



# 1 Einleitung

## 1.1 Grundlegende Einleitung

Die wichtigsten Ziele in der Entwicklung moderner Motoren im Bereich des Individualverkehrs sind die Kundenzufriedenheit und die Einhaltung der vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Richtlinien.[1]

Die Kundenzufriedenheit umfasst unter anderem die Bereiche Effizienz, Leistung, Zuverlässigkeit und Qualitätsanmutung. Die Anforderungen des Gesetzgebers beschränken sich im Wesentlichen auf die Einhaltung der immer strenger werdenden Vorschriften zur Reduzierung der Schadstoffemissionen.

Die aufgelisteten Punkte lassen sich unmittelbar auf die Kolbengruppe projizieren, da diese einen direkten Einfluss auf alle der aufgezählten Teilbereiche hat.

Das Hauptaugenmerk bei der Weiterentwicklung des Systemverbunds Kolbengruppe liegt in diesem Zusammenhang auf der Reduzierung der an der Baugruppe Kolben/Kolbenringe/Zylinderlaufbahn auftretenden Verlustleistungsströme.

Diese Ströme umfassen dabei in der Betrachtung der vorliegenden Arbeit die resultierende innermotorische Reibleistung der Kolbengruppe, die ungenutzt den Kolben passierenden Blowby-Gasströme sowie der auftretende Verbrauch an Motoröl.

Die Kolbengruppe selbst grenzt den Brennraum bezüglich der unter hohem Druck stehenden Verbrennungsgase von der Kurbelkammer ab. Die Abdichtwirkung wird von den Kolbenringen, welche sich in den Ringnuten befinden und auf der Zylinderlaufbahn gleiten, realisiert. Hinsichtlich des Motoröls hat das Kolben-/Ringpaket zwei Aufgaben. Zum einen muss es für einen ausreichenden Schmierfilm auf der Zylinderwand sorgen, um einen Motorbetrieb mit möglichst geringer Reibleistung und Verschleiß zu gewährleisten. Zum anderen muss die Ölzufuhr in den Brennraum reguliert werden, um den Ölverbrauch auf einem minimalen Niveau zu halten.[2]

Eine Optimierung hinsichtlich aller betrachteter Aspekte stellt eine große Herausforderung in der Entwicklung dar, da die gesetzten Ziele eine enge Verknüpfung untereinander haben und zum Teil gegenläufige Tendenzen aufweisen.

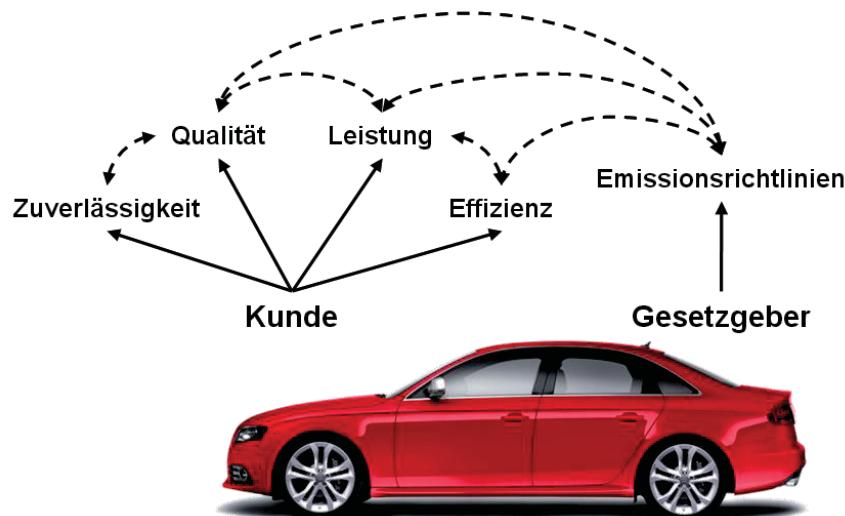
So kann eine Reduzierung der Vorspannkräfte der Kolbenringe eine Verringerung der Reibleistung der Kolbengruppe zur Folge haben. Eine derartige Maßnahme wirkt sich je-



doch potentiell negativ auf das Motorverhalten hinsichtlich Blowby-Gasstrom und Ölverbrauch aus.

Eine erhöhte Blowby-Gasmenge ist gleichbedeutend mit einem verstärkten Eintrag von Verbrennungsprodukten in das Motoröl, was die Lebensdauer des Schmierstoffs herabsetzt. Dies hat wiederum negative Auswirkungen auf die Dauer der notwendigen Wartungsintervalle und mindert somit die vom Kunden empfundene Qualität des Gesamtfahrzeugs. Ein erhöhter Ölverbrauch kann einen ähnlichen Effekt erzielen. Zudem trägt unverbranntes, oder nur teilweise verbranntes Öl im Abgasstrom direkt zu den HC- und Partikelemissionen bei.[2][3][4] Dies kann zu weiteren negativen Konsequenzen bei der Einhaltung der Abgasvorschriften führen. Zusätzlich können chemische Bestandteile der im Motoröl befindlichen Additive das Abgasnachbehandlungssystem nachhaltig schädigen, was zu weiteren Nachteilen im Emissionsverhalten führt.[5]

So lässt sich das Zusammenspiel zwischen den aufgeführten Kundenanforderungen und den Vorgaben des Gesetzgebers sowie deren gegenseitige Beeinflussung, wie in Abbildung 1-1 dargestellt, schematisch aufzeigen.



**Abbildung 1-1: Zusammenhänge der betrachteten Anforderungen von Kunde und Gesetzgeber**

Der aufgezeigte Konflikt in den resultierenden, zum Teil gegenläufigen Motoreigenschaften, macht deutlich, dass es sich bei der Auslegung und Weiterentwicklung des Systems Kolben/Kolbenringe/Zylinderlaufbahn um eine komplexe Aufgabenstellung handelt. Aktuell wird diese Weiterentwicklung noch häufig empirisch durchgeführt. Der Einfluss



moderner analytischer Werkzeuge zur Eigenschaftsvorbestimmung ist zum jetzigen Zeitpunkt noch gering ausgeprägt.

## 1.2 Grundlagen des Ölverbrauchs

### 1.2.1 Definition Ölverbrauch

Zum Verständnis der Ergebnisse von Ölverbrauchsuntersuchungen ist es essentiell die Quellen und Senken im Ölkreislauf zu erkennen und zu berücksichtigen. Je nach eingesetztem Messverfahren können unterschiedliche Schmierölströme erfasst werden. Hierbei bestehen signifikante Unterschiede zwischen den Begriffen Ölbilanz, Ölverbrauch und Ölemission. Nachfolgende Abbildung 1-2 stellt die Zusammenhänge zwischen diesen Begriffen schematisch dar.

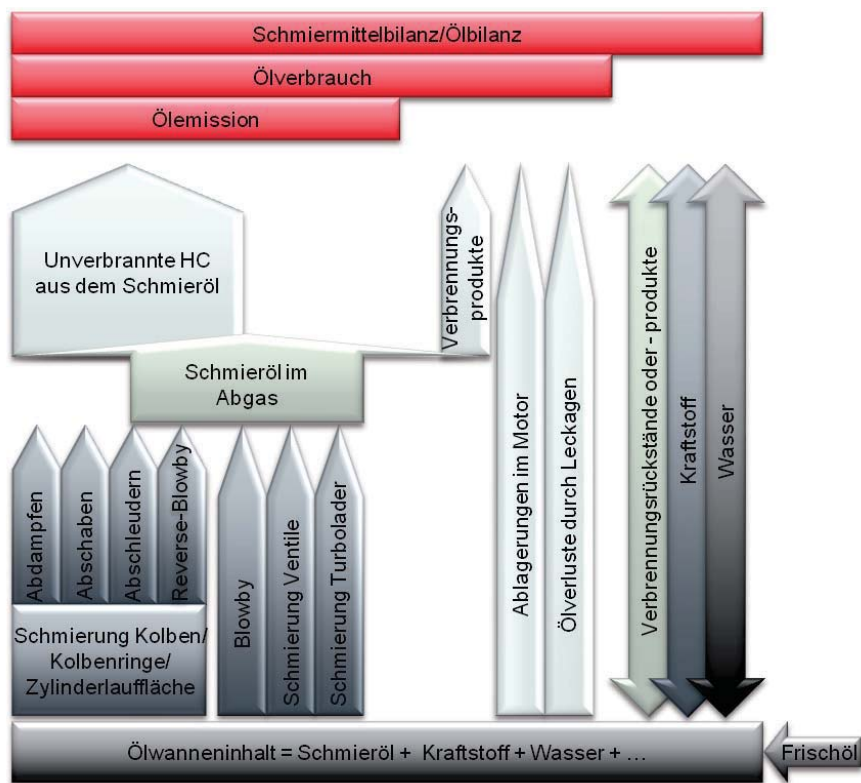


Abbildung 1-2: Übersicht Ölemission, Ölverbrauch und Ölbilanz [6]

Ölverbrauch ist definiert als der auf die Zeit bezogene Verlust von Schmierölanteilen aus dem Ölkreislauf. Während des Motorbetriebs wird jedoch nicht nur Schmieröl verbraucht,

sondern es findet permanent ein Ein- und Austrag von Kraftstoff, Wasser sowie von Verbrennungsprodukten und –rückständen aus dem, oder in das Kurbelgehäuse statt.[7] Die Ölbilanz muss aufgrund dessen um die ein- und ausgetragenen Massenströme erweitert definiert werden. Diese Bilanzierung erfolgt mittels Massen- oder Volumendifferenz über die Dauer eines festgelegten Prüfzeitraumes. Als Folge der Ein- und Austragsmechanismen kann in bestimmten Betriebszuständen eine deutliche Differenz zwischen Ölverbrauch und Ölbilanz auftreten.

Der größte Anteil des Ölverbrauches (80-90 %) besteht aus abgegebenen Ölemissionen. Emittiertes Öl sind Schmierölanteile, welche über das Abgassystem aus dem Motor austreten.[8] Die Ölkomponenten liegen hierbei unverbrannt, gasförmig, oder als Tröpfchen (Aerosol) vor. Die Erfassung des Ölverbrauches mittels Tracermethode (siehe Kapitel 2.3.2), wie sie in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, ist in der Lage, zusätzlich zum rein emittierten Öl auch Verbrennungsprodukte zu detektieren, welche bei der Umsetzung des Öls entstehen. Jedoch ist auch diese Analysemethode nicht in der Lage, den vollständigen Ölverbrauch zu erfassen. Die Verluste durch Leckagen oder Ablagerungen können hierbei nicht berücksichtigt werden. Diese Anteile am Ölgesamtverbrauch sind aufgrund ihres geringen Volumens nicht signifikant. Daher wird es als tolerierbar angesehen, auf deren Erfassung zu verzichten.[9]

## 1.2.2 Ölverbrauch in der Literatur - Vorausgegangene Untersuchungen

Der Ölverbrauch selbst sowie dessen Quellen und Mechanismen, sind Bestandteile einer Vielzahl vorangegangener Untersuchungen. So beschäftigen sich die Arbeiten [10][11][12][13][14] mit den Einflüssen der geometrischen Ausprägungen von Kolben und Kolbenringen auf den Ölverbrauch. Weitere Forschungsarbeiten betrachten sowohl die Auswirkung der Zylinderlaufflächenbehandlungen [15][16][17], als auch die Verformung der Zylinderbohrungen während des Betriebs [18][19] in Hinblick auf den Ölverbrauch der jeweiligen Motoren. Die Einflüsse der Komponententemperaturen des Systemverbunds Kolben/Kolbenringe/Zylinderlaufbahn [20] sowie die Eigenschaften der Ölformulierung [21][22] auf das Ölverbrauchsverhalten eines Motors, sind Gegenstand weiterer wissenschaftlicher Arbeiten. Betrachtungen des Einflusses der Zwischenringdrücke und der Ringdynamik auf den Motorölkonsum werden in [23][24] durchgeführt. Eine große Zahl an Untersuchungen zeigt zudem den Zusammenhang zwischen der mittels LIF (Laser Induced Fluorescence) ermittelten Ölfilmickenverteilung auf Ringen und Kolbenoberflächen und



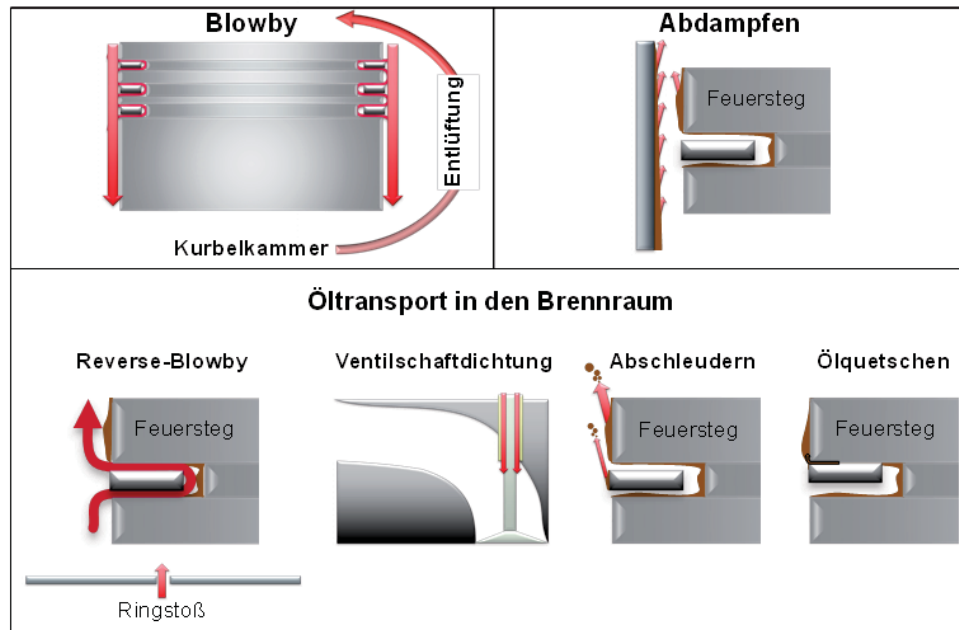
dem auftretenden Ölverbrauchsverhalten der eingesetzten Motoren [25][26][27][28][29][30][31][32]. Zudem wird die Auswirkung des Blowby-Volumenstroms auf den Motorölverbrauch in der Literatur in mehreren Untersuchungen behandelt [33][34][35][36][37][38].

### 1.2.3 Ölverbrauchsquellen

Der Verlust von Motoröl eines Verbrennungsmotors erfolgt über mehrere Ölverbrauchsquellen und -mechanismen. Das Schmieröl kann zum einen direkt aus dem Motorgehäuse oder gegebenenfalls über die Abdichtung eines vorhandenen Turboladers entweichen. Zum anderen gelangt das Öl in verbrannter, oder unverbrannter Form über den Brennraum in die Abgasanlage, wo es ausgestoßen wird und somit für den Schmierkreislauf des Motors nachhaltig nicht mehr zur Verfügung steht.

Das direkte Entweichen des Schmieröls aus dem Motor ist von untergeordneter Bedeutung.[39] In den weiteren Betrachtungen wird diese Möglichkeit des Ölverbrauchs deswegen nicht näher ausgeführt.

Die wesentlichen Ölverbrauchsquellen sind in Abbildung 1-3 dargestellt. Diese lassen sich in direkten Öltransport in den Brennraum, in Ölanreicherung des in die Zylinder zurückgeführten Blowby-Volumenstroms und in das Abdampfen von Zylinderlaufbahn und Feuersteg des Kolbens untergliedern.



**Abbildung 1-3: Hauptölverbrauchsquellen im Verbrennungsmotor**

Der direkte Öltransport in den Brennraum lässt sich, wie der Abbildung zu entnehmen ist, noch weiter unterteilen in die Öleinträge durch Reverse-Blowby, über die Ventilschaftdichtungen, durch Abschleudern und durch das Quetschen von Öl aus der obersten Ringnut.

Die dargestellten Ölverbrauchsquellen und –mechanismen sind nachfolgend kurz erläutert.

### 1.2.3.1 Ölverlust durch Blowby

Da der Kolben und das Kolbenringpaket keine vollständige Abdichtung zwischen dem jeweiligen Brennraum und der Kurbelkammer erreichen kann, tritt ein Gasaustausch zwischen diesen beiden Volumina auf. Der von den Brennräumen in die Kurbelkammer fließende Volumenstrom wird hierbei als Blowby bezeichnet. Blowby ist aufgrund des zyklischen Verbrennungsprozesses somit ein nicht statischer, periodischer Gasfluss von den Brennräumen in die Kurbelkammer, welcher Verbrennungsgase, Ruß, Kraftstoff und Öl in flüssigem, oder gasförmigem Aggregatzustand enthält.

Moderne Motoren verfügen über eine Rückführung der Kurbelkammerngase in das Einlasssystem. Die auftretenden Blowby-Gase werden somit wieder in die Brennräume zurückgeführt. Der Gasstrom reichert sich jedoch vor der Rückführung sowohl im Kolbenringpaket als auch in der Kurbelkammer mit Öl an.



Im Kolbenringpaket erfolgt diese Anreicherung mit Öl im gasförmigen, wie auch im flüssigen Aggregatzustand. Leicht flüchtige Bestandteile des Öls dampfen von den heißen Oberflächen des Systemverbunds Kolben/Kolbenringe/Zylinderlaufbahn ab und werden vom vorliegenden Gasstrom aufgenommen. Des Weiteren erfolgt eine Zerstäubung des dünnen Ölfilms im Kolben-/Kolbenringpaket aufgrund der hohen Gasflussgeschwindigkeiten. Dies führt somit zu einer weiteren Aufnahme von Öl in das Gas.

Nachdem der Gasstrom den Kolben und das Ringpaket passiert hat, strömen die bereits ölhaltigen Blowby-Gase in die Kurbelkammer ein und vermischen sich mit den dort vorliegenden Gasen. In diesem Bereich des Motors ist eine zusätzliche Anreicherung der Blowby-Gase mit Öl zu erwarten, da aufgrund des Ölabschleuderns bewegter Bauteile, Ölleckagen der Gleitlager und Spritzöl der Kolbenkühl Düsen viele Öltröpfchen vorhanden sind.

Vor der Rückführung der mit Öl geladenen Kurbelkammergase über die Kurbelkammerentlüftung in das Einlasssystem müssen diese bei modernen Motoren einen Feinölabscheider passieren, welcher Öl ab einer bestimmten Partikelgröße je nach Leistungsfähigkeit des Abscheiders aus dem Gasstrom ausfiltert und das aufgefangene Öl in die Ölwanne abgibt.

Der im Gas verbleibende Öldampf, welcher mit in die Brennräume über das Einlasssystem zurückgeführt wird, trägt in der Folge zum Ölverbrauch bei. Die Arbeiten [33][34][35][36][37][38] beschäftigen sich mit der Quantifizierung dieses Ölverbrauchsanteils.

### 1.2.3.2 Ölverlust durch Abdampfen

Wird ein Motor gefeuert betrieben, verdampft ein Teil des auf der Zylinderlaufbahn und den oberen Kolbenregionen befindlichen Öls. Der so entstehende Öldampf wird im Ausstoßtakt mit ausgeschoben und trägt somit zum Gesamtölverbrauch eines Motors bei.

Die Menge des abgedampften Öls von der Zylinderlaufbahn steht dabei in Zusammenhang mit der Fähigkeit der Kolbenringe, sich an die im Betrieb deformierte Zylinderwand anzupassen. Diese nimmt mit zunehmender Amplitude und Ordnung der Verformung, steigender radialer Kolbenringdicke und abnehmender Tangentialkraft der Kolbenringe ab. Eine geringere Anpassungsfähigkeit führt zu einem lokalen Anstieg der Ölfilmstärke auf der Zylinder-



laufbahn in Umfangsrichtung. Der Ölverbrauch kann hierdurch negativ beeinflusst werden.[19]

Experimentelle Untersuchungen bestätigen, dass das Abdampfen des Öls von Zylinderwand und Kolben einen wesentlichen Beitrag zum Motorölverbrauch liefert [20][21][22]. Theoretische Ansätze zur Betrachtung des Ölabdampfens [40][41][42] zeigen, dass der Prozess des Ölabdampfens stark von der Ölzusammensetzung und der Linertemperatur abhängig ist. Frühere Arbeiten [21][22] weisen auf die Wichtigkeit der Ölviskosität und der Flüchtigkeit der Ölbestandteile in Bezug auf Abdampfen hin. Die Arbeiten [43][44][45] bestätigen dies mittels Infahrzeugmessungen.

### **1.2.3.3 Direkter Öltransport in den Brennraum**

#### **Öltransport aufgrund von Gasströmen**

Die im motorischen Betrieb auftretenden Gasströme im Kolben-/Ringpaket können das Motorölverbrauchsverhalten auf unterschiedliche Weise beeinflussen.

Je nach vorliegender Motorlast wird der Zylinderinnendruck während des Einlasstakts sowie der maximal auftretende Druck im Zylinder beeinflusst. Als Folge dessen wird der Gasdurchfluss durch das Ringpaket und somit das auftretende Blowby verändert. Bei geringer Last tritt aufgrund der niedrigeren Verbrennungsdrücke weniger Blowby auf. Da mit dem Blowby-Strom gleichzeitig auch der Gasdurchfluss durch das Ringpaket abnimmt, wird folglich weniger Öl aufgrund der induzierten Schubspannungen zwischen dem Öl und dem vorbeiströmenden Gas in Richtung der Kurbelkammer mitgerissen (siehe Überlegungen Kapitel 4.1.4.4.3). Es kann somit zu einer verstärkten Ansammlung von Öl im Systemverbund Kolben/Kolbenringe kommen. Liegt mehr Öl in den oberen Kolbenregionen vor, so kann es zu einem Öltransport in Richtung der Brennräume über verschiedene Pfade kommen. Das Öl wird dabei zuerst der Ringnut des obersten Kolbenrings zugeführt, gelangt von dort aus auf den Feuersteg und wird durch weitere Effekte wie Abdampfen und Abschleudern in die Brennräume selbst eingetragen, wo das Öl zum Gesamtölverbrauch beiträgt.

Des Weiteren tritt bei geringen Motorlasten während des Ansaugtaktes sowie im späten Arbeits- und frühen Ausstoßtakt, ein negatives Druckgefälle über den ersten Kolbenring auf. Dies bedeutet, dass der Zylinderinnendruck in besagten Phasen geringer als der Druck zwischen den ersten beiden Kolbenringen ist. Durch den so gerichteten Druckgradienten kommt es zu einem rückwärtigen Gastransport in Richtung der Brennräume (Reverse-Blowby).





Dieser Gasstrom kann direkt Öl, welches im dampfförmigen Aggregatzustand in den oberen Kolbenregionen vorliegt, durch den Ringstoß, oder auch die Ringnut des obersten Kolbenrings, in den Brennraum eintragen. Weiterhin kommt es durch den nach oben gerichteten Gasfluss zu einem Mitreißen des auf dem Kolben angesammelten flüssigen Öls, welches durch die oberste Kolbenringnut auf den Feuersteg transportiert wird und in weiterer Folge zum Gesamtölverbrauch beiträgt.[46][47] Hierbei ist zwischen zwei Anteilen des Reverse-Blowby zu differenzieren. Einem Gasstrom innerhalb des Ringpakets, welcher Öl aus der Kurbelkammer und von tieferen Kolbenregionen in Richtung höherer Kolbenbereiche transportiert und einem rückwärtigen Gasstrom über den ersten Kolbenring, welcher für den direkten Öleintrag des nach oben transportierten Öls auf den Feuersteg und in den Brennraum mit verantwortlich ist. Beide Gasströme sind jedoch eng miteinander verbunden. In vielen Arbeiten wird es als erwiesen angesehen, dass der beschriebene Reverse-Blowby-Strom vorbei am ersten Kolbenring den Hauptgrund für den Öltransport in die Brennräume darstellt.[38]

### **Öleintrag über die Ventilschaftdichtungen**

Flüssiges Öl kann aus den Zylinderköpfen über mangelhafte, oder defekte Ventilschaftdichtungen in die Brennräume eindringen und in verbrannter, oder unverbrannter Form mit dem Abgas aus den Zylindern ausgestoßen werden.

In sehr guter Näherung kann davon ausgegangen werden, dass die Abdichtung der Ventilschäfte im ordnungsgemäßen Zustand so gut ist, dass dieser Anteil am Gesamtölverbrauch vernachlässigt werden kann.[48]

### **Öltransport aufgrund von Inertialkräften und Abschleudern**

Aufgrund der reziproken Bewegung des Kolbens treten sehr hohe Beschleunigungskräfte auf. Das sich auf dem Kolben befindliche flüssige Öl erfährt dabei als Folge der resultierenden Massenträgheitskräfte eine Relativbewegung auf den Kolbenoberflächen. Da das Ölangebot in den unteren Kolbenregionen größer ist als in den Bereichen um die oberen beiden Kolbenringe (Spritzöl von den Kolbenkühlöfen und von den bewegten Bauteilen in der Kurbelkammer), liegt in diesen Regionen eine größere Ölsammlung vor. Wie in [49] beschrieben, wird ein größeres Ölvolumen schneller über die jeweilige Kolbenoberfläche bewegt, als ein geringeres. Aufgrund dessen erfolgt durch die auftretenden Trägheitskräfte



jeweils ein Öltransport auf den Kolbenringstegen in Richtung des Brennraums. Findet dieser Transport des Öls auf dem Feuersteg statt, so kann es bei ausreichenden Beschleunigungswerten zu einer Ablösung von Öltröpfchen des dort angesammelten Öls kommen. Flüssiges Öl wird somit von diesem Bereich in den Brennraum abgeschleudert und in der Folge verbrannt oder unverbrannt mit den Verbrennungsprodukten aus dem Brennraum in Richtung Abgasanlage ausgeschoben.[50][51]

### **Öltransport durch Ölquetschen zwischen Ring- und Nutflanken**

Durch die Relativbewegung zwischen den Kolbenringen und dem Kolben kommt es dazu, dass die Ringe zum Teil mehrfach während eines Verbrennungszyklus Anlagewechsel zwischen Nutober- und Nutunterflanke vollziehen. Das auf den Ring- und Nutflanken befindliche Öl wird dabei verdrängt und je nach angesammelter Menge und relativem Winkel zwischen Ring und Nut entweder in die Nut hinein, oder aus der Nut heraus gequetscht. Das Quetschen des Öls in die Ringnut ist gleichbedeutend mit einer steigenden Ansammlung von flüssigem Öl im Nutgrund. Aufgrund der Gasdurchströmung der Nuten wird dieses Öl wieder in den Spalt zwischen Kolbenring und Ringnutflanke geleitet. Findet dort ein Ölquetschen aus der Nut statt, so wird das auf diese Weise transportierte Öl auf die Oberfläche der jeweiligen Kolbenregion befördert. Findet dieses Ausquetschen an der Unterseite des Kolbenrings statt, so kann dies positive Folgen für den Ölverbrauch haben, da dies einen Öltransport in Richtung Kurbelkammer darstellt. Wird Öl jedoch an der Nutoberflanke auf den dort befindlichen Ring- oder Feuersteg gequetscht, ist dies gleichbedeutend mit einem Öltransport in Richtung des Brennraums, was wiederum einen gesteigerten Ölverbrauch begünstigt. Auf diese Weise kann Öl aufgrund des mechanischen Verdrängungsprozesses bis auf den Feuersteg gelangen, wo es dann durch Phänomene wie Abdampfen und Abschleudern mit zum Ölverbrauch beiträgt.

#### **1.2.3.4 Anteile der Ölverbrauchsquellen**

In diesem Abschnitt beschränkt sich die Betrachtung der Anteile der Ölverbrauchsquellen auf das Abdampfen des Öls von der Laufbahn, den Blowby-bedingten Ölverbrauch und den aufgrund Öltransport durch das Kolben-/Ringpaket hervorgerufenen Ölverbrauch. Es wird somit angenommen, dass sich der Gesamtölverbrauch zu 100 % aus diesen drei Ölver-



brauchsquellen zusammensetzt. Die Untersuchungen beziehen sich dabei auf den Fall des statischen Betriebs. Transiente Einflüsse sind hierbei ausgeschlossen.

Eine getrennte Analyse bezüglich der Last- und Drehzahlabhängigkeit der Ölverbrauchsanteile ist möglich und nachfolgend aufgezeigt.

### Lastabhängigkeit der Ölverbrauchsanteile

Abbildung 1-4 zeigt die in [38] bei 3500 1/min ermittelte Lastabhängigkeit der Anteile der einzelnen Ölverbrauchsquellen am Gesamtölverbrauch.

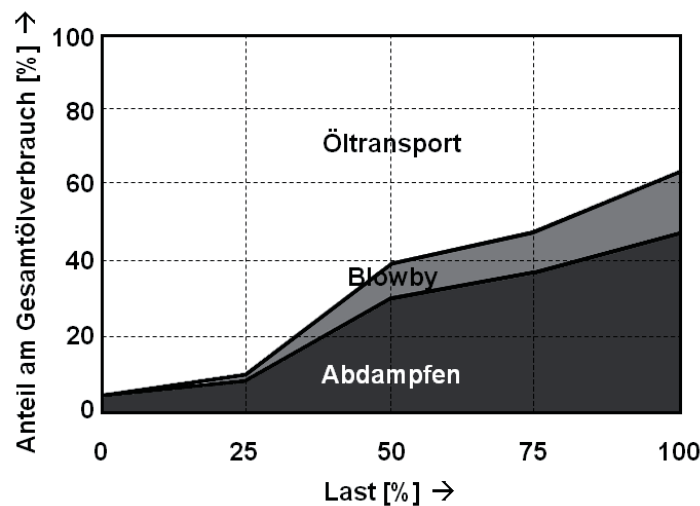


Abbildung 1-4: Anteile am Gesamtölverbrauch in Abhängigkeit von der Motorlast [38]

Es ist zu erkennen, dass bei niedrigen Lasten der Öltransport über das Kolben-/Kolbenringpaket bei Weitem den größten Anteil am gesamten Ölverbrauch aufweist. Mit zunehmender Last nimmt diese Ölverbrauchsquelle anteilig kontinuierlich ab. Der Blowby-Ölverbrauch und vor allem der Ölverbrauch aufgrund des Abdampfens des Öls in den Brennraum nehmen zu.

Bei niedriger Last herrscht nur ein geringer Blowby-Strom vor, sodass nur wenig Öl von der Kolbenoberfläche bedingt durch Scherspannungen in der Grenzschicht zwischen Ölfilm und Gasstrom in Richtung der Kurbelkammer mitgerissen werden kann (siehe Überlegungen Kapitel 4.1.4.4.3). Aufgrund der sich einstellenden Druckverhältnisse im Zylinder und im Ringpaket nimmt im Ansaugtakt die Reverse-Blowby-Menge zu. Des Weiteren verlängert sich die Phase mit negativem, also in Richtung der Kurbelkammer gerichtetem Druckgradi-