



Schlussbericht

Projekt HCNG-PW

Untersuchung der Wasserstoffbeimischung an einem CNG-Fahrzeug





Empa

Materials Science and Technology

Datum: 1. März 2017

Ort: Dübendorf

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE

Forschungsprogramm Verbrennungsbasierte Energiesysteme

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Gas mobil AG, c/o VSG Grütlistrasse 44, 8027 Zürich

Auftragnehmer/in:

Empa, Abt. Fahrzeugantriebssysteme

Überlandstrasse 129, CH-8600 Dübendorf

www.empa.ch/abt504

Autoren:

Christian Bach, Empa, christian.bach@empa.ch

Thomas Bütler, Empa, thomas.buetler@empa.ch

Mathias Huber, Empa, mathias.huber@empa.ch

BFE-Bereichsleitung: Dr. Carina Alles, carina.alles@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Stephan Renz, renz.btr@swissonline.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501224-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurde untersucht, ob sich die in Brennverfahrensstudien ermittelten energetischen Verbrauchseinsparungen einer Wasserstoffbeimischung zum Methangas als Treibstoff um bis 25 Mol% in einer konkreten Fahrzeuganwendung mit dynamischen Fahrprofilen bestätigen lassen und wie sich die in Publikationen aufgezeigten, teilweise hohen T.HC- und NO_x-Reduktionen mit wasserstoffangereichertem Methangas technisch erklären lassen.

Dazu wurde ein CNG-Fahrzeug (Euro-4) mit einem applizierbaren Motorsteuergerät und einem angepassten Katalysator für den CNG-Betrieb mit 100% Methan und den Betrieb mit Methan/Wasserstoffgemischen (85 Mol%/15 Mol% und 75 Mol%/25 Mol%) ausgerüstet und auf einem Rollenprüfstand in 2 verschiedenen Fahrprofilen mit insgesamt 7 Teilzyklen betrieben.

Die Untersuchungen zeigten, dass in den gewählten Fahrprofilen energetische Verbrauchseinsparungen um bis 2% realisierbar sind (ohne Anpassungen am Motor). Die Verbrauchseinsparung kann auf die beschleunigte Entflammungsphase zurückgeführt werden. In Summe mit dem geringeren Kohlenstoffgehalt des wasserstoffangereicherten CNGs konnten CO₂-Reduktionen um bis 11.3% ermittelt werden (bzw. 28 – 31% niedrigere CO₂-Emissionen als im Benzinbetrieb). Berücksichtigt man zudem den Biogasanteil im Tankstellenerdgas von 20%, so wird im HCNG-Betrieb gegenüber dem Benzinbetrieb eine CO₂-Minderung von 37 – 41% erreicht.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die T.HC-Emissionen vor und nach Katalysator je nach Teilzyklus um 30 – 60% abnehmen. Diese Abnahme kann mit grosser Wahrscheinlichkeit auf die deutlich geringere Flammlöschdistanz im Brennraum während der Verbrennung von Wasserstoff im Vergleich zu Methan zurückgeführt werden. Im Katalysator konnte keine signifikant erhöhte T.HC-Umwandlung beobachtet werden konnte.

Die NO_x-Emissionen vor Katalysator lagen demgegenüber im CNG wie auch im HCNG-Betrieb praktisch gleichauf, nach Katalysator bei wasserstoffangereichertem Methangas jedoch um bis 60% niedriger. Als Ursache für die bessere Katalysatorumwandlung konnte der etwas erhöhte H₂-Anteil im Abgas nach Schubphasen identifiziert werden. Dieser bewirkt ein verstärktes Ausräumen des während Schubphasen im Katalysator gespeicherten Sauerstoffs, was zu einer beschleunigten katalytischen Reduktion der Stickoxide im Dreiwegekatalysator führt.



Résumé

Dans ce projet, on a étudié si les économies de consommation énergétique apportées par une adjonction atteignant jusqu'à 25% d'hydrogène au méthane utilisé comme carburant, constatées dans des études de procédés de combustion, étaient confirmées avec une utilisation concrète d'un véhicule avec un cycle de conduite dynamique et comment les réductions en partie élevées des émissions de T.HC et de NOx que cette adjonction entraîne pouvaient s'expliquer sur le plan technique.

Pour cela, un véhicule CNG (Euro-4), équipé d'une unité de contrôle électronique du moteur adéquate et d'un catalyseur adapté pour le fonctionnement CNG avec 100% de méthane et pour celui avec un mélange méthane/hydrogène (85 mol%/15 mol% et 75 mol%/25 mol%), a été soumis à des essais sur un banc à rouleaux avec 2 cycles de conduites comprenant au total 7 cycles partiels.

Ces essais ont montré qu'avec les cycles de conduite choisis, les économies de consommation énergétiques réalisables avec ces adjonctions atteignent jusqu'à 2% (sans adaptations du moteur). Ces économies peuvent s'expliquer par l'accélération de la phase d'inflammation. Dans l'ensemble, avec la teneur inférieure en carbone du CNG enrichi en hydrogène, les réductions des émissions de CO₂ déterminées atteignaient jusqu'à 11.3% (ou 28 – 31% de moins de CO₂ qu'avec essence). Considérant aussi le part de biogaz de 20% dans le gaz naturel, une réduction de CO₂ de 37 - 41% est réalisée par rapport avec essence.

Par ailleurs, on a constaté que les émissions de T.HC avant et après le catalyseur diminuaient de 30 à 60% selon le cycle partiel. Cette diminution est très probablement due à la distance d'extinction dans la chambre de combustion nettement plus faible lors de la combustion de l'hydrogène par rapport à celle du méthane. On n'a pas constaté dans le catalyseur d'augmentation significative des T.HC avec l'adjonction d'hydrogène.

Avant le catalyseur, les émissions de NOx étaient pratiquement semblables lors du fonctionnement avec CNG et avec HCNG; par contre elles étaient jusqu'à 60% plus faibles après le catalyseur. La cause de cette meilleure conversion catalytique a été identifiée comme étant la teneur légèrement accrue en hydrogène des gaz d'échappement après la phase de poussée. La phase de poussée provoque une évacuation accrue de l'oxygène accumulé dans le catalyseur ce qui conduit à une accélération de la réduction des oxydes d'azote dans le catalyseur trois voies.



Summary

Within this project an investigation was conducted to confirm the energy consumption reduction values shown in combustion process studies when up to 25%vol hydrogen is added to gaseous methane fuel in the concrete case of a road vehicle application, including a dynamic driving profile test. An attempt was made to explain in technical terms how the sometimes high T.HC and NO_x reduction reported in the literature is accomplished with hydrogen-enriched methane gas.

To achieve this aim a CNG-powered vehicle (Euro-4) fitted with a adjustable motor control unit and modified catalytic converter adapted for CNG operation with both 100% methane and methane/hydrogen mixtures (85 mol%/15 mol% and 75 mol%/25 mol%) was investigated on a chassis dynamometer. Two different test profiles were run including a total of 7 sub-cycles.

The test results showed that, for the driving cycles selected, an energy consumption reduction of up to 2% could be achieved with hydrogen enriched methane without engine adjustments. The reduction in fuel consumption can be attributed to the accelerated ignition phase. In combination with the low carbon content of the hydrogen enriched CNG, a CO₂ reduction of up to 11.3% was achieved (or 28 - 31% lower CO₂ emissions compared with gasoline operation). Considering also the biogas portion of 20% in the natural gas, a CO₂ reduction of 37 - 41% is achieved in HCNG operation compared with gasoline operation.

In addition, it was found that the pre and post catalytic converter T.HC emissions decreased by 30 – 60%, depending on the sub-cycle. This decrease can be ascribed with high probability to the significantly smaller flame extinguishing distance during the combustion of hydrogen in the combustion chamber, compared to that of methane. A significantly higher T.HC conversion in the catalyzer was not seen.

The NO_x concentrations measured upstream of the catalytic converter were practically identical for both CNG and HCNG operation. However, downstream of the catalytic converter the values for hydrogen-enriched methane were up to 60% lower. The reason for the improved catalytic conversion was identified to be the somewhat higher H₂ concentration in the exhaust gas during idle phases. This enhances the removal of oxygen stored in the catalytic converter during deceleration phases, which results in an increased catalytic reduction of the nitrogen oxides in the three way catalytic converter.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	7
1. Einleitung	8
2. Versuchsaufbau	10
3. Zündzeitpunktanpassung zur Korrektur der Schwerepunktlage	14
4. Ergebnisse	18
4.1. Einfluss der H ₂ -Beimischung auf den energetischen Verbrauch	18
4.2. Einfluss der H ₂ -Beimischung auf die CO ₂ -Emissionen	21
4.3. Einfluss der H ₂ -Beimischung auf die T.HC-Emissionen	22
4.4. Einfluss der H ₂ -Beimischung auf die NO _x -Emissionen	27
5. Zusammenfassung der Ergebnisse	36
6. Dank	36



Abkürzungsverzeichnis

CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas/Biogas)
HCNG	Wasserstoffangereichertes Erdgas/Biogas
HCNG ₂₅	Wasserstoffbeimischung um 25 Mol%
PtG	Power-to-Gas
ECU	Electronic Control Unit (Motorsteuergerät)
ZZP	Zündzeitpunkt
Euro-4	Europäische Abgasrichtlinie ab 01.01.2006 – 31.12.2010
NEFZ	Zur Zeit gültiger offizieller Fahrzyklus für Personenwagen in Europa
WLTC	Ab 2018 gültiger offizieller Fahrzyklus für Personenwagen (WLTC = <u>W</u> orld-wide <u>L</u> ight-duty vehicle <u>T</u> est <u>C</u> ycle)
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
FID	Gesamtkohlenwasserstoffanalysator (Flame Ionisation Detector)
CVS	Abgasverdünnungsanlage auf konstanten Volumenstrom (Constant Volume System)



1. Einleitung

Die Anwendung wasserstoffangereicherter Treibstoffe, insbesondere in Form von wasserstoffangereichertem Methan, wurde in verschiedenen Brennverfahrensstudien bereits untersucht^{1,2,3,4,5}. Diese Studien zeigen, dass insbesondere das Entflammungsverhalten durch die Wasserstoff-Beimischung beschleunigt wird. Das ist bei methanbasierten Treibstoffen (Erdgas, aufbereitetes Biogas, synthetisches Methan) ein grundsätzlich willkommener Effekt, da Methan aufgrund der kurzketigen molekularen Struktur ohne C-C-Doppelbindungen ein im Vergleich zu Benzin trägeres Entflammungsverhalten zeigt.

Diese motorische Untersuchungen an wasserstoffangereicherten, methanbasierten Treibstoffen haben des Weiteren gezeigt, dass die hohe Klopfestigkeit von Methan durch die Wasserstoffbeimischung (zumindest bis Beimischraten bis 25 Vol-%) nicht abnimmt. Dies wird so erklärt, dass sich die Auswirkungen der H₂-Beimischung praktisch vollständig auf die Entflammungsphase (0 - 5% Brennstoffumsatz) beschränken, bei der das Klopfverhalten aufgrund geringer Zylinderinnendrücke generell unkritisch ist. Die Verbrennungsphase (5 – 100% Brennstoffumsatz) hingegen wird durch die Beimischung bei stöchiometrischem Betrieb kaum beeinflusst.

Es gibt bisher nur wenige Studien zur Nutzung von wasserstoffangereichertem Methan in Fahrzeugen^{3,6,7}. Diese zeigen bei Fahrzeugen mit stöchiometrisch betriebenen Gasmotoren und Dreiwegekatalysator insbesondere bei den NO_x-Emissionen deutlich geringere Werte, allerdings ohne Erklärung.

Im vorliegenden Projekt sollten deshalb folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Können die in Brennverfahrensstudien auf dem Motorenprüfstand ermittelten Wirkungen auf den Verbrauch und die Engine-out-Emissionen in einem Fahrzeug im transienten Betrieb bestätigt werden?
- Wie stark wirkt sich die Korrektur der treibstoffinduzierten Verschiebung der Verbrennungsschwerpunktlage auf den energetischen Verbrauch in einer dynamischen Fahrzeuganwendung aus?
- Wie kann die in Publikationen gezeigte starke Steigerung der NO_x-Umwandlungsrate im Katalysator beim HCNG-Betrieb erklärt werden?

¹ <http://www.naturalhy.net/>

² C. Skalla, Gemischbildung und Verbrennung von Wasserstoff/Methan-Gemischen in Pkw-Anwendungen, 2012, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz, Graz

³ O. Florisson, D. Pinchbeck, NATURALHY: first step in assessing the potential of the existing natural gas network for hydrogen delivery, 2009

⁴ Soltic P. et al; Micro-thermal CMOS-based gas quality sensing for control of spark ignition engines; Measurement 91 (2016)

⁵ Biffiger H. et al; Effects of split port/direct injection of methane and hydrogen in a spark ignition engine; International journal of hydrogen energy (2015)

⁶ F. Ortenzi, M. Chiesa, R. Scarcelli, G. Pede, Experimental tests of blends of hydrogen and natural gas in light-duty vehicles; International Journal of Hydrogen Energy, 33 (2008).

⁷ F. Moreno, M. Muñoz, J. Arroyo, O. Magén, C. Monné, I. Suelves, International Journal of Hydrogen Energy, 37 (2012) 11495-11503



Umfeld

Der zunehmende Ausbau von PV- und Windanlagen führt ohne Gegenmassnahmen auch dann zur Produktion von Strom, wenn dieser im Strommarkt nicht nutzbar ist oder aufgrund eines Überangebots nicht wirtschaftlich vermarktet werden kann (im Folgenden als „Überschuss-elektrizität“ bezeichnet). Diese Überschusselektrizität muss entweder gespeichert und zu anderen Zeiten genutzt (z.B. Pumpspeicherkraftwerke oder Batterien), in Power-to-Gas/Liquid-Anlagen in die Mobilität transferiert und so genutzt oder aber „abgeregelt“ werden. Diese Abregelung ist zwar kostengünstig, sollte aber verhindert werden, da sie den Ausbau erneuerbarer Stromproduktion begrenzen könnte.

Die Herstellung von Wasserstoff aus Überschusselektrizität in Power-to-Gas-Anlagen mit Einspeisung in das Gasnetz wäre eine technisch relativ einfache, unter gewissen Rahmenbedingungen sogar wirtschaftliche und einigermaßen energieeffiziente Möglichkeit zur Nutzbarmachung von Überschusselektrizität. Dies könnte bedeuten, dass das Erdgas künftig nicht nur Biogas- sondern auch Wasserstoffanteile enthält. Dazu ist eine Reihe von Anpassungen an Reglementen und Richtlinien erforderlich, insbesondere um die verspröde Wirkung von Wasserstoff auf Metalle in der ganzen gasführenden Kette zu unterbinden.



2. Versuchsaufbau

Im Rahmen dieses Projektes wurde Methan als Treibstoff mit und ohne Wasserstoffbeimischung in einem Euro-4 Fahrzeug mit Gasmotor vermessen. Das Fahrzeug wurde hierzu mit einer externen Treibstoffversorgung, einem Zugang zur elektronischen Motorsteuerung (ECU), einem modifizierten Katalysator sowie einer Zylinderinnendruckmessung im Brennraum des Motors ausgerüstet. Auf einem Rollenprüfstand mit Strassenlastsimulation wurde das Fahrzeug mit zwei verschiedenen Fahrzyklen (NEFZ und WLTC) gefahren und dabei Verbrennungsparameter, Verbräuche sowie gasförmige Emissionen vor und nach Katalysator gemessen.



Abb. 1 Projektfahrzeug auf Rollenprüfstand

Für die Versuchsreihe wurde ein bestehender VW Touran Ecofuel eingesetzt, der zu Beginn dieses Projekts einen km-Stand von rund 38'000 km aufwies.

Marke:	VW	Kraftstoff:	Erdgas
Modell:	Touran grau / CNG	Fuel type:	CNG
Fahrgestell-Nr.:	WVGZZZ1T25W017971	Einspritzung:	Saugrohr
Typgenehmigung:	X	Injection:	Port fuel
1. Inverkehrsetzung:	17.01.2006	Hubraum:	1'984 cm3 Zylinder: 4
Emissionscode:	Euro 4	Engine displacement:	Cylinder: 4
Fahrzeug-Kategorie:	Personentransport	Leerlaufdrehzahl:	750 rpm
Leergewicht VTS:	1'715 kg	Low idle speed:	
Gesamtgewicht:	2'090 kg	Nennleistung:	80 kW @ 5'400 rpm
min/max LG gem. TG:	--- / ---	Rated power:	
Anzahl Sitzplätze:	5 inkl. Fahrer	Max. Drehmoment:	160 Nm @ 3'500 rpm
		Max. torque:	
		Getriebe:	manuell 5 Gang
		Gearbox:	manual Gear
		Übersetzungen:	Gang Nr. i Gear i Achse i Gesamt
		Transmission ratios:	gear no. i Gear i axle i tot
			1 3.46 4.93 17.06
			2 1.96 4.93 9.66
			3 1.28 4.93 6.31
			4 0.93 4.93 4.58
			5 0.74 4.93 3.65

Tab. 1 Technische Daten des Projektfahrzeugs



Anpassungen am Katalysator

Dem bereits eingefahrenen Fahrzeug wurde zu Beginn dieses Projekts ein neuer Originalkatalysator eingebaut. Vorschädigungen oder Verschmutzungen irgendeiner Art lagen also keine vor. Im Rahmen der Vorversuche (Messreihe 1) wurde der neue Katalysator mit 400 km simulierter Autobahnfahrt auf dem Prüfstand eingefahren, also einem sogenannten „Degreening“ unterzogen.

Um sicher zu stellen dass die nach Katalysator gemessenen Emissionswerte nicht zu nahe an der Nachweisgrenze der jeweiligen Analysesysteme liegen, wurde die Wirksamkeit des Katalysators künstlich verschlechtert, in dem dieser um ca. 1/3 seiner Länge gekürzt wurde (Abb. 2).



Abb. 2 Einkürzter Katalysator - nur das linke Katalysatorteil wurde verwendet.

Abb. 3 zeigt die Probenahmestellen vor und nach Katalysator im Unterboden des Projektfahrzeugs.

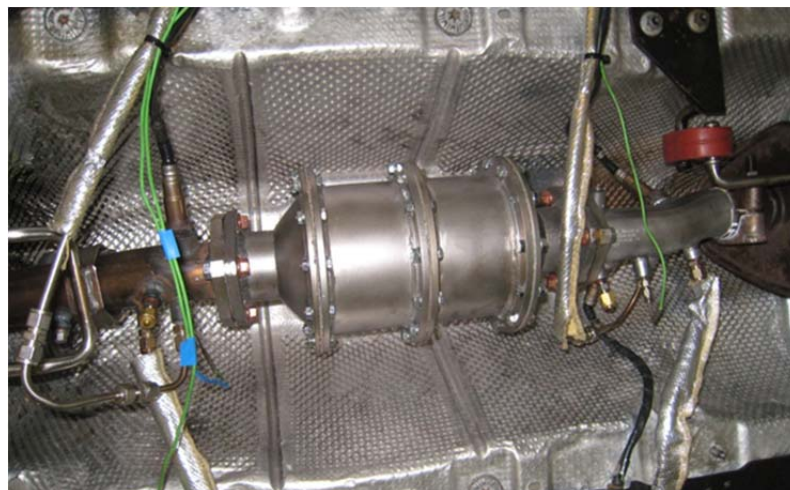


Abb. 3 Katalysator im Fahrzeugunterboden mit für Abgas-, λ -Sonden- und Abgas-Probenahmestellen



Fahrzyklen

Für die Emissionsmessungen wurde das Fahrzeug im aktuell gültigen sowie im zukünftigen legislativen Fahrzyklus getestet.

- NEFZ -> Aktuell gültiger Europäischer Fahrzyklus (Abb. 4, rotes Profil)
- WLTC -> Ab Herbst 2018 gültiger Europäischer Fahrzyklus (Abb. 4, blaues Profil)

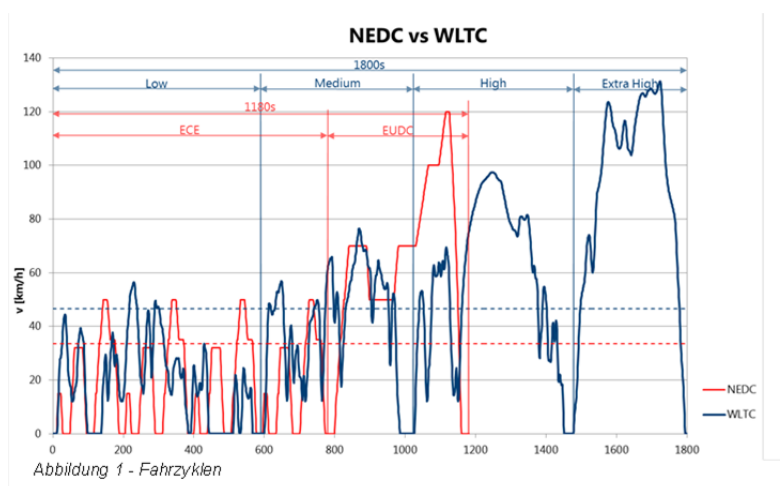


Abb. 4 Fahrprofile NEFZ und WLTP

Im Unterschied zu einer offiziellen Messung wurde der Motor im Rahmen dieser Untersuchungen vor den Messungen warmgefahren und der Test mit betriebswarmem Motor gestartet. Die Kaltstartemissionen waren nicht Gegenstand dieses Projektes.

Verwendete Treibstoffe

Für die Untersuchungen wurden folgende Treibstoffe verwendet:

Bezeichnung	CH ₄ -Anteil [Mol%]	H ₂ -Anteil [Mol%]	Energie% H ₂ [Mol%]	Dichte [kg/m ³]	Heizwert [MJ/kg]	C-Anteil (mass%)
CNG	100	0	0	0.6785	50.01	74.9
HCNG ₁₅	85	15	5.1	0.5895	51.58	73.2
HCNG ₂₅	75	25	9.3	0.5302	52.92	71.9

Tab. 2 Treibstoff-Spezifikationen (Dichte bei 15°C und 1'013 mbar)

Messtechnik und Abgasprobenahme

Zur Bestimmung der gesetzlich limitierten Schadstoffe wurde eine 2-Linien Abgasanalyseanlage (Horiba Mexa-7400H) sowie eine Verdünnungsanlage mit kritischem Venturi (Horiba CVS-9400T) eingesetzt.

Die nicht-limitierten Schadstoffe (NO_2 , NH_3) wurden mittels FTIR Infrarotspektrometer (Gaset CR-2000S) und einem Wasserstoff-Massenspektrometer (V&F H-Sense) gemessen. Zusätzlich wurden zur Untersuchung der Katalysator-Aktivität die Kohlenwasserstoffe mit einem schnellen 2 Linien-Flammenionisationsdetektor (Cambustion Fast-Response-FID HFR500) für die Messung vor und nach Katalysator aufgezeichnet.

Damit die gemessenen Emissionen zeitlich korrekt den zugrunde liegenden Ereignissen des Motorbetriebs zugeordnet werden können, wurden bei den beiden Probenahmestellen vor und nach Katalysator je eine Bosch LSU-4 Breitband-Lambdasonde verbaut. Diese schnell messenden Sauerstoff-Sensoren dienen somit als zeitliche Referenz am jeweiligen Probenahme-Anschluss.

Ein sogenannt „offenes“ Motorsteuergerät – ECU mit Emulatorentastkopf (ETK) – ermöglichte die Anpassung und Verstellung des Zündzeitpunktes und versorgte die Datenerfassung mit weiteren Messgrößen welche zur Kontrolle und zur Charakterisierung des Motorbetriebszustandes und der Verbrennung dienen.

Ein Zylinderdruckindiziersystem (Kistler KiBox) mit einem in einer Zündkerze integrierten piezoelektrischen Druckfühler diente zur Erfassung des Zylinderdruckes welcher zur Beurteilung der Verbrennung und deren Schwerpunktlage unentbehrlich ist.

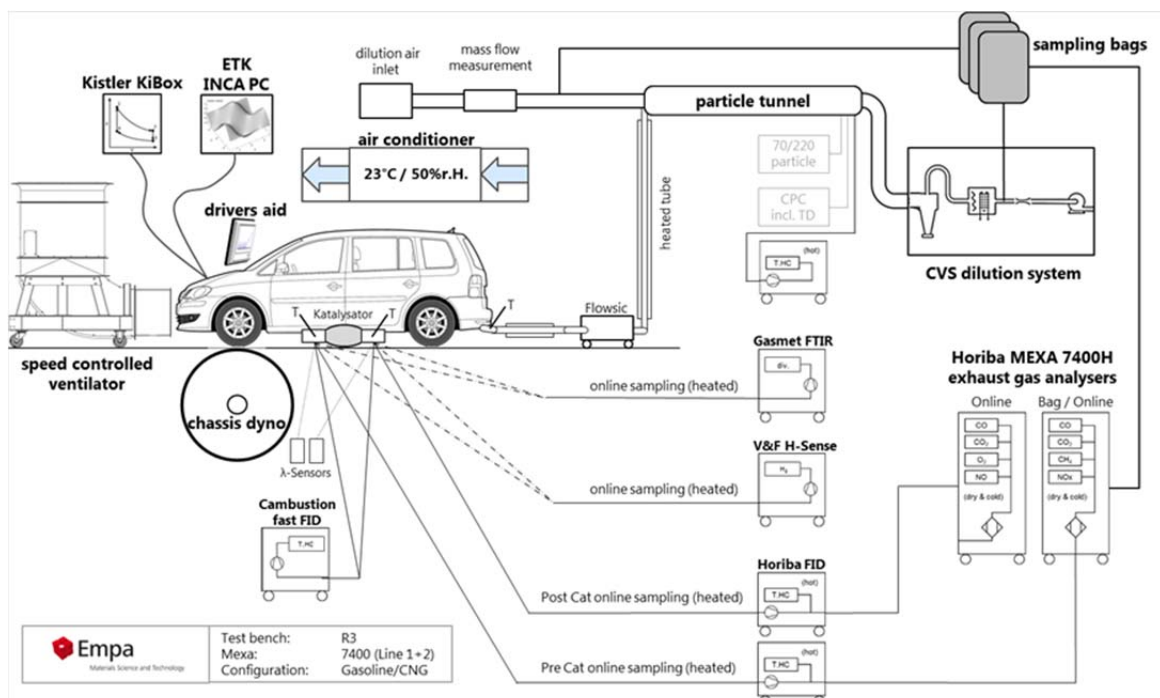


Abb. 5 Versuchsaufbau und Messtechnik



3. Zündzeitpunktanpassung zur Korrektur der Schwerpunktlage

ZZP-Korrektur

Durch die Beimischung von H_2 zum Treibstoff CNG wird die Entflammungsphase der Verbrennung beschleunigt, was zu einer Frühverschiebung der Verbrennungsschwerpunktlage, definiert als 50% Energieumsatz, führt. Um diese Frühverschiebung zu korrigieren, muss der Zündzeitpunkt (ZZP) im HCNG-Betrieb um den entsprechenden Betrag nach „Spät“ verschoben werden. Das Versuchsfahrzeug ist mit einer applizierbaren Motorsteuerung ausgerüstet, die eine solche Anpassung ermöglicht.

Um die Parameter für die Anpassung des ZZP-Kennfelds zu bestimmen, wurde zuerst die Schwerpunktlage im CNG-Betrieb mit originalem Zündkennfeld bei verschiedenen Konstantgeschwindigkeiten mittels Zylinderdruckindiziersystem ermittelt. Nach dem Wechsel auf die wasserstoffangereicherten Treibstoffe ($HCNG_{15}$ und $HCNG_{25}$) wurde die Verbrennungsschwerpunktlage durch Verschiebung des Zündzeitpunkts nach „Spät“ auf die zuvor mit dem Standardtreibstoff ermittelte originale Schwerpunktlage korrigiert. Im Folgenden sind der Übersichtlichkeit halber lediglich die Messungen mit Beimischungen von 25 Mol% Wasserstoff aufgeführt. Die Wirkungen der Messungen mit 15 Mol% Wasserstoffbeimischung liegen praktisch überall ungefähr in der Mitte zwischen dem CNG- und $HCNG_{25}$ -Betrieb.

Die Zündzeitpunktkorrekturen, gemessen in Grad Kurbelwinkel ($^{\circ}KW$), wurden in einen entsprechenden Zeitverzug umgerechnet und anschliessend auf den relevanten Drehzahlbereich des ZZP-Kennfelds extrapoliert (siehe Abb. 6 links). Da der Einfluss der Last auf die Verschiebung der Schwerpunktlage gering ist, wurde auf eine lastabhängige Anpassung des Zündzeitpunkts verzichtet. Dadurch ergab sich die in Abb. 6 rechts dargestellte Offset-Kennlinie, welche über den gesamten Lastbereich auf das Originalkennfeld angewendet wurde. Mit dieser Korrektur des ZZP-Kennfelds konnte die Schwerpunktlage im $HCNG_{25}$ -Betrieb auf der ursprünglichen Position gehalten werden.

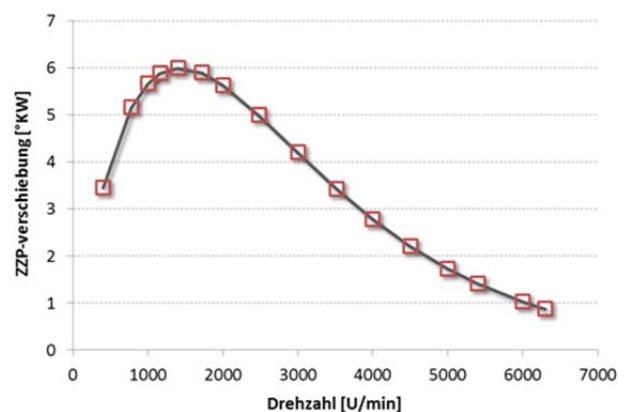
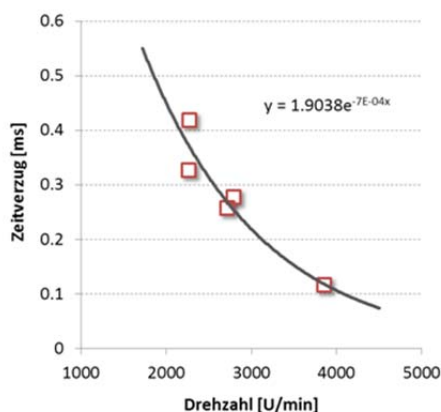


Abb. 6 links: Ermittelter Zeitverzug in den NEFZ-Konstantgeschwindigkeiten im $HCNG_{25}$ -Betrieb

Abb. 6 rechts: Auf alle Drehzahlstützstellen extrapolierte Zündzeitpunktverschiebung für den $HCNG_{25}$ -Betrieb in Grad Kurbelwinkel ($^{\circ}KW$).

Um die Sensitivität der Zündzeitpunktvariation zu ermitteln, wurden zusätzliche Messungen mit anderen ZPP-Kennfeldanpassungen durchgeführt, bei welchem die Korrektur gemäss Abb. 6 (im Folgenden als „mod2“ bezeichnet) nur zu 50% korrigiert (als „mod1“ bezeichnet) und mit einem ZPP-Kennfeld, bei welchem der Zündzeitpunkt zu 50% überkorrigiert wurde („mod3“).

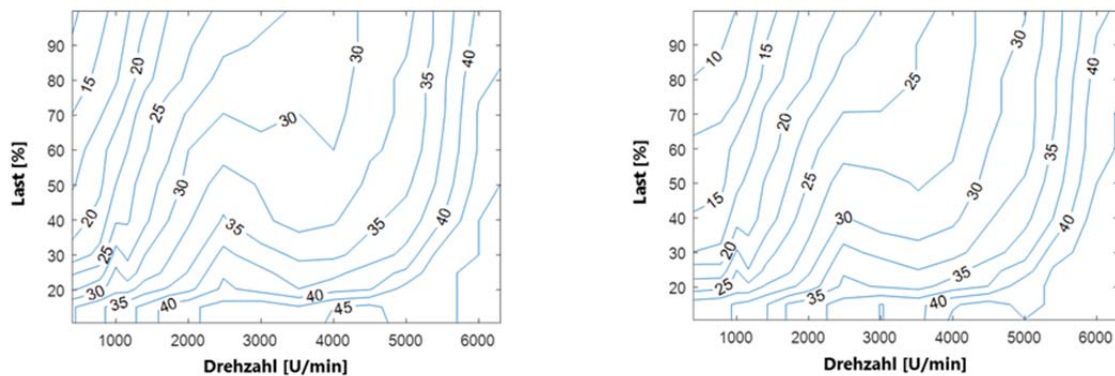


Abb. 7 links: Originales Zündkennfeld für den CNG-Betrieb. Die Linien und Werte entsprechen dem Zündzeitpunkt (ZPP) in Grad Kurbelwinkel ($^{\circ}$ KW) vor dem oberen Totpunkt (v.OT).

Abb. 7 rechts: Angepasstes Zündkennfeld für den HCNG₂₅-Betrieb mit optimaler ZPP-Verstellung (mod2)

Schwerpunktlage über verschiedene Fahrzyklen

Bei den Messungen wurden neben den Emissionswerten auch einige Steuergrössen und die mit dem Zylinderdruckindiziersystem ermittelten Verbrennungsparameter aufgezeichnet. Die Analyse der Daten im positiven Lastbereich des Motors (positive Radleistung und Fahrpedal >1%) zeigen, dass die Zündzeitpunktkorrektur den gewünschten Effekt erzielt hat (Abb. 8 - 11). Beim Originalkennfeld im CNG-Betrieb liegen über 45% der Schwerpunkte im idealen Bereich von 6 - 10 $^{\circ}$ KW nach OT. Im HCNG₂₅-Betrieb liegen ebenfalls über 45% der Verbrennungsschwerpunkte in diesem Bereich (siehe Grafiken). Dass nicht alle Schwerpunkte in diesem Bereich liegen hat mehrere Gründe:

- Im dynamischen Betrieb stellt sich selten eine konstante Schwerpunktlage ein, da sich Last und Drehzahl stetig ändern können. Dies beeinflusst auch die Schwerpunktlage
- Je später der ZPP eingestellt ist umso instabiler wird die Schwerpunktlage (ausgedrückt als Anstieg der Standardabweichung), vermutlich aufgrund der Zündung bei höheren Drücken⁸.

⁸ Corti E. et al; Spark advance real-time optimization based on combustion analysis; Journal of Engineering for Gas Turbines and Power (2011)



Verbrennungs-Schwerpunktlage im CNG-Betrieb

Abb.8 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Verbrennungs-Schwerpunktlage im CNG-Betrieb über dem Kurbelwinkel nach OT im NEFZ (links) und im WLTP (rechts). Die mittlere Verbrennungsschwerpunktlage mit Originalzündkennfeld (org) liegt sowohl im NEFZ wie auch im WLTC bei 8-9°KW n.OT (Mittelwert aus 6 Messungen) und verschiebt sich mit den ZZZP-Kennfeldkorrekturen (mod1, mod2, mod3) wie erwartet nach „Spät“.

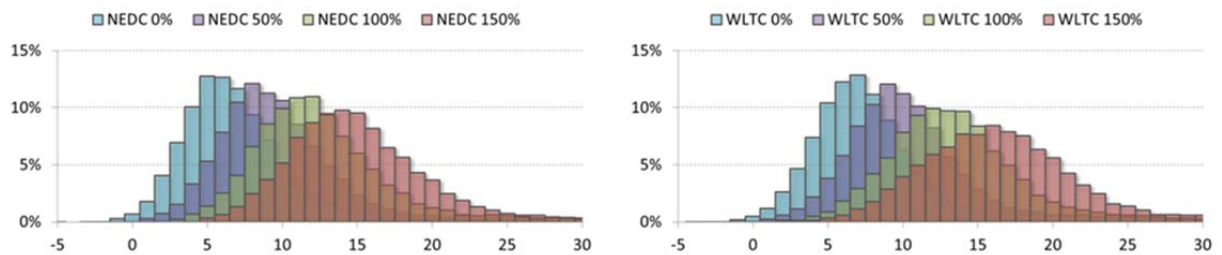


Abb. 8: Verteilung der Verbrennungsschwerpunktlage im CNG-Betrieb im NEFZ (links) und im WLTC (rechts) mit originalem ZZZP-Kennfeld (hellblau) und den ZZZP-Variationen mod1, mod2 und mod3.

Abb. 9 zeigt die Verteilungen ohne ZZZP-Korrektur (org) und mit den Variationen mod1, mod2 und mod3 einzeln. Es zeigt sich, dass die ZZZP-Korrekturen neben einer Verschiebung der mittleren Schwerpunktlage sowohl im NEFZ wie auch im WLTP zusätzlich zu einer leichten Verbreiterung der Verteilung führen.

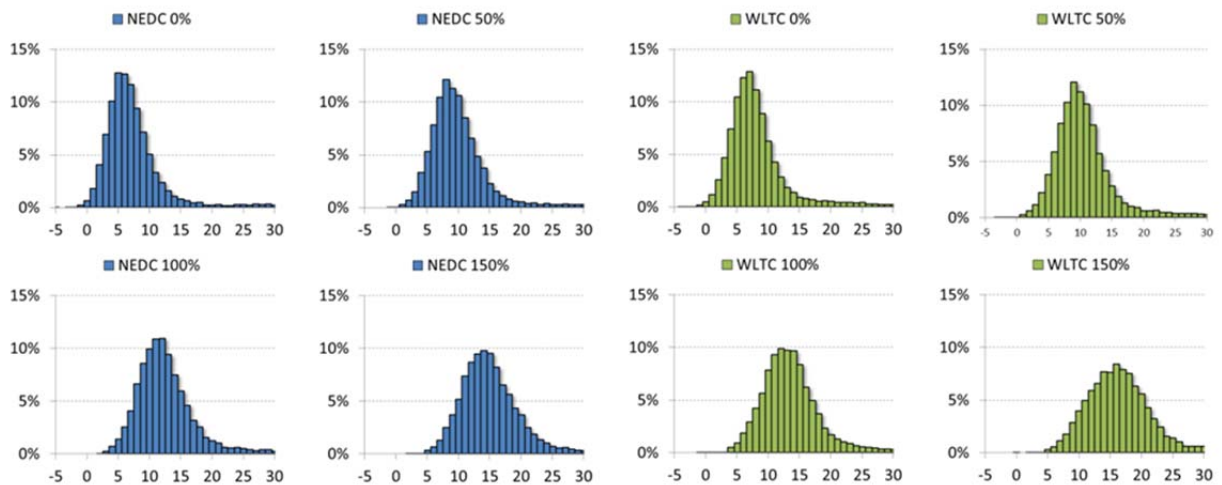


Abb. 9: Verteilung der Verbrennungsschwerpunktlage im CNG-Betrieb im NEFZ (links) und im WLTC (rechts) mit originalem ZZZP-Kennfeld (hellblau) und den ZZZP-Variationen mod1, mod2 und mod3.



Verbrennungs-Schwerpunktlage im HCNG₂₅-Betrieb

Abb. 10 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Verbrennungs-Schwerpunktlage im HCNG₂₅-Betrieb über dem Kurbelwinkel nach OT im NEFZ (links) und im WLTP (rechts). Ohne ZZZ-Korrektur resultiert eine Frühverschiebung der Verbrennungs-Schwerpunktlage. Im Mittel liegt diese dann bei 4-5°KW n.OT (Mittelwert aus 6 Messungen). Die ZZZ-Korrekturen mod1, mod2 und mod3 verschieben die Verteilungen wieder nach „Spät“, wobei die Korrektur „mod2“ den Originalwerten im CNG-Betrieb am nächsten kommt.

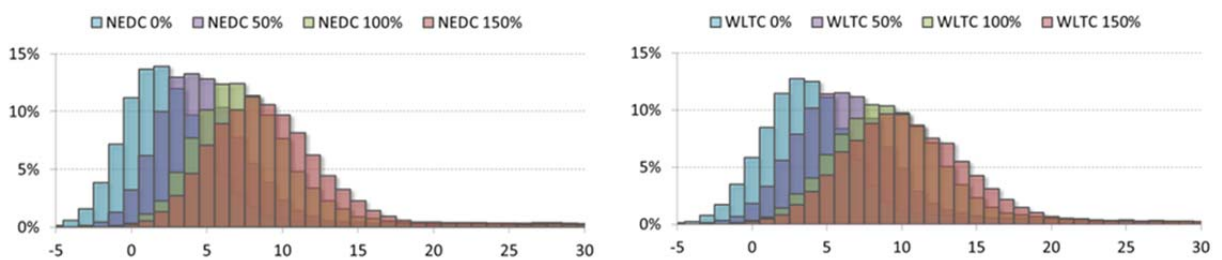


Abb. 10: Verteilung der Verbrennungs-Schwerpunktlage im CNG-Betrieb im NEFZ (links) und im WLTC (rechts) mit originalem ZZZ-Kennfeld (hellblau) und den ZZZ-Variationen mod1, mod2 und mod3.

Abb. 11 zeigt die Verteilungen im HCNG₂₅-Betrieb ohne ZZZ-Korrektur (org) und mit den Variationen mod1, mod2 und mod3 einzeln. Es zeigt sich, dass die ZZZ-Korrekturen wie im CNG-Betrieb (siehe Abb. 9) auch im HCNG₂₅-Betrieb zu einer leichten Verbreiterung der Verteilung führen.

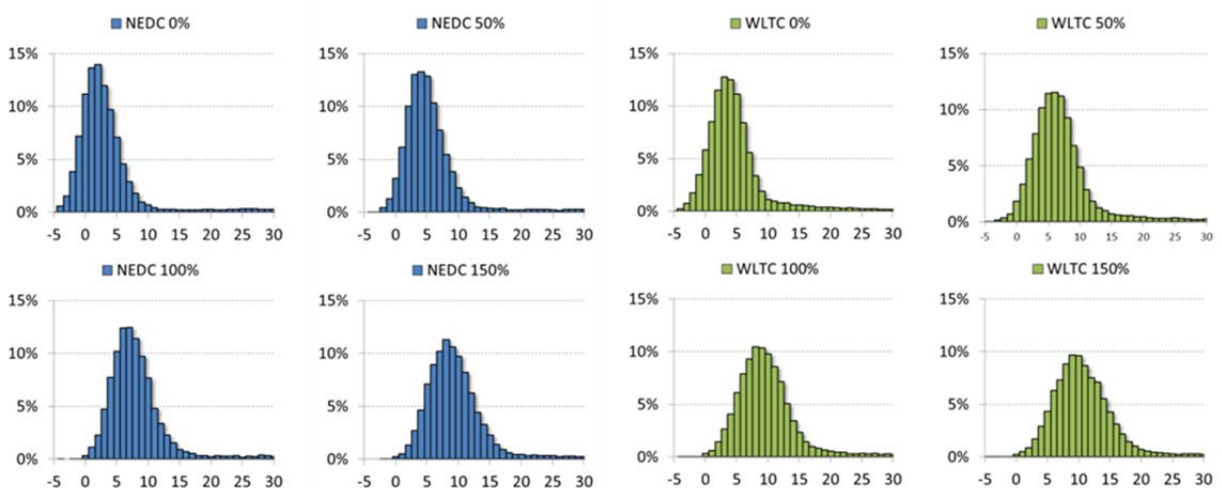


Abb. 11: Verteilung der Verbrennungs-Schwerpunktlage im CNG-Betrieb im NEFZ (links) und im WLTC (rechts) mit originalem ZZZ-Kennfeld (hellblau) und den ZZZ-Variationen mod1, mod2 und mod3.

4. Ergebnisse

4.1. Einfluss der H₂-Beimischung auf den energetischen Verbrauch

a) Basis-Verbrauchsmessungen im CNG-Betrieb

Um sicherzustellen, dass nicht die ZKP-Variation sondern wirklich die H₂-Beimischung für die Auswirkungen auf die Abgasemissionen und den Verbrauch verantwortlich ist, wurde in einer ersten Messreihe untersucht, wie sich die Korrekturen des ZKP-Kennfelds im CNG-Betrieb in den Fahrzyklen NEFZ und WLTC auswirkt.

Abb. 12 zeigt den energetischen Verbrauch in MJ/km im CNG-Betrieb im NEFZ und WLTC in den einzelnen Teilzyklen (grüne Markierungen) sowie die prozentuale Abweichung zum originalen ZKP-Kennfeld (gelbe Markierungen). Dabei zeigte sich, dass alle ZKP-Variationen im CNG-Betrieb zu einem Verbrauchsanstieg führten. Man kann also davon ausgehen, dass die originale Bedatung des ZKP-Kennfelds verbrauchsoptimal erfolgte und die folgenden Messergebnisse alleine auf die H₂-Beimischung zurückgeführt werden können.

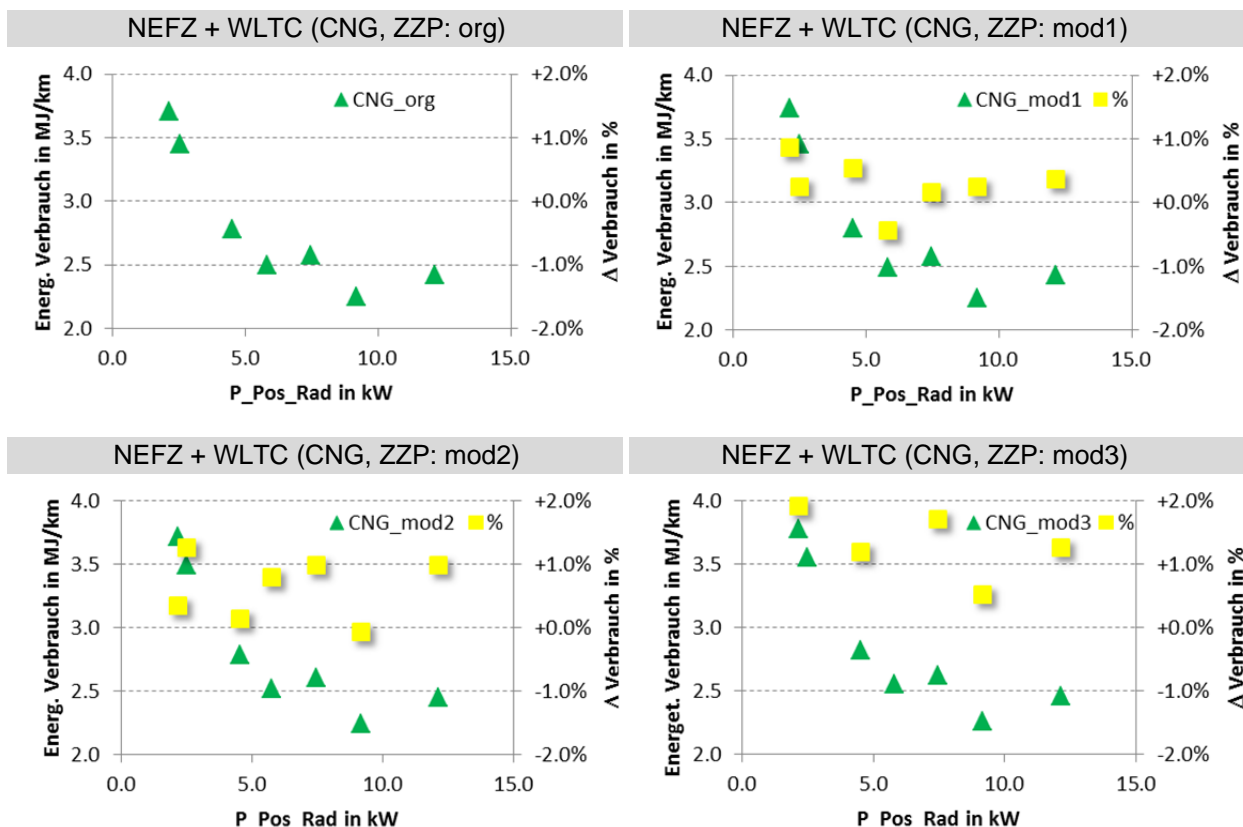


Abb. 12 Energetische Verbräuche im NEFZ und im WLTC (grüne Markierungen) sowie Verbrauchsveränderungen gegenüber dem originalen ZKP-Kennfeld (gelbe Markierungen) für die ZKP-Variationen (mod1, mod2, mod3) im CNG-Betrieb mit betriebswarmem Motor (Oeltemperatur bei Motorstart = 80°C).



Die Auswirkungen der ZZZ-Korrektur in den einzelnen Teilzyklen unterscheiden sich aufgrund deren unterschiedlichen Lastprofils. Die Änderungen aufgrund der ZZZ-Variation sind aber proportional gesehen über den ganzen Betriebsbereich ähnlich. Bei geringer Verschiebung des Zündkennfelds nach Spät (mod1) liegen die Verbrauchsveränderungen im Bereich von -0.5 bis +1%, beim für den HCNG₂₅-Betrieb optimalen ZZZ-Kennfeld (mod2) liegen sie im Bereich von 0 bis 1% und beim noch weiter nach Spät verschobenen ZZZ-Kennfeld (mod3) wurden Verbrauchsveränderungen im Bereich von 0.5 bis 2% gemessen. Tendenziell zeigten niedriglastige Teilzyklen eine etwas höhere prozentuale Verschlechterung als die höherlastigeren Teilzyklen.

b) Vergleichs-Verbrauchsmessungen im HCNG₂₅-Betrieb

Im Folgenden sind die Vergleichsmessungen im HCNG₂₅-Betrieb aufgeführt. Abb. 13 zeigt die im NEFZ und WLTC ermittelten energetischen Verbrauchswerte mit originalem Zündkennfeld im CNG-Betrieb (orange Markierungen), mit modifizierten Zündkennfeldern im HCNG₂₅-Betrieb (blaue Markierungen) und die prozentualen Veränderungen (gelbe Markierungen).

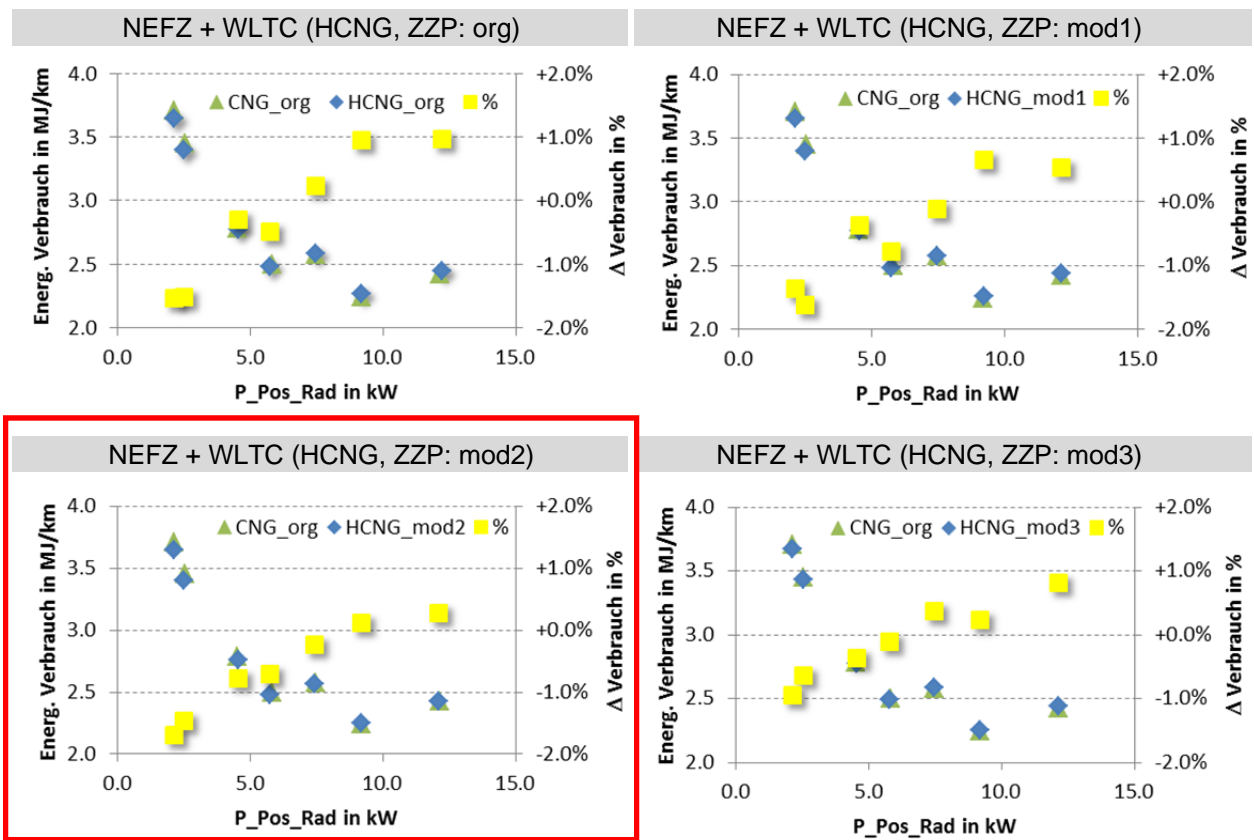


Abb. 13 Energetische Verbräuche im NEFZ und WLTC im CNG-Betrieb (grüne Markierungen) und im HCNG-Betrieb (blaue Markierung) sowie Verbrauchsveränderungen (gelbe Markierungen) gegenüber dem originalen ZZZ-Kennfeld für die ZZZ-Variationen (mod1, mod2, mod3) im HCNG₂₅-Betrieb mit betriebswarmem Motor (Oeltemperatur bei Motorstart = 80°C).



Die H₂-Beimischung mit originalem ZZP-Kennfeld führt bei niedriglastigen Fahrten (mittlere positive Radleistung <7 kW) zu einer energetischen Verbrauchseinsparung von bis zu 1.5%; bei höherlastigen Fahrten allerdings zu einer Erhöhung um bis 1%. Die mittlere Abweichung über alle Teilzyklen beträgt -0.24%.

Die zur Hälfte korrigierte Verschiebung der Verbrennungs-Schwerpunktlage (ZZP-Kennfeld mod1) senkt die energetischen Verbräuche gegenüber dem originalen ZZP-Kennfeld leicht ab. Bei Fahrzyklen mit höheren mittleren positiven Radleistungen resultiert allerdings immer noch ein leichter Mehrverbrauch von bis 0.5%. Die mittlere Abweichung über alle Teilzyklen beträgt -0.44%.

Die optimale Korrektur des ZZP-Kennfelds (ZZP-Kennfeld mod2; in Abb. 13 rot umrahmt), die die Schwerpunktlage der Verbrennung wiederum auf die ursprünglichen Werte setzt, senkt die energetischen Verbräuche am meisten ab. Dies führt selbst bei Fahrzyklen mit höheren mittleren positiven Radleistungen zu keinem signifikanten Mehrverbrauch mehr. Die mittlere Abweichung über alle Teilzyklen beträgt -0.64%.

Eine übermässige Spätverstellung des ZZP-Kennfelds (mod3) führt gegenüber der vollständigen Korrektur des ZZP-Kennfelds wiederum zu einer leichten Erhöhung der energetischen Verbräuche. Dies resultiert bei Fahrzyklen mit höheren mittleren positiven Radleistungen in einem Mehrverbrauch um bis 1%. Die mittlere Abweichung über alle Teilzyklen beträgt -0.1%.

Fazit Energieverbrauch:

Insgesamt zeigt sich, dass die H₂-Beimischung bei korrekter Anpassung des ZZP-Kennfelds (mod2) zu einer energetischen Verbrauchsminderung bei niedrigen Lasten um bis 2% führt. Bei höheren Lasten ist keine Verbrauchseinsparung mehr messbar.

4.2. Einfluss der H₂-Beimischung auf die CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen hängen vom energetischen Verbrauch und vom Kohlenstoffgehalt des Treibstoffs ab. Gemäss Abb. 13 führt die H₂-Beimischung mit 25 Mol% zu einer Verbrauchsminderung um 0 – 2%. Diese H₂-Beimischung entspricht gemäss Tabelle 2 einem Energieanteil bzw. einer entsprechenden Reduktion des Kohlenstoffgehalts von 9.3%. Somit kann eine CO₂-Reduktion im Bereich 9.3 – 11.3% erwartet werden.

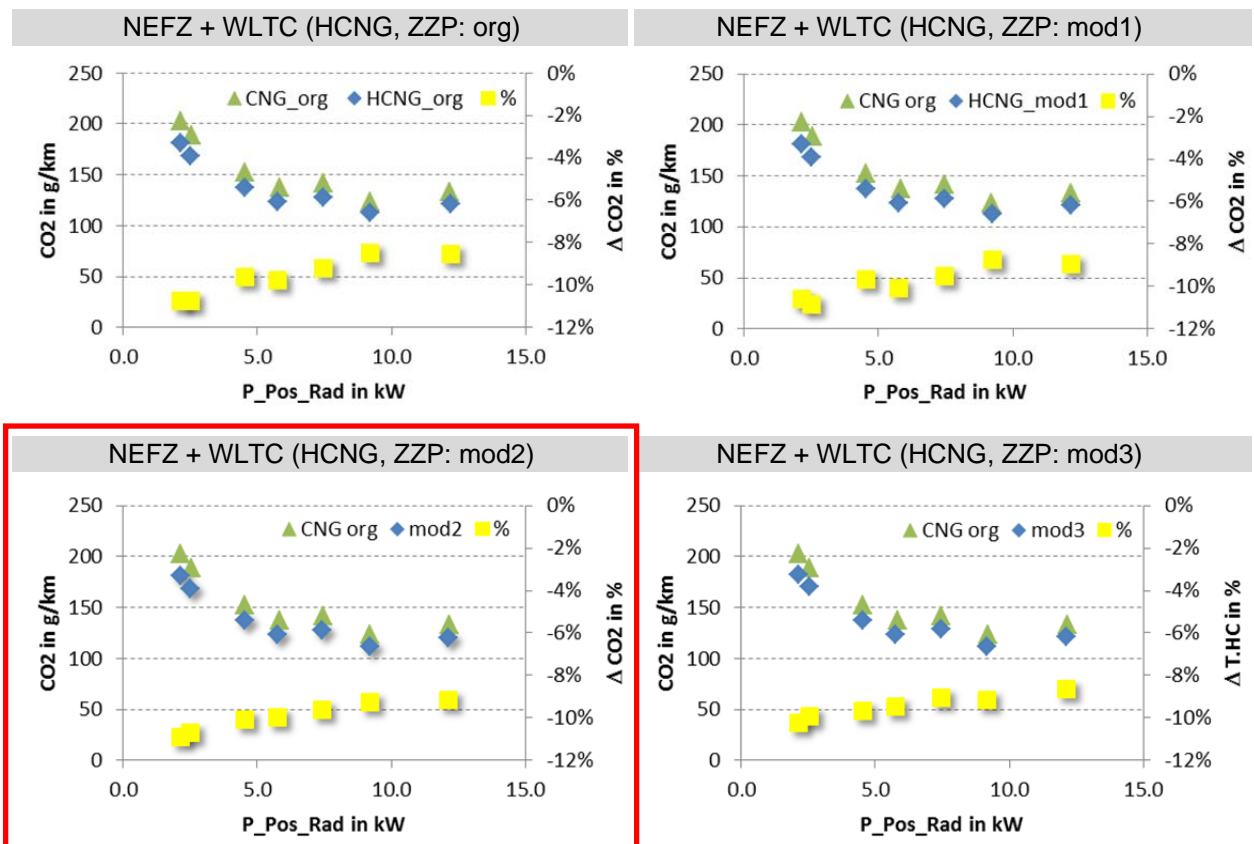


Abb. 14 CO₂-Emissionen im NEFZ und WLTC im CNG-Betrieb (grüne Markierungen) und im HCNG₂₅-Betrieb (blaue Markierung) sowie Veränderungen (gelbe Markierungen) gegenüber dem originalen ZCP-Kennfeld für die ZCP-Variationen (mod1, mod2, mod3) im HCNG₂₅-Betrieb mit betriebswarmem Motor (Oeltemperatur bei Motorstart = 80°C).

Wie Abb. 14 zeigt, liegen die CO₂-Emissionen des Fahrzeugs im HCNG₂₅-Betrieb bei korrekter ZCP-Korrektur (mod2, rot umrahmt) wie erwartet um 9.3 – 11.3% niedriger, als im CNG-Betrieb.

4.3. Einfluss der H₂-Beimischung auf die T.HC-Emissionen

a) Endrohr-T.HC-Emissionen im CNG-Betrieb

Abb. 15 zeigt die T.HC-Emissionen im CNG-Betrieb mit originalem ZKP-Kennfeld (orange Markierungen) und mit Variation des ZKP-Kennfelds (grüne Markierungen). Die Veränderungen gegenüber dem originalen ZKP-Kennfeld ist durch die gelben Markierungen dargestellt.

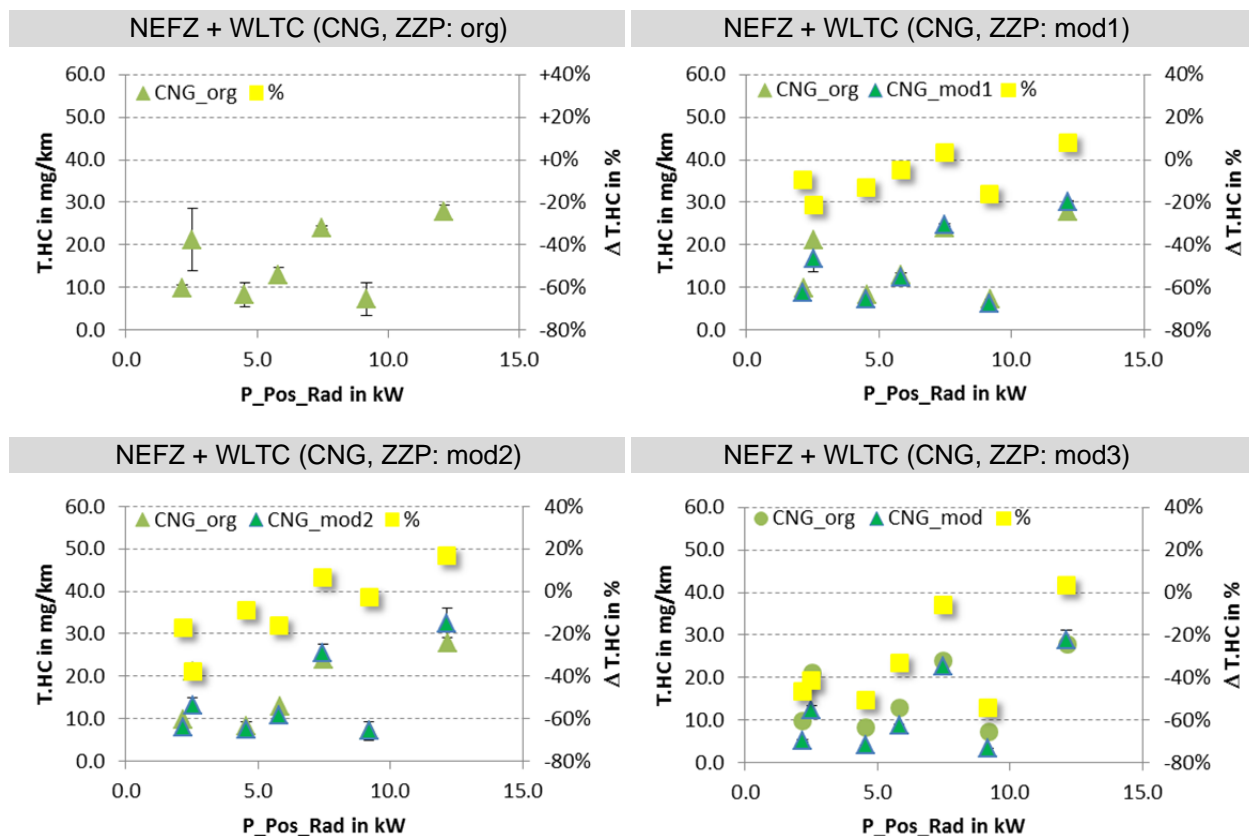


Abb. 15 T.HC-Emissionen im NEFZ und WLTC im CNG-Betrieb mit originalem ZKP-Kennfeld (hellgrüne Markierungen) und im CNG-Betrieb mit modifizierten ZKP-Kennfeldern (dunkelgrüne Markierung) sowie Veränderungen (gelbe Markierungen) gegenüber dem originalen ZKP-Kennfeld für die ZKP-Variationen (mod1, mod2, mod3) im CNG-Betrieb mit betriebswarmem Motor (Oeltemperatur bei Motorstart = 80°C).

Abb. 15 zeigt, dass die Spätverschiebung des ZKP-Kennfelds bereits im CNG-Betrieb zu einer Reduktion der T.HC-Emissionen führt. Alleine bewirkt diese allerdings eine Abweichung von der optimalen Verbrennungsschwerpunktlage und deshalb eine Wirkungsgradverschlechterung (siehe Abb. 12).



b) Endrohr-T.HC-Emissionen im HCNG₂₅-Betrieb

Im HCNG₂₅-Betrieb wurden je nach Kennfeldkorrektur 10 - 50% niedrigere T.HC-Emissionen gemessen. Bei der optimalen ZZZP-Kennfeldkorrektur (mod2, rot umrahmt) lagen diese im Mittel bei 35% niedrigeren Werten als beim CNG-Betrieb mit originalem ZZZP-Kennfeld.

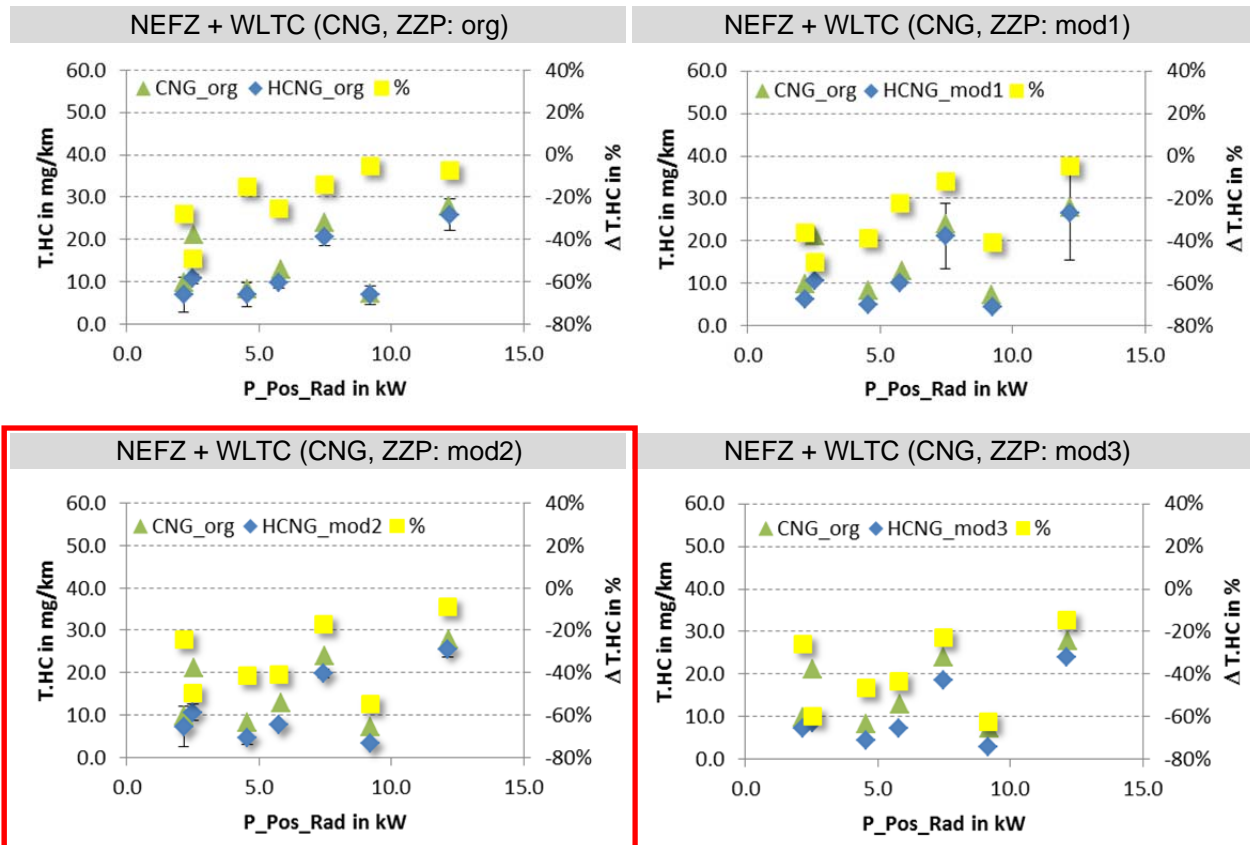


Abb. 16 T.HC-Emissionen im NEFZ und WLTC im CNG-Betrieb (grüne Markierungen) und im HCNG₂₅-Betrieb (blaue Markierung) sowie Veränderungen (gelbe Markierungen) gegenüber dem originalen ZZZP-Kennfeld für die ZZZP-Variationen (mod1, mod2, mod3) im HCNG₂₅-Betrieb mit betriebswarmem Motor (Oeltemperatur bei Motorstart = 80°C).

Im HCNG₂₅-Betrieb konnte im ganzen Betriebsbereich eine Reduktion der T.HC-Emissionen festgestellt werden. Mit bezüglich Verbrennungsschwerpunktlage optimalem ZZZP-Kennfeld (rot umrahmt) konnte je nach Teilzyklus eine Reduktion der T.HC-Emissionen bis fast 60% (siehe gelbe Markierungen) gemessen werden.

c) Vor-Katalysator-T.HC-Emissionen im CNG- und HCNG-Betrieb

Um die Minderung der T.HC-Endrohr-Emissionen gemäss Abb. 16 zu verstehen, wurden Vor-Katalysatormessungen im CNG-Betrieb mit originalem ZFP-Kennfeld und im HCNG₂₅-Betrieb mit vollständig korrigierter Frühverstellung (ZFP-Kennfeld mod2) bei betriebswarmem Motor durchgeführt.

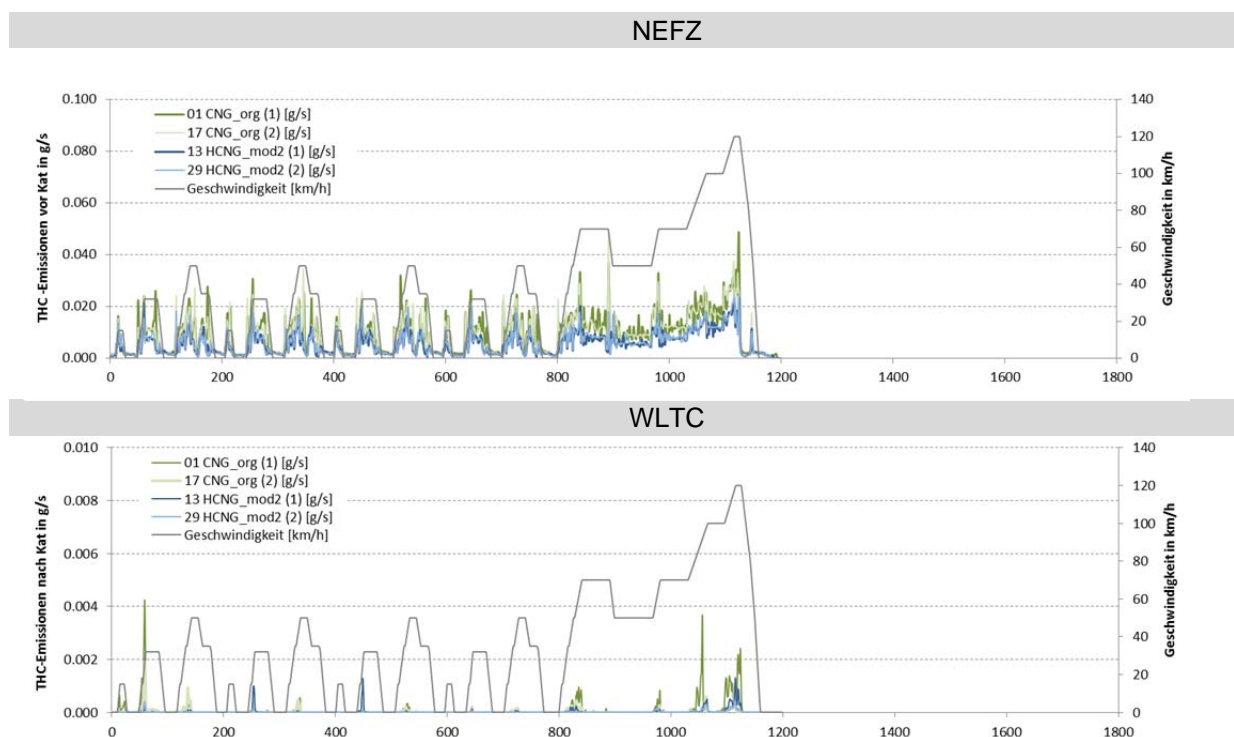


Abb. 17 T.HC-Emissionen vor Katalysator im CNG-Betrieb (grün) und im HCNG-Betrieb mit 25 Mol% H₂-Beimischung (blau) im NEFZ (oben) und im WLTC (unten)

Die T.HC-Emissionen vor Katalysator liegen bei beiden Fahrprofilen im HCNG₂₅-Betrieb generell um 20 – 40% unter denjenigen im CNG-Betrieb. Eine wichtige Quelle für T.HC-Emissionen sind die Flammlöschzonen an den Brennraumwänden. Ma et al⁹ geben für reinen Wasserstoff eine 3 – 4 Mal geringere Flammlöschdistanz an, als für Methan. Die in Abb. 17 gezeigte T.HC-Minderung vor Katalysator im HCNG-Betrieb kann vor diesem Hintergrund mit grosser Wahrscheinlichkeit hauptsächlich auf die geringere Flammlöschdistanz des HCNG₂₅-Gemischs zurückgeführt werden.

⁹ Fanhua Ma et al; Combustion and emission characteristics of a port-injection HCNG engine under various ignition timings; IJHE 2008



d) T.HC-Messungen nach Katalysator im CNG- und HCNG₂₅-Betrieb

Endrohr-T.HC-Messungen wurden im CNG-Betrieb mit originalem und im HCNG₂₅-Betrieb mit vollständig korrigierter Frühverstellung (ZZP-Kennfeld mod2) und betriebswarmem Motor durchgeführt. Wie in Kapitel 2 ausgeführt, wurde der Katalysator für diese Untersuchungen um 1/3 gekürzt. Dies erklärt die starken Anstiege der Emissionen nach Katalysator bei hohen Abgasmassenströmen.

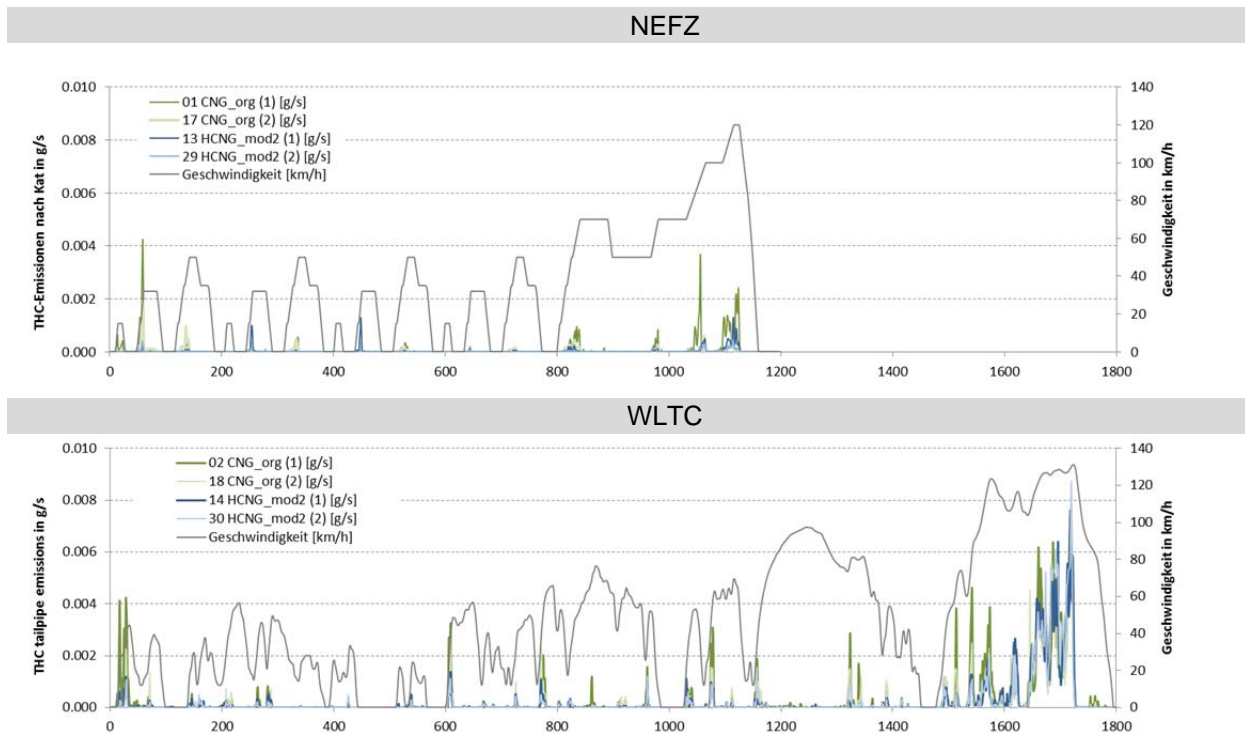


Abb. 18 T.HC-Emissionen nach Katalysator im CNG-Betrieb (grün) und im HCNG-Betrieb mit 25 Mol% H₂-Beimischung (blau) im NEFZ (oben) und im WLTC (unten)

Die T.HC-Emissionen nach Katalysator liegen auf einem sehr niedrigen Level. Bei Geschwindigkeiten <100 km/h sind beim Anfahren bzw. nach Lastwechsel lediglich einzelne T.HC-Peaks zu erkennen. Diese hängen vermutlich mit dem schwierigen Gemischbildungsprozess bei Beschleunigungen nach einer Schubabschaltung zusammen. Abgeleitet wird dies von der Tatsache, dass diese T.HC-Peaks sowohl im CNG- wie auch im HCNG₂₅-Betrieb am gleichen Ort auftreten und deshalb eher einem Regelungsevent und nicht dem Katalysatorverhalten zugeordnet werden müssen. Abb. 18 zeigt auch, dass die T.HC-Peaks im HCNG₂₅-Betrieb – analog den Vor-Katalysator-Emissionen – deutlich niedriger sind, als im CNG-Betrieb.

Bei Geschwindigkeiten >100 km/h ist eine deutliche Abnahme der Konversionsrate bzw. ein Anstieg der T.HC-Emissionen zu sehen. Dies ist auf den um 1/3 gekürzten Katalysator zurückzuführen.



Vergleicht man die kumulierten T.HC-Emissionen vor und nach Katalysator im NEFZ und im WLTC (Abb. 19), so sieht man, dass die H₂-Beimischung sowohl vor Katalysator (linke Y-Achse) aber auch nach Katalysator (rechte Y-Achse) sowohl im NEFZ wie auch im WLTC zu einer signifikanten T.HC-Reduktion führt.

Der Anstieg bei den T.HC-Emissionen nach Katalysator bei Geschwindigkeiten >100 km ist auf die Kürzung des Katalysators um 1/3 zurückzuführen (siehe Kapitel 2).

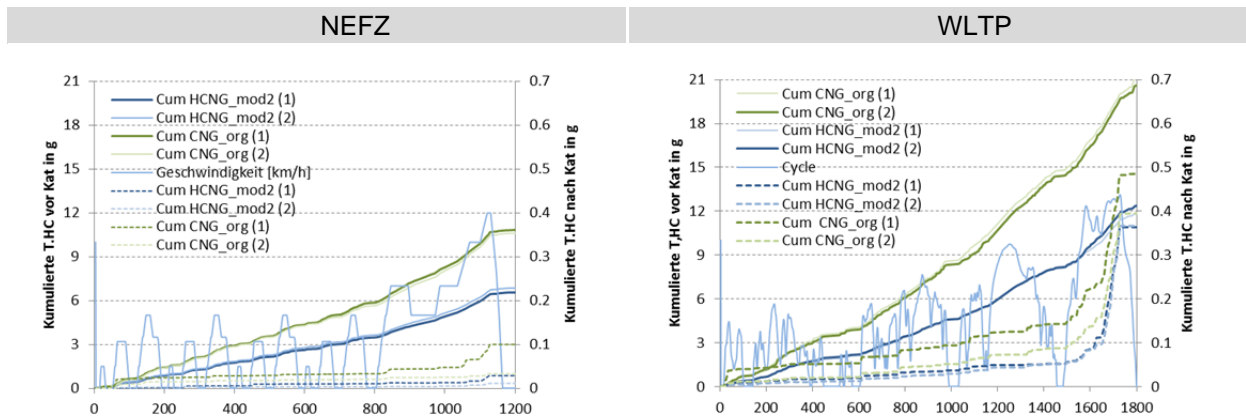


Abb. 19 Kumulierte T.HC-Emissionen vor und nach Katalysator (je 2 Messungen) im NEFZ (linkes Diagramm) und im WLTP (rechtes Diagramm).

Fazit T.HC-Emissionen:

Die H₂-Beimischung führt zu einer deutlichen Reduktion der T.HC-Emissionen, sowohl vor wie auch nach Katalysator. Diese kann mit grosser Wahrscheinlichkeit auf geringere Flammlöschdistanzen während der Verbrennung des wasserstoffangereicherten Treibstoffs zurückgeführt werden.

4.4. Einfluss der H₂-Beimischung auf die NO_x-Emissionen

a) Endrohr-NO_x-Emissionen im CNG-Betrieb

Abb. 20 zeigt die NO_x-Endrohr-Emissionen im CNG-Betrieb mit originalem ZFP-Kennfeld (hellgrüne Markierungen) und mit Variation des ZFP-Kennfelds (dunkelgrüne Markierungen). Die Veränderungen gegenüber dem originalen ZFP-Kennfeld sind durch die gelben Markierungen dargestellt.

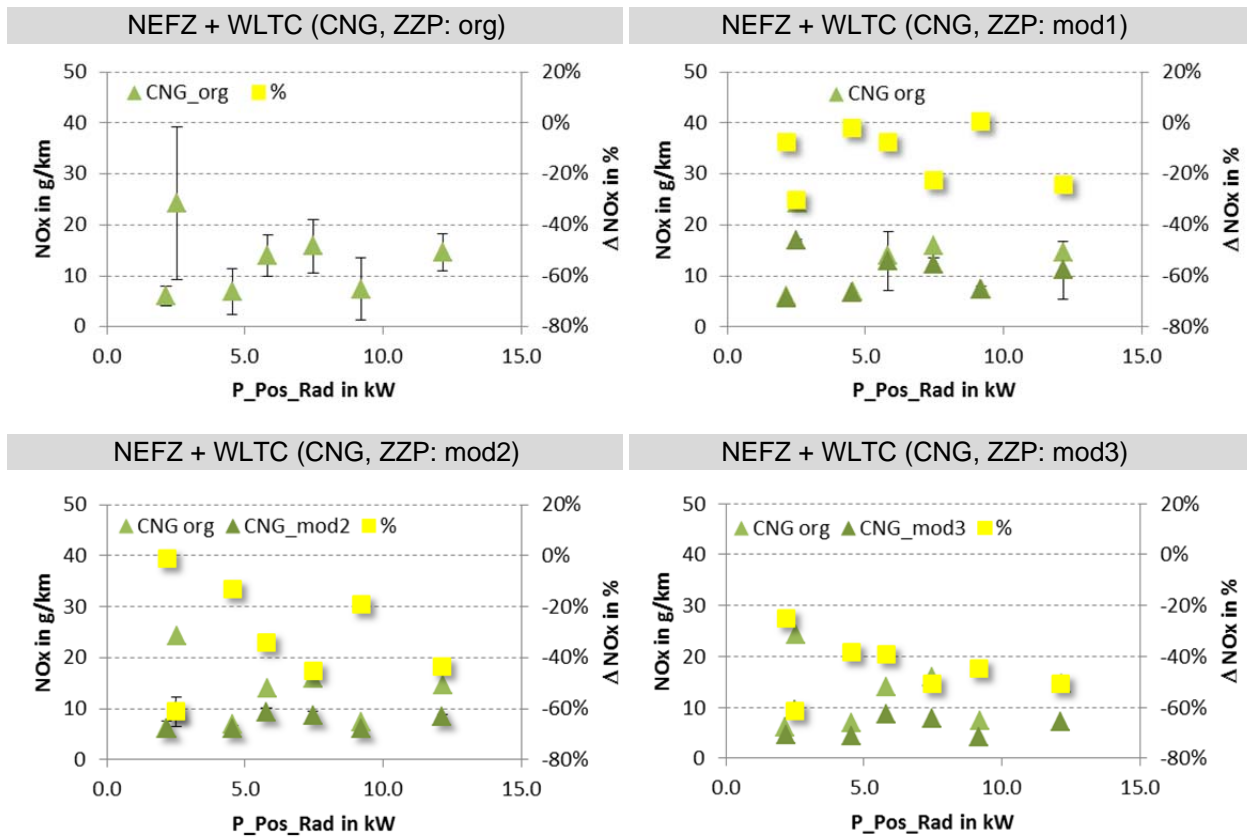


Abb. 20 NO_x-Emissionen im NEFZ und WLTC im CNG-Betrieb mit originalem ZFP-Kennfeld (hellgrüne Markierungen) und im CNG-Betrieb mit modifizierten ZFP-Kennfeldern (dunkelgrüne Markierung) sowie Veränderungen (gelbe Markierungen) gegenüber dem originalen ZFP-Kennfeld für die ZFP-Variationen (mod1, mod2, mod3) im CNG-Betrieb mit betriebswarmem Motor (Oeltemperatur bei Motorstart = 80°C).

Abb. 20 zeigt, dass die Spätverschiebung des ZFP-Kennfelds bereits im CNG-Betrieb zu einer Reduktion der NO_x-Emissionen führt. Diese bewirkt allerdings eine Abweichung von der optimalen Verbrennungsschwerpunktlage und deshalb eine Wirkungsgradverschlechterung (siehe Abb. 11). Die Abnahme ist jedoch - anders als bei den T.HC-Emissionen – über den ganzen Radleistungsbereich etwas konstanter.

b) Endrohr-NOx-Emissionen im HCNG₂₅-Betrieb

Im HCNG₂₅-Betrieb wurden nach Katalysator je nach Kennfeldkorrektur bis zu 60% niedrigere NOx-Emissionen gemessen. Bei der optimalen ZZZP-Kennfeldkorrektur (mod2, rot umrahmt) lagen diese im Mittel bei 42% niedrigeren Werten als beim CNG-Betrieb mit originalem ZZZP-Kennfeld.

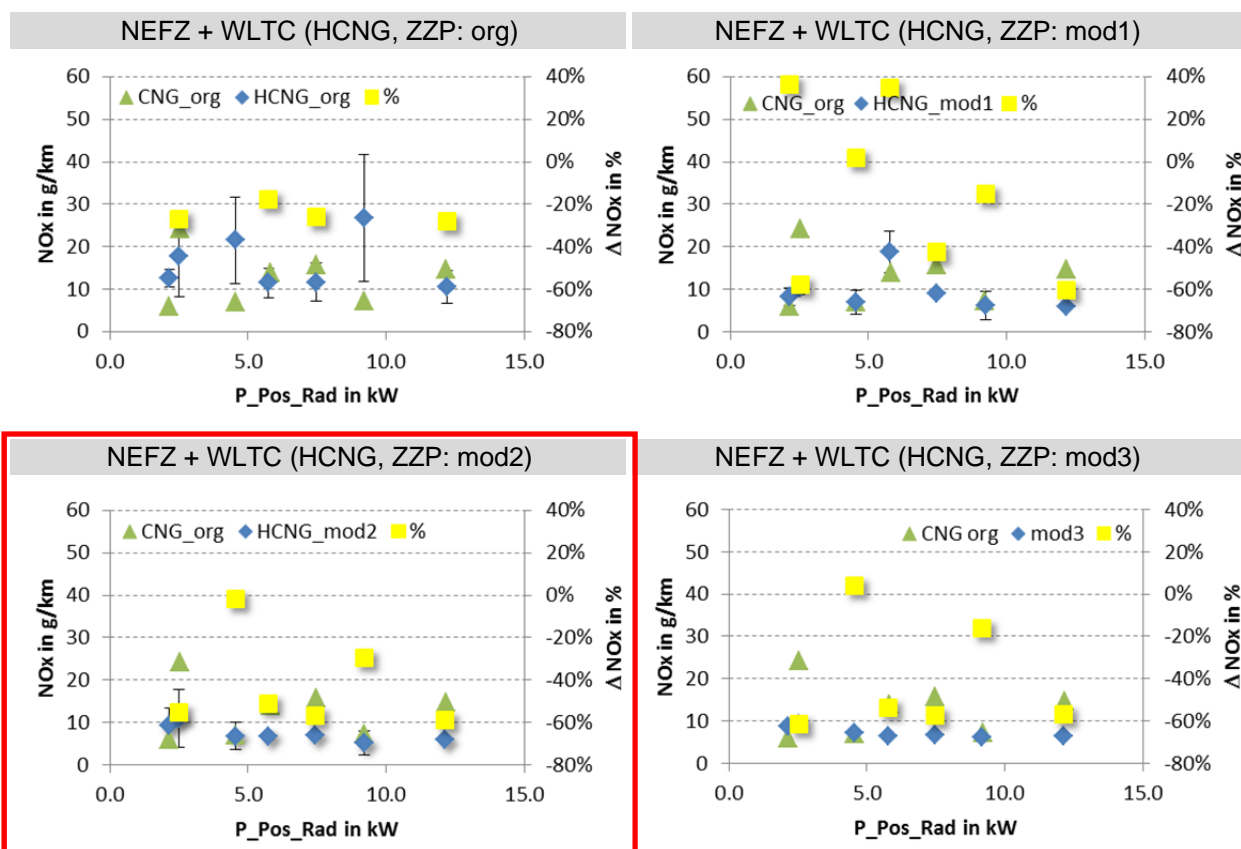


Abb. 21 T.HC-Emissionen im NEFZ und WLTC im CNG-Betrieb (grüne Markierungen) und im HCNG₂₅-Betrieb (blaue Markierung) sowie Veränderungen (gelbe Markierungen) gegenüber dem originalen ZZZP-Kennfeld für die ZZZP-Variationen (mod1, mod2, mod3) im HCNG₂₅-Betrieb mit betriebswarmem Motor (Oeltemperatur bei Motorstart = 80°C).

Anders als bei den T.HC-Emissionen kann die hohe Reduktion der NOx-Endrohrmissionen nicht von der Verbrennung abgeleitet werden, wie folgende Ausführungen zeigen. Die NOx-Emissionen vor Katalysator im CNG-Betrieb mit originalem ZZZP-Kennfeld und im HCNG₂₅-Betrieb mit optimiertem ZZZP-Kennfeld (mod2) sind nämlich praktisch identisch.



c) NO_x-Messungen vor Katalysator im CNG- und HCNG-Betrieb

Die Messungen wurden im CNG-Betrieb mit originalem und im HCNG₂₅-Betrieb mit vollständig korrigierter Frühverstellung (ZZP-Kennfeld mod2) und betriebswarmem Motor durchgeführt.

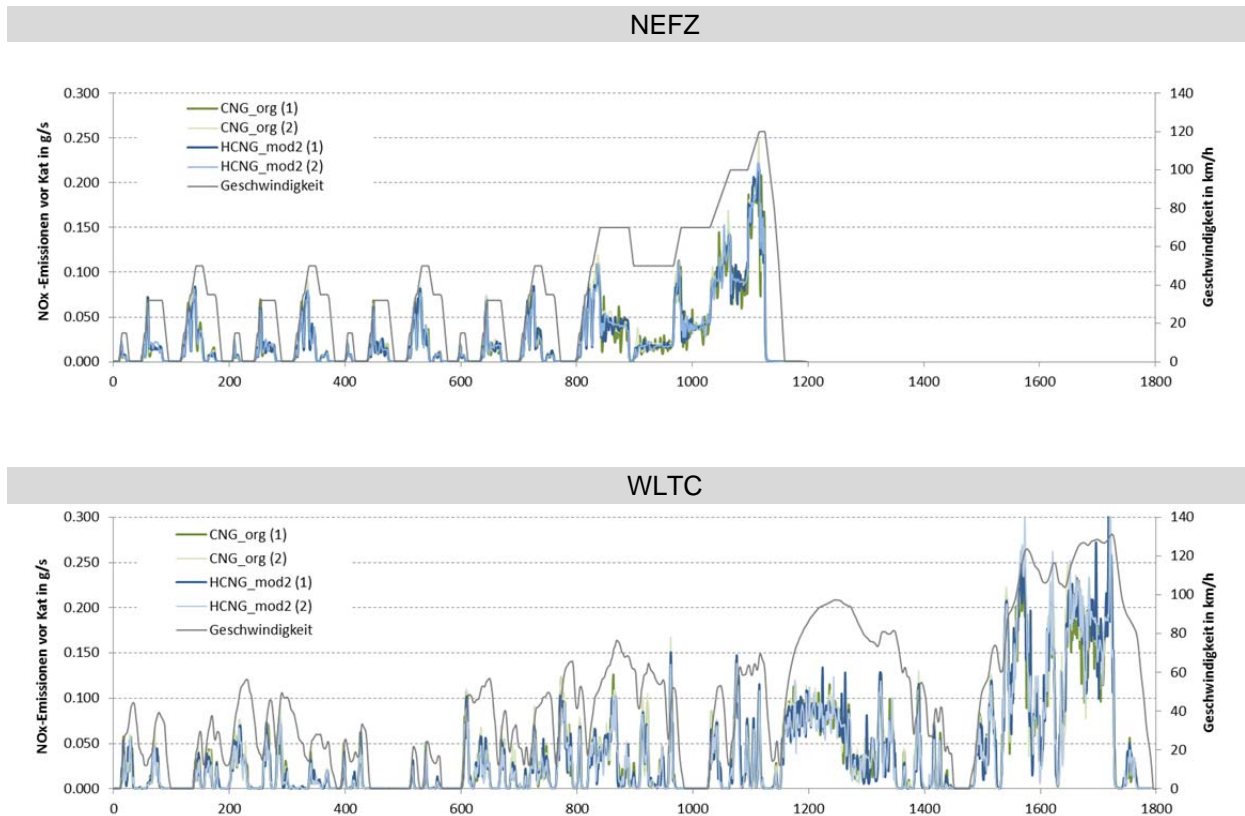


Abb. 22 NO_x-Emissionen vor Katalysator im CNG-Betrieb (grün) und im HCNG₂₅-Betrieb (blau) im NEFZ (oben) und im WLTC (unten)

Die NO_x-Emissionen vor Katalysator liegen bei beiden Fahrprofilen im CNG und im HCNG₂₅-Betrieb auf gleichem Niveau. Die NO_x-Emissionen im Verbrennungsmotor werden hauptsächlich thermisch gebildet¹⁰. Die Messungen zeigen, dass die Korrektur des ZZP-Kennfelds im HCNG-Betrieb auf die gleiche Verbrennungsschwerpunktlage wie im CNG-Betrieb zu konstanten NO_x-Rohemissionen vor Katalysator führt.

Somit liegen die NO_x-Emissionen im CNG- und HCNG₂₅-Betrieb - anders als bei den T.HC-Emissionen - vor Katalysator auf nahezu dem gleichen Niveau.

¹⁰ Van Basshuysen/Schäfer; Handbuch Verbrennungsmotoren, Siemens VDO Automotive (2002)

d) NO_x-Messungen nach Katalysator im CNG- und HCNG-Betrieb

Die Messungen wurden im CNG-Betrieb mit originalem und im HCNG₂₅-Betrieb mit vollständig korrigierter Frühverstellung (ZZP-Kennfeld mod2) und betriebswarmem Motor durchgeführt. Wie in Kapitel 2 ausgeführt, wurde der Katalysator für diese Untersuchungen um 1/3 gekürzt.

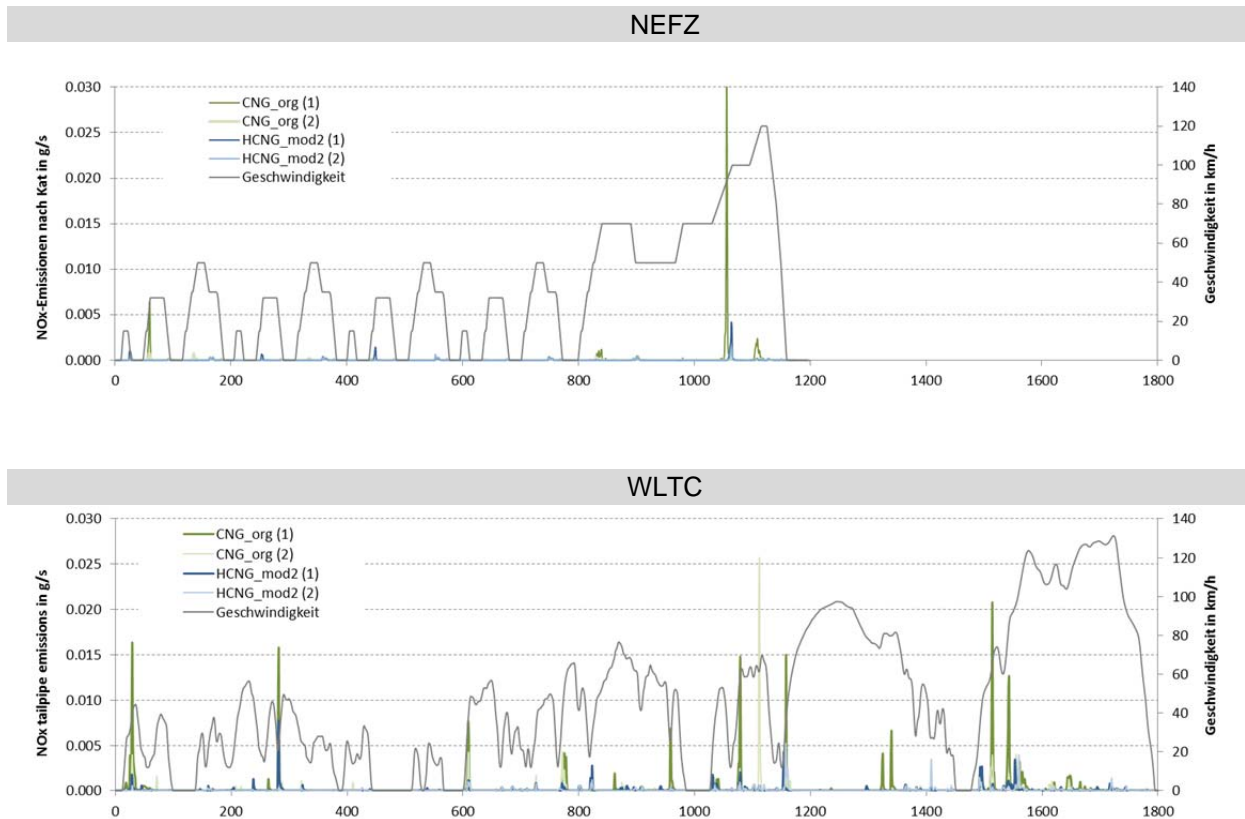


Abb. 23 NO_x-Emissionen nach Katalysator im CNG-Betrieb (grün) und im HCNG₂₅-Betrieb (blau) im NEFZ (oben) und im WLTC (unten)

Die NO_x-Emissionen nach Katalysator liegen sowohl im CNG- wie auch im HCNG₂₅-Betrieb auf einem sehr niedrigen Level. Wie bei den T.HC-Emissionen sind lediglich beim Anfahren bzw. nach Lastwechsel einzelne NO_x-Peaks zu erkennen.



Betrachtet man die kumulierten NO_x-Emissionen vor- und nach Katalysator (Abb. 24), so zeigt sich, dass die Vor-Katalysatoremmissionen (Abb. 24, ausgezogene Linien) im CNG- und HCNG₂₅-Betrieb in beiden Zyklen sehr ähnlich sind. Die Nach-Katalysatoremmissionen (Abb. 24, gestrichelte Linien) im HCNG₂₅-Betrieb sind jedoch deutlich (bis zu 60%) niedriger sind, als im CNG-Betrieb.

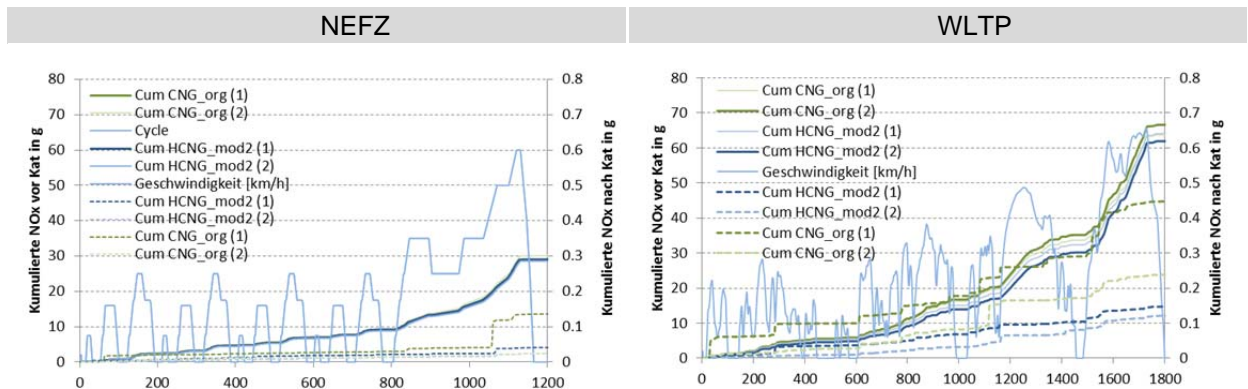


Abb. 24 Kumulierte NO_x-Emissionen vor und nach Katalysator (je 2 Messungen) im NEFZ (linkes Diagramm) und im WLTP (rechtes Diagramm).

Anders als bei den T.HC-Emissionen werden bei den NO_x-Emissionen im HCNG₂₅-Betrieb nach Katalysator also nicht einfach nur die niedrigeren Vor-Katalysatorwerte gespiegelt, sondern es kann eine zusätzliche, im Katalysator resultierende Erhöhung der Konversion beobachtet werden.

Zur Erklärung dieses Effekts wurden in einem ersten Anlauf verschiedene Analysen zu kinetisch begründeten Hypothesen (höhere Temperatur, höhere Anteile an reaktiveren Abgas-komponenten) aufgestellt und dazu entsprechende Grössen wie Temperaturen vor Katalysator, Anteile nicht-limitierter Schadstoffverbindungen wie NO₂, NH₃ oder H₂ gemessen sowie eine schnelle NO_x-Analytik eingesetzt. Allerdings waren die Unterschiede in allen diesen Aspekten eher gering und konnten die beobachtete starke Minderung der NO_x-Endrohr-Emissionen nicht erklären.

Als einziger Unterschied wurden bei geringen Abgasmassenströmen (d.h. bei niedrigen Lasten) etwas höhere H₂-Konzentrationen gemessen (Abb. 25). Rechnet man die Potentiale dieses temporär leicht erhöhten H₂-Gehalts zur chemischen Reduktion der NO_x-Emissionen um (SCR-Reaktion), so kann die NO_x-Minderung nur zu einem geringen Anteil erklärt werden. Wir können deshalb eine kinetische oder chemische Begründung für die verstärkte NO_x-Minderung im HCNG₂₅-Betrieb ausschliessen.

Abb. 25 zeigt, dass die H_2 -Konzentrationen im CNG- und HCNG₂₅-Betrieb im NEFZ wie auch im WLTC praktisch unabhängig vom momentanen Fahrzustand im Bereich 4'000 - 5'000 ppmV liegt, ausser nach Schubphasen, wo die Konzentration im CNG-Betrieb auf rund 15'000 ppm und im HCNG₂₅-Betrieb auf 17'000 – 18'000 ppm ansteigt.

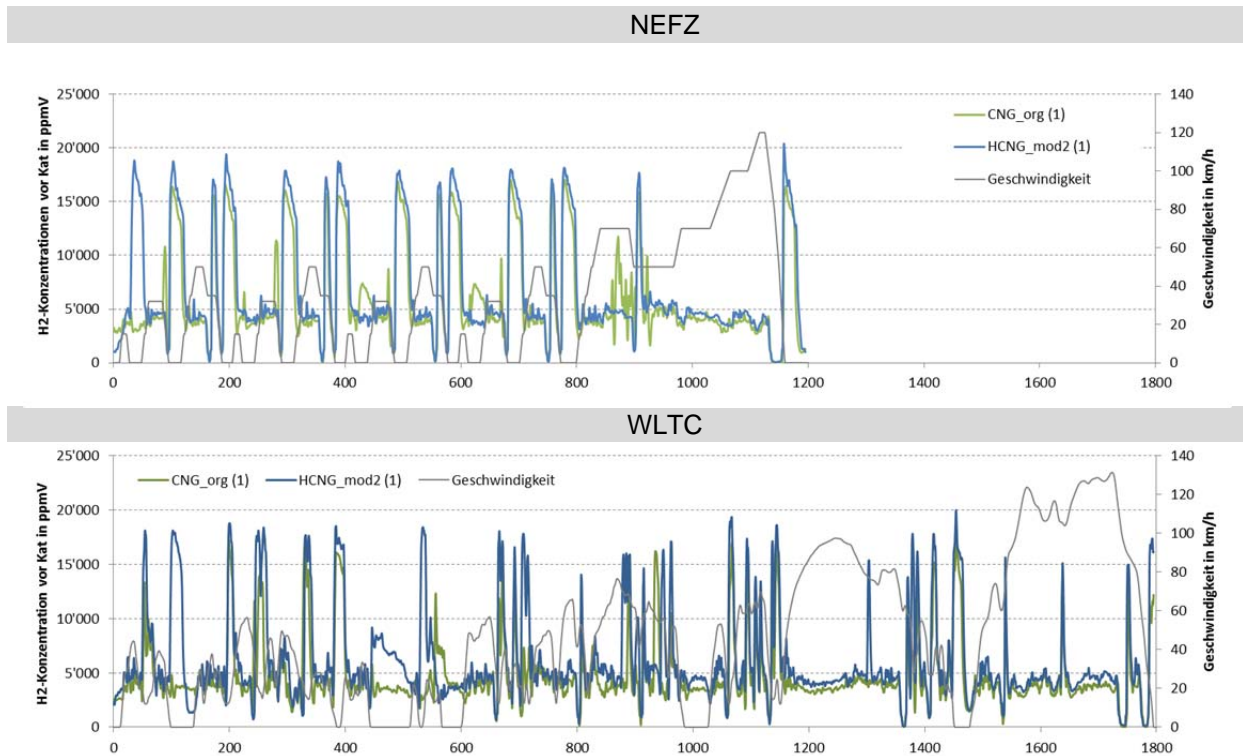


Abb. 25 H_2 -Konzentrationen im Abgas vor Katalysator im CNG-Betrieb (grün) und im HCNG₂₅-Betrieb (blau) im NEFZ (oben) und im WLTC (unten)

Nach Schubphasen mit einer Treibstoffschubabschaltung läuft regelungstechnisch auch das sogenannte „Kat-Ausräumen“, bei dem ein fettes Gemisch mit entsprechend erhöhter CO-Emission zur Reduktion des Sauerstofffüllstands im Katalysators eingestellt wird. Das CO reagiert im Katalysator zu CO_2 und baut so den an der porösen Katalysatoroberfläche, dem sogenannten „Washcoat“, chemisch gebundenen Sauerstoff mindestens teilweise ab. Ohne dieses „Kat-Ausräumen“ würde die katalytische Umwandlungseffizienz der Stickoxide während dem Anfahren massiv vermindert, da der für die Oxidationsreaktionen benötigte Sauerstoff aus dem Washcoat und nicht von den Stickoxiden entnommen würde.

In einem zweiten Anlauf wurde deshalb eine regelungstechnisch begründete Hypothese aufgestellt, die die o.g. Beobachtung der erhöhten H_2 -Konzentration bei Leerlaufphasen und nach Schubabschaltung beinhaltet.



Konkret geht es dabei um die Frage, ob die gegenüber dem CNG-Betrieb erhöhte H_2 -Konzentration das Kat-Ausräumen beschleunigen und damit die NO_x -Umwandlung im Katalysator während den Anfahr- oder Lastwechselphasen nach Schubabschaltung positiv beeinflussen könnte.

Die Sauerstoffspeicherung erfolgt im Schubbetrieb durch die Oxidation von Ce_2O_3 mit O_2 ¹¹. Diese Reaktion läuft sehr schnell ab. Bei 300°C erfolgt eine vollständige Sättigung des Ce_2O_3 im Washcoat innerhalb von weniger als 1 Sekunde.

Die Regeneration bzw. das „Kat-Ausräumen“ erfolgt im fetten Betrieb durch die chemische Reduktion des CeO_2 mit CO oder H_2 in Ce_2O_3 (+ CO_2 bzw. H_2O).

Abb. 26 zeigt, dass die CO-Emissionen vor Katalysator im NEFZ und im WLTC im CNG- und $HCNG_{25}$ -Betrieb sehr ähnlich sind.

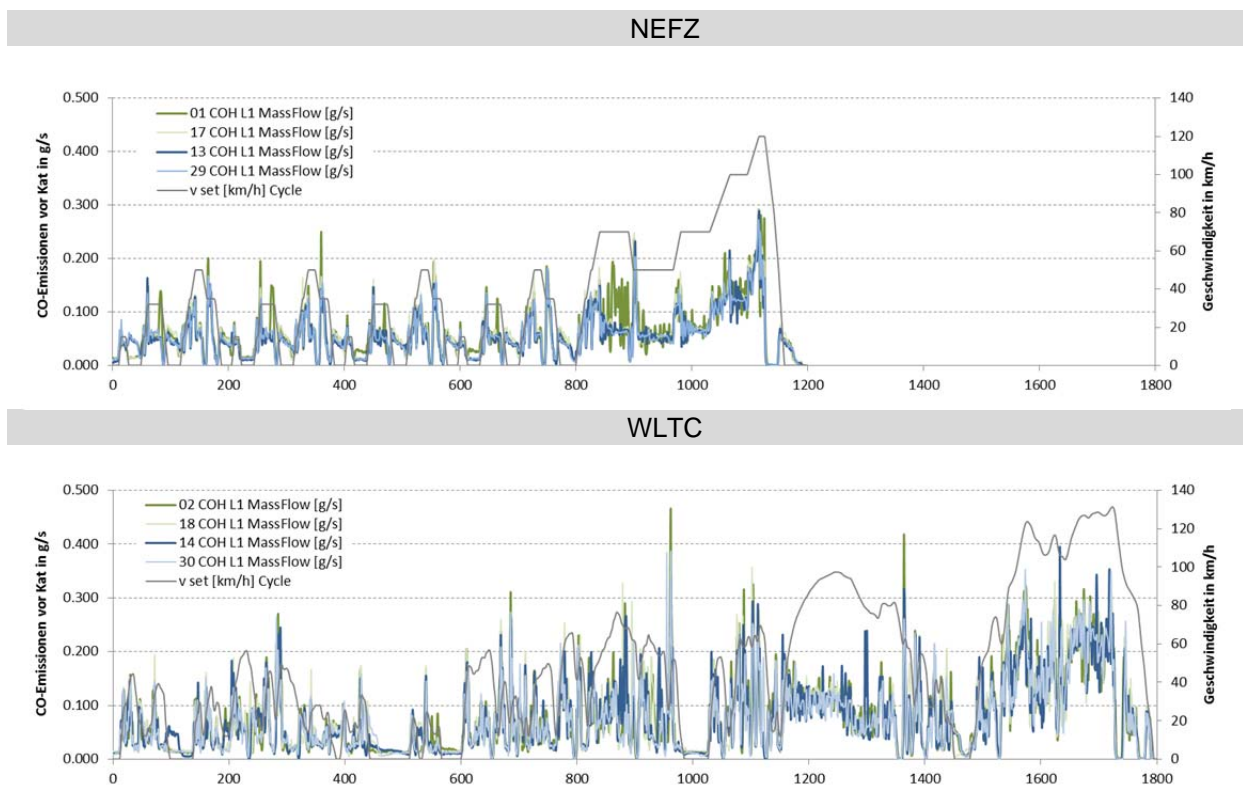


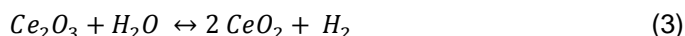
Abb. 26 CO-Emissionen im Abgas vor Katalysator im CNG-Betrieb (grün) und im $HCNG_{25}$ -Betrieb (blau) im NEFZ (oben) und im WLTC (unten)

Man kann deshalb davon ausgehen, dass die CO-Emissionen in diesem Kontext keine Rolle spielen, was den Fokus auf den H_2 -Gehalt der Abgasemissionen lenkt.

¹¹ Kaspar, Grantini; Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths (2000)



Dass H_2 im Katalysator das Konversionsverhalten positiv beeinflusst, ist bekannt. So erhöhen beispielsweise die Wassergasshift-Reaktion (1) und die Wasserdampfreformierung (2) aber auch die Sauerstoffspeicherung aus Wasserdampf am Ce_2O_3 (3) den Wasserstoffgehalt im Katalysator, was als Erhöhung der katalytischen Umwandlungseffizienz bekannt ist:



Um wieviel die NO_x -Emissionen im $HCNG_{25}$ -Betrieb durch die H_2 -Beimischung gesenkt werden konnte, zeigt Abb. 27. Dabei wurden die Emissionsprofile der beiden Messungen im CNG- und im $HCNG_{25}$ -Betrieb gemittelt und die Differenz (NO_x im $HCNG_{25}$ -Betrieb – NO_x im CNG-Betrieb) gebildet.

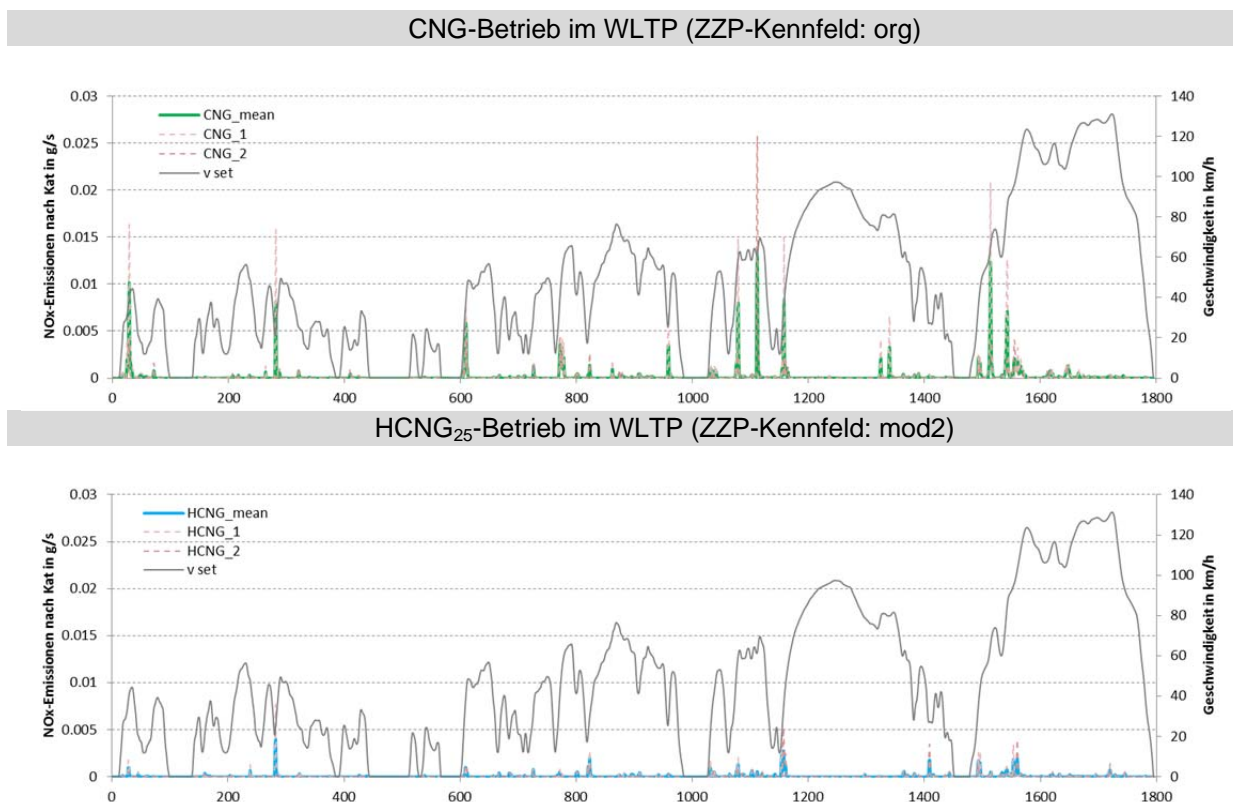


Abb. 27 Gemittelte NO_x -Emissionen im Abgas nach Katalysator im CNG-Betrieb (oberes Diagramm) und im $HCNG_{25}$ -Betrieb (unteres Diagramm) im WLTC

Abb. 27 zeigt, dass NO_x -Emissionen nach Katalysator praktisch ausschliesslich aus den NO_x -Peaks nach Schubabschaltung bestehen und dass die Streuung sowohl im CNG- wie auch im $HCNG_{25}$ -Betrieb sehr gering ist.

Bildet man nun die Differenz der beiden NO_x-Verläufe (ohne jegliche zeitliche Korrekturen), so zeigt sich, dass durch die H₂-Beimischung im HCNG₂₅-Betrieb alle NO_x-Peaks nach Schubphasen verglichen mit dem CNG-Betrieb deutlich vermindert werden. Diese Minderung kann nach dem Ausschlussverfahren als Beitrag der H₂-Beimischung identifiziert werden.

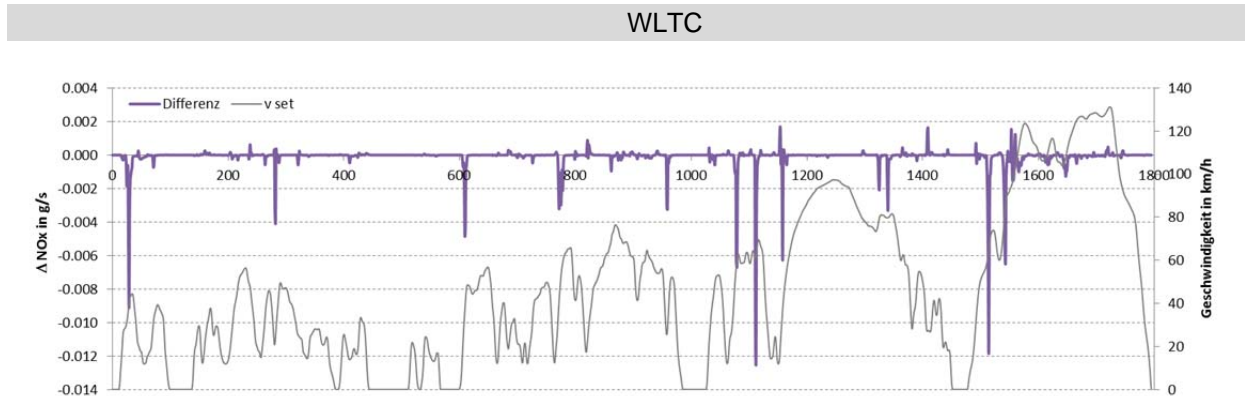


Abb. 28 CO-Konzentrationen im Abgas **vor Katalysator** im CNG-Betrieb (grün) und im HCNG₂₅-Betrieb (blau) im NEFZ (oben) und im WLTC (unten)

Die Hypothese, wonach der leicht erhöhte H₂-Gehalt des Abgases vor Katalysator nach Schubphasen für die erhöhte NO_x-Umwandlung im Katalysator im HCNG-Betrieb verantwortlich sein könnte, hat sich damit zumindest empirisch bestätigt. Dies ist in der Reaktionsfreudigkeit von H₂ für die Reaktion mit O₂ begründet.

Aufgrund der komplexen Sauerstoffspeicherung mit Material-, Temperatur- und Alterungsabhängigkeiten im Washcoat des Katalysators und der starken Abhängigkeiten von regelungstechnischen Funktionen und der Bedatung der Motorsteuerung beim Kat-Ausräumen und der O₂-Füllstandsregelung des Katalysators, sowie schliesslich vom Auftreten anderer H₂-bildender Reaktionen im Katalysator, kann ein wissenschaftlicher Beweis dieser Hypothese nur durch eine detaillierte Modellierung erfolgen. Dies war nicht Gegenstand dieses Projektes. Zur Zeit wird geprüft, ob entsprechende Arbeiten zum Beispiel im Rahmen eines Nachfolgeprojektes angegangen werden könnten.

Eine potentielle praktische Umsetzung der Ergebnisse dieses Projektes könnte bedeuten, dass die Sauerstoffspeicherkapazität von Dreiwege-Katalysatoren für CNG-Motoren/Fahrzeuge reduziert werden sollte. Da die CO-Emissionen bei CNG-Motoren wesentlich geringer ausfallen als bei Benzinmotoren und Anfertigungen als Bauteilschutz ebenfalls entfallen, ist die hohe Sauerstoffspeicherkapazität erstens voraussichtlich nicht notwendig und zweitens könnten NO_x-Peaks nach Schubphasen möglicherweise bereits ohne H₂-Beimischung deutlich gesenkt werden.



Fazit NO_x-Emissionen:

Die H₂-Beimischung führt zu einer deutlichen Reduktion der NO_x-Emissionen nach Katalysator. Dies kann auf ein stärkeres Ausräumen des im Katalysator gespeicherten Sauerstoffs nach Schubphasen durch höhere Wasserstoffanteile im Leerlauf zurückgeführt werden.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Beimischung von Wasserstoff zum CNG ist materialtechnisch nicht ohne Weiteres umsetzbar, da sowohl das Gasnetz wie auch die gasführenden Bauteile im Fahrzeug dafür ausgelegt sein müssen.

Der Betrieb in konventionellen CNG-Fahrzeugen würde aber zu nochmals deutlich geringeren Schadstoffemissionen führen, als diese im CNG-Betrieb ohnehin schon sind. Die NO_x-Emissionen könnten im gesamten Betriebsbereich praktisch eliminiert werden und auch die T.HC-Emissionen, die hauptsächlich aus Methan bestehen, das primär ein starkes Treibhausgas darstellt, könnten im Mittel um einen Drittel reduziert werden.

Betrieblich nachteilig wäre allerdings die volumetrische Energiedichte, die bei einem H₂-Anteil von 25 Mol% um fast 30% abnimmt. Sie könnte durch eine Druckerhöhung auf 350 bar kompensiert werden.

Für künftige Brennverfahren mit verdünnter Gemischbildung (Mager- oder AGR-Betrieb) könnten H₂-Anteile im einstelligen %-Bereich aufgrund der schwierigen Entflammung von Methangasen durchaus eine interessante Option darstellen.

6. Dank

Das Projektteam dankt dem Bundesamt für Energie (Programm Verbrennungsbasierte Energiesysteme) und der Gasmobil AG für die finanzielle Unterstützung des Projektes.