

Wie verändern sich Partikelemissionen an Dieselmotoren beim Einsatz von paraffinischem Diesel (DIN EN 15940)?

Projekt: InnoFuels; Innovationsschwerpunkt Straße & Schiene

Alexander Heinz⁽¹⁾; Dr.-Ing. Olaf Toedter⁽¹⁾

⁽¹⁾Institut für Kolbenmaschinen; KIT

Neben der voranschreitenden Elektrifizierung des Straßenverkehrs sind erneuerbare fortschrittliche Kraftstoffe biologischen und nicht-biologischen Ursprungs ein Baustein der zukünftigen defossilisierten Mobilität. Im Schwerlastverkehr auf der Straße kommen heute hauptsächlich Dieselmotoren zum Einsatz (KBA 2025). Für diese Motoren sind seit Mitte 2024 auch paraffinische Kraftstoffe nach DIN EN 15940 in Deutschland und weiten Teilen Europas zulässig. Unter diesen Kraftstoffen ist HVO der schon heute verfügbare Vertreter. Perspektivisch wird auch ein synthetisch aus CO₂ und Wasserstoff hergestellter paraffinischer eDiesel unter diese Norm fallen. Viele Hersteller geben für Bestandsfahrzeuge, die unter die Abgasnormen Euro 5 und Euro 6 fallen, formale Freigaben für HVO nach DIN EN15940. Generell lässt sich HVO aber an allen Dieselmotoren einsetzen. HVO Mischungen mit Dieselkraftstoff die unter, DIN EN 590 fallen, sind für alle Dieselfahrzeuge ein direkter Ersatz. Da reines HVO eine andere chemische Zusammensetzung im Vergleich mit Diesel B7 hat, misst man eine veränderte Zusammensetzung der Abgasbestandteile. HVO zeigt hier oft einen Vorteil sowohl bei den Stickstoffoxiden (NO_x) als auch den Partikelmassenemissionen (PM). Bezüglich Partikelanzahl (PN) verschiebt sich das Profil zu kleineren Partikeln, so dass hier ein Anstieg der ungefilterten Emissionen beobachtet werden kann.

In dieser Literaturzusammenstellung sollen wesentliche Ergebnisse des HVO-Einsatzes in Verbrennungsmotoren dargestellt werden. Der Fokus liegt auf den innermotorischen Partikelemissionen (PN+PM). Zusätzlich wird auf die Effekte nach der Abgasnachbehandlung eingegangen.

Motorische Emissionen beim Einsatz von HVO

Grundsätzlich besteht beim dieselmotorischen Brennverfahren ein Zusammenhang zwischen Partikel- und NO_x -Emissionen. In der Ruß- NO_x -Schere können Emissionen mithilfe von Applikationsparametern wie dem Einspritzzeitpunkt oder dem Kraftstoffeinspritzdruck gezielt beeinflusst werden, sodass eine Verschiebung zwischen NO_x - und Rußemissionen erfolgt. Deshalb liegt ein zentraler Fokus in der Entwicklung von Dieselmotoren auf Strategien, die beide Emissionen gleichzeitig senken – oder zumindest eine von beiden reduzieren, ohne dass die andere ansteigt. Hier haben sich z.B. AGR¹-Systeme etabliert.

Abbildung 1 zeigt die generellen Zusammenhänge grafisch.

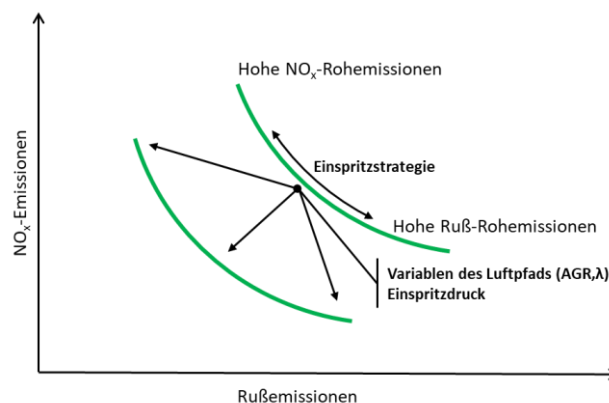


Abbildung 1: Ruß Nox Schere bei Dieselmotoren Euro 5 und 6

Treten in Untersuchungen mit alternativen Kraftstoffen z.B. erhöhte NO_x -Emissionen bei gleichzeitig erniedrigten Rußemissionen auf, deutet das oft auf eine Verschiebung der Verbrennungslage hin, die dann mittels der Motorapplikation durch die Einspritzstrategie wieder verschoben werden kann. Deshalb bietet sich eine gleichzeitige Betrachtung beider Emissionen an. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht von Tests mit HVO an Motorenprüfständen. Als Kriterium für die Rußemissionen wurde entweder die Partikelmasse und Anzahl (PM und PN) oder die damit korrelierte Schwärzungszahl verwendet.

1 AGR: Abgasrückführung

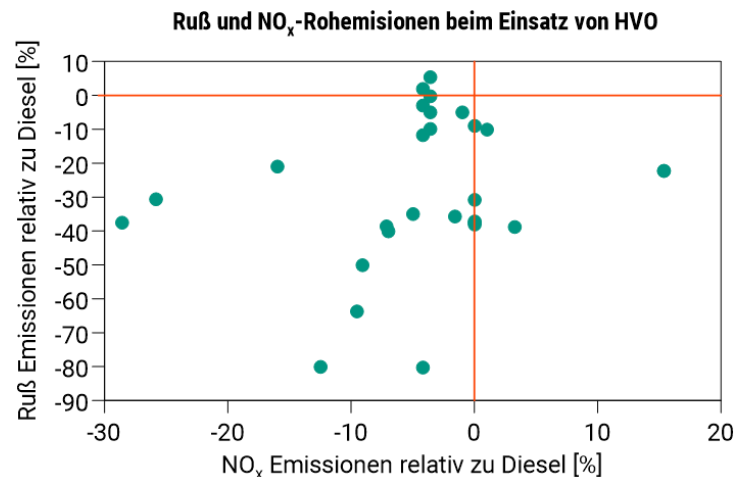


Abbildung 2: Übersicht über Emissionen beim Einsatz von HVO im Vergleich zu Diesel. Verwendet wurden Ergebnisse von Motoren unterschiedlicher Bauart (LKW und PKW) in diversen Betriebspunkten. Eigene Darstellungen mit Daten aus [1–6]

Insgesamt zeigt sich für HVO ein Vorteil sowohl bezüglich PM also auch von NO_x. Betriebspunkte mit erhöhter Rußemissions sind auf die Partikelanzahl zurückzuführen. Die teils stark verminderte Rußemission wird von den Autoren mit den in paraffinischem Diesel fehlenden Aromatenanteilen im Kraftstoff und den damit fehlenden Rußvorgängermolekülen während der Verbrennung erklärt. Die Untersuchungen zeigen außerdem, dass über die Fahrzeugapplikation auch die NO_x-Rohemission gesenkt werden kann, was im Einsatz dann zu niedrigeren AdBlue-Verbräuchen führen würde. Damit zeigt HVO zunächst ein großes Potential zur Emissionsreduktion. Das Verhalten bezüglich der Partikelanzahl muss jedoch weiter betrachtet werden.

Preuß et.al.[6] zeigen in Untersuchungen an einem HD und LD Dieselmotor für HVO in den untersuchten Betriebspunkten im Spektrum vom 0-1000nm eine leichte Verschiebung des Partikelspektrums mit einer leicht höheren Partikelanzahl >100nm für Diesel.

Schukla et.al.[7] weisen in ihren Untersuchungen an einem HD-Dieselmotor in einzelnen Punkten eine Erhöhung der Partikelemissionen bei kleinen Partikeln <23nm für HVO nach. Insgesamt weisen die Autoren aber keine systematische Erhöhung von Partikeln <23nm nach. Im absoluten Vergleich liegen die größten Partikelanzahlen hier ebenso bei ca. 100nm

Abgasnachbehandlung in Dieselfahrzeugen

Eine typische Abgasnachbehandlung bei Fahrzeugen nach Euro 6 Abgasnorm besteht aus einem Partikelfilter (DPF²) für die Reduktion der Rußpartikel (PN und PM), einem SCR³-System mit Harnstoff(AdBlue⁴)-Einspritzung für die Reduzierung der NO_x-Emissionen und einem Oxidationskatalysator (DOC⁵) für die Oxidation der Produkte unvollständiger Verbrennung Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe. Teilweise werden diese Komponenten auch in gemeinsame Bau- und Funktionsgruppen kombiniert (z.B beschichtete DPF)

Als DPF kommen heute keramisch-monolithische Zellenfilter zum Einsatz, an denen sich in der Porenstruktur die bei der Verbrennung entstandenen Partikel anlagern. Der Filter muss dabei je nach Höhe der Beladung aktiv oder passiv regeneriert werden. Dabei werden die Partikel oxidiert. Die Abscheidegrade moderner Partikelfilter liegen bei >99% im Bereich 10 bis 500nm [8].

Im Hinblick auf eine mögliche Verschiebung des Partikelspektrums ist die Frage zentral, ob Partikelfilter in den unteren Größenbereichen an Effizienz verlieren. In der Verbrennungsmotorenentwicklung und -forschung sind Partikelgrößenspektrometer für den Größenbereich 5-1000 nm im Einsatz. Der Schwerpunkt der Dieselpartikel liegt dabei üblicherweise bei ca. 100 nm.

In einer Studie, zur Messmethodik an Verbrennungsmotoren weisen Arun et.al. für nicht volatile Partikel nach DPF keine Größenabhängigkeit der Filtereffizienz nach. Sie weisen hier auch auf die Schwierigkeit hin, bei gängigen Messverfahren volatile von nicht volatilen Partikeln um die 10nm zu unterscheiden. [9]

In einer Grundvermessung zu ihrer Messkampagne zeigen Tang et al.[10] ebenfalls mittels Partikelgrößenverteilungen, eine hohe Filtereffizienz >99% in der 10 nm Größenklasse. Für

2 DPF: Dieselpartikelfilter

3 SCR: Selective Catalytic Reduction (DE: Selektive Katalytische Reduktion)

4 AdBlue: Markenname einer wässrigen Harnstofflösung für den Einsatz in SCR-Katalysatoren

5 DOC: Diesel-Oxidations-Katalysator

transiente Tests wurden ähnliche Ergebnisse erzeugt, wobei hier ein zusätzlicher Peak bei 100 nm detektiert wurde.

Wu et al. demonstrieren anhand eines paraffinischen synthetischen Dieseldiesels und unter Verwendung eines Euro-5-Dieselmotors, dass die Filtereffizienz des Partikelfilters in Bezug auf die Partikelanzahl (PN) vor und nach dem Filter konstant bei über 99,9 % liegt. Dies ist sowohl für reinen fossilen und synthetischen Diesel als auch für Mischungen der Fall. Der Größenschwerpunkt nach dem Abgasnachbehandlungssystem liegt hier ebenfalls bei 100 nm Partikelgröße. Die absoluten Partikelanzahlen liegen in allen Größenklassen unter der fossilen Referenz.[11]

In einer Messkampagne zur Untersuchung eines möglichen 10-nm-Grenzwerts für PKW zeigen Samaras et al., dass die aktuelle Dieseldieseltechnologie bei den untersuchten Fahrzeugen in der Lage ist, die Grenzwerte einzuhalten – auch unter Berücksichtigung von Partikeln in der Größenklasse von 10 nm. Dies deutet auf eine ausreichende Filtereffizienz auch bei kleinen Partikelgrößen hin.[12, 13]

Fazit

Insgesamt lassen sich die Erkenntnisse dieser Übersicht folgendermaßen zusammenfassen:

- HVO als Kraftstoff senkt in vielen Betriebspunkten sowohl die Stickoxidemissionen (NO_x) als auch die Partikelemissionen (PN und PM) bereits im Rohabgas moderner Dieselmotoren
- Das Potential lässt sich bei Anpassung der Motorapplikation noch weiter ausnutzen, hat aber für Bestandsfahrzeuge nur eine untergeordnete Relevanz.
- Erhöhungen der Emissionen in Bezug auf die Partikelanzahl (PN) sind nicht systematisch zu beobachten. In der Partikelgrößenverteilung verschiebt sich der Schwerpunkt jedoch häufig hin zu kleineren Partikeln unter 100 nm.
- Partikelfilter (DPF) filtern Partikel im relevanten Bereich von 5-1000 nm mit einer sehr hohen Effizienz von >99,9%. Diese, für den fossilen Diesel entwickelte Technologie, ist auch bei den niedrigeren Partikelgesamtemissionen von paraffinischem Diesel einsetzbar.

Plattform InnoFuels

Das Projekt InnoFuels startete im Februar 2023 und läuft bis Ende August 2026. Es wird im Rahmen des Gesamtkonzepts Erneuerbare Kraftstoffe mit insgesamt 5,24 Millionen Euro durch das **Bundesministerium für Digitales und Verkehr** gefördert. Die Förderrichtlinie für die Entwicklung regenerativer Kraftstoffe wird von der **NOW GmbH** koordiniert und durch die Projektträger **VDI/VDE Innovation +Technik GmbH** sowie die **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.** umgesetzt. Mehr Informationen auf www.InnoFuels.de.



GESAMTKONZEPT
**ERNEUERBARE
KRAFTSTOFFE**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



NOW - G M B H . D E

Projektträger:



GESAMTKONZEPT
**ERNEUERBARE
KRAFTSTOFFE**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



NOW - G M B H . D E

Projektträger:



Literatur

1. Aatola H, Larimi M, Sarjovaara T, Mikkonen S (2009) Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO_x, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. SAE Int. J. Engines 1(1):1251–1262. doi:10.4271/2008-01-2500
2. Bortel I, Vávra J, Takáts M (2019) Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine. Renewable Energy 140:680–691. doi:10.1016/j.renene.2019.03.067
3. Dimitriadis A, Natsios I, Dimaratos A, Katsaounis D, Samaras Z, Bezergianni S, Lehto K (2018) Evaluation of a Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) and Effects on Emissions of a Passenger Car Diesel Engine. Front. Mech. Eng. 4. doi:10.3389/fmech.2018.00007
4. Lukas Heinz, Christian Böhmeke, Uwe Wagner, Thomas Koch (2024) Influence of regenerative Fuel Characteristics on Particle Raw Emissions. Postersession. 11. internationaler Motorenkongress, Baden-Baden
5. Parravicini M, Barro C, Boulouchos K (2021) Experimental characterization of GTL, HVO, and OME based alternative fuels for diesel engines. Fuel 292:120177. doi:10.1016/j.fuel.2021.120177
6. Preuß J, Munch K, Denbratt I (2021) Performance and emissions of renewable blends with OME3-5 and HVO in heavy duty and light duty compression ignition engines. Fuel 303:121275. doi:10.1016/j.fuel.2021.121275
7. Shukla PC, Shamun S, Gren L, Malmborg V, Pagels J, Tuner M (2018) Investigation of Particle Number Emission Characteristics in a Heavy-Duty Compression Ignition Engine Fueled with Hydrotreated Vegetable Oil (HVO). SAE Int. J. Fuels Lubr. 11(4):495–505. doi:10.4271/2018-01-0909
8. van Basshuysen R, Schäfer F (2015) Handbuch Verbrennungsmotor. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
9. K AP, Bernemyr H, Erlandsson A (2021) Comparison of Two Dilution and Conditioning Systems for Particle Number Measurements along the Exhaust After-Treatment System of an HD Diesel Engine SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States
10. Tang T, Cao D, Zhang J, Zhao Y, Shuai S (2014) Experimental Study of Catalyzed Diesel Particulate Filter with Exhaust Fuel Injection System for Heavy-Duty Diesel Engines SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States
11. Wu Y, Li H, Andrews G (2020) Particle Emissions and Size Distribution across the DPF from a Modern Diesel Engine Using Pure and Blended GTL Fuels SAE Technical Paper Series. SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States

12. Samaras Z, Rieker M, Papaioannou E et al (2022) Perspectives for regulating 10 nm particle number emissions based on novel measurement methodologies. Journal of Aerosol Science 162:105957. doi:10.1016/j.jaerosci.2022.105957
13. Samaras ZC, Andersson J, Bergmann A, Hausberger S, Toumasatos Z, Keskinen J, Haisch C, Kontses A, Ntziachristos LD, Landl L, Mamakos A, Bainschab M (2021) Measuring Automotive Exhaust Particles Down to 10 nm. SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility 3(1):539–550. doi:10.4271/2020-01-2209