

Innovative Prüfmethodik zur Ermittlung der thermomechanischen Ermüdung an Zylinderköpfen

Tobias Bischoff, Steffen Rödling, Ottobrunn, und Bernhard Stauder, Linz, Österreich

Im Auslegungsprozess von Zylinderköpfen spielt die Bewertung der thermomechanischen Ermüdung eine wesentliche Rolle. Der IABG-Zylinderkopfprüfstand basiert auf einer innovativen Methode, die eine Beurteilung und Optimierung von Zylinderköpfen hinsichtlich thermomechanischer Ermüdung bereits in einem sehr frühen Entwicklungsstadium erlaubt. Durch die im Vergleich zu konventionellen Prüfmethoden deutlich kürzeren Versuchszeiten bietet der Prüfstand die Möglichkeit, die Entwicklungszeiten neuer Zylinderkopfkonzepte bei gleichzeitiger Reduzierung der Versuchskosten erheblich zu verkürzen. Der offene Aufbau des Prüfstandes ermöglicht zudem erstmals eine In-situ-Detektion des Anrisses sowie eine Verfolgung des Rissfortschrittes im Brennraumdach. Der vorliegende Artikel stellt das Prüfkonzept und die Ergebnisse eines Variantenvergleichs von konstruktiv identischen Zylinderköpfen mit unterschiedlichen Aluminium-Gusslegierungen vor.

Die Steigerung der spezifischen Leistung, Emissionsreduzierung und Leichtbau sind Themen, die in der Fahrzeugindustrie eine immer bedeutendere Rolle spielen und die Hersteller vor neue und anspruchsvolle Herausforderungen im Motorenbau stellen. Diese Faktoren tragen dazu bei, dass die lokale Beanspruchung im Motor durch steigende Spitzentemperaturen, insbesondere im Zylinderkopf, immer weiter zunimmt. Konzeptveränderungen des Zylinderkopfes im Bereich der Konstruktion können die Beanspruchbarkeit erhöhen und erfordern entsprechende Anpassungen in der Werkstoffauswahl. Einen wesentlichen Einfluss auf den TMF-Prozess im Zylinderkopf haben daher unter anderem die Bauteilgeometrie sowie die Gießtechnik. Diese Einflüsse können mit aus Probenversuchen parametrisierten Berechnungsmodellen bezüglich der Lebensdauer bewertet werden. Aufgrund der modellbedingten Unsicherheiten in der Berechnung müssen die abgeschätzten Lebensdauern jedoch im Komponentenversuch verifiziert werden. Zugleich

steigt die Anzahl von Motorvarianten in stets kürzeren Entwicklungszyklen und zukünftige Zylinderkopfvarianten müssen in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, also noch vor Fertigstellung des Gesamtmotors, geprüft werden. Dabei unterliegen die Anforderungen an die Erkennung von Schadensbeginn und -verlauf ebenfalls deutlich höheren Anforderungen.

Die Prüfmethodik der IABG simuliert die thermomechanische Ermüdung am Zylinderkopf entsprechend den im realen Motorbetrieb auftretenden thermischen Belastungen. Im Rahmen dieser Komponentenprüfung kann ohne einen Gesamtmotorversuch auf einem Motorenprüfstand und bei gleichzeitiger Versuchszeitverkürzung sowie Kostenersparnis schon frühzeitig eine Aussage über das thermomechanische Verhalten des Zylinderkopfes getroffen werden. Darüber hinaus ermöglicht der Prüfstand (Bild 1) die visuelle Verfolgung des Schadensverlaufs während der Prüfung und liefert somit zusätzliche Erkenntnisse über den Schadensbeginn und -fortschritt.

Hauptbeanspruchungen im Zylinderkopf

Die Beanspruchungen im Zylinderkopf lassen sich in zwei wesentliche Hauptanteile untergliedern:

- HCF-Beanspruchung aufgrund zyklischer Druckpulsationen infolge der Verbrennungsvorgänge mit hohen Lastwechselzahlen
- Thermomechanische Beanspruchung (TMF) aufgrund thermischer Aufheiz- und Abkühlvorgänge im Bereich niedriger Lastwechselzahlen (LCF-Bereich)

Beide Beanspruchungsarten zeigen in Bezug auf das Bauteil grundlegend unterschiedliche Schadensbilder. Während bei der Beanspruchung des Zylinderkopfes durch die Druckpulsationen die Schäden vorrangig innerhalb des Zylinderkopfes im Umfeld des Wassermantels auftreten, sind Risse aufgrund der thermomechanischen Belastung eher am Brennraumdach und im Bereich der Ventilbohrungen zu beobachten (Bild 2).

Die vorgestellte Prüfmethodik [1, 2] beschränkt sich auf die Abbildung der thermomechanischen Beanspruchung und da-

mit auf Schäden bzw. Risse im Bereich der Ventilstege und der Zündkerzen- und Einspritzdüsendome. Genau in diesen Bereichen mit dünnen Materialwandstärken und hohen Temperaturen und Temperaturgradienten können Risse aufgrund zu hoher thermischer Spannungen entstehen.

Diese Risse können bis in den Bereich des Wassermantels fortschreiten und zu einem Wasseraustritt im Brennraumdach bzw. letztendlich zu einem Motorschaden führen. Bei längeren Vollastfahrten kommt es zu hohen thermischen Einträgen im Zylinderkopf, die lokal im Brennraumdach zu starken Werkstoffausdehnungen führen. Aufgrund der umliegenden, meist kühleren Bauteilbereiche kommt es zu einer Dehnungsbehinderung und damit zu Druckspannungen, welche je nach Lastzustand zu Plastifizierungen im Material führen können.

Abhängig von der Höhe der lokalen Temperaturen und der thermischen Belastungsdauer können gerade bei Leichtmetall-Zylinderköpfen zusätzlich Diffusionsvorgänge auftreten, die aufgrund der Materialalte-

rung über die Betriebszeit zu einem veränderlichen Werkstoffverhalten führen [3, 4].

Wird im Anschluss an eine Vollastphase die Last deutlich reduziert oder der Motor im Schubetrieb geschleppt, reduziert sich der thermische Eintrag, während zusätzlich kalte Luft über die Einlassventile angesaugt wird. Diese lokale und sehr schnelle Abkühlung des Brennraumdachs führt zu einer Umkehr der thermischen Dehnungen. Wegen der weiterhin wirksamen Verformungsbehinderung durch umliegende Bereiche entstehen dabei Zugspannungen in den vorher durch Druckspannungen plastifizierten Bauteilbereichen. Diese aufgrund der auftretenden inhomogenen Temperaturverteilung entstehenden Zugspannungen führen zu einer signifikanten lokalen Ermüdung im Brennraumdach. Je nach Anzahl und Stärke der thermomechanischen Beanspruchungszyklen können hieraus Anrisse entstehen [5-7]. Bild 3 zeigt schematisch den Temperaturverlauf eines typischen TMF-Zyklus sowie den entsprechenden Spannungs- und Dehnungsverlauf, wie er typischerweise im Brennraum-

dach auftritt. Aufgrund der Tatsache, dass Druckspannungen bei hohen Temperaturen und Zugspannungen bei niedrigen Temperaturen auftreten, wird diese Art der thermomechanischen Beanspruchung als Out-of-Phase-TMF-Beanspruchung oder TMF-Zyklus bezeichnet.

Neue Prüfmethodik – Komponententest für TMF-Lebensdauerabschätzung an Zylinderköpfen

Die stetige Verkürzung der Entwicklungszyklen und die damit steigende Anzahl von Motorvarianten macht deutlich, dass der zukünftige Versuchsbedarf nicht mit dem herkömmlichen Motordauerlauf, sondern nur mit einem zeitgerafften und kostenoptimierten Komponententest abgedeckt werden kann. Die IABG realisierte daher einen Komponentenprüfstand zur thermomechanischen Ermüdung von Zylinderköpfen (Bild 1).

Prüfkonzept. Der IABG-Zylinderkopfprüfstand ist so ausgelegt, dass zur Simulation der thermomechanischen Ermüdung



Bild 1. Zylinderkopfprüfstand 2 bei der IABG mbH

Figure 1. Cylinder head test bench 2 at the IABG mbH



Bild 2. Beispieldarstellung eines typischen TMF-Schadens im Brennraumdach eines Dieselmotors [8]

Figure 2. Exemplary illustration of a typical thermo-mechanical fatigue damage in the roof of a combustion chamber of a diesel engine [8]

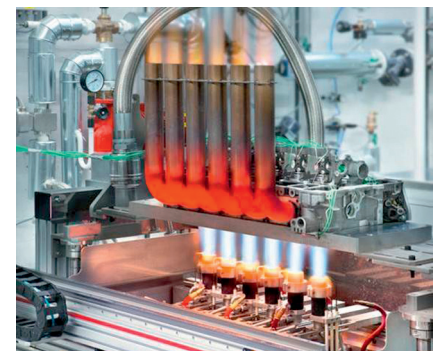
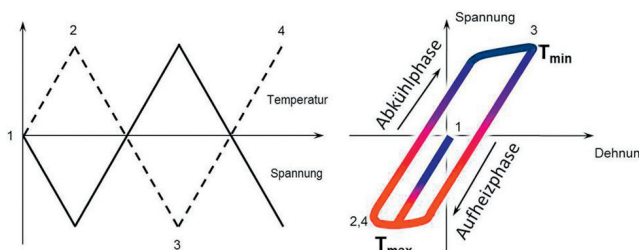


Bild 4. Aufbau des Zylinderkopfes eines Reihensechszylindermotors auf dem ZKP

Figure 4. Set-up of a cylinder head of a six-cylinder engine on the ZKP

Bild 3. Darstellung eines Out-of-Phase-TMF-Zyklus mit entsprechender Hystereseschleife

Figure 3. Illustration of an out-of-phase TMF cycle with the corresponding hysteresis



am Zylinderkopf lediglich der Zylinderkopf selbst, nicht aber ein betriebsbereiter Motor benötigt wird.

Der zu untersuchende Zylinderkopf wird über eine Adapterplatte mit dem Prüfstand verbunden. Dieser Dummy ersetzt das Kurbelgehäuse und wird in Bezug auf Steifigkeit und Kühlbedingungen so ausgelegt, dass der Zustand wie im befeuerten Motor erreicht werden kann.

Der Wärmeeintrag aus dem Verbrennungsprozess wird während der Aufheizphase durch bis zu sechs einzeln regelbare Propan-Sauerstoff-Druckluft-Brenner nachgebildet, die von unten die Brennraumdächer aufheizen (vgl. Bild 4). Dabei können Brennerposition, Flammgeometrie, Brennerleistung sowie parallele Druckluftspeisung so variiert werden, dass durch die entsprechende Temperaturverteilung im Brennraumdach die Verhältnisse im Motorbetrieb nachgebildet werden. Die maximale Leistung einer Brenneinheit beträgt 75 kW. Für PKW-Zylinderköpfe reicht diese Leistung aus, um jedes Brennraumdach mit je einem Brenner zu beheizen. Für größere Motoren können bis zu vier Brenner mit einer Gesamtleistung von 300 kW kombiniert werden. In der Abkühlphase des Lastzyklus wird – wie im Realmotor bei Schubetrieb – die auftretende konvektive Luftkühlung simuliert. Dazu strömt durch die Brennerdüsen kalte Druckluft auf die Brennraumdächer.

Das Prüfkonzept des IABG-Zylinderkopfprüfstandes verzichtet bewusst auf die Simulation der Beanspruchung durch den Gasdruck aufgrund der Zündvorgänge im Brennraum, um durch den offenen Prüfstands Aufbau eine In-situ-Risserkennung und -verfolgung ohne Unterbrechung des Dauerlaufs zu ermöglichen.

In jeder Phase der Prüfung wird der Zylinderkopf entsprechend den realen Bedingungen im Motorbetrieb mit Kühlmittel durchströmt. Am Prüfstand stehen hierfür zwei 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 bis 200 l/min regelbar. Um den Aufheizevorgang im Zylinderkopf zu unterstützen und zu beschleunigen, steht ein weiterer Kühlwasserkreis mit einem bis auf 120 °C konditionierbaren Kühlmedium zur Verfügung.

Die thermische und mechanische Schnittstelle des Zylinderkopfes zum Kurbelgehäuse wird am Zylinderkopfprüfstand durch eine Edelstahl- oder Aluminium-Ad-

apterplatte, dem sogenannten Kurbelgehäuse-dummy, abgebildet. Dieser wird strömungsmechanisch so ausgelegt und optimiert, dass die Strömungsbedingungen im Kühlkreislauf des Gesamtmotors nachgebildet werden. Durch Angleichung des Wärmeeintrags sowie der Kühlmittelströmung und damit der Wärmeübergänge in den Wassermantel an die Verhältnisse im befeuerten Motor werden realistische räumliche und zeitliche Temperaturgradienten und damit schädigungsäquivalente thermomechanische Ermüdungsvorgänge erzeugt. Bild 5 zeigt die Simulation der Strömungsverhältnisse im Wassermantel eines Zylinderkopfes und des zugehörigen Kurbelgehäusedummys am Beispiel einer Drei-Zylinderbank eines Ottomotors.

In der Inbetriebnahmephase werden vor Start des Dauerlaufs in einem iterativen Verfahren die Prüfstandsparameter so lange verändert, bis die Temperaturverteilung im Brennraumdach den Theroschockverhältnissen im Gesamtmotor entspricht. Der für die Inbetriebnahme verwendete Zylinderkopf ist dabei mit einer Vielzahl an Thermomessstellen bestückt, deren Zyklustemperaturen aus dem Motorversuch, Messungen

am Fahrzeug oder aus Simulationen bekannt sind. Der sogenannte Messzylinderkopf ist baugleich zu den später im Dauerlauf zu untersuchenden Prüflingen. Veränderbare Prüfstandsparameter sind beispielsweise Brennerleistung, Flammform, Aufheiz- und Abkühlzeiten sowie Kühlmittelströme und Vorlauftemperaturen des Kühlwassers in beiden Phasen des Lastzyklus.

Nach Abschluss der Inbetriebnahmephase werden die iterativ angepassten Prüfstandsparameter fixiert und für den Dauerlauf verwendet. Der Dauerlauf wird mit Prüflingen mit nur wenigen Referenzmessstellen zur Temperaturüberwachung gefahren und bei einer festgelegten Lastwechselzahl oder bei Auftreten eines Schadens abgebrochen.

Zur Schadenserkenkung und -verfolgung im Brennraumdach während der Prüfung kann der Zylinderkopf am Zylinderkopfprüfstand um 90° um seine Längsachse aus der Prüflage in die Inspektionslage geschwenkt werden (Bild 6). Dies ermöglicht eine optische Rissinspektion durch das Bedienpersonal sowie eine vollautomatisierte Dokumentation der Schadensentwicklung der Brennraumdächer mit einer integrier-

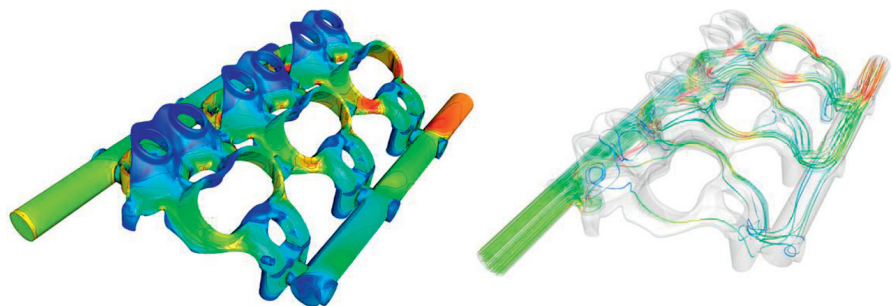


Bild 5. CFD-Strömungsberechnung des Kurbelgehäusedummys und der Kühlkanäle einer Drei-Zylinderbank eines Ottomotors (links Strömungsgeschwindigkeiten, rechts Strömungslinien)

Figure 5. CFD-evaluation of crankcase dummy and the cooling ducts of a three-cylinder Otto engine (left flow rates, right flow paths)

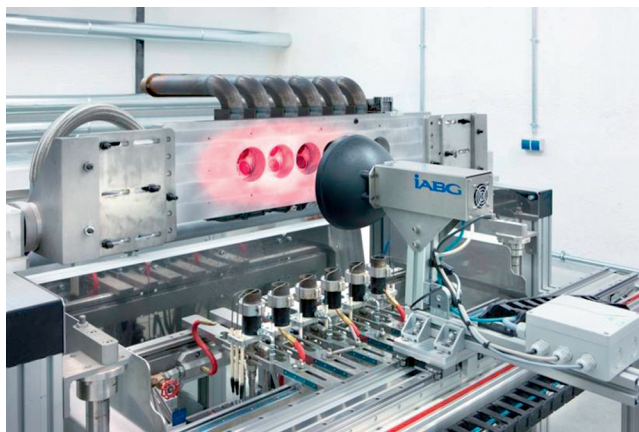


Bild 6. Zylinderkopf in Inspektionslage während der automatisierten Bild-dokumentation

Figure 6. Cylinder head during automatic camera inspection

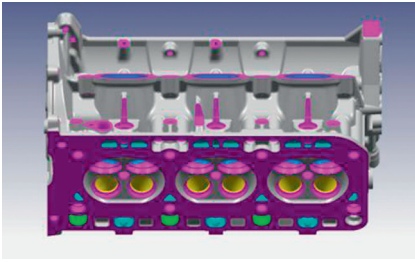


Bild 7. CAD-Modell des Prüflings

Figure 7. CAD-Model of the specimen

ten hochauflösenden Kamera. In einem Nachbearbeitungsschritt kann anhand der Aufnahmen einem vorhandenen Riss der entsprechende Anrisszeitpunkt zugeordnet sowie eine Rissfortschrittskurve ermittelt werden. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung der Aussageschärfe und -tiefe gegenüber der Erprobung im Motordauerlauf dar, bei der aus praktischen Gründen während der Prüfung keine Inspektion durchgeführt und somit keine Aussage zum Schadensbild abgeleitet werden kann.

Verifikation des neuen Prüfkonzeptes gegenüber Motorprüfstand und Simulation. Betriebsfestigkeitsprüfungen werden in der Regel bezüglich der auftretenden Lasten und der Umgebungsbedingungen vereinfacht durchgeführt, um einzelne Einflussgrößen in ihrer Auswirkung deutlich trennen zu können. Dies sind in der Regel vereinfachte Komponentenprüfungen, die die Realität nicht exakt abbilden, im Ergebnis jedoch einen vergleichbaren Schaden zeigen sollen.

Am Zylinderkopfprüfstand sind im Vergleich zum realen Motorlauf die deutlichsten Unterschiede in der Art des Wärmeeintrages und der anschließenden Kühlung mit einem idealisierten Kühlkreislauf zu sehen. Um die Vergleichbarkeit des zeitlich gerafften Verfahrens mit den gängigen Erprobungsmöglichkeiten im Fahrzeug oder auf dem Motorprüfstand nachzuweisen und in die bisherigen experimentellen und rechnerischen Auslegungs- und Freigabeprozesse zu integrieren, ist eine Verifikation der Prüfergebnisse nach definierten Kriterien unumgänglich.

Diese Kriterien können beispielsweise auftretende lokale Dehnungen, die Risslage, die Anriss-Lebensdauer oder die Lebensdauer bis zum Durchriss zum Wassermantel sein. Zur Verifikation dieser Kriterien wurde bereits in einer Vielzahl von Projekten mit Diesel- oder Ottomotoren aus verschiedenen Bereichen ein direkter Vergleich zum Motorprüfstand und zu Simulationsergebnissen durchgeführt.

Dazu wurden Abgleichmessungen zwischen real auftretenden lokalen Dehnungen und erfassten Risslagen in den Stegbereichen und die zugehörigen Thermochock-Zyklenzahlen verglichen.

Dabei ergab sich stets, dass die erzeugten Schadensbilder am Zylinderkopfprüfstand jenen im Motorversuch sehr gut entsprechen. Auch in Bezug auf die Simulation konnten die bestehenden Modelle abgeglichen und verifiziert werden [1, 2, 9].

Positionierung des Prüfverfahrens im Entwicklungsprozess von Zylinderköpfen

Auf Basis der in verschiedensten Projekten erzielten Ergebnisse konnte sich der Zylinderkopfprüfstand als zeit- und kostenoptimiertes Komponentenprüfverfahren etablieren und im Entwicklungsprozess der Motorenhersteller aus den unterschiedlichsten Bereichen positionieren. Mit den zwei bei der IABG vorhandenen Prüfständen können Zylinderköpfe für Motoren aus den Bereichen Pkw, Lkw und Großmotoren geprüft werden.

Dabei sind in kürzester Zeit Variantenvergleiche möglich. Primär werden hier Konstruktionsunterschiede, verschiedene Gussverfahren sowie der Einsatz von neuen Werkstoffen untersucht.

Bei Konstruktionsvarianten werden Zylinderköpfe mit unterschiedlichen Kühlgeometrien, Zündkerzenbohrungsdurchmessern oder Ventilgrößen untersucht. Die unterschiedlichen Wandstärken wirken sich unmittelbar auf die Lebensdauer der umliegenden Stegbereiche aus.

Aber auch die gängigen Gießverfahren wie Sandguss, Kokillenguss oder das

Lost-Foam-Verfahren nehmen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Oberflächen und der differierenden Materialkennwerte Einfluss auf die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Zylinderkopfes.

Entscheidend für das Verhalten unter zyklischer thermischer Beanspruchung sind aber auch die eingesetzten Werkstoffvarianten wie etwa gängige Aluminiumgusslegierungen. Je nach Anforderungs- und Auslegungsprofil wird hier zwischen verschiedenen Legierungen und deren Wärmebehandlung unterschieden.

In einem Gemeinschaftsprojekt zwischen der Nemak, einer der führenden Zylinderkopfgießereien, und der IABG wurden unterschiedliche Werkstofflegierungen an einem konstruktiv identischen Zylinderkopf auf thermomechanische Ermüdung auf dem Zylinderkopfprüfstand erprobt. Ziel war hierbei nicht nur die experimentelle Untersuchung des Bauteilverhaltens, sondern auch der Abgleich zwischen Versuch und Simulation. Besonders im Fokus standen Unterschiede der Legierungsvarianten in Bezug auf die Lebensdauer und den Schadensmechanismus.

Gegenstand der Prüfung

Prüfobjekt war eine Zylinderkopfbank eines V6-Serienmotors (Bild 7). Geprüft wurden hierbei zwei konstruktiv identische Zylinderkopfbänke aus zwei unterschiedlichen Gusslegierungen.

Aufgrund der hohen thermischen und auch mechanischen Beanspruchung im Motorbetrieb gelten für die prinzipielle Auswahl einer Legierung im Auslegungsprozess eines Aluminiumzylinderkopfes folgende wesentliche Werkstoffanforderungen [10]:

- hohe Dehngrenze bei Raumtemperatur und bei Betriebstemperatur
- hohe Bruchdehnung
- hohe thermische Leitfähigkeit
- geringe thermische Ausdehnung
- hohe Kriechfestigkeit
- hohe Thermochockbeständigkeit
- günstige Verarbeitungseigenschaften.

Angaben in [Massen-%]	AlSi6Cu4	AlSi7Cu0,5Mg
Si	6,4	7,13
Cu	3,9	0,50
Mg	0,24	0,42
Fe	0,44	0,12
Mn	0,45	0,09
Ti	0,14	0,11
Sr	0,0187	0,0211

Legierung	Wärmebehandlung	R _{p0,2} / MPa	R _m / MPa	A / %
AlSi6Cu4Sr	T7 water	334	400	2
AlSi7MgCu	T6 air	207	285	6

Bild 8. Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften der Legierungen (RT-Zugversuch)

Figure 8. Chemical and mechanical properties composition of the alloys (RT tensile test)

Auf Basis dieser Überlegungen wurden in dem hier dargestellten Projekt folgende Werkstoffvarianten ausgewählt:

1. Werkstoff A: AlSi7Cu0,5Mg – T6-Air
2. Werkstoff B: AlSi6Cu4 – T7-Wasser.

Beide Werkstoffe stellen gießtechnisch gut verarbeitbare untereutektische Al-Si-Gusslegierungen dar. Deren chemische Zusammensetzung, Wärmebehandlung und die resultierenden mechanischen Eigenschaften für Proben aus dem Brennraumbereich gehen aus Bild 8 hervor.

Die AlSi6Cu4 weist durch den hohen Cu-Anteil eine hohe Warmfestigkeit auf. Zusammen mit den höheren Fe- und Mn-Gehalten wird dadurch allerdings die Duktilität des Werkstoffs reduziert. Die AlSi7Cu0,5Mg ist ein Vertreter der duktilen Primärlegierungen, mit einem Fe-Gehalt deutlich unter 0,2 Masse-%. Ein Vergleich der Gefügeausbildung beider Legierungen ist in Bild 9 zu sehen. Die höhere Inhomogenität der AlSi6Cu4 bei identischer Feinheit der primären Al-Dendritenstruktur ist daraus ersichtlich. Das Al-Si-Eutektikum liegt in beiden Varianten durch die Strontium-Zugabe veredelt und durch die Lösungsglühung rundlich eingeformt vor. Aus der hiermit dokumentierten Gefügeausbildung lässt sich kein Unterschied im mechanischen Werkstoffverhalten ableiten.

Beide Legierungen werden für hochbeanspruchte Zylinderköpfe in Serie, sowohl für Otto- als auch Dieselmotoren, verwendet. Von Thalmeier [11] wurde bereits eine umfangreiche Studie zum Verhalten der thermomechanischen Ermüdung von Al-Si-Gusslegierungen unter ottomotorischen Beanspruchungen vorgestellt.

Die Fertigung der in diesem Beitrag vorgestellten Prüflinge erfolgte in der Entwicklungsgießerei der Nemak Linz GmbH. Beide Legierungen wurden mit identischen Prozessparametern im Nemak-eigenen Rotacast®-Verfahren abgegossen (Bild 10). Das Rotacast®-Verfahren ist besonders geeignet, um im Brennraumbereich von Zylinderköpfen eine sehr feine Gefügequalität bei geringster Porosität einzustellen. Besonders unterstützt wird dies durch die äußerst turbulenzarme, schichtende Füllweise dieses Gießverfahrens und den ausgeprägten Temperaturgradienten mit der Folge sehr kurzer Erstarrungszeiten (Bild 11) und idealer Erstarrungsbedingungen. Durch das Einhalten identischer Fertigungsparameter und die hohe Gefügequalität kann für die vorliegenden Prüflinge sichergestellt werden, dass die Ergebnisse in erster Linie durch die Eigenschaften der Legierung und

kaum durch Qualitätseinflüsse aus dem Prozess bestimmt werden.

Durch die Wärmebehandlung kann das Eigenschaftsprofil nach dem Abguss weiter maßgeblich verändert werden. Im Segment höher beanspruchter Motoren sind T6- und T7-Wärmebehandlungen mit Lösungsglühen, Abschrecken und anschließender Warmauslagerung ein weit verbreiteter Standard. Die anzuwendenden Verfahren und Parameter hängen jedoch

stark von den zu erzielenden Eigenschaften ab [12]. Letztlich sind sie das Ergebnis aus der im Gießverfahren erzielten Gefügequalität, der Materialvorgabe, den berechnungstechnischen Limits bezüglich Eigenspannungen und den geforderten mechanischen Eigenschaften inklusive der Härte.

Die Legierung A wurde auf T6 mit Luftabschreckung wärmebehandelt. Diese Wärmebehandlung ist besonders geeignet, um ge-

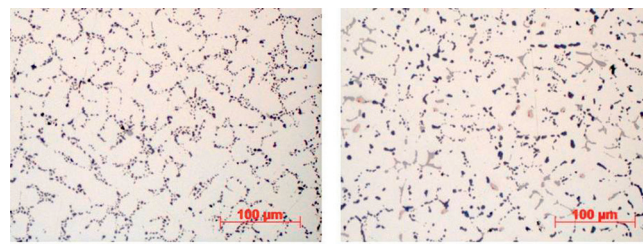


Bild 9. Gefügebilder der eingesetzten Legierungsvarianten

Figure 9. Microstructure of the used alloy variants

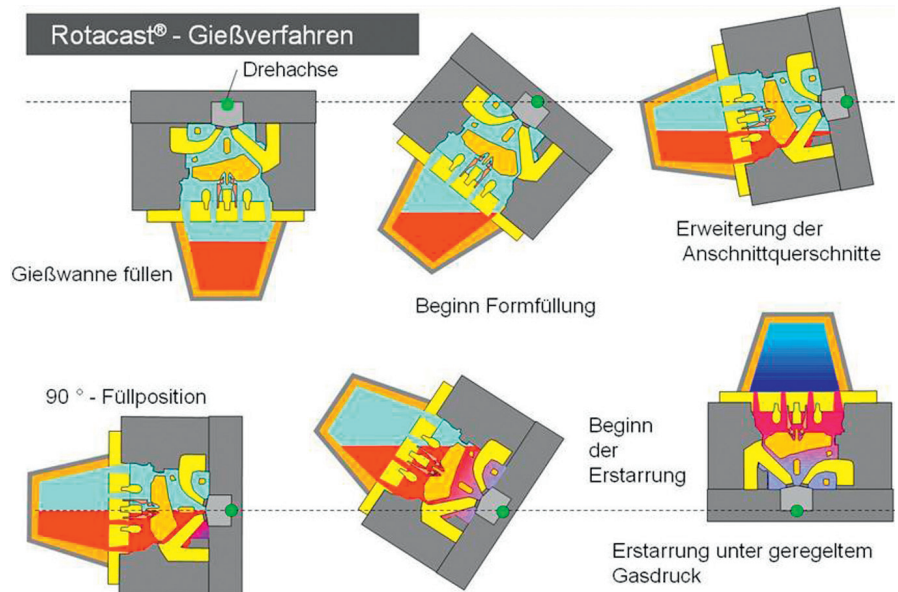


Bild 10. Gießverfahren Prinzip Rotacast®

Figure 10. Casting process principle Rotacast®

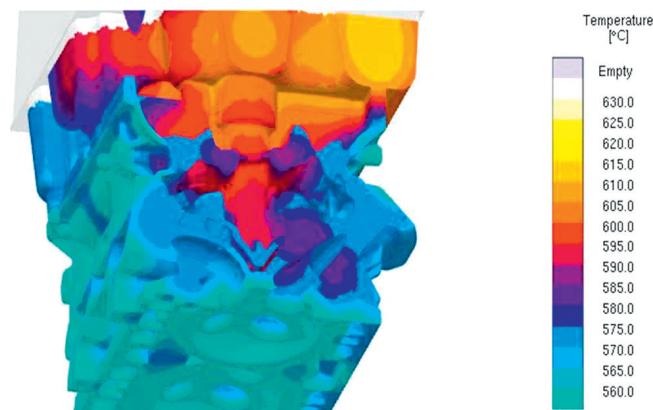


Bild 11. Temperaturverteilung im Gussteil am Ende der Rotacast®-Formfüllung

Figure 11. Temperature distribution at the cast part at the end of the Rotacast® mold filling

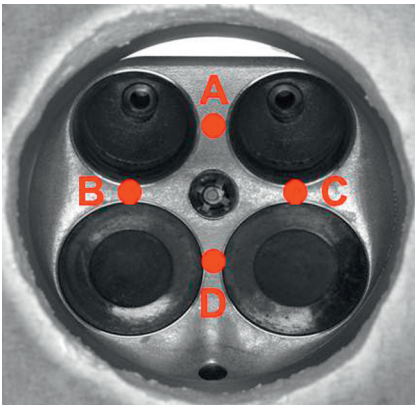


Bild 12. Positionen der Temperaturmessstellen am Kalibrierkopf

Figure 12. Thermocouple positions of reference cylinder head

ringe Eigenspannungen in den Bauteilen zu erzielen, und wird bei Nemak bereits seit den 1990er Jahren erfolgreich angewandt. Die Legierung B wurde T7 mit Wasserabschreckung wärmebehandelt. Bei der Warmauslagerung wird die Legierung überaltert und somit der Ausscheidungszustand stabilisiert. Durch höhere Temperaturen oder eine längere Auslagerungsdauer wird damit der Punkt höchster Festigkeit überschritten [12, 13]. Dabei wird ebenfalls ein Abbau von Eigenspannungen erreicht, wenn auch nicht auf ein der Luftabschreckung vergleichbares Niveau [14, 15].

Der T6-wärmebehandelte Werkstoff A hat eine hohe Duktilität bei gleichzeitig hoher Wärmeleitfähigkeit und Warmfestigkeit. Dieser soll als Referenz für den qualitativen Vergleich dienen. Die T7-wärmebehandelte Legierung (Werkstoff B) hat eine höhere Warmfestigkeit, jedoch aufgrund der höheren Legierungselementgehalte eine etwas geringere Wärmeleitfähigkeit und Bruchdehnung.

Abgleich der Prüfstandsparameter mit dem Motorbetrieb

Durch den modularen Aufbau des IABG-Zylinderkopfprüfstandes konnten zeitgleich zwei Zylinderkopfbänke mit jeweils drei Brennräumen unter gleichen Rahmenbedingungen getestet werden. Zum Einmessen der Prüfparameter wurden zwei Referenz-Kalibrierköpfe aus Werkstoff A AlSi7Cu0,5Mg mit je vier Temperaturmessstellen pro Brennraumdach appliziert. Die Positionen der Messstellen sind in Bild 12 gekennzeichnet und dargestellt. A: Auslass-Auslass-Steg (A/A-Steg) B: Einlass-Auslass-Steg-links (E/A-Steg L)

Bild 13. Inbetriebnahme Ergebnisse an den Ein- und Auslassventilstegen

Figure 13. Commissioning results between the inlet- and outlet valve

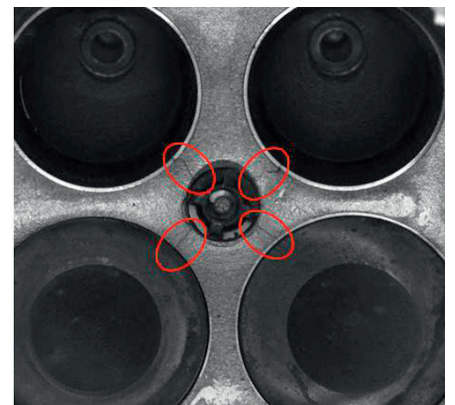
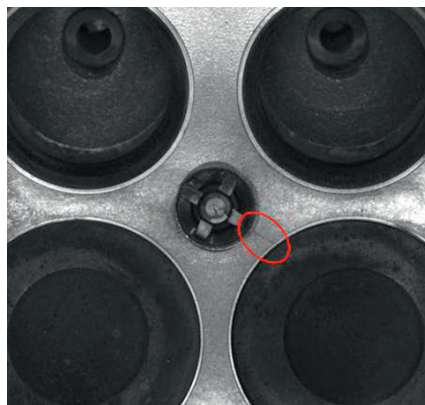
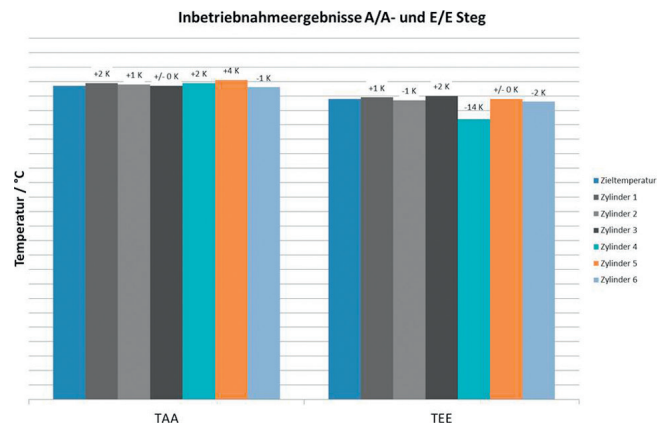


Bild 14. Ergebnis der Bilddokumentation an Zylinder 3 nach 100 % Laufzeit: Werkstoff A links, Werkstoff B rechts

Figure 14. Result of pictorial documentation on cylinder 3 after 100 % operating time: Material A left, material B right

C: Einlass-Auslass-Steg-rechts (E/A-Steg R)
D: Einlass-Einlass-Steg (E/E-Steg).

Die vier dargestellten Referenzmessstellen pro Brennraumdach sind bei dem dargestellten kleinen Zylinderkopf ausreichend, um das zugehörige Temperaturfeld gemäß den Anforderungen am Prüfstand abzubilden. Die Zieltemperaturen der einzelnen Messstellen stammen aus einer Berechnung der thermodynamischen Belastung im Motor. In einem iterativen Prozess wurden die Prüfstandsparameter dahingehend optimiert, dass die Temperaturverteilung an den applizierten Messstellen den Verhältnissen im Gesamtmotor entspricht. Dabei wurde eine Zyklusdauer für einen Thermoschock von 75 Sekunden mit einer Aufheizdauer auf Maximaltemperatur von 35 Sekunden und einer Abkühldauer von 40 Sekunden ermittelt. Typische Temperaturverläufe eines Thermoschockzyklus sind in [1, 2, 9] dargestellt.

Ausschlaggebend für die Schädigung im Flammdeck ist die größte auftretende Temperaturdifferenz. Aus diesem Grund lag

während der Inbetriebnahme besonderes Augenmerk auf den Referenzmessstellen zwischen dem heißesten Auslassventilsteg und dem kältesten Einlassventilsteg.

Bild 13 zeigt für die beiden Referenzmessstellen am Ventilsteg zwischen den Auslassventilen A und den Einlassventilen D die Zieltemperaturen und die an den Zylindern 1 bis 6 am Prüfstand erreichten Isttemperaturen. Die Zieltemperaturen konnten dabei größtenteils mit einer Genauigkeit von ± 2 Kelvin erreicht werden. Ein einzelner Ausreißer am Einlassventilsteg von Zylinder 4 lässt auf eine fehlerhafte Messstelle schließen, da die zugehörige Auslassstegtemperatur bereits um +2 Kelvin überschritten wurde.

Vergleichbare Ergebnisse wurden an den linken und rechten Ein-/Auslassventilstegen B und C erreicht. Auch der Kühlmitteldurchfluss und die Kühlmitteltemperaturen am Austritt des Kurbelgehäusedummys erreichten am Ende der Heizphase bis auf eine Genauigkeit von 5 % die im Motorbetrieb relevanten Werte. Danach wurden

die Prüfparameter für den Variantenvergleich fixiert und so ein konstanter Wärmeeintrag auf beiden Prüfpositionen gewährleistet.

Ergebnisse des Variantenvergleichs

Mit den festgelegten Dauerlaufparametern aus der Kalibriermessung wurde der Vergleich zwischen Werkstoff A und B unter gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, Unterschiede in der Bauteillebensdauer aufgrund der abweichenden Legierungszusammensetzung und der Wärmebehandlung aufzuzeigen.

Um die Auswirkung der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der verglichenen Werkstoffvarianten auf die Versuchsparameter festzustellen, wurden die Kühlmittelauslasstemperaturen der beiden Zylinderkopfvarianten im Prüfbetrieb verglichen. Signifikante Unterschiede in der Kühlmittelauslasstemperatur aufgrund der etwas geringeren Wärmeleitfähigkeit von Werkstoff B konnten am Prüfstand jedoch nicht festgestellt werden.

Während des Dauerlaufs wurde in Abständen von 50 Thermoschockzyklen die Dokumentation des Brennraumdaches durchgeführt. Nach einer Laufzeit von 100 % wurden die Aufnahmen der Brennraumdächer hinsichtlich aufgetretener Risse untersucht und deren Anrisszyklenzahlen bestimmt. Es konnten an allen Zylindern Risse festgestellt werden. Sämtliche Risse gehen von den Zündkerzenbohrungen aus und wachsen zu den Ventilsitzringen.

Bei beiden Werkstoffvarianten ist der Riss am Steg zwischen der Zündkerzenbohrung und dem rechten Einlassventil am deutlichsten und bei der niedrigsten Lastwechselzahl zu erkennen. In Bild 14 ist das Prüfergebnis am Beispiel Zylinder 3 der beiden Legierungsvarianten dargestellt. Am Zylinderkopf aus Werkstoff A (AlSi7Cu0,5Mg - T6 Air) ist lediglich der aus Motorversuchen bekannte Riss zwischen Zündkerze und Einlassventil (ZEV-Steg) zu sehen. Bei Werkstoff B hingegen sind ausgehend von der Zündkerze sowohl in Richtung der beiden Einlass- als auch Auslassventile deutliche Risse erkennbar. Der erste Anriss am ZEV-Steg Werkstoff B (AlSi6Cu4-T7-water) trat bereits bei 30 % der Laufzeit auf. Bei Werkstoff A hingegen wurde der erste Anriss erst bei 60 % der Laufzeit und damit der doppelten Lastwechselzahl festgestellt.

Abstract

Innovative Testing Concept for the Determination of the Thermo-Mechanical Fatigue of Cylinder Heads. During the design process of cylinder heads, evaluation of thermo-mechanical fatigue plays an essential role. The IABG thermal cylinder head test rig presents an innovative method for assessing and optimizing cylinder heads with respect to their service strength against thermo mechanical fatigue at a very early stage in the development process. The test rig makes it possible to reduce the testing time and costs significantly in comparison with standard test methods, thus shortening the development time for new cylinder head designs. The test rig's novel, open design also makes it possible to detect crack initiation and investigate the propagation of cracks in the pent roof during thermo shock cycles for the very first time. Inspection procedures do not require the disassembly of the entire engine for fueled operation. The present article exemplifies this new test concept concerning thermo-mechanical fatigue on cylinder heads including the results of an experimental comparison of two constructive identical cylinder heads with different aluminum cast alloys.

Der frühe Anrisszeitpunkt der ersten Stegrisse bei Werkstoff B wird auf die deutlich niedrigere Duktilität und Wärmeleitfähigkeit gegenüber Werkstoff A zurückgeführt. Auch die höhere Warmfestigkeit von Werkstoff B konnte diese Einflüsse offensichtlich nicht kompensieren. Insgesamt konnte für Werkstoff A (AlSi7Cu0,5Mg und der T6-Air-Wärmebehandlung) eine deutlich höhere Lebensdauer und ein besseres TMF-Verhalten nachgewiesen werden.

Weiterführende Untersuchungen der bisher bewerteten Werkstoffe sowie weiterer Werkstoffvarianten sind mit der vorliegenden Prüflingsgeometrie geplant, um zusätzliche Erkenntnisse über die Einflüsse der Legierung auf die Thermoschockbeständigkeit zu erhalten. Zusätzlich sollen Härteverlaufsuntersuchungen und Mikrostrukturanalysen an

den geprüften Zylinderköpfen Aufschluss über die Alterung des Materials während der Thermoschockzyklen am Prüfstand bringen.

Das Wichtigste in Kürze

Die thermischen Zylinderkopfprüfstände der IABG ermöglichen in einer innovativen Prüfmethode die frühzeitige Beurteilung und Optimierung von Zylinderköpfen hinsichtlich thermomechanischer Ermüdung. Dabei entsprechen die auftretenden Schadensbilder denen im Motorversuch. Durch die deutlich kürzeren Versuchszeiten bei gleichzeitiger Kostenreduktion sowie die Erprobung des Zylinderkopfes ohne funktionsfähigen Motor können die derzeitigen Entwicklungsprozesse maßgeblich optimiert werden. Daher hat sich diese Komponentenprüfung bereits nach kurzer Zeit als sinnvolle Ergänzung zu den Motordauerläufen etabliert und wird nicht nur in der Automobil- und Nutzfahrzeugbranche, sondern auch für Großmotoren eingesetzt. Der offene Aufbau des Prüfstandes ermöglicht erstmals eine In-situ-Detektion von Anrissen sowie eine Verfolgung des Rissfortschrittes im Brennraumdach. Aufgrund der Prüfmöglichkeit in einem sehr frühen Entwicklungsstadium der Zylinderköpfe können zuverlässige Vergleiche unterschiedlicher Konstruktionsvarianten und Werkstoffe zu einem deutlich früheren Zeitpunkt durchgeführt werden als bisher.

Mit dem dargestellten Variantenvergleich von konstruktiv identischen Zylinderköpfen aus unterschiedlichen Werkstofflegierungen konnten die Unterschiede in der Bauteillebensdauer unter Thermoschockbelastung für zwei Aluminium-Silizium-Legierungen mit unterschiedlichem Kupfergehalt sowie unterschiedlichen Wärmebehandlungen aufgezeigt werden. Auf diese Weise konnte erstmals mit vertretbarem Aufwand direkt am Bauteil eine

Untersuchung verschiedener Werkstoffe in Bezug auf die Lebensdauer unter thermischer Belastung durchgeführt werden.

Literatur

- 1 F. Achatz, S. Rödling, J. Fröschl, J. Gärtner: Thermomechanische Ermüdung von Zylinderköpfen: Bauteilprüfstand, MTZ (2009), No. 12, S. 930-934
- 2 F. Achatz, S. Rödling, J. Fröschl: Zeitgeraffte und kostenoptimierte Bauteilprüfung an Zylinderköpfen, Materials Testing 52 (2010), No. 7-8, S. 502-507
- 3 H.-J. Christ: Wechselverformung von Metallen, Springer-Verlag, Berlin (1991)
- 4 W. Ramberg, W. R. Osgood, Description of stress-strain curves by three parameters, NACA Technical Note No. 902 (1943)
- 5 J. Lemaitre, J. L. Chaboche: Mechanics of Solid Materials, Cambridge University Press, Cambridge (1990)
- 6 K. N. Smith, P. Watson, T. H. Topper: A stress-strain function for the fatigue of metals, Journal of Materials 5 (1970), S. 767-778
- 7 M. Riedler: Methodik Findung zur Simulation von thermomechanisch beanspruchten Motorbauteilen aus Aluminiumlegierungen, VDI Fortschritt-Bericht Reihe 5, Düsseldorf (2005)
- 8 Auto Bild: Renault Laguna Grandtour 2.0dCi Initiale: 100.000 km Dauertest vom 03.05.2010
- 9 T. Bischoff, S. Rödling: Zeitgeraffte und kostenoptimierte Bauteilprüfung von Zylinderköpfen unter thermischer Belastung, DVM-Workshop: Prüfmethode für Betriebsfestigkeitsversuche in der Fahrzeugindustrie, Plauen (2012)
- 10 H. Zak, B. Tonn, S. Kores: Warmfeste Aluminiumgusslegierungen für Zylinderköpfe in direktem Wettbewerb, Gießerei-Praxis (2009), No. 6, S. 199-202
- 11 S. Thalmeier: Thermomechanische Ermüdung von Aluminium-Silizium-Gusslegierungen unter ottomotorischen Beanspruchungen, Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik 52 (2009)

- 12 E. Sjölander, S. Seifeddine: The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys, Journal of Materials Processing Technology 210 (2010), S. 1249-1259
- 13 H. Koch, U. Hielscher, H. Sternau, A. J. Franke: Duktile Druckgusslegierungen mit geringem Eisengehalt, Sonderdruck Gießerei 82 (1995), No. 15, S. 1-18
- 14 F. Feikus, P. Stika, J. Huber: Auswirkung der Abschreckbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften und Eigenspannungen von Motorgussteilen, Gießerei 91 (2004), S. 46-52
- 15 B. Stauder: Reduzierung von Eigenspannungen in Zylinderköpfen, MTZ (2010), No. 9, S. 612-613

Die Autoren dieses Beitrages

Dipl.-Ing. (FH) Tobias Bischoff, geboren 1984, studierte Maschinenbau an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule in Nürnberg. Nach seinem Studium und erster Berufserfahrung ist er zum 1. Juni 2010 zur IABG mbH mit Sitz in Ottobrunn gewechselt, wo er inzwischen als Projektleiter für Betriebsfestigkeitsversuche im Bereich Test und Analysen tätig ist.

Dr.-Ing. Steffen Rödling, geboren 1973, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München und promovierte 2003 am Institut für Materialwissenschaften der Universität der Bundeswehr München in Neubiberg. Im Juli 2005 wechselte er als Projektleiter für Beanspruchungsanalysen und Betriebsfestigkeitsuntersuchungen in den Bereich Tests und Analysen der Industrieanlagen Betriebsgesellschaft mbH in Ottobrunn. Seit 2007 ist er als Leiter der Abteilung für Betriebsfestigkeit, Bauteilprüfung, Prüfstände und als stellvertretender Leiter des akkreditierten Betriebsfestigkeitslabors der IABG in Ottobrunn verantwortlich für die Entwicklung von Prüfkonzepten, die Durchführung von Bauteilerprobungen und den Betrieb von Großprüfständen.

Dipl.-Ing. Bernhard Stauder, geboren 1973, studierte Werkstoffwissenschaften an der Montanuniversität Leoben in Österreich. Nach dem Studium trat er bei der damaligen VAW Mandl&Berger GmbH, der heutigen Nemak Linz GmbH, in Linz/Österreich als Prozessingenieur in das Berufsleben ein. Von 2005 bis 2011 war er Leiter der Prozessentwicklung und damit für Material- und Wärmebehandlungsentwicklung und die gießtechnische Entwicklung und Optimierung in zahlreichen Bauteilprojekten verantwortlich. Seit 2012 ist er für den Bereich Technologie und Simulation bei Nemak Linz zuständig.

You will find the article and additional material by entering the document number MP110384 on our website at www.materialstesting.de