

Optimierung des En-O-Trak-Systems

Jörg Plöber¹, Oleksiy Antoshkiv¹, Heinz Peter Berg¹, Wolfgang Schluchter²

¹ Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe

² Lehrstuhl Sozialwissenschaftliche Umweltfragen

Kurzfassung

Das En-O-Trak-System wurde entwickelt, um den Traktor während der landwirtschaftlich unbenutzten Zeit für Strom- und Wärmeenergieproduktion einzusetzen. Eine gute Effizienz der Anlage wird dank der paralleler Produktion von Strom- und Wärme erreicht. Die Optimierung des En-O-Trak-Systems wurde mit Hilfe von der Simulationssoftware AVL BOOST durchgeführt wonach eine Validierung erfolgte. Der Beitrag präsentiert die Ergebnisse einer BOOST-Simulation sowie experimenteller Messungen.

Abstract

The En-O-Trak-System is developed for the use of tractors during the agriculturally unused time for the production of electrical- and heat energy. Due to the parallel production of electricity and heat energy a good efficiency of the system will be reached. An optimization of the En-O-Trak-System was done with the help of simulation tool AVL BOOST and finely a validation was carried out. This report represents results of BOOST-simulations and experimental measurements.

Einleitung

Eine Energiepolitik, die auf Umweltentlastung und Klimaschutz ausgerichtet ist, benötigt neue Ansätze für die Strom- und Wärmeerzeugung. Die Entwicklung zukunftsweisender Energieerzeugungskonzepte ist umso wichtiger, je mehr sich die gegenwärtig eingesetzten Energieträger erschöpfen. Die neuen Konzepte müssen zwei wesentliche Kernpunkte berücksichtigen. Einerseits müssen nicht-erneuerbare Energien durch erneuerbare ersetzt werden, andererseits muss die Ausnutzung der zur Zeit eingesetzten Energieträger optimiert werden. Die zweite Forderung beinhaltet unter anderem die konsequente Anwendung der Kraft-Wärme-Koppelung zur Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme. Dieser Verbund ermöglicht eine Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Kraftwerksanlagen und deren Wirkungsgrad bei Ausnutzung der eingesetzten Energieträger. Weiterhin wird durch die Verwendung erneuerbarer Energien der Einsatz der fossilen Primärenergieträger verringert, was zu einer Senkung der Umweltbelastung, insbesondere durch CO₂-Emissionen führt. Eine Veränderung der Energiepolitik führt aus volkswirtschaftlicher Sicht unmittelbar zu einer Kostensenkung bei der Energieerzeugung, da bei-

spielsweise kostenintensive Beräumungen, Entsorgungen oder Rekulтивierungen nicht mehr erfolgen müssen. Auch durch eine Dezentralisierung der Energieerzeugung lässt sich eine Senkung der Umweltbelastungen erreichen, weil die Transportwege für Strom und Wärme verringert werden und eine Verbesserung der Anpassung an die räumlich nahen Bedarfe möglich ist. Dies gilt besonders für KWK-Anlagen der kleinen bis mittleren Leistungsklasse. Für diese dezentralen Einsatzfälle wurden Blockheizkraftwerke konzipiert. Neben der Erhöhung der Energieeffizienz entsteht ein weiterer Effekt: es lassen sich regionale Wirtschaftskreisläufe neu entwickeln, in denen die regionale Wertschöpfung auch tatsächlich „vor Ort“ bleibt. Durch die Maßnahmen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Blockheizkraftwerke lässt sich eine Erhöhung der Attraktivität für den Betrieb von BHKW-Anlagen erreichen.

1 Das En-O-Trak-System als BHKW

Die Grundidee der KWK-Anlagen liegt in der Kopplung der Stromerzeugung mit der Wärmenutzung. Die bei der Verbrennung freiwerdende Wärme wird für die Bereitstellung von Heizwasser, Prozessdampf oder Trocknungswärme genutzt. Durch die kompakte Bauweise dezentraler Anlagen wurde für diesen Typ der Kraft-Wärme-Kopplung der Begriff „Blockheizkraftwerk“ geprägt.

Das Konzept dezentraler Energieerzeugungsanlagen wird durch das En-O-Trak-System umgesetzt. Grundidee ist der Einsatz von Landwirtschaftsmaschinen mit Verbrennungsmotoren zur Strom- und Wärmeerzeugung. Charakteristisch bei dem En-O-Trak-System ist die alternierende Einsatzmöglichkeit. Im Sommer wird die Landmaschine eher im Agrarbereich eingesetzt, im Winter mehr im Energiebereich. Damit wird die Einsatzzeit der Landwirtschaftsmaschine erheblich gesteigert, was die Amortisation des aufgewendeten Kapitals deutlich verbessert. Im aktuellen Entwicklungsstand kommt als BHKW-Aggregat ein Traktor zum Einsatz. In Abb. 1 ist das Prinzip des En-O-Trak-Systems dargestellt. Betrieben wird der Traktor beim Einsatz als BHKW mit Rapsöl. Alternativ existiert auch ein System für die Biogasverwendung.

Drucksituation im System-Container zu untersuchen. Herrscht im Container gegenüber der Umgebung ein erheblicher Druckunterschied, sollte überlegt werden, ob die Lufteinlassschächte des Containers vergrößert werden können. Möglicherweise ist der Einbau eines zusätzlichen Luftansaugschachtes von Vorteil. Von diesem wird die Frischluft durch eine Leitung direkt zum Luftfilter des Traktors geführt. Eine andere Variante würde den Ausbau des Standardluftfilters am Traktor erfordern. Durch die Installation eines Filters mit geringeren Druckverlusten, könnte die Effektivität der Luftzuführung verbessert werden.

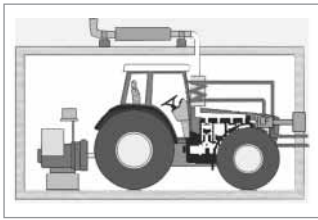


Abbildung 4:
Optimierte Luftansaugöffnung

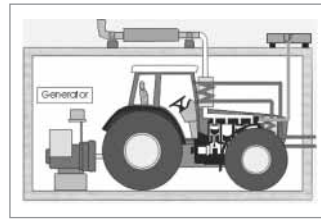


Abbildung 5:
Spezialdachluftfilter

Das gleiche Ergebnis würde sich bei der Verwendung eines Filters mit deutlich vergrößertem Filtervolumen einstellen. Die Abb. 4 und Abb. 5 zeigen das jeweilige Grundprinzip der erläuterten Varianten.

Die Wirksamkeit der beschriebenen Maßnahmen konnte in der Simulationsrechnung mit BOOST nachgewiesen werden. Das dazu verwendete Simulationsschema ist in Abb. 6 zu sehen. Die Tab. 2 zeigt die Verbesserung der Leistungscharakteristik des Motors bei Verwendung eines Filters mit doppelter Größe und entsprechend verringertem Druckverlust.

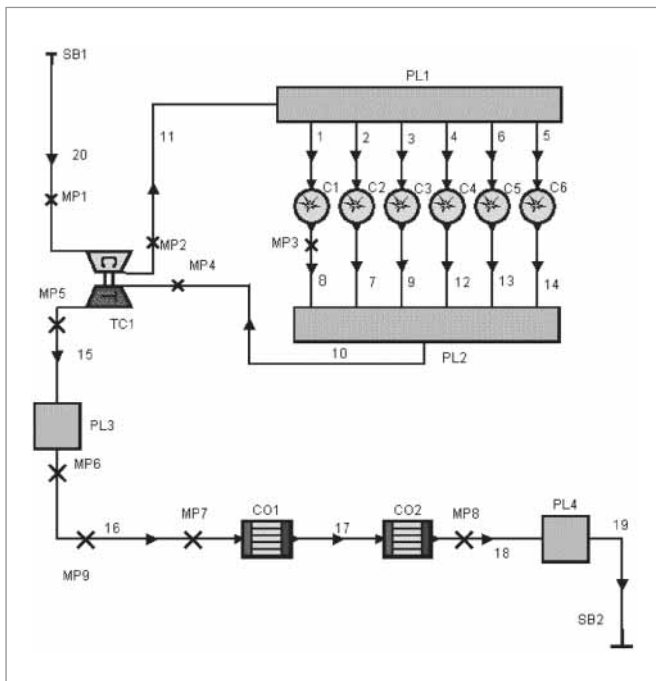


Abbildung 6:
Simulationsmodell ohne Luftfilter

Tabelle 2:

Ausgewählte Motorparameter bei Veränderung der Luftzuführung am Anlagen-nennpunkt (Simulation)

Konfiguration	B	P _{mech}	T _{AG,MP6}	b _e
	kg/h	kW	°C	g/kWh
Standard LF	21,366	82,86	493,7	257,868
Vergrößerter LF	21,366	83,11	487,3	257,09
Ohne LF	21,366	83,33	481,5	256,41

Da auf einen Luftfilter grundsätzlich nicht verzichtet werden kann, beinhaltet die Konfiguration ohne Luftfilter einen Filter, der quasi keinen Strömungswiderstand aufweist.

2.3 Verringerung der Wärmeverluste am Schalldämpfer

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Verringerung der Wärmeverluste im Abgassystem ist der Schalldämpfer des Traktormotors. Durch seine große metallische Oberfläche entsteht ein deutlicher Temperaturabfall im Abgas. Aus der Simulation mit AVL BOOST hat sich ergeben, dass beim Betrieb des Systems am Anlagen-nennpunkt über den Schalldämpfer der Temperaturverlust $\Delta T_{AG} = 10\text{-}15\text{ °C}$ beträgt. Dies entspricht einem maximalen Wärmeverlust von $P_{Q,v} = 3,12\text{ kW}$. Der Temperaturabfall ist dabei auch von der Temperatur der Umgebung abhängig. Um den Temperaturverlust zu verringern, können zwei Strategien verfolgt werden. Die erste Variante beinhaltet eine Ummantelung des Schalldämpfers mit einem entsprechenden Isolationswerkstoff. Die zweite Optimierungsmöglichkeit zur Verringerung der Temperaturverluste liegt in einem Ausbau des Schalldämpfers.

Tabelle 3:

Simulation Abgastemperatur bei $P_{Gen} = 70\text{ kW}$, $n_m = 1995\text{ min}^{-1}$

	T _{AG,MP6} (mit SD)	T _{AG,MP6} (ohne SD)	ΔT_{AG}	P _{Q,v}
	°C	°C	°C	kW
T _L = 5 °C	456,9	470,8	13,9	2,9
T _L = 20 °C	474,5	488,8	14,3	2,98
T _L = 37 °C	493,7	508,7	15,0	3,13



Abbildung 7:
Schalldämpfer Traktor



Abbildung 8:
Ersatzrohr für Schalldämpfer

In der Simulation hat sich gezeigt, dass die neue Verbindungsleitung (Abb. 8) nur einen Temperaturverlust von $\Delta T_{AG} = 2\text{ °C}$ aufweist. Die Abb. 9 zeigt die Abhängigkeit der Abgastemperatur am Messpunkt 6 von der Generatorleistung bei konstanter Ansauglufttemperatur.

Das Potential zur Kraftstoffeinsparung und Leistungssteigerung durch den Ausbau des Schalldämpfers ist am En-O-Trak-System sehr gering gegenüber den Resultaten bei Kraftfahrzeugen im Straßenbetrieb. Die Ursache liegt im weiterhin vorhandenen Abgasgedrückt durch die lange Abgasanlage des En-O-Trak-Systems, wie zum Beispiel durch den Rohrbündelwärmetauscher und dem Abgasschalldämpfer.

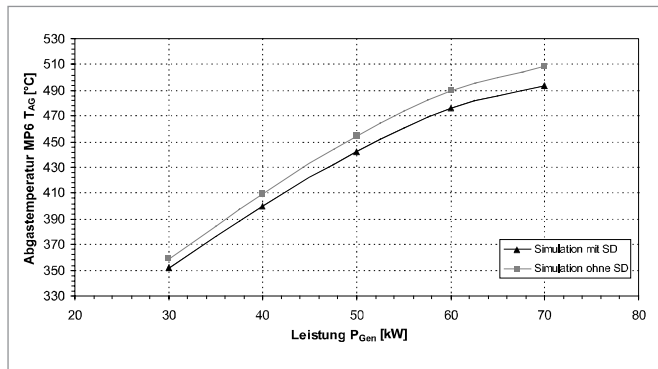


Abbildung 9:
Simulation der Abgastemperaturen an Messstelle 6, $T_L=37^\circ\text{C}$

2.4 Außerbetriebnahme des Abgasturboladers

Eine hypothetische Maßnahme zur Erhöhung einiger thermodynamischer Eigenschaften des En-O-Trak-Systems wäre der Ausbau des Abgasturboladers. Unter der Berücksichtigung des Verlustes an Motorleistung, würde dies zu den folgenden Effekten führen. Der Motor wird durch das Fehlen der Aufladung mit geringerer Frischladung versorgt. Damit reduziert sich die erreichbare effektive Motorleistung. Der Leistungsverlust kann jedoch zu einem kleinen Teil ausgeglichen werden, da die Temperaturerhöhung aufgrund der Verdichtungsarbeit des Turboladers entfällt. Der Temperaturerhöhung durch den Turbolader beträgt zirka 70°C .

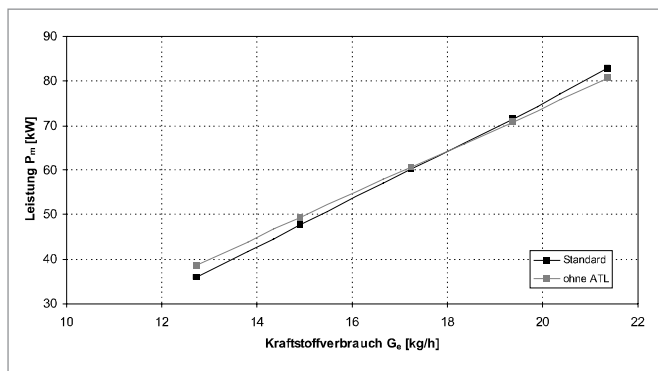


Abbildung 10:
Motorleistung mit/ohne Turbolader bei $T_L=37^\circ\text{C}$

Als Resultat dieser Umbaumaßnahme stellt sich eine höhere Abgastemperatur ein. Um jedoch in dieser Motorkonfiguration die Anlagenennleistung und damit die Motorleistung von $P_{Mot}=83\text{ kW}$ zu erreichen, ist eine um 3 Prozent größere Kraftstoffmasse notwendig. Einzusetzen wäre diese Anlagenvariante nur bei einem höheren Bedarf

an Wärmegegewinnung und beim Betrieb der Anlage mit einem möglichst preiswerten Kraftstoff, um den höheren Verbrauch auszugleichen. Die Außerbetriebnahme des Abgasturboladers beinhaltet aber auch einen hohen Montageaufwand. So muss die Luftzuführung zum Motor sowie die Führung des Abgases komplett verändert werden. Damit ergeben sich Umbauzeiten, die einen schnellen Systemwechsel des Traktors von der Feldarbeit zum Einsatz im En-O-Trak-System unmöglich machen. Daher ist diese Variante nur bei längeren Verweilzeiten des Traktors zur Strom- und Wärmeerzeugung sinnvoll. Der notwendige Umbau des Motors erfordert entsprechende technische Kenntnisse und bedeutet einen beträchtlichen Eingriff in das Antriebsaggregat des Traktors. Damit ist die Anwendung dieser Optimierungsvariante für den praktischen Einsatz nicht realisierbar.

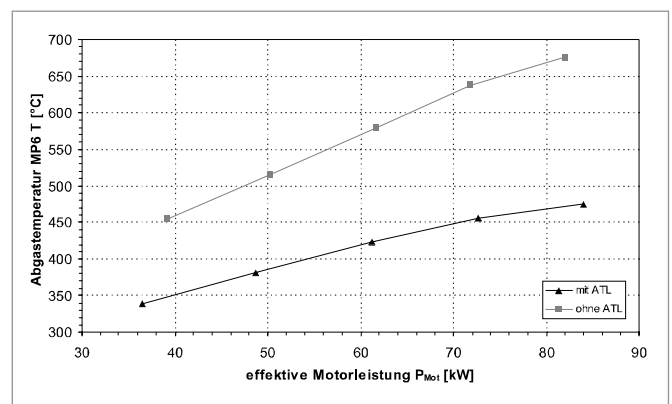


Abbildung 11:
Abgastemperatur mit/ohne ATL bei $T_L=37^\circ\text{C}$

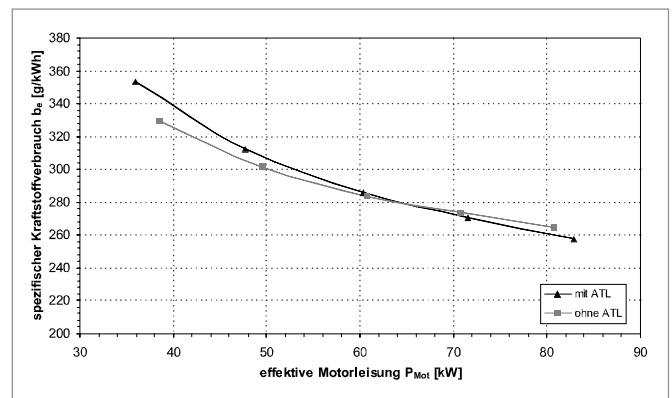


Abbildung 12:
Spezifischer Kraftstoffverbrauch mit/ohne ATL bei $T_L=37^\circ\text{C}$

3 Validierung der Optimierungsmöglichkeiten

Als nächstes sollen die Auswirkungen der erläuterten Optimierungsmaßnahmen auf den Wirkungsgrad der BHKW-Anlage untersucht werden. Als charakteristische Parameter für die Genauigkeit des Simulationsmodells sollen in diesem Fall die Abgastemperaturen sowie der Kraftstoffverbrauch gegenübergestellt werden. Dazu ist in Abb. 13 die Abgastemperatur am Messpunkt 6 für die unterschiedlichen Konfigurationen dargestellt.

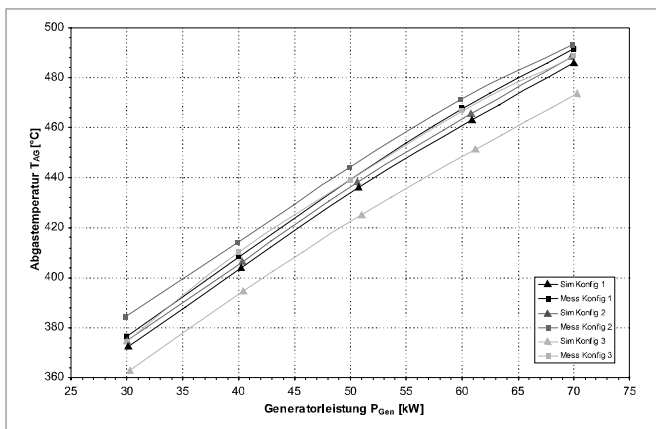


Abbildung 13:
Vergleich Simulation/Messung der Abgastemperaturen an MP6 für verschiedene Anlagenkonfigurationen

In den Konfigurationen 1 und 2 liegt die Abweichung zwischen den Simulationsergebnissen und den Messdaten für den Parameter Abgastemperatur an Messpunkt 6 zwischen 1 und 2,5 Prozent. Für die Konfiguration ohne Luftfilter ergibt sich ein Unterschied zwischen der gemessenen und simulierten Abgastemperatur von 3 bis 4 Prozent. Bei allen drei Varianten zeigt sich, dass die gemessenen Temperaturen höher liegen als die Simulationsergebnisse. Mit der Ergebnistoleranz von 1 bis 4 Prozent kann das Simulationsmodell bezüglich der Abgastemperaturen als hinreichend genau betrachtet werden.

Die Abb. 14 zeigt als weiteres Vergleichsmerkmal den Unterschied zwischen dem gemessenen Kraftstoffverbrauch und dem in der Simulation zugrunde gelegten Kraftstoffbedarf.

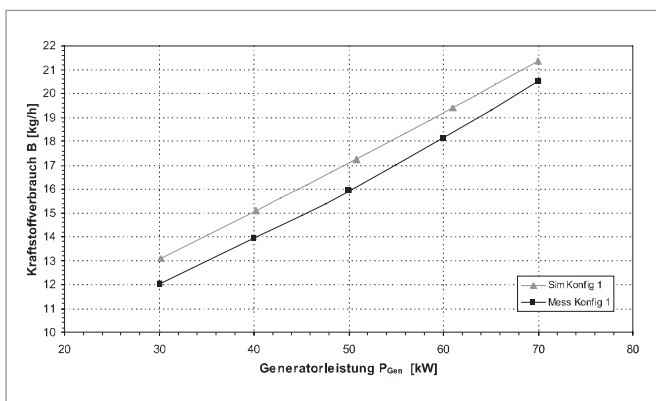


Abbildung 14:
Vergleich Simulation/Messung für den Kraftstoffverbrauch bei Konfiguration 1

Es ist zu erkennen, dass in der Simulation ein höherer Brennstoffmassenstrom für die gleiche Leistung benötigt wird. Die Differenz zwischen den Simulations- und Messwerten liegt in der Konfiguration 1 in der Größenordnung von 5 bis 8 Prozent. Für die Konfiguration 2 und 3 liegen die Abweichungen im Bereich von 6 bis 9 Prozent. Die verwendeten Berechnungsmodelle für die Verbrennung und Wärmeübertragung kommen dabei als eine mögliche Fehlerquelle für den höheren Kraftstoffverbrauch in der Simulation in Betracht.

4 Der Wirkungsgrad des En-O-Trak-Systems

In der Tab. 4 sind die Anlagenwirkungsgrade für die verschiedenen Systemkonfigurationen bei einer elektrischen Leistung von $P_{\text{Gen}} = 70$ kW aufgeführt.

Tabelle 4:
Elektrischer Wirkungsgrad bei Heizölbetrieb am Anlagennennpunkt für verschiedene Konfigurationen

Dieselbetrieb	Konfiguration	P_{Gen} kW	Messung		Simulation
			\dot{m}_B kg/h	η_{el}	η_{el}
				-	-
Konfig 1 $T_L = 40$ °C	70	20,67	0,2855	0,2737	
$T_L = 30$ °C	70	20,52	0,2876	0,2759	
$T_L = 20$ °C	70	20,36	0,2898	0,2776	
Konfig 2 $T_L = 30$ °C	70	20,48	0,2881	0,2758	
Konfig 3 $T_L = 30$ °C	70	20,30	0,2907	0,2774	

Bei dem Vergleich des elektrischen Wirkungsgrades in Tab. 4 zeigt sich, dass eine leichte Wirkungsgraderhöhung durch Senkung der Ansauglufttemperatur erreichbar ist. Sie beträgt bei einem Temperaturunterschied der Luft von 20 °C etwa 0,4 Prozent.

Aus den ausgewerteten Daten ergibt sich, dass durch die untersuchten Anlagenvarianten eine Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades um bis zu 0,5 Prozent möglich ist. Es zeigt sich außerdem, dass der um 10 % höhere Kraftstoffverbrauch bei Rapsölbetrieb keine signifikanten Einflüsse auf den Gesamtwirkungsgrad des En-O-Trak-Systems hat, da dieser sehr stark vom thermischen Wirkungsgrad beeinflusst wird.

Vergleicht man die ermittelten Anlagenwirkungsgrade des En-O-Trak-Systems mit denen herkömmlicher BHKW-Anlagen, so zeigen sich doch einige Unterschiede. Traditionelle Blockheizkraftwerke besitzen Gesamtwirkungsgrade von über 90 Prozent. Dies wird jedoch in erster Linie durch eine effektive Nutzung der beim Verbrennungsprozess erzeugten Abwärme erlisch. Wird nur der elektrische Wirkungsgrad betrachtet, so zeigt sich, dass der Wirkungsgrad des En-O-Trak-Systems nicht gravierend abfällt. Für Blockheizkraftwerke mit Hubkolben-Verbrennungsmotor der Leistungsklasse von 50 bis 150 kW elektrischer Leistung liegt der Teilwirkungsgrad zwischen 30 und 32 Prozent [1]. Unter Beachtung des systembedingten Energieflusses in der untersuchten Anlage liegt der Wirkungsgrad mit 28 Prozent am Dauerbetriebspunkt nicht signifikant niedriger. Der thermische Wirkungsgrad üblicher Blockheizkraftwerke liegt im Bereich von 30 bis 56 Prozent [2]. Der für das En-O-Trak-System berechnete thermische Wirkungsgrad liegt mit 36-42 Prozent im unteren Effizienzbereich für herkömmliche Blockheizkraftwerke mit Dieselmotoren, was unter der Berücksichtigung der Verwendung von Fahrzeugserienmotoren, die nicht speziell für den Einsatz in Blockheizkraftwerken angepasst sind, als akzeptabler Wert betrachtet werden kann.

5 Schlussbetrachtung

Bei der Auswertung der gewonnenen Daten haben sich zwei wesentliche Punkte für die Optimierung des En-O-Trak-Systems ergeben. Der eine Punkt betrifft die Erhöhung der Effizienz bei der Abgaswärmenutzung und der andere Punkt die Senkung der Energiekosten durch einen verbrauchsoptimalen Betrieb des En-O-Trak-Systems.

Um den Wirkungsgrad einer Anlage zu verbessern, ist in erster Linie eine Verringerung der eingesetzten Energie erforderlich. Ausgehend von den Simulationsergebnissen und den Messdaten kann daher festgestellt werden, dass bei Dauerbetrieb der Anlage die auftretende Ansauglufttemperatur zu hoch ist. Dies führt zu einer Leistungsreduktion und einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauches, so dass eine minimierte Temperatur der Verbrennungsluft eine wichtige Optimierungsmaßnahme zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit des En-O-Trak-Systems darstellt.

Zur Verbesserung des Anlagenwirkungsgrades trägt auch eine optimierte Nutzung der Abwärme bei. Dazu gehört in erster Linie eine effektiv gedämmte Abgasanlage sowie eine günstige konstruktive Gestaltung. Um eine konstante Auskopplung der Abgaswärme zu gewährleisten, wäre der Einsatz eines anderen Wärmetauschertyps in Erwägung zu ziehen. Auch durch Änderungen an der Zuführung des Abgases zum Wärmetauscher lässt sich die Abwärmenutzung verbessern. Bei baulichen Änderungen am Abgassystem des Traktors ist allerdings grundsätzlich zu klären, in welchem Umfang hier zulassungstechnische Belange berührt werden. Dies betrifft vor allem die Lärmemissionen des En-O-Trak-Systems.

Literatur

- [1] ENGLHARD, OSKAR: Dieselmotorenanlagen, 1. Auflage, Vogel-Fachbuch Verlag, Würzburg 1999
- [2] MOLLENHAUER, KLAUS (HRSG.): Handbuch Dieselmotoren, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg 2002
- [3] LEMM, STEFAN: Vom Traktor zum Kraftwerk, Diplomarbeit, BTU Cottbus, 2003
- [4] HELL, FRIEDRICH: Technische Energietechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf 1985



Dipl.-Ing. Jörg Plößer wurde im Jahre 1975 in Rostock geboren. Er studierte an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus von 2002-2006 Maschinenbau mit der Vertiefung Fahrzeug- und Verkehrstechnik, seit dem beruflich im Bereich Konstruktion tätig. In den Jahren 2005-2006 wurde die technische Betreuung des En-oTrak-Systems von ihm übernommen.



Dipl.-Ing. Oleksiy Antoshkiv, geboren in Lviv/Ukraine am 15.03.1975. In den Jahren 1992-1997 studierte er Kraftfahrzeugtechnik an der Staatlichen Universität „Lvivska Polytechnika“. Seit Juni 2002 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe der BTU Cottbus.



Prof. Dr.-Ing. Heinz Peter Berg wurde am 1. September 1960 in Friedberg/Hessen geboren. Er studierte von 1979 bis 1985 an der TH Darmstadt in der Fachrichtung Allgemeiner Maschinenbau. Nach dem Studium promovierte er am Fachgebiet Flugantriebe und Gasturbinen der TH Darmstadt. 1991 wechselte er zur neu gegründeten Triebwerksfirma BMW Rolls-Royce Aero Engines GmbH, die er mit aufbaute. Hier war er zunächst als Referent Prüfstandsentwicklung für die Auslegung und den Entwurf von neuen thermodynamischen sowie strömungstechnischen Testaufbauten, Komponenten- und Triebwerksprüfstände zuständig. 1992 übernahm er die Testprogrammleitung im F&E-Bereich der BMW Rolls-Royce Aero Engines GmbH, Anfang 1994 wurde er zum Leiter des aero-/thermodynamischen Komponenterversuchs (Strömungskomponenten- und Brennkammerversuch) ernannt. Ab 1994 übernahm er die Gesamtleitung der Abteilung Triebwerkskomponentenerprobung, bestehend aus den Fachgruppen Anbaugeräteprüfung und Triebwerksregelung; mechanische Bauteilerprobung; aero- und thermodynamischer Komponenterversuch. In dieser Zeit wurde das erste deutsche Ziviltriebwerk (BR 710) konzipiert, erprobt und für den Flugbetrieb zugelassen. 1995 erhielt er den Ruf an die BTU Cottbus. Seit Ende 1996 leitet er den Lehrstuhl Verbrennungskraftmaschinen und Flugantriebe mit den Forschungsgebieten Verbrennungsmotoren und Gasturbinen.



Prof. Dr. phil. habil. Wolfgang Schluchter, geb. 1944 in Stuttgart, Facharbeiterabschluss als Mechaniker 1963 in Stuttgart, Abitur 1965 in Fellbach, Studium Politologie, Soziologie, Volkswirtschaft und Agrarwissenschaft 1965-71, Promotion Universität Heidelberg 1973, Studienleiter an verschiedenen Forschungsinstituten 1973-79, Assistenzprofessor an der FU Berlin, Institut für Soziologie 1979-84, Habilitation Freie Universität Berlin 1984 (venia legendi), Verschiedene Gastprofessuren an der Uni Kassel, HU Berlin, FH Darmstadt und Geschäftsführer eines Forschungsinstitutes 1984-94, Lehrstuhl für sozialwissenschaftliche Umweltfragen BTU Cottbus seit 1994, Direktor des Humanökologischen Zentrums der BTU Cottbus (HöZ) seit 1999.