

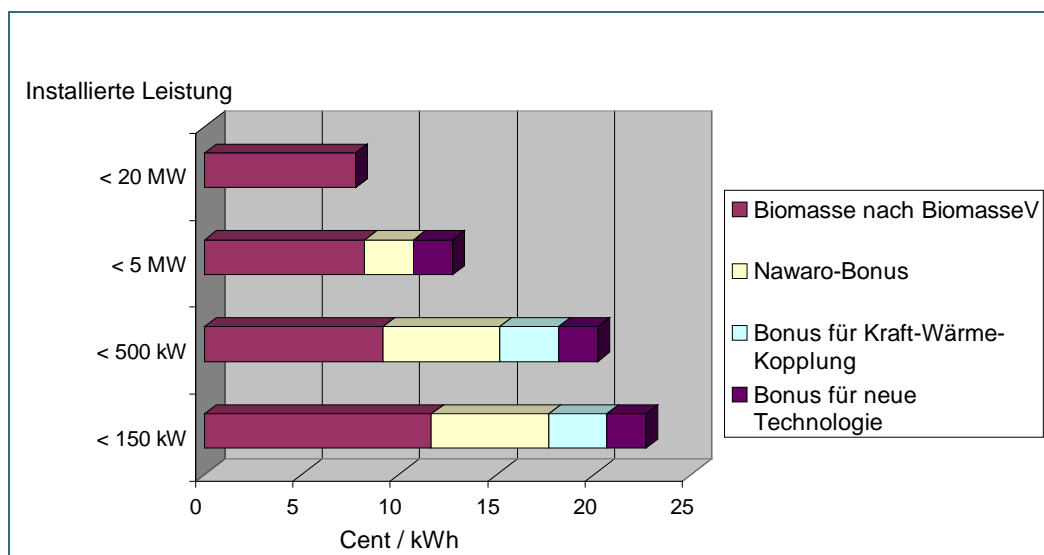


# Emissionen von Holzgasmotoren und Möglichkeiten zur Minderung

## 1 Einleitung

Die Technik zur Erzeugung und motorischen Nutzung von Holzgas ist eigentlich lange bekannt. Bis in die frühen 1950er Jahre waren in Deutschland etliche mit Holzgas betriebene Kleinlastwagen im Einsatz bis die Verfügbarkeit von Öl und Gas die Holzgasmotoren verdrängte.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz hat dieser Technik zu einer Renaissance verholfen. Es macht die Stromerzeugung aus Biomasse besonders in kleinen Anlagen attraktiv. Seit einigen Jahren laufen daher intensive Entwicklungsarbeiten, um diese Nachkriegstechnik an heutige Erfordernisse und Ansprüche anzupassen. Nach Auskunft des Fördervereins Erneuerbare Energien e.V. sind derzeit in Deutschland ca. 75 Holzgasmotoren in Betrieb, von denen 25 im letzten Jahr 2008 dazu gekommen sind.



Stromeinspeisevergütung nach EEG für Holzgas-BHKW

Bei den meisten Vergaser-Anlagen handelt es sich um Gleichstromvergaser, in denen die Holzhackschnitzel von oben dem Vergaser zugeführt werden. Während der Brennstoff nach unten rutscht, erfolgen Trocknung und Pyrolyse. Im mittleren Teil des Vergasers sind Lufteinlässe eingerichtet, im unteren Teil wird das entstehende Holzgas abgezogen. Während im mittleren Vergaserbereich eine Oxidation des Brennstoffs erfolgt und hohe Temperaturen entstehen, kommt es im unteren Bereich durch Luftmangel zur Reduktion von Koh-

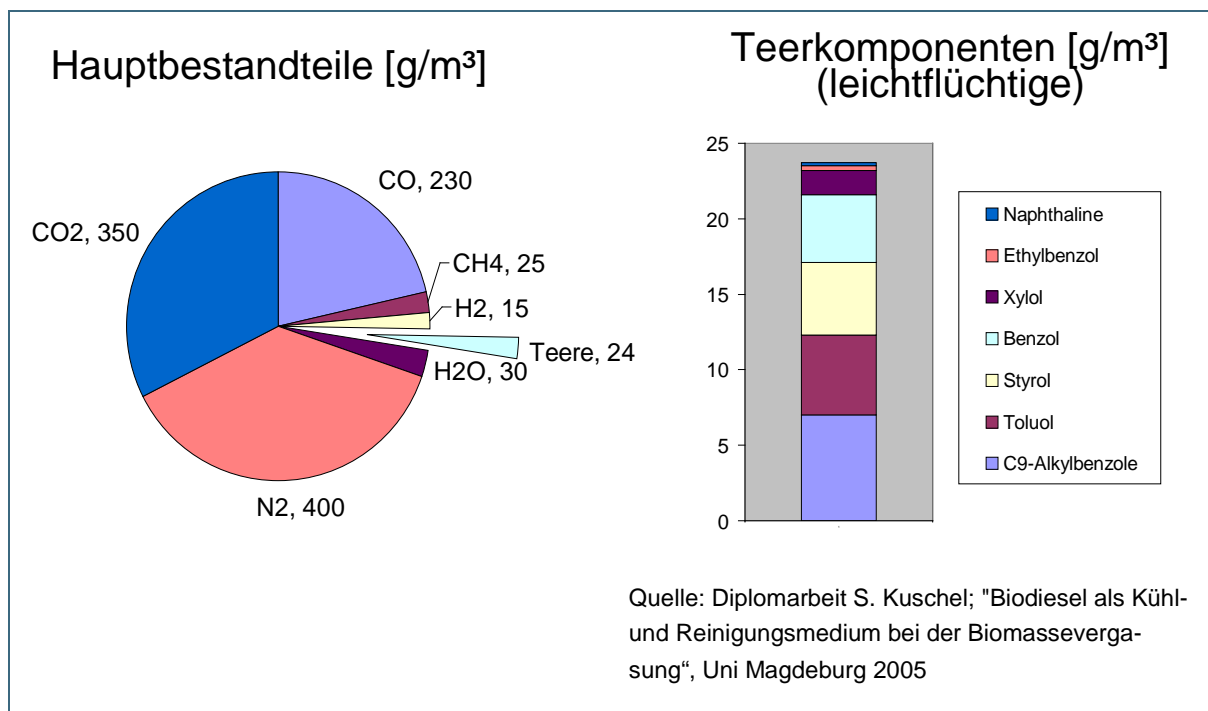
lendioxid und Wasser, wobei Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Methan gebildet werden und die Temperatur im Vergaser um mehrere hundert Grad abfällt.

Darüber hinaus enthält das Holzgas jedoch weitere Komponenten, die bei der motorischen Nutzung zu Schadstoffemissionen führen.

## 2 Zusammensetzung von Holzgas

Im Gegensatz zu Erdgas oder auch Biogas enthält Holzgas eine Vielzahl von Komponenten. Der Heizwert wird bestimmt von den Gehalten an Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Methan (CH<sub>4</sub>). Weitere Hauptkomponenten sind Stickstoff (N<sub>2</sub>), Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O). Auch sind viele Teerbestandteile enthalten.

Übersicht zeigt Abbildung 2.1.



Zusammensetzung von Holzgas (ohne staubförmige Komponenten), Ergebnisse aus Pyrolyseversuchen ; Massenkonzentrationen in g/m<sup>3</sup> [1]

Eine aus Sicht der Luftreinhalte besonders kritische Verbindung ist das krebserzeugende Benzol. Es kann als Leitkomponente für die leichtflüchtigen Teerbestandteile herangezogen werden. Bei Laborversuchen konnte durch eine Gaswäsche mit Biodiesel eine Benzol-Minderung von > 90 % gemessen werden.

Damit das Gas im Motor keine Schäden verursacht, müssen die schwerflüchtigen und staubförmig oder kondensiert vorliegenden Komponenten zuvor entfernt werden. Hierfür wurde eine Reihe von Reinigungskonzepten entwickelt, die auch in Kombination zum Einsatz kommen:

- Keramische Kerzenfilter (bei Gastemperaturen von > 300 °C)
- Tuchfilter (bei Gastemperaturen unter < 300 °C)
- Elektrofilter
- Nasselektrofilter
- Wäscher

- Wasserwäscher (deren Waschflüssigkeit manchmal auch Tenside zugegeben werden)
- Pflanzenöl- bzw. Biodiesel-Wäscher

Die Produktgasaufbereitung hat neben der Reinigungsfunktion aber auch die Erhöhung der Energiedichte (volumenbezogen) zum Ziel. Hierfür wird das am Vergaseraustritt etwa 600 °C heiße Gas auf deutlich unter 100 °C vor Motoreintritt abgekühlt. Der Energieinhalt (chemisch gebundene und fühlbare Wärme) des Produktgases sinkt dadurch um etwa 20 %.

### 3 Emissionen bei der Produktgasaufbereitung

Bei der Besichtigung der Anlagen fällt auf, dass bei manchen erhebliche Geruchswahrnehmungen auftreten, bei anderen sind nahezu keine Gerüche wahrnehmbar.

Besonders geruchsintensiv sind Kondensate und Waschflüssigkeiten aus der nassen Produktgasaufbereitung. Wer die Anlagen kennt, weiß, wie stark die Geruchsfreisetzungen aus Waschwasser bzw. Kondensat führenden Anlagenteilen sind, wenn diese nicht vollständig gekapselt werden.



Bandfilter zur  
Abscheidung fester  
Stoffe aus dem  
Waschwasser

Zur Vermeidung von Geruchsbelästigungen in der Nachbarschaft sollten Waschwasser führende Anlagenkomponenten deshalb unbedingt gekapselt und Verdrängungsluft gependelt bzw. gereinigt werden.

## 4 Emissionen im Motorabgas

### 4.1 Einflussgrößen

#### 4.1.1 Vergasertemperatur

Die Reaktionstemperatur im Vergaser hat großen Einfluss auf die Bildung von Teer. Je höher die Temperatur ist, desto niedriger ist die Neigung zur Teerbildung. So sank bei Versuchen des IVD Stuttgart an einem Versuchs-Flugstromreaktor bei Steigerung der Reaktionstemperatur von 600 auf 1000 °C der Teergehalt im Holzgas von 48 g/m<sup>3</sup> auf 10 g/m<sup>3</sup> ab [2]. Eine hohe Reaktionstemperatur im Vergaser führt vermutlich auch zu einer Reduzierung von Benzol. Andererseits ergaben die Versuche, dass mit steigender Temperatur der Anteil hochsiedender Kohlenwasserstoffe, wie Benzo(a)pyren, zunimmt.

Durch geeignete Zuführung der Verbrennungsluft in die Oxidationszone können eine gleichmäßige Verteilung erreicht und kalte Bereiche vermieden werden. Weitere Forschungsaktivitäten zur Benzolentstehung und zum Minderungspotenzial durch Optimierung des Vergasungsprozesses wären hilfreich.

#### 4.1.2 Motorspezifische Einflussgrößen

Wichtigste Ursache für die Emissionen von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen im Motorabgas ist der sog. Motorschlupf: Bestandteile des Holzgases gelangen unverbrannt durch den Motor in das Abgas. Ursachen sind Ventilüberschneidung und hoher Zylinderinnendruck [3], der in den vergangenen Jahren der motortechnischen Entwicklung eine deutliche Steigerung des Wirkungsgrad ermöglichte. Der Schlupf beträgt nach Angaben in der Literatur etwa 0,7 – 1,5 % [4].

Aber auch die unvollständige Oxidation von Kohlenwasserstoffen kann die Emissionen an Kohlenmonoxid erhöhen. So werden in der Literatur für Kohlenmonoxid höhere Schlupfanteile genannt als für Methan.

Bei einem typischen O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas von etwa 5 Vol.-% beträgt das Verhältnis der Volumenströme von Motorabgas zu Holzgas etwa 1 zu 2,5.

#### 4.1.3 Abgasreinigung mit Oxidationskatalysatoren

Die Emissionen an Kohlenwasserstoffen und an Kohlenmonoxid können mit Oxidationskatalysatoren effektiv gemindert werden. Die Minderungsleistung hängt insbesondere ab von der Katalysatoreintrittstemperatur und von der Strömungsgeschwindigkeit durch den Katalysator. Zudem ist die Minderungsleistung nicht für alle Stoffe gleich. So werden im Entwurf der Richtlinie VDI 3476 Bl. 2 „Verfahren der katalytischen Abgasreinigung - Oxidative Verfahren“ bei definierter Katalysatorauslegung für die Erreichung einer Minderungsleistung von 99 % für die verschiedenen Stoffe unterschiedliche Katalysatoreintrittstemperaturen genannt:

- Kohlenmonoxid            180°C
- Formaldehyd            190°C
- Benzol                    300°C
- Methan:                    450°C

Mit zunehmender Betriebsdauer verliert der Katalysator jedoch an Leistung. Nach Versuchen der Fa. Jenbacher an der Holzgasverstromungsanlage Güssing sank die Minderungsleistung des Katalysators für Kohlenmonoxid von 90 % nach 16.000 Betriebsstunden auf etwa 70 % [5].

#### 4.2 Ergebnisse aus Emissionsmessungen

Die Müller-BBM GmbH hat im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Emissionsmessungen im Abgas eines Holzgas BHKW mit einer elektrischen Leistung von 30 kW durchgeführt. Es handelte sich um eine Versuchsanlage der Fa. Spanner RE<sup>2</sup> in Neufahrn bei Landshut. Das Vergasungsverfahren basiert auf dem „Joos“-Vergaser mit trockener Produktgasaufbereitung, bei der das Holzgas lediglich nach Austritt aus dem Vergaser gekühlt und in einem Tuchfilter bei 120 °C entstaubt wird, bevor es mit einer Temperatur von ca. 50 °C dem Motor (Hersteller: KW Energietechnik; Typ: KWE 30HG-8AP) zugeführt wird.

Tabelle 2.1 zeigt eine Zusammenfassung der Messergebnisse und berechnete Schlupfanteile zwischen Produktgas und Motorabgas sowie Minderungsleistungen des Oxidationskatalysators.

Tabelle 2.1: Ergebnisse aus Emissionsmessungen an einem Holzgas-Verbrennungsmotor der Fa. Spanner RE<sup>2</sup>, Neufahrn

Betriebszustand		regulär	Zündzeitpunkt variiert	Be-/Umrechnungen
<b>Produktgas</b>	Einheit			
Vol.strom	Nm <sup>3</sup> /h	62 <sup>1)</sup>		
H <sub>2</sub>		16 Vol.-%		
CH <sub>4</sub>		2,1 Vol.-%		15 g/m <sup>3</sup>
CO		21 Vol.-%		240 g/m <sup>3</sup>
Benzol	[g/m <sup>3</sup> ]	2,6		
BaP	[µg/m <sup>3</sup> ]	< 1		
<b>Abgas</b>				
Anzahl Mess.		6	1	-
<b>Vor Katalysator</b>				Schlupf [%]
Vol.-strom	Nm <sup>3</sup> /h	174		
O <sub>2</sub>	[%]	2,5	9,0	
CO	[g/m <sup>3</sup> ]	1,8	2,1	2,1 %
NO <sub>x</sub>	[g/m <sup>3</sup> ]	-		
Gesamt C	[mg/m <sup>3</sup> ]	151	-	
Benzol	[mg/m <sup>3</sup> ]	22	-	2,4 %
Geruch <sup>1)</sup>	[GE/m <sup>3</sup> ]	2520	-	
BaP	[µg/m <sup>3</sup> ]	< 1		
<b>Nach Kat:</b>				Minderungsleistung [%]
Vol.-strom	Nm <sup>3</sup> /h	206		
O <sub>2</sub>	[Vol.-%]	1,9	5,0	
CO	[g/m <sup>3</sup> ]	0,16	0,11	91 %
NO <sub>x</sub> [g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	0,63	0,76	
Gesamt C	[mg/m <sup>3</sup> ]	31	15	
Methan		49,3	57	
Benzol	[mg/m <sup>3</sup> ]	4,7	8,5	79 %
BaP	[µg/m <sup>3</sup> ]	< 1		
Geruch <sup>2)</sup>	[GE/m <sup>3</sup> ]	3690	-	0 %

Zur Begrenzung der Emissionen von Holzgas-BHKW nach dem Stand der Technik empfiehlt das Landesamt für Umwelt die Anforderungen der TA Luft der Nummern 5.2.1 (Staub), 5.2.7.1 (krebs-erzeugende Stoffe: Benzol) und hilfsweise der Nr. 5.4.1.4 für Biogasmotoren (CO, NO<sub>x</sub>, Formaldehyd) heranzuziehen.

Motorart		Gas-Otto	Zündstrahl
Kohlenmonoxid	g/m <sup>3</sup>	0,65 / 1,0 <sup>1)</sup>	0,65/ 2,0 <sup>1)</sup>
Stickstoffoxide, als NO <sub>2</sub>	g/m <sup>3</sup>	0,50	0,50 / 1,0 <sup>1)</sup>
Staub	mg/m <sup>3</sup>	20	20
Formaldehyd	mg/m <sup>3</sup>	60	60
Benzol	mg/m <sup>3</sup>	1	1
Benzo(a)pyren	µg/m <sup>3</sup>	50	50

Tabelle 2.2 Anforderungen nach TA Luft an Holzgasmotoren gemäß Empfehlung des LfU Bayern

<sup>1)</sup> falls FWL < 3 MW

In Tabelle 2.3 sind weitere Messergebnisse aus dem LfU vorliegenden Messberichten zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Messungen lassen sich wie folgt zusammen fassen:

- Bei Einsatz von Oxidationskatalysatoren kann der Emissionswert für Kohlenmonoxid von 0,65 g/m<sup>3</sup> eingehalten werden. Der für die motorische Nutzung von (sonstigen) gasförmigen Brennstoffen vorgesehene CO-Emissionswert von 0,30 g/m<sup>3</sup> wird vereinzelt ebenfalls eingehalten.
- Die Stickstoffoxid-Emissionswerte lagen nur bei einem Motor über dem in der TA Luft genannten Emissionswert. Durch Optimierung der Motoreinstellung könnten die NO<sub>x</sub>-Emissionen noch weiter gesenkt werden.
- Die Einhaltung des Emissionswertes für Staub ist unproblematisch.
- Der Emissionswert für Formaldehyd kann i.d.R. eingehalten werden. Nur bei einer der Messungen kam es zu einer Überschreitung, bei der die Betriebsbedingungen nicht repräsentativ waren. Nach Katalysator lagen die Konzentrationswerte sicher unter 5 mg/m<sup>3</sup>.
- Die im Motorabgas vor Katalysator gemessenen Benzolkonzentrationen lagen zwischen 2,5 und 34 mg/m<sup>3</sup>. Diese beiden Extremwerte wurden an 2 unterschiedlichen aber baugleichen Anlagenmodulen gemessen. Die an diesen Modulen gemessenen Sauerstoffgehalte zeigen an, dass die hohen Benzolwerte auf eine Störung des Vergasungsprozesses mit der Folge einer unvollständigen Oxidation zurückzuführen sind. Mit Oxidationskatalysatoren werden Minderungsleistungen für Benzol von etwa 80 % erreicht; sodass die Einhaltung des in der TA Luft für Benzol genannten Emissionswertes von 1 mg/m<sup>3</sup> grundsätzlich möglich erscheint aber nicht sicher gestellt ist.
- Die Konzentration an Benzo(a)pyren lag in allen Abgasproben unter der Nachweisgrenze. Mit Blick auf die relativ hohen Kosten empfehlen wir auf den messtechnischen Nachweis der Einhaltung zukünftig zu verzichten.
- Die Geruchskonzentration im Reingas betrug im Mittel ca. 3700 GE/m<sup>3</sup>. Der Katalysator bewirkte keine Minderung.

Tabelle 2.2: Ergebnisse aus dem LfU vorliegenden Messberichten

Hersteller Messinstitut		XXX LfU	XXX TÜV Süd		XXX MüllerBBM	XXX MüllerBBM		XXX TÜV Ö	XXX MüllerBBM
<b>Vergasungs- verfahren</b>		Gleichstrom	Gleichstrom		Gleich- strom	Gleichstrom		Gleich- strom	Wirbel- schicht
<b>Gasreinigung</b>		Nass	Nass		Trocken	Nass+Hackschnitzelfilter		Trocken	Nass
Benzol im Holzgas	[g/m <sup>3</sup> ]	-	3,5		2,6	-	-	-	1,5
Motorart		Zündstrahl	Zündstrahl		Gas-Otto			Gas-Otto	Zündstrahl
<b>Motorabgas</b>			M1	M2		M2	M1		
O <sub>2</sub>	[%]	7,5	11	11	2,5	6,4 – 12,1	3,4	5,2	8,0
CO	[g/m <sup>3</sup> ]	3,5	-	-	1,8	1,5 – 3,2	0,76	-	4,2
NO <sub>x</sub>	[g/m <sup>3</sup> ]	0,38	-	-	-	0,09	0,23	-	0,32
GesamtC NMHC	[mg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	151	-	-	-	96 -
Formaldehyd	[mg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	18 - 81	11	-	2 - 15
Benzol	[mg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	22	12 - 34	2,5	-	10 - 20
BaP	[µg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	< 1	< 20	< 20	-	1
Staub	[mg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	1	1	-	-
<b>Nach Katalysator</b>									
CO	[g/m <sup>3</sup> ]	0,44	0,47	0,18	0,16	-	-	0,53	-
NO <sub>x</sub> [g/m <sup>3</sup> ]	[g/m <sup>3</sup> ]	0,38	0,67	0,68	0,63	-	-	0,30	-
Gesamt C NMHC	[mg/m <sup>3</sup> ]	426 -	-	-	31 0	-	-	- 20	-
Formaldehyd	[mg/m <sup>3</sup> ]	0,1	2	1	-	-	-	-	-
Benzol	[mg/m <sup>3</sup> ]	8 – 12	6 - 9	5	4,7	-	-	-	-
BaP	[µg/m <sup>3</sup> ]	< 1	< 1	< 1	< 1	-	-	-	-
Staub	[mg/m <sup>3</sup> ]	4	2	2	-	-	-	-	-

## Datenquellen:

- Eigene Emissionsmessungen des Bayer. Landesamtes für Umwelt
- Messberichte der Messstellen Müller BBM (Nr. M75 510/1; M77 823/1; M78 190/1), TÜV Süd (Nr. N1175751) und TÜV Österreich (Nr. 22070261-1)

## 5 Fazit

Holzvergasungsanlagen sind komplex: Es kommen unterschiedliche

- Vergasungsverfahren
- Produktgasreinigungsverfahren
- Motortechniken und
- Abgasreinigungstechniken

zum Einsatz. Vielfach werden die Anlagen von nicht professionellen Anlagenentwicklern betrieben. Der antragsgemäße Betrieb ist daher nicht immer gewährleistet.

Aus Sicht der Luftreinhaltung sind als problematisch zu betrachten:

- Geruchsemissionen bei nasser Produktgasaufbereitung (Kondensat und Waschwasser führende Anlagenteile müssen gekapselt werden)
- Benzolemissionen bei Betriebsstörungen sowie im Motorabgas; der TA Luft-Emissionswert ( $1 \text{ mg/m}^3$ ) sollte als Zielwert angestrebt werden. Unter Berücksichtigung des erkennbaren Optimierungspotenzials sollten Emissionsgrenzwerte nicht über  $3 \text{ mg/m}^3$  festgelegt werden.

Unabhängig von der Genehmigungspflicht der Anlagen (immissionsschutzrechtlich oder baurechtlich) sollte bei entsprechenden Vorhaben aus fachlicher Sicht regelmäßig geprüft werden, ob schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne des BImSchG hervorgerufen und ob die beim Betrieb der Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können.



---

## Literatur

<sup>1</sup> S. Kuschel; "Biodiesel als Kühl- und Reinigungsmedium bei der Biomassevergasung", Uni Magdeburg 2005<sup>1</sup>

<sup>2</sup> W. Baaske: „Gas aus der Holzvergasung - eine alternative für die Zukunft?“, Vortrag im Rahmen der Renexpo 2006, Augsburg, Ingenieurbüro für Umweltschutz & Technik, Harrislee

<sup>3</sup> M. Bauer, G. Wachtmeister: „Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermotorischen Beeinflussung der Formaldehyd-Bildung und Darstellung der Einflussparameter“, Technische Universität München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

<sup>4</sup> H. Timmerer, F. Lettner: „Anlagensicherheit und Genehmigung von Biomassevergasungsanlagen, Leitfaden für Betreiber, Hersteller und Behörden; Institut für Wärmetechnik, TU-Graz; Wien, November 2005

<sup>5</sup> G. Herdin: "Nutzung biogener Gase in Motoren - Problemstellung bei der Nutzung von Holzgas in BHKW und deren Lösungen"; Konferenz "Holzvergasung - Technologien, Entwicklung, Praxiserfahrung" der BHKW-Consult am 17.09.2008 in Köln

---

## Impressum:

Herausgeber:  
Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

Postanschrift:  
Bayerisches Landesamt für Umwelt  
86177 Augsburg

Bildnachweis:

Telefon: (08 21) 90 71-0  
Telefax: (08 21) 90 71-55 56  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Bearbeitung:  
Ref. 21 / Gerhard Schmoeckel  
Stand:  
März 2009