

Abschlussbericht

BMBF Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 03X3536B

Laufzeit des Teilvorhabens: 01.10.2009 – 30.06.2013

Verbundprojekt: Nano-Ferro Beschichtung für Zylinderlaufbahnen in Hochleistungsmotoren mit stabilen tribologischen Eigenschaften

Teilvorhaben: Tribologische Untersuchungen am Vollmotor

IAVF Antriebstechnik GmbH

Projektleiter und Autor: Dr.-Ing. Peter Berlet

Projektingenieur und Autor: Dipl.-Ing. Andreas Knapp

Verbundpartner:

Gramm Technik GmbH (federführend)

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Institut für Kolbenmaschinen des KIT

Audi AG

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



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

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzungen für das Vorhaben	3
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
6	Ergebnisse	6
6.1	Versuchsvorbereitungen	6
6.2	Betriebsanalysen auf dem Motorprüfstand	9
6.2.1	Einlaufverhalten	9
6.2.2	Kennfelder mit Super Plus und E25-Kraftstoff	12
6.2.3	Endoskopie der Zylinder vor dem Kaltbetrieb	19
6.2.4	Kaltstarts mit unterschiedlicher Starttemperatur und Stillstandszeit	27
6.2.5	Endoskopie der Zylinder nach den Kaltstarts	30
6.2.6	Laufzeitverhalten des Topring- und Zylinderverschleißes	38
6.3	Bauteilanalysen im Messlabor	39
6.3.1	Zylinderlaufbahnen	39
6.3.2	Kolbenringe	55
7	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	67
8	Fortschritt auf dem Gebiet an anderen Stellen	67
9	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Forschungsergebnisse	67

1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung eines Höchstleistungswerkstoffes auf der Basis nanokristallinen Eisens. Diese Werkstoff- und Verfahrensentwicklung sollte im Motorbetrieb zu einer deutlichen Verringerung der Reibleistung führen, gefolgt von Kraftstoffeinsparung und Emissionsverringerung und damit einen Beitrag zur Energieeffizienz der Motoren leisten. Gleichzeitig sollte eine Vergrößerung der Toleranz gegenüber äußeren und inneren Störungen sowie eine erhöhte Systemstabilität erreicht und somit ein Downsizing auf Basis höherer spezifischer Leistungen ermöglicht werden.

Durch die steigenden spezifischen Bauteilbelastungen rücken Betrachtungen im Nano-Bereich bei den Analysen im Labor und auf dem Prüfstand mehr und mehr in den Vordergrund. Die hochqualifizierten Entwicklungsarbeiten von IAVF dienten vor diesem Hintergrund letztendlich wiederum der Senkung von Ressourcenverbrauch und Emissionen.

Aufgabe von IAVF war es, das Projekt mit Analytikkompetenz, Messtechnik und Motorenprüfständen zu unterstützen sowie Verschleißmessungen an einem Vollmotor beizusteuern, der hinsichtlich Auslegung und Leistungsverhalten weitgehend seriennah ist.

Im Versuch sollten Verschleißmessungen mittels Radionuklidtechnik (RNT) auf dem Prüfstand durchgeführt werden. Mit der RNT können Verschleißraten von wenigen Nanometern und sogar von Bruchteilen von Nanometern pro Stunde erfasst werden. Vor der radioaktiven Markierung der Zylinder im oberflächennahen Bereich (Dünnschichtaktivierung im Zyklotron) sollten Vermessungen hinsichtlich der Topografie der Zylinderlaufbahnen durchgeführt werden. Die Vorvermessungen sind insbesondere notwendig, um durch den Vergleich mit den Messungen nach Versuch Profilveränderungen durch Verschleiß und Verformungen der Zylinder erkennen zu können. Die Topografie wird durch Mantellinienschriebe mit dem Tastschnittgerät charakterisiert.

Für den Vollmotor war eine Palette zur Aufnahme von Motor und Getriebe, Medienkühlungen für Kühlmittel, Kraft- und Schmierstoffe und Schnittstellen für die Motorsteuerung aufzubauen. Der Prüfstand musste für Leistungen bis 600 PS geeignet sein und auch extreme Fahrzeuganforderungen wie Schub/Last-Wechsel abbilden können.

Die mit der RNT gewonnenen Ergebnisse sollten zunächst eine umfangreiche tribologische Charakterisierung des Schichtverschleißes im Einlauf sowie im Drehzahl/Last-Kennfeld ermöglichen und Optimierungspotenzial offen legen. Der Schichtverschleiß sollte mit den umfangreichen Erfahrungswerten bzw. Streubändern von IAVF verglichen werden.

Für späteren Kundenbetrieb im Feld relevante Sondereinflüsse waren anschließend zu untersuchen. Hierzu zählt eine Schwachstellenanalyse z. B. hinsichtlich der sehr wichtigen Verträglichkeit in Bezug auf neue, CO₂-neutrale Kraftstoffe und hinsichtlich neuer Beanspruchungen durch Hybridisierung bzw. Teilhybridisierung der Motoren (Stichwort Start-Stopp-Verhalten).

Mit Variationen der Kühlmitteltemperatur sollte der Einfluss von Zylinderdeformationen auf den Schichtverschleiß untersucht werden.

Nach den Prüfstandsversuchen waren sowohl auf den radioaktiv markierten Zylindern als auch auf den nicht markierten Schwesterzylindern Rückvermessungen durchzuführen.

2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Die Fragestellung des Vorhabens, inwieweit neue nanokristalline Schichten die motorischen Eigenschaften verbessern können, erfordert ein Zusammenspiel vieler verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen. So musste die Werkstoffkunde zunächst Schichten definieren, die bestimmte Zusammensetzungen und Eigenschaften aufweisen sollten. Die Fertigungstechnik musste Verfahren entwickeln, die in der Lage sind, technische Bauteile wie in diesem Fall einzelne Zylinderlaufbuchsen oder ganze Motorblöcke an den gewünschten Stellen gleichmäßig mit einer stabilen Schicht zu versehen. Anschließend war ein Honverfahren auf die neue Beschichtung anzupassen.

Die zunächst hergestellten Zylinderlaufbuchsen mussten im Einzylindermotor auf einem Forschungsprüfstand auf ihre Eigenschaften vermessen werden. Hierzu zählten Reibleistung, Korrosion, Stabilität der Schichthaftung und der eventuelle Einfluss der Schicht auf den Wandwärmeübergang.

Die Schichten mit den besten Ergebnissen sollten anschließend an Vollmotoren unter Realbedingungen in Dauerlauftests sowie mittels kontinuierlichen Verschleißmessungen mit der Radionuklidtechnik (RNT) auf ihre Serientauglichkeit überprüft werden.

Diese vielfältigen Aufgaben aus verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen können in der Regel nicht von einer Institution bewältigt werden. Es wurde deshalb ein Verbundprojekt initiiert, in dessen Rahmen die spezialisierten Verbundpartner durch vernetzte Teilvorhaben zum Gesamtziel des Vorhabens beitragen sollten.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Es wurde zunächst ein Konsortium aus Verbundpartnern zusammengestellt, die auf bestimmte Disziplinen spezialisiert und darin wissenschaftlich ausgewiesen sind. Dies sind

- Gramm-Technik GmbH: Beschichtungstechnik, federführend
- Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik: Oberflächentechnologie, Werkstoffmodellierung u. Simulation, Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung
- Institut für Kolbenmaschinen des KIT (IFKM): Motorentchnik am Einzylindermotor
- IAVF Antriebstechnik GmbH: Tribologieanalytik am Vollmotor
- Audi AG: Entwicklung und Produktion von Motoren und Fahrzeugen

Der Verbundantrag wurde beim Projektträger Forschungszentrum Jülich eingereicht und mit Beginn zum 01.10.2009 genehmigt.

Bei der IAVF Antriebstechnik GmbH mussten die Werkstatt und Laborkapazitäten zur Verfügung gestellt und ein Vollmotorenprüfstand entsprechend den in der Aufgabenstellung genannten Anforderungen aufgebaut werden.

Von der Audi AG wurde ein Serienmotor mit 373 PS (274 kW) sowie serienmäßige Kolbenringe und Kolben, die für die Zylinderbeschichtung modifiziert wurden, zur Verfügung gestellt.

Der Prüfstand musste mit einer Radionuklidtechnik-Verschleißmessanlage ausgestattet werden. Das beschichtete Zylinderkurbelgehäuse wurde im Labor vorvermessen und auf jeder Zylinderbank ein Zylinder im Zyklotron radioaktiv markiert. Zusätzlich wurde der jeweilige Topring an der Lauffläche so radioaktiv markiert, dass sich die beide Reibpartner aufgrund der unterschiedlichen charakteristischen Energien ihrer Radionuklide messtechnisch voneinander unterscheiden ließen. Dadurch konnte das Verschleißverhalten der unbeschichteten Topringlaufflächen sowie der beschichteten Zylinderlaufbahnen gleichzeitig in einer Zweikomponenten-Messung untersucht werden.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Zur Gewichtsreduzierung werden für Motorblöcke mit unbeschichteten Zylinderlaufbahnen seit geraumer Zeit übereutektische AlSi-Legierungen eingesetzt. Während des Einlaufs durchlebt das oberflächennahe Material eine drastische Veränderung. Diese ist für geringen Verschleiß und kleine Reibleistung ausschlaggebend [1].

Immer häufiger erzeugen neu entwickelte Motoren im System Kolbenring - Zylinder allerdings so hohe Reibleistungsdichten, dass eine weitere Steigerung der spezifischen Leistung nicht mehr möglich erscheint. Die werkstofftechnischen Probleme der AlSi-Legierungen für Zylinderlaufbahnen werden deutlich, wenn man den Prozess der Herstellung näher betrachtet:

Um eine kaltfress- und verschleißbeständige Lauffläche zu erhalten, hat sich in der Praxis ein zweistufiges Honverfahren, gefolgt von einem Freilegungsschritt bewährt [2].

Nach der Freilegung der in der α -Aluminiummatrix ausgeschiedenen Siliziumprimärpartikel ragen die Siliziumkristalle einige hundert Nanometer aus der Aluminiummatrix heraus. Diese Anfangstopographie hat zu der Vorstellung geführt, dass der Kolbenring von den hervorstehenden Si-Kristallen getragen wird [3,4]. Dieses einfache Modell ist jedoch durch Messungen des Zylinderverschleißes mit Hilfe der Radionuklidtechnik (RNT [5,6]) fraglich geworden. Mit dieser Methode, mit der Verschleißpartikel im Motoröl online detektiert werden können [7], zeigt sich, dass schon während des Einlaufs aluminiumhaltige Verschleißpartikel in den Ölkreislauf gelangen. Insofern muss entweder der Kolbenring mit der Aluminiummatrix in Berührung kommen oder es müssen über den Schmierfilm Kräfte übertragen werden, so dass auch aus der tiefer liegenden Aluminiummatrix Verschleißpartikel generiert werden.

Neuere Erkenntnisse zu tribologischen Mechanismen in der Lauffläche von monolithischen Zylinderkurbelgehäusen mit Hilfe von oberflächenanalytischen Methoden sind in [1] beschrieben worden. Die Topographie eines auf dem Motorenprüfstand gelaufenen Zylinderkurbelgehäuses wurde mit dem Rasterkraftmikroskop (RKM) untersucht. Zunächst fällt auf, dass die Siliziumprimärkristalle nicht mehr aus der Aluminiummatrix herausstehen. Des Weiteren hat die Aluminiumoberfläche eine „feinkörnige Struktur“ ausgebildet, die im Neuzustand nicht vorhanden war und aus einer Vielzahl von Partikeln unterschiedlicher Größe besteht.

Die Mikrostruktur des oberflächennahen Volumens wurde mit der fokussierten Ionenstrahlanalyse (FIB) untersucht. Auch hier sind in die Oberfläche eingebettete Partikel zu erkennen. Diese Partikel sind zum großen Teil Siliziumpartikel in der Größenordnung von einigen zehn Nanometern bis einigen Mikrometern.

Die Elementzusammensetzung des oberflächennahen Volumens (die ersten ca. 0,01 bis maximal rund 7 Mikrometer unterhalb der Oberfläche) wurde mit Augerelektronenspektroskopie (AES) ermittelt. Zusammen mit dem Abtrag von Material mittels Ionenkanone wurde ein Elementtiefenprofil erzeugt. Die Veränderungen an der Oberfläche umfassen deutliche Veränderungen der Zusammensetzung der Elemente auf den ersten Mikrometern in die Tiefe der Laufbahn. Während im Neuzustand nur in einer Zone von rund 100 Nanometern fertigungsbedingte Einträge von Fremdelementen nachgewiesen werden konnten, findet man in den aluminiumhaltigen Bereichen der gelaufenen Zylinderoberflächen Sauerstoff und Kohlenstoff sowie die „Fingerabdrücke“ von Öladditiven (z. B. Kalzium) bis in Tiefen von mehr als 6 Mikrometern. Tiefenprofilmessungen auf den Siliziumprimärpartikeln zeigen vergleichsweise nur geringe Änderungen in der Elementzusammensetzung, hauptsächlich Oxidation. Die wesentlichen Veränderungen der Zusammensetzung spielen sich in den aluminiumhaltigen Bereichen der Oberfläche ab:

- Während des Einlaufs wird die Aluminiummatrix durch das Einbetten von zumeist Siliziumpartikeln und plastische Durchmischung mit Ölbestandteilen stark verändert. Dadurch erfolgt eine Steigerung der Verschleißbeständigkeit der Aluminiummatrix. Dieser Vorgang wird unter anderem als Tribomutation oder auch als Bildung des 3. Körpers bezeichnet [8, 9].
- Die Freilegung der Siliziumprimärkristalle ist notwendig, um diese Prozesse während des Einlaufs einzuleiten. Im eingelaufenen Zustand ist eine Freilegung der Si-Kristalle nicht mehr essentiell.
- Die primäre Wirkung von Öladditiven findet im oberflächennahen Bereich der Al-Matrix statt.

Das tribologisch erzeugte oberflächennahe Material – eine Kombination aus Metallmatrix und Si-Nanokristallen sowie Einträgen aus dem Öl – soll während des Einlaufs optimale Schereigenschaften entwickeln und durch permanente Neubildung von Nanokristallen das Gleichgewicht erhalten. Wird das System aber durch zu hohe Energieeinträge an seine Gleichgewichtsgrenzen gebracht, kann der Selbstorganisationsmechanismus nicht aufrechterhalten werden. Das System erzeugt drastisch hohen Verschleiß und fällt aus.

Um bei weiter steigender Leistungsdichte der Motoren einen stabilen und störungsunempfindlichen Betrieb bei gleichzeitig niedriger Reibung und kleiner Verschleißrate zu gewährleisten sowie die auf Eisen optimierten Additivreaktionen voll auszunutzen, sollen die Zylinder einen nanokristallinen Überzug aus elektrolytischem Eisen erhalten. Da der letzte Bearbeitungsschritt eine wichtige Rolle

für die günstige Konditionierung der tribologischen Funktionsflächen spielt [10], muss auch das Honverfahren auf die Beschichtung angepasst werden.

Literatur

- [1] M. Dienwiebel, M. Scherge, Neue Erkenntnisse zur Tribologie von übereutektischen AlSi-Zylinderlaufflächen, MTZ 68(2007)3.
- [2] J. Schmid, Moderne Leichtmetallwerkstoffe für den Motorenbau und deren Endbearbeitung durch Honen. In: MTZ 59 (1998) 248.
- [3] P. Stocker, F. Rückert, K. Hummert, Die neue Aluminium-Silizium Zylinderlaufbahn Technologie für Kurbelgehäuse aus Aluminiumdruckguß, MTZ 58 (1997) 502.
- [4] A. Sach, F.-J. Feikus, Laufflächenbildung in Aluminium-Motorblöcken, MTZ Sonderausgabe Werkstoffe (1998/1999) 72.
- [5] M. Scherge, K. Pöhlmann and A. Gervé, Wear measurement using radionuclide-technique (RNT), Wear, 254(2003)9, 801-817.
- [6] F. Ditrói, S. Takács, F. Tárkányi, M. Reichel, M. Scherge and A. Gervé, Thin layer activation of large areas for wear study, Wear, 261(2006)11-12, 1397-1400.
- [7] M. Scherge, J.M. Martin and K. Pöhlmann, Characterization of wear debris of systems operated under low wear-rate conditions, Wear, 260(2006)4-5, 458-461.
- [8] B. Kehrwald: Untersuchung der Vorgänge in tribologischen Systemen während des Einlaufs, Dissertation Universität Karlsruhe (1998).
- [9] M. Godet, Third-bodies in tribology, Wear, 136(1990)1, 29-45.
- [10] P. Berlet, Einfluss spanender Endbearbeitungen mit geometrisch unbestimmten Schneiden auf tribologische Funktionsflächen im Motorenbau sowie auf Reibung und Verschleiß, Dissertation Universität Karlsruhe, Logos-Verlag Berlin (2009).

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte hauptsächlich mit den Projektpartnern im Verbundprojekt. Der Honprozess des Serienmotors wurde von der Firma Nagel Maschinen und Werkzeugfabrik GmbH im Unterauftrag auf die beschichteten Buchsen sowie die Vollmotor-Zylinderkurbelgehäuse angepasst.

6 Ergebnisse

6.1 Versuchsvorbereitungen

Entsprechend der Planung und in Abstimmung mit den Projektpartnern hat die IAVF Antriebstechnik GmbH einen Audi-Serienmotor auf einer IAVF-Motorpalette aufgebaut sowie Anschlüsse und Adapter für die Einbindung der Radionuklidtechnik-Verschleißmessanlage und des Ölverbrauchsmessgerätes in den Ölkreislauf des Motors angefertigt.

Die Versuchsteile, bestehend aus dem beschichteten Kurbelgehäuse sowie den Kolbenringen, wurden im Labor vermessen und anschließend radioaktiv markiert.

Der Motor wurde auf einem voll automatisierten Motorenprüfstand mit Konditioniereinrichtungen aufgebaut und die Funktionswerte überprüft.

Danach wurden die Versuchsteile in den Motor eingebaut und die Verschleißmessanlage sowie das Ölverbrauchsmessgerät kalibriert, bevor mit den Messungen begonnen wurde.

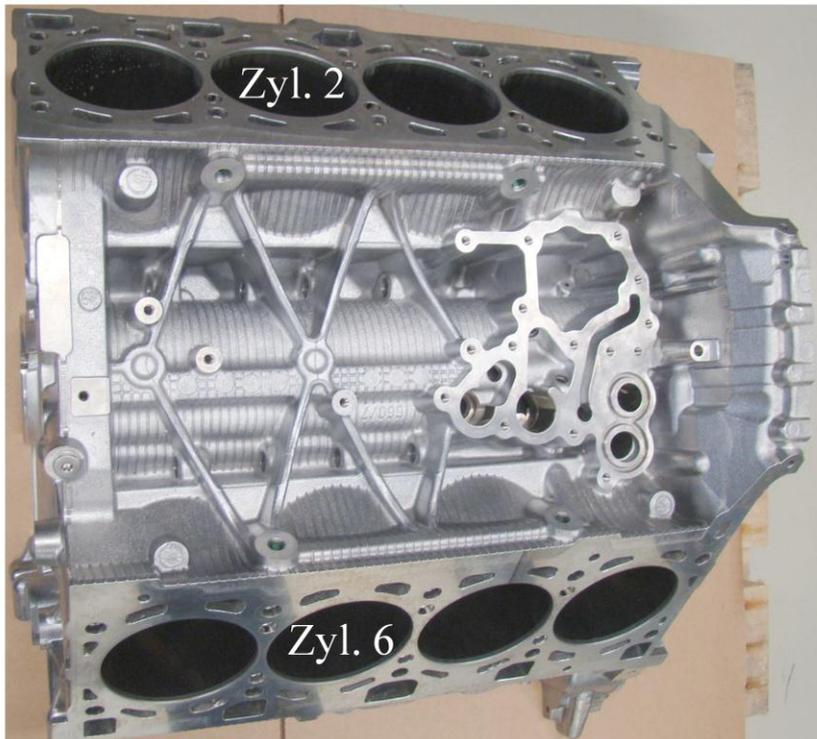
Vorbereitung Verschleißmessung Zylinderlaufbahnen

radioaktive Markierung: Zylinder 2 und 6

Zylinderlaufbahnen mit Ferrosil[®]-Beschichtung

Audi V8 FSI

Nr. CDR11422

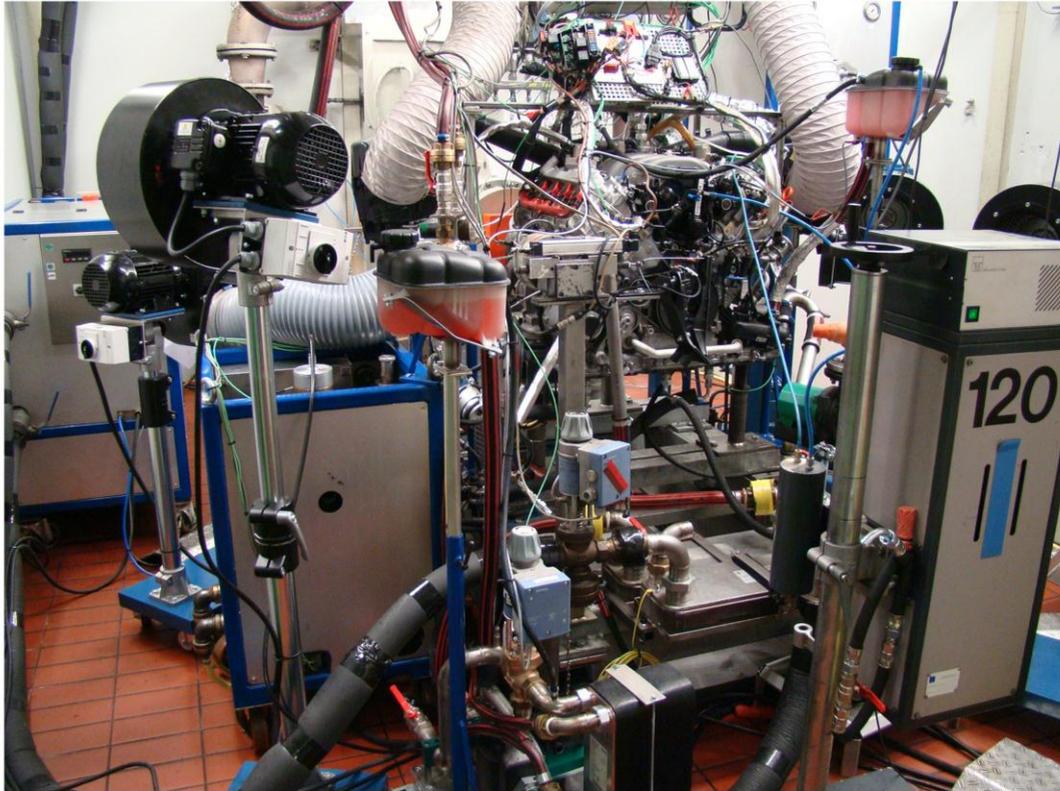


Positionen für die radioaktive Markierung der beschichteten Laufbahnen von Zylinder 2 und 6

Motor und Messtechnik im Prüfstand

IAVF-Messtechnik für Verschleiß und Ölverbrauch

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Motoraufbau mit Radionuklidtechnik-Verschleißmessanlage und Ölverbrauchsmessgerät, links Durchflussmesskopf der Verschleißmessanlage, rechts Ölverbrauchsmessgerät

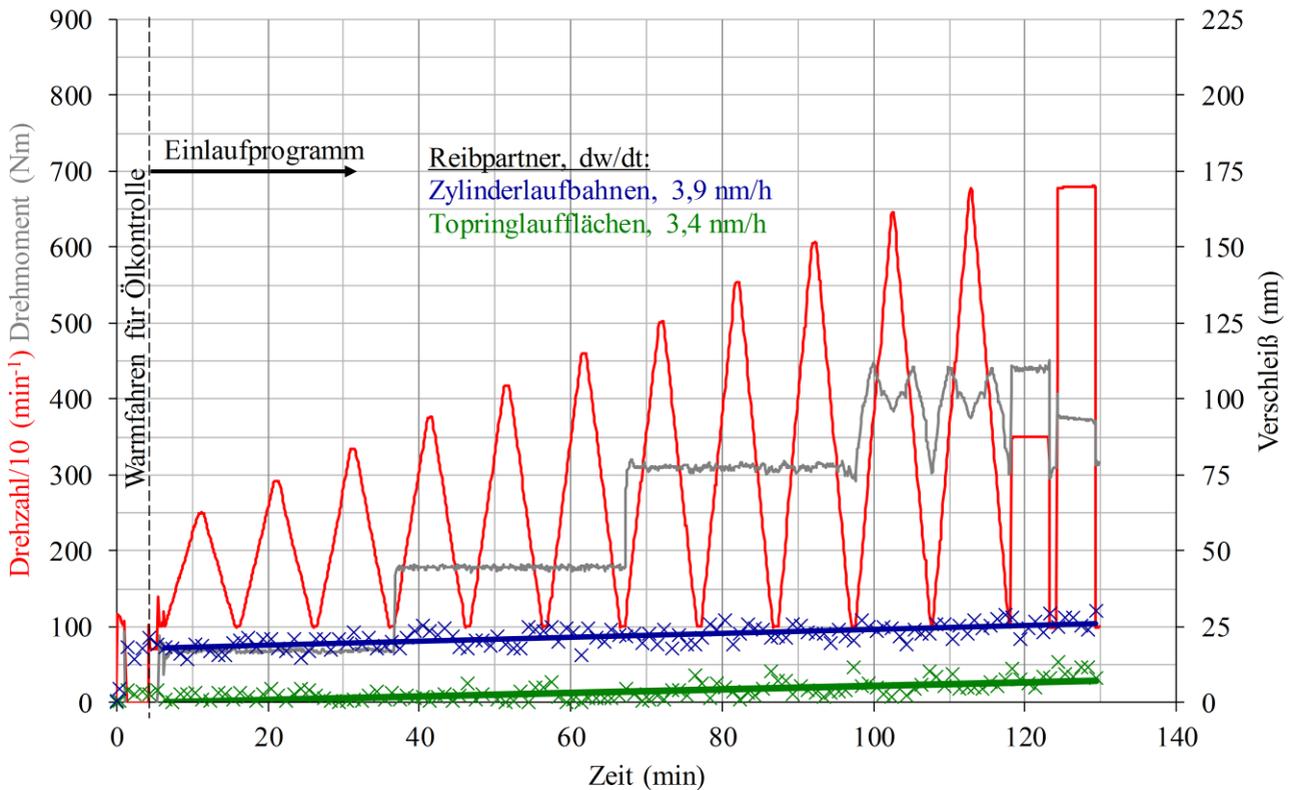
6.2 Betriebsanalysen auf dem Motorprüfstand

Die kontinuierlichen hoch auflösenden Verschleißmessungen mit der Radionuklidtechnik an den beschichteten Zylinderlaufbahnen und den Topringaufläen auf dem Vollmotorenprüfstand sind auf den folgenden Seiten detailliert dargestellt.

Verschleiß im Einlauf / Zeit

Zylinderlaufbahnen und Topringlaufflächen,
Audi-Einlaufprogramm, Super-Plus Kraftstoff

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



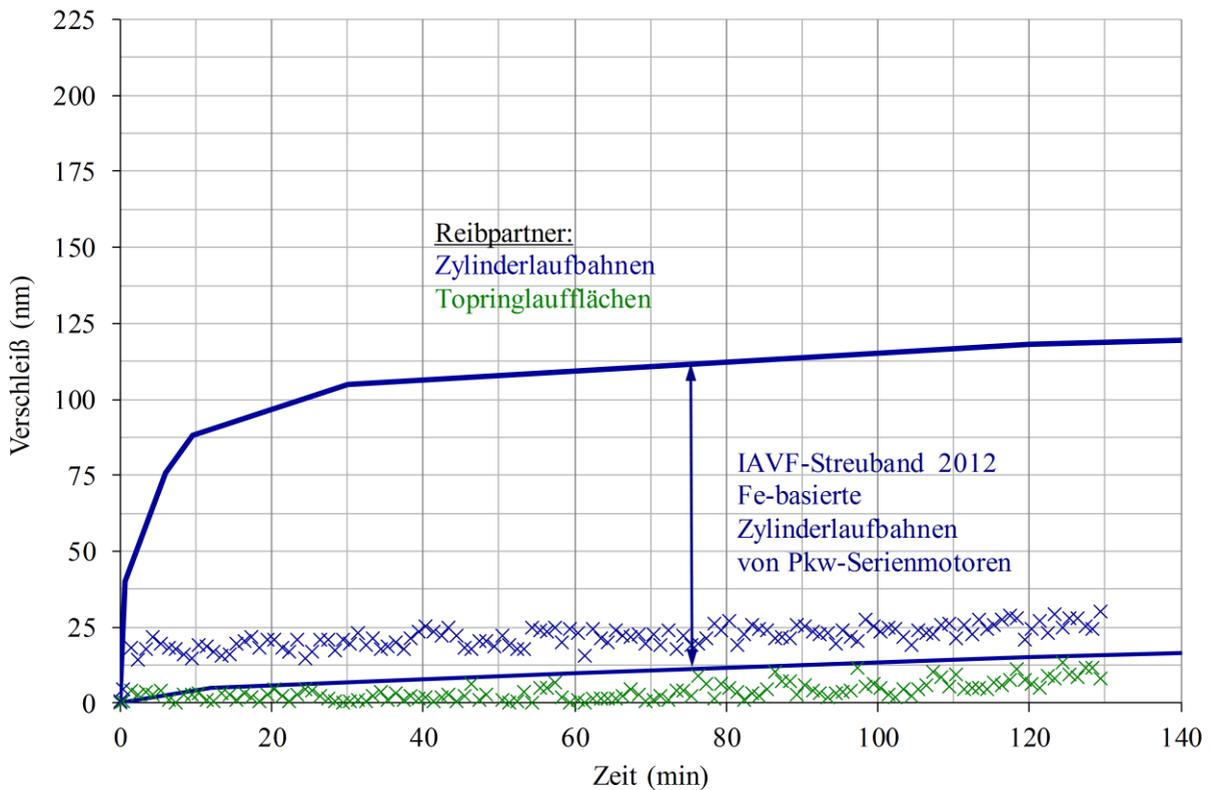
Drehzahl, Drehmoment, Verschleiß und Verschleißgeschwindigkeiten der beschichteten Zylinderlaufbahnen sowie der Topringlaufflächen über der Zeit im Audi-Einlaufprogramm

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Verschleiß im Einlauf / Zeit

Zylinderlaufbahnen und Topringlaufflächen

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



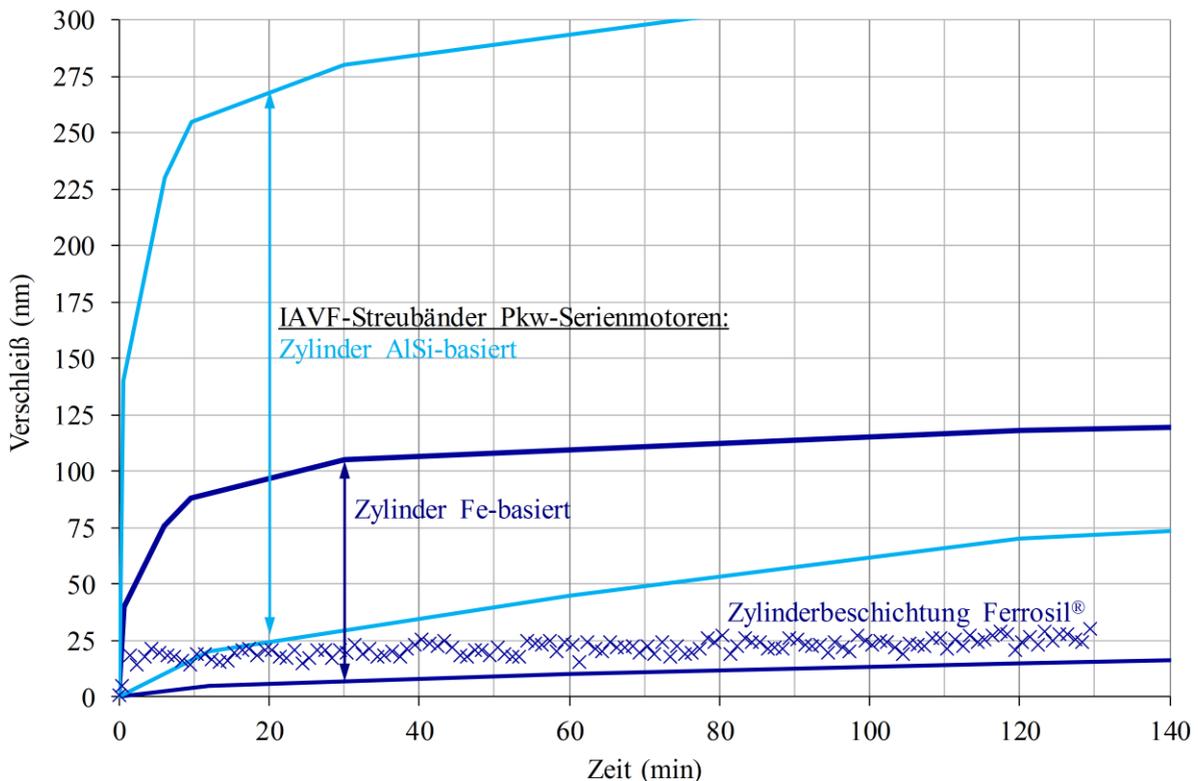
Verschleiß der beschichteten Zylinderlaufbahnen und der Topringlaufflächen über der Zeit im Audi-Einlaufprogramm sowie IAVF-Streuband des Verschleißes eisenbasierter Zylinderlaufbahnen von Pkw-Serienmotoren

Erläuterungen und Interpretationen auf der folgenden Seite

Verschleiß im Einlauf / Laufzeit

Zylinderlaufbahnen

Pkw-Ottomotoren



Verschleiß der beschichteten Zylinderlaufbahnen sowie IAVF-Streubänder des Verschleißes AlSi- und Fe-basierter Zylinderlaufbahnen im Einlauf von Pkw-Serienmotoren

Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 5 - 7 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil®-Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 0 - 2 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228

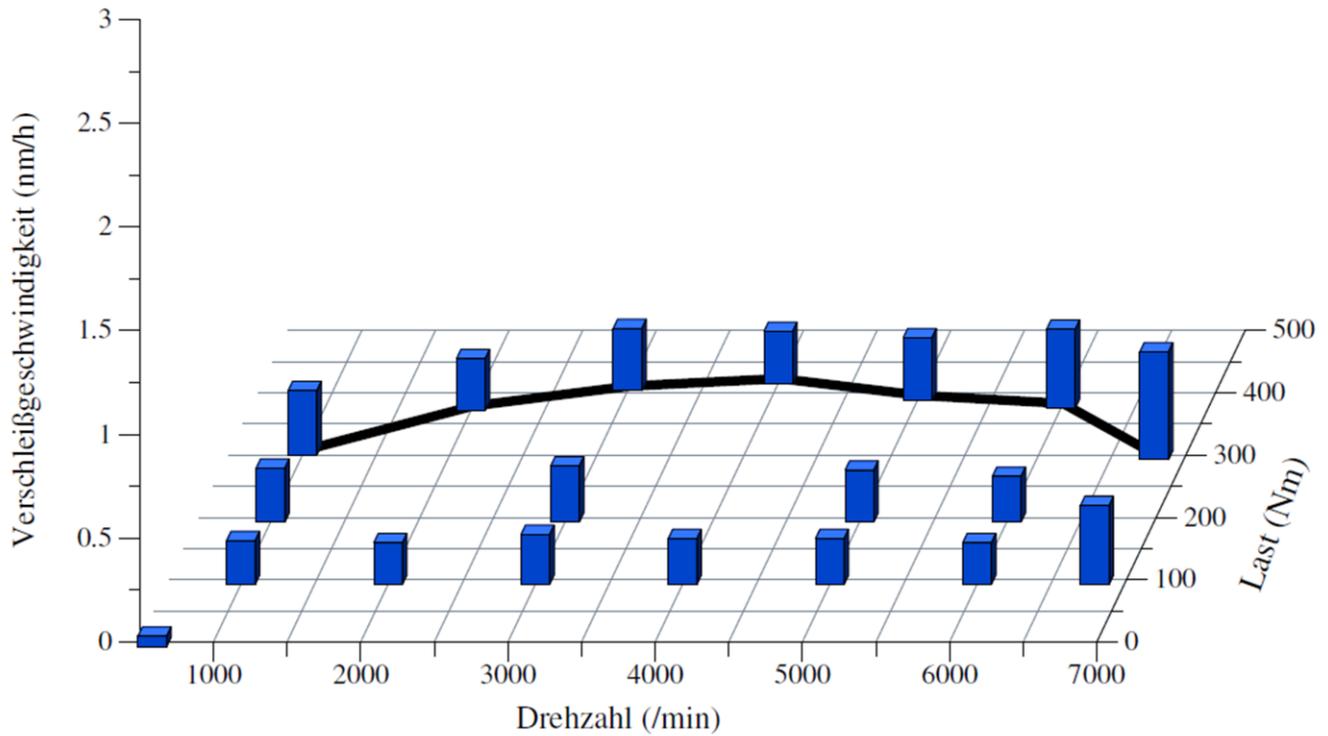
Im Audi-Einlaufprogramm ist der Verschleiß der Ferrosil-Laufschicht sehr niedrig und liegt mit Super-Plus Kraftstoff im unteren Bereich des IAVF-Streubandes für Pkw-Serienmotoren. Das Verschleißniveau erreicht bereits mit den Kolbenringen für die AlSi-Zylinderlaufbahnen des Serienmotors das Niveau konkurrierender Spritzschichten auf Eisenbasis und liegt etwa eine Zehnerpotenz unter dem unbeschichteter übereutektischer AlSi-Zylinderlaufbahnen.

Der Einlaufverschleiß der Topringe, bei denen es sich um nitrierte Stahlringe ohne Laufflächenbeschichtung handelt, ist erwartungsgemäß ebenfalls sehr gering.

Verschleiß / Drehzahl / Last

Zylinderlaufbahnen mit Ferrosil[®]-Beschichtung

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



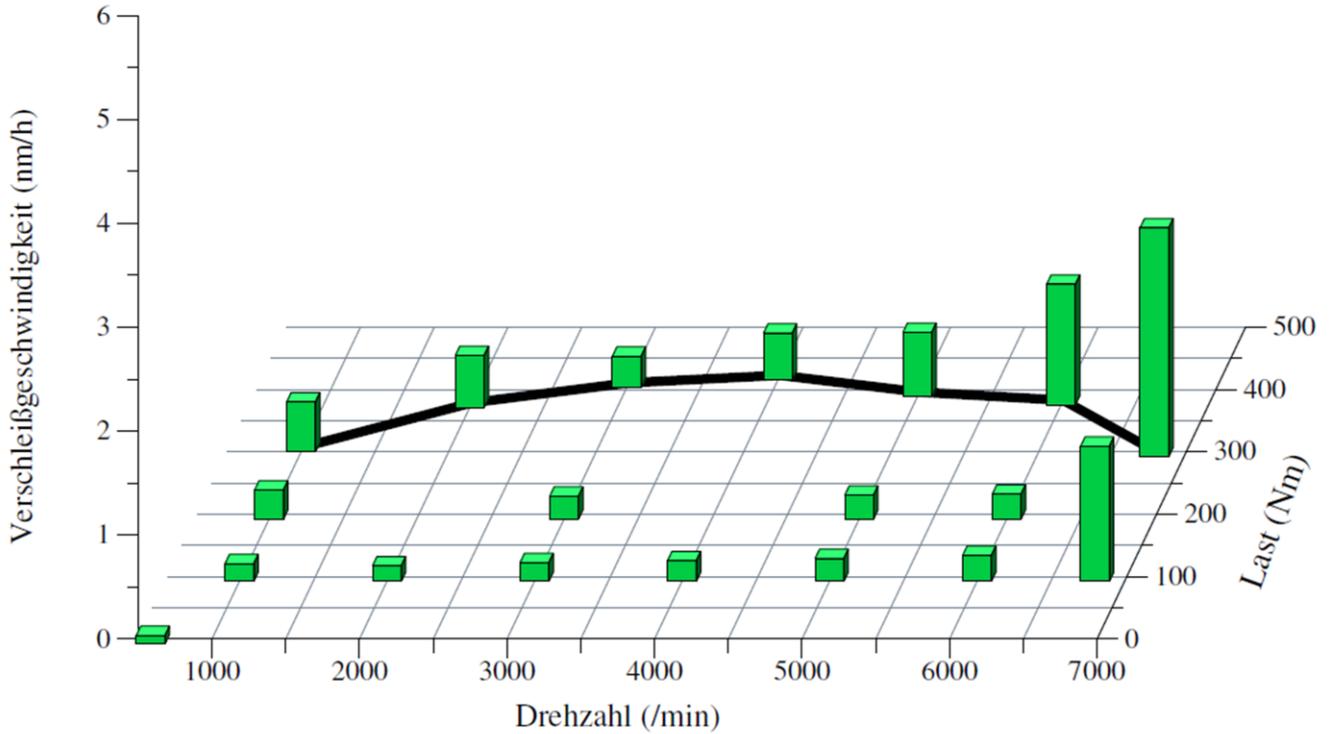
Verschleißgeschwindigkeiten der beschichteten Zylinderlaufbahnen mit Super Plus-Kraftstoff über Drehzahl und Drehmoment

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Verschleiß / Drehzahl / Last

Topringlaufflächen

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



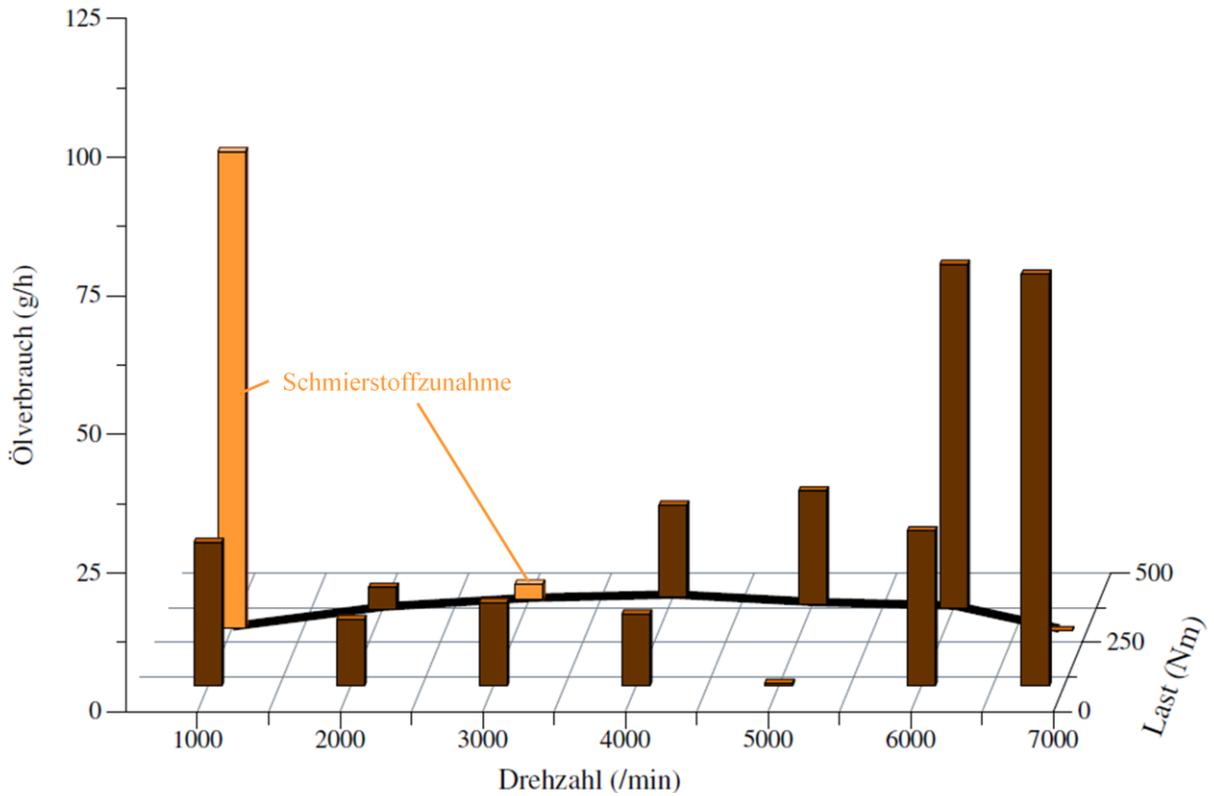
Verschleißgeschwindigkeiten der Topringlaufflächen mit Super Plus-Kraftstoff über Drehzahl und Drehmoment

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Schmierstoffverbrauch / Drehzahl / Last

Zylinderlaufbahnen mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
Kolbenringe: Serienringpaket

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



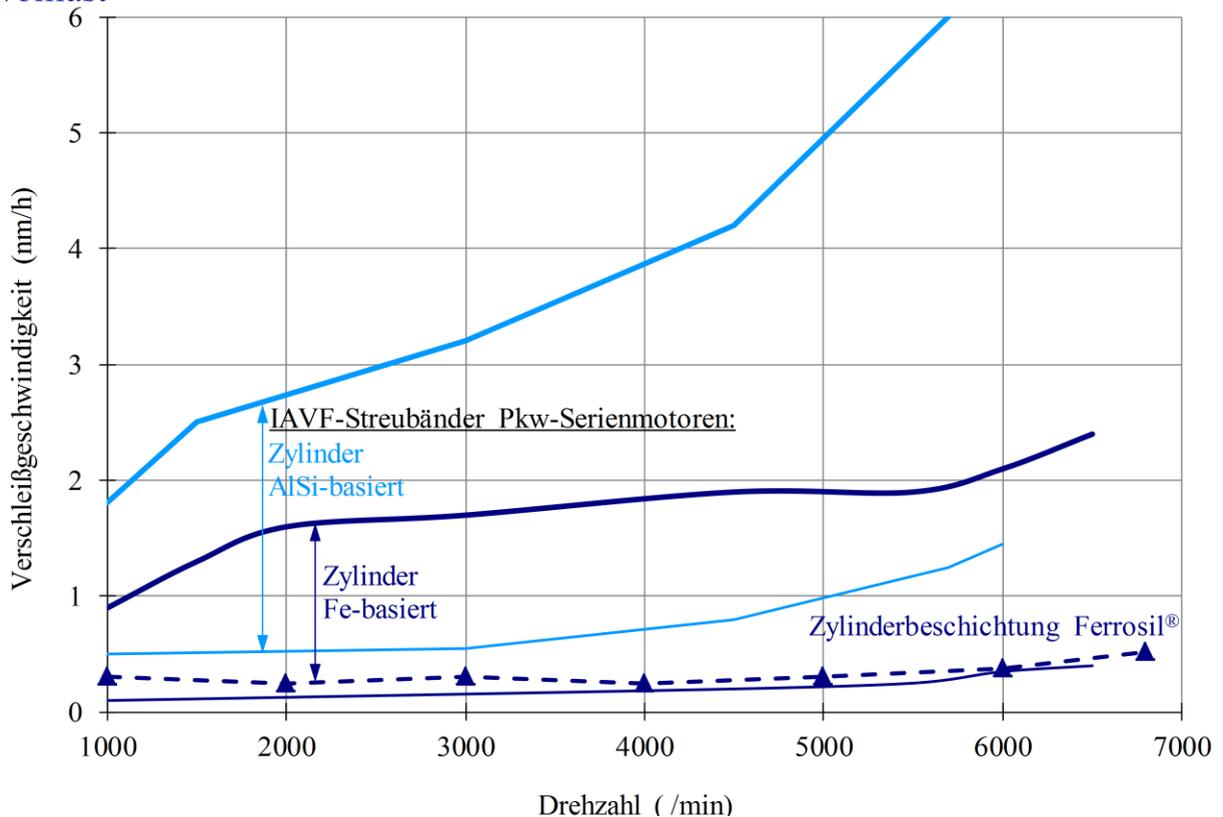
Schmierstoffverbrauch des Motors mit Super Plus-Kraftstoff über Drehzahl und Drehmoment

Erläuterungen und Interpretationen auf der folgenden Seite

Verschleiß / Drehzahl

Zylinderlaufbahnen,
Volllast

Pkw-Ottomotoren



Verschleißgeschwindigkeiten der beschichteten Zylinderlaufbahnen sowie IAVF-Streubänder des Verschleißes verschiedener Zylinderlaufbahnen von Pkw-Ottomotoren über der Volllastdrehzahl

Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 7 - 75 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil®-Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 2 - 70 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228

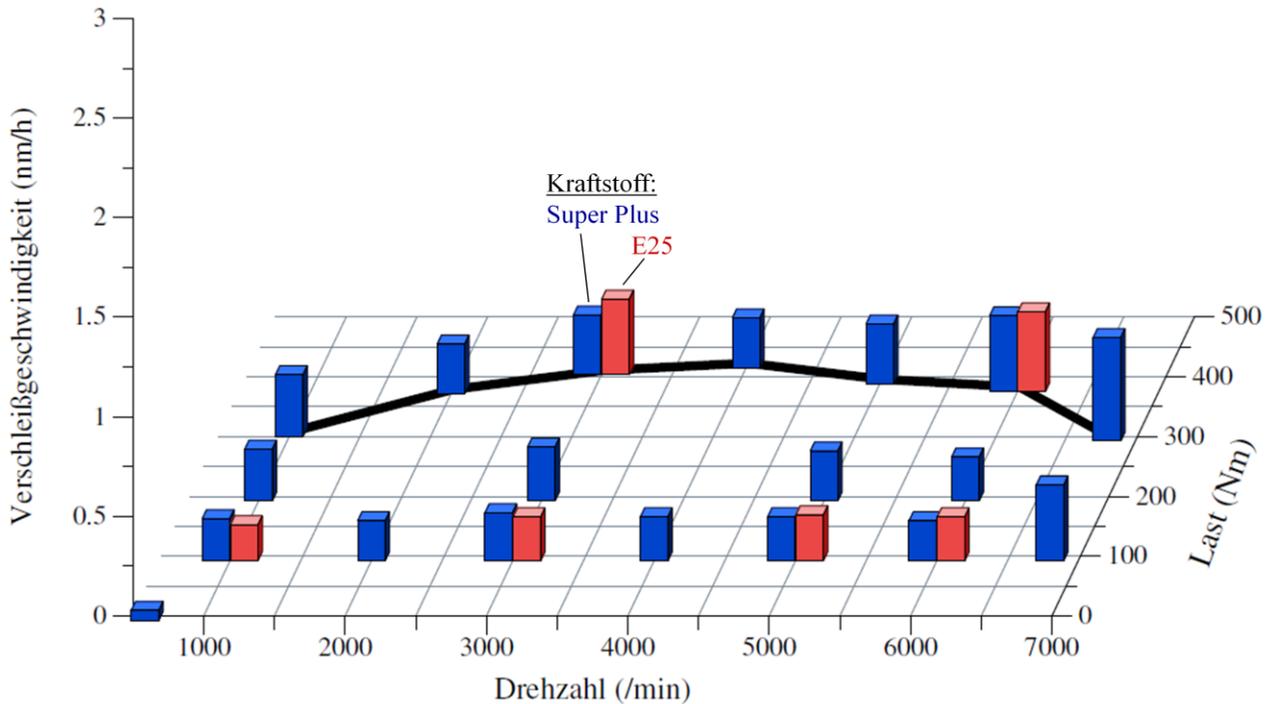
Das Verschleißniveau der Reibpartner Zylinderlaufbahnbeschichtung und Topringlauffläche ist im gesamten Drehzahl/Last-Kennfeld sehr niedrig. Lediglich im oberen Drehzahlbereich steigt der Verschleiß der unbeschichteten Topringe deutlich an, erreicht jedoch keine unzulässig hohen Werte.

Der Schmierstoffverbrauch des Motors liegt trotz der Modifikationen bei Zylinderlaufbahnwerkstoff, Honung und Kolbenbeschichtung auf dem vom Serienmotor bekannten Niveau.

Verschleiß / Drehzahl / Last / Kraftstoff

Zylinderlaufbahnen mit Ferrosil[®]-Beschichtung

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



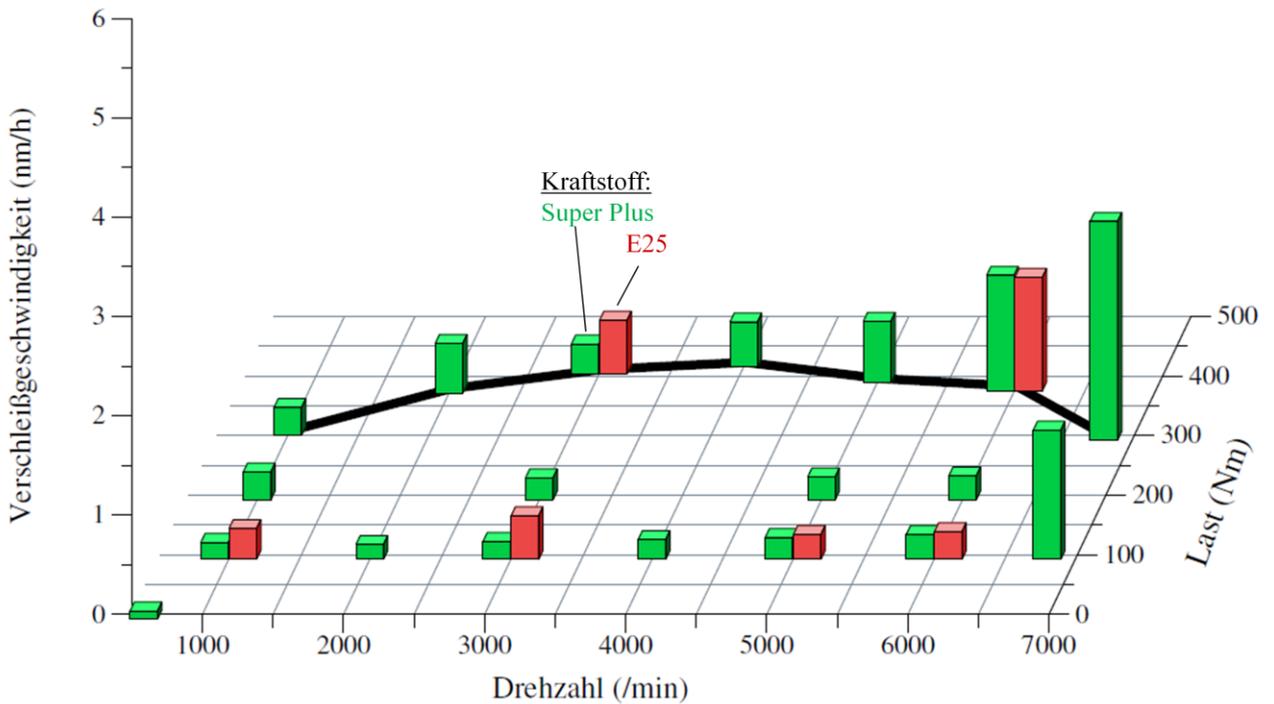
Verschleißgeschwindigkeiten der beschichteten Zylinderlaufbahnen über Drehzahl und Drehmoment ohne und mit 25% Ethanol im Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Verschleiß / Drehzahl / Last / Kraftstoff

Topringlaufflächen

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



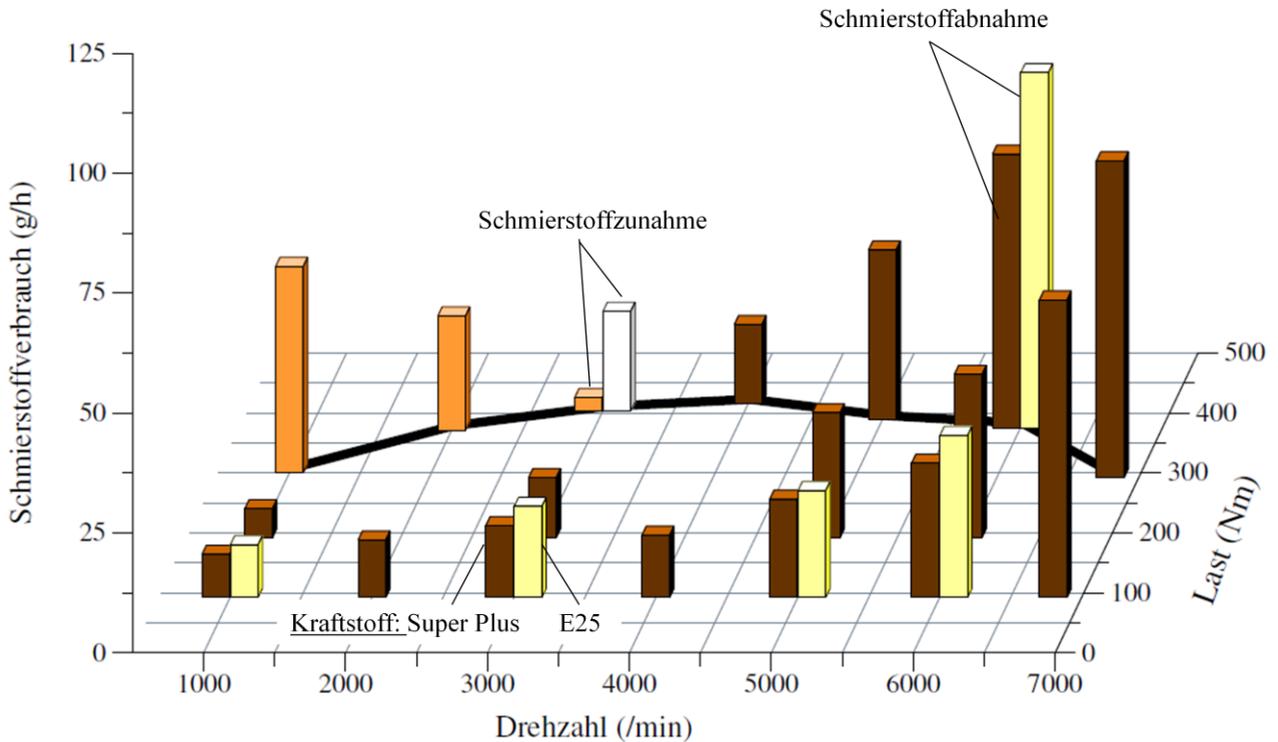
Verschleißgeschwindigkeiten der Topringlaufflächen über Drehzahl und Drehmoment ohne und mit 25% Ethanol im Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen auf der folgenden Seite

Schmierstoffverbrauch / Drehzahl / Last / Kraftstoff

Zylinderlaufbahnen mit Ferrosil®-Beschichtung
Kolbenringe: Serienringpaket

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Schmierstoffverbrauch des Motors über Drehzahl und Drehmoment ohne und mit 25 % Ethanol im Kraftstoff

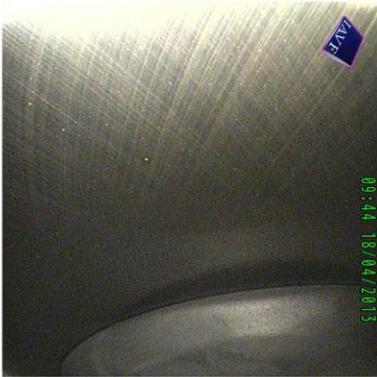
Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 7 - 75 h 110 - 223 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil®-Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 - 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 2 - 70 h 105 - 218 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228, E25-Kraftstoff, ROZ 98 ROZ 104

Auch mit 25% Ethanol im Kraftstoff ist das Verschleißniveau der Reibpartner Ferrosil®-Zylinderlaufbahn und Topringlauffläche niedrig. Die höhere Korrosionsneigung des Ethanols im Kraftstoff macht sich im stationären Warmbetrieb an der Ferrosil®-Beschichtung nicht nennenswert verschleißerhöhend bemerkbar. Die Verschleißgeschwindigkeiten an der unbeschichteten Topringlauffläche nehmen hier nur geringfügig bei niedriger bis mittlerer Drehzahl zu.

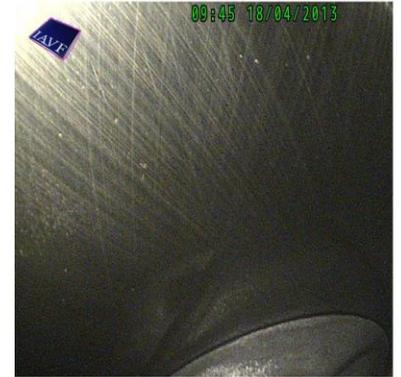
Zylinder 1

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



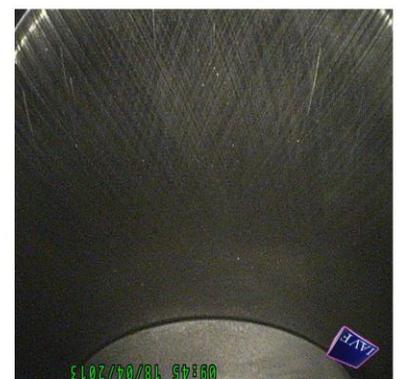
Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

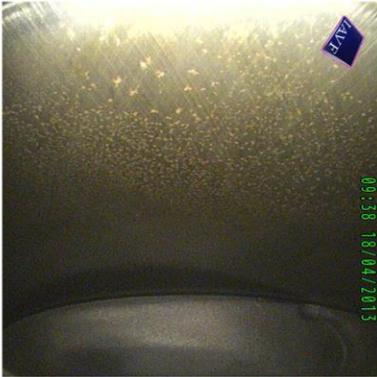
Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 1 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

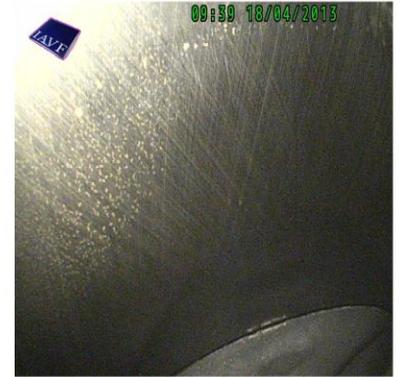
Zylinder 2

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

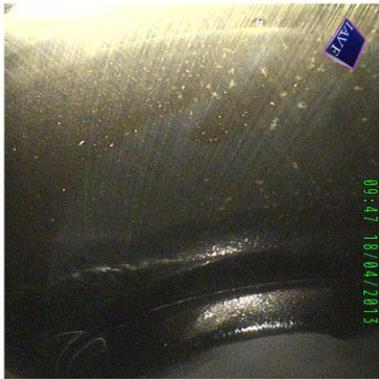
Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 2 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 3

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 3 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

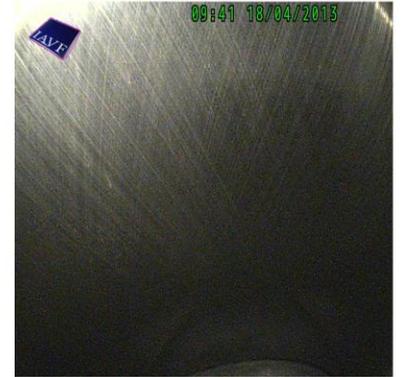
Zylinder 4

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



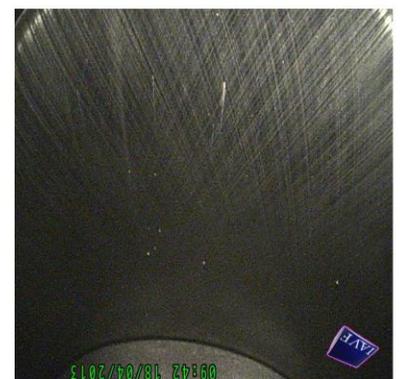
Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

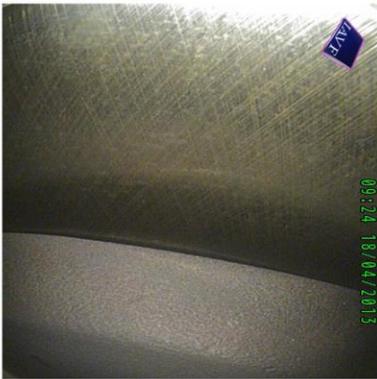
Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 4 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

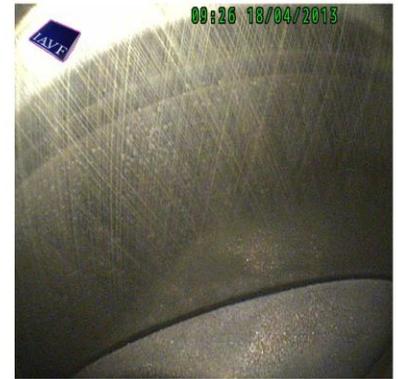
Zylinder 5

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

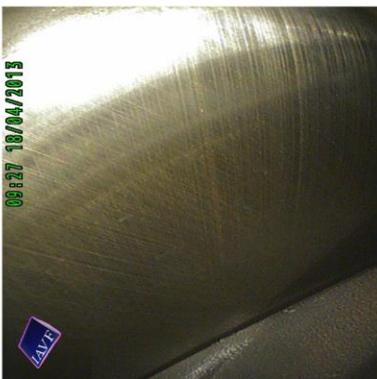
Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 5 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

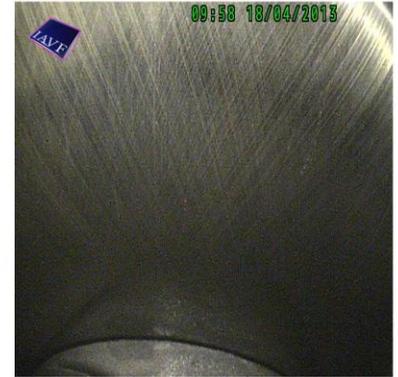
Zylinder 6

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



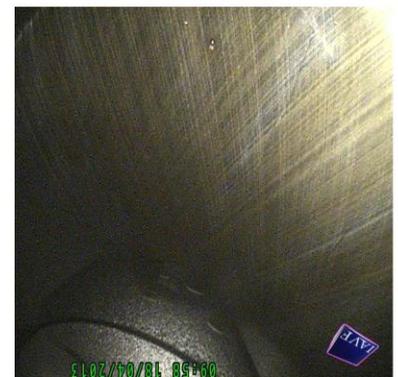
Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

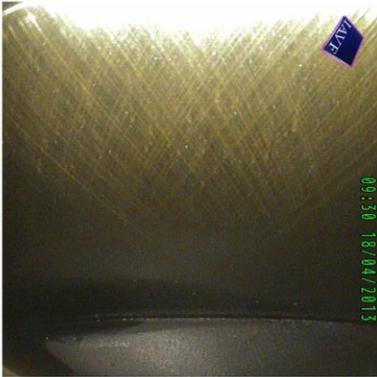
Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 6 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 7

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



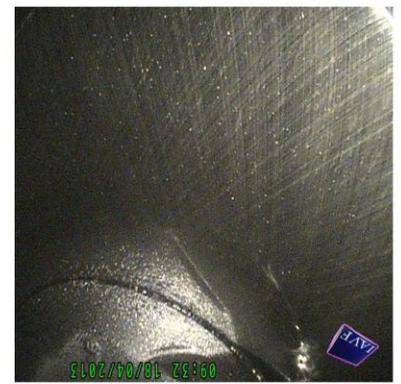
Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 7 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen auf der folgenden Seite

Zylinder 8

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil®-Beschichtung,
nach 218 h Stationärbetrieb, Endoskopie vom 18.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 8 nach 218 h Stationärbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff

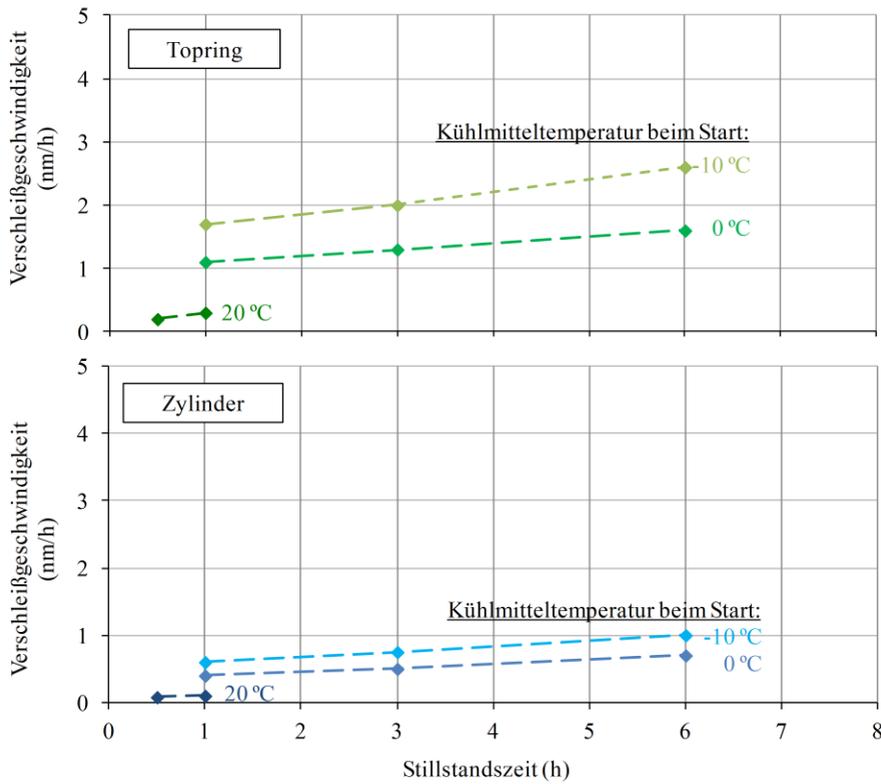
Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 5 - 223 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil®-Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 0 - 218 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: 0 – 105 h Bauteillaufzeit: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228 105 – 218 h Bauteillaufzeit: E25-Kraftstoff

Nach 218 Stunden stationärem Motorbetrieb mit Super Plus- und E25-Kraftstoff sind an der Ferrosil-Laufschicht mit dem Endoskop keine Korrosionsspuren zu erkennen.

Verschleiß / Stillstandszeit im Kaltstartbetrieb

Zylinderlaufbahnen und Topringlaufflächen,
jeweils 10 min Warmlauf

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Verschleißgeschwindigkeiten* der Topringe und der beschichteten Zylinderlaufbahnen über der Stillstandszeit im Kaltstartbetrieb mit unterschiedlichen Kühlwassertemperaturen

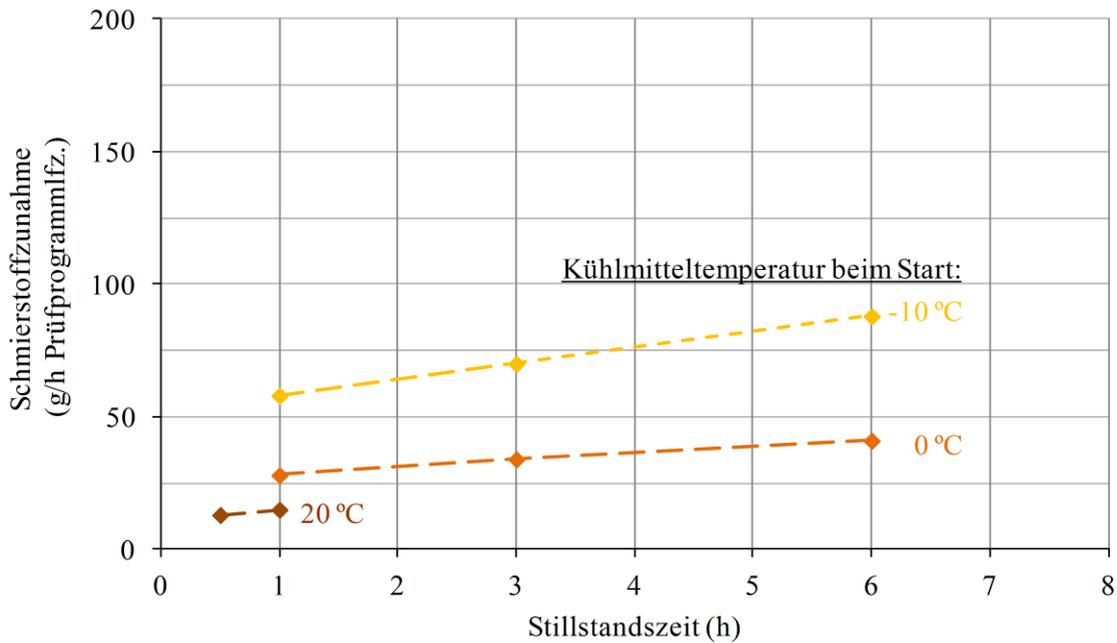
Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

* Stillstand und Verschleißkonzentrationsänderung durch Kraftstoffeintrag heraus gerechnet

Schmierstoffzunahme / Stillstandszeit im Kaltstartbetrieb

Zylinderlaufbahnen: Ferrosil[®], Kolbenringe: Serie,
jeweils 10 min Warmlauf

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Schmierstoffzunahme* über der Stillstandszeit im Kaltstartbetrieb mit unterschiedlichen Kühlwassertemperaturen

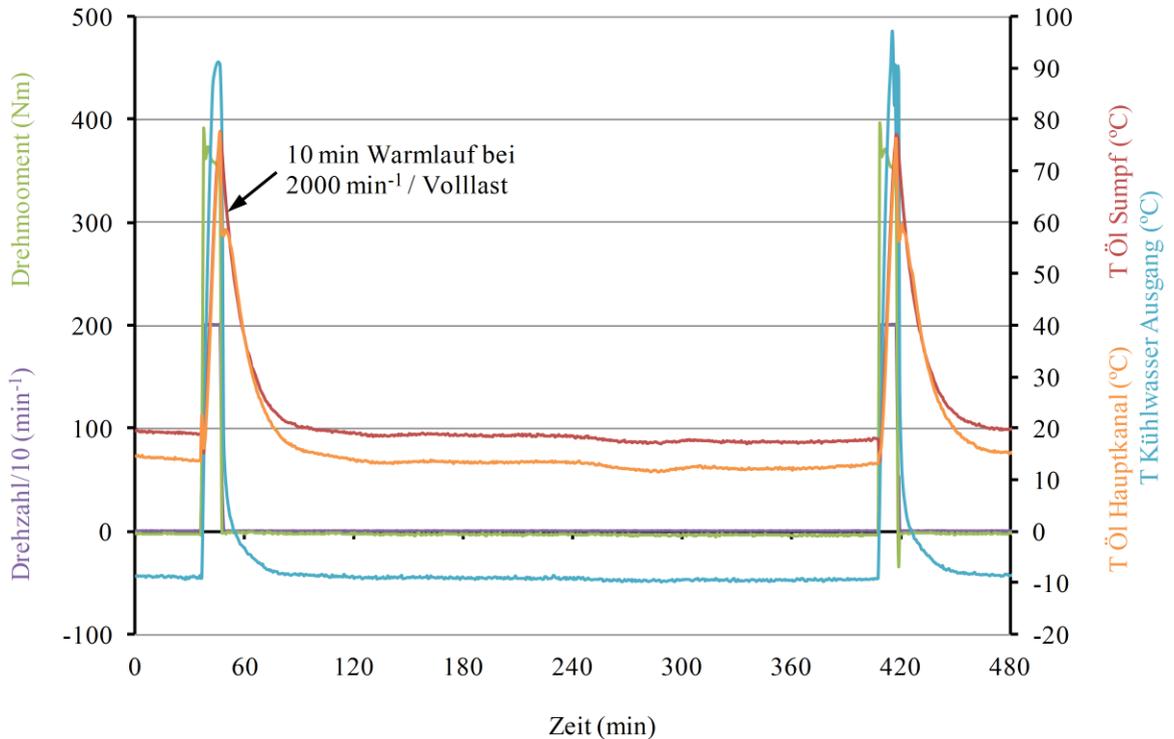
Erläuterungen und Interpretationen auf der folgenden Seite

* Stillstand nicht heraus gerechnet

Betriebswerte im Kaltstartbetrieb / Laufzeit

Zylinderlaufbahnen: Ferrosil[®], Kolbenringe: Serie,
jeweils 10 min Warmlauf mit Super Plus-Kraftstoff

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Drehzahl, Drehmoment sowie Öltemperaturen in Hauptkanal bzw. Ölsumpf sowie Kühlwassertemperatur im Ausgang über der Laufzeit im Kaltstartbetrieb bei -10 °C Kühlwassertemperatur

Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 223 – 236 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil [®] -Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 218 - 231 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228, ROZ 98

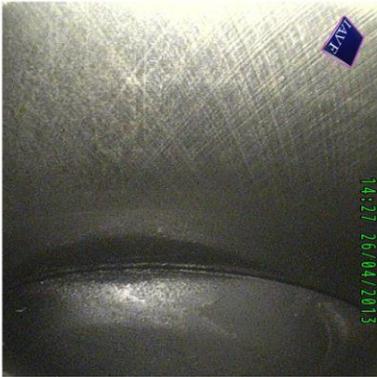
Ähnlich wie im Einlauf und im Warmbetrieb bei Variation von Drehzahl und Last ist das Verschleißniveau der Topringe und insbesondere der beschichteten Zylinderlaufbahnen auch im Kaltbetrieb sehr gering. Gegenüber übereutektischen AlSi-Zylinderlaufbahnen sind gerade bei längeren Stillstandszeiten deutliche Vorteile zu erkennen.

Die Beschichtung wirkt insbesondere im Kaltbetrieb erhöhend auf die Zylinderwandtemperaturen. Deshalb sind die Schmierstoffzunahmen im Kaltstartbetrieb, die die Ölalterung deutlich beschleunigen können, geringer als bei Motoren mit AlSi-Zylinderlaufbahnen.

Zylinder 1

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 1 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

* inklusive Stillstand

Zylinder 2

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

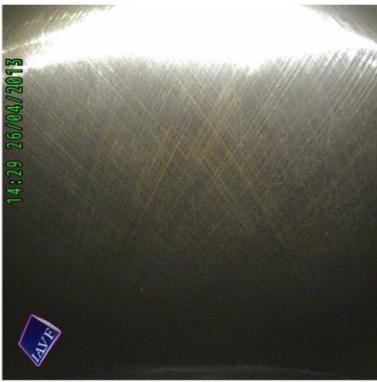
Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



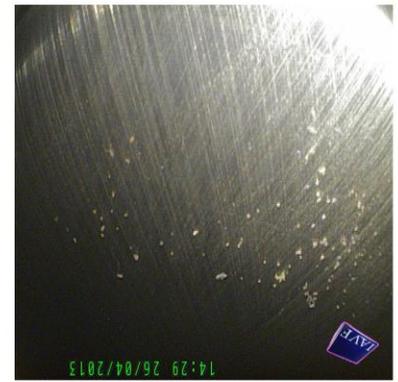
Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 2 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

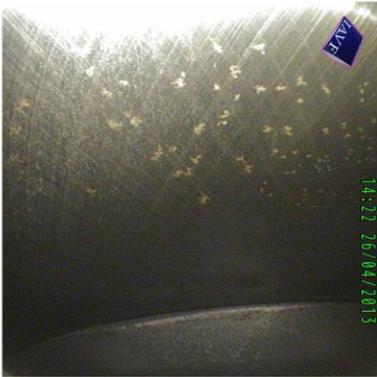
Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

* inklusive Stillstand

Zylinder 3

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 3 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

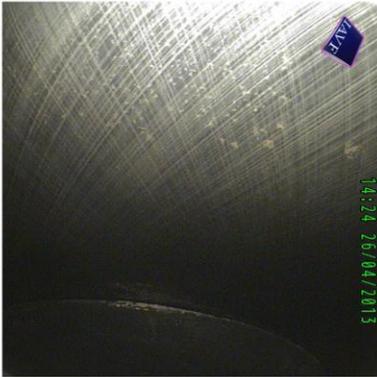
Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

* inklusive Stillstand

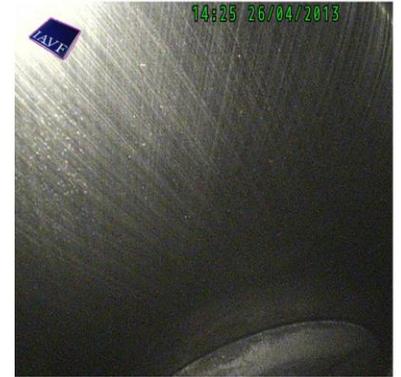
Zylinder 4

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

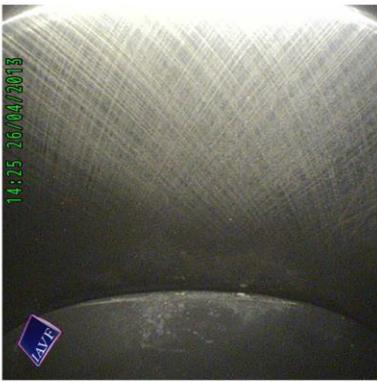
Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 4 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

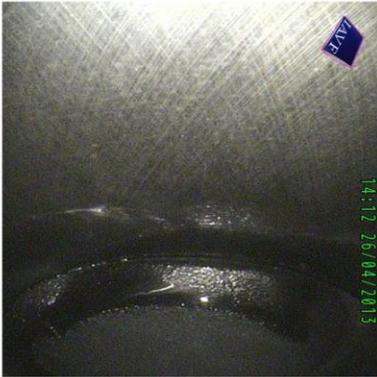
Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

* inklusive Stillstand

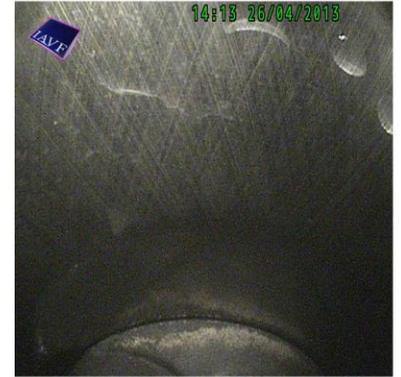
Zylinder 5

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 5 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

* inklusive Stillstand

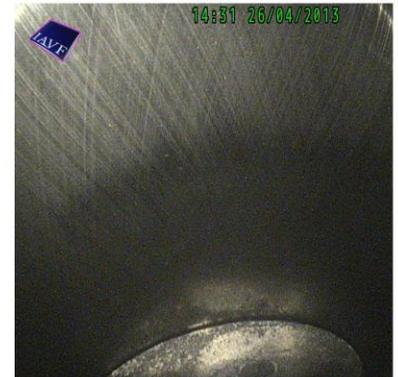
Zylinder 6

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 6 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

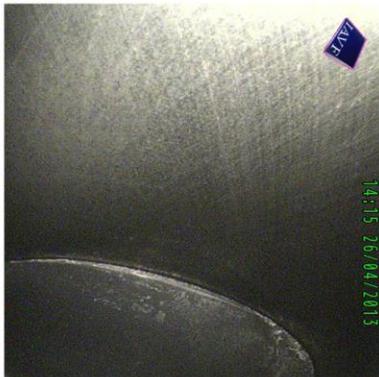
Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

* inklusive Stillstand

Zylinder 7

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil®-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

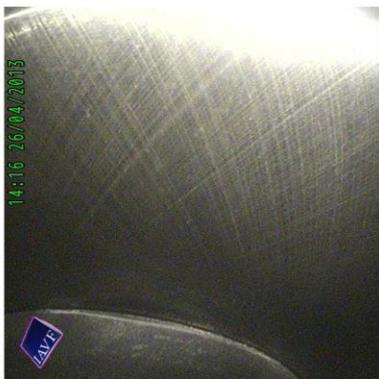
Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



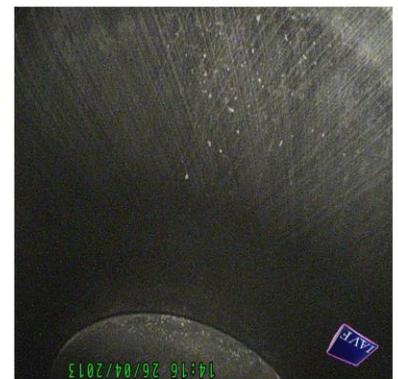
Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 7 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

Erläuterungen und Interpretationen auf der folgenden Seite

* inklusive Stillstand

Zylinder 8

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil®-Beschichtung,
nach 151 h Kaltstartbetrieb, Endoskopie vom 26.04.2013

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Riemenseite



Druckseite



Abtriebsseite



Gegendruckseite

Endoskopie-Aufnahmen von Zylinder 8 nach 218 h Stationärbetrieb und weiteren 151 h im Kaltstartbetrieb* mit Super Plus-Kraftstoff

Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 223 - 237 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil®-Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 217 - 231 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: 0 – 105 h Bauteillaufzeit: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228 105 – 218 h Bauteillaufzeit: E25-Kraftstoff 218 – 231 h Bauteillaufzeit: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228

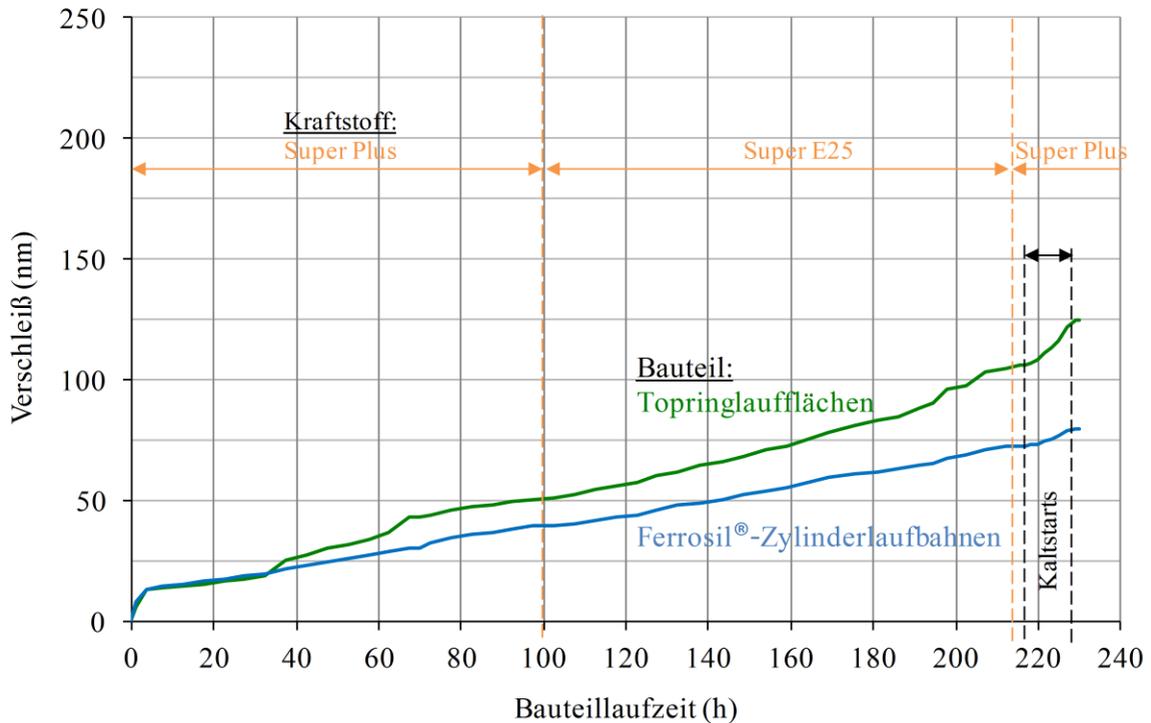
Nach ca. einer Woche Kaltstartbetrieb mit unterschiedlicher Starttemperatur, teilweise mit -10 °C, sind an der Ferrosil-Laufschicht keine Korrosionsspuren zu erkennen.

* inklusive Stillstand

Verschleiß / Laufzeit

Zylinderlaufbahnen: Ferrosil[®], Kolbenringe: Serie

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Verschleiß der Ferrosil[®]-Zylinderlaufbahnen sowie der Topringlaufflächen über der Bauteillaufzeit

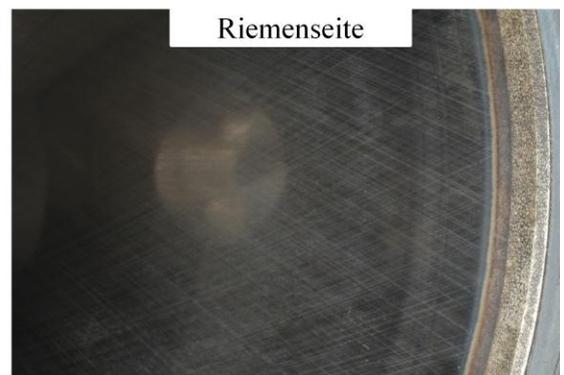
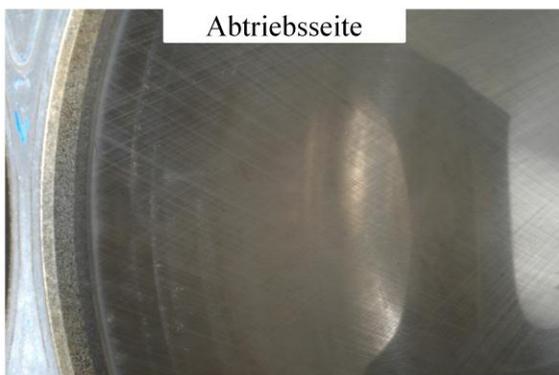
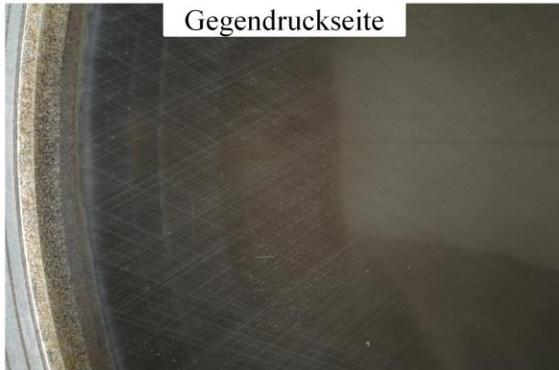
Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 5 – 236 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil [®] -Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 0 – 231 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228, ROZ 98 und E25-Kraftstoff, ROZ 104

Trotz der erheblichen Beanspruchungen durch die unterschiedlichen Kraftstoffe sowie den korrosionsfördernden Kaltbetrieb ist der Verschleiß von Topringringlaufflächen und beschichteten Zylinderlaufbahnen bis zum Versuchsende gering.

Zylinder 1

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



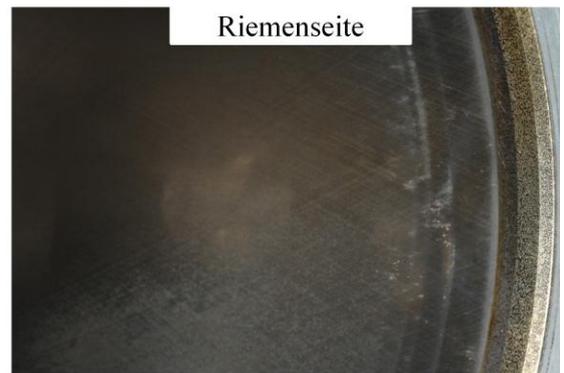
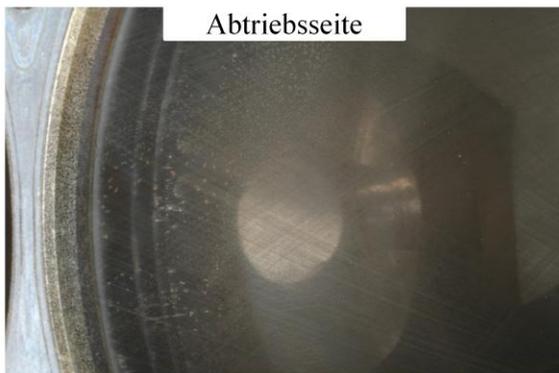
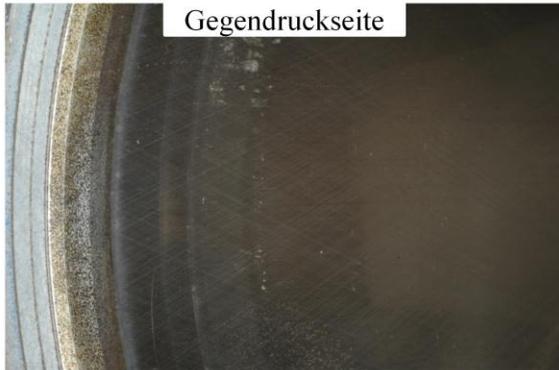
Zylinder 1 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 2

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



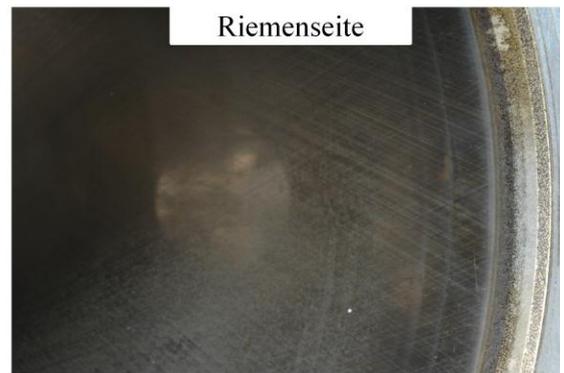
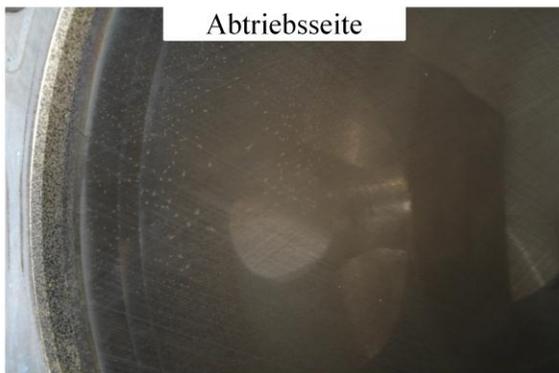
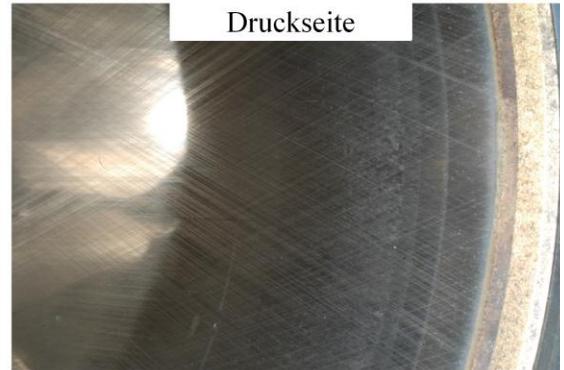
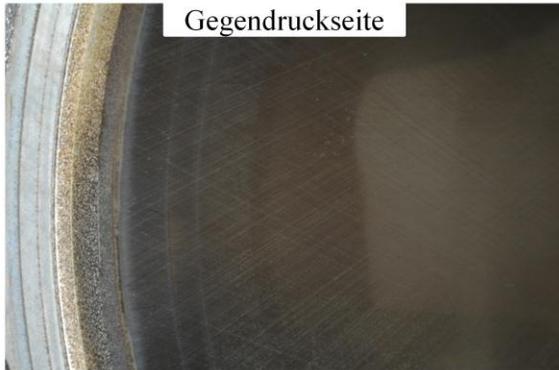
Zylinder 2 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 3

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



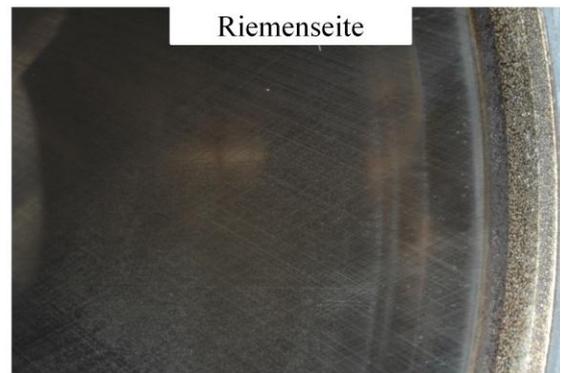
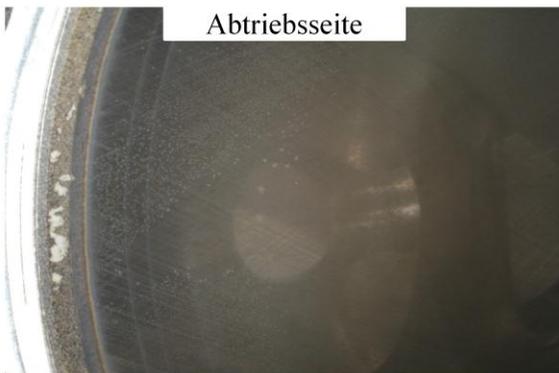
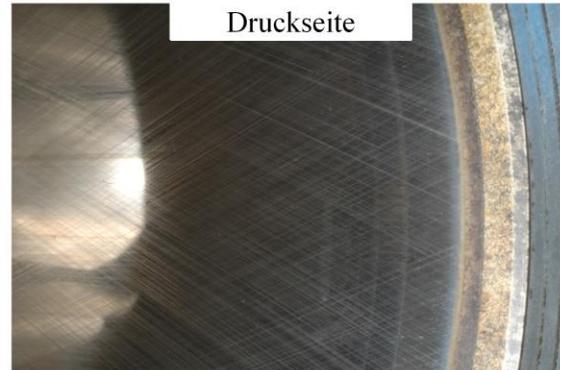
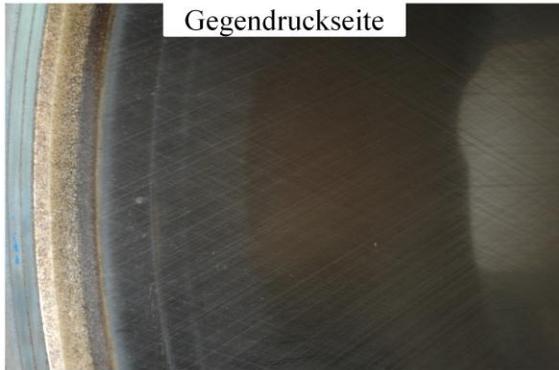
Zylinder 3 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 4

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



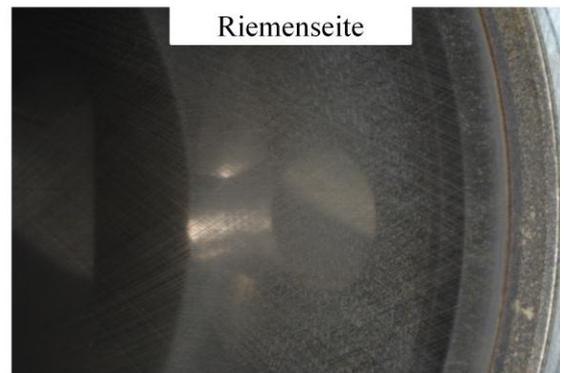
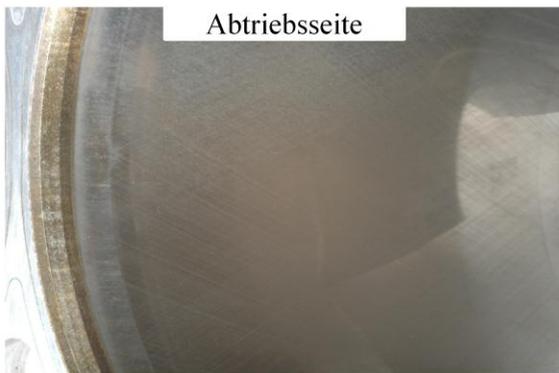
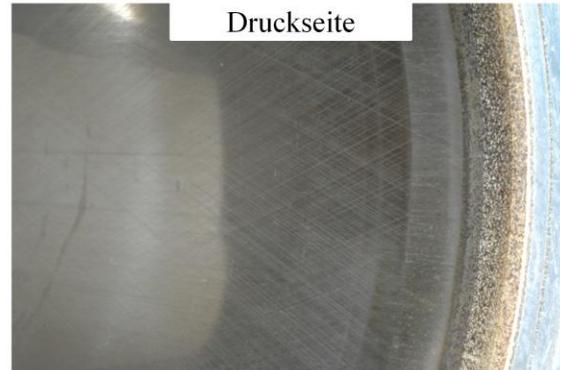
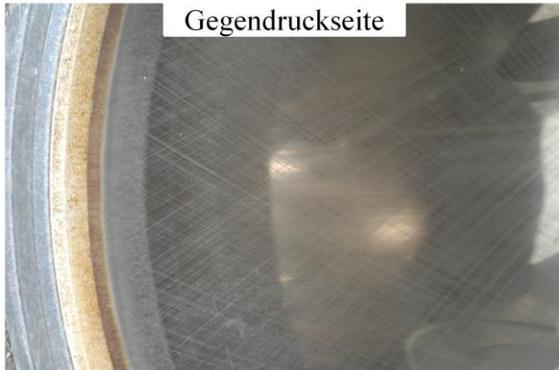
Zylinder 4 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 5

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



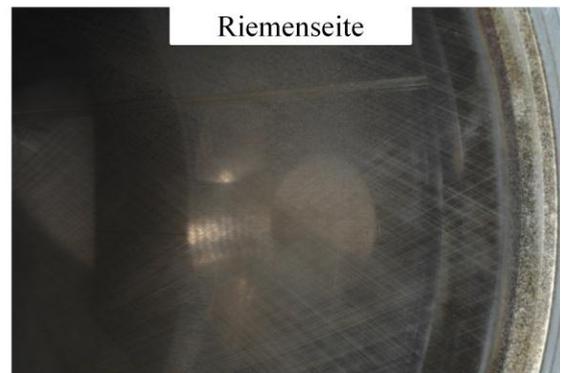
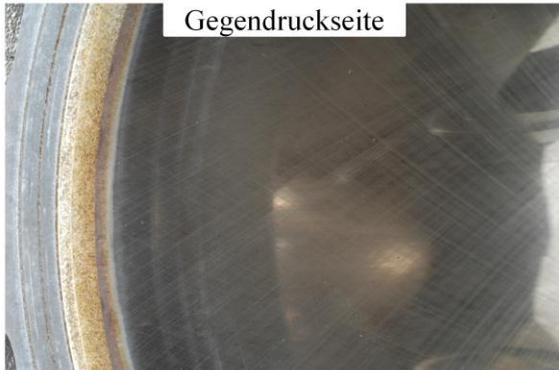
Zylinder 5 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 6

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



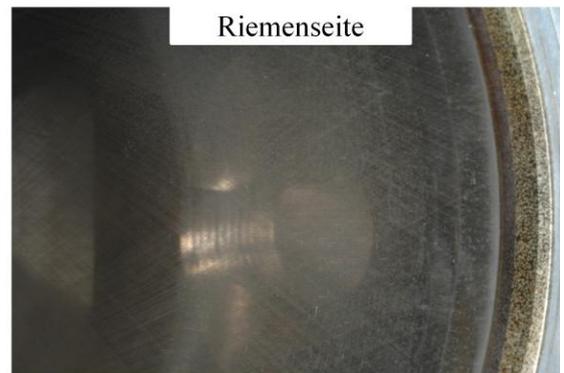
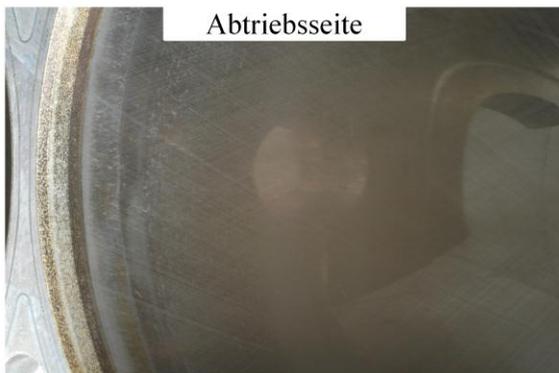
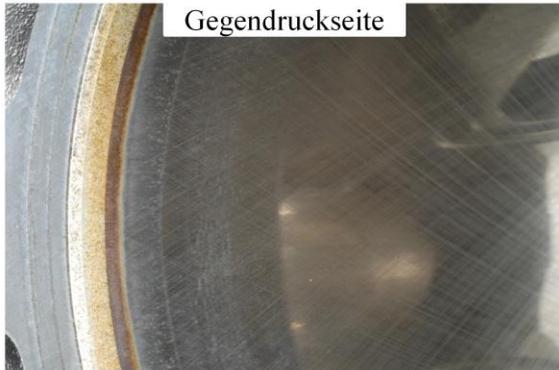
Zylinder 6 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 7

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



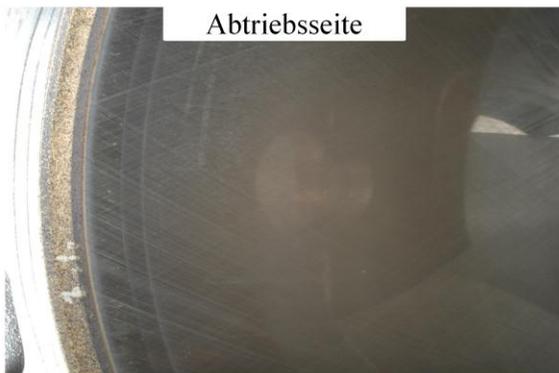
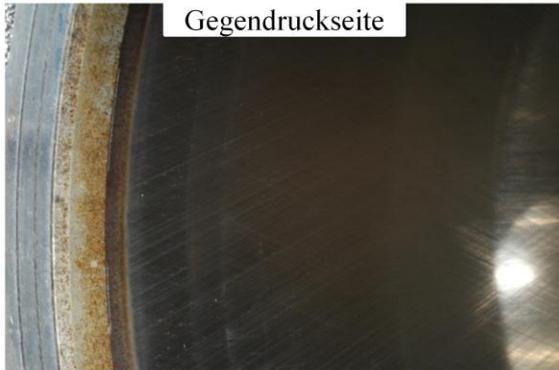
Zylinder 7 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Zylinder 8

Zylinderlaufbahn mit Ferrosil[®]-Beschichtung,
nach der Demontage am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



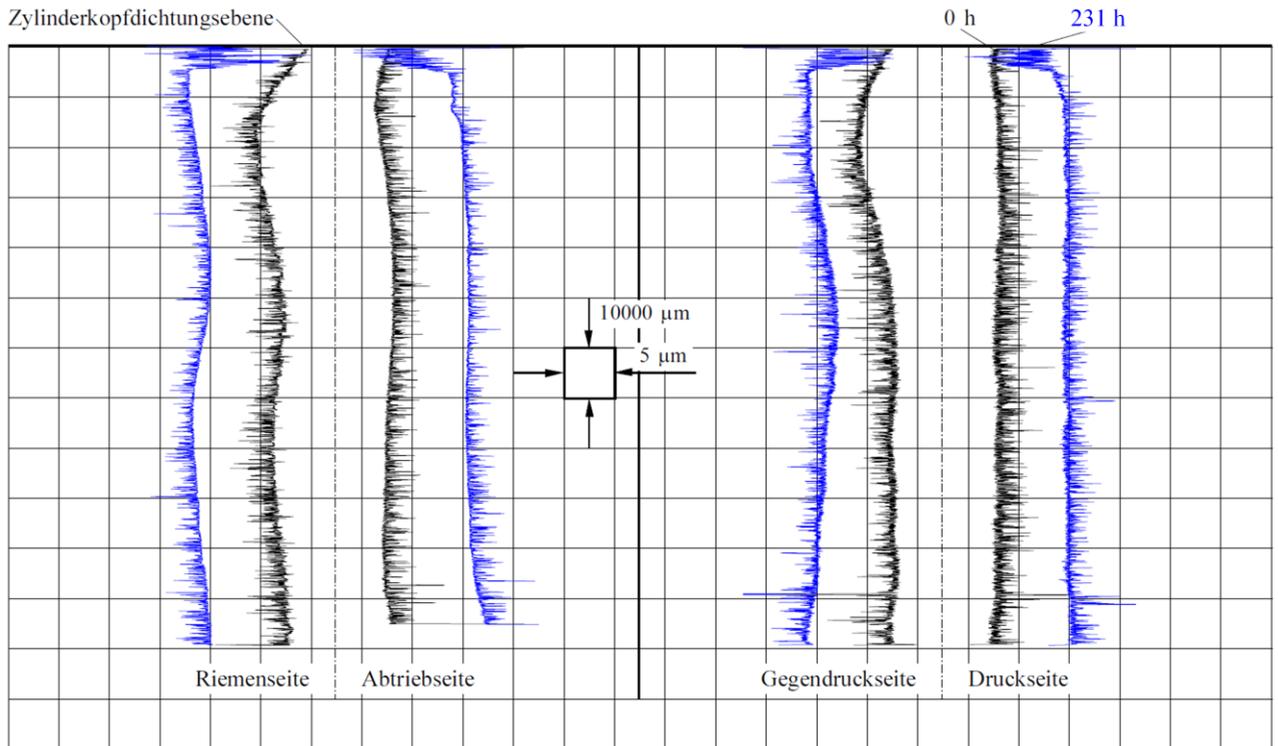
Zylinder 8 nach 231 h Bauteillaufzeit und Demontage am Versuchsende

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile von Zylinder 1

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil[®]-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



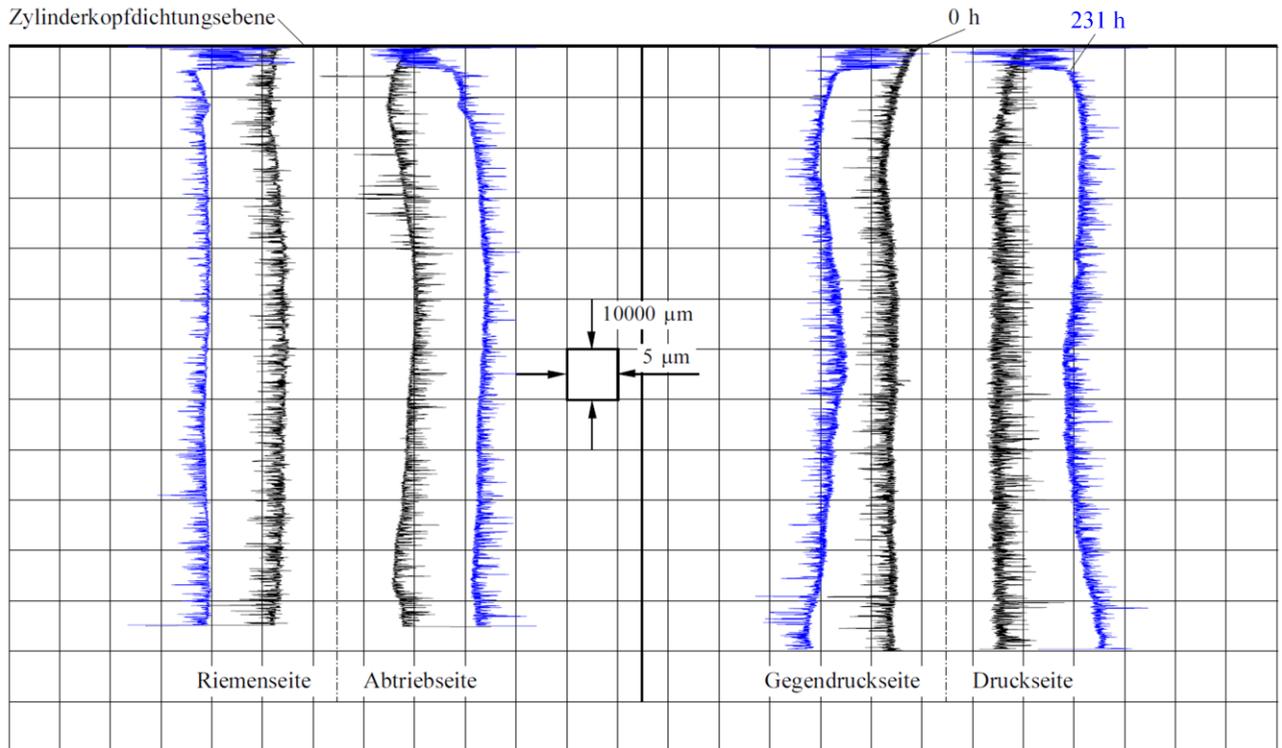
Profile von Zylinder 1 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile von Zylinder 2

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil[®]-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



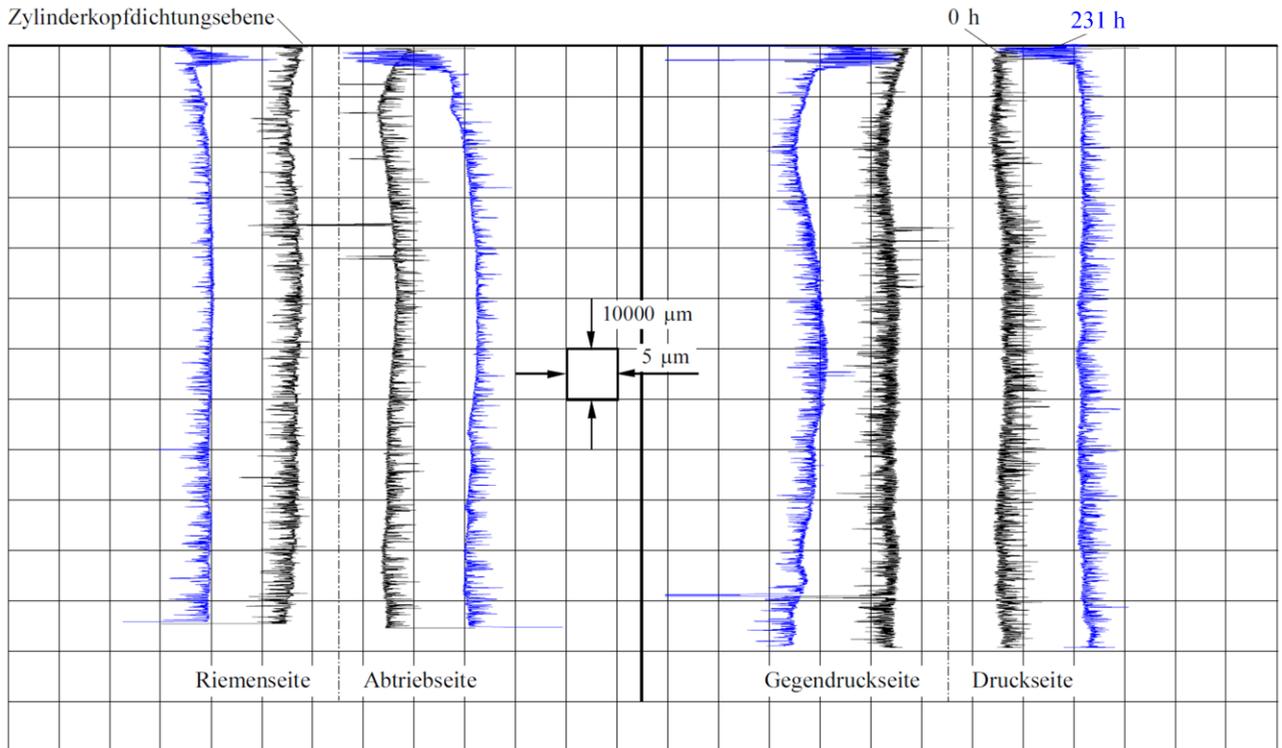
Profile von Zylinder 2 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile von Zylinder 3

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil®-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



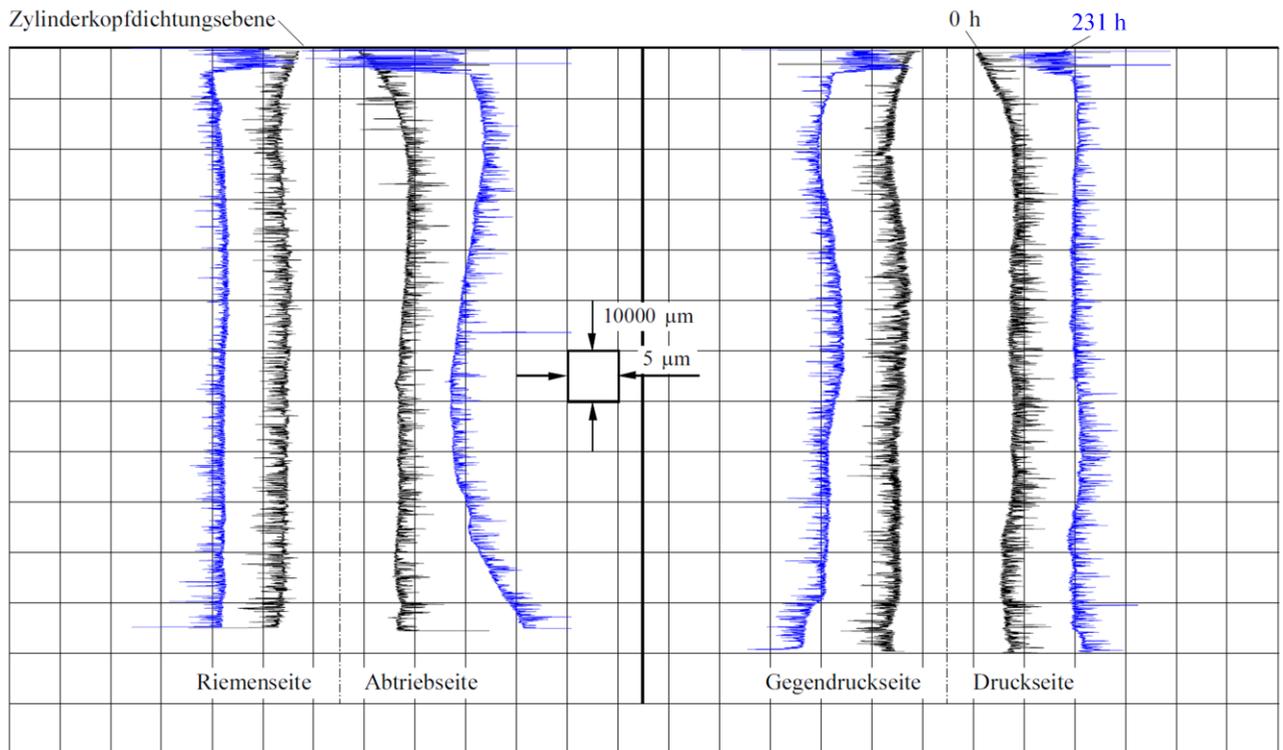
Profile von Zylinder 3 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile von Zylinder 4

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil®-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



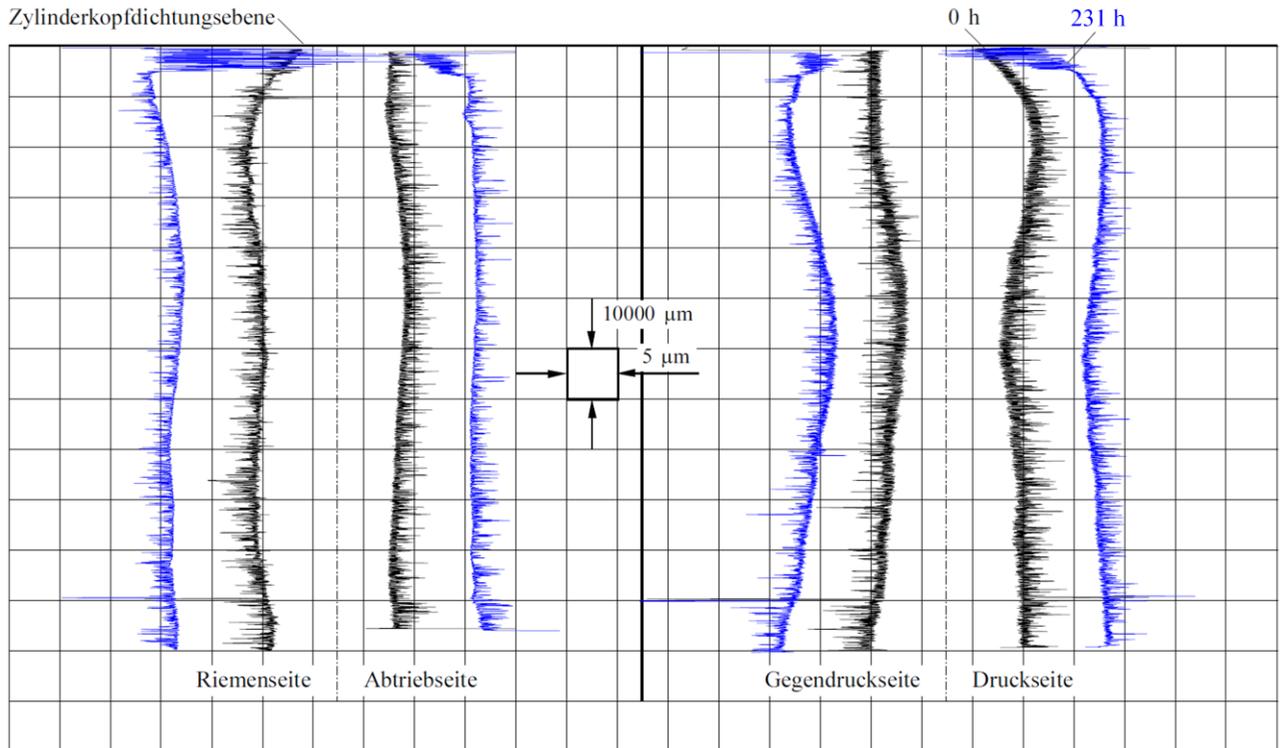
Profile von Zylinder 4 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile von Zylinder 5

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil[®]-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



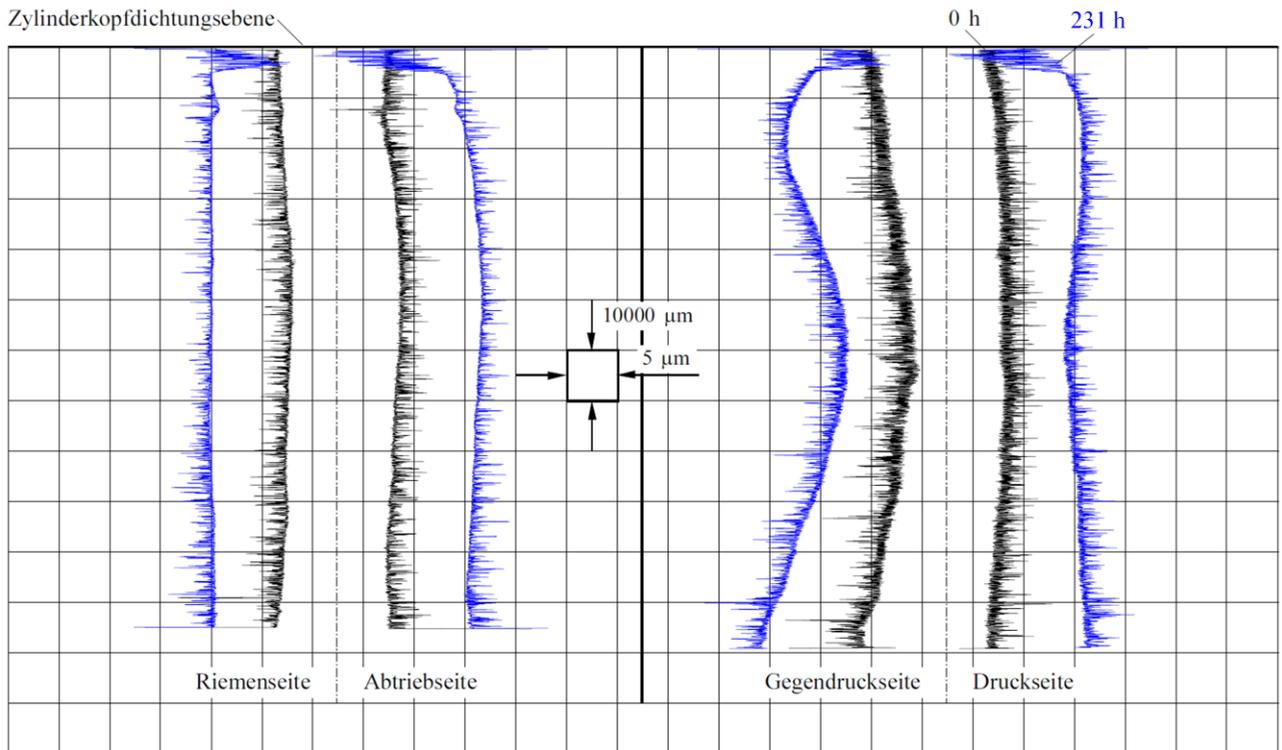
Profile von Zylinder 5 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile von Zylinder 6

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil®-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



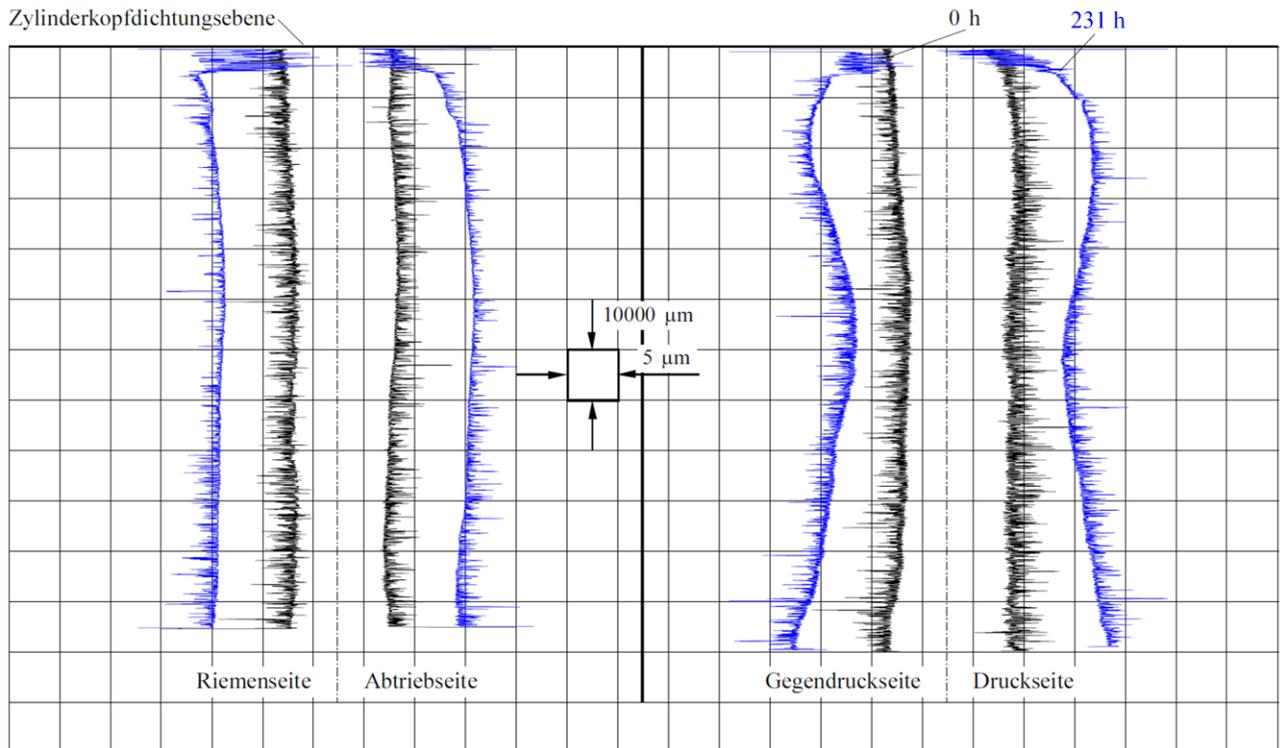
Profile von Zylinder 6 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile von Zylinder 7

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil[®]-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



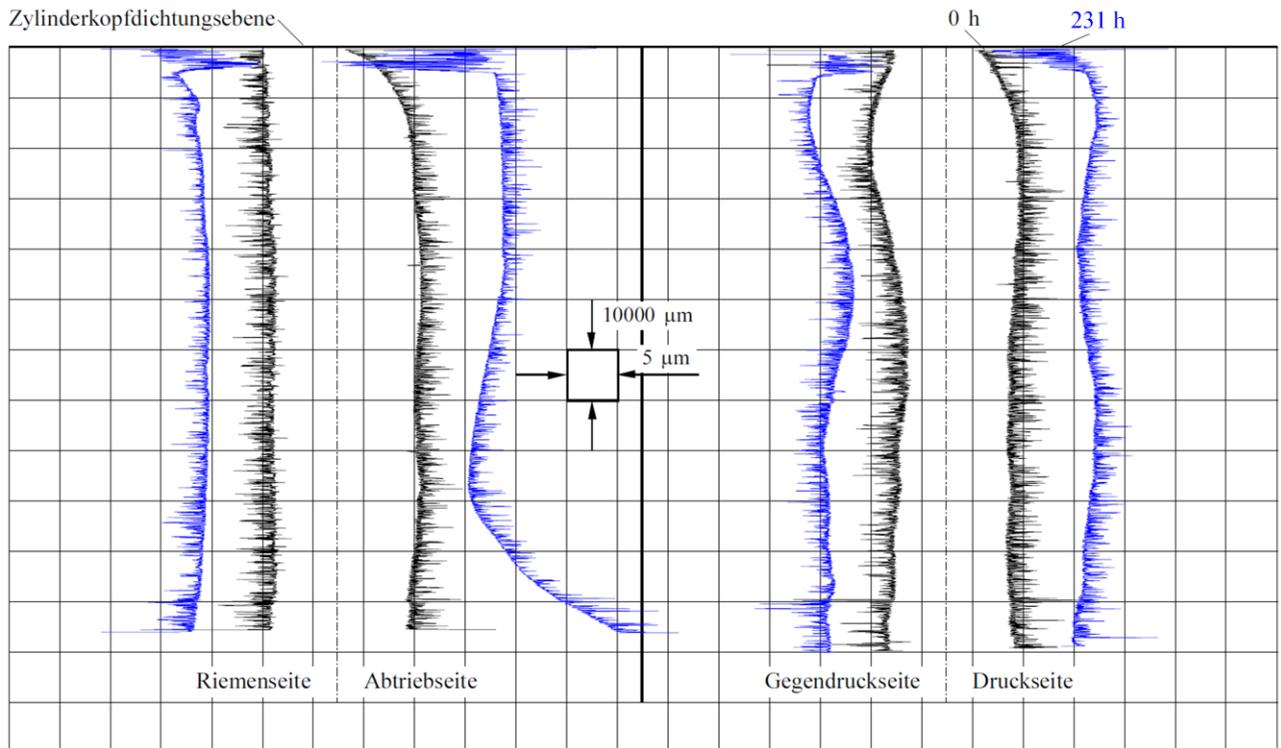
Profile von Zylinder 7 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen auf der folgenden Seite

Profile von Zylinder 8

verspannt mit Honbrillen und Bedplate gemessen,
Ferrosil®-Beschichtung, Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Profile von Zylinder 8 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 0 – 236 h
Kurbelgehäuse	: Nr. OA75018, Zylinderlaufbahnen mit Ferrosil®-Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 0 - 231 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228, ROZ 98 und E25-Kraftstoff, ROZ 104

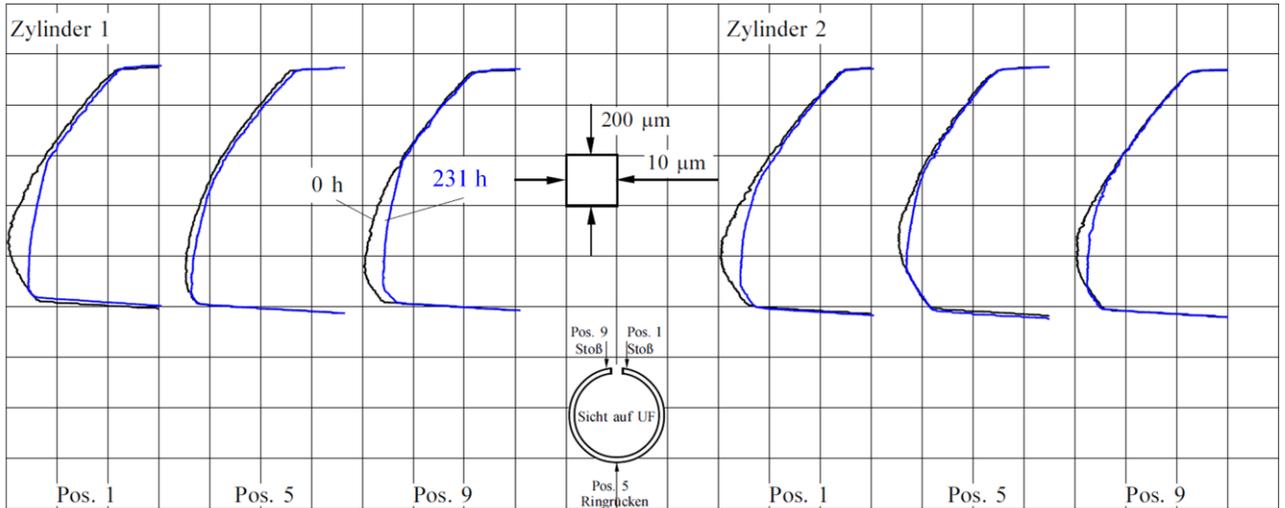
Die beschichteten Zylinderlaufbahnen weisen nach den Untersuchungen, die teilweise mit 25% Ethanol im Kraftstoff gefahren wurden und sowohl mehrstündigen Vollastbetrieb ohne Unterbrechung als auch bis zu 6 Stunden Stillstand und Starts mit -10 °C enthielten, nur geringe Profilveränderungen auf. Selbst die oberen Totpunkte der Kolbenringe in den Zylindern sind nicht zu beanstanden.

Nachdem der Motor bis zur Demontage und Rückvermessung noch ca. 6 Wochen gestanden hat, zeigen die meisten Zylinder in der oberen Hälfte jedoch leichte Braunschimmer, die auf geringe, für eisenbasierte Zylinderlaufbahnen nicht unübliche Korrosionsspuren hindeuten.

Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 1 und 2

GOE TOP 079K,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



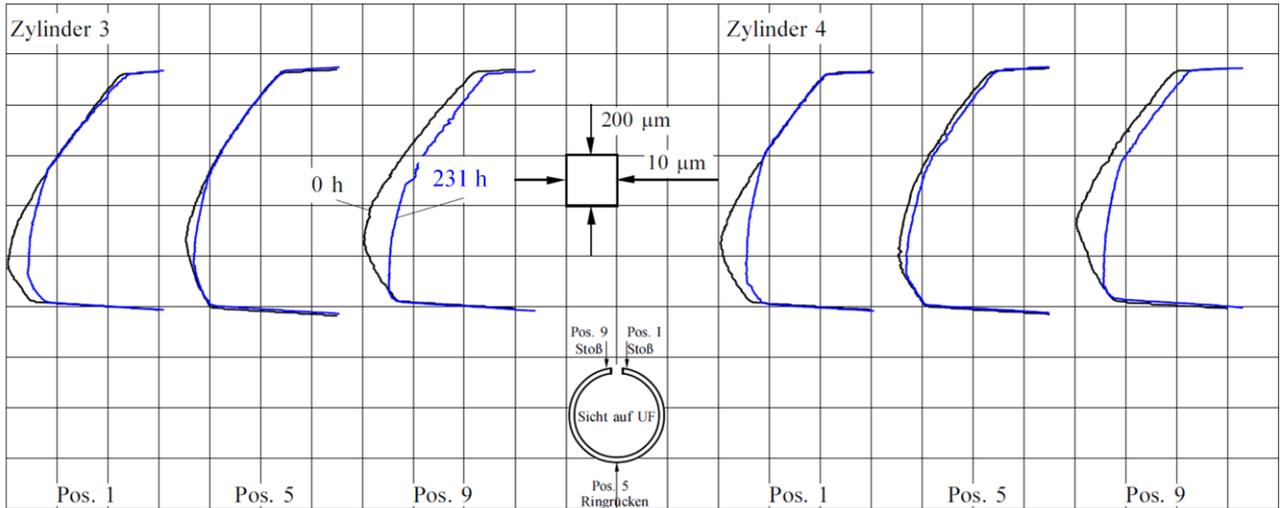
Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 1 und 2 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 3 und 4

GOE TOP 079K,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



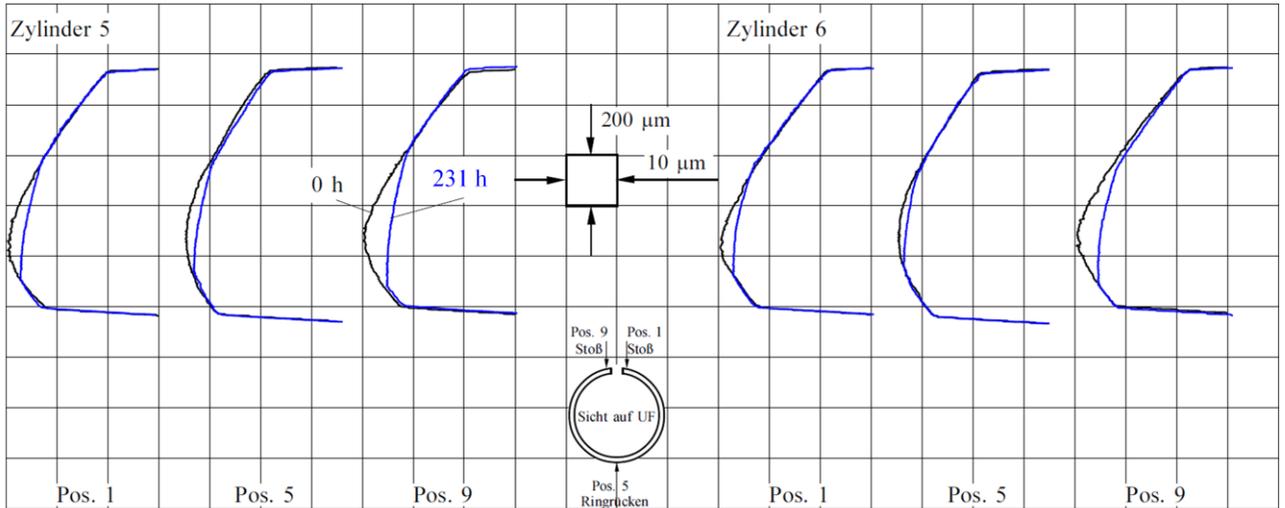
Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 3 und 4 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 5 und 6

GOE 5 TOP 079E,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



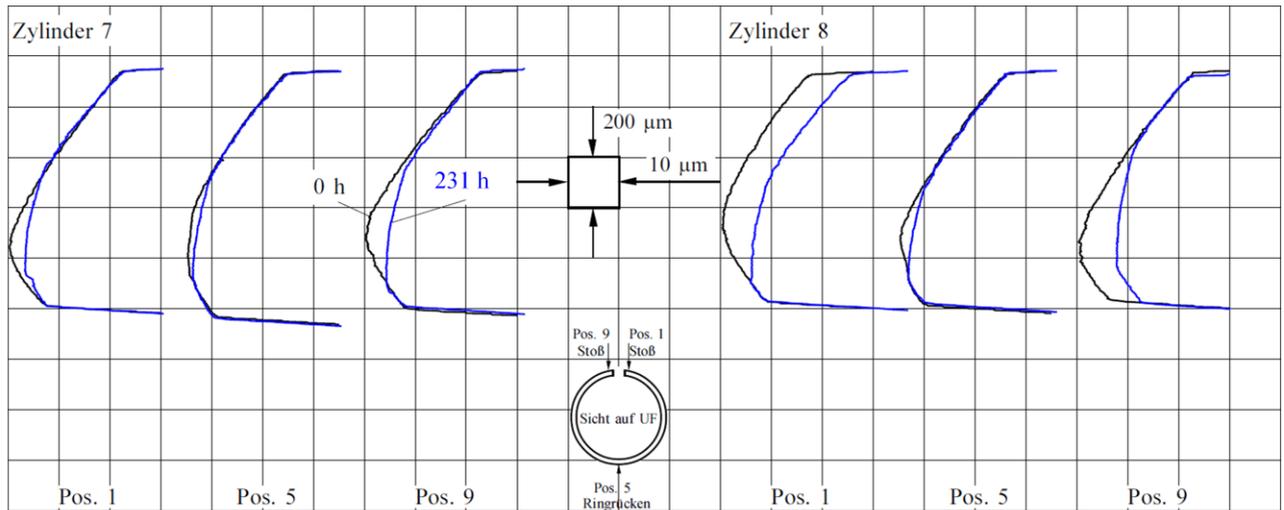
Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 5 und 6 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 7 und 8

GOE 5 TOP 079E,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



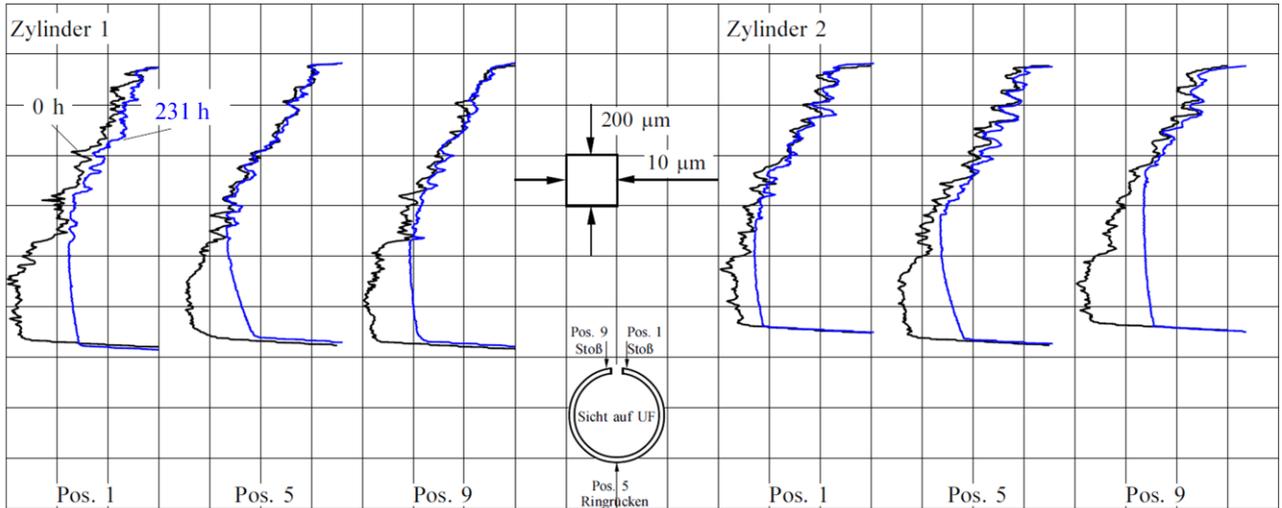
Profile der Topringlaufflächen von Zylinder 7 und 8 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 1 und 2

GOE 5 TOP 079E,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



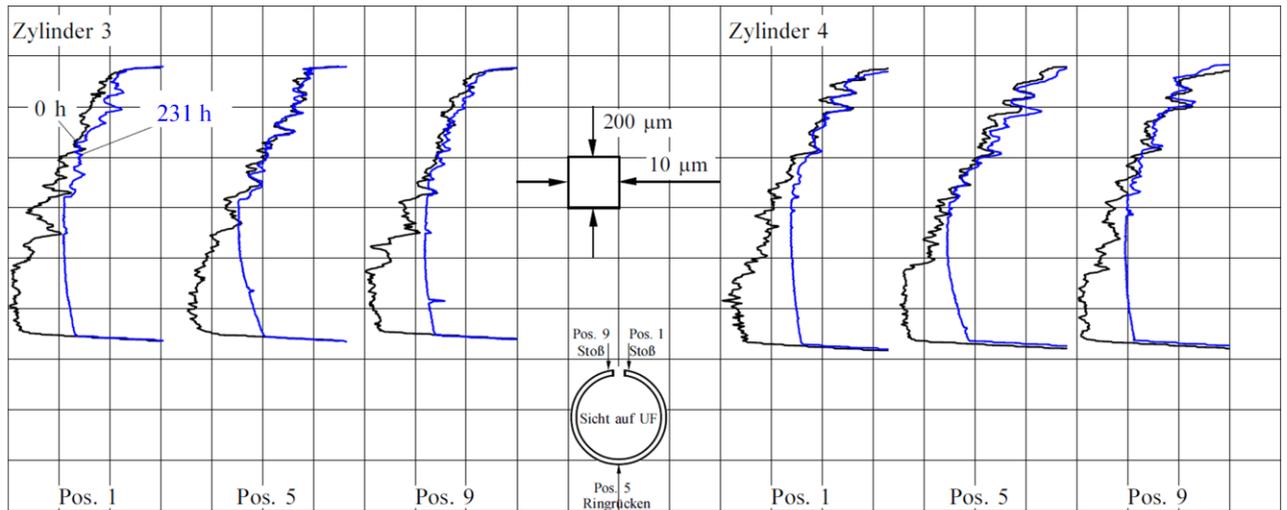
Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 1 und 2 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 3 und 4

GOE 5 TOP 079E,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



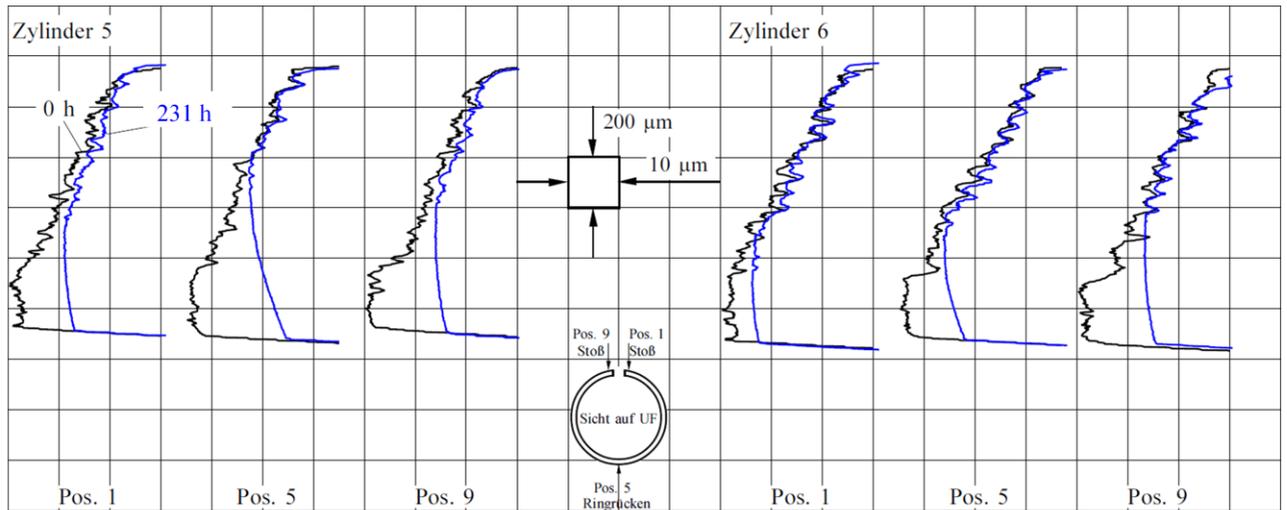
Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 3 und 4 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 5 und 6

GOE 5 TOP 079E,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



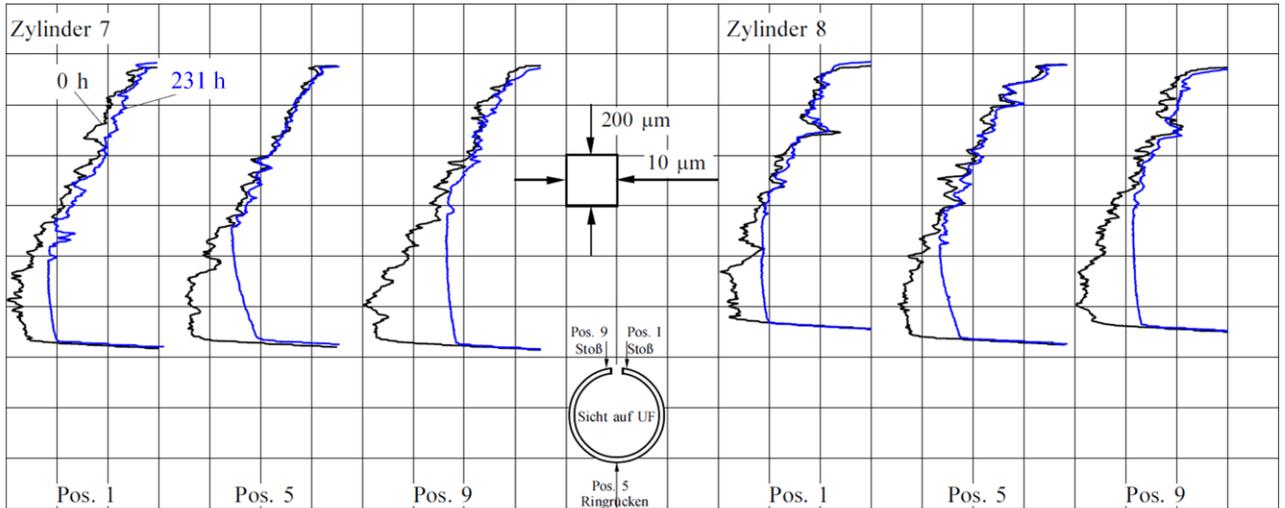
Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 5 und 6 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 7 und 8

GOE 5 TOP 079E,
Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



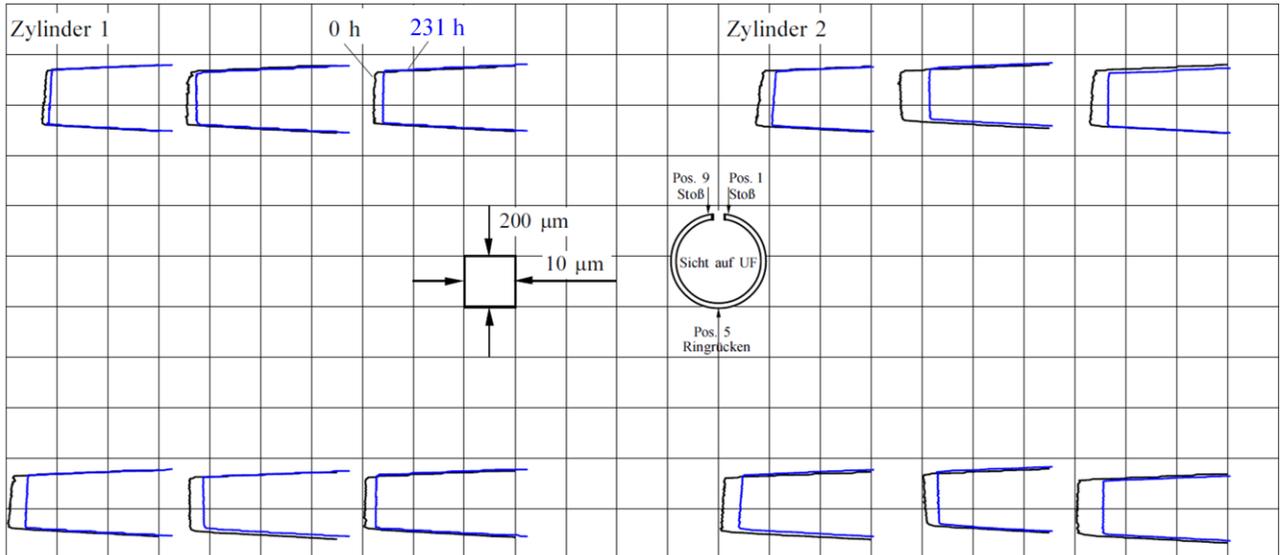
Profile der 2.Ringlaufflächen von Zylinder 7 und 8 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der Örlinglaufflächen von Zylinder 1 und 2

Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



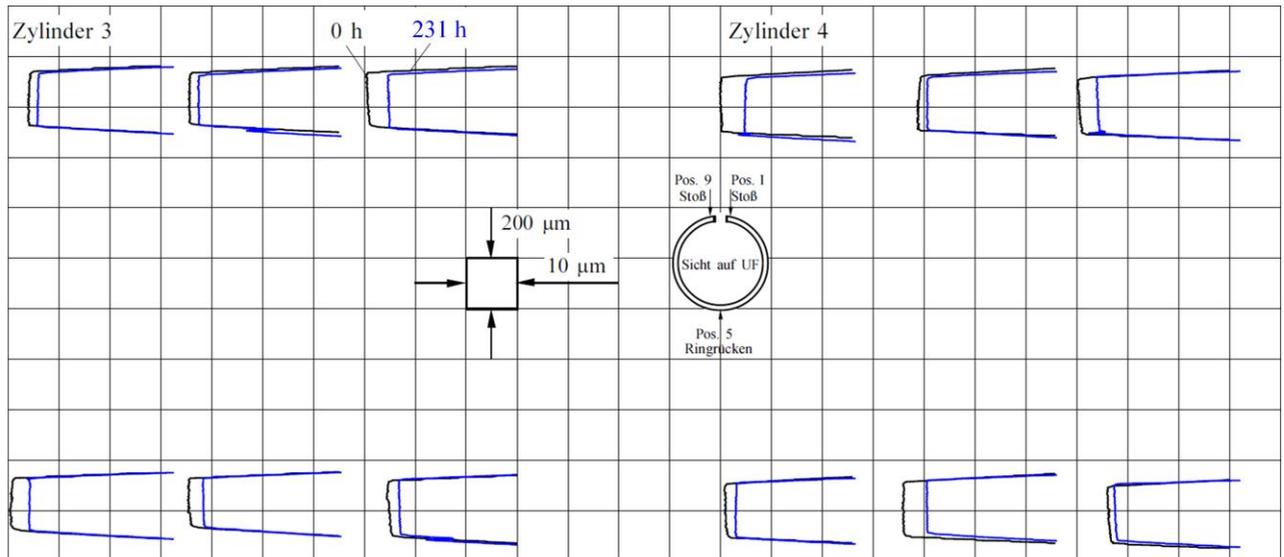
Profile der Örlinglaufflächen von Zylinder 1 und 2 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der Öhringlaufflächen von Zylinder 3 und 4

Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



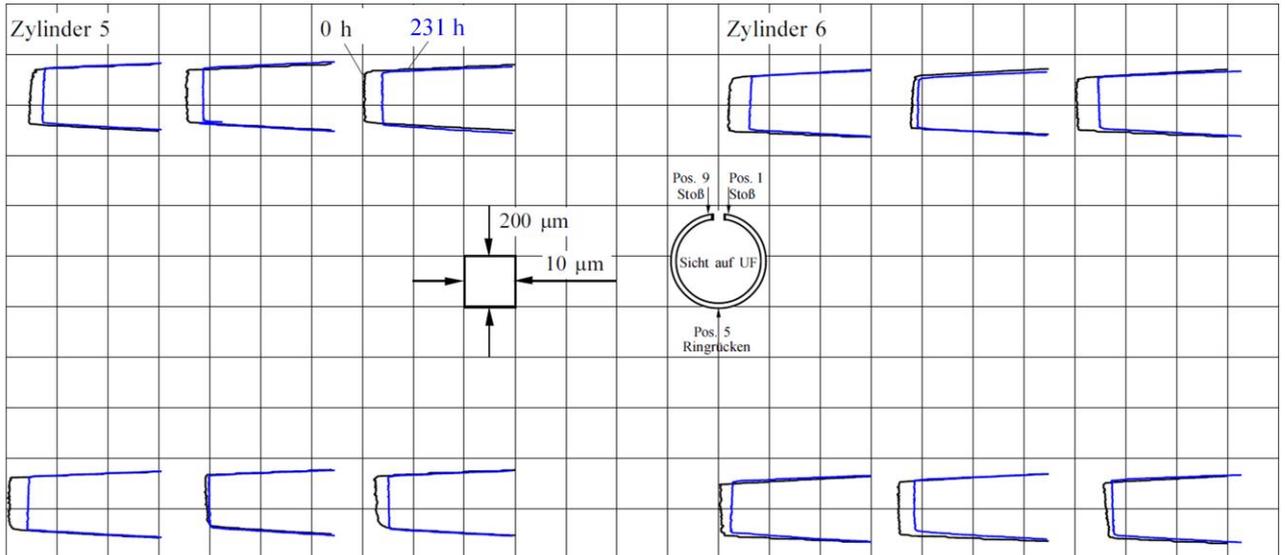
Profile der Öhringlaufflächen von Zylinder 3 und 4 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der Örlinglaufflächen von Zylinder 5 und 6

Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



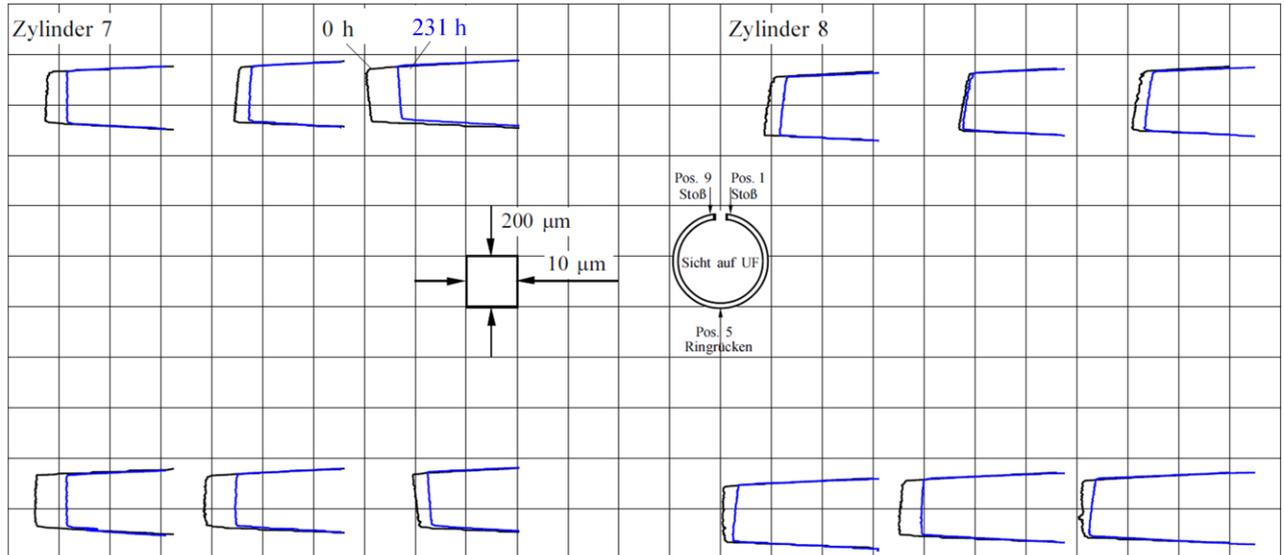
Profile der Örlinglaufflächen von Zylinder 5 und 6 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Erläuterungen und Interpretationen nach der folgenden Seite

Profile der Öhringlaufflächen von Zylinder 7 und 8

Neuzustand und am Versuchsende

Audi V8 FSI
Nr. CDR11422



Profile der Öhringlaufflächen von Zylinder 7 und 8 im Neuzustand und am Versuchsende nach 231 h Bauteillaufzeit

Motor	: Audi V8 FSI, 274 kW bei 6800 min ⁻¹ , 445 Nm bei 3500 min ⁻¹
Motor-Nr.	: CDR11422
Motorlaufzeit	: 0 – 236 h
Zylinderlaufbahnen	: Ferrosil®-Beschichtung
Verschleißmessung	: Zylinder 2 und 6, 360°, 4 – 110 mm unterhalb Deckfläche
Kolbenringe	: Serienringpaket
Verschleißmessung	: Laufflächen der Topringe, Zylinder 2 und 6
Bauteillaufzeit	: 0 - 231 h
Schmierstoff	: Castrol-Öl nach VW-Norm 50300/50400, SAE-Klasse: 5W-30, HTHS-Viskosität: 3,5 mPas
Kraftstoff	: Super-Plus Kraftstoff nach EN 228, ROZ 98 und E25-Kraftstoff, ROZ 104

Am Versuchsende nach 231 h sind an den Topringen erwartungsgemäß nur geringe Profilveränderungen vorhanden.

Der Verschleiß an den Laufflächen der 2.Ringe aus dem Serienringpaket des Motors ist zunächst nicht kritisch, erfordert jedoch bei einem Serieneinsatz der Beschichtung vermutlich noch Verbesserungsmaßnahmen.

Die Öhringe weisen am Versuchsende keine Spuren unzulässiger Beanspruchung auf.

7 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die APL-Gruppe mit der IAVF Antriebstechnik GmbH ist einer der führenden Dienstleister in der Motorenentwicklung in Deutschland. Insbesondere für Engineering im Bereich der motorischen Tribologieanalytik bieten Online-Messtechniken wie die Verschleißmessungen mittels RNT in Kombination mit hochauflösender Charakterisierung der Bauteile und deren Funktionsflächen den Vorteil zeit- und kostenintensive Prüfstand-s- und Feldversuche zu reduzieren und liefern darüber hinaus ein vertieftes Verständnis über funktionale Zusammenhänge sowie frühzeitige Erkenntnisse über Schwachstellen und Optimierungspotenziale.

IAVF arbeitet an seriennahen Aufgabenstellungen und versteht sich unter anderem als Troubleshooter bei ernsthaften, den Produktionsstart gefährdenden, tribologischen Problemen. Die IAVF wird auch bei Feldproblemen mit tribologischen Fragestellungen durch die betroffenen Fahrzeughersteller oder Zulieferer hinzugezogen.

Gegenüber dem Wettbewerb wurde ein Wissensvorsprung erarbeitet, der IAVF und seinen Kunden hilft, um weiterhin die erfolgreiche Position auf den globalen Märkten verteidigen und ausbauen zu können.

8 Fortschritt auf dem Gebiet an anderen Stellen

FE-Ergebnisse von dritter Seite bezüglich des Forschungsvorhabens sind nicht bekannt geworden.

9 Erfolge und geplante Veröffentlichungen der Forschungsergebnisse

Erfolgte Veröffentlichungen:

- A. Möndel, P. Dollinger, G. Ziegler, A. Brink, M. Scherge, G. Gramm, M. Kleindienst, H. Kubach, P. Berlet:
Untersuchungen an Zylinderlaufbahnen mit galvanisch aufgebrachtener Eisenbeschichtung, VDI Wissensforum, 19./20. Juni 2012, Baden-Baden
- A. Möndel, P. Dollinger, G. Ziegler, A. Brink, M. Scherge, G. Gramm, M. Kleindienst, H. Kubach, P. Berlet:
Nano-Ferro Beschichtung für Zylinderlaufbahnen in Verbrennungsmotoren, Branchendialog Nanotechnologie und Neue Materialien, 6. Dezember 2012, Berlin

Geplante Veröffentlichungen:

- Friction, Wear and Wear Protection, 6.-8. Mai 2014, Karlsruhe
- VDI Wissensforum, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel. 3.-4. Juni 2014, Baden-Baden
- Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie, 22.-24. September 2014, Göttingen