

Helmut Eichert und Richard Jarnovics

Wasserstoff als Zusatz für biogasbetriebene Blockheizkraftwerke

Der Einsatz von Wasserstoff als Additiv in Verbrennungsmotoren verspricht für gasbetriebene BHKW-Anlagen eine Verringerung der schädlichen Abgasbestandteile sowie eine Steigerung des Wirkungsgrades. Der Einsatz von Wasserstoff wurde daher gezielt am Motorenprüfstand auf die Formaldehydbildung untersucht. Die Versuche erfolgten für Erdgas und zwei Biogasarten mit einem Wasserstoffanteil von 0, 3, 6 und 9 Vol.-%. Ausgangspunkt für die Optimierung waren die Abgasgrenzwerte der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). Es ist gelungen den Motor so einzustellen, dass sich Formaldehyd (HCHO) reduziert, ohne dass der Wirkungsgrad verschlechtert wird.

Schlüsselwörter

Emissionen, Formaldehyd, Biogas, BHKW, elektrischer Wirkungsgrad

Keywords

Exhaust emissions, formaldehyde, biogas, CHP plant, electrical efficiency

Abstract

Eichert, Helmut and Jarnovics, Richard

Hydrogen as an additive for biogas-powered/driven combined heat and power plants

Landtechnik 68(5), 2013, pp. 316–321, 6 figures, 5 tables, 4 references

The use of hydrogen as an additive in internal combustion engines promises, in particular for gas-powered CHP plants, a reduction of harmful exhaust gas components, as well as an increase in the efficiency. For this reason, the inject of Hydrogenadditiv on the formation of formaldehyde has been studied. The experiments were performed for natural gas and two types of biogas with a hydrogen content of 0–9 Vol.-%. The starting point for optimizing was the German emission standards of the Technical Instructions on Air Quality Control (TA Luft). Thereby it is possible to adjust the motor to reduced formaldehyde (HCHO), without degrading the efficiency.

■ Die Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland hat sich von 2005 bis 2010 mehr als verdoppelt. Aufgrund dieser Entwicklung rücken Biogasanlagen immer stärker in den Fokus des öffentlichen Interesses und der Politik. Die TA Luft führte 2002 für den bei BHKW-Anlagen erzeugten Abgasschadstoff Formaldehyd (HCHO) einen Grenzwert von 60 mg/m_n^3 ein. In der Folgezeit wurden bei einer Vielzahl der BHKW-Anlagen, insbesondere bei denen mit Schwachgasbetrieb deutliche Grenzwertüberschreitungen ermittelt. Im Jahr 2012 wurde der Grenzwert für Formaldehyd auf 40 mg/m_n^3 gesenkt.

Deshalb wurde die HCHO-Bildung von Biogas-BHKW genauer untersucht [1; 2]. Wachtmeister und Bauer kamen bei ihrer Forschungsarbeit zur Formaldehydbildung [2] zu dem Ergebnis, dass die Grenzwerte mit dem derzeitigen Stand der Technik innermotorisch nicht sicher zu unterschreiten sind, ohne dass andere Parameter (Wirkungsgrad, Stickoxide) negativ beeinflusst werden. Daher wird Formaldehyd mit Abgasnachbehandlung reduziert. Die am meisten angewendete Methode ist der Oxidationskatalysator. Alternative Möglichkeiten sind z.B. die thermische Nachverbrennung oder Systeme auf Basis der Gaswäsche.

Das Zumischen von Wasserstoff in das Brenngas stellt eine weitere Möglichkeit dar, die in der vorliegenden Studie bei BHKW-Anwendungen untersucht wurde. In anderen Arbeiten wurde neben der Verringerung der Abgasemission auch eine Steigerung des Wirkungsgrades infolge der H_2 -Beimischung in Brenngasen ermittelt [3].

Ziel der Untersuchungen war es, die Auswirkungen der Wasserstoffbeimischung auf das Abgasverhalten und den Motorwirkungsgrad zu untersuchen. Dabei sollen die Versuche helfen die Möglichkeiten und Potenziale abzuschätzen, um einen Motor ohne Abgasnachbehandlungssysteme unter Einhaltung der Grenzwerte der TA-Luft zu betreiben.

Tab. 1

Motorspezifikation

Table 1: Engine specification

Zylinderanzahl Number of Cylinders	6 in Reihe 6 in line
Aufladung Charging	Abgasturbolader Exhaust gas turbocharger
Zündsystem Ignition system	Motortech MIC500
Gasmischer Gas mixer	Motortech Varifuel 2 für Erdgas/Biogas mit Luft RMG 985 für CO ₂ /Erdgas Motortech Varifuel 2 for natural gas/biogas with Air RMG 985 for CO ₂ /natural gas

Versuchsmotor und Prüfstands Aufbau

Die Wasserstoffuntersuchungen wurden an einem aufgeladenen Otto-Gasmotor durchgeführt. Der 6-Zylinder-Forschungsmotor verfügt über eine max. Leistung >100 kW (Tabelle 1). Der für die Versuche verwendete Gasmotor verfügt neben Druck- und Temperatursensoren für Öl, Wasser und Luft auch über eine Druckindizierung aller Zylinder. Weiterhin ist der Versuchsmotor mit Messstellen für ein Brennstoff-, Luftmengen- und Abgasemissionsmessgerät ausgerüstet.

Die Einspeisung des Wasserstoffs erfolgt zwischen dem Nulldruckregler der Gasregelstrecke und dem Gasmischer (Abbildung 1). Mit dem nachgeschalteten Verdichter des Turboladers wird eine nahezu ideale Homogenität des Brenngases erreicht. Die Sicherheit wird durch eine eigene Wasserstoffregelstrecke mit Detonationssicherung, Regelventilen

und Massendurchflussregler gewährleistet. Zusätzlich ist eine Stickstoffspülung der Wasserstoffregelstrecke installiert, die die Wasserstoffleitung bei einem ungewollten Motorstopp mit Stickstoff spült. **Abbildung 1** zeigt die Einbindung der Wasserstoffregelstrecke sowie den Aufbau der bisherigen Gasregelstrecke für den Erdgas-/Biogas-Betrieb.

Die Erfassung der Abgase erfolgte mit dem FAS-FTIR-Analysesystem Typ Versa des österreichischen Sondermaschinenbauers IAG. Für die Kommunikation und die Datenübertragung sowie deren Auswertung ist das FTIR-Analysesystem in das Prüfstandssystem eingebunden. Im Hinblick auf die TA Luft lag der Schwerpunkt der Messungen auf den Stickoxiden (NO_x), dem Kohlenstoffmonoxid (CO) sowie dem Formaldehyd (HCHO).

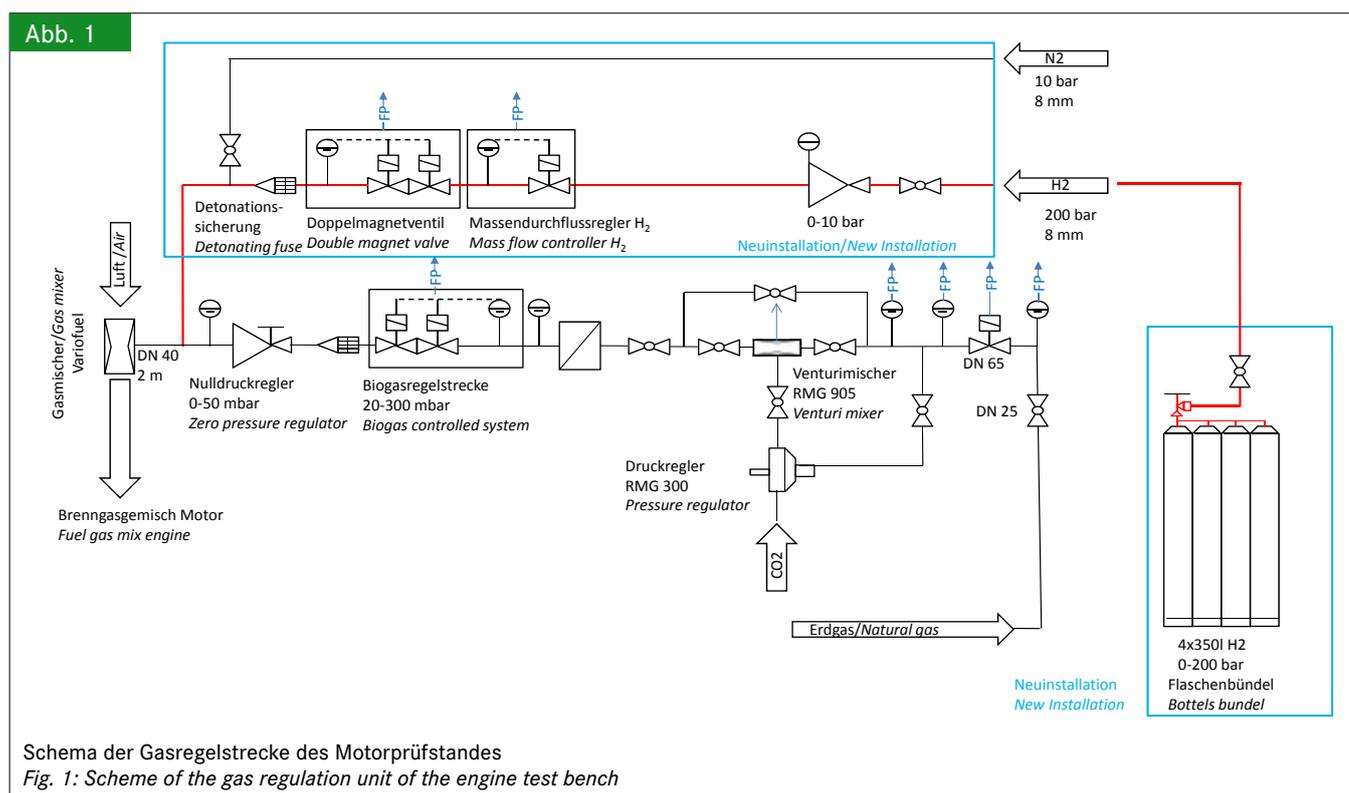
Versuchsdurchführung

Die konstant gehaltenen Randbedingungen sind in **Tabelle 2** und die untersuchten Einflussgrößen sind in **Tabelle 3** zusammengestellt. Die Motordrehzahl beträgt die für BHKW-Anwendungen üblichen 1500 Umdrehungen pro Minute. Es wurde eine Leistung von 83 kW gewählt.

Die Emission der Abgasschadstoffe wird in ppm gemessen und für 5 % Restsauerstoff (Deutscher Standard TA Luft) in mg/m_n³ korrigiert.

Die Biogaszusammensetzung beim Biogas-BHKW ist stark vom Substrateinsatz abhängig. Deshalb erfolgte die Versuchsdurchführung für zwei verschiedene Biogasarten, nämlich Biogas 50/50, Biogas 60/40 sowie Erdgas. Die Gasmischung Biogas 60/40 setzt sich aus 60% Methan (CH₄) und 40% Kohlenstoffdioxid (CO₂) zusammen. Darüber hinaus wurden die Luftverhältnisse und Zündzeitpunkte variiert. Hierbei wurde

Abb. 1



Tab. 2

Allgemeine Versuchsbedingungen

Table 2: General experimental conditions

Parameter/Parameter	Bereich/Range
Frequenz Frequency	50 Hz
Nenndrehzahl Crankshaft rotation speed	1 500 ± 5 min ⁻¹
Leistung Power	83 ± 1,2 kW
Schmieröltemperatur Lube oil temperature	> 100 °C
Kühlwassertemperatur Cooling water temperature	90 °C ± 1 °C
Gemischtemperatur Gas mixture temperature	50 °C ± 1 °C

Tab. 3

Untersuchte Einflussgrößen

Table 3: Analyzed factors

Parameter/Parameter	Bereich/Range
H ₂ Vol.-% im Kraftstoff H ₂ Vol.-% in fuel	0, 3, 6 und 9 Vol.-% ± 0,5 %
CO ₂ Vol.-% im Kraftstoff CO ₂ Vol.-% in fuel	40 und 50 Vol.-% ± 0,5 %
Luftverhältnis Air-fuel ratio	1,2; 1,3; 1,4; 1,5 und 1,6 ± 0,1
Zündzeitpunkt [°KW] Ignition timing [°CA]	334, 337, 340, 343 und 346

Tab. 4

Nomenklatur

Table 4: Nomenclature

Abkürzung/Abbreviation	Beschreibung/Description
EG	Erdgas/Natural gas
BG 60/40	Biogas aus 60 % Methan (CH ₄) und 40 % Kohlenstoffdioxid (CO ₂)/Biogas from 60 % methane (CH ₄) and 40 % carbon dioxide (CO ₂)
BG 50/50	Biogas aus 50 % Methan(CH ₄) und 50 % Kohlenstoffdioxid (CO ₂)/Biogas from 50 % methane (CH ₄) and 50 % carbon dioxide (CO ₂)
ZZP	Zündzeitpunkt [°KW] Ignition timing [°CA]
λ	Luftverhältnis/Air-fuel ratio

ein Wasserstoffanteil der Brenngasmischung mit 0, 3, 6 und 9 Vol.-% untersucht. Die untere Grenze des Luftverhältnisses wurde dabei mittels eines NO_x-Grenzwertes festgelegt. Die obere Grenze wurde so gewählt, dass der Motor gerade noch ohne Verbrennungsaussetzer betrieben werden konnte.

Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend sollen die Auswirkungen der Wasserstoffeinblaufung auf das Abgas und den Motorwirkungsgrad diskutiert werden, besonders im Hinblick auf die Möglichkeiten für Biogas 50/50. Diese Gasmischung entsteht bei den häufig anzutreffenden NawaRo-Anlagen (Nachwachsender Rohstoff). Die Biogas-BHKW-Anlagen vergären Gülle und nachwachsende Rohstoffe (z.B. Gras, Getreide, Mais) zu Biogas. Parallel erfolgten die Untersuchungen der Brenngase Erdgas und Biogas 60/40 (Tabelle 4 und 5).

Für einen Anlagenbetreiber ist es wichtig, einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen und gleichzeitig die Grenzwerte der TA Luft einzuhalten. Daher wird der Referenzpunkt nahe am Grenzwert der Stickoxide von 500 mg/m_n³ festgelegt. Der Grenzwert von Formaldehyd beträgt 40 mg/m_n³. Aus diesen Grenzen resultiert ein möglicher Betriebsbereich (Abbildung 2). Die blaue Markierung verdeutlicht den Betriebsbereich für Biogas 50/50 mit H₂- und die grüne ohne H₂-beimischung.

Für die Vergleiche wurde das fetteste Gemisch gewählt, da hier der beste Wirkungsgrad unter Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte erreicht wird (Tabelle 5). Da der Grenzwert der CO-Emission von 1 000 mg/m_n³ bei Anlagen kleiner 3 Megawatt immer eingehalten wird (Abbildung 3), braucht dieser Schadstoff für die Ermittlung eines möglichen Betriebsbereichs nicht weiter betrachtet werden. Durch die Zugabe von Wasserstoff steigen die globalen und lokalen Verbrennungstemperaturen bei gleichem Zündzeitpunkt und gleichem Luftverhältnis, was zu einer Erhöhung der Stickoxidemissionen über den zulässigen Grenzwert führt. Die Bildung von Formaldehyd wird dagegen gehemmt, diese Beobachtung entspricht auch dem bereits bekannten Trade-Off-Verhalten von Stickoxiden und Formaldehyd. Durch eine sorgfältige Auswahl von Luftverhältnis und ZZP kann diesem Phänomen entgegengewirkt werden (Abbildung 4, 5 und 6).

Die H₂-Beimischung verschiebt die Magerlaufgrenze, d.h. die Grenze bei der noch keine Verbrennungsaussetzer auftreten. Infolge des Betriebs mit größeren Luftverhältnissen kann der NO_x-Grenzwert eingehalten werden. Zusätzlich steigert die H₂-Beimischung den Wirkungsgrad (Abbildung 2), was sich umso deutlicher zeigt je später der ZZP gewählt wird. Dies trifft für die Gasmischungen Erdgas und Biogas 60/40 sowie Biogas 50/50 zu. Weiterhin zeigen die Ergebnisse der untersuchten Gasmischungen, dass die H₂-Beimischung eine Verschiebung des maximalen Wirkungsgrades hin zu höheren Luftverhältnissen bewirkt.

Gegenläufig zur Stickoxid-Emission verhält sich die HCHO-Emission: Durch die schlechteren Brennbedingungen aufgrund der geringeren Brennraumtemperaturen bei mageren Brenn-

Tab. 5

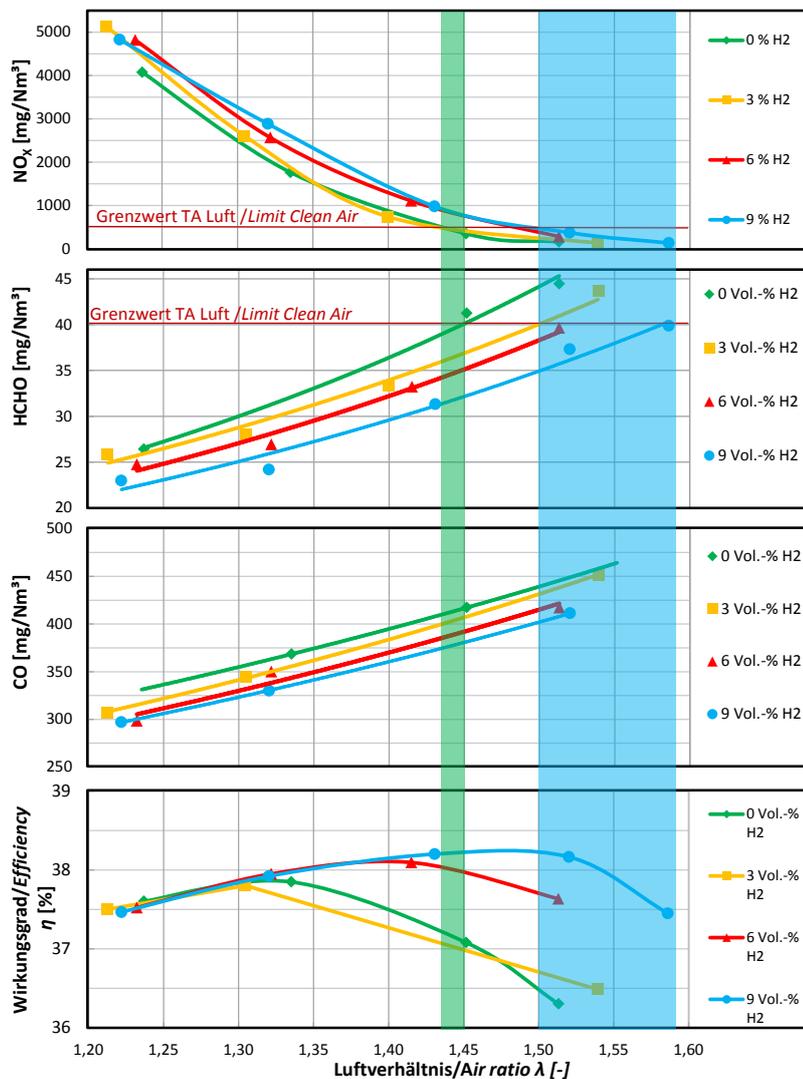
Vergleich verschiedener Brenngase und ihr Einfluss auf H₂-Beimischung

Table 5 : Comparison of different fuel gases and their impact on hydrogen admixture

Gasart Type of gas	Wirkungsgrad Efficiency [%]	NO _x [mg/m ³]	CH ₂ O [mg/m ³]	CO [mg/m ³]
EG	37,1	500	40	430
EG 9 Vol.-% H ₂	37,7 (+1,34 %) ¹⁾	500 (-) ¹⁾	38 (-5 %) ¹⁾	420 (-2,3 %) ¹⁾
BG 60/40	37,7	500	40	428
BG 60/40 9 Vol.-% H ₂	38,4 (+1,9 %) ¹⁾	500 (-) ¹⁾	37 (-7,5 %) ¹⁾	410 (-4,2 %) ¹⁾
BG 50/50	37,2	500	39,0	410
BG 50/50 9 Vol.-% H ₂	38,2 (+2,7 %) ¹⁾	500 (-) ¹⁾	34 (-12 %) ¹⁾	375 (-10 %) ¹⁾

¹⁾ Der Wert bezeichnet den relativen Unterschied in % zu dem vergleichbaren Brenngas unter Einhaltung der TA-Luft-Grenzwerte. / This value means the relative difference in % of the similar fuelgas in terms of the TA-Luft limit values.

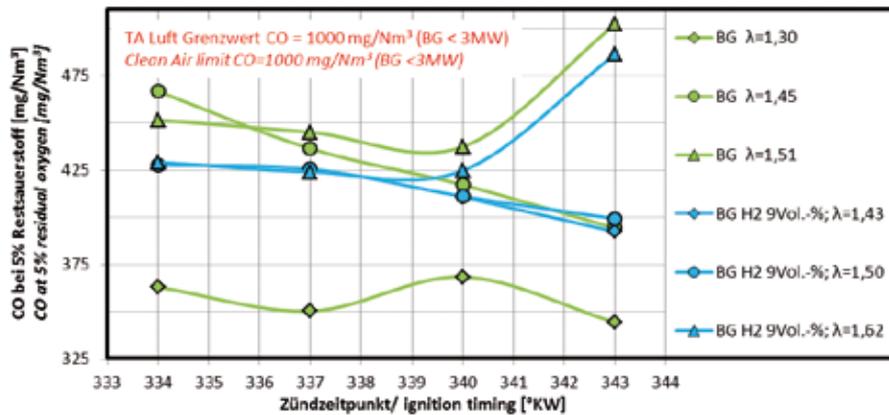
Abb. 2



Einfluss der Wasserstoffkonzentration und des Luftverhältnisses auf den Wirkungsgrad sowie die Abgasemissionen (NO_x, HCHO, CO) bei BG 50/50 [4]

Fig. 2: Influence of the hydrogen concentration and the air ratio on the efficiency and the exhaust emissions (NO_x, HCHO, CO) at BG 50/50 [4]

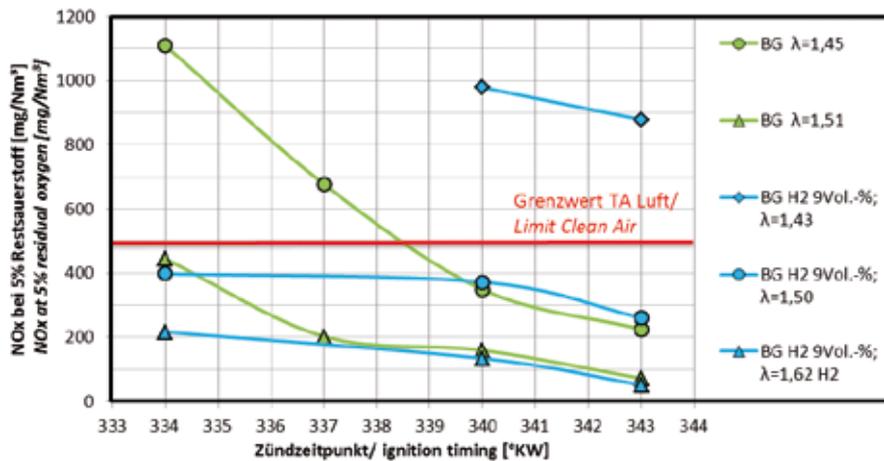
Abb. 3



Einfluss des Zündzeitpunkts und λ auf die CO-Emission bei BG 50/50 mit 0 und 9 Vol.-% H₂ [4]

Fig. 3: Influence of ignition timing on the CO-Emission of BG 50/50 with 0 and 9 vol.-% H₂ [4]

Abb. 4



Einfluss des ZPP und des Luftverhältnisses λ auf die NO_x-Emission bei BG 50/50 mit 0 und 9 Vol.-% H₂ [4]

Fig. 4: Influence of ignition timing on the NO_x-Emission of BG 50/50 with 0 and 9 vol.-% H₂ [4]

gasgemischen steigen die HCHO-Emissionen an. Dies zeigt sich besonders deutlich bei Biogas mit Luftverhältnis $\lambda = 1,51$ (**Abbildung 5**). Allerdings sind Werte von $\lambda > 1,45$ im Biogasbetrieb nicht von wesentlicher Bedeutung, da mit Biogas betriebene BHKW aus Gründen des Wirkungsgrades selten mit Luftverhältnissen von $\lambda > 1,40$ betrieben werden.

Der Motor mit der Gasmischung Biogas 50/50 konnte durch eine H₂-Beimischung von 9 Vol.-% den effektiven Wirkungsgrad um 2,7 % (absolut um 1 %) steigern. Dabei verringerte sich gleichzeitig die Emission an HCHO um 12 % und die von CO um 10 %. Erst mit Wasserstoffeinblasung wird es möglich, den getesteten BHKW-Motor ohne Abgasnachbehandlung nach geltender Richtlinie der TA Luft zu betreiben.

Insgesamt können die Ergebnisse der Untersuchungen von Wasserstoff als Additiv für Schwachgas-Motoren zur Weiterentwicklung und Optimierung von Gasmotoren, zur Verbesserung des Wirkungsgrades und zu einer geringeren Umweltbelastung

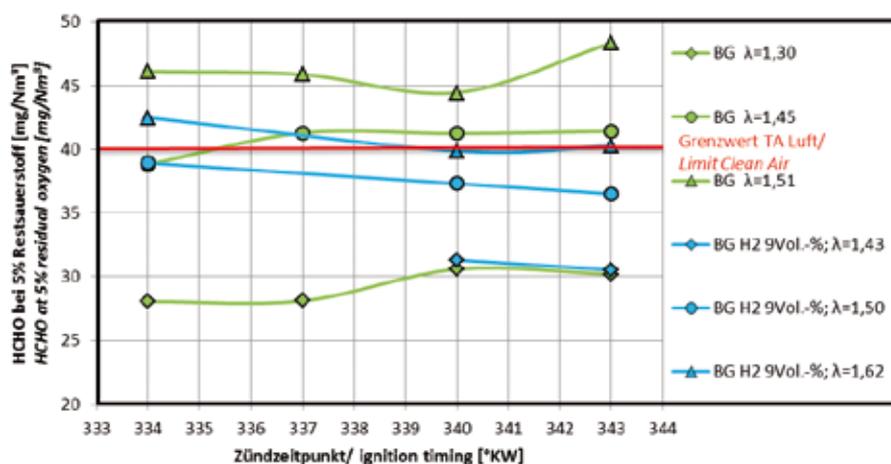
beitragen. Der Einsatz von Wasserstoff vergrößert den Wirkungsgrad und reduziert die Abgasemission.

Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Forschungsarbeiten zeigen, dass mit dem Zusatz von Wasserstoff in Brenngasen deutliche Wirkungsvorteile und eine Reduzierung der Formaldehydemission erreicht werden können. Die NO_x-Emission steigt jedoch durch den Wasserstoffzusatz an. Dennoch können durch Anpassung der Motorparameter, wie Luftverhältnis oder Zündzeitpunkt, die Grenzen gemäß TA Luft ohne Abgasnachbehandlung eingehalten werden.

Der Einfluss des H₂-Zusatzes ist bei allen Brenngasen qualitativ ähnlich, bei Brenngasen mit kleinerem Heizwert jedoch mehr ausgeprägt. Generell zeigen alle Brenngase mit steigender Wasserstoffkonzentration im Brenngas eine Zunahme des Wirkungsgrades.

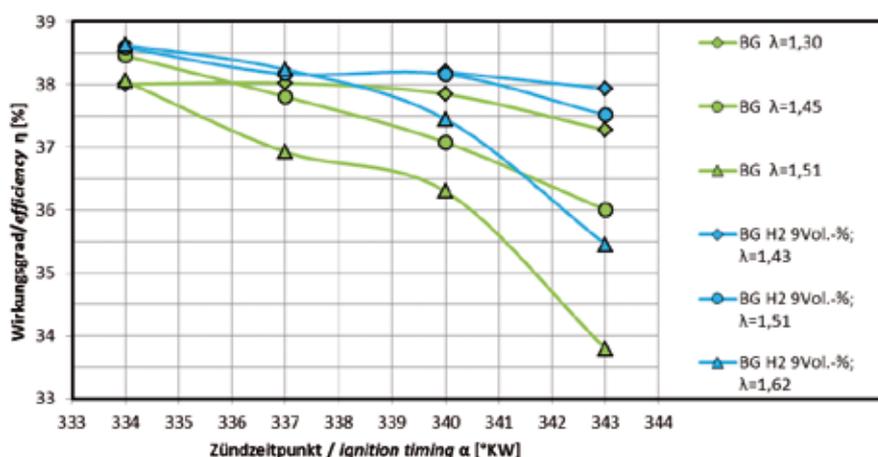
Abb. 5



Einfluss des ZPP und des Luftverhältnisses λ auf die HCHO-Emission bei BG 50/50 mit 0 und 9 Vol.-% H₂ [4]

Fig. 5: H₂ / Influence of ignition timing on the HCHO-emission of BG 50/50 with 0 and 9 vol.-% H₂ [4]

Abb. 6



Einfluss des ZPP und des Luftverhältnisses λ auf den Wirkungsgrad bei BG 50/50 mit 0 und 9 Vol.-% H₂ [4]

Fig. 6: Influence of ignition timing and air ratio on the efficiency of BG 50/50 with 0 and 9 vol.-% H₂ [4]

Der Einsatz von Wasserstoff als Brenngaszusatz für Biogasanlagen oder für BHKW-Anlagen, die mit Schwachgas betrieben werden, hängt im Wesentlichen von den Kosten ab, die für Wasserstoff anfallen. Neben einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollten auch weiterführende Messungen an anderen Motoren und Biogasanlagen erfolgen, um die Kenntnisse und Mechanismen der HCHO-Bildung sowie die Abstimmung der Motoren zu verbessern.

Literatur

- [1] Bauer, M.; Wachtmeister, G. (2008): Formaldehyd - Wirkmechanismen. Frankfurt am Main, FVV, Heft R547-2008
- [2] Neumann, T.; Beer, V.; Wedwitschka, H. (2010): Biogas-BHKW: Einflussparameter auf die Formaldehydemissionen. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14941>, Zugriff am 13.9.2013
- [3] Eichseder, H.; Klell, M. (2010): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag
- [4] Jarnovics, R. (2012) Untersuchung des Einflusses von Wasserstoff/Knallgas als Zusatz von Schwachgas beim Einsatz im Verbrennungsmotor. Diplomarbeit, Westsächsische Hochschule Zwickau

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Richard Jarnovics ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik (Leiter: **Prof. Dr.-Ing. Helmut Eichert**) der Westsächsischen Hochschule Zwickau (WHZ), Dr.-Friedrichs-Ring 2A, 08056 Zwickau, E-Mail: richard.jarnovics@fh-zwickau.de

Danksagung

Diese Arbeit ist ein Gemeinschaftsprodukt der WHZ und der AEV Energy GmbH Dresden. Ein herzlicher Dank gebührt allen am Projekt beteiligten Partnern, den Institutsmitarbeitern, studentischen Hilfskräften der Westsächsischen Hochschule Zwickau, den Mitarbeitern der AEV Energy GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Alfons Himmelstoss sowie Herrn Dipl.-Ing. Roland Reiter für die Unterstützung dieses Projektes.