

**Verbundprojekt AddUp**

**Schlussbericht nach NKBF 98**

**Technologietransfer-Programm Leichtbau  
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie**

**Programmlinie 3:**

CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Ressourceneffizienz und -substitution

**Vorhaben:** Additive Fertigung von materialelektiven Leichtbaukomponenten  
durch Upcycling von Abfällen aus der Strahlmittelherstellung (AddUp)

<b>Verbundkoordinator</b>	Dr.-Ing. Markus Wabner Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Reichenhainer Straße 88 09126 Chemnitz 0371/5397-1515 markus.wabner@iwu.fraunhofer.de
<b>Laufzeit</b>	36 Monate (01.07.2022 – 30.06.2025)
<b>Verbundpartner</b>	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, CHIRON Group SE, ERVIN Germany GmbH, Automatic-Systeme DREHER GmbH

# I. Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

Im Projekt AddUp verfolgten die Forschenden das Ziel, die additive Fertigung von Leichtbaustrukturen ökologisch und wirtschaftlich zu verbessern. Sie bereiteten metallische Produktionsabfälle aus der Strahlmittelherstellung als Ausgangsstoff für den 3D-Druck auf, um so den Einsatz konventionell hergestellter Metallpulver deutlich zu reduzieren.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

3D-Druck mit Metall ermöglicht Leichtbaulösungen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren kaum realisierbar sind. Komplexe Geometrien, variabler Materialeinsatz und eine funktionsgerechte Gestaltung lassen sich direkt umsetzen – ohne teure Gussformen oder spanende Nachbearbeitung. Doch obwohl diese Vorteile bekannt sind, bleibt der industrielle Einsatz begrenzt. Ein Grund: Die Herstellung des benötigten Metallpulvers ist energieintensiv, teuer und verursacht hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Gleichzeitig entstehen in der Produktion von metallischen Strahlmitteln große Mengen an ungenutzten Pulvern. Sie gelten bislang als Abfall. Genau hier setzt das Projektteam an: Es will diese hochwertigen Reststoffe für den 3D-Druck erschließen und dadurch sowohl ökologische Lasten senken als auch die Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigung mit Metall steigern.

## 3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Forschenden im Projekt AddUp entwickelten ein Verfahren, um metallische Abfälle aus der Strahlmittelproduktion für den 3D-Druck nutzbar zu machen. Sie untersuchten die Pulvereigenschaften, bereiten das Material auf und testeten es im generativen Auftragsschweißen – einem Verfahren, bei dem ein Laser Metallpulver gezielt aufschmilzt und Schicht für Schicht aufträgt. Anders als beim Pulverbettverfahren lassen sich damit auch große, tragende Bauteile effizient fertigen.

Um Pulver mit unterschiedlichen Qualitäten gezielt verarbeiten zu können, konstruierten die Projektpartner einen neuen Druckkopf. Dieser mischt die Materialien in Echtzeit und stellt sie direkt am Bauteil bereit – ohne lange Stillstandszeiten. Gleichzeitig entwarfen die Forschenden die Bauteilgeometrien mithilfe bionischer Topologieoptimierung so, dass sie nur dort Material einsetzen, wo es mechanisch notwendig ist. Das spart Masse und Energie.

Am Ende prüfen sie die Praxistauglichkeit der Methode anhand konkreter Anwendungen im Maschinenbau – etwa bei Komponenten, die sich schnell und präzise bewegen müssen. So soll der Transfer in die industrielle Praxis gelingen.

## 4. Wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde

Leichtbau ist ein etablierter Ansatz, um notwendige Antriebsenergien im Betrieb von dynamischen Systemen zu reduzieren und Material einzusparen. Eine Vielzahl von Arbeiten befasst sich mit der Bilanzierung, der Systementwicklung oder der Erforschung neuer Werkstoffe. Mittels der bionischen Topologieoptimierung kann eine günstige Grundgestalt (Topologie) für Bauteile unter mechanischer Belastung ermittelt werden. Konsequenz

umsetzen lassen sich derartige Strukturen bei geringen Losgrößen und in Multi-Material-Bauweise an sich nur mittels 3D-Druck bzw. additiver Verfahren, da sie keinen Halbzeugbeschränkungen (Schweißkonstruktionen) oder Losgrößenrestriktionen (Gusskonstruktionen) unterliegen. Hinderlich sind jedoch die bis heute hohen Kosten für die Druckpulver (z.B. CrNi-Pulver 48 €/kg). Diese hohen Pulverkosten und der hohe Ressourcenverbrauch bei der Pulverherstellung ist durch die aufwändigen Herstellverfahren bedingt. Die Nutzung von Abfällen aus der Strahlmittelherstellung für additive Verfahren ist jedoch nicht bekannt.

### 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es erfolgte keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### 1.1. Arbeitspaket 1: Analyse der Partikelreste aus der Strahlmittelherstellung für den 3D-Druck

##### Ausgangsmaterialien und erste Analysen

Zu Beginn des Vorhabens wurden verschiedene in der Stahlstrahlmittelproduktion anfallende Abfallfraktionen durch ERVIN systematisch untersucht, um deren Eignung für die additive Fertigung zu bewerten. Die erste betrachtete Fraktion bestand aus feinem Rundkorn im Bereich von 20 bis 100  $\mu\text{m}$  ( $D_{50} \approx 61 \mu\text{m}$ ) (Abbildung 1). Es zeigte sich, dass dieses Material aufgrund eines ausgeprägten Oxidationsgrades nicht für den Einsatz im 3D-Druck geeignet ist. Die Oxidschicht beeinflusste sowohl die Schmelzstabilität als auch die mechanischen Eigenschaften der gedruckten Probekörper negativ.



Abbildung 1: Rundkorn

Parallel dazu wurde eine zweite Abfallfraktion analysiert, bestehend aus gebrochenem, kantigem Grit-Material (Abbildung 2). Obwohl solche nicht-sphärischen Partikel üblicherweise als ungünstig für die Pulververarbeitung in additiven Fertigungsverfahren gelten, erwies sich dieses Material nach mechanischer Aufbereitung als potenziell verwendbar. Erste Untersuchungen deuteten darauf hin, dass eine geeignete Prozesskette zur Verbesserung der Partikelform und Partikelgrößenverteilung die grundsätzliche Verwendbarkeit ermöglichen könnte.

Ein zentrales Problem stellte zunächst die unzureichende Siebbarkeit der kantigen Körner dar. Aufgrund ihrer variablen Orientierung beim Auftreffen auf das Sieb zeigten die Partikel ein inkonsistentes Siebverhalten, was reproduzierbare Trennprozesse erschwerte. Diese Eigenschaft führte zu stark schwankenden Korngrößenverteilungen und machte eine Optimierung der Siebtechnik notwendig. Zusätzlich wurden unzureichende Fließigenschaften beobachtet, die eine kontinuierliche Pulverzufuhr im Druckprozess gefährdeten.

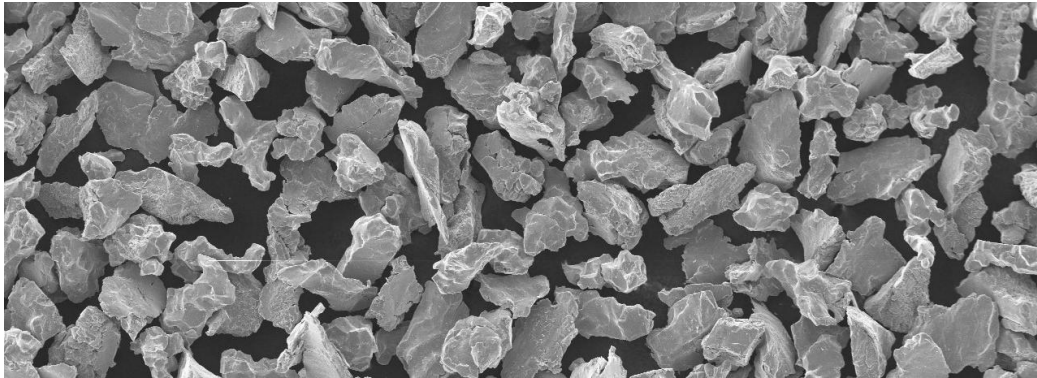


Abbildung 2: Kantiges Korn (Grit)

### Siebung, Mahlung und Verbesserung der Partikelmorphologie

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde durch ERVIN untersucht, inwieweit die mechanische Aufbereitung der vorhandenen Abfallfraktionen deren Eignung für den Einsatz in der additiven Fertigung verbessern kann. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Optimierung der Partikelmorphologie und der Partikelgrößenverteilung, da beide Parameter wesentlich für die Prozessstabilität und die Reproduzierbarkeit additiver Fertigungsprozesse sind.

Die zunächst festgestellten Schwierigkeiten bei der Siebung kantiger Grit-Partikel machten eine Überarbeitung der Aufbereitungsstrategie erforderlich. Aufgrund ihrer unregelmäßigen Geometrie und der rotationsabhängigen Orientierung beim Siebvorgang zeigten diese Partikel ein stark variierendes Siebverhalten. Dies führte zu ungleichmäßigen Siebkurven und erschwerte die Bereitstellung definierter Pulverfraktionen, die für den additiven Prozess unverzichtbar sind.

Zur Verbesserung der Partikeleigenschaften wurde daher eine mechanische Mahlung der Grit-Körner durchgeführt. Die Mahlversuche zeigten deutliche Effekte: Die scharfkantigen Partikelränder wurden durch den mechanischen Abrieb reduziert, was sowohl die Rundheit als auch die Oberflächenbeschaffenheit der Partikel verbesserte. Diese Veränderung wirkte sich positiv auf die Fließeigenschaften des Materials aus und führte zu einer signifikant stabileren und reproduzierbareren Siebkurve.



Abbildung 3: Mahlversuche zur Abrundung der Partikelkanten

Parallel hierzu wurde durch ERVIN ein Camsizer als Analysegerät in Betrieb genommen, der erstmals die Möglichkeit bot, die Partikelgrößenverteilung und Formfaktoren präzise und wiederholbar zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Technologie konnten die Auswirkungen der

Aufbereitungsmaßnahmen detailliert quantifiziert und die Prozessparameter systematisch angepasst werden.

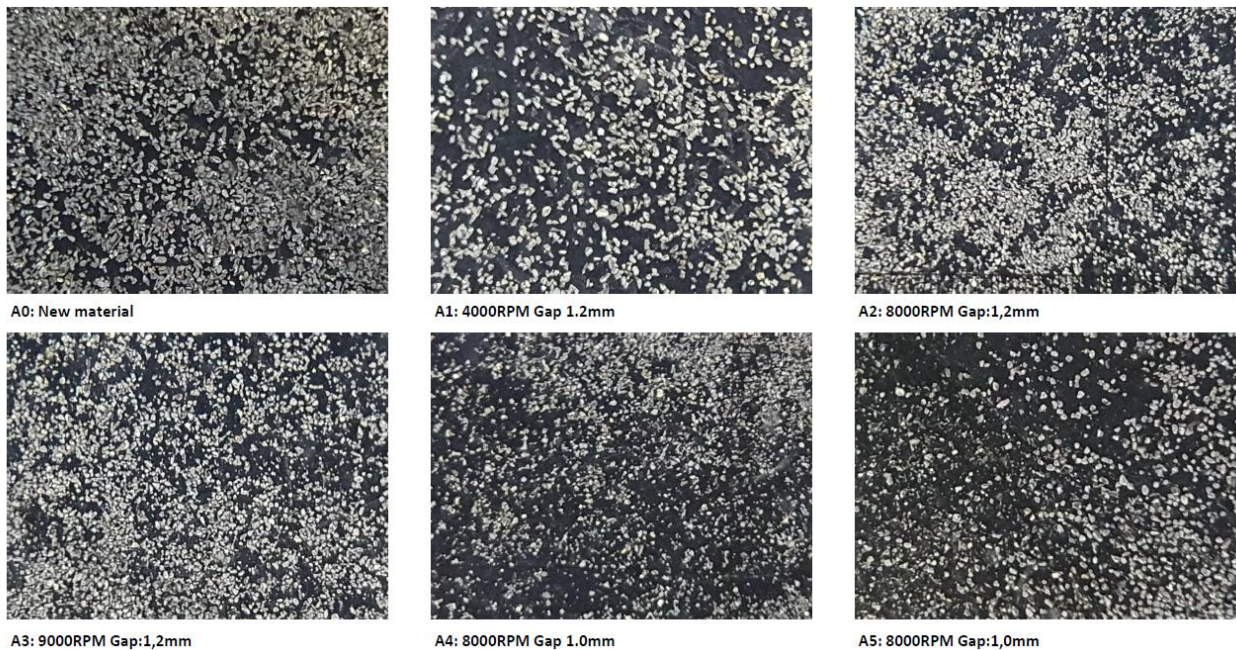


Abbildung 4: Exemplarische Mahlergebnisse

Die Ergebnisse dieses Arbeitsschritts zeigten, dass die Kombination aus mechanischer Aufbereitung und verbesserter Analytik dazu beiträgt, kantiges Grit-Material so zu modifizieren, dass es die grundlegenden Anforderungen an Pulver für die additive Fertigung erfüllt. Damit wurde eine wesentliche Voraussetzung geschaffen, um die folgenden Druckversuche mit reproduzierbaren und prozessstabilen Pulverchargen durchführen zu können.

### Identifikation kritischer Legierungs- und Prozessparameter

Im Rahmen der vertieften Analyse der aufbereiteten Partikel wurden die wesentlichen stofflichen Merkmale durch Fraunhofer identifiziert, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit im additiven Fertigungsprozess besitzen. Dazu wurde unter anderem die EDX-Analyse und ein Rasterelektronenmikroskop eingesetzt. Die EDX-Analyse (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) ist eine leistungsstarke Methode der Mikroanalyse zur Bestimmung der elementaren Zusammensetzung von Materialien. Insbesondere zwei Faktoren erwiesen sich als entscheidend für die Prozessstabilität und die resultierende Bauteilqualität: der Sauerstoffgehalt der Partikel sowie deren Kohlenstoffgehalt.

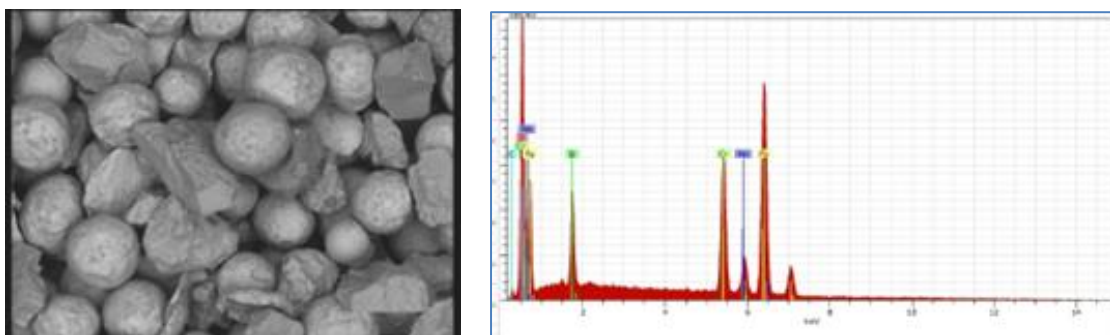


Abbildung 5: Elektronenmikroskopie und EDX-Analyse für Amachrom

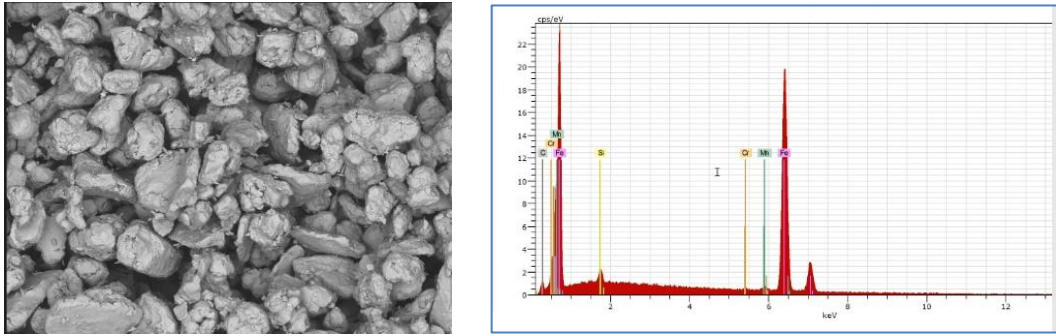


Abbildung 6: Elektronenmikroskopie und EDX-Analyse für Amasteel

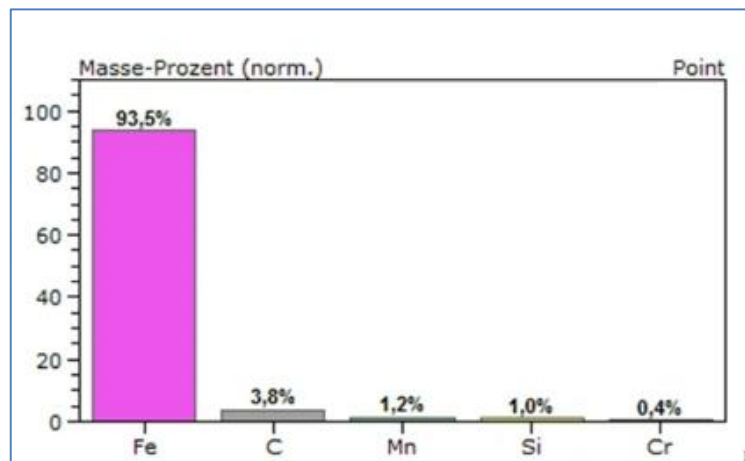


Abbildung 7: Elementare Zusammensetzung von Amasteel

Die Untersuchungen zeigten zunächst, dass der Sauerstoffgehalt nicht nur auf der Partikeloberfläche, sondern auch im Partikelinneren signifikant erhöht war. Diese Sauerstoffanreicherungen sind insbesondere eine Folge der Prozessschritte in der Strahlmittelherstellung und wirksam an der Entstehung von Poren im additiven Fertigungsprozess beteiligt. Während des Aufschmelzens des Pulvers führen diese oxidischen Bestandteile zu Gasentwicklungen und zu einer instabilen Schmelzbaddynamik, was die Bildung von Volumendefekten begünstigt. Erst durch die Kombination interner Analysen und externer Gasmessungen konnte ein verlässliches Messverfahren etabliert werden, das sowohl oberflächennahe als auch volumetrische Sauerstoffanteile berücksichtigt.

Tabelle 2: Sauerstoffgehalt in ppm

Werkstoff	Gasgehalt in ppm				Standardabweichung	
	1	2	3	Mittelwert	in ppm	in %
32-45µm	2542,9749	2994,7515	3354,5337	2964,0867	332,0263	11,20
45-63µm	2495,4756	2460,0139	2486,2600	2480,5832	15,0234	0,61
63-75µm	1479,1622	1574,1320	1568,7659	1540,6867	43,5595	2,83
S550	1379,1280	1624,3042	1409,9611	1471,1304	109,0494	7,41

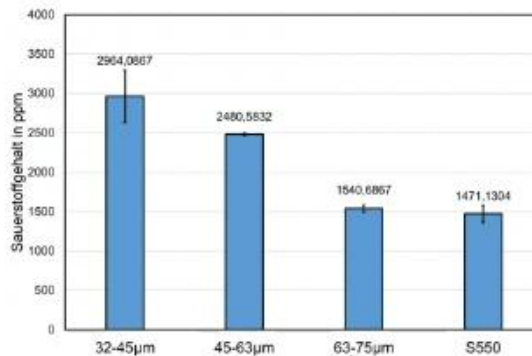


Abbildung 1: Sauerstoffgehalt in ppm

Abbildung 8: Sauerstoffgehalt Amasteel nach Partikelgröße

Parallel dazu wurde der hohe Kohlenstoffgehalt des Materials als zweiter kritischer Einflussfaktor identifiziert. Der in der Norm für Stahlstrahlmittel festgelegte Kohlenstoffgehalt von etwa 1 % liegt deutlich über dem Bereich, der üblicherweise als schweißgeeignet gilt. Während des additiven Prozesses führt dieser erhöhte Kohlenstoffgehalt zu einer martensitischen Aufhärtung bei hohen Abkühlgeschwindigkeiten. Dieser Effekt ist maßgeblich für die Entstehung von Rissen im gedruckten Material verantwortlich und erschwert insbesondere den Volumenaufbau komplexerer Geometrien. Im Rahmen ergänzender Analysen konnte jedoch gezeigt werden, dass eine angepasste Temperaturführung im Prozess zumindest einen Teil der daraus resultierenden Probleme kompensieren kann.

```

Spektrum: Point
Element: OZ Serie norm. C Atom. C Fehler
[Gew. %] [At. %] [%]
-----
Eisen: 26 K Serie 53,83 33,68 1,79
Sauerstoff: 8 K Serie 18,61 40,65 2,39
Chrom: 24 K Serie 16,96 11,40 0,59
Silizium: 14 K Serie 4,88 6,07 0,29
Mangan: 25 K Serie 3,70 2,35 0,19
Kohlenstoff: 6 K Serie 2,01 5,85 0,49
-----
Summe: 100,00 100,00
    
```

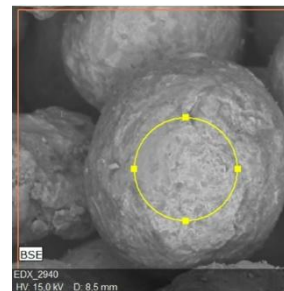


Abbildung 9: Zusammensetzung von Amachrom und Elektronenmikroskopie

Zur Bewertung der Materialien führte DREHER eine Analyse der marktgängigen Pulveranforderungen für den 3D-Druck von Maschinenbauteilen durch. Der Fokus lag insbesondere auf den bei DREHER verwendeten Materialien. In enger Abstimmung mit der Konstruktion wurde ebenfalls analysiert, inwiefern etablierte Materialien ggf. durch andere Materialien ersetzt werden können. Das bildet die Grundlage, um die Verwendung der von ERVIN bereitgestellten Materialien zu bewerten. Darauf basierend erfolgte durch CHIRON die Erarbeitung von technologischen Kriterien zur Trennung bzw. Mischung der Pulverabfälle und Strahlmittel für den 3D-Druck, wobei gestuft zwischen marktgängigen Qualitäten (hochwertig) und untypischen Qualitäten (minderwertig) unterschieden wird. Das erfolgte

sowohl nach materialwissenschaftlichen als auch pulvermetallurgischen Kriterien und diente gleichzeitig als eine Eingangsgröße für die Gestaltung des Druckkopfes. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere die Mischung von reinem Metallpulver, von Amasteel und Amachrom ein breites Spektrum von gängigen Materialien abdecken kann, von zäh bis sehr harten Eigenschaften. Allerdings hat sich ein hoher Kohlenstoffgehalt als eher ungünstig herausgestellt, der auch nicht beliebig reduziert werden kann, was das Einsatzspektrum der Pulvermischungen einschränkt. Das wird jedoch als nicht kritisch angesehen.

Im Ergebnis stehen zwei Strategien: Materialien mit höherwertigen Eigenschaften können direkt etablierte Werkstoffe ersetzen. Materialien mit – wenn auch nur teilweise – minderwertigen Eigenschaften bedürfen einer tieferen Bewertung und ggf. einer Neudimensionierung von Bauteilen.

Zusätzlich wurden im Produktionsprozess der Strahlmittelherstellung einzelne Schritte identifiziert, die den Sauerstoffgehalt der Partikel erhöhen oder reduzieren können. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für interne Workshops, in denen gemeinsam mit Prozessexperten Maßnahmen zur verbesserten Kontrolle der relevanten Prozessparameter entwickelt wurden. Am Ende des Berichtszeitraums konnte eine Materialprobe hergestellt werden, die auf Basis der neuen Kenntnisse hinsichtlich ihrer Legierungs- und Oxidationsparameter optimiert wurde und für weiterführende Druckversuche bereitgestellt werden konnte.

### 1.2. Arbeitspaket 2: Charakterisierung Werkstoff-, Werkstück- und Technologieeigenschaften

Im Rahmen von Arbeitspaket 2 wurden die werkstofflichen und prozesstechnischen Eigenschaften der von ERVIN bereitgestellten Pulverchargen systematisch untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung für unterschiedliche additive Fertigungsverfahren bewertet. Ziel war es, sowohl grundlegende Materialparameter als auch druckprozessrelevante Kenngrößen zu bestimmen und daraus belastbare Aussagen zur Verarbeitbarkeit abzuleiten. Die Arbeiten erfolgten hauptsächlich in enger Kooperation zwischen den Projektpartnern ERVIN, Fraunhofer IWU und CHIRON, wobei DREHER die erzielten Eigenschaften hinsichtlich der Einsatzfähigkeit in seinen Anlagen sowie allgemein im Maschinenbau bewertet hat.

Ein wesentlicher Bestandteil des Arbeitspakets war die Analyse der mechanischen und mikrostrukturellen Eigenschaften der aus dem aufbereiteten Material hergestellten Probekörper durch Fraunhofer. Erste Druckversuche durch CHIRON zeigten, dass die hergestellten Körper trotz des erhöhten Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalts bereits mechanische Kennwerte erreichten, die die Eigenschaften eines Standardbaustahls (S235) deutlich übertrafen. Dies unterstreicht das grundsätzliche Potenzial der Materialfraktion für die additive Fertigung, wenngleich die Prozessstabilität zu diesem Zeitpunkt noch nicht als ausreichend bewertet werden konnte. So trat insbesondere starke Porenbildung auf.

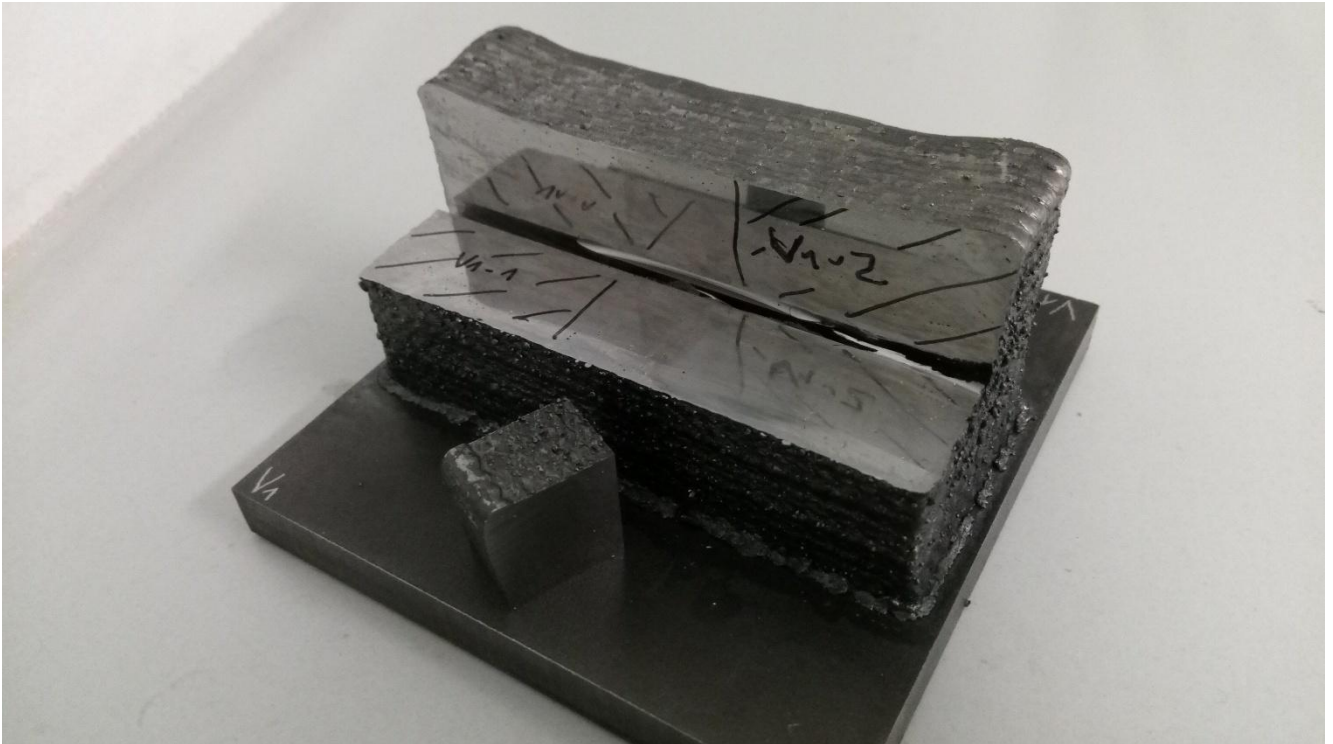


Abbildung 10: Aufgetrennte Druckprobe

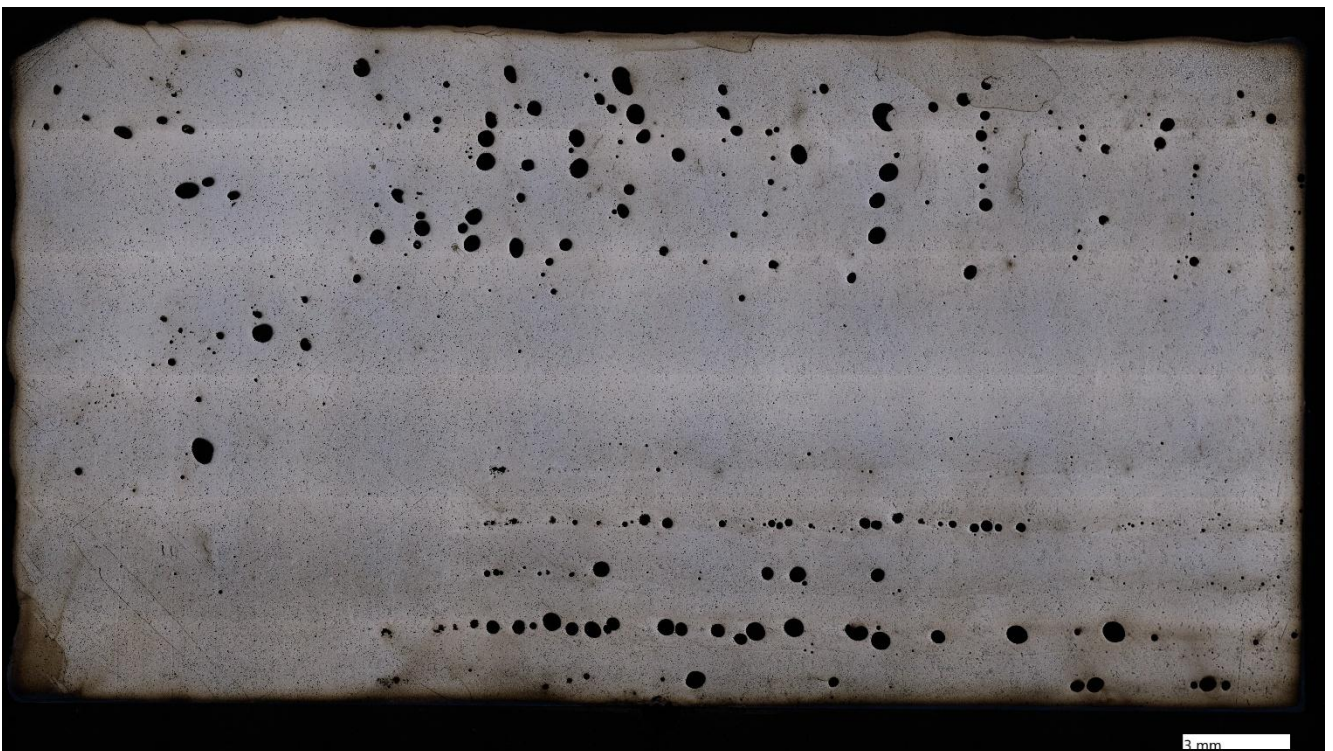


Abbildung 11: Geätztes Schlibbild zeigt Porenbildung

Zur Materialcharakterisierung wurden mehrfach Zugproben nach DIN 50125 hergestellt. Es hat sich dabei gezeigt, dass das Material sehr fest ist und in weiten Teilen einem Werkzeugstahl entspricht. Damit genügt es im Prinzip den Anforderungen von DREHER und wäre für den allgemein Maschinenbau geeignet.



Abbildung 12: Hergestellte Zugproben

Bei der Herstellung der Zugproben hat sich jedoch auch gezeigt, dass die Zerspanbarkeit des gedruckten Materials ganz im Sinne eines Werkzeugstahls aufgrund der Härte und Zähigkeit sehr schlecht ist und so in der üblichen Fertigung nicht ohne weiteres umgesetzt werden kann. Hierfür sind zumindest spezielle Zerspanwerkzeuge notwendig.



Abbildung 13: Späne aus Zerspanungsversuchen

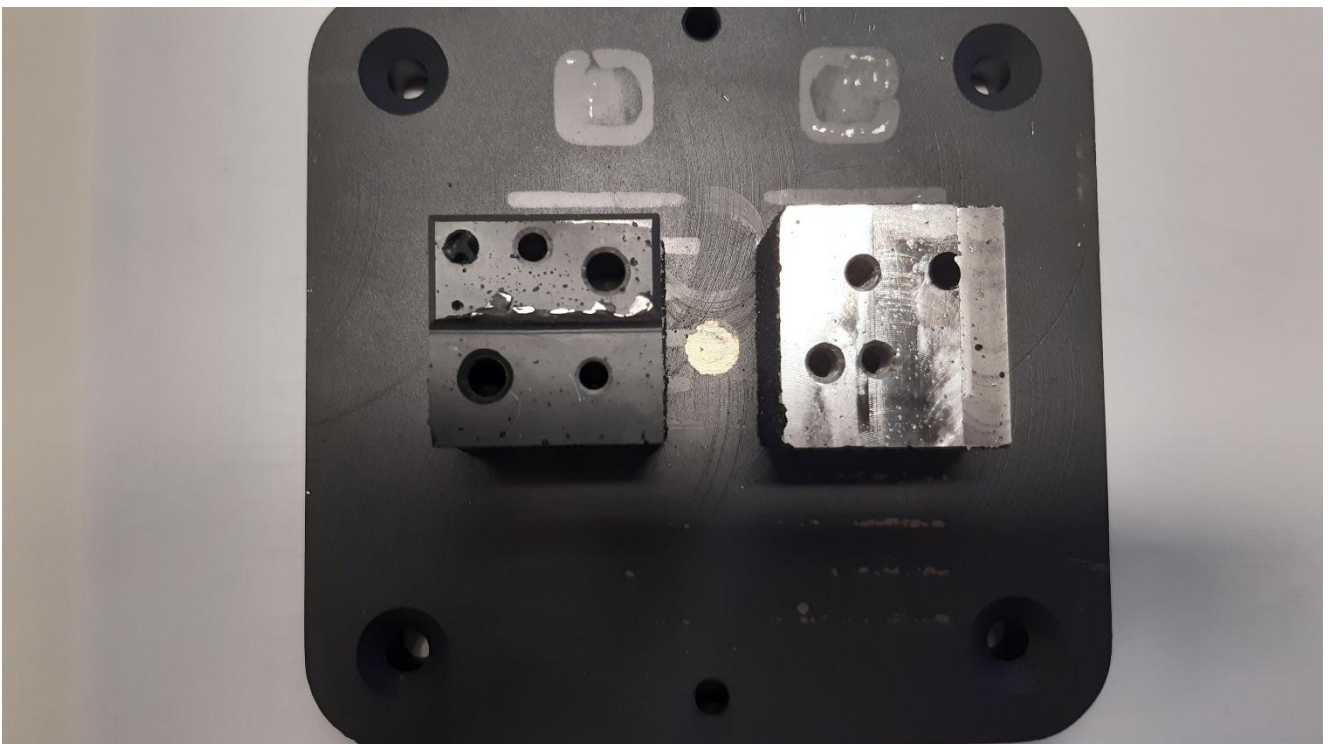


Abbildung 14: Weitere Zerspanversuche an Druckproben

Im Verlauf des Arbeitspakets wurde deutlich, dass insbesondere die Druckprozessrobustheit stark durch den Sauerstoffgehalt, den Kohlenstoffgehalt und die thermische Führung während der Verarbeitung beeinflusst wird. Die hohe martensitische Härte, die infolge des Kohlenstoffgehaltes während der Erstarrung auftritt, führte zu Rissbildungen, insbesondere bei Volumen-Strukturen. Ergänzende metallographische Untersuchungen bestätigten diesen Zusammenhang und lieferten Hinweise darauf, dass angepasste Temperaturführungsstrategien während des Druckprozesses geeignet sein könnten, diesen Effekt zumindest teilweise zu kompensieren.

Parallel dazu wurden die Ursachen der Porenbildung weitergehend untersucht. Die Ergebnisse bestätigten, dass die im Material vorhandenen Sauerstoffanreicherungen maßgeblich zum Auftreten gasinduzierter Poren beitragen. In enger Abstimmung zwischen ERVIN und Fraunhofer wurden daher verschiedene Aufschmelz- und Prozessparameter evaluiert, um die Wechselwirkung zwischen O<sub>2</sub>-Gehalt, Aufschmelzverhalten und Schmelzbadstabilität zu verstehen. Die neu erstellten Pulverchargen mit reduziertem Sauerstoffgehalt zeigten daraufhin eine deutlich stabilere Prozessdynamik, was insbesondere durch eine messbar reduzierte Funken- und Spritzerbildung sichtbar wurde.

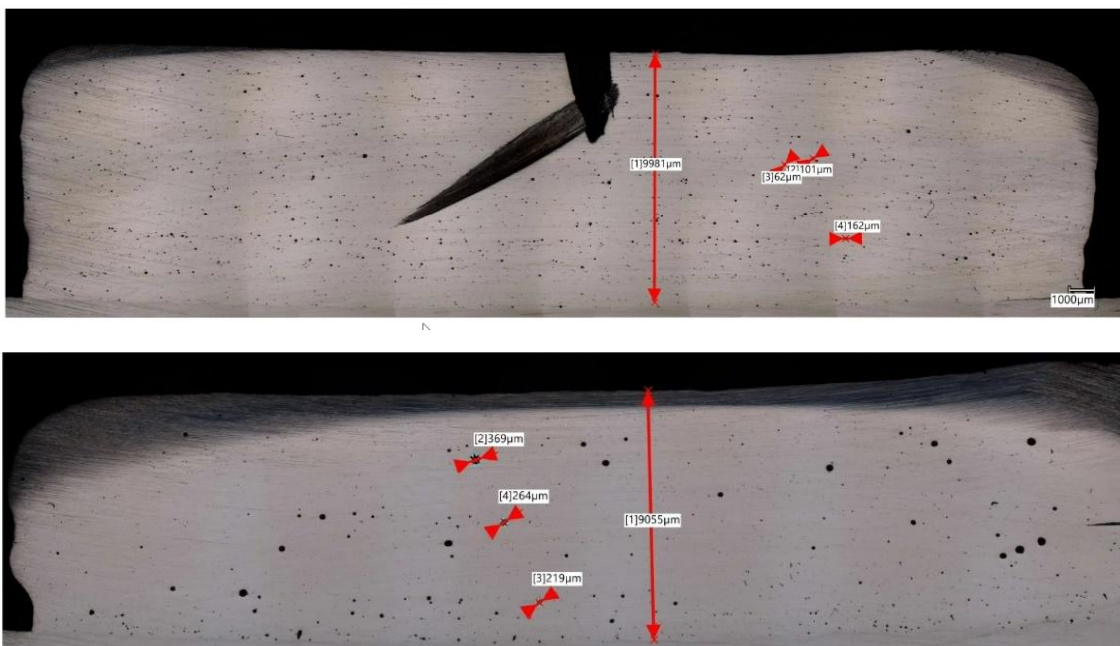


Abbildung 15: Exemplarische Darstellung von Schliffbildern mit Poren bis 200 µm

Zum Abschluss des Arbeitspakets wurde ein strukturiertes Datenblatt-Template erstellt, in dem alle werkstofflichen, prozesstechnischen und drucktechnischen Eigenschaften systematisch dokumentiert werden können. Dieses Template diente der einheitlichen Erfassung der relevanten Parameter über alle Chargen hinweg und bildete eine wichtige Grundlage für die weiteren Teilprojekte, insbesondere für die Bauteiltopologieoptimierung sowie für die Validierungsversuche in Arbeitspaket 7.

### 1.3. Arbeitspaket 3: Druckkopf mit intelligentem Mischmodul

Das von Projektpartner ERVIN zur Verfügung gestellte up-gecyclte Material konnte mit einer guten Schweißbarkeit verarbeitet werden. Die Entwicklung und Konstruktion des Pulverschalters für das Umschalten sowie Mischen von unterschiedlichen Pulversorten wurde wie geplant umgesetzt. Die Machbarkeit der Pulvermischung und deren Laser Metal Deposition- (LMD)-Schweißen wurde prototypisch nachgewiesen. Entwicklung und Optimierung der Prozessparameter für die gedruckten Referenzgeometrien wurden erfolgreich realisiert.



Abbildung 16: Druckanlage CHIRON

Der integrierte Pulverschalter zeigte ein gutes Einsatzverhalten. Die Lebensdauer ist abhängig von Pulvermaterial und -morphologie. Lediglich die Gleitflächen der Übergabestelle im Schalter mussten teilweise neukonstruiert werden. Zur steuerungseitigen Integration wurden die Steuerungsbausteine und die entsprechende M-Funktionen programmiert. So ist die Anlage in der Lage, Mischungsverhältnisse sowie Massenströme aus dem NC Code zu verändern bzw. zu steuern. Die Generierung des NC Code mit Hilfe des CAM-Tools NX CAM der Fa. SIEMENS zum Druck der Bauteile konnte nicht wie geplant umgesetzt werden. Die gemeinsamen Untersuchungen halfen jedoch, Erkenntnisse für die eventuelle Erweiterung des CAM-Tools zu erlangen.

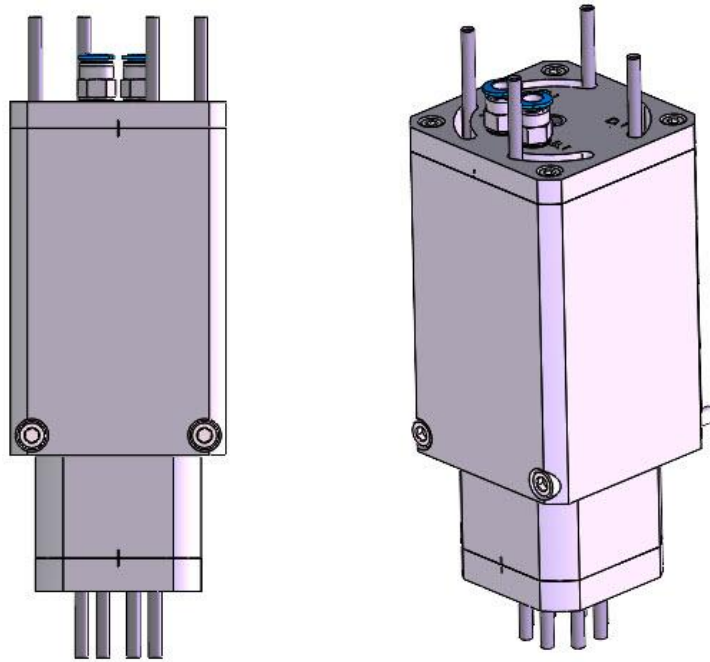


Abbildung 17: CAD-Modell des Druckkopfs



Abbildung 18: Druckkopf (links) und Pulvermischanlage (rechts)

#### 1.4. Arbeitspaket 4: Technologieanpassung und Auftragsstrategien

Hohe Kohlenstoffgehalte der Legierungen führen zu Rauch- und Spritzerbildung während des Prozesses sowie zu Porenbildung. Darunter leidet ebenso die Prozesssicherheit des

Auftragsschweißens. Durch Zumischung von Chrom- (Cr)-haltigem Stahlpulver wurde die Schweißbarkeit verbessert. Es konnten im Rahmen des Projekts Volumenkörper, jedoch mit hoher Porenzahl und Porengröße behaftet generiert werden. Zudem wurde die Kraterbildung begünstigt. Das am besten geeignete Eigenschaftsprofil wiesen niedriglegierte Stähle auf.

Daneben wirkt ein geringer Restsauerstoffgehalt begünstigend auf die Schweißbarkeit. Es wurde in weiteren Untersuchungen Inert-Prozessgas Argon Ar 4.6 eingesetzt. Dieses Prozessgas soll die heiße Zone inertisieren und das Schmelzbad vor Sauerstoff und Stickstoff schützen. Zudem wurde bei der Herstellung des Pulvers der Sauerstoff-Anteil auf < 500 ppm reduziert. Das Schweißergebnis zeigte eine Verbesserung im Porenbild und Schweißbarkeit, wenn auch immer noch eine große Anzahl an Poren vorliegt.

Die Analysen der Versuchsergebnisse aus den Versuchen mit Amasteel+Amachrome zeigten, dass die Kraterbildung auf die lokale Anreicherung (über 50 %) von Cr zurückzuführen sind. Ein erhöhter Cr-Anteil konnte in den „Kratern“ nachgewiesen werden. Die Entmischung und lokale Anhäufung von Cr fördert den Kornwachstum an diesen Stellen, welcher dann zu dem bereits erklärten Fehlerbild „Kraterbildung“ führt. Aus diesem Grund wurde die Beimischung von Amachrome zum vorgesehenen Grundmaterial Amasteel nicht weiterverfolgt.

Schweißbarkeitsversuche mit der Pulvermischung aus Amasteel und 316L-SI zeigten bessere Ergebnisse. Mit der Mischung gelang es, mehrere Lagen aufeinander aufzubauen. Ab 20 % 316L-SI kann gut geschweißt werden. Ab 30 % 316L-SI sind die Poren merkbar kleiner. Die guten Ergebnisse können auf die hohe Nickel- (Ni)-Gehalt (12,2 %) von 316L-SI zurückgeführt werden. Das in höherer Menge vorhandene Silizium (Si-Gehalt beträgt ca. 2,3%) wirkt stabilisierend auf das Schmelzbad. Energiedispersive röntgenspektroskopische Analysen zeigten, dass die Poren auf eine Silikatbildung zurückzuführen sind. Am Untergrund der Poren konnte die Anhäufung von Si, Calcium und Aluminium nachgewiesen werden. An solchen Stellen konnte die Entmischung von Legierungselementen, insbesondere von Cr und Ni, gut beobachtet werden. Die zur Validierung beauftragten Ergebnisse einer externen Überprüfung der Schweißbarkeit zeigen ein ähnliches Bild.

Die Werkstoffanforderungen an das gedruckte Bauteil liegen im Bereich der Eigenschaften von S235 bis S355. Diese Eigenschaften konnten durch Zugversuche mit Proben aus den gedruckten Würfeln aus Amasteel ermittelt werden. Da die Ergebnisse über den geforderten Werten lagen wurde der Werkstoff grundsätzlich als geeignet eingestuft.

Die in den Proben vorliegenden Poren wurden unter dem Gesichtspunkt der Übererfüllung der geforderten Werkstoffanforderungen bewertet und entschieden bei der Topologieoptimierung die Kennwerte des S235 anzunehmen, um die eventuelle Kerbwirkung der Poren zu berücksichtigen.



Abbildung 19: Druckproben mit unterschiedlichen Mischungsanteilen von Amachrom

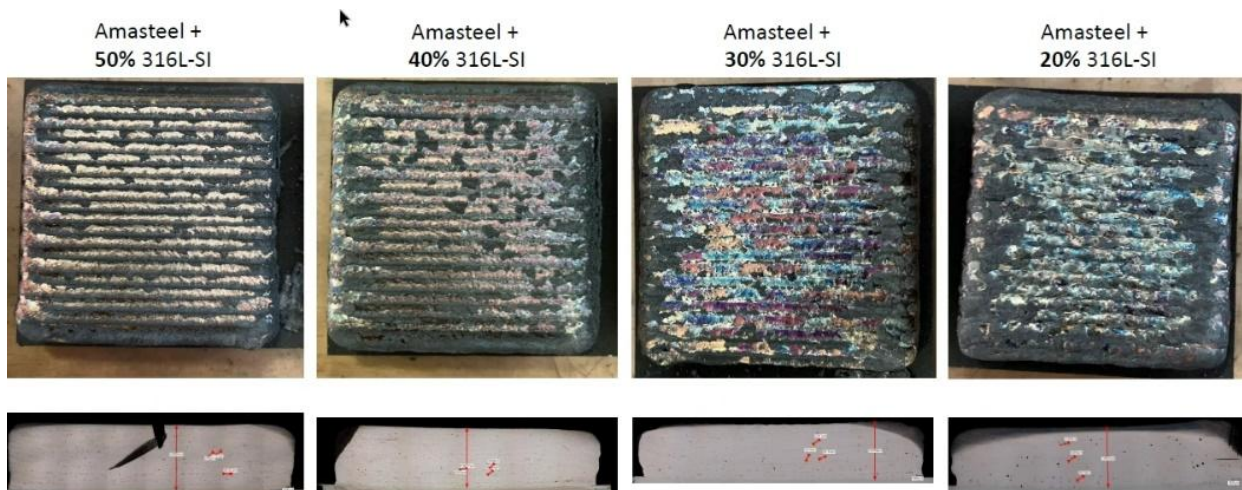


Abbildung 20: Druck- und Schlißproben mit unterschiedlichen Mischungsanteilen von Amasteel

### 1.5. Arbeitspaket 5: Optimierungsmethode für eine materialelektive Bauteiltopologie

Bei der Topologieoptimierung handelt es sich um eine Maßnahme zur 3D-Gestaltung eines Bauteils gegenüber einem Zielkriterium, damit das Bauteil die gewünschten Anforderungen optimal erfüllt. Eine Erweiterung der klassischen Topologieoptimierung bildet die materialelektive Bauteiltopologieoptimierung, welche als zusätzliches Kriterium Materialeigenschaften berücksichtigen kann. Damit dies umsetzbar ist, werden mindestens 2 verschiedene Werkstoffe benötigt, welche sich in mindestens einer Eigenschaft hinreichend genug unterscheidet. Die betrachteten Eigenschaften können dabei physikalischer oder wirtschaftlicher Natur sein, Beispiele hierfür können wären:

- Dichte → bestimmt am Ende das Bauteilgewicht
- Mechanische Festigkeit: (Streck- oder Dehngrenze, Zugfestigkeit)
- Steifigkeitsverhalten: E-Modul
- Materialpreis (Preis pro kg) (Wirtschaftlichkeit)

Daneben können weitere Kriterien, wie z.B. „Energieverbrauch bei der Materialherstellung“, berücksichtigt werden.

Bevor eine materialelektive Topologieoptimierung zum Einsatz kommen kann, wird eine funktionsfähige klassische Topologieoptimierung mithilfe eines Simulativen Ansatzes (FEM-Simulation) vorausgesetzt. Hierfür wird ein Bauteil in einer mechanischen Baugruppe ausgewählt und die mechanischen Randbedingungen (= mechanischer Lastfall) definiert. Der gesamte Ablauf der Simulation wird nachfolgend dargestellt.

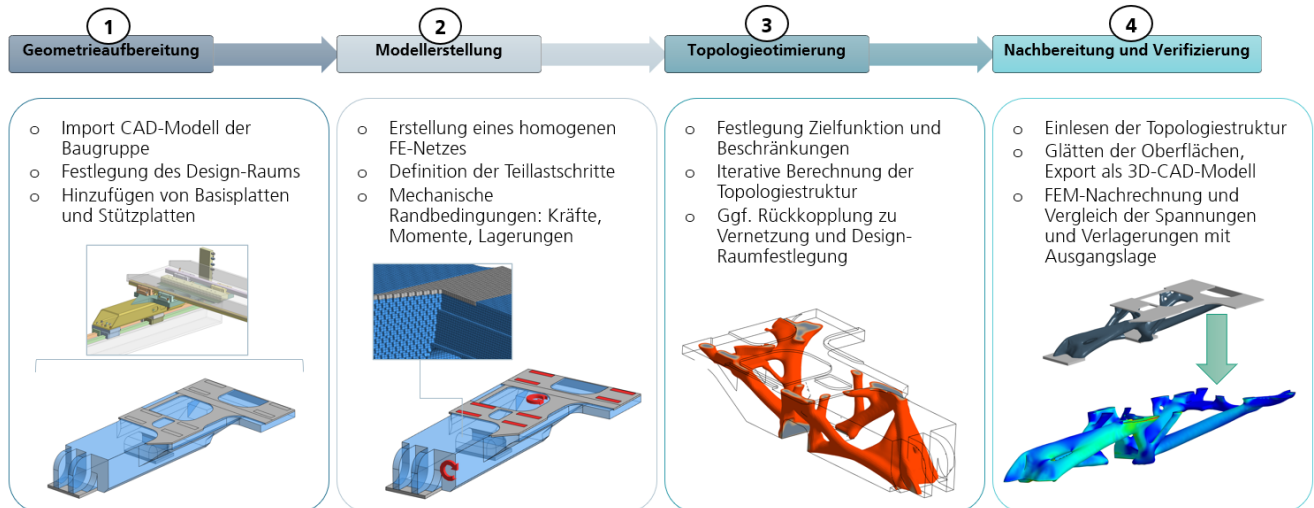


Abbildung 21: Der in 4 Schritten dargestellte Ablauf stellt die wesentlichen Arbeitsschritte einer Topologieoptimierung dar, welche mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) simulativ umgesetzt wird.

### 1. Geometriaufbereitung:

Im ersten Schritt wird eine 3D-Geometrie des Design-Raums für den Optimierungsalgorithmus erstellt und vom Konstrukteur in seiner maximalen Raumausdehnung festgelegt (maximal zulässige Größe). Im weiteren Schritt können Materialausparungen und Funktionsflächen definiert und integriert werden. Damit soll sichergestellt werden, dass das Bauteil in die Baugruppe geometrisch passt und keine Kollision mit anderen Bauteilen vorliegt. Die Materialausparungen stellen Sperrbereiche dar und sollen dafür sorgen, dass in diesen später kein Material vorhanden ist. Eine sorgfältige Prüfung des Design-Raums im Gesamtmodell der Baugruppe sollte erfolgen. Ein guter Design-Raum zeichnet sich dadurch aus, dass dieser eine möglichst einfache geometrische Form (geringes Oberflächen-Volumenverhältnis) aufweist, aber möglichst den insgesamt zur Verfügung stehenden Raum maximal ausnutzt.

### 2. Modellerstellung

Der nächste Schritt umfasst die Vernetzung des Design-Raums und die Festlegung der mechanischen Randbedingungen. Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist umso besser, je gleichmäßiger und strukturierter das Volumennetz ist. Dabei wird der Design-Raum in kleine Volumenkörper (z.B. Quader, Würfel, Tetraeder) zerlegt, welche eine vom Benutzer definierte Elementgröße (z.B. 3 mm) haben können. Größere Modelle können dabei aus mehreren Millionen solcher Volumenzellen bestehen. Dabei gilt, je einfacher die Geometrie des Design-Raumes ist, umso leichter hat es der Vernetzer, gleichmäßige und strukturierte Volumenzellen zu erzeugen. Viele Volumenzellen können bessere Oberflächen und feinere Strukturen liefern, erhöhen aber deutlich den Speicherbedarf und die Berechnungszeit. Dabei gilt die allgemeine Regel, dass eine Verdopplung der Elementzahl eine 4x-höhere Rechenzeit erfordert.

## 3. Topologieoptimierung

Die Topologieoptimierung benötigt im ersten Schritt eine statisch-mechanische FE-Simulation mit dem Design Raum als Ausgangslösung. Dabei werden alle mechanischen Lasten und die Bauteillagerung berücksichtigt. Sobald die Initiallösung vorliegt, benötigt der Optimierer 2 weitere Kriterien.

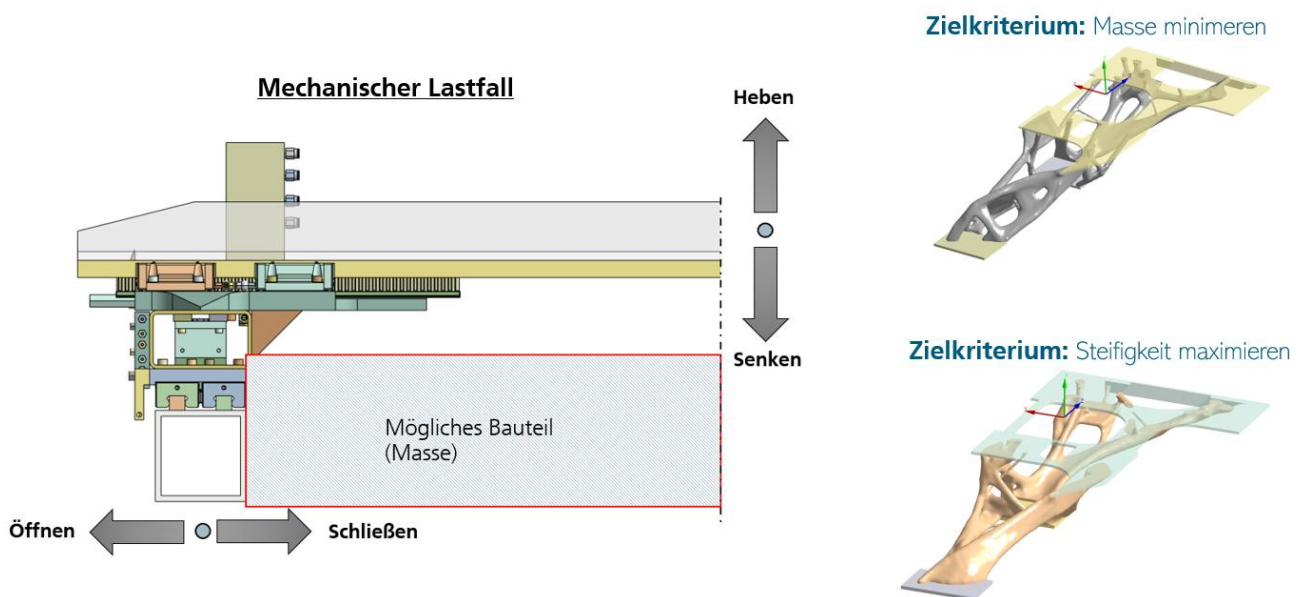
### a) Zielfunktion bzw. Optimierungskriterium:

Die wichtigste Einstellung, die der Benutzer vornehmen muss, da diese den Zweck der Optimierung festlegt. Zwei Beispiele hierfür sind:

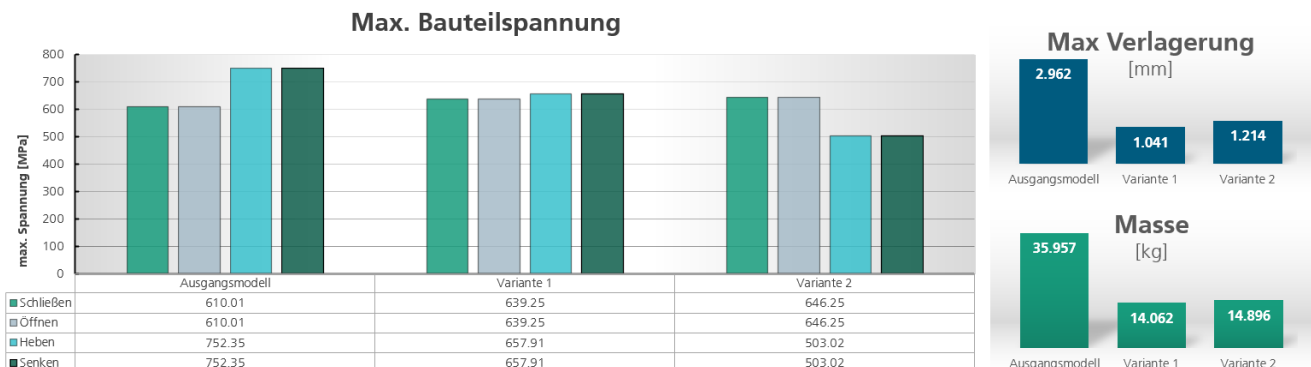
- Minimierung der Bauteilmasse (Hauptkriterium für den Leichtbau)
- Maximierung der Steifigkeit/Minimierung der Verlagerung (Hauptkriterium für mechanisch belastete Anwendungen)

Jedes Zielkriterium hat Stärken und Schwächen und muss für den jeweiligen Anwendungszweck optimal gewählt werden. Hier empfiehlt sich der Vergleich der Lösungen mit den unterschiedlichen Zielkriterien.

Folgendes Beispiel zeigt die Ergebnisse zwei unterschiedlicher Zielfunktionen:



Bei dem Bauteil handelt es sich um eine Transferschienenbaugruppe, welche über eine mehrstufiges Lastprofil zyklisch belastet wird. Die im Modell angewendeten Kräfte und Momente führten zu der finalen Topologiestruktur. Die endgültige Auswertung kann den folgenden Diagrammen entnommen werden.



Bei der Variante 1 wurde als Zielfunktion die Masse minimiert und bei der Variante 2 die Steifigkeit maximiert. Als Nebenfunktion wurde ein ähnliches Spannungsverhalten wie das Ausgangsmodell angesetzt. Die Berechnungsergebnisse gelten für die Topologiestruktur nach der Geometrienachbearbeitung (siehe Schritt 4). Wie zu erkennen ist führen beide Optimierungsansätze zu komplett unterschiedlichen 3D-Geometrien. Bei beiden Varianten konnte die Gesamtmasse signifikant reduziert werden. Bei der Variante 2 konnten die Spannungen noch weiter reduziert werden.

### b) Beschränkungen oder Nebenfunktion:

Das zweite wichtige Kriterium ist mindestens eine Einschränkung, da sonst der Optimierer unendlich viele Lösungen liefern würde. Mögliche Beschränkungen wären z.B.:

- Zulässige Maximalspannungen (bei Minimierung der Masse)
- Vorgabe einer Wunschmasse (bei Maximierung der Steifigkeit)

Anschließend wird iterativ die optimale Struktur ermittelt, dabei stehen dem Optimierer die Volumenzellen des Designraums zur Verfügung. Nicht benötigte Volumenzellen werden hierbei in jedem Iterationsschritt deaktiviert, benötigte aktiviert. Am Ende der Berechnung sollte sich die Topologiestruktur geometrisch zwischen zwei Iterationsschritten nicht mehr ändern, die Lösung ist konvergiert.

## 4. Nachbearbeitung und Verifizierung

Je nach Netzqualität und Konvergenzverhalten des Löser kommt eine Topologiestruktur mit mehr oder weniger guter Qualität heraus, welche optisch und in praktischer Hinsicht vom Benutzer zu bewerten ist. Netzelemente mit schlechter Qualität oder unstrukturierte Elemente (Tetraeder) können zu einer zerklüfteten und fehlerhaften Oberfläche führen, was den nächsten Schritt, die Geometrienachbearbeitung, erschwert.

Schlechte Topologieergebnisse sind sehr häufig auf unpassende Zielfunktionen und Beschränkungen und einen ungünstigen Design-Raum zurückzuführen. Oft ist ein zu großer und zu grob vernetzter Design-Raum das Hauptproblem. Es kann deshalb notwendig sein, in weiteren Schritten den Design-Raum anhand des Topologieergebnisses anzupassen und z.B. Bereiche rauslöschen, welche ohnehin keine Rolle für die Topologiestruktur spielen. Dadurch lässt sich der Design-Raum im Volumen verkleinern und feiner vernetzen. Gute Werte in der Praxis wären 7 -20 % des Volumens der Topologiestruktur vom Design-Raum nach der Berechnung.

Der nächste Schritt der *Geometrieneumodellierung* ist notwendig, um aus dem Topologieergebnis wieder einen für den Computer verwertbaren 3D-Volumenkörper zu erzeugen.

Dabei können die beiden folgenden Ansätze verfolgt werden:

- 1) Nutzung einer speziellen Software (z.B. Spaceclaim, CAD-Programme wie Creo) für die Rekonstruktion der Topologiestruktur. Hierfür wird die berechnete Struktur als STL-Datei importiert, mithilfe eines glatten Oberflächennetzes (Schrumpferpackung) neu strukturiert und wieder in einen 3D-Volumenkörper

umgewandelt. Dabei können Glättungsfunktionen und Reparatur-Tools eingesetzt werden. Das Ergebnis sind in der Regel geschlossene und komplexe Freiformflächen und große Dateien, wenn diese in einem neutralen CAD-Format (z.B. STEP) exportiert werden.

- 2) Manuelle Nachkonstruktion der Struktur in einer CAD-Umgebung mithilfe der Standard-Werkzeuge (z.B. Austragungen, Schneiden, Verrunden). Das Ergebnis sind meistens geometrisch einfache Formen, die jedoch von der Topologiestruktur abweichen können. Die Teile ähneln dann klassischen Konstruktionsteilen.

Der erste Ansatz ist vorzuziehen, wenn additive Fertigungsverfahren (z.B. 3D-Druck) zum Einsatz kommen, da hier die Struktur mit der optimierten Variante am besten übereinstimmt. In einigen Fällen kann die Topologiestruktur direkt vom 3D-Drucker eingelesen werden (STL-Format). Der zweite Ansatz muss gewählt werden, wenn klassische Fertigungsverfahren genutzt werden und erhebliche Geometrieinschränkungen gegeben sind, da Freiformflächen oder Überhänge oft nicht herstellbar sind, oder das Werkzeug die Position nicht erreichen kann.

Unabhängig vom Ansatz muss eine finale FE-Berechnung mit der finalen Geometrie und den mechanischen Randbedingungen als Verifikation durchgeführt werden.

Da das Optimierungsergebnis von dem Berechnungsergebnis der Verifikationsrechnung abweichen kann, muss das finale Berechnungsergebnis sorgfältig geprüft werden. Wenn z.B. zulässige Spannungsgrenzen überschritten werden oder die Steifigkeit nicht ausreicht, muss die Optimierungsschleife erneut durchlaufen werden. Dabei können die Ziel- und Nebenfunktionen angepasst, oder dem Optimierungsergebnis ein Material-Sicherheitszuschlag aufgerechnet werden. Gerade die zuletzt genannte Methode kann zu deutlich besseren Ergebnissen führen, da bei der Geometrienachbereitung oft Materialstruktur verloren geht.

### Materialselektive Optimierung:

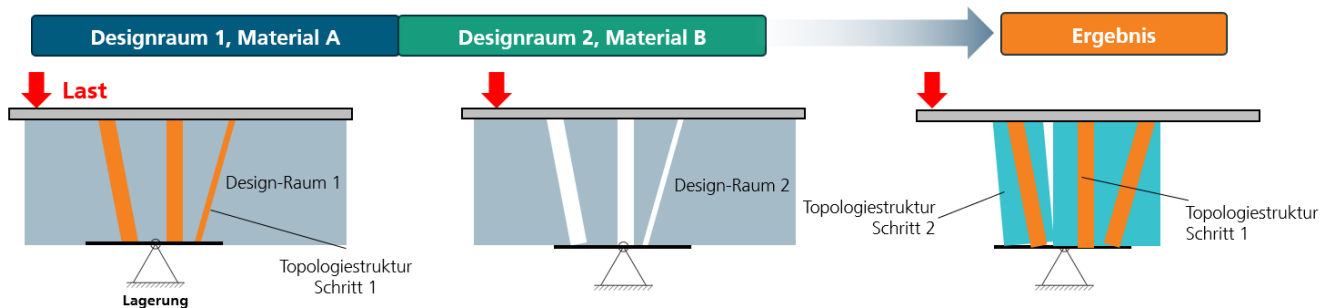
Die Materialselektive Optimierung führt mindestens eine zweite Optimierungsschleife in den Prozess ein. Da es sonst unendlich viele Lösungen geben würde, wird ein weiteres Optimierungskriterium für diesen Prozess notwendig. Daneben werden mindestens zwei verschiedene Materialien (hier als Material A und Material B bezeichnet) mit Unterscheidung in mindestens einer Materialeigenschaft, oder zwei gleiche Materialien mit der Unterscheidung der Fertigungsprozesse benötigt. Hier sind einige praktisch umsetzbare Kombinationen:

- Material A und B in additiver Fertigungsweise (Mischdüsen oder 2 unterschiedliche Druckköpfe)
- Material A klassische Fertigungsverfahren (z.B. zugeschnittene Grundplatte), Material B wird additiv aufgetragen
- Material A, ein Teil des Bauteils wird klassisch gefertigt und später mit gleichem Material additiv ergänzt (zwei Fertigungsschritte)

Bei der Unterscheidung von Materialeigenschaften gibt es sehr viele Kombinationen, von denen einige hier aufgezählt werden:

- Material A und B haben unterschiedliche Festigkeiten; Material A hat eine höhere Festigkeit, ist aber teuer
- Material A hat eine geringere Dichte als Material B
- Die mechanische Bearbeitung von Material A ist deutlich schwieriger, weshalb der 3D-Druck sich besser eignet

Für das erste Beispiel kann eine Topologieoptimierung in 2 Schritten erfolgen, wofür 2 Design-Räume benötigt werden:



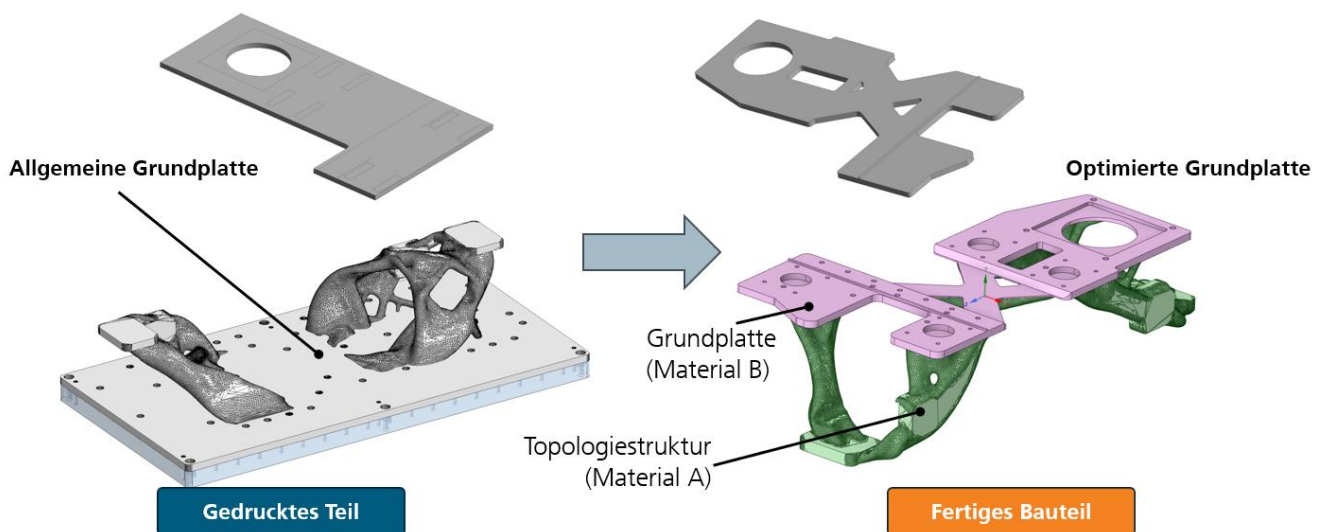
Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung des vollständigen Design-Raumes mit dem Höherfesten, aber teureren Material A. Um Kosten zu sparen, wird ein maximal zugelassene Masse als zusätzliches notwendiges Kriterium eingeführt. Als Zielkriterium kann die Spannung minimiert oder die Steifigkeit maximiert werden. Es ist von Anfang an klar, dass die Festigkeit der Materialmenge nicht ausreicht, um ein mechanisches Versagen des Bauteils zu verhindern. Deshalb wird im zweiten Schritt die Topologiestruktur um das mechanisch minderwertige, aber billige Material B ergänzt. Hierfür wird ein zweiter Design-Raum benötigt, welcher der Differenz des ersten Design-Raumes mit dem Ergebnis der 1. Berechnung (Topologiestruktur) entspricht. Am Ende existieren 2 aufbereitete Volumenkörper, welche mithilfe einer Mischdüse in additiver Weise gedruckt werden könnten. Aufgrund der zusätzlichen Stützstruktur von Material B werden die Festigkeitsanforderungen eingehalten.

Ähnliches Vorgehen ist für das zweite Beispiel vorgesehen, wobei hier der Schwerpunkt auf der Masse liegt. Als Beispiele gelten Leichtmetalle wie Aluminium oder Kunststoffe, welche als Füllstrukturen Verwendung finden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass unterschiedlich leichte Materialien große Unterschiede in der Schmelztemperatur und im thermischen Verhalten haben können.

Das dritte Beispiel bietet die meisten Vorteile, wenn man bestehende Konstruktionen im Hinblick auf Leichtbauweise oder Maximierung der Steifigkeit ersetzen möchte. Beispiel hierfür sind dynamisch bewegte Anlagenteile, wo die Einbaubedingungen und Lage der Funktionsflächen von der Baugruppe festgelegt sind.

Am Ende sollen die Vorteile der additiven Fertigung (Gestaltungsfreiheit) und die der klassischen Fertigung (hohe Fertigungsgenauigkeit) kombiniert werden. Das Verfahren des 3D-Drucks bietet zwar die hohe Gestaltungsfreiheit, ist aber ungenau und führt zu schlechten Oberflächen. Die Form- und Lagetoleranzen werden nicht eingehalten, weshalb eine Nachbearbeitung der Druckteile notwendig wäre (analog zu Gussteilen).

Aus diesem Grund bietet sich der Ansatz von zwei unterschiedlicher Fertigungsverfahren an. Dabei soll die Topologiestruktur um mindestens eine Startplatte und ggf. weiterer Funktionsplatten ergänzt werden. Die Startplatte und alle Platten für Funktionsflächen sind Teil des Design-Raumes bei der Topologieoptimierung, allerdings darf von diesen Hilfskörpern kein Material beim Optimierungsprozess entfernt werden. Im ersten Berechnungsschritt besteht das Ergebnis dann aus der Summe der Topologiestruktur und den Hilfskörpern. In der zweiten Berechnung können dann die Hilfskörper in Anlehnung an die erste Berechnung in ihrer Struktur nochmal konstruktiv optimiert werden (z.B. um Gewicht einzusparen). Am Ende muss jedoch ein Gesamtbauteil entstehen, welches sich fertigen lässt.



Bei den Materialpaarungen unterschiedlicher Werkstoffe können weitere Probleme auftreten, welche zu berücksichtigen sind. Bei den Versuchen mit dem Demonstratorbauteil (Druckprozess auf Grundplatte) konnten vor allem thermische Probleme infolge von Abkühleffekten und der Wärmeausdehnung festgestellt werden. Dies führte zu vermehrter Rissbildung infolge thermischer Zugspannungen bei der Abkühlung, vor allem bei spröden Werkstoffen. Ein weiteres Problem ist die unkontrollierte Porenbildung infolge von Gaseinschlüssen (Wasserstoff) beim Druckprozess. Aber auch andere metallurgische Effekte durch Legierungsbestandteile müssen bei der Materialpaarung berücksichtigt werden. So kann im ungünstigen Fall sich die erste Druckschicht von der Grundplatte lösen, wenn Unverträglichkeiten bei Legierungsbestandteilen vorliegen.

Im Laufe des Projektes wurden unterschiedliche Bauteile ausgewählt, um zu untersuchen, ob sie als Druckbauteil topologieoptimiert ausgeführt werden können. Die Bauteile wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- # Dynamisch bewegte Bauteile
- # Komplexe Strukturen
- # Bauteilgröße (passend für Anlage von Chiron)
- # Möglichkeit der Validierung in einer Anlage

Als erstes wurde eine Schlittenbaugruppe aus einem Transfersystem zur Produktion von Bipolarplatten untersucht. Das Bauteil wird konventionell als Schweißbaugruppe ausgeführt und im Betrieb dynamisch bewegt.



Bild: Eingebaute konventionelle Schweißbaugruppe

Als Vorgabe für die Topologieoptimierung galt in erster Linie die Gewichtsreduktion bei gleichbleibender Verformung im Betrieb.

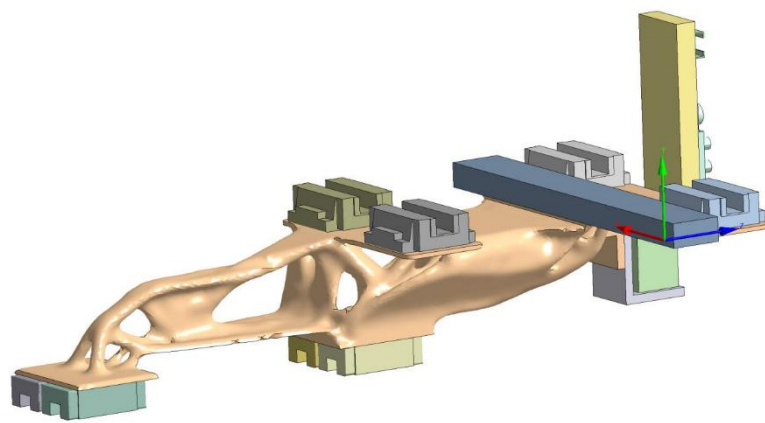


Bild: Topologieoptimierte Baugruppe

Da sich im Laufe des Projektes Schwierigkeiten mit dem zu druckenden Werkstoff zeigten wurden auch Bauteile untersucht, die zu groß für die Anlage von Chiron sind. Diese waren ein Hebe-Hubschlitten für ein Blechtransfer und eine Greiferschiene für ein Schmiedetransfer. Bei der Greiferschiene stellte sich heraus dass die vorhandene Struktur

aus einem Quadrattrohr sich nicht sinnvoll durch eine gedruckte Struktur ersetzen lässt. Im Q2/24 zeichnete sich die Möglichkeit des Testeinbaus eines gedruckten Bauteils für Q2/25 in einer, zu diesem Zeitpunkt verfügbaren, Anlage ab. Daraus resultierend wurde aus dieser Anlage ein Bauteil definiert und für den Druck topologieoptimiert.

### 1.6. Arbeitspaket 6: Verfahren zur Aufbereitung der Partikelreste aus der Strahlmittelherstellung

Arbeitspaket 6 stellte das zentrale Arbeitspaket der ERVIN Germany GmbH in enger Zusammenarbeit mit Fraunhofer dar und konzentrierte sich auf die Entwicklung geeigneter Verfahren zur Aufbereitung der in der Strahlmittelproduktion anfallenden feinen Partikelreste. Diese Fraktionen sollten so modifiziert werden, dass sie in additiven Fertigungsverfahren prozesssicher eingesetzt werden können. Zu diesem Zweck wurden sowohl bestehende Produktionsschritte analysiert als auch neue Aufbereitungsrouten experimentell erprobt und bewertet.

Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Identifikation und Kontrolle jener Prozessparameter, die maßgeblichen Einfluss auf die stoffliche Qualität der daraus gewonnenen Pulverchargen haben. Bereits zu Beginn des Arbeitspakets wurde deutlich, dass sowohl der Sauerstoffgehalt als auch der Kohlenstoffgehalt der Partikel in direktem Zusammenhang mit der späteren Prozessstabilität stehen. Aus diesem Grund wurden einzelne Schritte der Strahlmittelherstellung hinsichtlich ihres Einflusses auf Oberflächenoxidation, Gasaufnahme und Partikelmodifikationen untersucht. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnten Prozessschritte identifiziert werden, die sich für gezielte Anpassungen eigneten, um den Sauerstoffeintrag zu reduzieren.

Parallel dazu wurden manuelle und mechanische Aufbereitungsverfahren angewendet, einschließlich Mahlung, Separation und kontrollierter Siebung. Diese Maßnahmen hatten das Ziel, sowohl die Partikelmorphologie (insbesondere Kantenabrundung und Rundheitsverbesserung) als auch die Partikelgrößenverteilung zu optimieren. Dabei zeigte sich, dass verschiedene Strahlmittelchargen durch geeignete Kombination und Mischung hinsichtlich ihres Kohlenstoffgehalts angepasst werden konnten, um für den Druckprozess geeignete Materialeigenschaften zu erzielen.

Während der Projektlaufzeit konnte zudem nachgewiesen werden, dass die wesentlichen Prozessschritte zur Aufbereitung der benötigten Pulverchargen mit den im Werk Glaubitz vorhandenen Anlagen durchführbar sind. Dies unterstreicht die industrielle Realisierbarkeit der entwickelten Methoden und ermöglicht eine ressourceneffiziente Nutzung vorhandener Infrastruktur ohne zusätzliche Investitionen in Spezialtechnik.

Im späteren Projektverlauf trat ein Phänomen auf, das als „Rucksack-Effekt“ bezeichnet wurde. Hierbei kam es während des Druckprozesses zur Bildung von oxidischen Agglomeraten im Schmelzbad, die aus nicht vollständig aufschmelzenden Legierungsbestandteilen (insbesondere Oxiden von Aluminium und Magnesium) resultieren. Diese Agglomerate sammelten sich während des Prozesses am Druckkopf an und konnten sich mit zunehmender Größe unkontrolliert vom Druckkopf lösen. Die daraus entstehenden Einschlüsse im Bauteil führten zu lokal begrenzten Materialinhomogenitäten, die jedoch in ihrer Ausprägung vergleichbar mit jenen sind, wie sie bei klassischen Gusswerkstoffen

auftreten. Durch diese Erkenntnis wurde deutlich, dass das Material trotz verbleibender Oxidationsrückstände in bestimmten Anwendungsbereichen technisch sinnvoll eingesetzt werden kann, sofern entsprechende konstruktive Anpassungen berücksichtigt werden.

### 1.7. Arbeitspaket 7: Demonstration und Validierung

Im Rahmen von Arbeitspaket 7 wurden die abgeschlossenen Entwicklungen in praktischen Validierungsversuchen demonstriert. Ziel dieses Arbeitspakets war es, die technische Machbarkeit der Aufbereitung der Strahlmittelabfälle zu funktionsfähigem Druckpulver zu belegen und die Eignung der erzeugten Chargen in realen additiven Fertigungsprozessen nachzuweisen.

Zu diesem Zweck wurden die aufbereiteten Pulverchargen an die Projektpartner Fraunhofer IWU und CHIRON übergeben, die damit umfangreiche Druckversuche durchführten. Die Ergebnisse bestätigten, dass das Material grundsätzlich in der Lage ist, stabile Schmelzbäder zu erzeugen und funktionale Strukturen aufzubauen. Trotz der weiterhin vorhandenen Einschlüsse, die vor allem auf den zuvor beschriebenen Rucksack-Effekt zurückzuführen sind, wiesen die gedruckten Bauteile mechanische Eigenschaften auf, die mit solchen von Gussbauteilen vergleichbar sind. Für eine Vielzahl industrieller Anwendungen, insbesondere im Bereich funktionaler Komponenten oder beschichteter Substrate, ist dieses Eigenschaftsprofil technisch ausreichend und wirtschaftlich attraktiv.

Die Durchführung dieser Demonstratoren validierte damit, dass die im Projekt entwickelten Aufbereitungs- und Modifikationsprozesse eine ressourceneffiziente Alternative zu konventionellen, primärmetallischen AM-Pulverherstellungsverfahren darstellen. Zudem wurde nachgewiesen, dass die von ERVIN entwickelten Pulverchargen auch in größeren Mengen mit werkseigener Infrastruktur bereitgestellt werden können, wodurch sich eine direkte Möglichkeit zur industriellen Umsetzung ergibt.

Am Projektende wurden verschiedene Bauteile von DREHER gedruckt, Hauptfokus lag jedoch auf dem nachfolgend dargestellten Bauteil einer Automatisierungsanlage für Umformpressen.

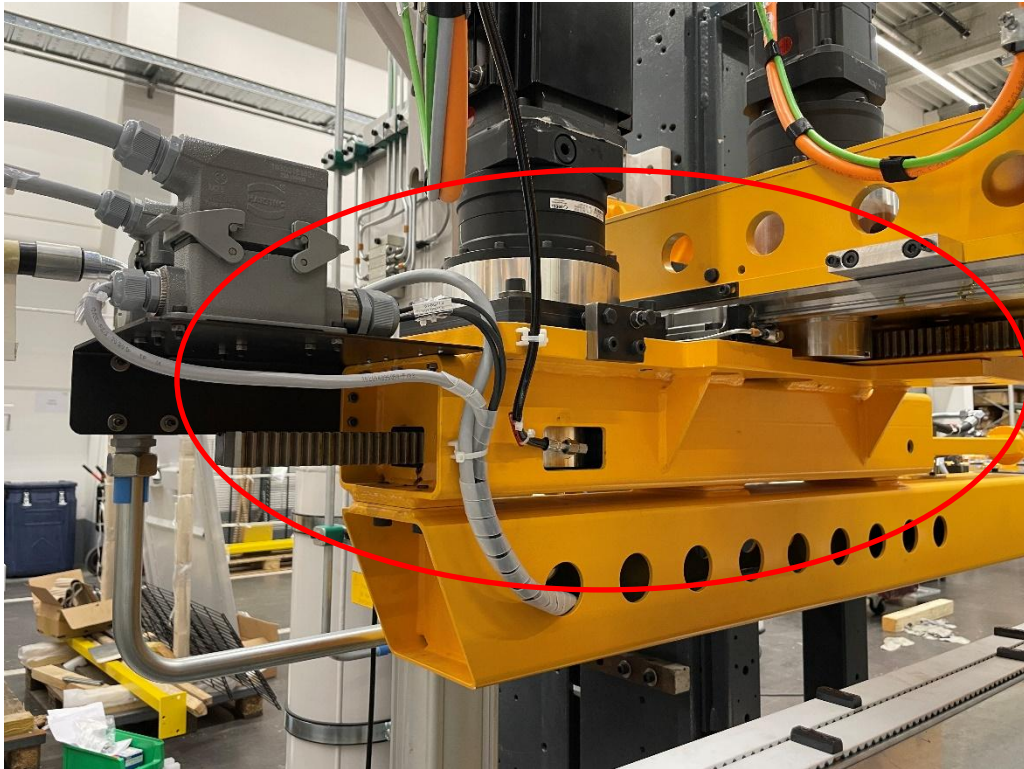


Abbildung 22: Eingebaute konventionelle Schweißbaugruppe

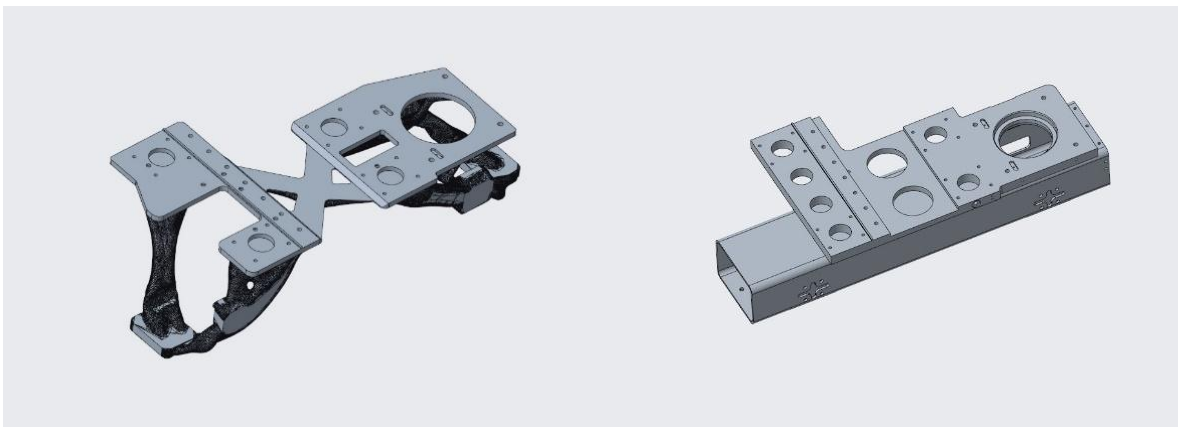


Abbildung 23: Vergleich gedrucktes zu geschweißtem Bauteil

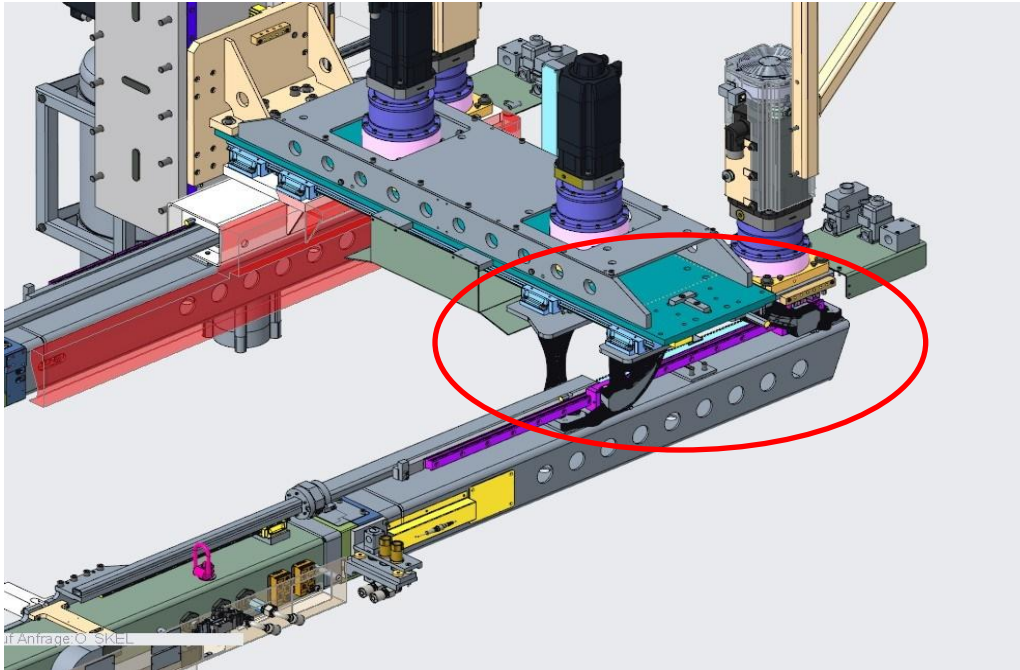


Abbildung 24: Topologieoptimiertes Bauteil im Modell eingebaut

Beim Druck des Bauteils aus Amasteel zeigten viele Risse in der Struktur weshalb entschieden wurde das Bauteil nicht spanend weiter zu bearbeiten. Anschließend wurde das Bauteil aus Amachrom nochmals gedruckt. Das Ergebnis war ohne Risse und wurde nach dem Lösungsglühn spanend bearbeitet.



Abbildung 25: Gedrucktes Bauteil aus Amachrom



Abbildung 26: Bearbeitetes Bauteil aus Amachrom

Die Bearbeitung des gedruckten Bauteils stellte sich komplexer dar als gedacht wodurch sich die Fertigstellung erheblich verzögerte, was den Einbau und somit den Versuch in die Anlage vor der Auslieferung an den Kunden nicht mehr möglich machte. Nach dem Projektende wurde noch ein weiteres Bauteil für den Druck beim Chiron optimiert und soll dort auch noch im Q4/25 gedruckt werden.

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 7 bestätigen im ergebnis die prinzipielle Verwertbarkeit der Aufbereitungsprozesse sowie die technische Nutzbarkeit der aufbereiteten Partikelreste in geeigneten additiven Fertigungsverfahren. Damit wurde ein zentraler Meilenstein des Gesamtprojekts erreicht.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Siehe Zwischen- und Schlussnachweise.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren zur Zielerreichung des Förderprogramms TTP LB zwingend erforderlich und in ihrem Umfang sowie ihrer Ausgestaltung angemessen. Die Notwendigkeit ergab sich aus dem Bedarf, zentrale Hemmnisse der additiven Fertigung – insbesondere die energieintensive Pulverherstellung, hohe Materialkosten und eingeschränkte Wirtschaftlichkeit – durch ein innovatives Upcycling-Verfahren zu überwinden. Die Erschließung der metallischen Abfallströme aus der Strahlmittelproduktion war hierfür unabdingbar, da nur so die angestrebte THG-Reduktion und Kostensenkung erzielt werden konnten.

Die werkstofftechnischen Untersuchungen zur Schweißbarkeit, Porenbildung, Legierungsentmischung und Prozessstabilität waren notwendig, um die Verarbeitbarkeit der

rezyklierten Pulverqualitäten abzusichern und die Grenzen des LMD-Prozesses zu bestimmen. Ebenso erforderte die Zielstellung die Entwicklung eines Pulverschalters und eines Druckkopfes zur in-situ-Mischung, da variable Materialverteilungen und funktionsangepasste Bauteile nur mit dieser Technologie realisierbar sind. Die Arbeiten zur topologieoptimierten und materialadaptiven Bauteilauslegung waren erforderlich, um die Leichtbaupotenziale in industriell relevanten Demonstratoren abzubilden.

Der durchgeführte Arbeitsumfang war angemessen, da alle Tätigkeiten unmittelbar zur Erreichung der Projektziele beitrugen. Anpassungen erfolgten auf Basis notwendiger Erkenntnisse aus Prototypentests. Untersuchungen, die keine erfolgversprechende Perspektive boten, wurden nach gemeinsamer Abstimmung beendet. Insgesamt wurden die finanziellen und personellen Ressourcen wirtschaftlich eingesetzt, die Arbeiten zielgerichtet durchgeführt und der projektierte Forschungsrahmen eingehalten.

#### 4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende sind insofern vorhanden, als dass die Pulvermischtechnologie bereits prototypisch in ein Kundensystem verbaut wurde. Die Anlage steht beim Kunden zum Zwecke des Feldtests. Hierbei konnten Optimierungen vorgenommen werden. Es ist angesichts der momentanen Marktsituation jedoch nicht zu erwarten, dass CHIRON die additiven Systemlösungen als Serienprodukte anbietet. Daher lassen sich keine Markterwartungen formulieren. Funktional und wirtschaftlich bietet das System Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen in Form eines vergleichsweise einfachen Set-up, der Flexibilität des Pulvermanagements und der damit verbundenen hohen Aufbauraten. Damit kann ein breites Spektrum an Zielbranchen, wie Energy, Automotive und Aerospace, weltweit erreicht werden. Eine weitere Umsetzungs- und Transferstrategie ist seitens CHIRON aktuell nicht vorgesehen.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende werden von ERVIN als positiv bewertet. Durch die Nutzung bislang kostenverursachender Abfallströme als Rohstoff für additive Fertigungsverfahren kann eine deutliche Reduktion von Materialkosten erreicht werden. Gleichzeitig wird die Abhängigkeit von kommerziell verfügbaren, energieintensiv hergestellten AM-Pulvern verringert. Besondere wirtschaftliche Vorteile ergeben sich für Anwendungen, bei denen gussähnliche Werkstoffeigenschaften ausreichend oder sogar vorteilhaft sind, beispielsweise bei funktionalen Bauteilen, Verschleißschutzbeschichtungen oder hybriden Fertigungskonzepten. Die Ergebnisse sind insbesondere für Anwender in den Bereichen Maschinenbau, Werkzeugbau und Instandhaltung von Interesse. Die Umsetzung erfolgt schrittweise durch industrielle Pilotanwendungen und Technologietransfer innerhalb bestehender Kundenbeziehungen.

Die Herstellung kostengünstiger 3D-gedruckter Leichtbauteile aus Stahl kann in naher Zukunft (2 bis 3 Jahre) dazu führen, dass diese auch im Maschinen- und Anlagenbau zur Massenreduzierung und Performancesteigerung häufiger zum Einsatz kommen. Dies kann als Wettbewerbsvorteil zu Anlagen mit konventionell hergestellten Baugruppen angesehen werden.

Wissenschaftlich-technisch konnte die Machbarkeit sowie die prototypische Nutzbarkeit beim Kunden nachgewiesen werden. Das erarbeitete Wissen steht für die eventuelle

Wiederaufnahme der kommerziellen Verwertung der additiven Produkte zur Verfügung. Das Projektteam hat ein vor dem Projekt nicht bestehendes Netzwerkwerk aufgebaut. Daran ist die Willenserklärung gekoppelt, auch in Zukunft zu kooperieren.

Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit ist an die Wiederaufnahme der additiven Systemlösungen gekoppelt. Die aktuelle Marktsituation erlaubt diesen Schritt jedoch derzeit nicht. Das erarbeitete Know-how und das CHIRON-Projektteam bleiben dem Unternehmen erhalten. Die kompetente Betreuung der im Feld befindlichen Anlagen kann mit den im Projekt erarbeiteten Kenntnissen umgesetzt werden.

### 5. Während der Durchführung des Vorhabens den ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Erfindungen und Schutzrechtsanmeldungen oder -erteilungen sind seitens des Zahlungsempfängers nicht erfolgt und wurden auch seitens Dritter nicht bekannt. Schutzrechte von Stakeholdern wurden nicht in Anspruch genommen oder verwertet. Es sind nach aktuellem Stand der Dinge auch in Zukunft keine Verwertungsmöglichkeiten für den Zahlungsempfänger erkennbar.

### 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Projektergebnisse wurden durch das Projektteam, aber auch durch angrenzende Abteilungen, wie Vertrieb, Produktmanagement sowie Forschung & Entwicklung, gegenüber potenziellen Kunden präsentiert. Damit konnte der Vertrieb des Produktzweigs „Additive Fertigung“ erfolgreich flankiert werden. Ausgewählten Kunden wurde während der jährlichen CHIRON Group Open House der Projektstatus demonstriert. Die daraus resultierenden Kundenaufträge zahlen so indirekt auf den Projekterfolg ein.

Durch ERVIN erfolgte eine Messebeteiligung auf der Formnext.