
Einsatzgrenzen von Kühlmittel- zusätzen in Verbrennungskraft- maschinen mit modernem Thermomanagement

Grenztemperatur II

Thomas Duchardt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

1 Problemstellung

Konzepte zur Reduzierung von Verbrauch und CO₂-Emissionen von Verbrennungsmotoren, wie das intelligente Thermomanagement, erfordern eine bedarfsgerechte Regelung der mittleren Kühlmitteltemperatur, die beispielsweise durch eine Drehzahlvariation der Wasserpumpe herbeigeführt werden kann. Beim Starten des Motors wird das Kühlmittel im Kühlsystem zunächst nicht umgepumpt, um den Motor schneller auf Betriebstemperatur zu bringen. Dies hat jedoch zur Folge, dass das Kühlmittel lokal, an heißen Oberflächen im Motor, zu Sieden beginnen kann, bevor die mittlere Solltemperatur erreicht ist. Gleiche Situationen ergeben sich im Teillastbetrieb mit vermindertem Kühlmitteldurchfluss, sowie beim Abstellen des Motors ohne Nachlauf der Wasserpumpe. Wird also die Strömungsgeschwindigkeit des Kühlmittels bis hin zum Stillstand geregelt, kann die Sättigungstemperatur des Kühlmittels insgesamt überschritten werden und das Kühlmittel verdampft. Dadurch besteht die Gefahr eines Überhitzens der Werkstoffe sowie der thermischen Zersetzung des Kühlmittels. Diese Tatsache und die damit verbundenen Auswirkungen hinsichtlich des Korrosionsverhaltens müssen bei der Abschaltung bzw. Drosselung der Wasserpumpe oder beispielsweise auch bei modernen Start-Stopp-Systemen zwingend berücksichtigt werden.

Jedoch ist die Frage, welche Auswirkungen die hohe thermische Beanspruchung und insbesondere lokale stationäre bzw. instationäre Siedeprozesse in Verbindung mit kompletter Verdampfung des Kühlmittels auf das Korrosionsverhalten, die Wirkungsweise der Schutzschichtbildung und die Langzeitstabilität von Korrosionsinhibitoren haben, aktuell nur unzureichend beantwortet. Gleichfalls unerforscht ist die Fragestellung, inwieweit wechselnde Strömungsbedingungen in Ruhephasen bzw. zyklischen Betriebsphasen die Mechanismen der Korrosion bzw. Schutzschichtbildung beeinflussen und somit in Wechselwirkung mit dem Korrosionsfortschritt treten und welche (elektro-) chemischen Vorgänge ablaufen und die jeweils dominierende Rolle spielen.

2 Ziele

Das vorliegende Projekt „Grenztemperatur II“ hat zum Ziel, das Korrosionsverhalten metallischer Werkstoffe und die Inhibition durch das Kühlmittel bei zyklisch wechselnden thermischen und strömungsmechanischen Bedingungen mit Auftreten von unterkühltem Strömungssieden und Verdampfung zu untersuchen, um mögliche Optimierungspotenziale aufdecken zu können.

Dies soll mittels der im vorangegangenen Projekt (Grenztemperatur) entwickelten Versuchseinrichtung der sog. Grenztemperaturanlage erfolgen. Eine Charakterisierung der Korrosionsprozesse bzw. des Korrosionsschutzes soll ferner in situ anhand elektrochemischer Messmethoden an der beheizten Probe erfolgen. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen über den Einfluss bestehender und zukünftig angedachter Optimierungsmaßnahmen auf Werkstoffe und Kühlmittel im Kühlsystem, können Motorenhersteller, Zulieferer und Kühlmittelhersteller ihre Entwicklungen entsprechend zielgeführt vorantreiben bzw. anpassen.

Die angestrebten Forschungsziele sind in folgende Arbeitspakete untergliedert:

- Analyse praxisrelevanter Versuchsparameter und Definition kritischer Beanspruchungsparameter
- Modifikation der Versuchsanlage und Generierung eines Verdampfungszyklus
- Versuchsdurchführung mit begleitenden elektrochemischen Untersuchungen
- Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich auftretender Korrosion und Reaktionsschichtbildung sowie Bewertung anhand elektrochemischer Kenngrößen
- Abschätzung des Korrosionsverhaltens sowie der Reaktionsschichtbildung
- Validierung eines Labor-Versuchszyklus
- Dokumentation, Zwischen-/Abschlussberichte sowie Veröffentlichungen

3 Vorgehensweise

- Zunächst soll unter den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses eine Umfrage zwecks Definition praxisrelevanter Versuchsparameter durchgeführt werden. Ziel ist es Feldparameter wie Strömungsgeschwindigkeiten von Kühlmitteln, Wärmestromdichten in das Kühlmittel oder auch die vorherrschenden Kühlmitteltemperaturen zu ermitteln.
- Im Zuge der Modifikation sollen zunächst Vorversuche zur grundsätzlichen Realisierbarkeit von lokalen Siedevorgängen mit vollständiger Kühlmittelverdampfung in der Grenztemperaturanlage (GTA) durchgeführt werden. Diese sind generell möglich, jedoch führte die Kühlmittelverdampfung zu einer Raumforderung in der Anlage. Diese wurde durch Installation eines vergrößerten Ausgleichsbehälters ermöglicht.
- Um dem Projektantrag entsprechend Siedevorgänge bei wechselnden thermischen und strömungsmechanischen Bedingungen durchführen zu können, muss die Steuerung der GTA umprogrammiert und neue Regelungsparameter hinterlegt werden. Diese ermöglichen die Realisierung einer Folge von komplexen Siedevorgängen mit variablen Versuchsparametern.
- Weitere Modifikationen der Versuchseinrichtung müssen im Bereich der Probenkammer erfolgen Abbildung 2. Diese soll hinsichtlich der Durchführbarkeit elektrochemischer Messungen während des laufenden Versuchs (in situ) um einen Elektrodenhalter für die Referenz- und die Gegenelektrode erweitert werden. Ferner soll zur Durchführung elektrochemischer Messungen, die Werkstoffprobe elektrisch gegen den Heizblock sowie die Probenkammer isoliert werden, ohne den Wärmedurchgang maßgeblich zu beeinflussen. Hierzu wurde eigens ein entsprechendes Laminat entwickelt.
- Die Erarbeitung eines neuen Versuchszyklus soll an die maschinellen und regelungstechnischen Möglichkeiten der GTA gekoppelt werden. Der bereits bestehende Versuchszyklus wurde daher um eine 12-stündige Verdampfungsphase erweitert, Abbildung 1. In dieser wird der Kühlmittelstrom, entsprechend der vorgegebenen Zeiten, gestoppt und die Heizung ausgeschaltet. Die in Heizblock und Probe gespeicherte Restenergie wird zur Kühlmittelverdampfung in der Probenkammer genutzt. Eine Taktung von 5-sekündiger Kühlmittelverdampfung alle 2,5 Minuten wurde in Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss gewählt.

- Die nachfolgenden Untersuchungen zum Einfluss der Kühlmittelverdampfung sollen an Werkstoffproben aus der Aluminiumlegierung EN AC-ALSi10Mg unter zuvor definierten Versuchsparametern durchgeführt werden. Die zu untersuchenden Kühlmittelzusätze wurden seitens des projektbegleitenden Ausschusses ausgewählt. Es handelt sich dabei um ein Silikat-haltiges Produkt (KMA_Si), ein Produkt basierend auf organischen Säuren (KMB_OAT), sowie ein Hybrid-Produkt, welches eine Mischung aus beiden Technologien darstellt (KMC_Si-OAT).
- Die Bewertung der ausgebildeten Reaktionsschichten sowie des Korrosions- und Inhibitionsverhaltens der Werkstoffproben sollen mittels 3D-Mikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie und energiedispersiver Röntgenspektroskopie durchgeführt werden. Zusätzlich soll vor und nach Versuch eine Wägung der Werkstoffproben durchgeführt werden um eine versuchsbedingte Massenänderung zu detektieren.

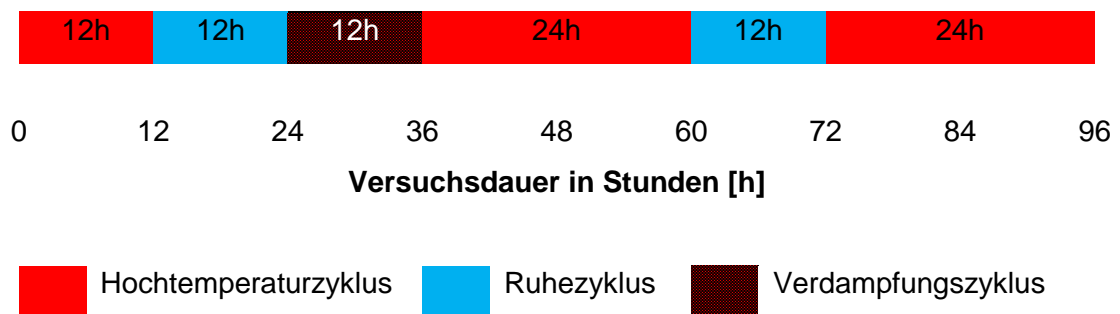


Abbildung 1: Modifizierter Prüfzyklus

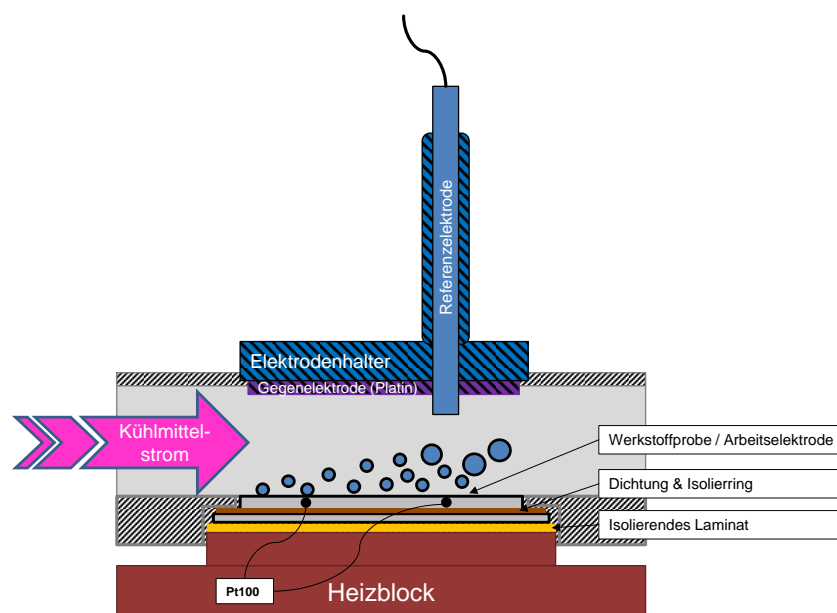


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der modifizierten Probenkammer

4 Ergebnisse

4.1 Genereller Einfluss der Verdampfungsphase

Um sicherzustellen, dass der modifizierte Prüfzyklus mit Verdampfungszyklus einen erkennbaren Einfluss auf die Versuchsergebnisse abbildet, wurde zunächst je Kühlmittel ein Versuch durchgeführt und mit den Ergebnissen des vorangegangenen Projektes verglichen. Der Vergleich erfolgte anhand der versuchsbedingten Massenänderung, Abbildung 3.

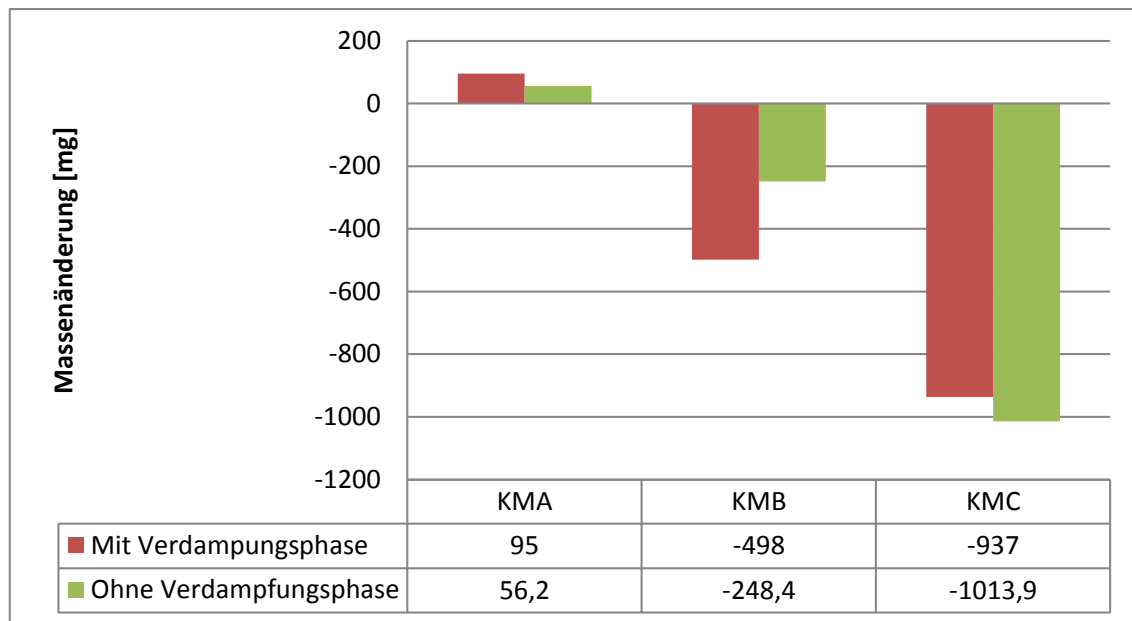


Abbildung 3: Vergleichsversuche, AlSi6Cu4, 115 °C Vorlauftemperatur, 2,5 bar Druck, 2944 W

Im Versuch mit KMA_Si verdoppelte sich mit dem Verdampfungszyklus die Massenzunahme und im Versuch mit KMB_OAT der Massenverlust. Die bereits erhebliche Schädigung im Versuch mit KMC_Si-OAT war mit Verdampfungszyklus unwesentlich geringer. Der Verdampfungszyklus beeinflusst die Versuchsergebnisse somit entscheidend.

4.2 Zusammenfassung der weiteren Versuchsergebnisse

Mittels der durchgeführten Versuche konnte der zeitliche Verlauf der Probenschädigung in Versuchen mit KMB_OAT und KMC_Si-OAT sowie der zeitliche Ablauf der Deckschichtbildung in Versuchen mit KMA_Si nachvollzogen werden. Dieser lässt sich entsprechend der einzelnen Zyklen des gewählten Prüfzyklus wie folgt einordnen:

Hochtemperaturzyklus 1:

Die Ergebnisse zeigen auf, dass es während des ersten 12-stündigen Hochtemperaturzyklus zur primären Ausbildung von Deck- und Reaktionsschichten auf der Probenoberfläche kommt.

Auch treten erste korrosive Schädigungen auf, die jedoch, bezogen auf die Gesamtschädigung nach Versuchsende von eher untergeordneter Bedeutung sind, Abbildung 4.

Ruhezyklus 1:

Während des Ruhezyklus wachsen im Falle der Versuche mit KMB_OAT und KMC_Si-OAT die bereits ausgebildeten Reaktionsschichten weiter an und regenerieren sich teilweise. Der zeitliche Verlauf des Schichtwachstums kann dabei in situ anhand des freien Korrosionspotenzials nachvollzogen werden, Abbildung 5.

Verdampfungszyklus:

Wie die werkstoffanalytischen Untersuchungen aufzeigen, beeinflusst der 12-stündige Verdampfungszyklus den jeweiligen Oberflächenzustand maßgeblich. Im Falle von KMA_Si werden Inhibitorausfällungen begünstigt, welche zu Aufwachsungen auf der Probenoberfläche führen. Diese wiederum können partiell das Temperaturniveau der Probenoberfläche stören und so die Entstehung von Lochkorrosion unter den Aufwachsungen ermöglichen.

Dass Störungen bedingt durch Korrosion in den ausgebildeten Deckschichten auftreten können, kann mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie aufgezeigt werden. Die Probenoberflächen aus Versuchen mit KMB_OAT und KMC_Si-OAT werden während des Verdampfungszyklus flächig korrosiv geschädigt, was in einem deutlichen Massenverlust resultiert, Abbildung 4. Gleichzeitig werden die niedrigsten Impedanzwerte während der Verdampfungsphase gemessen, was auf Schäden an der Reaktionsschicht hinweist.

Hochtemperaturzyklus 2:

Der zweite, nun jedoch 24-stündige Hochtemperaturzyklus, führt zu einer Überlagerung der flächigen Korrosion mit lochfraßartiger Korrosion im Falle der Kühlmittelzusätze B und C. Dies ist maßgeblich auf Schäden an der Reaktionsschicht zurückzuführen, welche aus der Verdampfungsphase resultieren. Hingegen wächst die Alumosilikat- bzw. Silikatschicht in Versuchen mit KMA_Si weiter auf. Auch das unter Versuchen mit KMA_Si ermittelte freie Korrosionspotenzial steigt, was für ein Ausheilen und Aufwachsen der während der Verdampfungsphase geschädigten Deckschicht spricht, Abbildung 5.

Ruhezyklus 2:

Während des zweiten 12-stündigen Ruhezyklus kommt es wiederum zu einem Aufwachsen und Regenerieren der Reaktionsschichten in Versuchen mit KMB_OAT und KMC_Si-OAT. Eine Änderung der ausgebildeten Deckschicht in Versuchen mit KMA_Si konnte nicht beobachtet werden.

Hochtemperaturzyklus 3:

Der finale 24-stündige Hochtemperaturzyklus fördert in Versuchen mit KMB_OAT und KMC_Si-OAT sowohl die laterale Ausbreitung der lochfraßartigen Korrosion, als auch den flächigen Massenabtrag bis Versuchsende und ist maßgeblich an der Probenschädigung beteiligt. Weiterhin wird die Deckschichtbildung in Versuchen mit KMA_Si gefördert.

Verdopplung der Versuchslaufzeit.

Durch Verdopplung der Versuchslaufzeit nahm unter Verwendung von KMB_OAT und KMC_Si-OAT die korrosionsbedingte Probenschädigung zu. Eine Änderung der Art oder Form der Schädigung konnte jedoch nicht beobachtet werden. In Versuchen mit KMA_Si konnte keine Änderung des Oberflächenzustands festgestellt werden. Somit trägt eine Verlängerung der Versuchsdauer nicht zur Erhöhung der Aussagekraft bei.

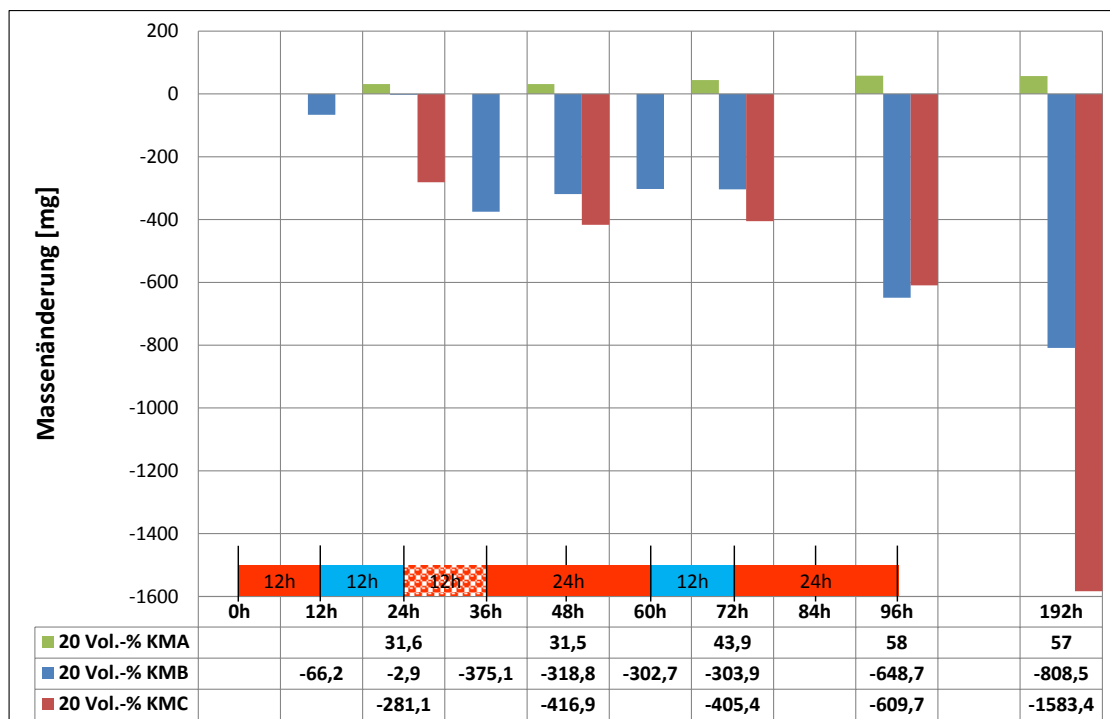


Abbildung 4: Ermittelte Massenänderungen bezogen auf die Versuchslaufzeit

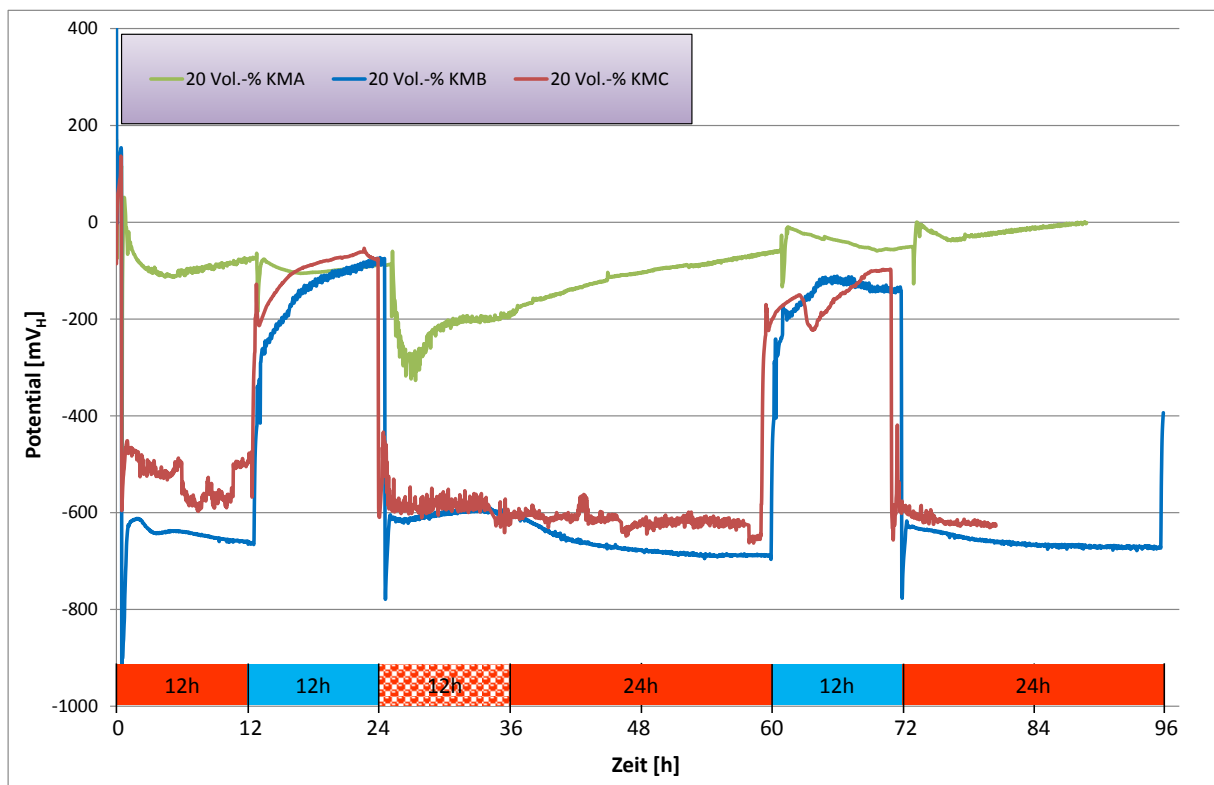


Abbildung 5: Ermittelte freie Korrosionspotentiale bezogen auf die Versuchslaufzeit

5 Praktischer Nutzen/Wirtschaft

Zwar können durch den Einsatz moderner Thermomanagementsysteme sowie Start-Stopp-Automatiken Kraftstoff- und Emissionsverbrauch gesenkt werden, jedoch fehlen derzeit Prüfverfahren im Labormaßstab, um die Auswirkungen der resultierenden erhöhten thermischen Belastungen auf das Kühlsystem nachzustellen. Die Weiterentwicklung der bestehenden Prüfeinrichtung „Grenztemperaturanlage (GTA)“ sowie die Entwicklung eines Prüfzyklus, welcher wechselnde thermische und strömungsmechanische Bedingungen simuliert, schließt diese Lücke.

Die Durchführung elektrochemischer Messungen, welche die Online-Erfassung der Reaktionen zwischen Werkstoffprobe und Kühlmittel ermöglichen, stellt derzeit ein Novum auf diesem Gebiet dar. Die Messungen helfen, das grundlegende Verständnis über ablaufende Korrosions- sowie Inhibitionsmechanismen zu verbessern. Hieraus können Impulse für die Entwicklung neuer Motoren hinsichtlich des Werkstoffverhaltens bzw. für die Entwicklung neuer Inhibitorenpakete von Kühlmitteln entstehen. Auch kann die Entwicklung von Sensoren gefördert werden, welche anhand elektrochemischer Messungen einen Anstieg von Korrosionsreaktionen im Kühlkreislauf detektieren und auf einen nötigen Wechsel der

Kühlflüssigkeit hinweisen.

Durch das verbesserte Verständnis des Korrosionsverhaltens kann ferner der Gestaltungsspielraum in der Auslegung und Konstruktion von Motoren und Kühlsystemen vergrößert werden.

6 Danksagung

Das IGF-Vorhaben (17092 N/1) der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken der FVV für die Möglichkeit zur Durchführung des Vorhabens sowie dem BMWi und der AiF für die finanzielle Förderung. Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter Leitung von Hans Koch, Mahle Behr GmbH & Co. KG, begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt unser Dank für die große Unterstützung.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages