

Thermisch isolierte Gaskanäle in Zylinderköpfen zur Verbesserung des Motorverhaltens

Rolf Gosch¹⁾, Franz Josef Feikus²⁾, Bernhard Stauder¹⁾, Jurij Gontarev¹⁾, Michael Rafetzeder¹⁾,

1) Nemak Linz GmbH

2) Nemak Europe GmbH

Kurzfassung

Die mit der Leistungssteigerung u.a. aufgrund von Downsizing einhergehende größere Energiedichte bringt Zylinderköpfe bei der Verwendung herkömmlicher Aluminium-Gusslegierungen nicht nur an die Grenzen der mechanischen Belastbarkeit. Bei Motorkonstruktionen mit hoher Integration, z.B. mit integrierten Abgassammelkanälen, hat dies auch weitergehende thermodynamische Auswirkungen. Solche langen Abgaskanäle mit großen Oberflächen führen über das Kühlwasser eine beträchtliche Wärmemenge ab.

Für Ottomotoren wäre ein verminderter Wärmeeintrag ins Kühlmedium wünschenswert, weil dadurch für den Vollastbetrieb die ohnehin begrenzte Fläche des Kühlers nicht weiter vergrößert werden muss. Für Dieselmotoren ist eine Anhebung der Abgastemperatur häufig erwünscht. Der Turbolader könnte von einem höheren Enthalpieangebot profitieren, ebenso ist eine verminderte Wärmeabgabe in der Aufwärmphase für die Effizienz des Abgasnachbehandlungssystems förderlich.

In der Vergangenheit gab es zahlreiche Ansätze zur Isolierung des Abgasstranges, von „Portlinern“ [1,2] über diverse Beschichtungen bis zu Stahlblecheinsätzen [3], die allerdings nie eine Serienreife für PKW-Anwendungen erlangt haben.

In einer Kooperation mit der Firma Kühn ist es Nemak gelungen, eine isolierende Email-Beschichtung für komplexe Abgaskanäle zu entwickeln, die die gewünschte Isolierwirkung erzielt und gleichzeitig die hohen Anforderungen hinsichtlich der thermischen Stabilität erfüllt. Der entscheidende Entwicklungsschritt bestand darin, die Zusammensetzung der Emaille maßgeschneidert auf die Aluminium-Gusslegierung anzupassen unter Berücksichtigung einer hohen Isolierwirkung sowie der geforderten thermischen (Wechsel-)Beständigkeit.

Die Emaille besteht aus zwei Bereichen. Über die Grundemaille wird eine perfekte Anbindung zum Aluminium sichergestellt. Die Emaille verbindet sich vollständig mit dem Grundwerkstoff Aluminium, was eine exzellente Haftung der Schicht bedingt. Die Deckemaille bildet dann die „Funktionschicht“ zum Strömungskanal, die gesondert auf die Bedürfnisse hin eingestellt werden kann.

An einem Heißgasprüfstand ist eine Isolierwirkung in Höhe von 16% gemessen worden. Zur Sicherstellung der Schichteignung für die motorische Anwendung sind umfassende Untersuchungen durchgeführt worden: Metallografische Schiffe, REM-Untersuchungen, Härte- und Rauheitsmessungen, Messung der Isolierwirkung der Schicht, Thermoschockprüfungen sowie Messungen der physikalischen Kennwerte. Ergebnisse motorischer Prüfungen stehen noch aus. Das dort festgestellte Potential wird dann über die Einführung der Beschichtung in Motoren entscheiden.

1. Motivation

Zur Erfüllung des Bedarfes hoch effizienter Antriebe können kompakte motorische Aggregate einen wesentlichen Beitrag leisten, um so die Erwartungen bezüglich Leistung und Abgasgesetzgebung zu befriedigen, aber auch den Anforderungen aus dem Fahrzeugleichtbau zu genügen. Ein Studienobjekt mit integrierten Abgaskanälen und integriertem Turbogehäuse verdeutlicht das gießtechnische Potenzial und die serienmäßige Machbarkeit einer hochintegrierten Bauweise, wenn motorische Konzepte dies erfordern. Aus dieser Idee heraus hat sich unmittelbar der Bedarf ergeben, den

Wärmehaushalt zusätzlich zu beeinflussen. Das gilt sowohl für einen Bedarf betreffend Abgastemperaturen als auch hinsichtlich des Wärmeeintrags in das Kühlwasser. Zudem kann eine hochintegrierte, kompakte Bauweise den Bedarf nach lokalem Bauteilschutz ergeben, um eine Schädigung durch den Heißgasstrom zu vermeiden. Somit ergibt sich die Anwendbarkeit einer Beschichtung immer aus einer Zusammenarbeit mit Motorenentwicklern, wenn thermodynamische Potenziale damit erhöht werden können.

2. Motorisches Potential

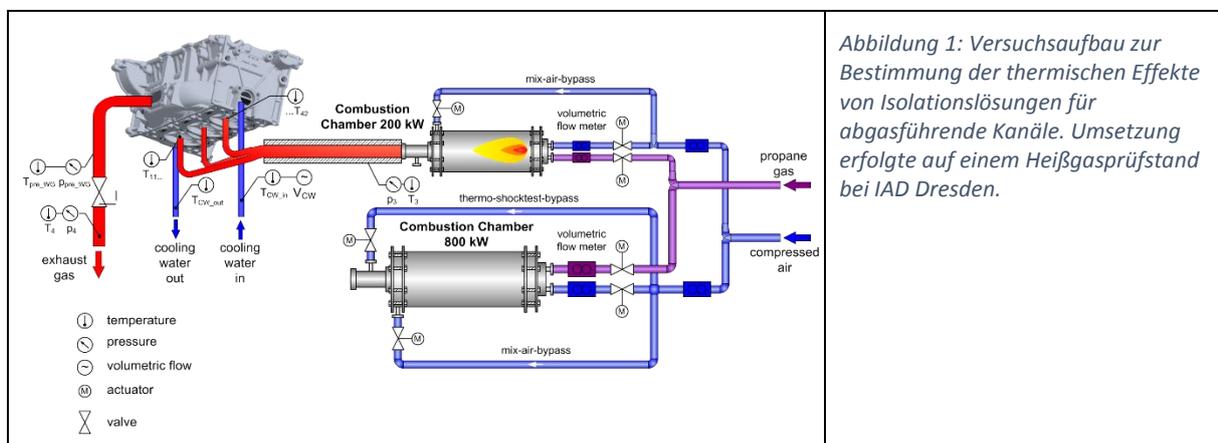
Folgende Effekte können mit der thermischen Isolationsschicht erzielt werden:

- Reduzierung Wärmeeintrag in das Bauteil (speziell für Otto-Motoren) und somit geringere erforderliche Wasserkühlleistung: Vorteil für die Dimensionierung der Kühler.
- Reduzierung Wärmeentzug des Verbrennungsgases (speziell für Diesel-Motoren): Potenzial einer höheren Enthalpie für den Turbolader und kürzeren Ansprechzeit des Katalysators.
- Spezifischer Bauteilschutz in stark angeströmten Bereichen, bzw. verminderte thermische Beanspruchung des Werkstoffes.
- Reduzierung des Strömungswiderstandes aufgrund sehr glatter Oberflächen: Potenziale für verbesserten Ladungswechsel und reduzierten Wärmeübergang auch der Ansaugluft.

Um die thermodynamischen Effekte für einen Otto- und einen Diesel-Anwendungsfall zu untersuchen, wurde das Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) mit einer entsprechenden Studie beauftragt. Ein jeweils typisches motorisches Aggregat lag den Berechnungen zugrunde. Die theoretisch zu erwartenden thermischen Effekte sind für Teil- und Vollastbetrieb ermittelt worden. Für eine effektiv wirksame Isolationslösung wurden aus diesen Berechnungen Mindestwerte für die Wärmeleitfähigkeit und die Schichtstärke herausgezogen. Die maximalen Schichtstärken sind begrenzt auf eine Größenordnung im Bereich einiger 1/10 mm um mit den üblichen Zylinderkopfkonstruktionen kompatibel zu bleiben.

Am Beispiel der ottomotorischen Anwendung mit integriertem Abgaskanal ist der Wärmeeintrag in das Kühlwasser als Kennfeld über Schichtdicke und Wärmeleitfähigkeit unter Annahme einer vollständigen Beschichtung des abgasführenden Systems dargestellt. Mit Annahmen einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 1,5 W/m*K, als typische Werte für Gläser und keramische Werkstoffe, und einer Schichtstärke von 0,4 mm ergäbe sich bei diesem Modell ein um 16% reduzierter Wärmeeintrag, was für die Kühlerauslegung bereits signifikante positive Auswirkungen hat.

Am IAD wurden Kennfelder für Teil- und Vollastbetrieb unter Vergleich von nicht beschichteten und beschichteten Prüflingen ermittelt. Die theoretischen Annahmen konnten über den Heißgas-Prüfstandstest anhand instrumentierter Bauteile verifiziert werden.



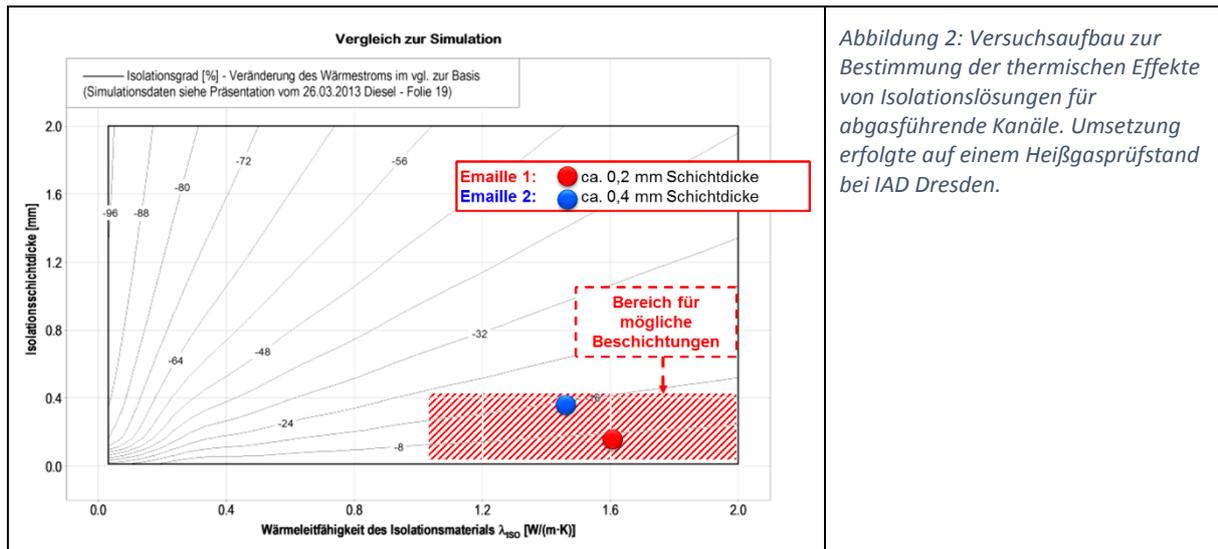


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Bestimmung der thermischen Effekte von Isolationslösungen für abgasführende Kanäle. Umsetzung erfolgte auf einem Heißgasprüfstand bei IAD Dresden.

3. Werkstoffaufbau und Eigenschaften

Das Email wird zunächst als Schlicker auf die Gussoberfläche aufgebracht und anschließend eingebrannt. Es ist mit einfachen Maßnahmen möglich, bestimmte Bereiche von der Benetzung auszunehmen oder den Schlicker auch nach dem Aufbringen zu entfernen, um Bauteilbereiche unemailliert zu belassen, wie es in Abbildung 3 auch ersichtlich ist.

Aus den Möglichkeiten des Herstellprozesses ergibt sich ein Schichtaufbau gemäß den Abbildung 4, Abbildung 5 und 6, der in der Folge näher beschrieben wird.

Das Email geht eine hervorragende, atomare Verbindung mit dem Grundwerkstoff ein (Abbildung 6). Dazu müssen die Bauteilbereiche vor Beschichtung einer speziellen Bauteilbehandlung unterzogen werden. Über den Einbrennvorgang entstehen schmelzflüssige Phasen, die aufgrund der hervorragenden Benetzung mit dem Grundwerkstoff zu der Glättung der Schichtoberfläche führen. Eine höhere Einbrenntemperatur als beim Lösungsglühen schließt sich aus, da dies zur Schädigung des Bauteiles durch Anschmelzungen führen kann, eine Mindesttemperatur von 500 °C ist allerdings einzustellen.

Eine Lösungsglühbehandlung mit Luftabschreckung ist hervorragend mit dem Emaillierprozess verträglich. Ein Abschrecken in Wasser verursacht Rissbildungen im Email. Diese Bedingungen sind bei der Bauteilwerkstoffauswahl zu berücksichtigen. Bauteile höchster Ansprüche werden von Nematik mit gängigen und geeigneten Legierungs- und Wärmebehandlungskombinationen in Serie produziert und sind für jeden Anwendungsbereich selbstverständlich verfügbar.

Aus Abbildung 4 und Abbildung 5 ist die typische Mikrostruktur einer solchen Emailleschicht ersichtlich. Diese kann aus einer Grund- und Decklage bestehen, die homogen ineinander übergehen. Wie aus der Schichttechnologie generell bekannt, können dadurch spannungsinduzierte Fehler, die bei dicken Schichten der limitierende Faktor sind, minimiert werden. Die deutlich erkennbare Porosität ist ein gewünschtes Charakteristikum der Schicht, durch die die Isolationswirkung verstärkt wird. Darüber hinaus ist die Schicht mit Partikeln und Fasern verstärkt, um einen hohen Risswiderstand zu erzeugen und damit Abplatzungen zu vermeiden.

Aufbau Abbildung 4 der Emailschrift



Abbildung 3: Ansicht des Schnittes durch einen Auslasskanalbereich mit Emailbeschichtung. Bereiche der Ventilführung wurden partiell maskiert.

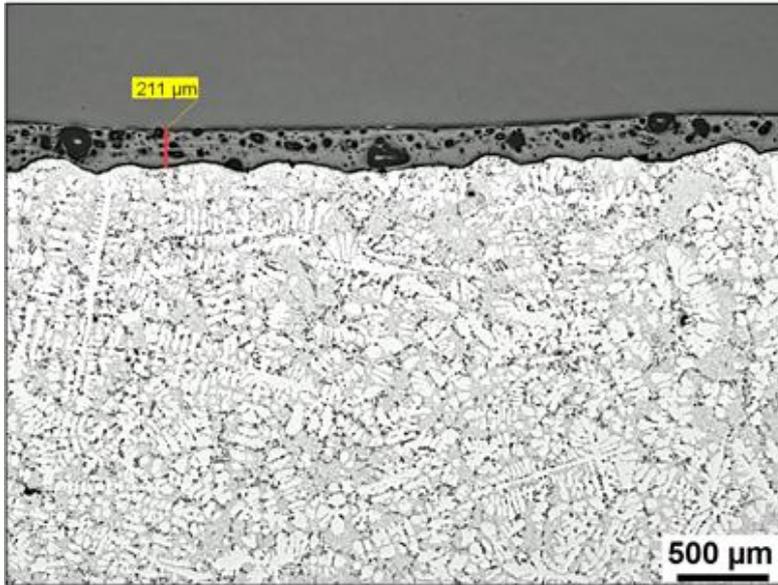
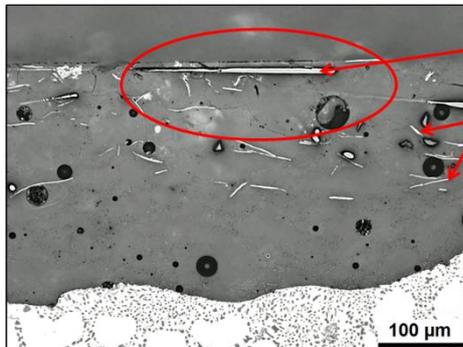


Abbildung 4: Querschliff durch einen Bauteilabschnitt mit Emaillierung. Die Glättung der ursprünglichen Gussrauheit durch das Email ist offensichtlich.



Probenbez.: ZK 1 - Beschichtung 1
 Bildname: 2014_004321
 Vergrößerung: 200:1
 Präparation: Schliff ungeätzt / Hellfeld
 Bild 6

Abbildung 5: Detailaufnahme der Mikrostruktur des Emails, bestehend aus einer Grund- und Deckschicht. Verstärkungselemente sind erkenntlich. Porosität ist erwünscht, um den Wärmeübergang zu minimieren. Es besteht eine vollständige Anbindung der Schicht zum Grundgefüge.

Verbindung Grundwerkstoff - Emaille

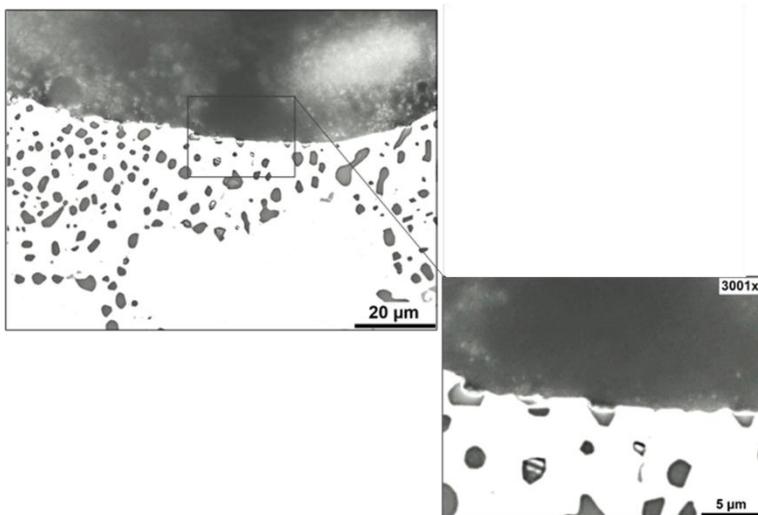


Abbildung 6: Schliffbild mit dem Detail aus Grundwerkstoff und Emailschiicht. Es liegt eine vollständige Anbindung der Schicht auf dem Grundmetall vor, sowohl zu Si- als auch zu Al-Phasen.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit der Schicht wurde aus vergleichenden Versuchen von unbeschichteten mit beschichteten Aluminiumplättchen einer Dicke von 2,5 mm und einem Durchmesser von 12,5 mm mittels der Temperaturleitfähigkeitsbestimmung nach der Laserflashmethode [4] durchgeführt. Bereits aus der Visualisierung der Laufzeiten der Wärmewelle in Abbildung 7 ist der deutliche Einfluss der Schicht auf die Geschwindigkeit der Wärmewelle, die die Grundlage für die Auswertung der Wärmeleitfähigkeit darstellt, ersichtlich. Daraus ergibt sich eine Wärmeleitfähigkeit der Schicht von

etwa $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. In dem Kennfeld für einen der Berechnung zugrunde liegenden Basismotor ergibt das in Kombination mit einer Schichtdicke von über $200 \mu\text{m}$ eine zu erwartende Reduktion des Wärmeeintrages in das Kühlwasser von bis zu 20%.

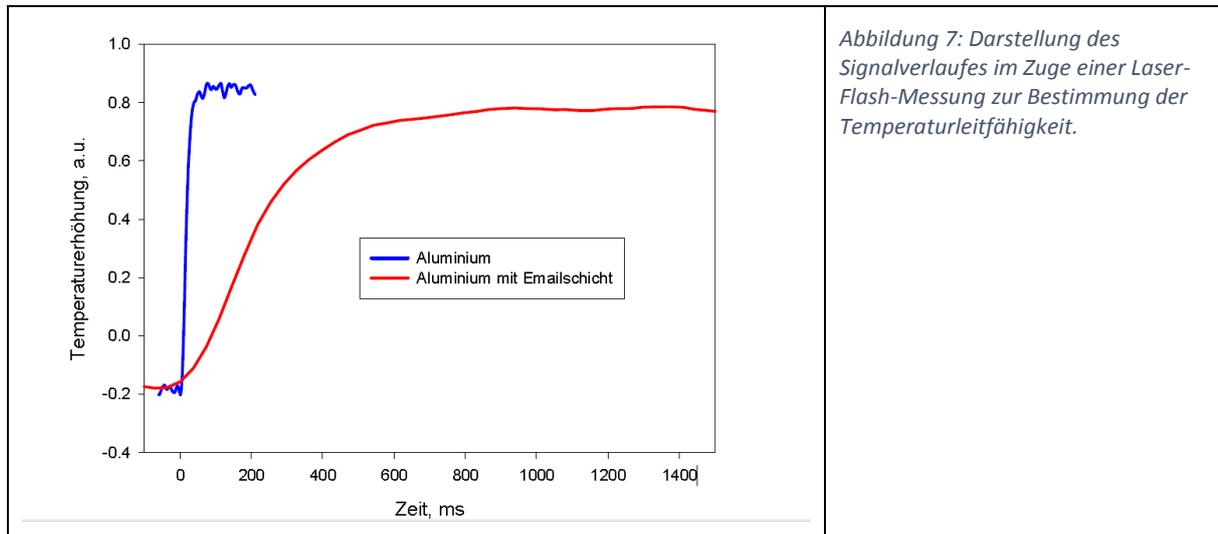


Abbildung 7: Darstellung des Signalverlaufes im Zuge einer Laser-Flash-Messung zur Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit.

4. Ergebnisse zur Haltbarkeit

Temperaturwechselbeständigkeit

Um das Verhalten der entwickelten Schicht in einem Motor mit Heißgas- und Kaltluftspülung nachzubilden, ist ein Heißgasprüfstand zum Einsatz gekommen (Abbildung 8). Die Heißgastemperatur im Austritt am Flansch wurde auf einen Wert von bis zu $840 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt. Anschließend erfolgte eine Kühlung mittels Druckluft auf eine Austrittstemperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Zykluszeit für diesen Temperaturwechsel betrug 40 s . Um nicht das Bauteil generell aufzuheizen, ist dieses nockenwellenseitig in ein Wasserbad mit ständigem Austausch gesetzt worden. Zusätzlich ist seitens des Bauteiles die Temperatur in der Kanalwand aufgezeichnet worden, die sich im Bereich von $175\text{-}220 \text{ }^\circ\text{C}$ bewegt hat.

Mit dem beschriebenen Aufbau sind mehrere Versuche durchgeführt worden. Selbst nach 3000 Zyklen konnte keine Schädigung der Schicht festgestellt werden, also weder Risse, Ablplatzungen, noch Spaltbildung. Metallografische Untersuchungen haben diese Beobachtung untermauert.

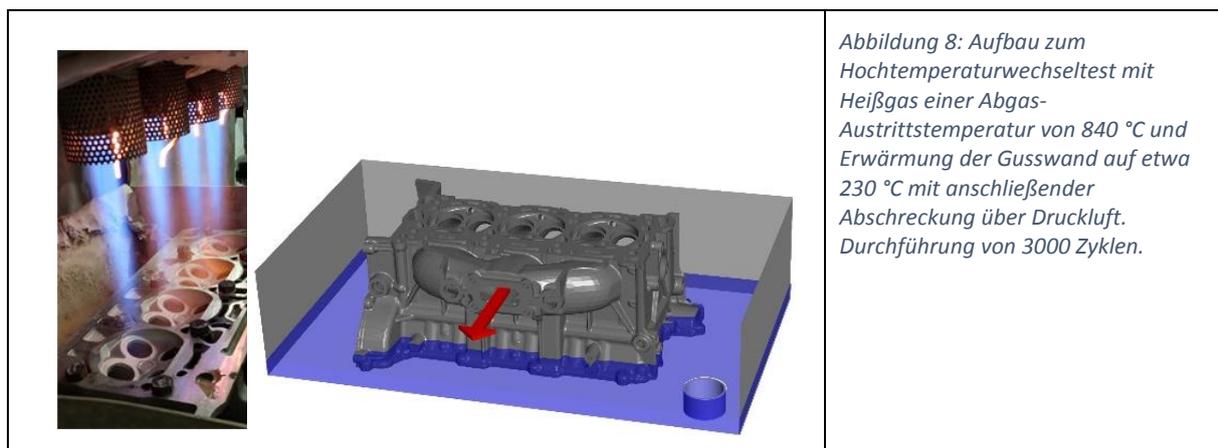


Abbildung 8: Aufbau zum Hochtemperaturwechseltest mit Heißgas einer Abgas-Austrittstemperatur von $840 \text{ }^\circ\text{C}$ und Erwärmung der Gusswand auf etwa $230 \text{ }^\circ\text{C}$ mit anschließender Abschreckung über Druckluft. Durchführung von 3000 Zyklen.

Zur zusätzlichen Absicherung der Haltbarkeit des Emails sind Abschreckversuche in flüssigem Stickstoff, also bis $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ und Wiedererwärmung auf Raumtemperatur durchgeführt worden. Unter diesen Bedingungen wird das Email extrem beansprucht, da keine Erweichung stattfindet und das Aluminium erhebliche Kontraktion aufweist. Auch bei diesem Test wurden selbst nach 11 Wiederholungen keine Schäden detektiert.

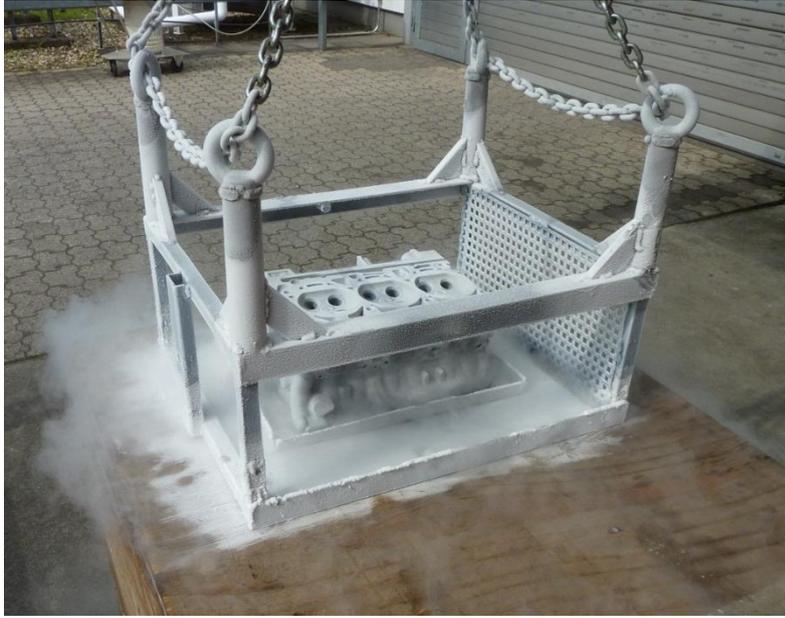


Abbildung 9: Aufbau zum Tieftemperaturwechseltest unter Abschreckung in flüssigem Stickstoff mit anschließender Wiedererwärmung auf Raumtemperatur. Durchführung von 11 Zyklen.

Die einwandfrei gute Haftung der Schicht auf der Al-Gussoberfläche und die Schichtfestigkeit wurden über die Versuche bestätigt, sodass als Fazit eine motorische Beanspruchung von der Schicht ohne Schädigung und Abplatzungen ertragen werden kann.

5. Bearbeitbarkeit

Da die Beschichtung an teilbearbeiteten Teilen und vor deren Wärmebehandlung stattfindet, sind Schnittstellen zur Bearbeitung gegeben, wenn derartige Bereiche nicht bewusst unemailliert belassen werden. Typische Bearbeitungsoperationen sind Fräsen der Flanschbereiche, Ventilsitz- und Ventilfehrungsbearbeitung und Zusatzbohrungen, wie beispielsweise für eine Abgasrückführung.

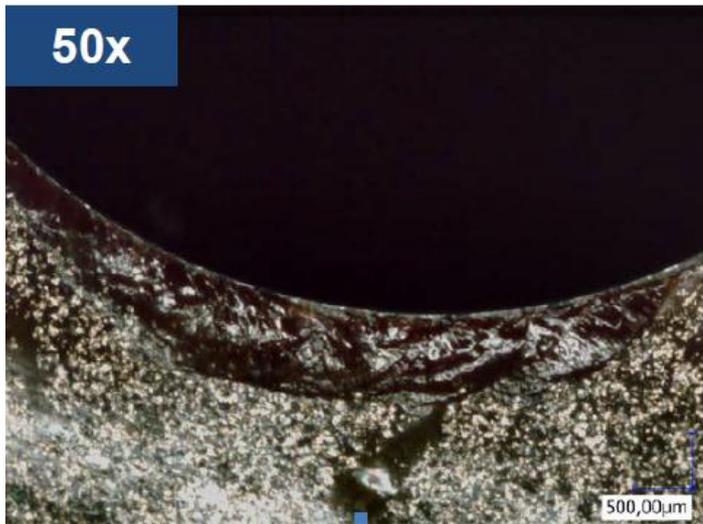
Bereits beim Trennen der Probestücke mittels Sägen konnte festgestellt werden, dass die Schicht nicht ausreißt. Somit können die Laboroperationen ohne Fixierungsmaßnahmen der Schicht durchgeführt werden.

Für belastbare Aussagen bezüglich Fräs- und Bohroperationen wurden Versuche in Kooperation mit einem Universitätsinstitut unter Verwendung von Ventilfehrungsbearbeitungswerkzeugen durchgeführt. Dabei ist die Schicht dergestalt kritisch belastet worden, indem vom Aluminium kommend durch die Schicht bearbeitet wurde. Im Anschluss daran wurden Analysen der Schicht und des Bearbeitungsrandes sowie des Werkzeuges vorgenommen. Das Versuchsteil nach den Probebearbeitungen ist in Abbildung 10a dargestellt. Der Rand einer typischen Bohrung ist in Abbildung 10b ersichtlich. Es kann von einer Absplitterung von maximal 0,5 mm ausgegangen werden, wobei der Aluminiumgrundwerkstoff nicht freigelegt wird.

Folgeversuche haben sich mit dem Anschneiden des Emails bei schrägem Bohransatz, wie es bei Ventilfehrungsbearbeitung vorkommen kann, beschäftigt. Auch hier waren keine zusätzliche Schädigung und auch eine gute Zerspanbarkeit der Schicht feststellbar. Diese Untersuchungen wurden mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Maßauswertungen unterstützt. Für eine Serienbearbeitung sind die Werkzeuge sehr wahrscheinlich dennoch auf das Email hin zu optimieren.



(a)



(b)

Abbildung 10: Darstellung der Durchführung von Bearbeitungsversuchen an emaillierten Probestücken (a) mittels eines Werkzeuges für die Ventilführungsbearbeitung. Im Detail (b) ist der Rand eines Bohrungsaustrittes zu sehen.

6. Konzept zur Serienfertigung

Da die grundsätzlichen Schichteigenschaften angefangen von der gegebenen Isolierwirkung bis über die sehr gute Haltbarkeit und Handhabung im Prozessfluss für eine Umsetzbarkeit in motorischen Anwendungen sprechen, wurde bereits eine konkrete Fertigungsplanung für den Emaillierprozess ausgearbeitet. Diese erfolgte unter der Annahme, dass ein hochbeanspruchtes Motorkonzept mit einem Stückzahlzenario von 30.000 Teilen im Jahr umgesetzt wird. Ein Hochskalieren ist jederzeit möglich.

Zusammen mit dem Entwicklungspartner Kühn sind die Prozessschritte und ein Fertigungslayout definiert worden, dessen Umsetzung bereits startet. Die zugehörige Qualitätsdokumentation ist ebenfalls in Entwicklung. Der Ablauf besteht im Wesentlichen aus: Anlieferung – Teilverbereitung – Schlickern – Einbrennen – Prüfungen – Versand. Jeder Prozessschritt ist überwacht und geeignete Prüfmaßnahmen sind validiert.

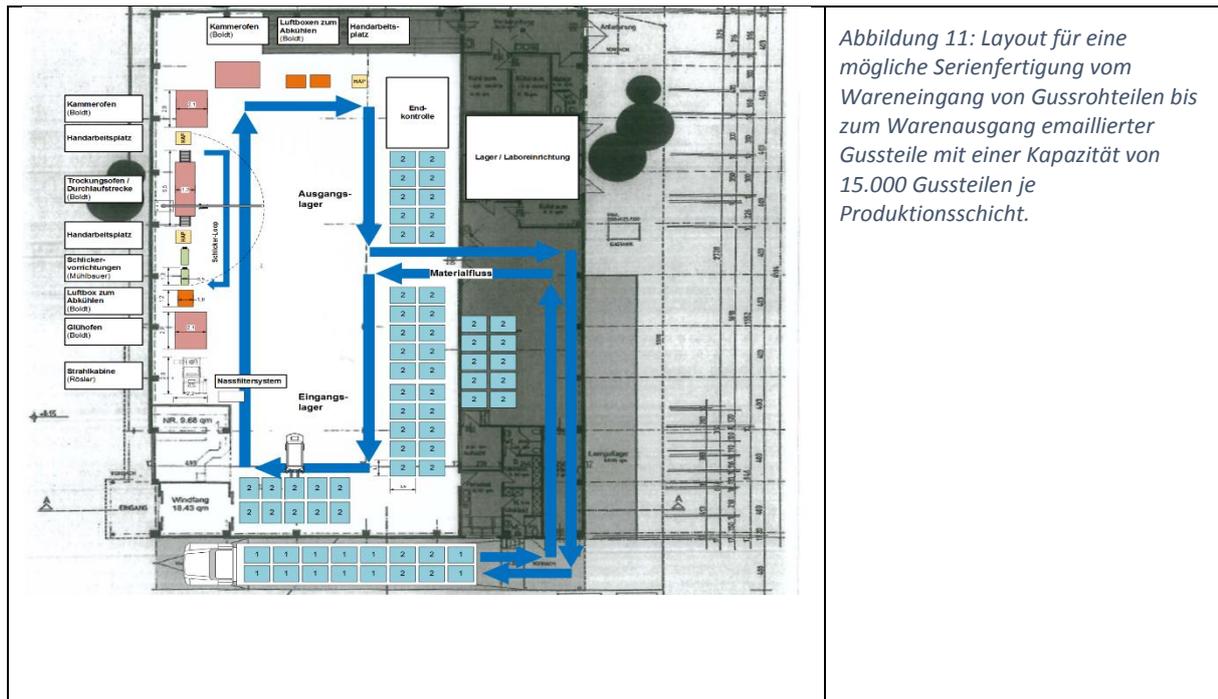


Abbildung 11: Layout für eine mögliche Serienfertigung vom Wareneingang von Gussteilen bis zum Wareneingang emaillierter Gussteile mit einer Kapazität von 15.000 Gussteilen je Produktionsschicht.

7. Zusammenfassung

Die Entwicklungsarbeiten zur Festlegung der Emailzusammensetzung, der Aufbringung des Schlickers und des Einbrennens führten zu einem serienfähigen Prozess zur Herstellung einer isolierenden Emailschiicht auf Aluminiumgussoberflächen. Theoretische Berechnungen zum motorischen Potential und deren Verifizierung auf einem Heißgasprüfstand bestätigten das motorische Potential. Untersuchungen zur Struktur der Emailschiicht und ihrer Verbindung mit dem Aluminium lassen unter allen Belastungszuständen eine sehr hohe Schichthaltbarkeit erwarten. Dies wurde durch Heiß- und Kaltthermoschocktests nachgewiesen. Begleitende Untersuchungen zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten wurden ebenfalls durchgeführt. Mit der Konzeption einer Serienfertigung und den dazu gehörigen Anlagenspezifikationen ist Nemak in der Lage, neue Motorenentwicklungen mit bedarfsgerecht thermisch isolierten Innenhohlräumen in die Serienumsetzung zu führen.

Literatur

1. Winkler, M. and Parker, D., "Ceramic Thermal Barrier Coatings Provide Advanced Diesel Emissions Control and Improved Management of Combustion-Exhaust System Temperatures," SAE Technical Paper 931106, 1993, doi:10.4271/931106.
2. Huber, J. and Heinrich, J., "2nd European Symposium on Engineering Ceramics – Section Ceramics in Internal Combustion Engines"; ISBN 978-94-010-6988-5; 1989; doi: 10.1007/978-94-009-1105-5_9; P 203-228
3. Joergl, V., Keller, P., Weber, O., Mueller-Haas, K. et al., "Influence of Pre Turbo Catalyst Design on Diesel Engine Performance, Emissions and Fuel Economy," SAE Int. J. Fuels Lubr. 1(1):82-95, 2009, doi:10.4271/2008-01-0071.
4. DIN EN 821-2(1997) Teil 2; Messung der Temperaturleitfähigkeit mit dem Laserflash (oder Wärmepuls-) Verfahren; Deutsche Fassung EN 821-2:1997