

Dynamische Emissions- und Kraftstoffverbrauchsmessung an pflanzenöltauglichen Traktoren

Johannes Ettl, Heinz Bernhardt, Klaus Thuneke, Peter Emberger, Edgar Remmele

Die Bewertung der Umweltwirkung landwirtschaftlicher Fahrzeuge erfordert realitätsnahe Testmethoden zur Erhebung von Abgasemissionen. Am Motorenprüfstand sind dynamische Drehzahl- und Drehmomentzyklen Stand der Technik. Im Traktor eingebaute Motoren wurden überwiegend stationär bei gleichbleibender Drehzahl und Last mithilfe einer Zapfwellenbremse geprüft. Mit einem auf Basis des NRTC (nonroad transient cycle) adaptierten Messzyklus lassen sich reproduzierbare, transiente Emissions- und Verbrauchsmessungen an Traktoren durchführen. Die Mittelung der Drehzahl- und Drehmomentvorgaben in 10-Sekunden-Intervallen (10-s-NRTC) ermöglicht trotz unvermeidbarer Trägheitsmomente am Traktorenprüfstand die Durchführung eines dynamischen Messzyklus, auch unter Einbeziehung des Kaltstarts. Neben Emissionen und Verbrauch können auch Abgasnachbehandlungssysteme und das Thermomanagement des Gesamtsystems Traktor untersucht und optimiert werden. Bei einer Versuchsreihe konnte das Mittelungsintervall auf bis zu 3 s verkürzt werden und damit die Dynamik dem originalen NRTC-Zyklus gut angenähert werden. Dabei waren die NO_x -Emissionen lediglich im 3-s-NRTC signifikant höher als im 10-s-NRTC und NRSC. Im angepassten 10-s-NRTC zeigen sich mit Rapsöl geringere Partikelmasse- und höhere HC- und CO-Emissionen sowie ein höherer spezifischer Kraftstoffverbrauch im Vergleich zum stationären NRSC (nonroad steady cycle).

Schlüsselwörter

Traktoren, Emissionen, Kraftstoffverbrauch, Testzyklus, NRTC (nonroad transient cycle), NRSC (nonroad steady cycle), Rapsöl, Pflanzenöl

Die Wirkung von Motorenabgasen auf Mensch und Umwelt erlangt einen immer höheren Stellenwert. Aus diesem Grund werden Abgasemissionen von Traktormotoren seit Jahren durch gesetzliche Regulierungen stufenweise stärker begrenzt. Untersuchungen belegen, dass insbesondere dynamische Drehzahl- und Lastwechsel einen starken Einfluss auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch haben (BANE 2002, LINDGREN 2004, BLASSNEGGER et al. 2009). Die Einführung von transienten Prüfzyklen und die Einbeziehung von Emissionen aus Kaltstartereignissen zusätzlich zu bestehenden stationären Prüfzyklen sowie die Anwendung mobiler Emissionsmesstechnik sind Maßnahmen, um das Abgasverhalten im realen Betrieb besser einschätzen zu können (FRANCO et al. 2014, BONNEL et al. 2013, GIETZELT et al. 2012). Die Datengrundlage zur Quantifizierung von Abgasemissionen landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen im transienten Betrieb ist bislang jedoch unzureichend (HELMS und HEIDT 2014).

Die Typengenehmigungsprüfung von Traktormotoren erfolgt im ausgebauten Zustand mit einem stationären (NRSC) und einem dynamischen Zyklus (NRTC) nach Richtlinien 2000/25/EG, 2005/13/EG und 97/68/EG. Zur wiederkehrenden Bestimmung von Emissionen am Gesamtfahrzeug haben sich bei Forschungsarbeiten zudem Emissionsmessungen gemäß dem NRSC am eingebauten Motor mittels Zapfwellenbremse bewährt (EMBERGER et al. 2011). Der in den USA entwickelte NRTC ist größtenteils aus hochtransienten Einzelzyklen von Baumaschinenarbeiten zusammengesetzt (ULLMAN et al. 1999, STARR et al. 1999, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 2003) und ist ebenso wie der NRSC für den Motorenprüfstand konzipiert. Bei der Anwendung am Traktor mit der Leistungsabnahme an der Zapfwelle reduzieren höhere Trägheitsmomente durch zusätzliche Nebenaggregate sowie Getriebekomponenten die Dynamik im Vergleich zum Motorenprüfstand. LANDIS 2012 beschreibt einen angepassten NRTC, der am Traktorenprüfstand mit Leistungsabnahme an der Zapfwelle angewendet werden kann. Dabei werden die Drehzahl- und Drehmomentvorgaben des NRTC abschnittsweise alle zehn Sekunden (10-s-NRTC) gemittelt, wodurch die Dynamik reduziert und die Zyklusarbeit jedoch unverändert bleibt. Der 10-s-NRTC wurde bisher nur am Traktorenprüfstand der Forschungsanstalt Agroscope erprobt. Ferner ist noch nicht untersucht worden, ob eine höhere Dynamik als 10 s durch kürzere Mittelungsintervalle erreicht werden kann und wie sich diese gegebenenfalls auf die Ergebnisse der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs auswirken.

Zielsetzung

Ziel der Untersuchungen ist die Prüfung der Anwendbarkeit des 10-s-NRTC am Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums (TFZ) in Straubing mit der Leistungsabnahme an der Zapfwelle. Im nächsten Schritt sollen mit kürzeren Mittelungsintervallen im Vergleich zum 10-s-NRTC eine höhere Dynamik erzeugt und Messwerte von Drehzahl, Drehmoment und Leistung auf die Übereinstimmung mit den Bezugswerten (Sollvorgaben) gemäß der Zyklusvalidierung nach der Richtlinie 97/68/EG geprüft werden. Ferner soll der Einfluss auf die Ergebnisse für Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM) sowie auf den Kraftstoffverbrauch an einem Traktor mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 untersucht werden.

Material und Methoden

Der stationäre Prüfzyklus NRSC (nonroad steady cycle) besteht aus acht stationären Prüfphasen im Motorkennfeld, die in einer festgelegten Reihenfolge durchlaufen werden. Bei den ersten vier Prüfphasen wird die vom Hersteller angegebene Nenndrehzahl angefahren sowie 100%, 75%, 50% und 10% Leistung eingestellt. Für die nächsten drei Prüfphasen bei 100%, 75% und 50% Leistung ist die Zwischendrehzahl anzufahren, welche beim höchsten Motordrehmoment festgelegt ist. Die letzte Prüfphase des Prüfzyklus ist der Leerlaufbetriebspunkt. Der NRSC ist bei Traktormotoren aller Abgasstufen durchzuführen

Ab der Abgasstufe IIIB ist nach der Richtlinie 97/68/EG zusätzlich zum NRSC der NRTC (nonroad transient cycle) zu absolvieren. Der NRTC beinhaltet schnell wechselnde Betriebspunkte und wird zuerst im Kaltstart und anschließend im Warmstart durchgeführt. Die Emissionen der limitierten Abgaskomponenten des Warmstarts werden zu 90% und die des Kaltstarts zu 10% gewichtet. Der NRTC beginnt mit einer 28 s langen Leerlaufphase und endet mit einer 34 s langen. Weitere Zyklusabschnitte mit unterschiedlich dynamischem Drehzahl- und Drehmomentverlauf stammen nach UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 2003 aus Arbeiten mit einem Baggerlader (29–234 s),

einem Radlader (235–418 s), einer Planierdraupe (419–627 s), einem Traktor (628–777 s), einem Bagger (778–812 s), einem Schweißaggregat (816–1019 s) und einem Kompaktlader (1020–1204 s).

Mit der Validierungsstatistik gemäß 97/68/EG wird geprüft, wie gut der NRTC-Zyklus am Prüfstand durchgeführt werden kann. Für Drehzahl, Drehmoment und Leistung wird dabei eine lineare Regression $y = mx + b$ der Messwerte y auf die Bezugswerte x mit der Fehlerquadratmethode durchgeführt. Die Steigung der Regressionsgeraden m , der Y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden b , die Standardabweichung vom Schätzwert SE (von y über x) und das Bestimmtheitsmaß R^2 dienen als Beurteilungskriterien. Der Vergleich zwischen den Kenngrößen der Regressionsgeraden mit den Grenzwerten nach 97/68/EG weist auf die Güte der Messung hin. Schließlich wird die gemessene Zyklusarbeit W_{act} mit der theoretischen Bezugszyklusarbeit W_{ref} (in kWh) gegenübergestellt.

An den Traktoren in Tabelle 1 wurde der 10-s-NRTC nach LANDIS 2012 angewandt. In einer weiteren Versuchsreihe wurde die blockweise durchgeführte Mittelwertbildung der Drehzahl- und Drehmomentvorgaben auf 5 s-Intervalle (5-s-NRTC) reduziert. Durch die Bildung des gleitenden Mittelwerts der NRTC-Bezugswerte alle 3 s wird die Dynamik weiter erhöht (3-s-NRTC). Beim 1-s-NRTC werden die gesetzlich NRTC-Vorgaben ohne Mittelung angewandt. Die Datenerfassung und -analyse erfolgte bei einer Frequenz von 1 Hz.

Tabelle 1: Untersuchte Traktoren und verwendete Testzyklen sowie Kraftstoffe

Bezeichnung (Abgasstufe)	Test Zyklen in Anlehnung an 97/68/EG	Anzahl Zylinder, Einspritzsystem	Versuchskraftstoffe	Maßnahmen zur Emissionsminderung
Traktor II (Abgasstufe II)	NRSC 10-s-NRTC	6 Zylinder, Pumpe-Leitung-Düse	Rapsöl- kraftstoff	Ventilüberschneidung beim Ladungswechsel
Traktor IIIA (Abgasstufe IIIA)	NRSC 10-s-NRTC 3-s-NRTC 1-s-NRTC	4 Zylinder, Common-Rail	Diesel- kraftstoff	Ventilüberschneidung beim Ladungswechsel Oxidationskatalysator
Traktor IIIB (Abgasstufe IIIB)	NRSC 10-s-NRTC 1-s-NRTC	6 Zylinder, Common-Rail	Diesel- kraftstoff	Oxidationskatalysator Selektive katalytische Reduktion
Traktor IV (Abgasstufe IV)	NRSC 10-s-NRTC 5-s-NRTC 3-s-NRTC	6 Zylinder, Common-Rail	Rapsöl- kraftstoff	Externe Abgasrückführung Oxidationskatalysator Selektive katalytische Reduktion Partikelfilter

Die Zyklusvalidierung erfolgt an allen Traktoren (Tabelle 1). Die Auswirkungen auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch werden beispielhaft am Traktor IV mit Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 im 10-s-NRTC, 5-s-NRTC und 3-s-NRTC sowie im NRSC ermittelt. Die Zykluswerte der Emissionen und des Verbrauchs aus den NRTC-Testzyklen werden mit den Ergebnissen des stationären NRSC verglichen.

In Abbildung 1 sind wesentliche Steuer- und Messgrößen für die Verbrauchs- und Emissionsmessungen am TFZ-Traktorenprüfstand in Anlehnung an die Richtlinien 2000/25/EG, 97/68/EG bzw. ISO 8178 dargestellt. Die Drehzahl wird über den Fahrhebelsteller am Gaspedal und das Drehmoment über die Wirbelstrombremse bestimmt. In EMBERGER et al. (2013), EMBERGER (2013) und THUNKE und EMBERGER (2007) werden Aufbau und Durchführung der Messung der festen und gasförmigen Abgaskomponenten sowie des Kraftstoffverbrauchs am Traktorenprüfstand beschrieben.

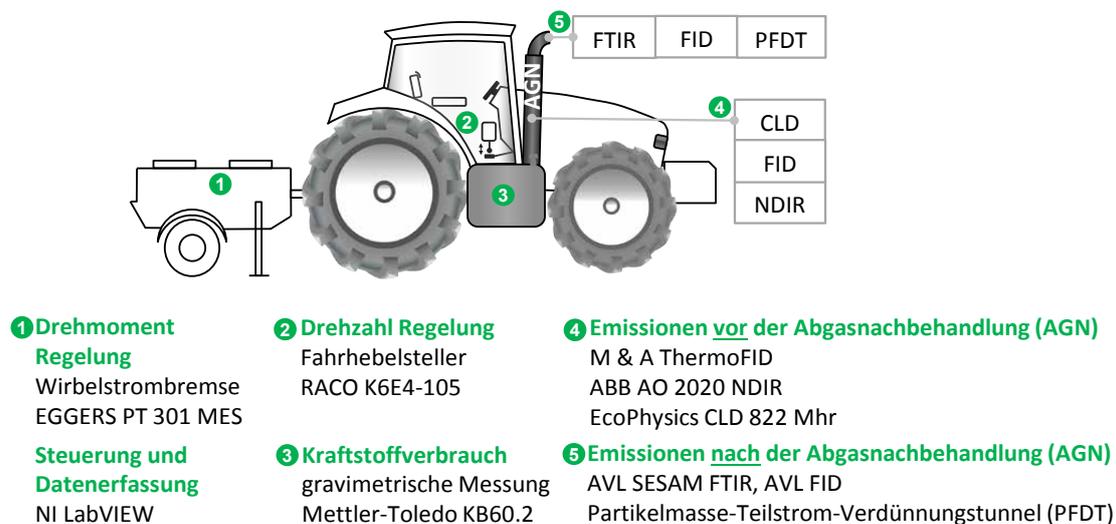


Abbildung 1: Wesentliche Steuer- und Messgrößen sowie Messgeräte am Traktorenprüfstand

Bei der luftgekühlten Wirbelstrombremse kam es bei steigender Betriebstemperatur zu einem sinkenden Drehmoment bei gleicher Erregerstromvorgabe. Zudem muss bei der Steuerung des Gaspedals berücksichtigt werden, dass bei manchen Traktoren wechselnde Drehzahlregelstrategien (z. B. abhängig von der Betriebstemperatur oder Laufzeit), lastabhängige Einflüsse auf die Drehzahl oder mechanische Ungenauigkeiten am Gaspedal (Hysterese) auftreten können. Diese Drehmoment- und Drehzahlabweichungen konnten in Vorversuchen erfasst und anschließend durch Einbeziehung in die Steuerung des Fahrhebelstellers und der Bremse weitestgehend korrigiert werden.

Ergebnisse und Diskussion

Anwendbarkeit der NRTC-Zyklen am TFZ-Traktorenprüfstand

In Abbildung 2 sind die Bewertungskriterien zur Validierung der Güte der Durchführung verschiedener NRTC-Varianten am Traktorenprüfstand dargestellt.

Dabei zeigt sich, dass die NRTC-Varianten am Traktorenprüfstand an mehreren Traktoren mit unterschiedlicher Abgasstufe durchlaufen werden können. Die Parameter der Regressionsgeraden $y = mx + b$ zwischen Mess- und Bezugswerten (x und y) für die äquivalente Motordrehzahl und das Motordrehmoment sowie die Leistung wird teils deutlich von der NRTC-Mittelung beeinflusst. Beim 10-s-NRTC konnte die beste Reproduzierbarkeit erreicht und die Validierungsstatistik gemäß 97/68/EG am besten erfüllt werden, entsprechend den Ergebnissen der Forschungsanstalt Agroscope (LANDIS 2012 und LANDIS 2014). Einzig beim Traktor II mit mechanischem Pumpe-Leitung-Düse-Einspritzsystem konnten im Kaltstart aufgrund des trägen Ansprechens der Drehzahlverstellung die Grenzwerte der Validierung für die Drehzahl nicht immer erfüllt werden. Bei aktuellen Traktoren hingegen mit Common-Rail-Einspritzung werden beim 10-s-NRTC im Soll-Ist-Vergleich Bestimmtheitsmaße (R^2) bis zu 99 % für Drehzahl, Drehmoment und Leistung erreicht. Die Messungen im 5-s-NRTC am Traktor IV bzw. im 3-s-NRTC am Traktoren IIIA weisen analog zum 10-s-NRTC eine gute Reproduzierbarkeit auf und erfüllen die Zyklusvorgaben. Beim Mittelungsintervall von 3 s nimmt

die Dynamik im Vergleich zum 10-s-NRTC stark zu, was geringfügig größere Abweichungen im Soll-Ist-Vergleich zur Folge hat. So wurde im Kaltstart eines 3-s-NRTC aufgrund von Abweichungen der Drehzahl des kalten Motors im ersten Zyklusdrittel das geforderte R^2 von 97% um 2 %-Punkte verfehlt, während im Warmstart mit $R^2 = 98%$ ein normkonformer Wert erreicht wurde. Im 1-s-NRTC, ohne Mittelung der NRTC-Vorgaben, wurden die Grenzen der Validierungsstatistik nur bei einzelnen Kriterien eingehalten.

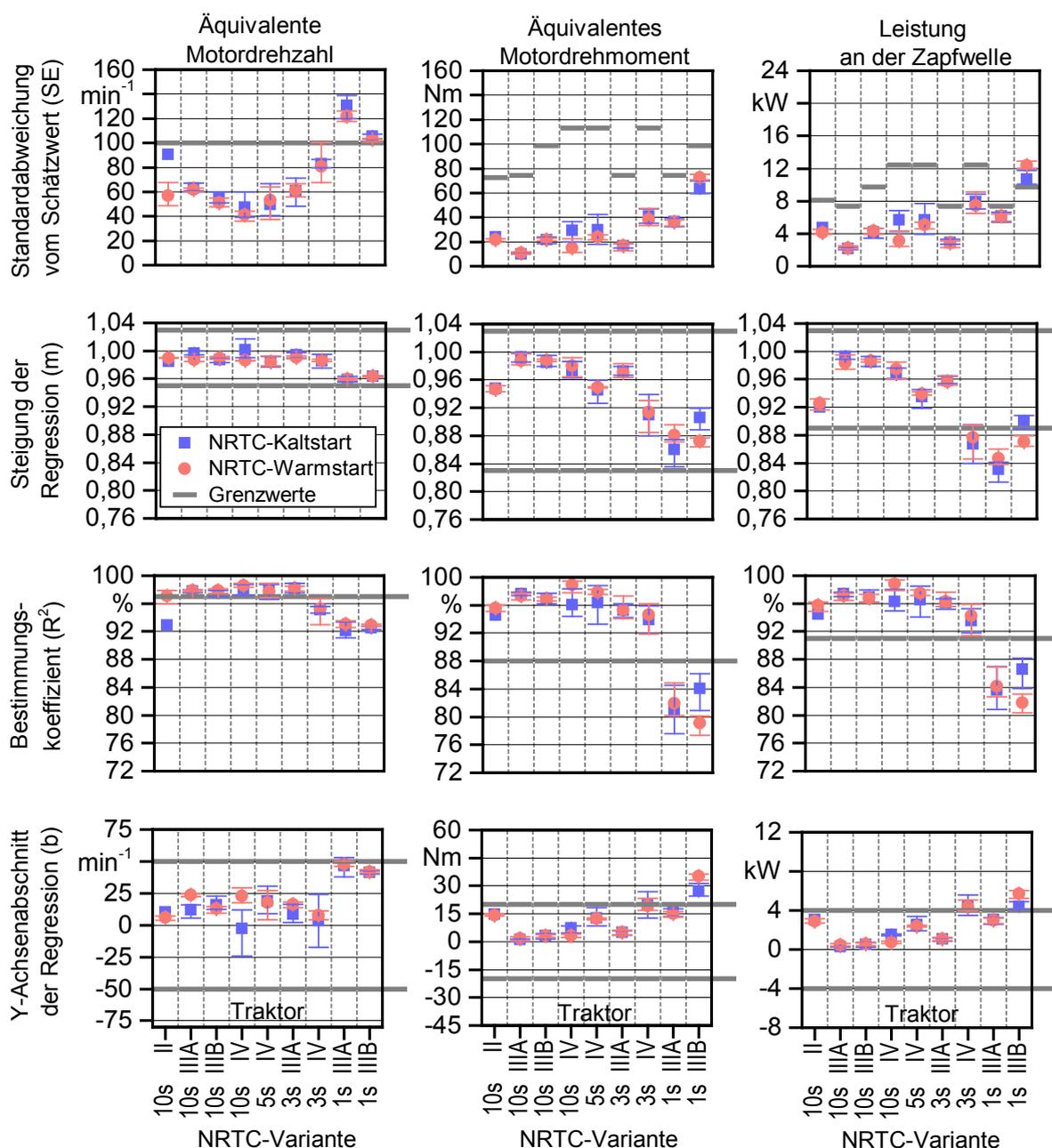


Abbildung 2: Mittelwert und Spannweite von Parameter der Regressionsgeraden aus Mess- und Bezugswerten von Drehzahl, Drehmoment und Leistung bei verschiedener NRTC-Varianten für den Kalt- und Warmstart mit je drei Wiederholungen (n = 1 beim Traktor II im Kaltstart des 10-s-NRTC)

Der Unterschied zwischen der gemessenen Zyklusarbeit W_{act} zur theoretischen Bezugszyklusarbeit W_{ref} ist ein weiteres Kriterium für die Güte der Messung und war bei allen Testläufen innerhalb des zulässigen Bereichs von -15% bis +5% (nicht abgebildet). Bei 80% der durchgeführten Kalt- und Warmstarttests lag W_{act} innerhalb von $\pm 1\%$ von W_{ref} . Steigende Drehzahl- und Drehmomentabweichungen bei zunehmender Dynamik beeinflussten die mittlere Zyklusarbeit kaum.

Abbildung 3 zeigt den Soll-Ist-Vergleich von Drehzahl und Drehmoment des 10-s-NRTC, 3-s-NRTC und 1-s-NRTC am Traktorenprüfstand mit dem Traktor IIIA über die Messdauer.

Die Höhe der Abweichungen von Drehzahl und Drehmoment im Soll-Ist-Vergleich hängt vom Zyklusabschnitt ab. Mit der Verkürzung des Mittelungsintervalls steigen die Abweichungen vor allem zwischen 150 und 600 s Messzeit an. Dieser Zyklusabschnitt basiert auf Radlader- sowie Planieraupenarbeiten. Der Traktormotor kann im eingebauten Zustand dem vorgegebenen Drehzahl- und Drehmomentverlauf überwiegend nur im 3-s-NRTC und 10-s-NRTC folgen. Im 1-s-NRTC ist die Regelung des Traktors wegen der sehr hohen Dynamik in Teilabschnitten am Limit. Ab ca. 600 s ist die Drehzahl im Mittel höher und ändert sich weniger stark. So ist in Teilbereichen des 1-s-NRTC die Erfüllung der Validierungsstatistik auch ohne Mittelung der NRTC-Vorgaben möglich. Dies betrifft insbesondere den Zyklusabschnitt zwischen 628 und 777 s, welcher speziell das Betriebsprofil von Traktormotoren im NRTC repräsentiert.

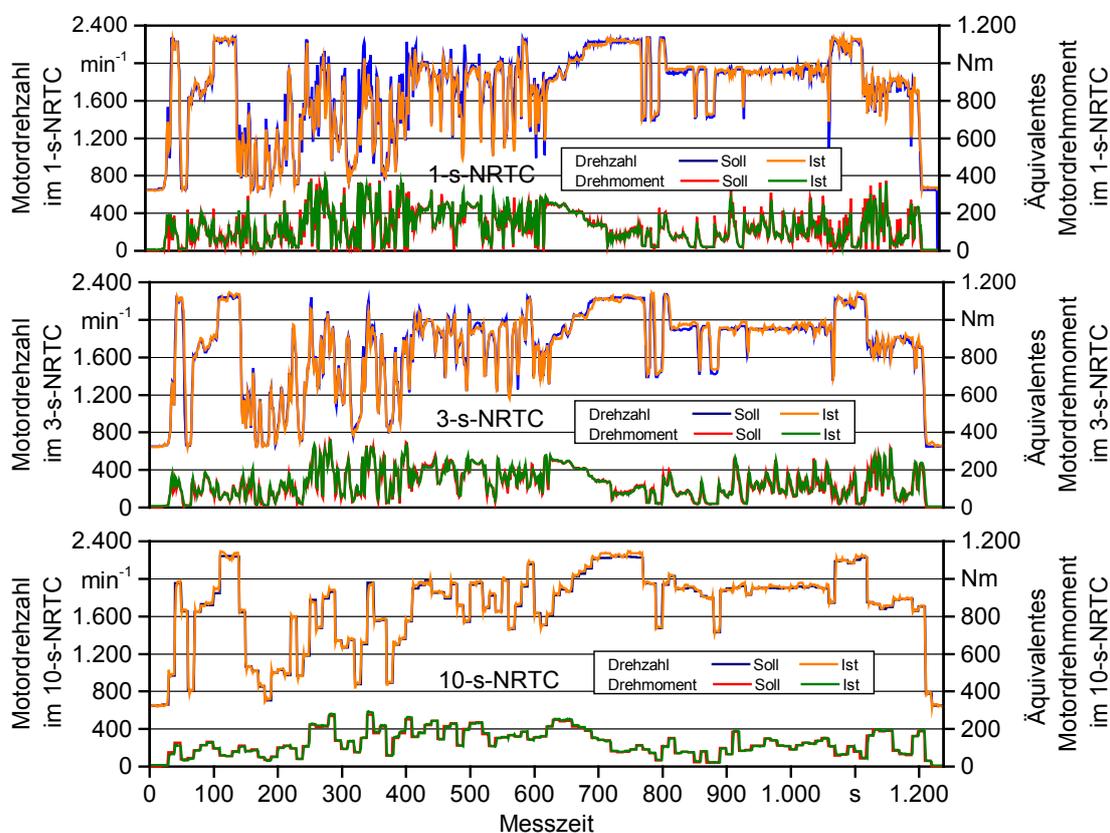


Abbildung 3: Soll- und Ist-Werte von Drehzahl und Drehmoment der NRTC-Varianten des Traktors IIIA

Emissionen und Kraftstoffverbrauch im 3-s-NRTC, 5-s-NRTC und 10-s-NRTC

Abbildung 4 zeigt die Auswirkungen der Varianten der Mittelwertbildung der NRTC-Vorgaben auf die Abgasemissionen und den spezifischen Kraftstoffverbrauch b_e des Traktors IV bezogen auf den stationären NRSC mit Rapsölkraftstoff. Obwohl für die beiden Zyklen NRSC und NRTC die gleichen Grenzwerte gelten, liegen die Abgasemissionen bei den NRTC-Varianten je nach Komponente teilweise über dem NRSC (> 1) und teilweise darunter (< 1).

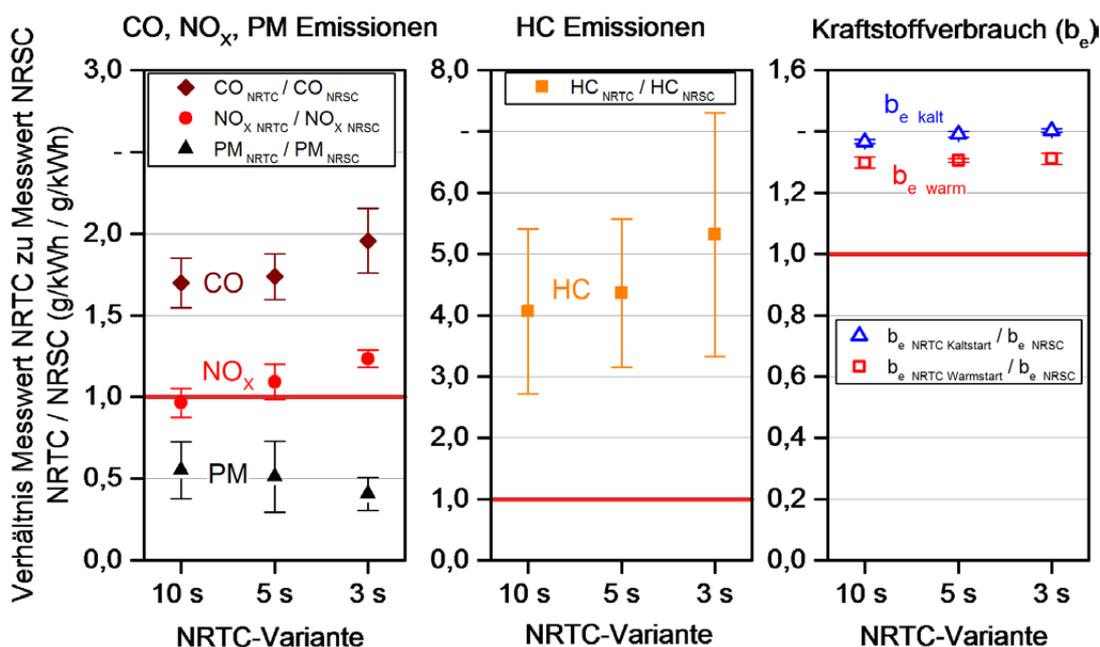


Abbildung 4: Mittelwert und Standardabweichung der relativen Emissions- und Verbrauchswerte verschiedener NRTC-Varianten (je $n = 3$) bezogen auf die NRSC-Ergebnisse ($n = 3$) des Traktors IV

Die Ergebnisse des 10-s-NRTC, der am Traktorenprüfstand des TFZ mit Rapsölkraftstoff durchgeführt wurde, bestätigen die Untersuchungen von LANDIS 2014. Höhere spezifische Verbräuche im Vergleich zum NRSC waren insbesondere beim Kaltstart aufgrund höherer Schmierölviskosität sowie der geringeren verrichteten Arbeit des NRTC bei konstanter Leistungsaufnahme von Nebenaggregaten festzustellen. Auch niedrigere CO-Emissionen im stationären NRSC stimmen mit den Beobachtungen von LANDIS 2014 grundsätzlich überein. Eine zunehmende Erhöhung der Dynamik hat keinen signifikanten Einfluss auf die PM-, HC- und CO-Emissionen, wenn sich auch tendenziell ein Anstieg der CO- und HC-Emissionen sowie ein Rückgang der Partikelemissionen abzeichnen. Größere Schwankungen der relativen Emissionen sind auf das geringe absolute Emissionsniveau im NRSC von 0,05 g/kWh CO, kleiner 0,001 g/kWh HC und 0,003 g/kWh PM zurückzuführen. Diese Abgaskomponenten bewegen sich somit um ein Vielfaches unterhalb der gesetzlichen Grenzwerte. Im Kaltstart des 3-s-NRTC und 5-s-NRTC sind geringfügig höhere spezifische Kraftstoffverbräuche als beim 10-s-NRTC ersichtlich. Im Warmstart wird hingegen bei ansteigender Dynamik etwa die gleiche Kraftstoffmenge verbraucht.

Bei den NO_x -Emissionen konnte im 3-s-NRTC ein signifikanter Anstieg um ca. 20% im Vergleich zum NRSC sowie zum 10-s-NRTC beobachtet werden. Abbildung 5 zeigt für Traktor IV die unterschiedlichen NO_x -Emissionen vor und nach der Abgasnachbehandlung (Abgasrückführung und SCR-Katalysator) im 3-s-NRTC und 10-s-NRTC über die Messdauer.

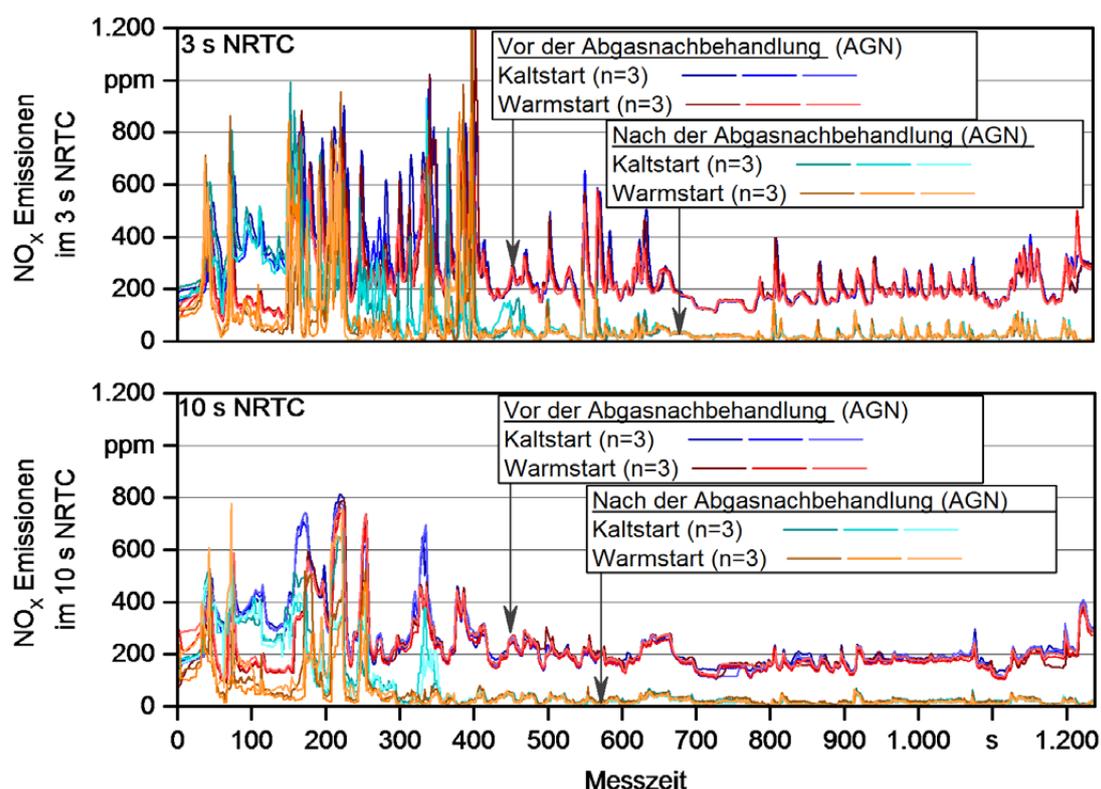


Abbildung 5: Stickoxidemissionen (NO_x) vor und nach der Abgasnachbehandlung im Kalt- und Warmstart (mit je drei Wiederholungen) im 3-s-NRTC und 10-s-NRTC für Traktor IV

Im ersten Drittel beider Zyklen sind höhere NO_x -Emissionen zu verzeichnen. Dabei erhöhen zu Zyklusbeginn geringere Abgasrückführaten (AGR-Raten) vor der Abgasnachbehandlung (AGN) und geringe Betriebstemperaturen des SCR-Katalysators nach der AGN die NO_x -Emissionen. Nach ca. 400 s Messdauer sind kaum noch Unterschiede zwischen Kalt- und Warmstartemissionen zu erkennen.

Beim Vergleich der NO_x -Emissionen zwischen dem 3-s-NRTC und dem 10-s-NRTC zeigen sich verstärkt in transienten Abschnitten des 3-s-NRTC höhere NO_x -Rohemissionen. Die dabei erhöhte Drehzahl- und Drehmomentdynamik beeinflusst die Regelung emissionsrelevanter Motorkomponenten. Bei einer verzögerten Regelung des Turboladers sowie des AGR-Ventils kann eine schlechte Durchmischung von Kraftstoff und Luft im Brennraum mit partiellem Sauerstoffüberschuss die Folge sein, was die NO_x -Bildung begünstigt. Daneben reduziert das aktive SCR-System bei Betriebstemperatur die NO_x -Rohemission zuverlässig, jedoch erhöhen rasche Anstiege der Rohemissionen auch die Emissionen nach der AGN. Trotz vieler Einflussfaktoren war das Emissionsverhalten der Traktoren in den NRTC-Messungen am Traktorenprüfstand gut reproduzierbar.

Schlussfolgerungen

Auf dem NRTC (nonroad transient cycle) basierte Testzyklen ermöglichen Abgasemissionsmessungen am Traktorenprüfstand mit transientscher Motordrehzahl -drehmomentverlauf in Anlehnung an die Richtlinie 97/68/EG. Die wiederkehrende Erhebung des dynamischen Emissions- und Betriebsverhaltens von Traktoren unter Einbeziehung des Kaltstarts ist z. B. bei Langzeit-Feldtests und für Folgeabschätzungen von Interesse. Der aufwendige Aus- und Wiedereinbau des Motors für transiente Messungen am Motorprüfstand lässt sich dabei vermeiden.

Die Emissionsgrenzwerte nach 97/68/EG beziehen sich auf die Kurbelwellenarbeit (in kWh) und sind deshalb nicht direkt mit den Emissionswerten bezogen auf die Arbeit an der Zapfwelle vergleichbar. Durch die Leistungsabnahme an der Zapfwelle werden am Traktorenprüfstand zusätzliche Nebenaggregate und Getriebekomponenten inkl. auftretender Verluste geprüft, welche auch im realen Betrieb eingesetzt werden. Die Zyklusarbeit an der Zapfwelle ist dadurch niedriger als an der Kurbelwelle und entspricht dem realen Traktorbetrieb besser. Allerdings erhöhen diese zusätzlichen Bauteile die Trägheitsmomente und reduzieren die Dynamik bei Drehzahl- und Drehmomentsprüfungen. Für wiederholbare Messungen am Traktorenprüfstand ist daher eine Mittelung der originalen NRTC-Drehzahl- und -Drehmomentbezugswerte erforderlich. Die Eignung der vom NRTC abgeleiteten Varianten mit Mittelungsintervallen von 10 s, 5 s, 3 s und ohne Mittelung (1 s) kann in Abhängigkeit von der Zielstellung der Messaufgabe variieren.

Der 10-s-NRTC von LANDIS 2012 lässt sich an unterschiedlichen Traktorenprüfständen sehr gut anwenden und ist an mehreren Traktorenmodellen erprobt. Die Drehzahl-, Drehmoment- und Leistungsvorgaben sind am Traktorenprüfstand unter Einhaltung der Zyklusvalidierung durchführbar. Durch geringe Abweichungen im Soll-Ist-Vergleich mit reproduzierbarer Motorbelastung eignet sich der 10-s-NRTC besonders bei Vergleichsmessungen unterschiedlicher Traktorentypen. Kürzere Mittelungsintervalle als 10 s sind für ältere Traktoren, durch das trägere Ansprechen des Motors, weniger gut geeignet.

Die Tests anhand des 5-s-NRTC und 3-s-NRTC verdeutlichen, dass eine kürzere Mittelung der NRTC-Vorgaben bei modernen Traktoren ohne wesentlich höhere Drehzahl- und Drehmomentabweichungen möglich ist. Gerade bei Traktoren mit Common-Rail-Einspritzsystem stellt der 3-s-NRTC mit einer höheren Dynamik eine Alternative zum 10-s-NRTC dar, wenngleich sich die Ergebnisse durch Untersuchungen an weiteren Traktoren bestätigen müssen.

Der Annäherung an den originalen NRTC (1-s-NRTC) sind am Traktorenprüfstand jedoch Grenzen gesetzt. Die Dynamik des 1-s-NRTC kann über weite Strecken des Zyklus mit deutlich höheren Drehzahl- und Drehmomentabweichungen abgebildet werden. Die Anwendung des 1-s-NRTC ohne Mittelung bedingt zwar höhere Abweichungen im Soll-Ist-Vergleich, lässt jedoch als Worst-Case-Test bessere Aussagen über das Emissionsverhalten in sehr dynamischem Motorbetrieb zu. Da einige Teilabschnitte selbst im 1-s-NRTC auch ohne Mittelung am Traktorenprüfstand durchführbar sind, könnte das Mittelungsintervall auch in Abhängigkeit des Zyklusabschnitts bemessen werden.

Das Emissionsverhalten im 10-s-NRTC, 5-s-NRTC und 3-s-NRTC unterscheidet sich beim untersuchten Traktor teils deutlich vom NRSC. Beim Vergleich der NRTC-Varianten untereinander steigen mit zunehmender Dynamik im 3-s-NRTC im Vergleich zum 10-s-NRTC nur der Kraftstoffverbrauch im Kaltstart und die NO_x-Emissionen signifikant an. Die Unterschiede innerhalb der NRTC-Varianten sind für die meisten Emissionskomponenten sowie dem Verbrauch geringer als die Differenz im Vergleich

zum NRSC. Daher bietet hier bereits der 10-s-NRTC trotz der vergleichsweise geringen Dynamik eine Abschätzung des Emissionsverhaltens im dynamischen Betrieb und im Vergleich zum NRSC.

Zukünftig sollen weitere Traktoren auch hinsichtlich nichtlimitierter Abgaskomponenten (z. B. Partikelanzahl) untersucht werden. Ferner ist von Interesse, wie sich reale Drehzahl- und Drehmomentverläufe von Traktorarbeiten gegenüber NRSC- und NRTC-Varianten auf die Emissionen und den Verbrauch auswirken.

Literatur

- Bane, B. R. (2002): A Comparison of Steady State and Transient Emissions from a Heavy-Duty Diesel Engine. A Thesis, submitted to THE College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Morgantown, WV, USA: West Virginia University
- Blassnegger, J.; Knauer, M.; Carrara, M.; Niessner, R.; Urbanek, M.; Geringer, B.; Schramm, K.-W.; Kunze, J. (2009): Untersuchung: Emissionen bei der motorischen Verbrennung von Biokraftstoffen und Kraftstoffmischungen. Endbericht zum Projekt BioE, erstellt im Auftrag der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Graz, Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
- Bonnel, P.; Perujo, A.; Provenza, A.; Villafuerte, M. (2013): Non Road Engines Conformity Testing Based on PEMS. Lessons Learned from the European Pilot Program. Ed.: European Commission (EC), Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (IET), JRC Scientific and Policy Reports, DOI: <http://dx.doi.org/10.2789/18679>
- Emberger, P.; Landis, M.; Krammer, K.; Prankl, H.; Schaufler, H.; Schiess I.; Thuneke, K. (2011): Measurement of emissions of a tractor – round robin test of ART, FJ-BLT and TFZ. *Landtechnik* 66(1), pp. 56–59, DOI: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2011.353>
- Emberger, P.; Thuneke, K.; Remmele, E. (2013): Pflanzenölaugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA. Prüfstandsuntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Berichte aus dem TFZ, Nr. 32, Straubing, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
- Emberger, P. (2013): Zünd-, Verbrennungs- und Emissionsverhalten verschiedener Pflanzenöle. Dissertation. Halle-Wittenberg, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Zentrum für Ingenieurwissenschaften
- Franco, V.; Posada Sánchez, F.; German, J.; Mock, P. (2014): Real-world exhaust emissions from modern Diesel cars. A meta-analysis of PEMS emissions data from EU (Euro 6) and US (Tier 2 Bin 5/ULEV II) Diesel passenger cars. Part 1: Aggregated results. Ed.: International Council on Clean Transportation Europe (ICCT), Beijing, Berlin, Brussels, San Francisco, Washington, D. C., ICCT White Paper
- Gietzelt, C.; Degrell, O.; Mathies, K. (2012): In-use-Emissionsmessungen an Motoren von mobilen Maschinen. *Landtechnik* 67(5), S. 366–369, DOI: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2012.338>
- Helms, H.; Heidt, C. (2014): Erarbeitung eines Konzeptes zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand. Hrsg.: Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau, Texte 24/2014
- Landis, M. (2012): Dynamischer Messzyklus für Emissionsmessungen an Traktoren. In: *LAND.Technik* 2012, 70. Internationale Tagung, VDI-Fachbereich Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik, 6.–7. November 2012, Karlsruhe, VDI-Bericht 2173, Düsseldorf, VDI-Verlag, S. 81–86
- Landis, M. (2014): Results of long-time tractor emission and fuel measurements. In: Engineering for improving resource efficiency. Agroscope, ETH Zürich, European Association of Agricultural Engineers (EurAgEng) (Eds.), Proceedings, AgEng 2014 – International Conference of Agricultural Engineering, 6–10 July 2014, ETH Zurich
- Lindgren, M. (2004): Engine exhaust gas emissions from non-road mobile machinery. Effects of transient load conditions. Doctoral thesis, Uppsala, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Biometry and Engineering
- Ullman, T. L.; Webb, C. C.; Jackson, C. C.; Doorlag, M. H. (1999): SAE Technical Paper 1999-01-2800 Nonroad Engine Activity Analysis and Transient Cycle Generation. Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition, Session New Diesel Engines & Components, September 1999, Indianapolis IN USA, Ed.: SAE International, Warrendale, PA, USA, pp. 35–45

- Starr, M. E.; Buckingham, J. P.; Jackson, C. C. (1999): Development of transient test cycles for selected nonroad diesel engines. In: Bell, S. R. (Ed.): Modeling and simulation of engine processes and engine emissions. Proceedings of the 1999 Spring Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division. Volume 1. Spring Technical Conference. Columbus, Indiana, USA, April 24-28. ICE-Volume 32-1. New York, NY, USA: The American Society of Mechanical Engineers (ASME), pp. 145–156
- Thuneke, K.; Emberger, P. (2007): Exhaust Gas Emission Characteristics of Rapeseed Oil fuelled Tractors. Landtechnik 62(4), pp. 208–209, DOI: <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2007.981>
- United States Environmental Protection Agency (2003): Draft Regulatory Impact Analysis. Control of Emissions from Nonroad Diesel Engines. Environmental Protection Agency Report, Nr. EPA420-R-03-008
- United States Environmental Protection Agency (2010): Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling – Compression-Ignition. NR-009d, July 2010, United States, Environmental Protection Agency (EPA) (Ed.), Washington, D. C. Report, Nr. EPA-420-R-10-018 NR-009d

Autoren

Dipl.-Ing. Johannes Ettl M. Sc. und **Dr.-Ing. Peter Emberger** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, **Dr. Klaus Thuneke** ist stellvertretender Leiter, **Dr. Edgar Remmele** ist Leiter des Sachgebiets Biogene Kraft-, Schmier- und Verfahrensstoffe, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Schulgasse 18, 94315 Straubing, E-Mail: johannes.ettl@tfz.bayern.de

Prof. Dr. agr. habil. Heinz Bernhardt ist Ordinarius des Lehrstuhls für Agrarsystemtechnik der TUM München, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik der Technische Universität München (TUM), Am Staudengarten 2, 85354 Freising-Weihenstephan

Danksagung

Die Autoren danken dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie für die Finanzierung des Vorhabens.