wie Löcher, Taschen, Schraubengewinde usw. hängt von der Ausrichtung des Teils ab.

Die höchste Qualität beim Drucken entsteht in Z-Richtung (senkrecht zur Bauplattform).

Wenn diese Details in X/Y-Richtung (parallel zur Bauplattform) gedruckt werden, verschlechtert sich deren Qualität durch die Ausrichtung nach unten.



1. Löcher in Z-Richtung
2. Löcher in der X/Y-Richtung



Schlackenbildung in nach unten gerichteten Flächen.

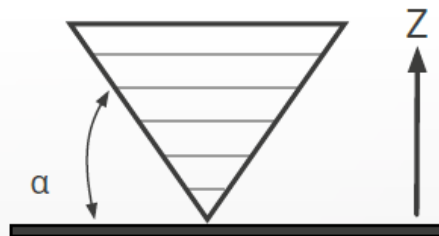
Anhang 11: Designbeschränkungen

• Stahl, Edelstahl, Inconel

- Große Oberfläche $\alpha > 60^\circ$
- Mittlere Oberfläche $\alpha > 50-55^\circ$
- Kleine Oberfläche $\alpha > 45^\circ$

• Titan, Aluminium

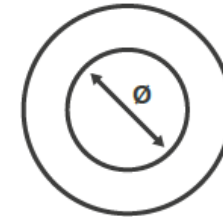
- Große Oberfläche $\alpha > 50^\circ$
- Mittlere Oberfläche $\alpha > 40-45^\circ$
- Kleine Oberfläche $\alpha > 35^\circ$



*Diese Werte sind Erfahrungswerte, gewonnen auf ProX DMP 320-Druckermodellen, die sich je nach Druckermodell, spezifischen Geometrien und verbesserten Konstruktionsstilen ändern können.

• Horizontale kreisförmige Löcher

- Ohne Stützstrukturen \varnothing innen < 8 mm
- Stützstrukturen erforderlich \varnothing innen > 10 mm



• Horizontale Brücken

- Ohne Stützstrukturen $L < 1,2$ mm
- Stützstrukturen erforderlich $L > 1,5$ mm



• Horizontaler, nach unten gerichteter Flansch

- Ohne Stützstrukturen $L < 0,75$ mm
- Stützstrukturen erforderlich $L > 0,75$ mm



