



# Grüner als gedacht

**Land- und Baumaschinen sind führend bei Emissionsreduktionen**

*Marcus Geimer, Danilo Engelmann*

***Land- und Baumaschinen erfüllen heute die höchsten Ansprüche an eine Minimierung der Schadstoffemissionen. Dieser Vergleich zeigt, dass die gültigen Richtlinien für Dieselmotoren sogar strenger als die für Pkw sind.***

**F**ahrzeuge, die für einen Einsatz abseits der Straßen entwickelt werden, wie z. B. Land- und Baumaschinen, werden heute aufgrund der hohen notwendigen Energie- und Leistungsdichte bevorzugt verbrennungsmotorisch angetrieben. Aufgrund der Drehmomentcharakteristik des Verbrennungsmotors wird dabei als Energiespeicher Dieselmotoren eingesetzt.



Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer, Institutsleiter,  
Dipl.-Ing. Danilo Engelmann, akademischer Mitarbeiter  
Forschungsgruppe: Steuerungs- und Assistenzsysteme; Beide  
Karlsruher Institut für Technology KIT, Institut für Fahrzeug-  
systemtechnik, Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen

Geregelt werden die zulässigen Schadstoffemissionen eines Dieselmotors für Land- und Baumaschinen in der Richtlinie 97/68/EG [1]. Neben den genannten Maschinen werden in dieser Richtlinie auch Schiffe und Eisenbahnen geregelt. Ab dem 1. Januar 2015 ist die Stufe IV für Motoren von 56 kW bis 560 kW in Europa bindend. Entgegen der in [2] dargestellten Informati-

onen sind die Motoren der genannten Maschinen weder unreguliert, noch ist die Stufe IIIB aktuell gültig. Je nach Motorleistung wurde die Stufe IIIB in den Jahren 2013 bis 2014, mit einer Übergangsfrist bis Ende 2014, durch die Stufe IV abgelöst. Eine sehr komprimierte und übersichtliche Darstellung der gültigen Grenzwerte für die genannten Maschinen ist in [3] zu finden.

Für Pkw ist seit dem 1. September 2015 die Abgasstufe Euro 6 bindend, [4]. Genau wie bei den Maschinen müssen alle neu in den Verkehr gebrachten Fahrzeuge die Grenzwerte einhalten. Bereits zugelassene oder in Verkehr gebrachte Fahrzeuge, wie z. B. solche mit H-Kennzeichen, die meist keine Schadstoffminderungseinrichtungen besitzen, müssen nicht nachgerüstet werden.

Die Tabelle 1 fasst in den ersten beiden Zeilen die heute gültigen Emissionsgrenzwerte für Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Partikel (PM) von Maschinen und Pkw zusammen. Hierin ist die Problematik eines direkten Vergleichs zu erkennen: während die Schadstoffgrenzwerte für Pkw auf die zurückgelegte Strecke in km bezogen werden, werden sie bei den Maschinen auf die Motorenergie in kWh bezogen. Im Folgenden werden Möglichkeiten zu einer Umrechnung vorgestellt, damit die Emissionsgrenzwerte objektiv miteinander verglichen werden können.

### Umrechnung durch den zulässigen Flottenverbrauch

Ein erklärtes Ziel der Europäischen Union ist es, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Jahre 2020 im Vergleich zum Jahr 1990 um 20 % zu senken. Die Bundesregierung hat dieses Ziel sogar dahingehend verschärft, dass Sie eine Reduktion um 40 % im genannten Zeitraum anstrebt. Aus diesem Grund wurde auch der Flottenverbrauch von Pkw begrenzt, [5]: Aktuell gilt ein CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 120 g/km, ab dem Jahre 2020 wird dieser Grenzwert auf 95 g/km reduziert.

Der Ausstoß von CO<sub>2</sub> ist eine unmittelbare Folge der motorischen Verbrennung. Aus der Verbrennungsschemie mit der Randbedingung einer vollständigen Oxidation des im Dieselmotorkraftstoff gebundenen Kohlenstoffs kann das CO<sub>2</sub>-Äquivalent eines Liters Kraftstoff zu 2,64 kgCO<sub>2</sub>/l Diesel ermittelt werden. Reale Messungen an zwei Traktoren haben in [6] gezeigt, dass das tatsächliche CO<sub>2</sub>-Äquivalent bei ungefähr 2,70 kgCO<sub>2</sub>/l Diesel liegt.

Unter Berücksichtigung des gemessenen CO<sub>2</sub>-Äquivalents kann auf einen Kraftstoffverbrauch rückgerechnet werden:

$$b_{\text{Diesel}} = \frac{\text{CO}_2\text{-Ausstoß}}{\text{CO}_2\text{-Äquivalent}} \quad (1)$$

Im vorliegenden Fall berechnet sich daraus der spezifische Kraftstoffverbrauch:

$$b_{\text{Diesel}} = \frac{120 \frac{\text{g}}{\text{km}}}{2,70 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 4,44 \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} \quad (2)$$

Dieser Wert erscheint auf Basis von Erfahrungen als Durchschnittswert für Pkw plausibel.

Für eine Umrechnung U des oben errechneten Verbrauchs auf die spezifische Moto-  
 renergie muss der spezifische Verbrauch  
 „b“\_“e“ eines Verbrennungsmotors bekannt  
 sein:

$$U = \frac{b_e}{\rho \cdot b_{\text{Diesel}}} \quad (3)$$

Da sich dieser in seinem Kennfeld ändert  
 kann für eine Best-Case-Abschätzung der  
 minimale spezifische Verbrauch herange-  
 zogen werden. Nach aktuellem Kenntnisstand  
 beträgt der minimale spezifische Verbrauch  
 eines Dieselmotors etwa 200 g/kWh, [7, 8, 9].

$$U_B = \frac{200 \text{ g/kWh}}{0,83 \text{ kg/l} \cdot 4,44 \text{ l/100 km}} = 5,42 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \quad (4)$$

Mit Hilfe des Umrechnungsfaktors können  
 nun die bestenfalls von einem Pkw zu er-  
 reichenden Emissionswerte auf den Ener-  
 giebedarf umgerechnet werden. Die Ergeb-  
 nisse sind in der 3. Zeile der Tabelle zusam-  
 men gefasst. Dabei zeigt sich, dass die Emis-  
 sionsgrenzwerte der Maschinen und Pkw  
 gleich hohe Werte im Best-Punkt des Ver-  
 brennungsmotors zulassen.

**Umrechnung auf Basis  
 gemessener Verbrauchswerte**

Im nun folgenden Kapitel erfolgt auf Basis  
 von Messwerten an Fahrzeugen die Umrech-  
 nung der Emissionen einer zurückgelegten  
 Strecke [km] auf die Motorenergie [kWh].

Zum ersten kann der Energieverbrauch  
 im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ)  
 eines Fahrzeugs gemessen werden. So wird  
 beispielsweise in [10] die mittlere Antriebs-  
 leistung im NEFZ mit 4 kW angegeben. Aus  
 der Abgasgesetzgebung [4] ist zudem be-  
 kannt, dass der NEFZ-Zyklus 1.180 s dauert  
 und 11 km lang ist. Der Umrechnungsfaktor  
 UNEFZ berechnet sich so zu:

$$U_{\text{NEFZ}} = \frac{11 \text{ km}}{4 \text{ kW} \cdot 1.180 \text{ s}} = 8,39 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \quad (5)$$

Mit Hilfe dieses Umrechnungsfaktors kann  
 erneut der für Pkw äquivalente Emissions-  
 wert berechnet werden, vgl. Zeile 4 in Tabelle.  
 Im Gegensatz zu dem Best-Case-Szenario  
 zeigen sich bei den Maschinen jetzt deutlich  
 bessere Emissionswerte als beim Pkw.

Begründet werden kann das Ergebnis un-  
 ter Berücksichtigung des spezifischen Ver-  
 brauchs mit den gewählten NEFZ-Daten:

$$b_{e,\text{NEFZ}} = 200 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \cdot \frac{8,39 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}}{5,42 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}} = 310 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \quad (6)$$

| Zeile | Grundlage                       | Fahrzeug | NOx        | Partikel    | Bemerkung         |
|-------|---------------------------------|----------|------------|-------------|-------------------|
| 1     | 97/68/EG                        | Maschine | 0,4 g/k Wh | 0,025 g/kWh | –                 |
| 2     | 91/441/EWG                      | Pkw      | 80 mg/km   | 4,5 mg/km   | –                 |
| 3     | U <sub>B</sub> =5,42 km/kWh     | Pkw      | 0,4 g/kWh  | 0,024 g/kWh | Best-Case         |
| 4     | U <sub>NEFZ</sub> = 8,39 km/kWh | Pkw      | 0,7 g/kWh  | 0,038 g/kWh | NEFZ-Zyklus       |
| 5     | U <sub>WLTP</sub> = 6,64 km/kWh | Pkw      | 0,5 g/kWh  | 0,030 g/kWh | neuer WLTP-Zyklus |
| 6     | 70km/h                          | Pkw      | 0,7 g/kWh  | 0,039 g/kWh | Konstandfahrt     |

Tabelle: Emissionsgrenzwerte nach [1,4], teilweise umgerechnet

Es zeigt sich hier, dass die Betriebspunkte  
 des NEFZ nicht im Bereich des optimalen  
 Verbrauchs im Motorkennfeld liegen, somit  
 einen höheren spezifischen Verbrauch be-  
 sitzen. Aufgrund der geringen Motorbelas-  
 tung im Zyklus des NEFZ ist auch dieser  
 Wert plausibel.

Etwas verbessert wird diese Situation  
 durch den neu angestrebten Testzyklus  
 „Worldwide Harmonized Light Duty Test  
 Procedure (WLTP)“. Nach [10] wird in dem  
 Zyklus eine mittlere Antriebsleistung von  
 7 kW benötigt, der Zyklus dauert 30 Minuten  
 und hat eine Länge von 23,25 km. Umrech-  
 nungsfaktor UWLTP und Emissionen lassen  
 sich analog berechnen, vgl. Zeile 5 in Tabelle:

$$U_{\text{WLTP}} = \frac{23,25 \text{ km}}{7 \text{ kW} \cdot 30 \text{ min}} = 6,643 \frac{\text{km}}{\text{kWh}} \quad (7)$$

Eine weitere Möglichkeit eines Emissions-  
 vergleichs ist die Auswahl eines speziellen  
 Betriebspunkts. Hierzu muss z. B. die für ei-  
 ne gewisse Geschwindigkeit v notwendige  
 Leistung P<sub>v</sub> eines Pkw bekannt sein. Renius  
 gibt z.B. in seinem Leserbrief zum Artikel  
 [2] an, dass bei 70 km/h eine Leistung von  
 8 kW benötigt wird. Der Umrechnungsfak-  
 tor berechnet sich dabei zu:

$$U_v \text{ [km/kWh]} = \frac{v \text{ [km/h]}}{p \text{ [kW]}} \quad (8)$$

Die Zeile 6 in Tabelle gibt die für die  
 Geschwindigkeit umgerechneten Emis-  
 sionen eines Pkw an. Man erkennt im Ver-  
 gleich zur Maschine deutlich höhere Emis-  
 sionen beim Pkw, aber ähnlich hohe Werte  
 wie im NEFZ.

**Im besten Fall gleich  
 hohe Emissionen**

Die Emissionen von Pkw und mobilen Ma-  
 schinen, wie z. B. Land- und Baumaschinen,  
 werden heute unterschiedlich reglemen-  
 tiert. Während die Emissionen bei Pkw auf  
 die zurückgelegte Strecke [km] bezogen wer-  
 den, werden Sie bei mobilen Maschinen auf  
 die erzeugte Energie [kWh] bezogen. Dies  
 hat zur Folge, dass eine direkte Umrechnung  
 der Emissionsgrenzwerte nicht möglich ist.

In der vorliegenden Studie wurden Mög-  
 lichkeiten zur Umrechnung der Emissionen  
 für einen Vergleich vorgestellt. Neben einer

Best-Case-Betrachtung wurden aktuelle  
 Leistungskennwerte von Pkw, z. B. aus dem  
 NEFZ oder bei einer Fahrt mit konstanter  
 Geschwindigkeit, herangezogen. Dabei  
 zeigt sich, dass die Emissionen bei Pkw bes-  
 tenfalls gleich hoch sind wie die von mobi-  
 len Maschinen, im praktischen Betrieb je-  
 doch in der Regel höher. ■

**Literaturverzeichnis:** [1] Richtlinie 2010/26/EU der  
 Kommission vom 31. März 2010 zur Änderung der  
 Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments  
 und des Rates zur Angleichung der Rechtsvorschriften  
 der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur  
 Bekämpfung der Emissionen von gasförmigen  
 Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus  
 Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und  
 Geräte.

[2] Kellerhoff, P.: Land- und Baumaschinen hinken  
 Pkw hinterher, VDI nachrichten vom 9. Oktober 2015,  
 Nr. 41, S. 13.

[3] Abgasgesetzgebung – Diesel- und Gasmotoren,  
 VDMA Motoren und Systeme, Stand Juni 2006.

[4] Richtlinie des Rates vom 26. Juni 1991 zur  
 Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Anglei-  
 chung der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen gegen  
 die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von  
 Kraftfahrzeugen, Internet: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31991L0441&from=de>, Stand: 02.11.2015.

[5] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen  
 Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur  
 Festsetzung von Emissionen für neue Personenkraft-  
 wagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der  
 Gemeinschaft zur Verringeren der CO<sub>2</sub>-Emissionen  
 von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeu-  
 gen, Internet: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ%3AL%3A2009%3A140%3A0001%3A0015%3ADE%3APDF>, Stand 02.11.2015.

[6] Clare, D.A. et al.: Real world measurement of  
 carbon dioxide emissions of agricultural tractor using  
 a portable emissions measurement system,  
 Conference: Agricultural Engineering, 6.-7. Nov. 2015,  
 Hannover. In: VDI-Berichte Nr. 2251, 2015, S. 21-27.

[7] Kleibl, A.: Effizienzbewertung bei Spezialtiefbau-  
 maschinen, 6. Fachtagung Baumaschinentechnik  
 2015, 17./18. September 2015, Dresden. In:  
 Tagungsband, Schriftenreihe der Forschungsvereini-  
 gung Bau- und Baustoffmaschinen e.V. (FVB), Heft  
 49, S. 129.

[8] Geimer, M. und Pohlandt, C.: Grundlagen mobiler  
 Arbeitsmaschinen, Karlsruher Schriftenreihe  
 Fahrzeugsystemtechnik, Band 22, ISBN 978-3-7315-  
 0188-6, Seite I-13.

[9] Effektiver Kraftstoffverbrauch, Internet: <http://www.motorlexikon.de/?I=3492>, Bild K285, Stand  
 03.11.2015.

[10] NEFZ und WLTP, Verband der Automobilindus-  
 trie VDA, Internet: <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/nefz-und-wltp>,  
 html, Stand 03.11.2015.

Bilder: Fotolia