

Alternative Kraftstoffe im Härtetest: Was ein PEMS beim Pflügen misst

von KASPAR OBERMAIER, DR. JOHANNES Ettl und DR. KLAUS THUNEKE: **Rapsölkraftstoff kann in der Landwirtschaft regional erzeugt werden, gilt als krisensicher und umweltfreundlich. Im Rahmen des internationalen Verbundvorhabens ResiTrac untersucht das Technologie- und Förderzentrum (TFZ) einen Traktor der Abgasstufe V mit Rapsölkraftstoff beim Pflügen. Wie schneiden Traktor und Kraftstoff im Abgastest unter Realbedingungen ab?**

Die Antriebstechnologien landwirtschaftlicher Maschinen stehen vor einem Wendepunkt: Klimawandel und steigende Kosten für fossile Kraftstoffe fordern neue Lösungen. Parallel zur Weiterentwicklung moderner Dieselmotoren ist ein altbekannter Kraftstoff wieder in der Diskussion: Rapsöl. Traktoren, die damit betrieben werden, können einen positiven Beitrag zum Klimaschutz leisten, die Abhängigkeit von importiertem Diesel verringern und die Kreislaufwirtschaft fördern. Doch wie umweltfreundlich ist diese

Alternative im Vergleich zum konventionellen Dieselantrieb wirklich? Das Projekt ResiTrac gibt Antworten darauf: Wissenschaftler des TFZ haben einen Rapsöl-Traktor beim Pflügen getestet und die Abgasemissionen mit mobiler Messtechnik ermittelt.

Viskosität im Blick: Was den Pflanzenölbetrieb herausfordert

Rapsölkraftstoff ist dem Diesel grundsätzlich sehr ähnlich. So ist z. B. der auf das Volumen bezogene Heizwert mit 34 MJ/l vergleichbar mit dem von Diesel mit 36 MJ/l. Allerdings unterscheidet sich Rapsöl deutlich im Fließverhalten. Die Viskosität, d. h. der Wert, wie zähflüssig der Kraftstoff ist, liegt deutlich höher und ist stark von der Temperatur abhängig. Sie liegt bei 20 °C bei 75 mm²/s und ist somit etwa 15-mal so hoch wie die von Diesel, welche bei etwa 5 mm²/s

liegt. Dies erfordert technische Veränderungen am Motor- und Kraftstoffsystem.

Im Rahmen des Projektes rüstete der Hersteller John Deere den Testtraktor 6R 215 auf reinen Pflanzenölbetrieb um. Dazu wurde die Motorsteuerung gezielt auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Rapsöl abgestimmt. Dabei passten die Ingenieure die Einspritzmengen des Kraftstoffs so an, dass der Motor eine mit Dieselbetrieb vergleichbare Leistung erbringt. Aufgrund der höheren Viskosität von Rapsöl wurden eine leistungsfähigere Niederdruckpumpe sowie Leitungen mit größerem Querschnitt im Niederdruckkraftstoffsystem verbaut. Außerdem kommt im Traktor eine serienmäßig verfügbare elektrische Motorvorwärmung zum Einsatz, die den Kühlwasserkreislauf und damit den ganzen Motorblock vorheizt. Das erleichtert den Kaltstart bei niedrigen Temperaturen.

Infobox: Projektinformationen

Titel:	Resilient Food Production with Green Tractors kurz: ResiTrac	
Projektpartner:	– John Deere (Koordinator) – Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Straubing – Fachhochschule Bern, Schweiz – Versuchszentrum Laimburg, Südtirol/Italien	
Projektlaufzeit:	Januar 2023 bis Dezember 2025	
Finanzierung:	EIT-Food	
Kofinanzierung:	Europäische Union	
Weitere Infos:	https://www.tfz.bayern.de/projekt-resitrac	



Aufbau des Praxistests

Der Testtraktor zählt mit seinen 215 PS zur oberen Leistungsklasse, der schwere Bodenarbeiten wie beispielsweise Pflügen verrichten kann. Für die Emissionsmessung in diesem leistungsintensiven Bereich hat ihn das TFZ mit einem sogenannten PEMS (Portables Emissions-Messsystem) ausgestattet. Während Messungen auf dem Prüfstand unter standardisierten und idealisierten Bedingungen stattfinden, erfasst das PEMS die Emissionen direkt im realen Betrieb. Es trägt deshalb dazu bei, die tatsächlichen Umweltwirkungen von Maschinen im Feldebetrieb transparent zu machen. PEMS und Traktor kamen beim Pflügen auf einem Straubinger Praxisbetrieb zum Einsatz (siehe Bild 1).



Bild 1: Rapsöltraktor 6R 215 während der Abgasmessung beim Pflügen mit einem portablen Emissions-Messsystem (PEMS) im Frontanbau, das gleichzeitig der Ballastierung dient (Fotos: TFZ)

Wie funktioniert nun die mobile Abgasmessung und was wird gemessen?

Bei der mobilen Abgasmessung wird ein Teil des Abgasstroms über spezielle Leitungen zu den Analysegeräten geführt. Dort werden die Konzentrationen von CO, CO₂, HC, NO_x sowie die Partikelanzahl bestimmt. Wie in Bild 2 darge-

stellt, sind die Analytoren zum Schutz vor Staub und Wasser in einer Metallbox untergebracht. Ein Generator sorgt dafür, dass die Geräte unabhängig vom Stromnetz des Traktors mit elektrischem Strom versorgt werden, ohne die Messung zu verfälschen.

Seit Einführung der Abgasstufe V im Jahr 2019 ist die Erfassung der Emissionen im tatsächlichen Fahrbetrieb mittels PEMS erforderlich. Konkrete Abgasgrenzwerte hierfür wurden vorerst noch nicht festgelegt. Die Anforderungen an die Überwachung der Emissionen im Realbetrieb geben die Verordnung (EU) 2016/1628 und die delegierte Verordnung (EU) 2017/655 vor.

Gemäß diesen Verordnungen werden bei der Auswertung die Messdaten sekundlich beginnenden Zeitfenstern zugeordnet, die jeweils die gleiche mittlere Arbeit wie im genormten Prüfstandszyklus NRTC (Non-Road Transient Cycle) abbilden. Die Messung startet, wenn eine Kühlmitteltemperatur von 70 °C erreicht ist oder spätestens 20 Minuten nach Motorstart. Für jedes der Zeitfenster wird die durchschnittliche Emissionskonzentration ermittelt. Die Prüfdauer bei der Realemissionsmessung muss das Fünf- bis Siebenfache der

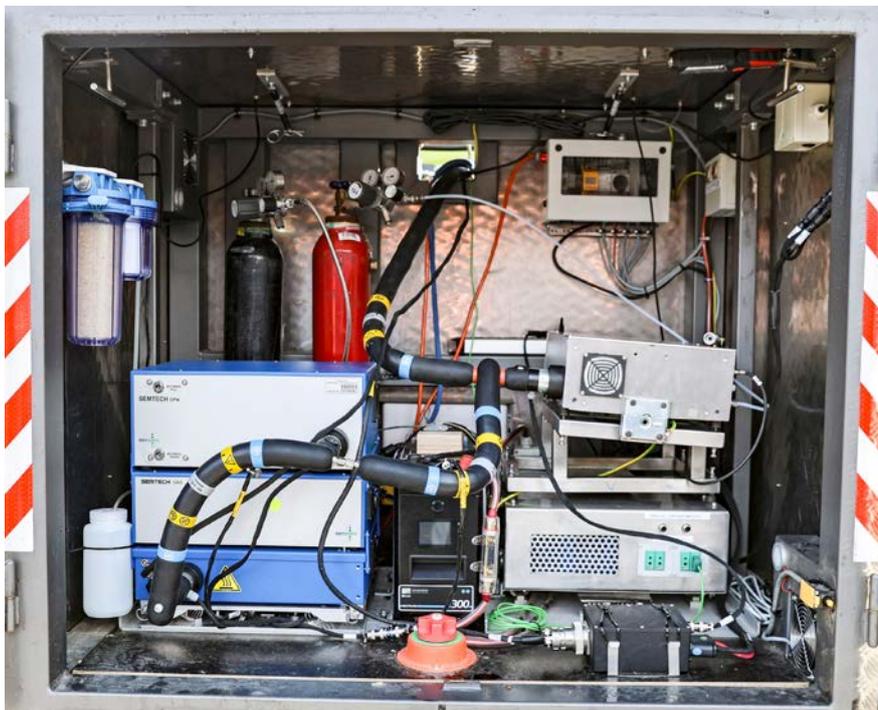


Bild 2: „Innenleben“ des PEMS – Portables Emissions-Messsystem zur Abgasemissionsmessung im Realbetrieb

Referenzarbeit des NRTC-Tests umfassen. Aus diesen Anforderungen ergeben sich, je nach Schwere der Arbeit bzw. Lastanforderung an den Motor, Messzeiten für eine Einzelmessung von etwa ein bis zwei Stunden.

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse beschränken sich auf die Stickoxid-Emissionen, da diese bei modernen Dieselmotoren die wichtigsten Abgasparameter sind. Der gültige NO_x -Grenzwert für die Typprüfung am Prüfstand beträgt bei diesem Traktor 0,4 g/kWh. Da für Traktoren im Realbetrieb noch keine Grenzwerte festgelegt sind, kann für die Einordnung der Ergebnisse die Gesetzgebung für Lkw herangezogen werden. Bei Lkw darf der Prüfstandsgrenzwert bei Realemissionsmessungen um nicht mehr als das 1,5-fache (hier: 0,6 g/kWh) überschritten werden.

Messergebnisse und Analyse

Die Ergebnisse der Emissionsmessung im Realbetrieb werden in der *Abbildung* dargestellt. Im obersten Teil der Grafik wird die Motordrehzahl des Traktors über die Zeit visualisiert. Deutlich erkennbar ist, dass der Traktor zu Beginn des Arbeitstages eine Phase bei Standgas bzw. schnell wechselnden Drehzahlen durchläuft. Diese Phase ist charakteristisch für den Start des Betriebs (I), in der der Motor während des Anbaus des Pfluges (II) und anderer Vorbereitungen warmläuft und die Fahrt zum Feld (III) erfolgt. Nach dieser initialen Phase folgt eine Reihe von regelmäßig wiederkehrenden Drehzahlmustern, in denen der Traktor mit konstant höheren Drehzahlen (1 600 bis 1 700 min^{-1}) arbeitet. Diese treten auf, wenn der Schlepper am Pflügen ist. Die Bereiche mit niedrigeren Drehzahlen dazwischen (circa 1 000 min^{-1}) zeigen sich bei den Wendemanövern (IV).

Der darunterliegende Teil der Grafik zeigt den Verlauf der Motorlast real (türkis) und in einer geglätteten Form (blau), welche durch die sogenannte Moving Average Window Methode (MAW = Fenster mit gleitendem Mittelwert)

berechnet wurde. Auch hier sind die charakteristischen Schwankungen in Form von markanten Plateaus und Tälern zu erkennen. Diese Schwankungen (20 bis 85 Prozent) spiegeln die unterschiedlichen Arbeitslasten wider, die der Motor während der verschiedenen Phasen des Pflügens zeigt.

Im mittleren Teil der Grafik wird die Abgastemperatur über den gesamten Messzeitraum dargestellt. Zu Beginn der Messung ist die Temperatur niedrig ($< 100\text{ °C}$) und steigt dann kontinuierlich an, während der Traktor seine Arbeit verrichtet. Nach circa 600 Sekunden erreicht der Motor Betriebstemperatur und somit auch die Abgastemperatur ein konstantes Niveau (circa 300 °C).

Der von oben vierte Grafikteil zeigt die Stickoxid-Emissionen (NO_x) in ppm (parts per million) über den gesamten Verlauf der Messung. Hier wird ein Zusammenhang zwischen der Motorlast und den emittierten Stickoxiden deutlich. Nach anfänglich hohen Stickoxid-Emissionen sinken diese stark ab, wenn die Abgastemperatur circa 250 °C überschreitet. Das lässt erkennen, dass das SCR (Selective Catalytic Reduction)-System damit beginnt, NO_x mit Hilfe der Harnstofflösung „AdBlue“, chemisch zu reduzieren.

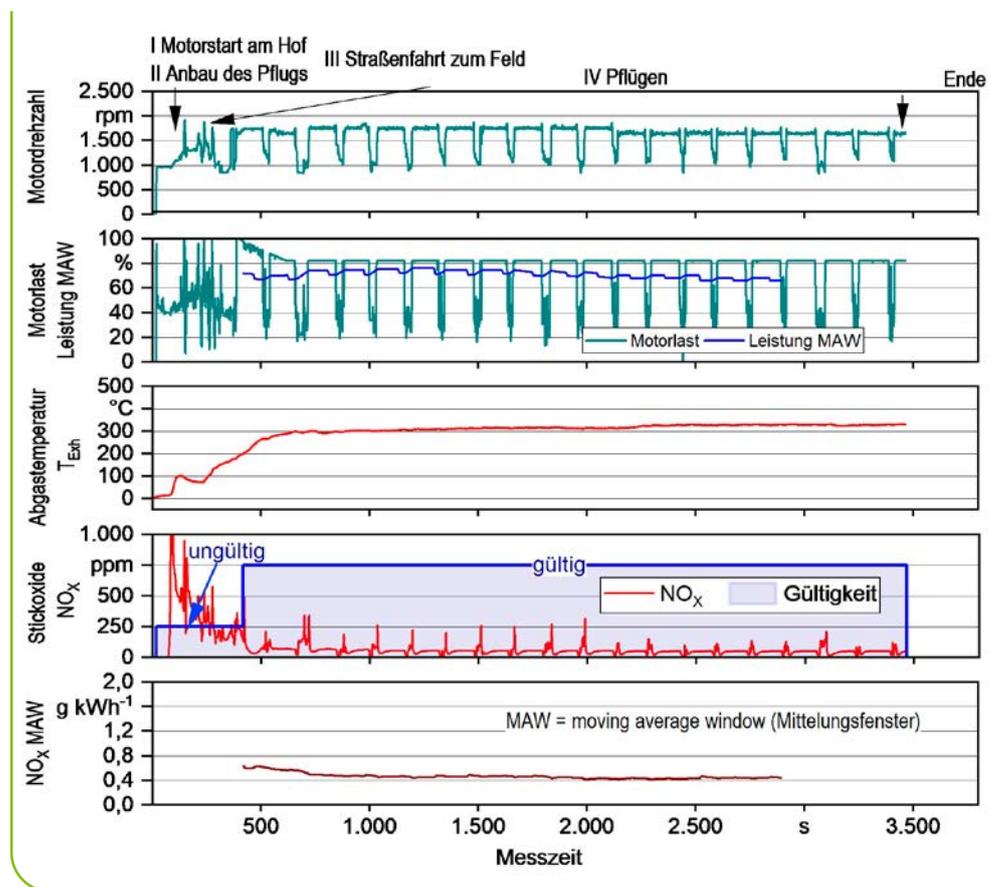


Abbildung: Verlauf von Motordrehzahl, Motorlast, Abgastemperatur und Stickoxiden (NO_x) bei der Abgasmessung beim Pflügen mit einem Rapsöltraktor

Dieser Zeitpunkt fällt mit einer Kühlmitteltemperatur von circa 70 °C zusammen, ab der die Messwerte als gültig in die Auswertung einfließen. Im weiteren Verlauf fällt auf, dass die NO_x-Werte kurzzeitig ansteigen, wenn die Last jeweils zu Beginn der Arbeit des Traktors in der Pflugfurche zunimmt. Umgekehrt sinken die NO_x-Emissionen geringfügig, wenn die Motorlast bei den Wendemanövern absinkt. Der NO_x-Anstieg lässt sich damit erklären, dass durch die kurzfristige Lastanforderung mehr Kraftstoff eingespritzt werden muss. Die entstehenden größeren Mengen an Stickoxiden können aber auf die Schnelle nicht vollständig reduziert werden. Dies ist bedingt durch die Trägheit des SCR-Systems bei der Nachregulierung.

Im untersten Teil der Grafik werden die NO_x-Konzentrationen, ausgewertet nach der Moving Average Window Methode, dargestellt. Ähnlich wie bei der Stickoxidkonzentration, die in ppm gemessen wird, zeigen auch die NO_x-Emissionen, die in Relation zur geleisteten Arbeit stehen, nach Erreichen der Betriebstemperatur einen langsamen Rückgang auf ein konstantes Niveau. Der oben beschriebene, aus der Gesetzgebung für Lkw abgeleitete Grenzwert von 0,6 g/kWh, konnte bei den durchgeführten Messungen eingehalten werden.

Fazit

Die aktuelle Untersuchung hat gezeigt, dass die Stickoxid-Emissionen des getesteten Pflanzenöltraktors gering sind. Wird zur Orientierung die Abgasgesetzgebung von Lkw herangezogen, würde der zulässige NO_x-Grenzwert von dem untersuchten Traktor im Rapsölbetrieb eingehalten werden.

Die mobile Abgasmessung mit PEMS eröffnet eine zusätzliche Dimension bei der Überwachung der Emissionen von Traktoren. Diese Messmethode ermöglicht es, das Abgasverhalten über die Lebensdauer unter realen Bedingungen wiederkehrend zu erfassen und Betriebsphasen höherer Abgaskonzentrationen zu identifizieren. Dies kommt der Weiterentwicklung von Traktoren mit deren Abgasnachbehandlungstechnik, insbesondere auch bei der Umstellung auf erneuerbare Kraftstoffe, zugute.

Lesen Sie hierzu auch den Beitrag „Als Partner im europäischen Netzwerk EIT Food“ auf der Seite 4 ff.

Literatur

- ETTL, J.; HUBER, G.; EMBERGER, P.; THUNEKE, K.; REMMELE, E.: Klimafreundliche Landmaschinen im Feldtest. Berichte aus dem TFZ, Nr. 80. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
- REMMELE, E.; ECKEL, H.; PICKEL, P.; RATHBAUER, J.; REINHOLD, G.; STIRNIMANN, R.; HÖRNER, R.; UPPENKAMP, N. (2020): Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen. KTBL-Schrift, Nr. 519. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 133 Seiten, ISBN 978-3-945088-73-9
- GÖTZ, I. K.; MEISEL K.; SCHRÖDER, J.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; BAUER, C.; SACCHI, R. (2025): Ökologische Einordnung. In: Schröder, J.; Görsch, K. (Hrsg.): Erneuerbare Energien im Verkehr. Monitoringbericht. Seite 132 bis 143. Leipzig: DBFZ. ISBN: 978-3-949807-23-7. DOI: 10.48480/w11j-9w27



KASPAR OBERMAIER
DR. JOHANNES Ettl
DR. KLAUS THUNEKE

TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM IM
KOMPETENZZENTRUM FÜR
NACHWACHSENDE ROHSTOFFE
kaspar.obermaier@tfz.bayern.de
johannes.ettl@tfz.bayern.de
klaus.thuneke@tfz.bayern.de

