

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Arbeitskreises Forschung und Lehre der

Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) **637**

Julian Schwehn

Energiebedarf von Traktoren und ausgewählten Anbaugeräten in der Außenwirtschaft landwirtschaftlicher Betriebe

**Energiebedarf von Traktoren und ausgewählten
Anbaugeräten in der Außenwirtschaft landwirtschaftlicher
Betriebe**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Agrarwissenschaften (Dr. sc. agr.)

Fakultät Agrarwissenschaften
Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik

vorgelegt von Julian Tobias Schwehn
aus Heidenheim an der Brenz

2024

Julian Schwehn

**Energiebedarf von Traktoren und ausgewählten
Anbaugeräten in der Außenwirtschaft
landwirtschaftlicher Betriebe**

D 100 (Diss. Universität Hohenheim)

**Shaker Verlag
Düren 2024**

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.: Hohenheim, Univ., Diss., 2024

Die vorliegende Arbeit wurde am 01.08.2023 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung:	02.02.2024
Dekan	Prof. Dr. R. Vögele
Berichterstatter, 1. Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger
Mitberichterstatter, 2. Prüfer:	Prof. Dr. L. Frerichs
3. Prüfer:	apl. Prof. Dr. E. Gallmann

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9429-9

ISSN 0931-6264

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 • E-Mail: info@shaker.de

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand im Wesentlichen in den Jahren 2016 bis 2021 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim. Ausdrücklich danken möchte ich dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft für die Förderung des Forschungsprojekts sowie den zahlreichen Partnern aus Forschung und Industrie für die erfolgreiche und für mich persönlich sehr erfahrungsreiche Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit und die Unterstützung während der Anfertigung. Des Weiteren danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, die daraus resultierenden Freiräume bei der Projektbearbeitung sowie die Möglichkeiten zur persönlichen Entwicklung. Herrn Prof. Dr. sc. agr. L. Frerichs danke ich für die Übernahme des Mitberichts sowie die konstruktiven Anmerkungen zu dieser Arbeit. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. J. Bennewitz für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich bedanke mich herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen, die während meiner Zeit am Institut für Agrartechnik gearbeitet haben. Die vielen Gespräche brachten vielfältige Anregungen und die gemeinsame Zeit war stets von einem großen Zusammenhalt und tatkräftiger Unterstützung geprägt. Einen besonderen Dank möchte ich an Dr.-Ing. S. Häberle und V. Ernst richten, die mich auf vielfältige Art und Weise unterstützt haben. Des Weiteren gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Werkstatt für die Hilfe beim Aufbau von Messtechnik sowie bei der Durchführung von Feldversuchen. Ebenso danke ich den zahlreichen wissenschaftlichen Hilfskräften und den Studierenden, die mich bei der Bearbeitung wichtiger Teilaufgaben unterstützt haben.

Ich danke meiner Familie und insbesondere meiner Frau Ann-Kathrin für das Verständnis und die beständige Unterstützung während der Zeit der Anfertigung der Arbeit. Ein weiterer Dank gilt H. Kümmerle für die fachlichen Gespräche sowie die freundliche Förderung über die Jahre.

Kempten, im Februar 2024

INHALTSVERZEICHNIS

FORMELZEICHEN	III
ABKÜRZUNGEN	VII
KURZZUSAMMENFASSUNG	IX
SUMMARY	X
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER TECHNIK	4
2.1 Energie und Energieformen	4
2.2 Boden	6
2.3 Landwirtschaftliche Verfahren und Anbaugeräte	10
2.3.1 Bodenbearbeitung	10
2.3.1.1 (Kurz-)Scheibenegge	16
2.3.1.2 Grubber	20
2.3.1.3 Pflug	22
2.3.1.4 Kreiselegge	25
2.3.2 Aussaat	27
2.3.3 Düngung	27
2.3.4 Pflanzenschutz	30
2.3.5 Ernte	31
2.3.6 Transport	32
2.4 Traktor	34
2.4.1 Dieselmotor	36
2.4.2 Abgasnachbehandlung	39
2.4.3 Alternative Kraftstoffe	43
2.4.4 Versuchstraktor	45
2.5 Messtechnik	46
2.5.1 Kraftmessrahmen	46
2.5.2 Drehmoment-/Drehzahlmessung	47
2.5.3 Messaufbau	48
2.6 Zusammenfassung und Präzisierung der Aufgabenstellung	49
3 ENERGIEBEDARF LANDWIRTSCHAFTLICHER VERFAHREN	51
3.1 Datenerhebung	51
3.2 Ergebnisse und Diskussion	63
4 ENERGIEBEDARF TRAKTOR	66
4.1 Testverfahren und Datenerhebung	66
4.2 Ergebnisse und Diskussion	70
4.3 Verbrauchskennfelder	86

5	ENERGIEBEDARF ANBAUGERÄTE	97
5.1	Untersuchungen zum Energiebedarf, Testverfahren und Datenerhebung	97
5.2	Berechnungsmodelle	99
5.2.1	Berechnungsmodell nach Gorjatschkin	101
5.2.2	Berechnungsmodell nach ASABE	101
5.2.3	Berechnungsmodell nach KTBL	102
5.2.4	Modellvalidierung	103
5.3	Bodenbearbeitung	103
5.3.1	(Kurz-)Scheibenegge	104
5.3.2	Grubber	108
5.3.3	Pflug	113
5.3.4	Kreiselegge	116
5.4	Aussaat	120
5.5	Düngung und Pflanzenschutz	123
5.6	Transport	124
5.7	Zusammenfassung und Bewertung der Berechnungsmodelle	125
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	128
7	LITERATURVERZEICHNIS	131
8	ANHANG	146

FORMELZEICHEN

a	-	Taktzahl
B_A	l/ha	Flächenbezogener Kraftstoffverbrauch
B_h	l/h	Zeitbezogener Kraftstoffverbrauch
B_m	l/t	Erntemengenbezogener Kraftstoffverbrauch
b_{AG}	m	Arbeitsbreite Anbaugerät
b_e	g/kWh	Spezifischer Kraftstoffverbrauch
$d_{Körnung}$	mm	Durchmesser Bodenkörnung
E	J	Energie
F	N	Kraft, allgemein
F_{Zug}	N	Zugkraft
f	Hz	Frequenz
H_i	MJ/kg	Heizwert
i	-	Laufindex, Klasse
k_{a1}	-	Gerätespezifischer Koeffizient 1 nach ASABE
k_{a2}	-	Gerätespezifischer Koeffizient 2 nach ASABE
k_{a3}	-	Gerätespezifischer Koeffizient 3 nach ASABE
k_{a4}	-	Bodenspezifischer Koeffizient 4 nach ASABE
k_{g1}	-	Gerätespezifischer Koeffizient 1 nach Gorjatschkin
k_{g2}	kN/m ²	Bodenspezifischer Koeffizient 2 nach Gorjatschkin
k_{g3}	kNs ² /m ⁴	Gerätespezifischer Koeffizient 3 nach Gorjatschkin
k_{k1}	-	Modellspezifischer Koeffizient 1 nach KTBL
k_{k2}	-	Modellspezifischer Koeffizient 2 nach KTBL
LK	%	Luftkapazität
L_{min}	kg/kg	Kraftstoffspezifische Mindestluftmasse
n	-	Stichprobenumfang, Anzahl
n_Z	-	Anzahl Zylinder
n_{Motor}	1/min	Drehzahl Motor
n_{ZW}	1/min	Drehzahl Zapfwelle
M	Nm	Drehmoment, allgemein
M_{Motor}	Nm	Drehmoment Motor
M_{ZW}	Nm	Drehmoment Zapfwelle

m	kg	Masse, allgemein
m	kg	Transportmasse
$ma_0...ma_5$	-	Regressionskoeffizienten Kraftstoffverbrauch
$mb_0...mb_3$	-	Regressionskoeffizienten Volllastkennlinie
$mc_0...mc_1$	-	Regressionskoeffizienten Abregelgerade
P	kW	Leistung, allgemein
P_{Ges}	kW	Gesamtleistung
P_{Hyd}	kW	Hydraulische Leistung
P_{Nenn}	kW	Nennleistung
P_{Nutz}	kW	Nicht korrigierte Nutzleistung
$P_{Traktor}$	kW	Leistung Traktor
P_{Zug}	kW	Zugleistung
P_{ZW}	kW	Zapfwellenleistung
P_{ZW_max}	kW	Maximale Zapfwellenleistung
p	bar	Druck, allgemein
p_L	bar	Druck, Luft
Q	l/min	Volumenstrom
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
R_L	J/mol·K	Spezifische Gaskonstante, Luft
s	m	Strecke
T_L	K	Temperatur, Luft
t	s	Zeit
t_{AG}	m	Arbeitstiefe Anbaugerät
V	m ³	Volumen
V_h	m ³	Hubvolumen
v	km/h	Geschwindigkeit
W	J	Arbeit
W_e	J	Nutzarbeit
W_T	J	Transportarbeit
w_e	J/m ³	Spezifische Nutzarbeit
x_i	-	Stichprobenwert
\bar{x}	-	Arithmetischer Mittelwert der Stichprobenwerte x_i

Δ	-	Differenz
$\bar{\epsilon}$	-	Mittlere absolute Abweichung
η	-	Wirkungsgrad, allgemein
η_G	-	Wirkungsgrad, Getriebe
η_M	-	Wirkungsgrad, Motor
η_e	-	Wirkungsgrad, effektiv
η_L	-	Wirkungsgrad, Laufwerk, Fahrwerk
λ_I	-	Liefergrad
λ	-	Luftverhältnis
ρ_{Diesel}	kg/m ³	Dichte Dieselkraftstoff
χ	-	Allgemeine Messgröße
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit

INDIZES

AG	Anbaugerät
ber	berechnet, modelliert
ges	gesamt
i	Laufindex, Klasse
max	maximal, maximum
mess	gemessen
min	mindestens, minimum
Motor	Motor
Nenn	Nennpunkt
ZW	Zapfwelle

ABKÜRZUNGEN

AGR	Abgasrückführung
ARG	Abregelgerade
AS	Aussaatsaat
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
ASC	Ammoniak-Schlupf-Katalysator
BB	Bodenbearbeitung
BSF	Binnenschifffahrt
CAN	Controller Area Network
cDPF	katalysierter Dieselpartikelfilter
CECE	Committee for European Construction Equipment
CEMA	European Agricultural Machinery Industry Association
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
DG	Düngung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnmessstreifen
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter
EB	Eisenbahn
ECE	Economic Commission for Europe
EKoTech	Effiziente Kraftstoffnutzung der AgrarTechnik
EU	Europäische Union
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
GKV	Güterkraftverkehr
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft DLG e.V.
ISO	Internationale Organisation für Normung
KE	Kreiselegge
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
LNG	Liquified Natural Gas
LW	Landwirtschaft
LWK-SH	Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein

MAN	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
MD	Mähdrescher
MP	Messpunkt
NKB	Nicht-Korn-Bestandteile
NTTL	Nebraska Tractor Test Laboratory
NRMM	Non-Road Mobile Machinery
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ÖKL	Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung
PM	Partikelmasse
PS	Pflanzenschutz
REG	Regression
RME	Rapsmethylester
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SI	Système International d'unités
THG	Treibhausgas
VLK	Volllastkennlinie
VTG	Variable Turbinengeometrie
WG	Wintergerste
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrübe

KURZZUSAMMENFASSUNG

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und hoher Ressourcenpreise ist der umsichtige Einsatz der zur Verfügung stehenden Energieträger von besonderer Bedeutung. Um die Folgen anthropogener Treibhausgasemissionen auf das Klima zu minimieren, sehen legislative Vorgaben in Europa und Deutschland ambitionierte Reduktionsziele für einzelne Sektoren wie die Landwirtschaft vor. Die heterogene Agrarstruktur erfordert standortgerechte Produktions- und Arbeitsverfahren, was zu einer großen Vielfalt an eingesetzten Maschinen und Anbaugeräten führt. Neben der Untersuchung von Einsparpotentialen einzelner Fahrzeugkomponenten bieten landwirtschaftliche Verfahrensketten mögliche weitere Einsparungen. Die Erforschung dieser prozessualen Potentiale macht eine detaillierte Kenntnis der eingesetzten Maschinen und Anbaugeräte aus energetischer Sicht notwendig.

Um die Einsparpotentiale innerhalb der Prozesse sowie der eingesetzten Technologien quantifizieren zu können, wird in der vorliegenden Arbeit der Energiebedarf von Traktoren und ausgewählten Anbaugeräten ermittelt. Dazu wird nach der Einführung einzelner Maschinen und Anbaugeräte eine Metastudie verschiedener Testverfahren und Literaturquellen durchgeführt, um die vorhandene Datenbasis zu bewerten und Datenlücken aufzuzeigen. Soweit es die Datenbasis zulässt, werden der aktuelle Stand und eine Entwicklung seit 1990 dargestellt, um die bereits erzielten Einsparungen aufzuzeigen. Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich sowie eine Evaluierung bestehender Modellansätze zur Berechnung des Energiebedarfs einzelner Maschinen und Anbaugeräte. Aus der Kenntnis vorhandener Datenlücken sowie der Güte aktueller Parametersätze können systematische Feldversuche für weiterführende Arbeiten abgeleitet werden.

Die Auswertung zum Energiebedarf landwirtschaftlicher Verfahrensketten zeigt zunächst die Schwierigkeiten des holistischen Ansatzes auf. Die vorhandenen Quellen befassen sich oftmals lediglich mit einzelnen Verfahrensschritten oder sie weisen einen geringen Detaillierungsgrad auf. Für Traktoren stehen ausreichend Daten zur Verfügung, um sowohl den Status quo als auch eine Entwicklung des Energiebedarfs seit 1990 abzubilden. Aus den vorhandenen Daten werden für simulationsbasierte Untersuchungen Verbrauchskennfelder für verschiedene Leistungsklassen abgeleitet. Bei Anbaugeräten beschränken sich die auswertbaren Datenquellen vor allem auf die energieintensive Bodenbearbeitung, wobei eine Darstellung der Entwicklung in den meisten Fällen nicht möglich ist. Der Abgleich vorhandener Messungen mit den Berechnungsansätzen zeigt die Datenlücken und fehlenden Parametersätze der Modelle deutlich auf.

SUMMARY

In the face of climate change and high resource prices, the prudent use of available energy sources is particularly relevant. In order to minimize the impact of anthropogenic greenhouse gas emissions on the climate, legislation in Europe and Germany demands ambitious reduction targets for individual sectors such as agriculture. The heterogeneous structure of agriculture requires site-specific production and working methods, which results in a wide range of machines and implements used. In addition to investigating saving potentials of individual vehicle components, agricultural process chains may offer further potential. Exploring these process-related potentials requires a detailed knowledge of the machines and implements used from an energy point of view.

In order to be able to quantify the potential savings within the processes as well as the technologies used, the energy demand of tractors and selected implements is determined in the present thesis. For this purpose, a meta-study of different test methods and literature sources will be conducted after the introduction of individual machines and implements in order to evaluate the existing database and to identify data gaps. As far as the database allows, the current status and a development since 1990 will be presented to show the savings already achieved. In addition, a comparison and evaluation of existing models for calculating the energy requirements of individual machines and attachments will be carried out. From the knowledge of existing data gaps and the quality of current parameter sets, systematic field tests for further studies can be derived.

The evaluation of the energy demand of agricultural process chains shows the difficulties of the holistic approach. The existing sources often only deal with individual process steps or have a low level of detail. For tractors, sufficient data are available to represent both the status quo and the development of the energy demand since 1990. For simulation-based studies, engine consumption maps for various power classes are derived from the available data. In the case of implements, the data sources that can be evaluated are primarily limited to energy-intensive tillage, and in most cases it is not possible to illustrate the development. The comparison of existing measurements with different calculation approaches clearly shows the data gaps and missing parameter sets of the models.