

**Gemeinsamer Schlussbericht
zum Verbund-Forschungsprojekt**

LEIMOT

**LEIchtbau-MOTor
Gewichtsreduzierung eines Verbrennungsmotors
durch gezielte Strukturoptimierung und der
Verwendung von Hybrid Metall- und Kunststoff-
Komponenten**

**Förderkennzeichen: 19I18002 A-G
Laufzeit: 07/2018 – 03/2022**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektpartner**FEV Europe GmbH****RWTH Aachen - TME(VKA)****Fraunhofer Institute ICT und ILT****FH Aachen - FB Maschinenbau****Volkswagen AG****INPECA GmbH****WFS GmbH****Autoren****Ralf Bey
Ralf Jans****Nils Büchau
Can Kayacan****Marcel Laux
Simon Vervoort****Sebastian Bremen
Marco Skupin****Waldemar Kujawski****Jan Bültmann
Roman Lengsdorf****Volker Thee**

Das diesem Bericht zugrunde liegende Verbund-Forschungsprojekt LEIMOT wurde vom BMWK unter den Förderkennzeichen 19I18002 A – G gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. FEV Europe GmbH	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
1.4 Abschlussarbeiten, Promotionen und Patentanmeldungen	6
1.5 Analyse des Referenzmotors und LeiMot Konzeptionierung	6
1.6 Konstruktion, Simulation und Detaillierung	9
1.7 Erprobung des Konzeptmotors	12
1.8 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse	12
2. TME (VKA) RWTH Aachen	13
2.1 Zylinderkopf Struktur	13
2.2 Kühlsystem	13
2.3 Ölsystem	15
2.4 Rechnerische Absicherung der metallischen Bauteile	15
2.5 Topologieoptimierung	17
2.6 Versuche	18
3. Fraunhofer Institut ICT	19
3.1 Materialwissenschaftliche Untersuchungen	19
3.2 Konzeptionierung und Detailentwicklung der faserverstärkten Kunststoff Komponenten	20
3.3 Fertigung, Qualitätssicherung und Montage	23
4. Fraunhofer Institut ILT	25
4.1 AM Parameterentwicklung	25
5. FH Aachen	30
5.1 Digitale Ausrichtung und Stützoptimierung des Bauprozesses	30
5.2 Validierung durch Fertigung eines Ein-Zylinders und Vier-Zylinders	33



Inhaltsverzeichnis

6. Volkswagen AG	35
6.1 Zusammenfassung der Projektergebnisse	35
7. INPECA GmbH	42
7.1 Aufgabenstellung der Inpeca	42
7.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	42
7.3 Erzielte Ergebnisse.....	42
8. WFS GmbH	46

1. FEV Europe GmbH

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel und die Aufgabenstellung des LeiMot-Projektes war die Gewichtsreduzierung eines Verbrennungsmotors mithilfe von Strukturoptimierungen des Kurbelgehäuses und Zylinderkopfes um 30% bis 40%. Der Ansatz des Vorhabens ist es den Produktionsprozess mittels additiver Fertigung (SLM), frei von Herstellungsrestriktionen wie Gusskernen, Entformungen, usw. neu auszurichten. Zusätzlich sollten zur weiteren Reduzierung hochbelastbare Kunststoffkomponenten aus Faserverbundwerkstoffen (FVW) eingesetzt werden. Die FEV fungiert als Konsortialführer und bringt Expertise für Verbrennungsmotorentechnik und Füge­technik ein.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das vorliegende Forschungsprojekt beinhaltete insgesamt 8 Arbeitspakete und vier Meilensteine, welche über eine angesetzte Projektlaufzeit von 36 Monaten durchgeführt werden sollten. Die FEV beteiligt sich als Konsortialführer in folgenden Arbeitspaketen:

1.2.1 Arbeitspakete im Einzelnen:

- Koordination, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit
- Analyse des Referenzmotors und Konzeptionierung
- Konstruktion, Simulation und Detaillierung
- Entwicklung der Fertigungs- und Verbindungstechniken
- Entwicklung Produktion- und Nachbearbeitungskonzepte
- Herstellung, Montage und Erprobung von Motorkomponenten
- Erprobung des Konzeptmotors
- Kosten- / Nutzenbewertung

1.2.2 Meilensteinplanung

- **Meilenstein 1:** Vollständiger Konzeptentwurf des Leichtbaumotors (12 Monate)
- **Meilenstein 2:** Geschlossenes Layout (12 Monate)
- **Meilenstein 3:** Prototypenbeschaffung (6 Monate)
- **Meilenstein 4:** Prüfstanduntersuchung

1.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte in regelmäßigen Meetings mit den beteiligten Projektpartnern.: TME (VKA), FH Aachen, Fraunhofer Institut ILT und ICT, VW AG, Inpeca GmbH, WFS GmbH; assoziierte Projektpartner: Dätwyler Holding AG, EcoClean GmbH, EJOT GmbH & Co. KG, Martinrea Honsel Germany GmbH, KAMAX Holding GmbH & Co. KG

1.4 Abschlussarbeiten, Promotionen und Patentanmeldungen

1.4.1 Abschlussarbeiten

- Promotionen (laufend) von: Nils Büchau, Can Kayacan
- Masterarbeiten (abgeschlossen) von: Yannick Reichertz, Mukul Bhawar, Puneet Shahare, Omar Darwish, Maximilian Dunker
- Bachelorarbeiten (abgeschlossen) von: Maximilian Dunker, Nils Randerath, Lev Beker

1.4.2 Patentanmeldungen

Im Rahmen des Projektes wurden insgesamt 11 Patente angemeldet. Diese können dem vollständigen Abschlussbericht entnommen werden.

1.5 Analyse des Referenzmotors und LeiMot Konzeptionierung

1.5.1 Referenzmotor VW EA288 evo

Zur Untersuchung lieferte VW einen Kompletmotor mit eingebrachten Messstellen sowie einen Kompletmotor zur weiteren Analyse.

Der Zylinderkopf und das Kurbelgehäuse wurden mit Thermoelementen bestückt, die später an gleicher Position im LeiMot-Motor eingebracht wurden, um eine Vergleichbarkeit zu realisieren.

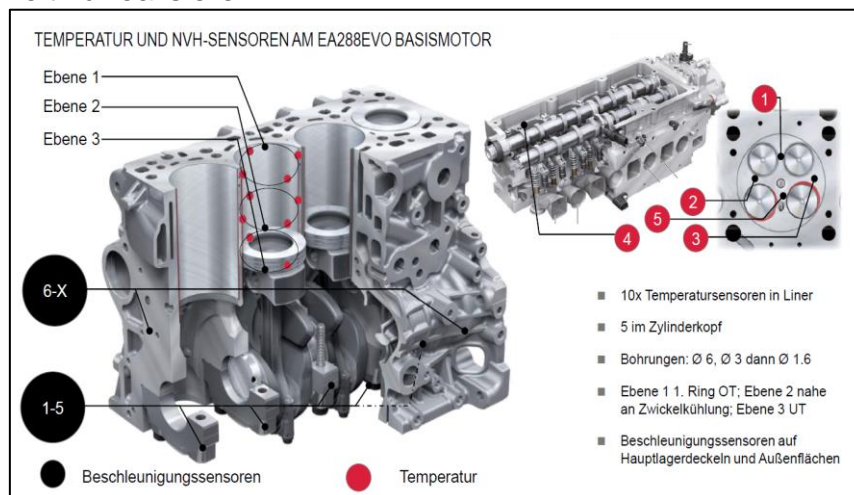


Abbildung 1.1 Messstellen im Basismotor

Folgende statische und transiente Bedingungen wurde untersucht

- Statische Prüfläufe:
 - Volllast
 - Änderung der Drehzahl bei Teillast
 - Lastsprung bei konstanter Drehzahl
- Transiente Prüfläufe:
 - Heißabschaltung: Motor bei Nennleistung, danach wird er schnell gestoppt)

- Warmlaufkurve: Motor wird kaltgestartet ($\pm 25^{\circ}\text{C}$) und erwärmt sich mit konstanter Drehzahl/Leistung
- Abkühlkurven (Aufnahme der Temperaturentwicklung nach Motorstopp)

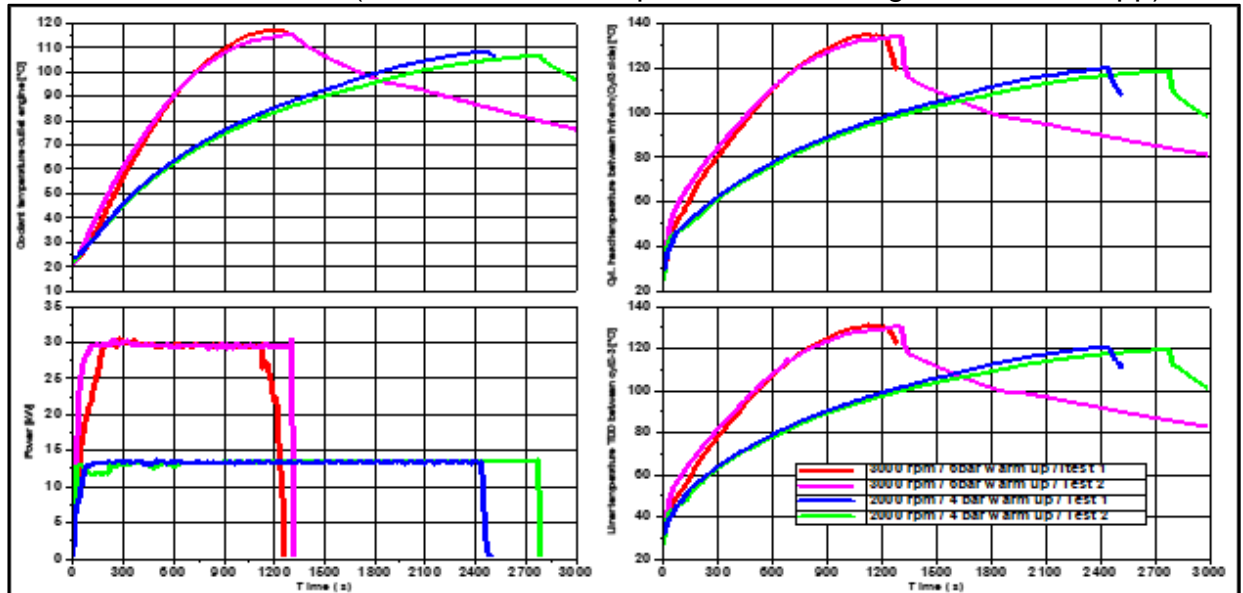


Abbildung 1.2 Kühlmittel- und Materialtemperaturen während des Warm-up-Tests

1.5.2 LeiMot Konzeptionierung

Viele Bauteile weisen aufgrund der Designfreiheit der additiven Fertigung Optimierungspotential auf. Der Zylinderkopf und das Kurbelgehäuse bieten das meiste Potenzial auf Gewichtsreduzierung. Um weiteres Gewicht einzusparen wurde das Kurbelgehäuse durch Kunststoffseitenteile abgeschlossen. Eine Analyse des Kühl- und Ölkreislaufs wurde durchgeführt und Verbesserungspotentiale identifiziert.

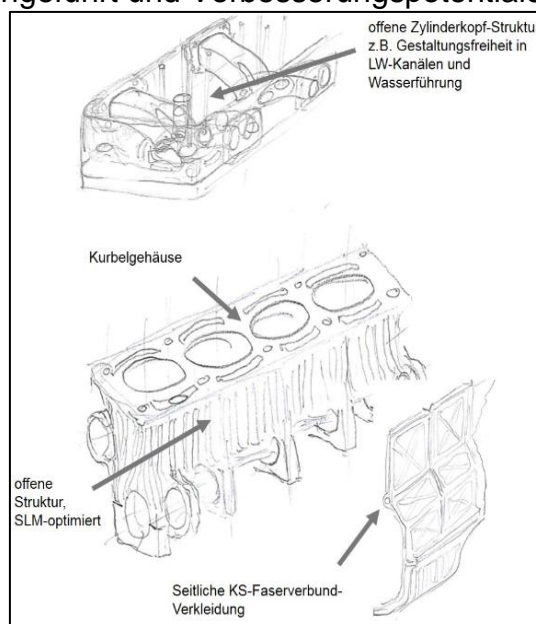
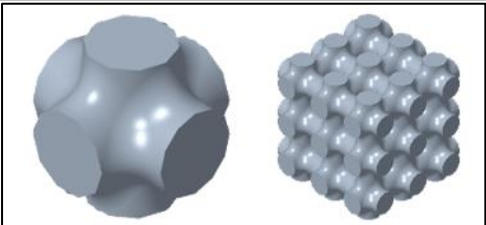
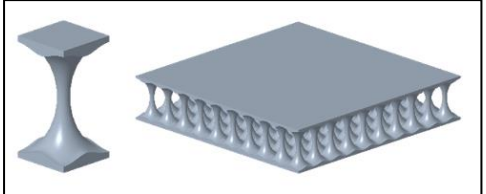
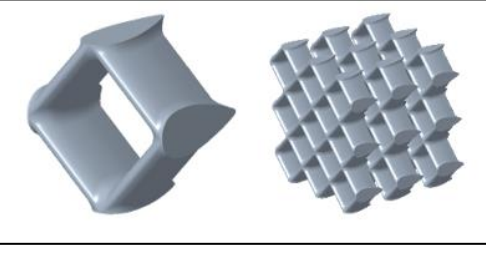


Abbildung 1.3 Konzeptskizze - LeiMot

Um eine größtmögliche Steifigkeit unter Gewichtsreduzierung zu erreichen, wurden spezielle Strukturkonzepte für Zylinderkopf und Kurbelgehäuse im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt. Drei Strukturen zeichneten sich heraus die bei verschiedenen Anwendungsfällen zum Einsatz kommen.

<p>Struktur bei mechanischer Belastung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringere Dichte als Vollmaterial ▪ hohe Steifigkeit 	
<p>Struktur bei thermischer Isolation</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Isolierung durch Zwischenraum ▪ Wärmestrom über Querschnitt steuerbar 	
<p>Struktur in durchströmten Kanälen</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhter Wärmetransport ▪ Reduzierter Druckverlust ▪ Geringer Strömungswiderstand 	

Zur Verifizierung wurden Simulationsergebnisse in praktischen Tests untermauert. Hierzu gehörten die folgenden Versuche:

- Zugversuch Mit und ohne Temperatur
- 3-Punkt-Biegeversuch
- Dämpfungsversuch
- Umlaufbiegeversuch
- Härtemessungen



Abbildung 1.4 *Verschiedene Probekörper mit Gitterstruktur*

1.6 Konstruktion, Simulation und Detaillierung

1.6.1 Konstruktion Kurbelgehäuse und Bedplate

Beim Kurbelgehäuse wurde der Kern aus Aluminium gedruckt und durch Seitenteile aus Kunststoff verschlossen. Zwischen den Schottwänden wurden horizontale Belastungsstrukturen platziert und mit einem Kreuzrippenverbund versteift. Zusätzlich verstärken zwei optimierte Verbindungsrohre die Schottwände im Bereich der Ausgleichswellen. Das Deep-Skirt Design des Referenzmotors wurde durch ein Short-Skirt-Design mit Aluminium-Bedplate ersetzt. Auf die schweren Stahl-Lagerdeckel der Kurbelwellenlagerung konnte so verzichtet und gleichzeitig eine Versteifung erreicht werden. Der Gewichtsvorteil liegt so bei etwa 2 kg.

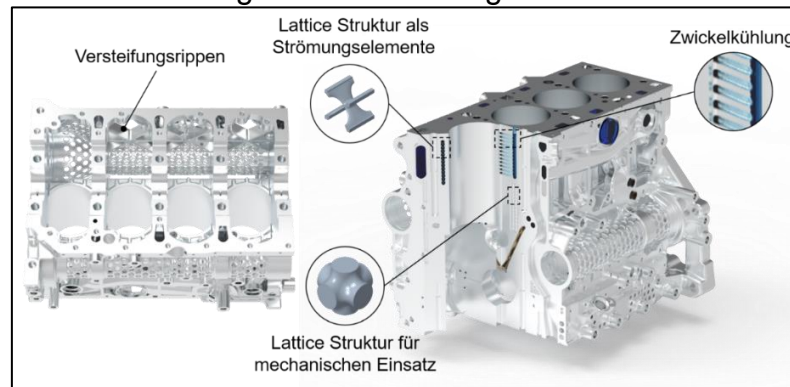


Abbildung 1.5 Renderings Kurbelgehäuse

1.6.2 Fügechnik Kunststoff/Aluminium

Um den Einfluss verschiedener Fügechniken zu testen wurde die kalte Seite fest verklebt und die heiße Seite zur Verbesserung des NVH-Verhaltens entkoppelt verschraubt. Aufgrund vorteilhafter Eigenschaften wurde glasfaserverstärktes Phenolharz als Werkstoff ausgewählt. Dadurch sind die Seitenwände um etwa 15 % leichter im Vergleich zu Aluminium. Auf der kalten Seite wurde ein silikonbasierter Klebstoff zur Abdichtung eingesetzt und mit selbstfurchenden Schrauben an das Kurbelgehäuse geschraubt. Die heiße Seite wird mittels einer Elastomerdichtung abgedichtet.

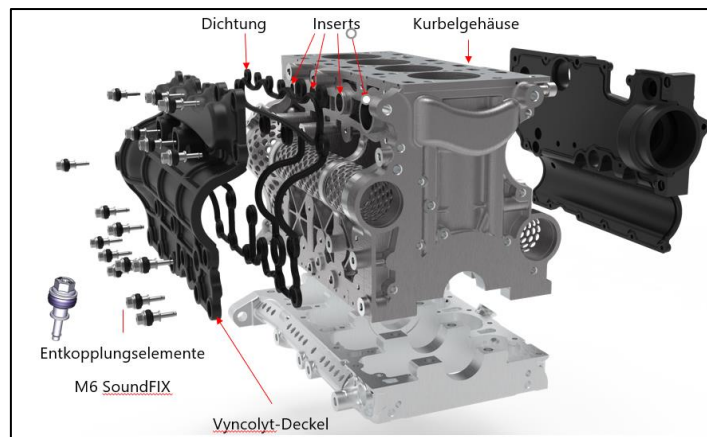


Abbildung 1.6 Fügekonzept der Seitenteile

1.6.3 Kühl und Ölkreislauf

Um eine möglichst zielgerichtete Kühlung der jeweiligen Zylinder bei gleichzeitig reduzierter Wassermenge zu erreichen wurden einzelne Leitungen mit definierten Querschnitten in den Zylinderkopf eingebracht (Arterienkühlung). Diese umströmen die Ventilsitzringe und den Injektorschacht und transportieren die eingebrachte Wärme mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten ab. Als positiver Nebeneffekt erhöhen die einzelnen Leitungen die Steifigkeit der Brennraumplatte und durch das reduzierte Wasservolumen wird die Aufwärmphase verkürzt. Um den Auslasskanal kommen 5mm dünne Kühlschilde zum Einsatz. Das Layout ermöglicht zudem eine sichere Kühlung der thermisch hochbelasteten Ventilführungen der Auslassseite. Die Temperaturen in der Brennraumplatte des Zylinderkopfs konnten so um bis zu 40 °C abgesenkt werden. Ebenfalls könnte die Wasserpumpenleistung verringert werden. Ovale Kühlkanäle in 2x3 mm (BxH) wurden als Zwickelkühlung zwischen den Zylinderrohren eingebracht.

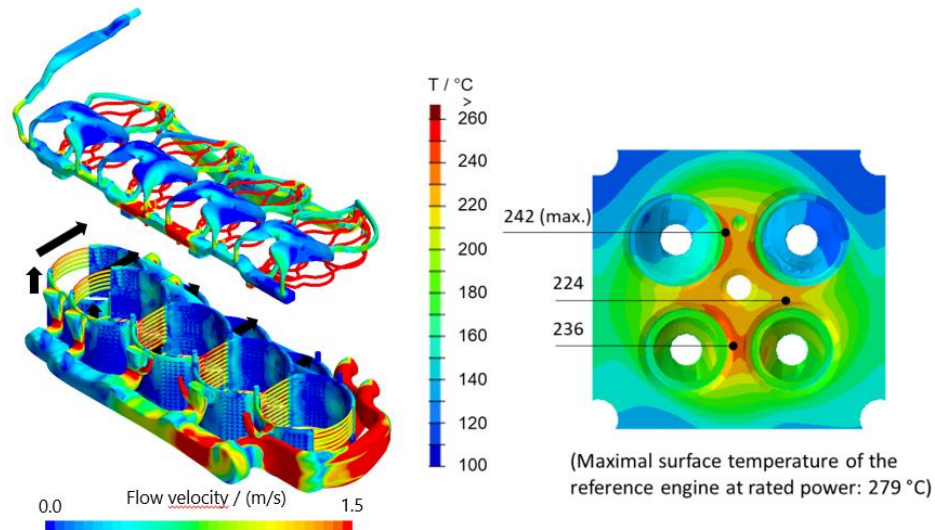


Abbildung 1.7 LeiMot Wassermantel



Abbildung 1.8 LeiMot Wassermantel

Ölkreislauf

Durch neuartige Leitungsführung ohne scharfe Umlenkungen konnte der Druckverlust um bis zu 22 % reduziert werden. Druckleitungen mit Querschnitten von 3 bis 8 mm konnten direkt druckbar konzipiert werden.

Eine schnellere Öldruckversorgung der Ventiltriebkomponenten beim Kaltstart wird erreicht, indem die Steigleitung und Hauptgalerie das Ablaufen des Öls im Stillstand durch einen umgekehrten Siphon verhindern.

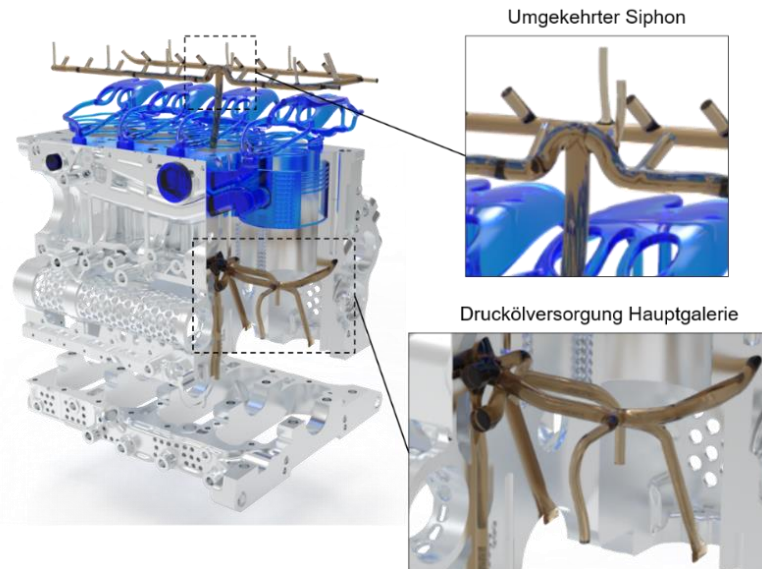


Abbildung 1.9 LeiMot Ölkreislauf

1.6.4 Konstruktion des Einzylinder-Versuchsmotors

Zur Untersuchung der Strukturfestigkeit und zur Ermittlung einer Haltbarkeitsaussage wurde ein Einzylinder Versuchsmotor im Bereich des zweiten Zylinders entwickelt.

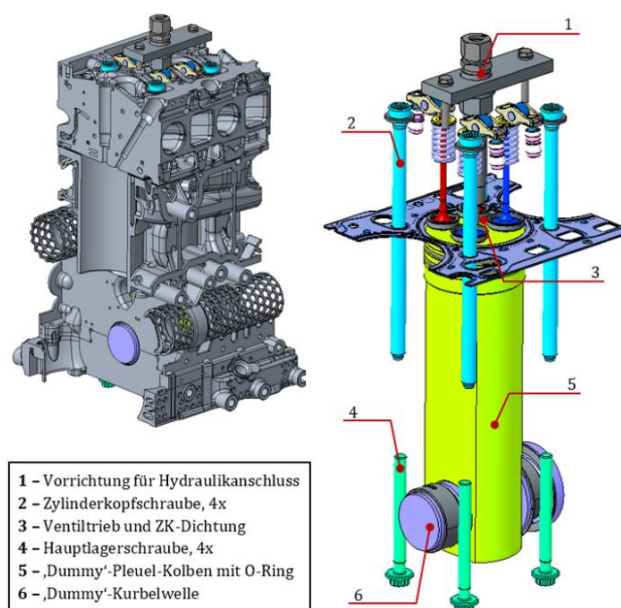


Abbildung 1.10 Konstruktion des Einzylinder-Versuchsmotors

1.7 Erprobung des Konzeptmotors

1.7.1 Erprobung

Am Ende des Einlaufprogramms wurde die Nennleistung überprüft: Die Motorleistung des LeiMot und der spezifische Kraftstoffverbrauch lagen im gleichen Bereich wie beim Referenzmotor. Das Kühlungssystem des LeiMot wurde wesentlich verändert, dies trägt zum Unterschied der Kühl-Volumenströme bei.

4000 rpm Full load	Reference engine	Leimot
Power [kW]	125,8	123,5
Torque [Nm]	300	295
Fuel consumption [g/kWh]	216,8	215,5
Coolant flow total [l/min]	115	142,6*
Δ engine coolant temp. [°C]	5,3	4,1
Oil pressure cyl. head [bar]	4,1	3,6

Tabelle 1-1 Vergleich zwischen Referenz- und LeiMot-Motor

1.8 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse des Vorhabens

- Gewichtsreduzierung des Basis Motors EA 288evo durch Strukturoptimierung des Zylinderkopfes ZK (-30%), Kurbelgehäuses KG einschl. Bedplate (-22%)
- Neuartiges Kühlungsprinzip entwickelt und patentiert für den ZK und das KG.
- Weiterentwicklung der Arterienkühlung zur Herstellung von Zylinderköpfen unter preiswerten konventionellen Herstellungsverfahren
- Reduzierung der thermischen Masse des ZK von bis zu 40%
- Reduzierung der thermischen Masse des ZG von bis zu 22%
- Druckverlustreduzierung des Schmierkreislaufes um bis zu 20%
- Entwicklung von additiv hergestellten Strukturen für isolierenden, strömungsverbessernden und mechanischen Einsatz
- Entwicklung von Kunststoff Seitenschalen zur Abdichtung des Kurbelgehäuses
- Vielzahl von Bachelor/ Masterarbeiten und zwei laufende PhD Arbeiten

2. Institut für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme (TME/VKA) der RWTH Aachen

2.1 Zylinderkopf Struktur

Betrachtet man Biegung und Torsion im Hinblick auf möglichst steife geometrische Formen bei geringem Gewicht bieten sich besonders geschlossene Hohlprofile (Torsion) und Doppel-T-Träger bzw. IPB-Träger Formen (Biegung) an. Aus diesen beiden Ansätzen wurde das in Abbildung gezeigte Konzept entwickelt, dass eine Kombination aus Schubkasten und IPB-Träger darstellt.

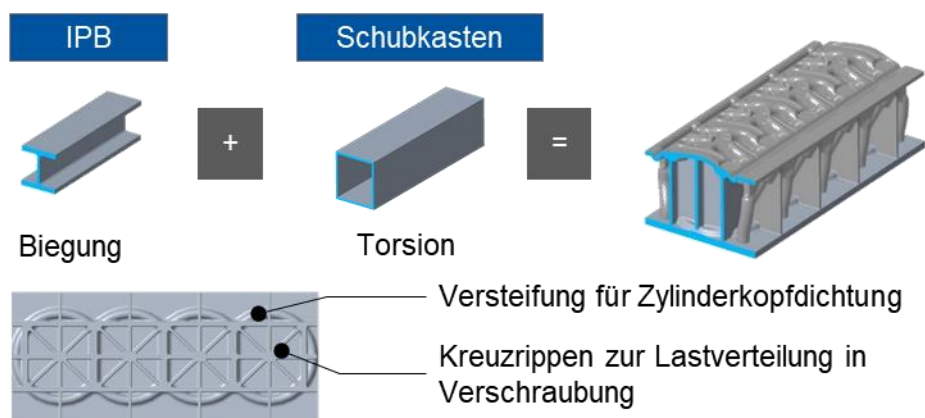


Abbildung 2.1: Strukturkonzept des Zylinderkopfs

Der gewählte Ansatz ist primär durch ein hochliegendes Öldeck gekennzeichnet, welches zusammen mit dem Flammdeck und entsprechend angeordneten Längsversteifungen die IPB-Schubkasten-Kombination bildet. Das hochliegende Öldeck erfordert einen neuen Ansatz für den Ölrücklauf, um eine einwandfreie Bewegung des Ventiltriebs und Funktion der Ventilschaftdichtungen sicherzustellen.

2.2 Kühlsystem

Ein wesentliches Problem sind Staupunkte und Totwassergebiete an Verzweigungen. Diese Phänomene begünstigen Sieden des Kühlmittels, insbesondere dann, wenn sie in heißen Zonen des Brennraums auftreten. Hieraus entstand die Idee einzelne Leitungen durch das Flammdeck zu führen. Deswegen wurden die Leitungen auf mehreren Ebenen angelegt, was die nahezu komplette Umspülung des Ventilsitzrings mit Kühlmittel ermöglicht.

Im Zylinderkopf richtet sich die zulässige Maximaltemperatur nach den Materialeigenschaften von AlSi10Mg. Grundsätzlich sollen 250°C nicht überschritten werden. Um die Temperaturen im Brennraumdach gegenüber dem Referenzmotor einordnen zu können, wurde die thermische Analyse auch für den Zylinderkopf des Referenzmotors durchgeführt. Die maximale Brennraumdachtemperatur im Referenzmotor liegt auf ~290 °C. Im LeiMot Zylinderkopf können ca. 40-50°C geringere Temperaturen erreicht

werden. Dieses deutlich niedrigere Temperaturniveau spricht für die Effizienz des Kühlkonzepts.

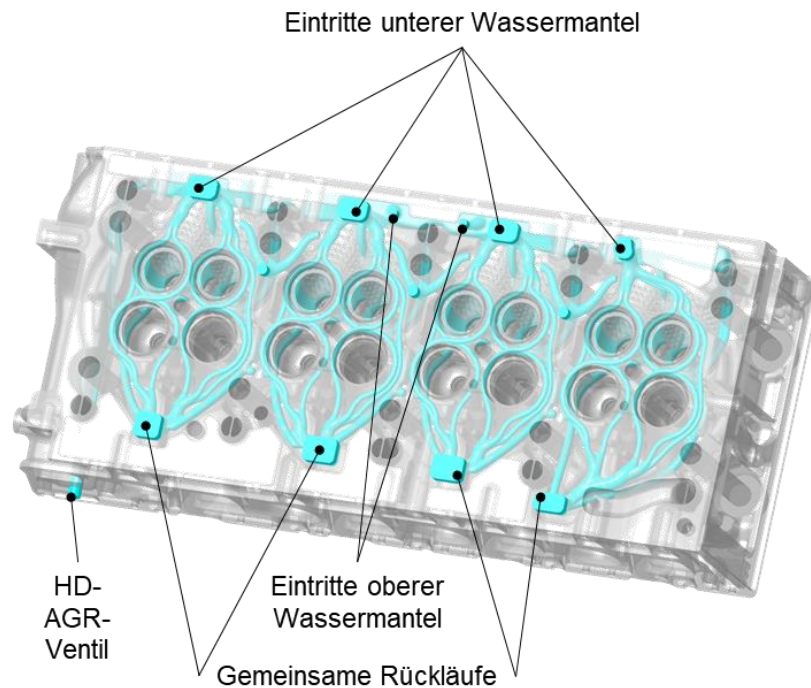


Abbildung 2.2: Wassermantel des Zylinderkopfs

2.2.1 Auslasskanalisolation

Im Sinne einer gesamtheitlichen Lösung zur Kühlung und Isolation der Auslasskanäle entstand ein schichtweiser Aufbau mit Luftspalt, Gitterstrukturen und Kühlmittel. Die Wahl der optimalen Lattice-Geometrie für die Auslasskanalisolation wurde mittels thermische FE-Simulationen unter Berücksichtigung des CAD-Prozesses und Herstellung über Abgleich von unterschiedlichen Elementen durchgeführt. Obwohl mit der Lattice-Geometrie „Creo“ eine höhere Oberflächentemperatur als „Doppelsäule“, erreicht wird, aufgrund der Vorteile hinsichtlich einfache Auslegung in CAD sowie besserer Oberflächenqualität die Lattice-Geometrie „Doppelsäule“ eingesetzt. Es wurde mit den Isolationsstrukturen eine signifikante Steigerung der Oberflächentemperaturen realisiert.

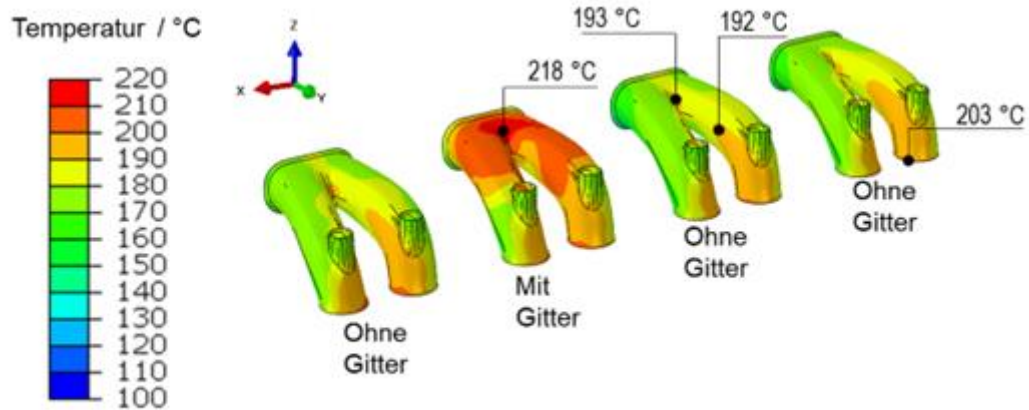


Abbildung 2.3: Oberflächentemperaturen in Auslasskanälen (mit Unterscheidung zwischen isoliert und nicht-isoliert) des LeiMot Zylinderkopfs im Nennleistungspunkt (3250 min^{-1} , 120 kW)

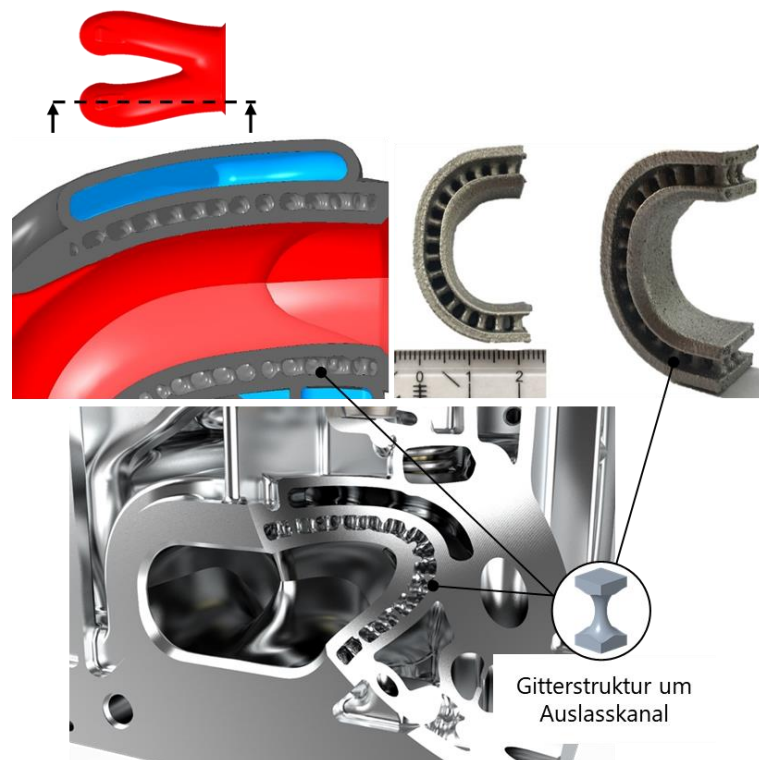


Abbildung 2.4: Auslasskanalisolationskonzept

2.3 Ölsystem

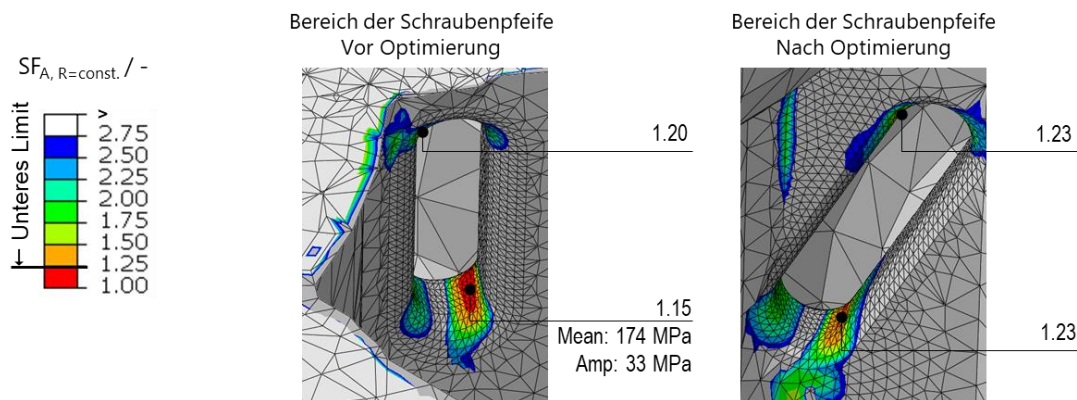
Das Ölsystem des LeiMot basiert auf dem des Referenzmotors. Sämtliche Verbraucher und Bauteile werden übernommen, so dass nur die Geometrie der internen Ölleitungen änderbar ist. Typischerweise fallen hier besonders an den scharfen Umlenkungen größere Druckverluste an. Die Umlenkungen entstehen, da die Leitungen vollständig

gebohrt werden. Das limitiert zwar den konstruktiven Gestaltungsfreiraum, bietet aber aus fertigungstechnischer Sicht eine hohe Reproduzierbarkeit mit geringen Risiken hinsichtlich Verschmutzungen und Toleranzeinflüssen.

Im Gesamtsystem konnte eine deutliche Druckverlustreduktion von bis zu 0,8 bar erzielt werden. Signifikante Verbesserungen liefert vor allem die Steigleitung von Kurbelgehäuse zu Zylinderkopf. Die Senkung des Druckverlustes wird insbesondere ab 1500 min^{-1} deutlich. So sinkt der hydraulische Leistungsbedarf um bis zu 30 W. Als Reibmitteldruck ausgedrückt entspricht das einer Reduktion um ca. 0,008 bar bei 2000 min^{-1} .

2.4 Rechnerische Absicherung der metallischen Bauteile

Die Festigkeitsuntersuchungen der Zylinderkopf- sowie Kurbelgehäusestruktur erfolgen gemäß den vorgegebenen Richtlinien bzw. Grenzwerten. Das vernetzte Modell sowie die Temperaturfelder sind zwei Bausteine für die mechanische FEA. Dazu kommen die Randbedingungen aus Einbausituation und Betrieb. Das sind Zylinderdrücke, Passungen und Schraubenkräfte. Im Laufe des Projekts wurden die kritischen Zonen mit hohen Spannungskonzentrationen optimiert und die Festigkeit von beiden Bauteilen wurde rechnerisch validiert.



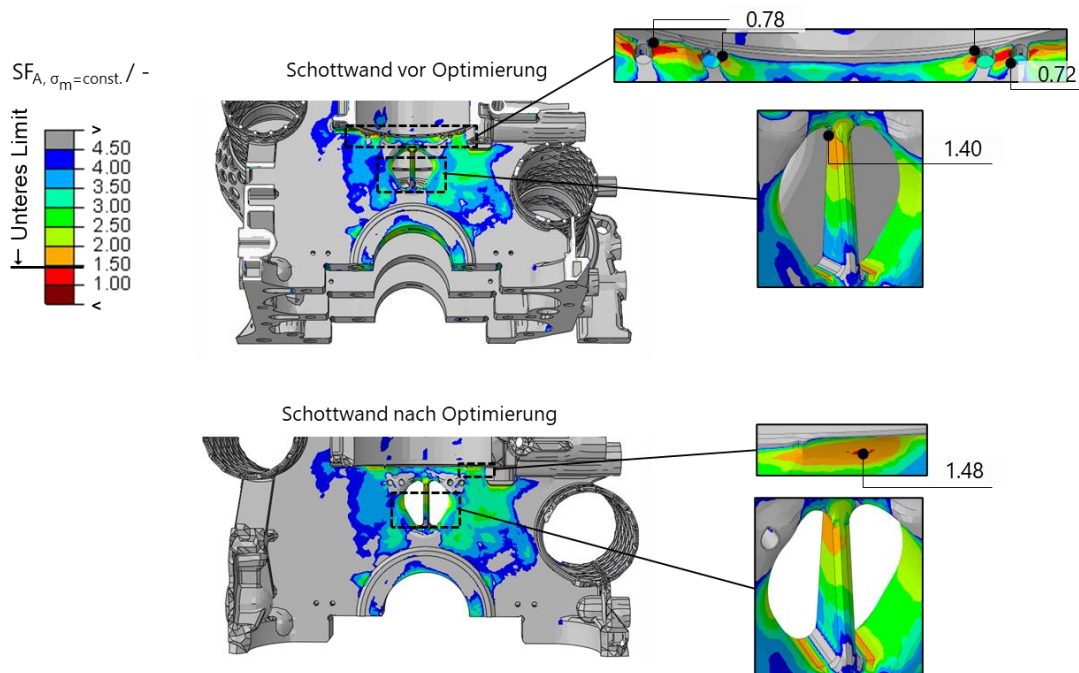


Abbildung 2.5: Optimierung von Zonen mit hohen Spannungskonzentrationen in dem Bereich der Schraubenpfeife des Zylinderkopfs (Oben) und in der Schottwand des Kurbelgehäuses (Unten)

2.5 Topologieoptimierung

Es wurden weitere Potenziale hinsichtlich Gewichtsreduktion mittels computer-gestützter Verfahren untersucht. Mit CAE basierten Strukturoptimierungsmethoden, können die wesentlichen Lastpfade in einer mechanischen Struktur erkannt und die Materialanordnung angepasst werden. Ein topologieoptimierter Zylinderkopf mit 30% Gewichtsreduktion im Vergleich zum Referenz Zylinderkopf wurde als 5. Zylinderkopf des LeiMot-Projekts hergestellt und dessen Dauerfestigkeit wurde mittels Hydropulstest nachgewiesen.

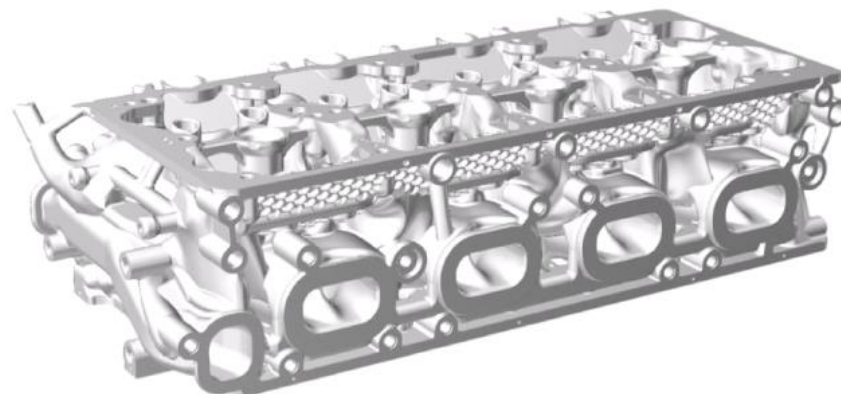


Abbildung 2.6: Topologieoptimierter Zylinderkopf mit 30% Gewichtsreduktion im Vergleich zum Referenz Zylinderkopf

2.6 Versuche

2.6.1 Vereinfachter Hydropuls-Versuchsträger

Der Versuchsträger wird analog zum Vollmotor mit den korrekten Schrauben, der Zylinderkopfdichtung und anderen relevanten Bauteilen montiert, um die vollständige Abdichtung des Brennraums zu gewährleisten. Zur Erfassung der Spannungszustände in zuvor definierten, kritischen Bereichen sind Dehnmessstreifen (DMS) angebracht.

Es trat bei 190 bar und 1897370 Lastzyklen das Versagen am Kurbelgehäuse ein. Die Untersuchungen bei 150 bar und 170 bar sind vollständig durchgelaufen. Dementsprechend wurden 210 bar und 230 bar nicht mehr geprüft.

Das Schadensbild entspricht sehr genau den Erwartungen auf Basis der Simulationsergebnisse. In der FEA hat sich der Gewindeauslauf der Hauptlagerverschraubung in den Schottwänden als kritischer Bereich gezeigt. Am Versuchsträger geht der Riss in einer Schottwand von dieser Stelle aus. In Folge des Risses hat sich dann der Verbund derart bewegt, dass die andere Schottwand ebenfalls gebrochen ist.

2.6.2 Gefuehrter Vollmotorversuch

Der Motor wurde mit dem neuen Zylinderkopf und Kurbelgehäuse analog zum Referenzmotor aufgebaut. Der Referenzmotor wurde bereits zu Beginn des Projekts vermessen, um anschließend den LeiMot damit vergleichen zu können.

Die gefuehrten Prüfstanversuche wurden aufgrund des Ausfalls eines Wälzlagers der Ausgleichswelle unterbrochen. Nach der Schadensanalyse wird vermutet, dass der Lagerring im warmen Zustand aufgrund der unregelmäßigen Bearbeitung der Lagergasse im Kurbelgehäuse und deswegen fehlender Pressung axial nach außen gerutscht ist.

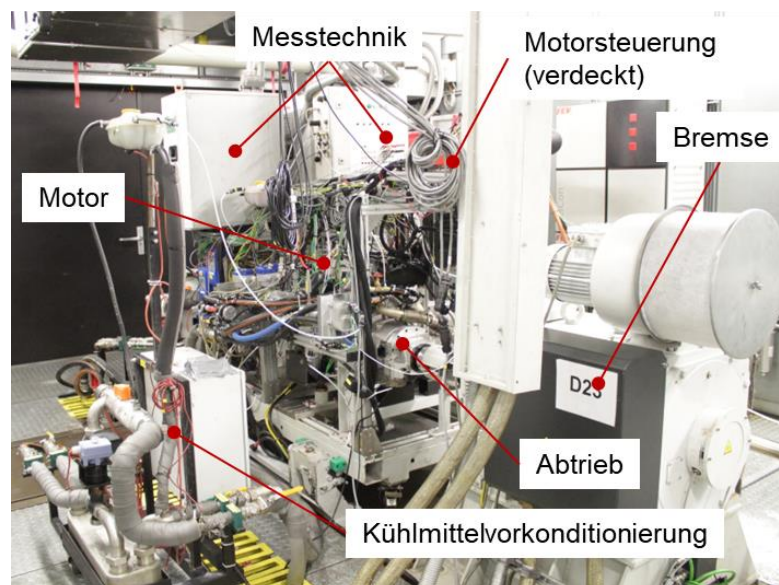


Abbildung 2.7: Prüfstands Aufbau des Vollmotors

3. Fraunhofer Institut ICT

Im Rahmen des Projekts LEIMOT hat das Fraunhofer ICT das Aufgabenpaket der Auslegung, Konstruktion und Fertigung der faserverstärkten Kunststoff Komponenten (FVK) erfolgreich abgearbeitet.

3.1 Materialwissenschaftliche Untersuchungen

Zu Beginn des Projekts wurden Untersuchungen zur Grenzflächenfestigkeit von direkt gefügten Polymer-Metall Verbindungen durch einen Nanoformschluss durchgeführt. Dazu wird die Oberflächenmorphologie einer nanoskaligen PECVD Beschichtung derart angepasst, dass eine bestmögliche Verbindung zwischen im SLM-Prozess hergestellten Metallkomponenten und den darauf angespritzten Kunststoffkomponenten entsteht. Dieser Beschichtungsprozess wurde mit Fokus auf die Fügetechnologie zwischen metallischen und im Duromer-Spritzguss hergestellten Komponenten unter Berücksichtigung des Anwendungsgebiets des LEIMOTs optimiert. Hierzu wurde mit WFS Formenbau ein Werkzeugeinsatz für die Spritzgussmaschine am Fraunhofer ICT ausgelegt, hergestellt und Abmusterungsversuche durchgeführt. In den Versuchen wurde durch Parametervariation der Einfluss verschiedener Eingangsgrößen auf die fließweglängenabhängige Anhaftung des FVKs auf metallischer Oberfläche identifiziert.

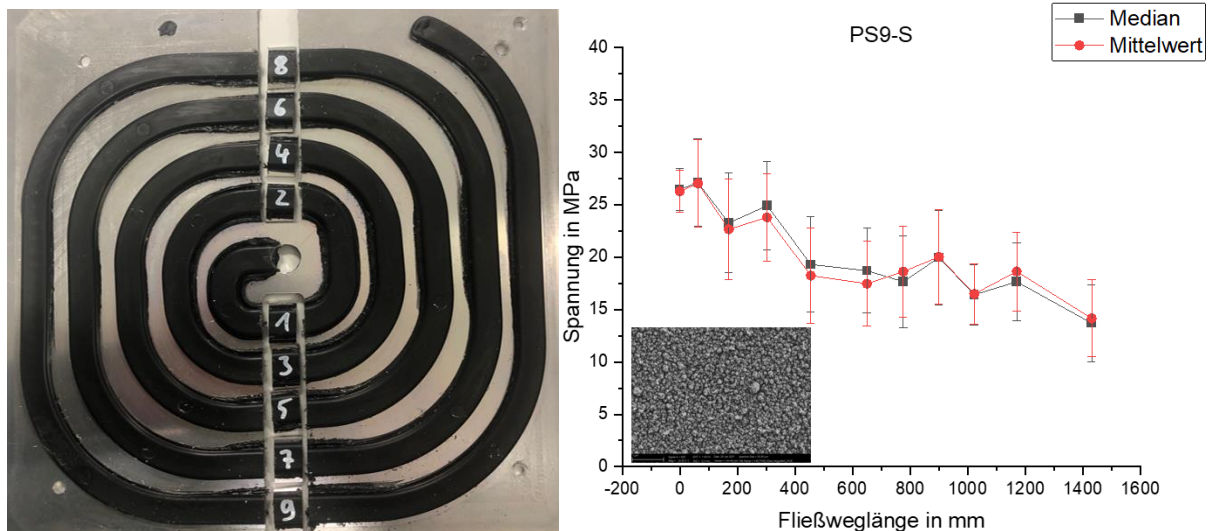


Abbildung 3.1: Spritzgegossene Fließspirale (links); Abfall der Interfacefestigkeit mit steigender Fließweglänge (rechts)

Abbildung 3.1 (links) zeigt exemplarisch eine solche abgemusterte Spirale, die rechte Seite zeigt den Abfall der Interfacefestigkeit der Metall-FVK Verbindung über die steigende Fließweglänge. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in Form eines Papers mit dem Titel „Influence of the morphology of nanoporous silicon dioxide based surface coatings on the interfacial strength of injection-molded polymer-metal hybrids“ auf der „Hybrid 2020“ veröffentlicht. Eine weitere Veröffentlichung mit weiterführenden Erkenntnissen aus dem Jahre 2021/22 ist im Rahmen der Mdpi materials Sonderausgabe „Advances in Microwave Processing of Materials“ geplant.

3.2 Konzeptionierung und Detailentwicklung der faserverstärkten Kunststoff Komponenten

Die Ausarbeitung und Bewertung technischer Konzepte für das Aluminium-Kunststoff Hybrid-Zylinderkurbelgehäuse stellte den ersten gestalterischen Schritt des ganzheitlichen Entwicklungsprozesses der FVK-Komponenten dar. Die Konzeptionierung des neuen Zylinderkurbelgehäuses (ZKG) mit FVK-Komponenten erfolgte unter Beachtung der thermomechanischen Belastungen unter reellen Betriebsbedingungen, dem Leichtbaugedanken sowie fertigungstechnischen Gesichtspunkten. Dabei lag der Fokus der Gestaltung auf einer möglichst hohen Funktionsintegration von Nebenaggregaten sowie Kühlmittelkanälen in die FVK-Komponenten. Die Realisierung der Abdichtung der FVK-Komponenten gegen Betriebsmittel wie Öl und Kühlmittel sowie dem Luft-Öl Aerosol durch Blow-By im Kurbelraum stellten dabei zusätzliche Anforderungen dar. Die Herstellung der FVK-Komponenten mittels großserienfähigem Spritzgussverfahren ermöglicht eine hohe Geometriekomplexität ohne hohen Anstieg der Fertigungskosten, jedoch sind auch einige Fertigungsrandbedingungen zu beachten. Zur problemlosen Entnahme der Bauteile aus der Werkzeugkavität sind Entformungsschrägen in Entformungsrichtung bereits im Design Prozess zu realisieren. Geometrische Hinterschneidungen, wie z.B. geschlossene Medienkanäle sind lediglich durch aufwändige, bewegliche Schieber im Werkzeug zu realisieren. Die Integration der komplexen Medienkanäle in der FVK-Seitenwand ist aufgrund multipler geometrischer Hinterschneidungen in einem einzigen Bauteil nicht realisierbar. Aus diesem Grund sind beide FVK-Seitenwände aus zwei separaten FVK-Komponenten aufgebaut, welche nach dem Spritzpress-Prozess gefügt werden. Anschließend werden die gefügten Einzelteile als eine FVK-Seitenwand an das ZKG montiert. Die beiden einzelnen FVK-Komponenten sind farblich hervorgehoben (Dunkelgrau und bronzefarben) in Abbildung 3.2 (links) dargestellt.

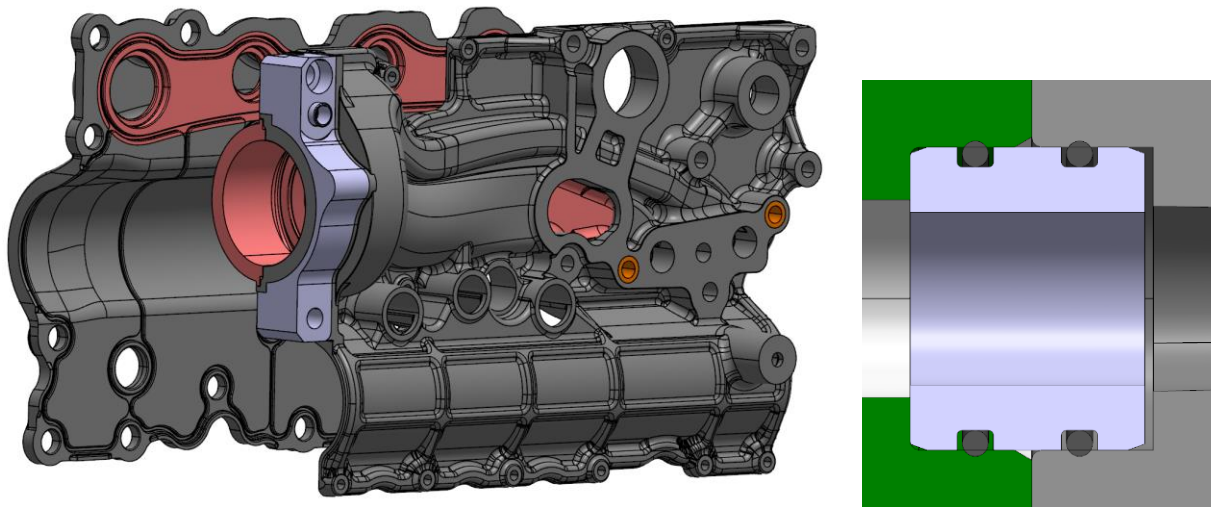


Abbildung 3.2: FVK Seitenwand Einlass- und Auslasseite (links), Medienübergabestelle zwischen Aluminium ZKG und FVK-Seitenwand

Die FVK-Seitenwände verschließen das offene ZKG inkl. der Ausgleichswellentunnel, wobei folgende Funktionalitäten in den FVK-Seitenwänden integriert werden konnten: Mechanische Wasserpumpe (WaPu), medienführende Kanäle von Kühlmittel Zu- und Rücklauf WaPu, Kühlmittel Zulauf Ölkühler, Kühlmittel Zu- und Rücklauf Zylinderkopf, Kühlmittel Zu- und Rücklauf Zylinderkurbelgehäuse, Öl Zu- und Rücklauf Ölkühler und die Aufnahme des Kühlmittelverteilmotors sowie Ölfiltermoduls. Die Medienübergabe von Öl und Kühlmittel zwischen dem ZKG und den FVK-Seitenwänden erfolgt über radial O-Ring gedichtete Aluminiumröhrchen, wie in Abbildung 3.2 (rechts) im Schnitt gezeigt. Diese Medienübergabe ermöglicht eine Abdichtung ohne erforderliche Flächenpressung zwischen ZKG und FVK-Seitenwand und kann gleichzeitig im Herstellungsprozess entstehende geometrische Toleranzen ausgleichen. Die Klammer aus Aluminium umschließt das Gehäuse der mechanischen WaPu, wird direkt in das Spritzgusswerkzeug eingelegt, direkt umspritzt und dient der Aufnahme der hohen Biegekräfte durch den Riemenantrieb der WaPu. Die Verschraubung und Abdichtung gegen Schmutz von außen sowie das Luft-Öl Aerosol durch Blowby der FVK-Seitenwände erfolgt auf der Einlassseite durch eine Flüssigdichtung und feste Verschraubung, auf der Auslassseite mit einer Elastomer-Formdichtung und einer schwingungsentkoppelten Verschraubung mittels Elastomerelementen. Zur Validierung beider Konzepte wurden repräsentative Probekörper in einem iterativen Gestaltungsprozess konstruiert und simuliert, sodass die schlussendliche Geometrie im Spritzgussverfahren hergestellt und durch experimentelle Versuche auf Funktionsfähigkeit untersucht werden konnte. Neben der gezielten Geometrie Entwicklung der FVK-Komponenten mit Fokus auf Schraubendome, Versteifungsrippen und Klebenut für die Einlassseite wurde zusätzlich die Geometrie der Elastomer Formdichtung der schwingentkoppelten Auslassseite

ausgelegt. Der Schnitt durch die entkoppelte Verschraubung des Auslasses ist in Abbildung 3.3 (links) gezeigt.

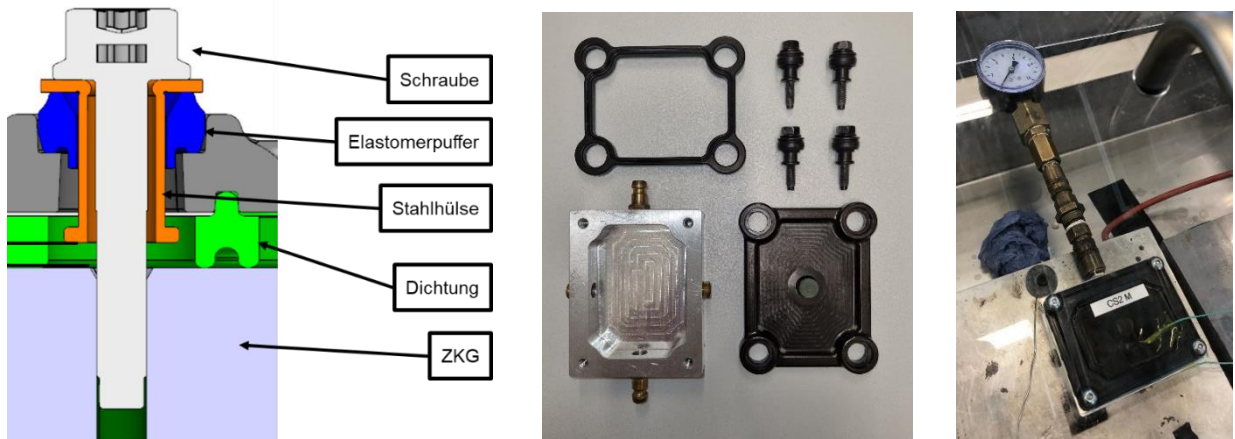


Abbildung 3.3: Schnitt durch entkoppelte Verschraubung (links), Einzelkomponenten des Probekörpers Auslasseite vor Montage (Mitte), Aufbau der experimentellen Untersuchung (rechts)

Das FVK-Bauteil wird zwischen dem blauen Elastomerelement und der grünen Elastomer-Formdichtung verpresst. Der Abstand in nicht montiertem Zustand der Stahlhülse zum ZKG steuert dabei die Kompression und somit die wirkende Vorspannkraft auf das FVK-Bauteil. Die grüne Dichtgeometrie wurde für geometrische Steifigkeit und hohe Flächenpressung mit einer „Doppelfußform“ ausgeführt. Mittig in Abbildung 3.3 sind die Einzelkomponenten des Probekörpers vor Montage gezeigt, rechts der Prüfaufbau im Labor. Die Experimente wurden unter thermomechanisch repräsentativen Bedingungen für das Worst Case Szenario der Belastung der FVK-Seitenwände durchgeführt und zur Validierung der Strukturmechanischen Finite Elemente Methode Simulation verwendet. Es wurden Wasserdruck für die Einlass- und Blowby-Druck für die Auslasseite angenommen und dabei die Aufheiz- und Abkühlphase des Motors durch eine Heizplatte nachgestellt. Diese Fälle stellen aufgrund der unterschiedlichen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit des Aluminium-ZKG zu den FVK-Seitenwänden den höchsten Lastfall dar. Die Bauteile widerstanden den definierten thermomechanischen Belastungen und somit bestätigten die Vorversuche die durchgeführten FE-Simulationen für den Abkühl- und Aufheizprozess des Motors.

Für die FVK-Seitenwände wurde ein analoger, simulativer Prozess zur strukturmechanischen Absicherung der Geometrie durchlaufen. Die resultierenden Zug- und Druckspannungen werden hierbei separat betrachtet, da die verwendete Phenolharzformmasse höhere Druckspannungen als Zugspannungen ertragen kann. Abbildung 3.4 links zeigt einen Auszug der maximal auftretenden Zugspannungen in der Struktur-Simulation der mechanisch höher belasteten FVK-Seitenwand der Einlassseite. Die maximale Zugspannung liegt bei ca. 68 MPa und bietet somit einen Sicherheitsfaktor von ca. 1.5 gegen Bauteilversagen.

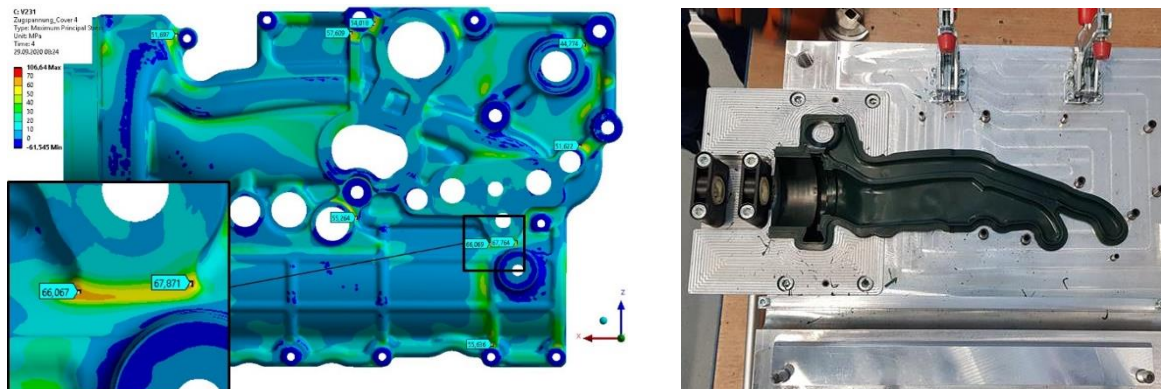


Abbildung 3.4: Auswertung der Zugspannungen der FVK-Seitenwand der Einlasseite (links), FVK-Komponente der Einlasseite auf Abkühllehre (rechts)

3.3 Fertigung, Qualitätssicherung und Montage

Nach Finalisierung der Bauteilgeometrie sowie der Ableitung und Herstellung der Werkzeugform bei WFS sind die einzelnen FVK-Komponenten chargenweise bei SPHBB in Gent sowie am Fraunhofer ICT abgemustert worden. Die Bauteile wurden direkt nach der Entnahme aus der Spritzgussmaschine im heißen Zustand auf eine, in Abbildung 3.4 rechts gezeigte, Abkühllehre montiert, um einen möglichen Bauteilverzug im Abkühlprozess entgegenzuwirken. Im Anschluss wurden die Bauteile zur Beurteilung der Maßhaltigkeit in einem GOM System 3D vermessen und mit der Sollgeometrie abgeglichen. Die Verformung lag durch Verwendung der Abkühllehre innerhalb des zulässigen Toleranzbereichs, sodass die anschließenden Wärmebehandlungs- und Verklebungsprozesse der FVK-Komponenten durchgeführt werden konnten. Die FVK-Seitenwand der Einlasseite wurde spanend bearbeitet, um die eng tolerierte Passung für den Sitz der mechanischen Wasserpumpe herzustellen. Zur Überprüfung der Dichtigkeit der verklebten FVK-Seitenwände wurden alle Medienkanäle sowie die Medienübergabestellen auf einem Dummy Kurbelgehäuse mit Wasserdruck abgeprüft und somit der Qualitätssicherungsprozess der FVK-Seitenwände abgeschlossen. Die finalen FVK-Seitenwände vor Montage sind in Abbildung 3.5 mit dem Referenzmotor EA288evo im Hintergrund dargestellt.

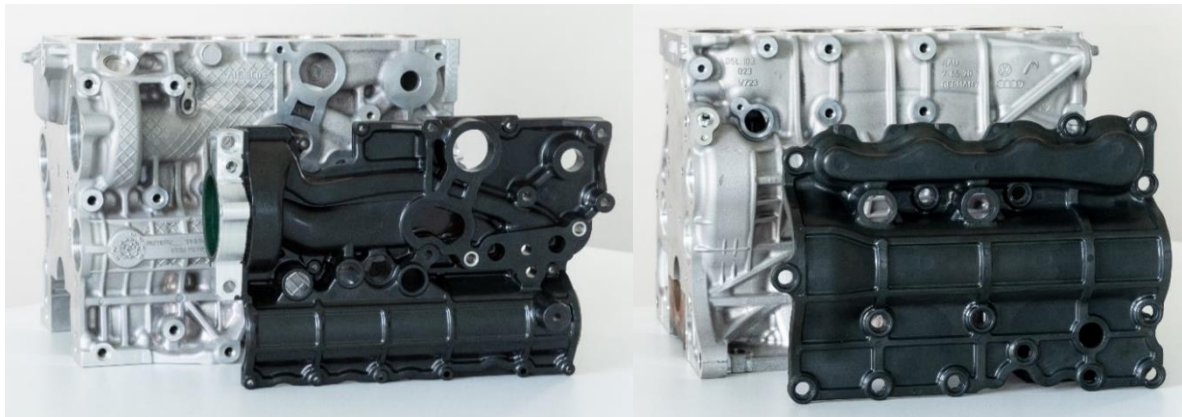


Abbildung 3.5: Finale FVK-Seitenwand Einlassseite (links) und Auslassseite (rechts) vor EA288evo

Das Fügen der FVK-Seitenwände mit dem SLM-ZKG wurde gemeinsam bei FEV in Aachen durchgeführt. Das Testprogramm des LEIMOT Motors konnte erfolgreich durchgeführt werden und es sind bis auf eine Ausnahme keine signifikanten Beschädigungen der FVK-Komponenten aufgetreten. Die leichte Rissbildung im Bereich der Ausgleichswellenabdeckung der FVK-Seitenwand der Einlassseite trat kurz vor dem Schaden der Ausgleichswellenlagerung auf und wird auf eine erhöhte Vibration bzw. Schwingung zurückgeführt.

- Laserleistung P_L :
910 W
- Scangeschwindigkeit v_s : 2350 mm/s
- Spurbstand y_s :
110 μm
- Schichtdicke D_s (fix): 50 μm

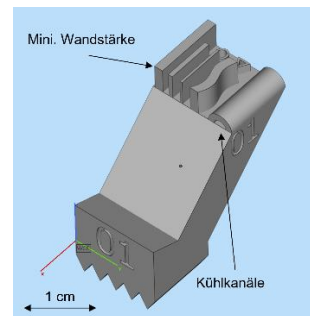


Bild 4-2: Multifunktions-Probekörper zur Parameterentwicklung

Im Rahmen der Parameterentwicklung wird die Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Spurbstand variiert. Die genutzten Probekörper sind in Bild 4-2 dargestellt und dienen zur lichtmikroskopischen Messung der relativen Bauteildichte anhand von Querschliffen, zur Messung der Oberflächenrauheit und der Bewertung der Druckbarkeit verschiedener Bauteil-Features wie Kanälen und dünnwandigen Strukturen. Insgesamt werden 140 Probekörper gefertigt und analysiert. Die Ergebnisse der Dichteanalyse sind in Bild 4-3 dargestellt.

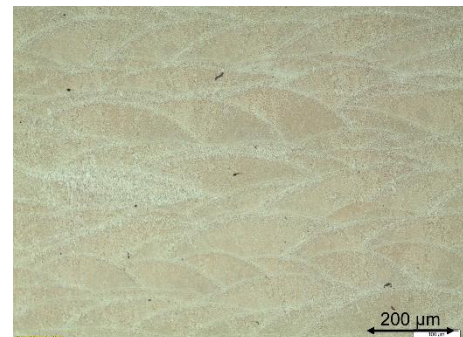
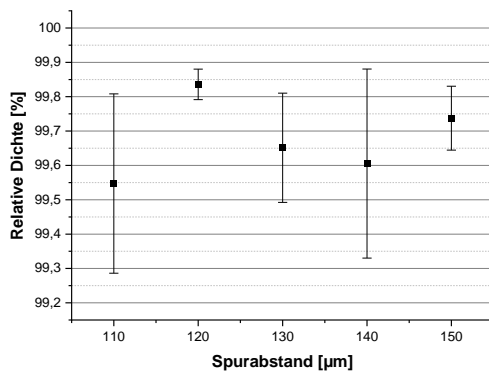
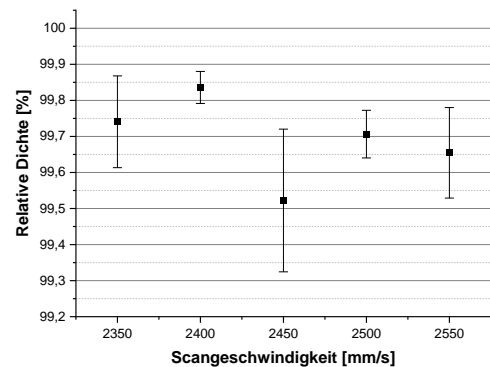
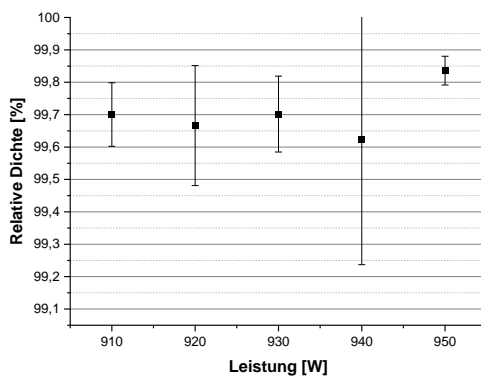


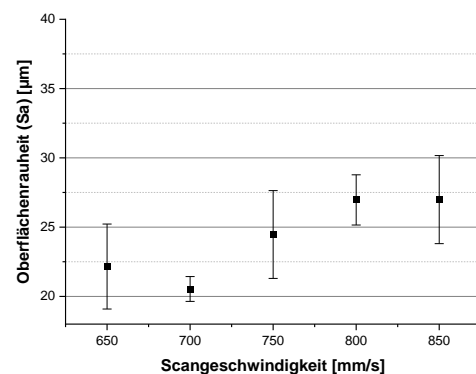
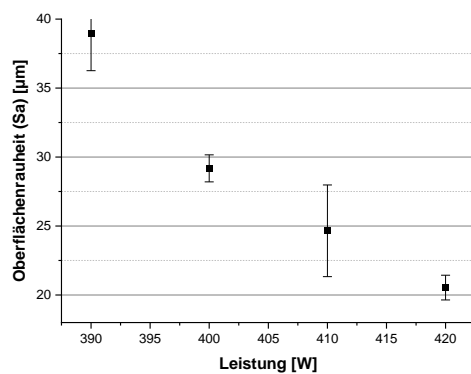
Bild 4-3: Ergebnisse der Dichteanalyse und Foto eines Querschliffs zur optischen Dichtemessung

Aufgrund der Ergebnisse werden folgende Parameter für die Fertigung des LeiMot und weiterer Probekörper empfohlen:

Laserleistung P_L :		950 W
Scangeschwindigkeit v_s :	2400 mm/s	
Spurabstand y_s :		120 μm
Schichtdicke D_s (fix):	50 μm	

Da sich die jeweiligen Parameter gegenseitig beeinflussen, wird in einem weiteren Versuch der oben genannte Parameter validiert und die resultierende relative Bauteildichte zu 99,89 % +/- 0,044 % bestimmt. Die genannten Parameter beziehen sich auf das Bauteilinnere.

Die Oberflächenrauheit hat erheblichen Einfluss auf die Bauteilperformance, z.B. auf den Strömungswiderstand in Kühlkanälen und Öl-Leitungen und auf das Ermüdungsverhalten durch Kerbwirkung. Zur Reduzierung der Oberflächenrauheit werden die Bauteilkonturen mit einem sogenannten Konturscan nachbelichtet. Aufgrund anderer Wärmeleitungsbedingungen als im Bauteilvolumen unterscheiden sich die Bearbeitungsparameter für Kontur und Volumen. Weiterhin unterscheiden sich die erreichbare Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Flächenausrichtung zur Aufbaurichtung. Daher werden Parameter für Konturbelichtung entwickelt, indem Laserleistung, Scangeschwindigkeit und der Abstand zwischen Volumenbereich und Konturvektoren (Konturabstand) variiert und 62 Probekörper aufgebaut und analysiert werden. Die Analyse der Oberflächenrauheit erfolgt mittels Konfokalmikroskop, Messgröße ist die flächenbezogene Mittenrauheit S_A . Die Ergebnisse sind in Bild 4-4 dargestellt.



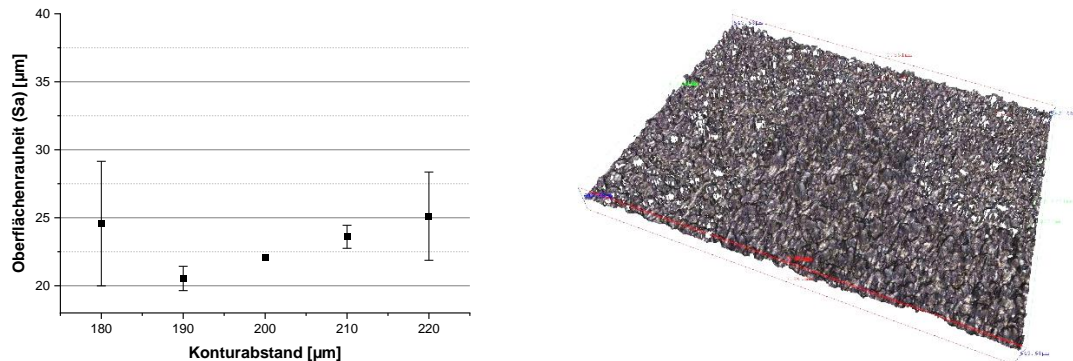


Bild 4-4: Ergebnisse der Rauheitsmessung und Beispielbild der konfokalen Oberflächenmessung

Die minimalen Rauheiten werden mit folgenden Parametern erreicht:

Laserleistung P_L :	420 W
Scangeschwindigkeit v_s :	700 mm/s
Konturabstand y_s :	119 µm

Mit den genannten Parametern wird in einem Validierungsversuche eine gemittelte Oberflächenrauheit von $S_A = 18 \mu\text{m} \pm 3,4 \mu\text{m}$ erreicht.

Für die simulationsgestützte Konstruktion des Leimot sind die erreichbaren mechanischen Festigkeiten des gedruckten Materials entscheidend, welche vom Mikrogefüge abhängen, welches wiederum im Wesentlichen durch die Bearbeitungsparameter beeinflusst wird. Daher werden mit den zuvor entwickelten Bearbeitungsparametern Probenkörper zur mechanischen Prüfung gefertigt; 36 Proben zur quasistatischen, einachsigen Zugprüfung nach DIN 50125 und 40 Proben zur Umlaufbiegeprüfung (High Cycle Fatigue, HCF) nach DIN 50100. Alle Probekörper werden stehen gefertigt und spanend nachbearbeitet; Proben zur HCF-Untersuchung werden zusätzlich poliert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 4-5 dargestellt. Die Zugprüfung erfolgt bei 20°C, 130°C und 250°C (je 12 Proben), um eine Festigkeitsberechnung des Leimot bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen zu ermöglichen. Die bei 20°C erreichten Zugfestigkeiten von $R_{M,20^\circ\text{C}} = 295 \text{ N/mm}^2$ fallen bei steigender Prüftemperaturen auf $R_{M,130^\circ\text{C}} = 247 \text{ N/mm}^2$ bzw. $R_{M,250^\circ\text{C}} = 176 \text{ N/mm}^2$. Die Dehngrenze verringert sich von $R_{p,0,2; 20^\circ\text{C}} = 241 \text{ MPa}$ auf $R_{p,0,2; 130^\circ\text{C}} = 222 \text{ MPa}$ und $R_{p,0,2; 200^\circ\text{C}} = 168 \text{ MPa}$.

5. FH Aachen

5.1 Digitale Ausrichtungs- und Stützoptimierung des Bauprozesses

Seitens der FH Aachen war die Analyse der AM-gerechten Konstruktion der Motorkomponenten sowie die Ausrichtungs- und Stützoptimierung das wichtigste Arbeitspaket. Da die Konstruktion sowie Topologieoptimierung federführend durch die FEV durchgeführt wurde, bestand die Hauptaufgabe der FH Aachen in der Sicherstellung einer AM-gerechten Bauteilgestaltung. Hierfür erfolgte zunächst ein Workshop seitens der FH Aachen bei der FEV, in der die Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung im SLM-Prozess in Anlehnung an die VDI 3405-3 erläutert wurden. [1] Darüber hinaus wurden spezifische Restriktionen, die sich durch die Anlagentechnik der X-Line 200R ergeben (z. B. durch den Laserstrahldurchmesser) vorgestellt.

Zu Beginn war eine Festlegung der Bauteilausrichtung von Kurbelgehäuse, Zylinderkopf und Bedplate im Druckprozess notwendig, um eine AM-gerechte Fertigung im Hinblick auf Topologieoptimierungen zu gewährleisten. Dabei wurde sich auf die in *Bild 5.1* abgebildeten Orientierungen geeinigt, bei dem zu Beginn des Prozesses möglichst kleine Flächen belichtet werden, um einem Bauteilverzug möglichst entgegenzuwirken (sog. Curl-Effekt).

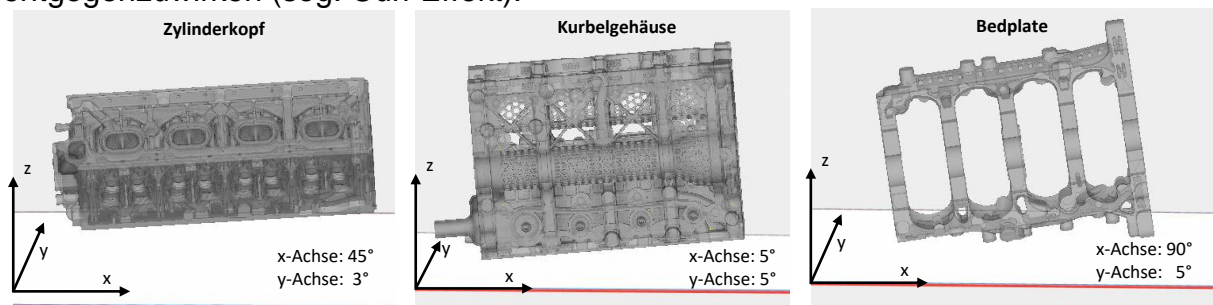


Bild 5.1: Festgelegte Bauteilausrichtungen der Komponenten Zylinderkopf, Kurbelgehäuse und Bedplate

Basierend auf diesen Orientierungen erfolgte in mehrfachen, iterativen Zyklen eine AM-gerechte Topologieoptimierung. Die Analyse erfolgte mithilfe der Software „Magics“ der Firma Materialise. [2] Hierbei handelt es sich um die gängigste Software zur Daten- und Bauvorbereitung in der additiven Fertigung. Jede Konstruktion seitens der FEV wurde auf folgende Punkte untersucht:

- Fehler, die sich aufgrund der Konvertierung eines CAD- ins STL-Format ergeben können
- Geschlossene Volumina, bei denen das Pulver anschließend nicht entfernt werden kann
- Ableitung von Konstruktionsanpassungen bei innenliegenden Überhängen, dessen Winkel größer als 45° zur Bauplattform ist (siehe bspw. *Bild 5.2*)
- Generieren von Support (Stützstrukturen) zur Überprüfung der Prozesssicherheit
- Ableitung von Empfehlungen zur Implementierung von Gitterstrukturen (bspw. an Stellen, an denen Stützen nicht entfernt werden können)

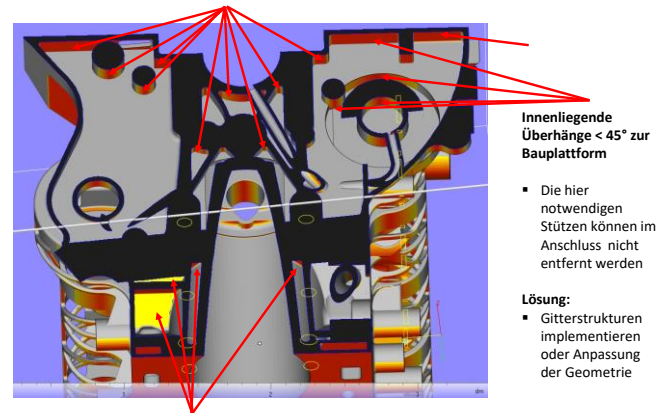


Bild 5.2: Analyse des Kurbelgehäuses im Hinblick auf problematische, innenliegende Überhänge

Neben der Untersuchung einer AM-gerechten Konstruktion bestand eine weitere Aufgabe in einer Untersuchung der zu verwendeten Support-Typen. Supports (Deutsch: Stützstrukturen) erfüllen mehrere Aufgaben im SLM-Prozess:

- Wärmeabfuhr an kritischen Bauteilbereichen
- Sie verhindern ein Absacken der schmelzflüssigen Schicht in das Pulverbett bei Überhängen
- Sie verhindern Verzugerscheinungen und fixieren das Bauteil auf der Bauplattform
- Sie nehmen Kräfte auf, welche im Beschichtungsvorgang entstehen

Neben einer Anbindung zur Bauplattform müssen ebenfalls Überhänge mit einem Überhangwinkel von 45° oder kleiner zur Bauplattform abgestützt werden. Die richtige Auswahl der Stützstruktur entscheidet zum einen über die Sicherheit des Prozesses gegenüber Prozessfehlern infolge durch Bauteilverzug, andererseits darüber, wie aufwendig die anschließende Nachbearbeitung sein wird.

In der Vergangenheit wurden an der FH Aachen Bauteile mit sog. massiven Volumensupports gefertigt. Diese bieten aufgrund einer großen Querschnittsfläche einen schnellen Abtransport von Prozesswärme. Die Stützen kontaktieren das Bauteil nahezu vollflächig und sind in einem Raster „fragmentiert“. Diese Fragmentierung unterbricht das Volumen der Stützen, sodass einzelne Stützenblöcke mit Abmessungen von $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ (in Schichtebene) und einem Abstand von $0,2\text{ mm}$ zueinander entstehen (siehe *Bild 5.3* links).

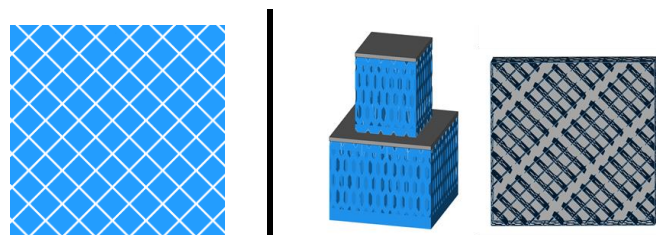


Bild 5.3: Links: Darstellung der Volumensupports ($2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$); Rechts: Darstellung der Blocksupports ($2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$)

Die Fragmentierung ist der erste Schritt zur Einsparung von Material und ermöglicht zudem eine einfachere manuelle Stützenentfernung mittels Handwerkzeugen. Aufgrund der hohen Querschnittsfläche dieser Stützen eignen sie sich ebenfalls sehr gut zur Aufnahme von aus Schrumpfung resultierenden Spannungen während des Bauprozesses. Der Nachteil dieser Stützengeometrie liegt jedoch in einem hohen Anteil an Materialausschuss, da diese nach der Fertigstellung des Baujobs entfernt und dem Recycling zugeführt werden.

Um den Materialeinsatz für die Stützen zu reduzieren, wurde im weiteren Verlauf eine den Anforderungen angepasste Stützstrategie verwendet. Die sog. „Blocksupports“ ermöglichen wie die „Volumensupports“ das großflächige Unterstützen des Bauteils gegen Absacken des Schmelzbades. Jedoch wird hierzu die Stützstruktur durch eine Linienbelichtung anstelle der Flächenbelichtung realisiert. Die sich überschneidenden Linien haben einen definierten Rasterabstand (Hatch) von 2 mm x 2 mm und sind in „Blocks“ aufgeteilt (siehe *Bild 5.3* rechts). Hierdurch lässt sich neben dem Materialeinsatz zusätzlich die Prozesszeit reduzieren. Gleichzeitig erlaubt diese Stützstruktur eine einfachere manuelle Stützentfernung nach dem Prozess.

Weitergehend stellt das große Volumen der aufzubauenden Komponenten eine Gefahr für die Prozesssicherheit des SLM-Prozesses dar. Aus den vergleichsweise großen zu belichtenden Flächen resultiert ein starker thermisch induzierter Verzug. Dadurch ziehen sich die Außenkanten des Bauteils hoch und sorgen bei dem nächsten Beschichtungsvorgang zur Kollision und weitergehend zum Prozessabbruch. Zur Sicherstellung des Abtransportes von Prozesswärme und zur Aufnahme von resultierenden Spannungen wurden zusätzlich kegelförmige

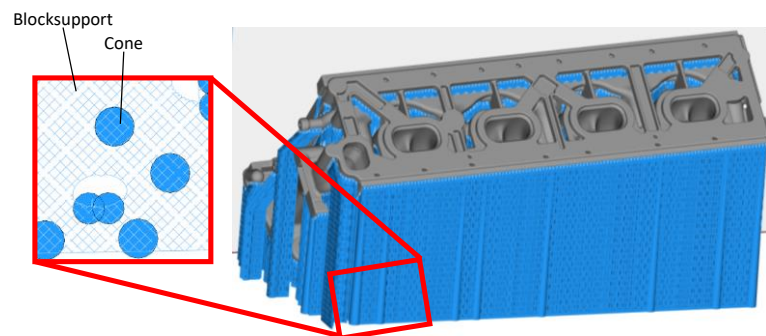


Bild 5.4: Verwendung von **Blocksupports** und **Cones** am Beispiel des **Zylinderkopfes**

Volumenstützen (sog. Cones) vorgesehen (siehe *Bild 5.4*).

Die zu erreichende Materialersparnis von Stützmaterial ist in *Tabelle 5-1* gegenübergestellt.

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Materialersparnis von Stützen (Supports)

Bauteil	Volumensupport		Blocksupport + Cones		Gewichtersparnis
	Volumen Stützen [mm ³]	Gewicht Stützen [kg]	Volumen Stützen [mm ³]	Gewicht Stützen [kg]	
Kurbelgehäuse	6.264.184,38	16,79	984.287,18	2,64	84,29 %
Zylinderkopf	2.419.128,16	6,48	1.349.066,20	3,62	44,23 %
Bedplate	2.419.128,16	6,48	928.049,07	2,49	61,64 %

5.2 Validierung durch Fertigung eines Ein-Zylinders und Vier-Zylinders

Zur Untersuchung der Machbarkeit der Topologieoptimierten Motorenkomponenten erfolgte die Fertigung eines Ein-Zylinders (repräsentative Teilsegmente von Bedplate, Kurbelgehäuse und Zylinderkopf) an der FH Aachen.

Hierfür wurden die Bauteile seitens der FH Aachen in Magics vorbereitet, sodass entsprechend notwendige Stützen angebracht wurden. Anschließend erfolgten die Fertigung und eine manuelle Nachbearbeitung (Entfernen der notwendigen Stützen).

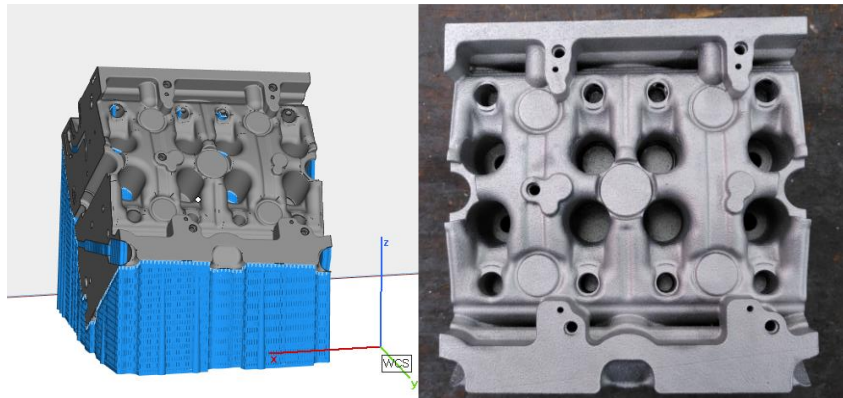
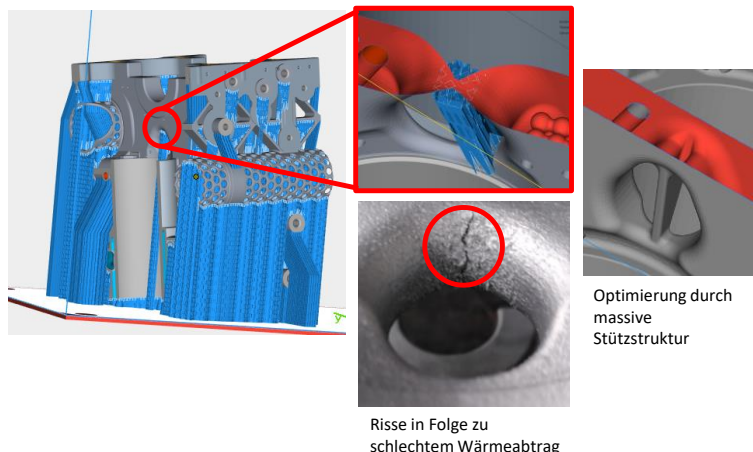


Bild 5.5: Links: Gestütztes Modell des Zylinderkopfes für den Ein-Zylinder; Rechts: Gefertigtes Bauteil nach der Nachbearbeitung

Die Versuche zeigten erste positive Ergebnisse hinsichtlich der Machbarkeit im SLM-Prozess (siehe bspw. *Bild*).

Mithilfe des Ein-Zylinders konnte zusätzliches Optimierungspotential ermittelt werden. So wurden bspw. Risse im Bauteil ermittelt, die sich im Verlaufe des Fertigungsprozesses aufgrund zu hohen thermischen Verzuges ergaben. Gerade im Bereich von Rundungen in Aufbaurichtung konnte aufgezeigt werden, dass die Blocksupports nicht ausreichend genug waren, um die entstandene Wärme abzuleiten und infolgedessen Risse entstanden sind (siehe *Bild*). Hierdurch konnte im weiteren Verlauf eine massive Stütze vorgesehen werden, die diese Fehlerbildung verhindert (*Bild* rechts).



Risse in Folge zu schlechtem Wärmeabtrag

Bild 5.6: Analyse von Optimierungspotential mithilfe des 1-Zylinders (Rissbildung im Kurbelgehäuse)

Weitere Fehlstellen konnten mithilfe eines durchgeführten CT-Scans ermittelt werden, sodass sämtliche Fehler dokumentiert und im weiteren Verlauf optimiert werden konnten. Zusätzlich wurde mithilfe des CT-Scans

eine Bauteilschrumpfung infolge der temperaturbedingten Längenänderungen aufgezeigt, sodass die Soll-Maße nicht erreicht wurden. Infolgedessen wurde für den weiteren Verlauf ein Skalierungsfaktor für das CAD-Modell von der Inpeca GmbH bereitgestellt.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen konnte die Machbarkeit des kompletten Basismotors untersucht werden. Hierfür wurden seitens FH Aachen Bedplate, Kurbelgehäuse und Zylinderkopf gestützt, gefertigt und manuell nachbearbeitet.

Alle drei Komponenten konnten mit den gewählten Supportstrukturen erfolgreich gefertigt werden (siehe bspw. Bild). Im Rahmen der Nachbearbeitung sowie mithilfe eines weiteren CT-Scans konnten weitere Optimierungen in Zusammenarbeit mit der FEV untersucht werden.

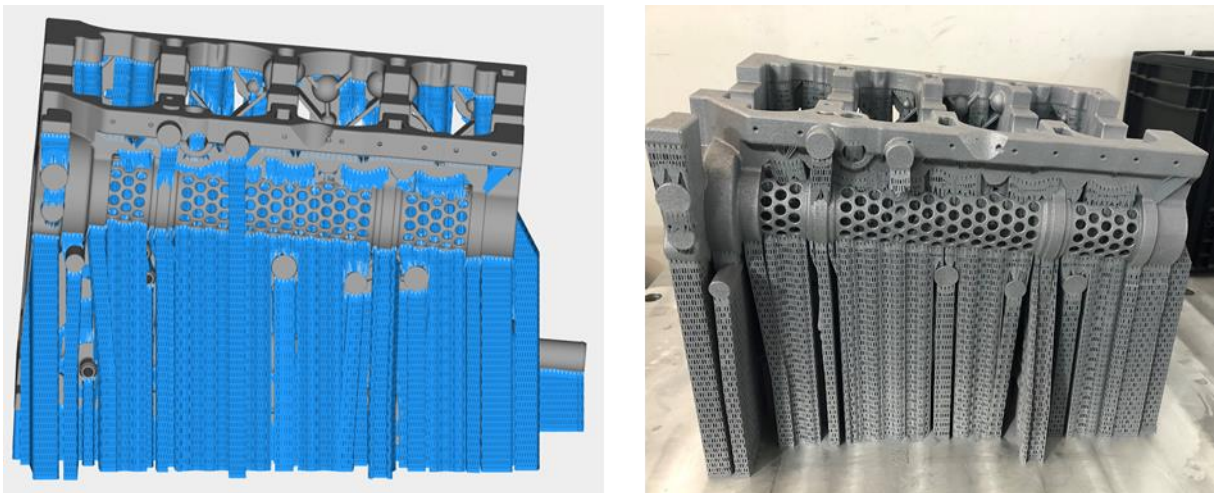


Bild 5.7: Fertigung des Kurbelgehäuses vom Vier-Zylinder seitens FH Aachen

Anschließend erfolgte die Übergabe an die FEV zur weiteren Untersuchung. Sämtliche Daten wurden zur Fertigung weiterer Motoren an die Inpeca GmbH übergeben.

6. Volkswagen AG

6.1 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Für die Durchführung des LeiMot-Projektes hat VW vier Verbrennungsmotoren inkl. den kompletten CAD-Datensatz sowie notwendige technische Zeichnungen zur Verfügung gestellt. Die Daten dienen als Grundlage für die Analyse und Konzeptionierung des LeiMot Motors.

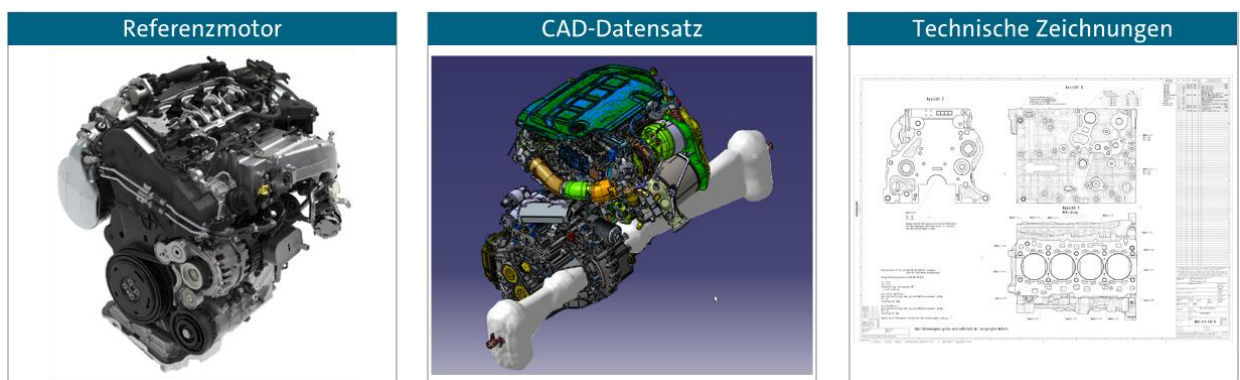


Abbildung 6.6: Inputdaten für die Durchführung des LeiMot-Projektes

Die vier Verbrennungsmotoren wurden gemäß der Abbildung 6.2 wie folgt aufgeteilt.

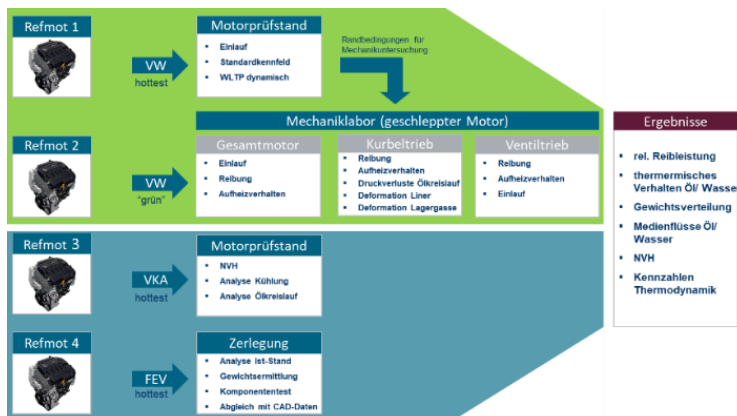


Abbildung 6.2: Zweck und Verwendung von Referenzmotoren

Zwei Verbrennungsmotoren sind bei VW geblieben und zwei weitere Motoren wurden an Projektpartner (FEV und TME) verschickt. Bei VW wurde ein Motor für die Untersuchungen am Motorprüfstand vorbereitet. Der zweite Motor wurde für geschleppte Untersuchungen im Mechaniklabor zwecks der IST-Standanalyse sowie die Bewertung von wissenschaftlichen Maßnahmen hinsichtlich der Industrialisierung untersucht. Zwei weitere Referenzmotoren wurden an die Projektpartner (FEV und TME) für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Bei FEV wurde der

Referenzmotor zerlegt und analysiert, um ein neues Leichtbaukonzept des LeiMot-Motors definieren zu können. Beim TME wurde der Referenzmotor auf dem Prüfstand detailliert untersucht, damit die am TME-Institut erarbeiteten wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie die umgesetzten Maßnahmen des LeiMot-Motors verifiziert werden konnten. Für den Aufbau des Motors auf einem Prüfstand beim TME hat VW notwendige zusätzliche Komponenten zur Verfügung gestellt. Dazu gehörte unter anderem die komplette Abgasanlage sowie der Kabelbaum mit dem Seriensteuergerät und eine Wegfahrsperrung als auch die Adaptierung des Antriebs. In das Steuergerät wurde ein speziell angepasster Datensatz der Software eingespielt, damit der Betrieb des Motors inkl. der Regeneration des Dieselpartikelfilters einwandfrei funktionieren kann. Die Antriebsadaptierung enthält eine Kupplung mit einem Teil des Getriebes, um die Antriebswelle s.g. UKF-Patrone lagern zu können.

Ein weiteren Input seitens VW waren die Konstruktionsdaten des Referenzmotors mit ausgewählten notwendigen Fertigungszeichnungen. Die Konstruktionsdaten wurden als vollständiger 3D-CAD-Datensatz des Längs und Quereinbaus in CREO-Format an Projektpartner Fa. FEV zur Verfügung gestellt. Der CAD-Datensatz enthält den kompletten Motor mit sämtlichen Anbauteilen sowie das Getriebegehäuse mit Antriebswellen. Das Modell ist die Grundlage für die Konzeptionierung und Entwicklung des LeiMot-Motors. In Abbildung 1 ist ein Datensatz für den Quereinbau exemplarisch dargestellt. Für die Herstellung des LeiMot-Motors wurden technische Zeichnungen mit Fertigungsdaten geliefert. Während der Laufzeitphase des Projektes wurden einige Konstruktions-, Fertigungs- sowie Montageinformationen dem Konsortium zur Verfügung gestellt, um den LeiMot-Motor aufbauen zu können.

Gleichzeitig zu der Konzeptionsphase hat VW den Referenzmotor detailliert analysiert. Die Untersuchungen wurden sowohl im Mechaniklabor als auch auf einem Motorprüfstand durchgeführt. Im Mechaniklabor wurden zwei Sonderprüfvorrichtungen für hochgenaue Reibleistungsanalysen vom Ventiltrieb und Kurbeltrieb aufgebaut (Siehe Abbildung 6.3).

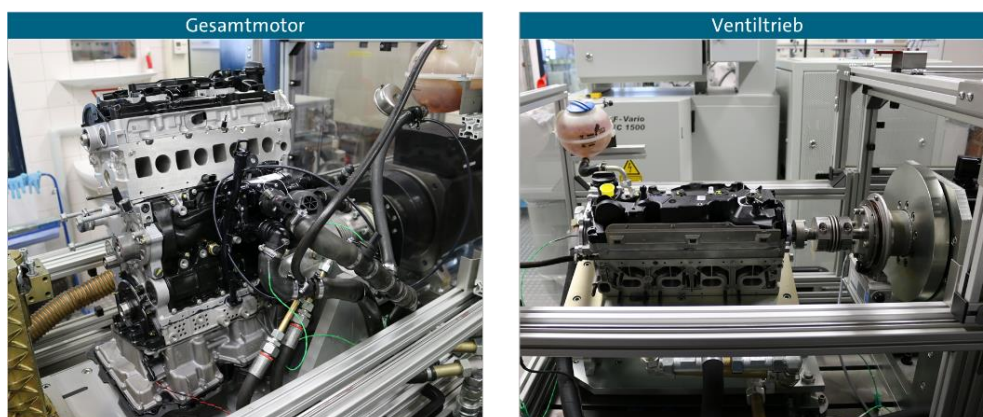


Abbildung 6.7: Prüfvorrichtungen im Mechaniklabor für geschleppte Reibleistungsanalysen

An der Ventiltriebprüfvorrichtung wurde ein Zylinderkopf auf einer Platte befestigt (siehe Abbildung 6.4 rechts). Die Platte bildet den oberen Teil des Motoblocks ab, um den

motornahen Verzug der NoWe-Lagergasse infolge der ZK-Verschraubung zu gewährleisten. Darüber hinaus wurde die Versorgung von Öl und Kühlmittel durch die Platte wie im realen Motor realisiert. Der Antrieb der Nockenwelle erfolgte durch direkte Anbindung des E-Motors an die Nockenwelle. Dazwischen befand sich eine Messwelle für die Reibmomentmessung des Ventiltriebs. Die Medien wurden mittels hochgenauen Konditionieranlagen temperiert. Vor dem Prüflauf fand ein Einlauf statt. In der Einlaufphase wurde die Absenkung des mittleren Antriebsmomentes über ein definiertes Messprogramm überwacht und verifiziert. Nach dem Einlaufprogramm wurde ein Prüfprogramm gestartet. Im Prüfprogramm wurde die Reibleistung des Ventiltriebs für drei Temperaturen und einen aus dem Serienmotor ermittelten Öldruck gemessen. Das mittlere Antriebsmoment wurde wie folgt ermittelt. Die Antriebsmomentverläufe werden während einer Umdrehung von NoWe bei konstanter Drehzahl gemessen. Danach wird ein Mittelwert des Antriebsmomentverlaufes berechnet und über die zugehörige Drehzahl dargestellt. Die daraus erhaltene Kurve bezeichnet man als Stribeck-Kurve und sie bildet die Reibungsverluste in mechanischen Komponenten ab. Je niedriger die Werte, desto effizienter ist die Mechanik und desto weniger Energie wird benötigt, um sie anzutreiben.

Der LeiMot-Zylinderkopf wurde auf der gleichen Prüfvorrichtung unter Berücksichtigung von gleichen Randbedingungen untersucht. Die Reibungsergebnisse des LeiMot-Zylinderköpfen wurden in der Abbildung 4 gegenüber dem Serien-Zylinderkopf dargestellt.

Die Messergebnisse sollten übereinander liegen, da keine konstruktiven Änderungen an der LeiMot-Motormechanik vorgenommen wurden. Ein leichter Anstieg des Reibmomentes bei niedrigeren Drehzahlen deutet auf eine ungenaue Bearbeitung.

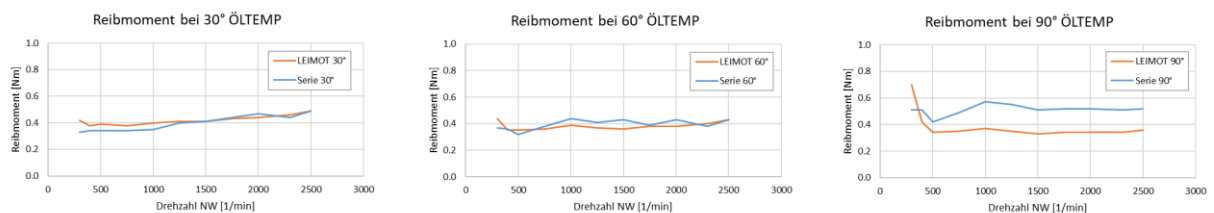


Abbildung 6.8: Vergleich der geschleppten Reibmomente des Ventiltriebs (Serie vs. LeiMot) für verschiedene Öltemperaturen

Für die Analyse der Motorreibung im geschleppten Zustand wurde eine zweite Prüfvorrichtung s.g. Gesamtmotorprüfvorrichtung (siehe Abbildung 4 links) aufgebaut. An der Gesamtmotorprüfvorrichtung wurde der komplette Verbrennungsmotor hinsichtlich der Reibleistung untersucht. Der Verbrennungsmotor wurde mittels Getriebeflansch und Motorlager vom Quereinbau auf einem Maschinenbett befestigt. Der Antrieb erfolgte an Kurbelwellenposition durch einen Elektromotor. Die Reibungsverluste wurden mit der zwischen dem Motor und dem E-motor eingebauten Messwelle aufgenommen. Die Konditionierung wurde nur durch das Kühlmittelkonditionieranlage realisiert, da die Ölpumpe im Motor eingebaut wurde. Über

einen Wärmetauscher wurden die zwei Medien (Öl und Kühlmittel) durch externe Konditionieranlage auf gewünschte Temperatur geregelt. Die Bewertung der Motorreibung wurde im gleichen Format wie die Reibung vom Ventiltrieb (mittleres Reibmoment über Motordrehzahl) dargestellt.

Der LeiMot-Motor wurde auf der gleichen Prüfvorrichtung unter Berücksichtigung von gleichen Randbedingungen untersucht. Die Reibungsergebnisse des LeiMot-Motors wurden in der Abbildung 6.5 gegenüber dem Referenzmotor dargestellt. Die Messergebnisse sollten übereinander liegen, da keine konstruktiven Änderungen an der LeiMot-Motormechanik vorgenommen wurden. Ein leichter Anstieg des Reibmomentes bei niedrigeren Drehzahlen deutet auf eine ungenaue Bearbeitung hi

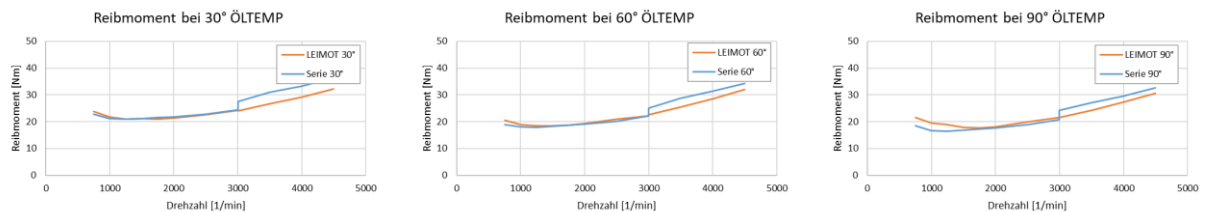


Abbildung 6.9: Vergleich der geschleppten Reibmomenten des Gesamtmotors (Serie vs. LeiMot) für verschiedene Öltemperaturen

Für eine weitere Bewertung von thermodynamischen LeiMot-Maßnahmen wurde der Referenzmotor auf einem Motorprüfstand (Siehe Abbildung 6.6) untersucht, wobei der Motorbefeuert betrieben und mit einer Prüfstandsbremse in einen Betriebspunkt gebracht wurde.

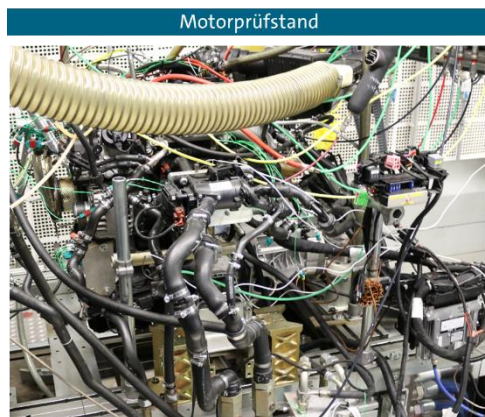


Abbildung 10.6: Motorprüfstand für Bewertung des LeiMot-Motors

Vor dem Prüfprogramm wurde der Motor eingelaufen. Hierbei wurde das Schleppmoment des Motors bei verschiedenen Temperaturen analysiert (siehe Abbildung 6.7).

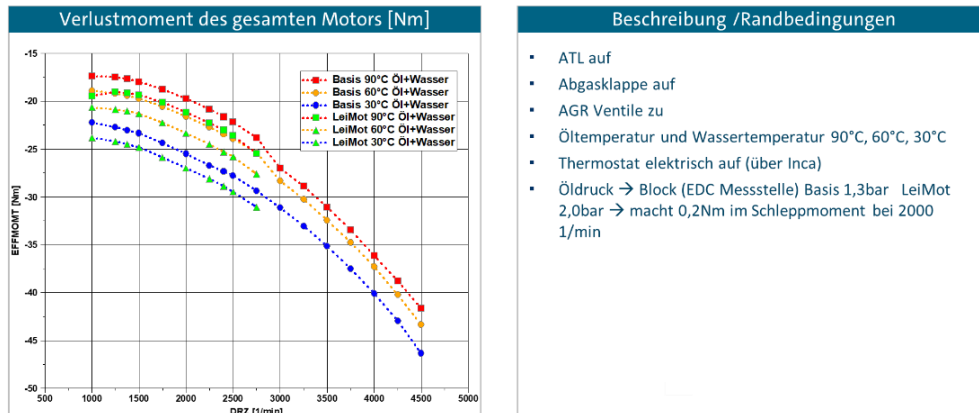


Abbildung 6.11: Schleppmomentvergleich (Basis vs. LeiMot) nach der Einlaufphase

Nach einem Beharrungszustand wurde das Prüfprogramm gestartet. Im Prüfprogramm wurde der Referenzmotor im Motorkennfeld stationär und im verbrauchrelevanten Bereichen dynamisch untersucht. Der LeiMot-Motor wurde analog zu dem Referenzmotor auf den gleichen Motorprüfstand getestet und die Ergebnisse wurden als Differenz zwischen Referenzmotor und LeiMot in folgenden Diagrammen dargestellt. Als Erstes wurde der Kraftstoffverbrauch zwischen den beiden Motoren verglichen (siehe Abbildung 6.8 links). Der Kraftstoffverbrauch ist beim LeiMot-Motor größer als beim Referenzmotor. Danach wurde der Reibmitteldruck verglichen (siehe Abbildung 6.8 mitte), um die Ursache des Mehrverbrauchs zu identifizieren. Die Ursache lag an der Mechanik, was die Schleppmessungen im Mechaniklabor bereits bestätigt haben. Als nächste Größe für die Bewertung des LeiMot wurde Blow-by als Indikator für Steifigkeit herangezogen (siehe Abbildung 6.8 rechts). Blow-by beschreibt unter anderem die Dichtigkeit zwischen dem Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbahn. Ab bestimmter/m Drehzahl/Last-Punkt steigt der Blow-by beim LeiMot an wegen zu hoher Nachgiebigkeit der Motorblockstruktur infolge der Betriebskräfte.

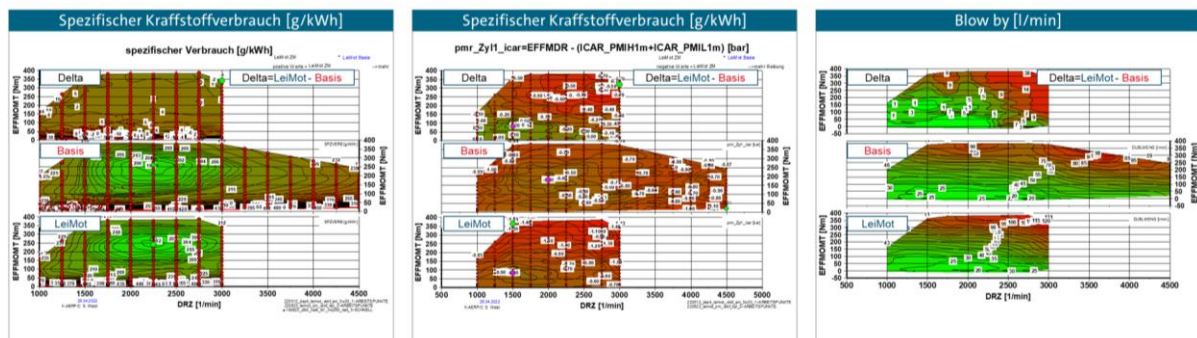


Abbildung 6.12: Vergleich der beiden Motoren (Basis vs. LeiMot) im Motorkennfeld (stationär)

Weitere Untersuchungen in verbrauchsrelevanten Zyklen WLTC und RDE haben die stationären Ergebnisse im Kennfeld bestätigt. An der Stelle wurden CO₂, CO und HC in Abhängigkeit von NO_x für Referenzmotoren von 2019 und 2022 gegenüber dem LeiMot-Motor von 2022 ausgewertet (siehe Abbildung 6.9).

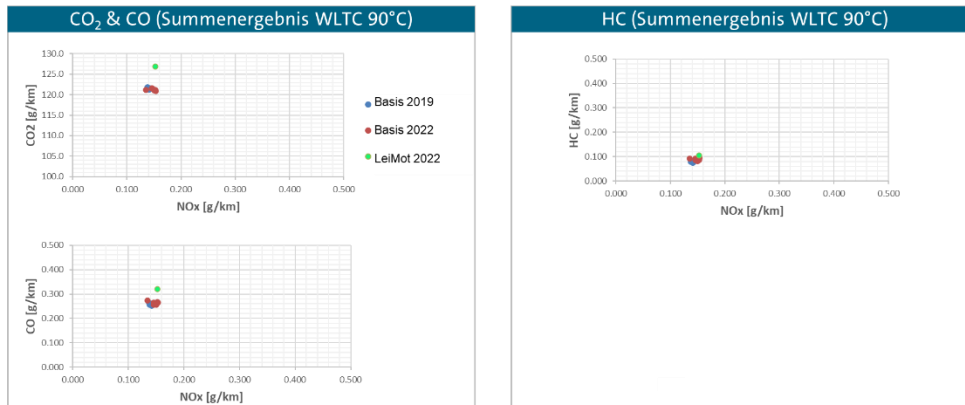


Abbildung 6.13: Darstellung CO₂, CO und HC im WLTC-Zyklus in Abhängigkeit von NO_x-Werten

Exemplarisch dargestellte Temperaturen an der Turbine und an dem Dieselpartikelfilter zeigen keine Veränderungen (siehe Abbildung 6.10).

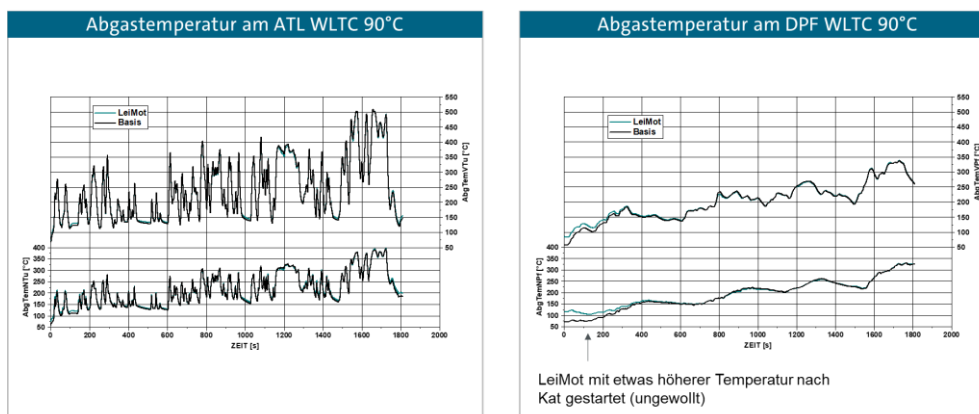


Abbildung 6.14: Vergleich der Abgastemperaturen im WLPC-Zyklus zwischen Basis und LeiMot

Die zu untersuchenden Rohemissionen sind bei der Referenz und beim LeiMot-Motor nahe zu identisch. Das bedeutet, die thermodynamischen LeiMot-Maßnahmen sind so gering, dass sie mit der herkömmlichen Messtechnik nicht erfaßt werden konnten. Dafür muss eine entsprechende hochempfindliche Messtechnik entwickelt werden. Dies war im Rahmen des Projektes seitens VW nicht vorgesehen. Der Schwerpunkt der Messungen war die LeiMot-Maßnahmen mit Standardmesstechnik im Hause VW nachweisen zu können.

Aufgrund des Motorschadens bei VKA wurde der LeiMot-Motor bei VW sehr vorsichtig auf dem Motorprüfstand untersucht, um so viele Messdaten wie möglich zu gewinnen. Trotzdem ist der LeiMot-Motor zu Schaden gekommen, aber dank der automatisierten Prüfstandüberwachung konnte er rechtzeitig ausgeschaltet werden. Dadurch konnte er sehr sorgfältig analysiert werden. Die Diagnose war zu grenzwertige Auslegung der Zylinderkopfverschraubung, die unter anderem auf das dynamische Schwingverhalten des gedruckten Werkstoffs des Zylinderkurbelgehäuse zurückzuführen ist. Eine weitere



mögliche Ursache ist die Übermaßpassung des Wälzlageringens der Ausgleichswellenlagerung.
Trotz des Motorsausfalls zeigt das 3D Metalldruckverfahren enormes Potential für zukünftige Leichtbaukonstruktionen.

7. INPECA GmbH

7.1 Aufgabenstellung der INPECA

Projektziel der INPECA GmbH war die kosteneffiziente Produktion großer Motorenbauteile im Laser Powder Bed Fusion Verfahren (LPBF) in Serienreife. Dazu war eine Reduzierung der Produktionszeit bei gleichbleibender Qualität, im Sinne mechanischer Eigenschaften, Oberflächenbeschaffenheit und Maßhaltigkeit der Bauteile, nötig.

7.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (LPBF, englisch Laser Powder Bed Fusion), früher auch selektives Laserstrahlschmelzen (SLM, Selective Laser Melting) genannt, gehört zu den additiven Fertigungsverfahren und ist ein generatives, pulverbettbasiertes Schichtbauverfahren, um geometrische Strukturen durch Umschmelzen des pulverförmigen, metallischen Ausgangsstoffs herzustellen. Durch das LPBF Verfahren können unterschiedlichste, dreidimensionale Bauteile mit hoher geometrischer Komplexität hergestellt werden. Selbst solche, die sich mit anderen Herstellverfahren nicht hergestellt werden können, z.B. Bauteile mit Hinterschneidungen, Hohlräumen oder sehr komplexen Geometrien. Durch die Möglichkeit Bauteile mit Hohlräumen herzustellen und diese bei Bedarf mit Tragstrukturen in Form dreidimensionaler Gitter zu füllen, ist das Verfahren in besonderer Weise für den Leichtbau prädestiniert.

Durch den form- und werkzeuglosen Herstellungsprozess ist das LPBF Verfahren bei kleinen Stückzahlen kostengünstiger als Druck- oder Sandguss, wodurch es sich im Besonderen für die Herstellung einzelner Teile oder Kleinstserien eignet, z.B. im Prototypenbau bzw. Rapid Prototyping. Allerdings ist das LPBF Verfahren aktuell noch zu langsam und damit zu teuer um für größere Produktionsserien großer Bauteile eine wirtschaftliche Alternative darzustellen. Grund dafür sind hauptsächlich die hohen Maschinenanschaffungskosten, wodurch die Maschinenlaufzeit den größten Anteil der Bauteilproduktionskosten ausmacht.

7.3 Erzielte Ergebnisse

7.3.1 Generieren der LPBF Bauteile

Im Verlauf des LeiMot Projekts stellte INPECA die nötigen, metallischen Bauteile für vier Motoren her. Insgesamt wurden vier Zylinderköpfe (Abbildung 7.15), vier Kurbelgehäuse und vier Bedplates gedruckt. Diese wurden von den Supportstrukturen befreit, geschliffen und gestrahlt. Zusätzlich wurden diverse Testgeometrien hergestellt.

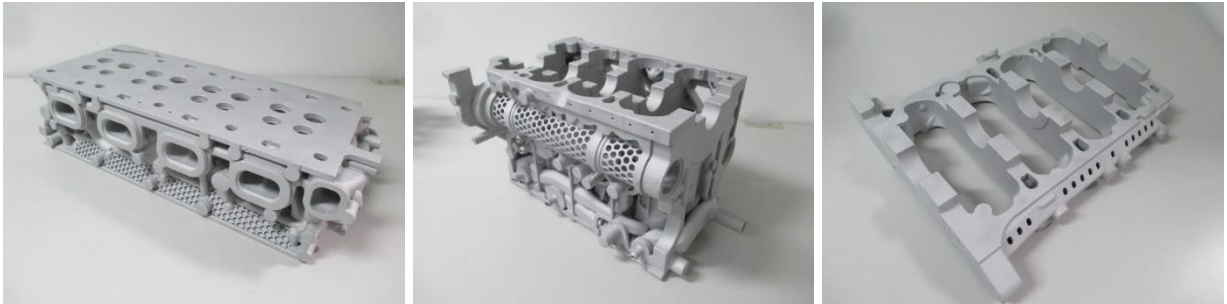


Abbildung 7.15: Zylinderkopf, Kurbelgehäuse und Bedplate nach Entfernen aller Stützstrukturen und Oberflächennachbearbeitung inklusive Sandstrahlen

Da die Bauteilproduktionskosten hauptsächlich von der Maschinenlaufzeit bestimmt werden und diese besonders von der Größe, genauer gesagt vom Volumen, des zu druckenden Bauteils abhängt, ist eine Kostenreduktion alleine schon durch Leichtbau erreichbar.

Aber nicht nur das Volumen des zu herzustellenden Bauteils, sondern auch das Volumen aller Supportstrukturen muss von der LPBF Maschine erzeugt werden und benötigt dementsprechend kostbare Maschinenzeit. Eine Reduktion von Supportstrukturen verringert die Kosten der Herstellung also in zweifacher Hinsicht, sowohl im Prozess selbst als auch im Postprozess beim Entfernen der Supportstrukturen.

Des Weiteren müssen durch die komplexen inneren Geometrien, besonders des Kurbelgehäuses und des Zylinderkopfes, Supportstrukturen im Inneren vermieden werden, wenn Sie nicht durch einfache Methoden nach dem 3D-Druckprozess entfernt werden können.

Werden Supportstrukturen allerdings zu leicht ausgelegt, können sie die Kräfte, die durch thermische Spannungen beim Abkühlen jeder einzelnen Schicht vom flüssigen Zustand bis auf Baukammertemperatur entstehen, nicht kompensieren und es kommt zu geometrischen Verzügen.

Im schlimmsten Fall kann ein Verzug am Bauteil während des 3D-Drucks zu einer Beschädigung des Pulver-Beschichtersystems und damit zum Prozessabbruch führen.

Bei der Herstellung der Bauteile für das LeiMot Projekt wurden nach jedem Baujob Problemstellen analysiert und die Supportstrukturen für das folgende Bauteil verbessert, um entsprechende Fehlstellen in Zukunft zu vermeiden. Dabei wurden Strategien für Supportstrukturen entwickelt, die in Zukunft die Herstellung großer, komplexer Bauteile direkt fehlerfrei ermöglichen sollen.

Bei der manuellen Anpassung der Supportstrukturen konnte das Volumen der sogenannten Blocksupports, die in erster Linie für das Stützen von Flächen ausgelegt sind, im Vergleich zur automatischen Supportgenerierung reduziert werden. Zusätzlich wurden Kegelsupports verwendet, die zum Stützen einzelner Punkte, Überhänge oder der Verstärkung kritischer Bereiche gedacht sind. Des Weiteren wurden sog. Gussetsupports verwendet, um materialsparend kleinere Überhänge zu stützen.

Insgesamt konnte durch die Anpassung der Supportstrukturen und vor Allem durch den Einsatz neuer Prozessparameter die Maschinenlaufzeit des Kurbelgehäuses von etwa

10 auf 6 Tage reduziert werden. Bei der Baujobkombination Kurbelgehäuse mit Bedplate sank die Maschinenlaufzeit von ungefähr 13 auf 7,5 Tage.

7.3.2 Wärmebehandlung der LPBF Bauteile

Sämtliche Bauteile des LEIMOT Projekts wurden einer T6 Wärmebehandlung unterzogen, siehe Abbildung 7.16. Bei diesem zweistufigen Verfahren wird bei additiv gefertigten Aluminiumbauteilen die Festigkeit reduziert, dafür aber die Duktilität erhöht.

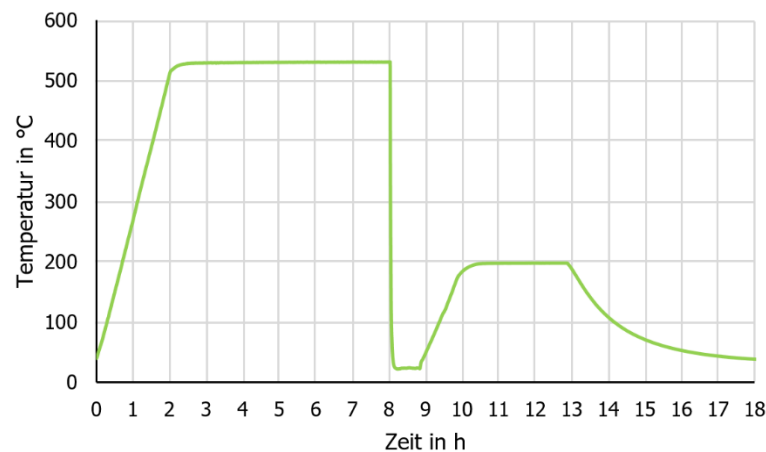


Abbildung 7.16: Exemplarischer Temperatur-Zeit-Verlauf der T6 Wärmebehandlung, wie sie im LeiMot Projekt umgesetzt wurde

7.3.3 CT-Untersuchung der LPBF Bauteile

Die hohe Komplexität der Bauteile des LEIMOT Projekts machte eine 3D Computer Tomographie Untersuchung erforderlich, um Pulver- oder Supportresten sowie Materialdefekte aufzuzeigen, siehe Abbildung 7.17.

Das im 3D-CT entstandene Abbild kann direkt mit den CAD-Konstruktionsdaten verglichen werden. So können Fehlstellen schneller und besser identifiziert und eindeutig lokalisiert werden, um eine eventuell notwendige Nacharbeit durchzuführen. Mit Hilfe der 3D-CT-Aufnahmen wurden im Projekt vor Allem die Öl- und Kühlkanäle untersucht, um sicherzustellen, dass diese frei von Pulverrückständen sind, da diese bei der nachfolgenden Wärmebehandlung verklumpen würden und nicht mehr hätten entfernt werden können. Dies hätte einen reduzierten Durchfluss und damit eine verminderte Schmier- oder Kühlleistung zur Folge gehabt. Des Weiteren wurden die Hohlräume auf Stützstrukturreste untersucht und diese gegebenenfalls nachträglich entfernt.

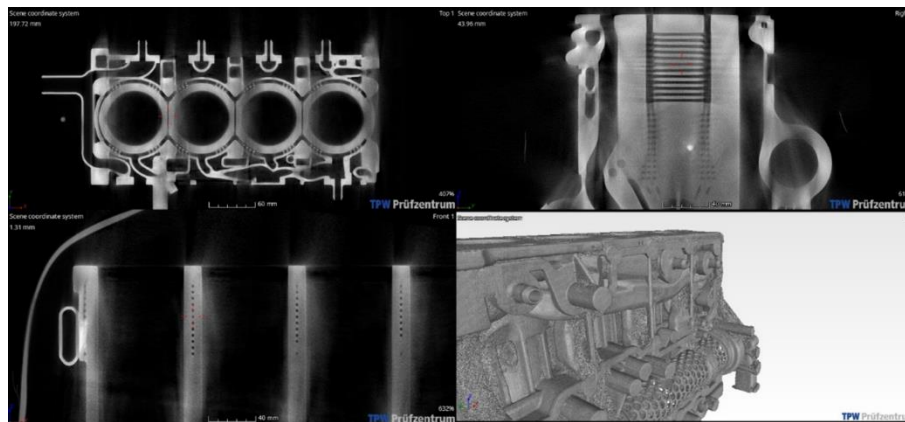


Abbildung 7.17: Aufnahme eines LEIMOT Kurbelgehäuses mit dem 3D-CT, geschnitten in drei unterschiedlichen Raumachsen und Darstellung des Volumenmodells (unten rechts).

7.3.4 Prüfung der Bauteilqualität der LPBF Rohteil

In allen Schritten wurde durch eine Vermessung der Bauteile mittels optischem 3D-Scan eine Qualitätskontrolle in Bezug auf die Maßhaltigkeit der Bauteile ermöglicht. Die Bauteile wurden nach Entfernen aller Supportstrukturen, nach Oberflächenbehandlungen sowie nach Wärmebehandlungen optisch gescannt und mit den CAD-Daten verglichen, um zu gewährleisten, dass die nötige Maßhaltigkeit der Rohteile vor der mechanischen Endbearbeitung für die spätere Verwendung gegeben ist, siehe Abbildung 7.18.

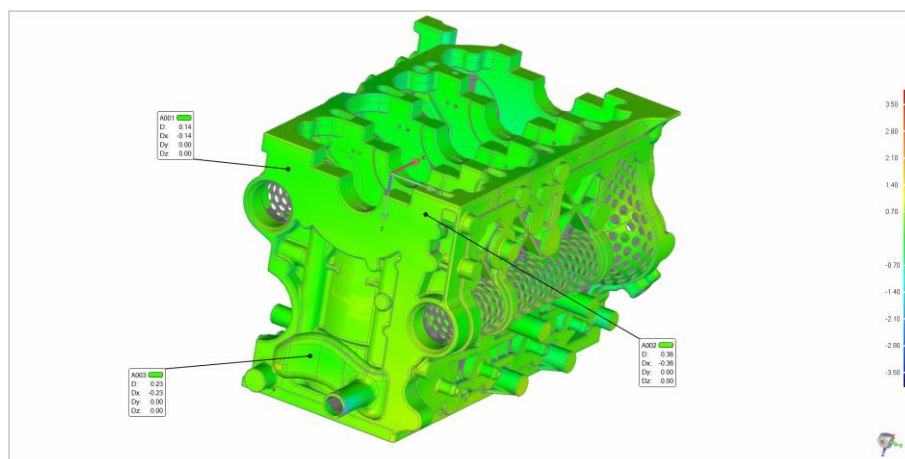


Abbildung 7.18: Falschfarbendarstellung eines optischen 3D-Scans zur Messung der Abweichungen des gedruckten Bauteils zu den CAD-Daten am Beispiel eines Kurbelgehäuses

8. WFS GmbH

Da für die WFS GmbH leider keine gekürzte Fassung des Abschlussberichtes vorliegt verweisen wir den interessierten Leser auf den vollständigen Abschlussbericht I und II und Erfolgskontrollbericht III.

Anbei eine kurze Übersicht über deren Inhaltsverzeichnis:

1	Kurzdarstellung
1.1	Aufgabenstellung
1.2	Voraussetzung für die Durchführung des Projektes
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfungspunkte
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen
2	Eingehende Darstellung
2.1	Erzielte Ergebnisse
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit
2.4	Voraussichtlichen Nutzen
2.5	Fortschritt in der Industrie während des Projekts
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses
4	Literaturverzeichnis