

## Abschlussbericht zum Verbundprojekt eta-up

<b>Förderkennzeichen:</b>	03SX419E
<b>Verbundprojekt:</b>	eta-up - Steigerung des Gesamtnutzungsgrades und Reduzierung der Reibverluste am mittelschnelllaufenden Dieselmotor
<b>Vorhaben:</b>	Analyse des Wärmehaushalts des Kolbens eines mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotors
<b>Ausführende Stelle:</b>	Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik Universität Rostock
<b>Projektleiter:</b>	Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Egon Hassel
<b>Bearbeiter:</b>	Dr.-Ing. Jürgen Nocke M.Sc. Alexander Dottei
<b>Laufzeit</b>	01.09.2016 bis 29.02.2020

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>1</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>5</b>
1.1 Motivation .....	5
1.2 Projektziele .....	5
1.3 Ziele Projektanteil LTT .....	6
1.4 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	6
1.5 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
1.6 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	7
1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
<b>2 AP1: Aufbau der experimentellen Methoden und numerischen Grundmodelle .....</b>	<b>9</b>
2.1 Konzept Thermoelemente Messkolben 1 / Basis .....	9
2.2 Konzept und Konstruktion Messschwinge 1 für Messkolben 1 / Basis .....	11
2.3 Fertigung Messschwinge 1 und Bestückung Messkolben 1 / Basis .....	12
2.4 Vernetzung und Plausibilitätstests Messkolben 1 / Basis .....	13
<b>3 AP2: Basisvermessungen und Modellvalidierungen .....</b>	<b>14</b>
3.1 Installation Messkette und Messschwinge 1 für Messkolben 1 / Basis .....	14
3.2 Funktionstest Messkette für Messkolben 1 / Basis .....	16
3.3 Validierungsrechnungen und erste Temperaturfelder Messkolben 1 / Basis .....	17
<b>4 AP3: Experimentelle und numerische Analyse der Kolbenbaugruppe .....</b>	<b>20</b>
4.1 Einbau und Inbetriebnahme Messschwinge 1 für Messkolben 1 / Basis .....	20
4.2 Anpassungen zur Inbetriebnahme .....	20
4.3 Erfassung und Auswertung Temperaturmessdaten Messkolben 1 / Basis .....	21
4.4 Konzept und Konstruktion Messschwinge 2 für Messkolben 1 / Basis .....	22
4.5 Fertigung Messschwinge 2 .....	23
<b>5 AP4: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Potenzial des Kühlwassersystems .....</b>	<b>23</b>
5.1 Konzept Thermoelemente Messkolben 2 .....	23
5.2 Bestückung Messkolben 2 .....	25
5.3 Einbau und Inbetriebnahme Messschwinge 2 für Messkolben 1 / Basis .....	25
5.4 Erfassung und Auswertung Temperaturmessdaten Messkolben 1 / Basis .....	26
5.5 Stationäres Temperaturfeld und Wärmeströme in Messkolben 1 .....	27

---

5.6	Instationäres Temperaturfeld und Wärmeströme im Kolbenoberteil von Messkolben 1 .....	29
5.7	Instationäre lokale in Kolbenoberseite eindringende Wärmeströme von Messkolben 1 .....	31
<b>6</b>	<b>AP5: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Potenzial des Schmierölsystems .....</b>	<b>31</b>
6.1	Konzept alternative Messkette Messkolben 2 .....	32
6.2	Fertigung drahtlose Telemetrie Messkolben 2.....	32
6.3	Einbau und Inbetriebnahme drahtlose Telemetrie Messkolben 2.....	33
6.4	Erfassung und Auswertung Temperaturmessdaten Messkolben 2.....	33
6.5	Stationäres Temperaturfeld und Wärmeströme in Messkolben 2.....	34
6.6	Instationäres Temperaturfeld und Wärmeströme im Kolbenoberteil von Messkolben 2 .....	37
6.7	Lokal stationäre Wärmeströme Unterseite Kolbenoberteil Messkolben 2....	37
6.8	Analytisch-empirischer Ansatz für Wärmeströme .....	39
<b>7</b>	<b>AP6: Systematisierung, Ableitung Auslegungsmethoden, Hochrechnung Gesamtpotenzial .....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....</b>	<b>43</b>
<b>10</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit ...</b>	<b>44</b>
<b>11</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....</b>	<b>44</b>
<b>12</b>	<b>Bekannt gewordener Fortschritt während des Vorhabens.....</b>	<b>44</b>
<b>13</b>	<b>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....</b>	<b>45</b>
<b>14</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>46</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung des erarbeiteten Konzepts aller Oberflächen- und Mantelthermoelemente für den Messkolben 1 / Basis.....	10
Abbildung 2 Darstellung des Konzepts für die Führung der Thermoelementleiter über mechanische Schwingenelemente für Messkolben 1 / Basis.....	11
Abbildung 3 Sukzessive Bestückung des Messkolben 1 zusammen mit der Fertigung des dazu angepassten Schwingensystems. ....	12
Abbildung 4 Plausibilitätstest zur Simulation des Temperaturfelds des Messkolben 1 / Basis. ....	13
Abbildung 5 Links wird der Messkolben 1 / Basis mit der Messschwinge als Gesamtinstallation dargestellt. Rechts oben wird der Übergang von Kolben zu Pleuel und rechts unten die Eigenkonstruktion der Gehäuseluke jeweils im Fokus dargestellt.....	15
Abbildung 6 Übersicht der motorexternen Messkette für die Thermoelemente der Messschwinge. Links wurden die AD-Wandler inklusive Spannungsversorgung untergebracht während rechts die einzelnen Verstärker je Thermoelement auf zwei Backplanes verteilt wurden. ....	16
Abbildung 7 2D Kontur Plot der Temperatur (links) und der Wärmestromdichte (rechts) verteilt auf dem Ausschnitt einer Kolbenkronenoberfläche zum Zeitpunkt von 12°KW nach dem OT [6].....	17
Abbildung 8 Darstellung von jeweils einem Querschnitt der verwendeten Polyeder Rechengitter des Messkolbens 1 / Basis und des Brennraums mit offenen Ventilen sowie dem angrenzenden Krümmer.....	18
Abbildung 9 Visueller Vergleich der Kolbenkrone zwischen dem bereits betriebenen Messkolben und dem zugehörigen simulierten Temperaturfeld.....	19
Abbildung 10 Links wird das Konzept für die Anpassungen am Gegengewicht und rechts das fertiggestellte Gegengewicht dargestellt. ....	21
Abbildung 11 Gemessene Temperaturverläufe von Oberflächen- und Mantelthermoelementen an der Kolbenkrone. ....	22
Abbildung 12 Links wird das Konzept für die Messschwinge 2 und rechts werden die fertiggestellten Gelenke Lager dargestellt.....	23
Abbildung 13 Darstellung des Konzepts aller Oberflächen- und Mantelthermoelemente für den Messkolben 2. ....	24
Abbildung 14 Darstellung des bestückten Messkolbens 2 zusammen mit den oberen Schwingenelementen. ....	25
Abbildung 15 Temperaturverlauf eines Oberflächenthermoelements der Kolbenkrone dargestellt über der Drehzahl während einem konstanten Anstieg der Drehzahl. ....	26
Abbildung 16 Schema zu den Bereichen der Kolbenkrone und der Kolbenkühlräume zusammen mit der Nummerierung der jeweils verwendeten Aufteilung des Messkolbens 1 / Basis. ....	27
Abbildung 17 Verteilung der übertragenen Wärmeströme über die gesamte Oberfläche des Messkolbens 1 / Basis.....	28
Abbildung 18 Lokale Verteilung der übertragenen Wärmeströme im Kühlraum des Messkolbens 1 / Basis.....	28
Abbildung 19 Stationäres Temperaturfeld des Messkolbens 1 / Basis mit Querschnitt entlang der Nabenachse.....	29

---

Abbildung 20	Instationäres Temperaturfeld des Brennraums dargestellt anhand eines Freischnittes während einzelner Kurbelwinkel. ....	30
Abbildung 21	Darstellung der instationären lokalen an der Kolbenkronen übertragenen Wärmestromdichten mit einem Übersichtsdiagramm der Kronenaufteilung in verschiedene Zonen. ....	31
Abbildung 22	Darstellung der gewählten Elektronik zur Signalübertragung (links) sowie des gefertigten Aluminiumgehäuses (rechts). ....	32
Abbildung 23	Experimentell erfasste instationäre Verläufe ausgewählter Oberflächen- und Mantelthermoelemente eines Betriebspunktes für Messkolben 2. ....	34
Abbildung 24	Instationäre Verläufe der experimentell ermittelten Wärmestromdichten an der Kolbenkronen während eines Lastwechsels. ....	35
Abbildung 25	Verteilung der übertragenen Wärmeströme über die gesamte Oberfläche des Messkolbens 2. ....	36
Abbildung 26	Stationäres Temperaturfeld des Messkolbens 2 mit Querschnitt entlang der Nabenachse. ....	36
Abbildung 27	Schema zu den Bereichen der Kolbenkronen und der Kolbenkühlräume zusammen mit der Nummerierung der jeweils verwendeten Aufteilung des Messkolbens 2. ....	37
Abbildung 28	Lokale Verteilung der übertragenen Wärmeströme im Kühlraum des Messkolbens 2 unter Variation des Wärmeübergangs an den Kühlraumzonen. ....	38
Abbildung 29	Lokale Verteilung der übertragenen Wärmeströme im Kühlraum des Messkolbens 2 unter Variation des Wärmeübergangs an der Kolbenunterseite. ....	38
Abbildung 30	Alle über die gesamte Oberfläche übertragenen Wärmeströme für den simulierten Vergleich zwischen Messkolben 1 / Basis und Messkolben 2. ....	39
Abbildung 31	Globale Verteilung der übertragenen Wärmeströme des Messkolbens 1 / Basis unter Variation der anliegenden Last an der Kolbenkronen. ....	40

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der grundlegende Vergleich heutiger mittelschnelllaufender Schiffsdieselmotoren mit PKW oder LKW Motoren aus dem On-Road Bereich zeigt auf, dass die großvolumigen Motoren aus dem maritimen Bereich die höheren effektiven Wirkungsgrade erzielen. Diese gehören mit 44 % bis 47 % zu den maximal erreichbaren Wirkungsgraden von Hubkolbenmotoren, die nur von den langsam laufenden 2-Takt-Dieselmotoren übertroffen werden. Wird darüber hinaus das stark unterschiedliche Verhältnis der jährlichen Laufzeit bedacht (im maritimen Sektor werden jährlich über 5000 Betriebsstunden erreicht während für den On-Road Sektor Größenordnungen von etwa 500 Betriebsstunden jährlich erreicht werden), so erklärt dies die Anstrengungen der letzten Jahre, die Brennverfahren immer weiter zu optimieren. Derselbe Vergleich zeigt ebenfalls, dass im On-Road Bereich einige Fortschritte hinsichtlich des mechanischen Wirkungsgrades erzielt werden konnten, durch die der Vorteil des optimierten Brennverfahrens leicht reduziert wird [1]. Dementsprechend groß ist das Interesse daran, den mechanischen Wirkungsgrad von Schiffsdieselmotoren hinsichtlich weiterer Optimierungspotenziale zu untersuchen. Dazu kann auf die bereits gewonnenen Erkenntnisse zurückgegriffen werden. Es ist bekannt, dass die mechanischen Verluste durch die Optimierung der Reibpaarung von Kolben-Kolbenringen-Laufbuchse oder durch die Wahl geeigneter Lagerwerkstoffe reduziert werden können [2].

## 1.2 Projektziele

Im Rahmen des Projekts eta-up sollen daher Maßnahmen erforscht werden, um die Reibverluste im Bereich der betrachteten mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotoren zu senken und den Gesamtnutzungsgrad von diesen auf ein Niveau zu heben, dass heute nur von schnelllaufenden Diesel- und Gasmotoren in Anwendungen als Block-Heiz-Kraftwerken (BHKW) erreicht wird. Im Ergebnis soll damit eine deutliche Senkung des primären Energiebedarfs der Schiffe bei unveränderten Leistungsparametern und damit einhergehend eine signifikante Reduzierung der betriebsbedingten Emissionen erreicht werden. Für die Anwendung am mittelschnelllaufenden Schiffsmotor müssen technische Lösungen, die in den vergangenen Jahren an schnelllaufenden Motoren untersucht wurden, hinsichtlich ihrer Effektivität neu bewertet werden, da sich sowohl die Belastungen als auch die Anforderungen an die hier betrachteten Großmotoren stark von kleinvolumigen Motoren unterscheiden. Für die Erfüllung der gesetzten Projektziele sind weiterhin neuartige Lösungsansätze zu erforschen, die den besonderen Rand- und Betriebsbedingungen von Großmotoren Rechnung tragen. Eine besondere Herausforderung besteht in der Erforschung neuartiger, für den Mittelschnellläufer geeigneter Versuchsmethoden zur genauen Bestimmung der Gesamtreibverluste und deren Aufteilung auf die einzelnen Teilsysteme bzw. tribologischen Partner. Mit diesen Untersuchungen wurden eine Halbierung der Reibverluste und eine Steigerung des effektiven Wirkungsgrades um 5 % bei Nennleistung angestrebt. Analog hierzu wurde eine Reduzierung um jeweils 5 % für die CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> (nur im Falle schwefelhaltiger Kraftstoffe) sowie für die Partikelemissionen angestrebt. Insbesondere im Hinblick auf das Gesamtsystem Schiff als Versorgungseinheit sollte auch der Gesamtnutzungsgrad erhöht werden, indem die zur Verfügung gestellten Energieströme hinsichtlich ihrer Qualität und Quantität erhöht werden sollen. Dies sollte über eine Anhebung der Temperaturniveaus in den nutzbaren Abwärmeströmen geschehen. Wird dieser Ansatz positiv in das

Versorgungskonzept des Schiffes integriert, sollte auch eine Senkung des Primärenergiebedarfs um 10 bis 15 % erreicht werden. Für die hier betrachteten Großmotoren stellt die Anwendung geeigneter experimenteller Analysemethoden ebenfalls eine Herausforderung dar, deren Aussagekraft zusätzlich mit numerischen Methoden ergänzt werden sollte, um übertragbare Ergebnisse zum Einfluss unterschiedlicher reibungssenkender Maßnahmen am Großmotor zu erhalten. Alle Analysen, Methoden und deren Ergebnisse sollten zusammengeführt werden, um die Zeit für Innovationszyklen neuer Systeme und Produkte auf dem Markt signifikant zu senken.

### **1.3 Ziele Projektanteil LTT**

Basierend auf den bisherigen Erfahrungen für die Applikation und die Erfassung von Oberflächenthermoelementen an brennraumbegrenzenden Bauteilen sollte am Versuchsträger – einem Reihensechszylinder MaK 6M20CR mit 1 MW effektiver Leistung – ein Messsystem zur experimentellen Erfassung, Auswertung und Interpretation des Kolbentemperaturfeldes angebracht werden. Diese spezielle Messmethodik sollte ebenfalls die Bestimmung von an der Kolbenoberfläche übertragenen Wärmeströme ermöglichen. Dabei sollten die transienten Temperaturgradienten an der Kolbenkronenoberfläche auch während eines Motorarbeitsspiels aufgelöst werden. Durch die weiträumige Installation von Mantelthermoelementen sollte die Kerntemperatur des Kolbens analysiert werden können. Parallel dazu sollte ein Auslegungsverfahren auf Basis von CFD- und FEM-Simulationen entwickelt werden, um die Aussagen der experimentellen Methodik zu erweitern. Alle gewonnenen Daten und Analysen dienen ebenfalls als Grundlage bzw. Validierung weiterführender Simulationen der Projektpartner. Durch die Zuarbeit der vorherrschenden thermischen Belastungen am Kolben konnten so z.B. bei dem IVB in Braunschweig quantitative Aussagen über die Warmkonturen der Laufbuchse oder bei dem IST in Aachen Aussagen über die an einem Betriebspunkt vorherrschenden Reibverluste gewonnen werden.

### **1.4 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Mit dem Projekt eta-up wurde ein Konsortium aus einzelnen Komponentenherstellern und Universitäten zusammengestellt, deren jeweiligen Erfahrungen sich bereits gut ergänzen, um die Abarbeitung der gesetzten Ziele zu gewährleisten und die Forschung hinsichtlich der Reibverluste an Großmotoren ermöglichen. Der Austausch zwischen den Projektpartnern wurde durch regelmäßige Telefonkonferenzen im zweiwöchigen Turnus unterstützt. Der aktuelle Status wurde schriftlich in Zwischenberichten festgehalten und dem Projektträger Jülich mitgeteilt. Zusätzlich wurden in regelmäßigen Abständen Milestone Meetings für alle Projektpartner einberufen, um die Zwischenstände zu dokumentieren.

### **1.5 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Teilvorhaben des LTT beschäftigte sich mit der Bestückung der Messkolben, der Bestimmung des Wärmehaushalts der Messkolben auf Basis von Temperaturmessungen und mit der Simulation des Kolbentemperaturfeldes. Alle experimentellen Untersuchungen wurden dabei an einem MaK 6M20CR durchgeführt, der in Rostock von dem Projektkoordinator FVTR GmbH betrieben wird. Dazu wurde das Projekt in sechs Arbeitspakete (AP) unterteilt, die im Folgenden vorgestellt werden.

AP1 beschäftigt sich mit dem Aufbau der experimentellen Methoden und der numerischen Grundmodelle. Die Simulation wurde vorbereitet mit dem Erzeugen der benötigten



Rechengitter und dem Durchführen von geeigneten Plausibilitätstests. Parallel dazu wurden Konzepte für die Bestückung des Messkolbens 1 / Basis sowie für die Konstruktion der mechanischen Datenübertragung über Schwingenelemente angefertigt. Dazu wurden die hierbei benötigten Fertigungsschritte ebenfalls vorbereitet.

In AP2 wurde die Messkette, bestehend aus mechanischen Schwingen- und Thermoelementen, am Pleuel installiert. Parallel dazu wurde die Elektronik zur Messauswertung (Thermoelementverstärker, AD-Wandler) in einem separaten Elektronikgehäuse vorbereitet. Anschließend wurde die Installation hinsichtlich ihrer Funktion kontrolliert und die korrekte Übertragung geprüft. Die erzeugten Rechengitter wurden für Validierungsrechnungen der eigenen als auch der Simulationen der Partner und die Berechnung der ersten Temperaturfelder genutzt.

In AP3 wurde der präparierte Messkolben 1 / Basis inklusive Messschwinge 1 verbaut. Die Inbetriebnahme verzögerte sich dabei aufgrund von Einbautoleranzen, durch den der notwendige Mindestabstand zwischen den Bauteilen nicht mehr gewährleistet wurde. Dies hatte zur Folge, dass Anpassungen an den Gegengewichten vorgenommen wurden um die ersten Messungen durchzuführen. Darüber hinaus wurde ein zweiter Schwingenmechanismus mit angepassten Gelenken und Lagerstellen konzipiert und gefertigt.

In AP4 wurde das Konzept für die Bestückung des zweiten modifizierten Messkolbens entworfen und die Bestückung desselben wurde vorgenommen. Parallel hierzu wurde am Prüfstand die Messschwinge 2 für den Messkolben 1 / Basis installiert und weitere Messungen wurden damit durchgeführt. Mittels der Simulation wurde das vorliegende stationäre Kolbentemperaturfeld sowie das transiente Temperaturfeld an der Kolbenkrone bestimmt und es wurden weitere Untersuchungen zu den übertragenen Wärmeströmen durchgeführt.

Da sich im experimentellen Messbetrieb Schwierigkeiten bei der stabilen Erfassung höherer Drehzahlen ergaben, wurde in AP5 ein alternatives Konzept für eine drahtlose Messkette erstellt, beschafft und gefertigt. Diese drahtlose Telemetrie wurde zusammen mit dem bestückten Messkolben 2 verbaut. Mit Hilfe dieses Systems wurden die zugehörigen Temperaturdaten erfasst. Analog zu Messkolben 1 / Basis wurden simulativ das stationäre Kolbentemperaturfeld sowie die zugehörigen übertragenen Wärmeströme untersucht.

In AP6 wurden, basierend auf den ermittelten Ergebnissen, Empfehlungen für die Optimierung und Dimensionierung der Kolbenkühlung zusammengefasst.

Die ursprünglich angesetzte Projektlaufzeit belief sich vom 01.09.2017 bis zum 31.08.2019 und wurde bis zum 29.02.2020 verlängert, da es zu Verzögerungen im Versuchsbetrieb und damit während der nachfolgenden Untersuchungen auch zu Verzögerungen bei der Simulation kam.

## **1.6 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Um die beschriebenen Projektziele zu erreichen, wurde ein geeignetes Konzept für die Messung der Kolbentemperatur entworfen. Für eine möglichst präzise Erfassung der Energieströme aus dem motorischen Brennraum an die umgebenden Bauteile werden am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik Oberflächenthermoelemente auf der Basis aufgedampfter Chromschichten an der Kolbenoberfläche appliziert. Aufgrund ihrer geringen thermischen Trägheit und deshalb kurzen Reaktionszeit sind diese Thermoelemente dafür



geeignet, die transienten Temperaturgradienten an der Kolbenkronenoberfläche auch während eines Motorarbeitsspiels aufzulösen. Die erfassten Temperatursignale werden über speziell zu konstruierende mitbewegte Schwingenelemente zum externen Messwerterfassungssystem geführt. Dort werden die übertragenen Signale verstärkt und gewandelt um auf dem installierten Messrechner abgespeichert zu werden. An diesem erfolgen die abschließende Bearbeitung sowie Auswertung der Temperaturdaten.

Auf dem Gebiet der Applikation und der Messwertverarbeitung von Oberflächenthermoelementen im Brennraum von Kolbenmaschinen verfügt der LTT Rostock bereits über jahrelange Erfahrung. Des Weiteren liegen erhebliche Kompetenzen auf dem Gebiet der Modellierung und Simulation des Motorinnenprozesses und der Abgasnachbehandlung vor. Hier wurden in den vergangenen Jahren in enger Zusammenarbeit mit Motor- und Automobilherstellern umfangreiche Forschungsarbeiten zur Simulation des Vorentflammungsprozesses, des Zünd- und Verbrennungsprozesses, der innermotorischen Schadstoffentstehung, von Kaltstartprozessen und von zyklischen Schwankungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Modellierung und Simulation des Motorinnenprozesses sind in eine Reihe von Dissertationen eingegangen.

### **1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit innerhalb des Projektes erfolgte nur mit den zugehörigen Partnern, aus denen sich das Projektkonsortium formiert hatte. Dieses besteht aus der Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG, der Ingenieurgesellschaft für Strukturanalyse und Tribologie (IST), der Universität Braunschweig (IVB), der FVTR GmbH sowie den assoziierten Partnern wie der Addinol Lube Oil GmbH, der Federal-Mogul Burscheid GmbH, der M. Jürgensen GmbH & Co. KG, der KS Kolbenschmidt GmbH, der Rickmeier GmbH und der Zollern BHW Gleitlager GmbH & Co. KG..

## 2 AP1: Aufbau der experimentellen Methoden und numerischen Grundmodelle

Im Folgenden wird das Konzept für die Bestückung des ursprünglichen Kolbens 1 / Basis mit Thermoelementen erläutert. Danach werden die Konstruktion sowie die Fertigung der verwendeten mechanischen Datenübertragung und der Fertigungsprozess der Kolbenbestückung beschrieben. Zuletzt wird auf die parallel durchgeführte Simulation und die dabei erzeugten Gitter und ersten Plausibilitätstests eingegangen.

### 2.1 Konzept Thermoelemente Messkolben 1 / Basis

Für die experimentellen Analysen wurde zusätzlich zu den sechs bereits im Versuchsträger verbauten Kolben ein zusätzlicher Messkolben zur Verfügung gestellt. Dieser Messkolben entspricht seiner Bauart nach den verbauten Basiskolben. Diese bestehen aus einem hohen Kolbenhemd bzw. Unterteil aus Aluminium das über Dehnschaftschrauben mit der Kolbenkrone bzw. dem Oberteil aus Stahl verbunden ist. Vor der eigentlichen Installation der Thermoelemente musste ein Konzept für die Bestückung der Thermoelemente im Kolben sowie für die Durchführung der Thermoelementleitungen definiert werden. Diese Konzeptphase wurde ebenfalls in enger Abstimmung mit den Projektpartnern durchgeführt, um auf die jeweils notwendigen Datenbedürfnisse eingehen zu können. Als Resultat wurde folgendes Konzept (vgl. Abbildung 1) zur Auflösung des Kolbentemperaturfeldes entworfen. Ziel der geplanten Temperaturmessstellen Konfiguration war eine möglichst vollständige Abbildung des Wärmehaushalts im Kolben. An der Kolbenoberfläche wurden aus diesem Grund insgesamt 15 Thermoelemente installiert. Acht davon wurden als Oberflächenthermoelemente (vgl. Abbildung 1, O4 bis O11) auf zwei radial verteilten Linien angebracht, um das Wärmeeindringverhalten entlang einer Spraykeule aufzulösen. Die Untersuchung der bereits verwendeten Kolben zeigte ein durchgehend gleichmäßig verteiltes Brennbild. Deshalb wurde von einer symmetrischen Temperaturverteilung des Kolbens ausgegangen. O8 wurde dabei, repräsentativ für die axiale Temperaturverteilung auf dem Kolbensteg, zentral entlang der Einspritzachse des Spraykolbens angebracht. O6/7 wurde an dem Kolbenmuldenrand angebracht, da es dort global gesehen zu den höchsten thermischen und mechanischen Belastungen kommt. Um eventuelle Abweichungen im Temperaturfeld des Kolbens aufgrund der turbulenten Verbrennung im Brennraum abbilden zu können, wurde O4 in der Kolbenmulde axialsymmetrisch um jeweils 90° gespiegelt, sodass die gespiegelten Thermoelemente an geometrisch ähnlichen Positionen platziert wurden (vgl. Abbildung 1, O1 bis O3). Damit wurde die gleichmäßige Erfassung des Temperaturfeldes, eine Validierung der aufgestellten Annahme sowie ein Vergleich der Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages ermöglicht. In einer Tiefe von etwa 1mm unter der Kolbenoberfläche wurden keine ausgeprägten zyklisch fluktuierenden Temperaturänderungen als Resultat der typischen Arbeitsspiele einer Verbrennungskraftmaschine mehr erwartet. Deshalb wurde unter den Oberflächenthermoelementen O5/6/7/8 jeweils ein Mantelthermoelement platziert, um sowohl lokal als auch zeitlich eine hoch aufgelöste Erfassung des Wärmestroms zu ermöglichen. Da im Bereich der Kolbenkrone die höchsten Temperaturgradienten vorhanden sind, wurden zur Abbildung des Wärmehaushalts im gesamten Kolben weitere Messstellen vorgesehen. An der Außenseite des Kolbens wurde an der unteren Kante des Feuerstegs und am Grund der ersten Ringnut jeweils ein Mantelthermoelement angebracht. Ähnlich hierzu wurden in den

Kühlkanälen der Shaker-Kühlung entlang eines planaren Querschnittes paarweise insgesamt acht Mantelthermoelemente installiert.

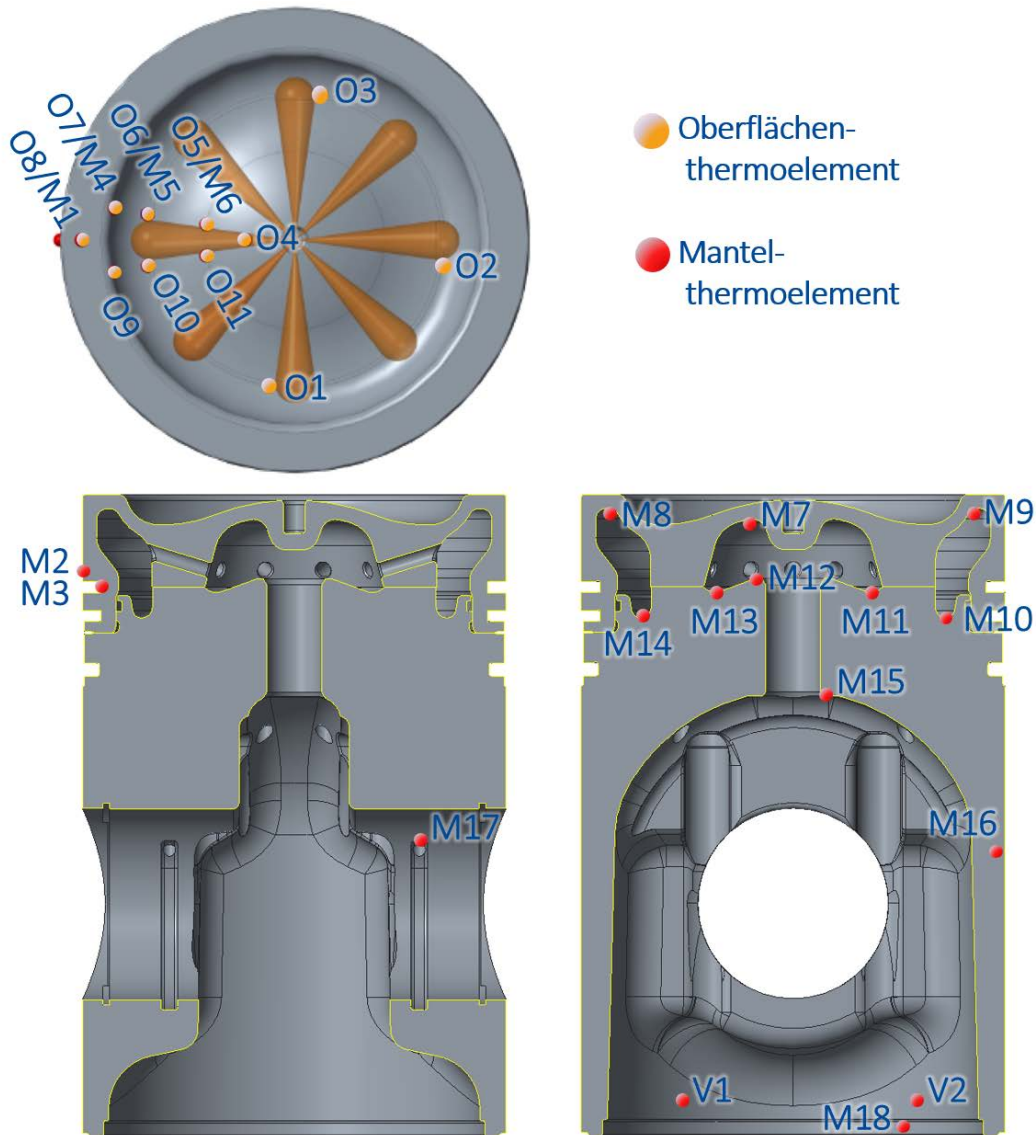


Abbildung 1 Darstellung des erarbeiteten Konzepts aller Oberflächen- und Mantelthermoelemente für den Messkolben 1 / Basis. Pleuellkrone und Pleuellhemd in geteilter Ausführung und unterschiedlichen Materialien.

Die Thermoelemente M7 bis M9 sollten dabei möglichst hoch und die Thermoelemente M10 bis M14 möglichst tief platziert werden, um sowohl die Maxima als auch die Minima des sich ausbreitenden Temperaturfeldes der Shaker-Kühlung korrekt zu messen. Aufgrund des nur schwer bestimmbareren Ölfüllgrades und der damit schwer vorhersehbaren Kühlwirkung, wurde der Außenring der Shaker-Kühlung auf beiden Seiten des Querschnittes mit jeweils einem Mantelthermoelement-Paar versehen (vgl. Abbildung 1 M9/M10 und M8/M14). Damit sollte zum einen geprüft werden, ob im Rahmen von Modellierungsansätzen von einer axial symmetrischen Kühlwirkung ausgegangen werden darf und zum anderen, ob durch den Ladungswechsel zwischen Ein- und Auslassseite des Pleuels Temperaturdifferenzen entstehen. An der Pleuellunterseite wurden global gesehen nur geringe Temperaturgradienten erwartet, sodass nur zwei Mantelthermoelemente zur Abbildung des Temperaturfeldes eingeplant wurden (vgl. Abbildung 1, M16 und M18). Diese wurden in einem möglichst großen

Abstand zueinander angebracht werden, um das Temperaturgefälle vollständig zu erfassen und damit den Effekt des abfließenden Schmieröls hinreichend genau wiedergeben zu können. Zur Erfassung der Öl-Zulauftemperatur an den Lagern des Kolbenbolzens wurde ein Mantelthermoelement innerhalb einer Zulaufbohrung angebracht (vgl. Abbildung 1, M17).

## 2.2 Konzept und Konstruktion Messschwinde 1 für Messkolben 1 / Basis

Aus den recherchierten Optionen zur Datenübertragung ging hervor, dass die Installation drahtloser Telemetrie Lösungen aus bauraumtechnischer Sicht möglich wäre. Doch das Konzept der Führung der installierten Thermoelementleiter über mechanische Schwingenelemente wurde bewusst gewählt, da die Unterbringung mehrerer Telemetrie Module zur Abbildung der geforderten Thermoelementanzahl sowie die zugehörige Finanzierung eines kommerziellen Systems im Rahmen dieses Projektes nicht realisierbar wäre. Deswegen wurde die Verwendung eines Schwingensystems favorisiert, da dies zwar einem konstruktiven Mehraufwand gleichkommt, aber die gestellten Anforderungen in ausreichendem Maße erfüllen kann. Folgendes Konzept wurde für die Führung der Thermoleiter erstellt.

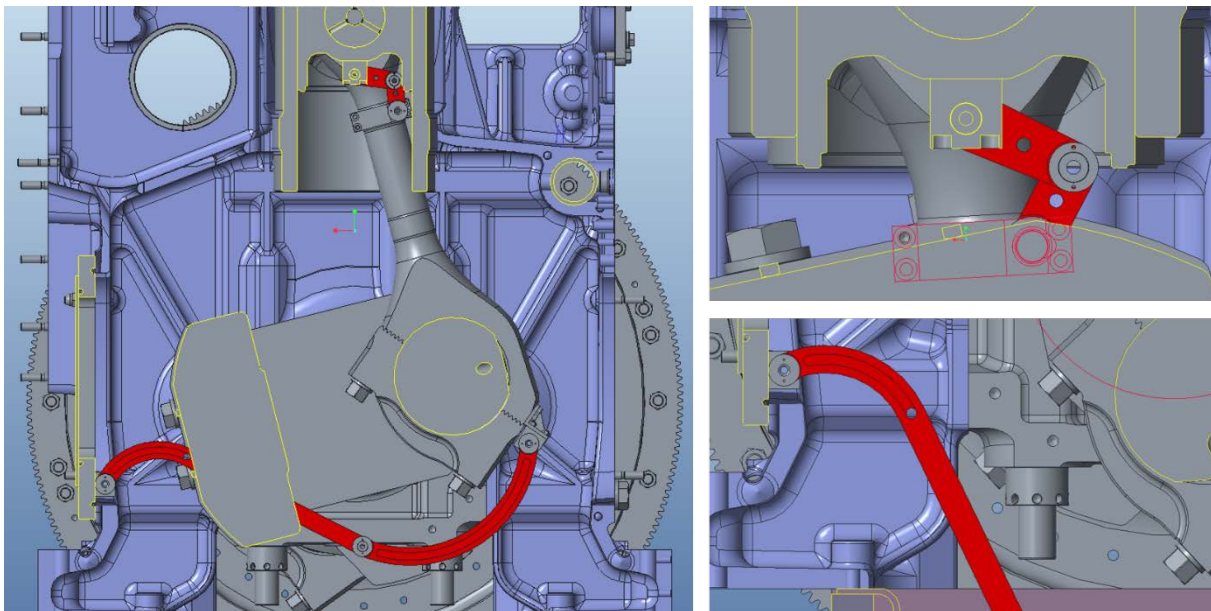


Abbildung 2 Darstellung des Konzepts für die Führung der Thermoelementleiter über mechanische Schwingenelemente für Messkolben 1 / Basis. Rechts oben wird die Problematik des Übergangs von Pleuel zu Pleuel hervorgehoben, während rechts unten auf die Herausforderung des langen Übertragungsabstandes und zeitgleich eingeschränkten Bauraums zwischen Motorgehäuse, Pleuel, Gegengewichten und Schmierölwanne.

Bei der Konzeptionierung des Schwingensystems wurde sich daran orientiert, mit möglichst wenigen Bauteilen geringer Größe eine mechanische Führung zu erzeugen, über die die Thermoelementleiter aus dem Motorraum hinausgeführt werden. Eine Führung außerhalb des Motorgehäuses wurde vermieden, um den Betrieb des Forschungsmotors nicht durch aufwändige Abdichtungsrichtungen einschränken zu müssen, so wie es bei Einzylinderaggregaten aufgrund der möglichen Anpassungen der Rahmenkonstruktion oftmals gehandhabt wird. Im ersten Schritt werden die Verbindungen vom Pleuel an das Pleuel geführt und im zweiten Schritt vom Pleuel an das Gehäuse des Motors, von dem aus sie an die Außenseite verlegt werden können.

Das oberste Schwingenelement zwischen Pleuel und Pleuel muss in einem gewissen Winkel vom Pleuel abgehen, um zu vermeiden, dass das etwas breitere Verbindungsstück mit dem



Pleuellager des Kolbenbolzens kollidiert. Diese Versetzung der Verbindungsstücke wird benötigt, um das untere Schwingenelement im freien Bauraum zwischen Pleuel und Kurbelwellengegengewichten zu führen. Von diesem oberen Übergang aus werden die Thermoelementleiter seitlich entlang des großen Pleuelauges an die unteren Schwingenelemente geleitet. Diese sind an einem Ende jeweils sichelförmig ausgeführt, um während der Rotationsbewegung zum einen die Kollision mit dem Motorgehäuse und zum anderen mit dem Pleuel selbst zu vermeiden. Zusätzlich wurde in diesem Konzept darauf geachtet, dass der tiefste Punkt der Konstruktion während dem Betrieb nicht mit der Ölwanne kollidiert. Nach den unteren Schwingenelementen werden die Thermoelementleiter zum letzten Lager geleitet, das an der Innenseite der Versorgungsluke angebracht wurde. Von dort werden die Signalkabel durch eine zusätzlich angebrachte Bohrung aus dem Motorraum hinaus an eine Auswerteeinheit (mit Signalverstärker und A-D-Wandler) weitergeleitet.

### 2.3 Fertigung Messschwinge 1 und Bestückung Messkolben 1 / Basis

Die Fertigung der Messschwinge 1 sowie die Bestückung des Messkolbens 1 / Basis konnte aufgrund der bereits früh durchgeführten Absprachen mit den Fertigungsabteilungen ohne Abweichungen durchgeführt werden. Der Fortschritt wird im Folgenden dokumentiert.



Abbildung 3 Sukzessive Bestückung des Messkolben 1 zusammen mit der Fertigung des dazu angepassten Schwingensystems. Oben links wird die bedampfte Goldschicht dargestellt, wobei die nicht mehr sichtbaren Messstellen der Oberflächenthermoelemente als rote Punkte visualisiert werden. Oben rechts wird die Unterseite der Pleueloberseite und unten links die Unterseite des Pleuelunterteils dargestellt, jeweils mit den ersten Thermoelementen und deren Verlegung im Material. Unten rechts werden die gefertigten und zusammengesetzten Schwingenelemente als Führung von Pleuel zum Pleuel dargestellt.

Wie in Abbildung 3 oben links erkennbar, konnte durch den Bedampfungsprozess die Kolbenkrone mit allen Oberflächenthermoelementen bestückt werden. Unerwünschte Ablösungen oder Schäden an den gebildeten Kontaktstellen der Thermoelemente traten nicht auf. Durch die günstig gewählte Orientierung an der Kolbengeometrie wurden die Thermoelementleiter im Kolbenunterteil, trotz des stark eingeschränkten Bauraums infolge der Pleuelbewegung, vollständig verlegt. Positiv hierbei war auch, dass die Erfassung eines Schmierölzulaufkanals zwischen dem Kolbenbolzen und dem äußeren Kühlkanal angebracht werden konnte, so wie durch das erarbeitete Konzept vorgesehen (vgl. Abbildung 1, M17). Bei der Verlegung der Thermoleiter auf der Unterseite des Oberteils wurde zusätzlich bedacht, dass die Anordnung nicht die vorgesehenen Kühlflächen zu stark einschränkt. Bei der in Abbildung 3 dargestellten Bestückung des Kolbenoberteils ist erkennbar, dass die Verlegung der Leiter trotz des deutlich härteren Stahls durchgeführt werden konnte. Mit Hilfe des erarbeiteten Konzeptes wurden somit die Verlegung aller Thermoelemente sowie die Zusammenführung von Kolbenober- und -unterteil realisiert. Um eine stabile Positionierung der Thermoelemente zu gewährleisten, wurden diese nach dem Zusammensetzen ebenfalls am Kolbenunterteil fixiert, sodass eine nicht lösbare Verbindung entstand.

## 2.4 Vernetzung und Plausibilitätstests Messkolben 1 / Basis

Die Bearbeitung der Simulation wurde parallel zu der Konzepterstellung des ersten Messkolbens vorangetrieben. Für die notwendige Vernetzung etc. wurden die Softwarepakete ANSYS® und AVL FIRE™ verwendet. Hierzu wurde ein Gitter generiert, das als sogenanntes Multimaterialmesh ausgeführt wurde. Damit wurde zunächst nachgewiesen, dass die Wärmeleitung durch die Kolbenkrone und das Kolbenhemd korrekt abgebildet werden, ohne dass unetige Temperaturgradienten um den Bereich des Materialwechsels herum auftreten. Dazu wurde unter anderem die Kontaktstelle durch einen konformen Gitterübergang abgebildet während vor allem die wandnahen Bereiche der Kolbenkrone, an denen größere Temperaturgradienten erwartet wurden, feiner aufgelöst wurden.

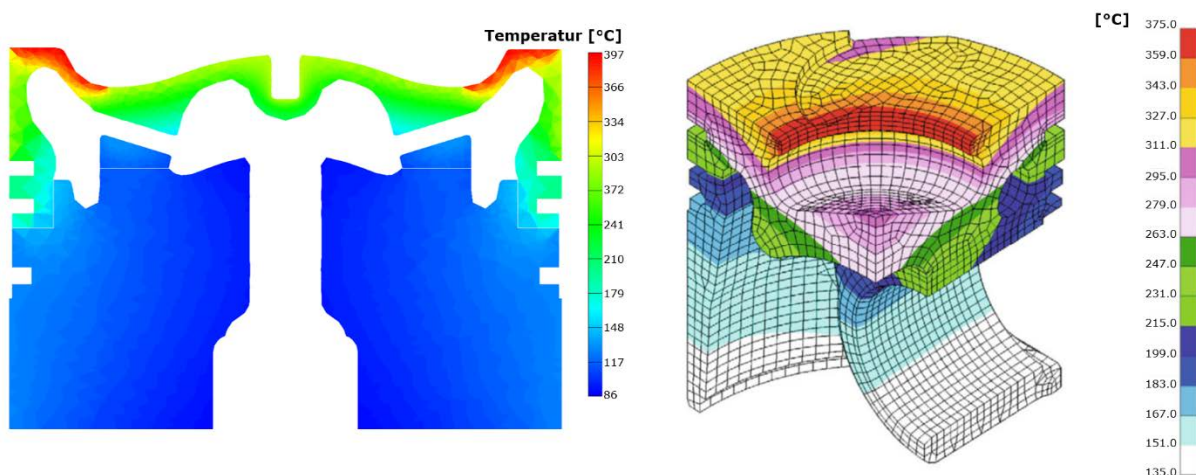


Abbildung 4 Plausibilitätstest zur Simulation des Temperaturfelds des Messkolben 1 / Basis. Links wird das Temperaturfeld im Querschnitt des simulierten Kolbens dargestellt und rechts mit dem in der Literatur angegebenen Temperaturfeld eines typischen PKW Dieselmotorkolbens verglichen. [3]

Wie Abbildung 4 zeigt, stellte sich mit vereinfachten Randbedingungen bei den durchgeführten Plausibilitätstests ein Temperaturfeld ein, das qualitativ bereits bekannten Verläufen von kleineren Nutzfahrzeugkolben entspricht. Das Kolbenhemd und der Bereich um den Pleuelkopf weisen kaum bzw. nur sehr geringe Temperaturgradienten auf. Als Folge der sich

ausbreitenden Flammenfront im Brennraum nimmt der Rand der Kolbenkronenmulde die höchsten Temperaturen an. Das Temperaturfeld in der Mulde selbst wird von der Geometrie der Kolbenkrone und von den darunter ausgeführten Kolbenkühlkanälen maßgeblich beeinflusst. Da sowohl das simulierte Temperaturfeld als auch die aus der Literatur bekannten Temperaturfelder den gleichen Verlauf bzw. übereinstimmende Größenordnungen wiedergeben (vgl. auch Temperaturverlaufsmessungen nach [4] und [5]), wurde das erzeugte Simulationssetup positiv gewertet. Im Rahmen dieser Plausibilitätstests wurde ebenfalls nachgewiesen, dass unterschiedliche Materialeigenschaften definiert und für das jeweilige Kolbengitter hinterlegt werden können, um die unterschiedlichen Materialpaarungen bzw. Kolbengeometrien zu berücksichtigen.

### **3 AP2: Basisvermessungen und Modellvalidierungen**

Nachfolgend wird die Installation der Messkette mit der mechanischen Datenübertragung am Messkolben 1 / Basis festgehalten. Dazu wird ebenfalls auf die motorextern angebrachte Elektronik eingegangen und die damit verbundenen ersten Funktionstests der Messkette werden beschrieben. Seitens der Simulation werden nach den Validierungsrechnungen erste Temperaturfelder präsentiert.

#### **3.1 Installation Messkette und Messschwinge 1 für Messkolben 1 / Basis**

Nach der Fertigung aller benötigten Schwingenelemente wurden diese für die Installation am Pleuelschaft (Übergang von Kolben zu Pleuel) und am Pleuelfuß (Übergang von Pleuel zu Motorgehäuse) vorbereitet. Die Herausforderung hierbei kommt durch die benötigten Passungstoleranzen zu Stande. Bisherige Erfahrungen zeigten, dass bereits geringe Fertigungsabweichungen in den Lagerstellen entweder zum Fressen, und damit zu einer Überlastung der Elemente, oder zum vibrationsbehafteten Betrieb, und damit zum stetigen Lösen der Verbindungen, führen. Aus diesem Grund wurden alle Schwingenelemente sowie die zugehörigen Lager paarweise ausgeführt und alle Lagerpassungen wurden iterativ aneinander angepasst. Nach diesen Anpassungen wurde die eigentliche Messschwinge an Pleuel und Kolben installiert. Für die Installation selbst musste bereits der vollständige Montageprozess des Kolbens inklusive des Einsetzens durch die Laubuchse und der Montage des Pleuelfußes berücksichtigt werden. Die fertig montierten Gelenke bildeten die Grundlage für die Führung der Thermoelementleiter. Zunächst wurden am Kolbenboden aufgrund der Anzahl der Thermoelemente zwei Übergangsstellen installiert, an die die bereits verlegten Oberflächen- und Mantelthermoelemente geführt wurden. Beide Übergänge wurden möglichst gleichmäßig als jeweils ein isothermer Block ausgeführt, deren absolute Temperaturbeträge über die mit V1 und V2 bezeichneten Vergleichsthermoelemente (vgl. Abbildung 1) erfasst wurden. Abgehend von diesen Übergangsstellen wurden die Spannungssignale über Kupferlitzen geringen Querschnittes geführt. Dieses Vorgehen wurde aus unterschiedlichen Gründen gewählt. Unter anderem ist die weitere Verwendung der mit Inconel ummantelten Thermoelemente nicht für die Fixierung an den Schwingenelementen geeignet. Zum einen ist dieses Mantelmaterial nicht für die wiederholte Biegung bzw. Rotation bei hohen Motordrehzahlen geeignet, weil es dadurch schnell zum Abriss der Leiter kommen würde. Zum anderen würde die Anbringung von mehreren Thermoelementen wie in unserem Fall eine deutlich größere Schwinge benötigen, da der Durchmesser je Thermoelement mit mindestens 1 mm berücksichtigt werden müsste. Wobei größer ausgeführte Schwingenelemente mit mehr Masse und somit größeren Belastungen einhergehen würden.



Die verwendeten Litzen weisen demgegenüber einen deutlich kleineren Durchmesser auf (0.5 mm) und sind deutlich besser dafür geeignet der zyklischen Bewegung der Schwinge zu folgen.

Die fertiggestellte Installation ist in Abbildung 5 dargestellt. Dabei wird gut sichtbar, wie die Führung aller Leiter auch bei dem eingeschränkten Bauraum erfolgreich realisiert werden konnte. Die Herausforderung bestand dabei darin, alle Leiter zum einen flach genug zu verlegen, um einen Schaden in Folge der Motorbeschleunigung oder in Folge einer Kollision mit benachbarten Bauteilen zu vermeiden. Zum anderen wurde gleichzeitig bei den Lagerstellen eine biegungs- und torsionsarme Führung der Leiter realisiert, die einem frühzeitigen mechanischen Bruch der Signalleiter entgegenwirkt. Durch die gewählte Anordnung der Schwingenelemente war es möglich, die Fixierung aller Thermoelemente bereits außerhalb des Motorgehäuses vorzunehmen ohne die anschließend notwendige Montage des Pleuelfußes zu beeinflussen.



Abbildung 5 Links wird der Messkolben 1 / Basis mit der Messschwinge als Gesamtinstallation dargestellt. Rechts oben wird der Übergang von Kolben zu Pleuel und rechts unten die Eigenkonstruktion der Gehäuseluke jeweils im Fokus dargestellt.

Für die Fixierung der unteren Schwingenelemente an dem Motogehäuse wurde die ursprüngliche Gehäuseluke durch eine massive Eigenkonstruktion (vgl. Abbildung 5 unten rechts) ersetzt, bei der die Anbringung einer öldichten Kabeldurchführung einfacher anzulegen ist. Die nach außen geführten Thermoelementleiter können somit an die motorextern angebrachte Messeinheit geführt werden, um die Temperatur Messkette zu vervollständigen. Die Messeinheit selbst wurde in einem abgeschirmten Elektronikgehäuse bzw. Schrank untergebracht (vgl. Abbildung 6), um störende Einflüsse durch den Generator zu vermeiden. Aus dem selbigen Grund wurde die Zuleitung der Leiter von Motorgehäuse zum Elektronikgehäuse mit Hilfe einer zusätzlichen Schirmung unterstützt.



Abbildung 6 Übersicht der motorexternen Messkette für die Thermoelemente der Messschwinge. Links wurden die AD-Wandler inklusive Spannungsversorgung untergebracht während rechts die einzelnen Verstärker je Thermoelement auf zwei Backplanes verteilt wurden.

Im Gehäuse wurde jedes Thermoelement seinem jeweiligen Verstärker zugeführt, wobei für die Oberflächen- und Mantelthermoelemente Spannungsverstärker hoher Bandbreite verwendet wurden und für die Vergleichsthermoelemente langsamere Thermoelementverstärker. Das ermöglichte die Bereitstellung eines ausreichend schnell aufgelösten Spannungssignals für die nachgeschalteten AD-Wandler, die ansonsten die zu kleinen Spannungsdifferenzen im Bereich einiger mV nicht verarbeiten könnten. Die verbaute Elektronik wurde mit einem linear geregelten Netzteil versorgt um zusätzlich die sonst möglichen Netzschwankungen zu minimieren. Die somit erzeugten Digitalsignale wurden weitergeleitet an einen Messrechner, der im Leitstand platziert wurde um die Erfassung und Sicherung der Temperaturdaten sowie Absprachen bezüglich der Motorsteuerung während des Betriebs ermöglichte.

### 3.2 Funktionstest Messkette für Messkolben 1 / Basis

Vor dem eigentlichen Einbau der beschriebenen Messkette mit der Messschwinge in den MaK 6M20CR musste die Funktionsweise der Elektronik überprüft werden. Dazu wurde vor allem bei der erhöhten Thermoelementanzahl sichergestellt, dass die Zuordnung sowie die

Polarität aller Leiter korrekt definiert wurden. Da bei der Installation nicht immer eine Beschädigung der installierten Leiter ausgeschlossen werden kann, wurde deren Funktionsweise iterativ durch einen lokalen Energieeintrag überprüft. Zusätzlich wurde für jeden Signaleingang ein künstlich erzeugter zyklischer Energieimpuls als Input simuliert. Das war insofern von entscheidender Bedeutung, als das damit die Auflösung der eigentlichen Temperaturerfassung und vor allem die zeitlich synchrone Erfassung aller Datenkanäle gewährleistet wurden. Dies wurde benötigt, um die anschließende Zuordnung aller Thermoelemente sowie den Bezug zu dem motorseitig erfassten Kurbelwinkelsignal zu ermöglichen. Mit der fertiggestellten Messkette konnten alle durchgeführten Tests positiv ausgeführt werden.

### 3.3 Validierungsrechnungen und erste Temperaturfelder Messkolben 1 / Basis

Der dominierende Energieeintrag in den Kolben wird durch den Wärmeübergang vom Brennraum an die Kolbenkrone definiert. Laut Literatur [6] haben bisherige Simulationen hierbei verdeutlicht, dass das resultierende Temperaturfeld stark davon abhängt, wie fein die Kolbenkrone aufgelöst wird, da es lokal zu deutlich inhomogen verteilten Gasttemperaturen, Wärmeübergangskoeffizienten und somit auch zu einer inhomogenen Verteilung der übertragenen Wärmeströme in Folge der Ladungswechselbewegung und der Verbrennung kommt (vgl. hierzu Literaturangaben in Abbildung 7).

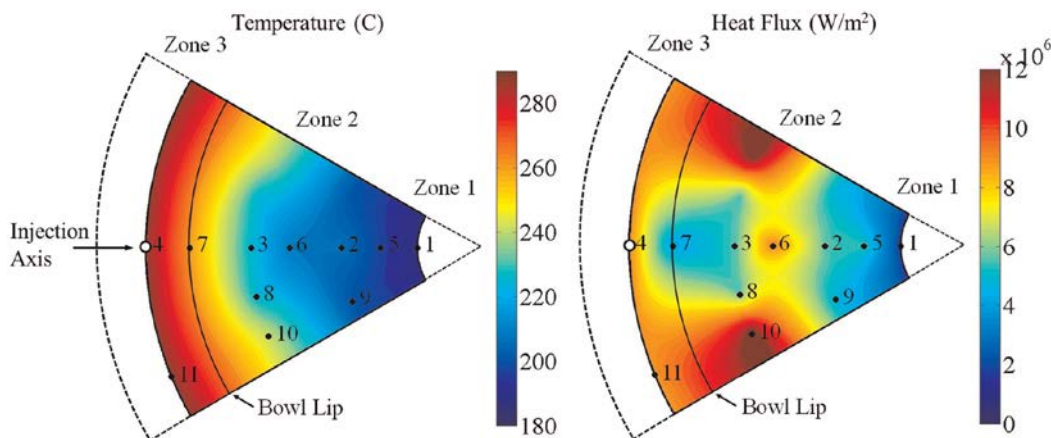


Abbildung 7 2D Kontur Plot der Temperatur (links) und der Wärmestromdichte (rechts) verteilt auf dem Ausschnitt einer Kolbenkronenoberfläche zum Zeitpunkt von 12°KW nach dem OT [6].

Aus diesem Grund wurden sowohl die Strömungsführung des Kraftstoff-Luft-Gemisches entlang der Ventile, innerhalb des Brennraums und des Abgaskrümmers als auch die Kraftstoffeinbringung und die Verbrennung mit Hilfe von 3D CFD zeitlich und örtlich aufgelöst simuliert. Dieser Ansatz ermöglichte die Abbildung des beschriebenen Wärmeübergangs an der Kolbenkrone und damit die Generierung der benötigten Randbedingungen für die Simulation des Kolbentemperaturfeldes. Für die Bestimmung des Temperaturfeldes wurde für den Festkörper auf Basis des vorhandenen CAD Modells ein Rechengitter erzeugt, dass in Abbildung 8 dargestellt wird. Des Weiteren wird ebenfalls das verwendete Rechengitter für den Brennraum abgebildet. Im Folgenden wird auf Details der Simulation sowie die verwendeten Modelle für die Turbulenz, die Verbrennung und die Einspritzung eingegangen. Das Brennraumgitter wurde beweglich ausgeführt, sodass bei der Simulation der vollständige Motorzyklus, inklusive aller vier Arbeitstakte, berücksichtigt wurde.



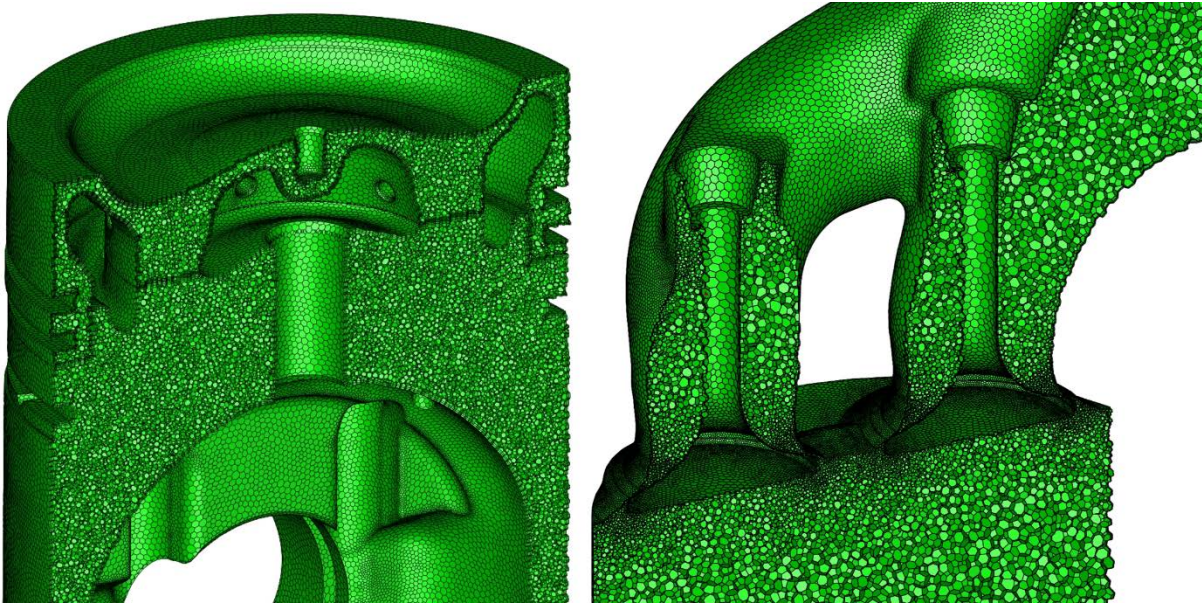


Abbildung 8 Darstellung von jeweils einem Querschnitt der verwendeten Polyeder Rechengitter des Messkolbens 1 / Basis und des Brennraums mit offenen Ventilen sowie dem angrenzenden Krümmer.

Dazu wurden, je nachdem ob gerade der Ladungswechsel aufgelöst wird, die Ein- und Auslasskanäle separat zugeschaltet. Während der Kompressionsphase wurden an der Position des oberen Totpunktes, kurz vor Beginn der Verbrennung, Gitter mit etwa 0,4 Mil. Zellen bei einer Auflösung von etwa 2 bis 3 mm außerhalb der verfeinerten Zonen für den eingebrachten Kraftstoff verwendet. Die Ladungswechselbewegung über den Einlass- und Auslasskanal wurde über die bekannten Ventilsteuerzeiten gesteuert, um Einflüsse der turbulenten Ladungsführung auf das sich ausbreitende Temperaturfeld im Brennraum berücksichtigen zu können. Zur Modellierung der Turbulenz wurde eine kompressible Gasströmung angenommen, für die das k-zeta-f Modell verwendet wurde. Dieses entspricht für die vorliegende Anwendung einer numerisch stabileren Variante des ursprünglichen Modells [7]. Für die Verbrennung selbst wurde das ECFM-3Z Modell verwendet. Dieses entspricht einem erweiterten Coherent-Flame Modell, das besonders für die Anwendung von Dieselverbrennungen gedacht ist. Dabei werden die Zellen der betrachteten Gitterstruktur in jeweils drei Zonen (unvermischte Luft, unvermischter Kraftstoff, vermischte Luft mit Kraftstoff) aufgeteilt. Für die Verbrennung wird die benötigte Flammenfrontdichte über eine Transportgleichung gelöst. Die Durchmischung selbst wird dabei über ein Mischungsmodell realisiert, das sowohl die inhomogene turbulente vorgemischte als auch die diffusive Verbrennung abbilden kann. Für die Einbringung des Kraftstoffsprays wurden Submodelle verwendet, die den Prozess der Kraftstoffeinspritzung und des Umsatzes unter hohem Druck und Temperatur physikalisch korrekt wiedergeben sollen. Für die Bestimmung des Widerstandes der Kraftstofftropfen bei Interaktion mit der Gasphase wird das Modell nach Liu-Reitz verwendet, bei dem die auftretende Verzerrung der Tropfen berücksichtigt wird. Für die Wandinteraktion wird ein Modell verwendet, das auf einem ursprünglichen Prinzip von Naber und Reitz beruht. Bei diesem werden Tropfen-Wand-Interaktionen, abhängig von der Weberzahl, zwei unterschiedlichen Regimen (Rebound oder Jet) zugeordnet. Je nachdem welches Regime vorliegt, werden so die Geschwindigkeitskomponenten der darauffolgenden Flugbahn der Tropfen bestimmt. Für die Verdampfung wird das Modell nach Abramzon und Sirignano verwendet. Bei diesem wird die eigentlich übertragene Verdampfungsenergie mit

Hilfe eines Korrekturfaktors bestimmt, der, in Abhängigkeit von weiteren Kennzahlen wie der Sherwood- und der Nusseltzahl, gewonnen. Dabei wird auf ein iteratives Verfahren zurückgegriffen. Für den Tropfenaufbruch wird das Wave Standard Modell genutzt. Dieses unterscheidet zwischen zwei Regimen. Bei langsamen Geschwindigkeiten kommt es zu einem Rayleigh Zerfall, der für die vorliegende Anwendung nicht von Bedeutung ist. Bei hohen Geschwindigkeiten wiederum wird angenommen, dass die Störungen auf der Flüssigkeitsoberfläche von der Wellenlänge der eingebrachten Flüssigkeit abhängen. Somit wird die Größenordnung der entstehenden Tropfen mit der Wellenlänge der instabilsten Welle an der Fluidoberfläche gleichgesetzt. Die Validierungsrechnungen mit Hilfe der erzeugten Gitter wiesen die grundsätzliche Eignung für die beschriebene Methodik nach. Die transienten an der Kolbenkrone vorliegenden Wärmeströme wurden dabei über ein Code Coupling Interface übertragen, dass die Interaktion zwischen beiden Gittern (unter Berücksichtigung der Kolbenbewegung) übernimmt. Dieses Interface basiert auf dem Austausch der jeweils wandnahen Wärmeübergangskoeffizienten und Temperaturen. Es ermöglicht demnach die zeitgleiche Berücksichtigung des Wärmeübergangs in der Gasphase und der Wärmeleitung im Festkörper. Zur Optimierung der Simulationsdauer wurde der Informationsaustausch zwischen beiden Rechengittern mit einer asynchronen Zeitauflösung gewählt. Die Wärmeleitung während eines Arbeitszyklus des Motors wurde mit etwa 0.5 °KW zeitlich gröber aufgelöst, als die Strömung samt der Verbrennung, die mit etwa 0.1 °KW aufgelöst wurden. Letztere wurden anhand des vermessenen Brennraumdruckverlaufs und einer 0D-Simulation an ausgewählten Betriebspunkten parametrisiert.

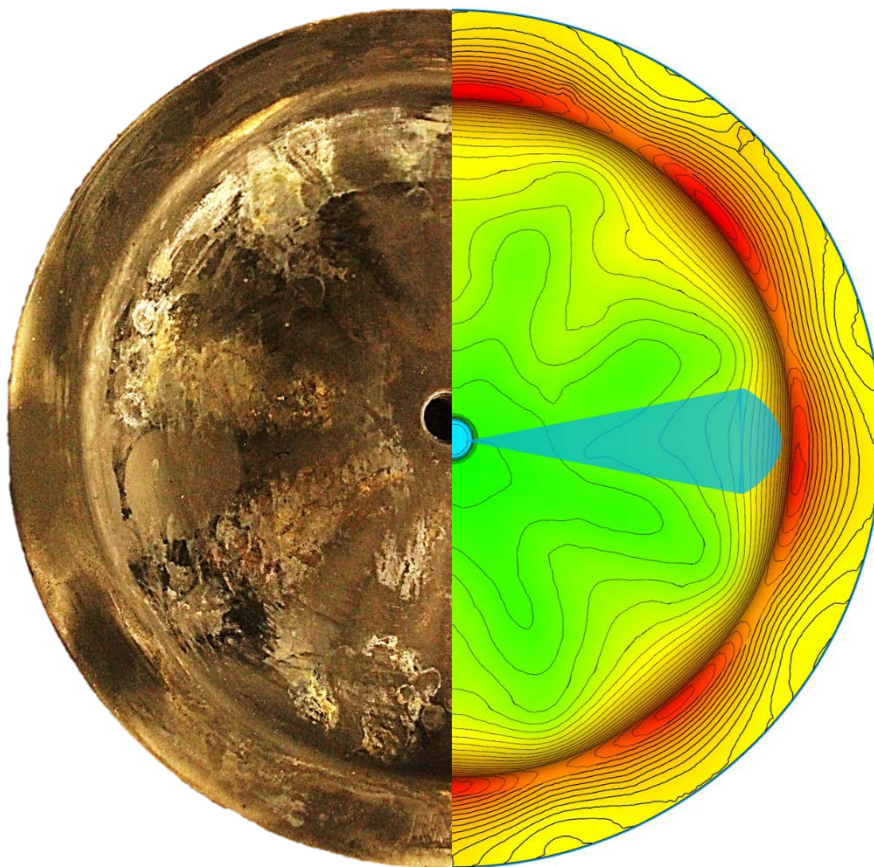


Abbildung 9 Visueller Vergleich der Kolbenkrone zwischen dem bereits betriebenen Messkolben und dem zugehörigen simulierten Temperaturfeld. In blau wurde schematisch die Kontur eines Kraftstoffsprays dargestellt.



Als Resultat spiegelt das ausgebildete Temperaturfeld nun deutlich genauer die Verteilung an der Kolbenkrone wieder, so wie es die optischen Untersuchungen der bereits im Motorbetrieb verwendeten Motorkolben haben vermuten lassen (vgl. Abbildung 9). Dabei wird erkennbar, dass nun die Wechselwirkung der Kraftstoffverbrennung mit dem Festkörper realitätsgetreu abgebildet wird. Die Verbrennung des eindringenden Kraftstoffsprays führt entlang der Sprayachse zu einer Erhöhung der Festkörpertemperatur. Das Temperaturmaximum wird dort am Muldenrand erreicht und liegt jeweils in der Nähe zum Schnittpunkt der Sprayachse (vgl. Abbildung 9 mit Spraykontur zur Orientierung). Ebenso wie bei dem Befund links weist das simulierte Temperaturfeld nur geringe Inhomogenitäten in radialer Richtung zwischen den Sprayachsen auf, was einen geringen Drall im Brennraum widerspiegelt. Als Resultat kann das durchgeführte Verfahren für die Bestimmung des lokalen Temperaturfeldes an der Kolbenkrone genutzt werden.

## **4 AP3: Experimentelle und numerische Analyse der Kolbenbaugruppe**

Nun werden die Inbetriebnahme der Messkette für Kolben 1 / Basis und die dafür durchgeführten Anpassungen geschildert. Danach werden die erfassten Temperaturmessdaten dargestellt, wobei im Anschluss die Konstruktion sowie der Fertigungsprozess einer optimierten mechanischen Schwingenkonstruktion vorgestellt wird.

### **4.1 Einbau und Inbetriebnahme Messschwinge 1 für Messkolben 1 / Basis**

Für den Einbau des Messkolbens 1 musste die bisherige Einbauprozedur nicht verändert werden. Nach der Präparation der Zylinderstation konnte der vorbereitete Messkolben 1 inklusive der angebrachten Schwingenelemente planmäßig durch die Lauffbuchse eingebracht werden. Sowohl die Vorbereitungen als auch die Durchführung des Messbetriebs wurde in engem Austausch kooperativ mit der FVTR Rostock durchgeführt. Bei der anschließenden Anbringung der Pleuelstange an den Kurbelwellenzapfen zeichnete sich ab, dass der vorhandene Abstand zwischen den oberen Schwingenelementen und den Gegengewichten in axialer Richtung der Kurbelwelle den geplanten Sicherheitsabstand unterschreitet. Das Risiko, dass während des Motorbetriebs eine Kollision bzw. ein Abscheren der geführten Thermoelementleiter auftritt, war somit stark gestiegen und der weitere Einbau war unter den gegebenen Voraussetzungen nicht mehr vertretbar. Um einen Ausfall der Messtechnik zu vermeiden und gleichzeitig den Aufbau planmäßig fortführen zu können, mussten weitere Anpassungen vorgenommen werden, die im Folgenden erläutert werden.

### **4.2 Anpassungen zur Inbetriebnahme**

Eine Neufertigung des vollständigen Schwingenmechanismus bzw. eines neuen Gegengewichtes wurde aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes nicht näher in Erwägung gezogen. Daher wurde als Option die Anpassung eines bereits vorhandenen Gegengewichtes gewählt, um den verfügbaren Abstand zwischen den Bauteilen anzupassen. Dabei war es von entscheidender Bedeutung, dass die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften des Gegengewichtes in seiner Funktion nicht eingeschränkt werden. Deshalb wurde bei der Anpassung darauf geachtet zum einen mit allen Änderungen möglichst wenig Material abzutragen und zum anderen den Massenschwerpunkt und die Gesamtmasse des ursprünglichen Bauteils zu erhalten. Dieses Vorgehen wurde erreicht, indem das Material

symmetrisch abgetragen wurde. Das abgetragene Material wurde zuvor bestimmt und musste im Anschluss durch ein Material höherer Dichte ersetzt werden, indem die erzeugte Geometrie des Gegengewichts zusätzlich mit Durchgangsbohrungen versehen wurde. Dieses angepasste Gegengewicht konnte nach der Überprüfung wieder verbaut werden und wird ebenfalls mit dem Vergleich zu dem erstellten Konzept in Abbildung 10 dargestellt.

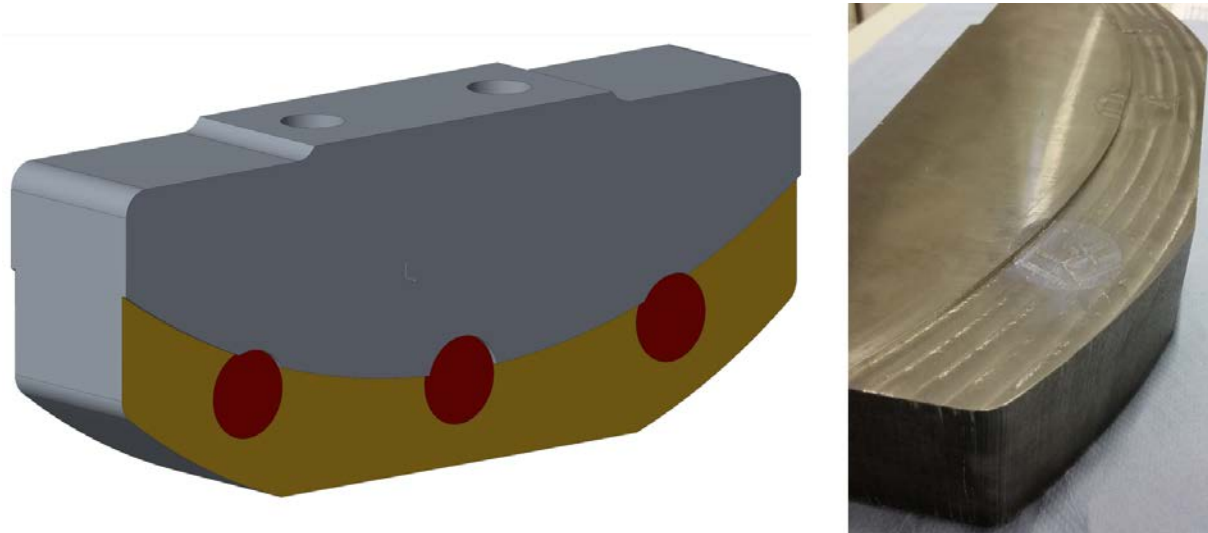


Abbildung 10 Links wird das Konzept für die Anpassungen am Gegengewicht und rechts das fertiggestellte Gegengewicht dargestellt.

#### **4.3 Erfassung und Auswertung Temperaturmessdaten Messkolben 1 / Basis**

Der Betrieb mit dem Messkolben wurde jeweils mit dem Leerlauf und somit bei möglichst geringer Drehzahl begonnen, um immer die generelle Funktion der Schwingenelemente und der Messtechnik zu prüfen. Die ersten durchgeführten Betriebsfahrten wurden dabei genutzt, um softwareseitig Anpassungen bezüglich der Aufnahme und dem Abspeichern der Messdaten vorzunehmen. Zusätzlich wurde die Aufnahme des Kurbelwellensignals als zeitliche Referenz zu der Motorindizierung angepasst, da dies entscheidend für die eigentliche Datenaufnahme war. Die ersten Messreihen werden in Abbildung 11 dargestellt.



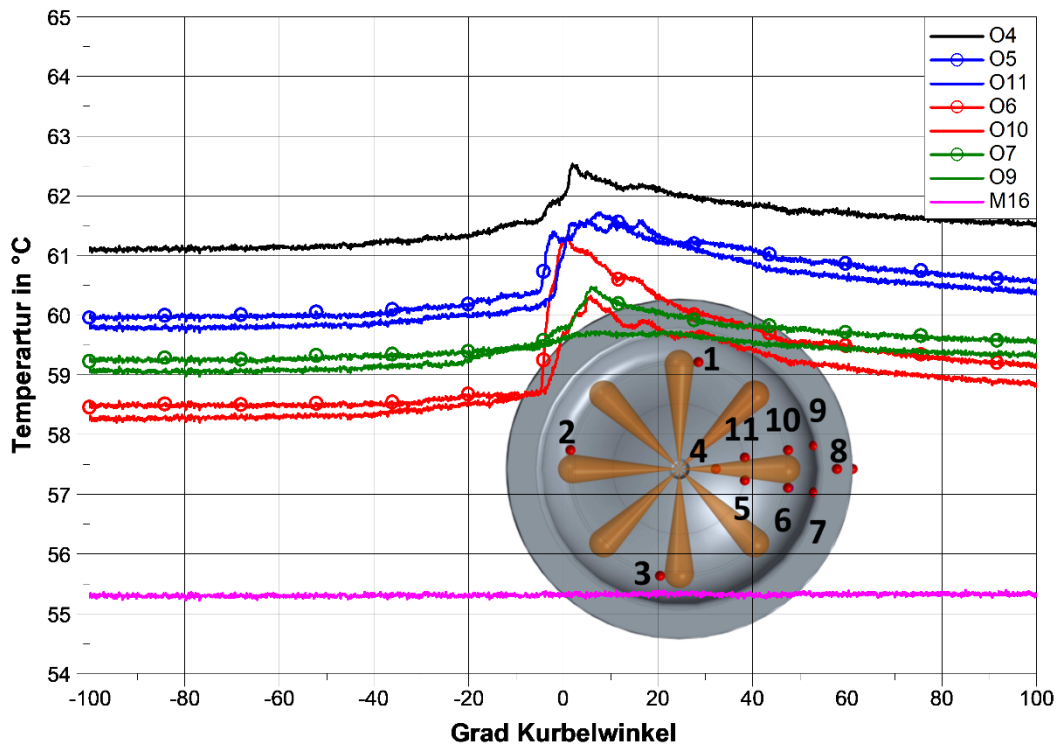


Abbildung 11 Gemessene Temperaturverläufe von Oberflächen- und Mantelthermoelementen an der Kolbenkrone. Aufgenommen über die Messschwinge 1 an Messkolben 1 / Basis.

Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, konnten die Messreihen erfolgreich durchgeführt werden und es wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Die Messtechnik ist in der Lage transiente Temperaturänderungen, auch mit hohen Gradienten (vgl. Abbildung 11, STC 6), zu erfassen. Dabei konnten sowohl die Signale selbst als auch die Maximalwerte der Temperaturverläufe ohne Datenverluste aufgelöst werden. Daher können diese Messreihen zur Validierung verwendet werden.

Um zusätzliche Validierungsdaten bei höheren Drehzahlen und Lasten zu erhalten, wurde anschließend sukzessive die Motordrehzahl erhöht. Beim Erreichen von etwa 500 bis 600  $\text{min}^{-1}$  kam es zum physischen Abriss bzw. Bruch der Schwingenelemente an der Übergangsstelle zwischen den Lagern am Pleuel und der Zugangsluke, sodass der Messkolben 1 vorerst ausgewechselt wurde. Darauf folgende Untersuchungen des Schadensbildes ergaben als Ursache die andauernden Vibrationen an der Befestigung eines Schwingenlagers. Dieser Befund wies auf eine eindeutige Ursache hin, die gezielt durch die Anpassung und Optimierung der Lagerstellen beseitigt werden konnte. Die durchgeführten Maßnahmen werden im nächsten Abschnitt näher dargestellt.

#### 4.4 Konzept und Konstruktion Messschwinge 2 für Messkolben 1 / Basis

Als Resultat wurde das Konzept (vgl. Abbildung 12, links) einer angepassten Schwingenkonstruktion mit veränderten Lagern und zusätzlich verstärkten Gelenken vorbereitet, welches sich geometrisch an dem ersten Entwurf orientierte. Mit diesem sollten die maximale Belastbarkeit der Gelenke sowie die Führungstoleranzen der Lagerstellen weiter optimiert werden, sodass die ohnehin nur gering belastbaren Thermoelementleitungen während des Motorbetriebes nur der bereits vorgeschriebenen Bewegung des Mechanismus folgen können.

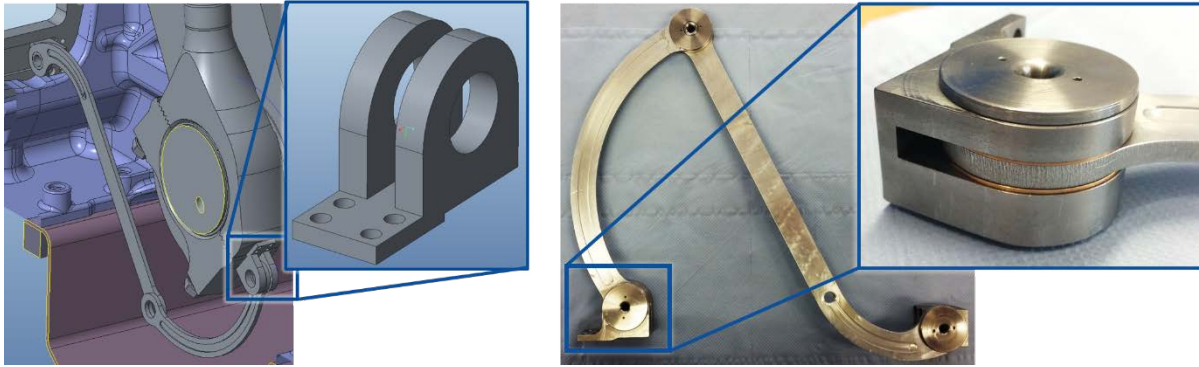


Abbildung 12 Links wird das Konzept für die Messschwinge 2 und rechts werden die fertiggestellten Gelenke Lager dargestellt. Gezeigt werden hierbei die Anpassungen an den großen Schwingenelementen und die neu konstruierten Lagerstellen werden jeweils einzeln hervorgehoben.

#### 4.5 Fertigung Messschwinge 2

Aufgrund der zuvor gesammelten Erfahrungen mit der Konstruktion der ersten Messschwinge, konnte die Fertigung zügig durchgeführt werden und wie in Abbildung 12 rechts dargestellt, wurden alle Anpassungen planmäßig übernommen. Die Verlegung der Thermoelementleiter war von den Anpassungen nicht betroffen und wurde analog zu den bisherigen Experimenten durchgeführt. Die gewählte Anordnung der Schwingengelenke wirkte sich ebenfalls positiv auf die relative Position zwischen den Gegengewichten der Kurbelwelle aus. Dabei wurde der verfügbare Abstand zwischen den Kurbelwellenwangen und den Gelenken erhöht, während die angepasste Lagerstelle zeitgleich für eine stärkere Führung in axialer Richtung der Kurbelwelle sorgte.

### 5 AP4: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Potenzial des Kühlwassersystems

Mit der zuvor beschriebenen Messschwinge 2 werden nun weitere Temperaturmessungen mit dem Messkolben 1 / Basis durchgeführt. Analog dazu wird ein Konzept für die Bestückung eines modifizierten zweiten Messkolbens, sowie die anschließende Bestückung des Kolbens selbst, vorgestellt. Ergänzend dazu werden von der Simulation mehrere Analysen dargestellt in Bezug auf das stationäre Temperaturfeld des gesamten Messkolbens 1 / Basis sowie das instationäre Temperaturfeld am Kolbenoberteil. Parallel hierzu werden die zugehörigen Wärmeströme sowie deren Verteilung untersucht.

#### 5.1 Konzept Thermoelemente Messkolben 2

In Anlehnung an das bereits erstellte Konzept für Messkolben 1 / Basis wurde ein Konzept für den Messkolben 2 ausgearbeitet. Im Gegensatz zu ersterem wird der Messkolben 2 nicht mehr zweigeteilt ausgeführt und besteht nur noch aus Stahl. Die Kühlkanäle der Shaker-Kühlung bestehen nun hauptsächlich aus einem äußeren Kühlkanal, der einen Großteil des Volumens des verkürzten Kolbens einnimmt. Um die Vergleichbarkeit beider Kolbenvarianten zu erhalten, wurde die Geometrie der Kolbenkrone in ihrer Funktion als brennraumabgrenzende Wand konstant belassen. Das erarbeitete Konzept zur Bestückung des Messkolbens 2 wird in Abbildung 13 dargestellt.

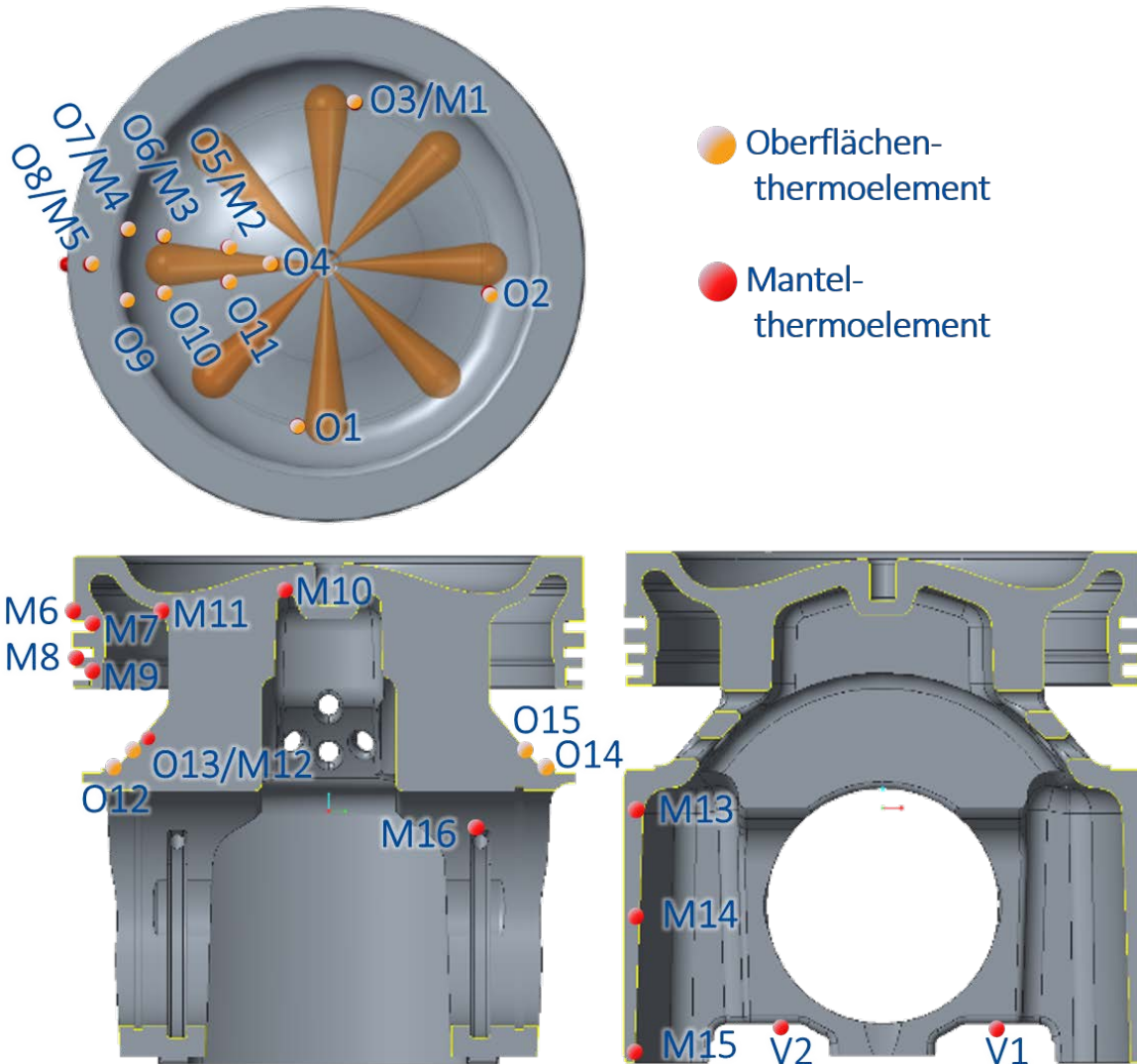


Abbildung 13 Darstellung des Konzepts aller Oberflächen- und Mantelthermoelemente für den Messkolben 2. (ohne die den Kühlraum abschließenden Halbschalen)

Aufgrund der Formgleichheit wurde die Anordnung der Oberflächen- und Mantelthermoelemente an der Kolbenkronen weitestgehend übernommen (vgl. Abbildung 13, O1 bis O11 und M1 bis M5). Der Kühlraum wurde entlang eines planaren Querschnitts aufgelöst, bei dem aufgrund der offenen Bauweise, im Gegensatz zu Messkolben 1, Mantel- und Oberflächenthermoelemente verwendet werden konnten (vgl. Abbildung 13, M11/12 und O12 bis O15). Der höchstgelegene Radius der Kühlraumoberfläche wurde aufgrund der Hinterschneidung und der geschlossenen Bauweise mit dem Mantelthermoelement M11 angenähert. Durch den verkürzten Feuersteg wurde der gesamte Ringbereich in Richtung Kolbenkronen und somit höherem Temperaturniveau verschoben. Für die Auflösung des dort anliegenden Temperaturgefälles wurden jeweils die obere Ringnutkante und der Nutgrund des Dichtrings und des Ölabbstreifings mit Mantelthermoelementen versehen (vgl. Abbildung 13, M6 bis M10). Die Materialtemperatur des Kolbenhemdes wurde über M13 bis M15 erfasst. Zuletzt wurde, ebenso wie bei Messkolben 1 / Basis (vgl. Abbildung 1, M17), die dem Kühlraum zugeführte Öltemperatur über das Mantelthermoelement M16 aufgenommen, das innerhalb einer Ölzulaufbohrung platziert wurde.

## 5.2 Bestückung Messkolben 2

Im Vergleich zu dem aufgestellten Konzept wurde die Bestückung des Messkolbens 2 ohne nennenswerte Abweichungen durchgeführt und der Fertigungsprozess wird in Abbildung 14 sukzessive wiedergegeben.



Abbildung 14 Darstellung des bestückten Messkolbens 2 zusammen mit den oberen Schwingenelementen. Links wird die bedampfte Goldschicht über den Messstellen der Oberflächenthermoelemente an der Kolbenkrone und an der Innenseite des Kühlraums dargestellt. Oben rechts werden die zum Kolbenboden geführten und fixierten Thermoelemente an der Unterseite des Kolbens dargestellt. Unten rechts werden die oberen Schwingenelemente als Führung von Kolben zum Pleuel dargestellt.

Die größten Anpassungen im Fertigungsprozess wurden für den Bedampfungsprozess vorgenommen. Um die Beschichtung in beiden geometrisch voneinander getrennten Bereichen realisieren zu können, wurde die Bedampfung iterativ unter unterschiedlichen Anordnungen relativ zur Dampfquelle vorgenommen, wobei kleinere Anpassungen am vorhandenen Aufbau der Vakuumanlage durchgeführt wurden. Bei der Anbringung aller Thermoelemente wurde aufgrund der begrenzten Durchführungen an die Kolbenunterseite vor allem auf eine äußerst platzsparende Fixierung geachtet, um die Kühlwirkung des abfließenden Schmieröls nicht zu beeinflussen. Als Resultat wurden alle Thermoelemente erfolgreich bis zum Kolbenboden verlegt, wo sie an den Pleuelschaft weitergeführt wurden. Die Eigenschaften des mechanischen Datenübertragungssystems wurden in Tabelle 1 kurz zusammengefasst.

## 5.3 Einbau und Inbetriebnahme Messschwinge 2 für Messkolben 1 / Basis

Für den Einbau selbst konnte das bereits angepasste Gegengewicht ohne weitere Anpassungen verwendet werden. Trotz des bereits beschriebenen geringen Bauraums konnte die Messschwinge auch nach dem angepassten Design, durch den intensiven Austausch und die konstruktive Kooperation vor Ort mit der FVTR Rostock, planmäßig eingesetzt werden. Zusätzlich wurden die vorab durchgeführten Überprüfungen der Thermoelemente und die



Signalübertragung zur Freigabe der Messschwinde 2 intensiviert. Bei der Inbetriebnahme wurde das Einfahrprogramm in regelmäßigen Abständen für Sichtprüfungen der Schwingengelenke und zur Kontrolle des anliegenden Drehmoments der verbauten Lagerstellen unterbrochen. Während dieser Kontrollphase wurden keine Auffälligkeiten festgestellt, sodass im kontinuierlichen Messbetrieb fortgefahren wurde.

Tabelle 1 Eigenschaften des mechanischen Datenübertragungssystems

Übertragung	Mechanisch über Schwingenelemente
Energieversorgung	Motorextern
Anzahl Thermoelemente	32 Stück verteilt an Kolben
Thermoelemente	Oberflächen- und Mantelthermoelemente gemischt vermessen
Bandbreite	10 kHz
Auflösung	16 bit
Abtastrate	100 kS/ch/s

## 5.4 Erfassung und Auswertung Temperaturmessdaten Messkolben 1 / Basis

Im direkten Vergleich zur Messschwinde 1 wirkten sich die konstruktiven Änderungen positiv aus. Zusammen mit der Messelektronik zeichnete sich ein stabiler Betrieb ab, der über einen vergrößerten Drehzahlbereich die Datenaufnahme ermöglichte. Mit den nachfolgenden Messungen wurde der gewünschte Drehzahlbereich von etwa  $900 \text{ min}^{-1}$  erreicht, doch der Betrieb bei höheren Drehzahlen weist stellenweise eindeutig Resonanzen auf, die den Betrieb der Konstruktion erschweren. Diese Resonanzen lassen sich teils direkt anhand der gemessenen Temperaturverläufe visualisieren (vgl. Abbildung 15).

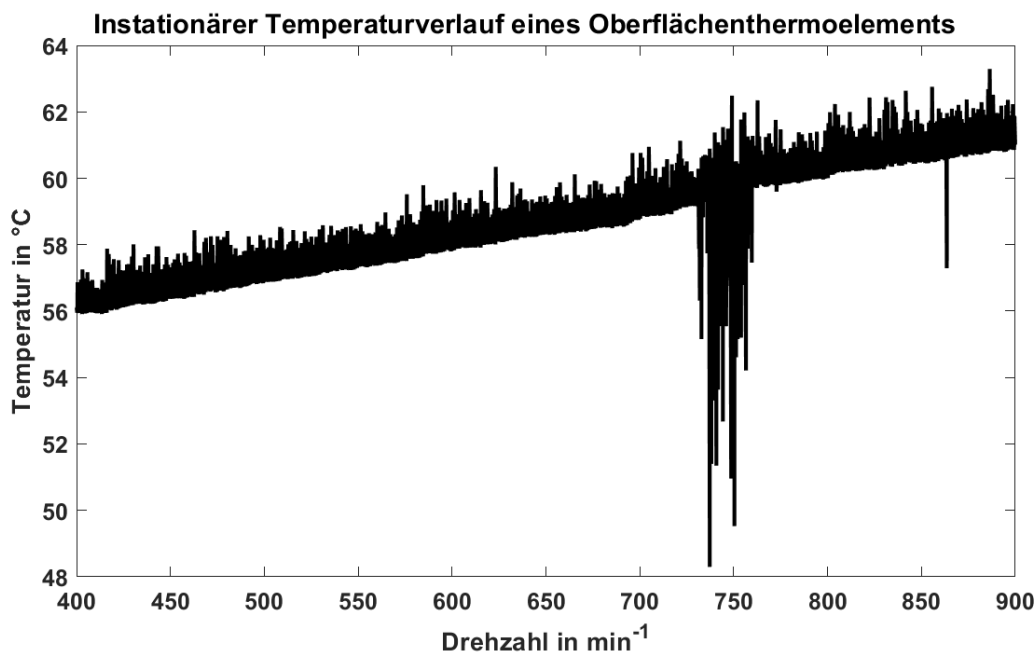


Abbildung 15 Temperaturverlauf eines Oberflächenthermoelements der Kolbenkrone dargestellt über der Drehzahl während einem konstanten Anstieg der Drehzahl.

Anhand des Temperaturverlaufs ist erkennbar, dass die Signalstörung nur temporär in einem zeitlich scharf umrissenen Bereich auftritt bis sie im weiteren Verlauf abklingt und nicht mehr erkennbar wird. Positiverweise entspricht dieser Verlauf nicht einem Signalausfall oder einer schlechten Datenübertragung, wobei mit Hilfe des Diagramms erkennbar wird, dass der Schwingenmechanismus bei höheren Drehzahlen wahrscheinlich mit Schwingungen beaufschlagt wird, die durch die rotatorische Bewegung der unteren Schwingenelemente nicht vermieden werden können. Solche Schwingungen sind für die mechanische Führung der Gelenke nachteilig, da damit eine Kollision mit benachbarten Bauteilen nicht mehr ausgeschlossen werden kann.

Im weiteren Betrieb trat dieser Fall ein und es kam zum Bruch der unteren Schwingenelemente. Daraufhin wurde der Beschluss gefällt, parallel zur Fertigung eines neuen Mechanismus zusätzlich den Ansatz einer drahtlosen Datenübertragung zu verfolgen, dessen Konzept und Fertigung im Rahmen des nächsten Arbeitspaketes beschrieben werden. Nichtsdestotrotz kann hier positiv festgehalten werden, dass die durchgeführten Anpassungen zielführend eingesetzt wurden. Der Betrieb wurde bereits in einem deutlich größeren Betriebsbereich ermöglicht und die stabile Datenübertragung konnte nahezu bis zur maximal geforderten Drehzahl von  $1000 \text{ min}^{-1}$  aufrechterhalten werden.

## 5.5 Stationäres Temperaturfeld und Wärmeströme in Messkolben 1

Für die Analyse der über die Oberfläche übertragenen Wärmeströme wurde der Kolben nach Funktionalität und gemäß seiner Geometrie in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt. Da im Detail ebenso die Wärmeübergänge an Kolbenkrone und am Kolbenkühlraum von Interesse sind, werden die dafür genutzten Zonen zusammen mit deren Nummerierung in einer Übersicht in Abbildung 16 dargestellt.

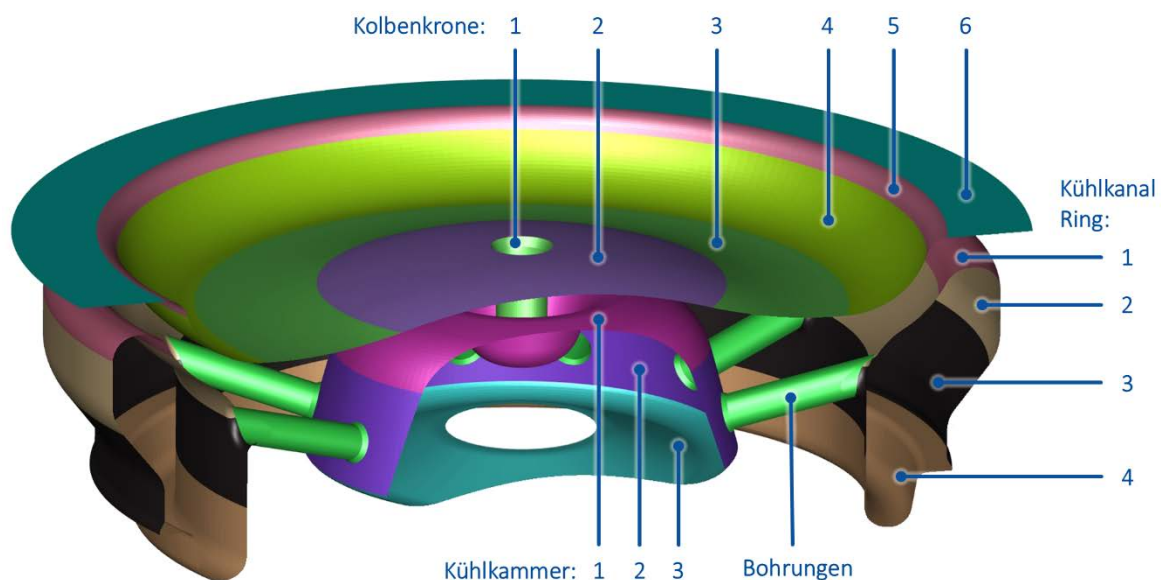


Abbildung 16 Schema zu den Bereichen der Kolbenkrone und der Kolbenkühlräume zusammen mit der Nummerierung der jeweils verwendeten Aufteilung des Messkolbens 1 / Basis.

Neben der zuvor beschriebenen Detailansicht wurden auch die global über die gesamte Kolbenoberfläche übertragenen Wärmeströme für verschiedene Szenarien untersucht.

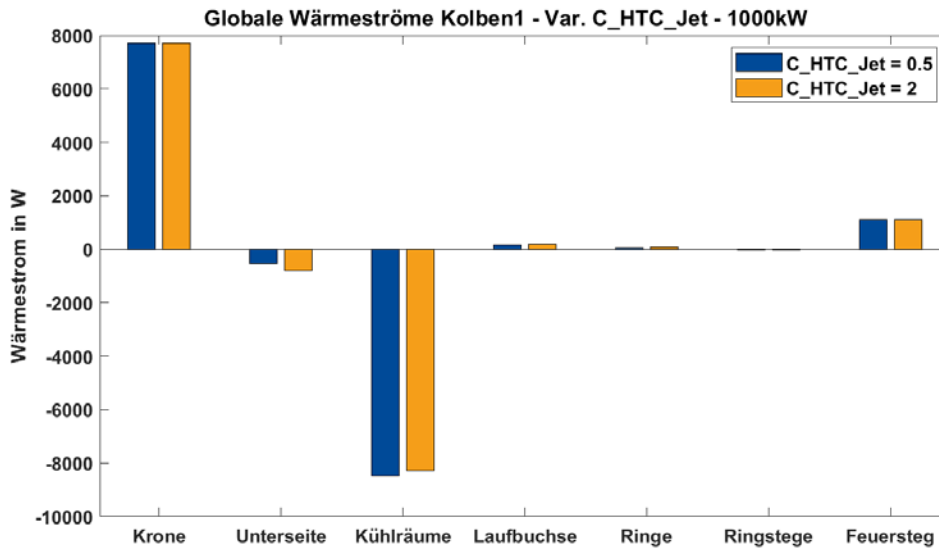


Abbildung 17 Verteilung der übertragenen Wärmeströme über die gesamte Oberfläche des Messkolbens 1 / Basis.

Eine Gegenüberstellung wird in Abbildung 17 zusammen mit einer Variation der anliegenden Schmierölrandbedingung an der Kolbenunterseite zusammengefasst, die mit dem abfließenden Öl des Kühlraums beaufschlagt wird. Hierbei wird gut ersichtlich, über welche Bereiche der hauptsächliche Energietransport am Kolben stattfindet. Im Gegensatz zu Verteilungen bei PKW Motoren fällt auf, dass der Großteil der ein- als auch ausströmende Wärmeströme gezielt über die Kolbenkrone und den darunterliegenden Kühlkanal und die zentrale Kühlkammer stattfindet. Der Anteil der Kolbenringe nimmt dabei eine stark untergeordnete Rolle ein, dessen Größenordnung z.B. den Bereichen des Kolbenhemdes entspricht. Zur Orientierung können ähnliche Größenordnungen auch der Literatur entnommen werden (vgl. [8]).

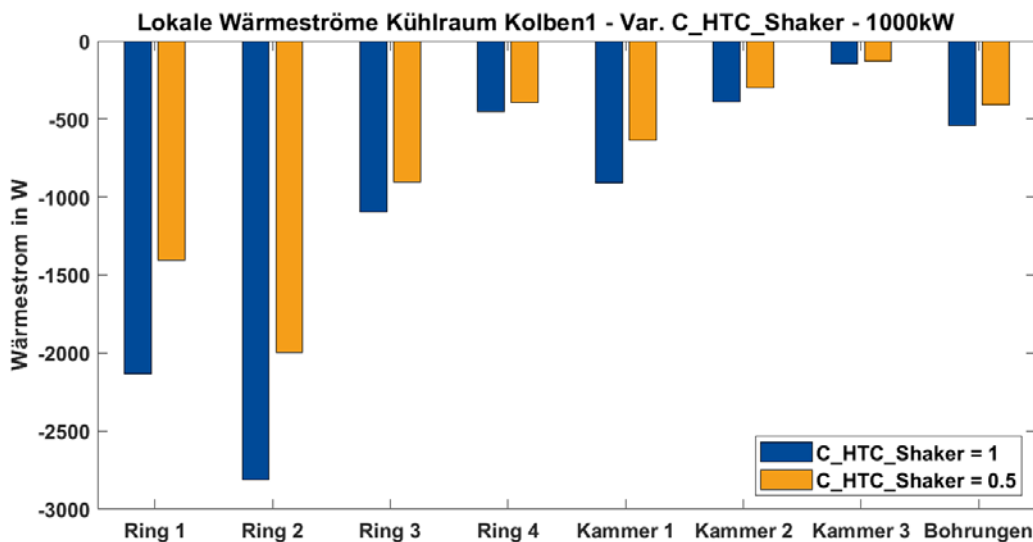


Abbildung 18 Lokale Verteilung der übertragenen Wärmeströme im Kühlraum des Messkolbens 1 / Basis.

In Abbildung 18 wird verdeutlicht, wie sensitiv nicht nur die Größenordnung des jeweiligen Gesamtwärmestroms (hier: Wärmestrom im Kühlraum) auf eine Anpassung des anliegenden Wärmeübergangskoeffizienten reagiert, sondern auch wie stark die Verteilung innerhalb des



Kühlraumes der Anpassung folgt. Die dabei verwendete Nummerierung für den äußeren Kühlkanal (hier: Ring 1 bis 4) und die zentral gelegene Kühlkammer (hier: Kammer 1 bis 3) stimmen in ihrer Reihenfolge mit Abbildung 16 überein. Die einzeln bestimmten Wärmeströme basieren dabei auf dem Temperaturfeld des Messkolbens 1 / Basis (vgl. Abbildung 19) und können wiederum detailliert aufgeteilt werden, um die Funktionsflächen besser beurteilen zu können.

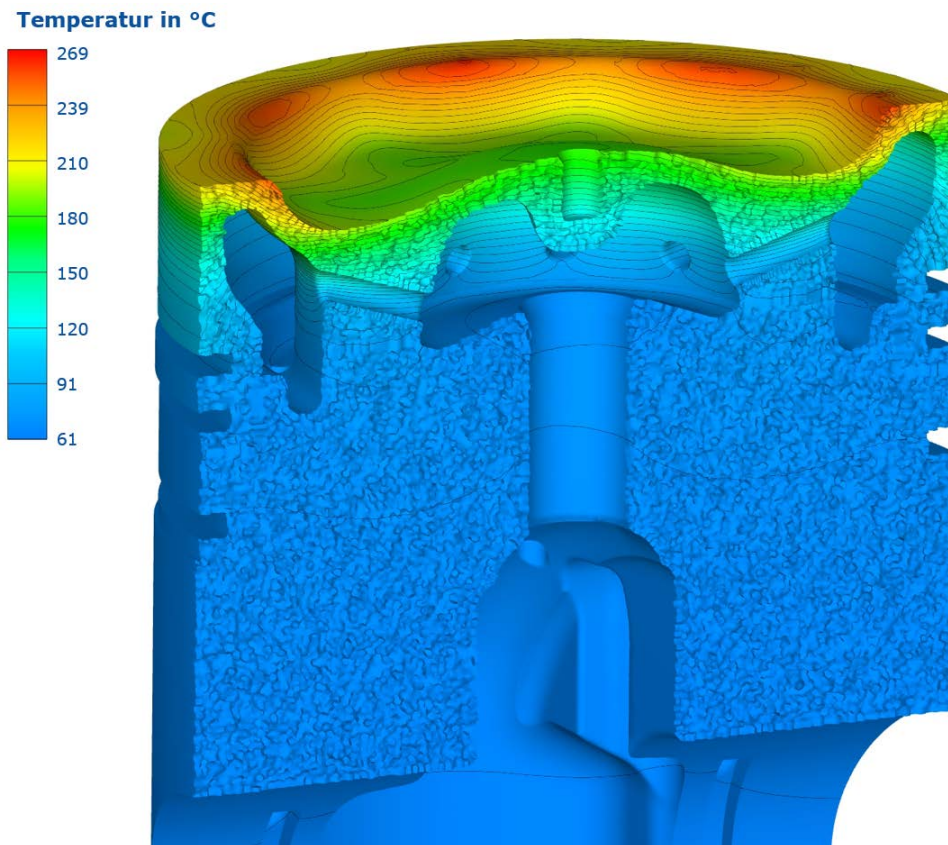


Abbildung 19 Stationäres Temperaturfeld des Messkolbens 1 / Basis mit Querschnitt entlang der Nabenachse.

Demnach kann durch die lokale Verteilung der Wärmeströme quantitativ verfolgt werden, wie die axial höher gelegenen Kühlkanalbereiche bereits einen hohen Anteil der Energie an das Kühlöl abgeben. Dieser Verlauf spiegelt auch das Verhältnis der Wandstärke zwischen Kolbenkrone und Kühlkanal des Messkolbens 1 / Basis wieder (vgl. Querschnitt in Abbildung 1), das mit zunehmendem Abstand vom Kolbenboden ebenfalls zunimmt. Da das Kolbenunterteil mit geringeren Temperaturen belastet wird als das Oberteil, werden über die Oberflächen des Aluminiumschafes (hier: Ring 4 und Kammer 3) geringere Wärmeströme überführt. Demgegenüber fällt auf, dass aufgrund des stark ausgeprägten Steges, der die zentrale Kammer von dem äußeren Kühlkanalring trennt, die Kühlbohrungen einen nicht unerheblichen Anteil an dem abgeführten Wärmestrom annehmen. Dieser Effekt wird durch die Nähe der symmetrisch angeordneten Kühlbohrungen zur Kolbenkrone noch verstärkt.

## 5.6 Instationäres Temperaturfeld und Wärmeströme im Kolbenoberteil von Messkolben 1

Durch die Kopplung des Kolbenoberteils an die transiente Ladungswechsel- und Verbrennungssimulation im Brennraum wurde das instationäre Temperaturfeld der Kolbenkrone bestimmt.

Der Ablauf des sich ausbildenden inhomogenen Temperaturfelds wurde in Abbildung 20 mittels eines dreidimensionalen Querschnittes durch den Brennraum festgehalten. Während definierter Kurbelwinkelangaben wird so die sich turbulent ausbreitende Flammenfront entlang der eingespritzten Kraftstoffsprays sichtbar, die während des Kontaktes mit der Kolbenkrone den lokalen Energieeintrag in den Festkörper bewirkt. Die für die Simulation des Wärmeübergangs notwendigen Parameter konnten unter anderem hieraus abgeleitet werden.

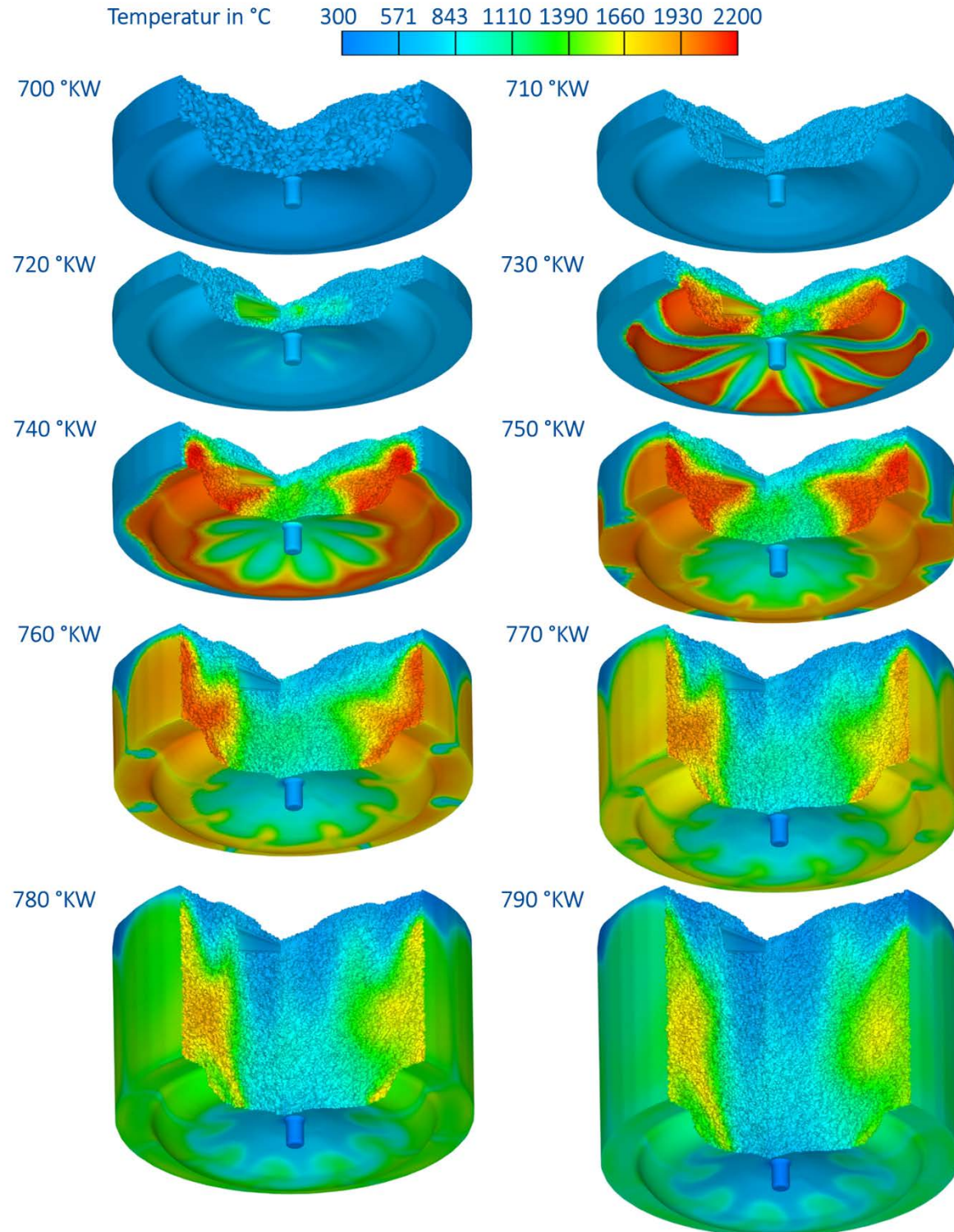


Abbildung 20 Instationäres Temperaturfeld des Brennraums dargestellt anhand eines Freischnittes während einzelner Kurbelwinkel.

## 5.7 Instationäre lokale in Kolbenoberseite eindringende Wärmeströme von Messkolben 1

Als Resultat der beschriebenen gekoppelten Simulation wurde der Wärmeübergang über die gesamte Kolbenkrone örtlich und zeitlich aufgelöst. Demnach ist es möglich, die instationären Wärmeströme über die zuvor definierten Funktionsflächen zu bestimmen. Die dabei verwendete Nummerierung der Zonen orientiert sich an dem vorgestellten Schema in Abbildung 16 während die ermittelten Verläufe für die lokalen Wärmestromdichten in Abbildung 21 dargestellt werden.

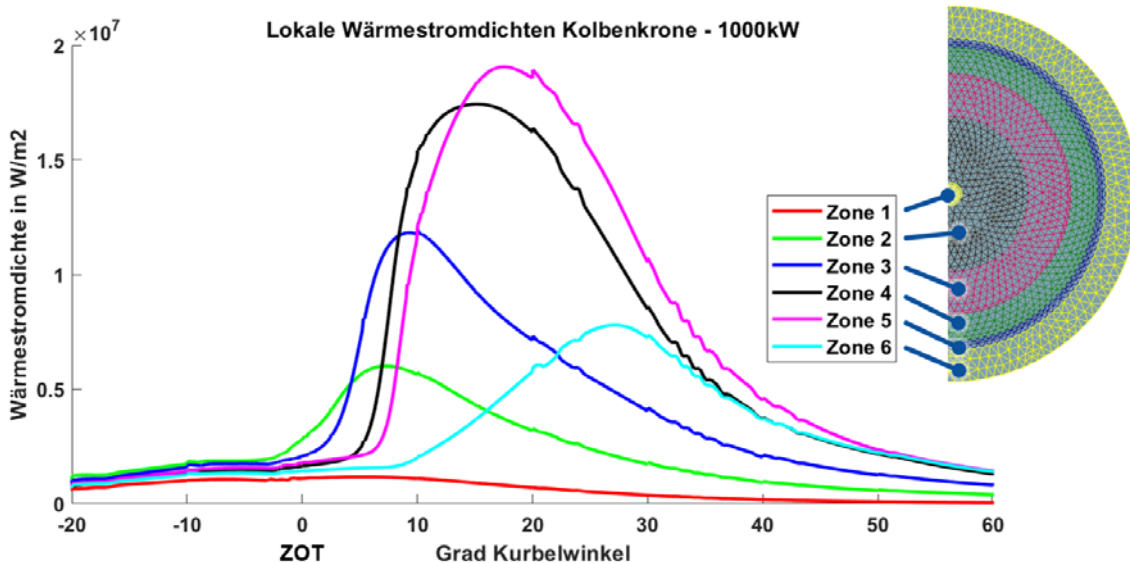


Abbildung 21 Darstellung der instationären lokalen an der Kolbenkrone übertragene Wärmestromdichten mit einem Übersichtsdiagramm der Kronenaufteilung in verschiedene Zonen.

Hierbei wird deutlich, dass der Muldengrund (Zone 4) und der Muldenrand (Zone 5) am höchsten belastet werden. An den um die Muldenmitte orientierten Zonen der Kolbenkrone (Zone 2 und 3) werden die Anstiege in den Wärmestromdichtenverläufe jeweils zu einem früheren Zeitpunkt und gleichzeitig einer kleineren Amplitude registriert. Dieser Versatz spiegelt die benötigte Zeit wieder, die die Flammenfront benötigt, um auf den Muldenrand zu stoßen. Analog dazu ist erkennbar, wie die Verbrennung den Quentschbereich nach einem zeitlichen Versatz erreicht und dort nur noch ein in der Amplitude deutlich reduzierter Anteil von der Kronenoberfläche aufgenommen wird.

## 6 AP5: Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Potenzial des Schmierölsystems

Als Resultat der vorhergehenden Untersuchungen werden zu Beginn auf die Entwicklung und die Fertigung eines neuen drahtlosen Datenübertragungssystems eingegangen, mit dem Ziel den stabilen Messbetrieb auf einen größeren Betriebspunktebereich auszuweiten. Danach wird auf die Inbetriebnahme sowie die Auswertung der Temperaturmessdaten für den Messkolben 2 eingegangen. Analog zum ersten Messkolben werden mittels der Simulation Analysen zu dem stationären Temperaturfeld des gesamten Messkolbens 2 und den zugehörigen Wärmeströmen durchgeführt. Zusätzlich wird die stationäre Wärmestromverteilung an der Kolbenunterseite untersucht.



## 6.1 Konzept alternative Messkette Messkolben 2

Wie in AP4 bereits erläutert, wurde für die Erweiterung des stabilen Messbereiches zu den maximalen Drehzahlen und somit auch bei den maximalen Beschleunigungskräften ein zweites System für die Datenübertragung angefertigt. Vorab wurden in der Konzeptphase mögliche Alternativen hinsichtlich Aufwand, zeitlichem Bedarf, Kosten und Eignung für den vorliegenden Motor untereinander verglichen. Ziel war es, die bereits zum Pleuelauge geführten Thermoelementleitungen zu nutzen, um die zunächst noch schwachen Signale zu verstärken und anschließend digital umzuwandeln. Diese umgewandelten Signale sollten dann über eine fixierte Sendeantenne an eine Empfangsantenne übertragen werden, die die ankommenden Signale an den Messrechner weiterleitet. Mit Hilfe des Messrechners wird einerseits die Speicherung der Daten und andererseits die Kontrolle der Signale im Betrieb ermöglicht. Nach diesen Vorgaben wurden getrennt voneinander je ein kommerzielles Modul als Verstärker und AD-Wandler sowie ein Modul als WLAN Transmitter gewählt, die beide als Platine verbaut wurden. Bei dieser Auswahl wurde darauf geachtet, eine, verglichen zur bisherigen Aufzeichnung, vergleichbare Auflösung zu gewährleisten (250 kS/s, 16 Bit). Darüber hinaus wurde Wert darauf gelegt, dass die Elektronik die geringen Eingangsspannungen im Bereich einiger mV weiterhin zuverlässig verarbeiten kann, ohne diese mit einem zu hohen Rauschen zu verfälschen. Zur Minimierung der Systemkomplexität wurde sich anstatt einer zusätzlichen drahtlosen Energieübertragung für eine Versorgung über temperaturbeständige Akkuzellen entschieden.

## 6.2 Fertigung drahtlose Telemetrie Messkolben 2

Für die Anbringung an das große Pleuelauge musste eine stabile Rahmenkonstruktion konstruiert werden, die die gesamte Übertragungselektronik aufnehmen und gleichzeitig die auftretenden Beschleunigungskräfte aushalten kann. Dabei sollte die gesamte Konstruktion möglichst öldicht verschließbar sein und zugleich sollte der Einbau ohne großen zeitlichen Aufwand ermöglicht werden. Um Anpassungen vornehmen zu können, sollte die Erreichbarkeit der Konstruktion noch innerhalb des Motorgehäuses gewährleistet werden, da dies einen kompletten Kolbenausbau und die damit verbundenen Wartezeiten verhindern würde. Nach diesen Vorgaben wurde ein Gehäuse aus Aluminium mit zwei voneinander getrennten Kammern als Rahmenkonstruktion gefertigt, welches in einer großen Kammer die beiden Platinen aufnahm und in einer kleinen Kammer die Akkuzellen für die Spannungsversorgung beinhaltete (vgl. Abbildung 22).

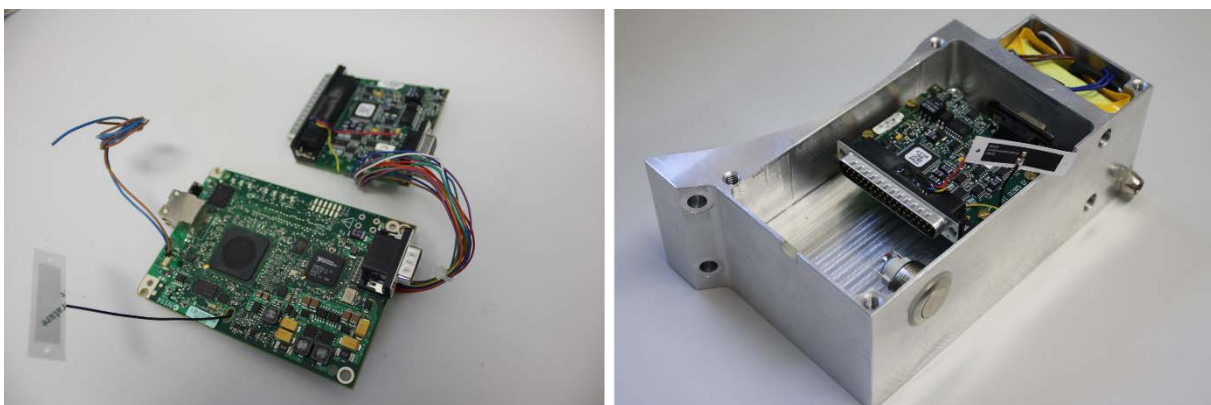


Abbildung 22 Darstellung der gewählten Elektronik zur Signalübertragung (links) sowie des gefertigten Aluminiumgehäuses (rechts). Zu erkennen sind die verbauten Platinen, die Akkuzellen, der An/Aus-Schalter sowie der externe Ladeanschluss an der Außenwand des Gehäuses.

Das Gehäuse selbst ist nur an einer Seite geöffnet und wird mit dem zugehörigen Gehäusedeckel verschlossen. Während der Fertigung selbst traten nur kleinere Abweichungen im Vergleich zum erstellten Konzept auf, die auf die Fertigungstoleranzen der Platinen zurückführbar waren und mit geringem Aufwand korrigiert wurden. Zusammengefasst entstand so ein alternatives Übertragungssystem, dessen Eigenschaften wie folgt tabellarisch zusammengefasst werden können.

Tabelle 2 Eigenschaften des drahtlosen Datenübertragungssystems

Übertragung	Drahtlos
Energieversorgung	Akkuzellen (lokal verbaut)
Anzahl Thermoelemente	16 Stück verteilt an Kolben
Thermoelemente	Oberflächen- und Mantelthermoelemente gemischt vermessen
Auflösung	16 bit
Abtastrate	7 kS/ch/s

### 6.3 Einbau und Inbetriebnahme drahtlose Telemetrie Messkolben 2

Vor dem Einbau der Messtechnik wurden Kontrollen bezüglich der Datenübertragung unter erhöhter Beschleunigungs- und Temperaturbelastung durchgeführt. Beide Parameter wurden getrennt voneinander geprüft, um somit die Tauglichkeit der gewählten Komponenten für den Betrieb im Motorgehäuse nachzuweisen. Der Einbauablauf entspricht dem Einsetzen der mechanischen Schwingenelemente. Das bereits zuvor beschriebene Einfahrprogramm zur Inbetriebnahme der verbauten Messtechnik wurde analog dazu durchgeführt. Dabei wurden anfängliche Diskrepanzen in der Signalübertragung wie Aussetzer oder Signalverlust durch Softwareseitige Anpassungen erfolgreich minimiert, sodass keine Einbußen in der Signalqualität oder ein erhöhter Rauschpegel im Vergleich zur mechanischen Datenübertragung in Kauf genommen werden mussten. Die Präparation der Messtechnik und alle dazu notwendigen organisatorischen Planungen wurden dabei in Absprache mit der FVTR Rostock durchgeführt, um einen geregelten Messbetrieb am Prüfstand zu gewährleisten. Die nachfolgend erfassten Daten werden im Folgenden dargestellt.

### 6.4 Erfassung und Auswertung Temperaturmessdaten Messkolben 2

Mittels der drahtlosen Datenübertragung wurden zeitgleich 16 Thermoelementsignale des Kolbens aufgenommen, sodass alle installierten Thermoelemente auf zwei Anschlüsse aufgeteilt wurden. Die Zuordnung der Temperaturverläufe zum gemessenen Kurbelwinkelsignal wurde in Abhängigkeit der zugehörigen Druckverlaufsanalyse korrigiert, um eine Orientierung des Messsignals zum oberen Totpunkt zu ermöglichen. Vor allem in Abbildung 23 wird ersichtlich, dass die installierte Telemetrie mittels der Oberflächenthermoelemente ebenfalls bei gesteigerten Drehzahlen und Lasten in der Lage ist, die durch die Verbrennung induzierten Temperaturgradienten an der Kolbenoberfläche abzubilden (vgl. O4, O5, O6). Analog hierzu werden in gleichem Maße die Kerntemperaturen mit Hilfe der Mantelthermoelemente wiedergegeben (vgl. M3). Hierbei ist, repräsentativ für unterschiedliche Betriebspunkte, gut erkennbar, wie anhand der Messungen das quantitative Temperaturfeld an der Kolbenoberfläche verläuft. Allgemein lässt sich festhalten, dass die unter der Kronenoberfläche platzierten Mantelthermoelemente zur Auflösung der Kerntemperaturen nur vergleichsweise stationäre Temperaturverläufe während eines Zyklus

einnehmen. Demgegenüber werden die Oberflächenthermoelemente aufgrund ihrer Interaktion mit dem Brennraum mit Amplituden von etwa 20 bis 60 K beaufschlagt. Dabei erfasst das Thermoelement am Muldengrund, das die tiefste Position der Kolbenkrone einnimmt, die niedrigsten Temperaturen, während die umliegenden Kronenbereiche wie auch der Muldenrand höher belastet werden. Aus Sicht der globalen Projektziele kann hier festgehalten werden, dass ebendiese transienten Temperaturverläufe, die für unterschiedliche Betriebspunkte erfolgreich erfasst werden konnten, die Grundlage für die Validierung der am LTT durchgeführten Simulationen zur thermischen Belastung des Motorenkolbens bilden. Somit haben diese, durch die Bereitstellung von Validierungsdaten für die Projektpartner, Anteil an dem weiterführenden Ziel der Reibungsreduzierung und Wirkungsgradoptimierung.

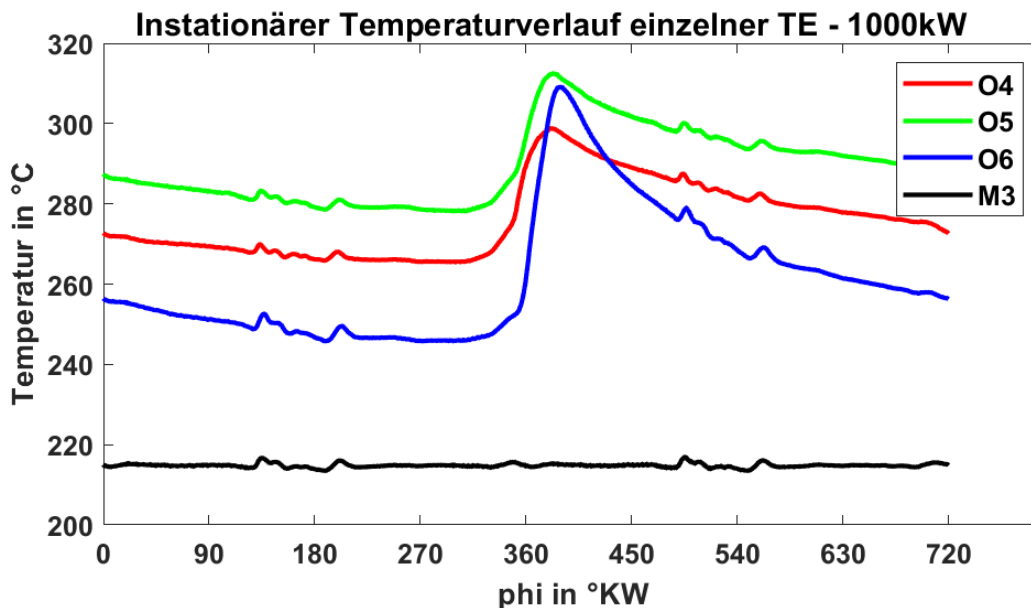


Abbildung 23 Experimentell erfasste instationäre Verläufe ausgewählter Oberflächen- und Mantelthermoelemente eines Betriebspunktes für Messkolben 2.

## 6.5 Stationäres Temperaturfeld und Wärmeströme in Messkolben 2

Entsprechend den aufgenommenen Temperaturdaten, wurden für den Wärmeübergang an der Kolbenkrone die übertragenen Wärmeströme bestimmt.

Bei dem gewählten Betriebspunkt mit 500 kW ist in Abbildung 24 gut erkennbar, wie die höchste Wärmestromdichten Amplitude an dem Muldenrand aufgeprägt wird (vgl. OT7-MT4), während an der Kolbenkronenmulde selbst (vgl. OT6-MT3 & OT8-MT5) geringere Wärmeströme eingebracht werden. Etwas abgesetzt dazu, wird anhand des höheren Betrags von OT5-MT2 deutlich, dass zumindest im Ladungswechsel ein erhöhter Anteil des Wärmestroms zentral über die Kolbenkrone eingebracht wird. Dieses Verhältnis wurde hauptsächlich im Bereich niedriger Lasten festgestellt. Die Messungen weisen darüber hinaus darauf hin, dass mit einer Steigerung der Last der Anteil des zentral übertragenen Wärmestroms weiter abnimmt, bis der Beitrag des über die Kolbenkronenkante übertragenen Wärmestromes dominiert (vgl. Fall 750 kW).

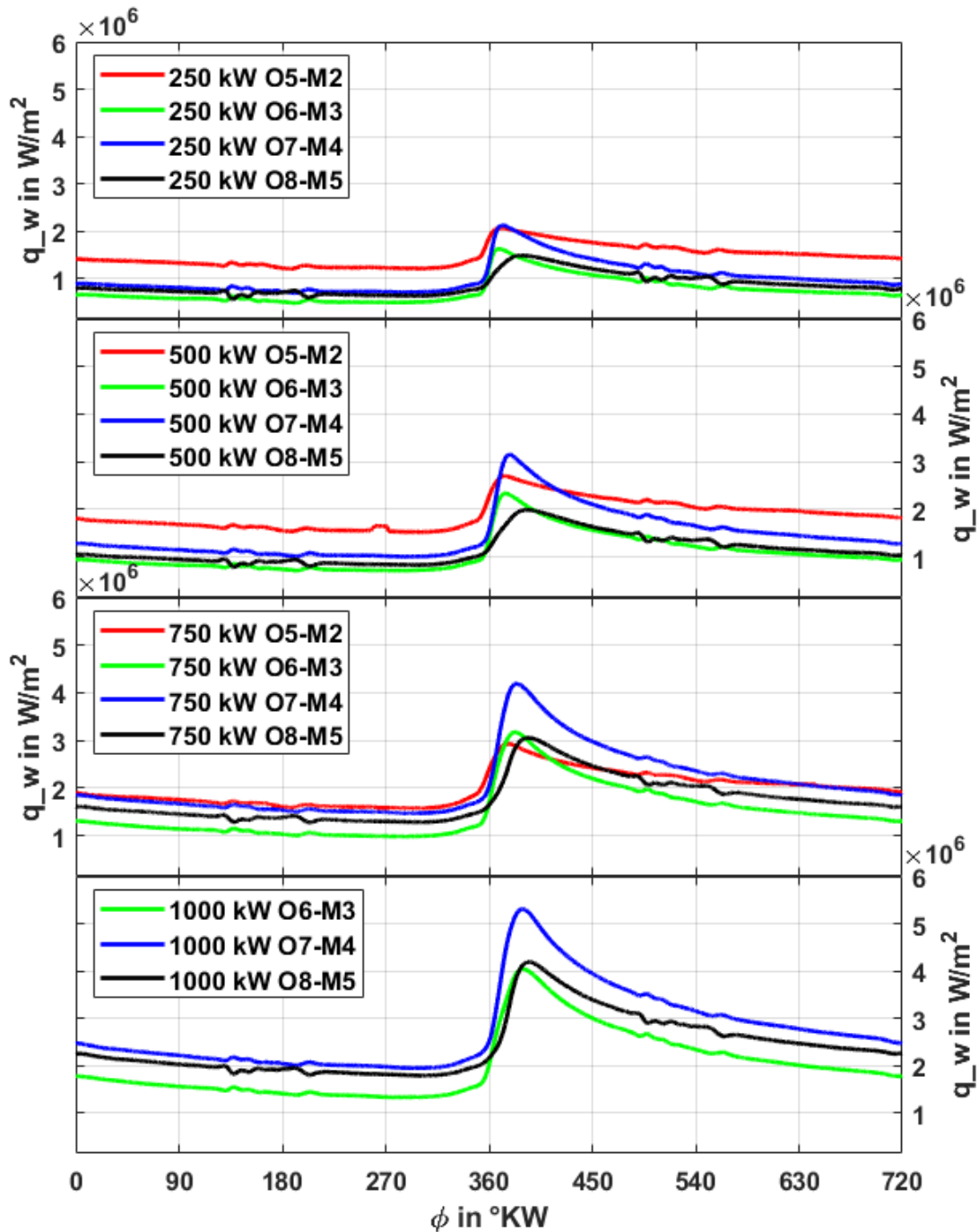


Abbildung 24 Instationäre Verläufe der experimentell ermittelten Wärmestromdichten an der Kolbenkrone während eines Lastwechsels.

Die quantitativen Größenordnungen der erzielten Materialtemperaturen sowie der vorliegenden Wärmestromdichten sind ebenfalls für den Abgleich der Simulationen der Projektpartner von Interesse für das Erreichen der übergeordneten Projektziele. So sind z.B. bei der Bestimmung der Temperaturfelder und Warmkonturen der brennraumumgebenden Bauteile bei dem IVB in Braunschweig die ermittelten thermischen Belastungen seitens des Brennraums von Interesse. Auch bei Caterpillar in Kiel sind diese Daten für weiterführende Simulationen interessant, da so z.B. die sich einstellenden Wärmeströme aus der eigenen Bilanzierung des gesamten Motorprozesses mit Hilfe der hier ermittelten Daten verglichen und validiert wurden.



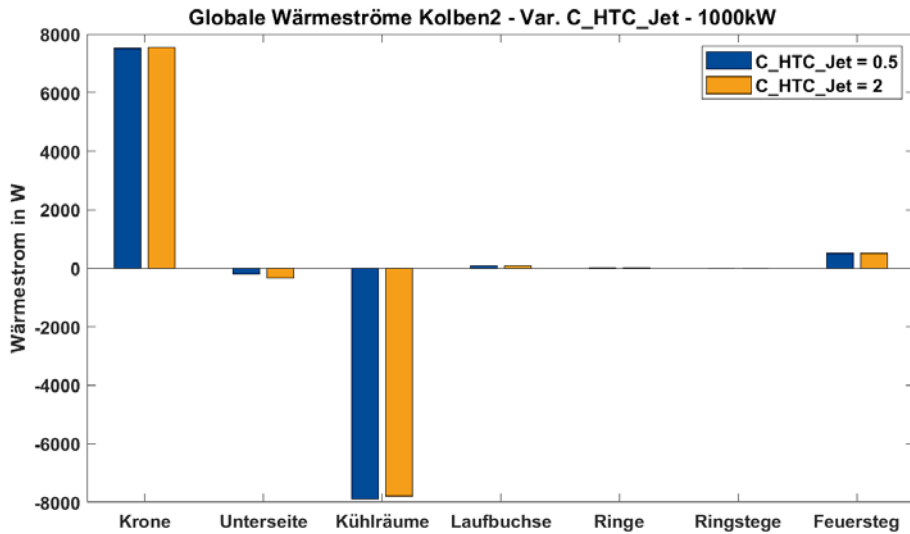


Abbildung 25 Verteilung der übertragenen Wärmeströme über die gesamte Oberfläche des Messkolbens 2.

Neben der Analyse der transienten Verläufe wurde ebenfalls die quantitative Verteilung der Wärmeströme anteilig über alle Kolbenoberflächen aufgetragen (vgl. Abbildung 25). Hierbei ist ebenso wie bei der Variation für Messkolben 1 / Basis erkennbar, dass auch bei stark angepasster Kolbengeometrie, die anliegende Randbedingung für den Wärmeübergang an der Kolbenunterseite kaum Einfluss auf die globale Verteilung der Wärmeströme im Kolben bzw. dessen Temperaturfeld hat, das in Abbildung 26 dargestellt wird.

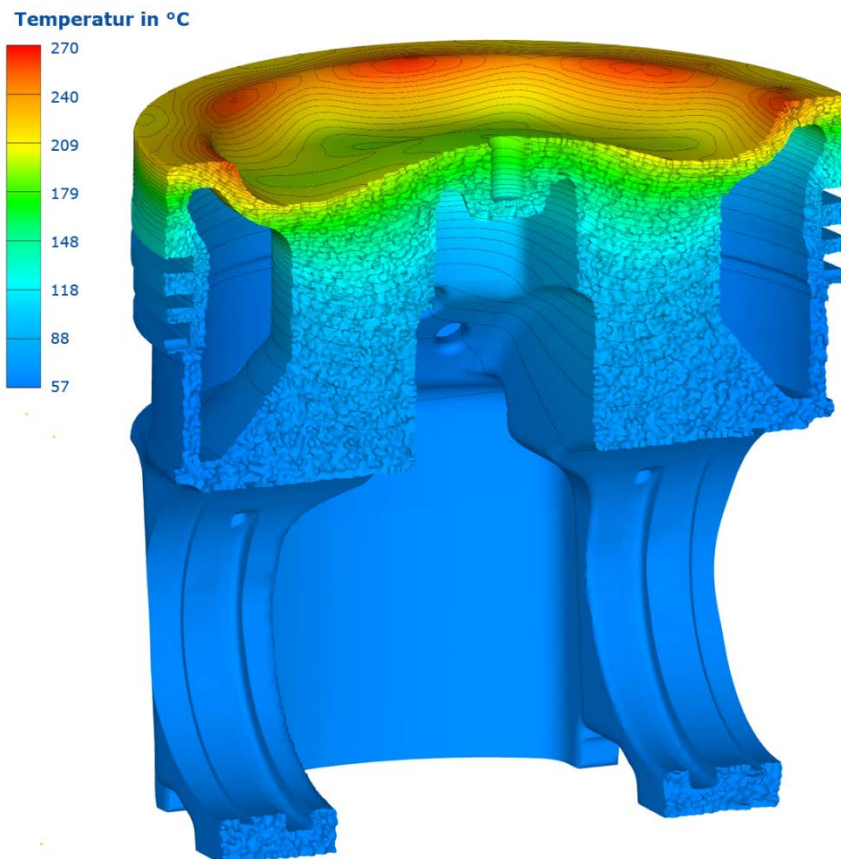


Abbildung 26 Stationäres Temperaturfeld des Messkolbens 2 mit Querschnitt entlang der Nabenachse.



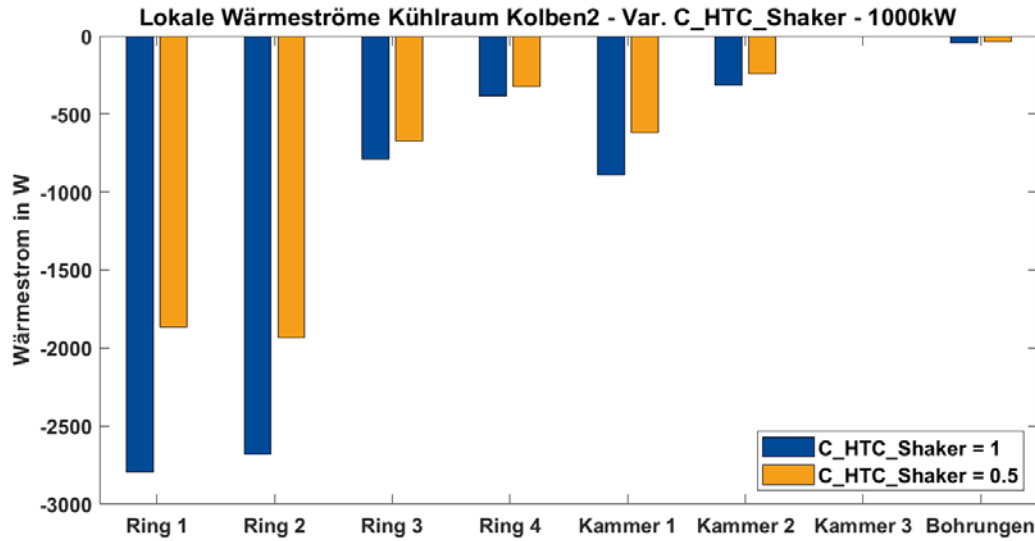


Abbildung 28 Lokale Verteilung der übertragenen Wärmeströme im Kühlraum des Messkolbens 2 unter Variation des Wärmeübergangs an den Kühlraumzonen.

Anhand der detaillierten lokalen Aufteilung ist zu erkennen, dass der Wärmestrom der höchstgelegenen Ringzone (Ring 1) deutlich zunimmt, während der Betrag, der über die vertikalen Kühlraumzonen (Ring 2 und Ring 3) übertragen wird, in etwa konstant verbleibt. Demgegenüber fällt auf, dass, trotz der deutlichen Verlängerung des Kühlraums in Richtung Kolbenunterteil, der Betrag der unteren Kühlraumzone (Ring 4) quasi konstant verbleibt. Im Gegensatz zu Messkolben 1 / Basis entfällt für die zentrale Kühlkammer die Wand (Kammer 3) als Abdichtung Richtung Kolbenunterseite, sodass nur die Kronennahen Zonen (Kammer 1 und Kammer 2) miteinander verglichen werden können. Die Beträge verbleiben auch hierbei unter leichten Geometrieadjustierungen konstant. Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei der vorliegenden Analyse die Gestaltung der Kronennahen Kühlraumzonen die Energieabfuhr dominiert, wobei Anpassungen an den unteren Kühlraumzonen die übertragenen Wärmeströme deutlich geringer beeinflussen.

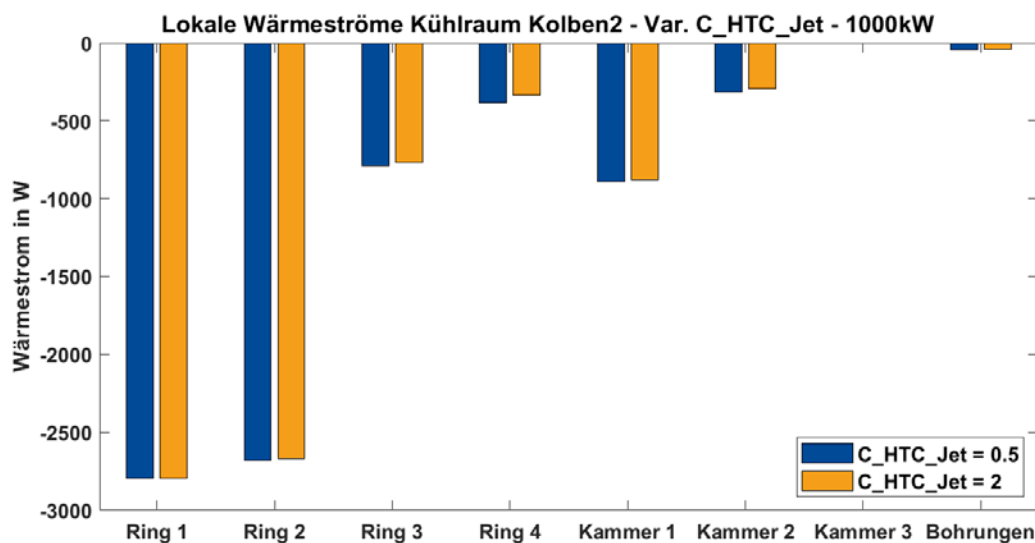


Abbildung 29 Lokale Verteilung der übertragenen Wärmeströme im Kühlraum des Messkolbens 2 unter Variation des Wärmeübergangs an der Kolbenunterseite.

Zusätzlich wurde untersucht, wie sensitiv die lokale Wärmestromverteilung des Kühlraums auf eine Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten an der Kolbenunterseite reagiert. Die Betrachtung der lokalen Wärmeströme zeigte, dass selbst die unteren, der Kolbenunterseite nahen Zonen (Ring 4 oder die Bohrungen), kaum von dieser Variation beeinflusst werden. Aufgrund des ähnlichen Resultates für den Messkolben 1 / Basis wird gefolgert, dass somit eine weitere Auflösung der Kolbenunterseite nicht weiter erforderlich ist, da die bereits vorhandene Modelltiefe ausreicht.

## 6.8 Analytisch-empirischer Ansatz für Wärmeströme

Der Bedarf eines analytisch empirischen Ansatzes wurde, unter Berücksichtigung der verfügbaren Projektlaufzeit, deutlich geringer eingeschätzt, als der Nutzen sowie der Bedarf einer voll funktionstüchtigen Messtechnik, die eine stabile Datenübertragung und Erfassung von aussagekräftigen Validierungsdaten ermöglicht. Daher wurde der Fokus im Verlauf des Projekts auf die Entwicklung der bereits beschriebenen Messtechnik gelegt.

## 7 AP6: Systematisierung, Ableitung Auslegungsmethoden, Hochrechnung Gesamtpotenzial

Dank der neuen Bestückung der Kolbenbaugruppen für alle Zylinderstationen, die innerhalb des Projekts durchgeführt werden konnten, wird ein quantitativer Vergleich von zwei verschiedenen Kolbengeometrien ermöglicht (vgl. Abbildung 30).

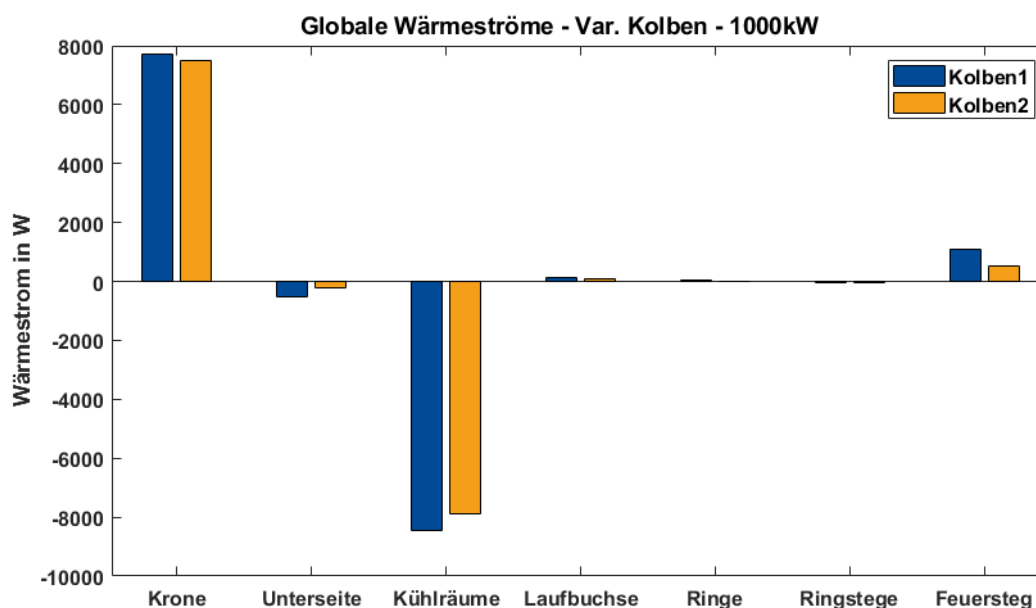


Abbildung 30 Alle über die gesamte Oberfläche übertragenen Wärmeströme für den simulierten Vergleich zwischen Messkolben 1 / Basis und Messkolben 2.

Es ist in Abbildung 30 gut erkennbar, dass bereits die geometrische Modifikation die globale Verteilung der übertragenen Wärmeströme beeinflusst. Bei vergleichbaren Randbedingungen an beiden Geometrien, die eine möglichst identische Belastung beider Kolbenvarianten gewährleisten soll, werden über den modifizierten Messkolben 2 generell geringere Energiemengen übertragen. Dies spiegelt sich ebenfalls in der Betrachtung der simulierten Temperaturbeträge wieder, da die Kronentemperatur des Messkolbens 2 einen leicht höheren

Betrag erreicht, als diejenige des Basis Messkolbens. Für die Auslegung entspricht dies einem geringeren Bedarf an die über das Schmieröl abzuführende Wärmemenge, sodass der nutzbare Anteil des weitergeführten Wärmestroms vergrößert wird. Das angepasste Kolbentemperaturfeld ist wiederum ein wichtiges Kriterium für die strukturmechanische Dimensionierung, da es ebenfalls die Temperaturverteilung an der Kolbenunterseite, so wie z.B. am Kolbenhemd, beeinflusst. Durch eine gleichmäßige Temperaturverteilung mit bekannten Temperaturniveaus auf den Laufflächen des Kolbens, können diese bereits in der Auslegungsphase hinsichtlich ihrer mechanischen Belastung und dem befeuerten Betrieb optimiert werden, da die Passungen zwischen Laubuchse und Kolben geeignet gewählt werden können.

Abhängig von der Dimensionierung des Kolbens lassen sich zudem die lokale Temperaturverteilung und somit auch die Ausbildung der Temperaturmaxima steuern. Diese sind für die Einhaltung der materialabhängigen Temperaturgrenzwerte essentiell, da es sonst zum Versagen der Bauteile kommt. Die bestimmten Temperaturfelder werden ebenfalls für die Analyse der thermischen Spannungsverteilung verwendet. Durch die kombinierte Methodik aus experimentell erfassten Temperaturdaten und den dazu abgestimmten simulierten Kolbentemperaturen, ist es möglich, detaillierte Aussagen über die Verteilung in den einzelnen Bereichen, wie der Kolbenkrone, den Ringbereichen oder dem Kolbenhemd, zu tätigen. Insbesondere kann dadurch, im Hinblick auf eine bedarfsgerechte Anpassung der Kolbenkühlung, die jeweils abgeführte Wärmemenge bzw. sich das jeweils einstellende Temperaturfeld für unterschiedliche Lasten miteinander verglichen werden.

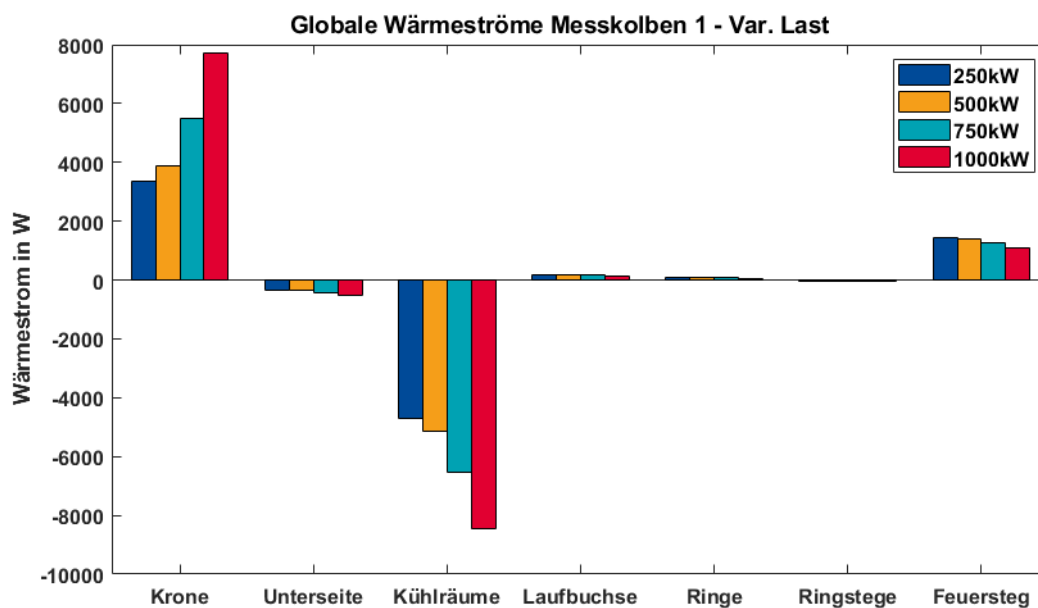


Abbildung 31 Globale Verteilung der übertragenen Wärmeströme des Messkolbens 1 / Basis unter Variation der anliegenden Last an der Kolbenkrone.

In Abbildung 31 wird deutlich, wie stark bei einem sonst konstant gehaltenen System der Bedarf der jeweils anliegenden Schmierölströmung unter Abnahme der Motorlast abnimmt. In dieser Analyse nimmt mit steigender Last der Betrag der hauptsächlich im- und exportierten Wärmeströme über die Kolbenkrone und den Shakerkühlraum nichtlinear zu. Unter Berücksichtigung dieser Daten für die angewendeten Lastprofile können dadurch die verwendeten Parameter für die Dimensionierung der Schmierölkühlung erweitert werden, da



so die Materialtemperaturen angepasst werden können. Dies wiederum hat direkten Einfluss auf die Temperatur des anliegenden Schmieröls zwischen Laufbuchse und Kolbenhemd, wobei eine Erhöhung der Öltemperatur eine geringere Ölviskosität bewirkt. Durch die dadurch geänderte Schmierfilmdicke und Tragfähigkeit des Schmieröls ist es möglich, die Laufeigenschaften des Motors zu beeinflussen. Unter Berücksichtigung des jeweils anliegenden Betriebspunktes werden dabei die resultierenden Reibungsverluste an der Reibpaarung verringert. Für die weiterführende Minimierung dieser Verluste wird ein Optimum zwischen der Schmierölversorgung und dem Verbrauch der Schmierölpumpe gesucht. Eine minimale Schmierölversorgung entspricht einer reduzierten Schmierfilmdicke und einem reduzierten Schmierölpumpenverbrauch, bei der jedoch das Risiko von Unterbrechungen des Schmierfilms und damit von Schäden am Kolben steigt. Eine erhöhte Schmierölversorgung entspricht einer sicher gewährleisteten Schmierfilmdicke und einem erhöhten Schmierölpumpenverbrauchs, bei dem jedoch das Risiko einer Überversorgung an Öl und damit eines nicht benötigten erhöhten Pumpenverbrauchs besteht. Durch die zusätzlich zur Verfügung stehenden Informationen des lokal aufgelösten Temperaturfeldes können nun die Grenzen für die minimal benötigte Schmierölversorgung z.B. auch unter Berücksichtigung des jeweiligen Betriebspunkteinflusses besser definiert werden. Die Größenordnungen der jeweils an das Schmieröl übertragenen Wärmeströme während dieser Lastvariation decken sich mit den bisherigen Resultaten aus den berechneten Variationssimulationen. Damit kann tendenziell der geringere Bedarf an Kühlleistung für den Kolben in dem Teillastbereich des Motors abgelesen werden. Würden diese Differenzen entsprechend der Simulation durch eine Einsparung des zugeführten Schmierölstroms realisiert werden, könnte so das Potenzial für eine effektive Einsparung des Schmierölverbrauchs genutzt werden, bei dem gleichzeitig die notwendige Kühlleistung immer noch erhalten bleibt.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Projektes eta-up wurde in dem vorliegenden Teilvorhaben der Wärmehaushalt von Kolben eines mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotors untersucht. Die Untersuchungen wurden sowohl experimentell an dem Versuchsträger, einem MaK 6M20CR, als auch mit Hilfe von CFD-CHT Simulationen durchgeführt. Zwei Kolben mit unterschiedlicher geometrischer Ausführung basierend auf ebenfalls unterschiedlichen Fertigungsprozessen konnten so mit Messtechnik für die Temperaturerfassung untersucht werden. Gegenstand der Untersuchungen war die Analyse des Kolbentemperaturfeldes und der dabei übertragenen Wärmeströme an der Kolbenoberfläche. Für die Anwendung am Prüfstand wurde zunächst eine mechanische Datenübertragung entworfen und gefertigt, die über mechanisch geführte Schwingenelemente alle installierten Thermoelementleiter an eine motorexterne Auswerteeinheit führt. Im Rahmen der darauf folgenden Untersuchungen wurde, zur Ausweitung des Betriebspunktbereiches mit einer stabilen Datenübertragung, beschlossen zusätzlich ein alternatives Messsystem zu erstellen, da die mechanische Übertragung bei höheren Drehzahlen entweder nur sehr schwer oder gar nicht umsetzbar wurde. Die angesprochene Alternative wurde über eine drahtlose Datenübertragung realisiert, die, im Vergleich zur mechanischen Übertragung, geometrisch bedingt geringeren Interferenzen ausgesetzt war und somit eine stabile Übertragung in einem erweiterten Motorkennfeldbereich liefern konnte. Die somit gewonnenen Daten konnten sowohl für die hier beschriebenen Simulationen als auch im Kreise der Projektpartner für die Validierung von weiterführenden

Simulationen verwendet werden. Hierzu zählen z.B. die Bestimmung von Temperatur- bzw. Wärmestromverteilungen von Bauteilen des gesamten Motors oder daraus resultierende Verluste in Folge der Reibpaarung zwischen Kolben-Kolbenringe-Laufbuchse. Durch die hier beschriebene Simulation des Kolbentemperaturfeldes war es möglich sowohl stationäre als auch transiente Temperaturverläufe am Kolbenoberteil zu bestimmen. Durch die damit vorhandene Güte der ebenfalls örtlich aufgelösten Temperaturfelder konnten höher belastete Bereiche des Festkörpers und die daran übertragenen Wärmeströme lokal bestimmt werden. Für die Einsparung von weiteren groß angelegten Messkampagnen, die jeweils mit zusätzlichem ökonomischem und zeitlichem Aufwand für den Betrieb der Messtechnik am Kolben versehen sind, konnte die Simulation, nach einer Validierung der Resultate, auf weitere Betriebspunkte und Parametervariationen ausgeweitet werden. Bei der genaueren Betrachtung des Kolbenoberteils konnte der Einfluss der Kühlraumkühlung als mit Abstand dominierender Anteil der gesamten Kolbenkühlung definiert werden. Im Vergleich hierzu nehmen sowohl die gesamte Kolbenunterseite als auch die Ringbereiche eine untergeordnete Rolle an der Kolbenkühlung ein. Zusätzlich ist es durch den direkten Vergleich der unterschiedlichen Kolbenvarianten möglich, die unterschiedlichen Bauarten hinsichtlich ihrer Kühlwirkung und des sich daraus ergebenden Temperaturfeldes zu bewerten, um dabei mögliche Schlüsse für eine Anpassung der Kühlstrategie vorzunehmen, die hinsichtlich des Bedarfs verbessert wird. Erweiterungen der bestehenden Methodik sind unter Umständen auch durch die Verwendung von weiteren Sensoren, wie z.B. Dehnmessstreifen, denkbar. Neben dem ökonomisch positiven Effekt zur Einsparung der notwendigen Anzahl an Prüfstandsversuchen könnten dadurch gleichzeitig Aussagen über die thermische und über die mechanische Belastung von Bauteilen getroffen werden. Dies wäre ebenfalls für die Simulation von Nutzen, da hierdurch weitere Validierungsdaten zur Verfügung gestellt werden würden. Zusätzlich würde die Simulation auch von der weiteren Detailauflösung über die Belastung von Bauteilen profitieren. Von besonderem Interesse für die erstellten Ansätze der Simulation und der Experimente ist die Anwendung auf weitere Motoren, um die Übertragung der Methodik zu kontrollieren und gleichzeitig das zur Verfügung stehende Know-How in diesem Forschungsgebiet zu verbessern. Zusammengefasst wurde bereits deutlich, dass die verwendete Methodik eine gute Basis bildet, um sowohl eine Beurteilung des Motorkolbens zu ermöglichen als auch um weiterführende Untersuchungen zu unterstützen.

## 9 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur übersichtlichen Darstellung wird der zahlenmäßige Nachweis der gesamten Projektlaufzeit in folgender Tabelle festgehalten.

Tabelle 3 Gegenüberstellung der insgesamt angefallenen Fördergelder und Kosten.

Position	Bezeichnung	Fördersumme	Kosten
0812	Beschäftigte E12 – E15	199.463,00 €	188.923,01 €
0817	Beschäftigte E1 – E11	91.615,00 €	89.577,87 €
0822	Beschäftigungsentgelte	9.939,25 €	9.939,25 €
<b>0824</b>	<b>Summe Personalausgaben</b>	<b>301.018,00 €</b>	<b>288.440,13 €</b>
0843	Materialien	5.536,00 €	6.787,44 €
0846	Dienstreisen	650,00 €	1.116,83 €
<b>0847</b>	<b>Summe Sächl. Verwaltungsausgaben</b>	<b>6.246,00 €</b>	<b>7.904,27 €</b>
0850	Gegenstände und Investitionen Liste:		
	Temperaturmessplatz		1.134,24 €
	Workstationplatz		4.277,85 €
	Lizenzen		81.574,50 €
	Messtechnik mech. Datenübertragung		12.410,40 €
	Messtechnik drahtlose Datenübertragung		4.667,26 €
	Präzisionskalibrator		3.668,58 €
<b>0850</b>	<b>Summe Gegenstände und Investitionen</b>	<b>104.228,00 €</b>	<b>107.732,83 €</b>
	<b>Gesamt Summe</b>	<b>411.492,00 €</b>	<b>404.077,23 €</b>

Hierbei ist erkennbar, dass der Großteil der 404.077,23 € Gesamtkosten auf Personalausgaben (288.440,13 €) entfallen ist. Darin sind die Kosten für die Wissenschaftlichen Hilfskräfte, die bei der Durchführung und Auswertung der wissenschaftlichen Aufgaben unterstützend gewirkt haben, für die technischen Mitarbeiter, die maßgeblich an den Vorbereitungen und Durchführungen aller experimentellen Arbeiten am Prüfstand beteiligt waren, und für die wissenschaftlichen Mitarbeiter, die für die Durchführung der Simulationen und Experimente verantwortlich waren, enthalten. Der zweitgrößte Anteil der Gesamtkosten entfällt mit 107.732,83 € auf Gegenstände und Investitionen. Darin sind die Ausstattungen für den Arbeitsplatz am Prüfstand und die für die Simulation benötigte Workstation enthalten. Darüber hinaus wird hierbei jegliche Elektronik (AD-Wandler, Verstärker), sowohl für die mechanische als auch für die drahtlose Datenübertragung, berücksichtigt, die am Motor verwendet wurde. Weitere 7.904,27 € entfallen auf die Sächlichen Verwaltungsausgaben, die die Dienstreisen und den Materialposten beinhalten. Darin werden jegliche Beschaffungen wie das Rohmaterial für die Fertigung der Schwingenelemente oder die Thermoelemente verbucht. Mit Ausnahme der Personalausgaben übersteigen die aufgetretenen Kosten für die Sächlichen Verwaltungsausgaben und Gegenstände/Investitionen die geplanten Fördersummen leicht. Abschließend wird jedoch festgehalten, dass die Einhaltung des aufgestellten Finanzplans positiv bewertet werden kann, da die Gesamtkosten das vorgesehene Budget des Projektes nicht überschreiten.

## **10 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Während der Bearbeitung der vorgestellten Arbeitsinhalte des Projektes wurde sich stets an dem übergeordneten Projektziel orientiert, um die Reibverluste zu reduzieren und den Gesamtnutzungsgrad zu steigern. Dieses Ziel wurde seitens des LTT auf zwei Arten, zum einen experimentell und zum anderen simulativ, unterstützt. Durch die Simulation wurden, aufbauend auf und ergänzend zu den Messungen, detaillierte Informationen über das transiente Temperaturfeld des Kolbens sowie über die Verteilung der übertragenen Energieströme gewonnen, die eine Einschätzung der Kolbenbelastung ermöglichen. Bei der mechanischen Datenübertragung nicht der volle Kennfeldbereich (vor allem höhere Drehzahlen) des Motors mit der geforderten Stabilität erreicht. Durch die Optimierung der mechanischen Datenübertragung und der zusätzlichen Entwicklung einer neuen drahtlosen Datenübertragung wurde für den experimentellen Anteil ein erhöhter Aufwand betrieben, um trotzdem die Temperaturmessungen gewährleisten zu können. Da jedoch durch das neue Messsystem ein deutlich stabilerer Messbetrieb und der Betrieb in weiteren Kennfeldbereich ermöglicht wurde, wurde die Notwendigkeit und Angemessenheit der als gegeben angesehen. Die Verwendung der Daten zur Validierung der Simulationsergebnisse wurde somit ebenfalls ermöglicht, sodass die Methodik hierbei als gerechtfertigt angesehen wird.

## **11 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Alle erworbenen Kenntnisse im Rahmen der experimentellen Durchführungen sowie die erweiterten wissenschaftlichen Kompetenzen für die Simulation und thermodynamische Bewertung von brennraumumgebenden Bauteilen können für den Fall des Lehrstuhls gut in den weiteren Lehrbetrieb eingebunden werden. Darin können sowohl auf das Thema aufbauende Untersuchungen vergeben werden, als auch zusätzliche Abschlussarbeiten angeboten werden. Durch das erweiterte Forschungsspektrum ist es nun möglich, weitere Veröffentlichungen zu bearbeiten. Das wiederum steigert ebenfalls den wissenschaftlichen Kenntnisstand und ermöglicht es dem Lehrstuhl weitere Dienstleistungen für Schiffsmotorenhersteller sowie Schiffsbetreiber anzubieten. Hierbei wäre es denkbar, den aufgebauten Wissensstand für die alternativ aufgebaute Messtechnik zu verwenden, um darauf aufbauend eine Optimierung an der bisherigen Telemetrie vorzunehmen. Zusätzlich wären ebenfalls weitere Anwendungsgebiete (experimentell für weitere Sensoren oder simulativ für weitere Bauteile) für die erarbeitete Methodik denkbar.

Die bereits vorliegenden und zusammengefassten Ergebnisse dieses Projekts können bereits jetzt bei den Partnern gewinnbringend für die Beurteilung und Anpassung weiterer Motorbaureihen angewendet werden, sodass das ursprüngliche Ziel zur Ableitung einzelner Optimierungsmaßnahmen erreicht werden konnte.

## **12 Bekannt gewordener Fortschritt während des Vorhabens**

Während des Vorhabens wurden weitere Untersuchungen im Bereich der Kolbenkühlung bekannt. Unter anderem wurden mittels FEM Simulationen und Motorprüfständen der Einfluss



von Kolbenkronenbeschichtungen untersucht. Dabei wurden entweder lokal an der Kolbenkrone [9] oder an der gesamten Kronenoberfläche [10] zusätzliche Materialschichten unterschiedlicher Stärken aufgetragen. Hierbei lag der Fokus teilweise auf den eigentlichen Materialuntersuchungen des Substrats oder den Machbarkeitsstudien für die eigentliche Herstellung, Verarbeitung und fertigungstechnische Anbringung des Substrats auf der Kolbenoberfläche. Die Absicht hinter diesen Vorhaben ist die thermische Isolierung des eigentlichen Kolbenträgermaterials mit einem dünn-schichtigen bzw. dünnwandigen Material mit möglichst geringer Wärmeleitfähigkeit. Dies ermöglicht eine Temperaturreduzierung des restlichen Kolbenträgermaterials bei einem gleichzeitigen Anstieg der Brennraumtemperatur. Andere Forschungsgruppen [11] haben sich wiederum auf die detaillierte Auflösung der Kühlölströmung an der Kolbenunterseite von Dieselmotoren fokussiert, um die Kühlwirkung an Kolben mit unterschiedlichen Kühlkanalgeometrien zu untersuchen. Dabei wurde unter anderem die Mehrphasenströmung einer Anspritzkühlung oder die Strömung innerhalb von Kühlkanälen mittels der VOF-Methode untersucht, die eine lokal aufgelöste Betrachtung der Temperaturen an der Kolbenunterseite ermöglichen. Ähnlich dazu wurden auch solch ganzheitliche Ansätze für hochbelastete Gasmotoren verwendet, bei denen auch die Ölverkokung berücksichtigt werden kann [12]. Bei diesen wurden sowohl CFD für die Simulation der Verbrennung und für die Simulation der Schmierölströmung im Kolben Shakerraum verwendet. Diese Simulationen stehen in Austausch mit einer FE Simulation des Kolbengitters für die Bestimmung der Kolbentemperaturverteilung. In Ergänzung zu den Simulationen wurden zur Validierung zusätzlich an einem Einzylinder-Forschungsmotor Kolbentemperaturen erfasst. Hierbei wurde eine mechanische Datenübertragung verwendet, die die Thermo-elemente über Schwingenelemente aus dem Motorgehäuse abführt, wobei jedoch im Vergleich zum vorliegenden Projekt, der Fokus der durchgeführten Analysen anders gesetzt wurde um z.B. die Entstehung von Verkokungsschichten an den Kühlraumwänden zu vermeiden.

Unabhängig von den veröffentlichten Forschungsergebnissen wurden ebenfalls Patentanmeldungen bekannt, die sich mit der Verbesserung bzw. Anpassung der bekannten Kolbengeometrien beschäftigen. Oftmals wird damit die Verbesserung der Wärmestromabführung angestrebt, sodass eine Anpassung der anliegenden Kolbentemperaturen erfolgen kann. Insgesamt lässt sich damit festhalten, dass die Forschung im Bereich der Kolbentemperaturerfassung immer noch von Interesse ist für die Industrie aber auch für Universitäten ist und über unterschiedliche Ansätze verfolgt wird.

## 13 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Nachfolgend eine Liste der im Projekt getätigten Veröffentlichungen:

Dottei, A., Püschel, M., Nocke, J., Hassel, E., „Analyse des Wärmehaushaltes im Kolben eines Schiffsdieselmotors mit Hilfe der 3D Simulation in Kombination mit experimentellen Untersuchungen“, Posterbeitrag, Thermodynamik-Kolloquium, Dresden, 27. – 29. September 2017.

Dottei, A., Püschel, M., Nocke, J., Hassel, E., „Analyse des Wärmehaushaltes im Kolben eines Schiffsdieselmotors mit Hilfe der 3D Simulation in Kombination mit experimentellen Untersuchungen“, Posterbeitrag, Jahrestreffen der ProcessNet Fachgruppen MPH, WSUE, CFD, HTT, AuW, KRI, PMT, Bremen, 06. – 09. März 2018.

Püschel, M., Reißig, M., Dottei, A., Nocke, J., Hassel, E., „eta-up – Reduction of Parasitic Losses of Medium-Speed Diesel Engines“, 5. Rostocker Großmotorentagung RGMT, Rostock, 13. – 14. September 2018.

Püschel, M., Hoppe, A., Theile, M., Reißig, M., Dottei, A., Nocke, J., Hassel, E., „Reduction of parasitic losses in medium-speed diesel engines“, DVV Media Group (Hrsg.): Ship&Offshore 08/2018, Hamburg, 2018.

Dottei, A., Nocke, J., Hassel, E., Püschel, M., „Temperaturfeld im Kolben eines Mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotors zur Reibungsminimierung“, Thermodynamik-Kolloquium, Duisburg, 30. September – 02. Oktober 2019.

Püschel, M., Hoppe, A., Theile, M., Reißig, M., Dottei, A., Nocke, J., Hassel, E., „eta-up – Reduction of Friction Losses of Medium-Speed Marine Diesel Engines“, 29<sup>th</sup> CIMAC World Congress, Vancouver, 10. – 14. Juni 2019.

Püschel, M., Dottei, A., Theile, M., Schäfer, S., „Reibungsreduktion und Gesamtwirkungsgrad-Steigerung bei Großdieselmotoren“, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Hrsg.), MTZ Industrial, 80. Jahrgang, Nr. 11, Wiesbaden, 2019.

Dottei, A., Hassel, E., „Numerische und experimentelle Analyse des Temperaturfelds im Kolben eines mittelschnelllaufenden Schiffsdieselmotors“, Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Wärme- und Stoffübertragung, Erfurt, 12. – 13. März 2020.

Zukünftig geplant sind noch folgende Veröffentlichungen:

Dottei, A., Hassel, E., Püschel, M., Reißig, M., Sturm, M., „eta-up – Numerische und experimentelle Kolben Temperaturfeldanalyse eines Schiffsdieselmotors“, 6. Rostocker Großmotorentagung RGMT, 03. – 04. September 2020.

## 14 Literaturverzeichnis

- [1] Wolf, R. and Eilts, P., “Comparison of Fuel Consumption and Emissions of Automotive and Large-Bore Diesel Engines,” *SAE Int. J. Engines* 7(1):221–233, 2014, doi:[10.4271/2014-01-1100](https://doi.org/10.4271/2014-01-1100).
- [2] Maassen, F.J., Dohmen, J., Pischinger, S., and Schwaderlapp, M., “Engine friction reduction,” *MTZ worldwide* 66(7), 2005, doi:[10.1007/BF03227776](https://doi.org/10.1007/BF03227776).
- [3] “Kolben Und Motorische Erprobung,” Vieweg + Teubner Verlag, ISBN 978-3-658-09557-4, 2015.
- [4] Köppl, F., “Untersuchung der Potentiale der numerischen Strömungsberechnung zur Prognose der Partikelemissionen in Ottomotoren mit Direkteinspritzung,” Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-11137-3, 2015.
- [5] Enomoto, Y., Aoki, Y., Emi, M., and Kimura, S., “Heat transfer coefficient on the combustion chamber wall surfaces in a naturally aspirated direct-injection diesel engine,” *International Journal of Engine Research* 15(5):606–625, 2014, doi:[10.1177/1468087413500060](https://doi.org/10.1177/1468087413500060).
- [6] Hendricks, T.L., Splitter, D.A., and Ghandhi, J.B., “Experimental investigation of piston heat transfer under conventional diesel and reactivity-controlled compression ignition combustion regimes,” *International Journal of Engine Research* 15(6):684–705, 2014, doi:[10.1177/1468087413512310](https://doi.org/10.1177/1468087413512310).

- [7] Hanjalić, K., Popovac, M., and Hadžiabdić, M., “A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD,” *International Journal of Heat and Fluid Flow* 25(6):1047–1051, 2004, doi:[10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.005](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.005).
- [8] Kajiwara, H., Fujioka, Y., and Negishi, H., “Prediction of Temperatures on Pistons with Cooling Gallery in Diesel Engines using CFD Tool,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2003 World Congress & Exhibition, MAR. 03, 2003, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2003.
- [9] Baldissera, P. and Delprete, C., “Finite Element Thermo-Structural Methodology for Investigating Diesel Engine Pistons with Thermal Barrier Coating,” *SAE Int. J. Engines* 12(1), 2019, doi:[10.4271/03-12-01-0006](https://doi.org/10.4271/03-12-01-0006).
- [10] Yao, Z. and Li, W., “Microstructure and thermal analysis of APS nano PYSZ coated aluminum alloy piston,” *Journal of Alloys and Compounds* 812:152162, 2020, doi:[10.1016/j.jallcom.2019.152162](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152162).
- [11] Dhar, S., Godavarthi, R., Mishra, A., Bedekar, S. et al., “A Transient, 3-Dimensional Multiphase CFD/Heat Transfer and Experimental Study of Oil Jet Cooled Engine Pistons,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, APR. 09, 2019, SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2019.
- [12] Ohler, S., Maier, T., Bludszuweit, S., and Chrobak, S., “Shakerkühlung - Shakerkühlung in Gasmotorenkolben für den maritimen Einsatz,” in: Forschungszentrum Jülich GmbH (ed.), *Statustagung Maritime Technologien: Tagungsband der Statustagung 2019*, Berlin, ISBN 978-3-95806-439-3, 2019.