



Schlussbericht

Verbundprojekt: Innovative kosten- und emissionsoptimierte Leichtbaukolbenentwicklung für den Gasbetrieb maritimer Dual-Fuel-Großmotoren
Akronym: InKoMar

Teilprojekt 1: „Simulationsgestützte Entwicklung kosten- und emissionsoptimierter Leichtbaukolben für den maritimen Einsatz“
Akronym: SimKoMar

Förderkennzeichen: 03SX491A

Unternehmen: MET Motoren- und Energietechnik GmbH

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. S. Bludszuweit

Zeitraum: 01. August 2019 bis 30. September 2022

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz unter dem Förderkennzeichen 03SX491A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Rostock, den 06.02.2023

I	KURZE DARSTELLUNG DER AUFGABENSTELLUNG, VORAUSSETZUNGEN, PLANUNG UND ABLAUF.....	3
1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	6
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
II	EINGEHENDE DARSTELLUNG	8
1.	Erzielte Ergebnisse	8
1.1	Entwicklung einer vereinfachten kostenoptimierter Kühl- und Schmierölversorgung für Kolben in maritimen Dual-Fuel-Großmotoren	8
1.2	Nutzung des entwickelten virtuellen Technologiedemonstrators zur Analyse und Bewertung von Verkokungserscheinungen am Kühlraumoberflächen von modernen gewichtsoptimierten Kolben	26
1.3	Anpassung des Versuchstands zum Reibschweißen und Durchführung von Versuchsreihen	33
1.4	Haltbarkeitsnachweis für neu erarbeitete Leichtbaukolbendesigns.....	39
1.4.1	Primäre Gas- und Massenkräfte	40
1.4.2	Thermische Belastung	40
1.4.3	Ergebnisse der Lastberechnungen von Primärkräften und Temperatur.....	40
1.5	Kolbensekundärbewegung	41
1.5.1	Numerische Analyse der Kolbensekundärbewegung	42
1.5.2	Festigkeitsanalyse des Messkolbens.....	43
1.5.3	Messtechnik (Manner System)	44
1.5.4	Zusammenfassung der Kolbensekundärbewegungsanalyse	45
1.6	Zusammenfassung.....	45
2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	47
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	47
4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit	48
5	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	48
6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	49
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	50
	TABELLENVERZEICHNIS	52

I Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf

1 Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt „InKoMar – Innovative kosten- und emissionsoptimierte Leichtbaukolbenentwicklung für den Gasbetrieb maritimer Dual-Fuel-Großmotoren“ baute auf Grundlagen und Ergebnissen der FuE-Verbundprojekte INKOV (FKZ 03SX364), G-KOM (FKZ 03SX445B) und SimShaker (FKZ 03SX415B) auf.

Zielstellung war es, im Rahmen des Verbundprojekts InKoMar zu untersuchen, ob die heute übliche komplizierte Ölzufuhr zum Großmotorenkolben über das Pleuel und einen Gleitschuh durch ein zu entwickelndes, neuartiges Kolbenkühlsystem mit einfacher Spritzölversorgung in Kombination mit einer reibgeschweißten Verbindung zwischen Kolbenober- und -unterteil ersetzt werden kann. Die Zielstellungen für das Teilprojekt 1 leiten sich unmittelbar aus dem Verbundprojekt ab. Im Fokus des TP 1 steht dabei die Entwicklung, Testung und Anwendung von leistungsfähigen Simulations- und Optimierungswerkzeugen, um verschiedene innovative Lösungsansätze für die Kühl- und Schmierölversorgung, die Brennraumgeometrie, den Wärmeübergang vom Brenngas zum Kühlmittel zukünftiger Großmotorenkolben an einem "virtuellen Kolben" zu untersuchen und zu vergleichen. Durch den konsequenten Einsatz von durchgängig simulationsgestützten Entwicklungsmethoden sollten die zukünftigen Entwicklungszeiten für Kolben erheblich verkürzt, die Treffsicherheit neuartiger Lösungen deutlich erhöht und die Entwicklungskosten drastisch gesenkt werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das vorliegende Teilprojekt 1 war Bestandteil des Verbundprojekts „InKoMar - Innovative kosten- und emissionsoptimierte Leichtbaukolbenentwicklung für den Gasbetrieb maritimer Dual-Fuel-Großmotoren“. Durch das Zusammenwirken der Verbundpartner SECO GmbH und Wissenschaftlich-Technisches Zentrum Roßlau gGmbH war gesichert, dass die industrielle Problemstellung des Projekts in der nötigen Tiefe unter Berücksichtigung der ganzen Komplexität untersucht und entlang der gesamten Wertschöpfungskette geforscht wird. Die Zusammensetzung des Verbunds aus Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen bot gute Voraussetzungen für die Erfüllung aller Teilaufgaben. Mit dem risikoreichen Verbundprojekt sollte die Technologieführerschaft der beteiligten Partner bei High-Tech-Komponenten des Schiffbaus gezielt ausgebaut werden. Die mit dem Projekt verbundenen hohen technischen und wirtschaftlichen Risiken konnten trotz des hohen Innovationspotenzials durch die beteiligten Verbundprojektpartner nicht allein getragen werden.

Aufbauend auf den o. g. Vorgängerprojekten und einer großen Anzahl von Industrieprojekten im Bereich der Kolbenentwicklung im Auftrag renommierter Industrieunternehmen waren



hervorragende Voraussetzungen für die erfolgreiche Bearbeitung des Teilprojektes gegeben. Die Zusammenarbeit mit den Verbundprojektpartnern und die konsequente Nutzung der sich daraus ergebenden synergetischen Effekte waren eine wesentliche Voraussetzung für den erfolgreichen Abschluss des vorliegenden Teilprojekts.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung der Aktivitäten und des zeitlichen Ablaufes sowie die Bearbeitung des Teilprojektes 1 „Simulationsgestützte Entwicklung kosten- und emissionsoptimierter Leichtbaukolben für den maritimen Einsatz (Akronym: SimKoMar)“ ordneten sich in das Verbundprojekt „InKoMar - Innovative kosten- und emissionsoptimierte Leichtbaukolbenentwicklung für den Gasbetrieb maritimer Dual-Fuel-Großmotoren ein.

Die Bearbeitung des Teilprojektes erfolgte in enger Kooperation mit den Verbundprojektpartnern:

- die SECO GmbH (Teilprojekt 2)
- die WTZ Wissenschaftlich-Technisches Zentrum Roßlau gGmbH (Teilprojekt 3).

Die MET Motoren- und Energietechnik GmbH übernahm die Koordinierung des Verbundvorhabens. Eine gemeinsame Kooperationsvereinbarung wurde unterzeichnet.

Mit den Projektpartnern der Teilprojekte erfolgte eine enge inhaltliche und zeitliche Abstimmung der Aktivitäten. Projekttreffen im Verbund wurden regelmäßig durchgeführt, um die erreichten Ergebnisse vorzustellen, den aktuellen Bearbeitungsstand der Teilprojekte abzugleichen und den weiteren Lösungsweg zu diskutieren und abzustimmen.

Mit der systematischen und planmäßigen Bearbeitung des Teilprojekts wurden wesentliche Grundlagen für die Entwicklung eines neuen Konstruktionsansatzes für einen zukünftigen Großmotorenkolben gelegt, bei dem die komplizierte und kostenaufwändige Schmier- und Kühllözlufte über Pleuel durch eine einfache Spritzdüsenölszufuhr über eine Düse ersetzt werden soll und dessen Fertigungsaufwand konkurrenzfähig ist.

Das Teilprojekt 1 wurde um 2 Monate bis zum 30.09.2022 verlängert, da der im Teilprojekt 2 für Versuche vorgesehene 1-Zylinder-Forschungsmotor havarierte und somit für längere Zeit unbrauchbar war. Die Motorenversuche konnten nur mit großer zeitlicher Verzögerung aufgenommen werden. Auf Grund der inhaltlichen Verflechtung der Teilprojekte, war auch eine Verlängerung des Teilprojektes 1 notwendig, um die entwickelten Simulationsmodelle zur Kolbenkühlung kalibrieren und verifizieren zu können. Die Simulationsergebnisse wiederum waren für die finale, dauerhafte Auslegung des innovativen Kolbens durch den Projektpartner SECO GmbH (Teilprojekt 2) notwendig.



Die Ausgangsplanung der Aktivitäten und des zeitlichen Ablaufes des Teilprojektes 1 wird in Tabelle 1 beschrieben.

Tabelle 1: Aktivitätenplanung

AP*	Aufgaben	Zeitraum
1.1	Erarbeitung des physikalischen Modells für die Schmier- und Kühlölaufuhr über Pleuel und Gleitschuh	08/19-10/19
1.2	Erarbeitung des physikalischen Modells der Ölaufuhr über eine Spritzöldüse und drucklose Schmierölversorgung der Kolbenbolzenlagerung	10/19-12/19
1.3	Überführung des physik. Modells aus AP 1.1 in ein numerisches Modell mit Vernetzung, Definition der Randbedingungen und Festlegung der Stoffwerte	12/19-02/20
1.4	Überführung des physik. Modells aus AP 1.2 in ein numerisches Modell mit Vernetzung, Definition der Randbedingungen und Festlegung der Stoffwerte	03/20-04/20
1.5	Erweiterung des numerischen Modells von AP 1.4 um das Teilmodell der dynamischen Schmierölversorgung der Kolbenbolzenlagerung innerhalb des Shakervorganges	05/20-06/20
1.6	Erarbeitung des physikalischen Modells der Wärmeübertragung vom Brenngas zum Kühlraum für die beiden unterschiedlichen Ölaufuhrvarianten	07/20-09/20
1.7	Überführung der physikalischen Modelle von AP 1.6 in numerische Modelle mit Vernetzung, Definition der Randbedingungen und Festlegung der Stoffwerte; Abstimmung und Anpassung der Schnittstellen zur Übernahme der thermo-dynamischen Randbedingungen	10/20-12/20
1.8	Simulation des gesamten Wärmetransportvorgangs vom Brenngas zum Kühlmittel für beide Ölaufuhrvarianten	12/20-03/21
1.9	Simulation der Schmierölaufuhr zum Kolbenbolzenlager im Rahmen des Shakervorgangs	02/21-04/21
1.10	Auswertung und Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse aus AP 1.8 und AP 1.9	04/21-05/21
1.11	Anpassung eines vorhandenen Versuchsstands zum Reibschweißen von Kolben mit Durchmessern von 150 mm bis 250 mm und Durchführung von Versuchen zum Nachweis der Machbarkeit	12/20-04/21
1.12	Aufbau eines virtuellen Technologiedemonstrators bestehend aus dem Gesamtmodell der Wärmeübertragung vom Brenngas zum Kühlöl sowie einer optimierten Brennraumform	05/21-08/21

1.13	Nutzung des virtuellen Technologiedemonstrators zur Analyse und Bewertung der Beeinflussung der Wärmeübertragung durch betriebsbedingte Verkokungen an den thermisch hochbelasteten Kühlraumoberflächen	09/21-01/22
1.14	Erzeugung und experimentelle Untersuchung von Verkokungsschichten auf Grundlage der vorhergesagten Oberflächentemperaturen aus den Simulationen	08/21-01/22
1.15	Analyse und Bewertung der Wärmeleitung von Verkokungsschichten; Maßnahmen zur Verhinderung/Reduzierung des Aufbaus von Verkokungen im Kühlraum	02/22-03/22
1.16	Haltbarkeitsnachweis für neu erarbeitetes Kolbendesign auf Anforderung des Projektpartners SECO; Bereitstellung der statischen und dynamischen Werkstoffeigenschaften durch den Projektpartner WTZ; Übergabe der Ergebnisse des Haltbarkeitsnachweises an Projektpartner SECO	09/21-05/22
1.17	Analyse und Bewertung des wirtschaftlichen Vorteils der Spritzdüsenölaufuhr im Vergleich zur Pleuel/Gleitschuh-Ölauführung zum Kolben	06/22-07/22
	Verlängerung des Teilprojektes 1	bis 09/22

*Arbeitspaket

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der fortgeschrittene wissenschaftliche Stand in der Leichtbaukolbenentwicklung, an den in diesem Vorhaben angeknüpft wurde, war mit den Forschungsergebnissen in den beiden Vorhaben (G-KOM, FKZ: 03SX445) und (SimShaker, FKZ: 03SX415) gegeben.

Da die MET GmbH in den genannten beiden Vorhaben als Verbundprojektpartner beteiligt war, hatte sie direkten Zugang zu den neuesten Erkenntnissen sowohl für den Diesel-/Schweröl-Kolben (G-KOM) als auch für den Gasmotoren-Kolben (SimShaker).

Die neuesten Erkenntnisse aus den vorangegangenen beiden Verbundvorhaben wurden in dem abgeschlossenen Vorhaben zusammengeführt und waren eine wichtige Basis für die durchgeführte Entwicklung eines kosten- und emissionsoptimierten Dual-Fuel-Großmotorenkolben.

Startend von diesem fortgeschrittenen wissenschaftlich-technischen Stand konnten im abgeschlossenen Vorhaben bemerkenswerte neue Erkenntnisse und Lösungsansätze für die Entwicklung zukünftiger kosten- und emissionsoptimierter Leichtbaukolben für den maritimen Einsatz erarbeitet werden, über die ausführlicher im Abschnitt II zu den erzielten Ergebnissen berichtet wird.



5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Verbundprojekt „InKoMar – Innovative kosten- und emissionsoptimierte Leichtbaukolbenentwicklung für den Gasbetrieb maritimer Dual-Fuel-Großmotoren“ wurde, wie oben bereits benannt, mit den leistungsstarken Partnern aus Sachsen-Anhalt ausgeführt.

Auf Basis des unterzeichneten Kooperationsvertrages für das Verbundprojekt zwischen den Projektpartnern fanden zur Sicherung des Fortschritts der Arbeiten regelmäßig, auf Grund der Coronavirus-Pandemie in der Regel, Online-Projektberatungen statt.

Um den Aufgabenumfang kompetent, mit sehr großem Know-how sowie der spezifischen fachlichen Kompetenz in dem eng gesteckten Zeitrahmen realisieren zu können, war die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit der beteiligten Partner sinnvoll und notwendig.

Die notwendige enge Zusammenarbeit ergab sich aus Sicht der MET GmbH, die die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Entwicklung eines neuartigen Kolbenkühlsystems und einer neu gestalteten Kolbenbrennraumform ausführte und die schrittweise experimentelle Evaluierung der Simulationsergebnisse vornahm, zum einen mit der SECO GmbH, die eine neue Fertigungstechnologie entwickelte und einen realitätsnahen Demonstrator fertigte und zum anderen mit der WTZ Roßlau gGmbH, die mit einem neu entwickelten Messverfahren unter Einsatz von modernsten Online-Datenübertragungs- und -speichersystemen im Realversuch am Forschungsmotor im Rahmen der experimentellen Überprüfung die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse überprüfte.



II Eingehende Darstellung

1. Erzielte Ergebnisse

1.1 Entwicklung einer vereinfachten kostenoptimierter Kühl- und Schmierölversorgung für Kolben in maritimen Dual-Fuel-Großmotoren

Das Ziel des Projekts bestand darin, zu untersuchen, ob die heute übliche komplizierte Kühl-/Schmierölaufuhr zum Großmotorenkolben über Pleuel und Gleitschuh bzw. Kolbenbolzen durch ein zu entwickelndes, neuartiges Kolbenkühlsystem mit einfacher Spritzölversorgung in Kombination mit einer reibgeschweißten Verbindung zwischen Kolbenober- und -unterteil ersetzt werden kann. Gleichzeitig sollte untersucht werden, inwiefern diese konstruktiven Änderungen zu einer Reduzierung der Masse des Kolbens und anderer Triebwerkselemente, wie Pleuel und Kolbenbolzen, genutzt werden können. Im Fokus der Bearbeitung des FuE-Projekts stand dabei die Entwicklung, Testung und Anwendung von leistungsfähigen Simulations- und Optimierungswerkzeugen, um verschiedene innovative Lösungsansätze für die Kühl- und Schmierölversorgung, die Brennraumgeometrie sowie den Wärmeübergang vom Brenngas zum Kühlmittel zukünftiger Großmotorenkolben für den Dual-Fuel-Betrieb an einem "virtuellen Kolben" zu untersuchen und zu vergleichen. Durch den konsequenten Einsatz von durchgängig simulationsgestützten Entwicklungsmethoden sollten die zukünftigen Entwicklungszeiten für Kolben erheblich verkürzt, die Treffsicherheit neuartiger Lösungen deutlich erhöht und die Entwicklungskosten drastisch gesenkt werden.

Es war zu beachten, dass die entwickelten Modelle für den „virtuellen Kolben“ mit entsprechenden Anpassungen (brennraumseitig) für die Bewertung der Wärmebilanzen im Kolben bei der Verwendung von nicht fossilen, klimaneutralen Kraftstoffen geeignet sind.

Zum Projektbeginn wurde von allen Projektpartnern festgelegt, dass zwei Kolbendesigns untersucht werden. Zum einen wurde ein existierendes Kolbendesign eines sogenannten „seriennahen Kolbens“ mit traditioneller Kühl- und Schmierölversorgung über Pleuel und Kolbenbolzen, welcher vom Projektpartner SECO GmbH seit Jahren hergestellt wird und zur Erprobung am Forschungsmotor des Projektpartners WTZ gGmbH geeignet ist, ausgewählt. Basierend auf dem Seriendesign wurde der Messkolben so modifiziert, dass beide Ölversorgungssysteme sowohl durch das Pleuel als auch mit einer Spritzdüse für die Kolbenkühlung realisiert werden konnten. Um den WTZ Forschungsmotor nicht zu gefährden, wurde die Schmierung des Kolbenbolzens durch das Pleuel für beide Varianten der Ölaufuhr zu den Kühlräumen des Kolbens gesichert.

Zum anderen wurde ein zweites Kolbendesign durch die SECO GmbH unter direkter Verfolgung des Projektzieles der Entwicklung eines reibgeschweißten Leichtbaukolbens für den Gasbetrieb maritimer Dual-Fuel-Motoren untersucht. Die durch die MET GmbH durchgeführten Simulationen wurden mit der SECO-Designvariante als Vorzugsvariante ausgeführt.



Für die Entwicklung der Simulations- und Optimierungswerkzeuge wurden im ersten Schritt die physikalischen Modelle für die Schmier- und Kühllölaufuhr formuliert und in numerische Modelle umgesetzt (AP 1.1-1.4).

Gestützt auf die von den Projektpartnern WTZ gGmbH und SECO GmbH gelieferten 3D-Geometrien des Triebwerks und des Kolbens (Abbildung 1, links) wurde zuerst ein physikalisches Modell für die Schmier- und Kühllölaufuhr über das Pleuel und den Kolbenbolzen erstellt. Es wurde ein dreidimensionales geometrisches Modell der Ölaufuhr vom Hauptlager über die Kurbelwelle zum Pleuel und weiter zum Kolbenbolzen und den Kühlräumen des Kolbens extrahiert (Abbildung 1, rechts). Um die Kinematik des Triebwerks realitätsnah nachzubilden, wurden die Bewegungsgleichungen von jedem kinematischen Knoten aufgestellt und über den Drehwinkel der Kurbelwelle gekoppelt. Damit wurde im Modell das dynamische Verhalten des Festkörpers definiert.

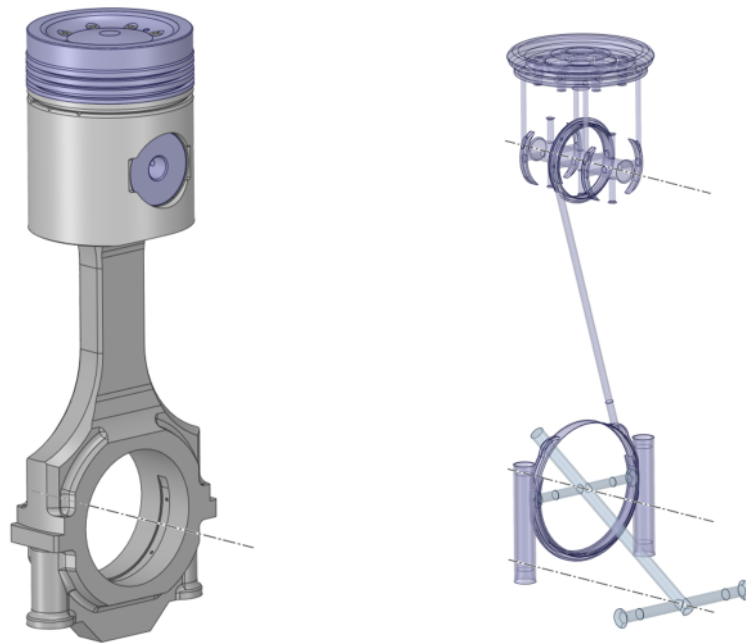


Abbildung 1: links: CAD-Modell des Kolbens und des Pleuels, rechts: Extrahiertes geometrisches Modell der Ölaufuhr

Für das Modell mit den Hauptkomponenten, die in der Abbildung 2 aufgelistet sind, wurde ein 1,5-dimensionales strömungsmechanisches Modell erarbeitet.

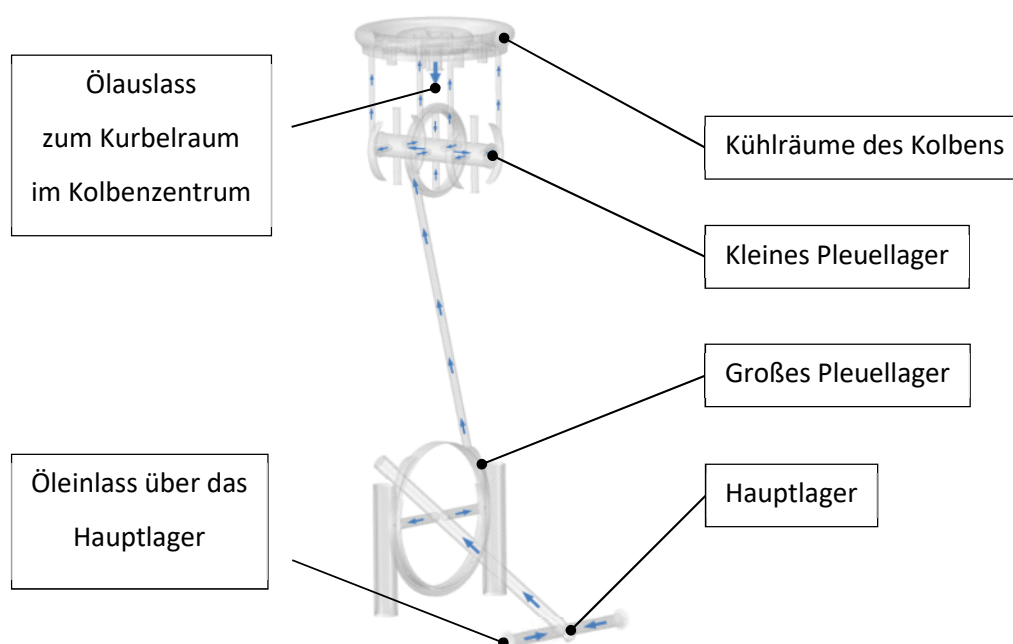


Abbildung 2: Hauptkomponenten des Ölzufuhrsystems mit angedeutetem Öldurchfluss

Dieses Modell realisiert die Aufteilung des Ölvolumenstromes aus der Pleuelbohrung in zwei Ölströme (Abbildung 3). Der erste Ölstrom dient der Schmierung des Kolbenbolzens (rote Pfeile). Der zweite Ölstrom wird vom Kolbenbolzen über vier Kanäle in die Kühlräume des Kolbens geführt (grüne Pfeile).

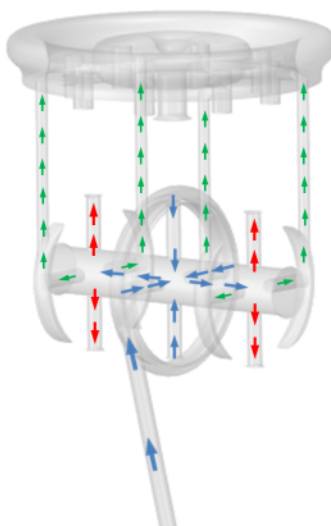


Abbildung 3: Aufteilung des Ölstromes aus der Pleuelbohrung (blau) in den Pfad zur Kolbenbolzenlagerung (rot) und den Pfad zu den Kühlräumen des Kolbens (grün)

Als Ergebnis liegen die Ölvolumenströme in jedem hydraulischen Berechnungspunkt in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel vor.

Danach wurde eine Schnittstelle entwickelt, welche die im 1,5-dimensionalen Modell berechneten kurbelwinkelabhängigen Ölströme über die vier Zuführkanäle an das 2-Phasen-

Shakermodell des Kolbenkühlraumes übergibt (Abbildung 3, Abzweigung mit grünen Pfeilen). Die zeitabhängigen Ölströme am Einlass in das Modell wurden mit der Bewegung des Shaker-Modells gekoppelt.

Die Betrachtung der Kolbenbolzenlagerung wurde in einem separaten Berechnungsmodell realisiert. Als Eintrittsbedingungen für das Schmieröl wurden vorher bestimmte Strömungsbedingungen in der Kolbenbolzenlagerung angewendet (Abbildung 3, Verzweigung mit roten Pfeilen). Mit dem Modell wurde eine Referenzauslegung definiert, die danach als Vergleich zur Auslegung mit der alternativen Ölversorgung des Kolbenbolzens diente.

Das Strömungsmodell wurde auf folgende Bereiche begrenzt: Kolben mit innerem und äußerem Kühlraum, Kolbenbolzen, kleinem Pleuellager und Ölzuführungsbohrung im Pleuel. Die notwendigen Vereinfachungen der Geometrie wurden vorgenommen, um ein numerisches Berechnungsnetz mit der erforderlichen Qualität zu erzeugen. Nach der Überführung der Strömungsgebiete in ein numerisches Modell wurden die strömungstechnischen und thermischen Randbedingungen implementiert. Neben der Kinematik des Triebwerks wurden auch die strömungstechnischen Randbedingungen zeitabhängig auf dem Einlass in das Strömungsgebiet definiert. Die periodische Relativbewegung zwischen Kolbenbolzen und Pleuel wurde in dem Modell implementiert, um die Strömungsverhältnisse realitätsnah nachzubilden. Das numerische Modell und die Verteilung des Öls in der Berechnungsdomäne in einem Zeitpunkt werden in der Abbildung 4 dargestellt.

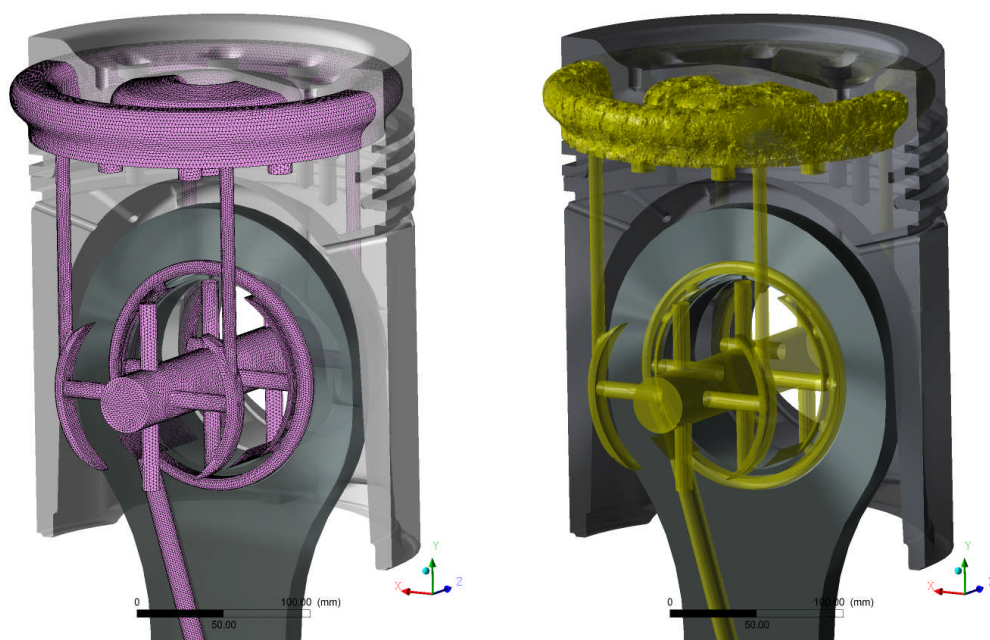


Abbildung 4: Numerisches Modell (links) und Verteilung des Öls im OT (rechts)

Nach der Testphase wurden die Ergebnisse auf ihre physikalische Richtigkeit und Plausibilität geprüft. Eine Anpassung der zeitabhängigen strömungstechnischen Randbedingung auf den

Einlass in das Strömungsgebiet wurde vorgenommen. Zusätzlich wurde die Verteilung der Massenströme zwischen Shakerraum und Kolbenbolzenlager bewertet.

Alternativ zur Ölversorgung des Kolbens und des Kolbenbolzens durch die Pleuelbohrung wurde ein Modell entwickelt, in dem die Ölversorgung über eine Spritzdüse erfolgt. Das Grundmodell konnte nach geometrischen Anpassungen aus dem Vorhaben SimShaker übernommen werden und wurde anschließend um die Schmierölversorgung für die Kolbenbolzenlagerung erweitert.

Das physikalische Shakermodell der Kolbenkühlung wurde um die Versorgung der Kolbenbolzen erweitert. Dazu wurde das Modell mit zusätzlichen Kanälen versehen über die das Öl von den Kühlräumen des Kolbens zum Kolbenbolzenlager gelangt. Die Anordnung dieser Kanäle wurde in verschiedenen Konfigurationen so vorgesehen, dass man bei diesem drucklosen Schmierungskonzept des Kolbenbolzens gleichzeitig zwei Effekte ausnutzt:

- die Beschleunigung des Kühllöls aus den Kühlräumen des Kolbens und
- die Pumpwirkung, welche aus der Relativbewegung des Kolbenbolzens und der Lagerschalen resultiert.

Bei der Erstellung des numerischen Modells der Spritzdüse mussten spezielle Annahmen getroffen werden, um das in der Realität auftretende physikalische Phänomen der Ausbreitung des Freistrahls korrekt zu berücksichtigen. Abbildung 5 zeigt die Ausbreitung des Freistrahls für zwei Düsen. Die Ausbreitung des Strahls ist stark von der konstruktiven Auslegung der angewendeten Düse und dem Betriebsdruck des Kuhlöls abhängig. Die Implementierung eines numerischen Düsenstrahl-Modells im Gesamtmodell der Shakerkolbenkühlung ist wegen der damit verbundenen wesentlichen Erhöhung des Rechnerzeitaufwandes nicht zielführend. Durch die Berücksichtigung einer mittleren Fangrate der Düse kann aber der Düsenstrahl entsprechend modelliert werden. Die Fangrate wird definiert als Verhältnis der in den Kühlraum eintretenden Ölmenge zu der aus der Düse austretenden Ölmenge. Die genaue Berücksichtigung dieser Parameter in dem numerischen Modell spielt eine zentrale Rolle, da dies die Ölmassenströme im Shakerkühlungsprozess stark beeinflusst.



Abbildung 5: Visualisierung der Ausbreitung des Freistrahls auf dem Prüfstand der MET GmbH: links - Düse mit konstantem Querschnitt, rechts - Düse aus dem Projekt SimShaker

Unter den genannten Voraussetzungen wurde eine Schnittstelle entwickelt und umgesetzt, die die Übertragung der Ölmenge vom Düsenaustritt in den Eintritt des Kolbens physikalisch korrekt beschreibt. Diese Schnittstelle erlaubt sowohl eine variable Anpassung des Berechnungsmodells an beliebige geometrische Formen der Spritzdüse als auch die Modellierung der realen Geschwindigkeit im Ölstrahl. In Abbildung 6 wurde die Ölverteilung in den Kühlräumen des Kolbens einer Shakerkühlungssimulation dargestellt, in der die oben beschriebene Schnittstelle angewandt wurde.

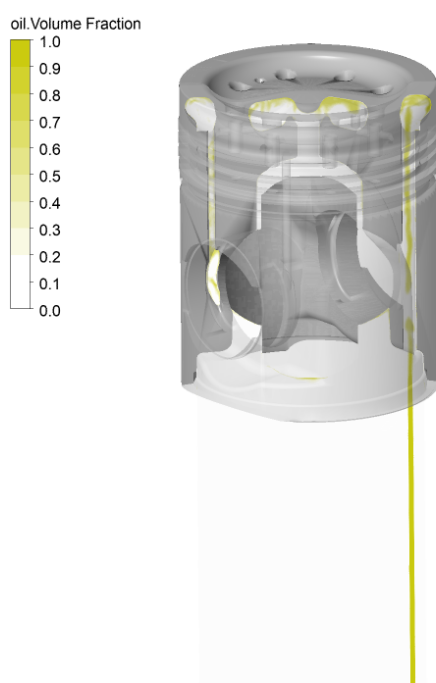


Abbildung 6: Ergebnis der Shakersimulation mit der Düsen-Schnittstelle

Im nächsten Schritt wurde im Shakerkühlungsmodell eine weitere Domain implementiert, die zusätzlich zu der translatorischen Bewegung des Kolbens auch die Schwenkbewegung des Pleuelkopfes simuliert (Abbildung 7).

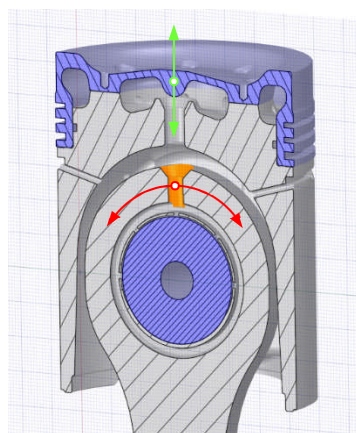
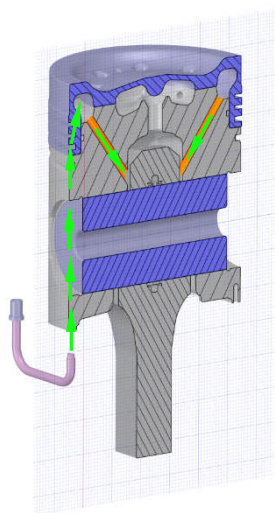


Abbildung 7: Darstellung der beiden im Berechnungsmodell implementierten Bewegungsarten, Grün – translatorisch, Rot - schwenkend

Im dreidimensionalen numerischen Berechnungsmodell wurde dabei die Vereinfachung getroffen, dass nur der Pleuelkopf ohne Pleuelschaft modelliert wird. Nach diesen Erweiterungen wurde das Modell in zwei Varianten (Abbildung 8) der drucklosen Schmierölversorgung des Kolbenbolzens aus den Kühlräumen des Kolbens erprobt.

Variante 1



Variante 2

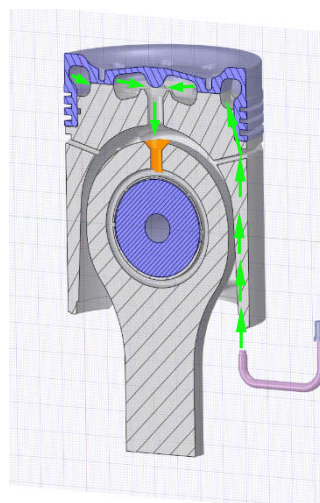


Abbildung 8: Zwei Varianten der drucklosen Schmierölversorgung aus den Kühlräumen des Kolbens

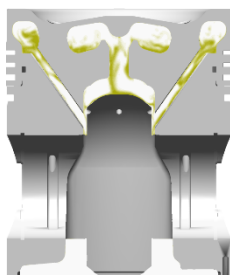
Für die beiden in Abbildung 8 dargestellten Geometrievarianten wurden numerische Simulationsmodelle erstellt, die Randbedingungen aufgeprägt und die Kopplung von neu entwickelten Teilmodellen getestet. Im ersten Schritt lag der Fokus auf der Problematik der drucklosen

Schmierölversorgung des Bolzenlagers. Dieser dynamische Vorgang wurde für die beiden Geometrievarianten in Abbildung 9 bei unterschiedlichen Kurbelwellenwinkeln dargestellt.

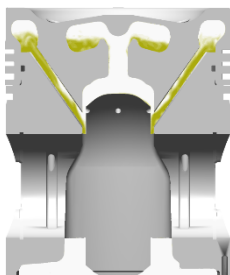
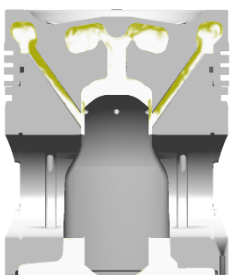
Danach wurden in dem erprobten numerischen Modell eine Schnittstelle bestimmt, an der Ölvolumen und dynamischer Druck ausgewertet werden. Diese Schnittstelle ermöglicht eine Kopplung zwischen Shakerkühlungssimulation und dem Lagerberechnungsmodell für das Kolbenbolzenlager. Diese neuartige Kopplung zwischen der Simulation der Shakerkühlung und der Berechnung der tribologischen Bedingungen im Kolbenbolzenlager wurde realisiert und an dem virtuellen Modell erprobt.

Variante 1

Oberer Totpunkt (OT)

90° Kurbelwellenwinkel
nach OT

Unterer Totpunkt (UT)

90° Kurbelwellenwinkel
nach UT

Oberer Totpunkt (OT)

Variante 2

Abbildung 9: Darstellung der Ölverteilung während des dynamischen Vorgangs der drucklosen Schmierölversorgung des Kolbenbolzens zu verschiedenen Zeitpunkten für zwei untersuchte Geometrievarianten.

Die zwei Varianten der alternativen dynamischen Ölversorgung des Pleuellagers durch Öl aus dem Pleuel-Schmierraum wurden analysiert und bewertet. Das in Abbildung 10 dargestellte Design wurde für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, da nur diese Variante am Forschungsmotor des Projektpartners WTZ, der für die Evaluierung vorgesehen war, im entworfenen Messpleuel umsetzbar war.

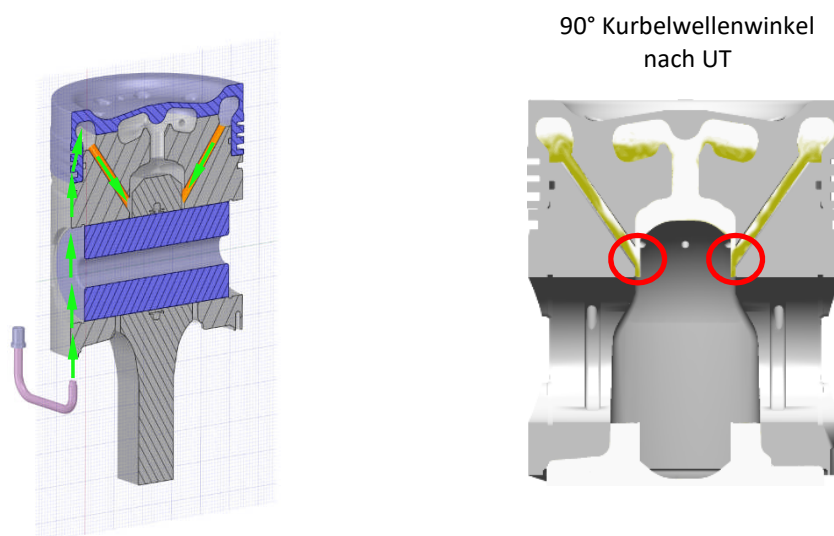


Abbildung 10: links: Drucklose Schmierölversorgung über die Kühlräume des Pleuels, rechts: Ölverteilung während des dynamischen Vorgangs mit markierten Schnittstellen zur Lagerberechnung

In das Gesamtmodell der Pleuelkühlung wurden neuartige Schnittstellen zur Übergabe dynamischer Prozessdaten wie

- Versorgungsdruckverlauf in der Schmierölnut
- Relative Drehzahl (Schwenkbewegung des Pleuelauges)
- Lagerlast (Pleuelkraftverlauf)

in das Lagerberechnungsprogramm implementiert, getestet und erfolgreich eingesetzt.

Außerdem wurde die lokale Änderung der Viskosität auf Grund der Temperaturerhöhung des Öls infolge von Flüssig- bzw. Mischreibungseffekten berücksichtigt.

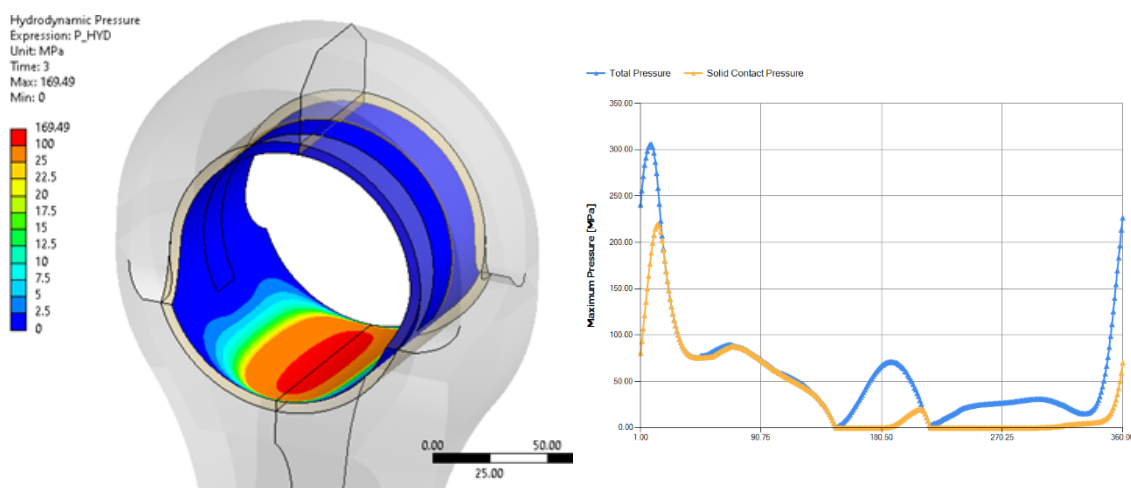


Abbildung 11: Hydrodynamische Druckverteilung (links) und Total- sowie Kontaktdruckverlauf (rechts)

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde das physikalische Modell der Wärmeübertragung vom Brenngas zum Kühlraum für die beiden Varianten der Kühlölauführung über das Pleuel bzw. über eine Spritzdüse erarbeitet. Wie in Abbildung 12 dargestellt, besteht dieses physikalische Modell aus drei gekoppelten Submodellen. Im ersten Submodell wurde die Wärmezufuhr von Brenngas zum Kolbenoberteil definiert. Im zweiten Submodell wurde die Wärmeabfuhr vom Kolben zum Kühlöl für die beiden untersuchten Kühlölauführungsvarianten charakterisiert. Im letzten Schritt wurden die Einflussparameter für das Teilmodell der Wärmeleitung im Kolben determiniert und dadurch die Kopplung zwischen den Submodellen gewährleistet. Das entwickelte physikalische Modell wurde mit dem Ziel konzipiert, die Wärmeübertragung von Brenngas zum Kühlöl realitätsnah zu beschreiben und eine gute Vergleichbarkeit der Kühlleistung von beiden Kühlölauführungsvarianten zum Kolben zu sichern.

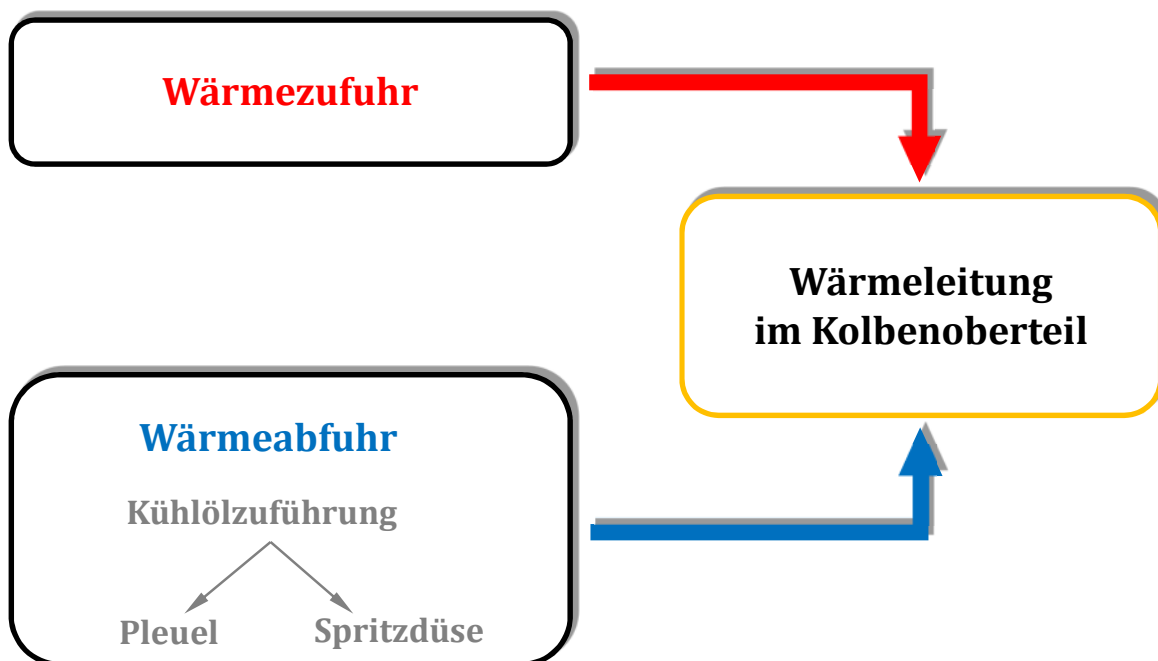


Abbildung 12: Physikalisches Modell der Wärmeübertragung vom Brenngas zum Kühlraum im Kolben

Nach der Konzipierung des physikalischen Modells wurde das Modell in ein numerisches Berechnungsmodell übertragen. Im Einzelnen begann das Pre-Processing mit der Generierung von numerischen Netzen mit deren Hilfe das Berechnungsgebiet in der erforderlichen Feinheit diskretisiert wurde, die besonders im Bereich hochdynamischer Änderungen (Kolbenkühlung) von Bedeutung sind. In dem angewendeten numerischen CFD-Modell wurde das Berechnungsnetz direkt an den Wänden des Kolbens mit solcher Feinheit modelliert, dass die Anforderungen der beiden physikalischen Hauptphänomene mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt werden konnten:

- die zweiphasige turbulente Strömung des Kühllöl-Luft-Gemisches und
- die wandnahe Wärmeübertragung zu diesem Gemisch.

Die temperaturabhängigen Eigenschaften des Kühllöls, wie die Viskosität, die Wärmekapazität und die Dichte, wurden für den Temperaturbereich zwischen 80 °C und 300 °C im Solver hinterlegt.

Zusätzlich dazu wurden, in Abhängigkeit von der Variante der Kühllölauführung, die strömungstechnischen Randbedingungen für den Öleinlass definiert. Die dynamische Bewegung des Kolbens wurde in beiden CFD-Modellen, sowohl bei der Kühllölversorgung über das Pleuel als auch bei Anwendung der Spritzdüsen, identisch modelliert.

Parallel dazu wurde ein FEM-Modell des Kolbenoberteils vorbereitet, in dem der Wärmeleitungsvorgang innerhalb des Kolbenoberteils abgebildet wird. In diesem Modell wurden die thermischen Stoffwerte des Kolbenmaterials (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) im Temperaturbereich zwischen 100 °C und 400 °C festgelegt.

Brennraumseitig wurden die Randbedingungen im ersten Schritt basierend auf Erfahrungswerten definiert, da zu diesem Zeitpunkt des Projektes keine anderen Datensätze verfügbar waren (Verbrennungssimulation bzw. Temperaturmesswerte am Kolben). Damit wurde die Vergleichbarkeit zwischen den Modellen der Kühllölauführung garantiert, da die brennraumseitigen Randbedingungen in beiden Fällen identisch gewählt wurden.

Zwischen dem CFD-Modell der Kolbenkühlung und dem FE-Modell der Wärmeleitung im Kolbenoberteil wurden Schnittstellen definiert, um die Wechselwirkung der thermodynamischen Randbedingungen zwischen den Sub-Modellen zu sichern.

Der Wärmetransport vom Brennraum zum Kühlmittel wurde durch eine 3D-Simulation für beide Ölauführungsvarianten ermittelt. Im Ergebnis liegen bewertbare Wärmestromfelder an den Wänden des Kolbens vor, die einen Vergleich beider Varianten zulassen.

In Abbildung 13 ist deutlich zu erkennen, dass bei der Ölauführung durch die Spritzöldüse hohe Wärmeströme in einem breiten Bereich auftreten. Bei der Ölversorgung durch das Pleuel dagegen sind vier Hotspots erkennbar. Bei der Integration des Wärmestromes über die Flächen des Kolbenkühlraums konnte für beide Varianten ein vergleichbarer Gesamtwärmefluss ermittelt

werden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die beide Ölversorgungsvarianten gleichgestellt werden können.

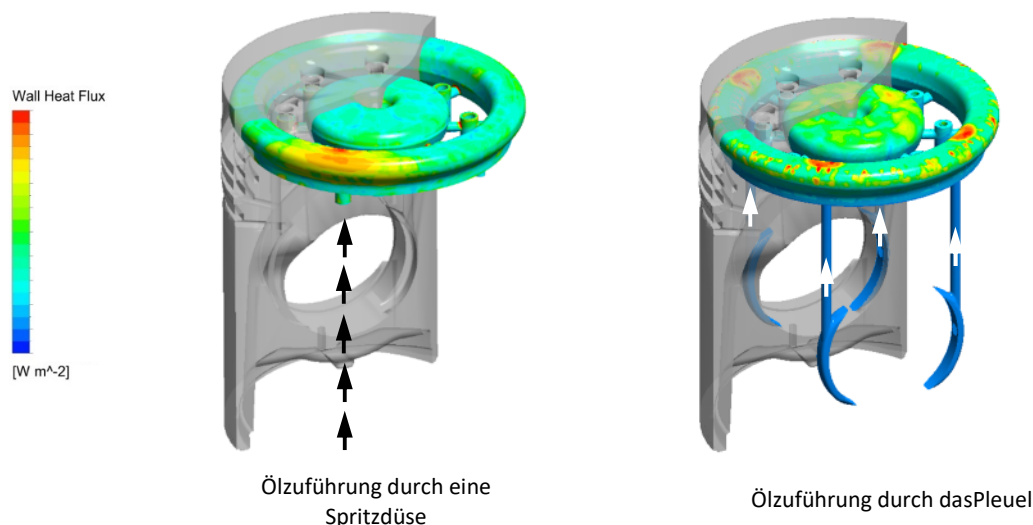


Abbildung 13: Darstellung des Wärmestroms über die Wände des Kolbenkühlraums für beide Ölzuführungsvarianten

Für Aussagen bezüglich der Kolbentemperatur ist die Annahme einer konstanten Kolbenbodentemperatur wie in den oben dargestellten Auswertungen nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurde eine statische thermische Randbedingung entwickelt, die eine örtliche Verteilung der Kolbenbodentemperatur berücksichtigt (Abbildung 14).

Die Auswertung der Simulationsergebnisse beider Ölversorgungsvarianten zeigt, dass die Wärmeübertragung vom Brennraum zum Kühlöl mit oben genannten thermischen Randbedingungen für beide Fälle vergleichbar ist und damit die Zielstellung einer extremen Leichtbauweise bei deutlich reduziertem Fertigungsaufwand für eine neuartige Ölversorgung der Pleuellagerung erreicht werden kann.

Realitätsnahe thermische Randbedingungen können nur durch eine transiente 3D-CFD-Verbrennungssimulation geliefert werden. Aber basierend auf den getroffenen Annahmen war der Vergleich der beiden Ölzuführsysteme physikalisch korrekt durchführbar.

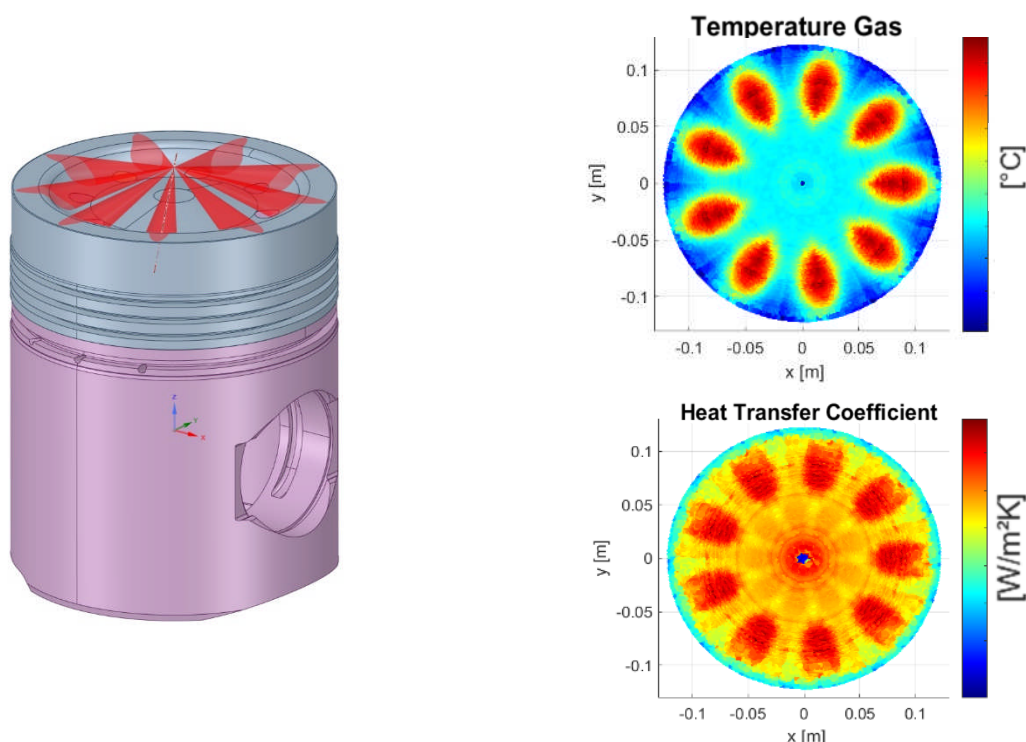


Abbildung 14: links: Kolben mit angenommenem Strahlbild der Einspritzdüsen, rechts: Brennraumseitige Randbedingungen für die Berechnung von mittleren Kolbentemperaturen

Um die Vorhersage bezüglich der realen Temperaturen im Kolben zu präzisieren wurde durch die MET GmbH im Projektverbund vorgeschlagen, realitätsnahe transiente thermische Randbedingungen zu generieren, in dem durch den Projektpartner WTZ gGmbH eine Verbrennungssimulation für den Forschungsmotor FM24 durchgeführt wird.

Bei der Verbrennungssimulation, die durch den Projektpartner WTZ gGmbH durchgeführt wurde, haben sich alle Projektpartner geeinigt, dass diese nur für den Dieselmotorbetrieb des Dual-Fuel-Motors durchgeführt wird. Ein wichtiger Grund dafür war, dass beim Dieselmotorbetrieb wegen der konstanten und allgemein verfügbaren Brennwerte des Diesel-Kraftstoffes eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Simulations- und Messergebnissen gewährleistet werden kann. Das ist beim Gasbetrieb nicht der Fall, weil der Brennwert des Gases von der tagesaktuellen Methanzahl des gelieferten Kraftstoffes abhängig ist.

In enger Zusammenarbeit zwischen dem Projektpartner WTZ gGmbH und MET GmbH wurden die realitätsnahen transienten thermischen Randbedingungen brennraumseitig ermittelt und durch die entwickelten Schnittstellen von der Verbrennungssimulation des Projektpartners WTZ an das virtuelle Kolbenmodell der MET GmbH übergeben und angekoppelt. In Abbildung 15 sind gemittelte realitätsnahe thermische Randbedingungen, die in der Verbrennungssimulation berechnet wurden, dargestellt.

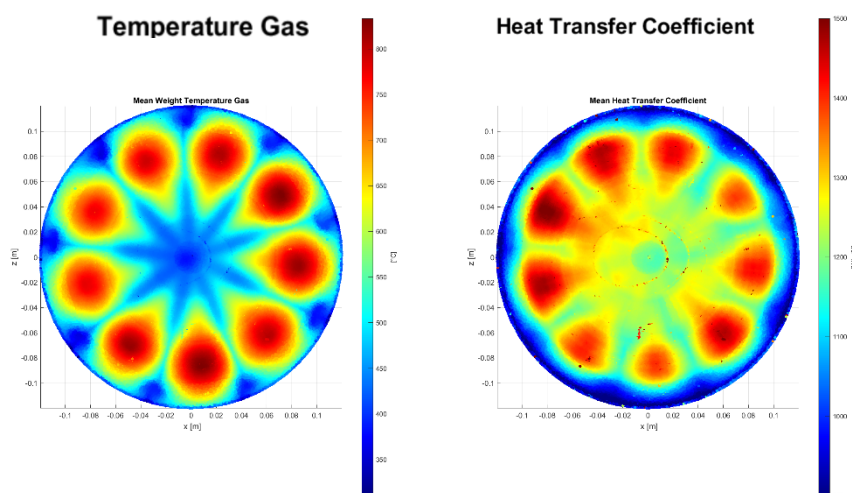


Abbildung 15: Zeitlich gemittelte thermische brennraumseitige Randbedingungen aus der Verbrennungssimulation des Projektpartners WTZ gGmbH

Diese thermischen Randbedingungen sind in den virtuellen Technologiedemonstrator eingeflossen und mit allen vorher entwickelten einzelnen Simulationsmodellen wie die Versorgung der Kolben mit Kühl- bzw. Schmieröl, die Versorgung des Kolbenbolzenlagers und die Wärmeübertragung vom Brenngas zum Kühllöl für ausgewählte Designvarianten zusammengeführt.

Im Folgenden wurde der virtuelle Technologiedemonstrator angewendet, um die realitätsnahen Temperaturfelder für die beiden Kolbendesigns zu ermitteln und zu bewerten (Abbildung 16).

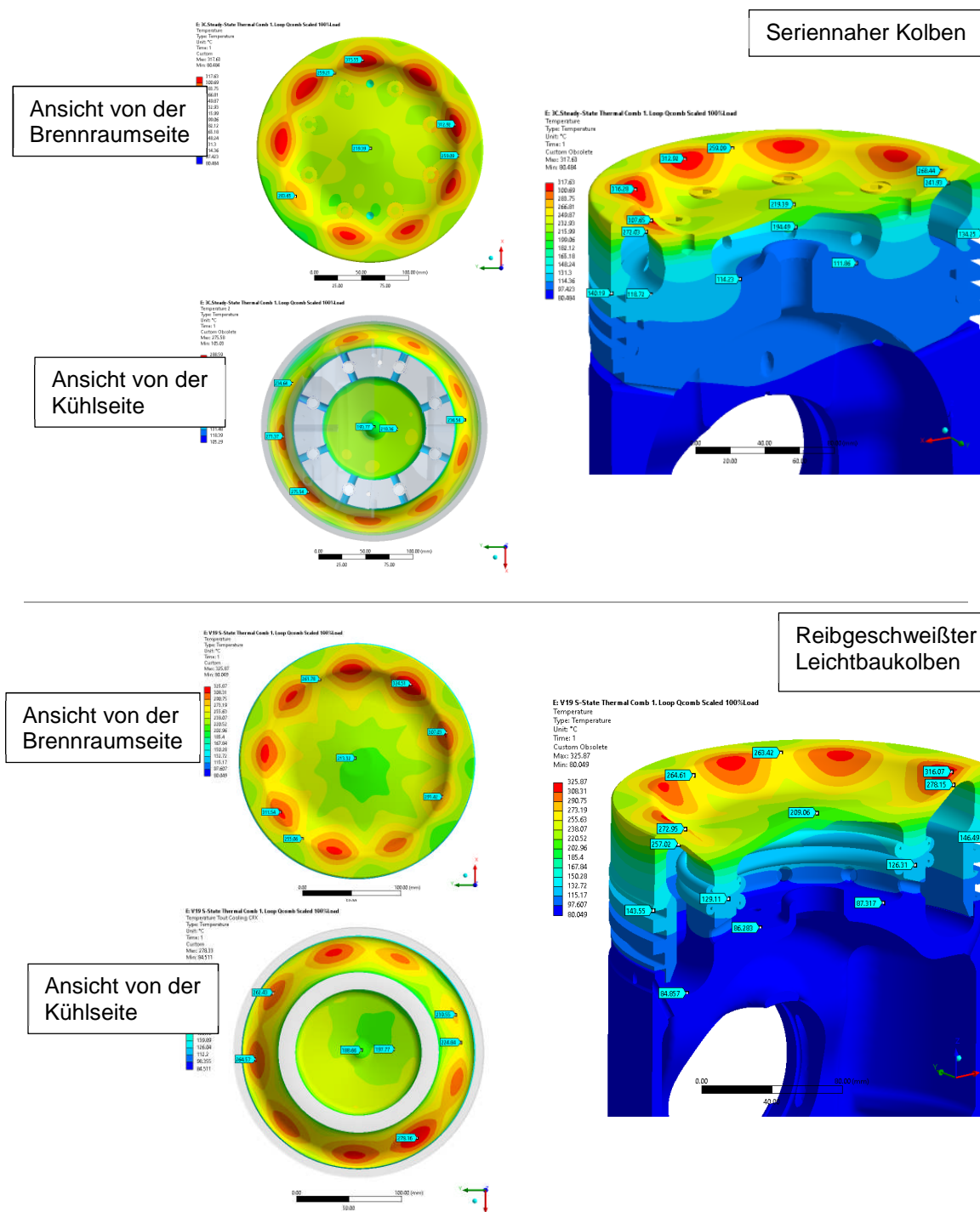


Abbildung 16: Berechnete Temperaturfelder in beiden Kolbendesignvarianten: oben – Seriennaher Kolben (Messkolben WTZ gGmbH), unten - Reibgeschweißter Leichtbaukolben (SECO-Designvariante)

Die experimentelle Evaluierung des errechneten Temperaturfeldes am „seriennahen Kolben“ erfolgte anhand der erhaltenen Anlassfarben auf dem Kolbenboden (Abbildung 17) unter Nutzung der Anlassfarben-Skala für den Werkstoff 42CrMo4 bei einer Motorlast von 75% des WTZ Forschungsmotors. Die Entstehung von Anlassfarben auf der Stahloberfläche ist ein

temperatur- und zeitabhängiger Oxidationsprozess, der es ermöglicht, die Temperatur bzw. das Temperaturfeld zu bestimmen, der eine Metalloberfläche ausgesetzt war.

Mit dem Bild der Anlassfarben an der Messkolbenkrone konnte eine Bewertung des errechneten zeitlich gemittelten Temperaturfeldes auf dem Kolben erfolgen. Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Fackelbild auf der Kolbenkrone und der örtlichen Verteilung des berechneten Temperaturfeldes (Abbildung 17). Die sehr gute Übereinstimmung des experimentell ermittelten Temperaturfeldes mit dem über den virtuellen Technologiedemonstrator errechneten Temperaturfeld spricht auch für die hohe Qualität der vom WTZ ausgeführten Verbrennungssimulation.

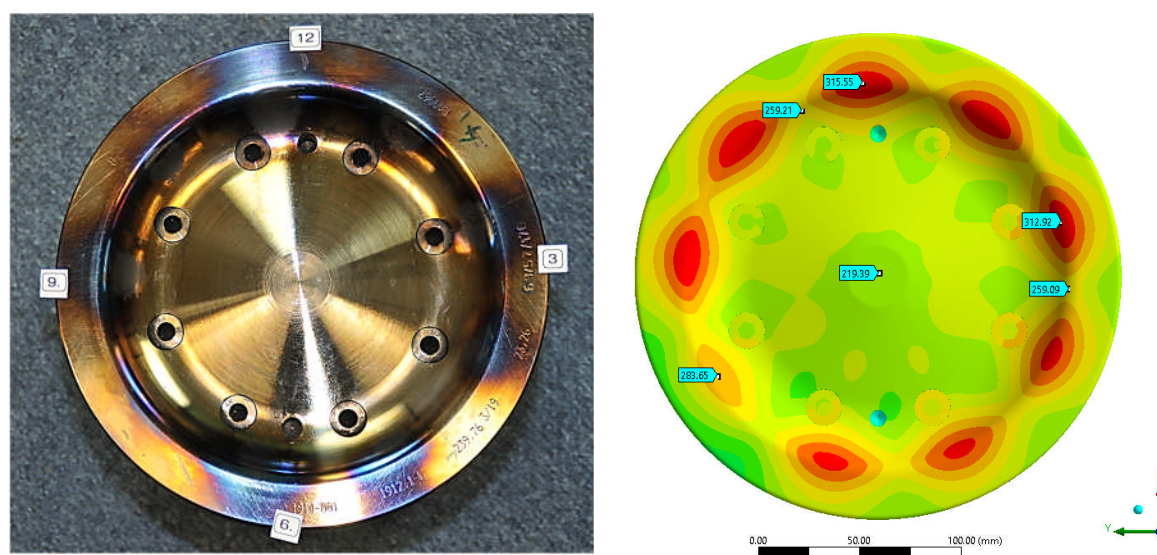


Abbildung 17: Anlassfarben an der Kolbenkrone (links) und Vergleich zu den berechneten Temperaturen (rechts)

Mit dieser Evaluierung der Simulationsergebnisse konnte der erreichte fortgeschrittene Stand des von der MET entwickelten Technologiedemonstrators eindrucksvoll nachgewiesen werden. Eine Bewertung der beiden Zuführungsvarianten des Kühlöls über Spritzdüse bzw. über Kurbelwelle-Pleuel war auf Basis der Simulationsergebnisse möglich. Auf dieser Grundlage können aus Sicht der Kolbenkühlung die beiden Ölzuführungsvarianten gleichgestellt werden. Konstruktiv ist eine Spritzdüsen-Variante einfacher zu gestalten und die Kühlölmenge kann bei Bedarf unkompliziert verringert (z. B. durch eine Blende im Ölzuführsystem) oder vergrößert (im Extremfall durch eine zweite Düse) werden. Diese Variante ist aber mit einer zusätzlichen Bau-Gruppe im Motordesign verbunden.

Bei der Ölversorgung über Kurbelwelle – Pleuel (Abbildung 18) ist eine Anpassung des Kühlöldurchflusses ohne Designänderung von Komponenten des Triebwerks nicht möglich. Zusätzlich ist in diesem Fall mit einer höheren Öleingangstemperatur zu rechnen, da das Öl auch an der Kühlung und Schmierung von allen Gleitlagern im einem Triebwerkstrang auf dem Weg zum

Kolben beteiligt ist. Diese höhere Temperatur muss durch einen größeren Öldurchsatz kompensiert werden, um die notwendige Kühlleistung im Kolben zu erreichen.

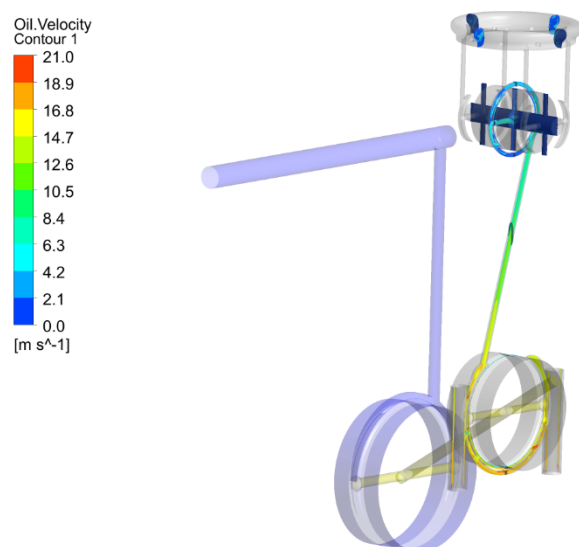


Abbildung 18: Ölpfadverlauf über Kurbelwelle-Pleuel-Kolbenbolzen-Kühlraum

Bei dem erkennbaren Trend zum dominanten Gasbetrieb bei Dual-Fuel-Motoren muss erneut ein Fokus auf die Brennraumform gelegt werden, um die CH-Emissionen und Klopfgefahr zu reduzieren. Dabei soll, ähnlich wie bei reinen Gasmotoren, die Position des Pleuellagerpakets soweit wie möglich nach oben verschoben werden. Bei dieser Position muss ein Kompromiss gefunden werden, um im Diesel-Betrieb die Temperaturen nach oben zu begrenzen und ein Verkoken und Klemmen der Pleuellager sicher auszuschließen. Die brennraumseitige Pleuellagerform soll unterstützend für die Erzeugung der notwendigen Turbulenz im Brennraum dienen. Alternativ kann diese Turbulenz auch durch die Anwendung einer Vorkammer für den Gasbetrieb erzeugt werden, was allerdings mit einer Änderung der Geometrie des Zylinderkopfes verbunden ist.

Neben der Optimierung der Brennraumform müssen auch die brennraumnahen Bauteile an den vorherrschenden Gasbetrieb bei Dual-Fuel-Motoren angepasst werden, um die so genannten „Toträume“ zu minimieren. Dies sind z. B. die Spalte zwischen Zylinderlaufbuchse und Zylinderkopf (im Dichtungsbereich) oder zwischen Pleuel und Pleuellagerbolzen (bzw. Anti-polish-ring). Jeder dieser Toträume führt beim Gasbetrieb mit äußerer Gemischbildung eines Dual-Fuel-Motors im Gegensatz zum Dieselpetrieb zu einem umweltschädigenden Methan-Schlupf und erhöht die CH-Emissionen.

1.2 Nutzung des entwickelten virtuellen Technologiedemonstrators zur Analyse und Bewertung von Verkokungserscheinungen am Kühlraumoberflächen von modernen gewichtsoptimierten Kolben

Bei der Leichtbaukolbenentwicklung für moderne Dual-Fuel-Motoren ist es zwingend notwendig, die Wandstärken des Kolbens möglichst gering zu halten, so dass das verwendete hochfeste Material mechanisch optimal ausgelastet wird. Demzufolge besteht im Entwicklungsprozess die Gefahr, dass Kühlraumoberflächen thermisch besonders hoch belastet werden. Im ungünstigen Fall können sich im Betrieb des Kolbens rasch unerwünschte Verkokungserscheinungen an den ölgekühlten Kühlraumoberflächen bilden. Die Verkokungsschichten haben stark isolierende Eigenschaften und behindern die Wärmeübertragung vom Brenngas zum Kühlmittel, wodurch es zu thermischen Beschädigungen am Kolben kommen kann.

Die Problemstellung der Ölverkokung an Kühlraumoberflächen im Kolben wurde in den AP13, AP14 und AP15 untersucht.

Der im Projekt entwickelte virtuelle Technologiedemonstrator, welcher realitätsnah die Wärmeübertragung vom Brennraum über den Kolbenkörper bis zum Kühllöl beschreibt, wurde entsprechend erweitert, um eine Abschätzung des Verkokungsrisikos an den Kühlraumoberflächen im Kolben zu ermöglichen und deren Auswirkung auf das Kolbendesign zu bewerten. Um das notwendige Know-how für das Entstehen der Ölverkokungsschichten und der Bestimmung deren physikalischer Eigenschaften zu sammeln, wurden mehrere Experimente durchgeführt.

Am Rande des früheren Projektes SimShaker (FKZ 03SX415B) wurde durch die MET GmbH, zu eigenen Lasten, ein erster thermo-mechanischer Versuchstand konzipiert, um außermotorisch Ölverkokung auf Versuchsproben zu erzeugen. Der Prüfstand wurde in dem aktuellen Projekt mit der notwendigen Steuerung und prüfstandspezifische Messtechnik nachgerüstet, um die Einhaltung der physikalischen Bedingungen für die Erzeugung der Verkokungsschicht zu sichern, sowie einen langzeitigen, wartungs- und bedienungsfreien Betrieb zu gewährleisten (Abbildung 19).

Auf dem Prüfstand wird ein Probekörper periodisch kontaktlos auf eine Temperatur oberhalb der thermischen Stabilität des Kühllöls (ca. 275 °C – 300 °C) erhitzt und dann in einen Behälter mit Kühllöl eingetaucht. Dieser Vorgang muss ungefähr 1000-mal wiederholt werden, um eine Verkokungsschicht von ca. 0,5 – 1 mm zu erzeugen.

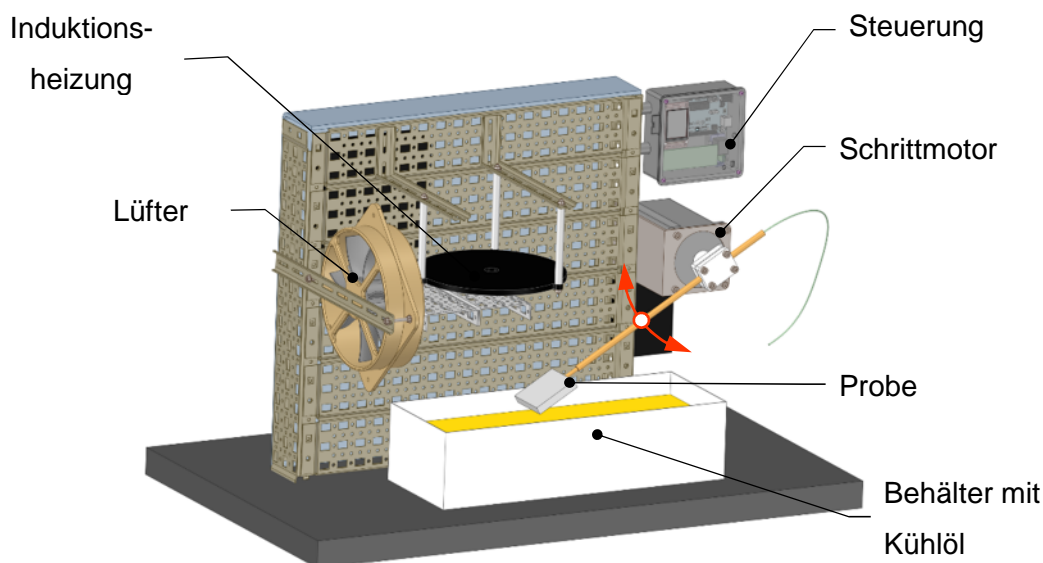


Abbildung 19: Verkokungsprüfstand und dessen Hauptkomponenten

In Rahmen des Versuchsprogrammes wurde eine Reihe von Versuchen durchgeführt, bei welchen die Probentemperatur bestimmt wurde, die zu einer ganzflächigen Verkokung der Probenoberfläche geführt hat (Abbildung 20, links). Die Gleichmäßigkeit des Temperaturfeldes des Probekörpers wurde mit einer Infrarotkamera kontrolliert (Abbildung 20, rechts).

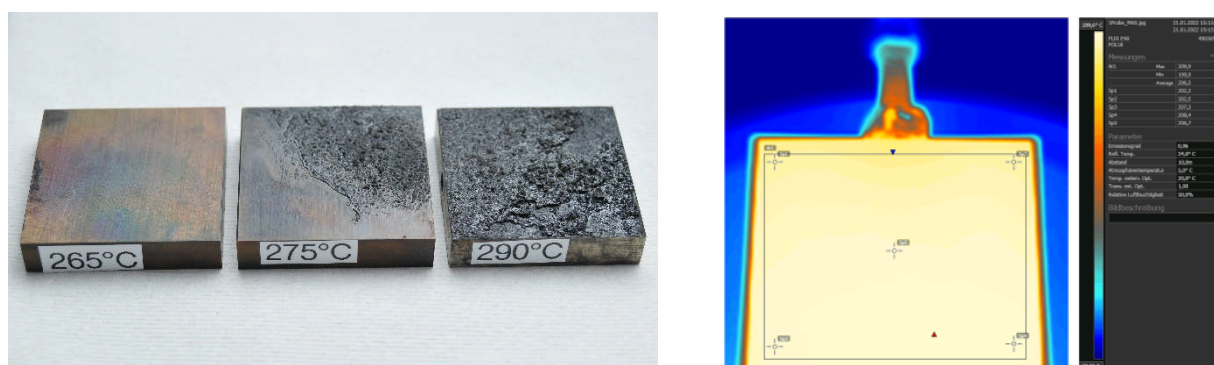


Abbildung 20: links: Verkokungserscheinungen bei unterschiedlichen Probentemperaturen
rechts: Temperaturfeld in der Probe mit Infrarotkamera bewertet

In Abbildung 21 wird eine außermotorisch erzeugte Verkokungsschicht auf einer Probe dargestellt.

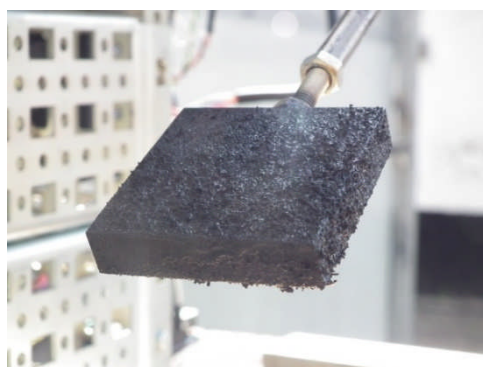


Abbildung 21: Außermotorisch erzeugte Verkokungsschichten auf einem Probekörper

Durch eine chemische Analyse der erzeugten Verkokungsschichten und deren Vergleich mit einer realen Verkokungsprobe, die direkt von einem gebrauchten verkokten Kolben entnommen wurde, konnte eine gute Übereinstimmung der chemischen Zusammensetzung festgestellt werden.

Um die reale Wärmeleitfähigkeit der erzeugten Verkokungsschichten zu untersuchen, wurde ein zusätzlicher Prüfstand entwickelt und aufgebaut. Für diese Untersuchung wurden spezielle Probekörper mit jeweils 4 integrierten Thermoelementen (Abbildung 22), welche auf der Oberfläche der Probekörper bündig laserverschweißt wurden, konstruiert und hergestellt. Diese Probekörper wurden auf dem Verkokungsprüfstand so eingesetzt, dass die Messpunkte der Thermoelemente direkt unter der Verkokungsschicht platziert sind. Für diese Proben wurde die Messtechnik des Prüfstandes weiterentwickelt, um die zusätzlichen Temperaturen während des Verkokungsprozess zu überwachen.

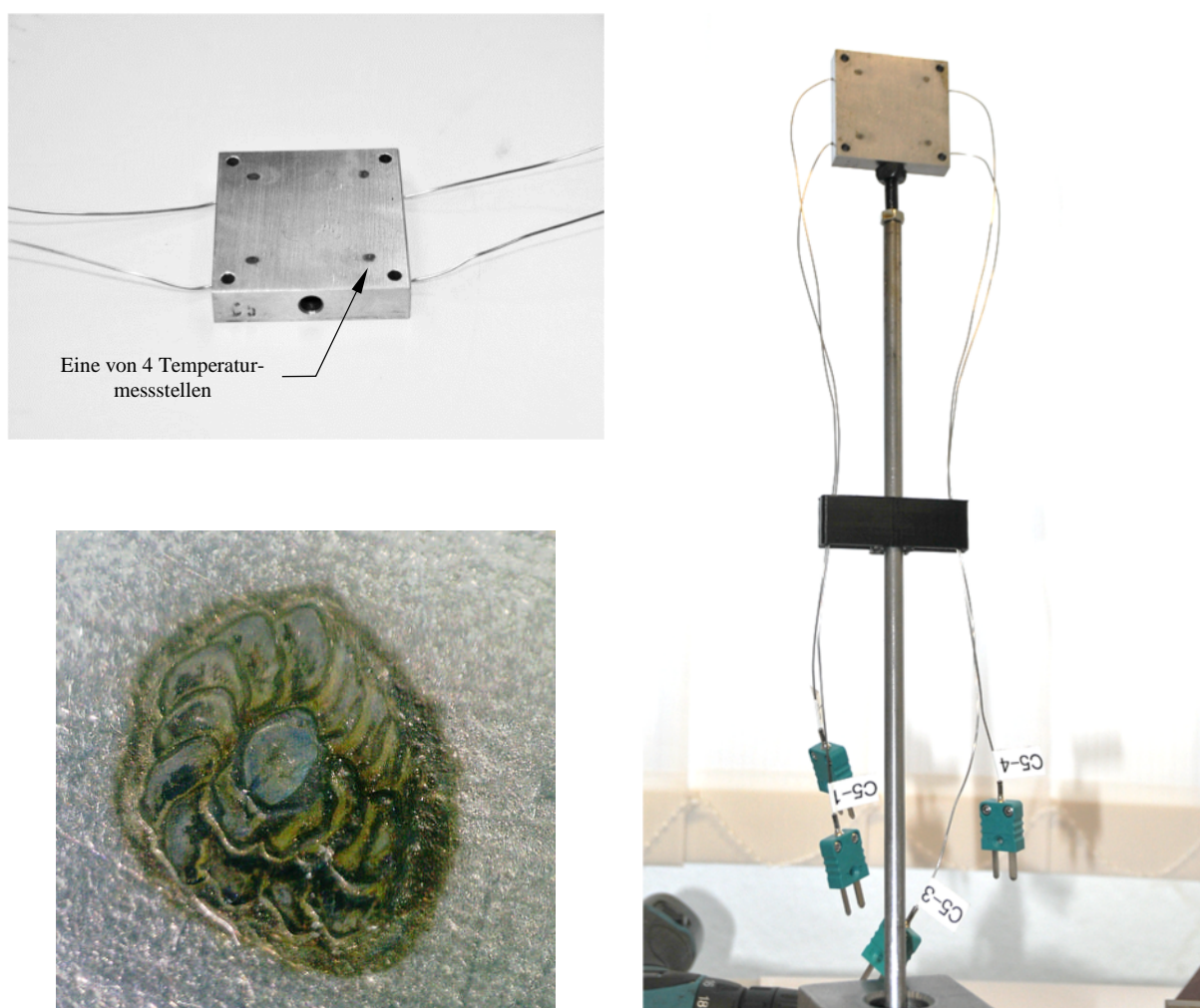


Abbildung 22: Spezielle Probekörper für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit:

links oben: sichtbare 4 integrierte Thermoelemente

links unten: lasergeschweißte Messstelle

rechts: Probe vor dem Verkokungsvorgang

In dem entwickelten Konzept der Untersuchung der physikalisch-thermischen Eigenschaften der Verkokung wurden zwei verkokte Proben benötigt (Abbildung 23). Diese wurden an der Seite mit den Temperaturmessstellen zusammengeschaubt, so dass die Messstellen übereinander lagen (Abbildung 23, rechts unten). Alle anderen Flächen der Probe wurde von der Verkokung befreit und in dem Prüfstand zur Bestimmung der Wärmeleiteigenschaften untersucht (Abbildung 24).

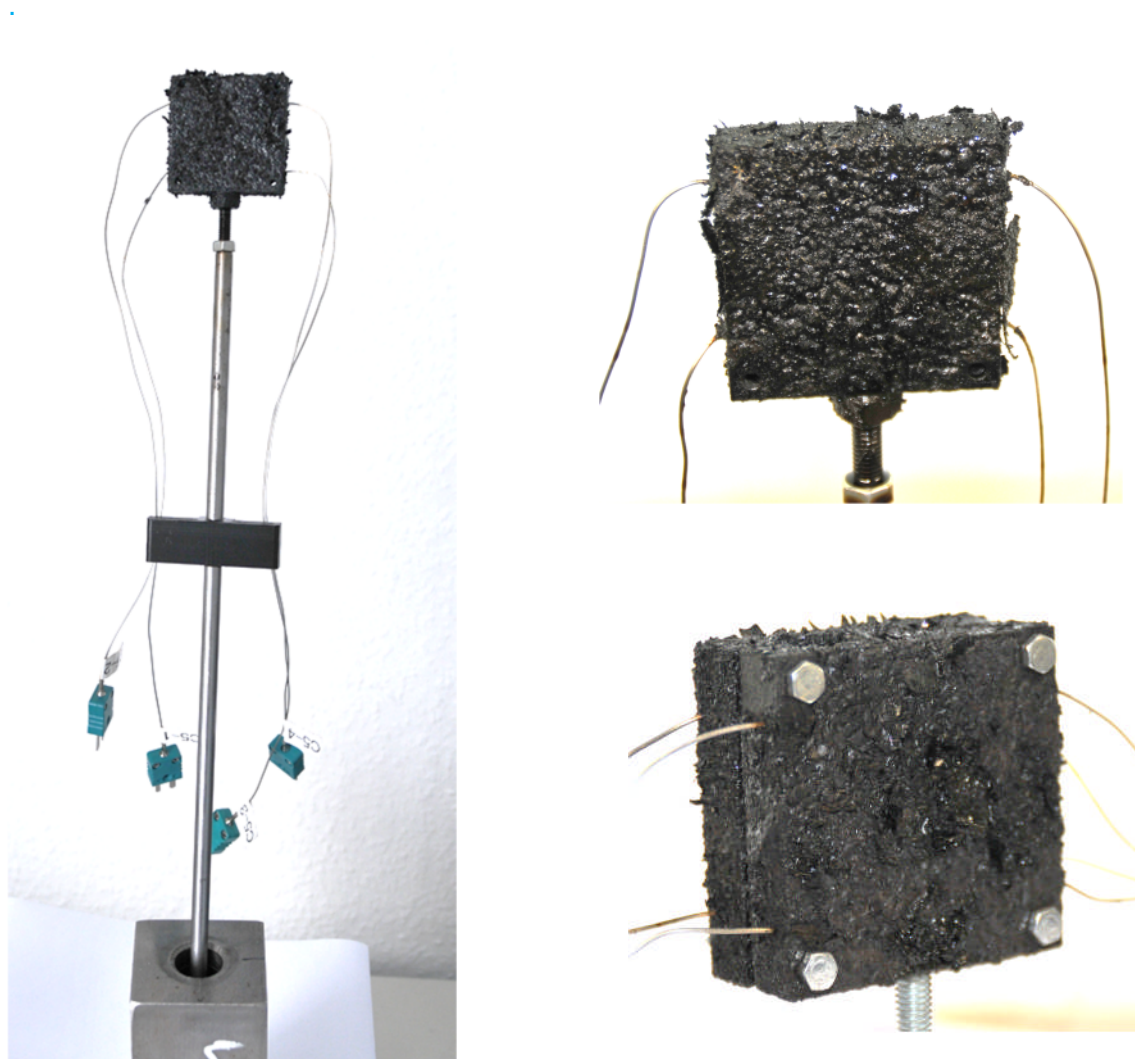


Abbildung 23: Verkakte Probekörper für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit:
 links: Probe direkt nach der Entnahme aus dem Verkokungsprüfstand
 rechts oben: Sichtbare Verkokungsstruktur
 rechts unten: Zusammengeschaubte Proben

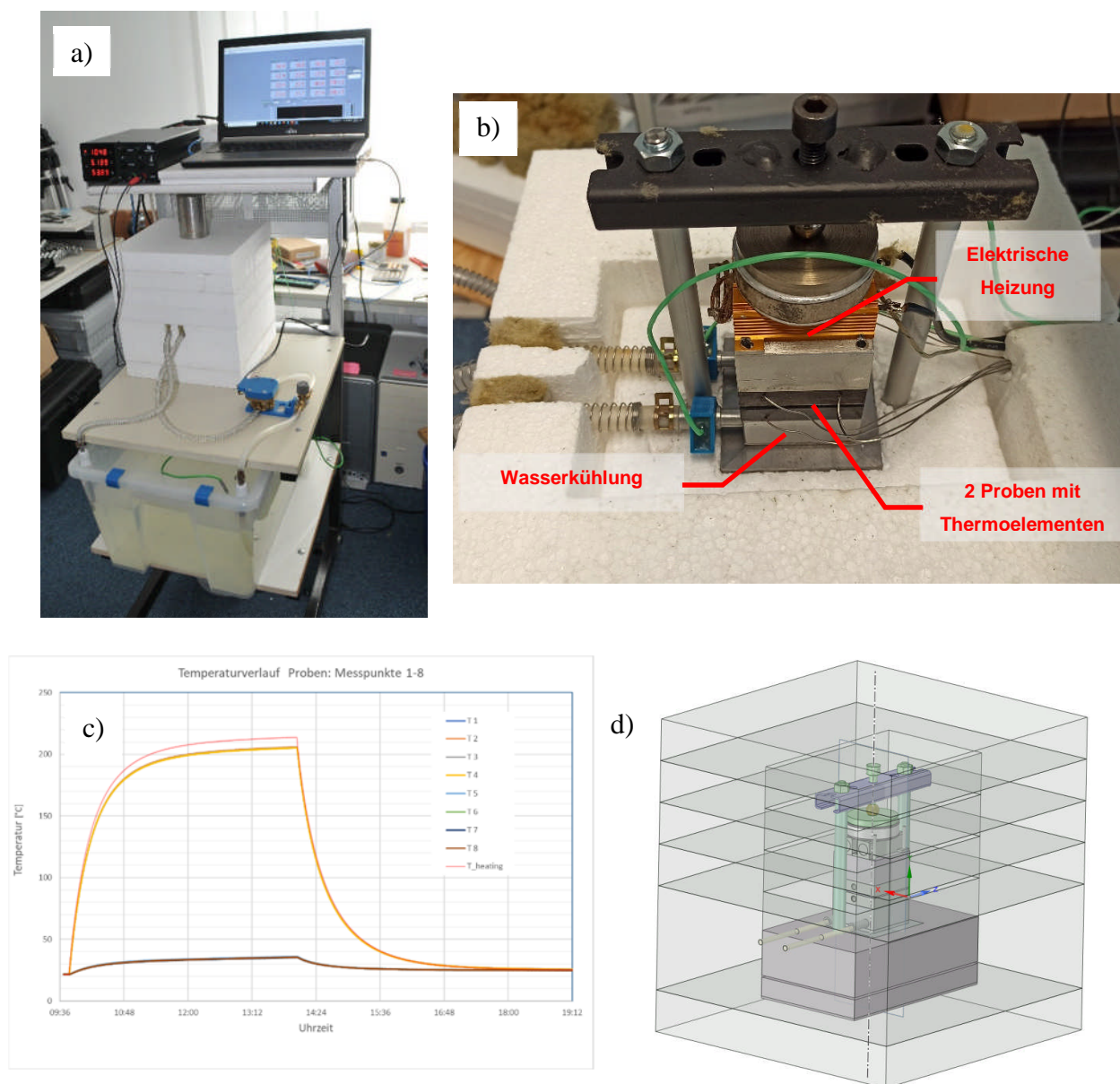


Abbildung 24: Prüfstand zur Untersuchung der Wärmeleiteigenschaften von Verkokungsschichten

- a) Aufbau des Prüfstandes
- b) Anordnung der Proben im Prüfstand
- c) Gemessene transiente Temperaturverläufe während der Aufheizung und Abkühlung
- d) Numerisches Modell zur Ableitung der Wärmeleiteigenschaften von Verkokungsschichten

Die durch die Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse über die Entstehung der Verkokung sowie die experimentell ermittelten Werte für die Wärmeleitfähigkeit sind als Randbedingungen in den erweiterten virtuellen Technologiedemonstrator eingeflossen. Die im obigen Experiment ermittelte Wärmeleitfähigkeit der Verkokungsschicht lag im Bereich von 0,1-0,15 W/mK. Danach erfolgte eine Testphase des gesamten Modells.

Am neuen gewichtsoptimierten Kolbendesign des Projektpartners SECO (Designvariante) wurde exemplarisch das Verkokungsrisiko und dessen Konsequenzen abgeschätzt. In Abbildung 25 sind die Bereiche farblich mit lila dargestellt, die bei längerem Betrieb des Kolbens



schrittweise verkoken. Als Kriterium für diese Identifikation wurden Temperaturen auf der Kühlraumoberfläche gewählt, welche die thermische Stabilität des Kühlöls überschreiten (in diesem Fall über 275°C).

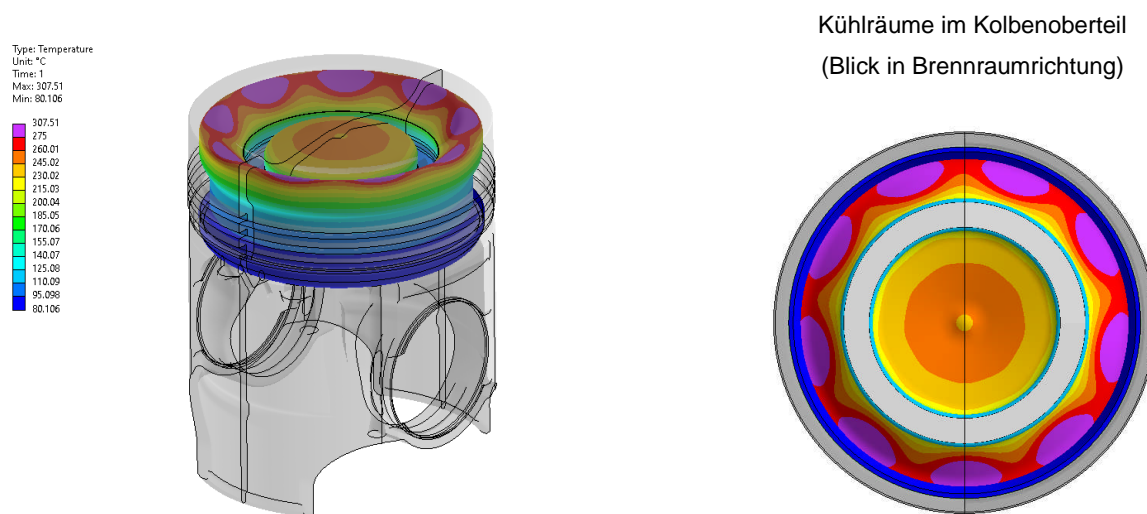


Abbildung 25: Identifikation von Bereichen im Temperaturfeld (farblich mit lila dargestellt) in den Kühlräumen des Kolbens, welche zu verkokungskritischen Zuständen führen

Die verkokungsgefährdeten Bereiche wurden im numerischen Modell der Wärmeübertragung im Kolben implementiert. Die isolierende Wirkung dieser Schichten wurde durch eine modellierte Dicke der Schicht und deren Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt. Die physikalischen Eigenschaften der Verkokung wurden experimentell bestimmt und die Ergebnisse auf das Modell übertragen. In der Abbildung 26 sind beispielhaft die Simulationsergebnisse dargestellt, welche die Steigerung der brennraumseitigen Temperaturen der Kolbenkrone durch die isolierende Wirkung der Verkokung zeigen.

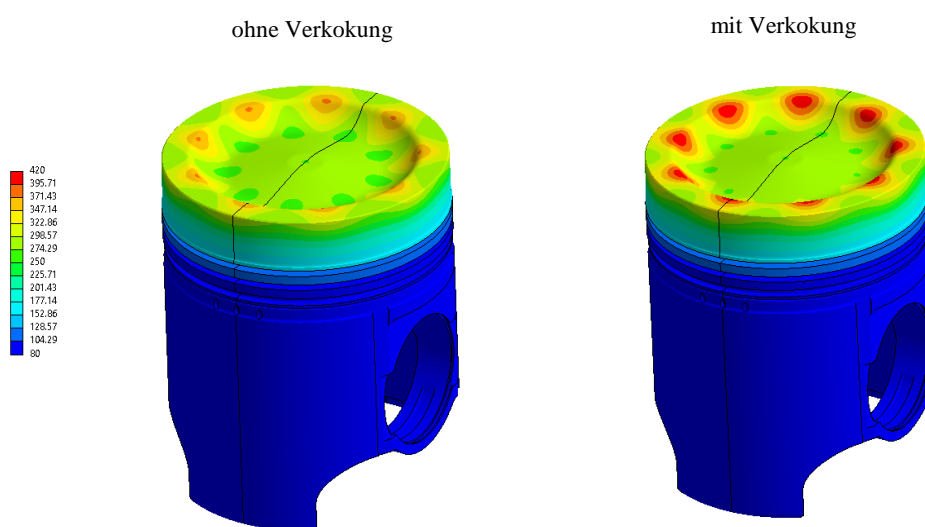


Abbildung 26: Einfluss der Verkokung an den Oberflächen von Kühlräumen auf die brennraumseitige Temperaturverteilung der Kolbenkrone (links: ohne Verkokung, rechts: mit 1mm Verkokungsschicht)

Zusätzlich zur Vorhersage der Verkokung an den Kühloberflächen im Kolben wurden die Möglichkeiten zur Verhinderung/Reduzierung des Aufbaus von Verkokungen im Kühlraum durch die Anwendung von Anti-Haftschichten untersucht.

Die Ergebnisse der Tests (Abbildung 27) waren negativ infolge unzureichender thermischer Stabilität der Anti-Haftschichten selbst. D. h., dass diese Anti-Haftschichten bereits unterhalb der Temperatur des Verkokungsbeginns (ca. 280 °C) des Kühllöls thermisch zerstört werden.

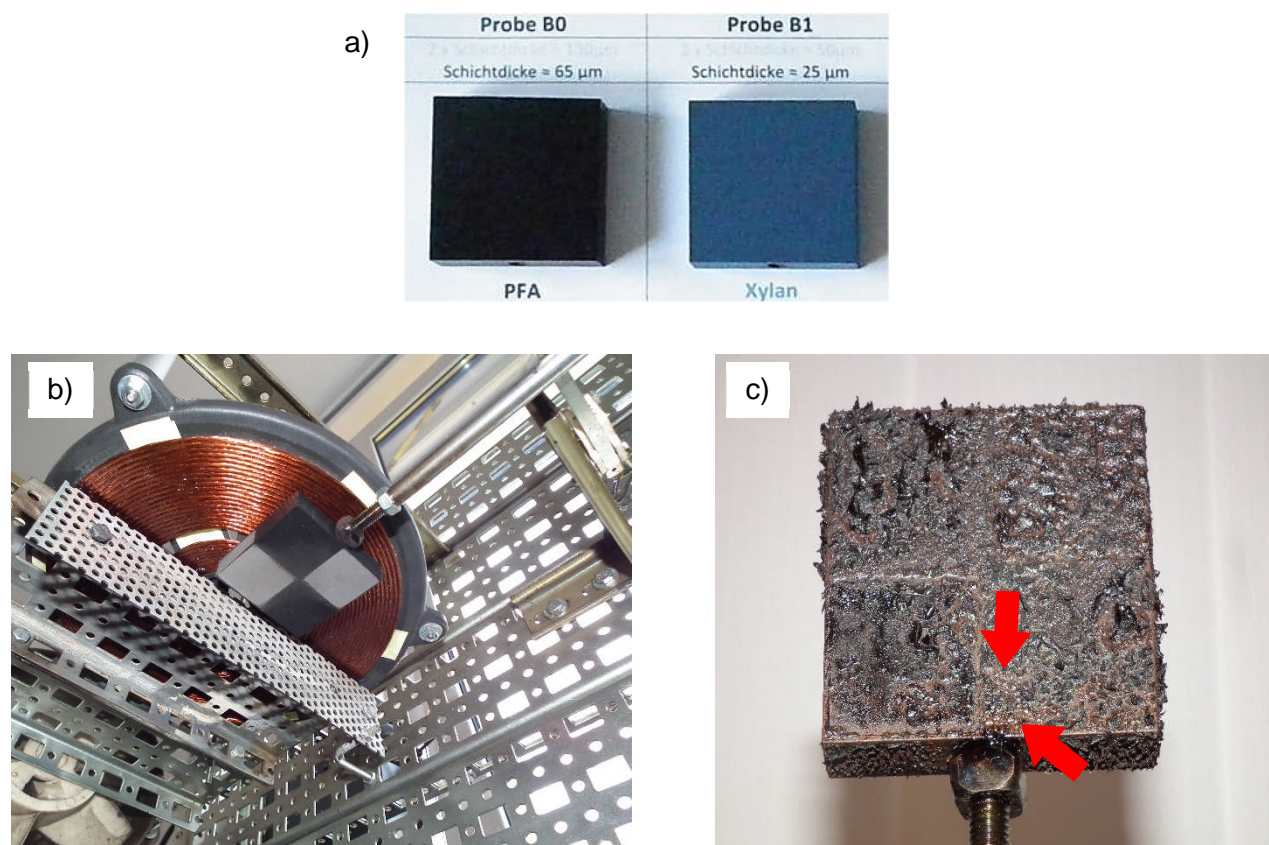


Abbildung 27: Beschichtete Verkokungsproben:

- a) Angewandte Beschichtungen: PFA und Xylan,
- b) Probe B0 teilweise befreit von der PFA-Beschichtung montiert am Verkokungsprüfstand,
- c) Probe B0 nach dem Verkokungsversuch (thermische Beschädigung der PFA-Beschichtung erkennbar).

Somit bleibt als wichtigste Maßnahme zur Verhinderung/Reduzierung des Aufbaus von gefährlichen Verkokungsablagerungen die Vermeidung von Spitzentemperaturen auf den Kühlraumoberflächen von mehr als 260 °C – 280 °C.

1.3 Anpassung des Versuchstands zum Reibschweißen und Durchführung von Versuchsreihen

Ziel des Arbeitspaketes 1.11 war es, den von der MET GmbH für das Projekt G-KOM 2020 gebauten Versuchsprüfstand für das Reibschweißen von Leichtbaukolben mit Durchmessern von 150 mm bis 250 mm anzupassen und Versuche zur Bestätigung der Funktionsfähigkeit durchzuführen (siehe Abbildung 28).



Abbildung 28: MET GmbH Reibschweißen Versuchsprüfstand

Um den Einbau im Versuchsprüfstand zu testen, wurden Rohlinge sowohl vom unteren als auch vom oberen Teil des Leichtbauprüfkolbens hergestellt. Die Geometrie des Leichtbauprüfkolbens und die Festlegung der verwendeten Materialien wurden vom Projektpartner SECO GmbH beigestellt. Jeder Schritt in der Entwicklung der Kolbengeometrie wurde numerisch durch die MET GmbH mithilfe der Finite-Elemente-Methode analysiert, was Teil des Arbeitspakets 1.16 war. Die Bewertung der Festigkeitsergebnisse des SECO-Designvariante-Leichtbaukolbens wird im weiteren Verlauf des Berichts in Abschnitt 4 ausführlich beschrieben. Die finale Variante der Kolbengeometrie, die bei den Versuchen auf dem Prüfstand verwendet wurde, war die SECO-Designvariante. Die Herausforderung bestand darin, die Schnittstelle zwischen dem oberen und dem unteren Teil des Leichtbauprüfkolbens an die entworfene Geometrie anzupassen und gleichzeitig die Grenzen der Möglichkeiten des Versuchsprüfstands in Bezug auf die maximale Verbindungsfläche einzuhalten. Die Verbindung konnte in guter Qualität reibgeschweißt werden. Die Verbindung zwischen dem oberen und dem unteren Teil des reibgeschweißten Leichtbauprüfkolbens befindet sich zwischen der inneren und der äußeren Kühlraum. Aus diesem Grund muss eine Labyrinthdichtung zwischen dem Ringpaket im Kolbenoberteil und der Laufläche im Kolbenunterteil eingebaut werden, wodurch ein Spalt zwischen den beiden Kolbenteilen entsteht. Die Höhe dieses Kanals beträgt nur 1 mm mit einer Toleranz von weniger als 0,5 mm.

Das bedeutet, dass beim Reibschweißen der gesamte Stauchweg von 10 Millimetern mit einer Toleranz von 0,5 mm eingehalten werden muss.

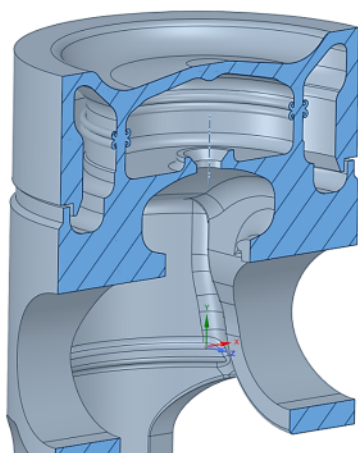


Abbildung 29: Leichtbauprüfkolben mit Labyrinthdichtung

Andernfalls kann zum einen die Labyrinthdichtung zu viel Spiel haben und zum anderen der Labyrinthdichtungskanal bereits während des Reibschweißens vollständig verschlossen werden, so dass die beiden Teile des Leichtbauprüfkolbens nicht zusammengefügt und die Rohlinge beschädigt werden können. Um dies sicher zu vermeiden, wurde der Reibschweißprozess mit den von der MET GmbH für das Forschungsprojekt INKOV entwickelten und im Rahmen des Forschungsprojekts G-KOM 2020 weiterentwickelten Berechnungswerkzeugen numerisch simuliert. Diese Simulationstools ermöglichen eine physikalisch exakte Vorhersage des Reibschweißens von Bauteilen beliebiger Geometrie aus beliebigen Metallen. Die Einzigartigkeit dieser Methode liegt da-

rin, dass der thermomechanische Prozess des Reibschweißens mit Materialeigenschaften simuliert wird, die nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Verformungsgeschwindigkeit abhängen. Die Verwendung eines solchen numerischen Modells führt zu sehr realistischen Ergebnissen, was durch die Ergebnisse früherer Forschungsprojekte bestätigt wurde. Mit bekannten rechnerischen Annahmen, die durch die enge Toleranz der Geometrie und die im Schwungrad des Versuchsprüfstands gespeicherte Energie begrenzt sind, können die Schlüsselparameter, die für eine qualitativ hochwertige Verbindung zwischen Ober- und Unterteil des Leichtbauprüfkolbens erforderlich sind, mit einem hohen Maß an Genauigkeit ermittelt werden (s. Abbildung 30).

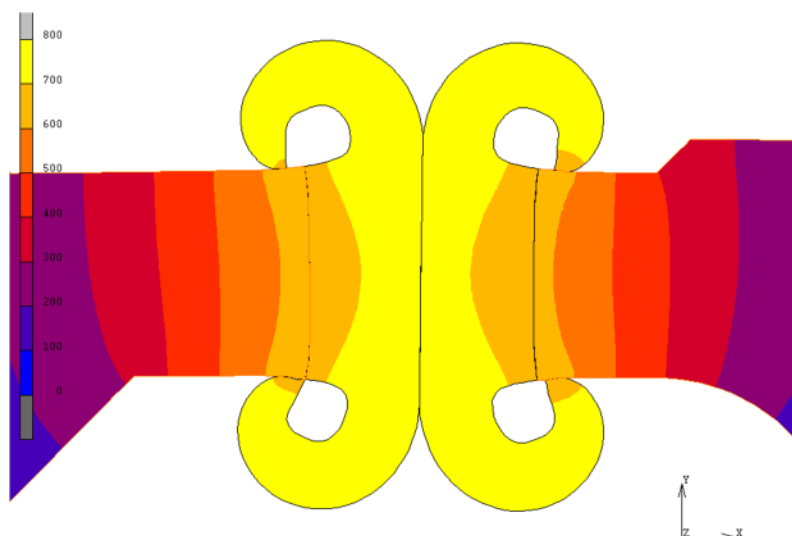


Abbildung 30: Simulierte Reibschweißverbindung (Temperatur °C, Stauchphase)

Die folgenden Parameter des Reibschweißprozesses wurden durch numerische Simulation ermittelt:

- Drehzahl
- Reibdruck
- Reibzeit
- Stauchdruck
- Stauchzeit
- Stauchweg

Die ausgewählten Parameter wurden an vereinfachten Rohlingen mit positiven Ergebnissen getestet. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Parameter „Stauchweg“, der bei allen Versuchen innerhalb der vorgegebenen Toleranzen lag.

Die Aufnahme der übergroßen, oberen und unteren Leichtbauprüfkolbenrohlinge im Versuchsprüfstand erfolgte mittels eines speziell angepassten Adapters (siehe Abbildung 31). Die Leichtbauprüfkolbenrohlinge wurden vom Projektpartner SECO GmbH hergestellt.

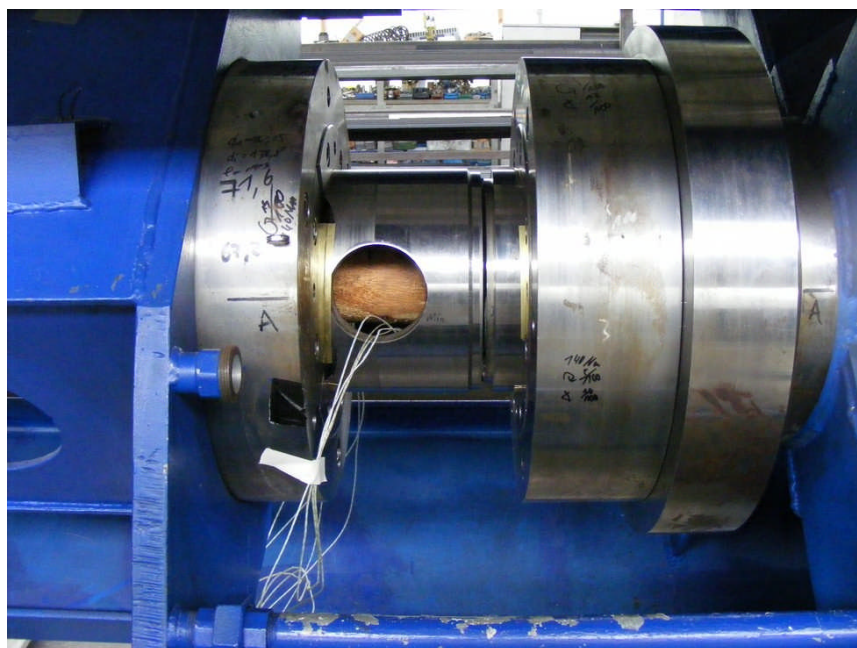


Abbildung 31: Prüfkolben eingebaut im Reibschweiß-Versuchsprüfstand der MET GmbH

Aufgrund der verwendeten Materialien ist ein zusätzliches Vorwärmen in diesem Fall nicht notwendig, obwohl der Versuchsprüfstand der MET GmbH für diesen Fall mit einem Acetylen-Ringbrenner ausgestattet ist. Eine zusätzliche Herausforderung bei der experimentellen Reibschweißung des Leichtbauprüfkolbens war die Tatsache, dass sich die Reibschweißnaht im Inneren des Kühlraums befindet und der Vorgang daher von außen nicht sichtbar ist. Um den Versuch zu beobachten und aufzeichnen zu können, wurde daher eine Minikamera in dem Kühlraum der unteren Hälfte des Leichtbauprüfkolbens installiert. Aufgrund ihrer Abmessungen musste die

Kamera beim Ausbau nach dem Experiment mechanisch zerstört werden. Zur Unterstützung wurde auch ein Endoskop durch die Ölbohrung in den Kühlraum eingeführt. Beide Kameras zeichneten das Experiment auf und lieferten eine Live-Ansicht. Zusätzlich zu den Kameras im Inneren des Kolbens wurde das Experiment auch von externen Kameras aufgezeichnet.



Abbildung 32: Aufgenommener Reibschweißvorgang.

Der Verlauf des Experiments wurde kontinuierlich durch eine Reihe von Sensoren überwacht, die unter anderem Drehzahl, Reib- und Stauchdruck und den Stauchweg aufzeichneten. Auch die Temperatur in der unmittelbaren Umgebung der gebildeten Reibschweißnaht wurde aufgezeichnet.

Aufgrund der oben beschriebenen gründlichen Vorbereitungen war es möglich, eine reibgeschweißte Verbindung zwischen dem oberen und dem unteren Teil des Leichtbauprüfkolbens ohne Probleme herzustellen.

Das Reibschweißverfahren beeinflusst thermisch einen relativ kleinen Bereich des Leichtbauprüfkolbens, den Schweißbereich. Der Schweißbereich wird auf die schmiedbare Temperatur sehr schnell erwärmt und dann sehr schnell abgekühlt, was zum Aufhärten des Materials in diesem Bereich führt. Um dieses Problem zu lösen, wurde der gesamte reibgeschweißte Leichtbauprüfkolben einer vollständigen Wärmebehandlung bestehend aus Normalisierung, Härtung und Anlassen unterzogen was wieder zum ursprünglichen Vergütungszustand führt. Der Wärmebehandlungsprozess wurde in einem Versuchsofen unter Verwendung geeigneter Kühlparameter durchgeführt (siehe Abbildung 33). Der Versuchsofen wurde von der MET GmbH beige- stellt. Die Festlegung der Kühlparameter erfolgte simulationsgestützt durch die MET GmbH. Die Messung der Härte und des Mikrokorngefüges der Begleitprobe bestätigte, dass die erwarteten Vergütungsparameter erreicht wurden. Ein Nebeneffekt der Wärmebehandlung des Kolbens ist sobald sie nicht in einer Inertgasatmosphäre erfolgt die Bildung einer Verzunderung auf den Kolbenoberflächen. Während die Entfernung dieser Schicht auf leicht zugänglichen Außenflächen unproblematisch ist, ist die Verzunderungsschicht im Inneren der Kühlräume

problematisch. Das Thema „Reinigung des Kolbenkühlraums“ wurde vom Projektpartner SECO GmbH nach Anlieferung der fertigen reibgeschweißten Leichtbaukolben umfassend bearbeitet.

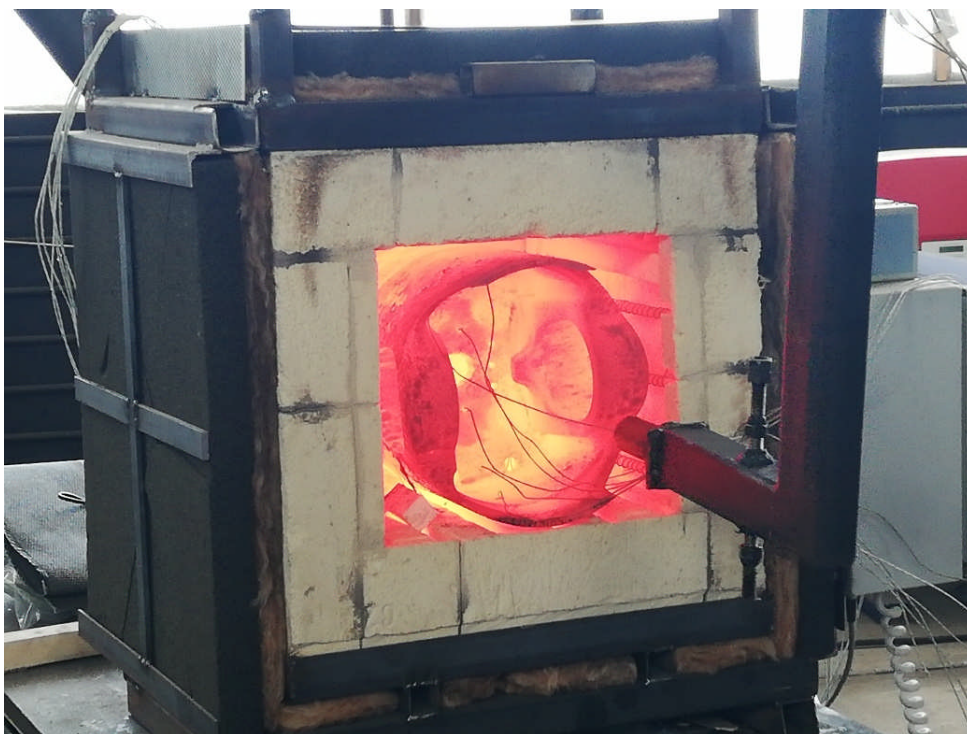


Abbildung 33: Leichtbauprüfkolben im Versuchsofen während der Wärmebehandlung

Die Qualität der Verbindung zwischen Ober- und Unterteil des reibgeschweißten Leichtbauprüfkolbens wurde zerstörungsfrei in einer Resonanzprüfanlage des IGP Fraunhofer in Rostock geprüft. Um den 30 kg schweren Kolben in einer Maschine befestigen zu können, die für viel leichtere genormte Proben vorgesehen ist, wurde ein spezieller Adapter verwendet, der die Richtung der auf den Kolben wirkenden Kräfte in einem Verbrennungsmotor simuliert. Der Leichtbauprüfkolben wurde einer Belastung ausgesetzt, die den maximalen Beschleunigungen entspricht, die während des Motorbetriebs auf ihn einwirken. Die reibgeschweißte Verbindung überstand den Test, bei dem der Kolben 50 Millionen Lastzyklen ausgesetzt wurde, was mehr als 800 Stunden Motorbetrieb bei 1.000 Umdrehungen pro Minute entspricht, ohne Beanstandungen (siehe Abbildung 34). Die Verwendung einer Resonanzanlage zur Prüfung eines Prototypkolbens ermöglicht es, die Qualität der reibgeschweißten Verbindung bereits im Stadium des unfertigen Rohlings in wenigen Tagen zu überprüfen. Außerdem wird das Risiko einer späteren Beschädigung des Testmotors vermieden.

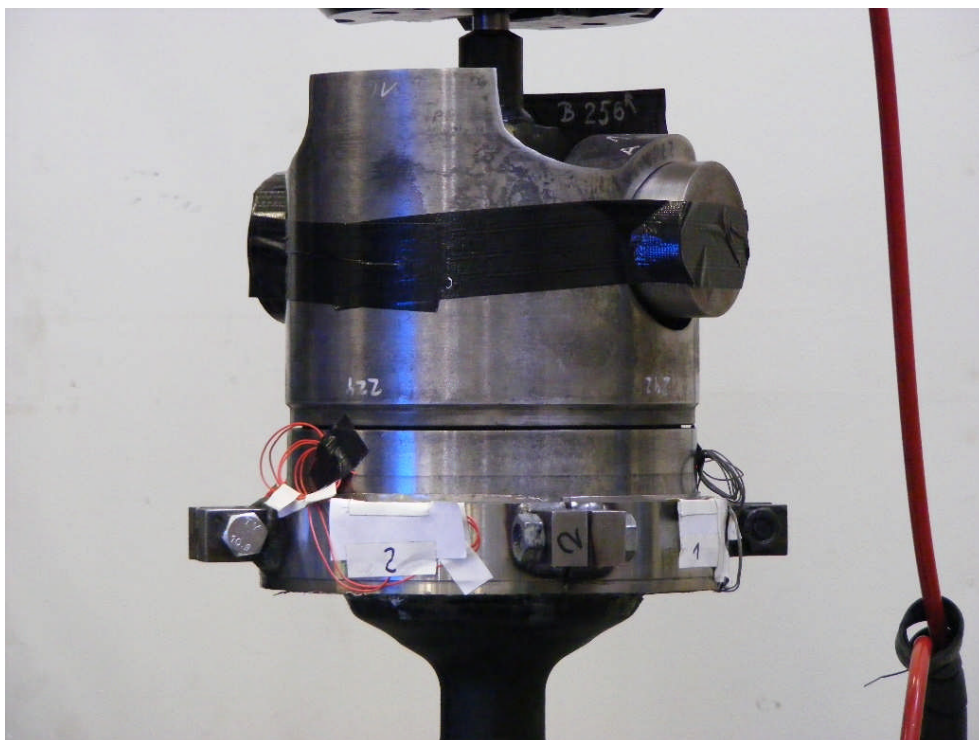


Abbildung 34: Ermüdungsprüfung des Versuchskolbens in der Resonanzprüfanlage

Zusätzlich zur zerstörungsfreien Prüfung des Leichtbauprüfkolbens wurden Ermüdungsversuche an einer reibgeschweißten Probe mit identischen Parametern wie beim Leichtbauprüfkolben und identischer Wärmebehandlung durchgeführt. Die vorbereiteten genormten Ermüdungsproben in Druck und Zug zeigten keine Abweichung von den Nennwerten für den Grundwerkstoff, wobei Brüche außerhalb des Reibschweißnahtbereichs überwogen (siehe Abbildung 35). Die Ermüdungsversuche wurden beim Projektpartner WTZ gGmbH durchgeführt.

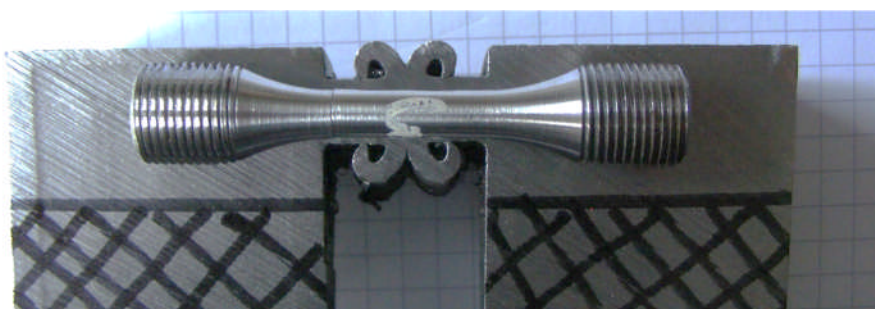


Abbildung 35: Ermüdungsprobe aus einer reibgeschweißten Verbindung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es in dem Arbeitspaket gelungen ist, einen voll funktionsfähigen Reibschweißversuchsprüfstand für die Evaluierung der Simulation von Kolben mit Durchmessern von 150 bis 250 mm zu entwickeln und zu betreiben. Durch den systematischen und koordinierten Einsatz des Berechnungsmodells und der Versuche auf dem Versuchsprüfstand konnten sowohl das numerische Modell des Reibschweißprozess als auch der

Versuchsstand schnell und effizient verbessert werden. Das entwickelte und evaluierte realitätsnahe Simulationsmodell ist in Zukunft auf beliebige Kolbendurchmesser bis 500 mm einsetzbar. Zusammen mit den Erfahrungen aus früheren Forschungsprojekten und den Innovationen in der Mess- und Prozessdokumentation ist es gelungen, reibgeschweißte Kolbenrohlinge herzustellen, die den Belastungen im Motorbetrieb standhalten und die erforderlichen Toleranzen einhalten, um eine effiziente Ölkühlung des Kolbens ohne zusätzliche Dichtungen zu ermöglichen. Die auf dem angepassten Versuchsprüfstand der MET GmbH hergestellten Leichtbauprüfkolbenrohlinge wurden dem Projektpartner SECO GmbH zur eingehenden Qualitätskontrolle übergeben, unter besonderer Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen und zur Prüfung von geeigneten Technologien der Reinigung der Kühlräume von Verzunderung.



Abbildung 36: Reibgeschweißte Leichtbauprüfkolbenrohlinge

1.4 Haltbarkeitsnachweis für neu erarbeitete Leichtbaukolbendesigns

Der reibgeschweißte Leichtbaukolben wurde vom Projektpartner SECO GmbH entwickelt und von der MET GmbH umfassend auf seine Haltbarkeit hin untersucht. Die Auswirkung von Belastungen auf den Kolben unter dem Einfluss von Kräften, die während des Betriebs im Motor auf ihn einwirken, wurde analysiert. Diese Kräfte werden unterteilt in Primärkräfte und Sekundärkräfte. Primärkräfte ergeben sich aus der Hubbewegung des Kolbens im Zylinder infolge der Verbrennung des Kraftstoffs im Brennraum. Als Sekundärkräfte bezeichnet man die Seitenkräfte, die durch den Druck des Kolbens gegen die Zylinderwände entstehen. Diese beiden Gruppen von Kräften werden in Form von Randbedingungen definiert und auf die im Folgenden vorgestellten numerischen Modelle angewendet.

1.4.1 Primäre Gas- und Massenkräfte

Bei der Hubbewegung des Kolbens lassen sich im Vier-Takt-Verfahren drei charakteristische Positionen unterscheiden, in denen Kräfte mit maximalen Werten wirken, diese sind:

- Massenkräfte im oberen Totpunkt (OT)
- höchste Verbrennungsgaskraft, in der Regel ein paar bis mehrere Grad nach OT
- Massenkräfte im unteren Totpunkt (UT)

Die Berechnung der in diesen drei spezifischen Positionen auf den Kolben wirkenden Kräfte gibt einen genauen Einblick in den Belastungszustand während der gesamten Kolbenbewegung. Die nachfolgenden Varianten des Leichtbaukolbens des Entwicklungspartners SECO GmbH wurden genau auf diese drei charakteristischen Belastungen hin untersucht. Für die Berechnung des Kolbens mit der Finite-Elemente-Methode wurde ein numerisches Modell auf Basis der Kolbengeometrie mit den entsprechenden Materialwerten für das Kolbenober- und -unterteil und einem Satz von Randbedingungen in Form von Druck und Beschleunigung für die drei untersuchten Lastfälle erstellt.

1.4.2 Thermische Belastung

Ein weiterer Faktor ist die thermische Belastung, die in Form des in den zuvor beschriebenen Arbeitspaketen berechneten Temperaturfelds implementiert ist.

1.4.3 Ergebnisse der Lastberechnungen von Primärkräften und Temperatur

Das Ergebnis der Simulation sind Dehnungen und Spannungen, die lokal für die gesamte untersuchte Geometrie darstellbar sind. So können Bereiche mit besonders hohen Spannungen isoliert und in der nächsten Version der Geometrie so umgestaltet werden, dass das zulässige Spannungsniveau nicht überschritten wird. Die maximale Belastungshöhe hängt von der Festigkeit des verwendeten Materials und einer Reihe von Sicherheitsfaktoren ab, die von verschiedenen Parametern wie der Art der Belastungen oder der Temperatur abhängen. Die Ergebnisse der Festigkeitsberechnungen des Leichtbaukolbens führten mit einer geringen Anzahl von Iterationen für die Geometrieänderung zu einem robusten Ziel-Leichtbaukolbendesign. Die von Mises-Verformungen und Spannungen für den SECO-Designvariante-Kolben sind in den nachstehenden Abbildungen dargestellt.

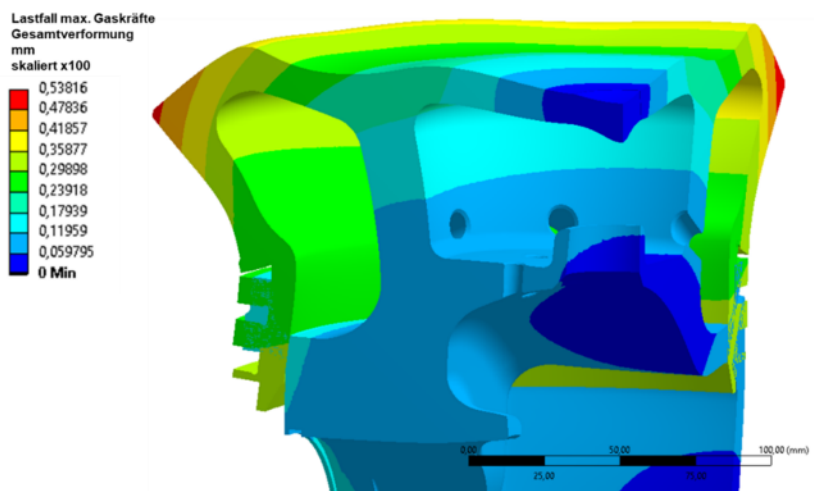


Abbildung 37: FE-Ergebnisse: Gesamtverformung für den Leichtbaukolben für den Lastfall maximale Gaskräfte. (Die Verformung ist mit dem Faktor 100 überhöht.)

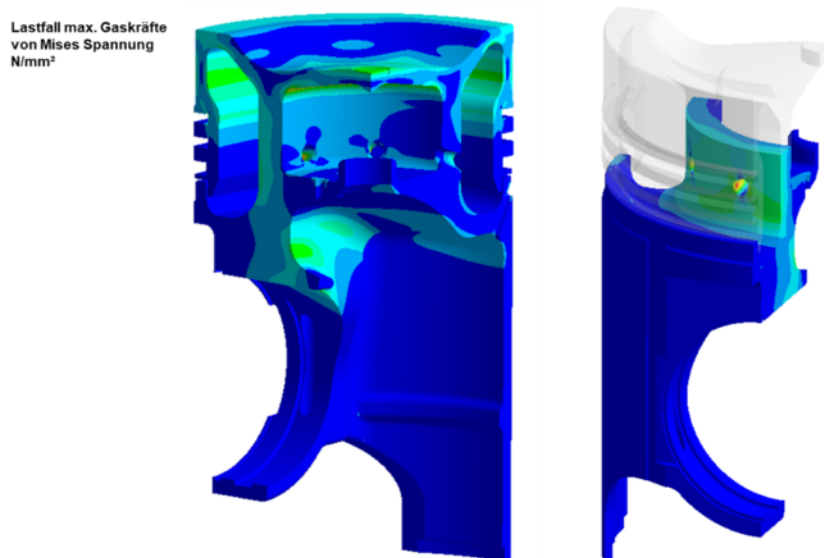


Abbildung 38: FE-Ergebnisse: von Mises Spannung Ergebnis für das Leichtbaukolben für den Lastfall maximale Gaskräfte.

1.5 Kolbensekundärbewegung

Ein wichtiges Element bei der Konstruktion eines neuen Kolbens ist die Vorhersage der möglichen Belastungen während des Betriebs im Motor. Dabei sind die vertikale Beschleunigungs- und Gaskräfte die Hauptquelle der mechanischen Belastung des Kolbens. Außerdem wird der Kolben infolge der Kraftstoffverbrennung thermisch belastet. Eine weitere wesentliche Lastkomponente sind horizontale sekundäre mechanische Belastungen durch die Kolbenbewegung, die sich aus dem kinematischen Zusammenwirken des Kolbens und dem sich auf zwei Gelenken bewegenden Pleuel ergeben. Durch die Drehung der Kurbelwelle neigt der Kolben bei seiner translatorischen Bewegung im Zylinder dazu, je nach Position und Zeitpunkt gegen eine Seite des Zylinders zu drücken. Diesen Effekt bezeichnet man als Kolbensekundärbewegung. Die

größten Kräfte der Kolbensekundärbewegung treten kurz (einige wenige bis einige zehn Grad) nach dem Erreichen des oberen Totpunkts im Arbeitstakt auf. Natürlich ist der Prozess komplizierter, weil sich der Kolben im Zylinder auf dem Ölfilm bewegt und die Form des unteren Teils des Kolbens kein Zylinder ist, sondern ein Oval mit einem speziellen Profil, das die Gleiteigenschaften auf einem dünnen Ölfilm verbessert.

1.5.1 Numerische Analyse der Kolbensekundärbewegung

Die oben beschriebenen und weitere wesentliche Effekte werden in dem von der MET GmbH entwickelten und verwendeten numerischen Berechnungsverfahren für die Kolbensekundärbewegung berücksichtigt. Das numerische Modell ermöglicht die Berechnung der Kolbensekundärbewegungskräfte für beliebige Kolbengeometrien. Alle Eigenschaften des Messkolbens sowie des Pleuels, der Kurbelwelle und des Zylinders des Motors wurden im kinematischen numerischen Modell implementiert, um die Änderungen des Kraftprofils der Kolbensekundärkolbenbewegung während eines Betriebszyklus des Viertaktmotors, d. h. während zweier Umdrehungen, vorhersagen zu können. Die aus dem kinematischen Modell gewonnenen Kräfte wurden auf das numerische Modell des Messkolbens übertragen, um die Verformungen und Spannungen zu berechnen (siehe Abbildung 39).

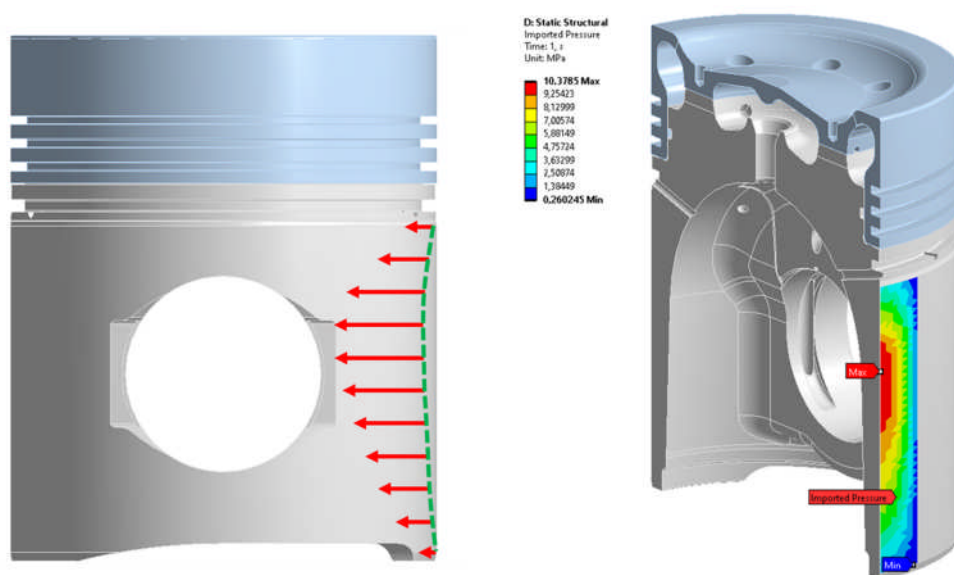


Abbildung 39: Links: Profil der Maximalkraft infolge der Kolbensekundärbewegung aus der numerischen Analyse. Rechts: Druckfeld infolge der Kolbensekundärbewegung aufgeprägt auf das Kolbenhemd.

Um die Qualität der Ergebnisse der numerischen Analyse zu bewerten, wurde ein Messkolben vorbereitet, an dem mit Hilfe eines Satzes von Dehnungsmesstreifen die Dehnungen im Zusammenhang mit der Kolbensekundärbewegung des Kolbens gemessen wurden.

1.5.2 Festigkeitsanalyse des Messkolbens

Für die Messungen im Prüfmotor des Projektpartners WTZ gGmbH wurde ein Messkolben vom Projektpartner SECO GmbH geliefert. Im Gegensatz zum reibgeschweißten Leichtbaukolben ist dieser Messkolben ein zweiteiliger Kolben, bei dem der obere Teil des Kolbens mit acht Schrauben mit dem unteren Teil des Kolbens verschraubt ist. Der obere Teil des Kolbens besteht aus Stahl und der untere Teil aus Aluminium. Um die erforderliche Messhardware, wie Kanäle für Sensoren, eine Konsole für das Akkupaket, den Sensorsignalverstärker und die Antenne, auf dem Messkolben unterzubringen, musste dessen Geometrie entsprechend angepasst werden. Diese Änderungen erforderten eine Festigkeitsanalyse mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, um sicherzustellen, dass die Verwendung des Messkolbens für die Messungen am Testmotor gefahrlos möglich war. Ein numerisches Modell des Messkolbens wurde unter Verwendung einer Reihe von Randbedingungen definiert, die den Spannungszustand während des Motorbetriebs für charakteristische Belastungszustände des Kolbens wiedergeben. Diese waren:

- oberer Totpunkt (OT)
- unterer Totpunkt (UT)
- maximale Gaskräfte nach oberem Totpunkt

Das im numerischen Modell verwendete Temperaturfeld wurde aus einer von der MET GmbH für dieses Forschungsprojekt berechneten instationären Analyse importiert.

Die Ergebnisse der numerischen Analyse zeigten, dass sich der Einbau eines Messkolbens in die Messvorrichtung nur minimal auf das Spannungsniveau auswirkt. Für Bereiche, die erhöhte Spannungen aufwiesen, wurden entsprechende Geometrieänderungen vorgeschlagen (siehe Abbildung 40).

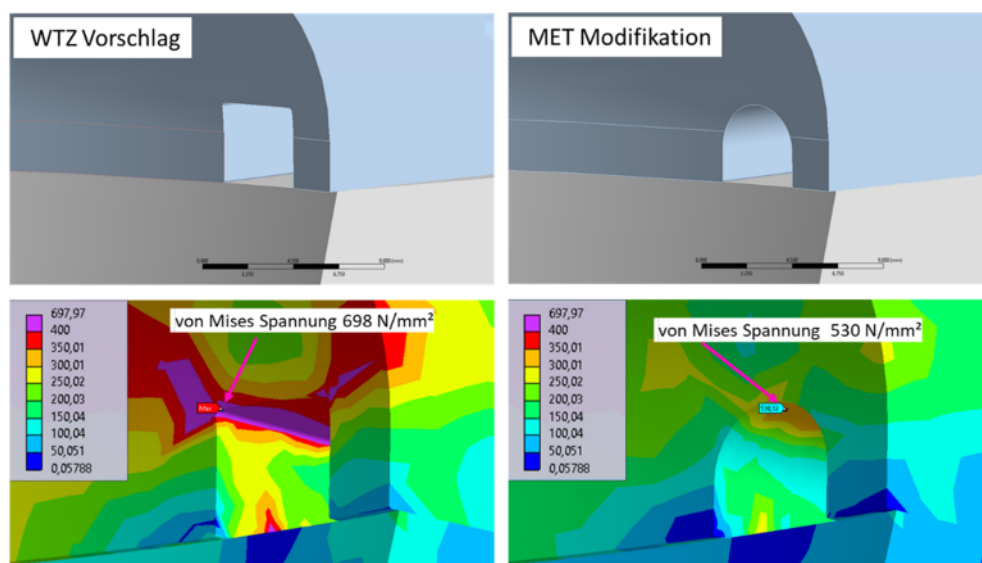


Abbildung 40: FEM-Ergebnisse für den nach MET-Vorschlägen modifizierten Messkolben.

1.5.3 Messtechnik (Manner System)

Der vom Projektpartner SECO GmbH gelieferte Messkolben wurde bei der MET GmbH mit Messsensoren in Form von vier Dehnungsmessstreifen ausgestattet, die sich am unteren Bereich der inneren Seite des Kolbenunterteils befinden, zwei auf jeder Seite in Bereichen mit hohen sekundären Kolbenbewegungskräften (siehe Abbildung 41).

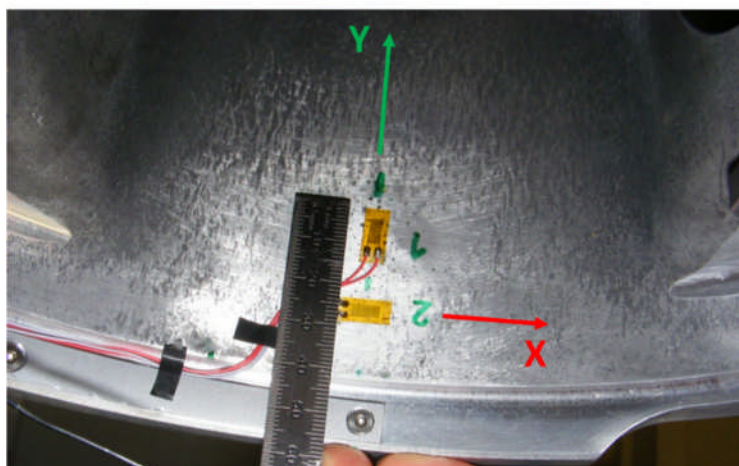


Abbildung 41: Dehnungsmessstreifen am unteren Bereich der inneren Seite des Kolbenunterteils

Die Aufgabe der installierten Dehnungsmessstreifen war es, die Verformung des Kolbens während des Betriebs im Versuchsmotor der WTZ gGmbH zu messen. Die Daten wurden während des Experiments live vom Sensorsignalverstärker über eine Antenne an die Empfangseinheit übertragen. Dadurch war es möglich, die Korrektheit der Ergebnisse noch während des Versuchs zu prüfen, ohne den Kolben aus dem Testmotor ausbauen zu müssen. Es wurde ein breites Spektrum an Daten während der verschiedenen Belastungen des Motors in einem Bereich von 25 % bis 75 % Leistung, sowohl bei laufendem als auch bei geschlepptem Motor (siehe Abbildung 42), gesammelt.



Abbildung 42: Spannungsergebnisse aus dem Experiment über vier Umdrehungen der Kurbelwelle bei 75% Last mit maximaler Spannung von 43 N/mm².

Die mit den Dehnungsmessstreifen erfassten Daten wurden dann mit den Ergebnissen der numerischen Analyse der Kolbensekundärbewegung verglichen.



1.5.4 Zusammenfassung der Kolbensekundärbewegungsanalyse

Die mit der numerischen Analyse erhaltenen Ergebnisse wurden dann mit den Dehnungen verglichen, die während des Versuchs mit den Dehnungsmessstreifen gemessen wurden. Beide Ergebnisse zeigen weitgehend ähnliche Tendenzen und Größenordnungen, was angesichts der Komplexität dieses Themas ein zufriedenstellendes Ergebnis ist. Der Vergleich der Ergebnisse der numerischen Analyse mit den Versuchsergebnissen eröffnet neue Möglichkeiten zur Verbesserung der Berechnungsverfahren, die bisher nicht möglich waren (für die FEM Analyse: siehe Abbildung 43).

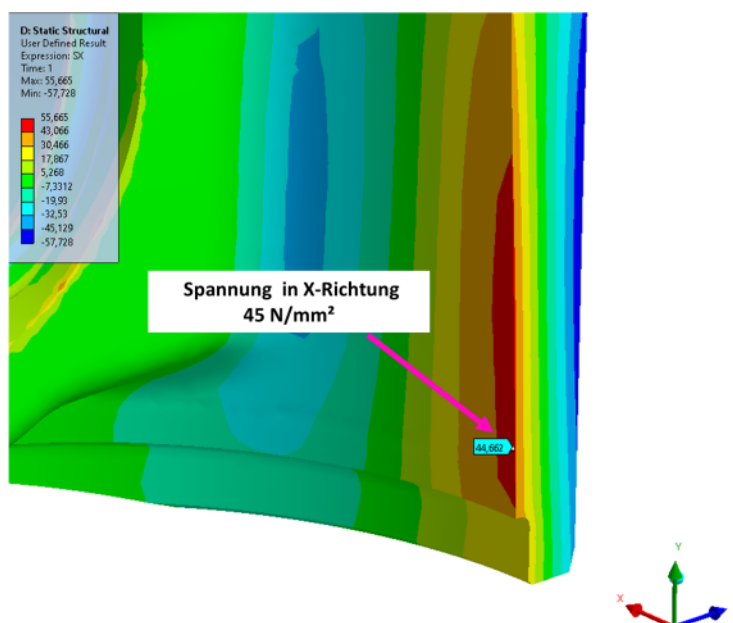


Abbildung 43: Spannungen im unteren Bereich der inneren Seite des Kolbenunterteils aus der FEM-Analyse unter Berücksichtigung der Kräfte aus der Kolbensekundärbewegung.

1.6 Zusammenfassung

Moderne maritime Großmotorenkonstruktionen verfügen bereits heute über ein ausgereiftes Kolbendesign, welches die aktuellen Anforderungen an einen effizienten umweltfreundlichen und sicheren Betrieb im maritimen Einsatz weitgehend erfüllen.

Die zukünftigen Herausforderungen ergeben sich wirtschaftlich durch die verschärften Wettbewerbsbedingungen infolge der deutlichen Verlagerung der maritimen Industrie nach Fernost und emissionstechnisch infolge der deutlichen Verschärfung der Regularien zur drastischen Reduzierung der Emissionen.

Diesen beiden Herausforderungen hat sich das abgeschlossene Verbundvorhaben InKoMar mit seinen Zielen gestellt.

Abgeleitet aus der Verbundprojektaufgabe war die simulationsgestützte Entwicklung kosten- und emissionsoptimierter Leichtbaukolben die Kernaufgabe im Teilprojekt 1.

Die Erfüllung der o. g. extremen wirtschaftlichen und umwelttechnischen Anforderungen an bereits hochentwickelten Kolbenausführungen von maritimen Motoren verlangte einen neuartigen hybriden Lösungsansatz mit seinen wirtschaftlichen und emissionstechnischen Komponenten. Die physikalische Komplexität der zu betrachtenden Prozesse erforderte den Einsatz interdisziplinärer Kompetenzen und die Anwendung gekoppelter numerischer Simulationswerkzeuge wie CFD und FEM, was deutlich über den bisherigen Stand von Wissenschaft und Technik hinausgeht. Es konnte gezeigt werden, dass eine herkömmliche Kolbenkühlung mit Ölzufuhr über Pleuel und Gleitschuh oder Kolbenbolzen und die alternative Kühlung über eine Spritzölzufuhr thermisch gleichwertig sind und somit die konstruktiv einfachere Spritzölkühlung für das Design reibgeschweißter Leichtbaukolben gewählt werden kann.

Zur Erreichung der hochgesteckten wirtschaftlichen und umwelttechnischen Zielstellungen, wie z. B. die Reduzierung der Kolbenmasse um 50 %, des Fertigungsaufwandes um 30 %, war eine durchgehend simulationsgestützte Arbeitsweise erforderlich.

Der hybride Charakter der Arbeitsmethodik ergibt sich einerseits aus der durchgehend simulationsgestützten Arbeitsweise in der Produkt-/Kolbenentwicklung und andererseits aus der durchgehend simulationsgestützten Fertigungsentwicklung (z. B. Gussimulationen, Simulation des Reitschweißprozesses, des thermischen Vorgangs des Vergütens des Kolbenrohlings nach dem Reibschweißvorgang usw.).

Um die erforderliche absolute Realitätsnähe der Simulationsergebnisse zu gewährleisten, wurde jeder Schritt in der Entwicklung der Simulationsmodelle in der MET durch experimentelle Unterstützung der Verbundpartner WTZ gGmbH und SECO GmbH evaluiert. Der hergestellte Leichtbaukolben wurde von der MET GmbH umfassend auf seine Haltbarkeit untersucht, dazu wurde eine große Anzahl von zahlreichen Materialproben aus den reibgeschweißten Rohlingen entnommen und bei dem Projektpartner WTZ gGmbH werkstofftechnisch untersucht.

Zur Evaluierung der von den Kunden geforderten Langlebigkeit zukünftiger reibgeschweißter Leichtbaukolben im maritimen Einsatz wurden die Ermüdungsprüfungen an ausgewählten Proben von üblichen 10^6 bzw. 10^7 Lastwechseln auf über 10^8 Lastwechseln erweitert.

Die Ganzheitlichkeit dieser durchgehend simulationsgestützten Arbeitsweise wurde erstmalig auch auf das Betriebsverhalten der kosten- und emissionsoptimierten Kolben ausgeweitet, in dem auch das Risiko von Ablagerungen im Kühlraum des Kolbens aufgrund des errechneten Temperaturfeldes im Kolbenoberteil vorhergesagt und daraus Serviceplanungen abgeleitet bzw. das Risiko von thermischen Schädigungen des Kolbens erkannt werden. Diese Aussagen wurden durch experimentelle Untersuchung der Entstehung von Ölverkokung und deren isolierenden Eigenschaften an den Verkokungsprüfstand der MET abgesichert.

Die Gesamtheit der entwickelten und evaluierten Simulationsmodelle sind in einen Technologiedemonstrator eingeflossen. Mithilfe dieses Technologiedemonstrators kann das Design, die Fertigung und wichtige Eigenschaften im Betriebsverhalten eines noch „virtuellen Kolbens“



analysiert und bewertet werden. Diese Analyse und Bewertung mit dem Technolgie-demonstrator ist physikalisch und nicht erfahrungsbasiert und kann deshalb zukünftig auf Kolben unterschiedlichster Zylinderdurchmesser und verschiedenster Werkstoffe angewandt werden.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung des Projekts wurden eingehalten. Es gab keine inhaltlichen Änderungen zur Erreichung der Zielstellung gegenüber dem Antrag. Zur Einhaltung der Selbstkosten wurden mehrere kostenneutrale Umwidmungen beantragt und genehmigt. Eine kostenneutrale Verlängerung des Teilprojektes wurde ebenfalls genehmigt und eingehalten (s. a. Abschnitt 3 Planung und Ablauf des Vorhabens).

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises sind Material-, Personal-, Reise-, und sonstige unmittelbare Vorhabenskosten sowie vorhabenspezifische Abschreibungen (Tabelle 2). Die Selbstkostennachkalkulation ergab, dass die finanziellen Ausgaben gegenüber der Vorkalkulation bei allen genannten Positionen unter Berücksichtigung der bestätigten Umwidmungen eingehalten und die Förder- und Eigenmittel streng nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten verwendet wurden.

Tabelle 2: Nachkalkulation der gesamten Selbstkosten

Nr.	Position	Gesamtvor-kalkulation	Gesamtnach-kalkulation
0813	Material	3.254,00 €	2.770,07 €
0837	Personalkosten	665.797,92 €	680.585,49 €
0838	Reisekosten	3.693,08 €	3.235,01 €
0847	vorhabenspezifische Abschreibungen	16.394,92 €	16.394,92 €
0850	sonstige unmittelbare Vorhabenskosten	71.182,08 €	60.094,81 €
0881	gesamte Selbstkosten	750.372,00 €	763.079,80 €

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Verbund geplante und im abgeschlossenen Vorhaben realisierte Forschungsaufgabe hat einen grundlegenden und vorwettbewerblichen Charakter, verbunden mit einem erhöhten wissenschaftlich-technischen Risiko. Damit verbunden war ein entsprechend hohes wirtschaftliches Risiko, welches von der MET GmbH als KMU getragen werden kann.

Die wertvollen innovativen Ergebnisse in der durchgängigen simulationsgestützten Kolbenentwicklung haben die Berechnungskompetenzen der MET GmbH wesentlich erweitert und den industriellen Partner SECO GmbH an neue effiziente Entwicklungswerkzeuge herangeführt.

Die Bewältigung dieser anspruchsvollen Forschungsaufgabe war ohne staatliche Förderung nicht realisierbar. Das bemerkenswerte Ergebnis dieses Verbundprojektes stärkt insgesamt die



Wettbewerbsfähigkeit der maritimen deutschen Industrie und entwickelt bedeutsame Alleinstärkungsmerkmale der beteiligten KMU.

4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit

Innerhalb des Verbundprojektes tritt der größte voraussichtliche Nutzen beim industriellen Verbundpartner SECO GmbH ein. Insbesondere ist die Verwertbarkeit infolge zukünftiger Marktanforderungen bei der SECO GmbH am sichersten gegeben. Mit den innerhalb des Verbundprojektes entwickelten 20 Designvarianten kann die SECO GmbH auf unterschiedlichste zukünftige Marktanforderungen flexibel und schnell reagieren, da für die erarbeiteten unterschiedlichen Designvarianten entsprechende effiziente Berechnungs- und Dimensionierungswerkzeuge beim Verbundpartner MET GmbH und neuartige Prüfverfahren beim Verbundpartner WTZ gGmbH entstanden sind, die bei Bedarf vom Kolbenproduzenten SECO GmbH kurzfristig abgefordert werden können.

Der unmittelbar zu erwartende Nutzen für das Teilprojekt 1, MET GmbH, besteht in der zukünftigen Nutzung der im Vorhaben entwickelten Berechnungs- und Vorhersagemethoden für den Reibschweiß- und Wärmeübertragungsvorgang vom Brennraum zum Kühlraum für unterschiedliche Kühltölzuführungsvarianten.

Die innerhalb des Teilprojektes 1 gewonnenen neuen Erkenntnisse zum Verkokungsvorgang im Kühlraum des Kolbens unterstützen zukünftig Schadensanalysen im Fall von thermisch überbeanspruchten Kolbenkronen oder Kolbenabbrand.

Die Vielfalt der neugewonnenen und erweiterten Erkenntnisse beinhalten ein hohes Verwertungspotenzial, insbesondere unter dem Aspekt des globalen Marktdruckes und stark steigender Emissionsbegrenzungen mit dem Einsatz neuartiger Kraftstoffe.

Mit dem konsequenten Einsatz der erarbeiteten durchgängig simulationsgestützten Entwicklungsmethoden können die Entwicklungszeiten für Kolben erheblich verkürzt, die Treffsicherheit neuartiger Lösungen deutlich erhöht und die Entwicklungskosten drastisch gesenkt werden.

5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Bearbeitung des Projekts sind keine konkreten ähnlichen Wettbewerbsbestrebungen Dritter oder Arbeiten anderer Firmen oder Forschungseinrichtungen zur Entwicklung eines neuen Konstruktionsansatzes für einen zukünftigen Großmotorenkolben bekannt geworden, bei dem die komplizierte und kostenaufwändige Schmier- und Kühltölzufuhr über Kurbelwelle und Pleuel durch eine einfache Spritzdüsenölaufuhr über eine Düse ersetzt werden soll und dessen Fertigungsaufwand konkurrenzfähig ist.

Es sind auch im Projektzeitraum keine Ergebnisse von Dritten bekannt geworden, die auf die geplante und durchgeführte Bearbeitung des Projekts Einfluss gehabt hätten.



Schutzrechtsanmeldungen wurden im Ergebnis des Teilprojekts nicht vorgenommen. Gleichfalls wurden auch keine Schutzrechte oder daraus abgeleitete Lizenzen Anderer in Anspruch genommen.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

In Verbundprojektveranstaltungen und Meilensteinabrechnungen sowie Online-Meetings wurden die Ergebnisse des Teilprojekts in Form von Vorträgen und Präsentationen den Projektpartnern entsprechend dem jeweils aktuellen Projektbearbeitungsstand bekannt gemacht.

Bereits im Verlauf der Projektbearbeitung wurden Teilprojektergebnisse im Rahmen von Firmenpräsentationen bzw. in Gesprächen mit potenziellen Kunden und interessierten Firmen, dargestellt und zugänglich gemacht. Von potenziellen Auftraggebern wurden die Ergebnisse des Teilprojekts in den geführten Diskussionen positiv bewertet. Insofern wurde schon im Verlaufe der Themenbearbeitung eine umfangreiche und weitgehend öffentliche Information und Präsentation gewährleistet.

Die Veröffentlichung und Bekanntmachung der für die Akquisition bedeutsamen Projektergebnisse werden auch weiterhin vorwiegend über spezielle Online-Informationsveranstaltungen bei bisherigen Kunden und bei potenziellen Neukunden erfolgen. Dort wird gleichzeitig die Wirksamkeit der modernen virtuellen Entwicklungswerkzeuge erläutert und demonstriert sowie der zu erwartende hohe Kundennutzen dargestellt.

Auf Grund der Coronaviruspandemie fanden im Projektzeitraum kaum wissenschaftlich-technische Tagungen und Konferenzen öffentlich statt. In der Regel wurde das Teilprojekt 1 online präsentiert. Erst im Jahr 2022 konnte wieder an wissenschaftlichen Konferenzen teilgenommen werden. So wurde z. B. die 7. Rostocker Großmotorentagung genutzt, um in Form einer Ausstellung die Teilprojektergebnisse zu veröffentlichen (Tabelle 1). Die Teilprojektergebnisse wurden genutzt, um weitere Entwicklungs- und Industrieprojekte im Rahmen von Netzwerken zu initiieren.

Tabelle 3: Veröffentlichungen

Nr.	Veranstaltungsort	Ausstellung und Tagungen
1.	1. Schiffsmaschinentagung 2019	Ausstellung / Präsentation
2.	37. CADFEM-Konferenz	Ausstellung / Präsentation
3.	2. Schiffsmaschinentagung 2021	Ausstellung / Präsentation
4.	Gasmotorenkonferenz 2022	Projektpräsentation vor Teilnehmern der Tagung
5.	FVV-Tagung 2022	Projektdarstellung bei Teilnehmern der Tagung
6.	potenzielle Kunden	Online-Präsentationen vor Kunden der MET GmbH



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: links: CAD-Modell des Kolbens und des Pleuels, rechts: Extrahiertes geometrisches Modell der Ölzufuhr	9
Abbildung 2: Hauptkomponenten des Ölzufuhrsystems mit angedeutetem Öldurchfluss.....	10
Abbildung 3: Aufteilung des Ölstromes aus der Pleuelbohrung (blau) in den Pfad zur Kolbenbolzenlagerung (rot) und den Pfad zu den Kühlräumen des Kolbens (grün)	10
Abbildung 4: Numerisches Modell (links) und Verteilung des Öls im OT (rechts).....	11
Abbildung 5: Visualisierung der Ausbreitung des Freistrahls auf dem Prüfstand der MET GmbH: links - Düse mit konstantem Querschnitt, Düse aus dem Projekt SimShaker.....	13
Abbildung 6: Ergebnis der Shakersimulation mit der Düsen-Schnittstelle	13
Abbildung 7: Darstellung der beiden im Berechnungsmodell implementierten Bewegungsarten, Grün – translatorisch, Rot - schwenkend.....	14
Abbildung 8: Zwei Varianten der drucklosen Schmierölversorgung aus den Kühlräumen des Kolbens.	14
Abbildung 9: Darstellung der Ölverteilung während des dynamischen Vorgangs der drucklosen Schmierölversorgung des Kolbenbolzens zu verschiedenen Zeitpunkten für zwei untersuchte Geometrievarianten.....	16
Abbildung 10: links: Drucklose Schmierölversorgung über die Kühlräume des Kolbens, rechts: Ölverteilung während des dynamischen Vorgangs mit markierten Schnittstellen zur Lagerberechnung.....	17
Abbildung 11: Hydrodynamische Druckverteilung (links) und Total- sowie Kontaktdruckverlauf (rechts)	18
Abbildung 12: Physikalisches Modell der Wärmeübertragung vom Brenngas zum Kühlraum im Kolben	18
Abbildung 13: Darstellung des Wärmestroms über die Wände des Kolbenkühlraums für beide Ölzuführungsvarianten.....	20
Abbildung 14: links: Kolben mit angenommenem Strahlbild der Einspritzdüsen, rechts: Brennraumseitige Randbedingungen für die Berechnung von mittleren Kolbentemperaturen	21
Abbildung 15: Zeitlich gemittelte thermische brennraumseitige Randbedingungen aus der Verbrennungssimulation des Projektpartners WTZ gGmbH.....	22
Abbildung 16: Berechnete Temperaturfelder in beiden Kolbendesignvarianten: oben – Seriennaher Kolben (Messkolben WTZ gGmbH), unten - Reibgeschweißter Leichtbaukolben (SECO-Designvariante)	23

Abbildung 17: Anlassfarben an der Kolbenkrone (links) und Vergleich zu den berechneten Temperaturen (rechts)	24
Abbildung 18: Ölpfadverlauf über Kurbelwelle-Pleuel-Kolbenbolzen-Kühlraum	25
Abbildung 19: Verkokungsprüfstand und dessen Hauptkomponenten.....	27
Abbildung 20: links: Verkokungserscheinungen bei unterschiedlichen Probertemperaturen ..	27
Abbildung 21: Außermotorisch erzeugte Verkokungsschichten auf einem Probekörper	27
Abbildung 22: Spezielle Probekörper für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit:.....	28
Abbildung 23: Verkokte Probekörper für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit:	29
Abbildung 24: Prüfstand zur Untersuchung der Wärmeleiteigenschaften von Verkokungsschichten.....	30
Abbildung 25: Identifikation von Bereichen im Temperaturfeld (farblich mit lila dargestellt) in den Kühlräumen des Kolbens, welche zu verkokungskritischen Zuständen führen	31
Abbildung 26: Einfluss der Verkokung an den Oberflächen von Kühlräumen auf die brennraumseitige Temperaturverteilung der Kolbenkrone (links: ohne Verkokung, rechts: mit 1mm Verkokungsschicht)	31
Abbildung 27: Beschichtete Verkokungsproben:	32
Abbildung 28: MET GmbH Reibschweißen Versuchsprüfstand	33
Abbildung 29: Leichtbauprüfkolbens mit Labiryntdichtung	34
Abbildung 30: Simulierte Reibschweißverbindung (Temperatur °C, Stauchphase)	34
Abbildung 31: Prüfkolben eingebaut im Reibschweiß-Versuchsprüfstand der MET GmbH.....	35
Abbildung 32: Aufgenommener Reibschweißvorgang.	36
Abbildung 33: Leichtbauprüfkolben im Versuchsofen während der Wärmebehandlung	37
Abbildung 34: Ermüdungsprüfung des Versuchskolbens in der Resonanzprüfanlage	38
Abbildung 35: Ermüdungsprobe aus einer reibgeschweißten Verbindung	38
Abbildung 36: Reibgeschweißte Leichtbauprüfkolbensrohlinge	39
Abbildung 37:FE-Ergebnisse: Gesamtverformung für den Leichtbaukolben für den Lastfall maximale Gaskräfte. (Die Verformung ist mit dem Faktor 100 überhöht.)	41
Abbildung 38: FE-Ergebnisse: von Mises Spannung Ergebnis für das Leichtbaukolben für den Lastfall maximale Gaskräfte.....	41
Abbildung 39: Links: Profil der Maximalkraft infolge der Kolbensekundärbewegung aus der numerischen Analyse. Rechts: Druckfeld infolge der Kolbensekundärbewegung aufgeprägt auf das Kolbenhemd.....	42
Abbildung 40: FEM-Ergebnisse für den nach MET-Vorschlägen modifizierten Messkolben. ..	43
Abbildung 41: Dehnungsmessstreifen am unteren Bereich der inneren Seite des Kolbenunterteils.....	44
Abbildung 42: Spannungsergebnisse aus dem Experiment über vier Umdrehungen der Kurbelwelle bei 75% Last mit maximaler Spannung von 43 N/mm².	44

Abbildung 43: Spannungen im unteren Bereich der inneren Seite des Kolbenunterteils aus der FEM Analyse unter Berücksichtigung der Kräfte aus der Kolbensekundärbewegung.	45
---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aktivitätenplanung.....	5
Tabelle 2: Nachkalkulation der gesamten Selbstkosten.....	47
Tabelle 3: Veröffentlichungen.....	49



Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Simulationsgestützte Entwicklung kosten- und emissionsoptimierter Leichtbaukolben für den maritimen Einsatz	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Bludszuweit	5. Abschlussdatum des Vorhabens <div style="text-align: center;">30.09.2022</div>
	6. Veröffentlichungsdatum <div style="text-align: center;">06.02.2023</div>
	7. Form der Publikation <div style="text-align: center;">Bericht</div>
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MET Motoren- und Energietechnik GmbH Erich-Schlesinger-Str. 50 18059 Rostock	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen <div style="text-align: center;">03SX491A</div>
	11. Seitenzahl <div style="text-align: center;">52</div>
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 11019 Berlin	13. Literaturangaben <div style="text-align: center;">0</div>
	14. Tabellen <div style="text-align: center;">3</div>
	15. Abbildungen <div style="text-align: center;">43</div>
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung <p>Ziel des Teilprojekts war es, zu untersuchen, ob die bisher übliche komplizierte Ölzufuhr zum Großmotorenkolben über das Pleuel und einen Gleitschuh durch ein neuartiges Kolbenkühlsystem mit einfacher Spritzölversorgung in Kombination mit einer reibgeschweißten Verbindung zwischen Kolbenober- und -unterteil ersetzt werden kann. Wesentliche neue Erkenntnisse konnten mit der Entwicklung und Anwendung eines virtuellen Technologiedemonstrators zur realitätsnahen Beschreibung der thermischen Belastung beliebig gestalteter Kolben gewonnen werden. Die physikalische Komplexität der zu betrachtenden Prozesse erforderte den Einsatz interdisziplinärer Kompetenzen und die Anwendung gekoppelter numerischer Simulationswerkzeuge wie CFD und FEM, was deutlich über den bisherigen Stand von Wissenschaft und Technik hinausgeht. Es konnte gezeigt werden, dass die herkömmliche Kühlung über Pleuel/Gleitschuh und die einfachere Spritzölkühlung thermisch gleichwertig sind und somit die konstruktiv einfachere Spritzkühlung für das Design reibgeschweißter Leichtbaukolben verwendet werden kann. Der Technologiedemonstrator wurde erfolgreich für die Bewertung des Verkokungsrisikos an den Kühlraumoberflächen der neuartigen Kolben eingesetzt und es konnten Kriterien für die Gestaltung einer optimierten Brennraumgeometrie abgeleitet werden. Ein vorhandener Reibschweißprüfstand wurde auf den im Teilprojekt geplanten Kolbendurchmesser erweitert, um die Ergebnisse der durchgängig simulationsgestützten Vorhersage des komplexen Reibschweißvorganges experimentell auf seine Realitätsnähe zu überprüfen. Dieser Beweis konnte beeindruckend erbracht werden.</p> <p>Die Bedeutung der gewonnenen Ergebnisse für die zukünftige Motorenentwicklung liegt in der gezielten Möglichkeit das Design von Großmotorenkolben mit durchgängig simulationsgestützten Entwicklungsmethoden sowohl hinsichtlich des Wärmetransports vom Brennraum zum Kühlmittel als auch des Masseeinsatzes zu bewerten und zu optimieren und dabei gleichzeitig die Leistungsdichte, Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Motoren zu erhöhen sowie Umwelt und natürliche Ressourcen maximal zu schonen. Veröffentlichungen in Form von Konferenzbeiträgen wurden vorgenommen.</p>	
19. Schlagwörter Leichtbaukolben, Großmotoren, Dual-Fuel-Betrieb, Kolbenkühlung, Kolbensmierung, Simulation, Reibschweißen, Emissionsreduzierung	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Report		
3. title Simulation-based development of cost- and emission-optimized lightweight pistons for maritime use			
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Dr.-Ing. habil. Siegfried Bludszuweit	5. end of project <div style="text-align: center;">30.09.2022</div>		
	6. publication date <div style="text-align: center;">06.02.2023</div>		
	7. form of publication <div style="text-align: center;">Report</div>		
8. performing organization(s) (name, address) MET Motoren- und Energietechnik GmbH Erich-Schlesinger-Straße 50 18059 Rostock	9. originator's report no.		
	10. reference no. <div style="text-align: center;">03SX491A</div>		
	11. no. of pages <div style="text-align: center;">52</div>		
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 11019 Berlin	13. no. of references <div style="text-align: center;">0</div>		
	14. no. of tables <div style="text-align: center;">3</div>		
	15. no. of figures <div style="text-align: center;">43</div>		
16. supplementary notes			
17. presented at (title, place, date)			
18. abstract The aim of the subproject was to investigate whether the complicated oil supply to the large engine piston via the connecting rod and a sliding shoe, which has been common up to now, can be replaced by a new type of piston cooling system with a simple spray oil supply in combination with a friction-welded connection between the upper and lower parts of the piston. Significant new findings were obtained with the development and application of a virtual technology demonstrator for the realistic description of the thermal load on pistons of any design. The physical complexity of the processes to be considered required the use of interdisciplinary competences and the application of coupled numerical simulation tools such as CFD and FEM, which clearly exceeds the previous state of the art in science and technology. It was shown that conventional cooling via connecting rod/slide shoe and the simpler spray oil cooling are thermally equivalent and thus the constructively simpler spray cooling can be used for the design of friction-welded lightweight pistons. The technology demonstrator was successfully used to evaluate the risk of coking on the cooling chamber surfaces of the novel pistons, and criteria for the design of an optimized combustion chamber geometry could be derived. An existing friction welding test rig was extended to the piston diameter planned in the subproject in order to verify experimentally the realism of the results of the consistently simulation-based prediction of the complex friction welding process. This proof was impressively provided. The significance of the results obtained for future engine development lies in the targeted possibility of evaluating and optimizing the design of large engine pistons using consistent simulation-based development methods, both in terms of heat transfer from the combustion chamber to the coolant and the use of mass, while at the same time increasing the power density, reliability and service life of the engines and maximizing the conservation of the environment and natural resources. Publications in the form of conference papers have been made.			
19. keywords: lightweight piston, large engine, dual-fuel operation, piston cooling, piston lubrication, simulation, friction welding, emission reduction			
20. publisher		21. price	