
Abschlussbericht zum Vorhaben

„Hocheffizienter Verbrennungsmotor mit innovativem Magerbrennverfahren in Verbindung mit Methan; Teilvorhaben: Optimierung und additive Fertigung von Motorkomponenten“

Verbundprojekt: MethMag

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2020 – 31.10.2023

Förderkennzeichen: 19I20014C

Ministerium: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Teil I – Kurze Darstellung

Rosswag GmbH
Gregor Graf
August-Rosswag-Straße 1
76327 Pfinztal
+49 (7240) 9410-292
g.graf@rosswag-engineering.de

Konsortium



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 19I20014C gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Inhalt

2	Aufgabenstellung und Stand der Technik.....	3
3	Ablauf des Vorhabens	4
4	Ergebnisdarstellung.....	4

2 Aufgabenstellung und Stand der Technik

Im Rahmen des Forschungsprojekts zur Entwicklung eines hocheffizienten Verbrennungsmotors für leichte Nutzfahrzeuge liegt ein Fokus auf der Anwendung und Integration additiver Fertigungsprozesse, insbesondere des Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Verfahrens. Diese Technologie bietet das Potential, komplexe Bauteile wie Vorkammerzündkerzen und Zylinderköpfe direkt aus Metallpulver herzustellen. Die spezifischen Anforderungen des Projekts an diese Bauteile umfassen hohe thermische und mechanische Belastbarkeit, optimierte Kühlkanalgeometrien und die Anpassung an das Mager-Brennverfahren mit Methan.

Die additive Fertigung im Automobil- und Motorenbau ist nicht neu, jedoch stellen die hohen Anforderungen des Motorsports und der Leichtbauindustrie stetig steigende Herausforderungen an das Material und die Fertigungstechnologien. Insbesondere der LPBF-Prozess hat sich als geeignet erwiesen, komplexe Geometrien mit internen Strukturen, die durch herkömmliche Methoden nicht oder nur schwer herstellbar sind, effizient zu fertigen.

3 Ablauf des Vorhabens

Im ersten Projektjahr lag der Fokus auf der Konzeption und Vorbereitung:

AP1 umfasste Koordination, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit, die durchgehend über alle drei Jahre des Projekts laufen.

AP2 beinhaltete die Definition von Anforderungen und Spezifikationen basierend auf den Nutzfahrzeug-Antriebssträngen und war für die ersten beiden Quartale des ersten Jahres geplant.

AP3 konzentrierte sich auf das Konzept und die Machbarkeit, wobei die Ausarbeitung des Brennverfahrenskonzepts auf Basis eines Einzylinder-Forschungsmotors im Mittelpunkt stand. Es begann kurz nach AP2 und erstreckte sich bis zur Hälfte des zweiten Projektjahres. Ein Teilpaket aus AP3, die 3D CFD Simulation, zieht sich bis in das dritte Projektjahr.

Im zweiten Jahr des Projekts begann die praktische Umsetzung und experimentelle Entwicklung:

AP4 betraf die Hardware-Darstellung, einschließlich der Integration des additiven Herstellungsprozesses für relevante Bauteile. Es startete noch im ersten Projektjahr.

AP5 befasste sich mit Voruntersuchungen, die kurz nach Start des AP4 begannen und notwendige Grundlagen für die Experimente lieferten.

Das dritte und letzte Jahr konzentrierte sich auf die Validierung und Adaption des erarbeiteten Konzepts auf einen serienfähigen Vollmotor:

AP6 und AP7 befassten sich mit der Anpassung des Versuchsträgers und der Ableitung eines serienfähigen Vollmotors. Diese Pakete wurden parallel durchgeführt und waren auf das Ende des Projekts ausgerichtet.

Die Meilensteine des Projekts waren strategisch über den Verlauf verteilt:

MS1 markierte das konzeptuelle Fundament des Projekts zur Hälfte des ersten Projektjahres.

Mit MS2 sollen zur Hälfte des zweiten Jahres die entworfenen Komponenten virtuell sowie experimentell entwickelt und validiert sein.

MS3 repräsentierte den Nachweis des Brennverfahrens im Forschungsmotor, zur Hälfte des dritten Projektjahres.

MS4 zeigte die Übertragung des Konzepts auf den Vollmotor und stellte den Abschluss des Projekts dar.

4 Ergebnisdarstellung

Die Ergebnisse aus den Kapiteln AP 4.1, AP 4.2 und AP 4.3 reflektieren signifikante Fortschritte im Bereich der additiven Fertigung für die Bauteile eines hocheffizienten Verbrennungsmotors.

In AP 4.1 wurde der LPBF-Prozess erfolgreich in die Produktionskette integriert, und die Materialauswahl fiel auf AlSi10Mg und 42CrMo4, da sie sich für die Herstellung von komplexen Bauteilen eignen und ihre Eigenschaften bereits im Automobilbau bewährt haben. Simulationsgestützte Methoden und Software wie Materialise Magics trugen zur frühzeitigen Erkennung und Behebung von Konstruktionsproblemen bei und halfen, eine Herstellung der innenliegenden Konturen ohne Stützstrukturen zu ermöglichen.

AP 4.2 fokussierte auf die Optimierung der Bauteilkonstruktion für den 3D-Druck. Hierbei wurden Bauteilgeometrien angepasst, um den Anforderungen der additiven Fertigung gerecht zu werden, wobei insbesondere die Auslegung der Kühlkanäle und die Minimierung von Überhängen im Vordergrund standen. Testdrucke bestätigten, dass die entworfenen Bauteile mit ihren komplexen internen Strukturen realisierbar waren, insbesondere im Hinblick auf die effektive Kühlung.

Die Umsetzung in AP 4.3 offenbarte anfängliche Herausforderungen im Herstellungsprozess, einschließlich signifikanter Abweichungen von der Sollgeometrie und hoher Porosität, die auf Probleme mit der Laseroptik zurückzuführen waren. Nach einer gründlichen Analyse und Korrektur der Anlagenprobleme verbesserten sich die Ersatzteilefertigung deutlich. Zusätzlich musste die Standardwärmebehandlung T6 für AlSi10Mg modifiziert werden, da sie zu Verformungen und erhöhter Porosität führte. Eine angepasste Wärmebehandlungsroutine wurde etabliert, welche die Eigenschaften der Bauteile verbesserte und gleichzeitig die Maßhaltigkeit sicherstellte.

Schließlich ermöglichte die Erforschung alternativer Materialien, wie der Aluminiumlegierung CP1 von Constellium, die Herstellung eines Zylinderkopfes mit verbesserten mechanischen Eigenschaften und einer höheren Wärmeleitfähigkeit, ohne die während der Wärmebehandlung auftretenden Probleme der Verformung.

Diese Ergebnisse zeigen, dass durch sorgfältige Materialauswahl, designorientierte Herangehensweisen und Prozessoptimierung die additive Fertigung eine leistungsfähige Methode darstellt, um komplexe und hochleistungsfähige Bauteile für moderne Verbrennungsmotoren zu produzieren.

Die neuesten Entwicklungen im politischen und dem Ford konzernspezifischen Umfeld haben erhebliche Auswirkungen auf den Verlauf und die Ergebnisse des Forschungsprojekts zur Entwicklung eines Methan-Mager-Motors. Die Entscheidung vieler deutscher Autohersteller, einschließlich des Konsortialpartners Ford, sich auf die Elektrifizierung der Antriebsstränge zu konzentrieren, markiert einen signifikanten Wandel in der strategischen Ausrichtung der Automobilindustrie. Diese Entwicklung steht im Einklang mit globalen Trends und der zunehmenden politischen und gesellschaftlichen Forderung nach nachhaltigeren, emissionsärmeren Verkehrslösungen.

Die spezifische Entscheidung von Ford, die Entwicklung an Verbrennungsmotoren einzustellen und die entsprechenden Prüfstände abzubauen, hat direkte Auswirkungen auf das Projekt. Diese Maßnahme reflektiert nicht nur die interne Strategieänderung des Konzerns, sondern auch die breitere politische Landschaft in Deutschland und Europa, wo umfangreiche Gesetzgebungen und Förderungen die Adoption von Elektromobilität stark vorantreiben.

Zudem zeigt das nachlassende Interesse seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, dass die politische und finanzielle Unterstützung für Projekte, die auf die Entwicklung neuer Verbrennungsmotorentechnologien ausgerichtet sind, schwindet. Dies steht im Kontext einer umfassenden politischen Agenda, die sich auf die Dekarbonisierung der Wirtschaft und die Einhaltung der Pariser Klimaziele konzentriert. Deutschland hat sich verpflichtet, bis 2045 klimaneutral zu sein, was eine drastische Reduktion von CO₂-Emissionen erfordert – ein Ziel, das durch die Förderung fossiler Brennstofftechnologien kaum zu erreichen ist.

Die Entscheidung, die im Rahmen des Projekts entwickelten Technologien nicht in der Serienproduktion zu verwenden, unterstreicht die Herausforderungen, mit denen Forschungs- und Entwicklungsprojekte in einem sich schnell wandelnden technologischen und politischen Umfeld konfrontiert sind. Die Entwicklungen und Ergebnisse des Projekts, insbesondere im Bereich der additiven Fertigung und der Optimierung von Verbrennungsprozessen, bieten jedoch wertvolle Einblicke und Technologien, die potenziell in anderen Anwendungsbereichen wie in der Forschung oder in spezialisierten Industrieanwendungen genutzt werden könnten.

Das Engagement des Fraunhofer ICT, den 3-Zylinder-Motor auf eigenen Prüfständen weiter zu erproben, zeigt, dass trotz der strategischen Abkehr von Verbrennungsmotoren in der Automobilindustrie, die wissenschaftliche und technische Erkenntnisgewinnung weiterhin von Bedeutung ist. Solche Forschungen könnten wichtige Beiträge zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Reduktion von Emissionen auch in anderen technischen Feldern leisten, was langfristig zur technologischen Diversität und Resilienz beiträgt.

Abschlussbericht zum Vorhaben

„Hocheffizienter Verbrennungsmotor mit innovativem
Magerbrennverfahren in Verbindung mit Methan; Teilvorhaben:
Optimierung und additive Fertigung von Motorkomponenten“

Verbundprojekt: MethMag

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2020 – 31.10.2023

Förderkennzeichen: 19I20014C

Ministerium: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

Teil II – Eingehende Darstellung

Rosswag GmbH
Gregor Graf
August-Rosswag-Straße 1
76327 Pfinztal
+49 (7240) 9410-292
g.graf@rosswag-engineering.de

Konsortium



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für
Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 19I20014C gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

1 Inhalt

2	Abbildungsverzeichnis.....	3
3	Tabelleverzeichnis.....	4
4	Aufgabenstellung und Stand der Technik.....	5
5	Ablauf des Vorhabens	6
6	Ausführliche Ergebnisdarstellung	8
6.1	AP 4.1 Integration additive Fertigung	8
6.2	AP 4.2 Bauteiloptimierung für additive Fertigung	9
6.2.1	Erweiterte Werkstoffauswahl und Eigenschaftsanalyse	9
6.2.2	Design und Konstruktionsrichtlinien	9
6.2.3	Testdrucke und Prototyping	9
6.3	AP 4.3 Herstellung Zylinderkopf und Vorkammer.....	11
6.3.1	Herstellungsprozess des Zylinderkopfes.....	11
6.3.2	Wärmebehandlung des Zylinderkopfes.....	13
6.3.3	Zusatzfertigung mit der Aluminiumlegierung CP1	21
6.4	Zusammenfassung.....	23
7	Zahlenmäßiger Nachweis..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
7.1	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises Fehler! Textmarke nicht definiert.	
7.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit..... Fehler! Textmarke nicht definiert.	
8	Verwertung der erzielten Ergebnisse.....	26
8.1	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse	26
8.2	Fortschritte an anderer Stelle	26
9	Veröffentlichungen.....	27

2 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: DARSTELLUNG DER ZEITLICHEN PROJEKTPLANUNG UND DER GEPLANTEN ARBEITSPAKETE IM GANTT-DIAGRAMM.....	6
ABBILDUNG 2: TESTDRUCK AUS DEM WERKSTOFF ALSI10MG MIT DEM GESAMTEN WASSERMANTEL DES ZYLINDERKOPFES.....	10
ABBILDUNG 3: MITTELS DRAHTERODIEREN AUFGETRENNTER TESTDRUCK DES WASSERMANTELS ZUR SICHTUNG DER KANÄLE IM ÜBERHANGBEREICH	10
ABBILDUNG 4: MIT SUPPORT (BLAU) VERSEHENES 3D-MODELL DES ZYLINDERKOPFES AUF DER VIRTUELLEN BAUPLATTE PLATZIERT	11
ABBILDUNG 5: POREN UND MAßLICHE ABWEICHUNG IM CT SCAN (GRÜNE UND WEIßE LINIE SIND SOLLGEOMETRIE)	12
ABBILDUNG 6: STARKE ABWEICHUNG DER IST-GEOMETRIE VON DER SOLL-GEOMETRIE > 5 MM.....	12
ABBILDUNG 7: GUTTEIL DES FEHLERFREIEN BAUJOBS.....	13
ABBILDUNG 8: LÄNGENMAßE DER ZUGPROBEN IM AS-PRINTED ZUSTAND	16
ABBILDUNG 9: LÄNGENMAßE DER ZUGPROBEN NACH DEN WÄRMEBEHANDLUNGEN	17
ABBILDUNG 10: LÄNGENDIFFERENZ DER ZUGPROBEN VOR UND NACH DER JEWEILIGEN WÄRMEBEHANDLUNG	18
ABBILDUNG 11: ERGEBNISSE AUS DEN ZUGVERSUCHEN FÜR RAUMTEMPERATUR LINKS UND BEI 200 °C RECHTS	19
ABBILDUNG 12: 3D-SCAN ZWEITE ERSATZTEILFERTIGUNG VOR WÄRMEBEHANDLUNG	20
ABBILDUNG 13: 3D-SCAN ZWEITE ERSATZTEILFERTIGUNG NACH WÄRMEBEHANDLUNG.....	20
ABBILDUNG 14: 3D-SCAN DES CP1 ZYLINDERKOPFES VOR DER WÄRMEBEHANDLUNG	21
ABBILDUNG 15: 3D-SCAN DES CP1 ZYLINDERKOPFES NACH DER WÄRMEBEHANDLUNG.....	22
ABBILDUNG 16: ZYLINDERKOPF AUS DEM WERKSTOFF AHEADD CP1	22
ABBILDUNG 17: BAUPLATTE NACH DEM 3D-DRUCK BESTÜCKT MIT VORKAMMERZÜNDKERZEN	23

3 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: DOE PROBENÜBERSICHT MIT ZUORDNUNG DER ZUGVERSUCHE UND WÄRMEBEHANDLUNG	14
--	----

4 Aufgabenstellung und Stand der Technik

Im Rahmen des Forschungsprojekts zur Entwicklung eines hocheffizienten Verbrennungsmotors für leichte Nutzfahrzeuge liegt ein Fokus auf der Anwendung und Integration additiver Fertigungsprozesse, insbesondere des Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Verfahrens. Diese Technologie bietet das Potential, komplexe Bauteile wie Vorkammerzündkerzen und Zylinderköpfe direkt aus Metallpulver herzustellen. Die spezifischen Anforderungen des Projekts an diese Bauteile umfassen hohe thermische und mechanische Belastbarkeit, optimierte Kühlkanalgeometrien und die Anpassung an das Mager-Brennverfahren mit Methan.

Die additive Fertigung im Automobil- und Motorenbau ist nicht neu, jedoch stellen die hohen Anforderungen des Motorsports und der Leichtbauindustrie stetig steigende Herausforderungen an das Material und die Fertigungstechnologien. Insbesondere der LPBF-Prozess hat sich als geeignet erwiesen, komplexe Geometrien mit internen Strukturen, die durch herkömmliche Methoden nicht oder nur schwer herstellbar sind, effizient zu fertigen.

5 Ablauf des Vorhabens

Nachfolgend wird der geplante Ablauf des Forschungsprojekts erläutert. Der zeitliche Ablauf und die Benennung der Arbeitspakete (AP) lässt sich dem Gantt-Diagramm entnehmen (siehe Abbildung 1).

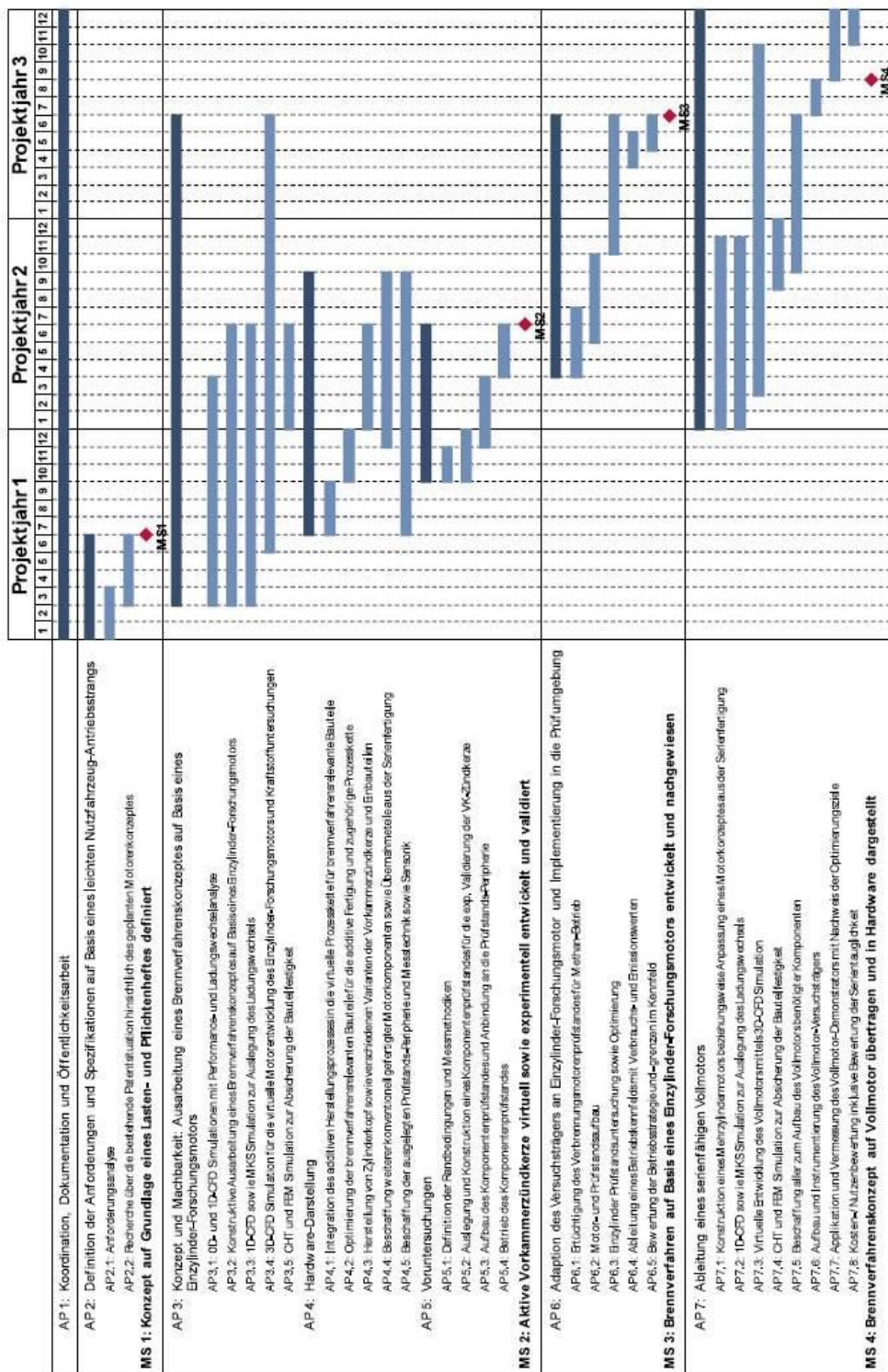


Abbildung 1: Darstellung der zeitlichen Projektplanung und der geplanten Arbeitspakete im Gantt-Diagramm

Im ersten Projektjahr lag der Fokus auf der Konzeption und Vorbereitung:

AP1 umfasste Koordination, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit, die durchgehend über alle drei Jahre des Projekts laufen.

AP2 beinhaltete die Definition von Anforderungen und Spezifikationen basierend auf den Nutzfahrzeug-Antriebssträngen und war für die ersten beiden Quartale des ersten Jahres geplant.

AP3 konzentrierte sich auf das Konzept und die Machbarkeit, wobei die Ausarbeitung des Brennverfahrenskonzepts auf Basis eines Einzylinder-Forschungsmotors im Mittelpunkt stand. Es begann kurz nach AP2 und erstreckte sich bis zur Hälfte des zweiten Projektjahres. Ein Teilpaket aus AP3, die 3D CFD Simulation, zieht sich bis in das dritte Projektjahr.

Im zweiten Jahr des Projekts begann die praktische Umsetzung und experimentelle Entwicklung:

AP4 betraf die Hardware-Darstellung, einschließlich der Integration des additiven Herstellungsprozesses für relevante Bauteile. Es startete noch im ersten Projektjahr.

AP5 befasste sich mit Voruntersuchungen, die kurz nach Start des AP4 begannen und notwendige Grundlagen für die Experimente lieferten.

Das dritte und letzte Jahr konzentrierte sich auf die Validierung und Adaption des erarbeiteten Konzepts auf einen serienfähigen Vollmotor:

AP6 und AP7 befassten sich mit der Anpassung des Versuchsträgers und der Ableitung eines serienfähigen Vollmotors. Diese Pakete wurden parallel durchgeführt und waren auf das Ende des Projekts ausgerichtet.

Die Meilensteine des Projekts waren strategisch über den Verlauf verteilt:

MS1 markierte das konzeptuelle Fundament des Projekts zur Hälfte des ersten Projektjahres.

Mit MS2 sollen zur Hälfte des zweiten Jahres die entworfenen Komponenten virtuell sowie experimentell entwickelt und validiert sein.

MS3 repräsentierte den Nachweis des Brennverfahrens im Forschungsmotor, zur Hälfte des dritten Projektjahres.

MS4 zeigte die Übertragung des Konzepts auf den Vollmotor und stellte den Abschluss des Projekts dar.

6 Ausführliche Ergebnisdarstellung

Im Kapitel AP 4.1 wird die nahtlose Eingliederung additiver Fertigungsverfahren in die Produktionskette betrachtet, unter besonderer Berücksichtigung der Materialauswahl und des Designs für den 3D-Druck. AP 4.2 legt den Fokus auf die Optimierung von Bauteilgeometrien für den LPBF-Prozess, um eine optimale Funktionalität und Fertigungseffizienz zu gewährleisten. In AP 4.3 wird schließlich der tatsächliche Fertigungsprozess von Zylinderköpfen und Vorkammerzündkerzen beleuchtet, inklusive der Herausforderungen und Lösungen zur Sicherung der Bauteilqualität durch angepasste Wärmebehandlungen und Qualitätsprüfungen.

6.1 AP 4.1 Integration additive Fertigung

Die Integration der additiven Fertigung in die Prozesskette bildete einen der Kerne der Entwicklungsarbeit in diesem Projekt. Die sorgfältige Auswahl und Qualifizierung von Werkstoffen, insbesondere die Aluminiumlegierung AlSi10Mg und der Vergütungsstahl 42CrMo4, standen dabei im Vordergrund. Diese Materialien wurden ausgewählt, weil sie bereits im Automobilbau erprobt sind und für ihre hohen mechanischen Eigenschaften und gute Wärmeleitfähigkeit bekannt sind.

In der virtuellen Prozesskette wurden zahlreiche Analysen durchgeführt, um die Eignung der ausgewählten Materialien und die Konstruktionsrichtlinien für den 3D-Druck, insbesondere dem Laser Powder Bed Fusion Prozess (LPBF-Prozess) zu validieren. Die Verwendung von Materialise Magics zur Überprüfung der Druckbarkeit der ersten Bauteilentwürfe war entscheidend. Diese Software ermöglichte es, kritische Überhänge und andere potenzielle Druckprobleme frühzeitig zu identifizieren. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Vermeidung von Stützstrukturen gelegt, da diese nach dem Druck nicht manuell aus den komplexen Innenstrukturen der Bauteile entfernt werden können.

Das Design der Komponenten wurde kontinuierlich überarbeitet und angepasst, um die Geometrien für den 3D-Druck zu optimieren. Dies umfasste Diskussionen über die Gestaltung von Überhängen und die Notwendigkeit, die Geometrien so anzupassen, dass sie ohne zusätzliche Stützstrukturen druckbar sind. Die Konstruktion des Zylinderkopfes und des Kühlmantels wurde speziell so entworfen, dass sie die Anforderungen des 3D-Drucks erfüllen und gleichzeitig die mechanische Integrität und Funktionalität der Bauteile gewährleisten.

Diese umfassende Vorarbeit zwischen dem Fraunhofer ICT und der Rosswag GmbH resultierte in einem fortschrittlichen Design des Zylinderkopfes, um den hohen Anforderungen des Methan-Mager-Brennverfahrens gerecht zu werden.

6.2 AP 4.2 Bauteiloptimierung für additive Fertigung

6.2.1 Erweiterte Werkstoffauswahl und Eigenschaftsanalyse

Die Optimierung der Motorkomponenten für die additive Fertigung begann mit einer detaillierten Analyse und Auswahl der Werkstoffe. Die durch die Projektpartner durchgeführten Voruntersuchungen ergaben bezüglich der thermischen Anforderungen im „worst case“ eine thermische Belastung von 250 °C im Zylinderkopf. Die Aluminiumlegierung AlSi10Mg wurde aufgrund ihrer etablierten Anwendung im Automobilbau und hervorragenden mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu traditionellen Guss-Alulegierungen für den Zylinderkopf ausgewählt. Dieses Material war bereits für den Metall-3D-Druck verfügbar und als gutmütiger Werkstoff für komplexe Geometrien, wie es der Zylinderkopf ist, etabliert. Gutmütig bedeutet in diesem Sinn ein vergleichsweise breites Prozessfenster im Vergleich zu anderen AM-Werkstoffen und eine hohe Toleranz zu Überhangkonturen, wie Oberflächen bei innenliegenden Kanälen ausgeprägt sind.

Für die Vorkammerzündkerzen hingegen wurden der Vergütungsstahl 42CrMo4 sowie verschiedenen Eisen- und Nickelbasislegierungen als möglicher Werkstoff diskutiert und betrachtet, da die thermische Stabilität dieser Komponenten mit bis zu 600 °C deutlich höher als die thermische Belastung des Zylinderkopfes selbst liegt. Beispielsweise wurden Edelstähle wie 1.4404 und 1.4828 sowie Nickelbasislegierungen wie Inconel 718 und Inconel 625 in Betracht gezogen, um die mechanischen Anforderungen spezifischer Motorkomponenten zu erfüllen.

6.2.2 Design und Konstruktionsrichtlinien

Die Konstruktionsrichtlinien für die additive Fertigung, insbesondere dem Laser Powder Bed Fusion-Prozess, wurden sorgfältig umgesetzt, um die Druckbarkeit der Bauteile zu optimieren und den Einsatz von Stützstrukturen zu minimieren. Eine besondere Herausforderung stellt der Platzbedarf des Zylinderkopfes dar. Das Design musste entsprechende dem Raumangebot der LPBF-Anlage entworfen werden. Der Zylinderkopf belegt den Bauraum von 280 mm mal 280 mm in der Grundfläche fast vollständig.

Es wurde darauf geachtet, dass Überhänge, die größer als 45° sind, vermieden oder minimiert werden, da diese sonst mit Stützstrukturen versehen werden müssen. Vor allem wurde konsequent darauf geachtet bei innenliegenden Strukturen Stützstrukturen zu vermeiden, da diese im Nachgang zum 3D-Druck nicht entfernt werden können. Die Designoptimierung umfassten auch die Anpassung der Wandstärken und die Optimierung der Kanäle für die Kühlung, um sicherzustellen, dass die Teile ohne interne Fehler gedruckt werden können.

6.2.3 Testdrucke und Prototyping

Zur Validierung der Konstruktionsrichtlinien und Materialauswahl wurden umfangreiche Testdrucke durchgeführt. Hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf den Wassermantel des Zylinderkopfes gelegt, für den ein spezieller Testkörper entworfen wurde. Der Wassermantel besteht aus Kühlkanälen mit großen Querschnitten, Verzweigungen und Querschnittsübergängen (siehe Abbildung 2).

Da die Vorkammerzündkerze als thermisch hochbelastete Komponente maßgeblich von ihrer Kühlung abhängig ist, wurde ein weiterer Testkörper mit dem Ausschnitt der Kühlung hergestellt, um die Realisierbarkeit der Kühlkanäle auch für diesen Abschnitt

abzusichern. Diese Kühlkanäle sind mit 3 mm am kleinsten Querschnitt sehr dünn und können eine Herausforderung für das nachträgliche vollständige entpulvern des Bauteils darstellen. Der Test zeigte, dass dieser Komponentenabschnitt vollständig entpulvert werden konnte (siehe Abbildung 3). Diese Tests waren entscheidend, um die Machbarkeit der Konstruktion zu überprüfen und sicherzustellen, dass die Kühlung effektiv funktioniert.

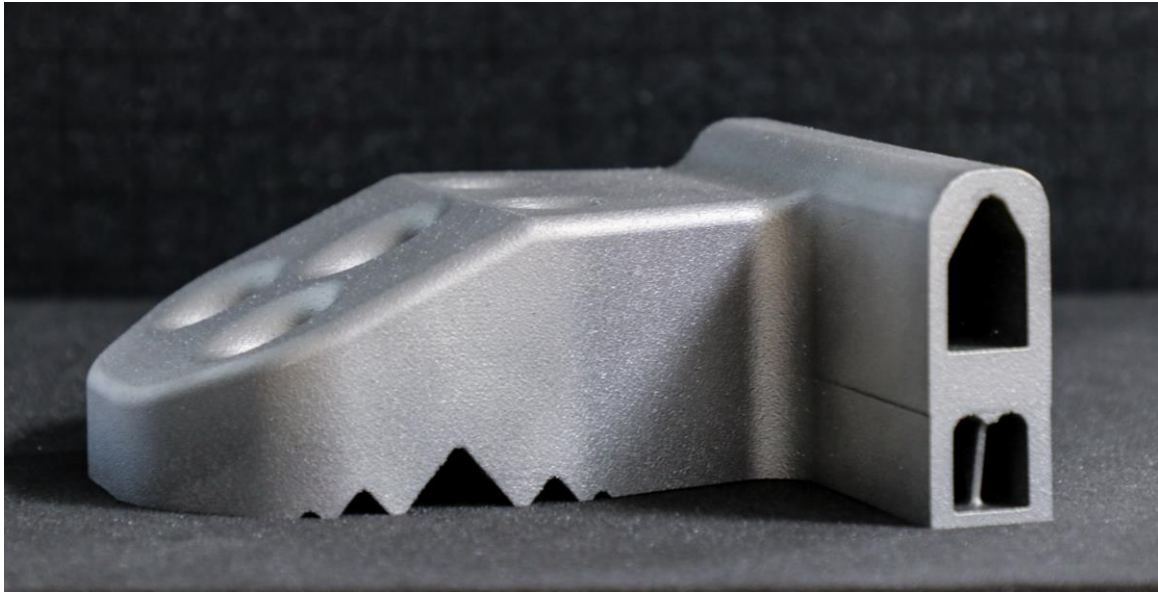


Abbildung 2: Testdruck aus dem Werkstoff AlSi10Mg mit dem gesamten Wassermantel des Zylinderkopfes

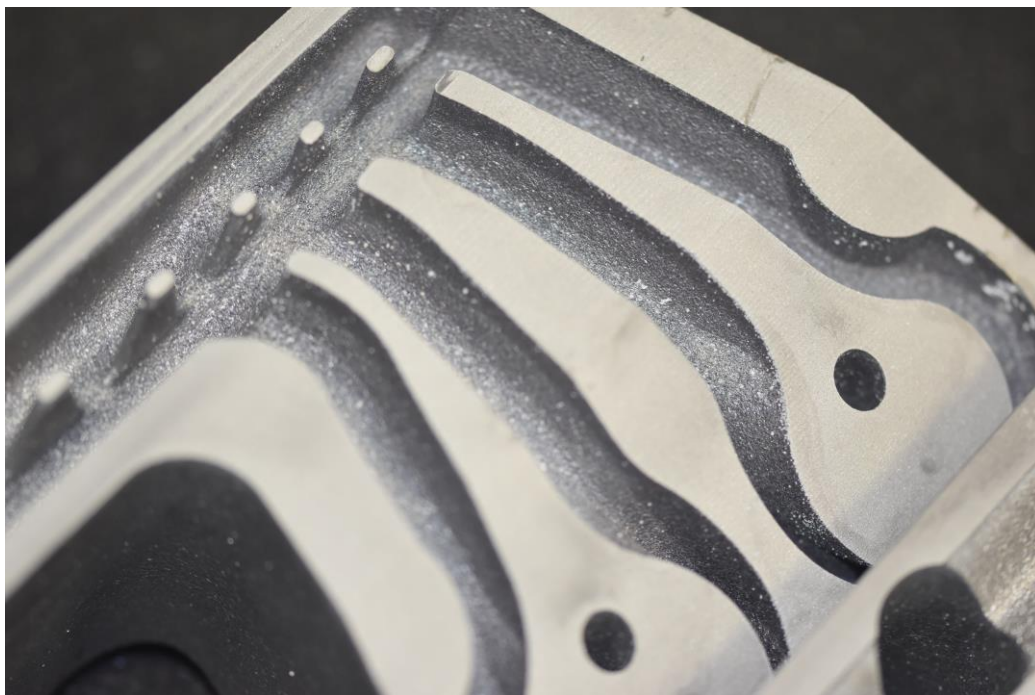


Abbildung 3: Mittels Drahterodieren aufgetrennter Testdruck des Wassermantels zur Sichtung der Kanäle im Überhangbereich

6.3 AP 4.3 Herstellung Zylinderkopf und Vorkammer

6.3.1 Herstellungsprozess des Zylinderkopfes

Die Herstellung der Zylinderköpfe aus der Aluminiumlegierung AlSi10Mg wurde zunächst mit der Produktion von vier Prototypen im April 2022 begonnen. Abbildung 4 zeigt den für den 3D Druck vorbereiteten Zylinderkopf in der Benutzeroberfläche des Pre-Processors Materialise Magics.

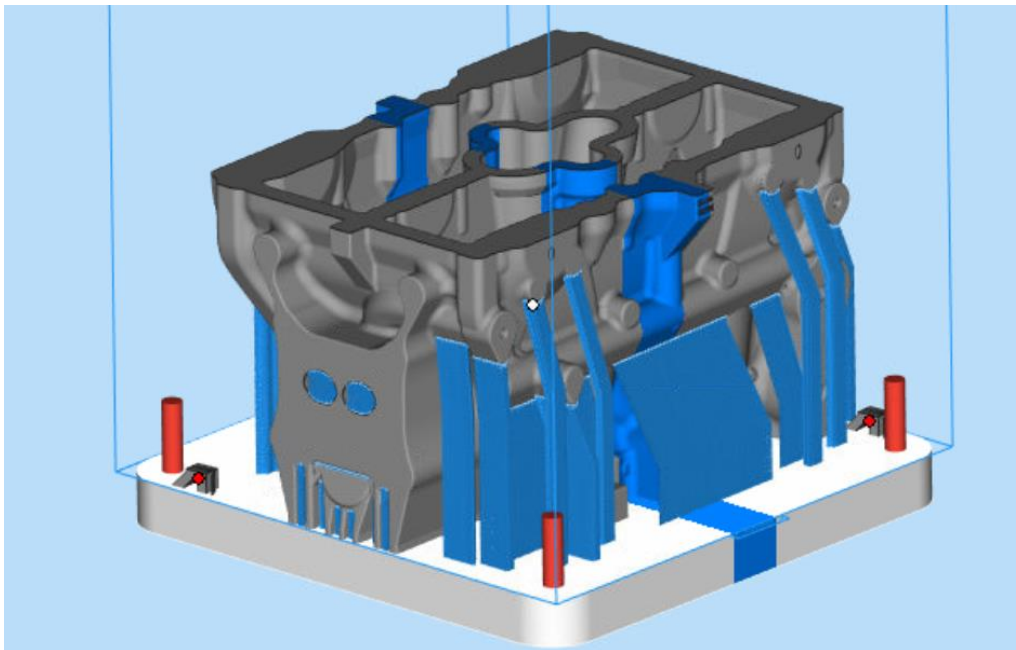


Abbildung 4: Mit Support (blau) versehenes 3D-Modell des Zylinderkopfes auf der virtuellen Bauplatte platziert

Um sicherzustellen, dass die komplexen Kühlkanäle in den Zylinderköpfen frei von Pulverrückständen waren, wurde ein Computertomographie-Scan (CT-Scan) durchgeführt. Die Ergebnisse des Scans zeigten, dass alle Kühlkanalabschnitte frei von Pulverrückständen waren. Die Maßkontrolle der vier Zylinderköpfe offenbarte jedoch signifikante Abweichungen von der Sollgeometrie. Stellenweise waren die Zylinderköpfe stark deformiert. Wie in Abbildung 5, ein Ausschnitt des CT-Scans, zu erkennen ist, war die Porosität im Gefüge stellenweise mit bis zu 15% deutlich zu hoch. Für den Werkstoff und den Prozess ist üblicherweise eine Restporosität von weniger als 0,1% zu erwarten. Die Maßabweichungen wurden in einem 3D-Scan näher quantifiziert. Zwei der vier Zylinderköpfe wiesen Formabweichungen von mehr als 5 mm auf (siehe Abbildung 6).

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde der Herstellungsprozess eingehend überprüft. Dabei wurde ein Fehler in der Optik der Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Anlage identifiziert, der eine Verschiebung des Laserfokus bewirkte. Dieser Fehler beeinträchtigte das prozesssichere Aufschmelzen des Metallpulvers, was zu den festgestellten Qualitätsmängeln führte. Die Analyse ergab, dass sich dieser Fehler ab der Fertigung des zweiten Zylinderkopfes verstärkt hatte.

Aus dem ersten Produktionslos konnte jedoch ein Zylinderkopf identifiziert werden, der sowohl maßlich als auch hinsichtlich des Gefüges dem Stand der Technik entsprach. Die Maßhaltigkeit im 3D-Scan ist in Abbildung 7 dargestellt. Aufgrund der identifizierten Probleme wurde in der Kalenderwoche 31/2022 die Ersatzfertigung

von drei weiteren Zylinderköpfen angestoßen. Durch die aufgetretenen Schwierigkeiten bei diesem innovativen Fertigungsverfahren konnte die ursprünglich geplante Zeitschiene für das Arbeitspaket AP 4.3 nicht eingehalten werden.

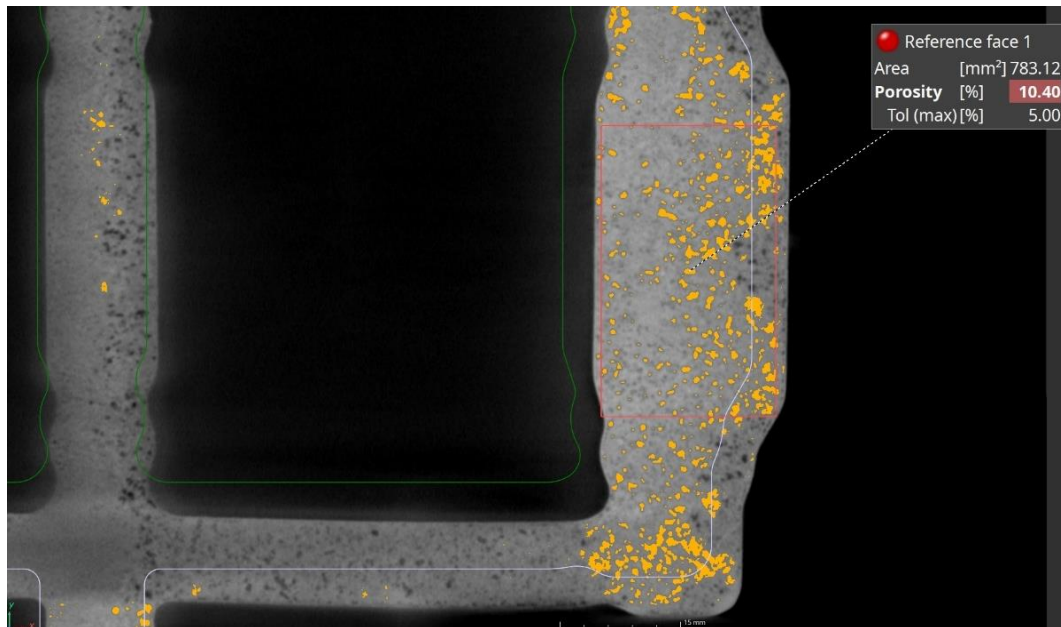


Abbildung 5: Poren und maßliche Abweichung im CT Scan (grüne und weiße Linie sind Sollgeometrie)

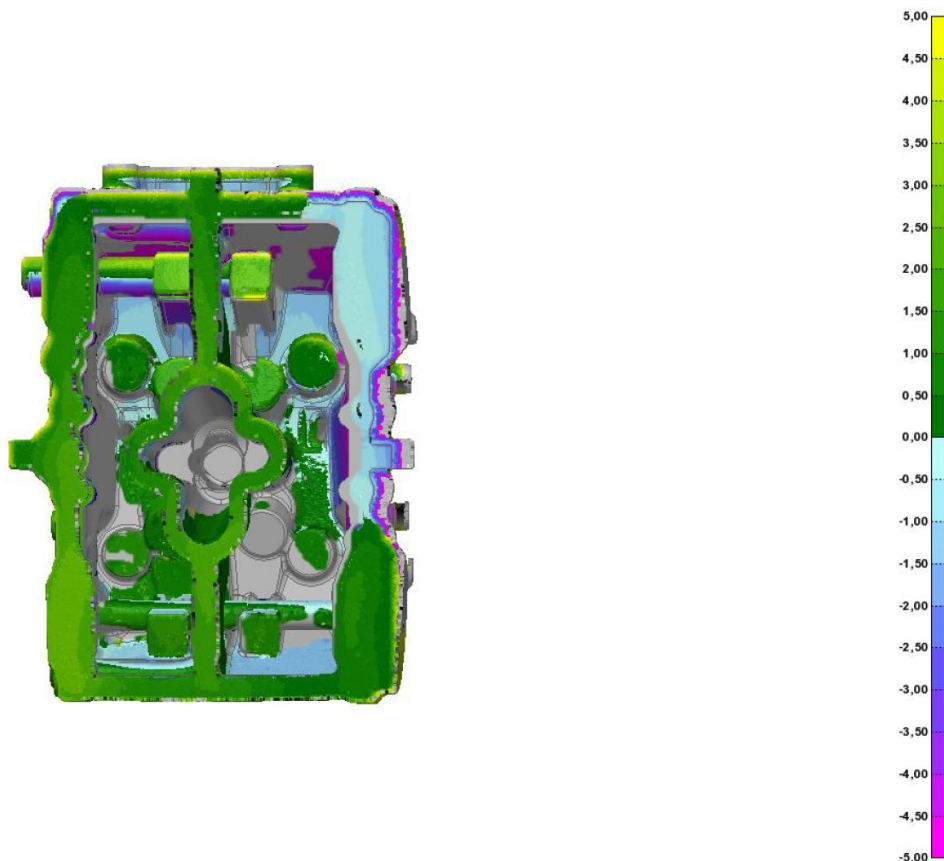


Abbildung 6: Starke Abweichung der Ist-Geometrie von der Soll-Geometrie > 5 mm

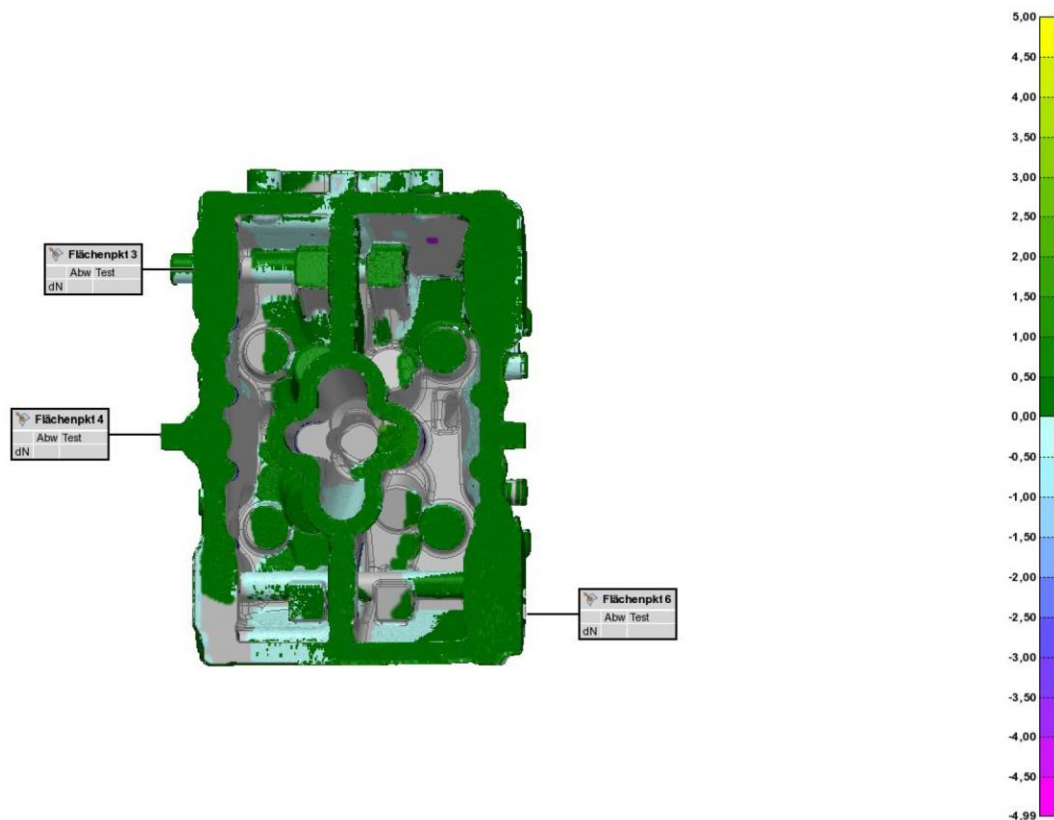


Abbildung 7: Gutteil des fehlerfreien Baujobs

6.3.2 Wärmebehandlung des Zylinderkopfes

Die drei Ersatzzylinderköpfe wurden erfolgreich produziert und mittels 3D Scans auf Maßhaltigkeit überprüft. Die Scans ergaben, dass die Teile, mit verfahrensüblichen Formabweichungen im Bereich von 0,1 mm, maßlich in Ordnung waren. Die geforderte T6 Wärmebehandlung wurde im Nachgang durchgeführt.

Beim Start der spanenden Nacharbeit ist aufgefallen, dass alle Rohteile maßlich nicht in Ordnung sind. Die Bauteile wurden daher zurück zu Rosswag Engineering geschickt, wo eine erneute Überprüfung mittels 3D Scan durchgeführt wurde. Dabei stellte sich heraus, dass sich die Zylinderköpfe während der Wärmebehandlung signifikant verformt hatten.

Nach einer Literaturrecherche wurde festgestellt, dass die T6 Wärmebehandlung für das 3D gedruckte AlSi10Mg im Vergleich zum konventionellen AlSi10Mg nicht geeignet ist, da diese die Porosität im Bauteil erhöht und so Verformungen hervorruft. Im Konsortium wurde über das weitere Vorgehen beraten und beschlossen, die Anzahl der benötigten Ersatzteile auf zwei zu reduzieren, indem Versuchsinhalte zusammengelegt werden. Neben dem erneuten Druck von zwei weiteren Ersatzzylinderköpfen wurden 12 Zugproben für Absicherungsversuche aus AlSi10Mg gedruckt. Ein Design of Experiment (DoE) wurde aufgesetzt, um alternative Wärmebehandlungsrouten zu prüfen. Das DoE ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Zugproben wurden nach der Herstellung mittels LPBF gescannt und vermessen und anschließend verschiedenen Wärmebehandlungsrouten unterzogen. Die Proben wurden bei Raumtemperatur und bei 200°C als Warmzugprobe geprüft.

Tabelle 1: DoE Probenübersicht mit Zuordnung der Zugversuche und Wärmebehandlung

Probennummer	Ausrichtung	Werkstoffzustand	Prüfung
RE-B339-Z1	out of plane	as printed	Zugversuch RT
RE-B339-Z2	out of plane	as printed	Zugversuch RT
RE-B339-Z3	out of plane	as printed	Zugversuch RT
RE-B339-Z4	out of plane	Spannungsarmglühen	Zugversuch RT
RE-B339-Z5	out of plane	Spannungsarmglühen	Zugversuch warm 200 °C
RE-B339-Z6	out of plane	Spannungsarmglühen + T6 like (EOS)	Zugversuch RT
RE-B339-Z7	out of plane	Spannungsarmglühen + T6 like (EOS)	Zugversuch warm 200 °C
RE-B339-Z8	out of plane	T6 like (EOS)	Zugversuch RT
RE-B339-Z9	out of plane	T6 like (EOS)	Zugversuch warm 200 °C
RE-B339-Z10	out of plane	T6 ICT	Zugversuch warm 200 °C
RE-B339-Z11	out of plane	T6 ICT	Zugversuch RT
RE-B339-Z12	out of plane	as printed	Zugversuch warm 200 °C

Spannungsarmglühen:

- Aufheizrate: 100°C / h
- Temperatur: 300°C
- Zeit: 2 h
- Abkühlen: Kontrolliert abkühlen 100 °C / h im Ofen

T6 like EOS

- Lösungsglühen
 - Einlegen in vorgeheizten Ofen
 - Temperatur: 530°C
 - Zeit: 0,5 h
- Abschrecken in Wasser direkt nach Ofenentnahme (ca. 15 Sekunden / max. 30 Sekunden)
- Warmauslagern

- a. Aufheizrate: 100°C / h
- b. Temperatur: 165°C
- c. Zeit: 6 h
- d. Abkühlen: unkontrolliert an Luft

T6 ICT

- 1. Lösungsglühen
 - a. Aufheizrate: 400 °C/h
 - b. Temperatur: 525°C
 - c. Zeit: 7 h
- 2. Abschrecken in Wasser direkt nach Ofenentnahme (ca. 15 Sekunden / max. 30 Sekunden)
- 3. Warmauslagern
 - a. Aufheizrate: 400°C / h
 - b. Temperatur: 150°C
 - c. Zeit: 7 h
 - d. Abkühlen: Kontrolliert abkühlen 100 °C/h im Ofen

Zur Bestimmung des Längenmaßes wurden an jeder Zugprobe jeweils drei Messungen durchgeführt und die Ergebnisse im nachfolgenden Diagramm aufgetragen (siehe Abbildung 8). An den as-printed Proben wurden sechs Längenmaße genommen, um einen Eindruck der Messmethode und deren Abweichung zu erhalten. Die Messwerte innerhalb einer Probe streuen im Bereich 0,1 mm bis 0,15 mm.

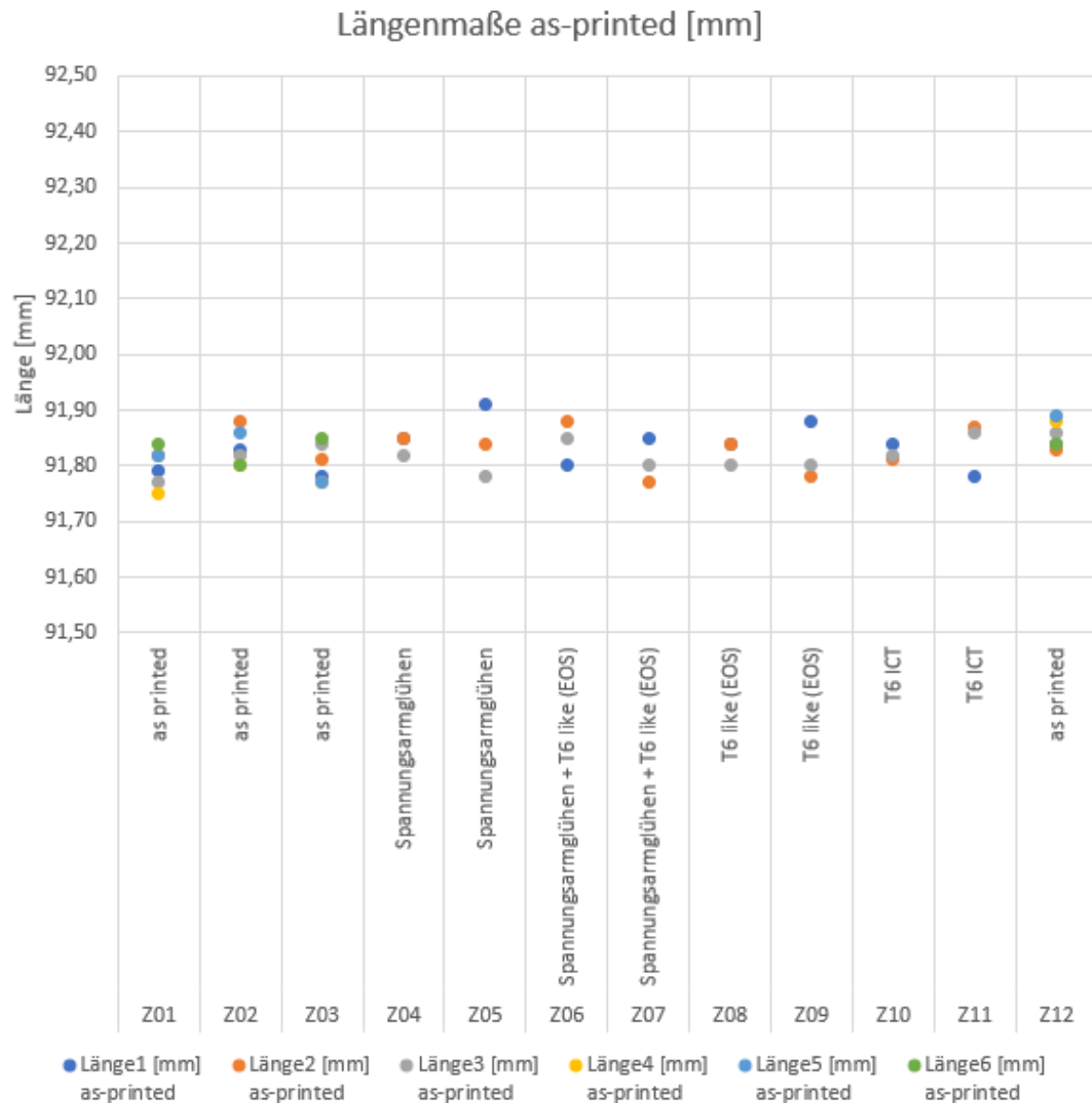


Abbildung 8: Längenmaße der Zugproben im as-printed Zustand

Nach den Wärmebehandlungen wurde, wie nachfolgend im Diagramm gezeigt, die Längenmaße wieder mit jeweils drei Messungen aufgenommen (siehe Abbildung 9). Die Streuung der Messwerte innerhalb einer Probe liegt ebenfalls im Bereich von 0,1 mm bis 0,15 mm.

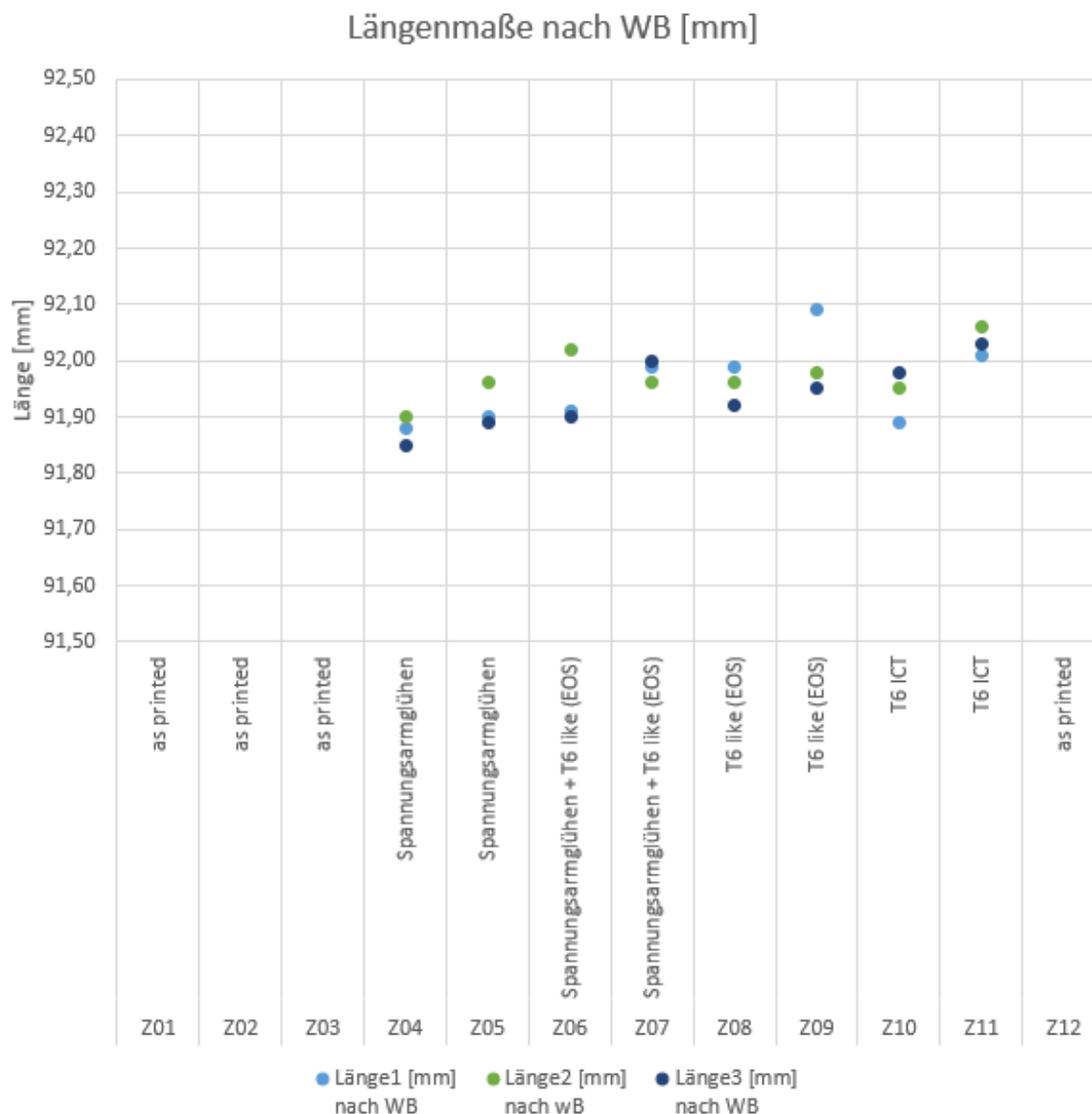


Abbildung 9: Längenmaße der Zugproben nach den Wärmebehandlungen

Die drei Wärmebehandlungsrouen mit einer T6 Komponente, namentlich „Spannungsarmglühen + T6 like (EOS)“, „T6 like (EOS)“ und T6 ICT“, resultieren im Mittel in einer Längenänderung von 0,15 mm. Im Vergleich dazu längen sich die Spannungsarmgeglühten Zugproben um 0,05 mm. Die Längenänderung ist in Abbildung 10 dargestellt.

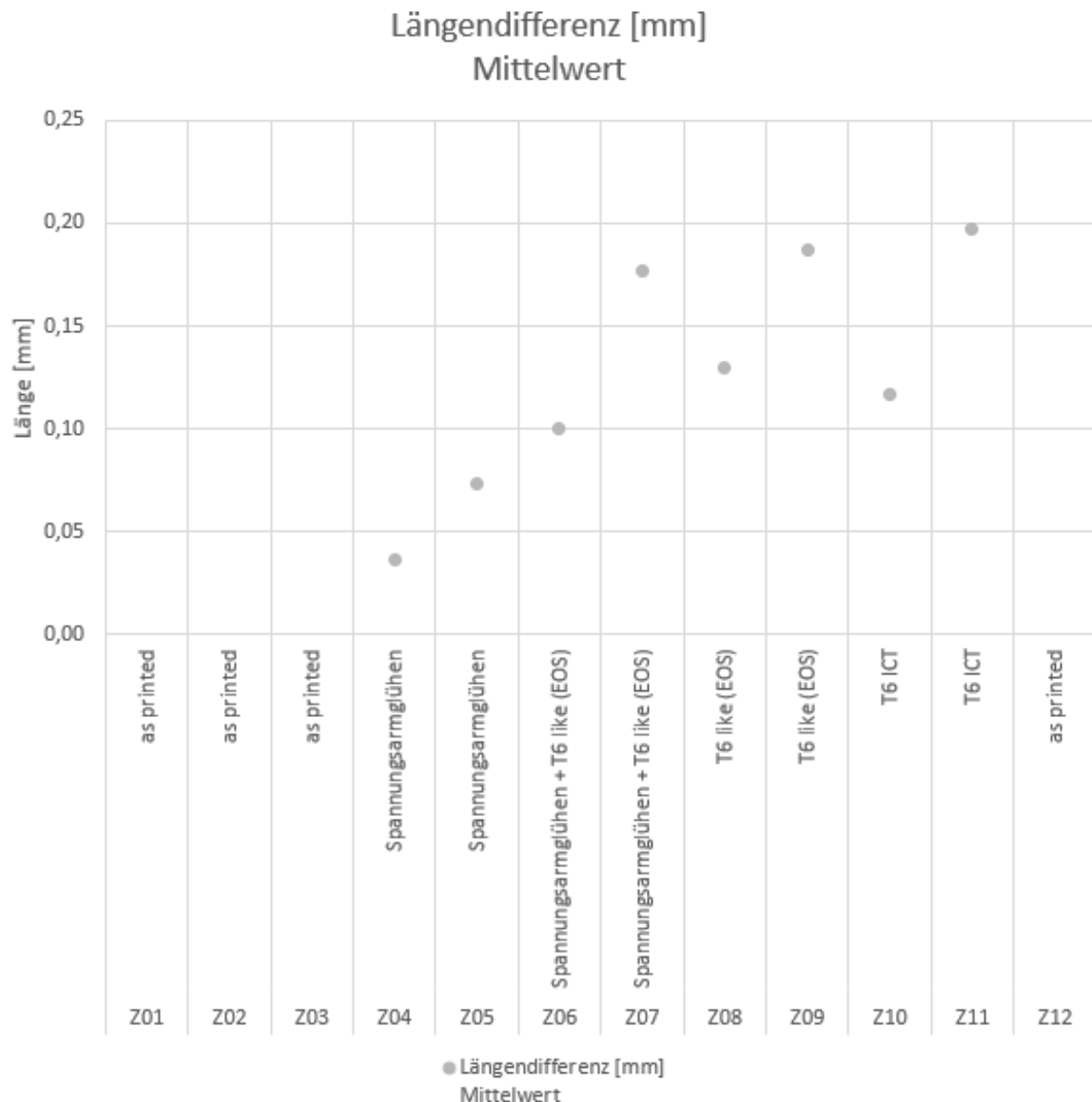


Abbildung 10: Längendifferenz der Zugproben vor und nach der jeweiligen Wärmebehandlung

Die beiden folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der Zugversuche bei Raumtemperatur und der Warmzugversuche bei 200 °C. Die besten mechanischen Eigenschaften mit einer Zugfestigkeit von ca. 430 MPa und einer Streckgrenze bei knapp 300 MPa weist der Werkstoff im as-printed Zustand auf. Darunter liegen, mit einer Streckgrenze von ca. 260 MPa und einer Zugfestigkeit von ca. 330 MPa, die Proben Z06 und Z08, an denen die „T6 like“ Wärmebehandlung durchgeführt wurde. Dabei ist auffällig, dass die „T6 like“ Wärmebehandlung das zuvor durchgeführte Spannungsarmglühen an der Probe Z06 neutralisiert. Das Spannungsarmglühen allein setzt die mechanischen Eigenschaften mit einer Streckgrenze von ca. 180 MPa und einer Zugfestigkeit von ca. 280 MPa weiter herab. Mit einer Streckgrenze von ca. 170 MPa und einer Zugfestigkeit von ca. 200 MPa liefert die Probe Z11 mit der zuvor erforderliche T6 Wärmebehandlung die schlechtesten mechanischen Kennwerte für den AlSi10Mg Werkstoff in dieser Untersuchung.

Der bei Raumtemperatur vorliegende flache Verlauf zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit des T6 ICT Werkstoffzustandes verläuft beim Warmzugversuch steiler. Die mechanischen Eigenschaften steigen dabei auf 220 MPa für die Streckgrenze und knapp 300 MPa für die Zugfestigkeit. Die Ergebnisse für die Proben Z07 und Z09 flachen hingegen von Streckgrenze bis zur Zugfestigkeit ab und liegen im Bereich von 200 MPa bis 240 MPa. Die besten Eigenschaften bei den Warmzugversuche liefert ebenfalls die Probe im as-printed Zustand. Die Ergebnisse aus den Zugversuchen sind in den beiden Diagrammen in Abbildung 11 aufgetragen. Das linke Diagramm zeigt die Zugversuchsergebnisse der Zugversuche bei Raumtemperatur. Das rechte Diagramm zeigt die Ergebnisse der Warmzugversuche.

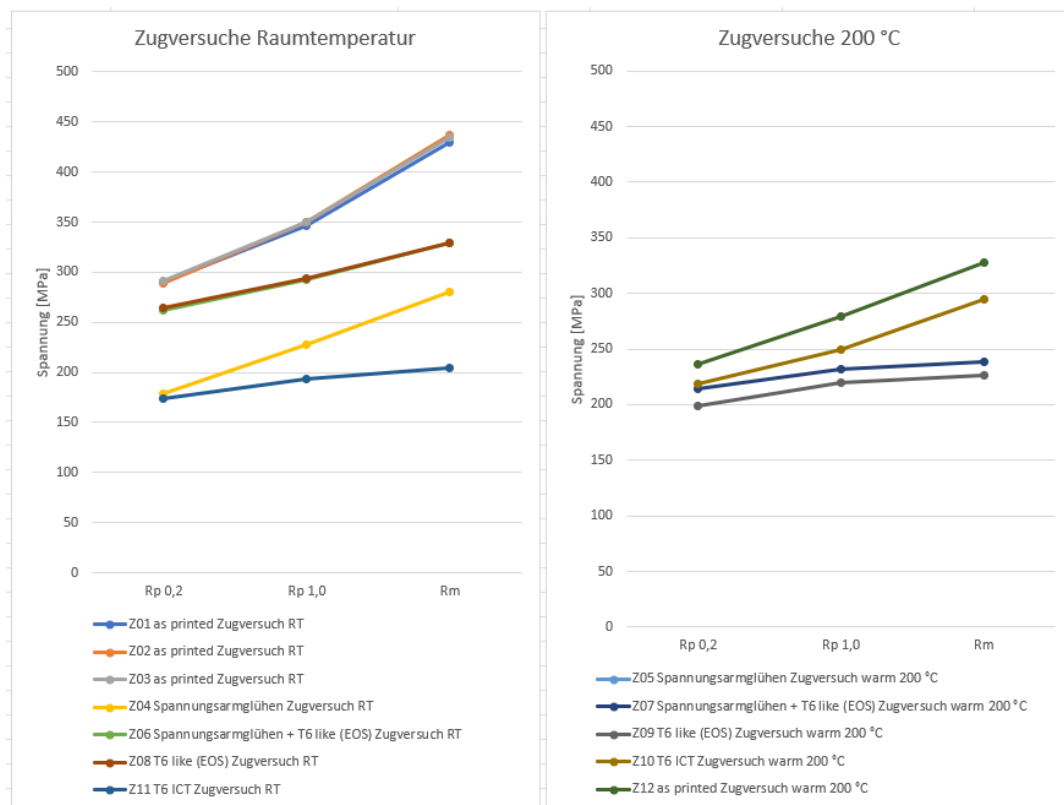


Abbildung 11: Ergebnisse aus den Zugversuchen für Raumtemperatur links und bei 200 °C rechts

Die Ergebnisse des DoE zeigten, dass die Zugfestigkeit der Proben im wärmebehandelten Zustand die Anforderungen für die Zylinderköpfe erfüllte, jedoch wurde eine Längenänderung bei den Zugproben mit T6 Komponente festgestellt, die darauf hindeutete, dass die gewählte Wärmebehandlung eine leichte Verformung verursachen könnte. Trotz Bedenken seitens Rosswag Engineering entschied das Konsortium, die Zylinderköpfe bei 300°C für 2 Stunden spannungsarm zu glühen. Nach dieser Behandlung wurden die Zylinderköpfe erneut vermessen und dabei eine geringfügige Längenänderung von 0,1% festgestellt, die jedoch innerhalb akzeptabler Toleranzen lag. Die 3D-Scans in den beiden nachfolgende Abbildungen zeigen die nur geringfügige Änderungen zwischen den beiden Werkstoffzuständen. In Abbildung 12 ist der Zylinder vor der Wärmebehandlung und in Abbildung 13 der Zylinderkopf nach der Wärmebehandlung zu sehen.

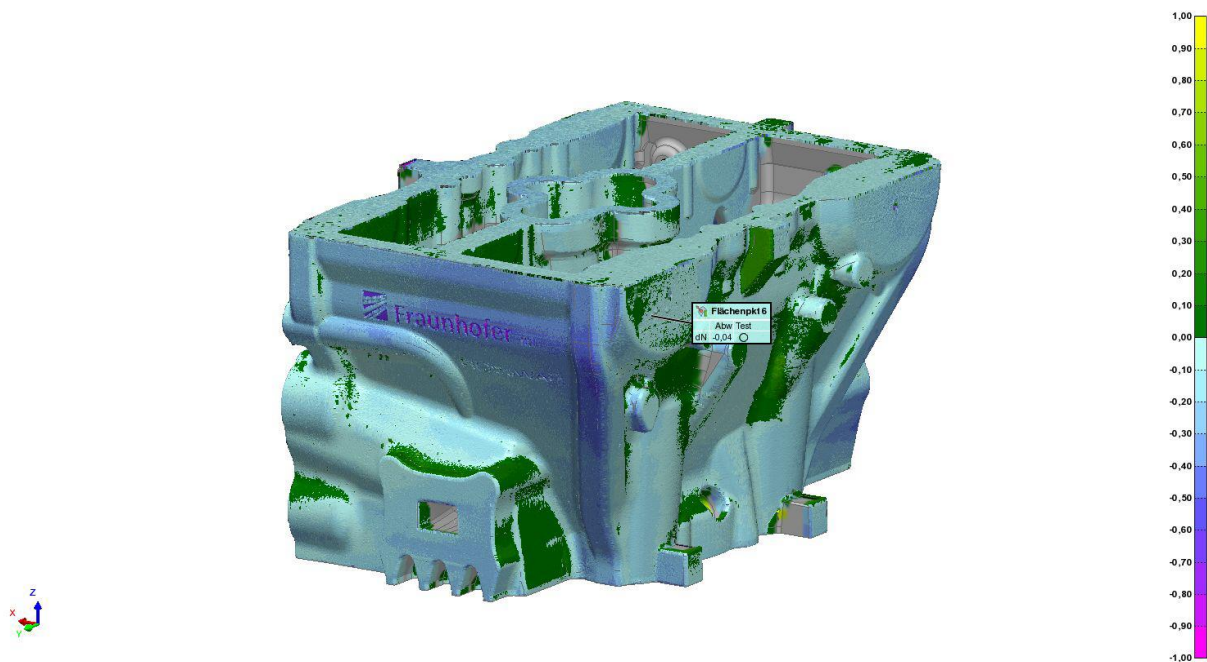


Abbildung 12: 3D-Scan zweite Ersatzteilerfertigung vor Wärmebehandlung

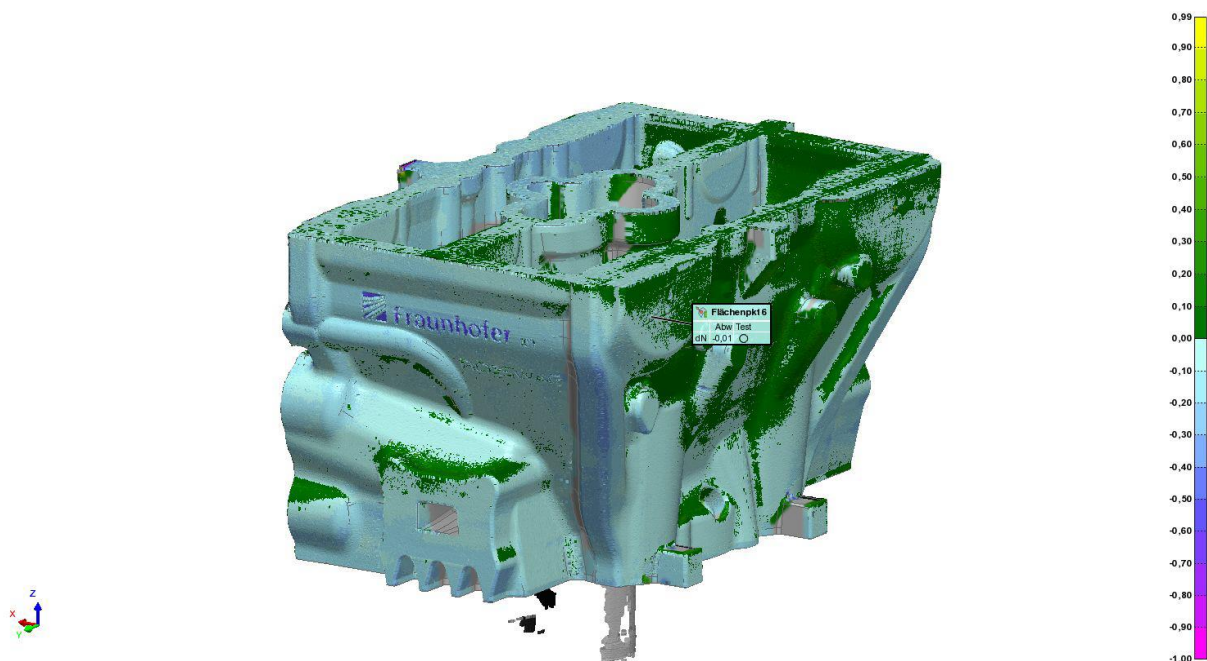


Abbildung 13: 3D-Scan zweite Ersatzteilerfertigung nach Wärmebehandlung

Aufgrund der im Konsortium beschlossenen Notwendigkeit einer Wärmebehandlung und der damit verbundenen Herausforderungen mit der Aluminiumlegierung AlSi10Mg entschied sich das Team einen alternativen Werkstoff für den Zylinderkopf zu qualifizieren. Es wurde die neue Aluminiumlegierung Ahead CP1 von Constellium in Betracht gezogen, die speziell für die Anforderungen des LPBF-Verfahrens entwickelt wurde. Der Werkstoff basiert auf einer Legierung aus Aluminium, Eisen und Zirkon. Diese Legierung verspricht hohe Festigkeit bei gleichermaßen hoher Duktilität und eine gute Wärmeleitfähigkeit im Bereich von 180

W/mK. Dabei soll sie sich gut im Laser Powder Bed Fusion Prozess verarbeiten lassen.

6.3.3 Zusatzfertigung mit der Aluminiumlegierung CP1

Die erste Fertigungsrunde mit der CP1-Legierung fand statt, nachdem die initiale Qualifizierung und Tests der Verarbeitbarkeit abgeschlossen waren. Der neue Zylinderkopf wurde unter Verwendung der zuvor erprobten Prozessparameter hergestellt. Der Zylinderkopf wurde einer umfassenden Qualitätskontrolle unterzogen, die 3D-Scans und mechanische Tests einschloss.

Insbesondere nach der Wärmebehandlung, die bei 400 °C für 4 Stunden durchgeführt wurde, verbesserten sich die Zugfestigkeiten signifikant von etwa 200 MPa auf etwa 340 MPa, wobei die Duktilität auf ein akzeptables Maß, einer Bruchdehnung von 13 % reduziert wurde. Die maßliche Abweichung nach der Wärmebehandlung betrug -0,3 mm, was innerhalb der Toleranzen für das LPBF-Verfahren lag. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen den Zylinderkopf aus dem Werkstoff CP1 vor und nach der Wärmebehandlung. Der additiv gefertigte Zylinderkopf vor der CNC-Bearbeitung in Abbildung 16 dargestellt.

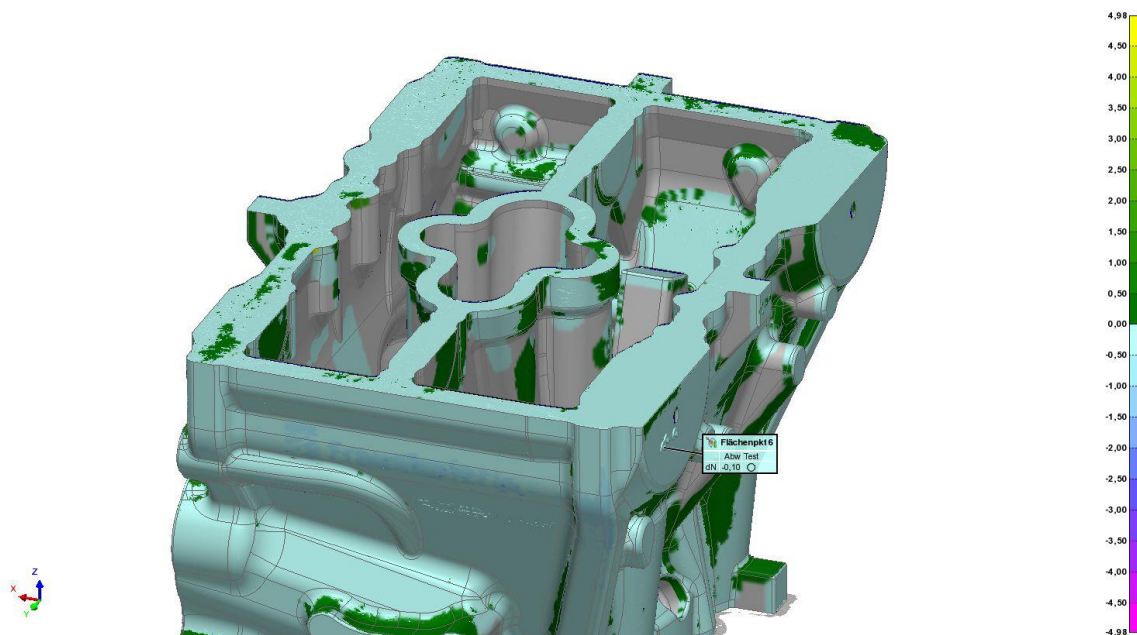


Abbildung 14: 3D-Scan des CP1 Zylinderkopfes vor der Wärmebehandlung

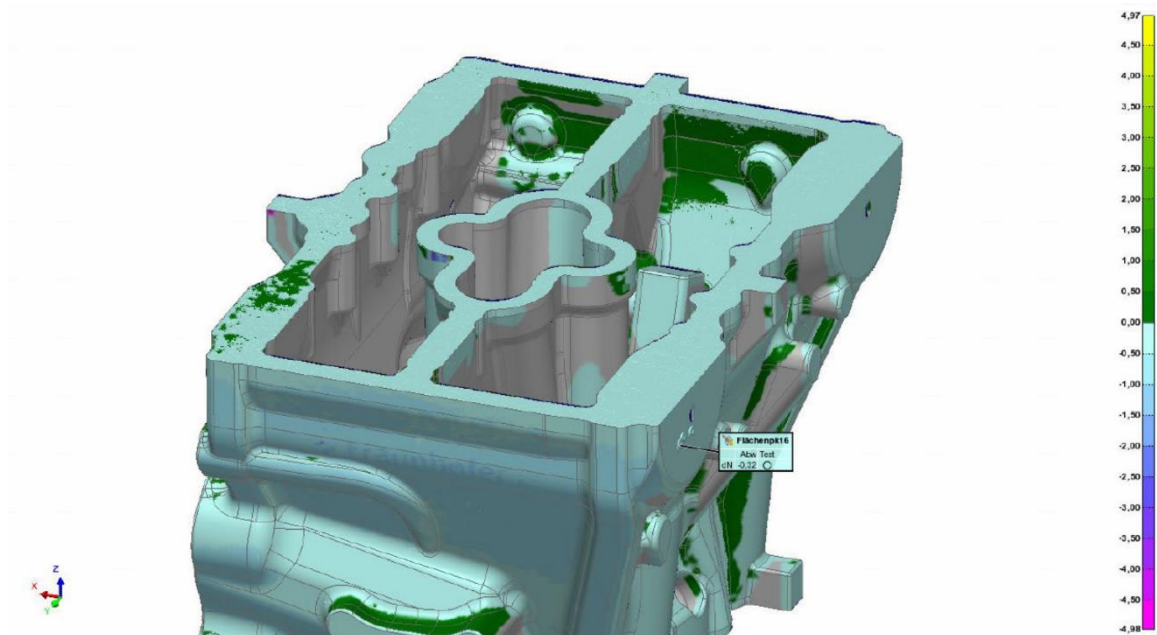


Abbildung 15: 3D-Scan des CP1 Zylinderkopfes nach der Wärmebehandlung

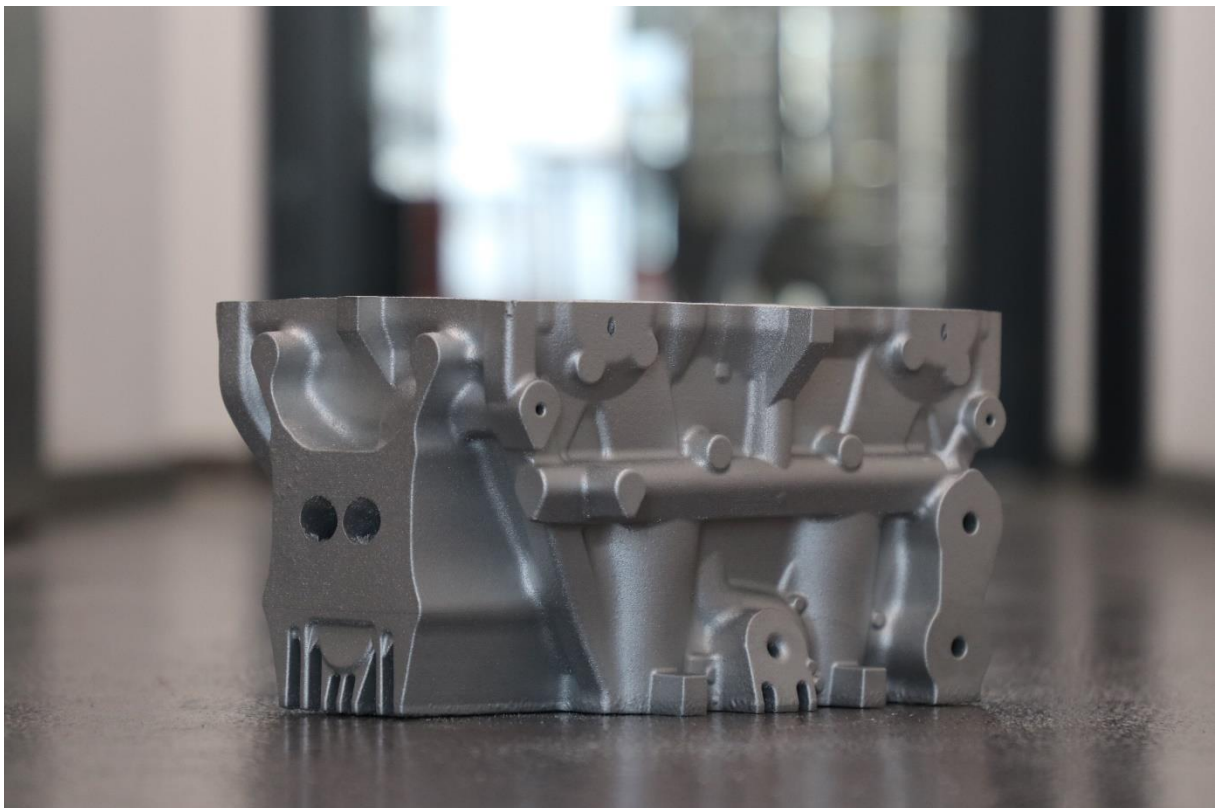


Abbildung 16: Zylinderkopf aus dem Werkstoff Ahead CP1

Herstellung der Vorkammerzündkerzen

Parallel zur Herstellung der Zylinderköpfe wurde die Produktion der Vorkammerzündkerzen aus 42CrMo4 durchgeführt. Diese Teile wurden ebenfalls mittels LPBF-Verfahren hergestellt und anschließend einer Wärmebehandlung

unterzogen, um die mechanischen Eigenschaften einzustellen. Entgegen der Zylinderkopffertigung wurde bei den Vorkammerzündkerzen keine Abweichungen festgestellt, wodurch diese ohne Einschränkung direkt zur weiteren Verwendung zur Verfügung standen. In Abbildung 17 sind die Vorkammerzündkerzen noch befestigt auf der Substratplatte dargestellt.

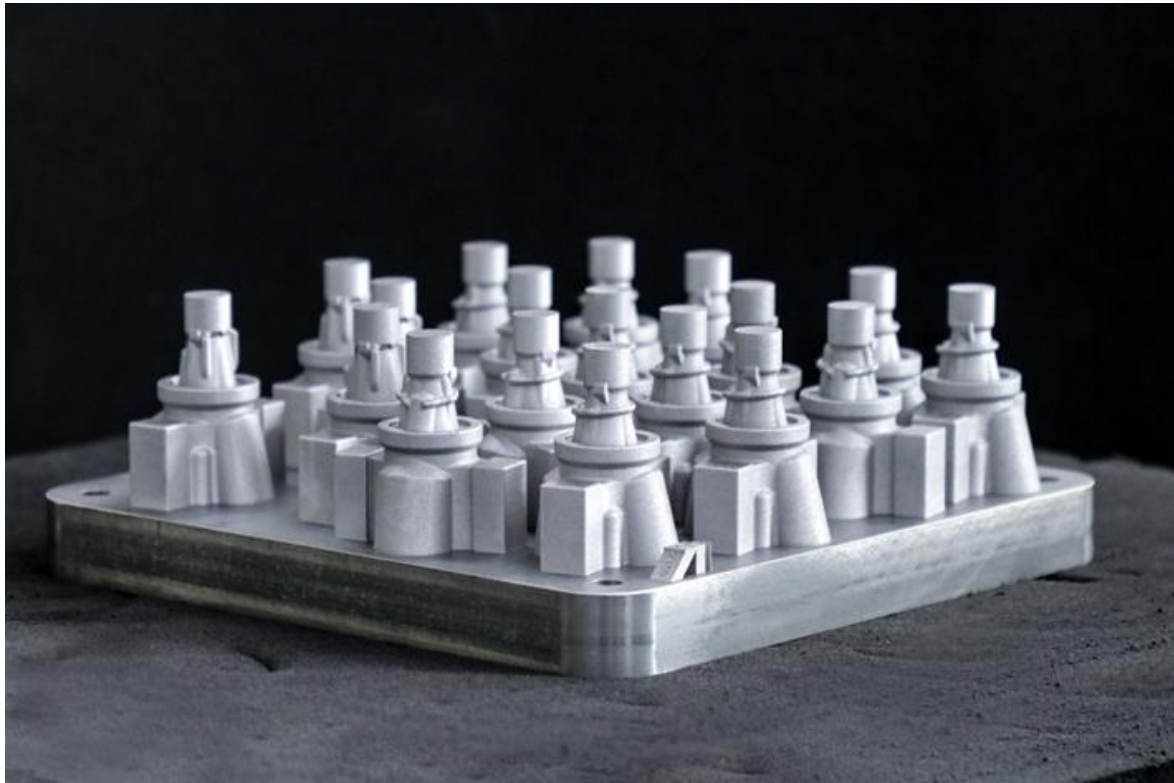


Abbildung 17: Bauplatte nach dem 3D-Druck bestückt mit Vorkammerzündkerzen

6.4 Zusammenfassung

Erprobt wurde der Einsatz der additiven Prozesskette zur Herstellung von Komponenten eines hocheffizienten Verbrennungsmotors. Die additive Fertigung, konkret das Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Verfahren, wurde genutzt, den hochkomplexen Zylinderkopf und diverse Varianten der Vorkammerzündkerzen zu produzieren.

Beim Design wurde Wert darauf gelegt, Überhänge zu vermeiden und innenliegende Konturen ohne Stützstruktur zu erstellen, um nachgelagerte Prozessschritte zu minimieren. Testdrucke wurden durchgeführt, insbesondere um die Effizienz der Kühlkanäle zu überprüfen und zu bestätigen, dass sie frei von Pulverrückständen sind.

Die Produktion der Prototypen offenbarte einige Herausforderungen hinsichtlich der Maßhaltigkeit und der Porosität, was auf Probleme mit der Laserfokussierung im LPBF-Verfahren hinwies. Nach mehreren Iterationen und Anpassungen der Wärmebehandlungsrouten konnte die Qualität und Genauigkeit der Zylinderköpfe optimiert werden. Die Verwendung der Aluminiumlegierung CP1 zeigte vielversprechende Ergebnisse in Bezug auf Festigkeit und Wärmebehandlungsstabilität.

Das Projekt hat innovative Ansätze in der Anwendung der additiven Fertigung für hochbeanspruchte Motorkomponenten aufgezeigt. Trotz anfänglicher Herausforderungen im Fertigungsprozess konnten durch iterative Optimierungen und den Einsatz alternativer Materialien, wie der Aluminiumlegierung CP1, die Projektergebnisse entscheidend verbessert werden. Die erfolgreiche Herstellung von Vorkammerzündkerzen bestätigte das Potential des LPBF-Verfahrens für die Produktion unter Serienbedingungen.

Die gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Methoden tragen signifikant zur Weiterentwicklung des Motorbaus bei und stellen einen bedeutenden Schritt in Richtung der Realisierung hocheffizienter Verbrennungsmotoren dar, die im Einklang mit strengen Emissionsvorschriften stehen. Die Erprobung und Implementierung des erarbeiteten Wissens in der Serienfertigung bleibt eine spannende Herausforderung für die Zukunft.

Die neuesten Entwicklungen im politischen und dem Ford konzernspezifischen Umfeld haben erhebliche Auswirkungen auf den Verlauf und die Ergebnisse des Forschungsprojekts zur Entwicklung eines Methan-Mager-Motors. Die Entscheidung vieler deutscher Autohersteller, einschließlich des Konsortialpartners Ford, sich auf die Elektrifizierung der Antriebsstränge zu konzentrieren, markiert einen signifikanten Wandel in der strategischen Ausrichtung der Automobilindustrie. Diese Entwicklung steht im Einklang mit globalen Trends und der zunehmenden politischen und gesellschaftlichen Forderung nach nachhaltigeren, emissionsärmeren Verkehrslösungen.

Die spezifische Entscheidung von Ford, die Entwicklung an Verbrennungsmotoren einzustellen und die entsprechenden Prüfstände abzubauen, hat direkte Auswirkungen auf das Projekt. Diese Maßnahme reflektiert nicht nur die interne Strategieänderung des Konzerns, sondern auch die breitere politische Landschaft in Deutschland und Europa, wo umfangreiche Gesetzgebungen und Förderungen die Umsetzung von Elektromobilität stark vorantreiben.

Zudem zeigt das nachlassende Interesse des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, dass die politische und finanzielle Unterstützung für Projekte, die auf die Entwicklung neuer Verbrennungsmotorentechnologien ausgerichtet sind, schwindet. Dies steht im Kontext einer umfassenden politischen Agenda, die sich auf die Dekarbonisierung der Wirtschaft und die Einhaltung der Pariser Klimaziele konzentriert. Deutschland hat sich verpflichtet, bis 2045 klimaneutral zu sein, was eine drastische Reduktion von CO₂-Emissionen erfordert – ein Ziel, das durch die Förderung fossiler Brennstofftechnologien kaum zu erreichen ist.

Die Entscheidung, die im Rahmen des Projekts entwickelten Technologien nicht in der Serienproduktion zu verwenden, unterstreicht die Herausforderungen, mit denen Forschungs- und Entwicklungsprojekte in einem sich schnell wandelnden technologischen und politischen Umfeld konfrontiert sind. Die Entwicklungen und Ergebnisse des Projekts, insbesondere im Bereich der additiven Fertigung und der Optimierung von Verbrennungsprozessen, bieten jedoch wertvolle Einblicke und Technologien, die potenziell in anderen Anwendungsbereichen wie in der Forschung oder in spezialisierten Industrieanwendungen genutzt werden könnten.

Das Engagement des Fraunhofer ICT, den 3-Zylinder-Motor auf eigenen Prüfständen weiter zu erproben, zeigt, dass trotz der strategischen Abkehr von

Verbrennungsmotoren in der Automobilindustrie, die wissenschaftliche und technische Erkenntnisgewinnung weiterhin von Bedeutung ist. Solche Forschungen könnten wichtige Beiträge zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Reduktion von Emissionen auch in anderen technischen Feldern leisten, was langfristig zur technologischen Diversität und Resilienz beiträgt.

7 Verwertung der erzielten Ergebnisse

7.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse

Der voraussichtliche Nutzen und die Verwertbarkeit der im Rahmen des Forschungsprojekts erzielten Ergebnisse sind vielversprechend. Dennoch wird die direkte Anwendung in der Automobilindustrie durch den Übergang zu elektrischen Antriebssystemen sehr begrenzt sind und voraussichtlich nicht bei ursprünglich beabsichtigten Verwendungszeck zum Einsatz kommen. Die Fortschritte in der additiven Fertigung, insbesondere die Entwicklung und Implementierung der CP1 Aluminiumlegierung sowie die Optimierung von LPBF-Prozessen, bieten erhebliches Potential für Branchen, in denen komplexe Bauteilgeometrien und hohe Materialanforderungen vorherrschen, wie in der Luft- und Raumfahrt, im Maschinenbau und in der Energieerzeugung. Auch die Erfahrungen über das Verhalten der Aluminiumwerkstoffe aus dem LPBF-Prozess in Bezug auf Wärmebehandlungen ist für die Firma Rosswag sehr wertvoll und kann auf andere Projekte übertragen werden.

7.2 Fortschritte an anderer Stelle

Seit Beginn des Forschungsvorhabens sind keine weiteren relevanten Veröffentlichungen oder Fortschritte zum Thema der Methan Mager Verbrennung im Bereich von Personenkraftwagen aufgekommen.

8 Veröffentlichungen

Neben der geplanten Veröffentlichung des Abschlussberichtes sind keine weiteren Veröffentlichungen zu diesem Projekt seitens der Rosswag GmbH geplant. Die Projektpartner Ford, Fraunhofer ICT und FKFS haben hingegen eine Veröffentlichung zur virtuellen Entwicklung eines 3-Zylindermotors mit aktiver Vorkammerzündkerze veröffentlicht.