



Technische  
Universität  
Braunschweig

INSTITUT FÜR  
mobile Maschinen  
und Nutzfahrzeuge



# Forschungsberichte

**Tobias Töpfer**

**Bewertung von Ansätzen zur Integration  
einer Wärmeenergieerückgewinnung  
in einen Traktor**

Herausgeber:  
Freundes- und Förderkreis des Instituts  
für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge e.V.

Shaker Verlag

# **Bewertung von Ansätzen zur Integration einer Wärmeenergieerückgewinnung in einen Traktor**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. (FH) Tobias Töpfer M.Sc.  
aus (Geburtsort): Templin

eingereicht am: 02.11.2021

mündliche Prüfung am: 28.02.2022

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs  
Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Reza Rezaei



Forschungsberichte aus dem  
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

**Tobias Töpfer**

**Bewertung von Ansätzen zur Integration einer  
Wärmeenergieerückgewinnung in einen Traktor**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8715-4

ISSN 2196-7369

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Fachbereich Nutzfahrzeuge bei IAV in Berlin und als externer Doktorand am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig.

Für die Betreuungszusage und den stets sehr hilfreichen fachlichen und überfachlichen Austausch, möchte ich mich bei meinem Doktorvater und Mentor, Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs bedanken. Er hat es mir ermöglicht, die Promotion und das strukturierte Doktorat berufsbegleitend durchzuführen.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Reza Rezaei für die Übernahme des Korreferats, die Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Tipps und Anregungen. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ferit Küçükay für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Allen Kollegen und Studenten, die mich während der Promotion im fachlichen Austausch oder in der Bearbeitung von relevanten Fragestellungen unterstützt und beraten haben, möchte ich meinen persönlichen Dank aussprechen.

Den Firmen IAV und CLAAS Tractor in Paderborn möchte ich ausdrücklich für die Unterstützung dieser Arbeit, vor allem mit Messdaten und technischen Informationen, danken.

Meiner lieben Frau Susanna und meinen Kindern Greta und Oskar gilt mein ganz besonderer Dank. Ohne die Unterstützung und das Verständnis für die vielen Arbeitsstunden, die zur Anfertigung dieser Arbeit notwendig waren und die von unserer gemeinsamen Zeit als Familie abgezogen werden mussten, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Berlin, im Oktober 2021

Tobias Töpfer



## **Kurzfassung**

Die Steigerung der Energieeffizienz und damit die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen gehören zu den übergeordneten Entwicklungszielen des 21. Jahrhunderts. Der Traktor ist die universelle landwirtschaftliche Maschine und wird in der Regel von einem Verbrennungsmotor angetrieben. Um auch hier die lokalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren, muss der Kraftstoffverbrauch gesenkt werden. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist die Verwendung einer Wärmeenergierückgewinnung. Dies bedeutet, dass Wärmeenergie, die sonst ungenutzt an die Umwelt abgegeben würde, in einer anderen Form wiederverwendet werden kann.

In der vorgelegten Arbeit wird der Clausius-Rankine-Prozess (CRP) als eine geeignete Möglichkeit zur Wärmeenergierückgewinnung am Traktor ausgewählt. Als Prozessmedium wird Ethanol festgelegt. Da sich die Lastkollektive und die Betriebsbedingungen des Traktors sehr wesentlich von anderen bekannten Anwendungen mit Wärmeenergierückgewinnung unterscheiden, ist die Forschungsfrage explizit auf die Voraussetzungen und die Integrationsmöglichkeiten eines CRP in den Traktor sowie auf deren Bewertung ausgerichtet.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird eine speziell ausgelegte Kombination aus Maschinenmessungen und Simulation verwendet. Damit gelingt es, die Ergebnisformulierung auf einen sehr breiten Untersuchungsraum zu stützen. Als Antwort auf die Forschungsfrage kann formuliert werden, dass die ideale Integrationsmöglichkeit eine Ausnutzung der Wärmequellen Abgas und Abgasrückführung vorsieht. Dies, verbunden mit einem direkt an den Verbrennungsmotor gekoppelten Expander und einer Möglichkeit, den genutzten Abgasmassenstrom bis zu 100 % zu reduzieren, ermöglicht die höchsten Potenziale in Bezug auf die Steigerung der Energieeffizienz des Traktors. Die zusätzliche Belastung des Kühlsystems kann als neuralgische Stelle beim Betrieb des CRP festgestellt werden.

Für weiterführende Arbeiten ist die evtl. prädiktive Regelung des CRPs idealerweise unter Einbeziehung des gesamten Kühlkreislaufes des Verbrennungsmotors zu nennen. Hier stellt der Traktor durch seine unterschiedlichen Einsatzzwecke eine besondere Herausforderung dar.



## **Abstract**

Increasing energy efficiency and thus reducing of CO<sub>2</sub> emissions are among the overarching development goals of the 21st century. The tractor is the universal agricultural machine and is usually powered by an internal combustion engine. To reduce local CO<sub>2</sub> emissions the fuel consumption must be reduced. One way to achieve this is to use thermal energy recovery. This means thermal energy that is otherwise released unused into the environment can be reused in another form.

In this work, the Clausius-Rankine-Process (CRP) is selected as a suitable option for heat energy recovery on the tractor. Ethanol is specified as the process medium. Since the load cycles and the operating conditions of the tractor differ significantly from other known applications with heat energy recovery, the research issue deals explicitly with the fundamentals of different integration options of a CRP in the tractor.

A specially designed combination of machine measurements and simulation works is used to evaluate the different integration options. This enables the result formulation to be based on a very broad investigation area. In response to the research issue, it can be formulated that the ideal integration option provides for the utilization of the heat sources exhaust gas and exhaust gas recirculation. This, combined with an expander coupled directly to the internal combustion engine and a possibility of reducing the exhaust gas mass flow up to 100 %, enables the greatest potential in terms of increasing the energy efficiency of the tractor. The additional load on the cooling system can be identified as a neural point when operating the CRP.

Further works shall address to the possibly predictive control of the CRP, ideally taking into account the entire cooling circuit of the combustion engine. Here, the tractor presents a particular challenge due to its different uses.

---

## **Inhaltsverzeichnis**

|   |            |
|---|------------|
| <b>Formelzeichen und Indizes</b> .....                            | <b>X</b>   |
| <b>Chemische Formelzeichen</b> .....                              | <b>XV</b>  |
| <b>Abkürzungen</b> .....  | <b>XVI</b> |
| <b>1 Einleitung</b> .....   | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivation und Ziel .....                                     | 1          |
| 1.2 Aufbau der Arbeit .....                                       | 2          |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....                   | <b>4</b>   |
| 2.1 Relevante Eigenschaften des Traktors .....                    | 4          |
| 2.1.1 Verbrennungsmotor (VKM) und gesetzliche Randbedingungen .   | 4          |
| 2.1.2 Wärmequellen und -senken .....                              | 9          |
| 2.1.3 Einsatz- und Lastprofile .....                              | 14         |
| 2.1.4 Aktuelle Entwicklungstrends .....                           | 17         |
| 2.2 Wärmeenergierückgewinnung in mobilen Anwendungen .....        | 21         |
| 2.3 Clausius-Rankine-Prozess (CRP) .....                          | 24         |
| 2.3.1 Prozessverlauf .....  | 24         |
| 2.3.2 Arbeitsmedium .....   | 26         |
| 2.3.3 Komponenten .....   | 30         |
| 2.3.4 Prozessregelung .....                                       | 36         |
| <b>3 Formulierung der Forschungsfrage</b> .....                   | <b>38</b>  |
| <b>4 Entwicklung einer geeigneten Untersuchungsmethodik</b> ..... | <b>40</b>  |
| 4.1 Festlegung der Untersuchungsmethodik .....                    | 40         |
| 4.2 Maschinen- und Prüfstandsmessungen .....                      | 45         |
| 4.3 Modellansätze für die Systemsimulation .....                  | 51         |
| 4.3.1 Wärmetauscher .....   | 51         |
| 4.3.2 Expander .....  | 54         |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 4.3.3    | Kühlsystem Traktor .....  | 57         |
| 4.4      | Fehlerdiskussion .....  | 63         |
| <b>5</b> | <b>Festlegung der zu untersuchenden Integrationsmöglichkeiten .....</b> | <b>67</b>  |
| 5.1      | Möglichkeiten der CRP-Integration .....                                 | 67         |
| 5.1.1    | Expansionsmaschine .....  | 67         |
| 5.1.2    | Kondensator .....   | 71         |
| 5.2      | Leistungsanalyse in realen Arbeitszyklen .....                          | 73         |
| 5.2.1    | Thermisches Leistungsangebot .....                                      | 73         |
| 5.2.2    | Leistungsbedarf der motornahen Nebenverbraucher .....                   | 77         |
| 5.2.3    | Leistungsvergleich .....  | 82         |
| 5.3      | Darstellung der zu untersuchenden Integrationsmöglichkeiten .....       | 88         |
| <b>6</b> | <b>Ergebnisdarstellung und Diskussion .....</b>                         | <b>92</b>  |
| 6.1      | Vorgehen zur Ergebniserzeugung .....                                    | 92         |
| 6.2      | Konzept A: Maximale Expanderleistung zur VKM-Unterstützung .....        | 96         |
| 6.2.1    | Parametervariation und Ergebnisdiskussion .....                         | 96         |
| 6.2.2    | Variation und Bewertung der CRP-Leistungsregelung .....                 | 104        |
| 6.2.3    | Ergebnisformulierung Konzept A .....                                    | 109        |
| 6.3      | Konzept B: Maximale Expanderleistung Nebenverbraucherantrieb ..         | 109        |
| 6.3.1    | Parametervariation und Ergebnisdiskussion .....                         | 109        |
| 6.3.2    | Ergebnisformulierung Konzept B .....                                    | 114        |
| 6.4      | Konzept C: Reduzierte Expanderleistung zur VKM-Unterstützung ..         | 115        |
| 6.4.1    | Parametervariation und Ergebnisdiskussion .....                         | 115        |
| 6.4.2    | Ergebnisformulierung Konzept C .....                                    | 118        |
| 6.5      | Vergleichende Konzeptbewertung .....                                    | 118        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                               | <b>122</b> |
| <b>8</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                       | <b>124</b> |
| <b>9</b> | <b>Anhang .....</b>   | <b>136</b> |