

Abstract

In the heavy-duty vehicle segment, the diesel internal combustion engine will be the dominant power source over the next decade. In order to minimize the environmental impact, many developments are focusing on CO₂ and emission reduction. The focus of the emission reduction activities is on nitrogen oxides and particulate matters.

Particulate matters can be emitted either from the exhaust aftertreatment box as soot or ash, or from an open crankcase ventilation system as oil aerosol. In case of a closed crankcase ventilation system, the non-separated oil aerosols are mixed into the intake air and will, over a longer period of time, lead to negative performance consequences due to deposits in the entire air path. Participation in the combustion process will increase ash formation and thus shorten the time interval between particle filter regenerations. Therefore, in addition to increasing separation efficiency, which many manufacturers are working on, it is important to minimize the particle formation. For this minimization, comprehensive knowledge and understanding of the particle formation and its parameters are necessary. That is why this work focuses on particle formation around and below 1 μm, this is where the efficiency of modern separation systems drops.

Firstly, blow-by sources in a modern diesel combustion engine are analyzed and compared. The prominent position of the piston-piston-ring-liner-group is clarified. With regard to particle formation, the mechanisms of mechanical collapse and evaporation with subsequent condensation on nuclei and spray atomization are described theoretically. Moreover, an optical particle counter is described as a suitable measuring technology and a two-stage sampling and dilution system developed at KIT is explained. Afterwards, the modern heavy-duty commercial vehicle diesel engine OM470 of the Daimler Truck AG is measured with respect to particle sources and along its separation system. Measurements with an exhaust gas turbocharger lubrication device and an air compressor with loading unit are used to determine a relative distribution of the particle sources. The piston piston-ring liner group dominates with always more than 60 % contribution, ahead of the single stage turbocharger with up to 30 % particle number and particle mass concentration contribution.

To investigate the main source in detail, a single-cylinder research engine is set up with real-time piston temperature measurement and temperature measurement in the cylinder liner. From the temperature measurements, it becomes clear that the highest temperatures with engine oil contact occur in the piston coolant channel, and the known split of heat transfer, 1/3 into engine coolant and 2/3 into engine oil, is detectable. The relationship between piston temperature, integral particle number and particle

mass concentration to selected engine operating parameters is compiled in an effect diagram. It becomes clear that the engine load, the engine oil temperature and the flow rate through the oil spray nozzle have the biggest influence. These are precisely these parameters that have a significant influence on the evaporation of engine oil and the engine blow-by and thus on the amount of nuclei from the combustion in the crankcase. A detailed spectral observation leads to the definition of two new hypotheses on the interrelationships. It is shown that the combustion processes significantly determine the particle number concentration mode at the lower end of the measurement scale. Secondly, a correlation of the second particle number concentration mode between 0,5 and 0,8 μm is formulated with the processes below the piston, especially the piston cooling.

The relationships determined for the single cylinder and the OM470 are then investigated for their transferability to four other heavy-duty commercial engines and, in a cooperation at the KIT, also to a medium-duty commercial vehicle engine. It becomes clear that even the very different design of the medium-duty commercial vehicle engine shows the same correlations, but at a different particulate emission level. Therefore, it is concluded that the same generation mechanisms are present, however in different levels for all compared engines.

The last part of this thesis focuses on measures for emission reduction and improved separation. Eight ideas are investigated experimentally to reduce formation, thereof the fine cylinder liner honing being the only one to reduce particle emissions and fuel consumption at the same time. Other efficient levers are the tangential tension of the piston oil scraper ring, the engine oil characteristic value NOACK, and an oil pressure control. Furthermore, six approaches are being pursued for improved separation, two of them were patented as part of this study. Especially the first patented idea, a sieve at the piston cooling channel outlet, shows great potential for particle emission reduction, both with the optical particle counter and a gravimetric oil mist analysis.

Further work should investigate the intersection in engine oil HTHS-variation and validity of the results on different engines, especially gas and hydrogen combustion engines.

Zusammenfassung

Im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge wird der dieselmotorische Verbrennungsmotor in mindestens den nächsten zehn Jahren die dominante Antriebsquelle sein. Um den Umwelteinfluss zu minimieren, fokussieren viele Entwicklungen auf CO₂- und Emissionsreduktion. Dabei sind Stickoxide und Partikel im Zentrum der Aktivitäten.

Partikel können dabei einerseits aus der Abgasnachbehandlungsbox als Ruß oder Asche und andererseits aus einer offenen Kurbelgehäuseentlüftung als Ölaerosol an die Umwelt emittiert werden. Im Falle einer geschlossenen Kurbelgehäuseentlüftung werden die nicht separierten Ölaerosole der Ansaugluft zugemischt und führen über längere Zeit zu negativen Konsequenzen durch Ablagerungen im Luftpfad bis in den Brennraum. Durch Teilnahme an der Verbrennung erhöht sich die Aschebildung und dadurch verkürzen sich die Zeitintervalle zwischen den Partikelfilterregenerationen. Daher ist neben der Abscheideeffizienzerhöhung, mit welcher sich zahlreiche Hersteller beschäftigen, eine Entstehungsminimierung wichtig. Für diese Minimierung sind umfassende Erkenntnisse und ein Verständnis der Partikelformation und dessen Austrag notwendig. Deshalb fokussiert diese Arbeit auf Partikel um und unterhalb 1 µm, da hier die Effizienz moderner Abscheidesysteme endet.

Zuerst werden die Blow-by-Quellen in einem modernen Dieselmotor analysiert und verglichen. Dabei wird die herausragende Stellung der Kolben-Kolbenring-Laufbuchsenengruppe verdeutlicht. Bezüglich der Partikelformation werden die Entstehungsmechanismen mechanischer Zerfall und Verdampfung mit anschließender Kondensation an Keimen und Atomisierung eines Ölstrahls theoretisch beschrieben. Anschließend wird ein optischer Partikelzähler als geeignete Messtechnik beschrieben, der in Verbindung mit einem am KIT entwickelten zweistufigen Entnahme- und Verdünnungssystem eingesetzt wird.

Danach wird der moderne schwere Nutzfahrzeugdieselmotor OM470 der Daimler Truck AG hinsichtlich der Partikelquellen und entlang seines Abscheidesystems vermessen. Durch Messungen mit einer Fremdölschmierung für den Abgasturbolader und einem Druckluftkompressor mit Belastungsanlage wird eine relative Aufteilung der Partikelquellen vorgenommen. Dabei dominiert die Kolben-Kolbenring-Laufbuchsenengruppe mit stets mehr als 60% Beitrag vor dem einstufigen Abgasturbolader mit bis zu 30% Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentrationsbeitrag.

Daraufhin wird ein Einzylinderforschungsaggregat mit Echtzeit-Kolbentemperaturmessstellen und Temperaturmessstellen in der Zylinderlaufbahn herangezogen, um die Haupt-

quelle detailliert zu untersuchen. Aus den Temperaturmessungen wird deutlich, dass die größten Temperaturen mit Motorölkontakt im Kolbenkühlkanal vorliegen und die bekannte Aufteilung des Wärmedurchgangs, $1/3$ ins Motorkühlmittel und $2/3$ ins Motoröl, nachweisbar ist. Der Zusammenhang zwischen Kolbentemperatur, integraler Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration zu ausgewählten motorischen Betriebskenngrößen wird in einem Effektdiagramm zusammengestellt. Dabei wird deutlich, dass die Motorlast, die Motoröltemperatur und der Durchfluss durch die Ölspritzdüse den größten Einfluss haben. Genau diese Parameter beeinflussen das Verdampfen von Motoröl, das Motorblow-by und damit die Menge an Keimen aus der Verbrennung im Kurbelraum maßgeblich. Eine detaillierte spektrale Betrachtung führt zu der Definition zweier neuer Hypothesen zu den Zusammenhängen. Es zeigt sich, dass die Partikelanzahlkonzentrationsmode am unteren Messende maßgeblich aus dem Brennraum bestimmt wird. Zweitens wird ein Zusammenhang der zweiten Partikelanzahlkonzentrationsmode zwischen $0,5$ und $0,8 \mu\text{m}$ mit den Vorgängen unterhalb des Kolbens, vor allem der Kolbenkühlung formuliert.

Weiterführend werden die am Einzylinder und an dem OM470 ermittelten Zusammenhänge auf ihre Übertragbarkeit auf vier schwere Nutzfahrzeugmotoren und in einer Kooperation am KIT auch mit einem mittelschweren Nutzfahrzeugmotor untersucht. Dabei wird deutlich, dass selbst der konstruktiv sehr unterschiedliche mittelschwere Nutzfahrzeugmotor die selben Zusammenhänge aufweist, allerdings auf einem anderen Partikelemissionsniveau. Daher wird geschlussfolgert, dass bei allen verglichenen Motoren die selben Entstehungsmechanismen in unterschiedlicher Ausprägung vorliegen.

Der letzte Teil dieser Arbeit fokussiert Maßnahmen zur Entstehungsminderung und verbesserten Abscheidung. Zur Entstehungsminderung werden acht Ansätze experimentell untersucht, wobei eine feine Zylinderlaufbahnhonung als einzige Partikelemission und Kraftstoffverbrauch gleichzeitig reduziert. Weitere effiziente Ansätze sind die Tangentialspannung des Kolbenölabstreifringes, der Motorölkennwert NOACK und eine Öldruckregelung. Zur verbesserten Abscheidung werden sechs Ansätze verfolgt, wobei zwei davon im Rahmen dieser Arbeit patentiert wurden. Vor allem die erste patentierte Idee, ein Sieb am Kolbenkühlkanalauslass, zeigt großes Potential zur Partikelemissionsreduktion sowohl mit dem optischen Partikelzähler als auch einer gravimetrischen Ölauswurfmengeuntersuchung.

Zukünftige Arbeiten sollten den Schnittpunkt in der HTHS-Variation und die Gültigkeit der Ergebnisse an weiteren Motoren, vor allem an Gas- und Wasserstoffverbrennungsmotoren, untersuchen.

1 Einleitung

Im Güterverkehr prognostiziert das Bundesverkehrsministerium deutlich steigende Frachtzahlen in den nächsten zehn Jahren, dabei soll der LKW-Verkehr bis 2030 um 39 % bezogen auf 2010 anwachsen [77]. Vor allem im schweren Nutzfahrzeugsegment wird der dieselmotorische Verbrennungsmotor die dominante Antriebstechnologie dafür sein. Das stellt die Entwickler moderner Motoren vor große Herausforderungen, da neben sinkender CO₂-Emissionen auch andere Abgasbestandteile signifikant zu reduzieren sind. Dabei fokussieren aktuelle Abgasgesetzgebungen in Europa, Nordamerika und China vor allem auf Stickoxid- und Partikelemissionen.

Partikelemissionen sind dabei, abhängig von ihrer Größe, besonders gefährlich für den Menschen, da diese lungen- oder sogar blutbahngängig sein können. Daher werden in der aktuellen EURO VIe Stufe in Europa die Partikelanzahlemissionen auch im realen Betrieb auf der Straße durch ein portables Emissionsmesssystem (PEMS) erfasst. Verschärfungen, vor allem durch Verschieben der unteren Messgrenze, sind zu erwarten. Grundlegend können Partikelemissionen am Dieselmotor aus zwei Quellen herrühren, erstens aus dem Abgasnachbehandlungssystem entweichende Partikelemissionen und zweitens aus einer offenen Kurbelgehäuseentlüftung in Form von Ölaerosolemissionen.

Im Nutzfahrzeugmotorenbereich wird eine offene Entlüftung für aktuelle EUVI-Motoren angeboten. Eine geschlossene Kurbelgehäuseentlüftung führt durch imperfekte Abscheidung von Partikeln aus dem Motorblow-by langfristig zu Ablagerungen am Abgasturbolader, im Ladeluftkühler, im Einlasskanal und an den Einlassventilen. Zudem nehmen nicht separierte Ölaerosole an der Verbrennung teil und erhöhen die Aschebildung. Dies kann zu einer häufigeren Regeneration des Dieselpartikelfilters und damit einem erhöhtem Kraftstoffverbrauch führen. Unabhängig davon ob ein offenes oder geschlossenes System verwendet wird, muss die Abscheidung möglichst effizient erfolgen.

In dieser Arbeit wird auf den Ursprung der Partikel und deren Parameter, unterhalb des unteren Effektivitätsgrenzdurchmessers moderner Abscheidersysteme, fokussiert. Dabei sollen die Quellen der Ölaerosole in einem modernen dieselmotorischen Verbrennungsmotor lokalisiert und quantifiziert werden. Danach soll die Hauptquelle detailliert untersucht werden. Dabei sind die Hauptentstehungsmechanismen zu analysieren und eine Parameterstudie zu typischen motorischen Betriebskenngrößen durchzuführen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind auf ihre Übertragbarkeit auf andere Nutzfahrzeugmotoren hin zu überprüfen und bewerten. Zuletzt sollen verschiedene Maßnahmen zur Entstehungsminderung und verbesserten Abscheidung beschrieben und experimentell untersucht werden.

Es soll ein Verständnis der Partikelbildung, die detaillierte Darstellung der Parameter der Partikelemission, Lösungsansätze und deren grundlegende Wirksamkeit ermittelt werden.

2 Kurbelgehäuseentlüftungsgasstrom und dessen Reinigung

2.1 Entstehung des Kurbelgehäuseentlüftungsgasstromes in modernen Dieselmotoren

Motorblow-by oder Durchblasverluste sind Leckagen an Dichtungsstellen von Bauteilen im Motor. Da diese Leckagen unvermeidlich sind, ist dies das Motorblow-by ebenfalls. Damit bilden diese eine der signifikanten Unterschiede zwischen dem thermodynamisch idealen und einem realen Motor. Dabei sind folgende Motorblow-by-Quellen bekannt:

- Kolben-Kolbenring-Laufbuchsen-Gruppe
- Ventilschaftabdichtungen
- Abgasturbolader
- Druckluftkompressor

Die Zusammensetzung von Motorblow-by ist dabei in zwei Hauptbereiche zu unterteilen, die reinen Luftundichtigkeiten und die Undichtigkeiten des Brennraumes. Während die reinen Luftundichtigkeiten hauptsächlich Ölaerosole transportieren, sind in den Undichtigkeiten des Brennraumes auch Reste verbrannten oder unverbrannten Kraftstoffes zu finden. Motorblow-by besteht aus Partikeln von Motoröl, metallischem Abrieb, Verbrennungsresten wie Ruß oder Schwefel und unverbrannten Kraftstoffpartikeln [46]. Dabei stellen Ölaerosole die größte Gruppe der im Motorblow-by beinhalteten Stoffe dar. Zudem ist im warmen Motorblow-by Wasser enthalten, das bei Abkühlung kondensiert und das Motoröl verdünnt.

In den nachfolgenden Abschnitten soll auf diese Quellen einzeln eingegangen und danach ein Vergleich gegeben werden.

Kolben-Kolbenring-Laufbuchsen-Gruppe

Die Kolben-Kolbenring-Laufbuchsen-Gruppe ist die Hauptquelle von Motorblow-by bei Verbrennungsmotoren. Bei Saugmotoren beträgt die Durchblasmenge maximal 1%, bei Motoren mit Abgasturboaufladung maximal 1,5 %, des theoretischen Ansaugvolumenstroms [106]. Dabei berechnet sich der Ansaugvolumenstrom wie folgt:

$$\text{Ansaugvolumenstrom} \left[\frac{l}{min} \right] = \text{Nenn Drehzahl} \left[\frac{1}{min} \right] * \text{Hubraum} [l] * \text{Füllgrad} [-] \quad (1)$$

Die Leckage ergibt sich aus dem Spalt zwischen den Kolbenringauflageflächen und der Zylinderlaufbahnoberfläche und dem Ringstoß [43].

In Abhängigkeit der Kolbenbewegung und des Arbeitstaktes kommen Situationen zustande, in denen Blow-by über die Kolbenringe in den Kurbelraum und in denen Blow-by aus den Kolbenringspalten zurück in den Brennraum strömt. Ersteres trifft vor allem auf den Kompressions- und Expansionstakt zu [104], [103] und [42]. Im Ansaugtakt kann Motorblow-by auch umgekehrt über die Kolbenringe in den Brennraum hinein strömen [104] und [103]. Aus diesem Mechanismus leitet sich eine starke Abhängigkeit des Leckagestroms von der Druckdifferenz ab. Damit ist das Motorblow-by über die Kolben-Kolbenring-Laufbuchsen-Gruppe vor allem von der Motorlast abhängig. Zur Verdeutlichung wird an einem Einzylinderforschungsaggregat ein Blow-by-Kennfeld bestimmt (Abbildung 1). Der Versuchsmotor wird detailliert in Abschnitt 6.1 beschrieben. Für das Motorblow-by ist relevant, dass das Einzylinderaggregat fremdaufgeladen ist, keine Verbindung zwischen Zylinderkopf und Kurbelraum besteht und kein Druckluftkompressor verbaut ist. Damit sind alle anderen Motorblow-by-Quellen als die Kolben-Kolbenring-Laufbuchsen-Gruppe und die Ventilschaftabdichtung ausgeschlossen.

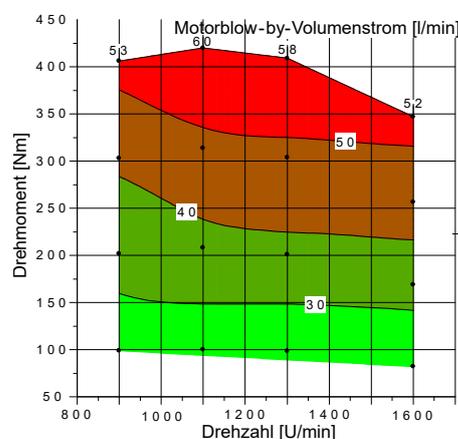


Abbildung 1: Blow-by-Werte eines Einzylinderaggregates mit 2,13 Litern Hubraum

Dabei zeigt sich deutlich die formulierte Motorlastabhängigkeit des Motorblow-by-Volumenstromes. Der Ansaugvolumenstrom des Motors ergibt sich zu ca. $3167 \frac{l}{min}$. Dies ergibt Blow-by-Werten von ca. $48 \frac{l}{min}$ pro Zylinder (Vergleiche Gleichung 1).

Abgasturbolader

Je nach Ausführung der Abgasturboaufladung gibt es ein positives Druckgefälle vom Verdichterbereich in den Lagerraum. Dies führt zu Leckage vom Verdichter in den Lagerraum. Der genaue Aufbau des OM470 Abgasturboladers ist im Anhang 9 beschrieben.

Zur Ermittlung des Beitrages wird eine Motorblow-by-Messung mit fremdölgeschmiertem Abgasturbolader durchgeführt. Aus der Differenz zu dem Vollmotorwert ergibt sich der Abgasturboladerbeitrag zum Motorblow-by-Volumenstrom. Auf den Vollmotor wird detailliert in Abschnitt 7.1 eingegangen. Das Differenzenkennfeld ist in Abbildung 2 dargestellt.

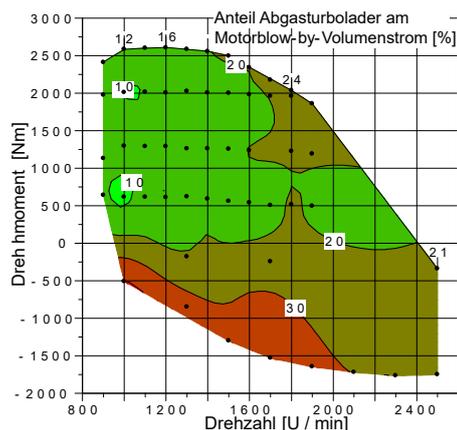


Abbildung 2: Relativer Anteil des Blow-by-Beitrages eines einstufigen Abgasturboladers am gesamten Motorblow-by-Volumenstrom

Im Kennfeld wird deutlich, dass der einstufige, gleitgelagerte Abgasturbolader einen maximal 26 %-igen Beitrag im befeuerten Betrieb zeigt, wobei weite Kennfeldbereiche zwischen 10 und 20 % liegen. Im Motorbremsbetrieb zeigt der Abgasturbolader seinen maximalen prozentualen Beitrag, wobei hier generell niedrige Motorblow-by-Volumenströme vorherrschen.

Ventilschaftabdichtungen

Neben dem Blow-by-Beitrag über die Kolbenringe kann eine Leckage an den Ventilschaftabdichtungen in den Zylinderkopfraum auftreten. Diese Leckagerate ist eine wichtige Auslegungsgröße der Ventilschaftabdichtung. Übliche Werte dafür sind im Bereich von deutlich unter $1 \frac{l}{min}$ Motorblow-by-Beitrag des Gesamtmotors [57].

Druckluftkompressor

Eine weitere Quelle von Motorblow-by kann ein motorbetriebener Druckluftkompressor sein. Über die Kolbenringe eines Zylinders des Druckluftkompressors ist eine Leckage in den Rädertriebbereich des Motors gegeben, siehe Anhang 9.

Der Motorblow-by-Beitrag eines Druckluftkompressors hängt maßgeblich von seiner Zylinderzahl und dem Gegendruck ab. Der Gegendruck ergibt sich aus dem Druckniveau in den Drucktanks und kann bis zu 13 bar in Mercedes-Benz Nutzfahrzeugen betragen. In [56] werden ein Beitrag bis zu 20 %, des Motorblow-by mit einem 2-Zylinder Druckluftkompressor angegeben. Da der Motor auch ohne einen Druckluftkompressor betrieben werden kann, handelt es sich um einen zusätzlichen Motorblow-by-Beitrag, der auf die Summe der anderen Quellen addiert werden kann.