

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postfach 49
2600 AA Delft
Niederlande

www.tno.nl

T 0031 88 - 866 30 00
F 0031 88 - 866 30 10

TNO report

TNO 2014 R10588

Beurteilung der Schadstoffemissionen bei Verwendung von Shell GTL Fuel als Ersatzkraftstoff in mittelschweren und schweren Nutzfahrzeugen, Binnenschiffen sowie mobilen Maschinen und Geräten

Datum	16. September 2014
Verfasser	Ruud Verbeek
Text-Nr.	2014-TM-RAP-0100154462
Anzahl Seiten	23 (einschließlich Anhänge)
Sponsor	Shell Downstream Commercial Nederland
Projektname	Shell
Projektnummer	060.07597

Alle Rechte vorbehalten.

Nichts aus diesem Prüfbericht darf ohne vorherige Zustimmung von TNO durch Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder auf andere Weise vervielfältigt und/oder veröffentlicht werden.

Wurde dieser Bericht im Auftrag erstellt, so sind auf die Rechte und Pflichten der vertragschließenden Parteien die "Allgemeinen Geschäftsbedingungen für Aufträge an TNO" beziehungsweise der zwischen den vertragschließenden Parteien diesbezüglich geschlossenen Vertrag anwendbar. Personen mit einem unmittelbaren Interesse darf der TNO-Bericht zur Einsichtnahme überlassen werden. Shell hat die Erlaubnis, den Bericht potenziellen Kunden vorzulegen. Siehe Schreiben 2014-TM-LTR-0100154460.

© 2015 TNO

Zusammenfassung

Alternative Kraftstoffe haben sich in den zurückliegenden Jahren zu einem aktuellen Thema entwickelt, vor allem deshalb, weil dies Möglichkeiten zur Senkung des Schadstoffausstoßes von Fahrzeugen, Schiffen und Maschinen eröffnet. Insbesondere städtische und kommunale Verwaltungen zeigen sich am Einsatz von alternativen Kraftstoffen und Elektroantrieben interessiert, um so jenen Bürgern eine bessere Luftqualität bieten zu können, die mit dieselbetriebenen Maschinen arbeiten oder sich in deren Nähe aufhalten.

In diesem Zusammenhang erhielt TNO von Shell den Auftrag, die verfügbaren Daten in Bezug auf die möglichen Vorteile von GTL Fuel ("Gas-to-Liquids") von Shell als Ersatzkraftstoff sowohl für vorhandene als auch neue gewerbliche Dieselfahrzeuge, Binnenschiffe und mobile Maschinen und Geräte durchzuarbeiten.

Die folgenden technischen Informationen lagen vor und wurden im Rahmen dieser Studie ausgewertet:

- Informationen aus früheren TNO-Veröffentlichungen
- Externe technische Veröffentlichungen
- Technische Berichte mit Testergebnissen aus der Untersuchung von Shell GTL Fuel

Auf der Grundlage dieser Betrachtung ergibt sich in Bezug auf den Einsatz von Shell GTL Fuel als Alternative für regulären Dieselmotorkraftstoff (EN590) das folgende Fazit:

- Beim Betrieb mit GTL Fuel fallen die gesetzlich regulierten Emissionen bei allen vier Schadstoffarten (NO_x, PM, CO und HC) geringer aus. Die Testergebnisse der einzelnen Versuchsprogramme fielen, wie dies aufgrund von Unterschieden zwischen den Motoren zu erwarten ist, unterschiedlich aus.
- Bei verhältnismäßig simplen Motorentechnologien, wie zum Beispiel Euro III Motoren, ergaben die Messungen eine Senkung des NO_x-Ausstoßes im Bereich von 5 bis 19 Prozent und eine PM-Senkung im Bereich von 10 bis 34 Prozent.
- Bei Motoren mit moderneren Emissionsminderungssystemen können die relativen Unterschiede bei den NO_x- und PM-Werten deutlicher ausfallen. Messungen mit Euro V SCR-Motoren ergaben je nach Motortyp und Prüfzyklus NO_x-Senkungen im Bereich von 5 bis 37 Prozent und PM-Senkungen von bis zu 33 Prozent. Die vergleichsweise großen Spannen sind auf die geringe Menge der Emissionen sowie den Umstand zurückzuführen, dass Emissionsminderungssysteme wie beispielsweise die AdBlue-Dosierung je nach Auslegung des Systems unterschiedlich auf GTL Fuel reagieren. Für Euro VI Motoren lagen keine Daten vor.
- Bei den relativ konventionellen Schiffsmaschinen ergaben die Messungen NO_x-Verbesserungen im Bereich von 8 bis 13 Prozent sowie PM-Werte, die um 15 bis 60 Prozent niedriger waren.
- Für mobile Maschinen und Geräte lagen kaum Daten vor. Allerdings dürften die Emissionssenkungen angesichts der positiven Ergebnisse der Tests mit GTL Fuel bei einer Vielzahl von Motoren in Kombination mit den Eigenschaften von GTL Fuel und den damit verbundenen positiven Verbrennungseffekten, mit den bei schweren Nutzfahrzeugen festgestellten Werten vergleichbar sein.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Schadstoffemissionen der vorhandenen Fahrzeugflotten durch den Einsatz von GTL Fuel deutlich gesenkt werden können. Es ist ein sofortiger Effekt, der eine Alternative zum Einsatz neuerer oder schadstoffärmerer Fahrzeuge, Schiffe oder Maschinen darstellt oder auch als ergänzende Maßnahme angewendet werden kann. Absolut gesehen sind die größten Emissionssenkungen beim Betrieb schadstoffreicherer Motoren zu erzielen, wie sie in älteren Fahrzeugen oder in Schiffen oder mobilen Maschinen anzutreffen sind.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
1 Einführung.....	5
2 Effekt von GTL Fuel auf Verbrennung und Emissionen.....	7
2.1 Technische Daten von Shell GTL Fuel.....	7
2.2 Effekt von GTL Fuel auf die Verbrennung.....	7
2.3 Ergebnisse aus früheren Studien	8
2.4 GTL Fuel Effekt bei Schiffsmotoren.....	10
2.5 GTL Fuel und moderne Abgasreinigungssysteme	10
3 Emissionen von mittelschweren und schweren Nutzfahrzeugen	11
3.1 Abgasnormen	11
3.2 Emissionsminderungstechniken	11
3.3 Effekt von GTL Fuel auf den Schadstoffausstoß.....	12
4 Emissionen von Binnenschiffen	14
4.1 Abgasnormen	14
4.2 Emissionsminderungstechniken	14
4.3 Effekt auf den Schadstoffausstoß.....	15
5 Emissionen von mobilen Maschinen.....	17
5.1 Abgasnormen	17
5.2 Emissionsminderungstechniken	18
5.3 Effekt auf den Schadstoffausstoß.....	18
6 Fazit.....	20
7 Quellen.....	21
8 Unterschrift	23

1 Einführung

Alternative Kraftstoffe haben sich in den zurückliegenden Jahren zu einem aktuellen Thema entwickelt, vor allem weil sich damit Möglichkeiten zur Senkung des Schadstoffausstoßes von Fahrzeugen, Schiffen und Maschinen bieten. Insbesondere städtische und kommunale Verwaltungen zeigen sich am Einsatz von alternativen Kraftstoffen und Elektroantrieben interessiert, um so jenen eine bessere Luftqualität bieten zu können, die mit dieselbetriebenen Maschinen arbeiten oder sich in deren Nähe aufhalten.

TNO war in den vergangenen Jahren an einer Reihe von Studien in den Niederlanden beteiligt, in denen GTL Fuel als möglicher Kraftstoff aufgeführt wurde:

- "Natural gas in transport: evaluation of all transport modalities" (Erdgas im Verkehrswesen: Beurteilung aller Verkehrsträger)
- Informationsblatt "Brandstoffen voor het wegvervoer" (Kraftstoffe für den Straßenverkehr)
- Informationsschrift "Rondvaart Amsterdam" (Grachtenboote in Amsterdam)

Shell vertritt die Auffassung, dass GTL Fuel eine geeignete Möglichkeit zur Senkung der Schadstoffemissionen zahlreicher verschiedener Motoren von Alt- wie Neufahrzeugen sowie Schiffen und Maschinen darstellt. Um seine Kunden mit unabhängigen Daten versorgen zu können, hat Shell TNO damit beauftragt, vorhandene und neue technische Informationen zu untersuchen und die Effekte von GTL Fuel zusammenfassend in einem Bericht zu beschreiben, der den folgenden drei Marktbereichen gewidmet ist:

- Gewerblicher Verkehr
- Binnenschifffahrt
- Mobile Maschinen und Geräte

Für diese Studie wurden die folgenden technischen Informationen ausgewertet:

- Informationen aus früheren TNO-Veröffentlichungen, insbesondere:
 - o Natural gas in transport: an assessment of different routes (Erdgas im Verkehrswesen: eine Beurteilung verschiedener Durchführungswege) [TNO/ECN/CE Delft 2013]
 - o Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles (Effekt von Biokraftstoffen auf die Luftschadstoffemissionen von Straßenfahrzeugen) [TNO/CE 2009], [TNO/CE 2008]
- Technische Veröffentlichungen von Shell, wie zum Beispiel SAE-Veröffentlichungen
- Technische Berichte mit Testergebnissen zum Thema GTL Fuel. Diese wurden zum überwiegenden Teil von unabhängigen Prüfern durchgeführt.

In Abschnitt 2 dieses Berichtes finden sich allgemeine Informationen über GTL Fuel und ein Überblick über die Ergebnisse früherer Studien zu diesem Thema. Die Abschnitte 3, 4 und 5 enthalten die spezifischen Angaben über schwere Nutzfahrzeuge, Binnenschiffe und mobile Maschinen und Geräte. Abschließend folgt in Abschnitt 6 ein allgemeines Fazit.

Die Beurteilungen in diesem Bericht richten sich speziell auf den Einfluss von GTL Fuel bei deren Verwendung als Ersatzkraftstoff¹.

¹ Ein Motor kann auch für den Betrieb mit GTL Fuel optimiert werden. In diesem Fall bieten sich bestimmte zusätzliche Vorzüge wie ein geringerer Verbrauch von Kraftstoff und/oder AdBlue sowie möglicherweise niedrigere Emissionswerte. Unter Umständen sind nicht alle der genannten Vorteile gleichzeitig erzielbar.

2 Effekt von GTL Fuel auf Verbrennung und Emissionen

2.1 Technische Daten von Shell GTL Fuel

GTL Fuel ist ein paraffinischer Dieselmotorkraftstoff. Im Jahr 2012 wurde eine eigene Technische Spezifikation für paraffinische Dieselmotorkraftstoffe aufgestellt. Sie trägt die Bezeichnung TS 15940 und folgt auf das frühere "CEN Workshop Agreement CWA 15940" (2009). Die technische Regel TS 15940 wurde vor kurzem aktualisiert und zur Norm prEN 15940 erhoben, dies war die letzte Stufe auf dem Weg zu einer EN-Norm. CEN prEN 15940 gilt sowohl für eine Reihe paraffinischer Fossilbrennstoffe sowieerneuerbare Brennstoffe, darunter GTL, CTL (Coal to Liquid), BTL (Biomass To Liquid) und HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, hydriertes Pflanzenöl).

Tabelle 1: Typische Eigenschaften von EN 590-Diesel (0 % FAME (Fettsäuremethylester)) und Shell GTL Fuel. Quelle: [Kind 2010]

Merkmal	Einheit	EN 590 Diesel	Shell GTL Fuel
Dichte (15 °C)	kg/m ³	830	775*
Viskosität (40 °C)	mm ² /s	2,9	2,45
Cetanzahl	CFR	56	> 70
Siedebeginn	°C	170	200
Siedeende	°C	360	310
Schwefel	mg/kg	< 10	0
Wasserstoffgehalt	% w	13,6	14,7
Kohlenstoffgehalt	% w	86,3	85,2
Spezifischer Heizwert	MJ/kg	42,9	44,0
	MJ/l	35,6	34,1
FAME-Gehalt	%	0	0

* Der typische Durchschnittswert der derzeitigen Produkte beträgt 778 kg/m³.

2.2 Effekt von GTL Fuel auf die Verbrennung

Bei dem GTL Fuel von Shell handelt es sich um einen als "paraffinischen Dieselmotorkraftstoff" eingestuften Fischer-Tropsch-Diesel. Ein weiterer paraffinischer Dieselmotorkraftstoff ist zum Beispiel hydriertes Pflanzenöl (HVO, Hydrotreated Vegetable Oil). Das Studium einer recht großen Zahl von Veröffentlichungen lässt den Schluss zu, dass paraffinische Kraftstoffe einen ähnlichen Effekt auf die Verbrennung im Dieselmotor haben. Sie verfügen über eine hohe Cetanzahl, was den Zündverzug bei der Verbrennung verkürzt. Die Verbrennung setzt dadurch im Verlauf der Einspritzphase früher und sanfter ein. Die gleichmäßigere Verbrennung führt meistens zu einer besseren Vermischung und einer homogeneren Verbrennung, was zu entsprechend niedrigeren NOx- und PM-Emissionen und einem geringeren Motorgeräusch führt [Kitano 2005].

2.3 Ergebnisse aus früheren Studien

In den Jahren 2008 und 2009 wurden zahlreiche Veröffentlichungen zum Thema GTL- und Fischer-Tropsch-Kraftstoff für die niederländischen "BOLK"-Projekte ausgewertet [TNO/CE 2009], [TNO/CE 2008]. Die Ergebnisse dieser Analysen sind untenstehend in den Abbildungen 1 (für Nfz-Motoren) und 2 (für Pkw-Motoren) dargestellt. Bei allen Motoren handelte es sich um relativ konventionelle Motoren in den Kategorien bis Euro V. Aus den Abbildungen 1 und 2 geht ganz allgemein hervor, dass der Betrieb mit GTL Fuel zu einem geringeren Ausstoß aller gesetzlich regulierten Substanzen führt: NO_x, Partikel (PM), CO und HC.

Die Senkung der PM- und CO-Werte bewegt sich allgemein im Bereich von 0 bis 40 Prozent; bei den NO_x- und HC-Werten liegt die Senkung allgemein im Bereich von 0 bis 20 Prozent.

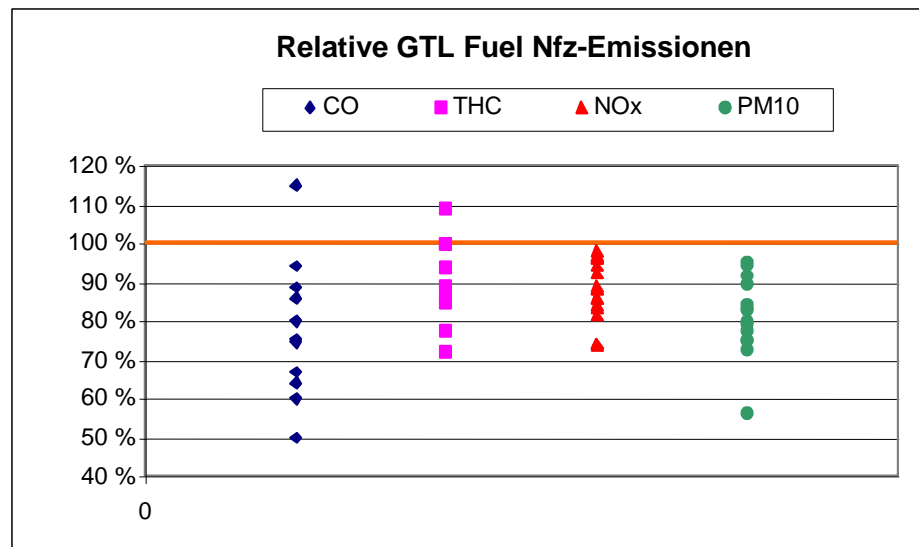


Abbildung 1: Abgasemissionen aus Nfz-Motoren im GTL Fuel Betrieb [Alleman 2003], [Clark 2005], [Krahl 2005], [Thompson 2004], Quelle: [TNO/CE 2008]

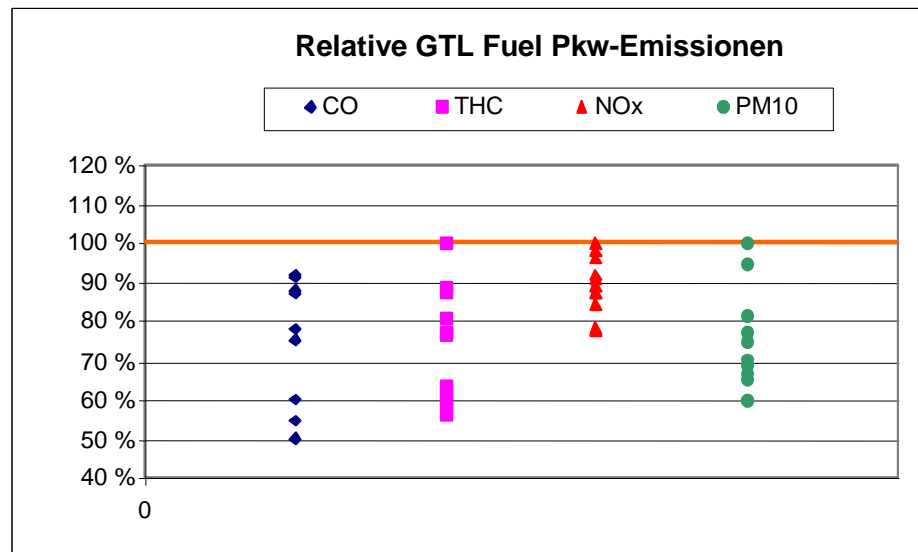


Abbildung 2: Abgasemissionen aus Pkw-Motoren im GTL Fuel Betrieb [Alleman 2003], [Kitano 2007], [Schaberg 2005]. Quelle [TNO/CE 2008].

Später wurden, zum Teil unter Nutzung derselben Veröffentlichungen, mehrere Quellen ausgewertet, um festzustellen, inwiefern sich ein GTL Fuel Betrieb auf die Emissionen auswirkt, wenn verschiedene moderne Abgasreinigungstechniken wie AGR und SCR (mit AdBlue-Einspritzung) zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse sind untenstehend in Tabelle 2 aufgeführt. Siehe Alleman 2003, Krahl 2005, Thompson 2004, Clark 2005a, Clark 2005b, Clark 2001. Theoretisch gesehen sind Unterschiede zwischen AGR (interne Maßnahme für Motor und Verbrennung) und SCR (Nachbehandlungsmaßnahme) zu erwarten. Bei der SCR ist wegen der Nachbehandlung ein gewisse Verstärkung der Änderung der von dem Motor ausgestoßenen NOx-Menge zu erwarten, wenn die Steuerung der AdBlue-Einspritzung bei den SCR-Motoren verhältnismäßig einfach ausgeführt ist (dies ist bei Motoren der Kategorien Euro IV und V allgemein der Fall). Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass die NOx-Senkung mit durchschnittlich 19 Prozent bei SCR-Motoren tatsächlich relativ hoch ausfällt. AGR-Motoren der Kategorie Euro IV sprechen mit ähnlichen NOx-Minderungswerten an wie Motoren nach Euro III und älter. Die PM-Reduktion fällt recht groß aus, denn sie beträgt bei den untersuchten Motoren durchschnittlich 29 Prozent (zwei Motoren).

Tabelle 2: Durchschnittliche Emissionssenkung im GTL-Betrieb gegenüber Dieselpetrieb bei unterschiedlicher Motorentechnik; Euro III und älter, Euro IV mit AGR und Euro V mit SCR.

Durchschnittsemissionen*	CO	HC	NOx	PM10
Euro III und älter	14 %	23 %	11 %	21 %
Euro IV AGR	19 %	15 %	12 %	29 %
Euro V SCR	25 %	entfällt	17 %	23 %

* Siehe Tabelle 5, Abschnitt 3.3, für die Bandbreite der Emissionssenkung.

2.4 GTL Fuel Effekt bei Schiffsmotoren

Es wurden Messergebnisse für den Betrieb mit Shell GTL Fuel auf zwei Schiffen vorgelegt [SGS 2013, 2014], die mit dem gleichen Maschinentyp ausgerüstet waren. Diese Messungen erfolgten zum Teil anhand von zwei unterschiedlichen Kalibrierungen des Motors, wie sie typisch sind um die höheren Anforderungen an NO_x Grenzwerten nach CCNR I oder CCNR II einzuhalten.

Die genannten Messungen ergaben die folgende Emissionssenkung bei GTL Fuel Betrieb im Vergleich zu EN 590 Dieselmotoren:

- NO_x: Senkung im Bereich von 8 bis 13 Prozent
- PM: Senkung im Bereich von 15 bis 60 Prozent

Siehe Abschnitt 4.3 für eine vollständige Beschreibung.

2.5 GTL Fuel und moderne Abgasreinigungssysteme

In [Liebig 2009] wurde umfassend untersucht, welchen Einfluss GTL und BTL auf die Regenerationseigenschaften eines Pkw-Dieselmotors haben. Dazu zählten auch die Beladung des DPF, die Regenerationsintervalle und die resultierenden Temperaturen. Man kam zu dem Schluss, dass die Regenerationsintervalle für das Partikelfiltersystem von Volkswagen, vermutlich wegen der geringeren Rußbelastung im Verlauf der Nutzung, um 70 Prozent verlängert werden konnten. Die Temperatur während des Regenerationsvorgangs wich im GTL Fuel Betrieb nicht wesentlich von der Temperatur bei Dieselbetrieb ab. Die Verlängerung des Regenerationsintervalls wirkt sich günstig auf den Kraftstoffverbrauch und möglicherweise (oder wahrscheinlich) auf die Kosten der Motorwartung aus. Letzteres hängt damit zusammen, dass der Motor bei der Regeneration einer verhältnismäßig hohen thermischen Belastung ausgesetzt wird, was die Eigenschaften des Motoröls beeinträchtigen kann. Der positive Einfluss auf die Regeneration des Dieselpartikelfilters könnte vor allem für mobile Maschinen mit Motoren von Bedeutung sein, die nach Stufe IIIB der geltenden Emissionsvorschriften zugelassen sind (siehe Abschnitt 5). Bei Motoren, die nach Stufe IIIB zugelassen sind, kommen im Allgemeinen Dieselpartikelfilter zum Einsatz. Beim Betrieb mobiler Maschinen treten starke Schwankungen der Durchschnittslast auf und es kommt außerdem regelmäßig zu einem längeren Betrieb im unteren Teillastbereich. Diese Bedingungen machen eine häufigere DPF-Regeneration erforderlich, und der Einsatz von GTL wirkt diesem Effekt wahrscheinlich entgegen. Spezifische Versuchsdaten, mit denen diese Vermutung untermauert werden kann, sind erwünscht.

Mehrere Nutzfahrzeughersteller unterstützen formell den Betrieb ihrer Motoren mit GTL Fuel. Einer der weltgrößten Hersteller von Kraftstoffeinspritzanlagen hat seine Produkte mit Fischer-Tropsch-Diesel (GTL) getestet und dabei Folgendes festgestellt: Die erzielten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Eigenschaften von F-T-Kraftstoff mindestens denen von herkömmlichen kohlenwasserstoffhaltigen Kraftstoffen vergleichbar und diesen in mehreren Punkten überlegen sind [Delphi 2010].

3 Emissionen von mittelschweren und schweren Nutzfahrzeugen

3.1 Abgasnormen

Ein Überblick über die in Europa für mittelschwere und schwere Nutzfahrzeuge geltenden Abgasbestimmungen ist in der untenstehenden Tabelle 3 enthalten. Nfz-Motoren kommen in Lkw und Bussen mit einem Fahrzeuggesamtgewicht von mehr als 3,5 Tonnen zum Einsatz. Euro VI gilt derzeit für alle Neufahrzeuge, die auf den Markt gebracht werden.

Tabelle 3: Übersicht der europäischen Emissionsgrenzen für Motoren in schweren Nutzfahrzeugen und Bussen (Fahrzeuggesamtgewicht > 3.500 kg)

Datum	Prüfzyklus	Einheit	CO	NMHC	NO _x	PM	PN (#/kWh)
Euro IV 2005	ESC	g/kWh	1,5	0,46	3,5	0,02	
	ETC	g/kWh	4,0	0,55	3,5	0,03	
Euro V 2008	ESC	g/kWh	1,5	0,46	2,0	0,02	
	ETC	g/kWh	4,0	0,55	2,0	0,03	
Euro VI 2013 ¹⁾	WHSC	mg/kWh	1500	-	400	10	8x10 ¹¹
	WHTC	mg/kWh	4000	160	460	10	6x10 ¹¹

1) Stichtag ist der 31.12.2012 für neue Typgenehmigungen, 1 Jahr später gilt die Norm für alle Anmeldungen.

3.2 Emissionsminderungstechniken

In Tabelle 4 werden die für schwere Nutzfahrzeuge eingesetzten Emissionsminderungstechniken im Überblick aufgeführt. Für jede der drei genannten Euro-Klassen werden im Wesentlichen zwei unterschiedliche Optionen angewendet.

Die selektive katalytische Reduktion von NO_x mittels AdBlue-Einspritzung vor dem Katalysator ist die dominierende Lösung in den Emissionsklassen Euro IV, Euro V und Euro VI. Die Abgasrückführung (AGR) wird, wie aus der Tabelle ersichtlich ist, in einem kleineren Teil der Euro-IV- und Euro-V-Fahrzeuge angewendet. Bei den meisten Euro-VI-Lösungen werden diese Verfahren in Kombination angewendet, um den NO_x-Ausstoß zu senken, während zudem ein Wandstrom-Partikelfilter eingebaut ist.

Tabelle 4: Für schwere Nutzfahrzeuge eingesetzte Abgasreinigungstechniken

Emissionsklasse	Möglichkeiten der Emissionsregelung	Geschätzter Marktanteil
Euro IV	SCR	75 %
	AGR + Oxidationskatalysator oder Dieselpartikelfilter	25 %
Euro V	SCR	95 %
	AGR + Oxidationskatalysator oder Dieselpartikelfilter	5 %
Euro VI	AGR + SCR + DPF	90 %
	SCR + DPF	10 %

SCR = selektive katalytische Reduktion von NOx. AGR = Abgasrückführung. DPF = Dieselpartikelfilter.

3.3 Effekt von GTL Fuel auf den Schadstoffausstoß

Welchen Einfluss GTL Fuel von Shell auf den Schadstoffausstoß hat, zeigt die untenstehende Tabelle 5 im Überblick. Darin werden die Werte für die Abgasklassen Euro III, IV und V aufgeführt. Angegeben ist die prozentuale Verringerung im Vergleich zu standardmäßigem Dieseldieselkraftstoff. Sowohl für die NOx- als auch die PM-Emissionen sind zwei Spalten aufgeführt. Die erste Spalte enthält die auf dem Motorprüfstand unmittelbar gemessenen Ergebnisse, während in der zweiten Spalte ein prognostizierter Wert für die simulierte (reale) Fahrt in den Niederlanden aufgeführt ist. Daraus folgt, dass in diesem Wert nicht alle Fahrzustände wiedergegeben werden. Die Berechnung stützt sich auf die durchschnittliche Senkung der vom Motor ausgestossenen Abgasemissionen zusammen mit der geschätzten NOx-Reduktion des SCR-Katalysators. Die Motorprüfergebnisse werden allgemein während der Typgenehmigungsprüfungen gemessen. In diesen Tests erfolgt die Messung bei relativ hoher Last (höher als bei durchschnittlicher Fahrweise). Dennoch liegen die für reale Fahrt prognostizierten Ergebnisse sehr nahe bei den im Prüfstand gemessenen Ergebnissen.

Tabelle 5: Senkung der NOx- und PM-Emissionen im GTL Fuel Betrieb gegenüber standardmäßigem Diesel. Aufgeführt sind die in einer Prüfzelle gemessene Bandbreite und ein prognostizierter Wert für Fahrzustände in den Niederlanden.

prozentuale Senkung im GTL Fuel Betrieb	NOx		Partikel	
	Bandbreite Motorprüfzelle	Prognose für simulierte Fahrzustände	Bandbreite Motorprüfzelle	Prognose für simulierte Fahrzustände
Euro III	5 – 19	12	10 – 34	21
Euro IV	5 – 22	14 – 19	20 – 38	20
EURO V	5 – 37	15 – 23	22 – 33	18

Weitere Informationen zu den Euro-V-Motoren sind in Abbildung 3 enthalten. Sie bietet einen Überblick über die Schadstoffemissionen im GTL Fuel Betrieb, verglichen mit standardmäßigem Diesel nach EN 590 (in den meisten Fällen mit 10 ppm Schwefel). Siehe [Shell 2013], [Thompson 2004], [Clark 2005a] und [Clark 2005b].

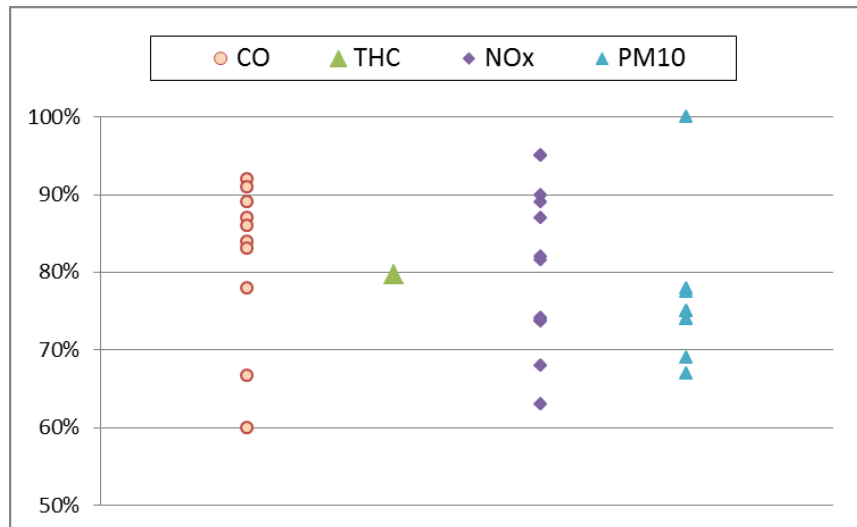


Abbildung 3: Emissionen im GTL Fuel Betrieb gegenüber standardmäßigem Diesel bei Euro-V-Motoren (EN 590 = 100 Prozent). Der PM-Wert von 100 Prozent (Emissionsenkung 0 Prozent) bezieht sich auf einen Sonderzyklus (Müllfahrzeugzyklus).

In Tabelle 5 und Abbildung 3 ist zu sehen, dass die relativen Emissionsschwankungen, insbesondere der NOx-Werte, bei Euro-V-Motoren größer ausfallen als bei Euro-III- und Euro-IV-Motoren. Dies hängt damit zusammen, dass die absoluten Werte niedriger sind, und wahrscheinlich auch mit den Unterschieden zwischen den einzelnen Motoren bezüglich der Regelcharakteristik des SCR-Katalysators (vor allem des exakten Ansprechverhaltens der AdBlue-Dosierung aufgrund des Betriebs mit GTL Fuel).

Für Euro-VI-Motoren wurden keine Ergebnisse mit GTL Fuel vorgelegt. Die NOx-Vorgaben für Euro VI sind um nahezu den Faktor 5 strenger als für Euro V. Motoren der Kategorie Euro VI verfügen höchstwahrscheinlich über einen geschlossenen Regelkreis hinsichtlich NOx, was mögliche Verbesserungen der NOx-Werte ausschließt. Eine solche Regelung wird jedoch der Erwartung nach nicht dazu führen, dass keinerlei Unterschiede mehr feststellbar sind², weshalb der Einsatz von GTL Fuel auch in diesem Fall noch zu einer geringfügigen NOx-Reduktion führen dürfte. Bis auf Weiteres wird, nachdem keine Daten von der Motorprüfzelle vorliegen, festgestellt, dass der NOx-Ausstoß im GTL Fuel Betrieb wahrscheinlich leicht gesenkt wird, wenngleich die genaue Menge ungewiss ist. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass die NOx-Werte gemäß Euro VI derart niedrig sind, dass eine diesbezügliche NOx-Reduktion von geringerer Bedeutung ist als Verbesserungen bei älteren Motoren.

² Es wurden mehrere Berechnungen angestellt, aus denen hervorgeht, dass ein geschlossener Regelkreis 75 bis 90 Prozent der Schwankungen der aus dem Motor austretenden NOx-Menge ausgleichen würde. Die verbleibenden 10 bis 25 Prozent ergäben eine NOx-Reduktion am Auspuff von ungefähr 10 Prozent.

4 Emissionen von Binnenschiffen

4.1 Abgasnormen

Die untenstehende Tabelle 6 enthält eine Übersicht der allgemein geltenden Bestimmungen für Rheinschiffe. Für die NO_x-Werte von Motoren mit einer Leistung von mehr als 560 kW wird eine Bandbreite angegeben. Der NO_x-Wert richtet sich nach der Höchstdrehzahl (n_{\max}), wobei die folgenden Gleichungen gelten:

- CCNR1: NO_x-Obergrenze beträgt $45 n_{\max}^{-0.2}$ (g/kWh)
- CCNR2: NO_x-Obergrenze beträgt $45 n_{\max}^{-0.2} - 3$ (g/kWh)

Der jeweils höchste Tabellenwert entspricht einer Maschine mit einer maximalen Drehzahl von 600 U/min. Die NO_x-Obergrenze fällt umso niedriger aus, je höher die Drehzahl ist.

Tabelle 6: Übersicht der Emissionsgrenzwerte für Rheinschiffe gemäß RheinSchUO

Datum	Stufe	Höchstleistung (kW)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	PT (g/kWh)
2003	CCNR1	130 - 560	5,0	1,3	9,2	0,54
		> 560	5,0	1,3	9,2 - 12,5	0,54
2007	CCNR2	130 - 560	3,5	1,0	6,0	0,2
		> 560	3,5	1,0	6 - 9,5	0,2

In Zukunft werden die Emissionsvorschriften für Binnenschiffe in Europa in die Richtlinie 97/68/EG für mobile Maschinen und Geräte aufgenommen, in der ihnen ein gesonderter Abschnitt gewidmet wird. Über die zukünftigen Emissionsgrenzen wird seit geraumer Zeit debattiert. In (Quispel 2013) wurden unter anderem die Stufen 4B und 5 mit Emissionsgrenzen für die Jahre 2017 beziehungsweise 2022 vorgeschlagen. Die Grenzwerte für NO_x betragen darin 1,2 beziehungsweise 0,4 g/kWh, die PM-Grenzwerte liegen bei 0,02 beziehungsweise 0,01 g/kWh. Wenn diese Vorgaben tatsächlich umgesetzt werden, erreichen die Emissionsgrenzen für Binnenschiffe bis zum Jahr 2022 nahezu das für schwere Nutzfahrzeuge und mobile Maschinen und Geräte geltende Niveau.

4.2 Emissionsminderungstechniken

Bis zum Jahr 2003 wurden die Motoren im Wesentlichen auf optimalen Verbrauch ausgelegt, was zu einem verhältnismäßig hohen Ausstoß von etwa 9 bis 12 Gramm NO_x/kWh führte. Eine Zulassung nach CCNR2 erforderte eine NO_x-Reduktion von 25 bis 30 Prozent. Dies geschah größtenteils durch die Optimierung der Kraftstoffeinspritzparameter, wodurch eine Verbrennung mit dem vorgeschriebenen niedrigeren NO_x-Ausstoß erreicht wurde. Es waren keine speziellen Methoden zur NO_x-Reduktion wie AGR (Abgasrückführung) oder DeNO_x-Katalysatoren erforderlich.

Dies wird sich mit den Gesetzesvorlagen für Stufe 4 und Stufe 5 ändern.

Im Zuge dieser Verschärfung sind die folgenden Emissionsminderungstechniken zu erwarten, die denen für schwere Nutzfahrzeuge der Kategorien Euro V und Euro VI entsprechen:

- Für Stufe 4B: SCR-DeNOx-Katalysator
- Für Stufe 5: SCR-DeNOx-Katalysator mit Dieselpartikelfilter

4.3 Effekt auf den Schadstoffausstoß

Für die Hauptmaschinen von zwei Binnenschiffen sowie für zwei Hilfsmaschinen lagen detaillierte Messprotokolle für GTL Fuel von Shell vor. Bei den Schiffen handelt es sich um die MS INVADO und die NOVAMENTE, zwei repräsentative holländische Binnenschiffe mit einer Länge von 110 beziehungsweise 135 Metern. Die Messungen wurden von einem unabhängigen Dienstleistungsunternehmen, der SGS Environmental Services, durchgeführt und von Shell Global Solutions sowie VIDOL Marine in Auftrag gegeben [SGS 2013], [SGS 2014]. Beide Schiffe wurden im Betrieb mit GTL Fuel und EN 590 Diesel getestet. Die Maschine der INVADO wurde ursprünglich nach CCNR0 zugelassen, erfüllt aber die Vorgaben von CCNR1. Die NOVAMENTE ist nach CCNR1 zugelassen. Die Emissionsreduktionen aller Messungen im GTL Fuel Betrieb gegenüber standardmäßigem Dieselmotorkraftstoff gemäß EN 590 sind in der untenstehenden Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Emissionsreduktion bei GTL Fuel Betrieb im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff bei Schiffsmotoren. Quelle: [SGS 2013], [SGS 2014], [Pon 2008]

		Motor-kategorie	Messung	Jahr	CO	HC	NOx	PM	Schwarz-rauch
Binnenschiff: MS Invado, Caterpillar 3512B, 1.119 kW bei 1600 U/min	Motor-kalibrierung „Verbrauchs optimiert“	CCR0	SGS	2013	0 %	10 %	8 %	37 %	
	Motor-kalibrierung „NOx optimiert“	CCR2*	SGS	2013	0 %	10 %	13 %	16 %	
Binnenschiff NOVAMENTE, Caterpillar 3512B, 1.014 kW bei 1600 U/min		CCR1	SGS	2013	11 %	≈ 50 %	10 %	≈ 60 %	
Caterpillar D3408 Schiff-Hilfsmaschine, 250 kW bei 1.500 U/min		-	PON	2008	17 %	-	≈ 4 %	-	32 %
Caterpillar 3408 Schiff-Hilfsmaschine, 320 kW bei 1.500 U/min		-	PON	2006	15,3 %	-	8,9 %	20,7 %	

* Eigentlich nach CCNR0 zugelassen, jedoch mit spezieller Software ausgestattet, um die CCNR2-Vorgaben zu erfüllen.

Aus Tabelle 7 geht hervor, dass die prozentualen Werte der Emissionsreduktion im GTL Fuel Betrieb für die einzelnen Schadstoffe sehr unterschiedlich ausfallen.

Durchschnittswert und Schwankungsbreite sind jedoch den bei Nfz-Motoren erzielten Werten, wie sie in Tabelle 1 aufgeführt sind, sehr ähnlich. Betrachtet man die auf den Schiffen gesammelten Messergebnisse, so könnte die PM-Senkung geringfügig größer sein als bei Nfz-Motoren, die Gründe dafür sind jedoch noch nicht bekannt. Zu beachten ist, dass auf Schiffen bisher nur wenige Messungen stattgefunden haben und diese auf Caterpillar-Motoren in verschiedenen Ausführungen beschränkt sind.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse (Tabelle 7) wird festgestellt, dass für die Emissionen aus Schiffsmaschinen (CCNR0 und CCNR1) im GTL Fuel Betrieb die folgenden Reduktionsspannen ermittelt wurden:

NOx: ~ 8 bis 13 Prozent
PM: ~ 15 bis 60 Prozent
CO: ~ 0 bis 20 Prozent
HC: ~ 10 bis 50 Prozent

5 Emissionen von mobilen Maschinen

5.1 Abgasnormen

Die Bestimmungen für Non-Road-Fahrzeuge sind in http://www.dieselnet.com/tech/text/dir_1997_68_ec.pdf der Richtlinie 97/68/EG und darauf folgenden Direktiven enthalten. Diese Richtlinie beschreibt eine große Zahl von Motorkategorien, u.a. für Lokomotiven und Binnenschiffe, die in gesonderten Abschnitten aufgeführt sind.

Die Stufen I und II (Richtlinie 97/68/EG) bildeten die ersten europäischen Rechtsvorschriften für mobile Maschinen und Geräte (NRMM, non-road mobile machinery). Die Stufen III und IV (Richtlinie 2004/26/EG) umfassten die Stufen IIIA und IIIB für das Bahnwesen. Mit der Richtlinie 2010/22/EU werden die bisher für Acker- und Forstraktoren geltenden Rechtsvorschriften geändert.

Die Richtlinie 2004/26/EG umfasst die folgenden Stufen:

- Stufe III A deckt Motoren von 19 bis 560 kW ab und umfasst Motoren mit konstanter Drehzahl, Triebwagen, Lokomotiven und Binnenschiffe.
- Stufe III B deckt Motoren von 37 bis 560 kW ab und umfasst Triebwagen und Lokomotiven.
- Stufe IV deckt Motoren von 56 bis 560 kW ab.

Für Motorleistungen oberhalb von 560 kW gibt es bisher keine Grenzwerte. Siehe <http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php> für eine vollständige Übersicht der Motorkategorien und Grenzwerte.

Die Grenzwerte und deren Inkrafttreten fallen für Non-Road-Fahrzeuge je nach Motorkategorie sehr unterschiedlich aus. Darüber hinaus variieren die Motorkategorien je nach Emissionsstufe. Die Zeitpunkte für das Inkrafttreten der einzelnen Stufen und die Leistungskategorien werden in der untenstehenden Abbildung 4 grafisch wiedergegeben.

Motorkategorien Nettoleistung (kW)	Stufe III A			Stufe III B		Stufe IV				
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
19 ≤ P < 37	7,5 (NO _x +HC) / 5,5 (CO) / 0,6 (PM) [g/kWh]						in Vorbereitung			
37 ≤ P < 75	4,7 (NO _x +HC) / 5,0 (CO) / 0,4 (PM) [g/kWh]			4,7 (NO _x +HC) / 5,0 (CO) / 0,025 (PM) [g/kWh]						
75 ≤ P < 130	4,0 (NO _x +HC) / 5,0 (CO) / 0,3 (PM) [g/kWh]		3,3 (NO _x) / 0,19 (HC) / 5,0 (CO) / 0,025 (PM) [g/kWh]			0,4 (NO _x) / 0,19 (HC) / 5,0 (CO) / 0,025 (PM) [g/kWh]				
130 ≤ P < 560	4,0 (NO _x +HC) / 3,5 (CO) / 0,2 (PM)	2,0 (NO _x) / 0,19 (HC) / 3,5 (CO) / 0,025 (PM) [g/kWh]				0,4 (NO _x) / 0,19 (HC) / 3,5 (CO) / 0,025 (PM) [g/kWh]				
P > 560 *	6,0-7,4 (NO _x) / 0,4-0,5 (HC) / 3,5 (CO) / 0,2 (PM) [g/kWh]		entspricht den US-Grenzwerten (Tier 3) 4,0 (NO _x +HC) / 3,5 (CO) / 0,025 (PM) [g/kWh]*			in Vorbereitung – soll den US-Emissionsgrenzen (Tier 4) entsprechen				

Abbildung 4: Grenzwerte und Datum des Inkrafttretens von fünf Motorkategorien für Non-road-Motoren [Quelle: Shell]

* nur für Triebwagen, Streckenlokomotiven und Rangierlokomotiven

5.2 Emissionsminderungstechniken

Die untenstehende Tabelle 8 bietet einen Überblick über die zur Emissionssenkung eingesetzten Techniken. Die letzte Spalte wurde zum Vergleich mit den für schwere Nutzfahrzeuge geltenden Rechtsvorschriften aufgenommen. Darin ist die Euro-Klasse aufgeführt, die ungefähr der jeweiligen Abgaskategorie entspricht. Die Emissionsminderungstechniken für Non-Road-Fahrzeuge entsprechen im Allgemeinen den bei schweren Nutzfahrzeugen angewandten Verfahren. Ein Unterschied besteht darin, dass bei Non-Road-Fahrzeugen zumeist die Abgasrückführung (AGR) als wichtigstes Mittel zur NO_x-Senkung verwendet wird, während dies bei schweren Nutzfahrzeugen meistens durch die Nachbehandlung in einem SCR-DeNO_x-Katalysator geschieht. So setzen etwa einige Hersteller von Lokomotivmotoren AGR und SCR sowie optional DPF-Systeme ein, während andere nur auf AGR und eine zweistufige Turboaufladung (ohne SCR und DPF) setzen, um die Anforderungen der Stufe IIIB zu erfüllen. Allgemein werden Partikelfilter öfter eingesetzt als bei Straßenfahrzeugen (bis zur Kategorie Euro V).

Tabelle 8: Emissionsgrenzwerte und Emissionsminderungstechniken für zwei Kategorien von Non-Road-Motoren

Jahr	Stufe	Leistung kW	NO _x g/kWh	PM g/kWh	Technik	≈ schweres Nfz
2006	III A	> 130	4*	0,2	AGR oder SCR (optional)	Euro III
2007		< 130	4*	0,3	Verbrennungsoptimierung	
2011	III B	> 130	2	0,025	SCR, AGR, AGR+SCR, AGR + DPF	Euro V
2012		< 130	3,3	0,025	AGR, AGR + DPF	Euro IV
2014	IV		0,4	0,025	AGR + SCR DPF optional	Euro VI

* NO_x + HC

5.3 Effekt auf den Schadstoffausstoß

Der Einsatz von Shell GTL Fuel für mobile Maschinen und Geräte wird in mehreren Berichten beschrieben, in denen es allerdings vor allem um die praktischen Aspekte der GTL Fuel Anwendung wie Winterbetrieb, Geräusentwicklung und Schwarzrauchmessung geht. Die Schwarzrauchmessung bietet einen guten Anhaltswert für den Schwarzrauchanteil an den Gesamtpartikelemissionen, es handelt sich aber nicht um eine offizielle Partikelmessung.

Über mobile Maschinen und Geräte lagen die folgenden Berichte vor:

- Bericht von Shell über Hitachi-Bagger: konzentriert sich auf die Wintertauglichkeit
- Bericht von DB Schenker zu Schwarzrauchmessungen an mehreren (Rangier-)Lokomotiven

Die Untersuchungen an den Baggern von Hitachi wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Hersteller durchgeführt. Das wichtigste Fazit lautete, dass die Startfähigkeit bei extrem niedriger Temperatur (-20 °C) sehr gut war und keine nachteiligen Folgen für die Lebensdauer des Motors erwartet werden.

Die Schwarzrauchmessungen bei DB Schenker erfolgten an Lokomotiven. Eine Rangierlokomotive war mit einem Dieselpartikelfilter ausgerüstet. Eine Einzelmessung ergab, dass sich im GTL Fuel Betrieb deutlich weniger Schwarzrauch als bei Betrieb mit Dieseldieselkraftstoff bildete. Die Werte lagen allgemein um rund 60 bis 85 Prozent niedriger. In einem Fall, und zwar bei der mit Dieselpartikelfilter ausgerüsteten Lokomotive, wurde zusätzliche Schwarzrauchbildung festgestellt.

Dies wird nicht als ungewöhnlich angesehen, da die Schwarzrauchwerte bei Einsatz eines Partikelfilters sehr niedrig sind und diese Filter recht große Mengen von Sulfat und Kohlenwasserstoff aufnehmen können.

Eine Schwarzrauchmessung unterscheidet sich deutlich von einer formellen Messung der Partikelemission. Letztere basiert auf der Partikelmasse, während die Schwarzrauchmessung im Allgemeinen mittels Lichtabsorption oder Filterpapierschwärzung erfolgt. Bei der Schwarzrauchmessung wird somit in erster Linie der Schwarzrauchanteil der Partikelemissionen ermittelt. Diese Messung umfasst nicht alle Partikel. Dementsprechend wurde im GTL Fuel Betrieb nur der Effekt auf den Schwarzrauch gemessen. Die tatsächliche prozentuale Verringerung der Gesamtpartikelemission im GTL Fuel Betrieb kann größer oder kleiner ausfallen.

Wenngleich kaum Messergebnisse für den Schadstoffausstoß von Non-Road-Motoren vorliegen, ist im GTL Fuel Betrieb wegen der spezifischen Zusammensetzung und Eigenschaften von GTL Fuel und des damit verbundenen günstigen Effekts auf die Verbrennung ein positiver Effekt auf die Abgasemissionen zu erwarten. Dies wird durch die positiven Ergebnisse gestützt, die bei Experimenten mit einer großen Zahl unterschiedlicher Motoren gewonnen wurden (siehe die Abschnitte 2, 3 und 4). Es werden vergleichbar positive Effekte erwartet wie bei Nfz-Motoren mit ähnlichen Motoren und Emissionsminderungstechniken.

6 Fazit

TNO hat eine große Zahl von Veröffentlichungen und Berichten ausgewertet, in denen die Emissionsmessdaten von GTL Fuel mit denen von standardmäßigem Dieselmotorkraftstoff (EN 590) verglichen werden. In den Veröffentlichungen mit vollständigen Schadstoffmessungen (NO_x, PM, CO und HC) ging es in erster Linie um Nfz-Motoren und Schiffsmaschinen. Darüber hinaus waren in begrenztem Umfang Daten von Schwarzrauchmessungen bei Lokomotivmotoren verfügbar.

Auf der Grundlage dieser Betrachtung ergibt sich in Bezug auf den Einsatz von Shell GTL Fuel als Alternative für regulären Dieselmotorkraftstoff (EN590) das folgende Fazit:

- Beim Betrieb mit GTL Fuel fallen die gesetzlich regulierten Emissionen bei allen vier Schadstoffarten (NO_x, PM, CO und HC) geringer aus. Die Testergebnisse der einzelnen Versuchsprogramme fielen, wie dies aufgrund von Unterschieden zwischen den Motoren zu erwarten ist, unterschiedlich aus.
- Bei verhältnismäßig simplen Motorentchnologien, wie zum Beispiel Euro-III-Motoren, ergaben die Messungen eine Senkung des NO_x-Ausstoßes im Bereich von 5 bis 19 Prozent und eine PM-Senkung im Bereich von 10 bis 34 Prozent.
- Bei Motoren mit moderneren Emissionsminderungssystemen können die relativen Unterschiede bei den NO_x- und PM-Werten deutlicher ausfallen. Messungen mit Euro-V-SCR-Motoren ergaben je nach Motortyp und Prüfzyklus NO_x-Senkungen im Bereich von 5 bis 37 Prozent und PM-Senkungen von bis zu 33 Prozent. Die vergleichsweise großen Spannen sind auf die geringe Menge der Emissionen sowie den Umstand zurückzuführen, dass Emissionsminderungssysteme wie beispielsweise die AdBlue-Dosierung je nach Auslegung des Systems unterschiedlich auf GTL Fuel reagieren. Für Euro-VI-Motoren lagen keine Daten vor.
- Bei den relativ konventionellen Schiffsmaschinen ergaben die Messungen NO_x-Verbesserungen im Bereich von 8 bis 13 Prozent sowie PM-Werte, die um 15 bis 60 Prozent niedriger waren.
- Für mobile Maschinen und Geräte lagen kaum Daten vor. Allerdings dürften die Emissionssenkungen angesichts der positiven Ergebnisse der GTL Fuel Tests bei einer Vielzahl von Motoren in Kombination mit den Eigenschaften von GTL Fuel und den damit verbundenen positiven Verbrennungseffekten, mit den bei schweren Nutzfahrzeugen festgestellten Werten vergleichbar sein.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Schadstoffemissionen der vorhandenen Fahrzeugflotten durch den Einsatz von Shell GTL Fuel deutlich gesenkt werden können. Es ist ein sofortiger Effekt, der eine Alternative zum Einsatz neuerer oder schadstoffärmerer Fahrzeuge, Schiffe oder Maschinen darstellt oder auch als ergänzende Maßnahme angewendet werden kann. Absolut gesehen sind die größten Emissionssenkungen beim Betrieb schadstoffreicherer Motoren zu erzielen, wie sie in älteren Fahrzeugen oder in Schiffen oder mobilen Maschinen anzutreffen sind.

7 Quellen

[Alleman 2003] Alleman, McCormick: FT diesel fuels - properties and exhaust emissions, SAE 2003-01-0763.

[DBSRNL 2014] Verslag roetmeting rangeerlocomotieven DBSRNL op Chemelot (Bericht zur Rußmessung an Rangierlokomotiven von DB Schenker Rail Nederland auf dem Chemelot-Gelände)

[Delphi 2010] Evaluation of Fischer-Tropsch Fuel Performance in Advanced Diesel Common Rail FIE. Paul Lacey, Jean Marc Kientz, Sandro Gail und Nebojsa Milovanovic. Paul Stevenson, Richard Stradling und Richard H. Clark Ratchatapong Boonwatsakul, SAE-Bericht 2010-01-2191.

[Clark 2009] Clark, Stephenson, Wardle: Emissions measurements of Shell GTL Fuel in the context of on-road trials and laboratory studies, 7th International Colloquium on Fuels, 14. - 15. Januar 2009.

[Clark 2005a] Clark, Wedlock, Cherrillo: Future fuels and lubricant base oils from Shell Gas to Liquids (GTL) technology, SAE 2005-01-2191.

[Clark 2005b] Clark, Louis, Stradling: Shell Gas to Liquids in the context of future engines and future fuels, 5th International Colloquium on Fuels, 2005.

[Clark 2001] Clark, Virrels, Maillard, Schmidt: The performance of diesel fuel manufactured by Shell's GTL technology in the latest technology vehicles, 3rd International Colloquium on Fuels, 2001.

[Kind 2010] Dedicated GTL vehicle: a calibration optimization study. Michael Kind, Andreas Kolbeck, Matthias Lamping, Dorothea Liebig, Richard Clark, Andrew Harrison, René van Doorn, SAE-Bericht 2010-01-0737.

[Kitano 2005] Koji Kitano, Ichiro Sakata, Richard Clark: Effects of GTL Fuel Properties on DI Diesel Combustion.

[Krahl 2005] Krahl et al.: Euro 3 Impact of different fossil and biogenic fuels on the exhaust gas and the health effects, Fuels 2005.

[Liebig 2009] Benefits of GTL Fuel in Vehicles Equipped with Diesel Particulate Filters. Dorothea Liebig, Richard Clark, Juliane Muth und Ingo Drescher, SAE-Bericht 2009-01-1934.

[Pon 2008] Dokter Wagemaker D3408 DITA distillate fuel compared to GTL, Pon-Bericht 2008.

[SGS 2013] Results of the emission measurements performed of MS INVADO Shell EN 590 versus Shell GTL. SGS Environmental Services, report nb. EZMO/13/0111-1_rep. date 27 November 2013. Messungen vom 21. und 22. November 2013

[SGS 2014] Results of the emission measurements performed on the NOVAMENTE: Shell EN 590 versus Shell GTL. SGS Environmental Services draft report nb EZMO/13/0111-2_rep, 14 January 2014. Messungen vom 20. Dezember 2013.

[Shell 2013] Informationen aus dem Shell GTL-Handbuch

[Thompson 2004] Thompson et al.: Fuel effects on regulated emissions from advanced diesel engines and vehicles, SAE 2004-01-1880.

[TNO/ECN/CE Delft 2013] Natural gas in transport: An assessment of different routes. Ruud Verbeek, Norbert Ligterink, Jan Meulenbrugge, Gertjan Koornneef, Pieter Kroon, Hein de Wilde, Bettina Kampman, Harry Croezen, Sanne Aarnink. Gemeinsamer Bericht CE Delft, ECN, TNO, Veröffentlichungscode: 13.4818.38, Mai 2013.

[TNO/CE Delft 2012] Ruud Verbeek, Bettina Kampman: Factsheets: Brandstoffen voor het wegtransport (Merkblätter: Kraftstoffe für den Straßenverkehr), September 2012.

[TNO/CE 2009] Verbeek, R., B. Kampman, G.L.M., Rabé, S. Bleuanus, X. Rijkee 2009 (Dec). Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles, phase 2. TNO report MON-RPT-033-DTS-03967A. TNO Science and Industry, Projektnummer 033.21296.

[TNO/CE 2008] Verbeek, R., Smokers, R.T.M., Kadijk, G., Hensema, Amber, Passier, G.L.M., Rabé, E.L.M., Kampman, B., & Riemersma, I.J. 2008 (June). Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles. TNO report MON-RPT-033-DTS-2008-01737. TNO Science and Industry, Projektnummer 033.16166.

[Verbeek 2012] Factsheets van technische mogelijkheden voor het verlagen van de milieubelasting van passagiersschepen in Amsterdam (Informationsschriften zu den technischen Möglichkeiten zur Senkung der Umweltbelastung durch Passagierschiffe in Amsterdam). TNO 2012 R10327, 7. Dezember 2012.

8 Unterschrift

Delft, 16. September 2014

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a central vertical stroke.

Nico Zornig
Leiter STL

A handwritten signature in blue ink, featuring a series of horizontal strokes and a long, sweeping underline.

Ruud Verbeek
Author