Schlussbericht zum Teilprojekt

„Verfahren zur schnellen Bereitstellung von keramischen Kernen für das Feingießen von Bauteilen für die Luftfahrt“

innerhalb des Verbundprojektes

IceCore

„Innovatives Herstellungsverfahren zur Verkürzung der Lieferzeiten von Kernen für Feingussteile in der Luftfahrt“

Laufzeit: 01.05.2022 bis 31.08.2024

Referenznummer: Förderkennzeichen: 20Q2111A

Pistol GmbH, 04442 Zwenkau

Inhalt

I. Kurze Darstellung 4
1. Aufgabenstellung 4
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 5
3. Planung und Ablauf des Vorhabens 5
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand 6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6
II. Eingehende Darstellung 7
1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse 7
II.1.1 Zielsetzung hinsichtlich des Anforderungsprofils für die neuen keramischen Kerne 7
II.1.2 Prozesstechnik und Werkzeugentwicklung 8
II.1.3 Fräs- und Kalibriertechnik 13
II.1.4 Technologiedemonstrator 14
2. Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises 21
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 21
4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit 21
5. Relevante Ergebnisse Dritter 22
6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 22

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtprojektstruktur 6
Abbildung 2: Formen zur Herstellung von Prüfkörpern. Links: Form für Biegestäbchen mit Einsätzen im Kopfbereich für Hinterschneidungen. Rechts: Stufenform 8
Abbildung 3: Form zur Fertigung konturnaher Kerne 8
Abbildung 4: Gefriervorrichtung bis – 150 °C 9
Abbildung 5: Vorrichtung zum gesteuerten Einfrieren zur Fertigung von Halbzeugen 10
Abbildung 6: Formen zur Fertigung von Halbzeugen. Links: Teilbare Aluminiumform. Rechts: Styroporform mit einem Boden aus Aluminiumblech 10
Abbildung 7: Links: Halbzeug gefertigt in der teilbaren Aluminiumform; jeweils zugeführte Suspensionsmenge 30 ml; Trennung der Schichten ist hier deutlich erkennbar. Rechts: Gelöste Lagen 11
Abbildung 8: Links: Halbzeug, gefroren in Styroporform mit einer jeweils zugeführten Suspensionsmenge von 10 ml. Rechts: Gelöste Lagen; Adhäsion der Lagen verbessert sich tendenziell mit zunehmendem Abstand von der Kühlplatte 11
Abbildung 9: Halbzeug mit jeweils 30 ml zugeführter Suspensionsmenge; die Lagen sind gut miteinander verbunden 12
Abbildung 10: Halbzeuge 12
Abbildung 11: Fixierung der Kerne für die mechanische Bearbeitung 13
Abbildung 12: Keramische Kerne: Ausgangsgeometrie und fertig bearbeitet (Mitte) 14
Abbildung 13: Gesinterter Kern (Links, 1400 °C), getrockneter Kern (Rechts, 110 °C) 15
Abbildung 14: Keramische Kerne eingelegt in gedruckte Wachs- (blau) oder PMMA- (gelb) Modelle 15
Abbildung 15: Keramischer Kern gefertigt aus einem keramischen Halbzeug 16
Abbildung 16: Entwurf von Modell und keramischer Kern für einen größeren Demonstrator 17
Abbildung 17: Form zur Fertigung der konturnahen Kerne (großer Demonstrator) 17
Abbildung 18: Gefriergelierte Kerne während der Trocknung. Links: kleiner Demonstrator; Rechts: großer Demonstrator# 18
Abbildung 19: Fertig bearbeitete Kerne (großer Demonstrator) 18
Abbildung 20: Spritzwerkzeug mit eingesetztem Kern (Links); Rechts: Fertiges Wachsmodell mit umspritzten Kern 19
Abbildung 21: Röntgenaufnahme des gegossenen Bauteils nach der Entkernung 19
Abbildung 22: CT-Aufnahme des Gussbauteils 20
Abbildung 23: CT-Aufnahme (links) und mikroskopische Aufnahme (rechts) des Gussbauteils 20

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Projektes IceCore war es, die Effizienz in Produktentwicklungszyklen von Feingussteilen für Flugzeugkomponenten zu verbessern. Bisher besteht ein zeitlicher Engpass in der Entwicklungsphase von Gussteilen, deren komplexe Geometrien nur durch Einsatz von Keramikkernen herstellbar sind. Ziel war die Entwicklung eines Verfahrens zur Verkürzung von Lieferzeiten (> 80%) für gegossenen Prototypenkomponenten und mit dieser Verfahrensverbesserung eine enorme Beschleunigung der Entwicklungszeiten und Produktentwicklungszyklen zu ermöglichen und die Wettbewerbsfähigkeit und die Wertschöpfung am Beginn der Zuliefererkette zu stärken. Das trifft genau die Kundenbedürfnisse innerhalb der aktuell agilen Luftfahrtforschungslandschaft, die schnelle Innovationen und Entwicklung, wie beispielsweise in den Bereichen Urban Air Mobility, Elektrifizierung des Antriebsstrangs und der konventionellen Luftfahrt, betreibt. Im Feinguss wird eine Vielzahl anspruchsvoller Bauteile für konventionelle Luftfahrzeuge und aktuelle Entwicklungen im Bereich effizienter und klimafreundlicher Lufttransportsystemen gefertigt. Diese Gussteile weisen komplexe innenliegende Geometrien auf, die nur mit Hilfe von verlorenen Keramikkernen herstellbar sind (z.B. Turbinenschaufeln). Bisherige Fertigungsrouten verhindern eine schnelle prototypische Umsetzung entsprechender Feingussteile, weil die Herstellung der Spritzgusswerkzeuge und Kerne langwierig und teuer ist. Wachsmodelle können dagegen bereits heute mit additiver Fertigung schnell und wirtschaftlich hergestellt werden. Hier setzte das Verbundvorhaben „IceCore“ an, um mit der Entwicklung einer neuen Prozessroute zur Herstellung keramischer Kerne eine wesentliche Verkürzung von Produktentwicklungs- und Fertigungszeiten bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten zu ermöglichen. Dazu sollten die Kerne mit dem Gefriergelierverfahren hergestellt werden. Anders als bei konventionellen, gespritzten Kernen entsteht durch den Gefrierprozess keine homogene, sondern eine hierarchische Porenstruktur, die über die Gefrierkinetik gezielt beeinflusst werden kann. Typisch sind eine dichte Struktur mit kleinen Poren an der Kernoberfläche und große Porenkanäle im Inneren. Aufgabenstellung war die Fertigung keramischer Kerne mit geringerer Schwindung und Verzug als konventionell hergestellte Kerne, die darüber hinaus auch mechanisch bearbeitet sind. Deshalb sollen neben endkonturnahen Kernen zusätzlich Halbzeuge aus dem Material produziert und erst durch eine nachträgliche mechanische Bearbeitung die Endgeometrie erzeugt werden. Im Verbundprojekt fallen folgende Aufgaben für die Pistol GmbH in den unterschiedlichen Hauptarbeitspaketen (HAP) an:

HAP 1: Im ersten Schritt definieren die Projektpartner gemeinsam das angestrebte Anforderungsprofil für die keramischen Kerne, legen eine zweckmäßige Prüfmethodik fest und bestimmen die Anforderungen an Formwerkzeuge und Prozess.

HAP 3: Die Pistol GmbH entwickelt und fertigt die Formwerkzeuge für die Gefrierkonsolidierung. Eine elementare Herausforderung besteht darin, die Besonderheiten beim Einfrieren keramischer Suspensionen zu berücksichtigen. Dazu ist es notwendig für das formgebende Werkzeug dünnwandige, thermisch gut leitfähige Materialien einzusetzen, die zudem eine gute Entformung der gefrorenen Bauteile ermöglichen. Sowohl Werkzeuge für die Fertigung endkonturnaher Kerne als auch die Herstellung von Preforms (Blockmaterial) sind Teil der Entwicklung.

HAP 5: Über diese standardisierten Preform-Vorprodukte werden ohne zusätzlichen Formenaufwand Kerne durch zerspanende Bearbeitung hergestellt. Insbesondere bei Einzelteilen kann dies das Mittel der Wahl sein. Außerdem erarbeiten wir geeignete Lösungen zum Einbau der Kerne in die gedruckten Prototypen-Wachsmodelle, bzw. zum Umspritzen von Kernen mit Feingusswachsen in Werkzeugen. Zur Erhöhung der Maßhaltigkeit, zur Kalibrierung sowie für sehr filigrane Bereiche wird es notwendig sein, die keramischen Kerne mechanisch zu bearbeiten. Hierdurch können beispielsweise feine Details oder Hinterschneidungen in den Kern eingearbeitet werden, die sich bei der Herstellung der Kerne im Gefrierprozess nicht realisieren lassen. Zur Erhöhung der Komplexität der Bauteile werden geeignete Methoden zum Fügen der Kerne erarbeitet. Die Pistol GmbH wird mit ihrem Know-how geeignete Bearbeitungsstrategien entwickeln. Gemeinsam mit dem Projektpartner IFAM werden Möglichkeiten für einen nachträglichen Materialauftrag auf Grünkörper oder gesinterten keramischen Kern untersucht. Hierdurch können Fehlstellen an Kernen repariert oder diese geometrisch modifiziert werden.

HAP 6: Hier erfolgt die Entwicklung und gießtechnische Fertigung eines typischen Feingussteils für die Luftfahrtbranche (z.B. Turbinenschaufel) zur Technologiedemonstration und Prozessvalidierung des zu entwickelnden Kernmaterials.

HAP 7: Gemeinsam mit dem Partner IFAM findet eine technische und wirtschaftliche Bewertung der neuen keramischen Kerne für den Feinguss von geometrisch anspruchsvollen Feingussbauteilen statt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wird unter der Voraussetzung durchgeführt, dass es als Verbundprojekt mit dem Fraunhofer Institut IFAM realisiert werden kann. Das Knowhow zum Gefriergelieren und zur Prozessgestaltung zur Fertigung keramischer Kerne liegt beim Projektpartner IFAM. Die erforderliche Vernetzung der unterschiedlichen Kernkompetenzen macht eine öffentliche Förderung zwingend erforderlich, da kein Partner in der Lage ist dieses Vorhaben allein zu bearbeiten und das damit verbundene Forschungsrisiko zu tragen. Eine zielführende Bearbeitung der Thematik erfordert vielmehr eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Industrie und Forschung, um zum einen die spätere industrielle Verwertung und zum anderen die notwendige Erarbeitung der technologischen Grundlagen sicherstellen zu können. Eine weitere Voraussetzung ist durch die langjährige Erfahrung und das vorhandene Knowhow im Bereich Werkzeugbau und Prozessentwicklung für die Fertigung komplexer Feingussbauteile gegeben. Hierdurch können Werkzeuge und Zubehöre für die Fertigung von keramischen Kernen jeglicher Komplexität hergestellt werden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben begann am 01.05.2022 und das Auftakttreffen fand am 07.07.2022 in Zwenkau statt. Im Verlauf des Projektes fanden insgesamt 6 Projekttreffen in Zwenkau und ein Projekttreffen in Bremen statt. Das 2. jährliche Review Meeting erfolgte am 13.11.2023 als Videokonferenz. Der Fortschritt der Arbeiten wurde in zwei jährlichen Zwischenberichten zusammengefasst. Das Projekt sollte nach ursprünglicher Planung im April 2024 abgeschlossen werden. Aufgrund des Ausfalls eines für die Arbeiten benötigten Bearbeitungszentrums wurde eine Laufzeitverlängerung um 4 Monate beantragt und genehmigt. Das Abschlusstreffen fand am 28.08.2024 in Zwenkau statt. Die Aufgabenteilung zwischen den Projektpartnern und die einzelnen abgeschlossenen Arbeitspakete sind in der Übersicht 1 dargestellt.

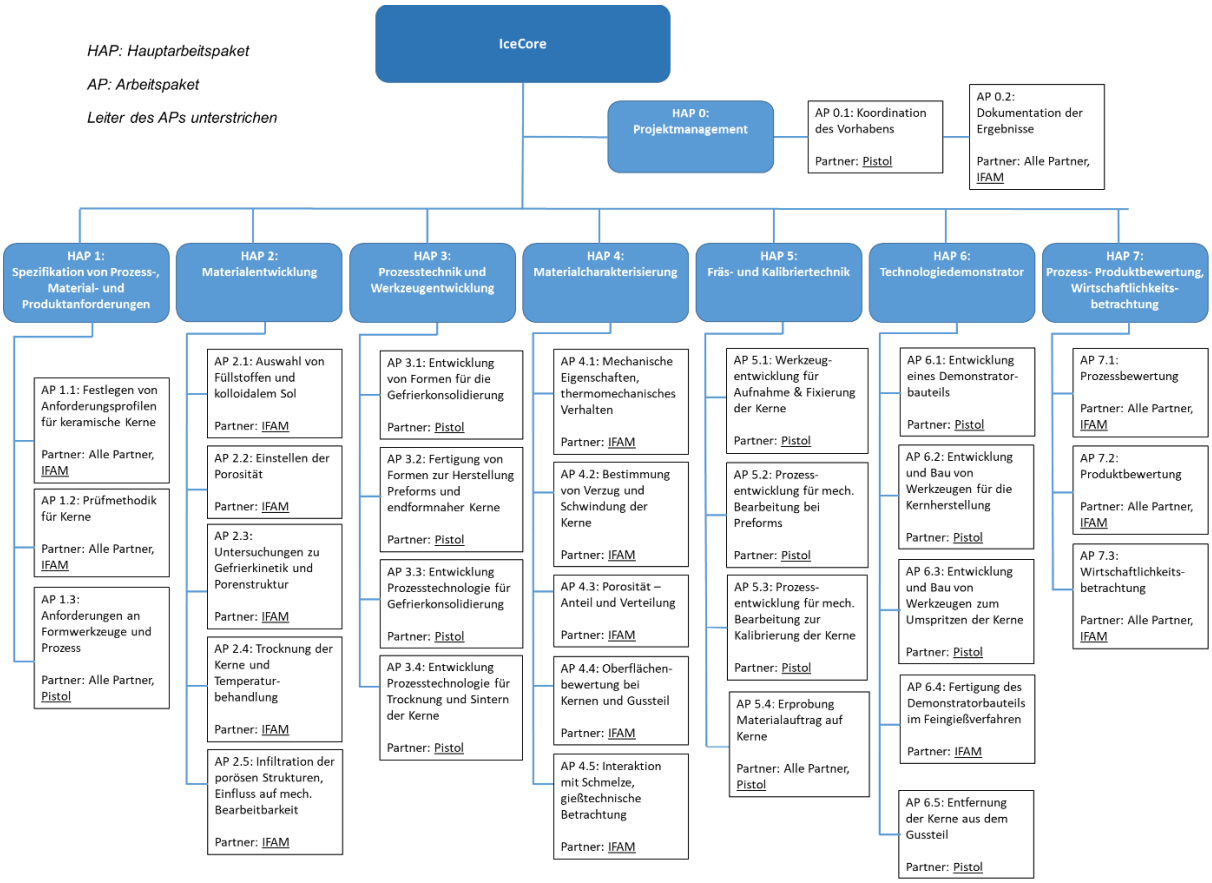

Abbildung 1: Gesamtprojektstruktur

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Keramische Kerne werden beim Feingießen verwendet, wenn Hohlräume durch die stofflichen Eigenschaften der Tauchmassen nicht mehr erreicht werden können. Kriterien sind Fließfähigkeit und Oberflächenspannung der eingesetzten Massen. Sind keramische Kerne notwendig, stellt dies einen erheblichen Mehraufwand dar, dieser zeigt sich in höheren Kosten und vor allem auch in erhöhtem Zeitaufwand bis zur Bereitstellung der Bauteile. Die benötigten Werkzeuge sind sehr teuer und zeitaufwändig herzustellen. Der Fertigungsprozess für komplexe keramische Kerne ist sehr aufwändig, die Prozessfenster für gute Bauteile sind klein und leiden damit unter hohen Ausschussquoten. Im Bereich der additiven Fertigung gibt es bisher nur sehr wenige Verfahren zur schnellen Herstellung von keramischen Kernen (Lithoz). Diese sind allerdings größenmäßig stark limitiert und damit nur für kleine Bauteile geeignet. Eigene Projekte haben bisher auf Grund technischer Probleme bei der Herstellung von Preforms nicht den erwünschten Erfolg gebracht. Prototypen und Teile für die Einzel- und Kleinserienfertigung zum Ausschmelzen oder Ausbrennen stehen aus der eigenen generativen Fertigung nach 5- 10 Werktagen zur Verfügung. Die parallele Fertigung von keramischen Kernen aus Prototypen-Werkzeugen benötigt hingegen mindestens 6- 8 Wochen.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes fand eine enge Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner IFAM statt. Eine Zusammenarbeit mit Dritten erfolgte nicht.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse

II.1.1 Zielsetzung hinsichtlich des Anforderungsprofils für die neuen keramischen Kerne

Mechanische Kennwerte: Die keramischen Kerne müssen den Belastungen in den unterschiedlichen Prozessschritten im Feingussprozess standhalten (Umspritzen der Kerne mit Wachs, Ausschmelzen des Modells und Brennen der Schale, Abguss). Die benötigte mechanische Festigkeit der Kerne wird durch diesen Prozess und die Geometrie der Kerne bestimmt und sollten hieran angepasst sein. Eine unnötig hohe Materialfestigkeit ist in Hinblick auf die spätere Entfernung der Kerne aus dem Gussbauteil nicht sinnvoll. Die Biegefestigkeit von Vergleichskernmaterialien liegt im Bereich von 19-22 N/mm². Diese Werte sollen auch für das neue Kernmaterial angestrebt werden.

Thermische Anforderungen: Die Kerne sollen kurzzeitig einer Temperatur von 1400°C standhalten. Bei Anwendungen für Einkristalle sind die Kerne dieser Temperatur einer längeren Zeit ausgesetzt (2 bis 6 Stunden). Eine Beständigkeit der Kerne ist hierfür angestrebt, wird aber nicht als Anforderung gesehen.

Porengröße, Porosität und Gasdurchlässigkeit: Die Porosität wird primär durch den benötigten Wasseranteil/Flüssigkeitsanteil in der Suspension bestimmt, dieser liegt typischerweise bei 30%. Die Oberfläche sollte dicht sein. Geschlossene Porosität ist in Ordnung. Poren im Inneren der Kerne ist für die Kernentformung hilfreich (mech. Festigkeit muss dennoch ausreichend sein). Bei gefrästen Grünkörper werden Poren an der Oberfläche freigelegt. Diese sollten durch Schlichten geschlossen werden können. Es sollten Reparaturmöglichkeiten bei den Kernen (Grünzustand, angesintert, gesintert) gegeben sein.

Lastenheft für Werkzeuge und Fertigungsablaufplan: Es werden dünnwandige Formwerkzeuge bevorzugt aus Aluminium und gegebenenfalls auch aus Kunststoff (Material muss kältebeständig sein) gefertigt. Wenn notwendig werden die Formoberflächen beschichtet, um eine Reaktion zwischen den Kernmassen und der Aluminiumoberfläche zu verhindern oder die Entformung zu erleichtern. Bei der Konstruktion der Werkzeuge ist die Volumenzunahme bei der Eiskristallisation zu beachten. Ein Formbereich bleibt offen und dient als Einguss. Dieser Bereich muss zuletzt einfrieren und nimmt die Volumenzunahme auf. Zur exakten Auslegung der Formwerkzeuge ist die Bestimmung der Schwindung der Kerne im Gussprozess notwendig und zu berücksichtigen. Der Prozessablauf besteht aus den folgenden Schritten: Keramische Suspension herstellen, Werkzeug befüllen, gefrieren, Form öffnen und Kern entnehmen (hierzu Erwärmung der Form auf min. Schmelztemperatur der Flüssigkeit in der Suspension, Kern bleibt bei der Entformung nach Möglichkeit gefroren), Kern trocknen + sintern oder erst mech. Bearbeiten des Grünlings und anschließend sintern. Kern bei der Trocknung stützen durch Formhälfte oder im Sandbett. Für die Materialcharakterisierung werden Biegestabform mit Wechseleinsatz (Kopf mit Hinterschneidung an den Enden als Einsatz, Biegestab 10 x 10 x 100 mm) und eine Treppenstruktur mit unterschiedlichen Kerndicken (mit Struktur als Einsatz) gefertigt. Die Werkzeuge werden aus Aluminium und Kunststoff gefertigt. Als Verschlusssystem werden Schließen / Kernkastenverschlüsse eingesetzt.

II.1.2 Prozesstechnik und Werkzeugentwicklung

Die Formen zur Herstellung von Prüfkörpern wurden aus Aluminium und Kunststoff gefertigt. Die Kontaktfläche der Formen zur Kühlplatte beim Gefrieren besteht aus einer dünnen Aluminiumplatte, um einen guten Wärmeübergang zu ermöglichen. Der Aufbau der Formen ermöglicht eine einfache Montage und Entformung der gefrorenen Bauteile. Abbildung 2 zeigt Formen zur Herstellung von Prüfkörpern.

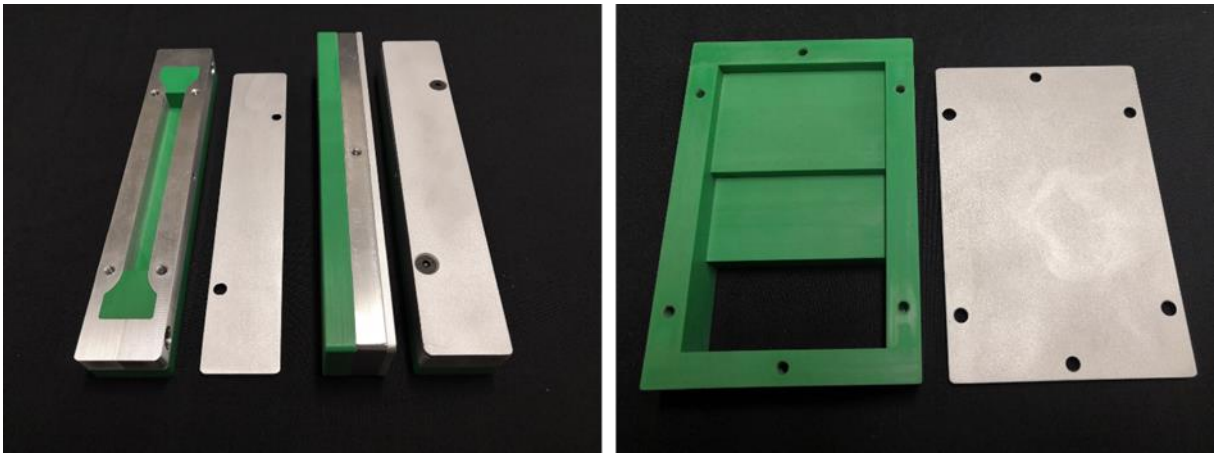

Abbildung 2: Formen zur Herstellung von Prüfkörpern. Links: Form für Biegestäbchen mit Einsätzen im Kopfbereich für Hinterschneidungen. Rechts: Stufenform

Das Formwerkzeug zur Fertigung endkonturnaher Kerne orientierte sich an einer typischen Geometrie einer Turbinenschaufel. Das Werkzeug besteht aus Aluminium und hat eine Teilungsebene (Abbildung 3). Die Formhälften besitzen eine Zentrierung und werden über Kernkastenverschlüsse zusammengehalten. Die Form wird stehend befüllt und eingefroren. Die Angussöffnung wird beim Gefrieren mit Styropor abgedeckt. Die Gefriervorrichtung zeigt Abbildung 4.

Abbildung 3: Form zur Fertigung konturnaher Kerne

Beim Gefriergelieren nimmt mit zunehmender Bauteilgröße die Unterschiede in der Porenstruktur zu. Grund hierfür ist, dass der Gefrierprozess an der Grenzschicht zwischen Suspension und Formwerkzeug startet. Hier wird die Kristallisationswärme schnell abgeführt, was zur Bildung sehr feiner Eiskristalle führt. Mit zunehmendem Abstand von der Formschale

nimmt die Gefriergeschwindigkeit ab, was mit der Bildung sukzessive größer werdender Eiskristalle einhergeht. Zur Herstellung von Halbzeugen mit größeren Volumen ist ein kontrollierts Einfrieren notwendig, um eine gerichtete Kristallisation zur gewährleisten, ein Gefrieren von den Formoberflächen hin zur Formmitte zu verhindern (Gefahr von Rissbildung durch Gefrieren im Inneren des Formteils bei schon gefrorenen Außenbereichen) und eine möglichst homogene Porenstruktur in den unterschiedlichen Bereichen des Halbzeugs zu erreichen.

Abbildung 4: Gefriervorrichtung bis – 150 °C

Hierfür wurde Vorrichtung gebaut, die ein kontinuierliche Absenkung einer Halbzeugform in eine gekühlte Flüssigkeit ermöglicht (Abbildung 5). Es wurde eine teilbare Form zur Fertigung von zylindrischen Proben gefertigt (Abbildung 6, links). Die drei Formteile werden über 6 Kernkastenverschlüsse zusammengehalten und der gefrorene Formkörper kann so einfach entformt werden.

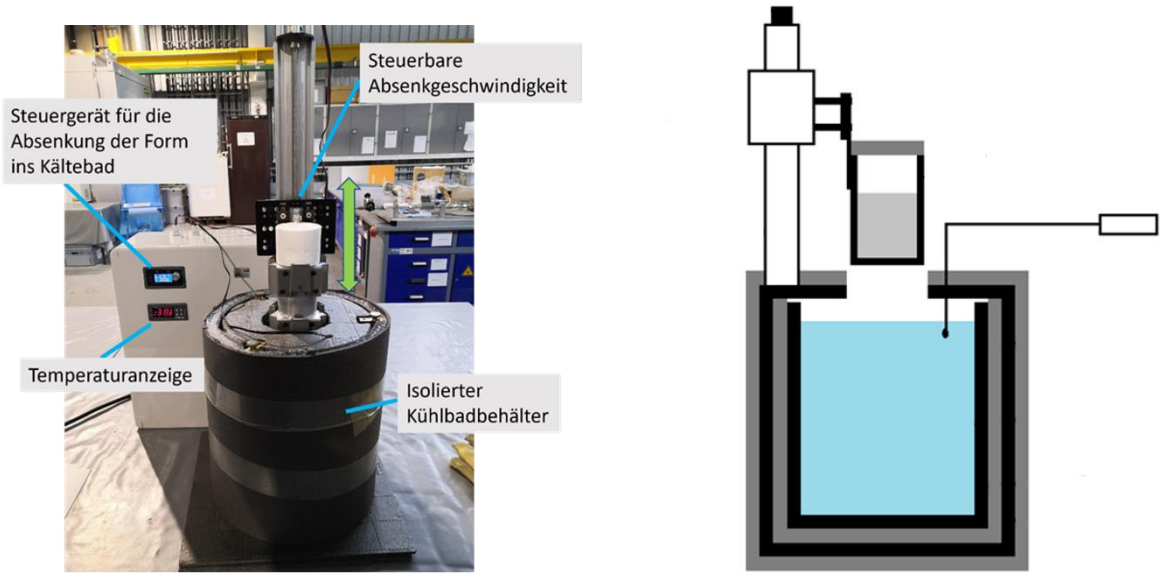

Abbildung 5: Vorrichtung zum gesteuerten Einfrieren zur Fertigung von Halbzeugen

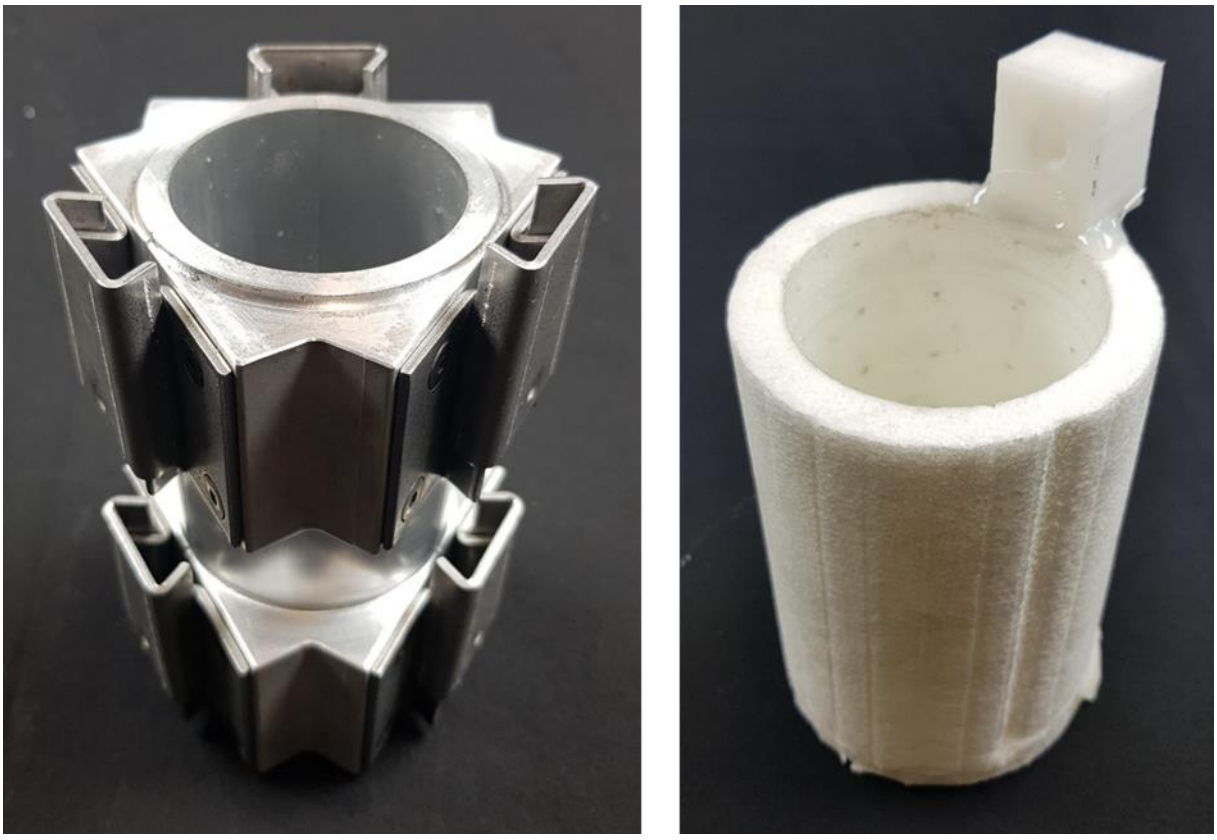

Abbildung 6: Formen zur Fertigung von Halbzeugen. Links: Teilbare Aluminiumform. Rechts: Styroporform mit einem Boden aus Aluminiumblech

Um ein Formwerkzeug mit geringer Wärmekapazität zu testen und ein unidirektionales Gefrieren nur von der Bodenplatte aus zu erreichen, wurde eine Form aus Styropor eingesetzt (Abbildung 6, rechts). Für die Fertigung der Halbzeuge zeigten sich Formen aus dünnem Aluminium- oder Stahlblech aufgrund ihrer geringen Masse vorteilhaft gegenüber der recht

massiven teilbaren Form aus Aluminium. Es wurden handelsübliche Dosen für eine einmalige Verwendung eingesetzt.

Alternativ wurde ein schichtweises Einfrieren erprobt. Hierzu wird erst eine Teilmenge der Suspension in die Form gefüllt, die Form in das Kältebad bis zur benötigten Tiefe abgesenkt und das Teilvolumen eingefroren. Nun wird die nächste Teilmenge an Suspension in die Form auf die gefrorene erste Teilmenge gegeben und der Vorgang wiederholt. Problematisch ist die Gefrierung von kondensierter Luftfeuchtigkeit an den Oberflächen bereits gefrorener Suspension, da dies eine gute Verbindung der Schichten untereinander behindert. Aus diesem Grund wurde die nachfolgende Suspensionsmenge möglichst zeitnah nach der Gefrierung der alten hinzugefügt, um die Menge an Kondenswasser gering zu halten. Die Formen wurden von oben an den Öffnungen isoliert, was gleichzeitig die eindringende Menge an Umgebungsluft geringhält. Bei Versuchen mit der geteilten Aluminiumform wurde diese nach jeder Befüllung stets so weit runtergefahren, dass die Form außerhalb immer auf Höhe der einzufrierenden Suspension mit Kühlmittel bedeckt war. Suspensionszugabe erfolgt in Intervallen von 30 ml immer dann, wenn die vorhergehende Lage vollständig gefroren war.

Nach vollständiger Gelierung und Entformung zeigt sich, dass sich die Lagen nicht oder kaum miteinander verbinden waren. Vermutlich reichte die zugeführte Wärmemenge der flüssigen Suspension nicht aus, um die obere Schicht anzutauen. In Abbildung 7 sind die Einschnitte am Umfang deutlich zu erkennen. Diese entstehen durch die Oberflächenspannung der flüssigen Suspension, die an den kalten Wänden der Form sehr schnell gefriert. Abbildung 8 zeigt, dass sich die unteren Schichten nicht verbinden und durch leichten Händedruck lösen lassen.

Abbildung 7: Links: Halbzeug gefertigt in der teilbaren Aluminiumform; jeweils zugeführte Suspensionsmenge 30 ml; Trennung der Schichten ist hier deutlich erkennbar. Rechts: Gelöste Lagen

Abbildung 8: Links: Halbzeug, gefroren in Styroporform mit einer jeweils zugeführten Suspensionsmenge von 10 ml. Rechts: Gelöste Lagen; Adhäsion der Lagen verbessert sich tendenziell mit zunehmendem Abstand von der Kühlplatte

Dieses Problem tritt bei größeren Suspensionsmengen nicht mehr auf (Abbildung 9). Bei einer schrittweisen Zugabe von 30 ml, wird ein guter Materialzusammenhalt erreicht. Nachteilig an

der Verwendung der Styroporform ist jedoch, dass das Gefrieren in den oberen Lagen zeitlich aufwändiger wird.

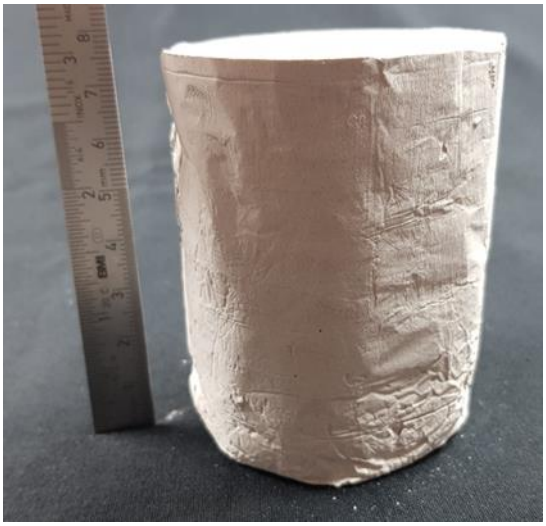

Abbildung 9: Halbzeug mit jeweils 30 ml zugeführter Suspensionsmenge; die Lagen sind gut miteinander verbunden

Um eine schnelle Herstellung der Halbzeuge zu erreichen und die Nachteile der recht massiven teilbaren Aluminiumform zu vermeiden, wurden Dosen aus dünnem Aluminium oder Stahlblech als Formen eingesetzt. Nach dem Gefrieren einer Schicht wurde die Oberfläche durch ein Warmluftgebläse oberhalb des Taupunktes erwärmt. Kontrolliert wurde die Oberflächentemperatur mit einem kontaktlosen Infrarotthermometer. Anschließen erfolgte die Zugabe der nächsten Schicht und das Abtauchen in die Kühlflüssigkeit. Hierdurch werden Halbzeuge ohne eine Trennschicht erhalten, die in unterschiedlichen Größen hergestellt werden können (Abbildung 10).

Abbildung 10: Halbzeuge

Trocknung der Kerne und Temperaturbehandlung: Die Kerne können nach dem Entformen noch im gefrorenen Zustand direkt bei 90 °C getrocknet werden können. Zur Abstützung könne die Kerne in ein Sandbett gelagert werden. Die Kerne besitzen nach der Trocknung eine ausreichende Grünfestigkeit für ein problemloses Handling oder eine erste mechanische Nachbearbeitung. Zum Sintern der Kerne wurde eine Aufheizgeschwindigkeit von 5K/min

gewählt (bis zu einer Temperatur von 1000 °C). Bei einer höheren Sintertemperatur von 1400 °C wird ein Hochtemperaturofen verwendet, für den eine geringere Aufheiztemperatur von 3K/min sinnvoll ist. Die Haltezeit bei der Endtemperatur betrug jeweils 1 Stunde.

II.1.3 Fräs- und Kalibriertechnik

Durch eine mechanische Nachbearbeitung der Kerne können feine Strukturen und Details realisiert werden, die sich bei der gießtechnischen Formgebung der Kerne nicht direkt umsetzen lassen. Für die Bearbeitung der Kerne ist eine sichere Fixierung notwendig. Abbildung 11 zeigt ein Beispiel für die Aufnahme und Fixierung der Kerne in einer Vorrichtung zur mechanischen Bearbeitung.

Die Bearbeitung/ Kalibrierung der Kerne erfolgt auf einem 5- Achs HSC Bearbeitungszentrum OPS Ingersoll 650. Es wurden geeignete Bearbeitungsstrategien und Prozessparameter bestimmt. Durch den Einsatz spezieller Werkzeuge für die Hartbearbeitung ist die Kalibrierung der Hüllflächen der Kerne sowie das Einbringen von feinen Strukturen möglich. Die kleinsten über mechanische Bearbeitung herstellbaren Innenradien über Kugelfräser liegen bei R0,3. Außenkanten sind am Bauteil mit mindestens R0,3 darzustellen da ansonsten, auf Grund der Körnung des Materials, erhöhte Neigung zu Ausbrüchen besteht.

Erprobung Materialauftrag auf Kerne: Die keramischen Suspensionen, die zur Herstellung der Kerne eingesetzt wurde, kam auch für die Reparatur von Löchern und Fehlstellen und für einen Materialauftrag zum Einsatz. Der Materialauftrag fand sowohl an getrockneten als auch bei gebrannten Kernen statt. Das aufgetragene Material verband sich fest mit dem Untergrund. Auch im thermischen Prozess blieb ein fester Verbund bestehen. Aufgetragene Strukturen wurden erfolgreich im Stahlguss erprobt.

Abbildung 11: Fixierung der Kerne für die mechanische Bearbeitung

II.1.4 Technologiedemonstrator

Zur Technologiedemonstration und Prozessvalidierung des Kernmaterials wurde eine typische Geometrie eines Kerns für eine Turbinenschaufel gewählt.

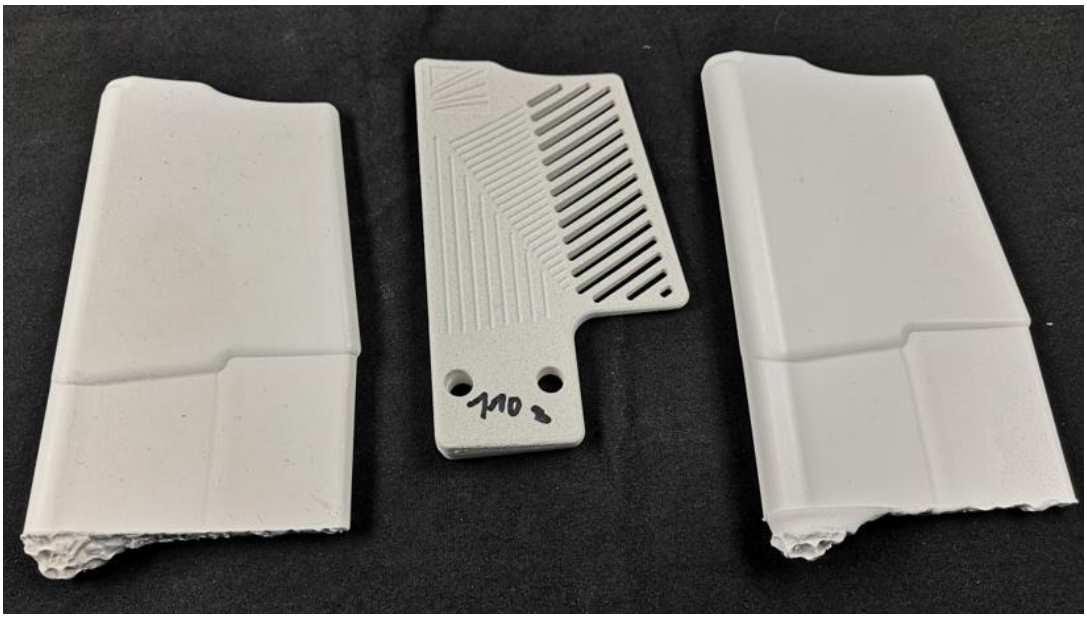

Abbildung 12: Keramische Kerne: Ausgangsgeometrie und fertig bearbeitet (Mitte)

Der Demonstrator wurde in zwei Größen gefertigt. Mit dem in Abbildung 3 gezeigten Formwerkzeug wurden die endkonturnahen Kerne für die kleine Ausführung des Demonstrators hergestellt, die auch für die gießtechnische Bewertung eingesetzt wurde. Abbildung 12 zeigt die konturnahen keramischen Kerne und einen fertigen Kern nach der mechanischen Bearbeitung. Die mechanische Bearbeitung ließ sich bei allen getesteten Materialsystemen erfolgreich umsetzen. Eine Bearbeitung war sowohl bei nur getrockneten Kernen als auch bei gesinterten Kernen (1000 °C oder 1400 °C) problemlos möglich (Abbildung 13).

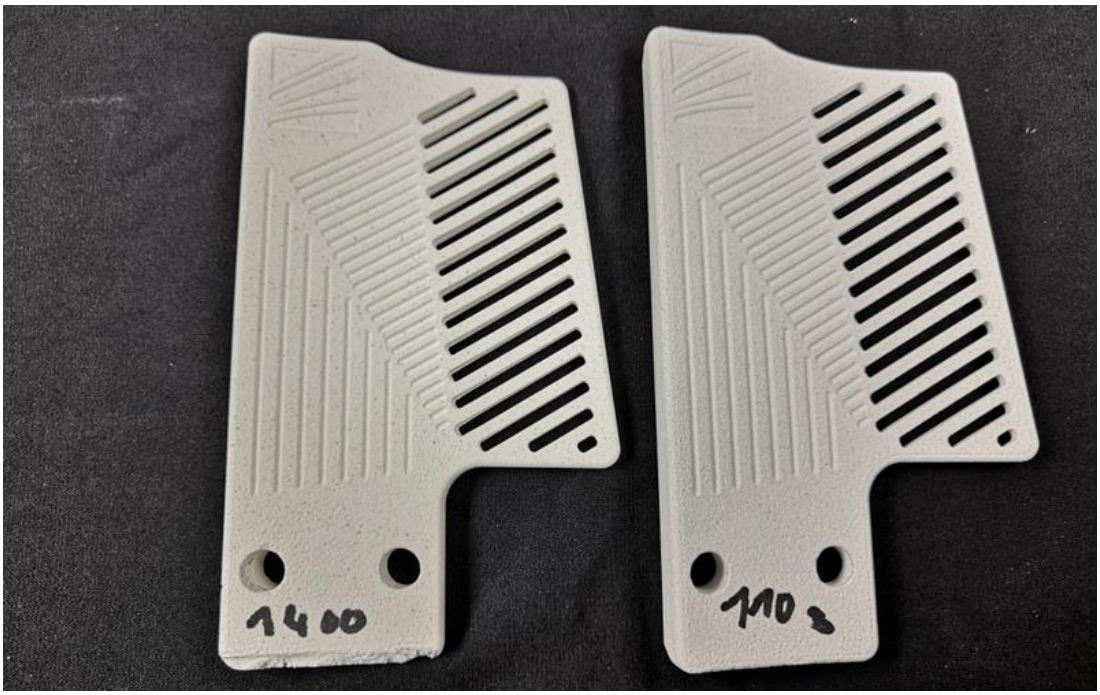

Abbildung 13: Gesinterter Kern (Links, 1400 °C), getrockneter Kern (Rechts, 110 °C)

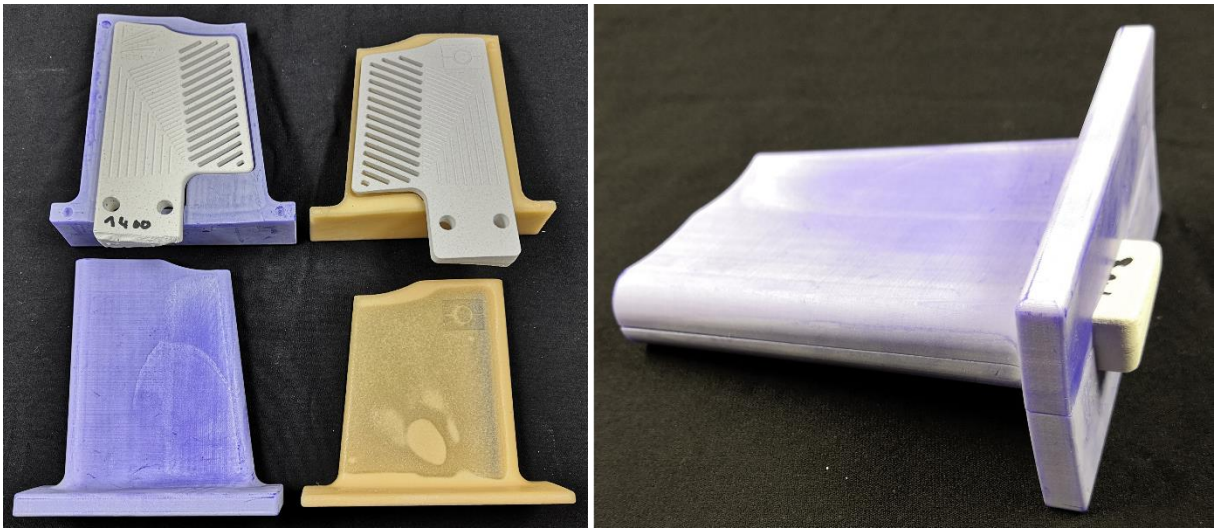

Abbildung 14: Keramische Kerne eingelegt in gedruckte Wachs- (blau) oder PMMA- (gelb) Modelle

Für die weitere gießtechnische Erprobung wurden die Kerne in gedruckten Modellhälften aus Wachs und PMM eingesetzt (Abbildung 14).

Neben den konturnahen Kernen wurden auch die gefertigten Halbzeuge (siehe Abbildung 10) für eine mechanische Bearbeitung getestet. Auch aus den Halbzeugen konnten die Kerne in der gewählten Geometrie hergestellt werden (Abbildung 15). Über solche Halbzeuge können Keren ohne zusätzlichen Formenaufwand direkt durch mechanische Bearbeitung gefertigt werden und damit insbesondere bei Einzelteilen das Mittel der Wahl sein.

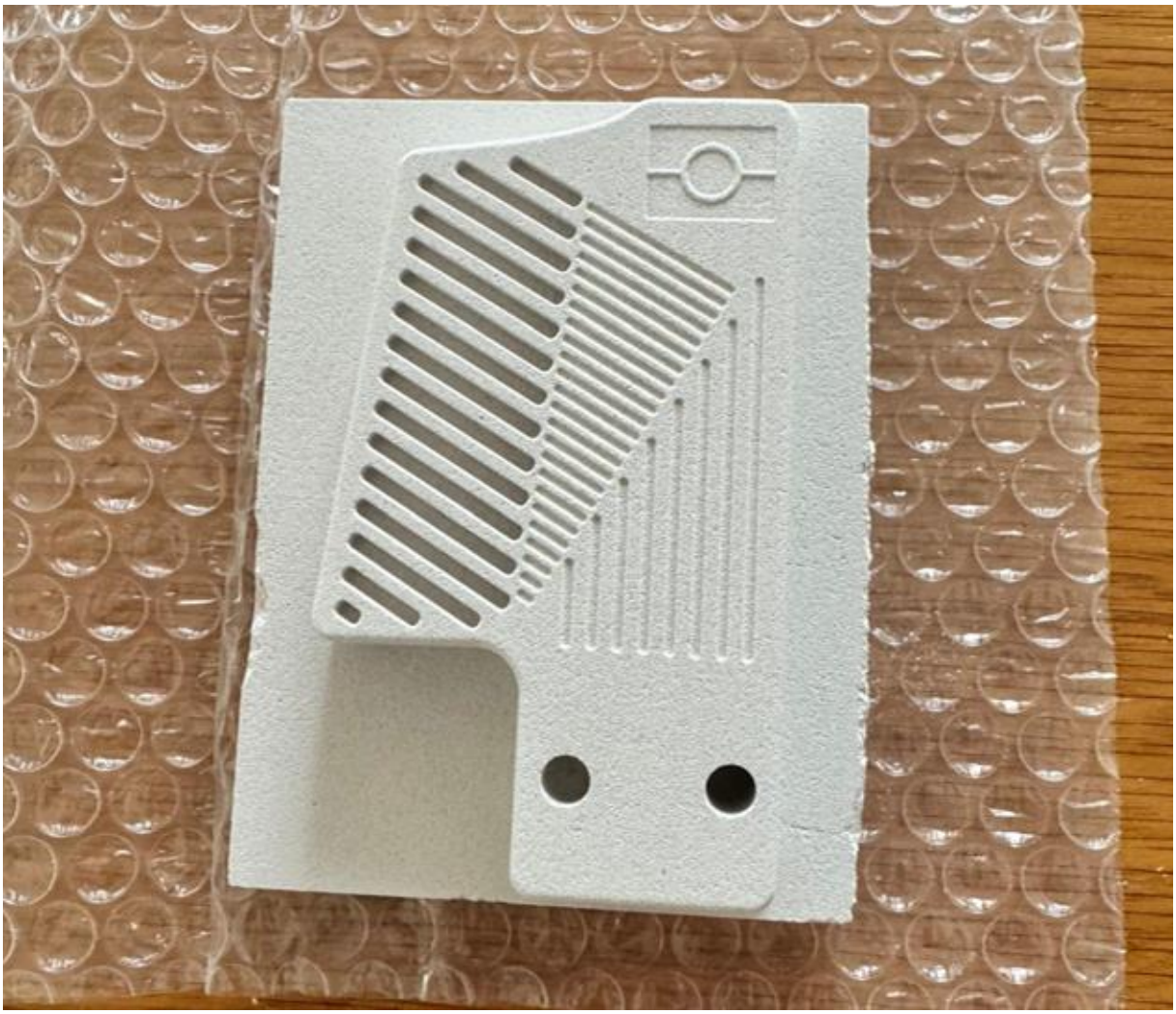

Abbildung 15: Keramischer Kern gefertigt aus einem keramischen Halbzeug

Die Kerne für die kleine Ausführung des Demonstrators haben eine Länge von 100 mm. Diese wurden auf eine typische Größe für Turbinenschaufeln in Gasturbinen vergrößert (Länge 190 mm). Abbildung 16 zeigt den Entwurf des Modells und die Form des keramischen Kerns. Zur Herstellung des deutlich größeren Kerns wurden die gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich Gefrierkinetik und Porengröße berücksichtigt. Während die Herstellung der kleinen konturnahen Kerne vorwiegend beim Projektpartner IFAM erfolgte, wurden die großen Demonstratoren bei uns gefertigt. Hierzu wurde der gesamte Prozess beginnend von der Herstellung keramischer Suspensionen, gefrierinduzierter Sol-Gel Übergang, Entformung und Trocknung in unserer Fertigung erprobt und erfolgreich umgesetzt. Die gefertigte Form aus Aluminium für die konturnahen Kerne zeigt Abbildung 17. Die Formhälften wurden geschlossen, mit keramischer Suspension gefüllt und im Tiefkühler kontrolliert eingefroren. Nach dem Gefrieren wurden die noch gefrorenen Kerne entformt und im Sandbett getrocknet (Abbildung 18).

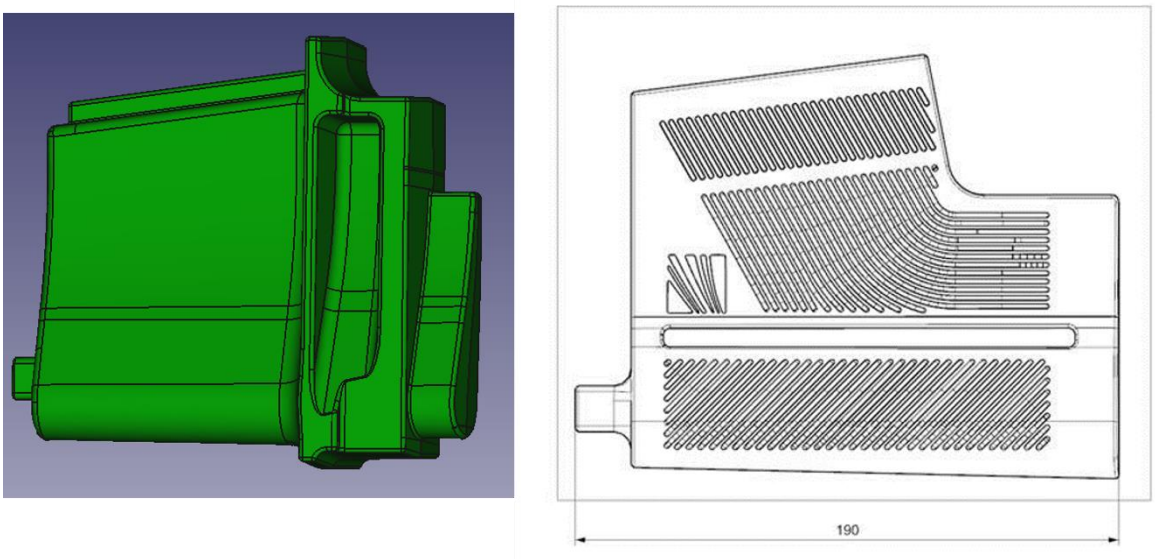

Abbildung 16: Entwurf von Modell und keramischer Kern für einen größeren Demonstrator

Abbildung 17: Form zur Fertigung der konturnahen Kerne (großer Demonstrator)

Abbildung 18: Gefriergelierte Kerne während der Trocknung. Links: kleiner Demonstrator; Rechts: großer Demonstrator#

Die mechanische Bearbeitung erfolgte an getrockneten keramischen Kernen. Auch bei dem großen Demonstrator ließen sich die Kerne gut mechanisch bearbeiten und die vorgesehene anspruchsvolle Geometrie erzeugen (Abbildung 19).

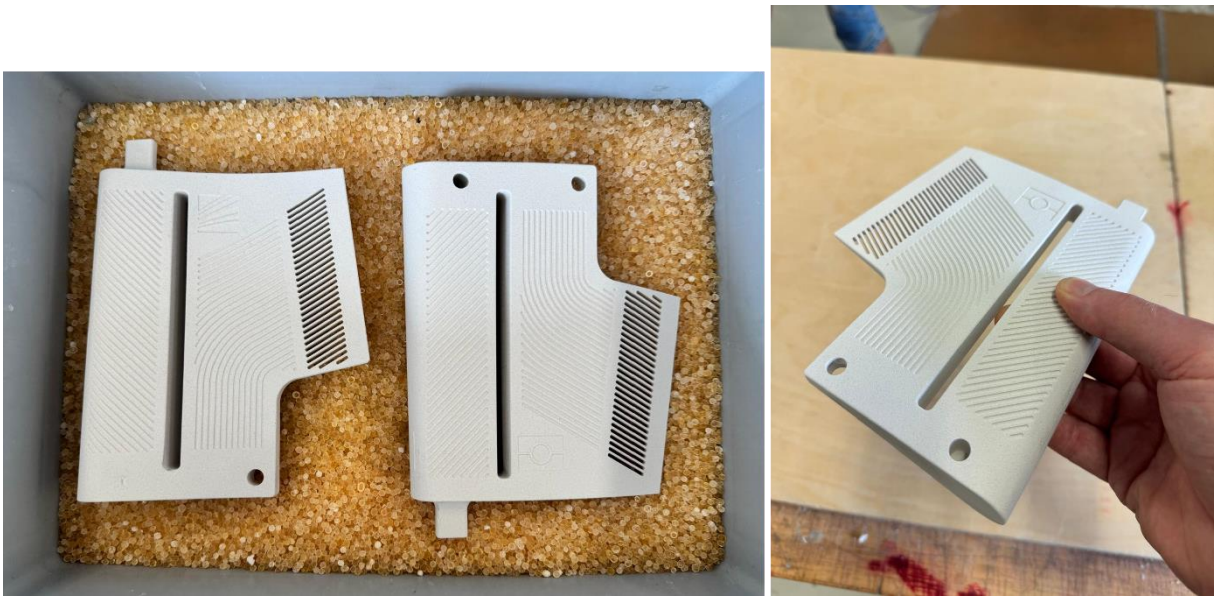

Abbildung 19: Fertig bearbeitete Kerne (großer Demonstrator)

Für die in Abbildung 16 gezeigt Modellgeometrie wurde ein entsprechendes Wachsspritzwerkzeug konstruiert und gefertigt. Abbildung 20 zeigt das Wachsspritzwerkzeug mit eingesetztem keramischem Kern (linke Seite) und das fertige Wachsmodell mit umspritzten keramischen Kern (rechte Seite).

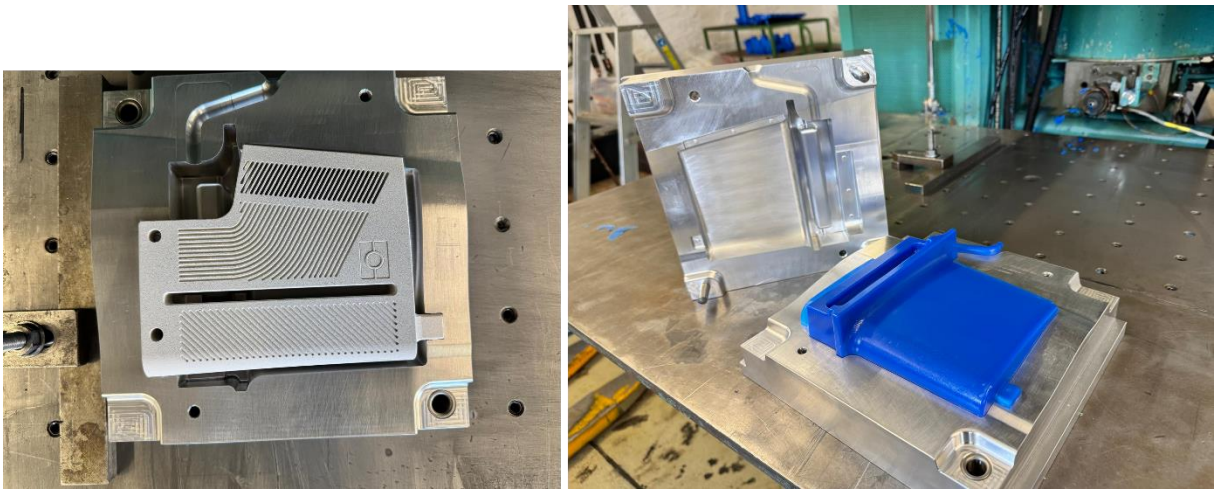

Abbildung 20: Spritzwerkzeug mit eingesetztem Kern (Links); Rechts: Fertiges Wachsmodell mit umspritzten Kern

Entfernung der keramischen Kerne aus dem Bauteil: Die Entkernung wurde bei einem Gussteil aus einer 2.4671 Inconel 713c Nickel-Kobaltlegierung erprobt. Hierbei handelt es sich um ein häufig verwendetes Material in Turbinen, Verdichtern und Laufrädern. Der Keramische Kern wurde mit einer 99 % Natriumhydroxid-Lösung bei einer erhöhten Temperatur von 90 °C herausgeätzt. Es waren mehrere Ätzungen in neuem Bad notwendig. Zwischen dien Ätzungen wurden die Teile gestrahlt und die Keramik manuell bestmöglich entfernt. Der Guss des Bauteils und die Entkernung wurde beim Feingießer Texmo Blank Germany GmbH durchgeführt. Abbildung 21 zeigt eine Röntgenaufnahme des gegossenen Bauteils nach der Entkernung. Leichte Schatten im Bereich der kanalartigen Strukturen deuteten auf verbliebene Reste des Kernmaterials hin. Um dies genauer zu bestimmen, wurde beim Projektpartner IFAM CT-Aufnahmen und mikroskopische Aufnahmen des Gussbauteils erstellt (Abbildung 22 und 23). Die Aufnahmen bestätigen geringe Kernreste an diesen Stellen. Es wäre ein weiterer Lösungszyklus notwendig. Eine genaue Anpassung der Lösungsbedingungen an das Kernmaterial oder eine Veränderung beim Lösungsbad sollten für den Serienbetrieb vorgenommen werden.

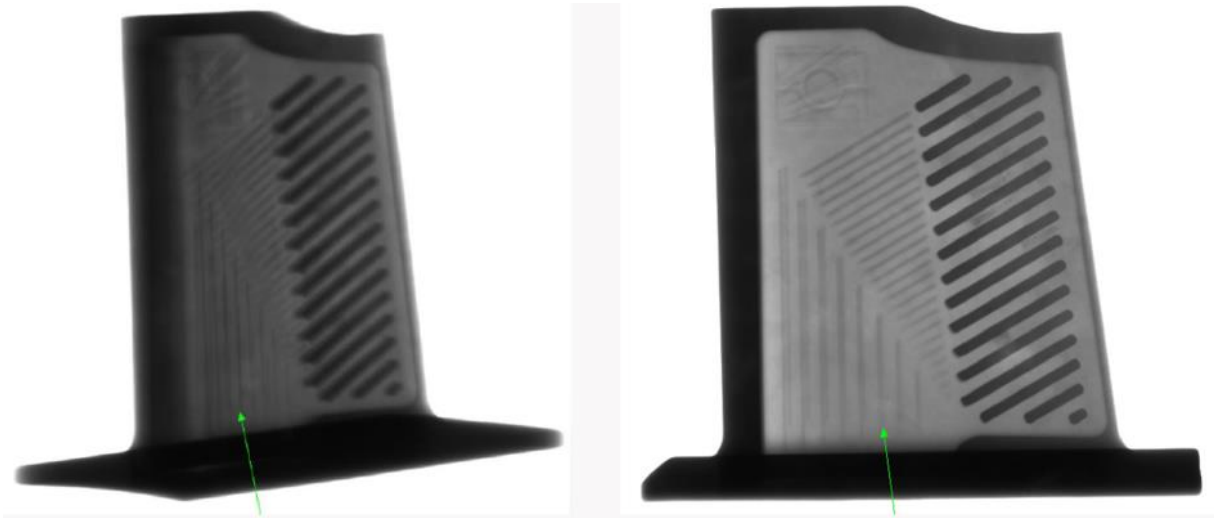

Abbildung 21: Röntgenaufnahme des gegossenen Bauteils nach der Entkernung

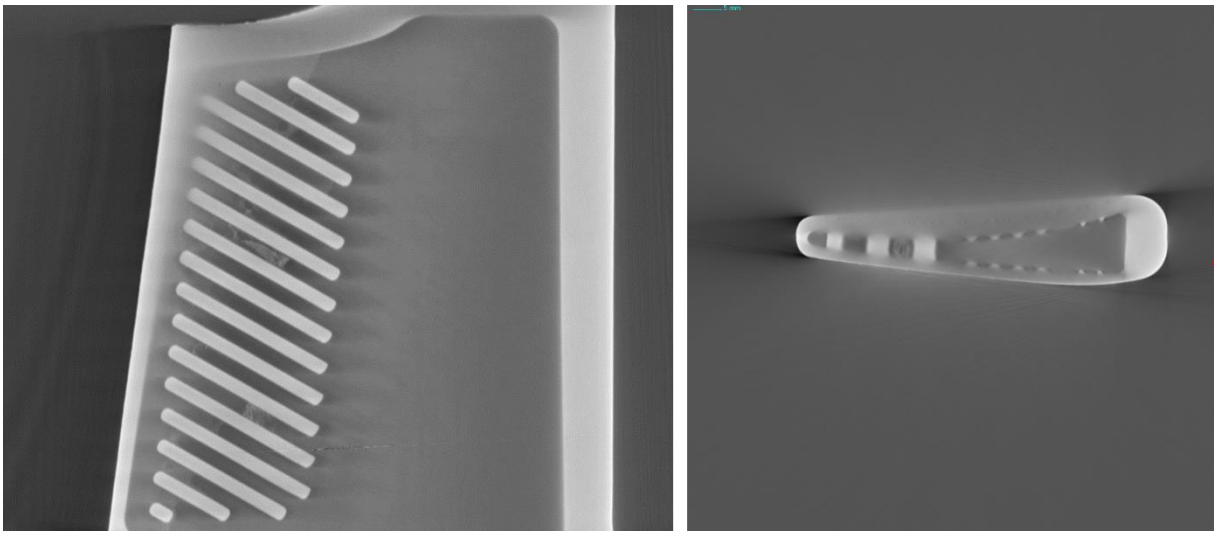

Abbildung 22: CT-Aufnahme des Gussbauteils

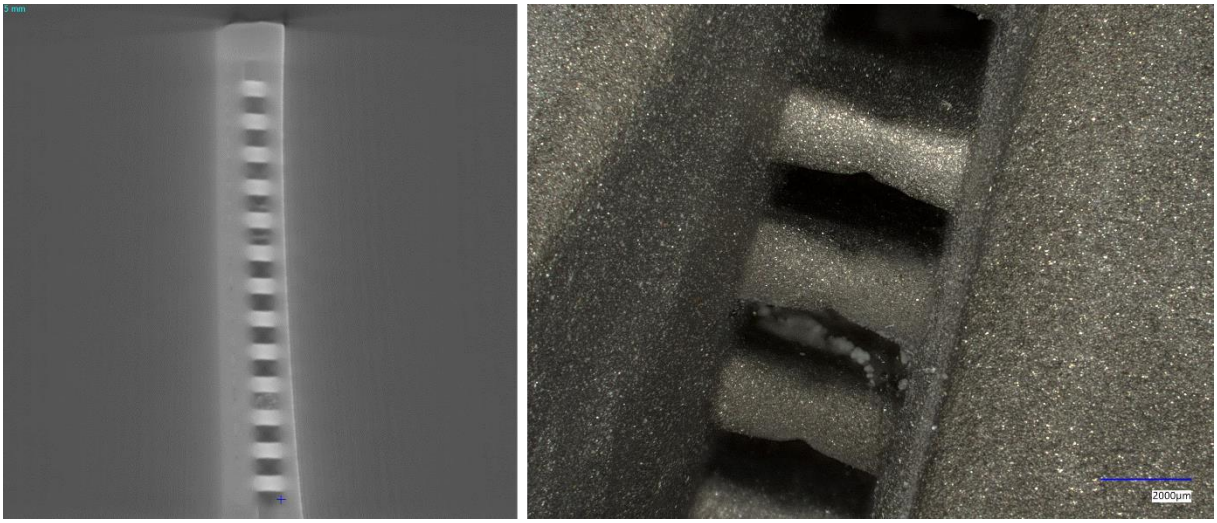

Abbildung 23: CT-Aufnahme (links) und mikroskopische Aufnahme (rechts) des Gussbauteils

Fazit:

- Die Zielstellung des Projektes ein keramisches Material zu entwickeln, das als Kern für den Feinguss zur Herstellung komplexer kosteneffizienter Gussteile für die Luftfahrt geeignet ist (mit einer Biegefestigkeit von bis zu 19-22 N/mm², Thermische Anforderungen: 1400 °C kurzzeitig. Bei Anwendung für Einkristalle 2-6 Stunden bei 1400 °C oder höher) wurde erreicht.
- Es wurden geeigneten Werkzeuge für die Gefrierkonsolidierung zur formgebenden Herstellung endformnaher keramischen Kerne entwickelt
- Die Eignung der keramischen Kerne wurde im Gießprozess bestätigt
- Eine exakte mechanische Bearbeitung der Kerne im Grünzustand und nach einer thermischen Behandlung ermöglicht beispielsweise die Erzeugung von feinen Details oder Hinterschneidungen, die sich bei der Herstellung der Kerne im Gefrierprozess nicht realisieren lassen.

- Es können sowohl konturnahe keramische Kerne mit entsprechenden Gießformen gefertigt werden als auch keramische Halbzeuge hergestellt werden.
- Ein nachträglicher Auftrag von Material auf Grünkörper oder gesinterte keramische Kerne ist möglich. Hierdurch können Fehlstellen an Kernen repariert oder diese geometrisch modifiziert werden.
- Die Kerne weisen eine sehr geringe Schwindung bei einer Sinterung oder durch die thermische Prozessführung im Feinguss auf.
- Ein chemisches Herauslösen der keramischen Kerne aus dem Gussbauteil ist mit den üblichen Verfahren möglich.

Durch das neue Verfahren zur Herstellung von gefriergelierten keramischen Kernen und die schnelle Geometrieanpassung wird die Effizienz in Produktentwicklungszyklen von Feingussteilen für Flugzeugkomponenten durch kürzere Lieferzeiten und geringere Kosten verbessert.

2. Erläuterung des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projektverlauf sind hauptsächlich Kosten für Personal, Reisen, Material, und vorhabenspezifische Abschreibung angefallen. Dabei wurden die genehmigten, vorkalkulierten Kosten in keiner Kostenart überschritten. Die Kosten setzen sich wie folgt zusammen:

Etwa 25.000,00 € an Personalkosten, mit denen die dargestellten wissenschaftlich/technischen Ergebnisse erzielt wurden.

Etwa 1.100,00 € an Reisemitteln für die Teilnahme am ersten Review Meeting im November 2022 in Bremen.

Etwa 6.000,00 € für Material.

Etwa 8.000,00 € für vorhabenspezifische Abschreibungen

Die exakten Zahlen sind bitte dem Schlussverwendungsnachweis zu entnehmen.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Projekt waren wir für die die drei Hauptarbeitspakete HAP3, HAP5 sowie HAP6 zuständig, in denen 12 Unterarbeitspunkte bearbeitet wurden. Hinzu kam die gemeinsame Arbeit mit unserem Projektpartner IFAM in den Arbeitspaketen 1 und 7 und die Etablierung des gesamten Prozessablaufs zur Herstellung keramischer Kerne in unserer Fertigung. Die geleisteten Arbeiten waren zur Erreichung der in Kapitel II.1 dargestellten Ergebnisse notwendig.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Das Projekt hat die Erarbeitung der benötigten Kompetenz zur Herstellung von Keramikkernen im Gefriergelierverfahren ermöglicht. Hierdurch eröffnen sich ganz neue Einsatzgebiete und Bauteilgeometrien, insbesondere für hochpräzise Anwendungsgebiete mit schwieriger Kernentformung und hohen Qualitätsansprüchen, wie sie im Bereich der Luft- und Raumfahrt gelten. Besonders die Möglichkeit der zeitnahen Bereitstellung von Kernen in Verbindung mit der generativen Fertigung von Modellen hat großes Vermarktungspotential, weil dieser Kundenbedarf und Nachfrage bereits bestehen. Zur Förderung der Akquisetätigkeit wurde im Projektvorhaben ein Technologiedemonstrator entwickelt, um potenziellen Kunden nach

Projektende anzusprechen und die Markteinführung zu beschleunigen. Eine Überführung der Technologie in die Produktion am Firmenstandort Zwenkau innerhalb 1 Jahres nach Projektende wird als realistisch eingeschätzt. Potenzial für die Anschlussfähigkeit liegt in der Weiterentwicklung des Verfahrens hin zu einem teilautomatisierten Prozess, um diesen für die Herstellung von großen Stückzahlen zu etablieren.

5. Relevante Ergebnisse Dritter

Relevante Ergebnisse Dritter während der Projektlaufzeit sind nicht bekannt.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Die Veröffentlichung ist geplant in der Fachzeitschrift „Gießerei“ unter dem Titel „Icecore – schnelle keramische Kerne für den Feingießer“