

## Schlussbericht

<b>InnoRegio-Projekt:</b>	MAHREG
<b>Verbundvorhaben:</b>	Simulationsgestützte Analyse und Bewertung qualitätsrelevanter Eigenschaften höchstbelasteter Komponenten zukünftiger Motorengenerationen (SIPROKO)
<b>Teilprojekt :</b>	Entwicklung, Verifizierung und Validierung von Methoden, Modellen und virtuellen Simulationswerkzeugen für qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile von Hochleistungskolben
<b>Förderkennzeichen:</b>	03i1229A
<b>Unternehmen:</b>	SECO GmbH
<b>Projektleiter:</b>	Herr Pränger
<b>Zeitraum:</b>	01. August 2005 bis 30. Juni 2006

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03i1229A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Harzgerode, den 08.01.2007

---

<b>I</b>	<b>KURZE DARSTELLUNG DER AUFGABENSTELLUNG, VORAUSSETZUNGEN, PLANUNG UND ABLAUF</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde insbesondere</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>	<b>9</b>
<b>II</b>	<b>EINGEHENDE DARSTELLUNG</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>Erzielte Ergebnisse</b>	<b>10</b>
1.1	Anforderungen an qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile für hochbelasteten Komponenten zukünftiger Motorengenerationen	10
1.2	Innovative Schweißtechnologien für mehrteilig gefügte Kolben	12
1.2.1	Konstruktive Grundvarianten	12
1.2.2	Beanspruchungen durch den Fügeprozess	17
1.3	Einfluss der technologischen Prozesse auf die Homogenität der Werkstoff- und Eigenspannungszustände	18
1.4	Virtuelles Modell als Entwicklungstool zur Beschreibung der Betriebsbelastungen und -beanspruchungen unter Berücksichtigung der Eigenschaften aus dem technologischen Gesamtprozess	23
1.5	Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methoden, Modelle und virtuellen Simulationswerkzeuge	27
<b>2</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>Bekannt gewordener Fortschritt während der Durchführung des Vorhabens</b>	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse</b>	<b>31</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>33</b>

**Inno-Regio-Projekt** MAHREG

**Verbundprojekt:** Simulationsgestützte Analyse und Bewertung qualitätsrelevanter Eigenschaften höchstbelasteter Komponenten zukünftiger Motorengenerationen (SIPROKO)

**Teilprojekt 03i1229A:** Entwicklung, Verifizierung und Validierung von Methoden, Modellen und virtuellen Simulationswerkzeugen für qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile von Hochleistungskolben



---

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>35</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>35</b>

---

## I Kurze Darstellung der Aufgabenstellung, Voraussetzungen, Planung und Ablauf

### 1 Aufgabenstellung

Insgesamt bestand die Aufgabe, die ständig wachsenden Anforderungen in der Motorentchnik, die vor allem durch wirtschaftliche und umwelttechnische Aspekte vorangetrieben werden, durch neue Produkteigenschaften zu erfüllen. Für Kolben und andere höchstbelasteten Komponenten zukünftiger Motorengenerationen muss den steigenden mechanischen und thermischen Beanspruchungen Rechnung getragen werden, um die sichere Funktion über die geplante Lebensdauer zu gewährleisten. Insbesondere ist folgendes zu berücksichtigen:

- Die Temperaturen und Drücke im Brennraum nehmen zu, um die spezifischen Massen der Motoren und damit verbunden auch der Kolben zu reduzieren.
- Die Emissionen, die von den Motoren ausgehen, sind schrittweise trotz Erhöhung der Leistung der Motoren zu senken
- Die Fertigungsbedingungen für solche Kolben sind derart zu beeinflussen, dass eine reproduzierbare wirtschaftliche und auf hohem Qualitätsniveau stehende Auslieferung der Kolben gewährleistet ist.

Das stellt neue Ansprüche an die konstruktive Gestaltung, werkstofftechnische Ausführung und geforderte Qualität der zu entwickelnden Bauteile. Damit verbunden ist die Definition und Realisierung von messbaren qualitätsrelevanten Eigenschaften (Qualitätskriterien), welche bereits im Entwicklungsprozess neuer Kolben erarbeitet und bei der späteren materiellen Realisierung des Produktes schrittweise verifiziert werden müssen. Dieser übergeordneten Aufgabe ordnen sich auch Entwicklungswerkzeuge in Form von Simulationsalgorithmen und -tools hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Treffsicherheit unter. Bei der Verifizierung der theoretischen Entwicklungsergebnisse in Form eines virtuellen Modells sollten experimentelle und messtechnische Prüfungen eingebaut werden, die eine durchgängige Absicherung der qualitätsrelevanten Eigenschaften und Eigenschaftsprofile über die geplante Lebensdauer der zu entwickelnden Erzeugnisse ermöglichen.

Um die vorangestellten anspruchsvollen Aufgaben erfüllen zu können, war eine intensive Forschungskooperation unter bewusster Ausnutzung der besonderen Kompetenzen der Verbundprojektpartner aufzubauen und über die Laufzeit des Vorhabens ständig weiterzuentwickeln. Im Ergebnis des Projektes sollte die wissenschaftlich-technische Kompetenz der beteiligten Unternehmen des Landes Sachsen-Anhalt in erheblichem Umfang erweitert und gefestigt werden sowie fertigungstechnische Grundlagen für zukünftige Produkte geschaffen werden.

---

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

Das selbständige Unternehmen SECO GmbH Harzgerode ist eine Ausgründung des Geschäftsbereiches „Kolben“ der TRIMET Aluminium AG, NL Harzgerode, welches erfolgreich auf dem Gebiet der Entwicklung und Fertigung von Kolben tätig ist und ein breites Sortiment von Kolben für Großmotoren anbietet. Das hier abgeschlossene Projekt wurde mit Zuwendungsbescheid vom 30. 11. 2005 von der TRIMET Aluminium AG, NL Harzgerode auf die SECO GmbH Harzgerode übertragen. Eine Änderung des bereits zuvor für die TRIMET Aluminium AG, NL Harzgerode bestätigten Arbeitsplanes wurde nicht vorgenommen.

Zum Kundenkreis der SECO GmbH zählen führende Motorenentwickler und -hersteller sowie Großreedereien. Auf Grund der langjährigen Arbeit in Industrie- und Forschungsprojekten von Mitarbeitern des ehemaligen Bereiches „Kolben“ verfügt die SECO GmbH über hohes Know-how auf dem Gebiet der Entwicklung, Berechnung, Herstellung und Prüfung von Komponenten für große Viertakt-Verbrennungsmotoren, insbesondere Kolben. Langjährige und umfangreiche Erfahrungen bestehen ebenfalls in der Erfassung, Prüfung und Festlegung von werkstoffbezogenen Qualitätskriterien und Bauteileigenschaften für Kolben und Kolbenteile, so dass für kommerzielle Kolbenwerkstoffe (Aluminiumwerkstoffe, Sphäroguss, Vergütungsstähle) ein umfangreiches und detailliertes Wissen in Theorie und Praxis der Kolbenentwicklung und -berechnung, -herstellung und praktischen Anwendung vorliegen. Mit dem vorliegenden Vorhaben wurde die Möglichkeit eröffnet Kolben mit neuen Materialien anzubieten, die höchsten Qualitätskriterien moderner Motorenkomponenten genügen.

In Verbindung zu dem beantragten Teilprojekt kann der Antragsteller auf das bereits abgeschlossene Projekt SIMEKO verweisen, mit welchem die Grundlagen für das vorliegende Projekt geschaffen wurden. Die vorliegenden günstigen wissenschaftlich-technischen Rahmenbedingungen erlaubten es der SECO GmbH, die Federführung für das Verbundprojekt zu übernehmen, in welches sich das durchgeführte Teilprojekt einordnete. Die Untersuchung neuer Strategien und Methoden zur Entwicklung von Hochleistungskolben wurde in enger Kooperation mit leistungsfähigen Partnern des Landes Sachsen-Anhalt erfolgreich realisiert.

Aufgrund ihrer umfassenden Tätigkeit auf dem Gebiet der Entwicklung von Kolben für Großmotoren konnte die SECO GmbH dem Verbundpartner den Partnern SLV Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, WTZ Wissenschaftlich-Technisches Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung Roßlau gGmbH und Methodisch-Diagnostisches Zentrum Werkstoffprüfung e.V. wichtige Parameter und Daten für die Bearbeitung ihrer Teilaufgaben zur Verfügung stellen und somit zur Gesamtrealisierung des Verbundprojektes beitragen. Die Förderung des InnoRegio-

Projekts machte es der SECO GmbH gemeinsam mit den Partnern möglich, eine Bündelung der Kräfte zum Erreichen des anspruchsvollen Gesamtziels vorzunehmen.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die inhaltliche und terminliche Planung des Projektes “Entwicklung, Verifizierung und Validierung von Methoden, Modellen und virtuellen Simulationswerkzeugen für qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile von Hochleistungskolben“ ist im Aktivitätenplan (Tabelle 1) beschrieben.

Tabelle 1 Aktivitätenplan

AP	Arbeitspakete	Zeitraum
100	Analyse qualitätsrelevanter Eigenschaftsprofile	08/05-08/05
200	Bewertung schmiede- und schweißtechnologischer Einflüsse	08/05-11/05
300	Realisierung eines Simulationsmodells	08/05-11/05
400	Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methoden und Modelle	08/05-04/06
500	Systematisierung der Projektergebnisse	03/06-06/06

Die inhaltliche und organisatorische Abarbeitung der Arbeitspakete erfolgte planmäßig entsprechend dem vorgesehenen Ablaufplan des Verbundprojektes (Abbildung 1).

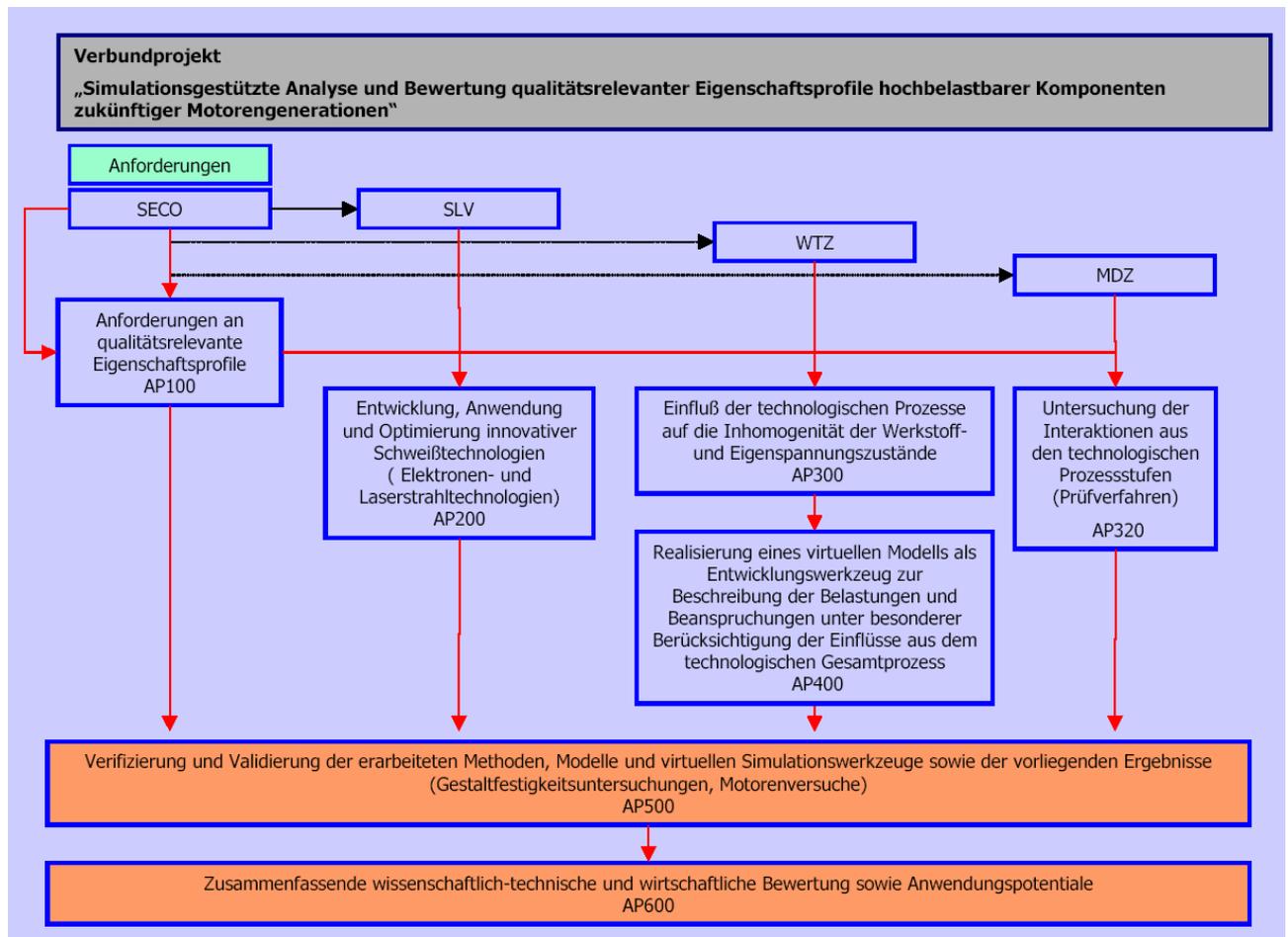


Abbildung 1: Ablaufplan des Verbundprojektes

Veränderungen beim Einsatz der finanziellen Mittel in Bezug auf die Höhe der einzelnen Kostenarten gab es auf Grund der Ausgründung des Geschäftsbereiches „Kolben“ der TRIMET Aluminium AG, NL Harzgerode als selbständiges Unternehmen SECO GmbH Harzgerode, die nicht von Beginn an planbar waren.

So musste bei der Position Material aufgrund von erheblichen Lieferverzögerungen der Schmiede auf noch vorhandenes Restmaterial der SECO GmbH, welches aus dem SIMEKO-Vorhaben stammte, zurückgegriffen werden. Damit verbunden war ein erheblich größerer Personalaufwand für die Probenherstellung. Die Investitionen der geplanten modernen Messmaschine verzögerten sich ebenfalls erheblich, so das vorhandene traditionelle Messeinrichtungen für die Messaufgaben des Vorhabens angepasst werden mussten. Daraus resultierte ebenfalls ein deutlich höherer Personaleinsatz für die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Messungen an den Versuchskolben.

---

Teile der Aufgaben, die ursprünglich als Fremdleistung geplant waren, mussten aufgrund fehlender Voraussetzungen an der Hochschuleinrichtung als Eigenleistung ausgeführt werden. Dadurch wurden deutlich mehr Personalkosten verbraucht, als im Plan vorgesehen. Insgesamt überstiegen die Kosten aber nicht den vorgesehenen Gesamtkostenrahmen.

#### **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde insbesondere**

Der internationale wissenschaftlich-technische Stand in der Dimensionierung und Auslegung von höchstbelasteten Kolben für Großmotoren wird im abgeschlossenen InnoRegio-Verbundvorhaben SIMEKO ausführlich dargestellt und durch die eigenen Ergebnisse auch deutlich mitbestimmt. Als erstes Erzeugnis dieser Art in Stahl-Stahl-Ausführung wird das von der Firma Mahle patentierte Produkt FERROCOMP® neu auf dem Markt angeboten.

Bezüglich der Auslegung der Kolbenkühlung wird dort jedoch noch die Shakerkühlung experimentell mit einem Plexiglasmodell untersucht, um die Kühlölbewegung, den Füllungsgrad der Shakeräume in Abhängigkeit von der Kühlölmenge, der Motordrehzahl und der Kolbenkühlraumgeometrie zu optimieren.

An einen vergleichbaren technischen Stand wurden in diesem Vorhaben angeknüpft. Im Ergebnis der Bearbeitung wurde im Teilprojekt der WTZ Wissenschaftlich-Technisches Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung Roßlau gGmbH und hier als FuE-Fremdleistung durch die MET Motoren- und Energietechnik GmbH ein neuer wissenschaftlich-technischer Stand erreicht. Wie in Abbildung 2 am Beispiel dargestellt, steht zukünftig der SECO GmbH eine durchgehend simulationsgestützte Auslegung der Kolbenkühlung mit dem Vorteil der Verkürzung der Entwicklungszeiten bei gleichzeitiger Senkung der Entwicklungskosten zur Verfügung.

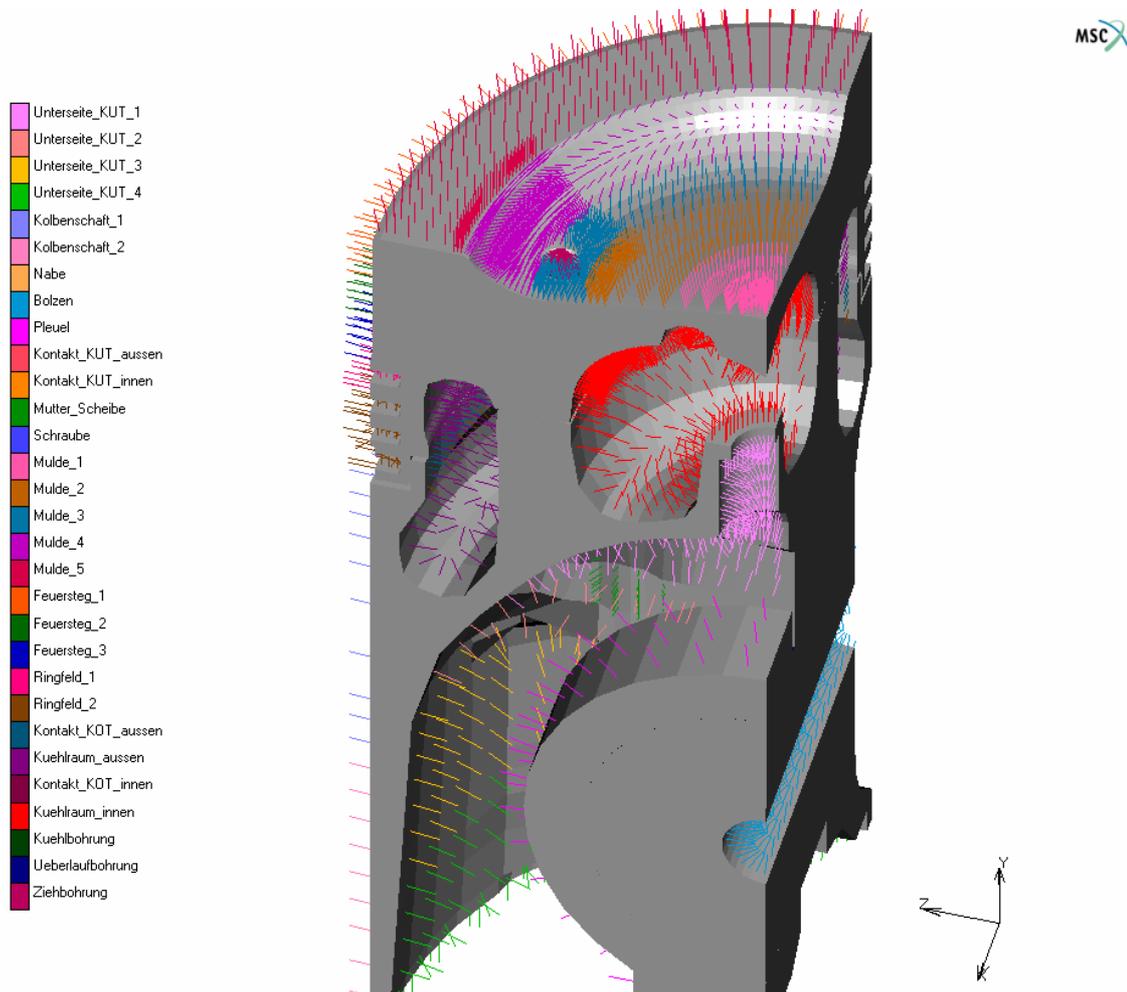


Abbildung 2: Randbedingungen des Kolbens

Bei den strukturellen Dimensionierungs- und Auslegungstools wurde ebenfalls an den erarbeiteten wissenschaftlich-technischen Stand des SIMEKO-Verbundprojektes angeknüpft und insbesondere aus wissenschaftlichen Überlegungen ein Konzept für geschweißte Kolbenkonstruktionen auf der Grundlage neuartiger Schweißverfahren (Elektronenstrahl-, Laserstrahlschweißen) entwickelt. Unter Inanspruchnahme der spezifischen Kompetenzen der Verbundpartner (SLV Halle GmbH, WTZ gGmbH) wurden im durchgeführten Vorhaben in Kooperation mit der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fachbereich Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, konstruktive Grundvarianten von mehrteilig geschweißten Komponenten für Großkolben entwickelt. Im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen wurde eine spezifische Analyse der entsprechenden Fachliteratur und der zutreffenden Patente [1] bis [14] durchgeführt.

---

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Intensiv wurde mit den leistungsstarken und kompetenten Partnern aus Sachsen-Anhalt:

- SLV Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH
- WTZ Wissenschaftlich-Technisches Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung Roßlaug GmbH
- Methodisch-Diagnostisches Zentrum Werkstoffprüfung e.V.

zusammengearbeitet.

In die fachliche Arbeit wurden als Unterauftragnehmer im vorliegenden Teilprojekt der SECO GmbH die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fachbereich Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik und im Teilprojekt der WTZ gGmbH die MET Motoren- und Energietechnik GmbH mit FuE-Fremdleistungen integriert.

Die SECO GmbH leitete das Verbundprojekt SIPROKO.

Es wurde eine enge Zusammenarbeit zwischen den Partnern gepflegt, um den Aufgabenumfang in dem eng gesteckten Zeitfenster zu realisieren und die spezifische fachliche Kompetenz eines jeden Partners dem Projekt zugute kommen zu lassen.

Gemeinsam wurden Projektberatungen durchgeführt und auf Statusseminaren/Workshops der jeweilige Arbeitsstand präsentiert.

## II Eingehende Darstellung

### 1 Erzielte Ergebnisse

#### 1.1 Anforderungen an qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile für hochbelasteten Komponenten zukünftiger Motorengenerationen

Die Qualität als Gesamtheit der Eigenschaften eines Erzeugnisses bestimmt seine Eignung für den vorgesehenen Einsatzzweck. Um die Qualität eines Produktes jedoch mess- und bewertbar gestalten zu können, ist es notwendig, qualitätsrelevante Eigenschaften durch messbare Größen (Qualitätsmerkmale) zu beschreiben. Auf der Basis solcher Merkmale lassen sich physikalisch-mathematische Kenngrößen ableiten (Qualitätskriterien), die von größter Bedeutung sind (z. B. Zweckbestimmung, Wirtschaftlichkeit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit). Ausgehend von diesem Qualitätsverständnis wurden im Arbeitspaket 100 „Formulierung der Anforderungen an qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile für hochbelastete Komponenten zukünftiger Motorengenerationen“ die konstruktiven und technologischen Anforderungen an qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile für hoch- und höchstbelastete Komponenten zukünftiger Großmotorengenerationen erarbeitet. Moderne Simulationsmethoden unterstützen diese Analyse (Abbildung 3).

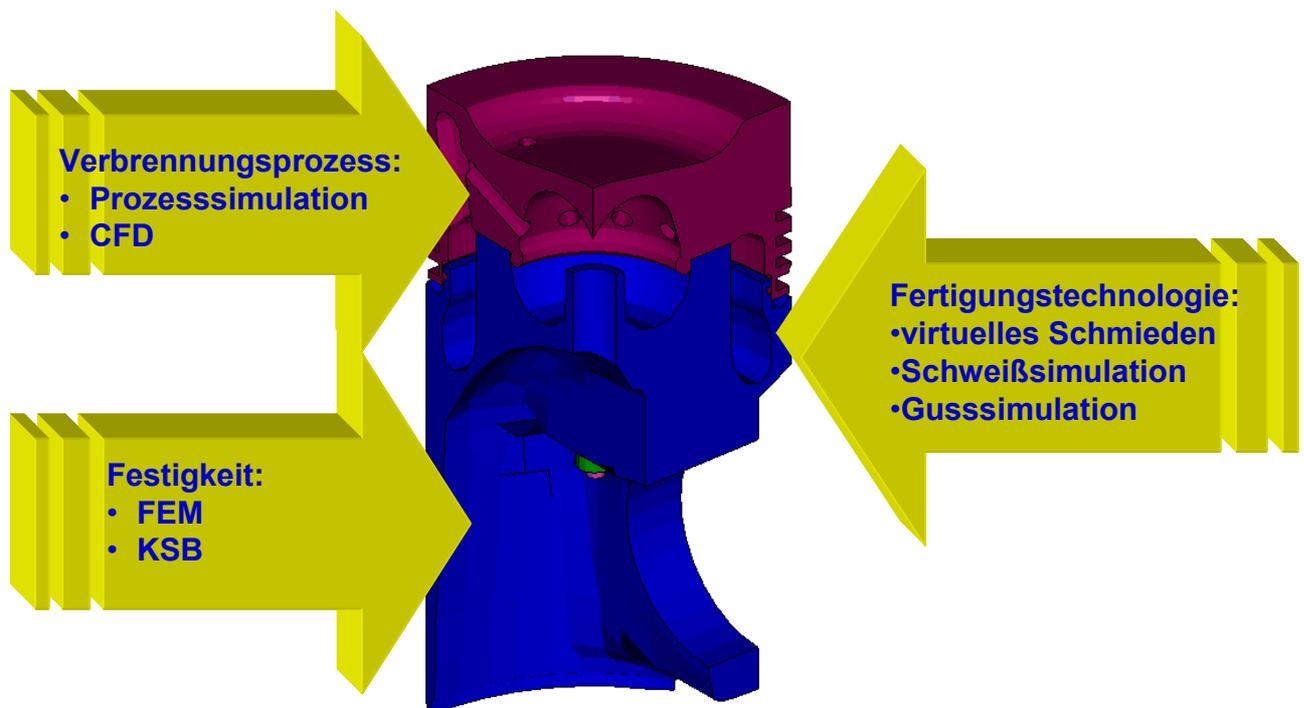


Abbildung 3: Simulationsgeführte Entwicklungskonzepte für höchstbeanspruchte Pleuelstiele

Wie aus den nachfolgenden Ausführungen erkennbar ist, lassen sich die konstruktiven und technologischen Anforderungen nicht getrennt entwickeln, sondern sind in der Regel stark miteinander verknüpft. Diese Grunderkenntnisse nutzend, wurden die Ergebnisse der Teilprojekte in kurzen Zeitabständen ausgetauscht, beraten und abgestimmt. Eine Schlüsselposition für die konstruktiven und technologischen Anforderungen stellt die Werkstoffauswahl dar. Aus wirtschaftlichen Erwägungen wurden schmiedbare unvergütete Stähle (AFP-Stähle) untersucht. Ihre Eignung leitet sich einerseits aus der zu erwartenden Betriebsbelastung und andererseits aus den fertigungstechnisch-technologischen Anforderungen ab.

Die fertigungstechnisch bedingten inneren Beanspruchungen (Eigenspannungen) sind ebenfalls mit den signifikanten betriebsbedingten Belastungen zu verknüpfen (Abbildung 4).

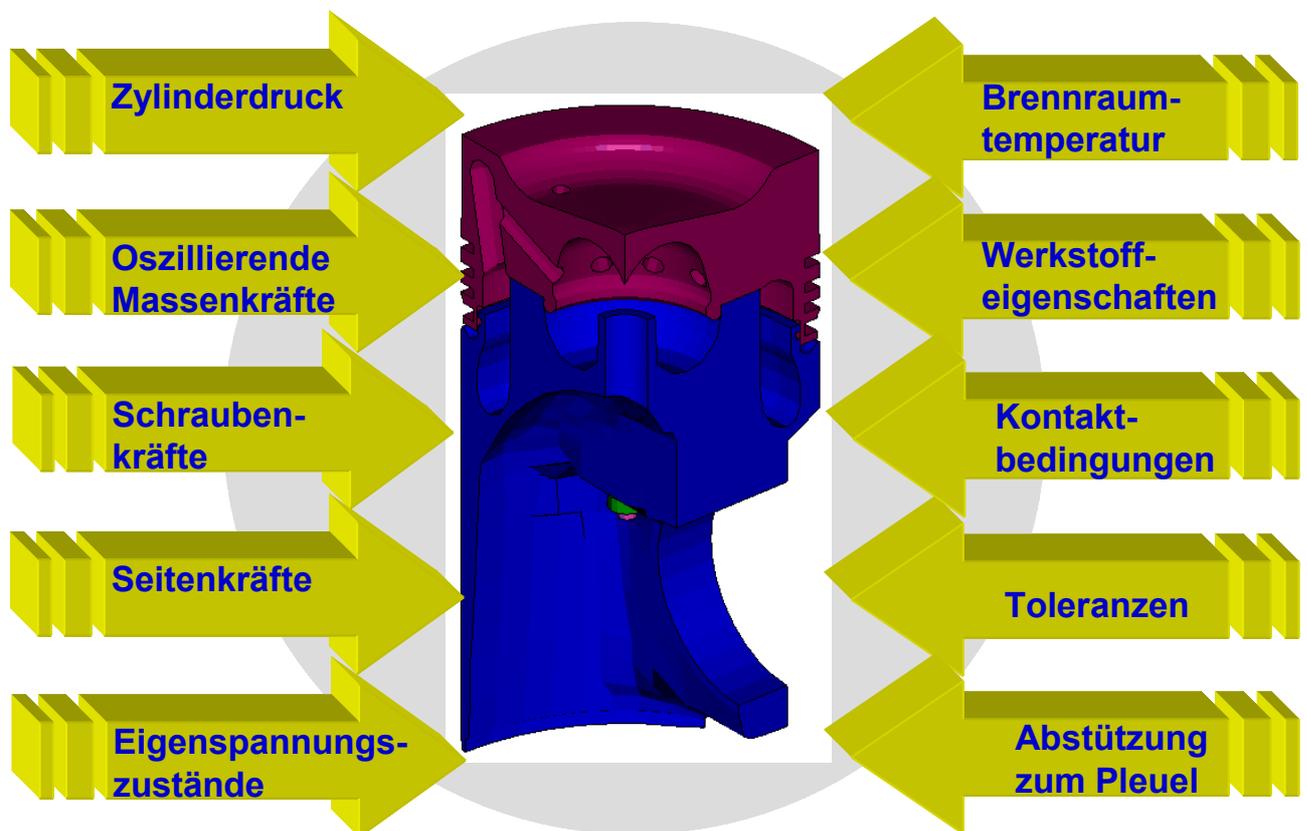


Abbildung 4: Einflussgrößen am Kolben

Unter Berücksichtigung dieser komplizierten Wechselwirkungen leiten sich stufenweise Anforderungen an die qualitätsrelevanten Eigenschaften ab. Diese wurden in einem Beispiel auf Kolben für die zukünftigen Großmotorengenerationen übertragen und betreffen Konstruktionen und Fertigungstechnologien im gleichen Umfang.

---

## 1.2 Innovative Schweißtechnologien für mehrteilig gefügte Kolben

Um zukünftige Motorenkonzepte sicher umsetzen zu können, sind leistungsfähige Kolbenkonstruktionen erforderlich. Die bisherigen Begrenzungen in der mechanischen Belastbarkeit sind meist durch den Werkstoff (Kugelgraphit) des Kolbenunterteils gegeben. In den bisherigen Konstruktionsausführungen liegt dieses Bauteil in Gussvarianten mit minimierter Bauteilmasse vor, verbunden mit einer effizienten Fertigungstechnologie. Gegenstand der fertigungstechnischen Betrachtungen zum Kolbenunterteil in Stahlausführung waren deshalb wirtschaftliche Aspekte. Insbesondere sollte untersucht werden, ob die o. g. Aufwandsnachteile des Schmiedestahlunterteils durch die Entwicklung von mehrteilig gefügten Kolben beseitigt oder gemindert werden können.

### 1.2.1 Konstruktive Grundvarianten

Bei den vorangestellten konstruktiven Grundvarianten wurden folgende 3 Fälle ins Auge gefasst:

- angeschweißte Schaftverlängerung
- eingeschweißte Bolzenaugen
- Schweißverbindung zwischen Oberteil und Unterteil

Die Untersuchungen dazu wurden ausführlich im Bericht der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), Fachbereich Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik [15] dargestellt und sollen deshalb in den folgenden Ausführungen nur sehr kurz erläutert werden.

#### *Angeschweißte Schaftverlängerung*

Mit dieser Maßnahme soll der Nachteil beim Gesenkschmieden des langen dünnenwandigen Schaftbereiches des Kolbenunterteils durch eine mit Laser- oder Elektronenstrahl angeschweißte Schaftverlängerung beseitigt werden. Abbildung 5 zeigt die konstruktive Lösung mit der Position der Schweißnaht. Um mögliche Fehler oder Defekte in der Schweißnahtwurzel zu beseitigen, wird eine Nacharbeit vorgenommen. Die Vorgehensweise bei der Schweißnahtbearbeitung wird in Abbildung 6 veranschaulicht. Mit diesem Konzept werden eventuelle Wurzelfehler und Einbrandfehler an der Oberseite beseitigt.

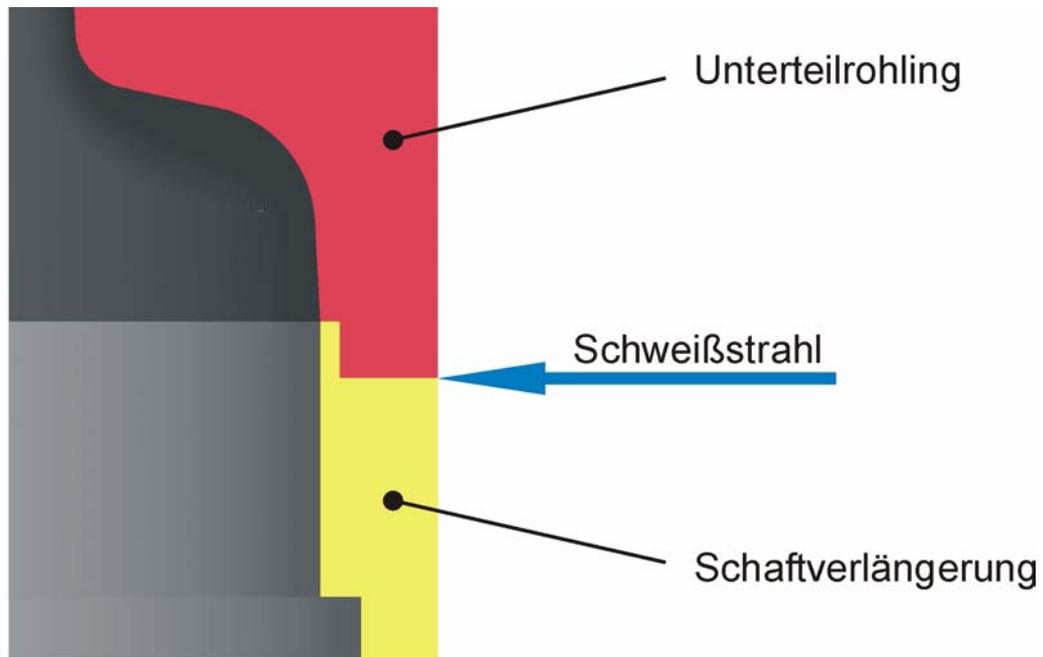


Abbildung 5: Verschweißen von Schaftverlängerung und Unterteilrohling

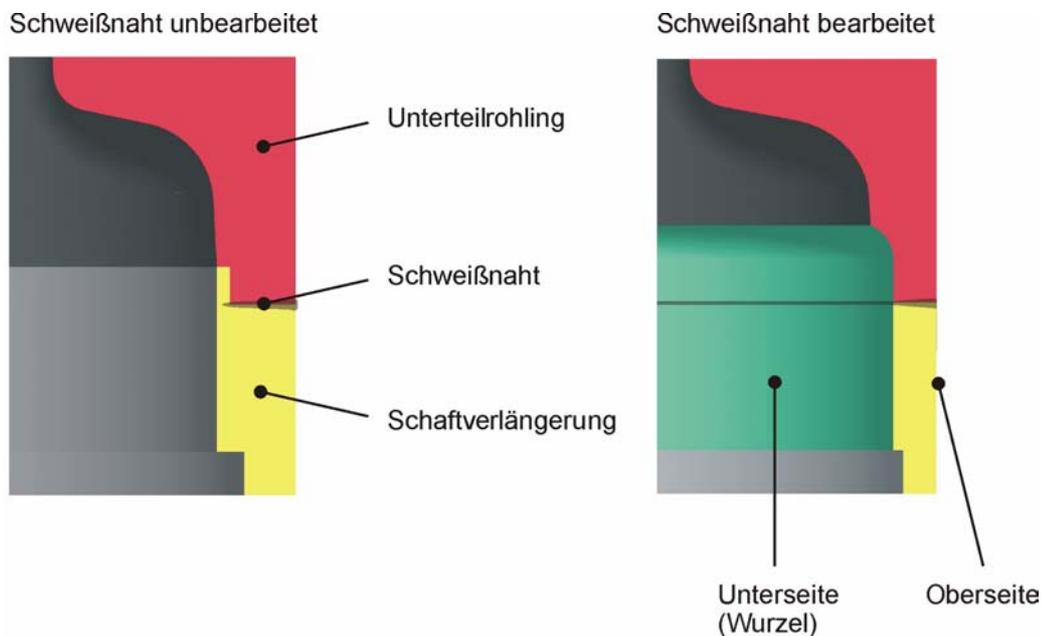


Abbildung 6: Bearbeiten der Schweißnaht

### *Eingeschweißte Bolzenaugen*

Die komplizierte Geometrie der Bolzenaugen kann im Gesenkschmiedevorgang nicht realisiert werden. Eine entsprechend aufwändige mechanische Bearbeitung ist nachfolgend erforderlich, um die Endgeometrie herzustellen. Alternativ dazu wurde eine Konstruktionsvariante mit geschweißten Bolzenaugen entwickelt. Einen Überblick dazu gibt die Abbildung 7.

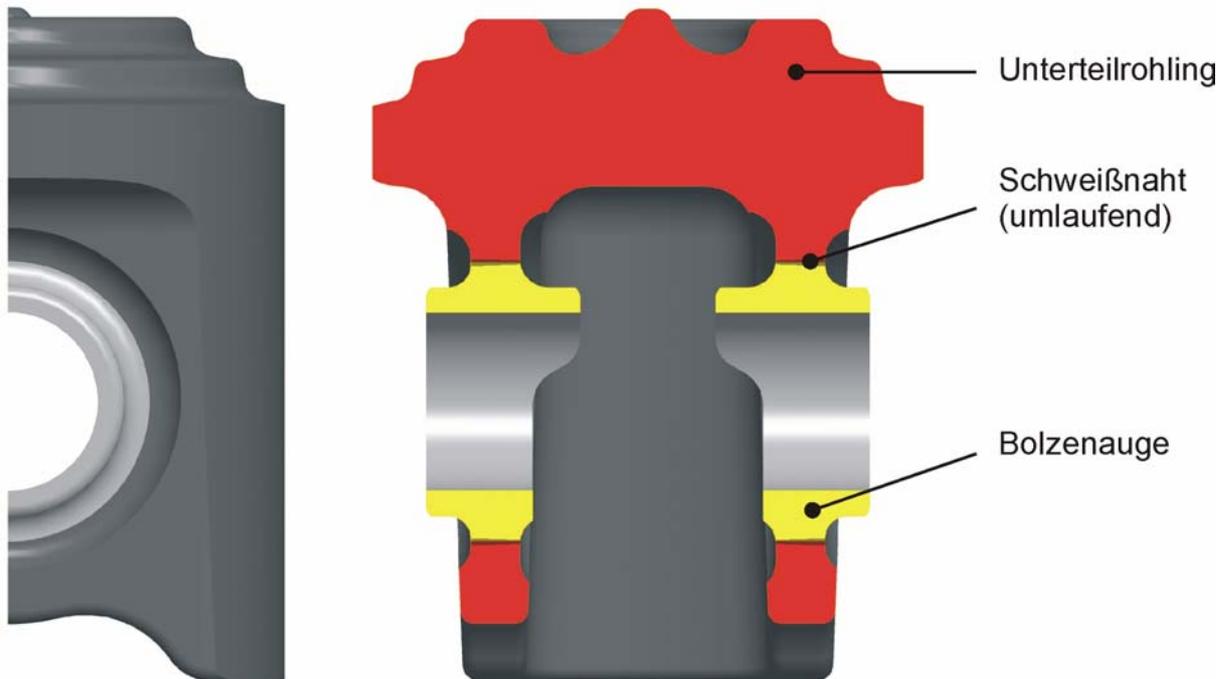


Abbildung 7: Schnittdarstellung durch Bolzenebene des geschweißten Unterteilrohlings

Die Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen, dass ein erheblicher Aufwand bei der Bauteilvorbereitung zu berücksichtigen ist. Ebenfalls aufwändig ist die Nachbearbeitung Schweißnähte, wie in der Abbildung 10 dargestellt.

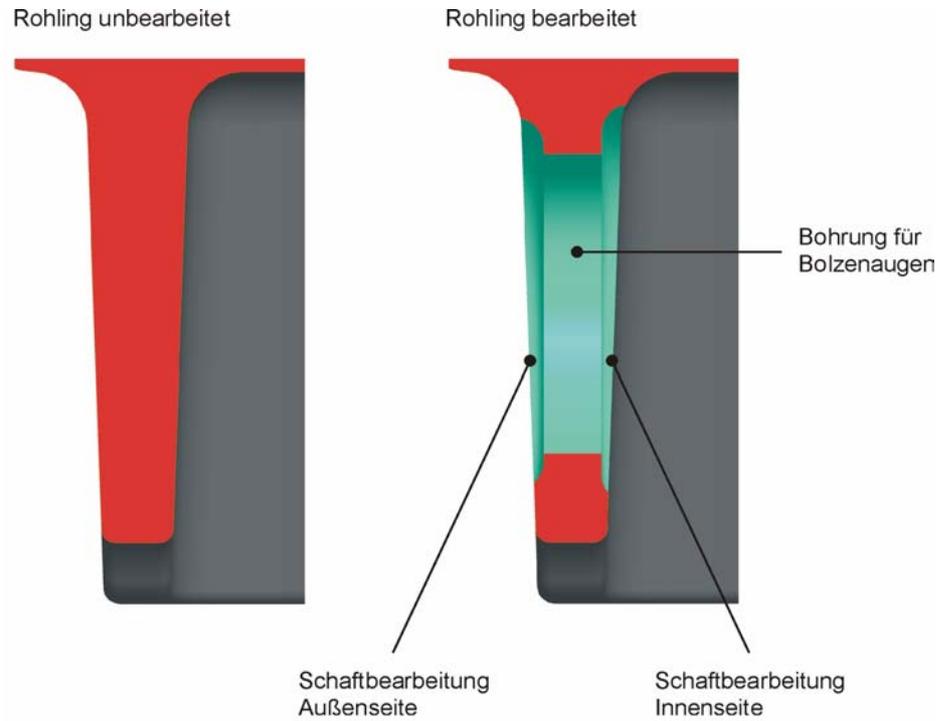


Abbildung 8: Schweißnahtvorbereitung am Unterteilrohling

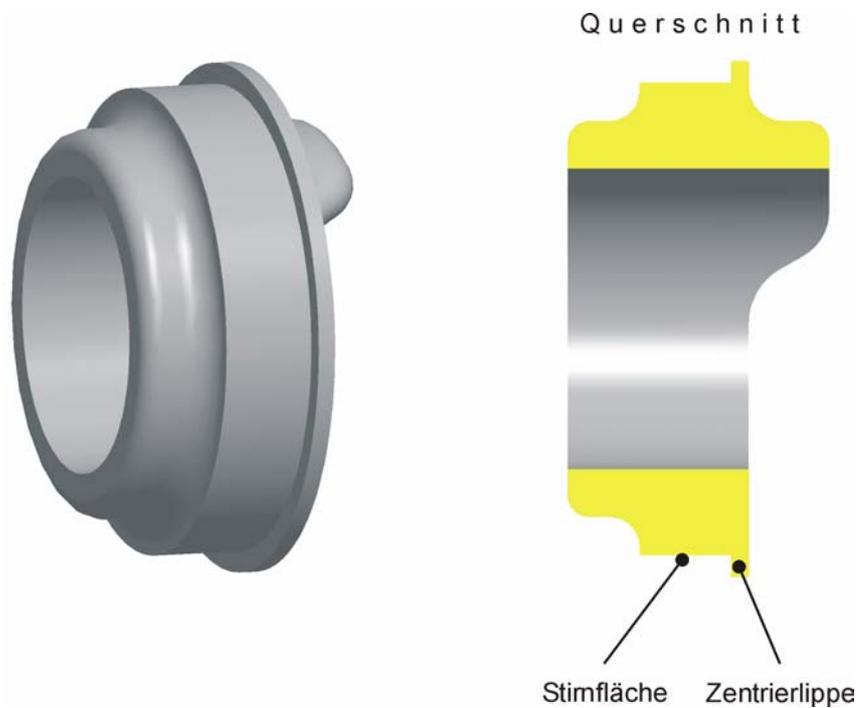


Abbildung 9: Formgebung und Herstellung der Bolzenaugen

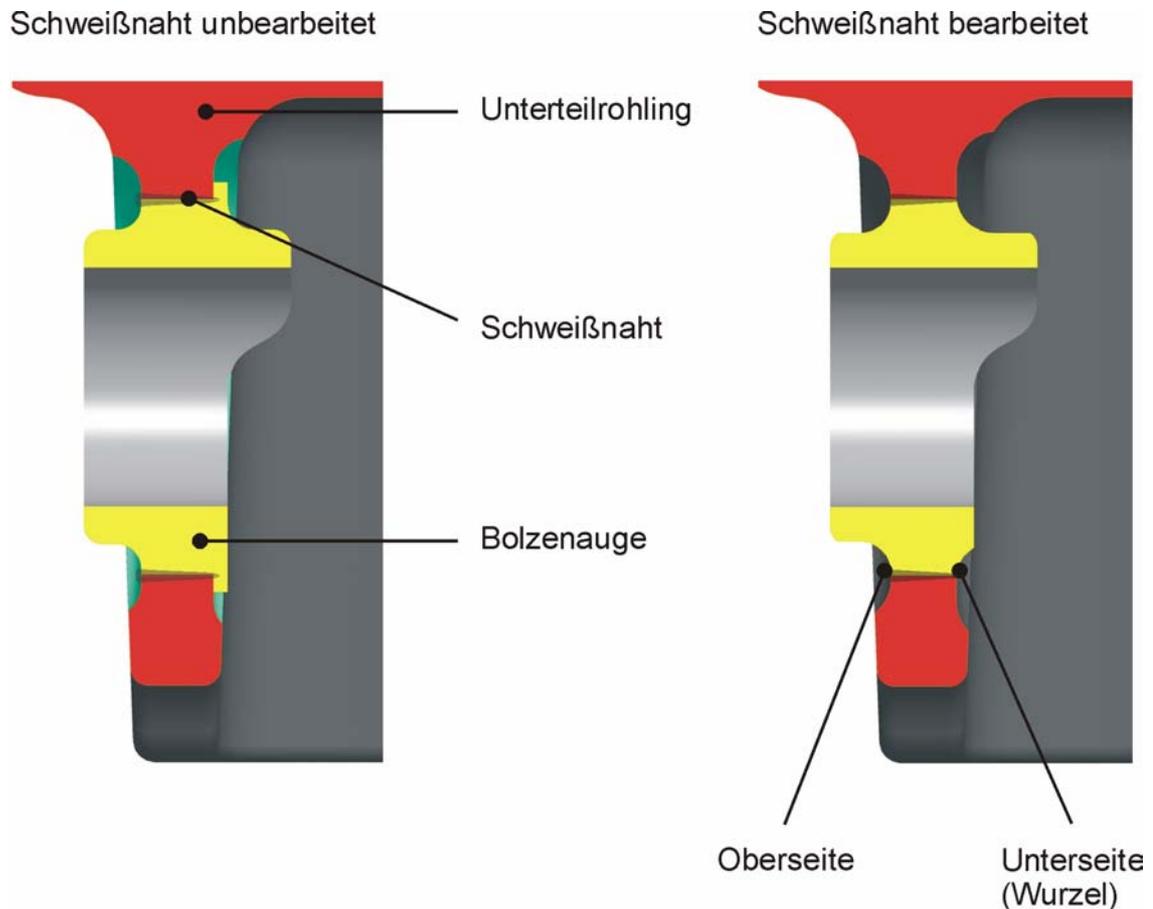


Abbildung 10: Schweißnahtbearbeitung auf der Innen- und Außenseite des Schaftes

Ein wirtschaftlicher Vergleich zu einer Komplettbearbeitung eines Gesenkschmiederohlings wird erforderlich.

#### *Schweißverbindung zwischen Pleuellagerober- und Pleuellagerunterteil*

Diese erarbeitete konstruktive Lösung greift tief in die Funktion eines Pleuellagers ein und bedarf deshalb einer sehr detaillierten Bewertung. Eingespart werden könnten mit dieser Lösung die aufwändige Schraubenverbindung und die Herstellung hoch genauer Kontaktflächen zwischen Ober- und Unterpleuellager. Dem gegenüber steht eine sorgfältige Vorbereitung und Realisierung der Schweißverbindung. Die Auslegungs- und Dimensionierungsmethoden müssen dieser neuen Fertigungstechnologie angepasst und die Werkstoffdaten ermittelt werden. Einen Überblick über die entwickelte geschweißte Pleuellagerstruktur gibt Abbildung 11.

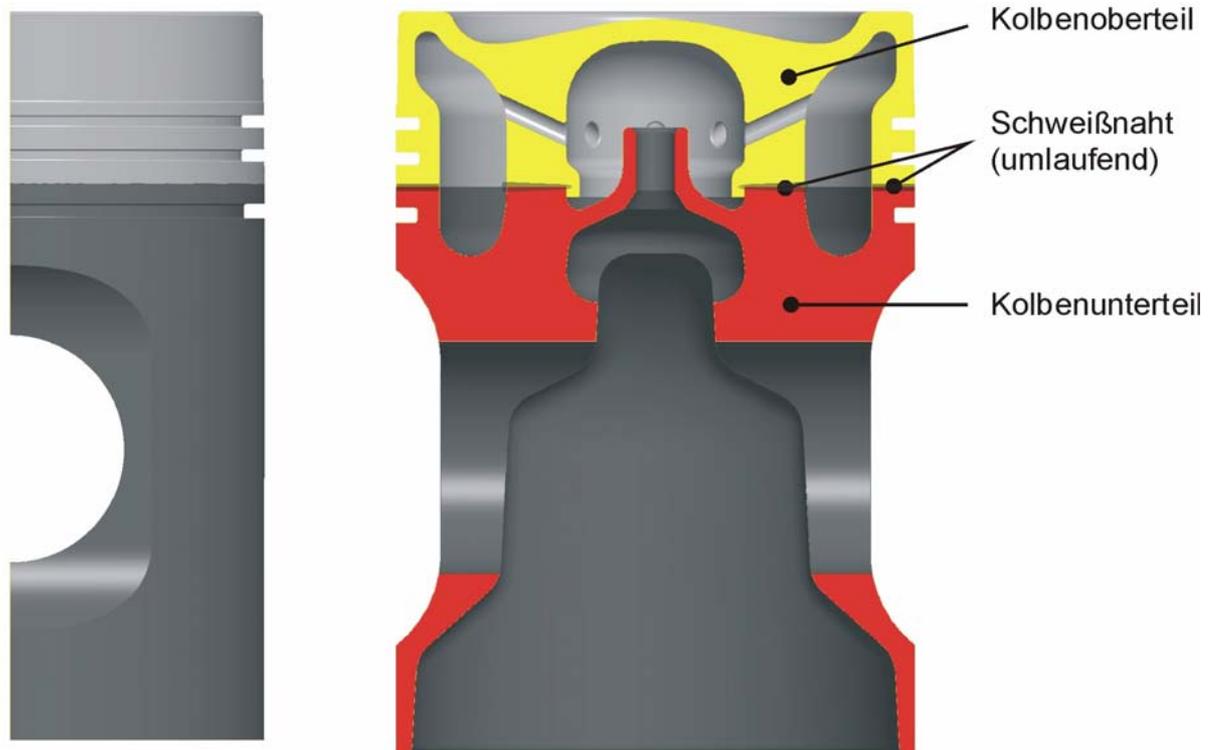


Abbildung 11: Schnittdarstellung durch Bolzenebene des geschweißten Kolbens

### 1.2.2 Beanspruchungen durch den Fügeprozess

Die Beanspruchungsverhältnisse bei mehrteilig gefügten Kolben unterscheiden sich von traditionell gebauten Kolben. Der Haltbarkeitsnachweis für diese neuartigen Kolbenkonstruktionen wird erheblich von den bisherigen abweichen und muss deshalb folgende zusätzliche Aspekte berücksichtigen:

- Bei der konstruktiven Gestaltung mehrteilig gefügter Kolben ist die Lage der Orte höchster Beanspruchung derart zu berücksichtigen, dass diese Orte nicht mit Schweißnähten zusammenfallen. In der Abbildung 12 wird dieser Sachverhalt beispielhaft dargestellt.
- Bei der Dimensionierung und Auslegung der mehrteilig gefügten Kolben müssen die fertigungsbedingten Beanspruchungen (Eigenspannungen, Restverformungen) wenigstens pauschalisiert bei der Bewertung der Betriebsbeanspruchung in ihrem Mittelspannungseinfluss berücksichtigt werden.

Nähere Ausführungen werden zu diesen Besonderheiten im folgenden Abschnitt gemacht.

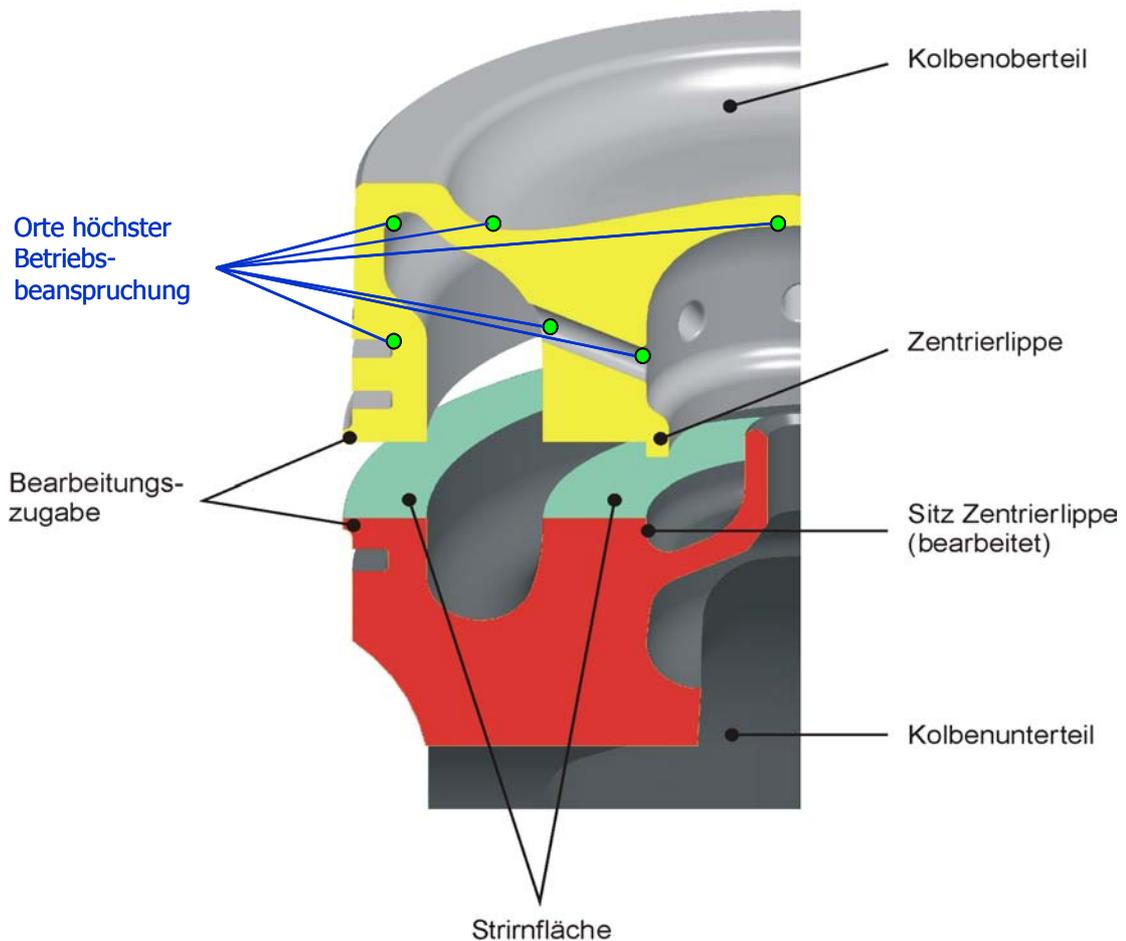


Abbildung 12: Vermeidung der Überlagerung von Betriebsbeanspruchung und Schweißspannungen bei mehrteilig geschweißten Kolben

### 1.3 Einfluss der technologischen Prozesse auf die Homogenität der Werkstoff- und Eigenspannungszustände

Es ist allgemein bekannt, dass aus dem Schmiedeprozess und der nachfolgenden Abkühlung die Werkstoffzustände im mikroskopischen und die Eigenspannungszustände im makroskopischen Bereich erheblich beeinflusst werden können.

Während es sich bei Vergütungsstählen bewährt hat, nach dem Vergüten ein gezieltes Spannungsarmglühen durchzuführen, sind diese Vorgänge bei den AFP-Stählen noch nicht so tiefgründig analysiert worden. Einen starken Einfluss übt bekanntlich auch die mechanische Bearbeitung auf die Eigenspannungszustände eines Bauteils aus. Aus diesen Gründen wurden im bearbeiteten Vorhaben vergleichende Messungen an Kolbenoberteilen aus Vergütungsstählen (42CrMo4V) und Kolbenunterteilen aus AFP-Stählen (38MnVS6BY) durchgeführt. Die Lage der Messstellen ist

Abbildung 13 – 16 zu entnehmen. Eine Übersicht über ausgewählte Messergebnisse wird in Abbildung 17 gegeben.



Abbildung 13: Kolbenoberteil

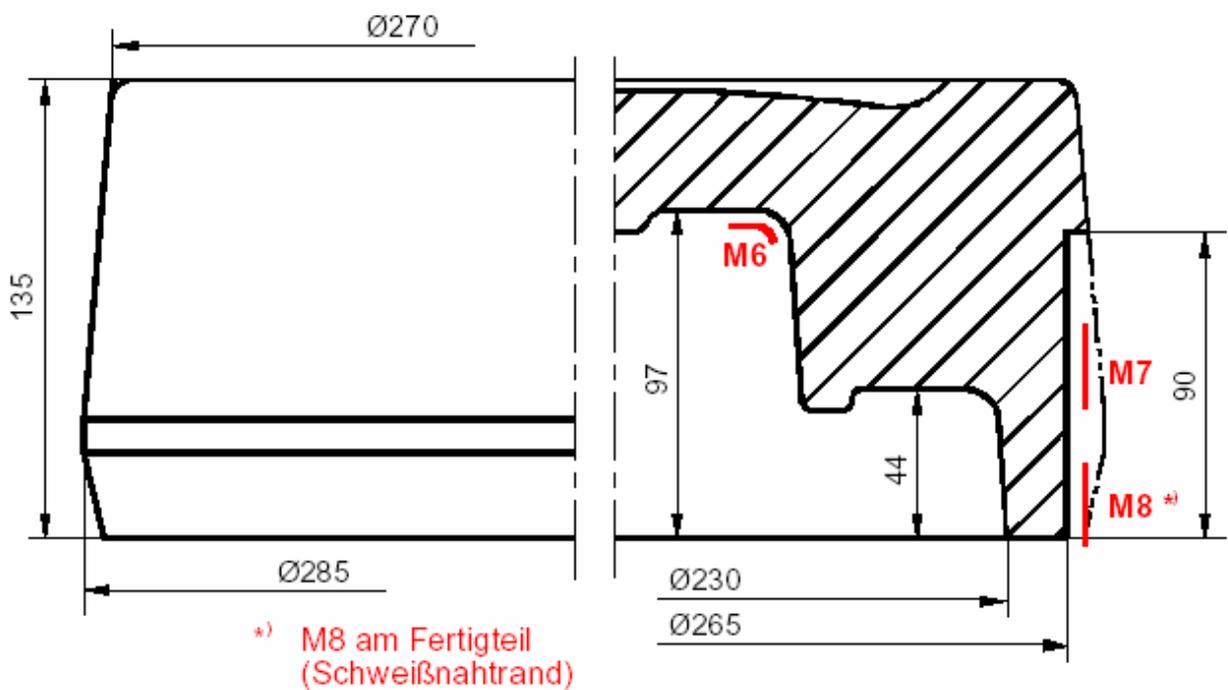


Abbildung 14: Eigenspannungsmessstellen am Kolbenoberteil



Abbildung 15: Kolbenunterteil

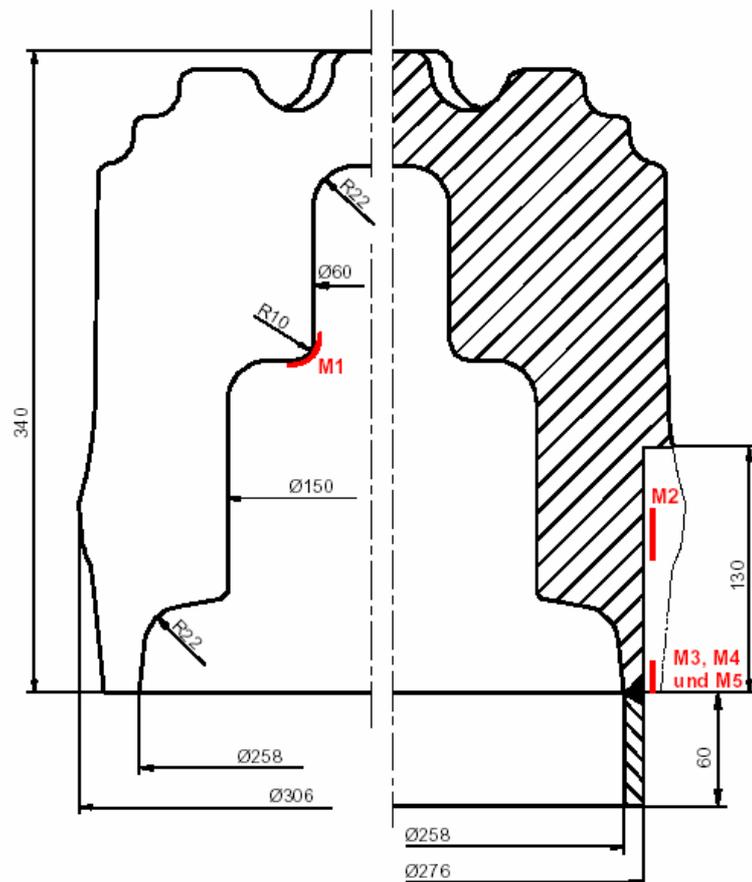


Abbildung 16: Eigenspannungsmessstellen am Kolbenunterteil

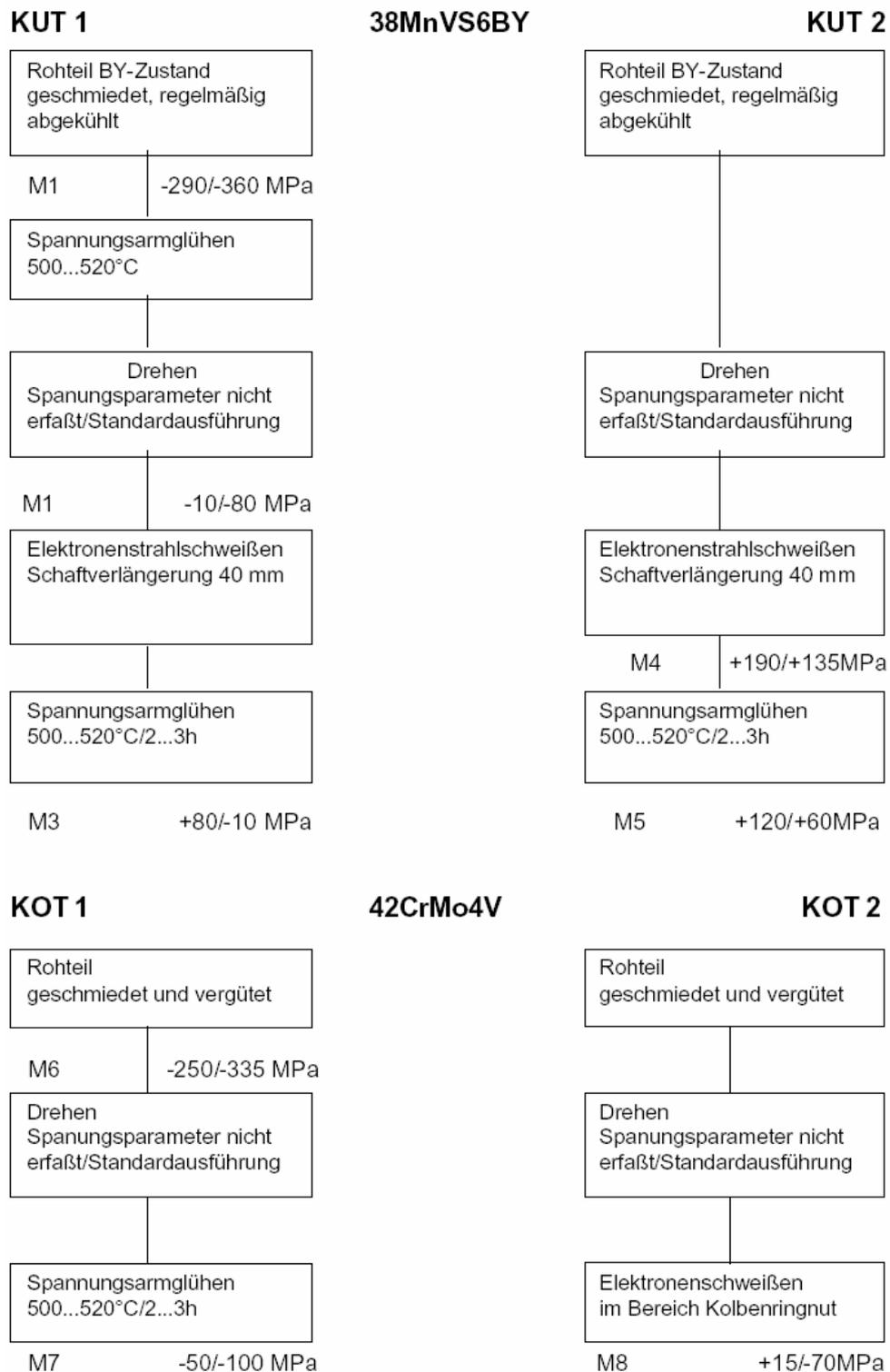


Abbildung 17: Ausgewählte Messergebnisse an Kolbenober- und Kolbenunterteilen aus AFP-Stahl und Vergütungsstahl

**Inno-Regio-Projekt** MAHREG

**Verbundprojekt:** Simulationsgestützte Analyse und Bewertung qualitätsrelevanter Eigenschaften höchstbelasteter Komponenten zukünftiger Motorengenerationen (SIPROKO)

**Teilprojekt 03i1229A:** Entwicklung, Verifizierung und Validierung von Methoden, Modellen und virtuellen Simulationswerkzeugen für qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile von Hochleistungskolben



---

Zusammenfassend kann zu diesen vorliegenden Messungen festgestellt werden, dass Wärmebehandlungen und mechanische Bearbeitungsvorgänge die Eigenspannungszustände in den Bauteilen erheblich beeinflussen. Auch sind deutliche Wechselwirkungen zwischen den mechanischen und thermischen Bearbeitungen der Bauteile vorhanden. Eine eindeutige Systematik ist jedoch nicht erkennbar, so dass vorerst pauschalisierte Abminderungen zu den ermittelten Schwingfestigkeitswerten vorzunehmen sind. Unter Inanspruchnahme der im Teilvorhaben der WTZ gGmbH ermittelten Schwingfestigkeitswerte für Elektronen- und Laserstrahl geschweißte Probe mit den Grundwerkstoffen 42CrMo4V und dem AFP-Stahl 38MnVS6BY können Haltbarkeitsnachweise für mehrteilig geschweißte Kolben in Zukunft ausgeführt werden.

#### 1.4 Virtuelles Modell als Entwicklungstool zur Beschreibung der Betriebsbelastungen und -beanspruchungen unter Berücksichtigung der Eigenschaften aus dem technologischen Gesamtprozess

Die Basis für dieses virtuelle Modell wurde bereits im abgeschlossenen InnoRegio-Vorhaben SIMEKO erarbeitet und beispielhaft an einer zukünftigen Stahl-Stahl-Kolbenkonstruktion getestet. Die Vorteile einer simulationsgestützten Kolbenentwicklung konnten bereits dort nachgewiesen werden. Das erfolgreiche simulationsgestützte Entwicklungskonzept wird schematisch in Abbildung 18 dargestellt.

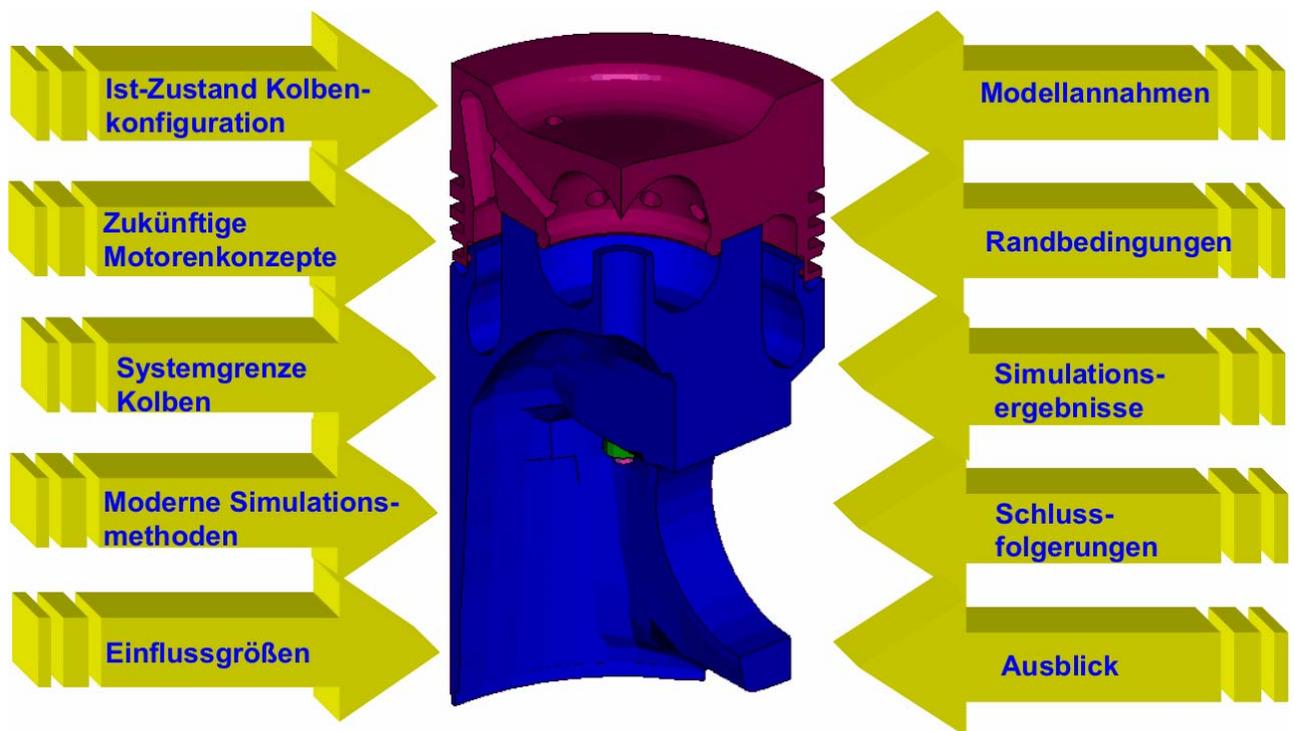


Abbildung 18: Simulationsgestütztes Kolbenentwicklungskonzept

Basierend auf diesen umfangreichen Erkenntnissen und positiven Erfahrungen wurden im Vorhaben SIPROKO diese effizienten Simulationsmethoden von der MET GmbH im Auftrag der WTZ gGmbH als FuE-Fremdleistung deutlich erweitert, so dass jetzt ein virtuelles Modell des Kolbens als Entwicklungswerkzeug vorliegt. Dieses virtuelle Modell ist in der Lage, die wesentlichen Prozessbedingungen sowie Hauptfertigungsabschnitte realistisch widerzuspiegeln. Beginnend mit dem Urformen (Gießen, Schmieden) sind spezielle Simulationswerkzeuge für die Kolbenfertigung entwickelt worden. In Abbildung 19 werden Ergebnisse einer Gussimulation beispielhaft dargestellt.

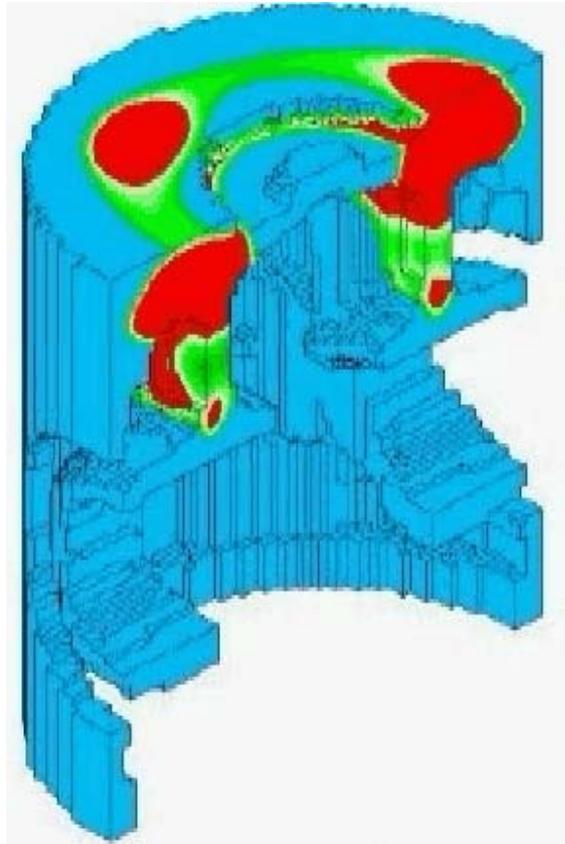
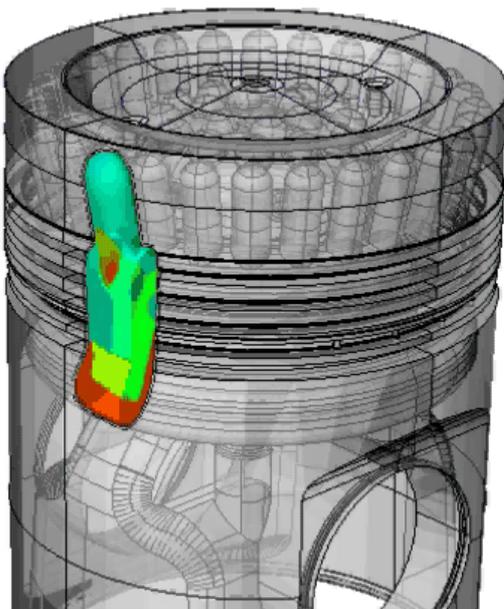


Abbildung 19: Gussimulation Kolben

Als besonders schwierig gestaltet sich die Modellierung der vielfältigen Prozessabläufe bei der Erfüllung der Funktion des Pleuellagers unter Berücksichtigung der Erfüllung aller qualitätsrelevanten Eigenschaftsprofile. Die Erarbeitung dieser qualitätsrelevanten Eigenschaftsprofile war ein wesentlicher Arbeitsschwerpunkt in diesem Teilprojekt. Die erarbeiteten Ergebnisse fanden einerseits direkten Eingang in das Teilprojekt der WTZ gGmbH bzw. in die FuE-Fremdleistung der MET GmbH, andererseits wurden die erstellten neuen Simulationsmodelle in diesem Teilprojekt am Beispiel getestet und evaluiert.

Einen besonderen Neuheitsgrad im virtuellen Pleuellagermodell hat das Teilmodell "Shakerkühlung". Der zu beschreibende komplizierte physikalische Vorgang besteht darin, einen möglichst hohen Wärmeübergangskoeffizienten im Kühlraum des Pleuellageroberteils durch eine intensive Planschbewegung des Pleuellageröls in den teilweise gefüllten Pleuellagerölräumen zu realisieren. Durch die hydrodynamischen Bewegungen der Pleuellagerölmasse Abbildung 20, verursacht durch die Kinematik der Pleuellagerbewegung, wird ein Öl-Gas-Gemisch zeitweise beschleunigt, trifft dann nach einer Flugphase auf die Pleuellagerflächen des Pleuellageroberteils mit hoher Geschwindigkeit auf. Bei diesem Auftreffen

und den nachfolgenden Gleitvorgängen in der Grenzschicht der Kühlräume werden örtlich sehr hohe Wärmeübergangszahlen erreicht.



**Intensive  
Wärmeübertragung**

**Große Kolben-  
beschleunigungen**

Abbildung 20: Betrachtungsgegenstand des CFD-Modells

Für das von der MET GmbH im Auftrag der WTZ gGmbH erarbeitete CFD-Modell (Computational fluid dynamics-Modell) wurden in diesem Teilprojekt wichtige konstruktive Parameter erstellt und das erstellte Modell am praktischen Beispiel evaluiert.

Neuartig und von besonderem Wert ist die Kopplung des strömungsmechanischen Modells der 2-Phasen-Bewegung mit dem strukturmechanischen FEM-Modell über die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten. In der Abbildung 21 werden Zeitausschnitte des berechneten Planschvorganges dargestellt.

Für die strukturmechanischen Simulationstools wurde für die Kolbensekundärbewegung Zuarbeit bezüglich der Konstruktionsparameter moderner Kolbenunterteileausführungen geleistet. Insgesamt steht mit den FuE-Ergebnissen ein leistungsfähiges virtuelles Modell als Entwicklungstool zur Verfügung, welches an ersten Testkolben erfolgreich evaluiert werden konnte, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

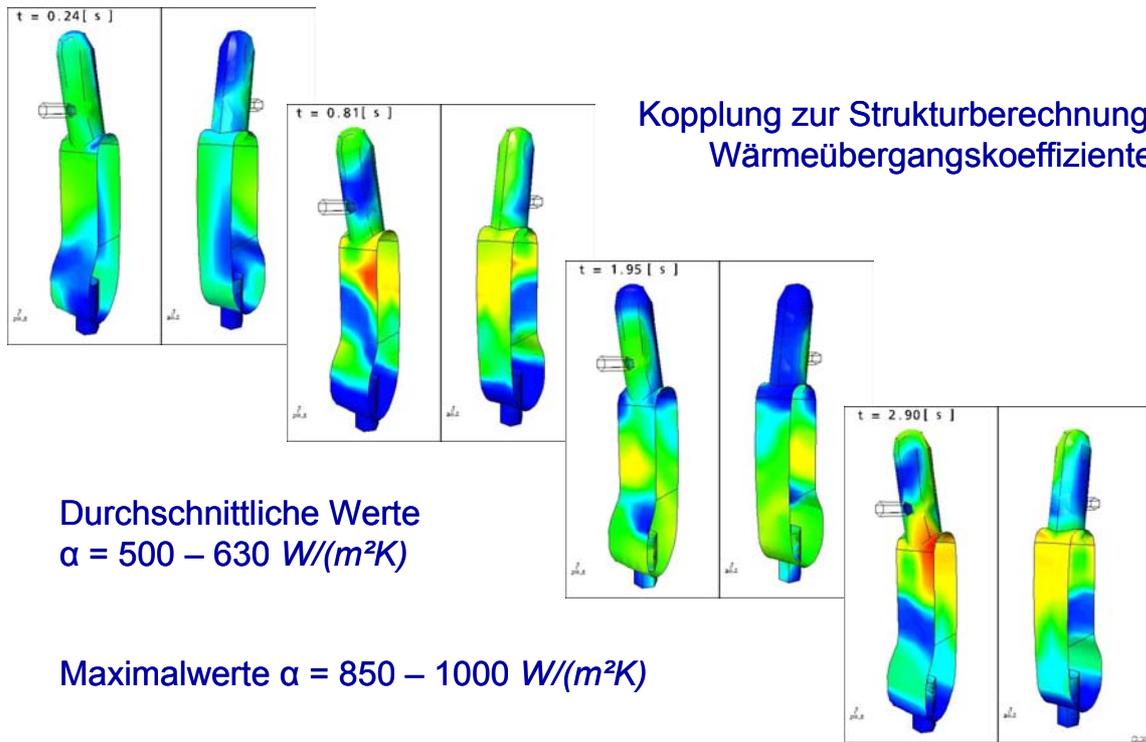


Abbildung 21: CFD-Modell für Planschkühlung, zeitlich veränderte Wärmeübergangsbedingungen

## 1.5 Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methoden, Modelle und virtuellen Simulationswerkzeuge

Die Verifizierung und Validierung der erarbeiteten Methoden, Modelle und virtuellen Simulationstools erfolgte in unterschiedlichen Arbeitsebenen. Die numerischen Tests, die Überprüfung des Konvergenzverhaltens der Solver sowie der Test der verschiedenen Schnittstellen erfolgte im Teilprojekt der WTZ gGmbH und dort vornehmlich beim FuE-Fremdleister MET GmbH. Schwerpunkt der Verifizierung und Validierung in diesem Teilprojekt war die Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse mit den entsprechenden Werten der Konstruktionsdatenbank, die eine große Anzahl von ausgewerteten Messergebnissen enthält. Die durchgeführten Vergleiche führten zu realitätsnahen Ergebnissen der Simulation. Für den Vergleich wurden Temperaturfelder (Abbildung 22) und Ergebnisse von Beanspruchungsberechnungen (Abbildung 23) herangezogen. Zur Evaluierung der Simulationstools für die Berechnung der Shakerkühlung wurde ein Messkolben vorbereitet und vergleichende Temperaturmessungen (Abbildung 24) auf dem Motorenprüfstand der WTZ gGmbH im Kühlraum des Kolbens durchgeführt. Diese experimentellen Überprüfungen hatten eine besondere Bedeutung, da die Simulation der Planschkühlung einen absoluten Neuheitswert hat. Das Ergebnis der Temperaturmessungen (Abbildung 25) stimmen gut mit den Simulationsergebnissen über ein.

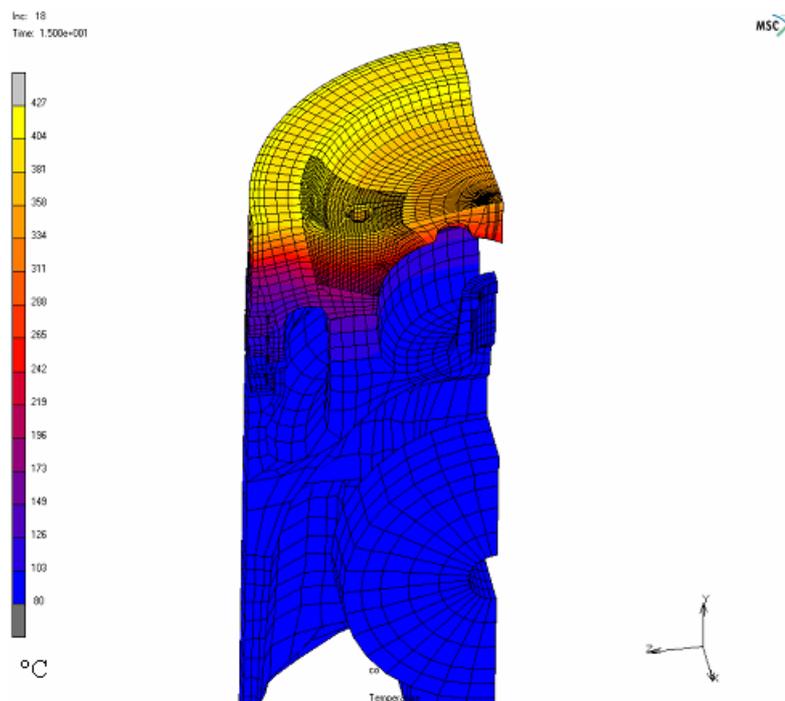


Abbildung 22: Ergebnisse Temperaturfeld des Kolbens



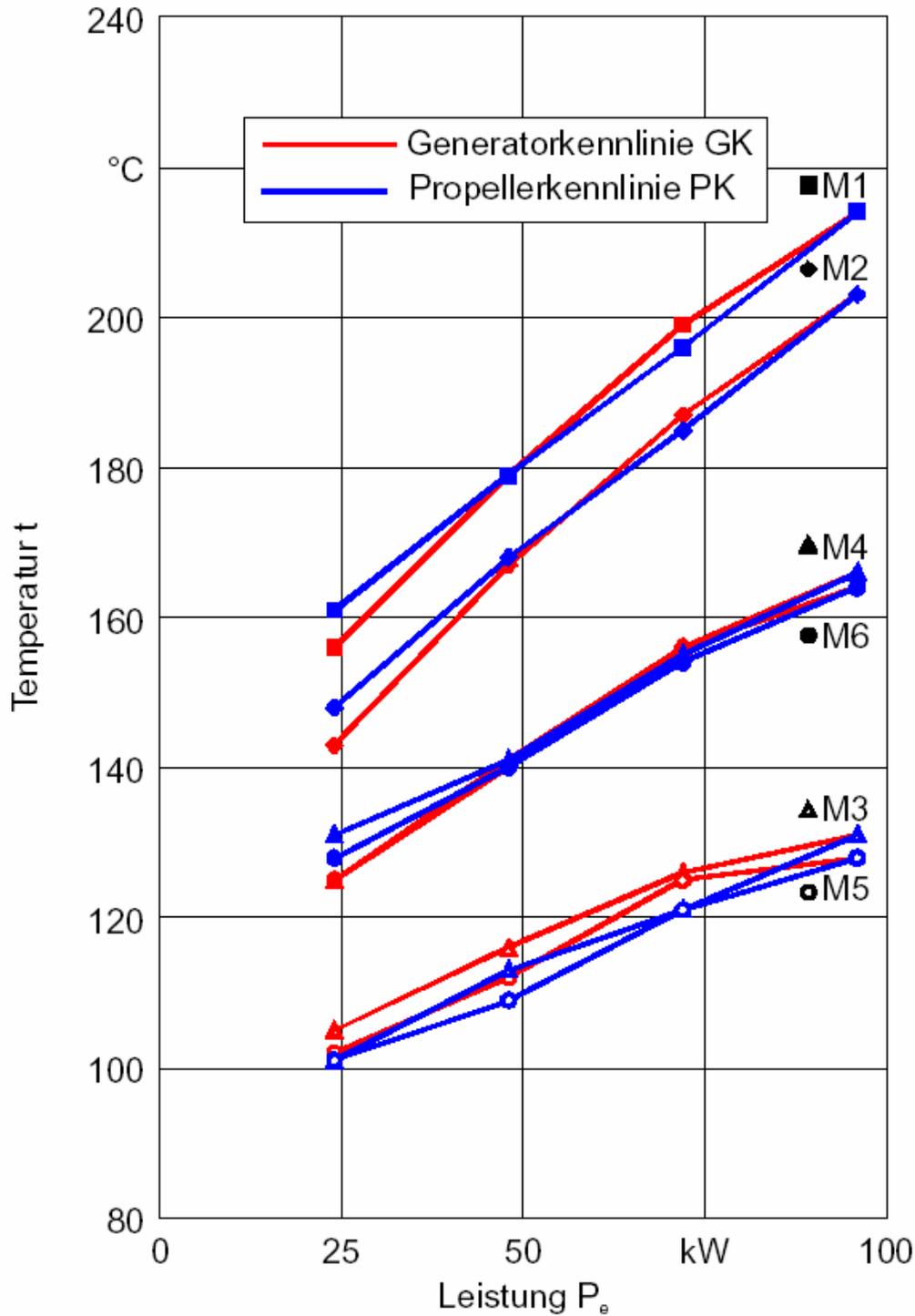


Abbildung 25: Temperaturverläufe bei der Propeller- und Generatorkennlinie

---

## 2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit

Die wissenschaftlich-technische Zielstellung virtuelle Modelle für moderne Großkolben als Entwicklungswerkzeug zu erstellen, konnte Dank der engen Zusammenarbeit der Partner im Verbundprojekt SIPROKO erreicht werden. Der Austausch von Kompetenzen zwischen den wissenschaftlichen und industriellen Verbundpartner bildete eine wichtige Grundlage für die erfolgreiche Bearbeitung der Teilprojekte. Die in diesem Teilprojekt erarbeiteten Eigenschaften und Eigenschaftsprofile für Hochleistungskolben zukünftiger Großmotorengenerationen sowie die erstellten Konstruktionsbeispiele für mehrteilig geschweißte Kolben gingen in die Teilprojekte der SLV Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH und der WTZ Wissenschaftlich-Technisches Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung Roßlau gGmbH direkt oder indirekt ein.

Einen weiteren Schwerpunkt dieses Teilprojektes bildete die Erarbeitung der Anforderungen an die Eigenschaften der Werkstoffe und Zielstellungen für die technologischen Hauptprozessabschnitte sowie die Vorbereitung und Bereitstellung der Versuchsbauteile für die Verbundpartner.

Durch eine zielstrebige Koordinierung der Aktivitäten zwischen den Teilprojekten wurde die Zielstellung des Teilvorhabens erreicht. Ein virtuelles Modell als Entwicklungstool liegt vor und kann schrittweise für die Entwicklung neuer Kolben eingesetzt werden.

Eine deutliche Reduzierung der Entwicklungszeiten, eine Senkung der Entwicklungskosten und eine enorme Verringerung des Entwicklungsrisikos bei neuen Erzeugnissen zählen zu den wirtschaftlichen Effekten der erreichten Forschungsergebnisse. Die in diesem Projekt realisierte neue Entwicklungsmethodik auf der Grundlage virtueller Modelle, kann auf andere Erzeugnisse übertragen und damit in größerer Breite in der Region genutzt werden, wobei im Mittelpunkt zukünftiger Verwertungen der erzielten Projektergebnisse die fertigungstechnische Umsetzung mit dem Ziel der praktischen Einführung der neuen Kolbenentwicklung in die Serienproduktion steht.

Ein weiterer Verwertungsschwerpunkt ist die Übertragung der Projektergebnisse auf wichtige Zulieferer der SECO GmbH, d. h. auf Gießereien und Schmieden, die die Qualität der Zulieferteile deutlich erhöhen und damit den Fertigungsablauf der Kolbenproduktion sicher gestalten können.

Bei Praxisanwendern wie Reedereien und Schiffseignern, Kraftwerks- bzw. Motorenbetreibern stießen die Ergebnisse des Teilprojektes ebenfalls auf positive Resonanz, da das Preis-Leistungs-Verhältnis zukünftiger Produktentwicklungen basierend auf der neuen Kolbenentwicklungsmethodik verbessert und die Einführung neuer Produkte beschleunigt werden kann.

Die im Vorhaben praktizierte enge wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit zwischen der Industrie und den wissenschaftlich-technischen Einrichtungen beeinflusst das Innovationsniveau der Region positiv und trägt zur Stärkung und Stabilisierung des Entwicklungs- und Forschungs-

---

tenzials in der Region bei. Die Zukunftsfähigkeit der MAHREG-Region im modernen Maschinenbau konnte mit dem Projekt SIPROKO nachhaltig unterstützt werden.

Mit den konkreten Ergebnissen des bearbeiteten Vorhabens werden hochwertige Arbeitsplätze in der SECO GmbH und bei den wissenschaftlich-technischen Dienstleistern gesichert. Durch den zukünftigen Einsatz der virtuellen Modelle in der Produktentwicklung werden die Marktpositionen und die Wettbewerbsfähigkeit der SECO GmbH deutlich verbessert, der Umsatz erhöht und damit Voraussetzungen für die Einstellung neuer Arbeitskräfte in der Region geschaffen.

### **3 Bekannt gewordener Fortschritt während der Durchführung des Vorhabens**

Zur Aufgabenstellung des Teilprojektes sind im Projektzeitraum keine konkreten ähnlichen Wettbewerbsbestrebungen bekannt geworden. Schutzrechtsanmeldungen wurden im Ergebnis des Projektes nicht vorgenommen. Gleichfalls wurden auch keine Schutzrechte oder daraus abgeleitete Lizenzen Anderer in Anspruch genommen.

Über den gesamten Projektzeitraum wurde eine enge Zusammenarbeit mit den verbundenen wissenschaftlich-technischen Einrichtungen und potenziellen Kunden gepflegt, um ihre Forderungen und Randbedingungen bei der Entwicklung der simulationsgestützten Lösungen direkt zu berücksichtigen.

Es wurde ein virtuelles Modell als Entwicklungstool für Hochleistungskolben unter Einsatz modernster Simulationstechniken entwickelt, welches individuelle Lösungen qualitätsrelevanter Eigenschaftsprofile für die zukünftige Hochleistungskolbenherstellung ermöglicht. Mit der Erarbeitung von werkstofftechnischen Grundlagen und grundlegenden fertigungstechnischen Lösungsstrategien wurde die Leistungsfähigkeit und die Kompetenz des Fertigungsunternehmens SECO GmbH sowie der anderen Verbundpartner und Unterauftragnehmer in Forschung und Entwicklung von neuartigen Motorenbauteilen für zukünftigen Großmotorengenerationen erhöht.

### **4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Entwicklung, Verifizierung und Validierung von Methoden, Modellen und virtuellen Simulationswerkzeugen für qualitätsrelevante Eigenschaftsprofile von Hochleistungskolben“ wurden bereits auf unterschiedliche Art und Weise öffentlich zugänglich gemacht. So wurden durch die Projektmitarbeiter im Rahmen von Veranstaltungen von MAHREG mehrere Vorträge gehalten. In den Projektseminaren 03.11.2005 in Barleben und am 19.04.2006

---

in Rostock wurde der zum jeweiligen Zeitpunkt erreichte Stand der Bearbeitung des Teilprojektes durch Projektmitarbeiter der SECO GmbH dargestellt.

In folgenden MAHREG-Publikationen erfolgten Veröffentlichungen zum Verbundvorhaben SIPROKO eingeschlossen Teilergebnisse des vorliegenden Teilprojektes:

- Tagungsband MAHREG-Innovationsforum 2005, Magdeburg
- Tagungsband MAHREG-Statusseminar 2005, Barleben
- „MAHREG Nachrichten“, Magdeburg, 3. Quartal 2006, 21. Ausgabe.

Gemeinsam mit den Verbundpartnern SLV Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, WTZ Wissenschaftlich-Technisches Zentrum für Motoren- und Maschinenforschung Roßlau gGmbH und Methodisch-Diagnostisches Zentrum Werkstoffprüfung e.V. sind Veröffentlichungen zum Verbundprojekt SIPROKO in Fachzeitschriften vorgesehen, wie die Motortechnische Zeitschrift (MTZ), die Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), die Zeitschriften Maschinenbau und Konstruktion.

Weitere Veröffentlichungen erfolgten u. a. als Firmen- und Messepräsentationen beispielsweise auf den Messen SMM Hamburg 2006 und Shanghai-Messe 2006 und werden auf der Messe NOR-SHIPPING 2007 in Oslo präsentiert.

Des Weiteren wurden bisher Projektergebnisse in bestimmtem Umfang interessierten Firmen und potenziellen Kunden, wie zum Beispiel Motorenentwickler und –herstellern, Reedereien und Schiffseignern, Kraftwerks- bzw. Motorenbetreibern im Rahmen von Firmenpräsentationen oder anderen geeigneten Formen zugänglich gemacht. Insofern wurde schon im Verlaufe der Themenbearbeitung eine umfangreiche und weitgehend umfassende öffentliche Information und Präsentation gewährleistet. Für die weitere Verwertung der Ergebnisse ist es von großer Bedeutung, potenziellen interessierten Nutzern und Auftraggebern die Wirksamkeit der modernen virtuellen Entwicklungswerkzeuge zu demonstrieren.

Bei der beabsichtigten Publikation sowie Anwendung und Umsetzung der Projektergebnisse wird auch zukünftig eine enge Zusammenarbeit mit den wissenschaftlich-technischen Einrichtungen sowie mit den technischen Hochschuleinrichtungen in Sachsen-Anhalt und den angrenzenden Wirtschaftsräumen, die speziell auf dem Gebiet des Großmotoren- und Schwermaschinenbaus tätig sind, angestrebt, so dass insbesondere die Fortsetzung der langen und erfolgreichen Tradition des Standortes auf maschinenbaulichem Wirtschaftsgebiet möglich und ausbaufähig ist. Da insbesondere die Verbundpartner als wissenschaftliche Einrichtungen tätig sind, bieten sich zahlreiche Anknüpfungspunkte, die Ergebnisse auf weitere Technikfelder anzuwenden. Entsprechende wissenschaftliche Berichte wurden erstellt. Die Verbundpartner werden in den Medien des Innovationsnetzwerkes publizieren.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Lipp, S.; Schmidt, R.: The New FERROCOMP<sup>®</sup>-Piston for High Cylinder Output. In: German CIMAC Committee: 23<sup>rd</sup> CIMAC World Congress on Combustion Engine Technology (Hamburg 2001). Hamburg: German CIMAC Committee, 2001, S. 527-535
- [2] Wünsche, A.-G.: Mahle Ferrotherm- und Monotherm-Stahlkolben: Eine Entwicklung für Dieselmotoren höchster Beanspruchung. In: VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik: VDI-Fachtagung Zylinderlauffläche, Hochleistungskolben, Pleuel – Innovative Systeme im Vergleich (Stuttgart 2001). Düsseldorf: VDI Verlage, 2001, S. 159-168
- [3] Kortas, J.; Geißler, C.; Schmidt, R.: Geschmiedete Stahlkolben für moderne Hochleistungs-Großmotoren, eingesetzt in 4 Takt Diesel- und Schwerölmotoren mit Zylinderdurchmessern von 130 – 500 mm. In: Aachener Kolloquium: Fahrzeug und Motorentechnik (Aachen, 2004). Aachen: 2004, S. 397-406
- [4] Ottliczly, E.; Gniesmer, V.; Luz, G.: Stahlkolben mit Kühlkanal. Deutsches Patent, 2003, Patentschrift – DE 102 09 168 B4
- [5] Kolb, A.; Netz, M.: Kolben bestehend aus zusammenschweißten Ober- und Unterteil. Deutsches Patent, 2004, Offenlegungsschrift – DE 101 32 446 A1
- [6] Geissler, C.: Unterteil für einen gebauten Kolben. Deutsches Patent, 2002, Offenlegungsschrift – DE 101 06 578 A1
- [7] Netz, M.; Kolb, A.: Kolben mit geschmiedeten und eingeschweißten Bolzenaugen. Deutsches Patent, 2002, Offenlegungsschrift – DE 100 64 367 A1
- [8] Fuchs, R.: Gebauter Kolben oder aus miteinander verschweißten bzw. verlöteten Bauteilen bestehender Kolben. Deutsches Patent, 2000, Offenlegungsschrift – DE 199 02 144 A1
- [9] Radaj, D.: Fachbuchreihe Schweißtechnik. Bd. 82: Gestaltung und Berechnung von Schweißkonstruktionen: Ermüdungsfestigkeit. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, 1985
- [10] Matthes, K.-J.; Richter, E. (Hrsg.): Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. 2. Aufl. Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2003
- [11] Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V. (Hrsg.): Merkblatt DVS 3203. Teil 4: Qualitätssicherung von CO<sub>2</sub>-Laserstrahl-Schweißarbeiten: Nahtvorbereitung und konstruktive Hinweise. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS) GmbH, 1988

- 
- [12] ARTIS Gesellschaft für angewandte Messtechnik mbH: CTM sichert Schwerstzerspannung. – URL: [http://www.artis.de/DOWNLOAD\\_CENTER/G/NEWS/Artis\\_News\\_03\\_D\\_web.pdf](http://www.artis.de/DOWNLOAD_CENTER/G/NEWS/Artis_News_03_D_web.pdf)
- [13] Moebus, H.: Gegenwärtige und künftige Gestaltung von Kolben für große Viertakt-Dieselmotoren. In: Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 50 (1989), Nr. 5, S. 237-240
- [14] Röhrle, M.D.; Jakobi, D.: Gebaute Kolben für Schwerölbetrieb. In: Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 51 (1990), Nr.9, S. 431-437
- [15] Bach, E.; Berger, R.: Konstruktive Grundvarianten von mehrteilig geschweißten Komponenten für Großkolben, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), FB Maschinenbau/Verfahrenstechnik, Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, 2006

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufplan des Verbundprojektes .....	6
Abbildung 2: Randbedingungen des Kolbens .....	8
Abbildung 3: Simulationsgeführte Entwicklungskonzepte für höchstbeanspruchte Kolben .....	10
Abbildung 4: Einflussgrößen am Kolben .....	11
Abbildung 5: Verschweißen von Schaftverlängerung und Unterteilrohling .....	13
Abbildung 6: Bearbeiten der Schweißnaht .....	13
Abbildung 7: Schnittdarstellung durch Bolzenebene des geschweißten Unterteilrohlings .....	14
Abbildung 8: Schweißnahtvorbereitung am Unterteilrohling .....	15
Abbildung 9: Formgebung und Herstellung der Bolzenaugen .....	15
Abbildung 10: Schweißnahtbearbeitung auf der Innen- und Außenseite des Schaftes .....	16
Abbildung 11: Schnittdarstellung durch Bolzenebene des geschweißten Kolbens .....	17
Abbildung 12: Vermeidung der Überlagerung von Betriebsbeanspruchung und Schweißspannungen bei mehrteilig geschweißten Kolben .....	18
Abbildung 13: Kolbenoberteil .....	19
Abbildung 14: Eigenspannungsmessstellen am Kolbenoberteil .....	19
Abbildung 15: Kolbenunterteil .....	20
Abbildung 16: Eigenspannungsmessstellen am Kolbenunterteil .....	20
Abbildung 17: Ausgewählte Messergebnisse an Kolbenober- und Kolbenunterteilen aus AFP-Stahl und Vergütungsstahl .....	21
Abbildung 18: Simulationsgestütztes Kolbenentwicklungskonzept .....	23
Abbildung 19: Gussimulation Kolben .....	24
Abbildung 20: Betrachtungsgegenstand des CFD-Modells .....	25
Abbildung 21: CFD-Modell für Planschkühlung, zeitlich veränderte Wärmeübergangsbedingungen .....	26
Abbildung 22: Ergebnisse Temperaturfeld des Kolbens .....	27
Abbildung 23: Beanspruchungsverhältnisse am Kolbenunterteil .....	28
Abbildung 24: Temperaturmessstellen am Kolbenoberteil .....	28
Abbildung 25: Temperaturverläufe bei der Propeller- und Generator Kennlinie .....	29

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Aktivitätenplan .....	5
-----------	-----------------------	---