

ZEITGERAFFTE UND KOSTENOPTIMIERTE BETRIEBS- FESTIGKEITSUNTERSUCHUNGEN AN ZYLINDERKÖPFEN AUF EINEM THERMISCHEN ZYLINDERKOPFPRÜFSTAND

F. Achatz, J. Fröschl, S. Rödling, IABG mbH, Ottobrunn
U. Tipkemper, BMW Group, München

Zusammenfassung

Um das thermomechanische Ermüdungsverhalten von Zylinderköpfen zu untersuchen, werden heutzutage meist Thermoschockprüfungen mit befeuerten Motor durchgeführt. Die lange Prüfdauer und die hohen Versuchskosten treiben hier die Suche nach Alternativen stark voran. Im vorliegenden Beitrag wird daher ein Zylinderkopfprüfstand vorgestellt, der in einer Kooperation mit der BMW Group bei IABG betrieben wird und die Nachbildung der thermo-mechanischen Ermüdungseffekte eines Zylinderkopfes im Motorbetrieb im Labor mit zyklischer thermischer Belastung zeitlich stark gerafft und mit deutlich niedrigeren Versuchskosten ermöglicht. Neben einer Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge der thermomechanischen Ermüdung in Zylinderköpfen wird die Realisierung der stark zeitgerafften Versuche auf dem thermischen Zylinderkopfprüfstand bei IABG vorgestellt. Neben der rechnerischen Optimierung der thermischen Randbedingungen wird die Einmessung und iterative Optimierung der Versuchsparameter, die Versuchsdurchführung mit automatisierter Rissinspektion und -verfolgung sowie die Auswertung der Versuchsläufe dargestellt.

Stichwörter: Zylinderkopf, Thermomechanische Ermüdung, Neue Bauteilprüfung

TIME-SCALED AND COST OPTIMIZED FATIGUE TESTS OF CYLINDER HEADS ON A THERMAL CYLINDER HEAD TEST STAND

Abstract

The thermal cylinder head test rig presents an innovative method for assessing and optimizing cylinder heads in relation to their service strength vs. thermo mechanical fatigue at a very early stage in their development process. The test rig makes it possible to reduce the testing times and costs significantly in comparison with standard engine test benches, thus shortening the development time for new cylinder head designs. The test rig's novel, open design also makes it possible to detect crack formation and investigation of crack propagation in the pent roof across thermo shock cycles for the very first time. Inspection procedures do not require the assembly of the entire engine for fueled operation.

Keywords: cylinder head, thermo mechanical fatigue, new component fatigue test method

Einleitung

Die stetig steigenden spezifischen Leistungen moderner Antriebssysteme stellen die Motorenentwickler gerade bei Zylinderköpfen aufgrund der dort auftretenden thermomechanischen Ermüdung vor enorme Herausforderungen. Die IABG entwickelte aus diesem Grund einen thermischen Zylinderkopfprüfstand, welcher eine exakte Abbildung der thermomechanischen Beanspruchung ermöglicht. Ein Vergleich mit Prüfergebnissen aus Motordauerläufen zeigte die Vergleichbarkeit der beiden Prüfverfahren sowie die erzielbaren Zeit- und Kosteneinsparungen aufgrund der Zeitraffung. In Kombination mit einem Kamerasystem zur in-situ Risserkennung ermöglicht dieser thermische Zylinderkopfprüfstand im Gegensatz zum Motordauerlauf eine frühzeitige Schadenserkenkung und automatisierte –verfolgung.

Hauptbeanspruchungen im Zylinderkopf

Eines der wesentlichsten Hauptauslegungskriterien hinsichtlich der betriebsfesten Auslegung von Zylinderköpfen ist die Reduzierung thermomechanischer Ermüdungsvorgänge. Die interessantesten Bereiche stellen dabei Ventilstege, Zündkerzen- bzw. Einspritzdüsendome dar. In diesen Regionen treten gerade bei längeren Vollastfahrten hohe thermische Einträge auf, welche lokal zu starken thermischen Ausdehnungen führen. Die umliegenden, meist kühleren Bauteilbereiche behindern die Dehnung und initiieren damit Druckspannungen, welche je nach Lastzustand zu Plastifizierungen führen können. Je nach Höhe der lokalen Temperaturen und Zeitdauer der thermischen Einträge können gerade bei Leichtmetall-Zylinderköpfen zusätzlich Diffusionsvorgänge auftreten. Diese führen oftmals zu einem über die Betriebszeit stark veränderlichen Werkstoffverhalten.

In den nachfolgenden Lastreduktions- bzw. Motorschubphasen wird der thermische Eintrag durch Reduktion der Einspritzmengen minimiert und meist „kalte“ Luft angesaugt. Dies führt in den vorher unter Druckspannungen und hohen Temperaturen plastifizierten Regionen zu Zugspannungen, wodurch je nach Höhe und Lastzustand wiederum Plastifizierungen im Zugspannungsbereich bei gleichzeitig niedrigen Temperaturen auftreten können. Gerade diese Zugspannungen können zu einer signifikanten lokalen Schädigung im Brennraumdach führen, welche je nach Anzahl und Stärke dieser sogenannten thermomechanischen Beanspruchungszyklen im Zuge der Einsatzdauer Bauteilschäden bzw. Anrisse verursachen können. Ein Teil dieser Anrisse kann dabei das Potential besitzen, bis zum Wassermantel zu wachsen, was einen Bauteilausfall zur Folge hat. Auf Grund der Tatsache, dass Druckspannungen bei hohen Temperaturen und zusätzlich Zugspannungen bei niedrigen Temperaturen auftreten, wird diese Art des thermomechanischen Beanspruchungsvorganges als Out-of-Phase Beanspruchung bezeichnet. (Abb. 1)

Neben den bereits erwähnten Diffusionsvorgängen können bei hohen Temperaturen auch andere, die Festigkeit beeinflussende, Phänomene wie Ausscheidungsvorgänge auftreten. Für eine Beurteilung von Zylinderkopfkonstruktionen hinsichtlich der „Widerstandsfähigkeit“ gegenüber thermomechanischer Beanspruchung ist aus diesem Grund die Kenntnis des sich über die Einsatzdauer veränderlichen Werkstoffverhaltens unumgänglich. Einige Motorenhersteller forschen daher intensiv an Methoden zur Beschreibung dieses stark veränderlichen Festigkeitsverhaltens, vgl. (1)

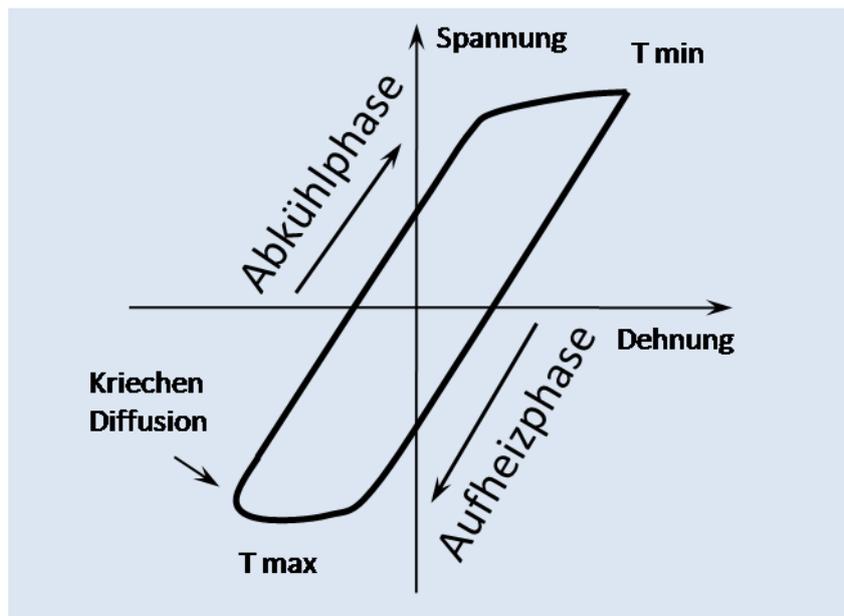


Abbildung 1: Typischer TMF-Zyklus im Zylinderkopf

Berechnungsmethoden für Thermomechanische Ermüdung

Für eine rechnerische Beschreibung thermomechanischer Ermüdungsvorgänge sind sowohl Modelle zur Beschreibung des sich ändernden zyklischen Verformungsverhaltens als auch des eigentlichen Schädigungsvorganges in Folge thermomechanischer Beanspruchung notwendig. In den vergangenen Jahrzehnten sind zahlreiche Modelle entstanden, deren detaillierte Aufzählung und Beschreibung den Rahmen dieses Beitrags erheblich überschreiten würde. Eine grundlegende Einteilung der unterschiedlichen Modelle zur Beschreibung des Wechselverformungsverhaltens kann entsprechend der Fachliteratur (2) vorgenommen werden in:

- Empirische Modelle
- Kontinuumsmechanische Modelle
- Werkstoffphysikalische Modelle
- Vielkomponentenmodelle

Ein oft verwendetes Modell, welches der Gruppe der empirischen Modelle zugeordnet werden kann, ist das Modell nach Ramberg-Osgood (3). Dieses beschreibt die Spannungsamplitude σ_a in Abhängigkeit der plastischen Dehnungsamplitude $\varepsilon_{pl,a}$, dem Verfestigungsexponenten K' und dem Verfestigungsexponenten n' .

Ein bekannter Vertreter der Gruppe der Kontinuumsmechanischen bzw. phänomenologischen Modelle ist das Modell nach Chaboche (4), welches die Berechnung der lokalen Spannungs-Dehnungs Entwicklung in einem Bauteil unter komplexer Beanspruchung auch bei veränderlichen Temperaturen ermöglicht. Die Modellbeschreibung ist dabei durch zahlreiche Parameter und interne Variablen gekennzeichnet, deren Ermittlung und gegenseitige Abstimmung für neue Werkstoffe bzw. Legierungen durchaus zeitintensiv sein kann.

Die exakte Beschreibung des lokalen Spannungs- bzw. Dehnungszustandes ist insofern von enormer Bedeutung für die Qualität einer Lebensdauerberechnung thermomechanisch beanspruchter Bauteile, da die meisten TMF-

Lebensdauermodelle auf diesen Größen aufbauen. Die Einteilung der TMF-Berechnungsmodelle kann dabei in ähnlicher Weise erfolgen in:

- Empirische Modelle
- Schädigungsmechanische Modelle
- Werkstoffphysikalische Modelle
- Bruchmechanische Modelle

Zu den empirischen Modellen zählt unter anderem die Gruppe der Ansätze auf Basis von Wöhlerlinien und Schädigungsparameteren. Dazu zählen unter anderem plastische Dehnungswöhlerlinienansätze, Totaldehnungswöhlerlinienmodelle oder auch der oftmals eingesetzte Schädigungsparameter nach Smith-Watson-Topper (5). Dieser beschreibt die Lebensdauer bei auftretenden Mittelspannungen auf Basis des Produkts der Totaldehnungsamplitude $\varepsilon_{a,t}$ und der Oberspannung σ_o . Den meisten TMF-Lebensdaueransätzen gemein ist dabei die Tatsache, dass sie auf einer linearen Schadensakkumulation basieren. Für eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Ansätze wird auf die weiterführende Literatur (6) verwiesen.

Die Versuchsführung zur Beschreibung der zahlreichen Einflüsse sowohl auf das Wechselverformungs- als auch auf TMF-Lebensdauerverhalten erfordert je nach gewähltem Modellansatz meist eine sehr hohe Anzahl von Probenversuchen. Mit einer umfangreichen Werkstoffdatensammlung aus Probenversuchen und einer vom Werkstoff als auch der Anwendung abhängigen richtigen Wahl des Berechnungsansatzes, liegt heutzutage die Qualität der TMF-Lebensdauerberechnung dabei auf sehr hohem Niveau.

Thermischer Zylinderkopfprüfstand

Um den Auslegungs- und Optimierungsprozess von Zylinderköpfen hinsichtlich thermomechanischer Ermüdung zu beschleunigen und die dabei anfallenden Kosten zu reduzieren realisierten IABG und BMW in einem kooperativen Projekt einen thermomechanischen Zylinderkopfprüfstand. Auf diesem Prüfstand ist es nicht notwendig, den gesamten Motor aufzubauen, lediglich der Prüfling – der Zylinderkopf – wird für die Untersuchung benötigt. Mittels Gasbrennern werden die räumlichen Temperaturverteilungen im Brennraum während eines Thermoschockzyklus denen im Motorbetrieb angepasst. Auch die Kühlmittelströme im Zylinderkopf entsprechen dabei den realen Bedingungen im Gesamtmotor. Die Beanspruchung durch den Gasdruck im Brennraum (HCF) kann durch Simulationen hinreichend gut abgebildet werden und wird daher bei diesem Prüfprinzip nicht berücksichtigt. Der offene Prüfstandsaufbau ermöglicht eine in-situ Risserkennung und –verfolgung ohne Unterbrechung des Dauerlaufs. Die Auslegung der benötigten Schnittstellen sowie das Prüfstandskonzept werden im Folgenden näher erläutert.

Prüfstandskonzept und Infrastruktur

Die Nachbildung der thermomechanischen Belastung des Zylinderkopfes stellt an das Prüfkonzept vor allem folgende Anforderungen: Die real im Motor auftretenden räumlichen Temperaturverteilungen abzubilden, eine exakte Nachbildung der Kühlmittelströme im Zylinderkopf während beider Phasen des Lastzyklus zu gewährleisten sowie eine Kontrolle des Siedeverhaltens im Zylinderkopf zu ermöglichen. Der Zylinderkopfprüfstand erlaubt eine Regelung all dieser Parameter in Abhängigkeit der

geforderten Prüfaufgabe. Ein kompletter Lastzyklus, bestehend aus Aufheiz- und Abkühlphase, wird dabei in etwa in einer Minute absolviert.

Die thermische Belastung des Zylinderkopfes wird während der Aufheizphase des Lastzyklus durch bis zu sechs einzeln regelbaren Propan-Sauerstoff-Druckluft-Brennern erreicht. Diese heizen jeweils ein Brennraumdach gezielt auf, wobei zur Steuerung des Temperaturfeldes die Leistung sowie die geometrische Lage jedes einzelnen Brenners individuell angepasst werden können. Die maximale Leistung der Brenneinheiten beträgt jeweils 75 kW. Das Propan-Sauerstoff-Gemisch wird in einem stöchiometrischen Verhältnis verbrannt um Verbrennungsrückstände auf den Brennraumdächern zu vermeiden.

In der Abkühlphase des Lastzyklus wird die auch im Realmotor bei Schubbetrieb auftretende konvektive Luftkühlung simuliert, indem durch die Brennerdüsen kalte Druckluft auf die Brennraumdächer strömt. In jeder Phase der Prüfung wird der Zylinderkopf den realen Bedingungen im Motorbetrieb entsprechend mit Kühlmittel durchströmt, am Prüfstand stehen hierfür drei Kühlmittelkreisläufe zur Verfügung. Der Kaltwasserkreis wird mit konditioniertem Medium mit einer Temperatur von konstant 26°C betrieben und dient der Abkühlung des Zylinderkopfes nach der Heizphase. Die Kühlmitteldurchflussmenge ist regelbar und beträgt im Maximum 200 l/min. Um den Aufheizvorgang im Zylinderkopf zu unterstützen und zu beschleunigen, steht ein weiterer Kühlwasserkreis mit einem bis 80°C regelbar konditionierbaren Kühlmittel zur Verfügung, die maximale Durchflussmenge beträgt hier 25 l/min.

Die realitätsnahe Abbildung der Temperaturverteilung im Brennraumdach bedingt eine Kontrolle des Kühlwassersiedens im Zylinderkopf. Um dies zu gewährleisten, steht am Zylinderkopfprüfstand ein optionaler fahrzeugnaher Kühlwasserkreis zur Verfügung. Dieser in der Heizphase verwendete Zylinderkopfbypass ermöglicht Volumenströme und Kühlwassertemperaturen wie sie im Motorbetrieb auftreten. So können beispielsweise motorähnliche Kühlmitteltemperaturen ohne lokales Sieden nach kurzer Zeit erreicht werden. Der Druck am Kühlwassereintritt in den Zylinderkopf kann in der Heizphase durch die Steuerung des Volumenstromes und die Drosselung des Rücklaufs bis auf maximal 4 bar eingestellt werden.

Zur Risskontrolle des Prüflings kann dieser am Zylinderkopfprüfstand um 90° um seine Längsachse aus der Prüflage in die Inspektionslage geschwenkt werden. Dies ermöglicht eine komfortable, optische Rissinspektion durch das Bedienpersonal, sowie bei unbemanntem Betrieb eine vollautomatisierte Dokumentation der Brennraumdächer mit einer am Prüfstand verbauten hochauflösenden Kamera. Diese fährt in festgelegten Intervallen die gewünschten Zylinder an und dokumentiert so die Schadensentwicklung an den Brennraumdächern, ohne den Prüfbetrieb zu unterbrechen. In einem Nachbearbeitungsschritt kann anhand der Aufnahmen einem vorhandenen Riss der entsprechende Anrisszeitpunkt zugeordnet sowie der Rissfortschritt dokumentiert werden.

Zur Messdatenerfassung stehen am Prüfstand Anschlüsse für bis zu 88 Thermoelemente, sowie weitere Messtechnik für andere Messgrößen, wie beispielsweise Drücke und Durchflüsse zur Verfügung. Das Prüfstandskonzept ist in Abbildung 2 dargestellt.

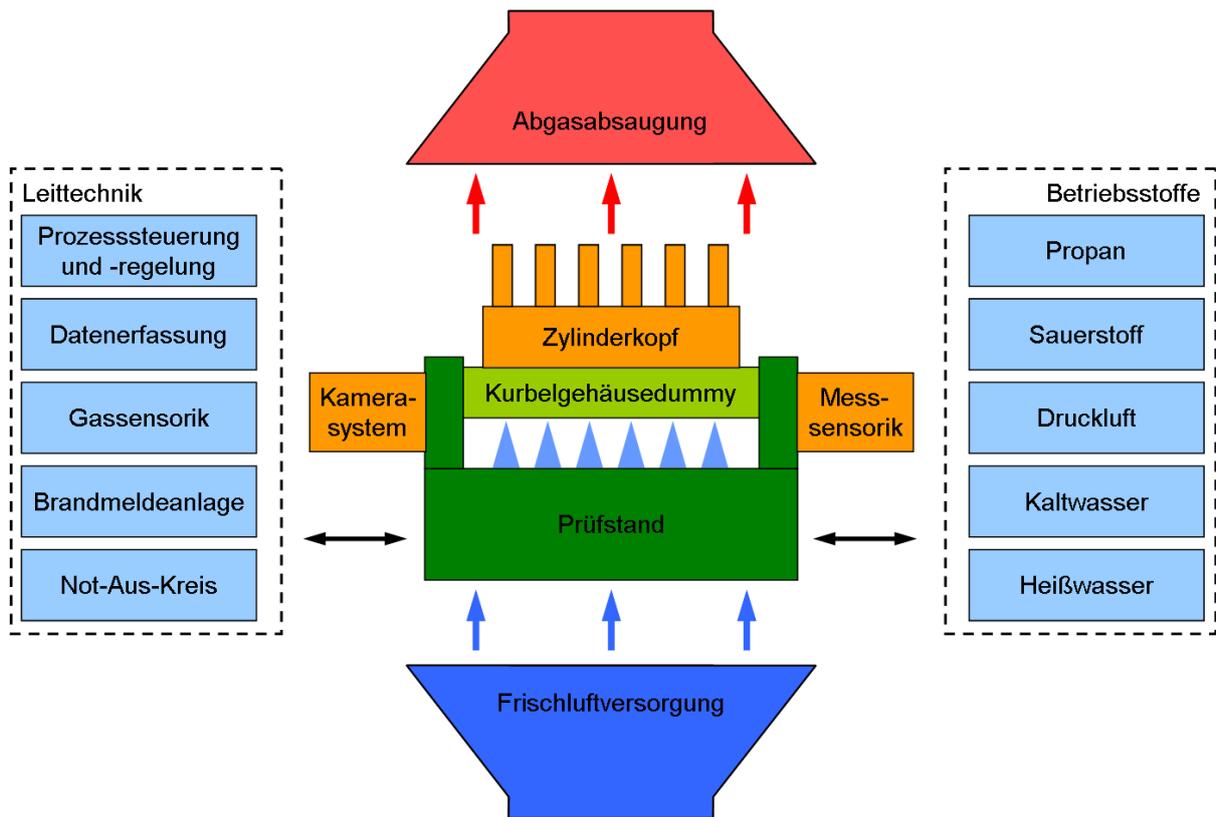


Abbildung 2: ZKP Prüfstandskonzept

Integration des Zylinderkopfes in das Prüfkonzept

Die thermische und mechanische Schnittstelle des Zylinderkopfes zum Kurbelgehäuse wird am Zylinderkopfprüfstand durch eine Edelstahl- oder Aluminium-Adapterplatte, dem sogenannten Kurbelgehäusedummy, abgebildet. Dieser wird strömungsmechanisch speziell ausgelegt, um die Strömungsbedingungen im Kühlkreislauf des Gesamtmotors exakt nachzubilden.

Zunächst erfolgt die konstruktive Anpassung des Dummies an die Schnittfläche von Zylinderkopf und Kurbelgehäuse sowie an die Gegebenheiten am Prüfstand wie beispielsweise Kühlmittlein- und auslässe. Dabei gilt ein besonderes Augenmerk den Zylinderkopfverschraubungen sowie der original Zylinderkopfdichtung.

Mittels CFD-Berechnung wird die strömungstechnische Auslegung des Dummies vorgenommen. Hierbei gilt es, durch Modellierung verschiedener konstruktiver Veränderungen am Kurbelgehäusedummy diesen iterativ soweit zu optimieren, dass die Strömungsbedingungen jenen im Gesamtmotor entsprechen. So wird sichergestellt, dass sich während des Prüfbetriebs im Zylinderkopf die schadigungsrelevante Temperaturverteilung und der korrekte Wärmeübergang einstellen. Abbildung 3 zeigt in einer Falschfarbendarstellung den rechnerischen Vergleich der Massenströme im Kühlkreislauf des Gesamtmotors (links) und des konstruktiv optimierten Kurbelgehäusedummy (rechts) am Prüfstand. Wie in dem dargestellten Bildausschnitt zu sehen ist, stimmen die Strömungsverhältnisse am Prüfstand mit denen im Gesamtmotor sehr gut überein.

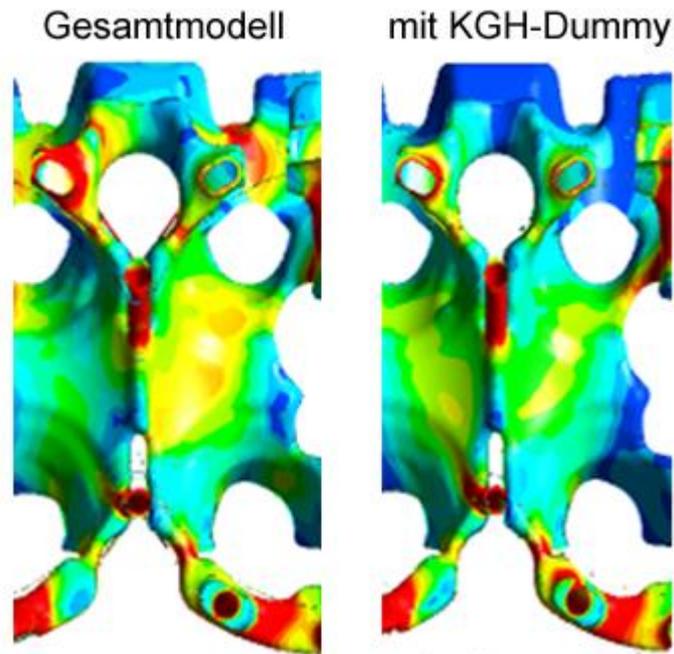


Abbildung 3: Vergleich CFD-Simulation: Gesamtmotor – ZKP-Prüfstand

Prüfprogramm

Das standardisierte Prüfprogramm am Prüfstand selbst besteht aus einer Inbetriebnahmephase, dem eigentlichen Dauerlauf sowie der Auswertung.

Inbetriebnahme

In der Inbetriebnahmephase werden vor Start des Dauerlaufs in einem iterativen Verfahren die Prüfstandsparameter so lange verändert, bis die Temperaturverteilungen sowie die Strömungsbedingungen im Zylinderkopf den Thermoschockverhältnissen im Gesamtmotor entsprechen. Der für die Inbetriebnahme verwendete Zylinderkopf ist dabei mit einer Vielzahl an Thermomessstellen bestückt, deren Zyklustemperaturen, bekannt sind. Der so genannte Messzylinderkopf entspricht in Bezug auf den Baustand und die Geometrie den später im Dauerlauf zu untersuchenden Prüflingen.

Veränderbare Prüfstandsparameter sind beispielsweise Brennerleistung, Flammform und Steuerzeiten sowie Kühlmittelströme und Vorlauftemperaturen in beiden Phasen des Lastzyklus.

Während der Inbetriebnahme wird außerdem das Kamerasystem für den Dauerlaufbetrieb eingerichtet. Die Positionen der einzelnen Zylinder auf der Linearführung der Kamera werden in der Prüfstandsteuerung hinterlegt und die Fokussierung des Objektivs für eine optimale Schärfe der Aufnahmen eingestellt.

Dauerlauf

Die in der Inbetriebnahme eingestellten Prüfstandsparameter werden anschließend für den Dauerlauf übernommen. Die Prüflinge werden mit neuer Verschraubung und neuer Zylinderkopfdichtung montiert und der Dauerlauf wird gestartet.

Zur Überwachung der Stabilität des Dauerlaufs werden prüfstandsseitig Messwerte wie Gas- und Kühlmitteldurchflüsse herangezogen. Zusätzlich können die Prüflinge mit einer Referenzthermomesstelle bestückt und die Maximal- sowie Minimaltemperaturen pro Lastzyklus überwacht werden. Abbildung 4 zeigt einen typischen Temperaturverlauf einiger Referenzmessstellen und des Kühlmittelkreislaufes aus einem Prüfstandsdauerlauf.

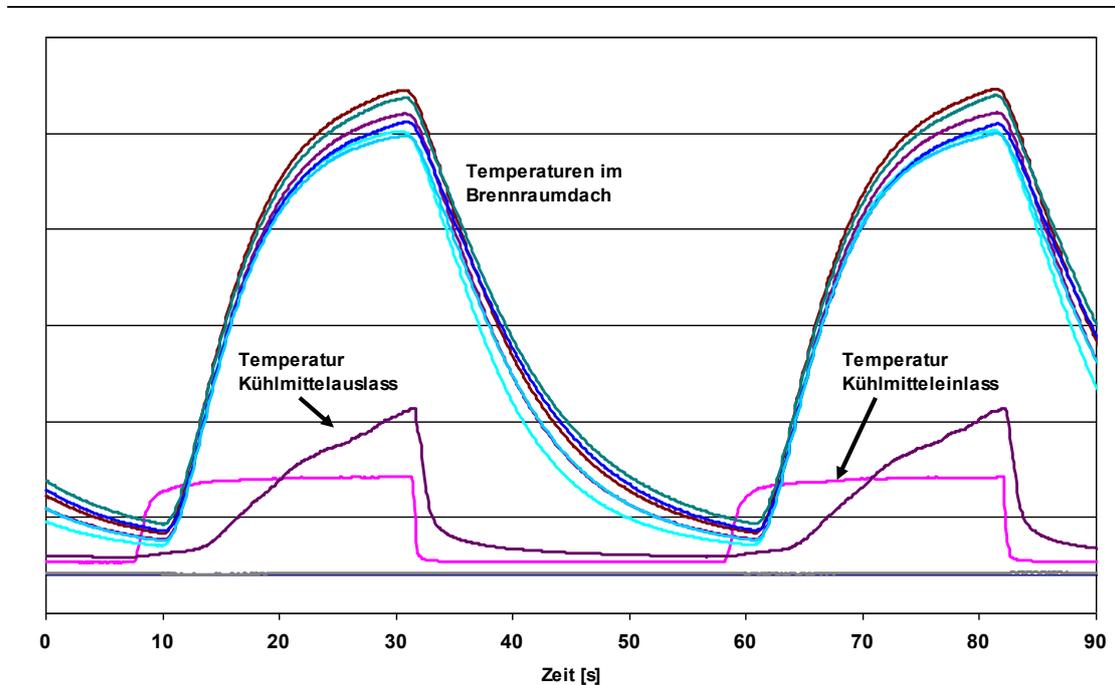


Abbildung 4: Temperaturverlauf an Referenzmessstellen

Durch die automatische Rissdokumentation mittels des Kamerasystems kann der Dauerlauf automatisiert im 24-Stunden-Betrieb durchgeführt werden, wobei die Entstehung der Schäden zu jedem Zeitpunkt nachverfolgbar bleibt. Die Rissdokumentation durch das Kamerasystem erfolgt in festgelegten Intervallen während des gesamten Dauerlaufs. Zusätzlich werden visuelle Risskontrollen durchgeführt. Auftretende Schäden werden so ab dem Anriss detektiert, der Rissfortschritt wird während des Dauerlaufs dokumentiert und ein Rissfortschrittsprotokoll wird erstellt.

Auswertung

Der Dauerlauf endet durch Erreichen der geforderten Lastspielzahl oder durch einen Schaden am Prüfling. Anschließend werden die detektierten Risslängen mittels Farbeindringverfahren verifiziert, ein Prüfbericht angefertigt und der Prüfling bzw. die Prüflinge zu weiteren Untersuchungen an den Auftraggeber übergeben. Schadensuntersuchungen, begleitende Rechnungen und unterstützende Materialcharakterisierungen können zusätzlich bei IABG in einem nach DIN 17025 akkreditierten Festigkeits- und Werkstofflabor durchgeführt werden.

Vergleich Zylinderkopfprüfstand – Motorprüfstand

Die Untersuchung der Betriebsfestigkeit von Zylinderköpfen bezüglich thermomechanischer Ermüdung wird heutzutage standardmäßig im Motordauerlauf am vollständigen Motor durchgeführt. Bei dieser Art der Versuchsdurchführung muss der

komplette Motor aufgebaut und betrieben werden, was die Untersuchung sehr zeit- und kostenintensiv macht. Für einen Temperaturzyklus muss der Motor innerhalb einer Zykluszeit von mehreren Minuten angefahren, warmgefahren sowie abgekühlt werden. Zudem ist eine Schadensbeurteilung während des Dauerlaufs nicht möglich, da der Aufwand zur mehrmaligen Demontage des Zylinderkopfes nicht wirtschaftlich wäre. Daher erfolgt eine Schadensbegutachtung bei erfolgtem Motorschaden oder nach Ende des Prüflaufs. Eine Anrisserkennung sowie eine Rissverfolgung sind mit vertretbarem Aufwand nicht machbar.

Der beschriebene Zylinderkopfprüfstand stellt eine innovative und effiziente Prüfal-ternative für Zylinderköpfe dar. Die Durchführung eines Thermoschocks innerhalb etwa einer Minute ermöglicht eine erheblich schnellere Prüfung. So ist es mit dem Zylinderkopfprüfstand erstmals möglich, mit akzeptablem Prüfaufwand Werkstoff-, Fertigungs- und Konstruktionsvarianten bei statistisch abgesicherten Versuchszahlen beurteilen zu können. An einem Prüftag können bis zu 1.000 Thermoschockzyklen erreicht werden. Für die Versuchsdurchführung wird dazu nicht der komplette Motor im befeuerten Betrieb benötigt. Daher ist es möglich, Zylinderköpfe im Prototypenstatus in Variationen zu erproben. Außerdem können Anrisse im Gegensatz zum herkömmlichen Motordauerlauf in-situ erkannt und der Rissfortschritt über die Thermozyklenzahl verfolgt werden, wodurch ein besserer Abgleich mit Berechnungsmodellen ermöglicht wird und auftretende Schäden besser untersucht werden können.

Zur Verifikation des neuen Prüfkonzeptes erfolgte ein Abgleich beider Versuchsvarianten bezüglich der auftretenden Schäden und der erreichten Temperaturzyklen bis zur Schadensentstehung. Die am Zylinderkopfprüfstand erzeugbaren Rissverläufe entsprechen den im Motordauerlauf auftretenden Schadensbildern. Abbildung 5 zeigt exemplarisch einen Schaden im Brennraumdach aus einem Prüflauf am Zylinderkopfprüfstand.

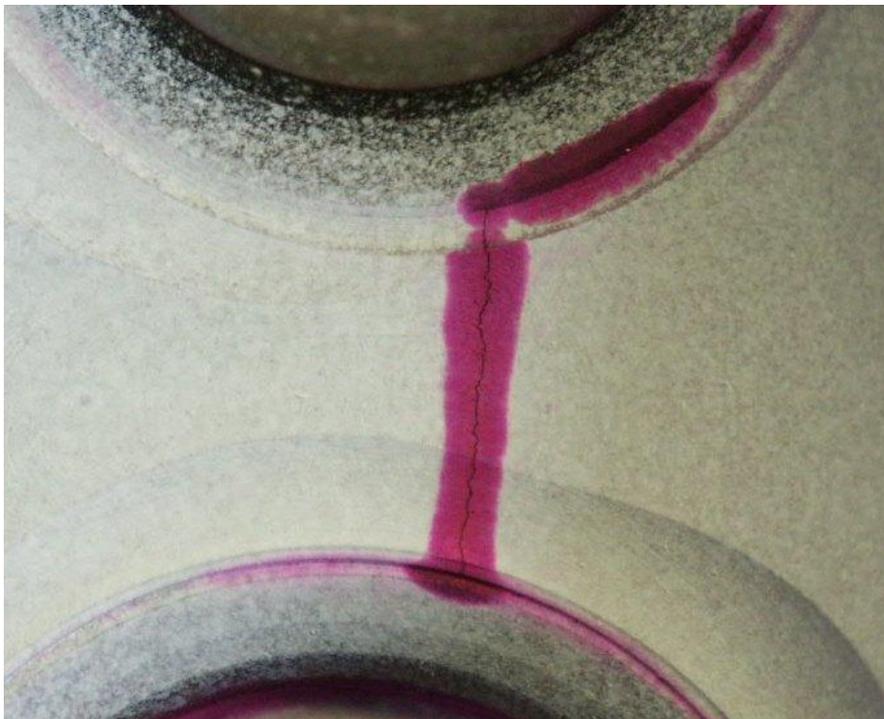


Abbildung 5: Typisches Schadensbild eines am ZKP-Prüfstand geprüften Zylinderkopfes

Schlussfolgerung

Der thermische Zylinderkopfprüfstand stellt eine innovative Methode dar, die Beurteilung und Optimierung von Zylinderköpfen hinsichtlich Thermomechanischer Ermüdung schon in einem sehr frühen Entwicklungsstadium vorzunehmen. Durch die im Vergleich zu konventionellen Motorprüfständen deutlich kürzeren Versuchszeiten bietet der Prüfstand die Möglichkeit, die Entwicklungszeiten neuer Zylinderkopfkonzepte bei gleichzeitiger Reduzierung der Versuchskosten im Vergleich zum herkömmlichen Motordauerlauf deutlich zu verkürzen. Der offene Aufbau des Prüfstandes ermöglicht außerdem erstmals eine in-situ Detektion des Anrisses sowie eine Verfolgung des Rissfortschrittes im Brennraumdach ohne Aufbau des kompletten Motors im befeuerten Betrieb.

Literaturverzeichnis

1. **Ehart R., Nefischer P., Riedler M.** Materialmodellierung und Lebensdauerabschätzung bei thermomechanisch beanspruchten Motorbauteilen unter Berücksichtigung von Alterungsvorgängen. [Buchverf.] DVM. *DVM-Bericht 133*. 2007, S. 109-122.
2. **H.-J., Christ.** *Wechselverformung von Metallen*. Berlin : Springer-Verlag, 1991.
3. **Ramberg W., Osgood W.R.** *Description of Stress-Strain Curves by three Parameters*,. s.l. : NACA Technical Note No. 902, 1943.
4. **Lemaitre J., Chaboche J.L.** *Mechanics of solid materials*. Cambridge : Cambridge University Press, 1990.
5. **Smith K.N., Watson P., Topper T.H.** A stress-strain function for the fatigue of metals. *Journal of Materials*. JMLSA 5, 1970, Bde. 4, pp. 767-778.
6. **Martin, Riedler.** *Methodikfindung zur Simulation von thermomechanisch beanspruchten Motorbauteilen aus Aluminiumlegierungen*. Düsseldorf : VDI Fortschritt-Bericht, 2005. Reihe 5.