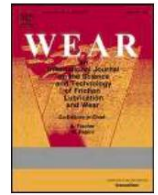


Inhaltsverzeichnisse verfügbar bei ScienceDirect

Tragen

Zeitschriften-Homepage: www.elsevier.com/locate/wear

Studie zur Motorhaltbarkeit und Schmieröltribologie eines mittelschweren Transportdieselmotors mit Biodieselantrieb und Common-Rail-Direkteinspritzung

Jai Gopal Gupta, Avinash Kumar Agarwal^{*}

Motorenforschungslabor, Abteilung für Maschinenbau, Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur, 208016, Indien

ARTIKEL INFORMATION

Schlüsselwörter:

CRDI-Motor
Karanja-Biodiesel
Ausdauertest
Materialverträglichkeit
Tribologische Eigenschaften

ABSTRAKT

Biodiesel hat sich im Verkehrssektor als praktikable Alternative zu mineralischem Diesel erwiesen, um fossile Brennstoffe teilweise zu ersetzen. Allerdings muss die langfristige Kompatibilität mit der Motorhardware bewertet werden, um einen reibungslosen Übergang zu gewährleisten. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Langzeitstudien zur Materialkompatibilität von Karanja-Ölmethylester-Mischungen (Biodiesel) mit der Hardware eines modernen Dieselmotors mit Common-Rail-Direkteinspritzung, der in Sports Utility Vehicles verwendet wird, durchgeführt. Ein Langzeit-Ausdauertest wurde in zwei Phasen durchgeführt, die jeweils 274 Stunden dauerten und (i) mineralischen Basisdiesel und (ii) einen 20 % v/v Karanja-Biodiesel, gemischt mit mineralischem Diesel (KB20), verwendeten.

Nach Abschluss der ersten Phase wurde der Motor zerlegt und wesentliche Motorkomponenten mithilfe verschiedener Techniken auf Kohlenstoffablagerungen und physischen Verschleiß untersucht. Bevor mit der nächsten Phase des Dauertests KB20 begonnen wurde, wurden neue Motorkomponenten in den Motor eingebaut und anschließend der Test durchgeführt. Der mit KB20 betriebene Motor zeigte einen geringeren Verschleiß an den Ventilen und Kurbelzapfen, aber einen höheren Verschleiß an Laufbuchsen, Kolbenringen, Kolben, Kolbenbolzen, kleinen und großen Endlagern der Pleuelstange und den Hauptlagern. Die Kraftstoffchemie beeinflusste die Wirksamkeit des Schmieröls und seine Restlebensdauer. Das Schmieröl des mit KB20 betriebenen Motors zeigte einen stärkeren Anstieg der Dichte und des Aschegehalts. Das Schmieröl des mit KB20 betriebenen Motors wurde stärker oxidiert und polymerisiert. Zur vergleichenden Verschleißbewertung während beider Phasen des Dauertests wurden die Oberflächenrauheitseigenschaften der Zylinderlaufbuchse vor und nach dem Dauertest gemessen. Es wurden Kohlenstoffablagerungen am Zylinderkopf, an der Kolbenoberseite und an den Einspritzdüsen verglichen, und die Kolben des mit KB20 betriebenen Motors wiesen höhere Kohlenstoffablagerungen auf. Biodieselmischungen beschädigten das Kraftstoffeinspritzsystem des CRDI-Motors.

Biodiesel schadet der Kraftstoffeinspritzanlage (FIE) des CRDI-Motors. An den regelmäßig entnommenen Schmierölproben wurden verschiedene tribologische Tests durchgeführt, um die Verträglichkeit von KB20 gegenüber mineralischem Diesel zu untersuchen. Bei dieser Reihe tribologischer Tests an den Schmierölproben wurde der Einfluss der Kraftstoffchemie auf die Leistung und Restlebensdauer des Schmieröls bewertet. Die Tests umfassten Schwankungen der Schmiermitteldichte, der Viskosität, der Flammpunkttemperatur, des Feuchtigkeitsgehalts, der Unlöslichkeit von Pentan und Toluol sowie der Kupferkorrosion im Laufe der Zeit. Die Studie kam zusammenfassend zu dem Schluss, dass Biodieselmischungen in einem CRDI-Motor verwendet werden können, ohne dass es zu größeren Problemen bei der Motorhaltbarkeit oder der Verschlechterung des Schmieröls kommt.

1. Einleitung

Die rasche Erschöpfung der Energieressourcen und die zunehmende Umweltverschmutzung sind die Hauptprobleme, mit denen die Welt heute konfrontiert ist. Für die Aufrechterhaltung des Lebensstandards und des modernen Lebensstils ist Energie unerlässlich. Im 21. Jahrhundert besteht die größte Herausforderung für die Forscher darin, den rasant steigenden globalen Energiebedarf zu decken [1]. Biokraftstoffe werden als Alternativen zu herkömmlichen fossilen Brennstoffen erforscht. Biodiesel ist ein wichtiger Kandidat für erneuerbare Biokraftstoffe, der in mehreren Teilen der Welt evaluiert wird. Allerdings stehen die Automobilhersteller vor einer Herausforderung durch die Eigenschaften

wie höhere Viskosität, geringere Oxidationsstabilität und Probleme mit der Materialkompatibilität. Da Biodiesel eine andere chemische Zusammensetzung als mineralischer Diesel hat, ist seine Kompatibilität mit modernen Motorkomponenten fraglich. Daher müssen Aspekte der Materialverträglichkeit vor seiner breiteren Verwendung als alternativer Kraftstoff berücksichtigt werden.

Gopal und Raj [2] führten eine Vergleichsstudie durch, um die Haltbarkeit eines Einzylinder-Kompressionszündungsmotors (CI-Motors) zu bewerten, der mit einer 20-prozentigen Mischung aus Pongamia-Ölmethylester (PME20) bzw. Diesel betrieben wurde. Zur Beurteilung der Kraftstoffauswirkungen wurden verschiedene tribologische Eigenschaften der aus dem Motor entnommenen Schmierölproben herangezogen

^{*} Korrespondierender Autor.

E-Mail-Adresse: akag@iitk.ac.in (AK Agarwal).

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204104> Eingegangen

am 26. April 2021; In überarbeiteter Form eingegangen am 6. September 2021; Angenommen am 10. September 2021. Online verfügbar am 17. September 2021

0043-1648/© 2021 Elsevier BV Alle Rechte vorbehalten.

Chemie auf die Schmieröleigenschaften und die Motorhaltbarkeit. Zu diesen Eigenschaften gehörten kinematische Viskosität, Dichte, Gesamtbasenzahl, Feuchtigkeitsgehalt, Aschegehalt, Pentan und Benzolunlöslichkeit. Aufgrund seiner Korrosivität, hygroskopischen Natur, Oxidationsanfälligkeit und Neigung zur Ablagerungen zeigte PME 20 im Langzeit-Dauertest eine schlechtere Schmierfähigkeit. Ferrographietests, die an den Schmierölproben durchgeführt wurden, zeigten verhältnismäßig größere Abnutzungsrückstände beim PME20-Motor. Dhar und Agarwal [3] führten einen 250-Stunden-Dauertest an einem Direkteinspritzungs-Kompressionszündungsmotor (DIC) durch, um die Auswirkung einer 20-prozentigen Karanja-Biodieselmischung (KB20) auf den Motorverschleiß und die Lebensdauer im Vergleich dazu zu untersuchen mineralischer Diesel. Gemäß der Verschleißcharakterisierungsstudie der Laufbuchsenoberfläche zeigte die Oberflächentextur der Zylinderlaufbuchsen nach dem Haltbarkeitstest für beide Kraftstoffe eine ähnliche Verschlechterung. Auf der Anti-Trust-Seite der Zylinderlaufbuchse wurden zusätzlich zu den Honspuren beim KB20-betriebenen Motor Kratzer beobachtet, die auf einen relativ höheren Laufbuchsenverschleiß durch KB20 hindeuteten. Dhar und Agarwal [3] berichteten jedoch, dass mit Biodiesel betriebene Motoren einen relativ geringeren Verschleiß der Kolbenringe, Kolben und Pleuellager aufwiesen. Sie fanden höhere Kohlenstoffablagerungen auf der Kolbenoberseite, dem Zylinderkopf und der Einspritzdüsen Spitze des mit KB20 betriebenen Motors als beim Basismotor mit Mineraldiesel, was möglicherweise auf höhere Kohlenstoffrückstände und eine geringere Flüchtigkeit von Biodiesel zurückzuführen ist. Die geringere Flüchtigkeit von Biodiesel erhöhte die Wärmefreisetzung während der späten Verbrennungsphase, was zu einer kürzeren Zeit für die Rußoxidation im Zylinder führte, was dazu führte, dass unverbrannte/pyrolysierte Biodieselprodukte an den Brennkammerwänden kondensierten, was zu erhöhten Kohlenstoffablagerungen führte [3]. Tziourtziou-mis et al. [4] untersuchten einen mit B70 betriebenen Dieselmotor mit Common-Rail-Direkteinspritzung (CRDI) unter stationären und transienten Bedingungen für 30 Stunden. Sie entdeckten in den Kraftstofffiltern eine dicke, an Fettsäureestern reiche Aufschlammung und hatten außerdem anfängliche Probleme beim Starten des Motors. Auch die Löcher der Einspritzdüsen waren mit dicken, öligen Kohlenstoffablagerungen bedeckt [4]. Fazal et al. [5] verglichen den Verschleiß von Motorkomponenten bei Biodiesel- und mineralölbetriebenen Dieselmotoren. Während der Feldversuche stellten sie einen geringeren/vergleichbaren Verschleiß von mit Biodiesel/Biodieselmischung betriebenen Motorkomponenten im Vergleich zu mit Mineraldiesel betriebenen Motoren fest. Armas et al. [6] führten einen 600-stündigen beschleunigten Dauertest durch, um die Auswirkungen einer Ethanol-Biodiesel-Diesel-Mischung (7,7–27,69 % – 69,61 % v/v) mit Basisdiesel in einem CRDI-Dieselmotor zu vergleichen. Laut dieser Studie zeigten beide Testkraftstoffe ähnliche Auswirkungen auf die Komponenten des Kraftstoffespritzsystems [6]. Pehan et al. berichteten über Kohlenstoffablagerungen in den Brennräumen von Biodiesel- und Dieselmotoren. [7]. Agarwal et al. [8] verwendeten einen 512-stündigen Dauertest, um die Wirkung von B20 (Leinölmethylester) auf den Verschleiß von CI-Motorkomponenten zu untersuchen. Sie stellten eine deutliche Verringerung der Kohlenstoffablagerungen auf der Kolbenoberseite des mit B20 betriebenen Motors fest. Aufgrund der zusätzlichen Schmierfähigkeit von Biodiesel war der physische Verschleiß kritischer Motorkomponenten beim mit B20 betriebenen Motor um etwa 30 % geringer. Zur Validierung dieser physikalischen Verschleißmessergebnisse wurden auch Schmierölproben analysiert. Die Schmierölproben des mit B20 betriebenen Motors wiesen einen relativ geringeren Aschegehalt auf, was auf das Vorhandensein von Abrieb mit geringerem Verschleiß hinweist [8]. Staat und Gateau [9] veröffentlichten Ergebnisse ihrer dreijährigen Studie, in der RME in 2000 Fahrzeugen in Frankreich eingesetzt wurde. Sie berichteten über eine Verringerung der Schmierölviskosität bei Fahrzeugen, die mehr als 30 % RME-Mischungen verwendeten. Der Verschleiß und die Sauberkeit von RME-betriebenen Motoren waren hingegen vergleichbar oder sogar besser als die von Motoren mit mineralischem Diesel. Sem [10] berichtete über Ablagerungen am Kolbenschaft und an der Ringnut der vier untersuchten Biodieselmotoren. Bei den in dieser Studie untersuchten Dieselmotoren fehlten solche Ablagerungen hingegen. Fazal et al. [11] verglichen die korrosiven Eigenschaften von Mineraldiesel und Palm-Biodiesel für Motoren/Fahrzeuge und berücksichtigten Gewichtsverlust und Korrosionsraten. Palm-Biodiesel wirkte stärker korrosiv auf Kupfer- und Aluminiumbestandteile als Mineraldiesel. Andererseits war Edelstahl vollständig Biodiesel-konform [11]. Kaul et al. [12] verglichen auch die Korrosivität von Biodieseln (Jatropha curcas, Karanja, Mahua und salvadorianischen Oleoiden) gegenüber Kolben, Laufbuchse und anderen Komponenten im Vergleich zu mineralischem Basisdiesel. Biodiesel hergestellt aus

Die salvadorianische Ölpflanze (Pilu) war am ätzendsten, gefolgt von Jatropha curcas. Karanja- und Mahua-Biodiesel verursachten eine Korrosion, die mit mineralischem Basisdiesel vergleichbar war [12]. In einer Studie von Bese und Fay [13] erwies sich Biodiesel als weitgehend unverträglich mit Nitrilkautschuk, Nylon 6/6 und hochdichtem Polypropylen. Andererseits waren Teflon und Viton relativ besser mit B100 kompatibel [13]. Bei der Oxidation von Biodiesel bildet sich Hydroperoxid, eine instabile Verbindung, die die Elastomere angreift, schlussfolgerte Gerpen [14]. Laut Schumacher et al. [15], Gummikomponenten der Betankungseinrichtung zersetzten sich bei Einwirkung von Biodiesel. Es wurde jedoch festgestellt, dass Viton- (Fluorkautschuk), Stahl-, Aluminium- und Nylon-verstärkte Schläuche mit Biodiesel kompatibel sind.

Biodiesel weist potenziell ungeeignete Kraftstoffeigenschaften auf, wie z. B. eine geringere Oxidationsstabilität, eine höhere Hygroskopizität, eine höhere elektrische Leitfähigkeit, Polarität und Lösungsfähigkeit, die alle zu einer erhöhten Korrosion metallischer Komponenten und einer Verschlechterung der Elastomerkomponenten beitragen [16]. Die Ergebnisse der Verwendung von Biokraftstoffen auf Reiskleieölbasis zum Schmierölabbau, zur Ablagerungsbildung und zum Verschleiß von Dieselmotoren wurden von Hoang et al. analysiert. [17]. Owuna [18] überprüfte mehrere Studien zur thermooxidativen Stabilität von Pflanzenölen, um ihre Nützlichkeit als alternative und nachhaltige Energiequelle zu bestätigen.

Da Studien zu diesen Aspekten rar sind, sind umfassende Untersuchungen zur Haltbarkeit von Biodieselmotoren erforderlich, um die Verschleißmechanismen zu verstehen. Die Haltbarkeit von Motorkomponenten hängt von der Qualität des Schmieröls und der Verschlechterung im Laufe der Zeit und des Gebrauchs ab. Schmieröl wird durch die Verdünnung durch Kraftstoff und Abriebpartikel verunreinigt. Die Schmierölverdünnung wird durch die physikalischen Eigenschaften des Kraftstoffs beeinflusst. Daher muss der Einfluss von Biodiesel auf den Schmierölabbau untersucht werden. Lin et al. [19] untersuchten, wie sich Biodiesel (Palm-Biodiesel und Mischungen; B100 und B20) auf den Schmierölabbau in einem Hochleistungsdieselmotor auswirkte, der 300 Stunden (18.000 km) in Betrieb war. Die Viskosität nahm um 11,9 cSt ab und die Gesamtalkalität stieg von 7,89 mg zu Beginn auf 8,24 mg KOH g⁻¹. Die Schmieröle der 8,05 mg⁻¹ B100- und B20-Motoren hatten eine Gesamt-KOH g⁻¹ Alkalität von 8,26 und KOH g⁻¹ Palm-Biodiesel, sodass der¹, jeweils. Der Beitrag Schmierölabbau vernachlässigbar war [19]. Biodiesel (B100) und Basisdiesel wurden außerdem in zwei identischen, nicht modifizierten Fahrzeugen getestet, um verschiedene Aspekte der Konformität von Biodiesel mit modernen CRDI-Kraftstoffeinspritzgeräten (FIE) realistisch zu bestimmen und die langfristige Haltbarkeit/Kompatibilität von Biodiesel mit Motorkomponenten in einem 30.000 km langen Feldversuch zu bewerten unter identischen Betriebsbedingungen [20,21]. Probleme mit der Motorzuverlässigkeit, einschließlich Kraftstofffilterverstopfung, Verkokung der Einspritzdüsen, Festsitzen von Kolbenringen, Kohlenstoffablagerungen in der Brennkammer und Auslaufen von Schmierölen, waren bei den mit Biodiesel betriebenen Fahrzeugen während der Feldversuche vergleichsweise geringer [20]. Bis Biodiesel in großem Umfang in aktuellen CRDI-Fahrzeugen zum Einsatz kommt, empfehlen die Forscher den OEMs weitere aktive technische Maßnahmen

Maßnahmen zur Bewältigung dieser technischen Herausforderungen [21]. In einer separaten Analyse stellten Dhar und Agarwal [22] höhere Spurenmetalle wie Fe, Cu und Mg in den Schmierstoffproben fest, die nach einem 200-stündigen Test mit B20 im Vergleich zu mineralischem Basisdiesel entnommen wurden. Dandu und Nanthagopal [23] untersuchten den Schmierölabbau in einem Selbstzündungsmotor unter Verwendung von 100 % Karanja-Ölmethylester in einer Langzeithaltbarkeitsanalyse. Die Experimente waren in zwei Phasen von jeweils 256 Stunden aufgeteilt. Es wurde berichtet, dass die Spurenkonzentrationen von Verschleißmetallen in den Schmierölproben, die aus dem Karanja-Biodieselmotor (B100) abgelassen wurden, relativ höher waren als die des Basisdieselmotors [23].

Staat und Gateau [9] berichteten, dass die Viskosität des Schmieröls in der Flotte mit 2000 Fahrzeugen, die RME nutzten, während der Feldversuche etwas stärker abnahm. RME-Mischungen hatten dagegen keinen erkennbaren Einfluss auf das Ölwechselintervall [9]. Thornton et al. [24] berichteten, dass mit Soja-Biodiesel (B20) betriebene Motoren eine höhere Schmierölverdünnung aufwiesen als mit Mineraldiesel betriebene Basismotoren. Die Analyse der im Schmieröl vorhandenen Verschleißmetallspuren liefert nützliche Informationen über den Verschleiß von Motorkomponenten. Die im Schmieröl vorhandenen Spuren von Verschleißmetallen könnten Aufschluss über das Ausmaß des Verschleißes der Motorkomponenten geben. Agarwal et al. [25] entdeckten relativ geringe Spuren

Konzentrationen von Verschleißmetallen in den Schmierölen, die aus dem mit B20 betriebenen Motor entnommen werden, im Vergleich zu mit Mineraldiesel betriebenen Basismotoren. Spurenmetalle in den Schmierölproben, die aus Sojabohnenmethylester (SME; B100) und mineralischen Dieselmotoren als Ausgangsbasis entnommen wurden, wurden von Schumacher et al. nachgewiesen. [15]. Das Schmieröl von mit B100 betriebenen Motoren wies eine geringere Spurenkonzentration von Pb, Fe und eine höhere Spurenkonzentration von Silizium auf, während vergleichbare Spurenkonzentrationen von Cu und Cr aufwiesen [15]. Sen-tanuhady et al. [26] untersuchten die Wirkung von B20 und B100 während des Langzeitbetriebs auf die Spurenmetalle und die Verunreinigung des Schmieröls mit chemischen Verbindungen in einem Dieselmotor. Die durchschnittlichen Konzentrationen der Spurenmetalle Fe, Al und Cr im Schmieröl von mit B100 betriebenen Motoren waren um 28, 13,5 bzw. 42 % niedriger und die Spurenmetalle Cu und Pb waren um 23 bzw. 19 % höher als in den entnommenen Schmierölproben von einem mit B20 betriebenen Motor [26]. In einem 80.000 km langen Feldversuch mit zwei Pickups stellten Reece und Peterson [27] erhebliche Mengen an Spurenmetallen in den Schmierölproben fest, die von mit Mineraldiesel und RME (B20) betriebenen Fahrzeugen entnommen wurden. Sem [10] kam zu dem Schluss, dass synthetische Schmieröle aufgrund der Verwendung spezieller Additive zur Verlängerung ihrer Restnutzungsdauer (RUL) länger haltbar und toleranter gegenüber der Verwendung von B100 sind und so Ablagerungen am Kolbenschaft reduzieren. Mosarof et al. [28] führten Experimente mit Calophylluminophyllum-Biodieselmischungen (PB10, PB20, PB30, CIB10, CIB20 und CIB30) bei verschiedenen Motordrehzahlen (1000–2400 U/min) und Volllast durch. Bei PB20 wurden im Vergleich zum Basis-Mineraldiesel eine geringere Oberfläche der Verschleißnarben und eine bessere Motorleistung berichtet. Murugesan et al. kamen in einem Übersichtsartikel zu dem Schluss, dass B20 ein geeigneterer alternativer Kraftstoff für Dieselmotoren ist [29]. Patel et al. [30] untersuchten Altspeiseöle (WCO), Jatroph- und Karanja-Öle in einem Genset-Motor im Vergleich zu mineralischem Basisdiesel, um deren Wirkung auf Spurenmetallemissionen zu untersuchen. Raadnui und Meenak [31] stellten identische Spurenmengen an Verschleißmetallen in den Schmierölproben fest, die aus raffiniertem Palmöl und mineralölbetriebenen Dieselfahrzeugen entnommen wurden. Der Verschleiß von Al-, Fe-, Cr- und Pb-haltigen Komponenten in einem CI-Motor verringerte sich, wenn Biodiesel mit mineralischem Diesel

gemischt wurde [32]. Zu den Herausforderungen bei der großtechnischen Einführung von Biodiesel gehört die Schmierölverdünnung, die durch die geringe Flüchtigkeit und die geringere Oxidationsstabilität von Biodiesel verursacht wird [33]. Es besteht immer die Gefahr, dass unverbrannter Biodiesel in den Ölsumpf gelangt und oxidiert, was zu einer Verschlechterung und Verdickung des Schmieröls führt, was zu Schlammabfällung und erheblicher Kohlenstoffverteilung führt. Andererseits kann eine Schmierölverdünnung durch Kraftstoffverdünnung oder Scherung von viskositätsmodifizierenden Polymeradditiven verursacht werden. Darüber hinaus führen Biodieselspuren im Schmieröl dazu, dass Metalle wie Kupfer und Blei aus den Lagern austreten. Motorbetriebsbedingungen, Ölart, Motortyp und Wartung sind die Faktoren, die die Verschlechterung des Schmieröls beeinflussen. Auch der Einfluss von Biodiesel auf die Lebensdauer von Schmieröl ist nicht bekannt. Es besteht Bedarf, die komplizierten physikalisch-chemischen Prozesse zwischen modernen Motorschmierölen und Biodiesel zu verstehen. In dieser experimentellen Studie wurde die Karanja-Biodieselmischung auf Kompatibilität mit einem Euro-IV-Common-Rail-Direkteinspritzer für mittelschwere Transportdieselmotoren untersucht, wobei der Schwerpunkt auf Motorverschleiß, Haltbarkeit und Schmierölverschlechterung im Laufe der Nutzung lag.

2. Methodik

Haltbarkeitstests wurden an einem SUV-Dieselmotor (Tata; Safari DICOR 2,2 L) gemäß dem indischen Standardcode (IS: 10000 Teil IX, 1980) durchgeführt [34]. Tabelle 1 listet die Spezifikationen des Testmotors auf. Das Schema des Versuchsaufbaus zur Durchführung der Motorversuche ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Langzeit-Dauertests wurden in zwei Phasen durchgeführt; Der Motor wurde in der ersten Phase mit mineralischem Diesel zur Basisdatengenerierung und in der zweiten Phase mit KB20 betrieben. Vor Beginn des Dauertests wurde der Motor nach Herstellerangaben vorbereitet und eingefahren. Der Motor wurde für eine vorläufige Einlaufzeit von 10 Stunden unter den vorgeschriebenen Geschwindigkeits-/Lastbedingungen (Tabelle 2) betrieben, bevor mit dem Dauertest begonnen wurde, wie von IS vorgeschrieben:

Tabelle

1 Technische Spezifikationen des Testmotors.

Marke/Modell	Tata/DICOR 2.2L (BS-IV/Euro-IV)
Motortyp	16 Ventile, wassergekühlter, turbogeladener, ladeluftgeköhlter Dieselmotor mit EGR
Anzahl Zylinder	4, Reihen-
Ventilmechanismus	DOHC
Bohrung/Hub	85 mm/96 mm
Hubraum Max.	2179 cm³
Leistungsabgabe,	103 kW bei 4000 U/min
maximales	320 Nm bei 1700–2700 U/min 17,5
Drehmoment,	1-3-4-2
	CRDI
	1600 bar
	Einstufig
	ECU-gesteuert
Kompressionsverhältnis, Zündreihenfolge, FIE-System, maximale FIP, Kraftstofffilter, Timing und Steuerung	

10000 Teil-V [35].

Beim Vorlauf wurde auf Motorvibrationen und Laufruhe geachtet. Anschließend wurde das Schmieröl abgelassen und die Ölwanne des Motors gemäß den Herstellerangaben wieder mit frischem Schmieröl befüllt. Anschließend durchlief der Motor die erste Phase des Langzeit-Dauertests. Anschließend wurde der Motor vollständig zerlegt und anschließend mit neuen Komponenten für die zweite Phase des Dauertests mit B20 unter verschiedenen Drehzahl-/Lastbedingungen wieder zusammengebaut. Seine Kolben, Ringe, Pleuellager, Kurbelwellenlager und andere wichtige Komponenten wurden durch neue Komponenten ersetzt. Anschließend wurde der Dauertest der zweiten Phase mit einem KB20 durchgeführt.

Wie bereits erwähnt, wurde der Motor noch einmal vorläufig eingefahren, bevor die zweite Phase des Langzeit-Dauertests mit KB20 durchgeführt wurde.

Die Langzeit-Dauertests wurden im 8-Stunden-Zyklus durchgeführt, 34 Zyklen pro Phase, also 274 Stunden pro Phase. Jeder Laufzyklus bestand aus vier sich wiederholenden 2-Stunden-Zyklen (Tabelle 3). Vor der Ausführung des nächsten Zyklus wurde sichergestellt, dass die Schmieröltemperatur innerhalb von ±5 K der Raumtemperatur lag. Der Verschleiß wurde in beiden Phasen durch Messung der Abmessungen verschiedener Motorkomponenten wie Zylinderlaufbuchse, Kolben, Kolbenbolzen, Pleuellager, Pleuellstange, Lagerbohrung usw. vor und nach dem Dauertest ermittelt (gemäß IS: 10000). Teil V) [35]. In beiden Phasen wurden Kohlenstoffablagerungen an jedem Zylinderkopf, Kolben und Einspritzventil fotografiert. Zur Durchführung verschiedener Öltests wurden alle 20 Stunden Schmierölproben (100 ml) in Kunststoff-Torsionsflaschen aus dem Motorsumpf entnommen und unter standardisierten Lagerbedingungen aufbewahrt, frei von Chemikalien und Feuchtigkeit, Verunreinigungen und vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt Exposition bei 25 °C [36]. Anschließend wurden die Proben auf verschiedene Parameter untersucht, unter anderem auf Spuren von Verschleißmetallen. Ein Flussdiagramm der wichtigsten Aufgaben während des Dauertests ist in Abb. 2 dargestellt.

Für beide Versuchsphasen wurden die Pleuellager vor und nach dem Dauertest gewogen, um den Pleuellagerverschleiß (basierend auf dem Gewichtsverlust der Ringe) zu messen. Zu den Hauptursachen für den Verschleiß der Zylinderlaufbuchsen zählen der Seitenschub des Pleuellagers, der Druck des Verbrennungsgases auf die Pleuellager, hohe Verbrennungstemperaturen, die abrasive Wirkung von Staub- und Rußpartikeln sowie der Zusammenbruch des Schmierölfilms auf der Pleuellageroberfläche. Um den Verschleiß der Zylinderlaufbuchse abzuschätzen, wurde der Bohrungsdurchmesser an fünf verschiedenen Stellen mit Bohrungsmessgeräten genau gemessen. Ein stiftbasiertes Oberflächenrauheitsprofilometer (Mitutoyo; SJ-301) wurde verwendet, um die Oberflächenrauheitsprofile der Zylinderlaufbuchse an verschiedenen Stellen zu messen. Das Profilometer maß eine Vielzahl von Parametern, nämlich die durchschnittliche Oberflächenrauheit (Ra), den quadratischen Mittelwert der Rauheit (Rq), die höchste Spitzenrauheit (Rp), die Tiefe des tiefsten Tals (Rv), die maximale Höhe des Profils (Ry usw.). Rz, die Gesamthöhe des Profils (Rt) usw. Oberflächenprofile wurden an drei Pleuellagerpositionen gemessen: nahe dem oberen Totpunkt (Ort der Bewegungsumkehr des Pleuellagers), in der Mitte des Pleuellagers und nahe dem unteren Totpunkt

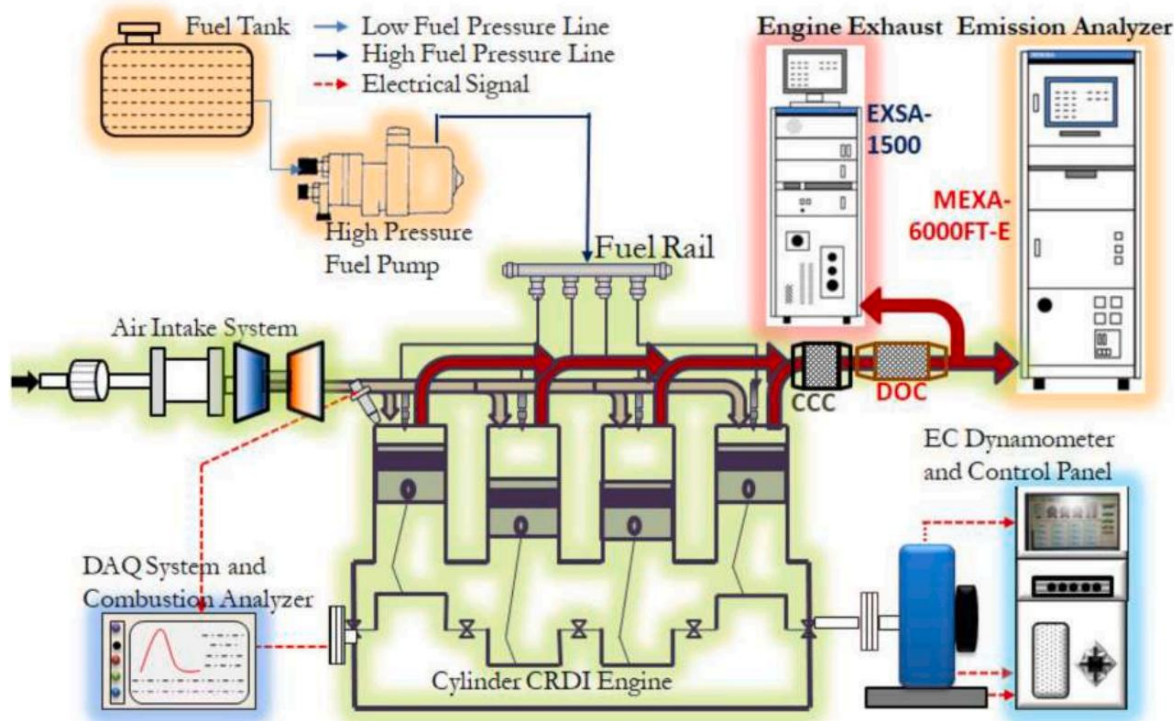


Abb. 1. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Tabelle

2 Belastungszyklus für den Vorlauf.

Motordrehzahl (% der Höchstgeschwindigkeit)	Last (Prozent der Nennlast)	Laufzeit (Minuten)
Leerlauf	0	30
40	30	30
50	30	30
70	40	30
85	40	30
40	50	30
45	60	30
50	60	30
60	60	30
70	60	30
80	60	30
75	60	30
95	60	30
100	80	30
60	80	30
70	80	30
100	100	30
70	100	30
85	100	30
100	100	30

Tabelle

3 Motorbelastungszyklus für den Langzeitdauertest [34].

Motordrehzahl	Last (% Nennlast)	Laufzeit (Minuten)
Maximale Geschwindigkeit	75	50
Maximale Drehmomentgeschwindigkeit	100	45
Leerlauf	Leerlauf	5
Maximale Geschwindigkeit	100	20

Zentrum (BDC). Dies sind aus Verschleißsicht die kritischsten Stellen in der Zylinderlaufbuchse. An allen drei Standorten wurden die Oberflächenprofile sowohl auf der Schub- als auch auf der Gegenschubseite aufgenommen.

Die Schmierölanalyse ist die beste Möglichkeit, den Motorverschleiß zu analysieren, ohne den Motor zu zerlegen. Schmieröle sind eine komplexe Mischung aus einer Vielzahl von Additiven in einem Grundöl, die speziell für eine bestimmte Anwendung entwickelt wurden. Daher wurde eine Charakterisierung der Schmierölproben für beide Phasen durchgeführt. Schwankungen in den Schmieröleigenschaften sind in erster Linie auf Ölverschlechterung oder -alterung, längere mechanische, thermische und umweltbedingte Belastungen sowie Fremdpartikelverunreinigungen durch Staub und Motorverschleiß zurückzuführen. Daher wurden Schmierölproben auf Schwankungen in ihrer Dichte, Viskosität, Aschegehalt, Flammpunkttemperatur, Kupferkorrosion, Oxidationsstabilität, Gesamtaschzahl, Feuchtigkeitsgehalt, Pentan- und Benzolunlöslichkeit, Spurenmetallanalyse usw. analysiert und in beiden Fällen verwendet die Phasen. Vergleichsdaten der beiden Phasen wurden verwendet, um die Wirkung von Biodiesel auf den Verschleiß, die Ablagerungen und die Haltbarkeit des CRDI-SUV-Motors im Vergleich zum mit Mineraldiesel betriebenen CRDI-SUV-Basismotor zu bestimmen.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Kraftstoffeigenschaften von Karanja-Biodiesel und Mineraldiesel wurden experimentell bestimmt und mit den indischen und ASTM-Spezifikationen für Biodiesel verglichen (Tabelle 4) [29,37–41].

Die Ergebnisse dieser Studie werden in den vier Unterabschnitten diskutiert. (i) Kohlenstoffablagerungen auf den wichtigen Motorkomponenten (ii) physischer Verschleiß der beweglichen Komponenten, (iii) Schmieröltribologie und (iv) Materialverträglichkeit von Biodiesel gegenüber mineralischem Basisdiesel.

3.1. Kohlenstoffablagerungen

Bei Verbrennungsmotoren sind mehrere Komponenten im Zylinder während des Langzeitdauertests hohen Temperaturen und mechanischen Belastungen ausgesetzt [42]. Rußablagerungen auf diesen Bauteilen entstehen durch thermischen und oxidativen Abbau von Schmierstoffen sowie durch Pyrolyse/unvollständige Kraftstoffverbrennung. Abb. 3 zeigt die Kohlenstoffablagerungen am Kolbenboden mineralischer Diesel- und KB20-betriebener Motoren nach Abschluss des Dauertests über 274 Stunden.

Abb. 4 zeigt, dass die Kohlenstoffablagerungen auf den Kolbenböden des

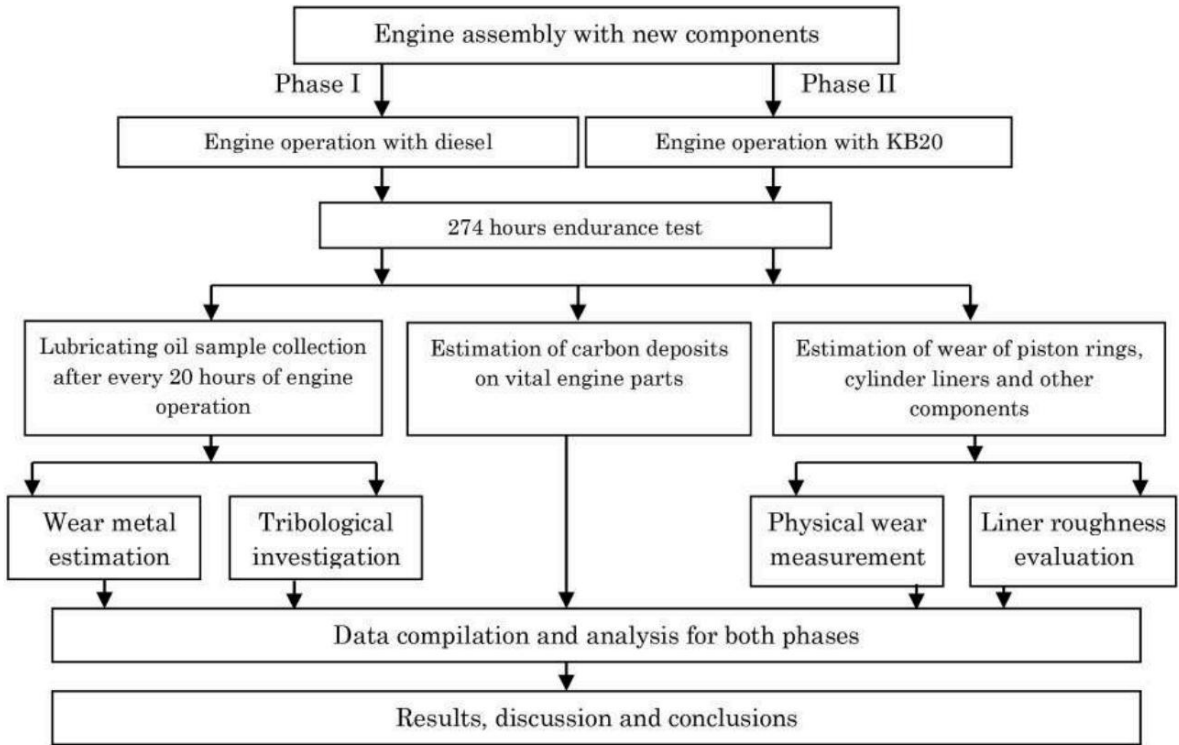


Abb. 2. Flussdiagramm des Dauertests.

Tabelle

4 Wichtige Testkraftstoffeigenschaften und Biodieselspezifikationen.

Eigentum	IS 15607(2005) Biodiesel-Spezifikationen	ASTM 6571 Biodiesel-Spezifikationen	Karanja Biodiesel	Mineralischer Diesel	KB20
Dichte (g/cm3) bei 30 °C	0,86–0,90	0,8–0,9	0,887	0,822	0,835
Kinematische Viskosität (cSt) bei 40 °C	2,5–6,0	1,9–6,0	5,79	2,71	3,31
Flammpunkttemperatur (°C) (min.)	120	130	168	49,5	–
Aschegehalt (%) (max.)	–	0,02	0,008	<0,005	–
Feuchtigkeitsgehalt (ppm) (max.)	500	500	<200	<200	<200
Brennwert (MJ/kg)	–	–	40,36	43,06	42,52
Kupferkorrosivität	Klasse 1	3a	1a	1a	1a
Oxidationsstabilität (h)	6,0	–	5,25	0,97	2,27

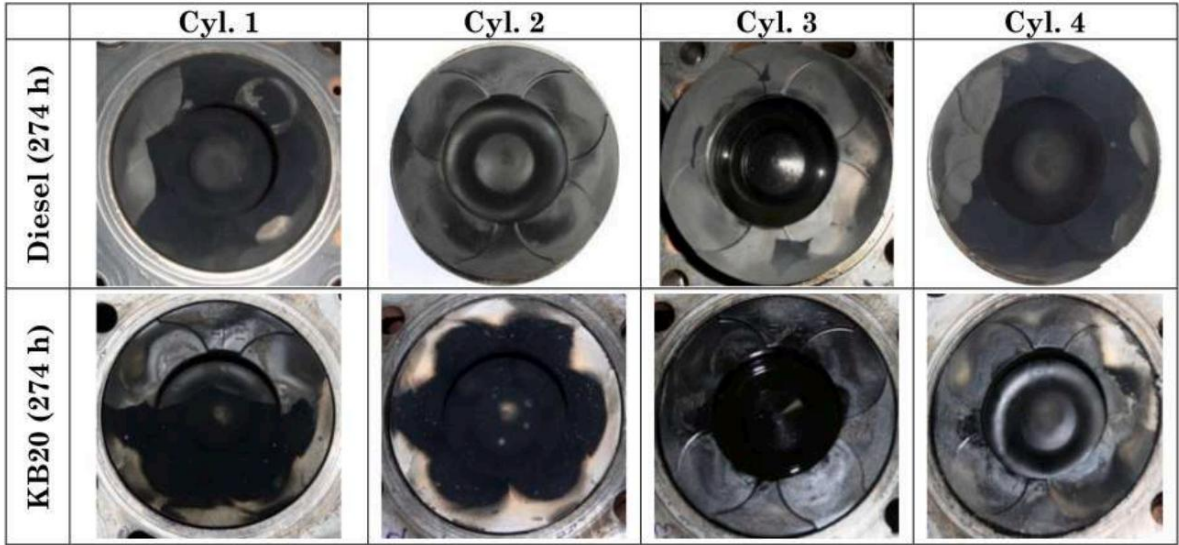


Abb. 3. Kohlenstoffablagerungen auf den Kolbenböden von mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren.

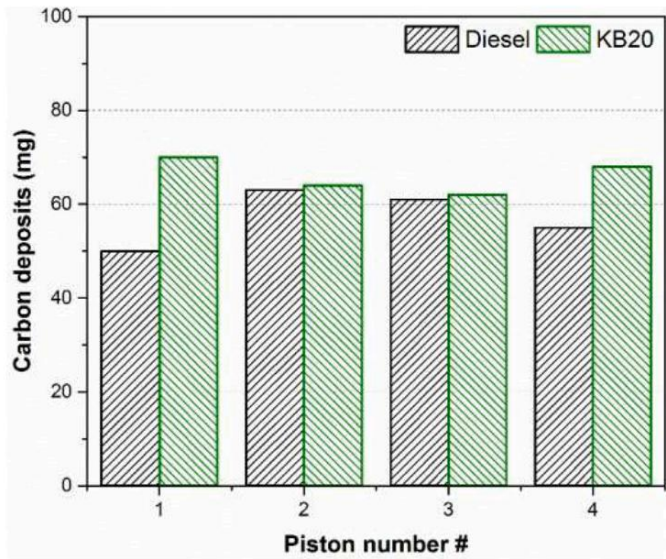


Abb. 4. Kohlenstoffablagerungen auf den Kolben von KB20- und Dieselmotoren.

KB20-Motoren waren dicker. Weiße Flecken auf diesen Kolben weisen auf eine höhere lokale thermische Belastung hin, der die Kolben des KB20-Motors ausgesetzt sind. Die Quantifizierung der Kohlenstoffablagerungen erfolgte durch sorgfältiges Entfernen und Wiegen dieser Ablagerungen vom Kolbenboden, wie in Abb. 4 dargestellt.

An den Kolben des mit KB20 betriebenen Motors wurde eine größere Masse kohlenstoffhaltiger Ablagerungen festgestellt. Dies ist möglicherweise auf höhere Kohlenstoffrückstände und eine geringere Flüchtigkeit von Biodiesel zurückzuführen. Da Biodiesel eine geringere Flüchtigkeit aufweist, setzt er in der späten Verbrennungsphase mehr Wärme frei, sodass weniger Zeit für die Rußoxidation im Zylinder bleibt. Dies führt dazu, dass unverbrannte/pyrolysierte Rußverbindungen an den Wänden der Brennkammer kondensieren und so die Kohlenstoffablagerungen erhöhen. Agarwal und Dhar [42] berichteten auch über eine höhere Ansammlung von Kohlenstoffablagerungen auf den Kolbenböden des mit Biodiesel betriebenen Motors. Abb. 5 zeigt die Kohlenstoffablagerungen am Zylinderkopf in den Studien Phase 1 (mineralischer Diesel) und Phase 2 (KB20).

Die Kohlenstoffablagerungen auf dem Zylinderkopf (Abb. 5) waren bei mineralischem Diesel relativ dünn, was mit den Beobachtungen bei Kolbenbodenablagerungen (Abb. 4) übereinstimmt. Auf den Auslassventilen des Motors sind große weiße Flecken sichtbar. Diese Markierungen sind auf höhere Thermik zurückzuführen

Belastungen dieser Ventile, was auf örtlich höhere Temperaturen beim Biodieselbetrieb hindeutet. Abb. 6 zeigt die Bilder für die Injektorablagerungen. Für den 274-stündigen Betrieb des KB20-Motors wurden zwei Einspritzdüsenätze verwendet. Der erste Satz Einspritzdüsen wurde nach 132 Stunden Motorbetrieb aufgrund starker schwarzer Rauchentwicklung aus dem Motor ausgetauscht. Der zweite Satz Einspritzdüsen beendete den verbleibenden Dauertest des Motors.

An den Einspritzdüsen des mit KB20 betriebenen Motors wurden vergleichsweise höhere Kohlenstoffablagerungen beobachtet als beim Basismotor mit Mineraldiesel. Diese Beobachtung war für alle vier Injektoren konsistent (Abb. 6). Höhere Kohlenstoffrückstände und eine geringere Flüchtigkeit von Karanja-Biodiesel waren die Gründe für höhere Kohlenstoffablagerungen auf mit KB20 betriebenen Motorkomponenten [43].

In einer ähnlichen Studie haben Fraer et al. [44] berichteten über starke Schlammabildung in mit B20 betriebenen Motoren (8 Stück) nach 600.000 Meilen Fahrzeugbetrieb. Laut Birgel et al. können das Vorhandensein von Zinkspuren im Kraftstoff, die Gestaltung der Einspritzdüsenlöcher und restliche Kraftstoffspuren in der Düsenöffnung am Ende der Einspritzung die Faktoren sein, die für beschleunigte Einspritzdüsenablagerungen verantwortlich sind. [45]. Andererseits zeigten einige andere Studien, dass mit Biodiesel und Biodieselmischungen betriebene Motoren möglicherweise geringere/ähnliche Kohlenstoffablagerungen aufweisen [7,8,13,46]. Sinha und Agarwal [47] berichteten auch, dass ein mittelschwerer DIC-Transportmotor mit B20 geringere Kohlenstoffablagerungen auf den Zylinderkomponenten (Reiskleieöl-Methylester-Mischung) aufwies als ein Transportmotor mit Direkteinspritzung und mechanischer Kraftstoffeinspritzung (FIE).). Mechanische und thermische Belastungen, Kohlenstoffablagerungen und die chemische Reaktivität des Testkraftstoffs waren die Hauptursachen für den Verschleiß von FIE-Komponenten [48].

3.2. Motorverschleiß

Der Verschleiß beweglicher Oberflächen von Motorkomponenten, die in physischem Kontakt stehen, wurde durch Relativbewegung verursacht. Mineralischer Diesel wurde als Testkraftstoff verwendet, um grundlegende Verschleißdaten zur Bewertung der Auswirkungen von KB20 auf den Motorverschleiß während des Dauertests zu generieren. Anschließend wurde der Motor mit KB20 unter identischen Last-/Drehzahlbedingungen betrieben, sodass der Einfluss der Biodieselmischung auf den Verschleiß der Motorkomponenten mit mineralischem Basisdiesel verglichen werden konnte. Der Verschleiß wurde durch (i) genaue Messungen der physikalischen Abmessungen verschiedener kritischer beweglicher Komponenten im Zylinder und (ii) der Oberflächenprofile der Zylinderlaufbuchsen vor und nach jeder Phase des Haltbarkeitstests mit mineralischem Diesel und KB20 beurteilt.

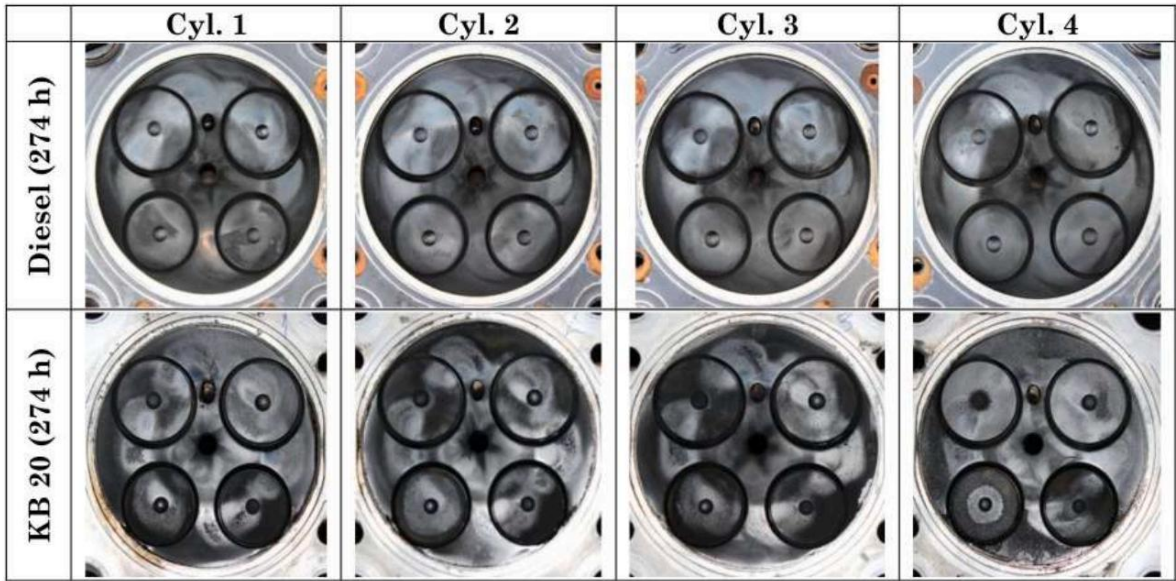


Abb. 5. Kohlenstoffablagerungen am Zylinderkopf von KB20- und Dieselmotoren.



Abb. 6. Kohlenstoffablagerungen an den Einspritzdüsen von KB20- und Dieselmotoren.

3.2.1. Physischer

Verschleiß Die physikalischen Abmessungen dieser Komponenten wurden gemäß IS: 10000 Teil V, 1980 [35] präzise gemessen. Die Beobachtungen zu relativen Verschleißverläufen beim Motorbetrieb mit den beiden Testkraftstoffen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Für beide Phasen des Dauertests wurde der Verschleiß der Einlass- und Auslassventilsitze durch Messung ihres Abstands von der Ventilflanschfläche mit einer Präzisionsmessuhr vor und nach dem Dauertest gemessen. Der Verschleiß der Einlass- und Auslassventile verringerte sich beim mit KB20 betriebenen Motor um 52,5 bzw. 33,1 % im Vergleich zum Basismotor mit Mineraldiesel. Dies war auf die überlegenen Schmiereigenschaften von Biodiesel zurückzuführen. Beim KB20 mit Kraftstoff wurde ein geringerer Verschleiß der Einlassventile beobachtet

Motor. Niedrigere Abgastemperaturen bei höheren Geschwindigkeiten und Lasten führten beim mit KB20 betriebenen Motor zu einem geringeren Verschleiß der Auslassventile als beim mit Mineraldiesel betriebenen Basismotor. Fazal et al. [5] berichteten auch über einen ähnlichen Trend eines geringeren Verschleißes von Motorkomponenten, die mit Biodiesel betrieben werden, als beim Basismotor mit Mineraldiesel. Beim Vergleich wichtiger beweglicher Teile wie Kolben, Ringe, Kolbenbolzen, Laufbuchsenbohrung, Pleuellager und Pleuellager sowie der Hauptlager des KB20-Motors mit dem mit Mineraldiesel betriebenen Basismotor: Es wurde festgestellt, dass der Verschleiß beim KB20-Motor relativ höher war. Die Verdünnung des Schmieröls durch Kraftstoff könnte zu einem erhöhten Verschleiß dieser Komponenten geführt haben. Dies deutet auf die Wahrscheinlichkeit einer Schädigung durch KB20 hin

des Schmieröls, im Einklang mit der tribologischen Charakterisierung gebrauchter Schmierölproben, die regelmäßig aus dem Ölsumpf entnommen werden.

3.2.2. Gewichtsverlust der

Kolbenringe Der Gewichtsverlust der Kolbenringe nach Abschluss beider Phasen des Dauertests wurde zur Beurteilung des relativen Kolbenringverschleißes (Abb. 7) und der Auswirkung von Biodiesel auf den relativen Kolbenringverschleiß herangezogen.

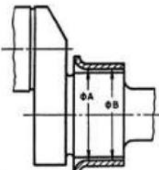
Die Kolbenringe des KB20-betriebenen Motors verloren durchweg mehr Gewicht als die des Basis-Dieselmotors. Der höchste Gewichtsverlust wurde bei den zweiten Verdichtungsringen beobachtet, der niedrigste bei den Ölringen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte eine relativ schlechtere Verbrennung, eine höhere Spitzentemperatur im Zylinder und eine höhere Rußbildung bei mit Biodiesel betriebenen CRDI-Motoren sein. Wenn Spuren von Glycerin in Biodiesel vorhanden wären, könnte dies zu Kraftstoffabscheidung, Verstopfung des Kraftstofffilters, Problemen mit der Materialverträglichkeit, Ablagerungen im Motor und Problemen mit der Haltbarkeit des Motors führen [49]. Kaul et al. [12] berichteten, dass Biodiesel aus salvadorianischen Ölen (Pilu) und *Jatropha curcas* stärker korrosiv auf die Kolbenringe und die Laufbuchse wirkten. Allerdings berichteten einige Forscher in der Literaturübersicht über einen geringeren Verschleiß bei mit Biodiesel betriebenen Motoren als bei mit Mineralöl betriebenen Basismotoren [3,8]. Dabei handelte es sich jedoch um DICl-Motoren und nicht um CRDI-Motoren.

Tabelle

5 Vergleich des physischen Verschleißes wichtiger Motorkomponenten von KB20- und Dieselmotoren.

Dimension der Komponente	Prozentualer Unterschied im Verschleiß jeder Komponente vom mit KB20 betriebenen Motor im Vergleich zum Basismotor mit Mineraldiesel (D: niedriger; IN: höher)
Abstand des Einlassventilkopfes vom Montageflanschfläche	52,52 (D)
Abstand des Auslassventilkopfes von der Montageflanschfläche	33,13 (D)
Liner-Bohrung	50,75 (IN)
Kolbendurchmesser	177,5 (IN)
Kolbenringe	211,88 (IN)
Kolbenbolzen, Bolzenbohrung, kleine Endbuchse der Pleuellstange	22,76 (IN)
Kurbelzapfen	12,21 (D)
Durchmesser der Pleuellagerbohrung	146,88 (Zoll)
Durchmesser der Hauptlagerbohrung	45,45 (IN)

Tabelle 5 (Fortsetzung)

Dimension der Komponente	Prozentualer Unterschied im Verschleiß jeder Komponente vom mit KB20 betriebenen Motor im Vergleich zum Basismotor mit Mineraldiesel (D: niedriger; IN: höher)
	

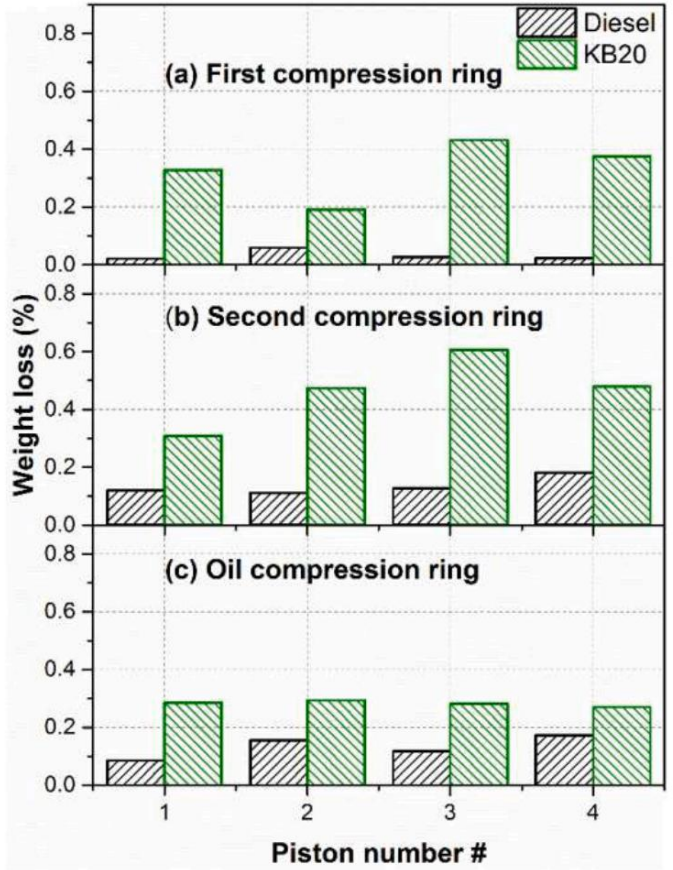


Abb. 7. Vergleich des Gewichtsverlusts der Kolbenringe von KB20- und Dieselmotoren aufgrund von Verschleiß für (a) ersten Kompressionsring, (b) zweiten Kompressionsring und (c) Öling.

3.2.3. Liner-Verschleiß

Das Scannen der Laufbuchse auf Oberflächenrauheitsprofile wurde für alle Zylinder auf der Druck- und Gegenschubseite durchgeführt, um einen qualitativen Vergleich des Laufbuchsenverschleißes zu beurteilen. Die Scanpositionen lagen in der Nähe der oberen Totpunkt-, Mittelhub- und BDC-Positionen, wie in Abb. 8 dargestellt. In beiden Phasen wurden Oberflächenprofile vor und nach dem Dauertest an denselben Stellen bewertet. Da die Laufbuchse des Testmotors fest mit dem Zylinderblock verbunden ist und nicht entfernt werden kann; Daher wurden beide Tests auf demselben Liner durchgeführt. Der Pleuelschaft berührt die Laufbuchsenoberfläche während des Ansaughubs auf der Druckseite und während der verbleibenden drei Hübe auf der Gegendruckseite.

Der Ra- Wert bezeichnet den arithmetischen Mittelwert des Rauheitsprofils, während der Rq- Wert den quadratischen Mittelwert über die gesamte Auswertungslänge des Rauheitsprofils bezeichnet. Für mineralischen Diesel und Biodiesel sind die Ra- und Rq- Werte in Tabelle 6 und die entsprechenden Tragflächenkurven für Liner 1 in Tabelle 7 aufgeführt. Die Abweichungen in

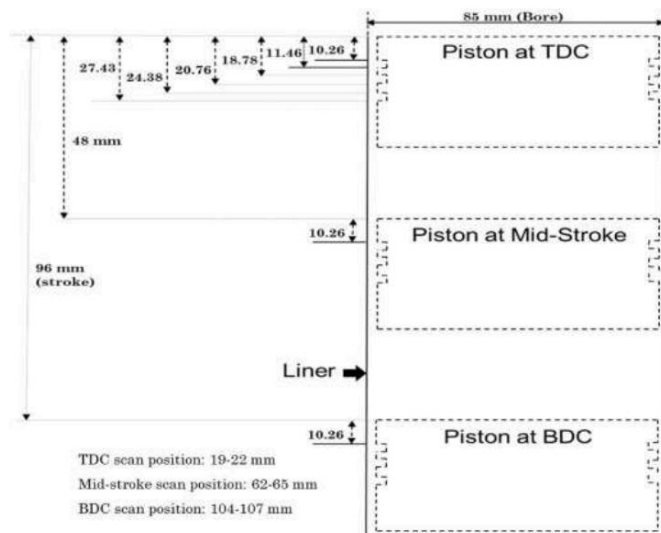


Abb. 8. Scanpositionen für die Oberflächenrauheit nahe dem oberen Totpunkt, der Mitte des Hubs und dem oberen Totpunkt.

Zur qualitativen Abschätzung des Verschleißes wurden die Oberflächenrauheitsprofile vor und nach dem Haltbarkeitstest herangezogen.

Die Antischubseite der Laufbuchse erfährt während drei der vier Takte eines Motorzyklus einen höheren Verschleiß, einschließlich der Leistungs- und Kompressionshübe, die höheren Druck und Temperatur aufweisen. Daher war mit einem höheren Verschleiß auf der Antischubseite des Liners zu rechnen. Auch andere Forscher berichteten über einen höheren Verschleiß der Zylinderlaufbuchse auf der Gegendruckseite als auf der Druckseite [3,47,50]. Diese Muster wurden mit der Kolbenbewegung und der Kolbenneigung korreliert, während sich der Kolben während verschiedener Hübe bewegt. Es wurde berichtet, dass während der vier Hübe des Kolbens der Hauptkontakt während der Kompressions-, Expansions- und Auslasshübe auf der Gegenschubseite liegt. Der Kontakt auf der Schubseite erfolgt nur während des Ansaugtakts, wenn Zylinderdruck und -temperatur vergleichsweise niedriger sind [3,47,50], was zu einem relativ geringeren Verschleiß führt. An allen Standorten kam es bei den mit Mineraldiesel und mit KB20 betriebenen Motorauskleidungen zu gleichem Verschleiß. Die Tragflächenkurve (BAC) ist ein nützlicher Parameter zur Beschreibung, wie sich das Oberflächenprofil der Auskleidung im Laufe der Zeit abnutzt. Beim Schneiden des Materials in einer bestimmten Höhe spiegeln die Tragflächenkurven den Materialanteil des Profils als Funktion der Scheibendicke wider [51,52]. Die Lagerflächenkurve wird nach erheblichem Verschleiß der Laufbuchsenoberfläche flacher, was auf die Beseitigung von Oberflächenrauheitsspitzen, z. B. bei einer gehonten Oberfläche, hinweist. Die Formen der BACs zeigen, dass sich KB20- und mit Mineraldiesel betriebene Auskleidungen ähnlich abnutzen und es kaum einen erkennbaren Unterschied in den Auskleidungsverbleibsmustern der beiden Phasen gab.

3.3. Schmieröltribologie

Es wurden verschiedene Analysen von Schmierölproben durchgeführt, um die Wirkung von KB20 und mineralischem Basisdiesel auf die Schmierölverschlechterung in einem unmodifizierten CRDI-SUV-Motor zu bestimmen. Hierbei handelt es sich um eine indirekte Methode zur Verschleißbeurteilung der Motorkomponenten, die sich auf grobe Schuldzuweisungen beschränkt. Abb. 9 zeigt die Dichte- und Viskositätsunterschiede von Schmierölproben, die in 20-Stunden-Intervallen aus den Ölsümpfen von mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren entnommen wurden.

3.3.1. Dichte

Die Dichte des Schmieröls wird durch die Zugabe von Verschleißpartikeln, Umgebungsstaub, Verdünnung durch Kraftstoff und Feuchtigkeit während des Motorbetriebs beeinflusst. Die Dichte der Ölproben beider Motoren nahm mit der Nutzung zu (Abb. 9). Der erste 20-Stunden-Betrieb des Motors zeigte einen schnelleren Anstieg der Dichte des Schmieröls. Die Dichte stieg beim KB20-Motor schneller an als beim Vergleichsmotor mit Dieselantrieb (Abb. 9). Durch die Kraftstoffverdünnung verringerte sich die Dichte des Schmieröls

da die Dichte der Testkraftstoffe geringer war als die von frischem Schmieröl. Die Viskosität, Dichte und Oberflächenspannung des Testkraftstoffs beeinflussen die Größenverteilung der Sprühtropfen. Größere Sprühtropfen von KB20 führten bei der Verwendung zu einer stärkeren Kraftstoffverdünnung des Schmieröls [49,53]. Schmieröl polymerisiert aufgrund thermischer Belastungen in Gegenwart von Feuchtigkeit und erhöht seine Dichte mit der Nutzung. Die Hinzufügung von Abrieb, die Ansammlung von Umgebungsstaub, die Polymerisation des Schmieröls und die Hinzufügung von Feuchtigkeit erhöhen die Dichte des Schmieröls, wohingegen die Kraftstoffverdünnung sie verringert. Infolgedessen liefern Trends bei Dichteschwankungen allein nur sehr umfassende Einblicke in den Verschleiß, aber keine definitiven Informationen über die vergleichende Auswirkung von KB20 auf die Gesundheit von Schmieröl bei Verwendung im Vergleich zu mineralischem Basisdiesel.

3.3.2. Viskosität

Die Dicke des Schmierölfilms wird durch eine unzureichende Viskosität beeinflusst, was zu übermäßigem Verschleiß der Gegenteile und Lager führt [54]. Abb. 9(b und c) zeigt die Viskosität von Schmierölproben von KB20- und Basismotoren mit Mineraldiesel, gemessen bei 40 °C bzw. 100 °C. Nachdem die Schmierölproben durch einen 75-µm-Filter gefiltert wurden, um suspendierte Verunreinigungen und Verschleißrückstände zu entfernen, wurden die kinematischen Viskositäten bei zwei Temperaturen bestimmt. Die Viskosität der Schmierölproben nahm mit der Verwendung beider Testkraftstoffe zu. Während des gesamten Testzeitraums war der relative Viskositätsanstieg bei den Schmierölproben, die aus mit Mineraldiesel betriebenen Motoren entnommen wurden, geringer als bei den mit KB20 betriebenen Motoren, wie in Abb. 9(b und c) dargestellt. Die Viskosität von Schmieröl steigt aufgrund von Oxidation oder Polymerisation, während sie aufgrund der Kraftstoffverdünnung abnimmt. Das Muster der Viskositätsschwankung mit der Verwendung deutet auf einen höheren Polymerisationsgrad und eine höhere Anlagerung von Verschleißrückständen im Schmieröl des mit KB20 betriebenen Motors hin, was zu einem schnelleren Viskositätsanstieg aufgrund der „kraftstoffinduzierten Oxidation“ des Schmierölgrundmaterials führt. Ein Motor, der mit einem viskoserem Schmiermittel betrieben wird, benötigt aufgrund der erhöhten Grenzflächenreibung in den Passflächen des Motors mehr Energie, um die gleiche Bremsleistung zu erzeugen. Diese zusätzliche Energie wird verwendet, um den viskosen Widerstand zu überwinden, wodurch der BSFC erhöht und der BTE für den mit KB20 betriebenen Motor im Vergleich zum mit Mineraldiesel betriebenen Basismotor verringert wird [55,56].

3.3.3. Aschegehalt

Kohlenstoffhaltige Materialien wie Schmieröl, Ruß, Benzin und nichtmetallische Anteile der organometallischen Additive werden nach der thermischen Zersetzung schließlich zu CO₂; Daher repräsentiert der Aschegehalt in den Schmierölproben nur die nicht kohlenstoffhaltigen Materialien, die im Schmieröl vorhanden sind. Die Unterschiede im Aschegehalt der Schmierölproben, die den mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren entnommen wurden, sind in Abb. 10 dargestellt.

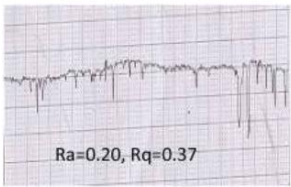
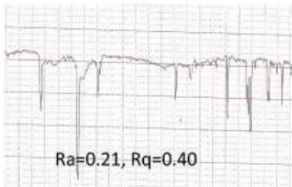
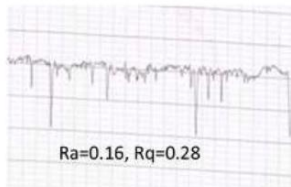
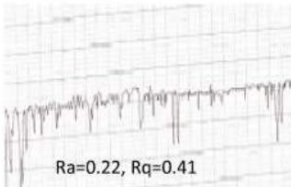
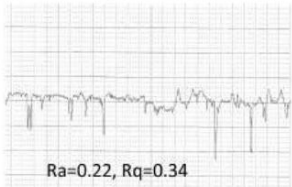
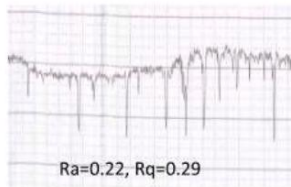
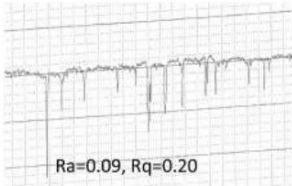
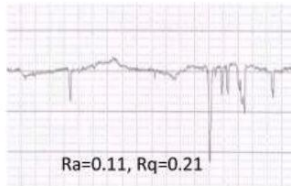
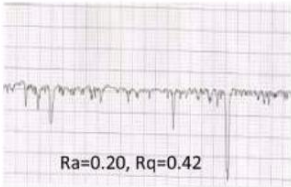
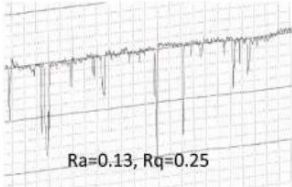
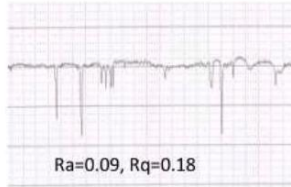
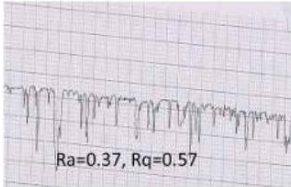
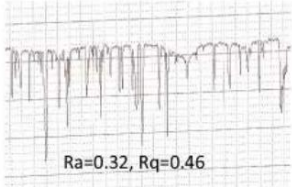
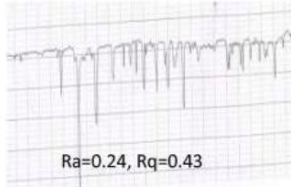
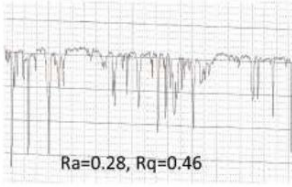
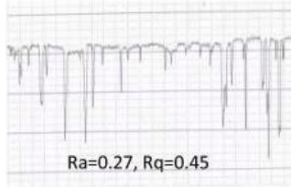
Änderungen im Aschegehalt der Schmieröle bei der Verwendung lassen auf die Hinzufügung von metallischen Abriebpartikeln und Fremdpartikeln wie Umgebungsstaub schließen. Der etwas höhere Aschegehalt der Schmierölproben, die aus dem mit KB20 betriebenen Motor entnommen wurden als aus dem mit Mineraldiesel betriebenen Motor, weist auf einen relativ höheren metallischen Verschleißrückstand im mit KB20 betriebenen Motor hin. Diese Schlussfolgerung muss jedoch durch die Verwendung der optischen Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) überprüft werden, um Spurenkonzentrationen von Verschleißmetallen in den Schmierölproben zu quantifizieren, was in einem späteren Abschnitt erörtert wird.

3.3.4. Gesamtbasiszahl

Die Gesamtbasiszahl (TBN) misst die Reservealkalität des Schmieröls, die seine Fähigkeit angibt, den Auswirkungen korrosiver Säuren zu widerstehen, die während des Motorbetriebs entstehen. Ein positiver TBN-Wert weist auf das Fehlen starker freier Säuren im Schmieröl hin. Abb. 10 zeigt die Veränderungen der TBN der Schmierölproben, die aus mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren entnommen wurden, im Laufe der Nutzung. Die TBN nahm mit der Verwendung der Schmieröle ab, die sowohl aus Mineraldiesel- als auch aus KB20-Motoren stammen. Allerdings war die TBN-Reduktion in den Schmierölproben, die dem KB20-Motor bei Nutzung entnommen wurden, geringfügig schneller als bei dem mit mineralischem Diesel betriebenen Motor, was auf einen schnelleren Alkalitätsverlust beim KB20-Motor hindeutet. Es scheint, dass Korrosionsinhibitoren (Additive)

Tabelle

6 Oberflächenrauheitsprofile von Liner 1 von Diesel- und KB20-Motoren auf der Schub- (T) und Anti-Schub-Seite (AT).

	Diesel (vor dem Dauertest)	Diesel (nach dem Dauertest)	KB20 (Nach dem Dauertest)
OT, AT	 Ra=0.20, Rq=0.37	 Ra=0.21, Rq=0.40	 Ra=0.16, Rq=0.28
TDC, T	 Ra=0.22, Rq=0.41	 Ra=0.22, Rq=0.34	 Ra=0.22, Rq=0.29
MITTE, AT	 Ra=0.24, Rq=0.40	 Ra=0.09, Rq=0.20	 Ra=0.11, Rq=0.21
MID, T	 Ra=0.20, Rq=0.42	 Ra=0.13, Rq=0.25	 Ra=0.09, Rq=0.18
BDC, AT	 Ra=0.37, Rq=0.57	 Ra=0.32, Rq=0.46	 Ra=0.24, Rq=0.43
BDC, T	 Ra=0.28, Rq=0.49	 Ra=0.28, Rq=0.46	 Ra=0.27, Rq=0.45

Aufgrund ihrer Wechselwirkung mit Biodiesel, der über Kraftstoffverdünnung/ Kurbelgehäuse-Blowby in den Schmierölsumpf gelangt, erschöpfen sie sich im KB20-betriebenen Motor relativ schneller.

3.3.5. Flammpunktemperatur

Schmierölmoleküle erfahren beim Erhitzen Van-der-Waals-Kräfte. Eine Kraftstoffverdünnung des Schmieröls ist unerwünscht, da dadurch die Van-der-Waals-Kräfte reduziert und die Flammpunktemperatur gesenkt wird [54]. Die Flammpunktemperaturen der Schmierölproben, die aus mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren entnommen wurden, sind in Abb. 10 dargestellt. Bei beiden Testkraftstoffen sank die Flammpunktemperatur der Schmierölproben mit der Verwendung. Im Vergleich zum Basismotor mit Mineraldiesel wurde bei mit KB20 betriebenen Motoren eine relativ geringere Senkung der Flammpunktemperatur beobachtet, was auf die Möglichkeit einer Kraftstoffverdünnung des Schmieröls schließen lässt. Aufgrund der niedrigeren Flammpunktemperatur von Mineraldiesel (49,5 °C) im Vergleich zu Karanja-Biodiesel (168 °C) ist trotz höherer Verdünnung eine geringere Absenkung der Flammpunktemperatur des Schmieröls aus dem mit KB20 betriebenen Motor möglich.

3.3.6. Feuchtigkeit

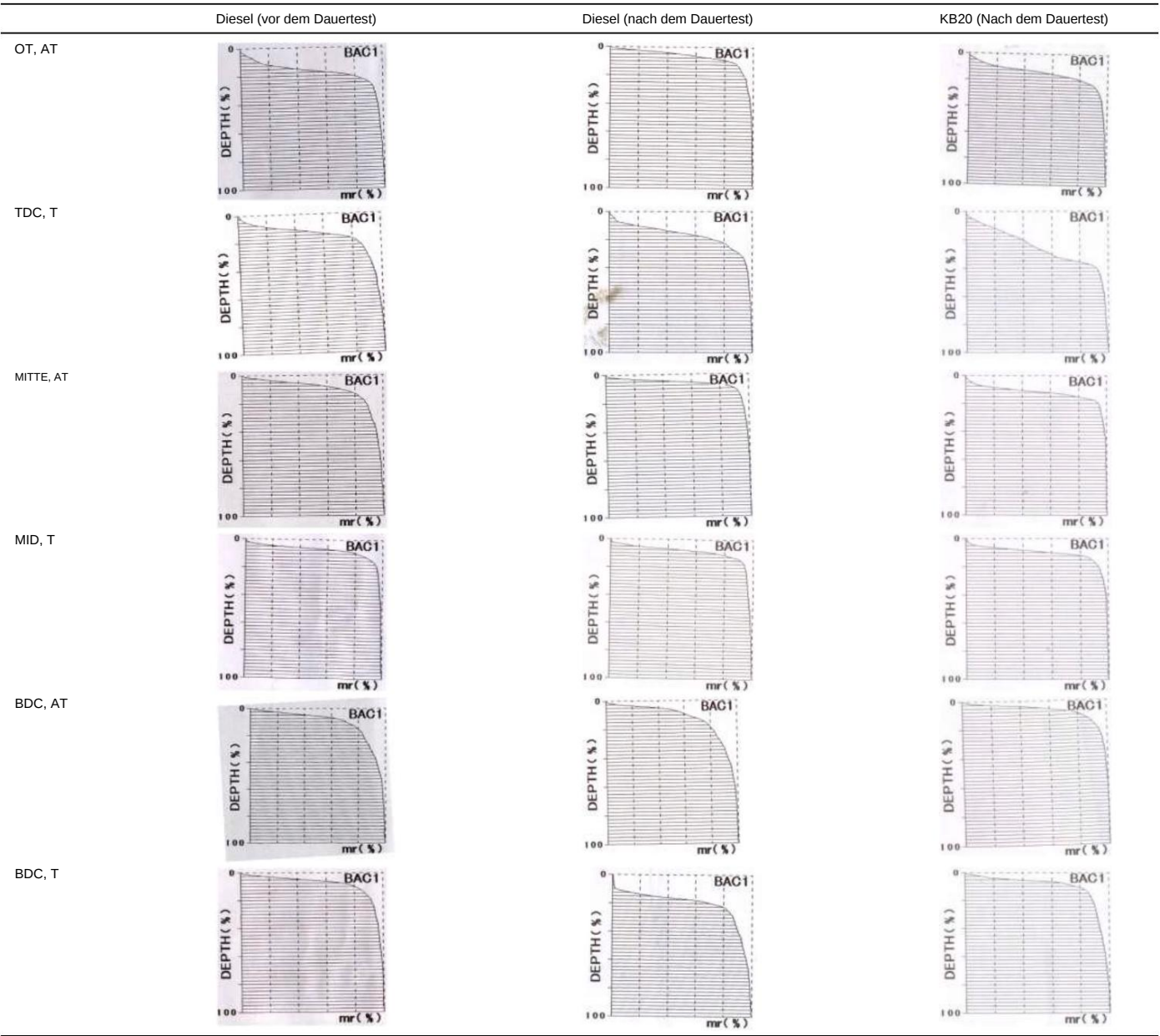
Ein höherer Feuchtigkeitsgehalt im Schmieröl fördert die Oxidation des Schmierölgrundstoffs, was zum „Drop-out von Additiven“ führt, dh zur Ausfällung von Additiven aus dem Schmiermittel. Feuchtigkeitsspuren begünstigen die Rostbildung und Korrosion verschiedener Metalloberflächen, was den Motorverschleiß erhöht. Feuchtigkeitsquellen im Schmieröl sind typischerweise Blow-by-Gas, Kühlmittel leaks usw. Aufgrund einer ordnungsgemäß abgedichteten Schnittstelle zwischen Kolbenring und Lauffachse kommt es zu einem geringeren Motor-Blow-by, was dazu führt, dass weniger Feuchtigkeit im Schmieröl im Kurbelgehäuse des Motors kondensiert. Die Feuchtigkeitsgehaltsunterschiede in Schmierölproben, die aus mit Mineraldiesel und KB20-betriebenen Motoren entnommen wurden, lagen unter 200 ppm, was der niedrigsten Nachweisgrenze des in diesen Untersuchungen verwendeten Instruments entsprach. Daher konnten aus diesem Test keine eindeutigen Schlussfolgerungen gezogen werden.

3.3.7. Kupferkorrosion

Ein Kupferkorrosionsbad und eine ASTM-Standardplatte für Kupferkorrosion wurden verwendet, um die Korrosivität des Schmieröls gegenüber den kupferhaltigen Motorkomponenten zu überprüfen. Frisches Schmieröl passend

Tabelle

7 Oberflächenlagerflächenkurven für Liner 1 von Diesel- und KB20-Motoren auf der Schub- und Gegenschubseite.



die Güteklasse „1a“ in der ASTM-Standardplatte, hellorange und identisch mit einem frisch polierten Kupferstreifen. Selbst nach 100 Betriebsstunden wurde die Kupferkorrosivität aller Schmierölproben beider Motoren mit „1a“ bewertet. Daraus kann geschlossen werden, dass der Kraftstoff KB20 keine zusätzlichen Schäden an den kupferhaltigen Bauteilen des Motors verursacht hat. Richard und McTavish [57] kamen zu dem Schluss, dass der Zusatz von FAME (Biodiesel) die Korrosionsneigung von Dieselmotorenölen aufgrund der Doppelbindungen im FAME verringert. Die Korrosionseffizienz von Schmierstoffproben wurde mithilfe des Hochtemperatur-Korrosionsprüfstandtests (HTCBT) (ASTM D6594) gemessen, sowohl mit als auch ohne Einbeziehung von Biodiesel in ihre Untersuchungen [57].

3.3.8. Pentan und Toluol unlöslich

Pentan und Toluol sind ebenfalls organische Lösungsmittel mit unterschiedlichen Molekülstrukturen; Daher haben sie unterschiedliche bevorzugte Löslichkeiten verschiedener Produkte. Pentan ist ein aliphatischer Kohlenwasserstoff, der die Schmieröle nur auflöst, und die harzigen Verbindungen, die normalerweise im Schmieröl löslich sind, werden als unlöslich von Pentan

Pentan. Schlamm, der bei der Schmieröloxidation entsteht, metallischer Abrieb, kohlenstoffhaltiger Ruß und in die Umwelt gelangende Fremdpartikel sind in Pentan unlöslich. Andererseits ist Toluol ein aromatisches organisches Lösungsmittel, das sogar die harzigen Materialien lösen kann, die durch Polymerisation im Schmieröl entstehen. Daher haben in Toluol unlösliche Stoffe eine geringere Masse als die in Pentan unlöslichen Stoffe. Daher zeigt der Unterschied zwischen Pentan- und Toluol-Unlöslichkeit das Ausmaß der Polymerisation des Schmieröl-Grundmaterials an. ASTD D893 wurde verwendet, um die Menge an Pentan und Toluol zu bestimmen, die in den Schmierölproben von mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren unlöslich war. Die Unterschiede in der Pentan- und Toluol-Unlöslichkeit in den Schmierölproben je nach Verwendung sind in Abb. 11 dargestellt.

Schmierölproben, die aus dem mit KB20 betriebenen Motor entnommen wurden, wiesen höhere Konzentrationen an unlöslichem Pentan auf. Da Biodiesel Sauerstoff in seiner Molekülstruktur enthält, ist Schmieröl aus mit Biodiesel betriebenen Motoren anfälliger für Oxidation. In der Literatur wird berichtet, dass Biodiesel in Gegenwart von Sonnenlicht und Feuchtigkeit zur Oxidation neigt [58–60], und dies könnte auch die Oxidation von Schmieröl beschleunigen

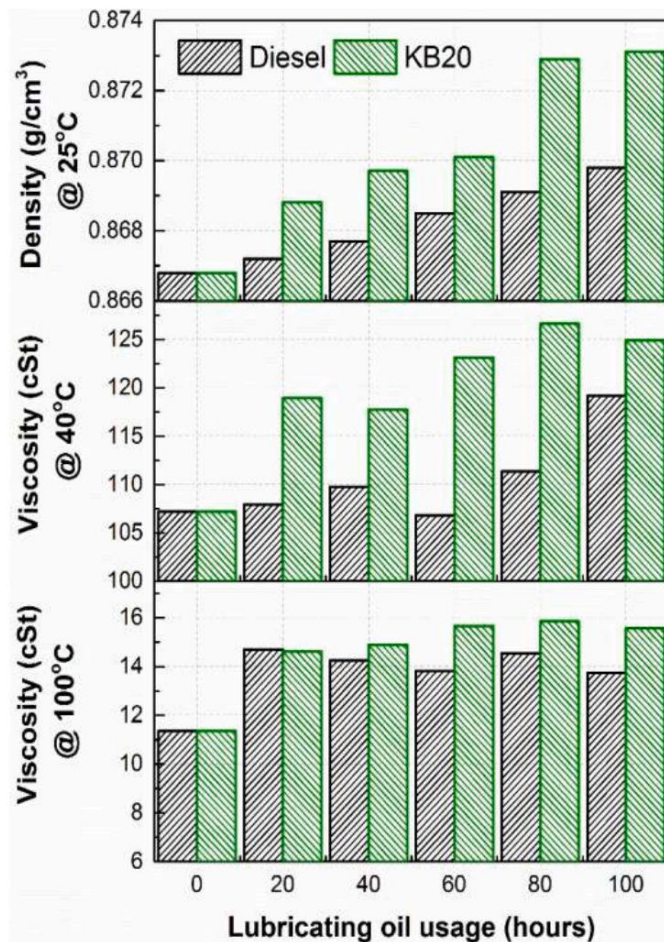


Abb. 9. (a) Dichte bei 25 °C, (b) Viskosität bei 40 °C und (c) Viskosität bei 100 °C der Schmierölproben, die aus KB20- und Dieselmotoren entnommen wurden.

Basislager. Nach Anwar und Garforth [61] ist die Oxidationsstabilität die Zeit, die der Kraftstoff benötigt, um durch Luftsauerstoff vollständig oxidiert zu werden.

Bei der Oxidation von Biodiesel entstehen unerwünschte Nebenprodukte, die die Motorkomponenten gefährden. Die Toluol-Unlöslichkeit der Schmierölproben, die aus dem mit KB20 betriebenen Motor entnommen wurden, war ebenfalls höher als bei dem mit mineralischem Diesel betriebenen Ausgangsmotor. Aufgrund der Einbringung von Karanja-Biodiesel in das Schmieröl über die Kraftstoffverdünnung nahm die Oxidation des Schmierölgrundmaterials zu, wodurch sich in den Schmierölproben des mit KB20 betriebenen Motors eine höhere Menge an harzigem Polymermaterial bildete.

3.3.9. Tragen Sie Metalle

Metallische Abriebrückstände, die durch Komponentenverschleiß entstehen, werden in jedem Dieselmotor vom Schmieröl weggespült. Mit der Zeit sammeln sie sich im Schmierölsumpf an. Informationen über die Verschleißrate der Komponenten, die Herkunft von Spurenmetallen und den Motorzustand können vorhergesagt werden, indem der Anstieg der Spurenmetallkonzentration im Schmieröl bei der Verwendung ausgewertet wird. Mithilfe der induktiv gekoppelten plasmaoptischen Emissionsspektroskopie (ICP-OES) wurde die Konzentration von Verschleißspurenmetallen in den Schmierölproben bestimmt, die aus Motoren mit Mineraldiesel und KB20-Motoren entnommen wurden.

Aluminium: Der Verschleiß von Kolben, Lagern, Schmutz, Additiven und Anlaufscheiben trägt zur Entstehung von Aluminium im Schmieröl bei. Mit Ausnahme einer 20-Stunden-Nutzungsprobe des Dieselmotors lagen die Aluminiumspuren in den Schmierölproben von KB20 und Dieselmotoren bei <5 ppm (Abb. 12). Allerdings wies der mit KB20 betriebene Motor im Vergleich zum Basis-Dieselmotor eine etwas höhere Spurenkonzentration von Aluminium in den Schmierölproben auf.

Magnesium: Magnesium in Abrieb kann aus verschiedenen Quellen stammen

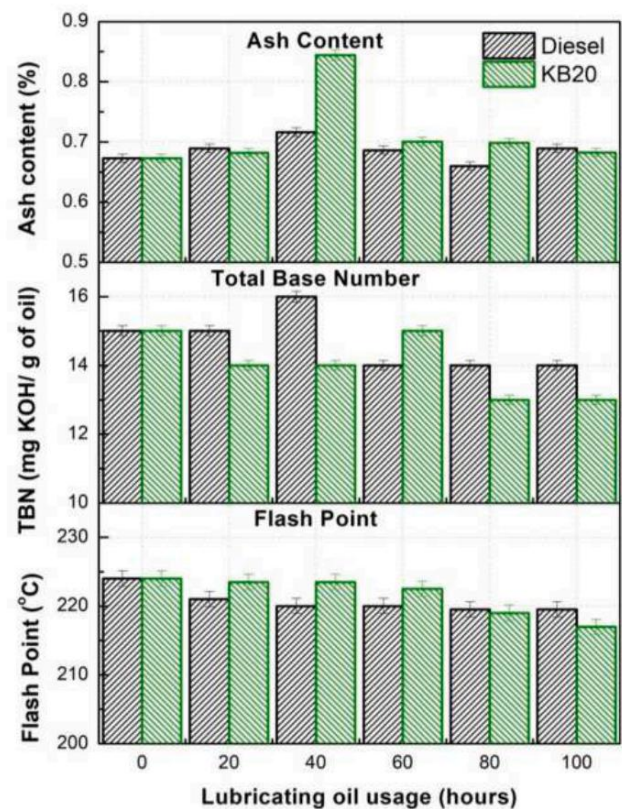


Abb. 10. Variationen in (a) Aschegehalt, (b) Gesamtbasenzahl und (c) Flammpunkttemperatur der Schmierölproben, die aus KB20- und dieselpbetriebenen Motoren entnommen wurden.

Ursachen, einschließlich Additivverschöpfung, Zylinderlaufbuchsenverschleiß, Lagerverschleiß usw. Magnesiumhaltige Verbindungen werden als Detergenzien (Additive) in den Schmierölen verwendet. Die Magnesiumkonzentration im Schmieröl variierte bei beiden Testkraftstoffen nur geringfügig und blieb bei ~10 ppm (Abb. 12). In beiden Phasen stieg die Magnesiumspurenkonzentration in den Schmierölproben mit der Nutzung nicht an.

Kalzium: Kalzium in den Schmierölproben kann aus Additiven, Wasser oder Fett stammen. Die Calciumspurenkonzentrationen waren in den Schmierölproben des mit KB20 betriebenen Motors etwas höher als in den mit Mineraldiesel betriebenen Motoren (Abb. 12). Die Calciumkonzentration in Schmierölproben stieg in beiden Phasen nicht signifikant gegenüber dem Ausgangswert im frischen Schmieröl an. Dies deutete darauf hin, dass während des Gebrauchs die Zugabe von Spurenkonzentrationen zum Schmieröl minimal war.

Zink: Zink-Di-Alkyl-Di-Thiophosphat (ZDDP), eine zinkhaltige Verbindung, ist ein multifunktionales Additiv, das in Schmierölformulierungen verwendet wird. ZDDP dient als Antioxidans-, Verschleißschutz- und Hochdruckadditiv sowie als Reinigungsmittel. Metallorganische Komplexe, die dem Schmieröl als Additive zugesetzt werden, erzeugen Zink als Spurenmetall. Zink im Schmieröl stammt unter anderem aus der Erschöpfung von Additiven, Lagerverschleiß, Messingteilen und Neoprendichtungen. Die anfängliche Zinkkonzentration im Schmieröl blieb in beiden Phasen des Motordauertests über die Zeit relativ konstant. Es gab keine signifikante Auswirkung der Verwendung von KB20 auf die Spurenkonzentrationen von Zink in den regelmäßig entnommenen Schmierölproben (Abb. 12).

Chrom: Verschleiß an Zylinderlaufbuchse, Kompressionsringen, Pleuellwelle und Lagern könnte die Quelle für Chrom im Schmieröl sein. Auch nach 40 h Motorbetrieb waren die Chromspuren in den Schmierölproben sehr gering. Allerdings zeigte der mit KB20 betriebene Motor nach 40 Stunden eine erhöhte Chromspurenkonzentration im Schmieröl (Abb. 12). Auch der Gewichtsverlust der Pleuellringe wurde gemessen und die Pleuellringe des KB20-Motors zeigten deutlich einen höheren Verschleiß (Abb. 7).

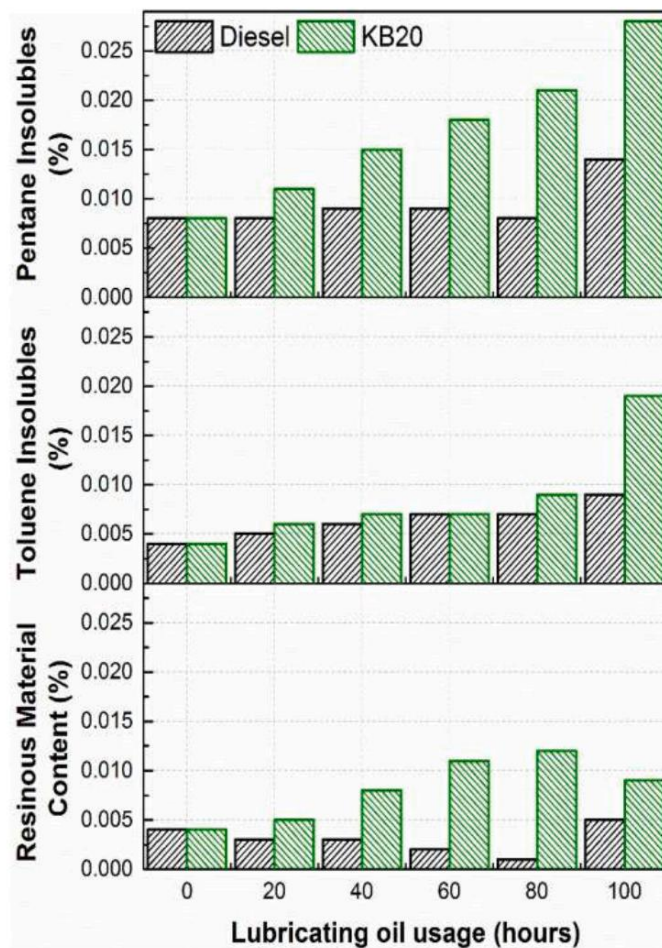


Abb. 11. Variationen in (i) in Pentan unlöslich, (ii) in Toluol unlöslich und (iii) Harzgehalt der Schmierölproben aus KB20- und Dieselmotoren.

Bei der Reibung zwischen Kolbenring und Laufbuchse kommt es immer wieder zu wiederkehrenden mechanischen und thermischen Spannungen an der Kontaktschnittstelle, die zu ermüdungsbedingtem Verschleiß in der oberen Schicht des Rings führen. Dies kann zu Oberflächenschäden aufgrund von Lochfraß, Abplatzungen und Delaminierung der Kolbenringflächenbeschichtungen führen [62,63]. Daher kann davon ausgegangen werden, dass höhere Chromspurenkonzentrationen in den Schmierölproben aus KB20-betriebenen Motoren auf einen erhöhten Verschleiß der Kolbenringe zurückzuführen sind.

Mangan: Der Verschleiß von Ventilen, Stahlwellen usw. ist eine Quelle für Mangan im Schmieröl bei der Verwendung. Mangan wurde in sehr geringen Spurenkonzentrationen (<2 ppm) in den Schmierölproben nachgewiesen, die den Motoren mit beiden Testkraftstoffen entnommen wurden (Abb. 12), und seine Spurenkonzentration änderte sich im Laufe der Zeit nicht wesentlich.

Natrium: Kühlmittel und Additive sind die beiden Hauptquellen für Natrium im Schmieröl. Während der Nutzung blieb die Natriumspurenkonzentration im Schmieröl aus Mineraldiesel- und KB20-betriebenen Motoren nahezu konstant (~2 ppm) und schwankte nicht mit der Zeit/Nutzung (Abb. 12).

Kupfer: Der Verschleiß von Lagern, Buchsen, Ventillführungen und anderen Komponenten trägt zu Kupferspuren im Schmieröl bei. Mit zunehmender Nutzung stiegen die Spurenkonzentrationen von Kupfer im Schmieröl sowohl von KB20- als auch von Dieselmotoren deutlich an (Abb. 12). Die zunehmende Spurenkonzentration von Kupfer deutete auf die Möglichkeit einer Verschlechterung der Schmierwirkung bei der Verwendung aufgrund der Oxidation des Schmieröls hin. Dies hätte mit der Zeit zu einem erhöhten Verschleiß kupferhaltiger Bauteile wie Lager geführt.

Eisen: Abrieb von Zylinderlaufbuchsen, Kolben, Ringen, Ventilen, Wellen usw.

Lager, Kurbelwelle und Korrosion sind die Hauptquellen für Eisen im Schmieröl. Der Verschleiß der Eisenkomponenten in mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren war bis zu 40 Stunden Motorbetrieb in beiden Phasen nahezu identisch (Abb. 12). Die Eisenspurenkonzentration in den Schmierölproben, die aus dem mit KB20 betriebenen Motor entnommen wurden, stieg über diesen Punkt hinaus deutlich und deutlich an, was auf eine höhere Verschleißrate der Eisenkomponenten im mit KB20 betriebenen Motor hinwies. Dies könnte möglicherweise auf eine stärkere Oxidation und Rostung der Motorkomponenten im KB20-Motor zurückzuführen sein. Auch die in dieser Studie durchgeführten körperlichen Verschleißtests bestätigten diese Ergebnisse (Tabelle 5).

Nickel: Die Hauptquellen für Nickel im Schmieröl sind Zusatzstoffe und Verschleißrückstände von Lagern, Ventilen und Getriebebeschichtungen. Die Spurenkonzentrationen von Nickel in den Schmierölproben, die aus mit Mineralöldiesel und KB20-betriebenen Motoren entnommen wurden, waren sehr niedrig (<1 ppm) und blieben bei der Verwendung unverändert.

Barium: Additive, Wasser und Fett sind die Quellen für Barium im Schmieröl. Die Spurenkonzentration von Barium in den in beiden Phasen entnommenen Schmierölproben war sehr niedrig (~0,1 ppm) und blieb bei der Verwendung relativ stabil.

Blei: Verschleiß von Lagern, Farben und Fett ist die Quelle von Blei im Schmieröl. Sowohl bei KB20- als auch bei mineralölbetriebenen Dieselmotoren betrugen die Bleispuren im Schmieröl weniger als 0,5 ppm und schwankten nicht

Verwendung.

In ähnlicher Weise betrugen die Spurenkonzentrationen von Kalium in den Schmierölproben, die aus mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren entnommen wurden, etwa 1 ppm, während die Spurenkonzentrationen von Kobalt, Kupfer und Beryllium vernachlässigbar waren. Dieser Abschnitt enthält daher nicht die Kurven, die die Variation der Spurenkonzentrationen dieser Metalle in den Schmierölproben aus beiden Phasen bei Verwendung zeigen.

3.4. Materialverträglichkeit

Verschiedene Materialien, die in verschiedenen Motorkomponenten verwendet werden, können durch Biodiesel angegriffen werden, der chemisch reaktiver ist als mineralischer Basisdiesel. Bevor Biodiesel als alternativer Kraftstoff in großem Maßstab eingesetzt wird, ist es daher wichtig, die Auswirkungen von Biodiesel/Biodieselmischungen auf die lebenswichtigen Motorkomponenten zu ermitteln. Tabelle 8 zeigt die Materialkompatibilitätsbeobachtungen einiger kritischer Motorkomponenten aus dieser Studie.

Das Kraftstoffsystem, insbesondere die CRDI-Kraftstoffpumpe und die Hochdruck-Magneteinspritzdüsen, wurde durch KB20 beeinträchtigt. Die relativ höhere Kraftstoffviskosität von Biodiesel führte dazu, dass die Einspritzdüsen eine geringere Kraftstoffmenge mit größeren Tröpfchen in den Brennraum des Motors sprühten als bei mineralischem Basisdiesel. Dies führte bei KB20 zu einem höheren Grad an unvollständiger Verbrennung und höherer Rauchentwicklung, was zu höheren Kohlenstoffablagerungen im Brennraum am Zylinderkopf, an der Kolbenoberseite und an der Einspritzdüsen Spitze führte. Gupta und Agarwal [64] führten eine makroskopische und mikroskopische Sprühcharakterisierung im FIP-Bereich von 500–1500 bar unter Verwendung eines Magnetinjektors für Biodieselmischungen (KB20 und KB40) und mineralischen Basisdiesel durch. Es zeigte sich, dass die Tröpfchengrößenverteilung, dargestellt durch den mittleren Sauter-Durchmesser (SMD) (D32) und den arithmetischen mittleren Durchmesser (AMD) (D10), mit zunehmendem Biodieselanteil im Testkraftstoff zunahm. Dies war ein Beweis dafür, dass größere Tröpfchen Biodieselmischungssprays darstellten. Dies lag an der höheren Viskosität und Oberflächenspannung von Biodiesel als dem mineralischen Basisdiesel. Relativ schlechtere Fließeigenschaften bei niedrigen Temperaturen und eine höhere Ungesättigtheit von Biodiesel führten zu einem höheren Grad an Polymerbildung im Testkraftstoff, was häufig zur Verstopfung der Kraftstofffilter führte. Biodiesel und Mischungen enthielten Feuchtigkeit, die sehr schwer zu entfernen war und schwere Schäden an der Kraftstoffpumpe und dem Einspritzventil verursachte, was zu innerer Korrosion führte. Nach Abschluss beider Phasen des Dauerbelastungstests wurden auch Dichtungen untersucht. Es wurden keine nennenswerten Schäden an den Dichtungen festgestellt und in beiden Phasen konnte kein Unterschied im Verschleißbild festgestellt werden.

Laut dieser Tabelle kann der Einsatz von Biodiesel in modernen CRDI-Motoren die Wartungskosten erhöhen. Diese Beobachtung war krass

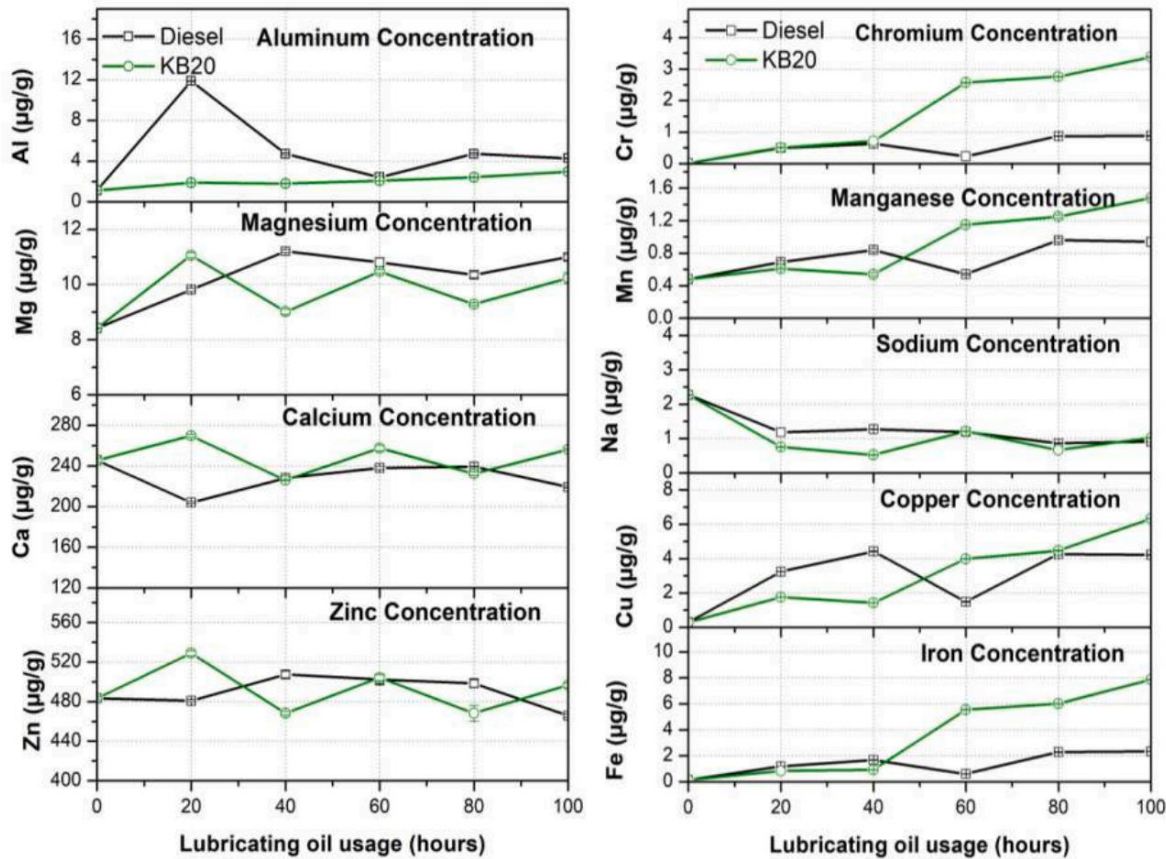


Abb. 12. Variationen in den Spurenkonzentrationen von (a) Aluminium, (b) Magnesium, (c) Kalzium, (d) Zink, (e) Chrom, (f) Mangan, (g) Natrium, (h) Kupfer und (i) Eisen in den Schmierölproben von KB20- und Dieselmotoren.

Tabelle

8 Materialkompatibilität von Motorkomponenten mit KB20 im Vergleich zu mineralischem Basisdiesel.

Komponente	Relativer Zustand für KB20 im Vergleich zum mineralischen Basisdiesel
Ventile	Der Verschleiß der Einlass- und Auslassventile war in KB20 um etwa 30–50 % geringer.
Liner	Ein direkter Vergleich war nicht aussagekräftig, da die Auskleidung ein fester Bestandteil des Blocks war und in den beiden Phasen nicht verändert wurde. Bei KB20 war aufgrund der separat aufgeführten Oberflächenprofile ein höherer Verschleiß zu erkennen.
Kolben	Der Verschleiß war bei KB20 etwas höher.
Kolbenringe	200–300 % höherer Verschleiß bei KB20. Höchster Verschleiß im oberen Kompressionsring für KB20.
Kolbennadel	20–30 % höherer Verschleiß bei KB20.
Kleines/großes Pleuellager	20–30 % höherer Verschleiß bei KB20.
Kurbelzapfen	10–20 % geringerer Verschleiß bei
Hauptlager	KB20. 40–50 % höherer Verschleiß bei KB20.
Schmieröl	Tribologische Untersuchungsdaten werden gesondert bereitgestellt.
Kohlenstoffablagerungen am Kolben, Zylinderkopf und Einspritzdüsen	Fotos von jedem werden separat gegeben. Höhere Ablagerungen an KB20-Motorkomponenten.
Zylinderkopfdichtung	Kein Unterschied.
Ansaugkrümmerdichtung	Kein Unterschied.
Auspuffkrümmerdichtung	Kein Unterschied.
Gummikomponenten	Keine Gummiteile im Motor.
Zahnriemen	Schwerer Schaden am KB20-Motor.
Turbolader	Kein Unterschied.
Einspritzdüsen	Beim Dauertest der zweiten Phase am KB20 nach 132 Stunden beschädigt und ersetzt.

Im Gegensatz zu den Beobachtungen mehrerer anderer wissenschaftlicher Studien, die bei der Verwendung relativ älterer Motoren (Euro-3/2/1/0) einen genau entgegengesetzten Trend zeigten. Die beobachteten Unterschiede waren auf spezifische Konstruktionsmerkmale des Motors zurückzuführen, insbesondere auf die Kraftstoffeinspritzausrüstung, die sehr hohe Kraftstoffeinspritzdrücke von etwa 1400–1600 bar verwendete.

Daher wird den OEMs empfohlen, die Biodieselskompatibilität eines Motors zu prüfen, bevor er über einen längeren Zeitraum mit Biodiesel betrieben werden darf, und dem Endbenutzer dann ein geeignetes Garantie- und Wartungsprotokoll anzubieten.

4. Schlussfolgerung

Es wurde ein Dauertest an einem CRDI-Dieselmotor durchgeführt, der typischerweise in SUVs verwendet wird, um die Auswirkungen von KB20 im Vergleich zu mineralischem Basisdiesel zu vergleichen. Der Motorverschleiß wichtiger Motorkomponenten wurde vor und nach dem 274-stündigen Dauertest für jeden Kraftstoff bewertet. Bei KB20 waren die Kohlenstoffablagerungen an Motorkomponenten wie Zylinderkopf, Kolbenoberteil und Einspritzdüsen deutlich höher. Die physikalischen Abmessungen der Motorkomponenten wurden vor und nach dem Dauertest in beiden Phasen gemessen, was auf einen wesentlich geringeren Verschleiß der Ventile und Kurbelzapfen des mit KB20 betriebenen Motors hinwies. Der mit KB20 betriebene Motor hingegen zeigte einen höheren Verschleiß der Laufbuchsen, Kolbenringe, Kolben, Kolbenbolzen, des kleinen und großen Pleuellagers und der Hauptlager. Verschiedene Öltribologietests, die an Schmierölproben von mit Mineraldiesel und KB20 betriebenen Motoren durchgeführt wurden, zeigten den Einfluss der Kraftstoffchemie auf die Wirksamkeit des Schmieröls und seine verbleibende Nutzungsdauer. Das Schmieröl des mit KB20 betriebenen Motors zeigte einen stärkeren Anstieg der Dichte und des Aschegehalts. Die Viskositätstests zeigten, dass das aus dem KB20-Motor entnommene Schmieröl einer stärkeren Oxidation und Polymerisation unterlag. Höherer Harzgehalt im

Schmieröl aus dem mit KB20 betriebenen Motor wies auch auf eine höhere Oxidation und Polymerisation des Schmieröls hin. Durch den Gebrauch sammelten sich im Schmieröl Abriebpartikel an, die zu einer Erhöhung der Spurenmetallkonzentration führten. Die aus dem KB20-Motor entnommenen Schmierölproben wiesen höhere Spuren von Cr und Fe auf. Allerdings waren die Spurenkonzentrationen von Al, Mg, Ca, Zn, Mn und Na in allen Schmierölproben nahezu identisch und veränderten sich mit der Verwendung nicht wesentlich. Die Biodieselmischungen beschädigten jedoch das Kraftstoffeinspritzsystem des CRDI-Motors. Werden dem Biodiesel ausreichend Additive zugesetzt, kann dieser negative Einfluss auf das Kraftstoffeinspritzsystem eliminiert werden. Diese Studie kommt zu dem Schluss, dass Karanja-Biodieselmischungen als teilweiser Ersatz für Mineraldiesel (bis zu 20 %) verwendet werden können, mit einer geringfügigen Neukalibrierung des Steuergeräts, mit geringfügigen Änderungen in der Schmierölzusammensetzung und ohne wesentliche Änderungen an der Motorhardware.

CRediT-Autorenbeitragsklärung

Jai Gopal Gupta: Datenkuration, formale Analyse, Untersuchung, Schreiben – Originalentwurf. **Avinash Kumar Agarwal:** Konzeptualisierung, Methodik, Projektverwaltung, Ressourcen, Supervision, Schreiben – Überprüfung und Bearbeitung.

Erklärung konkurrierender Interessen

Die Autoren erklären, dass ihnen keine konkurrierenden finanziellen Interessen oder persönlichen Beziehungen bekannt sind, die den Anschein erwecken könnten, dass sie die in diesem Artikel beschriebene Arbeit beeinflusst hätten.

Danksagungen

Wir danken der Technology Systems Group des Ministeriums für Wissenschaft und Technologie der indischen Regierung für die Forschungsförderung, die uns die Durchführung dieses Projekts ermöglichte (Grant No. DST/TSG/AF/2007/20 vom 4. Februar 2010). Die Autoren danken Sh. für seine Unterstützung. Veeramani und Tata Motors, Pune, für die Bereitstellung des Testmotors und anderer erforderlicher Hardware für Experimente dieser Studie an das Engine Research Laboratory des Indian Institute of Technology Kanpur, Indien.

Verweise

[1] H. Yaqoob, YH Teoh, F. Sher, MA Jamil, D. Murtaza, M. Al Qubeissi, M. UI Hassan, MA Mujtaba, Aktueller Stand und Potenzial der Reifenpyrolyseölproduktion als alternativer Kraftstoff in Entwicklungsländern, Nachhaltigkeit 13 (6) (Januar 2021) 3214.

[2] KN Gopal, RT Raj, Wirkung der Pongamia-Ölmethylester-Diesel-Mischung auf Schmieröldegradation von DI-Kompressionszündungsmotoren, Fuel 165 (2016) 105–114.

[3] A. Dhar, AK Agarwal, Wirkung der Karanja-Biodieselmischung auf den Motorverschleiß in einem Dieselmotor, Fuel 134 (2014) 81–89.

[4] D. Tziortzioumis, A. Stamatelos, Auswirkungen einer 70-prozentigen Biodieselmischung auf den Betrieb des Kraftstoffeinspritzsystems während der stationären und transienten Leistung eines Common-Rail-Dieselmotors, Energy Convers. Geschäftsführer 60 (2012) 56–67.

[5] MA Fazal, ASMA Haseeb, HH Masjuki, Machbarkeitsstudie für Biodiesel: an Bewertung der Materialverträglichkeit; Leistung; Emissionen und Motorhaltbarkeit erneuern. Aufrechterhalten. Energy Rev. 15 (2011) 1314–1324.

[6] O. Armas, S. Martínez-Martínez, C. Mata, Wirkung eines Ethanol-Biodiesel-Diesels Mischung auf einem Common-Rail-Einspritzsystem, Fuel Process. Technol. 92 (11) (2011) 2145–2153.

[7] S. Pehan, MS Jerman, M. Kegl, B. Kegl, Einfluss von Biodiesel auf die Tribologieeigenschaften eines Dieselmotors, Fuel 88 (6) (2009) 970–979.

[8] AK Agarwal, J. Bijwe, LM Das, Einfluss der Biodieselnutzung auf den Verschleiß wichtiger Teile in Kompressionszündungsmotoren, ASME. J. Engg. Gasturbine. Leistung 125 (2003) 604–611.

[9] Staat F, Gateau P. Die Auswirkungen von Rapsölmethylester auf Dieselmotoren Leistung, Abgasemissionen und Langzeitverhalten – eine Zusammenfassung von drei Jahren Experimentieren. SAE-Papier Nr. 950053.

[10] Sem TR. Einfluss verschiedener Schmieröle auf Kolbenablagerungen bei Biodiesel Motoren. SAE-Papier Nr. 2004-01-0098.

[11] MA Fazal, ASMA Haseeb, HH Masjuki, Vergleichende korrosive Eigenschaften von Erdöldiesel und Palmbiodiesel für Automobilmaterialien, Kraftstoffprozess. Technol. 91 (2010) 1308–1315.

[12] S. Kaul, RC Saxena, A. Kumar, MS Negi, AK Bhatnagar, HB Goyal, AK Gupta, Korrosionsverhalten von Biodiesel aus Samenölen indischen Ursprungs auf Dieselmotorteilen, Kraftstoffprozess. Techn. 88 (2007) 303–307.

[13] Besee GB, Fay JP. Kompatibilität von Elastomeren und Metallen in Biodiesel-Kraftstoffmischungen. SAE-Papier Nr. 971690.

[14] Gerpen JV. Bestimmung des Einflusses von Schadstoffen auf die Eigenschaften von Biodiesel. SAE-Papier Nr. 971685.

[15] Schumacher L., Borgelt SC, Hires WG, Wetherell W., Nevils A., 100.000 Meilen Tanken von 5,9-l-Cummins-Motoren mit 100 % Biodiesel. SAE-Papier Nr. 962233.

[16] AK Agarwal, S. Park, A. Dhar, CS Lee, S. Park, T. Gupta, NK Gupta, Übersicht über experimentelle und rechnerische Studien zu Spray, Verbrennung, Leistung und Emissionseigenschaften von mit Biodiesel betriebenen Motoren, ASME. J. Energieressource. Technol. 140 (12) (2018) 1–30, 120801.

[17] AT Hoang, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, AP Carlucci, AI Ölçer, AT Le, A. Ghassemi, Reiskleieöl-basierter Biodiesel als vielversprechende erneuerbare Kraftstoffalternative zu Petrodiesel: eine Übersicht, Renew. Aufrechterhalten. Energie Rev. 135 (2020) 110204.

[18] FJ Owuna, Stabilität pflanzlicher Öle, die bei der Formulierung umweltfreundlicher Schmierstoffe verwendet werden – eine Übersicht, Egyptian Journal of Petroleum 29 (3) (2020) 251–256.

[19] YC Lin, WJ Lee, TS Wu, CT Wang, Vergleich von PAK und regulierten Schadstoffemissionen aus Biodieselmischungen und Paraffinkraftstoffmischungen im Motor- Kilometertest, Fuel 85 (2006) 2516–2523.

[20] AK Agarwal, D. Agarwal, Feldtests mit Biodiesel (B100) und Dieselkraftstoff Fahrzeuge: Teil 3 – Verschleißbewertung von Laufbuchsen und Kolbenringen, Motorablagerungen und Betriebsprobleme, J. Energy Resour. Technol. 143 (4) (1. April 2021), 042309.

[21] AK Agarwal, D. Agarwal, Feldtests von Biodiesel (B100) und dieselbetriebenen Fahrzeugen: Teil 4 – Kolbenleistung und Probleme mit der Kraftstoffeinspritzrausrüstung, J. Energy Resour. Technol. 143 (4) (1. April 2021), 042310.

[22] A. Dhar, AK Agarwal, Experimentelle Untersuchungen der Wirkung von Karanja Biodiesel zu tribologischen Eigenschaften von Schmieröl in einem Selbstzündungsmotor, Fuel 130 (2014) 112–119.

[23] MS Dandu, K. Nanthagopal, Clean Karanja Methylester-Kompatibilitätsstudie zum tribologischen Langzeitverhalten eines Kompressionszündungsmotors, Fuel 291 (2021) 120148.

[24] M. Thornton, T. Allemen, J. Lücke, R. McCormick, Auswirkungen der Överdünnung von Biodiesel-Kraftstoffmischungen auf den Betrieb von Dieselmotoren für leichte Nutzfahrzeuge, SAE International Journal of Fuels and Lubricants 2 (1) (2009) 781–788.

[25] AK Agarwal, J. Bijwe, LM Das, Verschleißbewertung in einem mit Biodiesel betriebenen Fahrzeug Selbstzündungsmotor, ASME. J. Engg. Gasturbine. Leistung 125 (2003) 820–826.

[26] J. Sentanahady, W. Saputro, MA Muflikhun, Metalle und chemische Verbindungen Verunreinigungen in Dieselmotorschmiermitteln mit B20- und B100-Biokraftstoffen für den Langzeitbetrieb, Sustainable Energy Technologies and Assessments 45 (2021, 1 Juni) 101161.

[27] Reece DL, Peterson CL. Biodieseltests in zwei On-Road-Pickups. SAE-Papier Nr. 952757.

[28] MH Mosarof, MA Kalam, HH Masjuki, A. Alabdulkareem, AM Ashrafui, A. Arsian, HK Rashedul, IM Monirul, Optimierung der Leistung, Emission, Reibung und Verschleißseigenschaften von Palm- und Calophyllumphyllum-Biodieselmischungen, Energy Convers. Geschäftsführer 118 (2016) 119–134.

[29] A. Murugesan, C. Umarani, R. Subramanian, N. Nedunchezian, Biodiesel als alternativer Kraftstoff für Dieselmotoren – eine Übersicht, Renew. Aufrechterhalten. Energie Rev. 13 (3) (2009, 1. April) 653–662.

[30] C. Patel, K. Chandra, J. Hwang, RA Agarwal, N. Gupta, C. Bae, T. Gupta, A. K. Agarwal, Vergleichende Leistung von Kompressionszündungsmotoren, Verbrennungs- und Emissionseigenschaften sowie Spurenmetalle in Partikeln aus Biodieseln aus Altspeiseöl, Jatropa- und Karanja-Öl, Fuel 236 (2019) 1366–1376.

[31] S. Raddnui, A. Meenak, Auswirkungen von raffiniertem Palmöl (RPO)-Kraftstoff auf den Verschleiß von Dieselmotorkomponenten, Wear 254 (2003) 1281–1288.

[32] L. Schumacher, JV Gerpen, Motorölanalyse von Dieselmotoren, die mit 0, 1, 2 und 100 Prozent Biodiesel betrieben werden. ASAE-Jahrestagung, Midwest Express Center Milwaukee, WI, 9.–12. Juli 2000. Vortrag Nr. 00-6010.

[33] GK Mistri, SK Aggarwal, D. Longman, AK Agarwal, Leistungs- und Emissionsuntersuchungen von Jatropa- und Karanja-Biodieseln in einem Einzylinder -Kompressionszündungsmotor unter Verwendung endoskopischer Bildgebung. ASME, J. Energy Resour. Technol. 138 (1) (2016) 1–13, 011202.

[34] Indischer Standard IS: 10000, Testmethode für Verbrennungsmotoren: Teil IX, Dauertests, 1980, Bureau of Indian Standards, Neu-Delhi, Indien.

[35] Indian Standard IS: 10000, Testmethode für Verbrennungsmotoren: Teil V, Vorbereitung auf Tests und Messungen für Verschleiß, Bureau of Indian Standards, Neu-Delhi, Indien, 1980.

[36] M. García-Morales, SD Fern´andez-Silva, C. Roman, MA Delgado, Elektroaktive Kontrolle des viskosen Flusses und der tribologischen Leistung von Ökoschmiermitteln auf Basis von Phyllosilikat-Tonmineralen und Rizinusöl, Appl. Clay Sci. 198 (15. November 2020) 105830.

[37] H. Yaqoob, YH Teoh, F. Sher, MU Ashraf, S. Amjad, MA Jamil, MM Jamil, M. A. Mujtaba, Jatropa curcas Biodiesel: ein lukratives Rezept für den pakistanischen Energiesektor, Processes 9 (2021) 1129.

[38] H. Yaqoob, YH Teoh, F. Sher, MA Jamil, M. Nuhanović, O. Razmkhah, B. Erten, Tribologisches Verhalten und Schmiermechanismus der Reifenpyrolyse, Öl. Beschichtungen 11 (4) (April 2021) 386.

[39] H. Yaqoob, YH Teoh, MA Jamil, T. Rasheed, F. Sher, Ein Experiment Untersuchung zum tribologischen Verhalten von aus Reifen gewonnenem Pyrolyseöl, gemischt mit Biodieselskraftstoff, Sustainability 12 (23) (2020 Jan) 9975.

- [40] YH Teoh, HG How, F. Sher, TD Le, HT Nguyen, H. Yaqoob, Kraftstoffeinspritzreaktionen und Partikelemissionen eines CRDI-Motors, der mit Cocos Nucifera Biodiesel betrieben wird, Nachhaltigkeit 13 (9) (Januar 2021) 4930.
- [41] M. Habibullah, HH Masjuki, MA Kalam, NW Zulkifli, BM Masum, A. Arslan, M. Gulzar, Reibungs- und Verschleißigenschaften von Calophyllum inophyllum biodiesel, Ind. Crop. Prod. 76 (2015) 188–197.
- [42] AK Agarwal, A. Dhar, Wirkung der Karanja-Biodieselmischung auf den Motorverschleiß in einem Dieselmotor, Fuel 134 (2014) 81–89.
- [43] JG Gupta, AK Agarwal, SK Aggarwal, Partikelemissionen aus Karanja Biodieselbetriebern, turbogeladener CRDI-Sport-Utility-Vehicle-Motor, ASME. J. Energieressource. Technol. 137 (6) (2015) 1–6, 064503.
- [44] Fraer R, Dinh H, Proc K, McCormick RL, Chandler K, Buchholz B. Betriebserfahrung und Teardown-Analyse für Motoren, die mit Biodieselmischungen betrieben werden (B20). SAE-Papier Nr. 2005-01-3641.
- [45] Birgel A, Ladommatos N, Aleiferis P, Zuelch S, Milovanovic N, Lafon V, Orlovic A, Lacey P, Richards P. Ablagerungsbildung in den Löchern von Diesel-Einspritzdüsen: eine kritische Überprüfung. SAE-Papier Nr. 2008-01-2383.
- [46] Verhaeven E, Pelkmans L, Govaerts L, Lamers R, Theunissen F. Ergebnisse von Demonstrations- und Evaluierungsprojekte von Biodiesel aus Raps und Altfrittieröl für leichte und schwere Nutzfahrzeuge. SAE-Papier Nr. 2005-01-2201.
- [47] S. Sinha, AK Agarwal, Experimentelle Untersuchung der Wirkung von Biodiesel Nutzung der Schmieröldegradation und des Verschleißes eines Transport-CIDI-Motors, ASME. J. Engg. Gasturbine. Power 132 (2010) 1–9, 042801.
- [48] SM Reddy, N. Sharma, N. Gupta, AK Agarwal, Wirkung von nicht essbarem Öl und seinen Biodiesel zum Verschleiß von Komponenten der Kraftstoffeinspritzanlage eines Generators, Fuel 222 (2018) 841–851.
- [49] Morcos M, Parsons G, Lauterwasser F, Boons M, Hartgers W. Nachweismethoden für genaue Messungen des FAME-Biodieselgehalts in gebrauchtem Kurbelgehäuse-Motoröl. SAE-Papier Nr. 2009-01-2661.
- [50] WP Dong, EJ Davis, DL Butler, KJ Stout, Topografische Merkmale von Zylinderlaufbuchsen – eine Anwendung dreidimensionaler Charakterisierungstechniken, Tribol. Int. 28 (7) (1. November 1995) 453–463.
- [51] DK Srivastava, AK Agarwal, J. Kumar, Einfluss der Eigenschaften der Laufbuchsenoberfläche auf Verschleiß und Reibung in einem nicht feuermotorsimulator, Mater. Des. 28 (2007) 1632–1640.
- [52] R. Kumar, S. Kumar, B. Prakash, A. Sethuramiah, Bewertung des Motorlaufbuchsenverschleißes aus Tragflächenkurven, Wear 239 (2000) 282–286.
- [53] C. Patel, J. Hwang, K. Chandra, RA Agarwal, C. Bae, T. Gupta, AK Agarwal, Untersuchungen zum Sprühen und Verbrennen im Zylinder in einem optischen Hochleistungsmotor, der mit Altspeiseöl, Jatropha, betrieben wird und Karanja-Biodiesel, ASME. J. Energieressource. Technol. 141 (1) (2019) 1–12, 012201.
- [54] AK Agarwal, Experimentelle Untersuchungen der Auswirkung der Biodieselnutzung auf die Schmieröltribologie in Dieselmotoren, Journal of Auto. Engg., Proceedings of IMechE, Teil-D 219 (5) (2005) 703–714.
- [55] Smith LA, Preston WH, Dowd G, Taylor O, Wilkinson KM. Anwendung einer Wärmebilanzmethode des ersten Gesetzes auf einen turbogeladenen Automobildieselmotor. SAE-Papier Nr. 2009-01-2744.
- [56] AK Agarwal, JG Gupta, RK Maurya, WI Kim, S. Lee, CS Lee, S. Park, Sprühentwicklung, Motorleistung, Emissionen und Verbrennungscharakterisierung von Karanja-Biodiesel-betriebenen Common-Rail-Turbo-Direkteinspritzungs-Transportmotoren, Int. J. Eng. Res. 17 (10) (2016) 1092–1107.
- [57] KM Richard, S. McTavish, Einfluss von Biodiesel auf die Korrosionsleistung von Schmierstoffen, SAE International Journal of Fuels and Lubricants 2 (2) (1. Januar 2010) 66–71.
- [58] RK Saluja, K. Vineet, S. Radhey, Stabilität von Biodiesel – eine Übersicht, Renew. Aufrechterhalten. Energy Rev. 62 (2016) 866–881.
- [59] C. Sasikumar, K. Balamurugan, S. Jegadheeswaran, R. Sathyamurthy, Optimierung der Prozessparameter bei der Herstellung von Jatropha-Methylester mithilfe der Reaktionsoberflächenmethodik, Biokatalyse und landwirtschaftliche Biotechnologie 27 (2020) 101693.
- [60] CB Sia, J. Kansedo, YH Tan, KT Lee, Bewertung des Kaltflusses von Biodiesel Eigenschaften, oxidative Stabilität und Verbesserungsstrategien: eine Übersicht, Biocatalysis and Agricultural Biotechnology 24 (2020) 101514.
- [61] A. Anwar, A. Garforth, Herausforderungen und Möglichkeiten der Verbesserung der Kaltfließigenschaften von Biodiesel durch heterogene Katalyse, Fuel 173 (2016) 189–208.
- [62] S. Wan, H. Wang, Y 15) 202940.
- [63] A. Amanov, R. Karimbaev, SP Berkebile, Wirkung der Ultraschall-Nanokristall-Oberflächenmodifikation auf Verschleißmechanismen thermisch gespritzter WC-Co-Beschichtung, Wear (20. März 2021) 203873.
- [64] Gupta JG, Agarwal AK. Makroskopische und mikroskopische Sprüheigenschaften von Diesel- und Karanja-Biodieselmischungen. SAE-Papier Nr. 2016-01-0869.