

Abschlussbericht

BMBF Forschungsvorhaben, Förderkennzeichen 03X3536E

Laufzeit des Teilvorhabens: 01.10.2009 – 30.09.2012

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

Teilvorhaben: Thermodynamische und tribologische Versuche am Einzylinder-Forschungsmotor

**Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Kolbenmaschinen**

Projektleiter und Autor: Dr.-Ing. Heiko Kubach

Projektwissenschaftler und Autor: Dipl.-Ing. Maurice Kleindienst

Verbundpartner:

Gramm-Technik GmbH (federführend)

IAVF GmbH

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Audi AG



Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen EMHW 03259407 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Inhaltsverzeichnis

1.	Aufgabenstellung	4
2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	5
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
6.	Ergebnisse	8
6.1.	Prüfstandsaufbau und Referenzmessungen.....	8
6.2.	Vermessung der Schicht NF V1.....	12
6.2.1.	Reibungsmessung.....	12
6.2.2.	Haltbarkeit der Schicht	17
6.2.3.	Thermodynamische Betrachtung	17
6.3.	Vermessung der Schichten NF V2 und AI V2	19
6.3.1.	Reibungsmessung.....	19
6.3.2.	Thermodynamisch Betrachtung	23
6.3.3.	Haltbarkeit der Schichten	24
6.4.	Vermessung der Schicht NF V3.....	26
6.4.1.	Reibungsvermessung.....	26
6.4.2.	Thermodynamische Betrachtung	29
6.4.3.	Haltbarkeit der Schicht	33
7.	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	34
8.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	35
9.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Forschungsergebnisse.....	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Motorenprüfstand	8
Abbildung 2:	Prüfstandswarte	8
Abbildung 3:	Lambda Kennfeld	9
Abbildung 4:	Temperatureinfluss auf Reibung	9
Abbildung 5:	Referenzpunkte im Kennfeld	11
Abbildung 6:	Ein- und Auslass AISi, 30h Motorbetrieb.....	11
Abbildung 7:	Reibmitteldruck.....	12
Abbildung 8:	spez. Kraftstoffverbr.	12
Abbildung 9:	Kennfeld Reibmitteldruck	13
Abbildung 10:	Kennfeld Spitzendruck	14
Abbildung 11:	vKolben 2000 1/min.....	14
Abbildung 12:	vKolben 4000 1/min.....	14
Abbildung 13:	Einlaufverhalten 2000 1/min.....	15
Abbildung 14:	Einlaufverhalten 2000 1/min.....	16
Abbildung 15:	Reibmitteldruckverbesserung.....	16
Abbildung 16:	Endoskopierung NanoFerro, Motorlaufzeit 80h	17
Abbildung 17:	Zündwinkelvariation.....	18
Abbildung 22:	OT Sensitivität bei 2000 1/min	20
Abbildung 23:	p_{mr} Kennfeld NF V2	21
Abbildung 24:	p_{mr} Kennfeld AI V2.....	21
Abbildung 25:	Differenzkennfeld AI V2-NF V2	22
Abbildung 26:	Δp_{mr} 2000 1/min.....	23
Abbildung 27:	Δp_{mr} 4000 1/min.....	23
Abbildung 28:	Heizverlauf.....	23
Abbildung 29:	Normierter Heizverlauf	23
Abbildung 30:	Heizverlauf.....	24
Abbildung 31:	Normierter Heizverlauf	24
Abbildung 32:	NF V1	25
Abbildung 33:	NF V2	25
Abbildung 34:	AI V2	26
Abbildung 35:	Kolben NF V2	26

Abbildung 36: Laufbuchse NF V2.....	26
Abbildung 37: Sensitivität OT Versatz.....	27
Abbildung 38: OT Sonde	28
Abbildung 39: OT-Signal	28
Abbildung 40: Δp_{mr} 2000 1/min.....	29
Abbildung 41: Δp_{mr} 4000 1/min.....	29
Abbildung 42: Wärmeübergang.....	30
Abbildung 43: Heizrate	31
Abbildung 44: Temperatur.....	32
Abbildung 45: Wärmestrom.....	33
Abbildung 46: Endoskopie.....	34
Abbildung 47: Druckseite in UT	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messwerte	10
Tabelle 2: Betriebspunkte.....	24
Tabelle 3: Betriebspunkte.....	24
Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeit.....	29
Tabelle 5: Wärmedurchgangskoeffizient.....	30

1. Aufgabenstellung

Globales Ziel des Verbundvorhabens war die Reduzierung der Reibleistung und die Steigerung der Lebensdauer von Zylinderlaufbuchsen durch Beschichtung mit nanokristallinem Eisen. Dadurch kann die Effizienz eines Motors erhöht werden, was direkt zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch und niedrigeren CO₂-Emissionen führt.

Die Aufgabe des IFKM bestand darin, die mit verschiedenen Schichten versehenen Zylinderlaufbuchsen auf einem Einzylinder-Motorenprüfstand hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Korrosionsbeständigkeit, Stabilität, Reibung und Wandwärmeübergang zu beurteilen. Korrosion und Stabilität sollten optisch über endoskopische Zugänge beurteilt werden. Die Reibung der neuen Schichten sollte mittels hochgenauer Drehmomentmessung beurteilt werden. Einflüsse auf den Wandwärmeübergang sollen mittels einer Zylinderdruckverlaufsanalyse berechnet werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Fragestellung des Vorhabens, inwieweit neue nanokristalline Schichten die motorischen Eigenschaften verbessern können, erfordert ein Zusammenspiel vieler verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen. So muss die Werkstoffkunde zunächst Schichten definieren, die bestimmte Zusammensetzungen und Eigenschaften aufweisen sollen. Die Fertigungstechnik muss nun 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 muss ein Honverfahren auf die neue Beschichtung angepasst werden. Die zunächst hergestellten Zylinderlaufbuchsen müssen zunächst auf einem Forschungsprüfstand auf ihre Eigenschaften vermessen werden. Hierzu zählen Reibleistung, Korrosion, Stabilität der Schichthaftung und eventueller Einfluss auf die Ausbildung einer Grenzschicht, die den Wandwärmeübergang beeinflusst. Die so mechanisch beanspruchten Schichten müssen tribologisch beurteilt werden. Die Schichten mit den besten Ergebnissen müssen anschließend in einem Dauerlauftest unter Realbedingungen auf ihre Serientauglichkeit geprüft 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 sollen.

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

- Firma Gramm-Technik GmbH: Beschichtungstechnik, federführend

- Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik: Oberflächentechnologie, Werkstoffmodellierung u. Simulation, Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung
- Institut für Kolbenmaschinen des KIT (IFKM): Motorentchnik
- IAVF Antriebstechnik GmbH: motorische Tribologieanalytik
- 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.

Am IFKM musste nun ein Forschungsprüfstand aufgebaut werden, auf dem ein Einzylindermotor zur Beurteilung der Zylinderlaufbuchsen betrieben werden kann. Der Prüfstand musste verschiedenen Herausforderungen begegnen. So musste der Einzylindermotor die Möglichkeit bieten, Zylinderbuchsen auszutauschen, die die gleiche Geometrie aufweisen, wie die späteren Serienteile, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Es wurde ein Forschungseinzylindermotor – abgeleitet vom entsprechenden Serienaggregat – von der Firma Audi zur Verfügung gestellt. Der Prüfstand musste mit einer hochgenauen Drehmomentmessung ausgestattet werden, da über das Drehmoment der sogenannte Reibmitteldruck (p_{mr}) als Maß für die Reibung errechnet wird. Die Genauigkeit sollte hier im einstelligen Millibar-Bereich liegen und muss eine hohe Reproduzierbarkeit aufweisen. Zur Beurteilung der Auswirkung der Schicht auf die Thermodynamik, d.h. auf die Effizienz und den Wandwärmeübergang, mussten Systeme adaptiert werden, die eine hochgenaue Messung des Kraftstoffverbrauchs, der angesaugten Luftmasse und des Zylinderinnendruckes erlauben.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Im Prozess des Downsizings sowie der Gewichtsverringering werden für Motorblöcke zunehmend eutektische und übereutektische AlSi Legierungen eingesetzt. Während des Einlaufs durchlebt das oberflächennahe Material eine drastische Veränderung, bei der der so genannte dritte Körper entsteht. Dieser ist für geringen Verschleiß und kleine Reibleistung verantwortlich [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. Um dennoch einen stabilen und störungsunempfindlichen Betrieb bei gleichzeitig niedriger Reibung und kleiner Verschleißrate zu gewährleisten sowie die auf Eisen optimierten Additivreaktionen voll auszunutzen, sollen die AlSi Zylinder einen nanokristallinen Überzug aus elektrolytischem Eisen erhalten. Beim nachfolgenden Honen wird oberflächennahe Bereich der Eisenschicht in Richtung dritter Körper vorkonditioniert.

Die werkstofftechnischen Probleme der AlSi Legierungen 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 [4, 5].

Nach der Freilegung der in der α -Aluminiummatrix ausgeschiedenen Siliziumprimärpartikel ragen die Siliziumkristalle einige hundert Nanometer aus der Aluminiummatrix heraus. Diese Anfangstopographie hat zu dem Vorstellungsbild geführt, dass der Kolbenring von den hervorstehenden Si-Kristallen getragen wird [6,7].

Dieses einfache Modell ist jedoch durch Messungen des Zylinderverschleißes mit Hilfe der Radionuklidtechnik (RNT [8,9]) fraglich geworden. Mit dieser Methode, mit der Verschleißpartikel im Motoröl online detektiert werden können [10], zeigt sich, dass bei Prüfstandsversuchen mit AlSi-Motorblöcken 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 ist 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 nm fertigungsbedingte Einträge von Fremdelementen nachgewiesen werden konnten, findet man in den aluminiumhaltigen Bereichen der gelaufenen Laufbahnoberflächen 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 (Sauerstoff, Kalzium und Kohlenstoff) stark verändert. Dadurch erfolgt eine Steigerung der Verschleißbeständigkeit der Aluminiummatrix. Dieser Vorgang wird als Bildung des 3. Körpers bezeichnet [11, 12].

- 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.

Die tribologisch erzeugte oberflächennahe Legierung (der dritte Körper) – eine Kombination aus Metallmatrix und Si-Nanokristallen und 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 [5].

Literatur

- [1] M. Dienwiebel, M. Scherge, Neue Erkenntnisse zur Tribologie von übereutektischen AlSi-Zylinderlaufflächen, MTZ 68(2007)3.
- [2] R. van Basshuysenm, F. Schäfer, Motorlexikon, <http://motorlexikon.de>.
- [3] Leitfaden zu Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen 2007, VDA - Verband der Automobilindustrie e. V. und VDIK - Verband der Internationalen Kraftfahrzeughersteller e. V.
- [4] U.-P. Weigmann, Spiralgleithonen macht das Laserstrukturieren überflüssig, Betrieb und Meister, 04(2006)9.
- [5] J. Schmid, Moderne Leichtmetallwerkstoffe für den Motorenbau und deren Endbearbeitung durch Honen. In: MTZ 59 (1998) 248.
- [6] P. Stocker, F. Rückert, K. Hummert, Die neue Aluminium-Silizium Zylinderlaufbahn Technologie für Kurbelgehäuse aus Aluminiumdruckguß, MTZ 58 (1997) 502.
- [7] A. Sach, F.-J. Feikus, Laufflächenbildung in Aluminium-Motorblöcken, MTZ Sonderausgabe Werkstoffe (1998/1999) 72.
- [8] M. Scherge, K. Pöhlmann and A. Gervé, Wear measurement using radionuclide-technique (RNT), Wear, 254(2003)9, 801-817.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] M. Godet, Third-bodies in tribology, Wear, 136(1990)1, 29-45.
- [12] D. Shakhvorostov, K. Pöhlmann and M. Scherge, Structure and mechanical properties of tribologically induced nanolayers, Wear, 260(2006)4-5, 433-437.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte hauptsächlich mit den Projektpartnern im Verbundprojekt. Die Honung der Buchsen wurde von der Firma Nagel Maschinen und Werkzeugfabrik GmbH durchgeführt.

6. Ergebnisse

6.1. Prüfstands Aufbau und Referenzmessungen

Gemäß der ausgearbeiteten Planung hat das Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) den Versuchsträger aufgebaut und eine Basisvermessung des Motors durchgeführt. Um die verschiedenen Beschichtungen der Zylinderlaufbuchsen zu untersuchen, kommt ein Einzylinder-Versuchsmotor von Audi zum Einsatz (siehe Abbildung 1). Das Prüfstandssystem, der Drehmomentmessflansch und die Indiziermesstechnik wurden in Betrieb genommen und teilautomatisiert (siehe Abbildung 2).



Abbildung 1: Motorenprüfstand



Abbildung 2: Prüfstandswarte

Zur Sicherstellung reproduzierbarer Messungen wurde der Motor im gesamten Kennfeld von 1000 bis 5000 min⁻¹ appliziert, so dass das Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ in der Teillast konstant bei 1 liegt. In der Vollast wird zum Bauteilschutz auf $\lambda = 0,85$ geregelt (siehe Abbildung 3). Die Zündung wurde so eingestellt, dass der 50%-Umsatzpunkt konstant bei 8-10KW liegt. Sobald die Klopfgrenze erreicht ist, wurde die Zündung zur Vermeidung etwaiger Motorschäden nach spät gestellt.

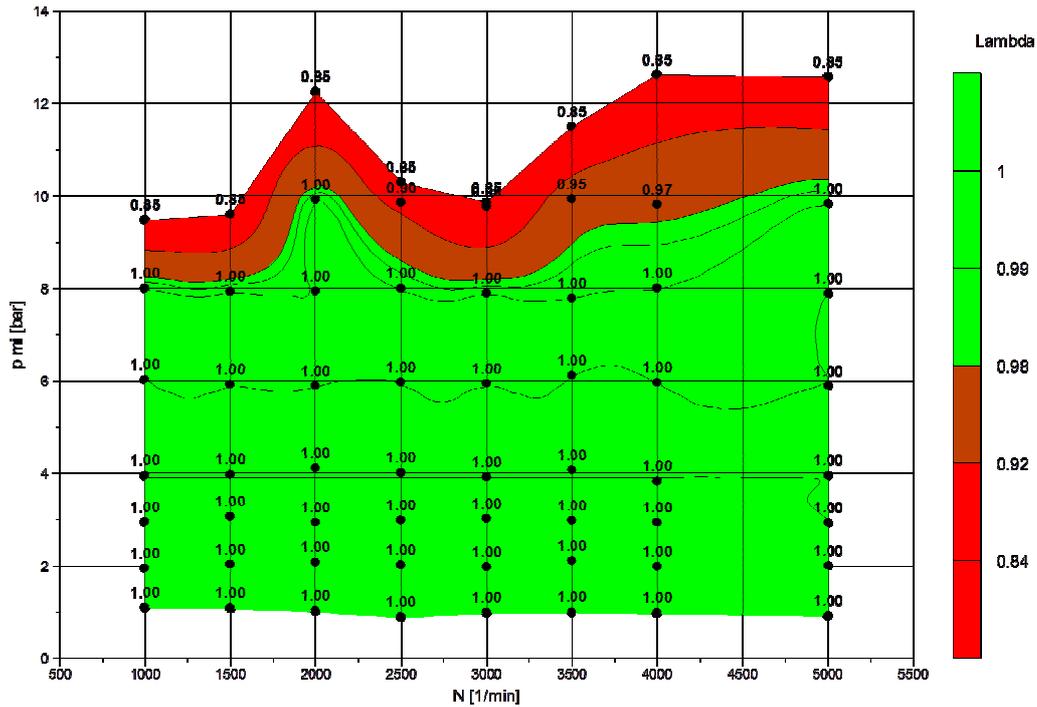


Abbildung 3: Lambda Kennfeld

Der Motor wird mit einer externen Öl- und Wasserkonditionierung betrieben, um sämtliche Temperaturen und Drücke, die auf die Reibleistung Einfluss haben, konstant zu halten. Die Öltemperatur ist auf $\pm 0.5^\circ\text{C}$ geregelt und schließt somit den Einfluss der Ölviskosität auf die Reibung aus. Dieser beträgt bei 4000 min⁻¹, 4 bar Last und bei 2000 min⁻¹, 2 bar Last jeweils ungefähr 0,3%.

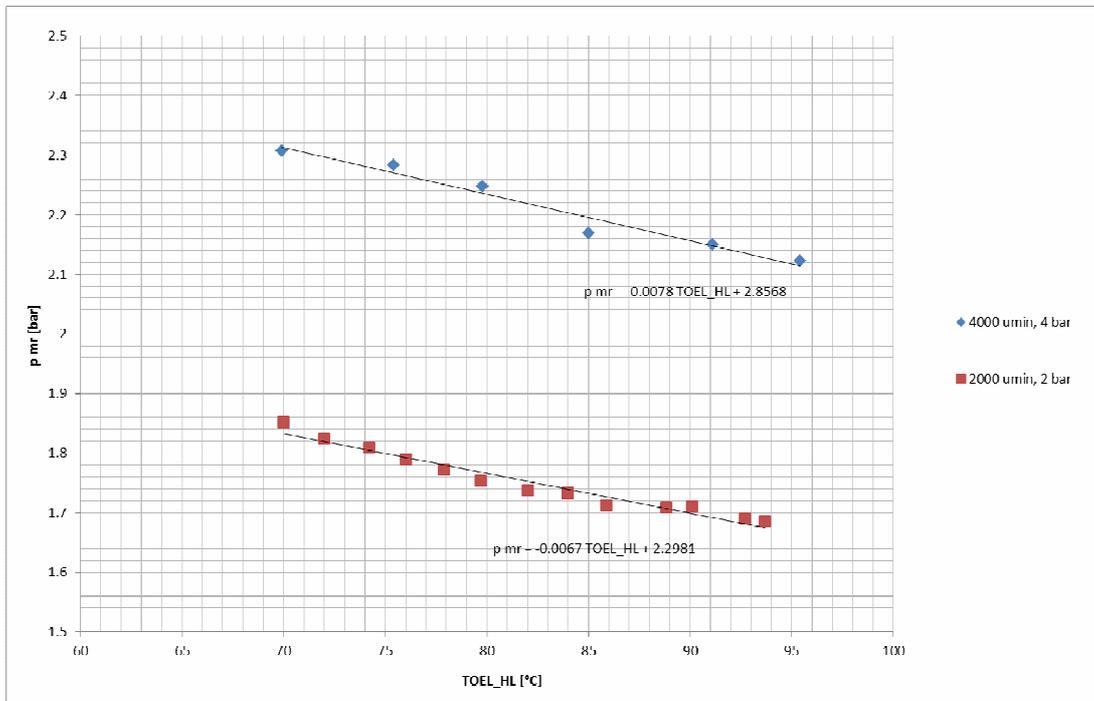


Abbildung 4: Temperatureinfluss auf Reibung

Zur Bestimmung der Reibleistung wird neben einem hochgenauen Drehmomentmessflansch zur Bestimmung des effektiven Mitteldrucks p_{me} , eine Indiziermesstechnik zur Bestimmung des indizierten Mitteldrucks p_{mi} benötigt. Die Differenz dieser beider Größen ist der Reibmitteldruck p_{mr} . Bei der Inbetriebnahme der Messtechnik wurde sichergestellt, dass beide Messungen exakt gleichzeitig starten, um eine reproduzierbare Reibleistungsmessung sicherzustellen. Bei je 50 Messungen wurde dadurch eine sehr geringe Standardabweichung von 5 mbar bei 2 bar Last erzielt (siehe Tabelle 1). Sowohl der Öldruck, die Öltemperatur und der Verbrennungsschwerpunkt konnten reproduzierbar dargestellt werden.

Größe	Einheit	2000 min ⁻¹ , 2bar	2000 min ⁻¹ , 6bar
p_{mr}	bar	1,764 ± 0,005	1,770 ± 0,018
p_{mi}	bar	1,974 ± 0,027	5,986 ± 0,074
p_{me}	bar	0,210 ± 0,029	4,216 ± 0,074
POEL	bar	5,000 ± 0,003	5,000 ± 0,005
TOEL	°C	90,0 ± 0,1	90,0 ± 0,1
I50	kW	9,1 ± 0,5	10,1 ± 0,1

Tabelle 1: Messwerte

Die Reibleistung, die Verbrennung und die Abgasemissionen werden bei beschichteten Buchsen an sechs Referenzpunkten mit der Ausgangsbasis, der unbeschichteten AISi Buchse, verglichen. Diese Punkte sind 2 bar, 6 bar und Vollast bei jeweils 2000 und 4000 min⁻¹ (siehe Abbildung 5). Dies stellt eine ausreichende Vergleichsmöglichkeit der Beschichtungen untereinander sicher, und repräsentiert kundenrelevante Betriebspunkte im Fahrbetrieb. Zudem sind vor allem die bei niedrigen Lasten erreichbaren Verbesserungen ausschlaggebend für den im NEDC ermittelten Verbrauch.

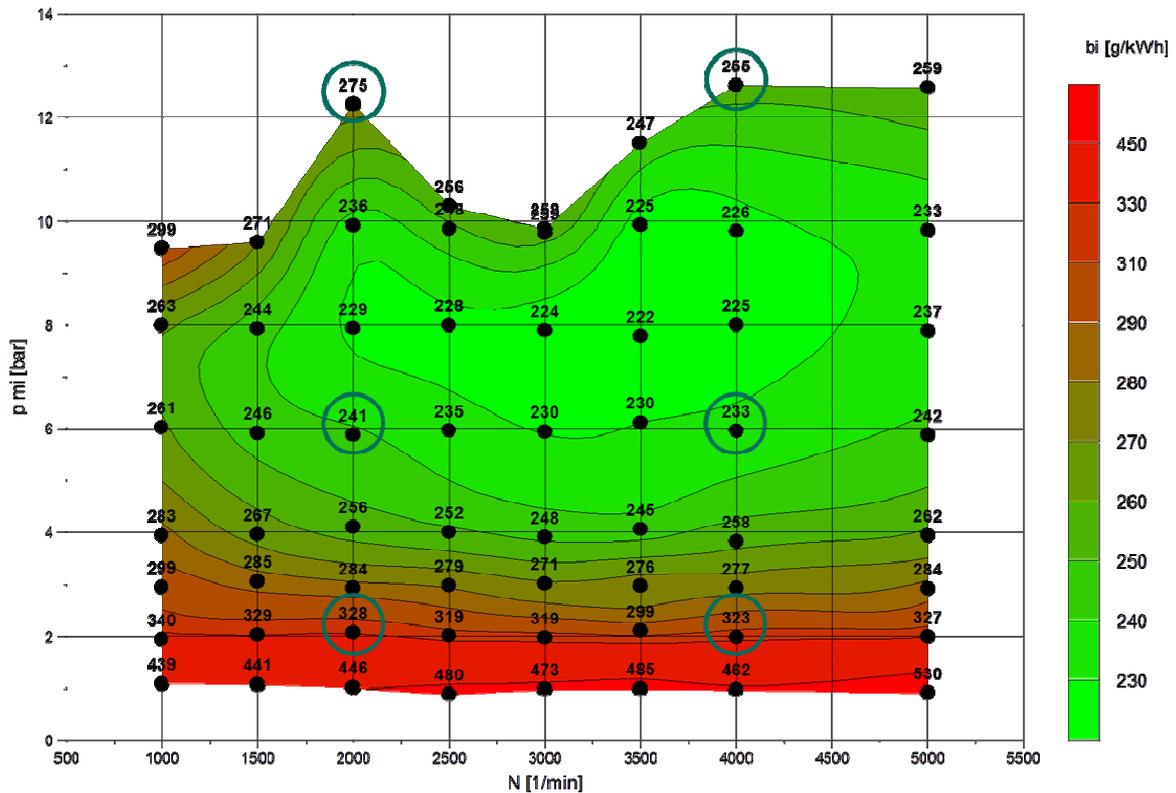


Abbildung 5: Referenzpunkte im Kennfeld

Um die Betriebssicherheit des Verbrennungsmotors zu garantieren, wird ein übermäßiger Verschleiß durch BlowBy gemessen, und optisch über eine regelmäßige Endoskopierung der Zylinderwand beurteilt. Beispielhaft ist die Zylinderwand der AlSi Buchse am Ein- und Auslass bei 30h Motorbetrieb über die Zündkerzenbohrung endoskopiert (siehe Abbildung 6).

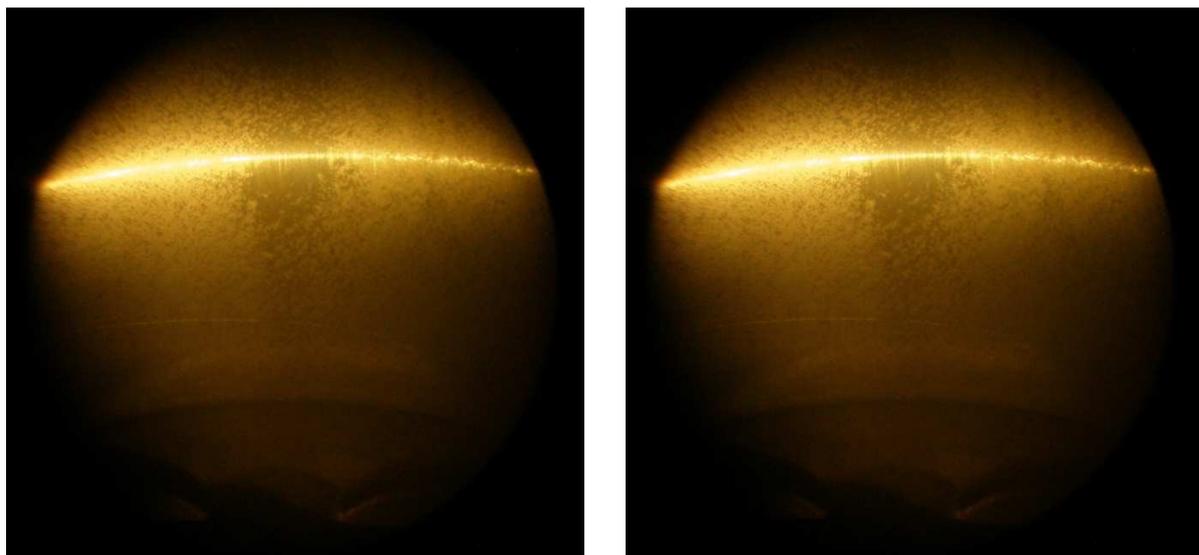


Abbildung 6: Ein- und Auslass AlSi, 30h Motorbetrieb

Zur Sicherstellung konstanter Einlaufbedingungen, die für die tribologischen Gegebenheiten wichtig sind, wird ein automatisiertes Einlaufprogramm erstellt. Dieses Programm lehnt sich an die mit IAVF

erstellten Einlaufprogramme der Audi AG an. Es werden Drehzahlrampen unter einer ständigen Lasterhöhung eingestellt, um die Randschichten tribologisch zu konditionieren. Dieses Einlaufprogramm wird bei allen folgenden Beschichtungsvarianten angewandt.

6.2. Vermessung der Schicht NF V1

6.2.1. Reibungsmessung

Zur Beurteilung des Einflusses der Betriebsmitteltemperaturen (Motoröl und Kühlwasser) auf den Reibmitteldruck wurde die Betriebstemperatur variiert. Verwendet wird das auch bei Audi eingesetzte Öl Castrol EDGE 5W30. Es ergibt sich bedingt durch die höhere Viskosität des Motoröls bei geringeren Temperaturen ein deutlich gesteigerter Reibmitteldruck (siehe Abbildung 1, bei den jeweiligen Betriebspunkten Drehzahl [1/min], p_{mi} [bar]). Durch die erhöhte Reibleistung bei kaltem Motor (35°) im Vergleich zu betriebswarmen Motor (90°) steigt damit auch der effektive spezifische Kraftstoffverbrauch um etwa 10% (siehe Abbildung 2). Für reproduzierbare Reibleistungsuntersuchungen muss demnach sehr exakt die Temperatur eingestellt und geregelt werden.

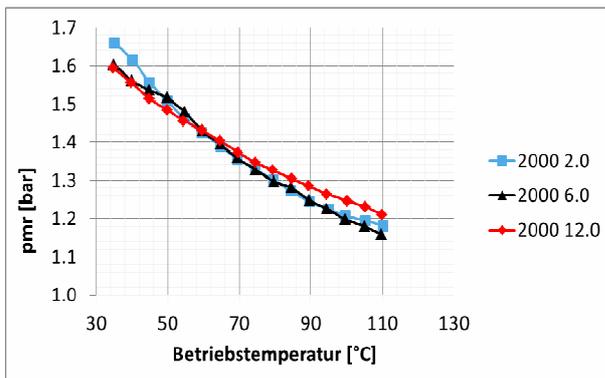


Abbildung 7: Reibmitteldruck

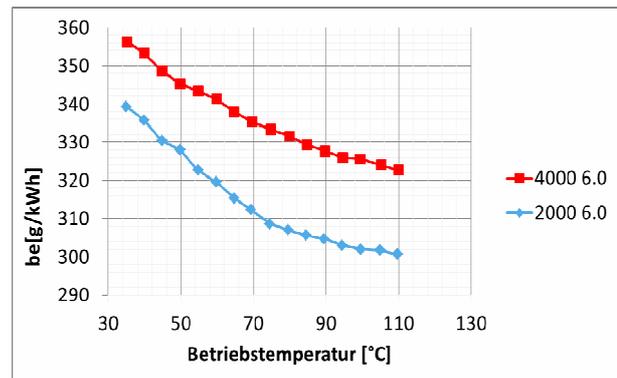
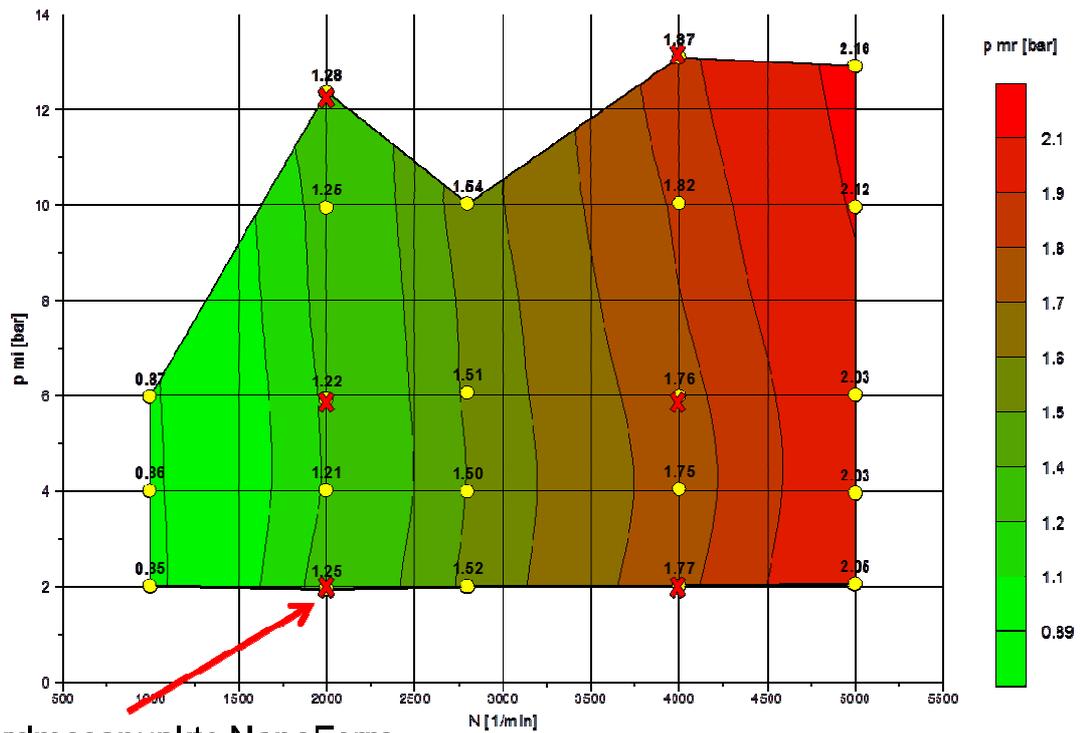


Abbildung 8: spez. Kraftstoffverbr.

Der Reibmitteldruck wurde sowohl bei der unbeschichteten AISi Zylinderlaufbuchse als auch bei der ersten Version der beschichteten Buchse (NF V1) an sechs Referenzpunkten verglichen. Diese Punkte sind 2 bar, 6 bar indizierter Mitteldruck und Volllast bei jeweils 2000 und 4000 1/min (siehe Abbildung 3). Die Teillastpunkte werden zur Vergleichbarkeit auf ein konstantes Drehmoment geregelt, die Volllastpunkte sind über eine komplette Öffnung der Drosselklappe definiert. Es zeigt sich, dass der Reibmitteldruck deutlich mit der Drehzahl steigt. Der Einfluss der Last p_{mi} auf die Reibung ist deutlich geringer.



Standardmesspunkte NanoFerro

Abbildung 9: Kennfeld Reibmitteldruck

Grund für die gesteigerte Reibung bei höherer Last sind die höheren Drücke bei der Verbrennung. Hier charakterisiert durch die maximal auftretenden Spitzendrücke (siehe Abbildung 10). Die Kolbenringe werden durch den anliegenden Innendruck zusätzlich zu ihrer Vorspannung an die Zylinderinnenwand gedrückt. Es ergibt sich eine höhere Normalkraft im Kontakt Kolbenring-Zylinder, der Reibbeiwert verschlechtert sich. Zum grundlegenden Vergleich beider Reibpaarungen Kolbenring-AISi und Kolbenring-NanoFerro wird derzeit beim Fraunhofer IWM der Reibbeiwert bei unterschiedlichen Normalkräften gemessen.

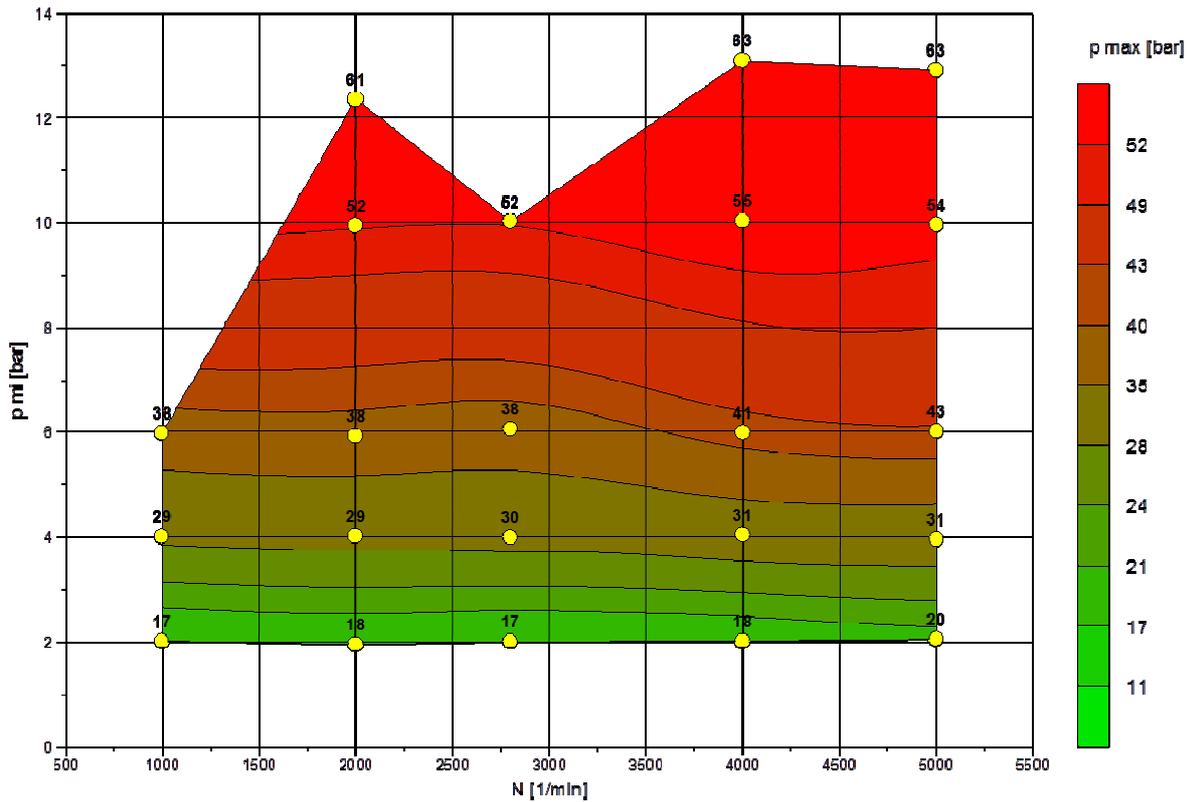


Abbildung 10: Kennfeld Spitzendruck

Wichtig für die Erstellung der Messungen am IWM ist die Kenntnis der Gleitgeschwindigkeiten besonders im obersten Bereich der Laufbuchse, nahe dem oberen Totpunkt OT. Dort treten die höchsten Verbrennungsdrücke und Normalkräfte auf. Dazu wurde für die Kinematik des eingesetzten Aggregates die Kolbengeschwindigkeit über Grad Kurbelwinkel bei 2000 und 4000 1/min berechnet (siehe Abbildung 5 und Abbildung 12). Am Umkehrpunkt selbst ist die Gleitgeschwindigkeit null und nimmt die ersten 20° Kurbelwinkel annähernd linear auf die Werte 5 m/s bei 2000 1/min und 10 m/s bei 4000 1/min zu.

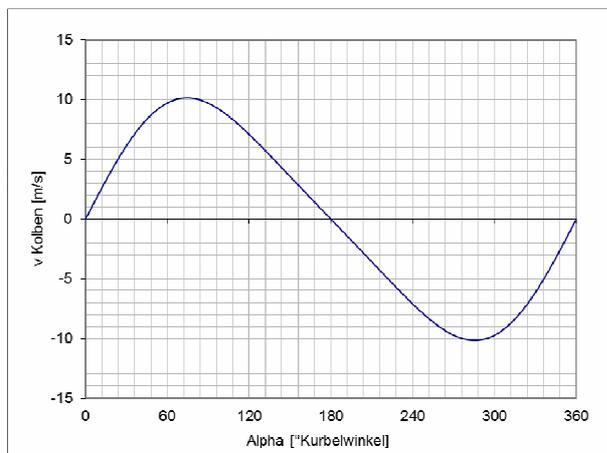


Abbildung 11: vKolben 2000 1/min

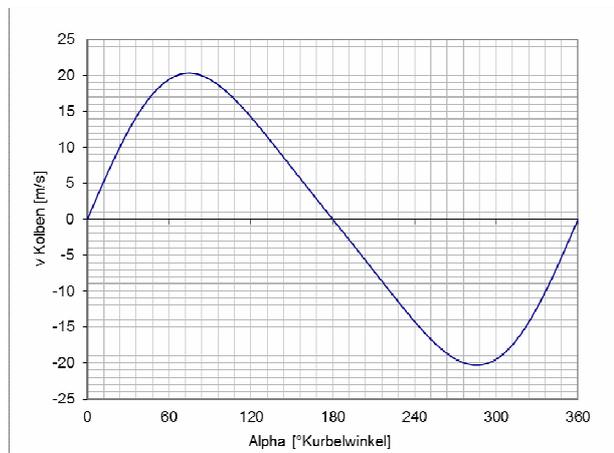


Abbildung 12: vKolben 4000 1/min

Zur Beurteilung der Reibung insbesondere während des Einlaufs wurden die vorgestellten Messpunkte über der Betriebszeit vermessen (siehe Abbildung 5). Ein Messpunkt wurde hierbei fünfmal vermessen, mit einer Standardabweichung $<1\%$ des Messwertes p_{mr} . Es zeigt sich, dass in den ersten Motorstunden der Reibmitteldruck deutlich absinkt. Nach etwa 30h ist ein konstanter Reibmitteldruck erreicht. Angedeutet ist der Reibmitteldruck der unbeschichteten, glatt gehonten AISi Variante, die zu Beginn des Projektes vermessen wurde. Diese Referenzmessung wurde bei einem Motorbetrieb von 80h der AISi Buchse aufgenommen. Nach dem Einlauf ergibt sich vor allem bei dem drehmomentgeregelten Teillastpunkten ein Plateau im Reibmitteldruck. Eine endgültige Beurteilung des Einlaufes wird mittels der Radionuklidtechnik bei IAVF stattfinden.

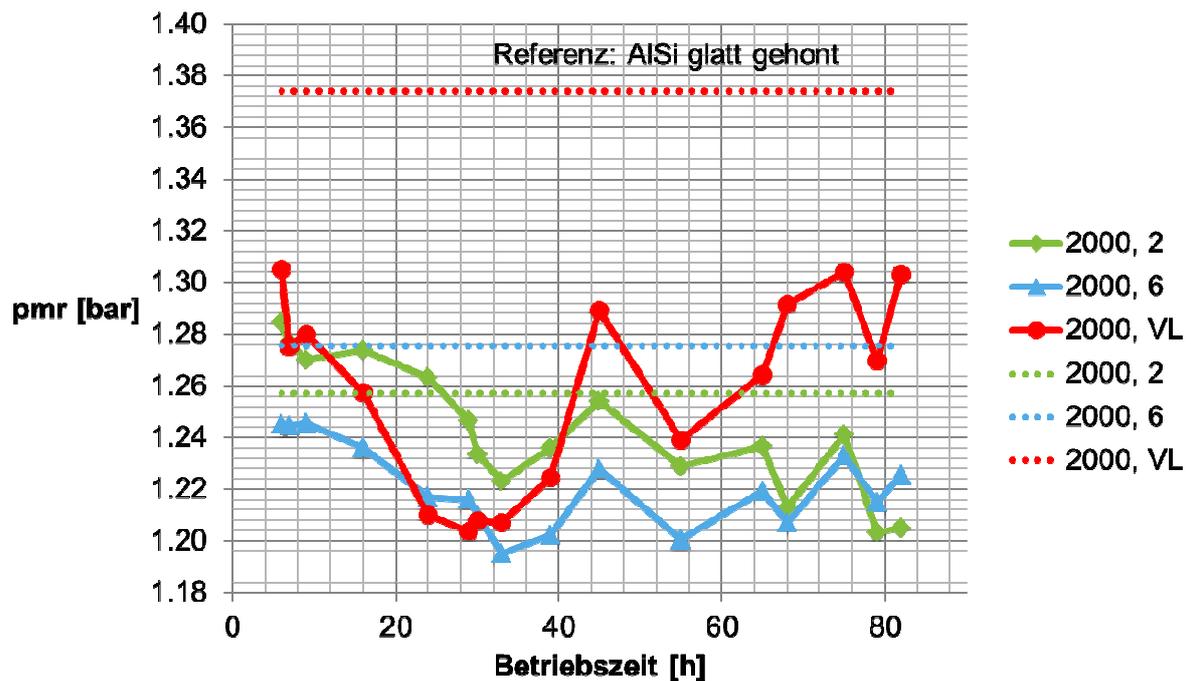


Abbildung 13: Einlaufverhalten 2000 1/min

Die Referenzpunkte bei 4000 1/min zeigen ein ähnliches Verhalten bezüglich des Einlaufs (siehe Abbildung 14). Nach circa 30 Motorbetriebsstunden ist ein konstantes Reibleistungsniveau erreicht.

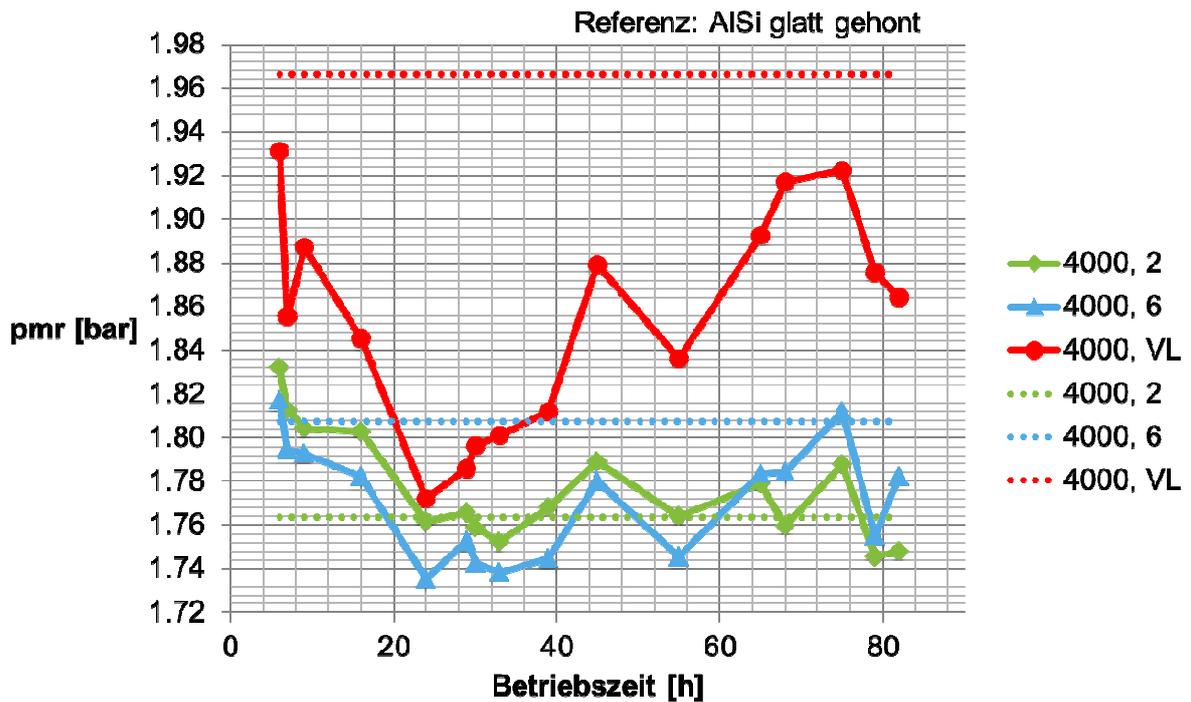


Abbildung 14: Einlaufverhalten 2000 1/min

Zusammenfassend wird ersichtlich, dass im eingelaufenen Zustand nach jeweils 80 Motorbetriebsstunden (siehe Abbildung 15) bei allen Betriebspunkten unter vergleichbaren Betriebsbedingungen die Reibung im Vergleich zur Referenzbuchse (AISI glatt gehont) gesunken ist. Dieser Vorteil in der Reibung kommt bei steigender Last, das heißt bei steigenden Gaskräften und damit auch höheren Flächenpressungen in der Laufbahn, noch deutlicher zum Tragen. Der Grund für die Verbesserung der Reibung des Motors ist die Verbesserung des Reibbeiwertes μ zwischen den Kolbenringen und der Zylinderlauffläche.

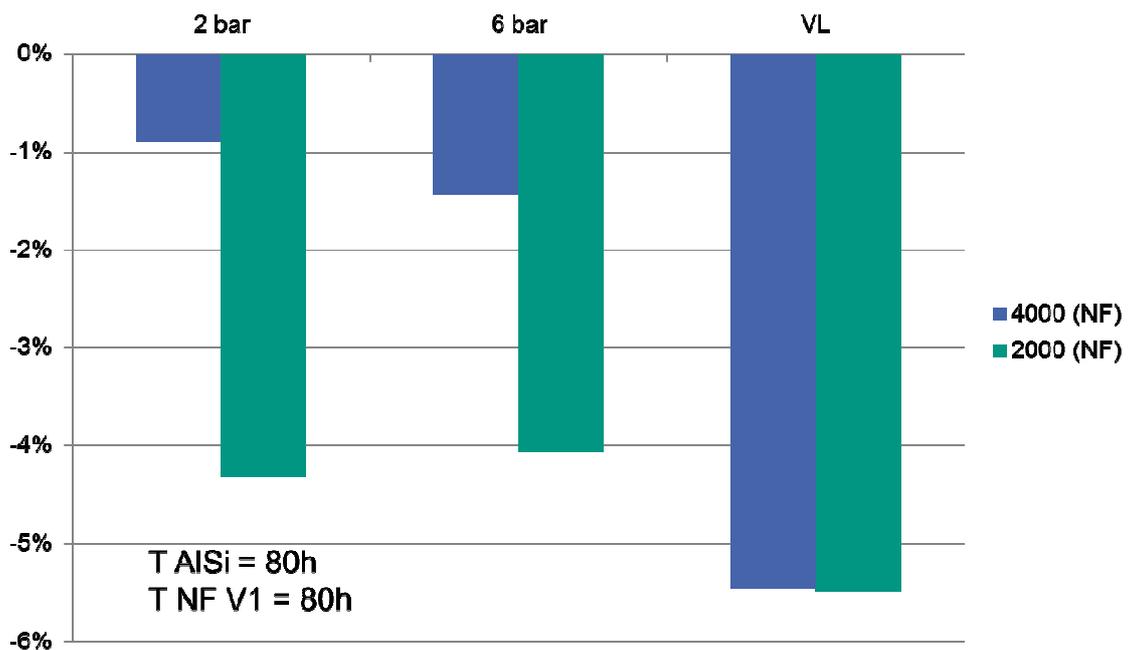


Abbildung 15: Reibmitteldruckverbesserung

6.2.2. *Haltbarkeit der Schicht*

Zu Beurteilung der Schicht wurde der Motor über die Zündkerzenbohrung nach 80h Laufzeit endoskopiert (siehe Abbildung 16). Es ist festzustellen, dass keine Abplatzer die Schicht zerstört haben. Die charakteristischen Merkmale der Kolbenringspuren in OT sind nach wie vor im Vergleich zur Endoskopierung bei 30h Laufzeit erhalten. Eine Korrosion der Schicht ist nur im oberen Bereich der Kammerung über dem ersten Kompressionsring in OT zu erkennen. Die Honriefen sind selbst im Bereich des OT noch durchgängig und sprechen für eine ausreichende Schichthaftung und für einen nicht übermäßigen Verschleiß der Schicht. Weitere Untersuchungen der gelaufenen Buchse bezüglich Restschichtdicke, Profil und Chemie der Oberfläche werden im Rahmen des Projektes angefertigt.

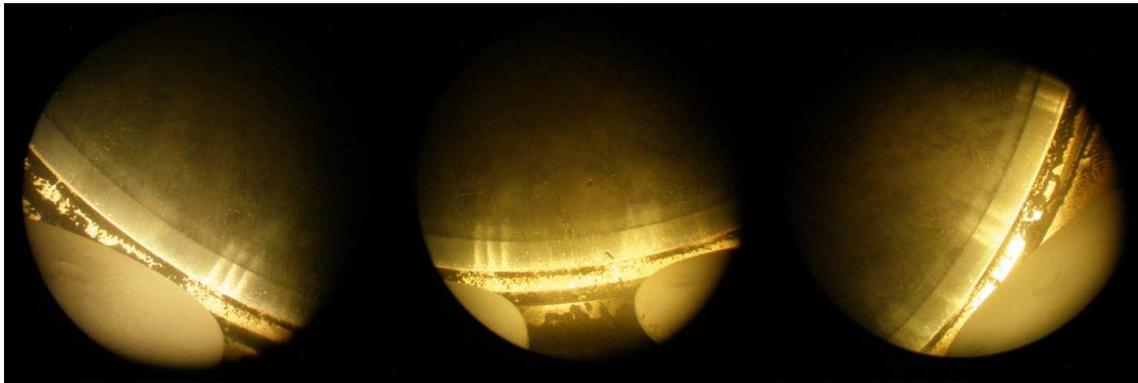


Abbildung 16: Endoskopierung NanoFerro, Motorlaufzeit 80h

6.2.3. *Thermodynamische Betrachtung*

Wichtig für die Beurteilung des Gesamtprozesses des Motors ist nicht ausschließlich die mechanische Reibung, sondern auch die Thermodynamik der veränderten Zylinderlauffläche. Zum grundlegenden Verständnis der Schicht wurde eine Zündwinkelvariation bei 2000 1/min und 2 beziehungsweise 6 bar pmi gefahren. Es zeigt sich, dass bei gleichbleibendem 50%-Massenumsatzpunkt bei einer eisenbeschichteten Buchse früher gezündet werden muss. Der höhere Zündverzug kann durch einen veränderten Wärmeübergang zwischen dem komprimierten heißen Gas und der Buchse resultieren.

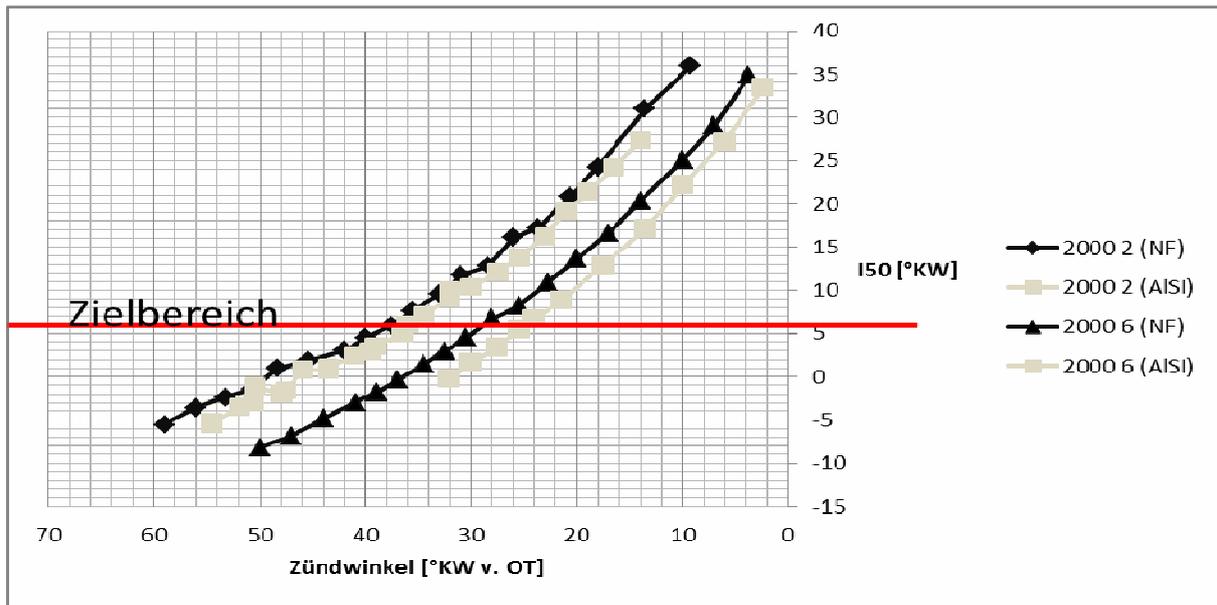


Abbildung 17: Zündwinkelvariation

Bei gleichem Zündzeitpunkt (ZSP in $^{\circ}\text{KW vOT}$) ergibt sich bei der beschichteten Variante ein späterer Umsatz des Gemisches (siehe Abbildung 18). Alle hier dargestellten Brennverläufe sind bei 2000 1/min und 6 bar p_{mi} gemessen. Nur durch Anpassung des Zündzeitpunktes von 24 auf 28 $^{\circ}\text{KW vOT}$ ist ein ähnlicher Massenumsatz zu erreichen (siehe Abbildung 19). Bei der AlSi Variante ist die Umsatzgeschwindigkeit höher. Der normierte Brennverlauf, in Abbildung 20 und Abbildung 21 dargestellt, verdeutlicht dieses Phänomen. Um genaue Kenntnis eines etwaig geänderten Wandwärmeübergangs zu erlangen, werden derzeit weitere Messungen durchgeführt um im weiteren Projektverlauf den Wandwärmeübergang besser charakterisieren zu können.

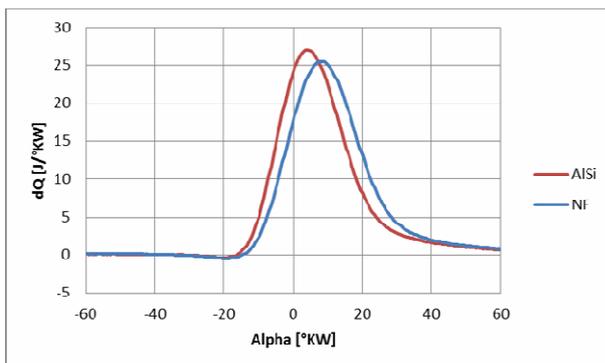


Abbildung 18: Brennrate, ZSP 24 $^{\circ}\text{KW vOT}$

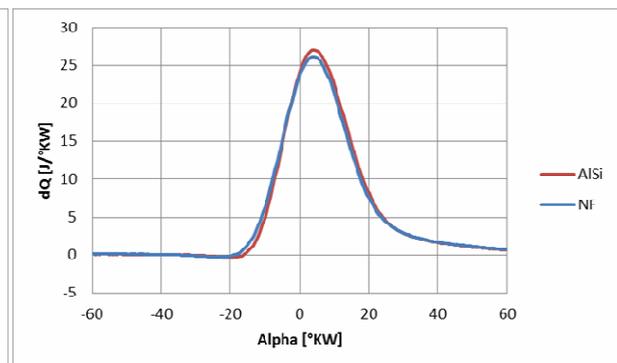


Abbildung 19: Brennrate, ZSP 24,28 $^{\circ}\text{KW vOT}$

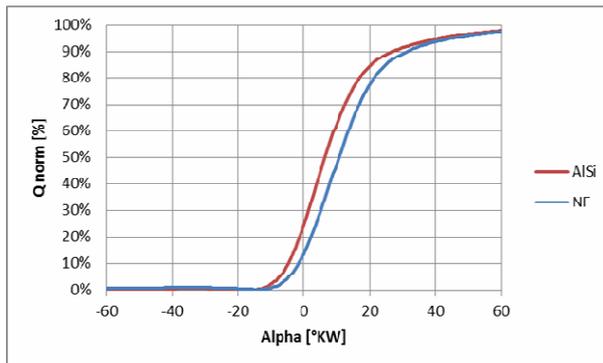


Abbildung 20: normierter Brennverlauf ZZP 24KW

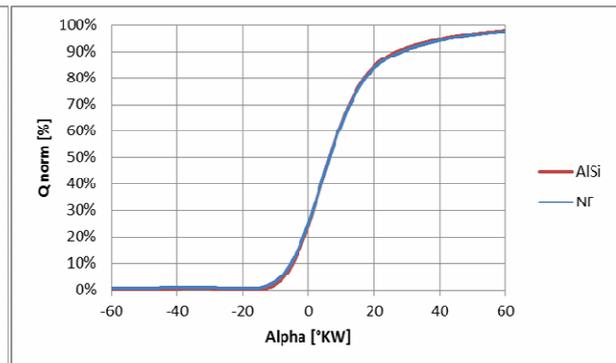


Abbildung 21: normierter Brennverlauf, ZZP 24,28KW vOT

6.3. Vermessung der Schichten NF V2 und Al V2

Es wurden jeweils eine weitere NanoFerro Beschichtung (NF V2) mit 2% Nanopartikeln und eine unbeschichtete, strukturgehonte Aluminium Laufbuchse (Al V2) untersucht und miteinander verglichen.

6.3.1. Reibungsmessung

Eine wichtige Größe für den Verbrauch und damit auch für den CO₂ Ausstoß eines Verbrennungsmotors ist der mechanische Wirkungsgrad, der zu einem großen Teil von der Reibung der Kolbenbaugruppe verursacht wird. Eine Zylinderinnenbeschichtung kann diesbezüglich, neben einer hohen Beständigkeit gegen Korrosion und Verschleiß, ein Verbesserungspotential aufweisen.

Zur Bestimmung der erforderlichen Genauigkeit des Versatzes vom OT-Signal des Winkelgebers zum physikalischen OT wurde eine Sensitivitätsanalyse dieses Wertes auf den indizierten Mitteldruck durchgeführt. Das Winkelgebersignal weist dem Zylinderinnendruck das entsprechende Hubvolumen bei den jeweiligen Kurbelwellenstellungen zu, und hat damit direkten Einfluss auf den indizierten oder inneren Mitteldruck.

$$P_{mi} = \frac{1}{V_H} \oint p(V) dV$$

Bei der verwendeten Messmethode wird der Reibmitteldruck über eine Differenzbildung des effektiven Mitteldrucks, der dem an der Kurbelwelle gemessen Drehmoment proportional ist, und dem inneren Mitteldruck bestimmt.

$$P_{mr} = P_{mi} - P_{me}$$

Somit hängt auch die gemessene Reibung von der Güte der OT Zuordnung ab. Die Sensitivität der p_{mi} Bestimmung auf einen fehlerhaften Versatz ist in Abbildung 22 für die Drehzahl 2000 1/min und verschiedene Lasten (p_{mi}) bis hin zur Vollast dargestellt. Dieser Fehler hängt geringfügig von der Drehzahl, aber stark von der Last ab.

Bereits Abweichungen von 0,1 Grad Kurbelwinkel (ΔKW) weisen in der Volllast einen Fehler von ca. 40mbar auf und liegen somit über der erforderlichen Messgenauigkeit von etwa 20mbar. Zur Einhaltung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit wird bei den durchgeführten Messungen ein maximaler OT-Versatz von 0,05° toleriert.

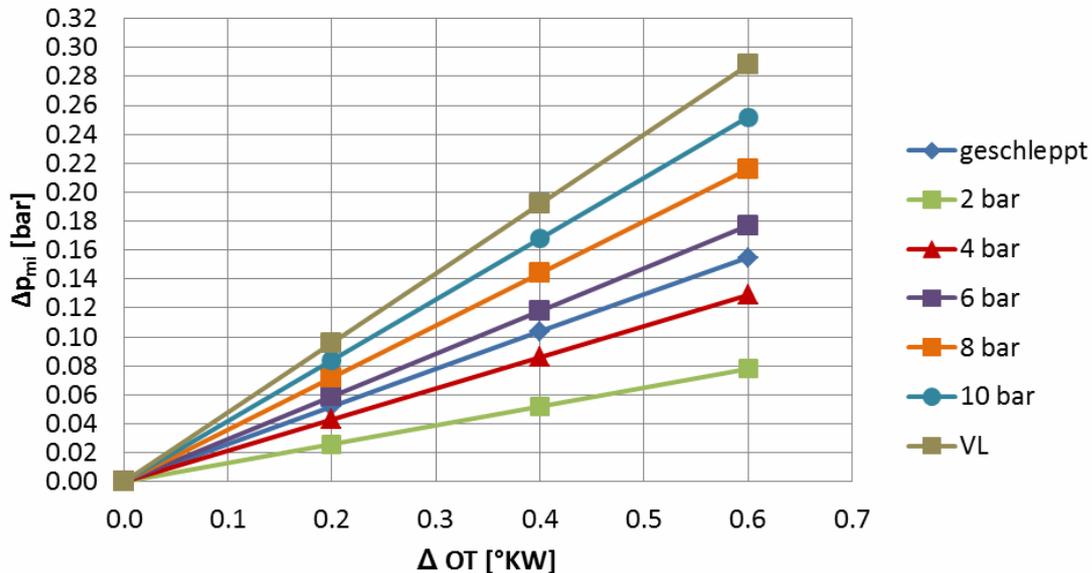


Abbildung 22: OT Sensitivität bei 2000 1/min

Über die im vorherigen Zwischenbericht vorgestellten Standardmesspunkte hinaus wurde das Reibkennfeld der eingesetzten Zylinderlaufbuchsen (NF V2 und AI V2) über einen weiten Drehzahl- und Lastbereich aufgestellt. Die Last wurde bei Drehzahlen zwischen 1000 und 2000 1/min sukzessive angehoben um den Antriebsstrang samt Drehmomentmessflansch nicht durch auftretende Drehmomentspitzen zu gefährden. Ab einer Drehzahl von 2000 1/min ist die Volllast bei voll geöffneter Drosselklappe erreicht und wird bis zur Maximaldrehzahl von 5000 1/min vermessen.

Die Kennfelder weisen eine Abhängigkeit des Reibmitteldrucks über der Last auf (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Grund hierfür ist die erhöhte Normalkraft der Kolbenringe auf die Zylinderwand bei gesteigertem Zylinderdruck. Im geschleppten Zustand ist die Reibung höher als bei niedriglastigen Betriebspunkten, da auch hier der Zylinderdruck höher ist – die Schleppkurven werden bei geöffneter Drosselklappe aufgenommen und sind durch negative p_{mi} Werte gekennzeichnet. Einen viel größeren Einfluss als die Last hat allerdings die Drehzahl auf den Reibmitteldruck. Darin liegt neben der Lastpunktverschiebung hin zu thermodynamisch günstigeren Betriebspunkten ein Verbrauchspotential des derzeit in der Automobilbranche verbreiteten Trends des „Downspeedings“ zur Senkung der CO₂ Emissionen.

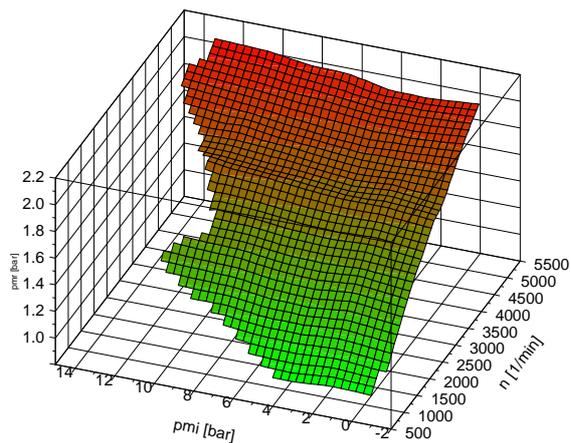


Abbildung 23: p_{mr} Kennfeld NF V2

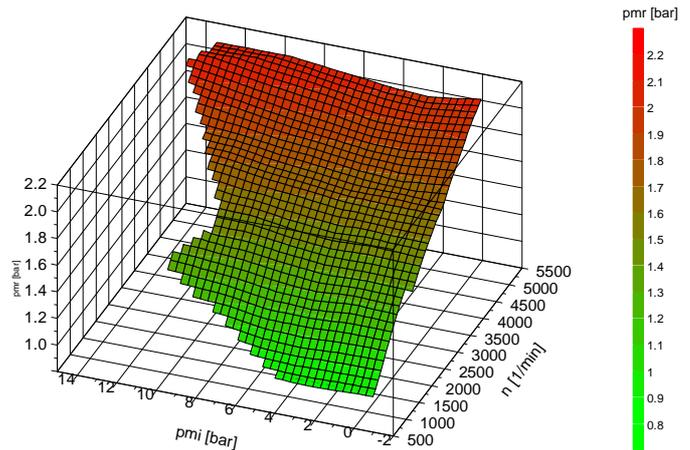


Abbildung 24: p_{mr} Kennfeld Al V2

Entscheidend für die Beurteilung der Beschichtung im Hinblick auf die Reibungseigenschaften ist die Differenz beider Kennfelder, die in Abbildung 25 aufgezeigt wird.

Es ergibt sich fast im gesamten Kennfeldbereich ein Vorteil der 2-prozentigen NanoFerro Beschichtung im Vergleich zur ebenfalls strukturgehonten unbeschichteten AluSil Variante. Beide Kennfelder sind in einem eingelaufenen Motorbetrieb nach jeweils etwa 60 Motorbetriebsstunden aufgenommen. Im Bestpunkt ist die Motorreibung um circa 70 mbar reduziert. Auch hier ist zu erkennen, dass die Vorteile in der Reibleistung hauptsächlich bei höheren Lasten auftreten.

Im nächsten Bearbeitungszeitraum werden die Gleitreibkoeffizienten der AluSil und der NanoFerro Laufbahn, die an einem Kolbenringsimulator am Fraunhofer IWM ermittelt werden, mit den hier gewonnenen Erkenntnissen verglichen.

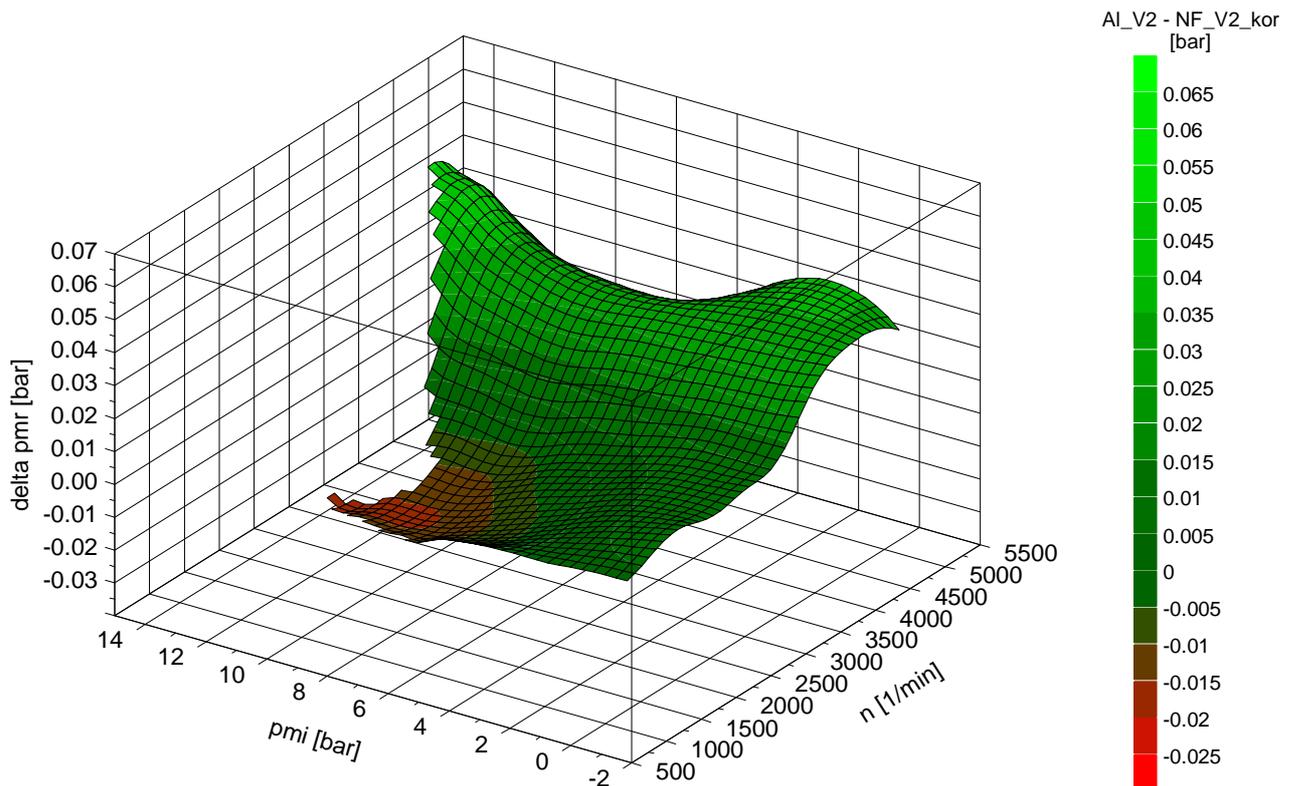


Abbildung 25: Differenzkennfeld AI V2-NF V2

In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind bei 2000 und 4000 1/min die gemittelten Reibmitteldruckvorteile der NF V2 Beschichtung im Vergleich zur strukturgehonten AI V2 aufgezeigt. Die Daten wurden über 30 Betriebsstunden gemittelt und zum Ende der jeweiligen Versuchsreihe jeder Buchse im eingelaufenen Zustand durchgeführt.

Die Betriebsmitteltemperaturen (Kühlwasser, Motoröl), der Öldruck, der effektive Mitteldruck p_{me} , sowie die Motorparameter wie Einspritz-, Zündzeitpunkt und Nockenwellenspreizung wurden jeweils konstant gehalten. Es bestätigt das vorgestellte Differenzkennfeld mit Reibungsvorteilen vor allem bei höheren Lasten, bis hin zu Vollast (VL).

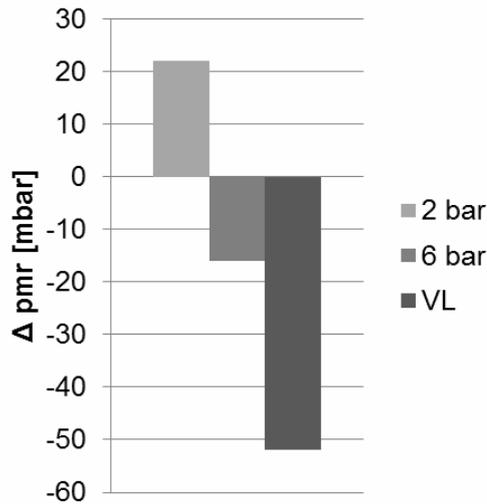


Abbildung 26: Δp_{mr} 2000 1/min

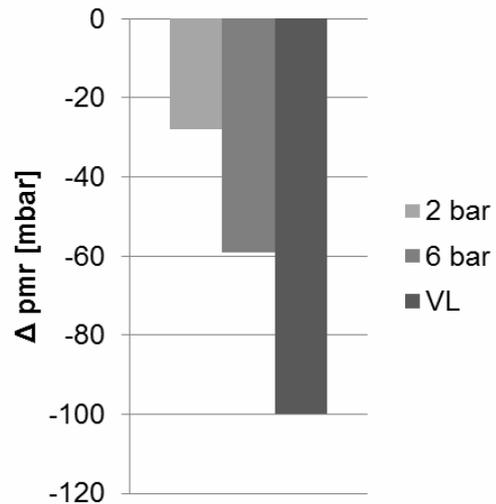


Abbildung 27: Δp_{mr} 4000 1/min

6.3.2. Thermodynamisch Betrachtung

Nicht ausschließlich eine geänderte Mechanik, sondern auch die thermodynamischen Gegebenheiten sind entscheidend für den Gesamtwirkungsgrad. Hierfür wurden die Heizverläufe und die normierten Heizverläufe der drei zuletzt eingesetzten Laufbuchsen (NF V1, NF V2, Al V2) verglichen. Dargestellt sind sie in Abbildung 28 und Abbildung 29 für die Varianten NanoFerro 0% Nanopartikel (NF V1), NanoFerro 2% Nanopartikel (NF V2), sowie die strukturegehonte AluSil Variante (Al V2) für den Betriebspunkt 2000 1/min und mittlere Last 6 bar p_{mi} . Das Luft Kraftstoff Verhältnis, der 50% Massenumsatz I50, sämtliche Temperaturen, die Steuerzeiten, die Ladungsbewegung, sowie der Einspritzdruck wurden konstant gehalten.

Im Brennverlauf zeigen sich nahezu keine Unterschiede der NanoFerro Varianten und nur sehr geringe Unterschiede zur AluSil Zylinderwand.

Lastpunkt 2000 1/min, 6 bar p_{mi}

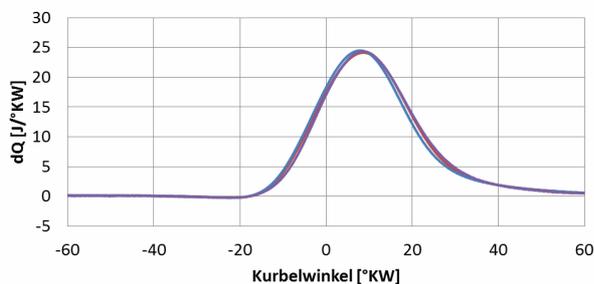


Abbildung 28: Heizverlauf

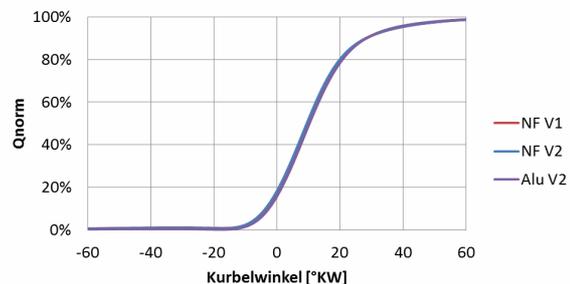


Abbildung 29: Normierter Heizverlauf

Messung	Buchse	Lastpunkt	p_{mi}	ZZP	I_5	I_50	I_95	ZV	BD
			bar	KW	KW	KW	KW	KW	KW
08022011_018	NF V1	2000, 19,5 Nm	6.0	-26.0	-6.2	10.5	39.0	19.8	45.2
29032011_027	NF V2	2000, 19,5 Nm	6.0	-27.0	-6.5	9.8	38.9	20.5	45.4
15062011_027	Alu V2	2000, 19,5 Nm	6.0	-26.9	-5.3	10.6	36.9	21.6	42.2

Tabelle 2: Betriebspunkte

Lastpunkt 4000 1/min, 6 bar pmi

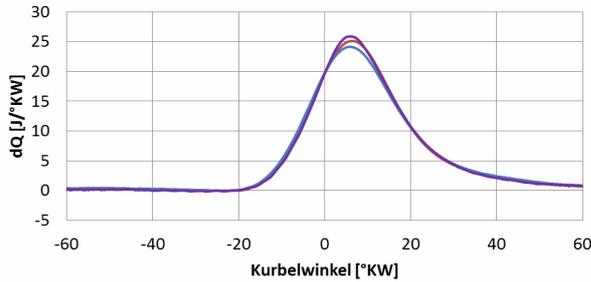


Abbildung 30: Heizverlauf

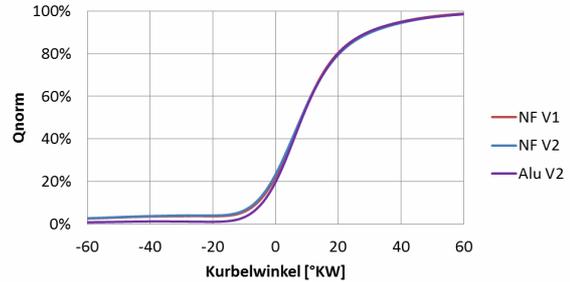


Abbildung 31: Normierter Heizverlauf

Messung	Buchse	Lastpunkt	p _{mi} bar	ZZP KW	I ₅ KW	I ₅₀ KW	I ₉₅ KW	ZV KW	BD KW
08022011_049	NF V1	4000, 17 Nm	6.0	-31.0	-11.5	8.7	40.2	19.5	51.7
29032011_080	NF V2	4000, 17 Nm	6.0	-32.2	-13.3	8.6	41.8	18.9	55.1
15062011_083	Alu V2	4000, 17 Nm	6.0	-32.8	-7.5	8.8	40.3	25.4	47.7

Tabelle 3: Betriebspunkte

Auch der Lastpunkt 6 bar p_{mi}, 4000 1/min (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31) bestätigt die Vergleichbarkeit aller Zylinder im Heizverlauf. Generell lässt sich jedoch ein erhöhter Zündverzug (ZV) und eine verkürzte Brenndauer (BD) der Al V2 Buchse beobachten.

Der Zündverzug ist in diesem Falle als Differenz zwischen dem 5%-Massenumsatz (I₅) und dem Zündzeitpunkt (ZZP) definiert. Die Brenndauer als Differenz zwischen dem 95%-Massenumsatz (I₉₅) und dem 5%-Massenumsatz (I₅).

Eine genaue Untersuchung folgt nach dem Verbau der finalen NanoFerro Beschichtung, die derzeit von den Projektpartnern Gramm, IWM und Audi festgelegt wird. Es wird der Brennverlauf mit dem am IFKM entwickelten Werkzeug zur Analyse des Brennverlaufs BREMO detaillierter betrachtet.

Von besonderem Interesse sind die Gastemperaturen zum Zündzeitpunkt, die den Zündverzug beeinflussen, sowie die Brenndauer. Da eine kurze Brenndauer wie sie im Aluzylinder auftritt thermodynamisch günstiger ist, als die längere Brenndauer im mit Eisen beschichteten Zylinder, gilt es hier eine Abwägung der mechanischen Vorteile und der eventuell auftretenden thermodynamischen Nachteile zu treffen.

6.3.3. Haltbarkeit der Schichten

Erste Versuche seitens Audi zeigten Auffälligkeiten der Schicht hinsichtlich Korrosion. Auch zur Beurteilung eines unzulässigen, übermäßigen Verschleißes werden die Laufbuchsen regelmäßig endoskopisch untersucht.

Eine Auffälligkeit hinsichtlich Korrosion konnte am Einzylinder-Aggregat zu keinem Zeitpunkt beobachtet werden, da der Motor vor Betrieb über eine externe Konditionieranlage auf Betriebstemperatur gebracht wird und erst im geschleppten Zustand die Verbrennung eingeleitet wird

– Es kommt zu keinem Kaltstart. Des Weiteren wird der Motor nach Messende nicht sofort abgestellt, sondern zuerst die Einspritzung abgeschaltet und nach etwa 5 Minuten Schleppbetrieb wird der Motor angehalten. Nach dieser Prozedur sind Verbrennungsgase, die kondensieren und korrosiv wirken können aus dem Brennraum gespült. In Abbildung 32 und Abbildung 33 ist die Auslasseite von links nach rechts des Brennraumdachs und der NF Zylinderwand dargestellt. Eine Korrosion wie sie bereits zum Teil seitens Audi auftrat konnte nicht beobachtet werden.

Gegen einen unzulässigen Verschleiß sprechen die noch durchgängigen Honriefen, sowie nicht vorhandene Abplatzer oder Verformungen der Schicht.

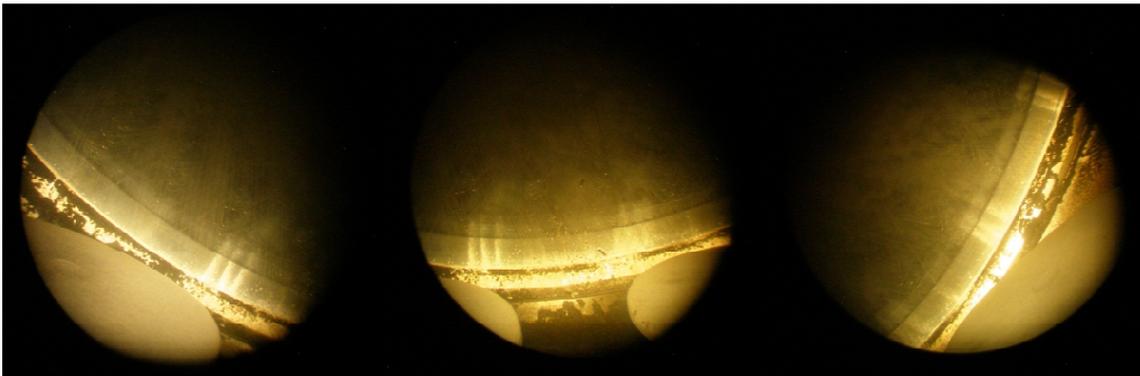


Abbildung 32: NF V1

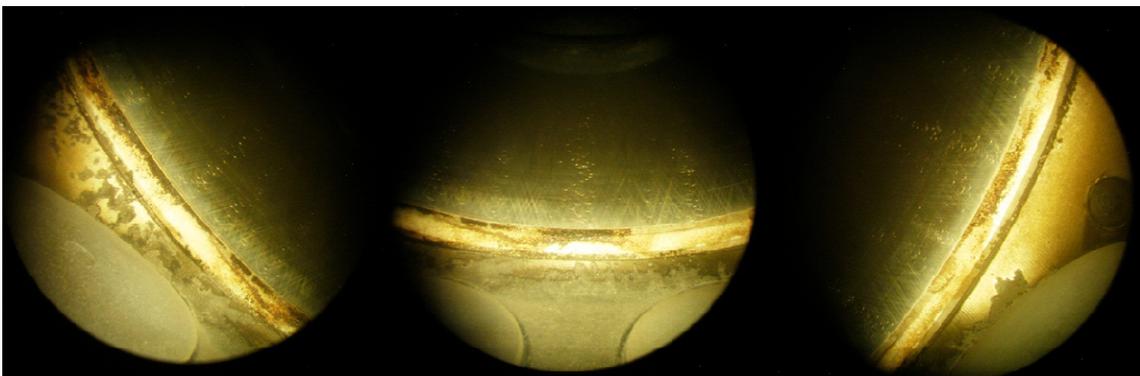


Abbildung 33: NF V2

Charakteristisch für alle Laufbuchsen sind die Spuren, die die Kolbenringe in ihren Umkehrpunkten im OT verursachen (siehe zusätzlich Abbildung 34). Auch bei der Alu-Variante, wie sie derzeit im Serieneinsatz bei Audi ist, sind keine unzulässigen Verschleißmerkmale zu erkennen.

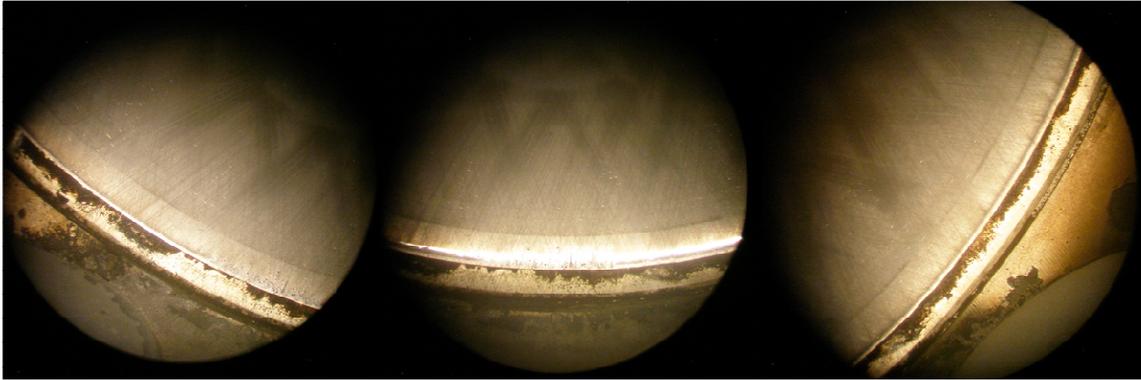


Abbildung 34: AI V2

Nicht nur die Funktionsfähigkeit der Laubbuchse, auch die für die NF-Laufbahnen geänderten Kolbenhemdbeschichtungen aus Grafal konnte nachgewiesen werden. Nach etwa 100 Motorbetriebsstunden, zum einem großen Teil unter hohen Lasten, sind keine Mängel am Kolbenhemd und an den Kolbenringen sichtbar (siehe Abbildung 35 und Abbildung 36).



Abbildung 35: Kolben NF V2

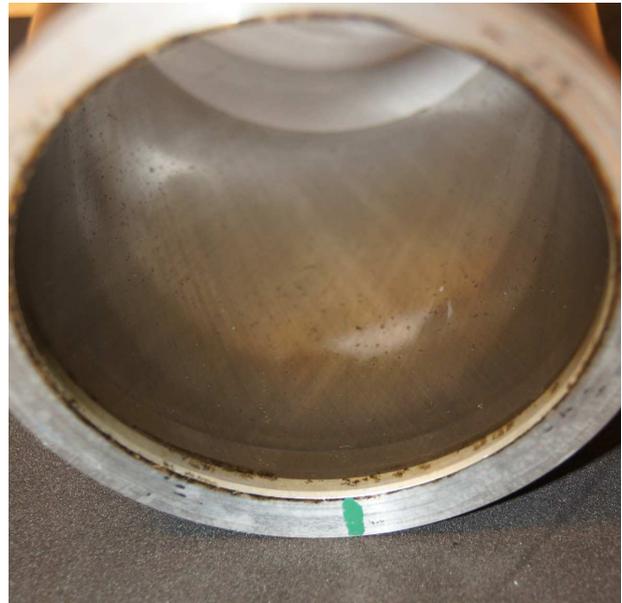


Abbildung 36: Laubbuchse NF V2

6.4. Vermessung der Schicht NF V3

Die Variante NF V3 wurde in Versuchen seitens der Projektpartner hinsichtlich Korrosion als optimal eingestuft. Es handelt sich um eine NanoFerro Beschichtung mit Nanopartikeln. Diese Beschichtung stellt hinsichtlich Reibung, Korrosion und Haltbarkeit den finalen Stand der IFKM-Untersuchungen dar.

6.4.1. Reibungsvermessung

Eine wichtige Größe für den Verbrauch und damit auch für den CO₂ Ausstoß eines Verbrennungsmotors ist der mechanische Wirkungsgrad, der zu einem großen Teil von der Reibung der Kolbenbaugruppe verursacht wird. Eine Zylinderinnenbeschichtung kann diesbezüglich, neben einer hohen Beständigkeit gegen Korrosion und Verschleiß, ein Verbesserungspotential aufweisen.

Für die Bestimmung des inneren Mitteldrucks ist die genaue Kenntnis der Lage des oberen Totpunktes (OT) von entscheidender Bedeutung. Um die Auswirkung eines fehlerhaften OT-Versatzes auf den p_{mi} Wert zu beurteilen wurden die gemessenen Druckverläufe bei den jeweiligen Lastpunkten um ein Delta TO verschoben. Wie Abbildung 37 veranschaulicht muss der OT mindestens auf $0,1^\circ$ genau bestimmt werden um reproduzierbare Ergebnisse und eine ausreichende Messgenauigkeit $<20\text{mbar}$ zu erhalten. Dieser Effekt tritt besonders bei höheren Lasten stark auf.

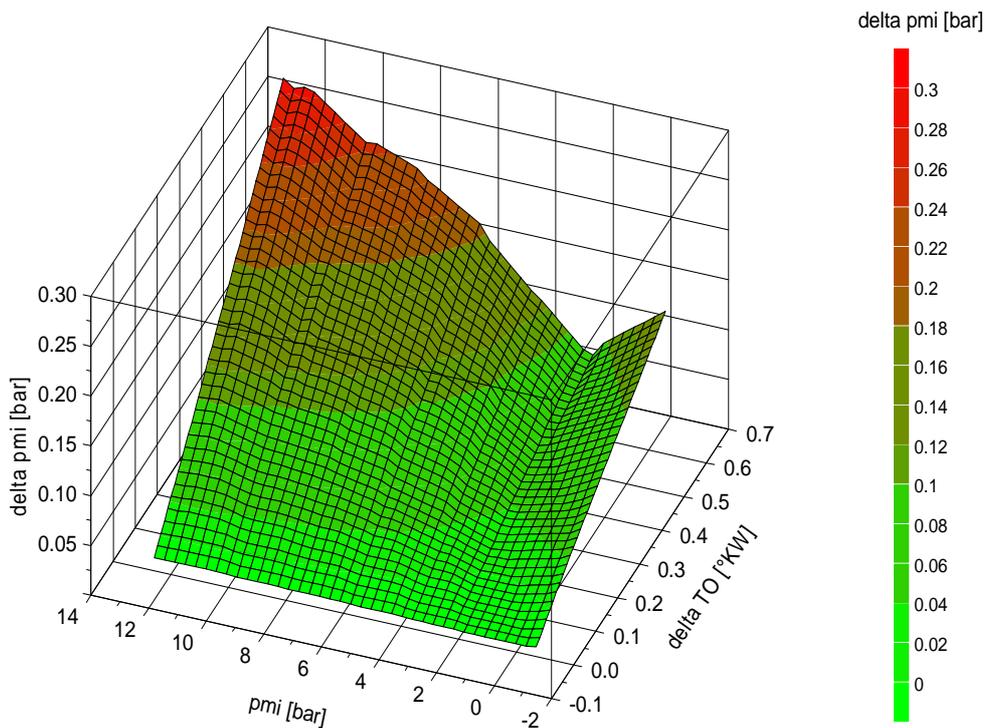


Abbildung 37: Sensitivität OT Versatz

Aufgrund dieses Sachverhaltes wird eine kapazitive OT Sonde zu Beginn einer jeden Beschichtungsvariante und danach in regelmäßigen Abständen in der Zündkerzenbohrung des Einzylinderaggregates montiert (siehe Abbildung 38). Diese Sonde nutzt den Kolbenboden als eine Hälfte eines Plattenkondensators. Im geschleppten Betrieb entsteht somit ein Signal, das dem inversen Kolbenabstand proportional ist. Es entstehen 2 Maxima, die dem Ladungswechsel- und Zünd-OT entsprechen (siehe Abbildung 39). Dieses Signal wird mittels eines Indiziersystems über 200 Zyklen im geschleppten Zustand bei voll geöffneten Drosselklappe und 2000 1/min mit einer Auflösung von $0,1^\circ$ aufgenommen und anschließend gemittelt und ausgewertet.

Im Gegensatz zum Ladungswechsel-OT werden im Zünd-OT sämtliche Spiele der Kolbenbaugruppe durch den durch die Kompression anliegenden Gasdruck herausgenommen. Folglich ist der Abstand des Kolbens zur Sonde im LOT geringer und das Maximum des Signals höher. Die Lage des LOT ist demnach die Position des größten Maximums des Signals, die des ZOT entspricht der Position des zweitgrößten Maximums, das zum LOT um 360° versetzt ist.



Abbildung 38: OT Sonde

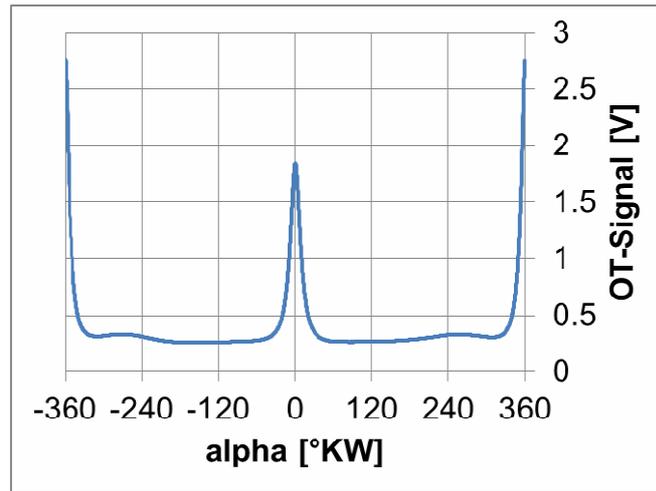


Abbildung 39: OT-Signal

Ein weiteres Qualitätsmerkmal der Indiziermessung liefert eine regelmäßige Kalibrierung des Drucksensors (montiert/demontiert siehe Abbildung 46). Dieser darf zu keinem Zeitpunkt von seiner Linearität abweichen und andere Sensitivitäten aufweisen, die durch eine Alterung oder unzulässig hohe Beanspruchung der Membran oder des Kristalls zustande kommen kann. Bei dem vorliegenden Drucksensor 6045 der Firma Kistler konnte eine Linearität des Sensors bis zum Ende der Messreihen mit einer Kalibriereinheit 6907B desselben Herstellers von kleiner $\pm 0,08\%$ nachgewiesen werden.

Weitere Fehlerquellen auf eine Reibleistungsmessung wie sie hier Verwendung findet können unterschiedliche Verspannungen im Motoraufbau sein. Da die Zylinderlaufbuchse selbst in einer schwimmenden Lagerung im Motorblock aufgenommen ist, kein Verzug durch benachbarte Zylinder auftreten kann, die Ausrichtung des Motorblocks auf dem Prüfstandbett sehr exakt erfolgt, sowie die Vorgehensweise des Anzugs der Kopfschrauben immer eingehalten wird können Unregelmäßigkeiten von dieser Seite aus vermieden werden.

Zur Verifizierung der Methoden und Abläufe beim Aufbau wurde eine Demontage und anschließende Montage des gesamten Motors ohne Komponentenwechsel durchgeführt. Die Differenz des Reibmitteldrucks am Referenzpunkt 2000 1/min, 2 bar vor und nach Umbau beträgt 9 mbar. Diese Differenz liegt im Bereich der Messgenauigkeit und veranschaulicht die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft der Messungen.

Bei der Vermessung des finalen Stands der Beschichtung wurden wie bei vorangegangenen Messungen die Betriebsmitteltemperaturen (Kühlwasser, Motoröl), der Öldruck, der effektive Mitteldruck p_{me} , sowie die Motorparameter wie Einspritz-, Zündzeitpunkt und Nockenwellenspreizung jeweils konstant gehalten. Bei der Drehzahl 2000 1/min wurde annähernd dasselbe Δp_{mr} zwischen der NF V3 und der strukturgehonten AluSil Buchse gemessen. Ein positives Δ entspricht einem Reibungsvorteil der Beschichtung im Vergleich zur sich in Serie befindlichen strukturgehonten AluSil Variante Al V2. Es bestätigt den Reibleistungsvorteil besonders bei hohen Lasten bis hin zur Vollast (siehe Abbildung 26).

Bei 4000 1/min konnten die bereits bei der Beschichtungsvariante V2 gefundenen Vorteile allerdings nicht mehr gemessen werden (siehe Abbildung 27). Grund hierfür kann eine Erhöhung der Reibung im Antriebsstrang des Einzylinders zum Ende der Messreihen sein. Die Prüfstandswelle ist mit einvulkanisierten Dämpfern zur Reduzierung der Drehmomentspitzen, die auf den Messflansch einwirken ausgestattet, die mit der Laufzeit altern können und besonders bei höheren Drehzahlen wirksam werden. Ein weiterer Grund kann der Steuertrieb, der über einen Riemen zwischen der Kurbelwelle und den Nockenwellen realisiert ist, sein. Allerdings bestätigen die gefundenen Resultate bei 2000 1/min den Vergleich der direkt aufeinander folgenden Messreihen NF V2 und AI V2. Eine abschließende Bewertung der Unterschiede wird im letzten Projektabschnitt der Vergleich der Messungen am Einzylinderprüfstand mit den Messungen am Kolbenringsimulator des Fraunhofer IWM aufzeigen.

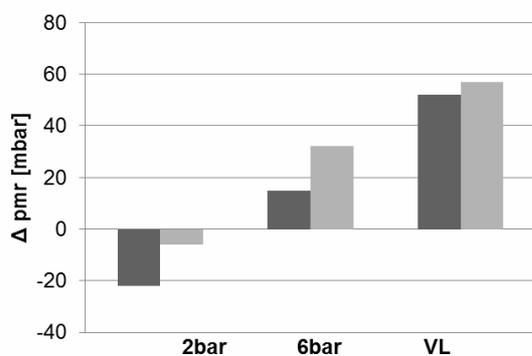


Abbildung 40: Δp_{mr} 2000 1/min

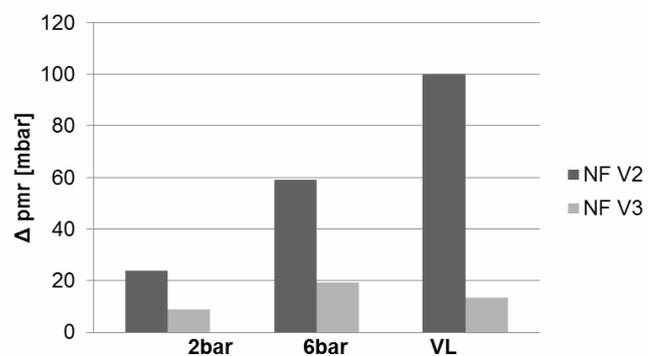


Abbildung 41: Δp_{mr} 4000 1/min

6.4.2. Thermodynamische Betrachtung

Thermodynamische Gegebenheiten sind neben den bereits besprochenen mechanischen Eigenschaften entscheidend für den Gesamtwirkungsgrad. Um weitere Erkenntnisse über bereits erkannte Phänomene bezüglich des Brennverlaufs und des Zündverzugs zu erhalten wurde eine Analyse der veränderten Zylinderwand durchgeführt.

Grundlegend ist festzuhalten, dass eine Schicht aus Eisen eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt als der übereutektische Aluminium-Silizium-Grundwerkstoff des Motorblocks. Der Wärmestrom durch reines Eisen im Vergleich zur Aluminiumlegierung halbiert sich in etwa bei einer gegebenen Temperaturdifferenz (Wärmeleitfähigkeit siehe Tabelle 4).

Werkstoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
AlSi17Cu4	125
Fe	67

Tabelle 4: Wärmeleitfähigkeit

Eine alleinige Beurteilung der Wärmeleitfähigkeit reicht allerdings nicht aus. Zusätzlich muss wie in Abbildung 42 ersichtlich die Wandstärke der Beschichtung von 140 µm in die Betrachtung mit einbezogen werden. Die Laufbuchse weist im beschichteten und im unbeschichteten Fall eine radiale Wandstärke von 5,5 mm auf. Bei den NF Varianten werden die äußeren 140 µm durch eine Eisenschicht ersetzt, die Gesamtwandstärke bleibt unverändert. Ebenso werden die 90° C des Kühlmediums konstant gehalten. Für eine erste zweidimensionale Beschreibung des Wärmedurchgangs wird eine maximale Gastemperatur von 2500K veranschlagt, die aus der Brennverlaufsanalyse bekannt ist.

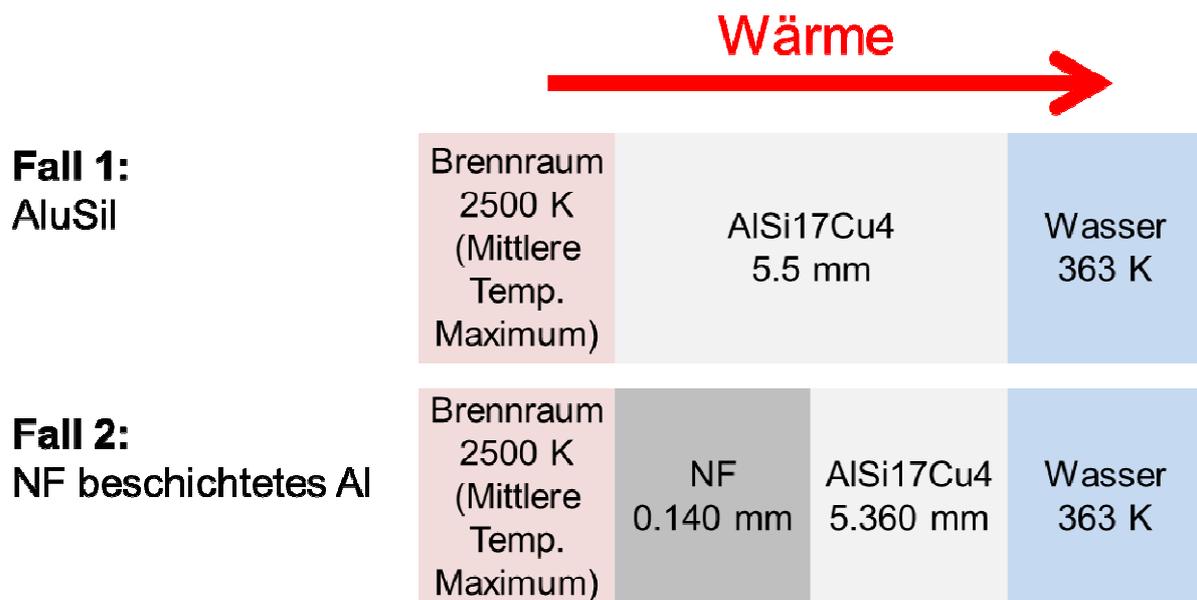


Abbildung 42: Wärmeübergang

Mit den mit einberechneten Wandstärken erhält man die Wärmedurchgangs-koeffizienten für den Fall 1 (AlSi17Cu4 unbeschichtet) und für den Fall 2 (AlSi17Cu4 beschichtet mit Fe). Durch die geringe Wandstärke des Eisens im Vergleich zur Restwandstärke der Aluminiumlegierung ergibt sich nur ein marginaler Unterschied des Wärmedurchgangskoeffizienten κ (siehe Tabelle 5). Bei einem gegebenen Wärmestrom vom Brennraum zum Wassermantel ergibt sich bei NF Buchsen eine erhöhte Wandtemperatur. Da die Änderung des Durchgangskoeffizienten in etwa nur 2% entspricht ist dieser Effekt mit hoher Wahrscheinlichkeit wiederum sehr gering.

Variante Laufbuchse	Wärmedurchgangskoeffizient κ [W/m ² K]
AlSi17Cu4 unbeschichtet	22 237
AlSi17Cu4 beschichtet	22 727

Tabelle 5: Wärmedurchgangskoeffizient

Mit diesen theoretischen Vorüberlegungen wird der durch den gemessenen Druckverlauf und mit BREMO berechnete Wärmeübergang beurteilt.

Grundlage für diese Betrachtung ist der Druckverlauf, aus dem die Heizrate berechnet werden kann. Diese gibt die Wärme pro Grad Kurbelwinkel an, die durch die Verbrennung freigesetzt wird. Dargestellt wird der Lastpunkt 6 bar p_{mi} bei den Drehzahlen 2000 und 4000 1/min. Beide Heizraten weisen nur geringe Unterschiede untereinander auf, was veranschaulicht, dass der eingestellte Betriebspunkt bezüglich des Zündzeitpunktes, des Raildrucks, der Last und der Ladungsbewegung in beiden Fällen vergleichbar ist (siehe Abbildung 43).

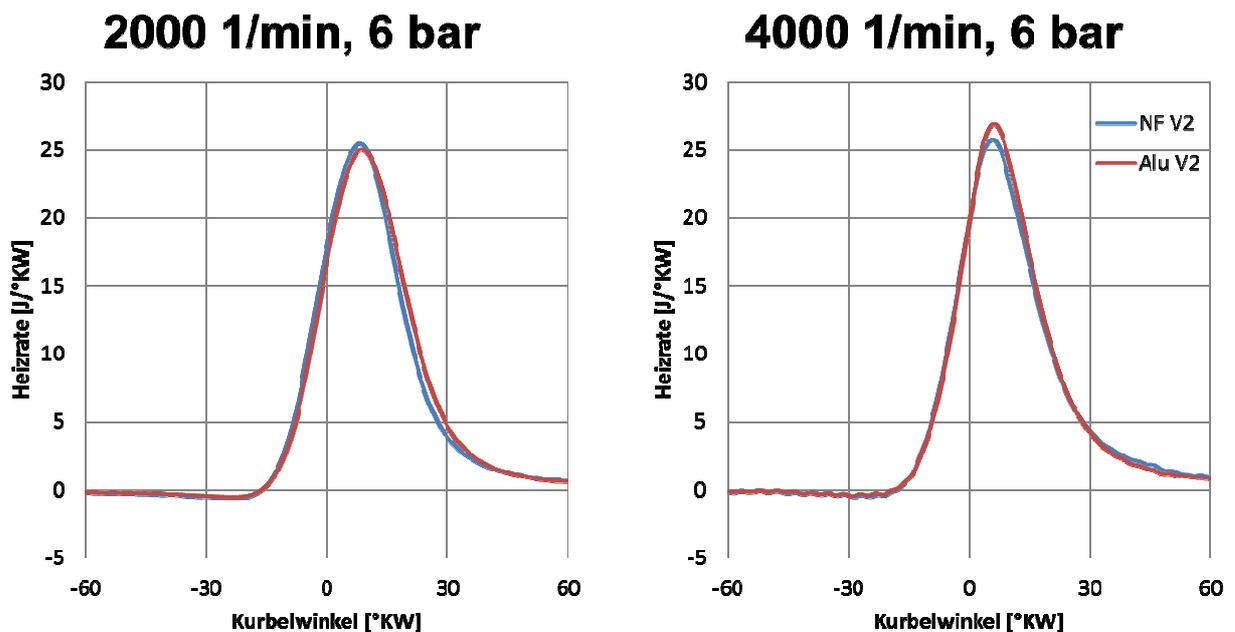


Abbildung 43: Heizrate

Die durch die Kompression steigende Temperatur steigt ab Brennbeginn, der aus der Heizrate abgelesen werden kann, deutlich an. Die Temperatur steigt dabei über eine Spitzentemperatur von 3000K an. Die aus den Vorüberlegungen angenommene Gastemperatur im bereits verbrannten Gemisch von 2500K ist somit durchaus realistisch, und liegt in einem weiten Kurbelwinkelbereich an (siehe Abbildung 44).

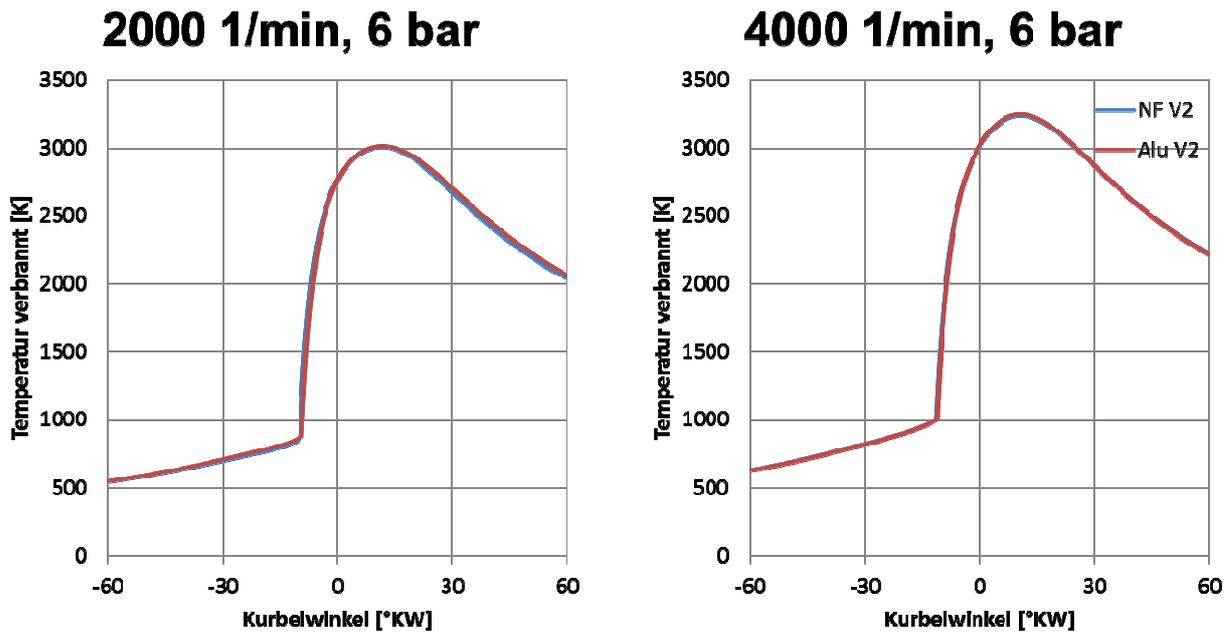


Abbildung 44: Temperatur

Mit der Temperatur kann schließlich der Wärmestrom in die Zylinderwand mit dem am IFKM entwickelten Tool BREMO berechnet werden. Dieser Wärmestrom ist wie die Heizrate ein Maß für die Wärme, die pro Grad Kurbelwinkel in die Zylinderwand übergeht (siehe Abbildung 45). Thermodynamisch ist es günstigster, wenn weniger Wärme in die Zylinderwand abgegeben wird, da in diesem Fall diese Wärme zur Umwandlung in Arbeit fehlt. Dementsprechend sinkt der thermodynamische Wirkungsgrad.

Nach den bereits vorgestellten Vorüberlegungen ist der Unterschied des Wärmedurchgangskoeffizients sehr gering. Dementsprechend kann im Rahmen der Messgenauigkeit keine Vorteile oder Empfehlung für eine beschichtete oder unbeschichtete Variante aufgezeigt werden. Beim Lastpunkt 2000 1/min, 6 bar ist der Wärmestrom bei der beschichteten Variante höher, wohin gegen dieser Sachverhalt bei derselben Last und 4000 1/min nicht bestätigt werden kann. Der geringe Unterschied des Wärmedurchgangskoeffizients von etwa 2% hat im Rahmen der Messgenauigkeit keinen Einfluss auf den in das Kühlwasser übergehenden Wärmestrom.

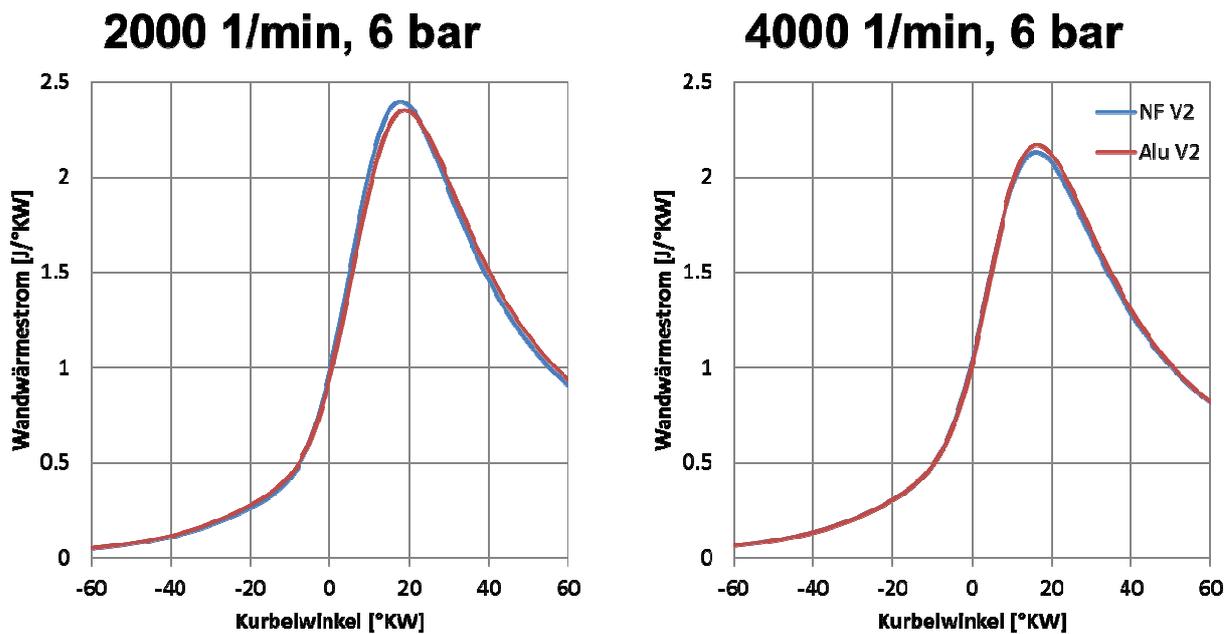


Abbildung 45: Wärmestrom

6.4.3. Haltbarkeit der Schicht

Vorversuche seitens den Projektpartnern Audi und Gramm deuten auf eine besonders niedrige Korrosionsanfälligkeit der finalen Beschichtungsvariante hin.

In Abbildung 46 sind die letzten beiden Varianten der NanoFerro Beschichtung mit der Ausgangsbasis der kreuzgehonten AluSil Variante gegenübergestellt. Eine Auffälligkeit hinsichtlich Korrosion konnte auch am Einzylinder-Aggregat zu keinem Zeitpunkt beobachtet werden, da der Motor vor Betrieb über eine externe Konditionieranlage auf Betriebstemperatur gebracht wird und erst im geschleppten Zustand die Verbrennung eingeleitet wird – Es kommt zu keinem Kaltstart. Des Weiteren wird der Motor nach Messende nicht sofort abgestellt, sondern zuerst die Einspritzung abgeschaltet und nach etwa 5 Minuten Schleppbetrieb wird die elektrische vier-quadranten Belastungseinheit angehalten. Nach dieser Prozedur sind Verbrennungsgase, die kondensieren und korrosiv wirken können aus dem Brennraum gespült.

Gegen einen unzulässigen Verschleiß sprechen die noch durchgängigen Honriefen, sowie nicht vorhandene Abplatzer oder Verformungen der Schicht.

AlSi V2

NF V2

NF V3

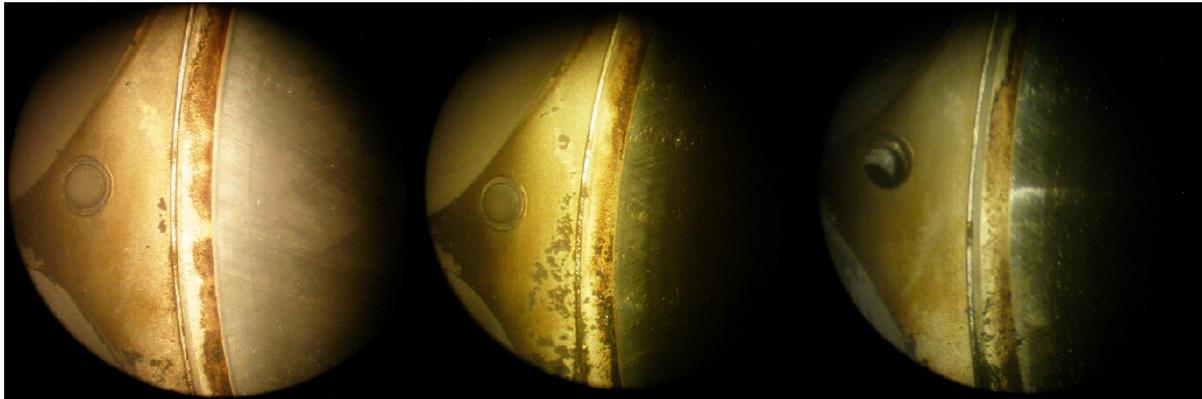


Abbildung 46: Endoskopie

Auch im Bereich des unteren Totpunktes auf der Druckseite sind keine Unregelmäßigkeiten erkennbar. Die Honriefen sind durchgängig, es kommt zu keinen Abplatzern durch unzureichende Schichthaftung, sowie zu Fressspuren durch ungeeignete Materialpaarungen der Kolbenringe oder des Kolbens selbst (siehe Abbildung 47).

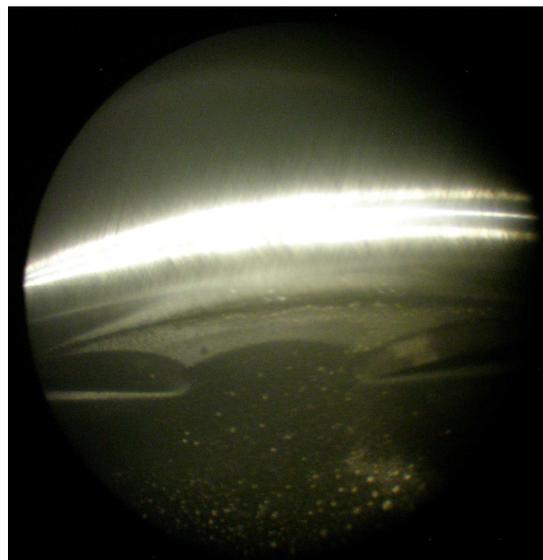


Abbildung 47: Druckseite in UT

7. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die kombinierte Untersuchung von Tribologie und Thermodynamik stellt ein wichtiges wissenschaftliches Feld dar, das die Kompetenzen des IFKM stärkt und erweitert. Gegenüber anderen Institutionen wurde ein Wissensvorsprung erarbeitet werden, der die Wettbewerbsfähigkeit des IFKM erhöht. In den zahlreichen Kooperationen des IFKM mit namhaften Unternehmen der Automobilindustrie kann das angeeignete Wissen direkt in die Praxis und damit in den wirtschaftlichen Nutzen transferiert werden.

Die Ergebnisse fließen außerdem in die Lehre und Ausbildung der Studenten des KTI ein. Insbesondere in die Vorlesungen Verbrennungsmotoren A, Kapitel Thermodynamik und Verbrennungsmotoren B, Kapitel Motormechanik

8. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

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

9. Erfolgte 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

Geplante Veröffentlichungen:

keine