

VERFASST VON



Christian Böhmeke, M. Sc.

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



Lukas Heinz, M. Sc.

ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



Dr.-Ing. Uwe Wagner

ist Forschungsgruppenleiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch

ist Professor und Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Einfluss von Schmieröladditiven auf das Partikel-Rohemissionsverhalten von Ottomotoren

Strenger werdende Emissionsgrenzwerte und zunehmend optimierte Brennverfahren rücken weitere innermotorische Partikelemissionsquellen beziehungsweise Partikelbildungswege in den Fokus von Forschungsfragen. Am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurden im Rahmen des FVV-Vorhabens Nr. 1374 partikelbeeinflussende Öl- und Kraftstoffadditive untersucht und hinsichtlich der Partikelanzahl und der Partikelgrößenverteilung bewertet.



© IFKM

1	MOTIVATION
2	ZUSAMMENSETZUNG UND ENTSTEHUNG VON PARTIKELN
3	PRÜFSTANDSAUFBAU
4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG
5	ERGEBNISSE
6	FAZIT

1 MOTIVATION

Alle heutigen Kraft- und Schmierstoffe enthalten zur Verbesserung ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften unterschiedliche Additivkomponenten. Diese sind in der Regel zwar nur in sehr geringen Konzentrationen beigemischt, können aber aufgrund ihrer Eigenschaften und Zusammensetzung insbesondere auf Emissionen sehr kleiner Partikel einen merklichen Einfluss haben. Die Erarbeitung detaillierter Kenntnisse über Wirk- und Einflussmechanismen ist notwendig, damit Additivhersteller alternative Lösungen entwickeln können. Forschungsfragen lassen sich dabei insbesondere auf folgende Themen ausrichten:

- Einfluss der Kraftstoffzusammensetzung
- Einfluss der Ölzusammensetzung
- Einfluss der Öladditivierung auf die Partikelemission
- Unterscheidung der Rußemission aus der Verbrennung von Öl oder Kraftstoff
- Öleintrag in den Brennraum und dessen Mechanismus und Wirkung auf die Partikelemissionen.

Um die Partikelemissionen von Ottomotoren mit Direkteinspritzung (Direct Injection, DI) bewerten und senken zu können, ist es erforderlich zu verstehen, welche Einflussgrößen für ihre Entstehung und ihre Charakteristik sowie für die Größenverteilung und -konzentration im Abgas verantwortlich sind. Im Fokus stehen hier schmierstoffseitige Einflüsse, die neben der Art der Prozessinteraktion insbesondere durch speziell hinzugefügte Additivkomponenten hervorgerufen werden.

2 ZUSAMMENSETZUNG UND ENTSTEHUNG VON PARTIKELN

Die Partikel bestehen hauptsächlich aus einem organischen Anteil und aus Nitraten, Sulfaten, Asche sowie kohlenstoffhaltigen Verbindungen. Die Zusammensetzung hängt von mehreren Einflussfaktoren wie Betriebsstoff, Betriebspunkt, Brennverfahren sowie äußeren Einflüssen ab. Anhand der Partikelbildungsmechanismen und dem -durchmesser können Rußemissionen über ein kontinuierliches Größenspektrum hinweg in Nukleations-, Akkumulations- oder Grobstaubmode eingeteilt werden. Beim Nukleationsmodus handelt es sich neben kleinen Kohlenstoffpartikeln auch um volatile, flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen [1]. Durch Kondensations- und Koagulationsvorgänge nimmt die Partikelgröße zu, was als Akkumulationsmode bezeichnet wird und Rußagglomerate aus der Verbrennung enthält [2].

3 PRÜFSTANDSAUFBAU

Als Versuchsträger wurde ein Einzylinderforschungsaggregat verwendet, **TABELLE 1**. Der Prüfstand verfügt über separate Öl-, Wasser-, und Luftkonditioniereinheiten, womit die äußeren Randbedingungen nahezu konstant gehalten werden können, **BILD 1**. Die Kraftstoffversorgung wurde über zwei Tanks mit einem variablen

Umschaltventil realisiert, das wiederum mit einem Hochdruckpumpenwagen (Railwagen) verbunden ist, um DI am Motor zu ermöglichen. Durch die variable Umschaltung zwischen den Kraftstofftanks können unterschiedliche Kraftstoffe sowie Kraftstoff/Öl-Kombinationen während des Motorbetriebs direkt miteinander verglichen werden. Zur Realisierung einer kurbelwinkelgenauen Öleinspritzung im Saugrohr wurde ein Ölinjektor mit Behälter integriert.

Der Motor wurde zur Bewertung seines thermodynamischen Verhaltens voll indiziert. Die gasförmigen Emissionen wurden mit dem Messgerät AMA 4000 von AVL bestimmt. Zur Messung der Partikelanzahl sowie der Partikelgrößenverteilung wurde ein DMS500 von Cambustion verwendet. Für die Untersuchungen im Brennraum wurden zwei Zugänge im Zylinderkopf gefertigt: einer zur Beleuchtung und ein weiterer für ein Endoskop von Karl Storz. Als Kamera wurde eine Vision Research Phantom V1612 verwendet, die eine kurbelwinkel aufgelöste Farbaufnahme des Arbeitsspiels eines Motors ermöglicht. Zur Validierung der Ergebnisse wurde ein Dreizylindervollmotor von Ford (FOX 1,0-l-EcoBoost-Motor mit GTDI) mit einem Verdichtungsverhältnis von 10:1 verwendet. Das Abgas wurde vor der Abgasnachbehandlung entnommen.

Typ	Einzylindermotor	Einheit
Ventile	4	–
Bohrung	84	mm
Hub	90	mm
Hubvolumen	498	cm ³
Verdichtungsverhältnis	10,5:1	–

TABELLE 1 Technische Daten des Versuchsträgers, einem Äquivalent zum N55 von BMW (© IFKM)

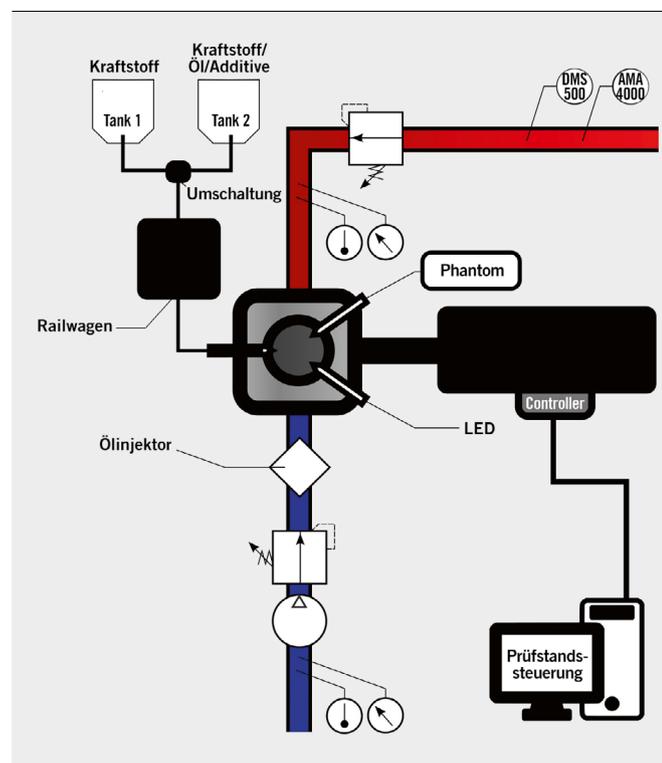


BILD 1 Schema des Prüfstandsbaus (© IFKM)

Öl/Additiv-Kombinationen
Standardmotoröl (SEO): Motoröl mit allen Standardadditiven (0W20)
Basisöl (BO): Unadditiviertes Motoröl
BO + Dispersant (Disp)
BO + Detergent (Det)
BO + Verschleißschutzadditive (EP/AW)
BO + Viskositätsverbesserer (VI)
BO + EP/AW-Additive und zum SEO angepasste Viskosität

TABELLE 2 Untersuchte Ölkombinationen (© IFKM)

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Für sämtliche Untersuchungen wurde ein unadditiverter E10-Zertifizierungskraftstoff von TotalEnergies verwendet. Der Einzylindermotor wurde mit einem für ihn zugelassenen 10W40-Motoröl betrieben. Es ist von den innerhalb der Versuche eingebrachten Öl/Additiv-Kombinationen, TABELLE 2, unabhängig. Die Komponenten wurden von Fuchs Schmierstoffe zur Verfügung gestellt.

Die Kombinationen wurden sowohl per DI als auch per Saugrohreinspritzung (Port Fuel Injection, PFI) in den Brennraum eingebracht. Mit PFI wird simuliert, wie das Öl beispielsweise über den Turbolader oder durch die Kurbelgehäuseentlüftung in den Brennraum gelangt. Die Einbringung eines Öl/Kraftstoff-Gemischs per DI aus dem vorgemischten Tank 2 simuliert das Abwaschen des Ölfilms am Zylinderliner. Die Menge an Öl für beide Einbringungen in den Brennraum liegt bei 1,7 % der Kraftstoffmasse, was relativ hoch dosiert ist. Beim Saugrohrinjektor wurden Tests mit unterschiedlichen Ölen am Blasprüfstand und in der Druckkammer durchgeführt, die belegten, dass dies die kleinstmögliche Einbringung ist.

Das Basisöl besteht lediglich aus reinen Kohlenwasserstoffen. Das Dispersant sorgt dafür, dass Fremdstoffe in der Schwebelage gehalten werden. An thermisch belasteten Bauteilen können sich Ablagerungen bilden, die zum Beispiel aus organischen Metallen (wie Kalzium) oder auch aus Metallkarbonat bestehen [3]. Detergenzien verhindern diesen Prozess. Sogenannte Extreme-Pressure/Anti-wear-Additive sorgen für den Verschleißschutz. Viskositätsverbesserer optimieren das Temperaturverhalten. Das Standardmotoröl enthält weitere Komponenten wie Antioxidantien, Korrosionsverhinderer und Entschäumer.

Die Messungen der Partikelanzahl eines Öls beziehungsweise einer Öl/Additiv-Kombination, BILD 2, wurde erst gestartet, nachdem der Motor ein stationäres Verhalten aufwies. Nach etwa 90 s wurde die Öleinspritzung eingeschaltet (jeweils durch den Ölinjektor oder die Umschaltung auf Tank 2). Nach dem Wiedererreichen eines stationären Verhaltens wurde die Öleinbringung ausgeschaltet. Nachdem die Partikelanzahl wieder auf dem ursprünglichen Niveau lag, wurde die Messung beendet. Durch diese Vorgehensweise enthält jede Messung eines Betriebspunkts neben dem Einfluss des Öls, ausgehend vom Basiskraftstoff, auch Referenzwerte, wodurch eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet wird. Auch umweltbedingte Einflüsse auf die Partikelbildung wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit können somit bewertet werden. Bei der Berechnung der Partikelgrößenverteilungen wurden jeweils Referenz- und Öleinflussmessung über 60 s gemittelt.

5 ERGEBNISSE

Wie zuvor beschrieben, wurde zu jeder Öl/Öladditiv-Kombination aus TABELLE 2 eine zugehörige Messung mit Referenzkraftstoff durchgeführt. Da die Partikelemissionen hierbei auf einem niedrigen, nahezu identischen Niveau liegen, ist in BILD 3 lediglich ein Referenzverlauf für alle Messungen gemittelt (rot) dargestellt. Die Ergebnisse der PFI sind gestrichelt und die der DI in durchgezogenen Linien dargestellt.

Der Einfluss der Additive ist deutlich zu erkennen, wobei er bei dem Detergent (gelb) am größten ist. Die Höhe der jeweiligen Peaks mit DI oder mit PFI liegt um eine Größenordnung über den Referenzmessungen. Die Lage der Peaks bei 10 nm kann hierbei auf organische Metalle zurückgeführt werden, die typische Bestandteile dieses Additivs sind [4]. Das Standardmotoröl (blaugrün) zeigt ähnliche Peaks. Da es ein volladditiviertes und somit ebenfalls detergenthaltiges Öl ist, kann ein ähnliches Verhalten erwartet werden. Das niedrigere Niveau kann darauf zurückgeführt werden, dass die Dosierung des Additivs im Standardmotoröl geringer ist als die des Detergents im Basisöl.

Ein geringerer Einfluss ist bei der Kombination der Verschleißschutzadditivierung mit Viskositätsverbesserer (violett) zu sehen. Die Partikelgrößenverteilung liegt hierbei genau über der Kurve des Basisöls mit angepasster Viskosität (grau). Hier kann festgehalten werden, dass Viskositätsverbesserer einen Anstieg der Partikelemissionen verursachen. Zur Verbesserung des Temperatur-

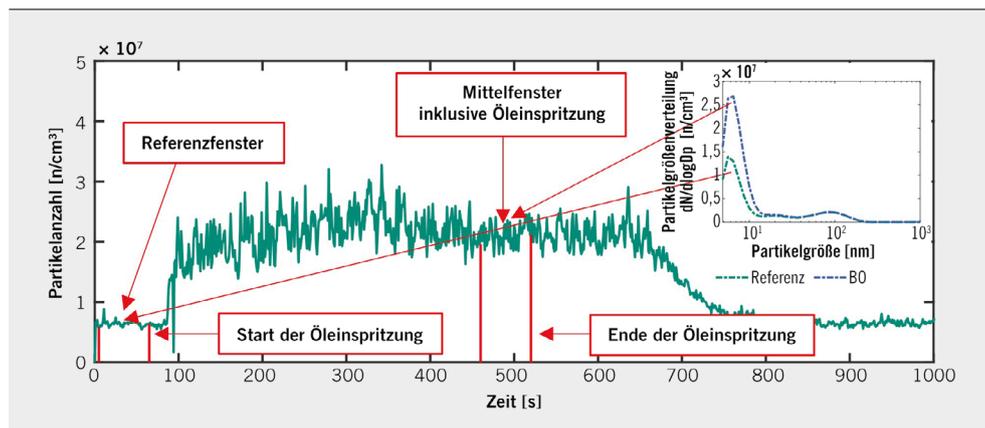


BILD 2 Beispielhafte Messung eines Versuchs: Partikelanzahl vor, während und nach der Öleinspritzung (© IFKM)

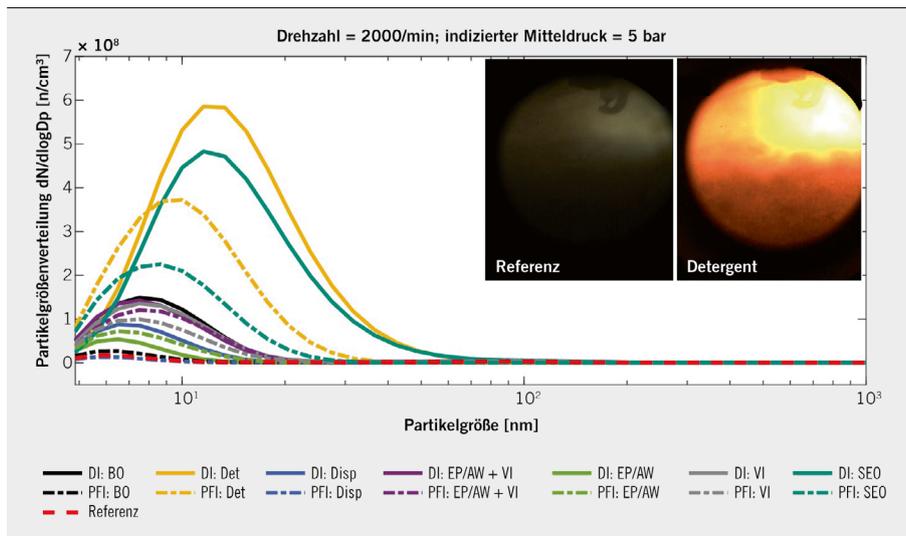


BILD 3 Einfluss der Öleinbringung: Vergleich der Öleinbringung in das Saugrohr (PFI) mit Direkteinspritzung des Öl/Kraftstoff-Gemischs (DI), inklusive optischer Aufnahmen (oben rechts) (© IFKM)

verhaltens kommen als Viskositätsverbesserer öllösliche Polymere zum Einsatz. Diese können ganz oder teilweise an der Verbrennung teilnehmen und somit die Rußentstehung fördern [5]. Hingegen weichen bei dem unadditivierten Basisöl, dem Dispersant- und der Verschleißschutzadditivierung die gemessenen Partikelemissionen gar nicht oder nur kaum von der jeweiligen Referenzmessung ab.

Bei DI und PFI sind die Trends und Lage der Peaks nahezu identisch. Lediglich die Höhe der absoluten Partikelemissionen liegen bei der PFI unterhalb der Untersuchungen zur DI. Dies wird darauf zurückgeführt, dass bei der PFI statt eines Sprays, das mit der Luftmasse unmittelbar in den Brennraum strömt, ein Ölfilm auf dem Saugrohrboden entsteht. Es wird davon ausgegangen, dass hier nur ein Teil des Öls durch schlechte Gemischbildung und Verbleib im Saugrohr an der Verbrennung teilnimmt.

Neben den Partikelemissionsmessungen wird in **BILD 3** (oben rechts) ein optischer Vergleich zwischen Referenzkraftstoff und Referenzkraftstoff inklusive Detergentadditiv für die DI gegenübergestellt. Beim Referenzkraftstoff mit Detergentadditiv wird ein deutliches homogenes Rußeigenleuchten detektiert, was wiederum die zuvor gemessene Partikelgrößenverteilung widerspiegelt. Das rötliche Leuchten kann auf das im Detergent enthaltene Kalzium zurückgeführt werden, das in diesem Wellenbereich leuchtet [6]. Zusätzliche Untersuchungen am Vollmotor zeigten ein gleiches Verhalten sowohl im stationären als auch im dynamischen Betrieb.

6 FAZIT

Es konnte gezeigt werden, dass einige Additive einen signifikanten Einfluss auf die Partikelbildung haben. Unadditiviertes Basisöl zeigt nur einen geringen Einfluss auf die Partikelbildung. Die Zugabe von Dispersant und Verschleißschutzadditiven im Vergleich zum Basisöl bewirken keine messbaren Veränderungen. Viskositätsverbesserer führen zu einem messbaren und Detergenzien zu einem deutlichen Anstieg der Partikelemission. Die Effekte treten unabhängig von der Art der Öleinbringung auf. Optische Messungen des Rußeigenleuchtens bestätigen den geringen Einfluss des Basisöls, zeigen jedoch ein ausgeprägtes Eigenleuchten bei detergent-haltigem Öl. Die Ergebnisse konnten im transienten Betrieb am Vollmotor validiert werden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Vander Wal, R. L.; Tomasek, A. J.: Soot oxidation: dependence upon initial nanostructure. In: *Combustion and Flame* 134 (2003), Nr. 1-2, S. 1-9
- [2] Hertler, D.: Partikelemission von Ottomotoren mit Direkteinspritzung: Experimentelle Charakterisierung des Einflusses der Kraftstoffaufbereitung und Gemischbildung (1. Aufl.). Aachen: Shaker Verlag, 2013
- [3] Kurzweil, P.: *Chemie. Grundlagen, technische Anwendungen, Rohstoffe, Analytik und Experimente* (11. Aufl.). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020
- [4] Neugebauer, J. M.: Detergents: an overview. In: *Methods Enzymol, Guide to Protein Purification* 182 (1990), S. 239-253
- [5] Richter, H.; Howard, J. B.: Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot – a review of chemical reaction pathways. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 26 (2000), Nr. 4-6, S. 565-608
- [6] Degenhardt, C.: *Freie und gespeicherte Calcium-Atome für ein optisches Frequenznormal*. Hannover, Leibniz Universität, Dissertation, 2004

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1374) wurde am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie unter der Leitung von Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz/Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (BMWK/AiF) (IGF-Fördernr. 20406 N) finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dr.-Ing. Wolfgang Samenfink, (Robert Bosch GmbH) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens. Besonderer Dank gilt auch dem Kollegen Thomas Weyhing, der tatkräftig in den Vollmotorenuntersuchungen unterstützt hat.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com