

Emissionsminderung bei kleinen Viertakt-Benzinmotoren

Emissionen können um mehr als 90% reduziert werden

Edwin Stadler, Ulrich Wolfensberger und Isidor Schiess, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon

Kleine Viertakt-Benzinmotoren im Leistungsbereich von 5 bis 10 kW, wie sie in landwirtschaftlichen Motor-mähern und anderen Kleingeräten zum Einsatz kommen, sind in ihrer Konstruktion robust und einfach in

der Handhabung. Sie weisen jedoch ausserordentlich hohe Abgasemissionen auf. In dieser Untersuchung wurde die Wirkung verfügbarer Massnahmen zur Abgasminderung an einem 10 kW-Viertakt-Benzinmotor ermittelt. Als solche standen: A) anstelle des handelsüblichen bleifreien Benzins ein spezielles Gerätebenzin, B) ein nachrüstbares Dreifwege-Katalysatorsystem, oder C) beides in Kombination zur Verfügung. Durch den Einsatz eines geregelten Dreifwege-

Katalysators konnten die im Prüfzyklus ISO 8178-G1 gemessenen unverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC) um 92% und das Kohlenmonoxid (CO) um 94% der ursprünglichen Werte gesenkt werden. In einzelnen Teillastpunkten gelang eine Absenkung um 99%. Gleichzeitig verbesserte sich der Treibstoffverbrauch wegen der Lambda-Regelung um etwa 10%. Auf das Leistungsverhalten des Motors hatte die Massnahme keinen Einfluss. Der Einsatz des sogenannten Gerätebenzins (Alky-latbenzin) reduzierte vor allem die aromatischen Kohlenwasserstoffe, beispielsweise Benzol auf unter 2%, zusätzlich mit dem Katalysator waren sie nicht mehr feststellbar. Ein Feldtest in einem Kommunalbetrieb während 110 Betriebsstunden bestätigte die Funktion des Katalysatorsystems.



Inhalt	Seite
Problemstellung	2
Abgasminderung am Beispiel Motormäher	2
Die Versuchsgegenstände	2
Versuchsablauf	3
Massnahmen zur Abgasreduktion	4
Die Messergebnisse	6
Zusammenfassung und Ausblick	9

Abb.1: Der Motormäher ist in der Schweiz mit 82 000 Einheiten, neben dem Traktor, die häufigste mit einem Verbrennungsmotor betriebene Landmaschine. Bei deren Einsatz bewegt sich die Bedienungsperson direkt in den mit giftigen Komponenten angereicherten Abgasen.

Problemstellung

Die in der Land- und Forstwirtschaft, im Gartenbau und Hobbybereich benzinmotorbetriebenen Transportmittel, Maschinen und Geräte, die nicht zur Kategorie der Strassenfahrzeuge zählen, sondern zusammen mit Flugzeugen, Schiffen, Baumaschinen usw. den sogenannten Offroad-Sektor bilden, verursachen gemäss BUWAL¹ in der Schweiz einen wesentlichen Anteil der gesamten Motoremissionen. Je nach Schadstoff variierte der Beitrag dieses Offroad-Sektors im Bezugsjahr 1990 zwischen 13% und 50%. Motorabgase sind nicht nur umweltbelastend, sondern auch gesundheitsschädigend. Oft befinden sich die Maschinenführer, wie am Beispiel der Motorsägen, in unmittelbarer Nähe des Auspuffes und atmen die Motorabgase in hoher Konzentration ein. Mit dem Ziel der weiteren Verbesserung der Luftqualität und der gesundheitlichen Situation der Maschinenführer setzt sich das BUWAL zusammen mit verschiedenen Institutionen für eine Verminderung dieser Motorabgase ein.

Abgasminderung am Beispiel Motormäher

Kleine Viertakt-Ottomotoren sind als anspruchslose und leistungsfähige Antriebe aus dem Bereich der Landwirtschaft nicht mehr wegzudenken. Die Antriebe reichen heute vom Motormäher über die Motorhacke bis zur Heuraupe im Berggebiet. Die Gründe, die seinerzeit zur grossen Verbreitung der Motormäher geführt haben (Topographie, ungünstige Parzellenform, usw.) gelten noch heute. Allerdings hat eine gewisse Gebietsbereinigung stattgefunden. Im Flachland ist der Motormäher vielerorts reine Eingrasmachine. Im Hügel- und Berggebiet dagegen mähen noch zahlreiche Landwirte das Gras ausschliesslich mit Motormähern. Im Flachland erwächst dem Motormäher zunehmend Konkurrenz durch den Traktor mit Frontmäherwerk, im Hügelgebiet durch die Zweiaxsmäher.



Abb. 2: Die Untersuchungen erfolgten an drei im Praxiseinsatz stehenden Motormähern der Marke RAPID.

Die Versuchsgegenstände

Die Motormäher

Maschinenhersteller: RAPID Maschinen und Fahrzeuge AG, Heimstrasse 7, CH-8953 Dietikon

Maschinen

Bezeichnung im Versuch: **BC1) Typ: U 505 Nr. 4098 mit mechanischem Fahrtrieb**
 BC2) Typ: Euro Profi Nr. HO2577 mit hydrost. Fahrtrieb
 BC4) Typ: Euro Profi Nr. HO100362 mit hydrost. Fahrtrieb

Die folgende Versuchsberichterstattung hat Maschine BC1 zum Gegenstand.

Motor

Motorlieferant: Kalus-Häberlin AG, Industriestrasse 6, CH-8610 Uster

Fabrikat: BRIGGS & STRATTON
 Modell: 294446 OHV
 Anzahl Zylinder: 2 in V-Stellung
 Hubraum: 479 cm³
 Verdichtung: 7,8 : 1
 Leistung: 10 kW (14 PS) bei 3600 min⁻¹ (Herstellerangabe)

Unterer Leerlauf: 1350 min⁻¹, aktuell 1500-1600 min⁻¹ (*)
 Oberer Leerlauf: 3250 min⁻¹
 Hauptdüse: Hauptdüse Nr. 72
 Leerlaufdüse: In Mittelstellung / nach rechts mit Katalysator

Zündung: Magnetzündung
 Zündkerze: CHAMPION RC12YC
 Elektroanlage: Wechselstromgenerator ungerichtet 12V 5A bei 3600 min⁻¹

*) Die erhöhte Leerlaufdrehzahl ist bedingt durch die erforderliche Betriebsspannung von mindestens 8 bis 10 Volt für die Steuerelektronik des Dreiwege-Katalysators.

Günstige Einsatzbedingungen vorausgesetzt, sind die neuen Verfahren dem Motormäher bezüglich Arbeitsleistung weit überlegen. In Zukunft hat letzteres allerdings weniger Einfluss auf die Anzahl der vorhandenen Motormäher als vielmehr auf deren Einsatzstunden.

Ungefähr 82 000 einachsige, handgeführte Motormäher weist die letzte Betriebszählung nach. Diese sind typischerweise mit einem Viertakt-Benzinmotor im Leistungsbereich zwischen 5 und max. 10 kW ausgerüstet. Nach unseren Schätzungen kann man mit jährlich etwa 100

¹ Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors, BUWAL Nr. 49, 1996

Betriebsstunden pro Gerät rechnen. Geht man – gemäss einigen Einzelerhebungen – von etwa 1,5 Liter Benzinverbrauch pro Betriebsstunde aus, so ergibt sich in der Schweiz ein jährlicher Gesamtverbrauch für die landwirtschaftlichen Motormäher von zirka 12,3 Mio Liter Benzin. Diese Menge macht zwar nur etwa 0,25% des Gesamtbenzinbedarfs aus. Aber das Abgasverhalten dieser Motoren ist vergleichsweise sehr schlecht und belastet damit die Gesundheit der Bedienungsperson und die Umwelt unnötig stark.

Aus diesen Gründen veranlasste das BUWAL eine Untersuchung der Möglichkeiten und Wirkungen von verschiedenen Massnahmen zur Emissionsminderung von kleinen Viertakt-Benzinmotoren am Beispiel der landwirtschaftlichen Motormäher. Unter der Projektleitung des Ingenieurbüros TTM arbeiteten die FAT und die EMPA bei den gasförmigen Emissionen sowie die Ingenieurschule Biel (AFHB) und die Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) bei den Partikeln eng zusammen. Die Firmen RAPID, Klaus-Häberlin (Briggs & Stratton), HJS und ASPEN (Elektrolux) stellten die benötigten Maschinen und Materialien sowie Wissen und Erfahrung zur Verfügung.

Mittels Versuche war die Frage zu klären, ob und wie weit eine Verbesserung des Emissionsverhaltens durch den Einsatz eines geregelten Dreiwegen-Katalysators oder/und die Verwendung von neuartigem Gerätebenzin (Alkylatbenzin) herbeigeführt werden kann. Dabei wurden natürlich auch die bisher bloss geschätzten Emissionsfaktoren von kleinen Viertakt-Benzinmotoren gemessen.

Versuchsablauf

Zunächst wurde in drei bereits im Praxiseinsatz stehenden Mähmaschinen der Marke RAPID ein neuer, dem heutigen Stand der Technik entsprechender Motor der Marke Briggs & Stratton Typ OHV, Modell 294446 eingebaut. Nach einer definierten Einlaufphase folgten umfangreiche Prüfstandsmessungen an der FAT Tänikon in Zusammenarbeit mit der EMPA Dübendorf. Die Untersuchung umfasste Leistungs-, Verbrauchs- und Abgasmessungen ohne und mit Abgaskatalysator sowie den beiden Treibstoffen Benzin bleifrei 95 und Geräte-

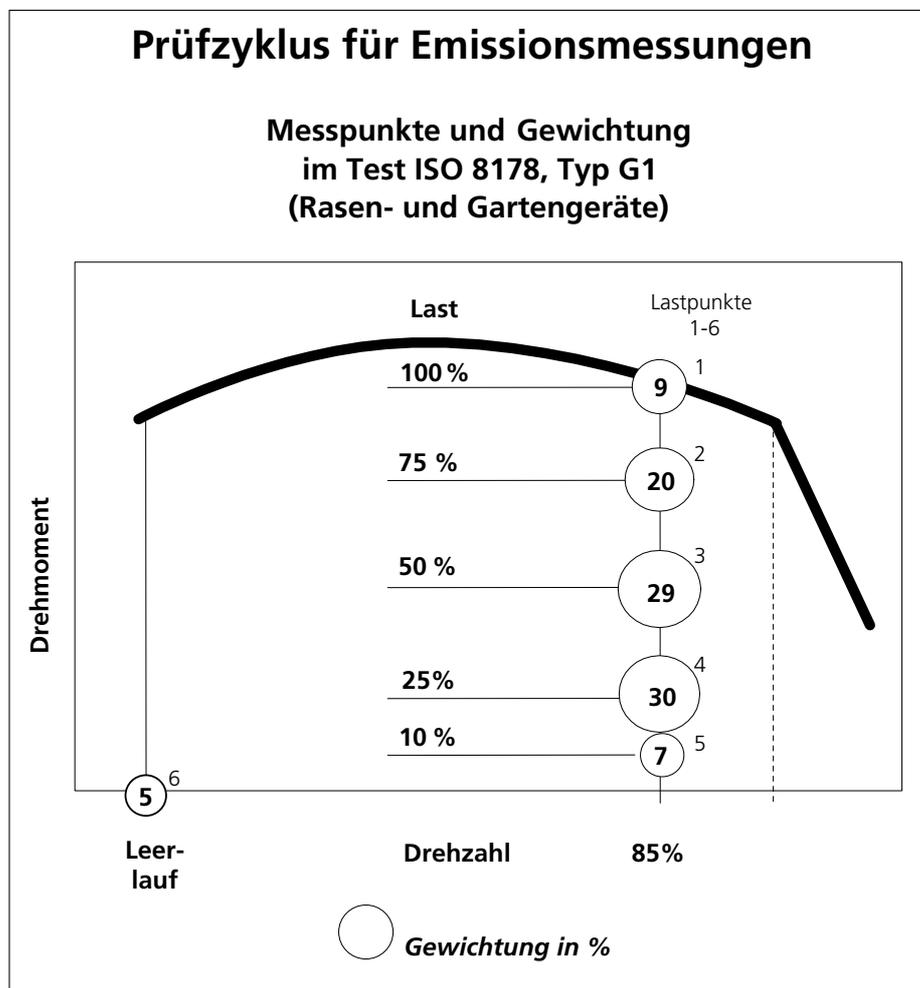


Abb. 3: International gültiger Prüfzyklus zur Messung von Motorabgasen an Gartengeräten und Mähmaschinen. Die Lastpunkte eins bis sechs wurden am Prüfstand im 10-Minuten-Intervall gefahren.

benzin. Letzteres stellte die Firma Electroflux zur Verfügung. Anschliessend an die Prüfstandsversuche folgte der Maschineneinsatz in der Praxis. Alle drei Maschinen ausgerüstet mit dem Katalysatorsystem von HJS, Katalysatorgrösse 50/50 mm, wurden deren zwei mit Benzin bleifrei 95 und eine mit dem neuen Gerätebenzin (Alkylatbenzin) betrieben. Ende der Saison kamen die Maschinen zu Kontrollmessungen wiederum auf den Prüfstand der FAT zurück. Die Resultate der Nachmessung waren für alle drei Maschinen unbefriedigend. Wie bereits im Praxiseinsatz liefen die Motoren in bestimmten Teillastbereichen ungleichmässig (stottern) und die Umsetzungsrate der Katalysatoren verschlechterte sich als Folge der zu klein gewählten Katalysator-Oberfläche zu stark. Deshalb wurde das ganze Versuchsprogramm mit einem grösseren Katalysator 70/90 mm und einer optimierten Steuerelektronik, jedoch nur noch mit einer Maschine, wiederholt. Die damit erzielten Ergebnisse waren her-

vorragend und blieben auch nach einem weiteren 110-stündigen Praxiseinsatz erhalten. Die nachfolgende Berichterstattung der Resultate hat die letzte, optimierte Version zum Gegenstand.

Messmethode, Abgasberechnung und Prüfzyklus ISO 8178-G1

Die vom Verbrennungsmotor emittierte Abgasmenge und deren Zusammensetzung hängen in starkem Masse von Motordrehzahl und Belastung ab. Für die Beurteilung der vom Motor im Betrieb emittierten Abgase ist also der spätere Verwendungszweck des Motors zu berücksichtigen. Der weltweit anerkannte und in der Norm ISO 8178-G1 festgeschriebene Prüfzyklus (Abb. 3) dient der Messung und Auswertung der gas- und partikelförmigen Abgasemissionen von Verbrennungsmotoren, die im Einsatz

von Gartengeräten und Mähmaschinen stehen. Er besteht aus sechs einzelnen Prüfstufen, von denen jede durch die Drehzahl und das Drehmoment des Motors sowie den Gewichtungsfaktor festgelegt sind. Der Test läuft bei zwei Drehzahlen ab, beginnend mit fünf Lastpunkten bei der Zwischendrehzahl, die in der Norm als 85% der Nenndrehzahl definiert ist, und bei der unteren Leerlaufdrehzahl. Mit Blick auf den Motoreinsatz als Motormäher und in Rücksprache mit Firma RAPID (Herr Keusch) haben wir die Zwischendrehzahl generell auf 2800 min^{-1} festgelegt. Die Dauer der einzelnen Prüfstufen betrug zehn Minuten, dabei wurden die Konzentrationswerte der Abgase in den letzten zwei Minuten aufgezeichnet. Aus den gemessenen Abgaskonzentrationen lassen sich unter Berücksichtigung der Massenströme von Ansaugluft und Treibstoff die Abgasmenge der sechs Laststufen in g/h errechnen. Aus der Summe der sechs mit dem entsprechenden Gewichtungsfaktor verrechneten Teilergebnisse, dividiert durch die gemessene und ebenfalls gewichtete Leistung in kW, ergeben sich die gesuchten Emissions- und Treibstoffverbrauchs-faktoren in g/kWh für den ganzen Testlauf. Für die Standard-Messungen der Abgase Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Stickoxide (NO_x) wurde dieser Zyklus der Norm entsprechend gefahren. Die Entnahmen der Abgase aus dem Auspuff erfolgten direkt und unverdünnt nach üblichem Verfahren. Für die Analyse der flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, volatile organic compounds) und der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) wurden am Prüfstand Abgasproben entnommen und anschliessend durch die EMPA nach dem GC-MS-Verfahren (Gas-Chromatographie/Massenspektroskopie) durchgeführt. Aus Rücksicht auf die aufwendigen VOC-Analysen wurden dabei nur die beiden im Hinblick auf den Praxiseinsatz besonders interessanten Betriebspunkte $2800 \text{ min}^{-1}/75\%$ Belastung und unterer Leerlauf untersucht.

Versuchsaufbau am Prüfstand

Für die Versuche diente ein in der landwirtschaftlichen Praxis im Einsatz stehender Motormäher der Herstellerfirma RAPID Dietikon, Typ U 505 mit mechanischem Fahrtrieb. Der alte Motor wur-

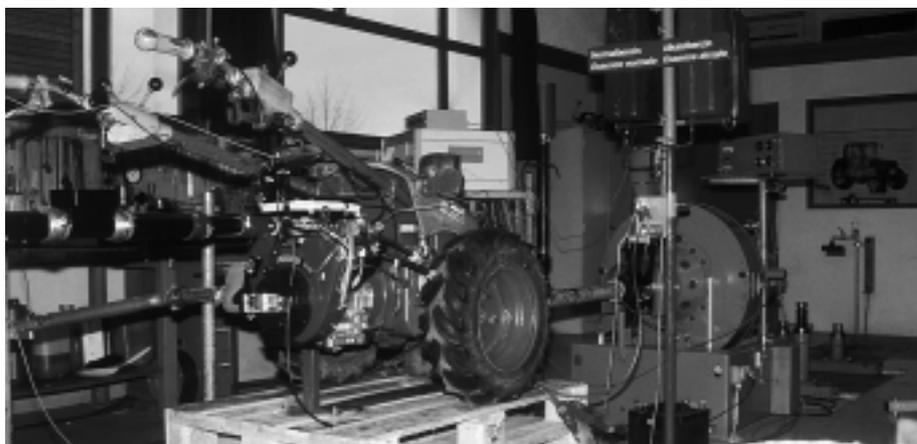


Abb. 4: Leistungs-, Verbrauchs- und Abgasmessungen erfolgten stationär am Prüfstand.

de gegen ein neues Modell von Briggs & Stratton ausgewechselt. Anschliessend wurde die komplette Maschine am Prüfstand aufgebaut. Die Messung der Motorleistung erfolgte über den Zapfwellenanschluss für den Mähmesserantrieb. Für die nachfolgenden Abgasmessungen erfolgte die Leistungsabnahme in gleicher Weise, mit Ausnahme des Messpunktes «unterer Leerlauf». Um ein Aufschaukeln des Antriebsstranges zu vermeiden, wurde der Zapfwellenantrieb in diesem Prüfpunkt jeweils abgeschaltet. Die Leistungsverluste durch die mitdrehenden Getriebeteile werden vom Hersteller auf etwa 10% der Motorleistung geschätzt. Als Leistungsprüfstand diente eine Wirbelstrombremse SCHENCK W400. Der Treibstoffverbrauch wurde mittels Durchflussmesser und die vom Motor angesaugte Verbrennungsluft mittels Luftmassenmesser kontinuierlich erfasst. Die Abgasprobe wurde dem unverdünnten Abgasstrom entnommen und mittels auf 190 °C beheizter Leitung der Abgasmessanlage Pierburg AMA 2000 zur Analyse zugeführt.

Besondere Probleme

Die erforderliche Betriebsspannung für das Steuergerät zur Speisung der Lambdasonde und Regelung des Luftventils liefert der unregelmässige Wechselstromgenerator des Motors. Die Leistung dieser Stromquelle ist in hohem Masse drehzahlabhängig. Die Betriebsspannung von minimal 8 Volt für die Steuerelektronik des Dreiwegen-Katalysators erfordert eine Erhöhung der unteren Leerlaufdrehzahl auf 1500 bis 1600 min^{-1} . Noch offen in diesem Zusammenhang bleibt eine zusätzliche Belastung, wenn die Fahrzeugbeleuchtung zugeschaltet würde.

Massnahmen zur Abgasreduktion

Als Massnahmen standen drei Möglichkeiten im Vordergrund.

- Der Betrieb der Motoren mit einem

Prüfstandseinrichtungen (Abb. 5)

Leistungsmessung:	Wirbelstrom Leistungsbremse SCHENCK, Typ: W400
Treibstoffverbrauch:	Treibstoff-Durchflussmessgerät PIERBURG, Typ: PLU 106
Ansaugluftmasse:	Luftmassendurchfluss-Messgerät Sensyflow SENSYCON (Hartmann und Braun)
Abgasmessung:	Abgasmessanlage PIERBURG, Typ: AMA 2000
– Kohlenwasserstoffe (HC):	Flammenionisationsdetektor (FID)
– Stickoxide (NO _x):	Chemolumineszenz-Detektor, beheizt (CLD)
– Kohlenmonoxid (CO):	Nicht dispersives Infrarotabsorptionsverfahren (NDIR)
Temperaturen:	Thermoelemente für Temperatur von Ansaugluft, Treibstoff, Motoröl und Abgase

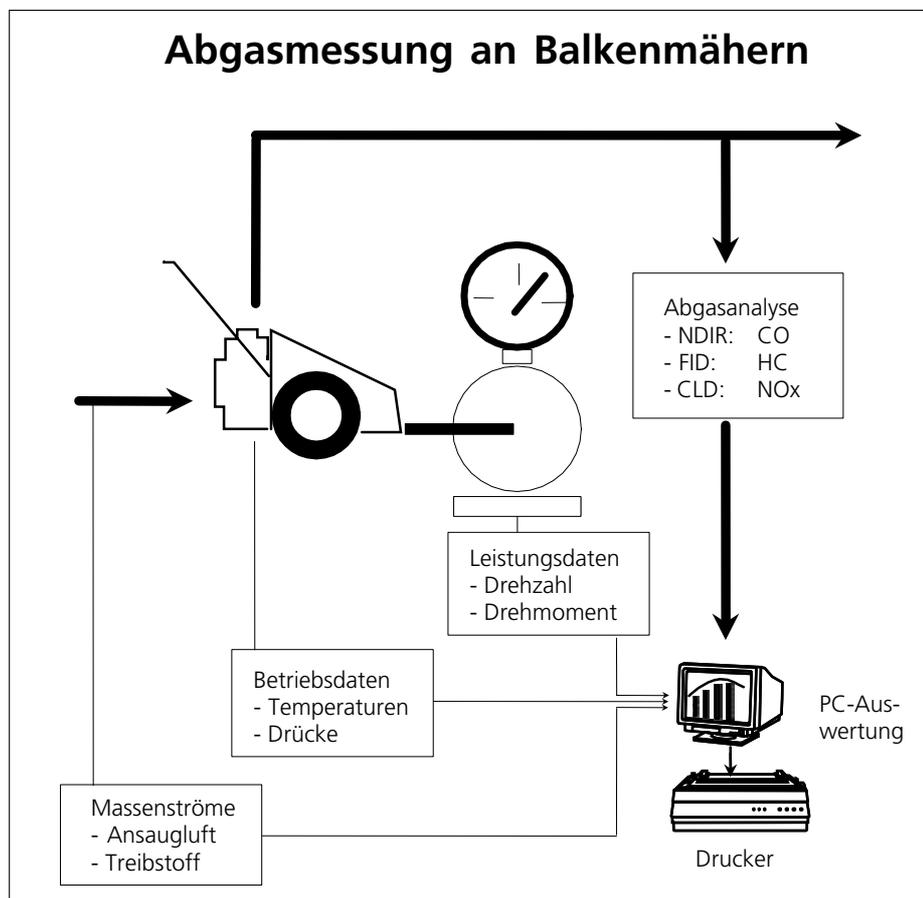


Abb. 5: Übersicht über die Prüfstandsordnung zur Untersuchung der Motorabgase an Motormähern.

neuartigen Gerätebenzin im Vergleich zu Normalbenzin.

- Der Einsatz eines optimierten Dreiwege-Katalysatorsystems.
- Der Einsatz eines optimierten Dreiwege-Katalysatorsystems zusammen mit dem Gerätebenzin.

Vorgängig der Versuchsreihe wurde mit Einwilligung des Motorherstellers zwecks Optimierung der Motorparameter am Motor die Vergaser-Hauptdüse Nr. 75 gegen die kleinere Nr. 72 gewechselt. Weitere Änderungen waren nicht erforderlich.

Lieferant: Electrolux AG, Industriestrasse 10, CH-5506 Mägenwil.

Dieser Sondertreibstoff wurde in Schweden von der Firma ASPEN entwickelt, um die Abgassituation für Benutzer von Motorsägen und anderen benzinmotorbetriebenen Handgeräten zu verbessern. Es handelt sich wie beim gewöhnlichen Benzin um ein Erdölprodukt, jedoch sind die chemische Struktur und das Herstellungsverfahren anders. Bei der Alkylierung werden die Kohlenwasserstoffe so zusammengeführt, dass eine sehr genaue Auswahl auf Grund der unter-

schiedlichen Siedetemperaturen möglich ist. Das Resultat ist ein Benzin, das bezüglich einiger kritischer Schadstoffemissionen grosse Vorteile bringt. So ist der Benzolgehalt von durchschnittlich 2,6% auf unter 0,1% und der Aromatengehalt von 33% auf unter 0,2% abgesenkt. Auch der Gehalt an Olefinen ist stark reduziert. Das neue Gerätebenzin ist ein Spezialprodukt, dessen Herstellung und Verteilung in kleinen Mengen die Kosten erhöht, so dass für den Verbraucher ein hoher Literpreis von Fr. 3.20 bis Fr. 3.50 resultiert. In der Schweiz gilt seit 1998 für diesen neuen Treibstoff die Norm SN 181 163 «Qualitätsrichtlinie für Gerätebenzin».

Der Abgaskatalysator

Die katalytische Abgasreinigung

Die Wissenschaft bezeichnet mit «Katalysator» einen Stoff, welcher chemische Reaktionen herbeiführt, ohne sich selbst zu verändern. In der Motortechnik soll der Katalysator im Abgas enthaltene schädliche Komponenten in *unschädliche* umwandeln und dadurch insbesondere den Ausstoss von Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (HC) und Stickoxiden (NOx) nachhaltig absenken. Als Träger für den Katalysator dient ein zylindrischer, wabenartiger Metallkörper. Als Katalysatormaterialien kommen überwiegend Platin, Rhodium und Palladium in Frage. Das Edelmetall wird in dünner Schicht auf die gesamte Oberfläche der vielen feinen parallelen Kanäle aufgebracht, die später von den Abgasen durchströmt werden. Das Grundprinzip der katalytischen Abgasreinigung im Dreiwege-Katalysator besteht darin, dass der Abgasstrom durch die edelmetallbeschichteten Kanäle geleitet wird, wobei je nach Beschichtungsart bestimmte chemische Reaktionen ablaufen. Dabei las-

Die untersuchten Treibstoffe

A) Benzin bleifrei 95, EMPA-Bericht Nr. 171090/03

Das verwendete Benzin bleifrei 95 wurde von der anstaltseigenen Benzintankstelle bezogen und darf als handelsüblich bezeichnet werden.

B) Gerätebenzin (Alkylatbenzin)

ASPEN, EMPA-Bericht Nr. 175015/01
Gerätebenzin nach Schweizer-Norm SN 181 163.

Die Analysen der verwendeten Treibstoffe

		Benzin bleifrei 95	Gerätebenzin (ASPEN)
Dichte	[kg/m ³]	754	694
Oktanzahl (ROZ)		95,8	94,8
C/H-Gehalt		87 / 13	84 / 16
Bleigehalt	[mg/l]	< 2	< 2
Schwefelgehalt	[m-%]	0,017	< 0,001
Benzol	[Vol.-%]	3,7	< 0,1
Aromaten	[Vol.-%]	32,5 *	0,2
Olefine	[Vol.-%]	7,5 *	< 0,1

* Mittelwert der 1998 an der EMPA untersuchten handelsüblichen Benzine bleifrei 95.

sen sich durch Oxidation Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoff (HC) bzw. durch Reduktion Stickoxid (NO_x) in *unschädliche* Verbindungen wie Kohlendioxid (CO₂), Wasser (H₂O) und elementaren Stickstoff (N₂) umsetzen. Je nach Abgastemperatur und Motorbetriebspunkt können mit dieser Methode bis zu 90% und mehr der drei Schadstoffkomponenten umgewandelt werden. Voraussetzung hierfür sind zum einen Abgastemperaturen von etwa 250 °C und mehr, zum anderen der für diese chemische Reaktion jeweils richtige Sauerstoffanteil im Abgas. Damit der Katalysator seine optimale Wirkung entfalten kann, muss das Treibstoff-Luftgemisch genau soviel Sauerstoff enthalten, wie es braucht, um den Treibstoff vollständig zu verbrennen, also Lambda = 1 (stöchiometrisches Verhältnis).

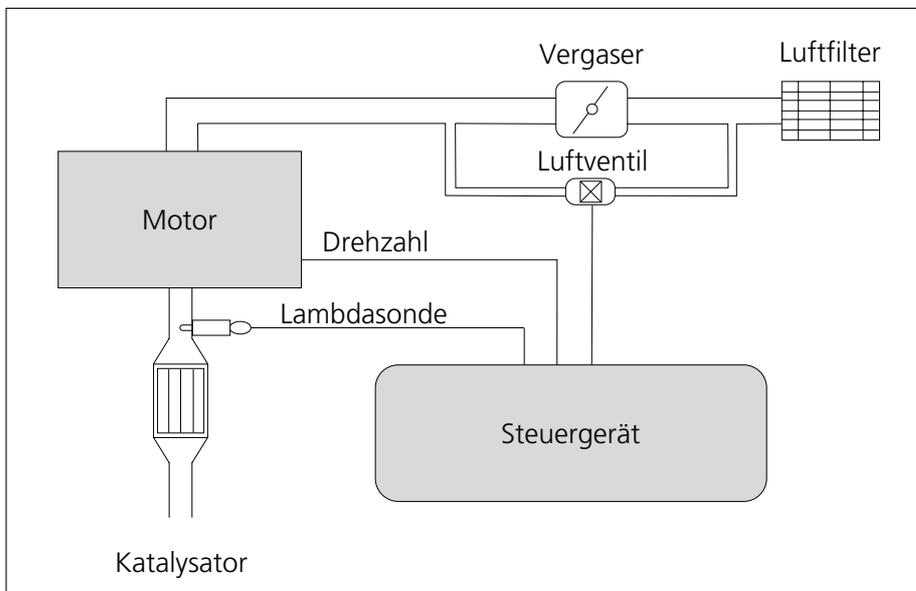


Abb. 6: Geregelt Dreiwegen-Katalysatorsystem für Benzinmotoren mit Vergaser-Gemischauflbereitung.

Ein geregeltes Dreiwegen-Katalysatorsystem von HJS

Das von der Firma HJS entwickelte Dreiwegen-Katalysatorsystem mit Lambda-Regelung eignet sich speziell für den Einsatz bei kleinen Viertakt-Benzinmotoren mit Vergaser-Gemischauflbereitung (Abb. 6). Die Lambda-Sonde misst ständig den Sauerstoffanteil der Abgase am Motoraustritt. Sie ist mit der digitalen Regel-

automatik (Steuergerät) verbunden, die das Luftventil betätigt und so viel Luft unterhalb des Vergasers dem (zu fetten) Gemisch zuführt, dass Lambda = 1 erreicht wird. Bei dieser Gemischeinstellung ist die Wirkung des Katalysators am grössten.

Das Katalysatorsystem wurde von HJS Fahrzeugtechnik GmbH & Co, D-58706 Mendon, geliefert.

Der Nachrüstsatz besteht aus Katalysator, Lambdasonde, Luftventil, Steuerelektronik und Verbindungsteile, und kostet als Nachrüstsatz zirka Fr. 400.- (ohne Montage).

Die Messergebnisse

Die Auswirkung von Treibstoffwechsel und Abgasmachbehandlung

Die Motorleistung (Volllastkennlinie) Weder die unterschiedlichen Treibstoffe noch der zusätzliche Katalysatoreinbau beeinflussen das Leistungsverhalten des Motors signifikant. Die gemessenen Volllastkurven decken sich weitestgehend (Abb. 8).



Abb. 7: Der Abgaskatalysator mit eingeschraubter Lambdasonde ist dem serienmässigen Schalldämpfer vorgeschaltet. Die Abgase sollen den Katalysator möglichst direkt ohne vorherige Abkühlung passieren.

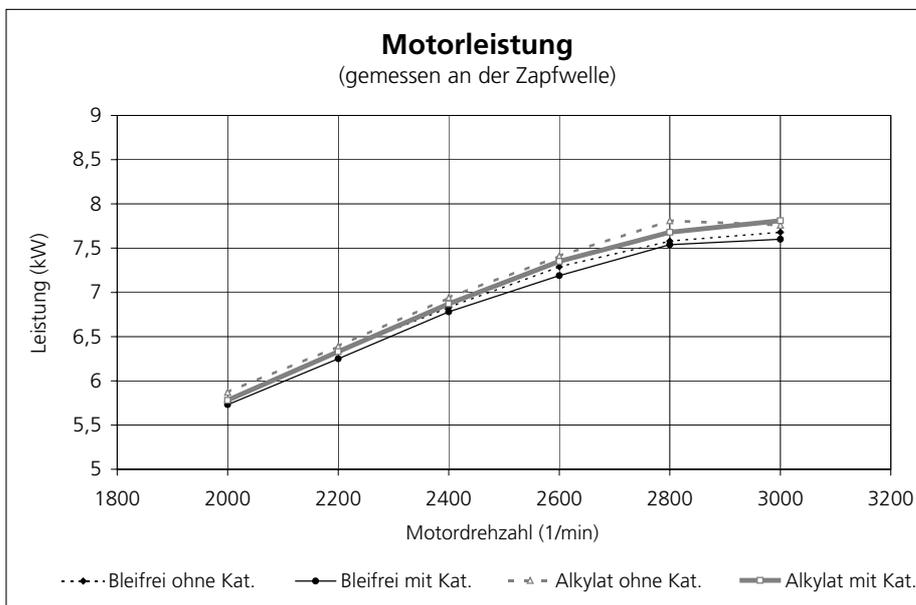


Abb. 8: Die verschiedenen Massnahmen zur Verbesserung der Abgase beeinflussen die Motorleistung nur wenig.

Die emittierten Motorabgase CO, HC und NOx in den Laststufen

Das Abgasverhalten, die Abgasmenge und Abgaszusammensetzung eines Verbrennungsmotors hängen einerseits vom verwendeten Treibstoff, andererseits aber stark von der Motordrehzahl- und Motorbelastung ab. Ebenso beeinflussen die Abgaszusammensetzung und Abgastemperatur die Umsetzungsrate und damit die Wirksamkeit des Katalysatorsystems in grossem Masse. Abbildung 9 zeigt den Einfluss von Treibstoff und Katalysator auf das Abgasverhalten in den sechs Lastpunkten im ISO 8178-G1 Messzyklus.

Auf die unbehandelten Abgase CO und HC hat der Treibstoffwechsel kaum Einfluss, die Kurven decken sich (Bleifrei ohne Katalysator und Gerätebenzin ohne Katalysator). Die Verdoppelung der HC auf 38 g/h mit Benzin bleifrei 95 gegenüber 18 g/h mit Gerätebenzin im Lastpunkt sechs zeigt lediglich den Streubereich in diesem sehr unstabilen Leerlaufbereich an. Die Wirkung des Katalysators auf die Schadstoffe CO und HC ist in den für die Praxis besonders interessanten Lastpunkten zwei bis sechs, mit einer Umsetzungsrate von 92 bis über 99% ausgesprochen gut. Im Lastpunkt eins (Volllast) ist die Umsetzungsrate des Katalysators beim CO wie auch beim HC mit rund 65% etwas ungünstiger. Der Grund liegt beim Luftbypasssystem, das das Treibstoff-Luftgemisch nicht exakt auf $\lambda = 1$ auszuregeln vermag.

Beim Schadstoff NOx bewirkt die Umstellung von Benzin bleifrei 95 auf das Gerätebenzin unabhängig der Motorbelastung eine Reduktion von etwa einem Drittel. Mit eingebautem Katalysatorsystem entsteht ein gegenteiliges Bild. Wegen der in Zusammenhang mit der Lambda-Regelung gewollten Abmagerung des Treibstoff-Luftgemisches und der daraus resultierenden zirka 50 bis 70 °C höheren Verbrennungstemperatur steigen in den Lastpunkten zwei bis sechs die Rohemissionen von NOx stark an. Diese können vom Katalysator nur mehr teilweise reduziert werden, so dass eine gewisse Verschlechterung der NOx-Werte gegenüber ohne Katalysatorsystem bleibt. Anders sieht es bei Lastpunkt eins aus (Volllast). Das Luftbypasssystem kann das Gemisch nicht genügend abmagern, die NOx-Werte steigen weniger an. Da die reduzierende Wirkung des Katalysators bei fettem Gemisch, also bei Sauerstoffmangel, noch verbessert wird, resultiert schliesslich eine NOx-Reduktion.

Abgase und Treibstoffverbrauch im Messzyklus ISO 8178-G1

Die Motorabgase CO, HC, NOx im Messzyklus ISO 8178-G1

Die gewichteten Abgaswerte gemessen

und berechnet nach der Norm ISO 8178-G1 ergaben folgende Ergebnisse (Abb. 10):

Kohlenmonoxid (CO)

Durch den Treibstoffwechsel vom Bleifrei 95 zum Gerätebenzin (ohne Katalysator) reduzierten sich die Schadstoffe CO ge-

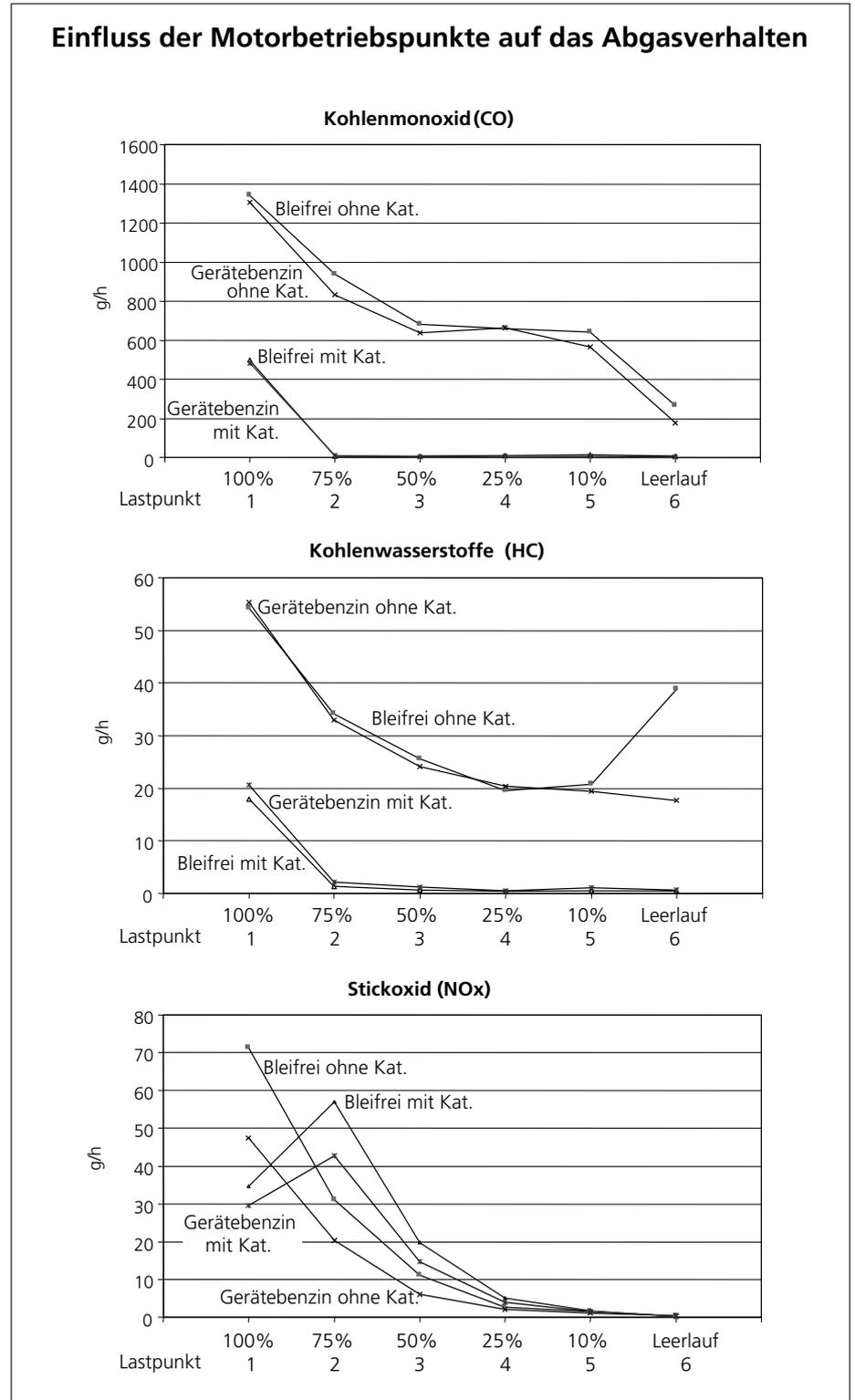


Abb. 9: Die Wirkung verschiedener Massnahmen auf die emittierten Motorabgase hängt auch sehr vom Motorbetriebspunkt ab.

ringförmig von 229,1 auf 215,5 g/kWh bzw. um 6%. Der Einbau des Katalysatorsystems brachte dagegen eine Absenkung auf 15,8 g/kWh bzw. um 90%.

Gerätebenzin plus Katalysator konnten CO auf 15,2 g/kWh bzw. um 93% absenken.

Kohlenwasserstoff (HC)

Der Treibstoffwechsel vom Bleifrei 95 zum Gerätebenzin (ohne Katalysator) bewirkt nur eine Verringerung der HC um 5% bzw. von 8,45 g/kWh auf 8,09 g/kWh. Der Katalysator senkt dagegen die HC um etwa 90% auf 0,68 g/kWh mit Bleifrei 95 und die Kombination Gerätebenzin und Katalysator auf etwa vergleichbar gute 0,87 g/kWh ab.

Stickoxide (NOx)

Der Wechsel von Benzin bleifrei 95 auf Gerätebenzin bewirkt eine Reduktion der NOx um 35% von 5,1 auf 3,3 g/kWh. Durch den Katalysatoreinbau (Lambda-Regelung) steigen die NOx dagegen um 29% beim Bleifrei 95 und um 51% beim Gerätebenzin an. Dabei darf aber festgehalten werden, dass auch die erhöhten Werte mit 6,6 g/kWh beim Bleifrei 95 und 5,0 g/kWh beim Gerätebenzin vergleichsweise (zum Beispiel zu Traktormotoren) gute Werte darstellen, die so akzeptiert werden können. Die Erhöhung der NOx ist eine direkte Folge des Magerbetriebes, der wiederum für die gewollte, starke Absenkung von CO und HC Emissionen mitverantwortlich ist.

Der spezifische Treibstoffverbrauch

Den Treibstoffverbrauch vergleichen wir anhand des sogenannten Verbrauchsfaktors. Diesem liegt der spezifische Treibstoffverbrauch gemessen und bewertet nach dem Sechsstufen-Normtest ISO 8178-G1 zu Grunde (Abb. 11). Für das Gerätebenzin ergibt sich mit 441 g/kWh gegenüber 448 g/kWh ein um 1,5% tieferer Verbrauchsfaktor als beim Benzin bleifrei 95. Dagegen wirkt sich der Katalysatoreinbau wegen der optimierenden Wirkung der Lambda-Regelung auf die Gemischaufbereitung bei Benzin bleifrei 95 um 10,5% und bei Gerätebenzin um 11,1% verbrauchssenkend aus.

Ergänzende Untersuchung durch die EMPA

Für die zwei im Hinblick auf den Praxis-einsatz interessantesten Betriebspunkte, die Zwischendrehzahl 2800 min⁻¹ bei 75% Belastung und den unteren Leerlauf, wurden von der EMPA flüchtige organische Verbindungen (VOC) sowie polizyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) gesondert untersucht. Tabelle 1 zeigt auszugsweise die gemessenen Werte für den Motorbetriebspunkt 2800 min⁻¹ und 75% Belastung.

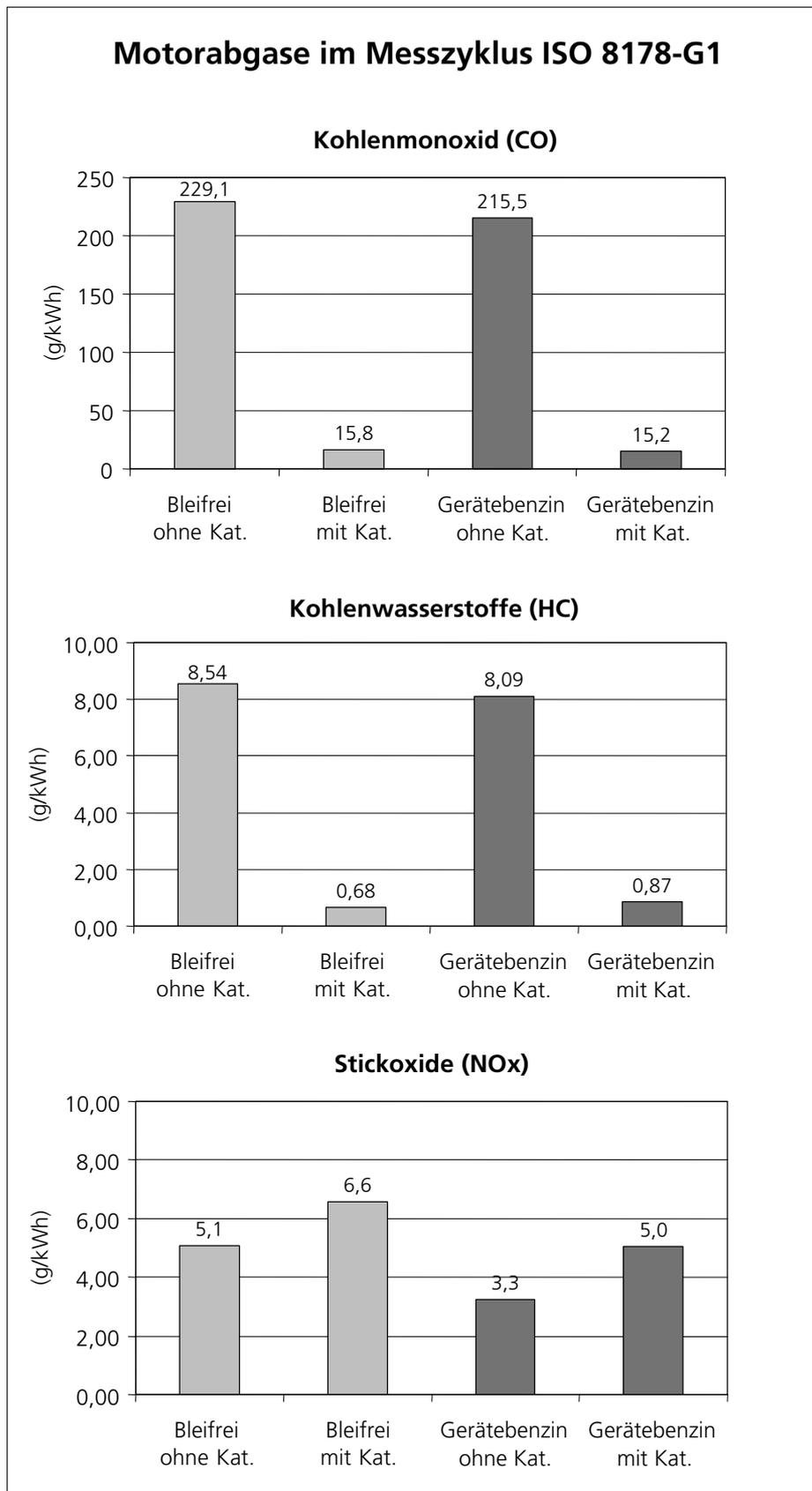


Abb. 10: Einfluss der Benzinart und des geregelten Dreiwege-Katalysators auf die Emissionsfaktoren im Prüfzyklus ISO 8178-G1.

Flüchtige organische Verbindungen (VOC)
 Erwartungsgemäss reduzieren sich durch den Einsatz des neuen Gerätebenzins die Rohemissionen der Aromaten Benzol, Toluol und Xylol sehr stark um über 96%. Beim Einsatz mit Normalbenzin vermag der Katalysator die Aromate in vergleichbarer Weise zu reduzieren. In der Kombination des Gerätebenzins mit dem Katalysator werden diese hochtoxischen, krebsfördernden Komponenten auf nur mehr geringe Spuren, zum Teil unterhalb der Nachweisgrenze vermindert. Die Werte für Formaldehyd und Acetaldehyd erhöhen sich zwar bei der Verwendung von Gerätebenzin. Sie lassen sich aber in Kombination mit dem Katalysator weitestgehend wiederum auf die Werte wie bei Normalbenzin absenken.

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die Verminderung der kanzerogenen PAK auf weniger als 10% der Ausgangswerte zeigt die ausserordentliche Wirksamkeit des Katalysatorsystems. Auch die Verwendung von Gerätebenzin senkt die PAK auf 30% gegenüber der Werte mit Normalbenzin.

Tabelle 2 zeigt auszugsweise die gemessenen VOC-Werte für den Leerlaufbetrieb.

Die Ergebnisse für den Leerlaufbetrieb sind ebenfalls eindrücklich. Mit dem Einsatz des Gerätebenzins reduzieren sich die Rohemissionen von Benzol, Toluol und Xylol um über 98% gegenüber den ursprünglichen Werten. Aber auch der Katalysator vermag diese Aromate in vergleichbarer Grösse zu reduzieren. Gerätebenzin kombiniert mit dem Katalysator reduziert diese hochtoxischen Komponenten sogar unter die Nachweisgrenze. Die Werte für Formaldehyd und Acetaldehyd sind bei der Verwendung von Gerätebenzin mit denen von Normalbenzin vergleichbar. Diese lassen sich aber in Kombination mit dem Katalysator zu über 99% auf Spurenwerte absenken.

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Untersuchung wurde die Wirkung der heute auf dem Markt verfügbaren Massnahmen zur Abgasminderung an einem modernen 10 kW

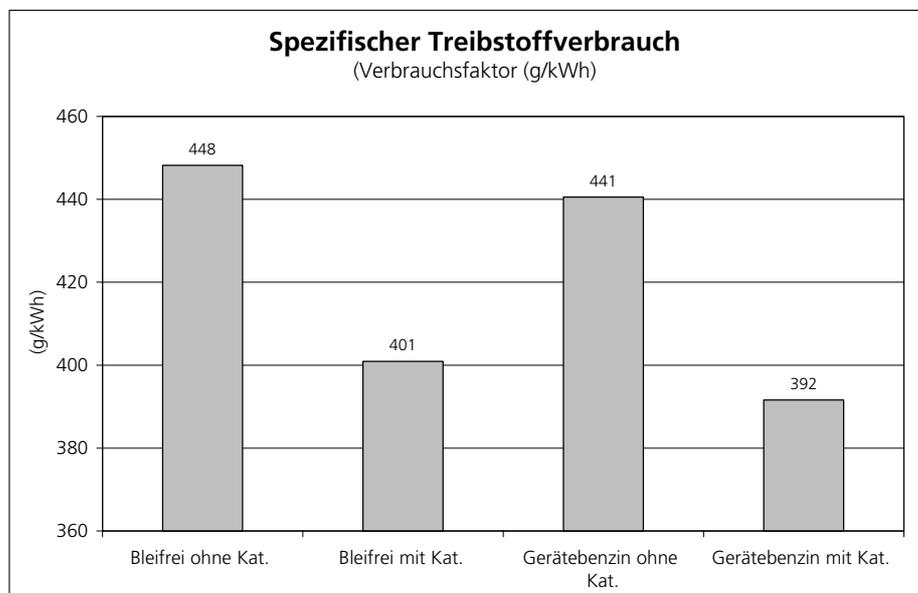


Abb. 11: Der spezifische Treibstoffverbrauch sinkt hauptsächlich wegen der Lambda-Regelung des Katalysatorsystems.

Tab. 1: VOC- und PAK-Analyse für 75% Teillast

VOC mg/h	Normalbenzin bleifrei 95 ohne Katalysator	Normalbenzin bleifrei 95 mit Katalysator	Gerätebenzin (Alkylat) ohne Katalysator	Gerätebenzin (Alkylat) mit Katalysator
Formaldehyd	382	19,9	773	8,1
Acetaldehyd	63	5,2	134	8,9
1,3-Butadien	14	0,26	23,7	0,44
n-Hexan	36	1,51	4,5	0,18
Benzol	186	4,7	7,2	0,53
Toluol	379	5,8	4,4	0,27
Ethylbenzol	56	1,1	nicht messbar	nicht messbar
Xylole	321	5,8	nicht messbar	nicht messbar
PAK µg/h				
Karzinogene EPA	194	12	57	19

Tab. 2: VOC-Analyse für Leerlaufbetrieb

VOC mg/h	Normalbenzin bleifrei 95 ohne Katalysator	Normalbenzin bleifrei 95 mit Katalysator	Gerätebenzin (Alkylat) ohne Katalysator	Gerätebenzin (Alkylat) mit Katalysator
Formaldehyd	221	1,38	241	1,06
Acetaldehyd	30	0,44	34	0,08
1,3-Butadien	12	nicht messbar	9,9	0,01
n-Hexan	76	1,28	2,8	0,02
Benzol	246	0,27	4,5	nicht messbar
Toluol	515	0,34	2,8	nicht messbar
Ethylbenzol	91	0,07	nicht messbar	nicht messbar
Xylole	508	0,43	nicht messbar	nicht messbar

leistungsstarken Viertakt-Benzinmotor der Marke BRIGGS & STRATTON Typ OHV ermittelt. Durch den Einsatz eines geregelten Dreibege-Katalysatorsystems von HJS konnten die im Prüfzyklus ISO 8178-G1 gemessenen unverbrannten Kohlenwasserstoffe (HC) um 92% und das Kohlenmonoxid (CO) um 94% der ursprünglichen Werte gesenkt werden. In einzelnen Teillastpunkten gelang eine Absenkung um 99%. Gleichzeitig verbesserte sich der Treibstoffverbrauch wegen der Lambda-Regelung um etwa 10%. Auf das Leistungsverhalten des Motors hatte die Massnahme keinen Einfluss. Der Einsatz des sogenannten Gerätebenzins (Alkylatbenzin) reduzierte vor allem die aromatischen Kohlenwasserstoffe, beispielsweise Benzol auf unter 2%. Zusätzlich mit dem nachgeschalteten Katalysator waren sie nicht mehr feststellbar. Ein Feldtest in einem Kommunalbetrieb während 110 Betriebsstunden bestätigte die Funktion des Katalysatorsystems, unabhängig des verwendeten Treibstoffes.

Auf der Kostenseite ergeben sich Mehrkosten bei Verwendung von Gerätebenzin (Literpreis Fr. 3.20 bis Fr. 3.50) von mindestens Fr. 2.– je Liter Benzin bzw. bei einem stündlichen Benzinverbrauch von 1,5 Liter und 100 jährlichen Betriebsstunden etwa Fr. 300.– pro Jahr. Beim Einbau des Katalysatorsystems HJS fällt eine Investition in der Grösse von Fr. 400.– an. Aus Verzinsung und Abschreibung auf zwölf Jahre gerechnet, ergeben sich daraus jährliche Zusatzkosten von Fr. 45.–. Der Treibstoffverbrauch verringert sich gleichzeitig um rund 10%, was sich als jährliche Minderausgaben bei 100 Betriebsstunden mit Normalbenzin von etwa Fr. 18.– niederschlägt. Für das Katalysatorsystem resultieren letztlich jährliche Mehrkosten von zirka Fr. 27.–.

Obschon in der Schweiz der landwirtschaftliche Motormäher, gemessen an seinen Stückzahlen (82 000), ein starker Vertreter ist und von seinen emittierten Abgasen her ein übermässiger Luftverschmutzer darstellt, ist sein Anteil an der gesamten Luftverschmutzung durch Motorabgase in der Schweiz sehr klein. Der Benzinverbrauch bewegt sich in der Grösse von nur 0,25% des gesamten Benzinverbrauches für den motorischen Verkehr in der Schweiz. Da sich aber die Bedienungsperson in relativer Nähe des Auspuffes im Abgasdunst bewegt und das Führen der Maschinen besonders in Hanglagen eine körperlich sehr anstrengende Arbeit ist, sollten die Motorabgase im Interesse der Gesundheit reduziert werden. Um so mehr als, wie die Versuche zeigen, mit dem Katalysatorsystem von HJS ein äusserst wirksames und preiswertes Mittel zu deren Reduktion zur Verfügung steht. Bei Neuanschaffungen (die Mehrkosten betragen etwa 3 bis 4% auf den Gesamtpreis) sollte auf diese Komfortsteigerung, die ja zudem noch mit einer 10%igen Treibstoffeinsparung verbunden ist, im Interesse der Gesundheit in Zukunft nicht verzichtet werden. Die Vorteile des untersuchten Gerätebenzins liegen hauptsächlich in den gesundheitsgefährdenden Emissionen. Die wichtigsten krebsfördernden Emissionen werden drastisch verringert, andere gesundheitsbeeinflussende Wirkungen sind denkbar. Ob der erhebliche Mehrpreis durch diese Vorteile aufgewogen wird, muss jeder Maschinenführer selber entscheiden und hängt sicher auch von den Einsatzbedingungen und der Relation der Treibstoffkosten zu den übrigen Kosten ab. Es ist zu hoffen, dass sich wie im Bereich der kleinen Zweitakt-Motoren (Kettensägen) eine vermehrte Anwendung dieses Benzins auch preissenkend auswirkt.

Anfragen über das behandelte Thema und über andere landtechnische Probleme sind an die unten aufgeführten Berater für Landtechnik zu richten. Weitere Publikationen und Prüfberichte können direkt bei der FAT (CH-8356 Tänikon) angefordert werden. (Tel. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90).

E-Mail: info@fat.admin.ch, Internet: <http://www.admin.ch/sar/fat>

- ZH** Kramer Eugen, Landw. Schule Strickhof,
8315 Lindau, Telefon 052 354 98 30
Blum Walter, Landw. Schule Strickhof,
8315 Lindau, Telefon 052 354 98 30
- BE** Jutzeler Martin, Inforama Berner Oberland,
3702 Hondrich, Telefon 033 654 95 45
Hügi Kurt, Inforama Seeland,
3232 Ins, Telefon 032 312 91 21
Marti Fritz, Inforama Rütli und Waldhof,
3052 Zollikofen, Telefon 031 910 52 10
Hofmann Hans Ueli, Inforama Schwand,
3110 Münsingen, Telefon 031 720 11 21
- LU** Moser Anton, LBBZ Schüpfheim,
6170 Schüpfheim, Telefon 041 484 25 25
Hodel René, LBBZ, Centralstr. 21,
6210 Sursee, Telefon 041 921 91 91
Marti Pius, LBBZ Willisau,
6130 Willisau, Telefon 041 970 20 77
Widmer Norbert, LMS,
6276 Hohenrain, Telefon 041 910 26 02
- UR** Landw. Beratungsdienst, Aprostr. 44,
6462 Seedorf, Telefon 041 871 05 66
- SZ** Landolt Hugo, Landw. Schule Pfäffikon,
8808 Pfäffikon, Telefon 055 415 79 22
- OW** Müller Erwin, BWZ Obwalden,
6074 Giswil, Telefon 041 68 16 16
- NW** Egli Andreas, Landwirtschaftsamt,
6370 Stans, Telefon 041 618 40 05
- GL** Amt für Landwirtschaft, Poststr. 29,
8750 Glarus, Telefon 055 646 67 00
- ZG** Furrer Jules, LBBZ Schluechthof,
6330 Cham, Telefon 041 780 46 46
- FR** Krebs Hans, Landw. Institut Freiburg (IAG),
1725 Posieux, Telefon 026 305 58 50
- SO** Wyss Stefan, Landw. Bildungszentrum Wallierhof,
4533 Riedholz, Telefon 032 627 09 62
- BL** Zjörjen Fritz, Landw. Zentrum Ebenrain,
4450 Sissach, Telefon 061 971 21 21
- SH** Landw. Bildungszentrum Charlottenfels,
8212 Neuhausen, Telefon 052 674 05 00
- AI** Koller Lorenz, Gaiserstrasse 8,
9050 Appenzell, Telefon 071 788 95 76
- AR** Vuilleumier Max, Landwirtschaftsamt AR,
9102 Herisau, Telefon 071 353 67 56
- SG** Haltiner Ulrich, Landw. Schule Rheinhof,
9465 Salez, Telefon 081 757 18 88
Steiner Gallus, Landw. Schule Flawil,
9230 Flawil, Telefon 071 394 53 53
- GR** Urwyler Hansueli, Grabenstrasse 1,
7000 Chur, Telefon 081 257 24 03
Föhn Josef, Landw. Schule Plantahof,
7302 Landquart, Telefon 081 307 45 25
- AG** Müri Paul, LBBZ Liebegg,
5722 Gränichen, Telefon 062 855 86 27
- TG** Herrmann Samuel, LBBZ Arenenberg, Fachstelle
Betriebsberatung und Landtechnik, Amriswilerstr. 50,
8570 Weinfelden, Telefon 071 622 10 22
- TI** Müller Antonio, Ufficio consulenza agricola,
6501 Bellinzona, Telefon 091 814 35 53

Landwirtschaftliche Beratungszentrale, Abt. Landtechnik, 8315 Lindau, Telefon 052 354 97 58

Die FAT-Berichte erscheinen in zirka 20 Nummern pro Jahr. – Jahresabonnement Fr. 50.–. Bestellung von Abonnements und Einzelnummern: FAT, CH-8356 Tänikon. Tel. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90.

E-Mail: info@fat.admin.ch – Internet: <http://www.admin.ch/sar/fat> – Die FAT-Berichte sind auch in französischer Sprache als «Rapports FAT» erhältlich. – ISSN 1018-502X.