



Technische
Universität
Braunschweig

INSTITUT FÜR
mobile Maschinen
und Nutzfahrzeuge



Forschungsberichte

Sebastian Steinhaus

**Methodik zur Bewertung und Erfassung
der Effektivität und Effizienz von
landwirtschaftlichen Verfahren und Prozessen**

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

Shaker Verlag

Methodik zur Bewertung und Erfassung der Effektivität und Effizienz von landwirtschaftlichen Verfahren und Prozessen

Von der Fakultät für Maschinenbau

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Sebastian Steinhaus

aus: Lohne (Oldenburg)

eingereicht am: 11.03.2021

mündliche Prüfung am: 05.11.2021

Gutachter: Prof. Dr. Ludger Frerichs

Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger

Forschungsberichte aus dem
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Sebastian Steinhaus

**Methodik zur Bewertung und Erfassung der
Effektivität und Effizienz von landwirtschaftlichen
Verfahren und Prozessen**

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., 2021

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 978-3-8440-8421-4

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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig. Sie basiert im Wesentlichen auf dem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft geförderten Verbundforschungsprojekt „EKOtech - Effiziente Kraftstoffnutzung der Agrartechnik“.

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs für die Möglichkeit zur Promotion und Betreuung meiner Arbeit. Das entgegen gebrachte Vertrauen, die Diskussionen und fachlichen Gespräche während meiner Zeit am Institut haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger danke ich für die Übernahme des Koreferats und die Anregungen im Projektverlauf. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Den Projektpartner*innen, vor allem den Kolleg*innen des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit und den intensiven Austausch über Effizienz aber auch Effektivität in der Landwirtschaft. Besonderer Dank gilt Herrn Steffen Hanke für die Initiierung des Projekts und für die zahlreichen Denkanstöße. Herrn Lennart Tröskén und Herrn Johannes Bührke danke ich für die großartige Unterstützung im Büro, auf dem Feld und auf den zahlreichen Projekttreffen. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Bei allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeiter*innen des IMN bedanke ich mich für die freundschaftliche und fachliche Zusammenarbeit. Die gemeinsame Zeit, sowohl im Institut als auch daneben, werde ich nie vergessen und die entstandenen Freundschaften werden hoffentlich lange anhalten.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern, meiner Schwester und meinem Bruder danke ich, dass sie mir diesen Weg ermöglicht und mich stets unterstützt haben. Auch in schwierigen Zeiten konnte ich immer auf sie zählen. Meinen Großeltern, auch wenn sie das Ende Promotion leider nicht mehr erleben konnten, danke ich für alles was sie uns entgegen gebracht haben sowie für das Wecken meines Interesses an der Landwirtschaft und Landtechnik. Meinen besten Freunden danke ich für die notwendige Ablenkung und das ständige Nachfragen nach dem Ende der Promotion. All das motivierte mich, die notwendige Zeit für diese Arbeit aufzubringen. Meiner Partnerin Anna-Lena Wessel möchte ich ganz besonders für die Unterstützung in den letzten Schritten der Promotion danken.

Kurzfassung

Landwirtschaftliche Verfahren und Prozesse des Ackerbaus können in Abhängigkeit des Standorts, der betrieblichen Ausrichtung und weiteren Gegebenheiten bedarfsgerecht individualisiert werden. Am Markt sind dafür unterschiedlichste Maschinen, Geräte und Ausstattungen verfügbar. Ein Vergleich von differenten Ausprägungen oder auch von Maschinen- und Geräteeinstellungen erfolgt vor allem aufgrund von subjektiven Erfahrungen und Bewertungen. Ohne eine objektive Methodik zur Bewertung der Arbeitsweise und Effizienz von Verfahren und Prozessen konnten bisher keine reproduzierbaren Ergebnisse generiert werden.

In der vorliegenden Arbeit wird daher eine Methodik zur Bewertung der Effektivität und Effizienz von landwirtschaftlichen Verfahren und Prozessen vorgestellt. Hierzu wird in einem ersten Schritt anhand von identifizierten Parametern, die das Arbeitsergebnis und den Ressourceneinsatz maßgeblich beeinflussen, und dazugehörigen Zielgrößen die Zielerfüllung ermittelt. Aus diesen Werten wird dann jeweils das gewichtete arithmetische Mittel als Bewertungsgröße für die Effektivität und Effizienz gebildet. Über Gewichtungsfaktoren kann die Bewertung bedarfsgerecht angepasst werden. Darüber hinaus ist auch eine ökonomische Betrachtung möglich. Die gemeinsame übergeordnete Bewertungsgröße ist schließlich die Multiplikation der Einzel-faktoren für Effektivität und Effizienz. Dieses grundsätzliche Vorgehen ist sowohl für einzelne Verfahrensschritte und Prozesse sowie für gesamte Verfahrensketten einsetzbar.

Damit die entwickelte Bewertungsmethodik angewendet werden kann, werden konkrete Werte der Parameter und die Zielgrößen der Effektivität und Effizienz benötigt. Da hier ebenfalls für viele Prozesse objektive Methoden fehlen, wird zusätzlich eine Möglichkeit zur Erfassung dieser Werte am Beispiel der Verfahren der Bodenbearbeitung vorgestellt. Mit hochpräzisen optischen Sensoren in einem Sensorträger an einem eigenständigen Fahrzeug ist es möglich, diese während der Fahrt auf dem Feld zu bestimmen. Die Aufteilung der Messaufgaben auf ein separates Fahrzeug steigert die Datengüte und sorgt für eine hohe Flächenleistung. Bestimmt werden können die wichtigsten effektivitätsbestimmenden Parameter der Bodenbearbeitung. Diese sind die Aggregatgrößenverteilung an der Bodenoberfläche, die Bedeckung der Bodenoberfläche durch organische Reststoffe sowie die Einebnung der Bodenoberfläche.

Mit umfangreichen Versuchen in unterschiedlichen Verfahrensschritten der Bodenbearbeitung werden dadurch die Einflüsse von Bearbeitungstiefe und -geschwindigkeit sowie Schargeometrien aufgezeigt. Mit der Anwendung der Bewertungsmethodik auf diese Ergebnisse können innerhalb des Parameterraums lokale Optima der kombinierten Bewertung der Effektivität und Effizienz identifiziert werden. Für die vorliegenden Versuchsbedingungen und in Abhängigkeit des Verfahrensschritts ist es dadurch möglich, die idealen Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu beziffern. Ebenso können die Auswirkungen der Bearbeitungstiefe und der verwendeten Schar-

geometrien auf die Bewertungsgrößen gezeigt werden. Betrachtet werden neben einzelnen Verfahrensschritten auch die Verkettung von Verfahren in der Bodenbearbeitung. Über die Anwendung der Bewertungsmethodik auf diese Ergebnisse wird nicht nur die Funktionsfähigkeit dieser gezeigt, sondern es können zusätzlich auch wichtige Hinweise für die Praxis gegeben werden.

Abstract

Agricultural procedures and processes in arable farming can be individualized according to need depending on for example the location or the farm's orientation. A wide variety of machines, devices and equipment is available on the market for this purpose. A comparison of different characteristics or also of machine and equipment settings is mainly based on subjective experiences and evaluations. Without an objective methodology to evaluate the functionality and efficiency of procedures and processes, it has not been possible to generate reproducible results.

This thesis therefore presents a methodology for evaluation the effectiveness and efficiency of agricultural practices and processes. For this purpose, in a first step, the fulfilment is determined on the basis of identified parameters that significantly influence the work result and the use of resources, and the associated target values. The weighted arithmetic mean is then formed from these values as an evaluation value for effectiveness and efficiency. Weighting factors can be used to adjust the assessment according to need. Furthermore, an economic consideration is also possible. Finally, the common overall evaluation value is the multiplication of the individual factors for effectiveness and efficiency. This basic procedure can be used for individual process steps and processes as well as for entire process chains.

In order to apply the developed evaluation methodology, the values of the parameters and the target values of effectiveness and efficiency are needed. Since comprehensive objective methods are also lacking here, an additional possibility for recording these values for the example of soil cultivation methods is presented. With high-precision optical sensors in a sensor carrier on a stand-alone vehicle, it is possible to determine these while driving in the field. The division of the measuring tasks to a separate vehicle increases the data quality and ensures a high area performance. The most important effectiveness-determining parameters of soil tillage can be determined. These are the aggregate size distribution on the soil surface, the coverage of the soil surface by organic residues and the levelling of the soil surface.

Extensive tests in different soil tillage steps are used to identify the influences of tillage depth and speed as well as tine geometries. With the application of the evaluation methodology to these results, local optima of the combined evaluation of effectiveness and efficiency can be identified within the parameter space. For the present test conditions and depending on the process step, it is thus possible to quantify the ideal tillage speed. Likewise, the effects of the tillage depth and the used tine geometries on the evaluation variables can be shown. In addition to individual process steps, the interlinking of processes in soil cultivation is also considered. The application of the evaluation methodology to these results not only demonstrates their functionality, but can also provide important information for the practice.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	XI
Abkürzungen	XV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand des Wissens	4
2.1 Definition Effizienz, Effektivität und Qualität	4
2.2 Landwirtschaftliche Verfahren und Prozesse	5
2.3 Arbeitsqualitätsbestimmende Parameter in landwirtschaftlichen Verfahren . . .	7
2.3.1 Bodenbearbeitung	8
2.3.2 Aussaat	9
2.3.3 Pflegemaßnahmen	10
2.3.4 Ernte	11
2.4 Erfassungsmethoden von arbeitsqualitätsbestimmenden Parametern	12
2.5 Zielwerte und Auswirkungen von arbeitsqualitätsbestimmenden Parametern . .	18
2.6 Bewertungsmethoden für die Effektivität und Effizienz	23
2.6.1 Methoden aus der Industrie	24
2.6.2 Methoden aus der Landwirtschaft	26
3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	28
3.1 Motivation der Arbeit	28
3.2 Formulierung der Forschungsfragen	29
4 Methodik zur Bewertung der Effektivität und Effizienz	31
4.1 Bestimmung der Bewertungsgröße für einen Prozess- oder Verfahrensschritt . .	31
4.2 Bestimmung der Bewertungsgröße für eine Verfahrenskette	37
4.3 Vereinfachte Bestimmung der Bewertungsgröße für eine Verfahrenskette	41
4.4 Ermittlung der notwendigen Parameter, Wechselwirkungen und äußeren Einflüsse	44
4.5 Zielgrößen für Qualitätsparameter in landwirtschaftlichen Verfahrensketten . .	46
5 Bestimmung der Effektivität und Effizienz in der Bodenbearbeitung	48
5.1 Erfasste Parameter zur Bestimmung der Effektivität	48
5.2 Vorgehen zur Bestimmung der Effektivität und Effizienz	50
5.3 Verwendete Sensorik und Messeinrichtungen	52
5.4 Aggregatgrößenverteilung an der Bodenoberfläche	55
5.4.1 Cloth-Simulation-Filtering Algorithmus	56

5.4.2	Segmentierung mittels DBSCAN	59
5.4.3	Sphere-Fitting zur Bestimmung der Aggregatgrößen	61
5.4.4	Ermittlung des gewogenen mittleren Durchmessers	64
5.5	Bedeckungsgrad organischer Reststoffe auf der Bodenoberfläche	68
5.6	Einebnung der Bodenoberfläche	72
5.7	Bearbeitungstiefe des Geräts	74
5.8	Effizienzbestimmende Parameter	76
6	Versuchsergebnisse in der Bodenbearbeitung	78
6.1	Versuchsplanung und -durchführung	78
6.2	Ergebnisse des Kraftstoffverbrauchs	81
6.3	Ergebnisse der Aggregatgrößenverteilung	83
6.4	Ergebnisse des Bedeckungsgrads	84
6.5	Ergebnisse der Einebnung	85
7	Bewertung der Versuchsergebnisse bezüglich der Effektivität und Effizienz	87
7.1	Vorgehen zur Bewertung	87
7.1.1	Bewertung der Effizienz	87
7.1.2	Bewertung der Effektivität	89
7.1.3	Zusammenführung der Effizienz und Effektivität	91
7.2	Ergebnisse für landwirtschaftliche Prozesse und Verfahren	92
7.2.1	Bewertung erste Stoppelbearbeitung	92
7.2.2	Bewertung zweite Stoppelbearbeitung	94
7.2.3	Bewertung Grundbodenbearbeitung	96
7.2.4	Bewertung des Verfahrens Bodenbearbeitung	99
8	Fazit und Nutzen für die Praxis	102
9	Zusammenfassung	105
	Literaturverzeichnis	107
	Anhang	121

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Erklärung
a	mm	x-Koordinate des Mittelpunkts einer Kugel
A_{Sp}	kpm/dm ³	spezifischer Energieaufwand für den Bearbeitungsprozess (1 kpm bzw. Kilopondmeter = 9,80665 Joule)
b	mm	y-Koordinate des Mittelpunkts einer Kugel
b_a	m	Arbeitsbreite
B	l/ha	flächenbezogener Kraftstoffverbrauch eines Verfahrensschritts
c	mm	z-Koordinate des Mittelpunkts einer Kugel
d	mm	Aggregatdurchmesser
d_a	mm	mittlerer Aggregatdurchmesser
$d_{a,g}$	mm	mittlerer Aggregatdurchmesser der Klasse g
d'	mm	Feinheitsparameter RRSB-Verteilung - Abzisse zu $D = 0,632$
D	%	Siebdurchgang
E	E	Energiegleichwert (1 ent bzw. 1 E = 0,736 kWh)
E_a	%	erreichte Arbeitsqualität
E_j	div.	Parameter der Effizienz
$E_{j,ist}$	div.	aktuelle Erfüllung des Parameters j der Effizienz
$E_{k,j,ist}$	div.	aktuelle Erfüllung des Parameters j der Effizienz des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
$E_{Schritt}$	-	Bewertungsgröße der Effizienz für einen Verfahrensschritt
$E_{Verfahren}$	-	Bewertungsgröße der Effizienz für eine Verfahrenskette
$E_{V,Verfahren}$	-	vereinfachte Bewertungsgröße der Effizienz für eine Verfahrenskette
f	-	Bewertungsfunktion eines Parameters der Effektivität oder Effizienz
f_d	-	Frequenzdichtefunktion der prozentualen Gewichtsanteile der unterschiedlichen Aggregatgrößen
f_i	-	Bewertungsfunktion des Parameters i der Effektivität
f_j	-	Bewertungsfunktion des Parameters j der Effizienz
$f_{k,i}$	-	Bewertungsfunktion des Parameters i der Effektivität des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
$f_{k,j}$	-	Bewertungsfunktion des Parameters j der Effizienz des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
F	mm ²	quadratischer Fehler zwischen den Datenpunkten l eines Cluster zur Kugeloberfläche
g	-	Laufindex der Klasseneinteilung der Aggregatdurchmesser

Formelzeichen	Einheit	Erklärung
$G_{E,k}$	-	Gewichtungsfaktor der Effizienz des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
G_i	-	Gewichtungsfaktor des Parameters i der Effektivität
G_j	-	Gewichtungsfaktor des Parameters j der Effizienz
$G_{k,i}$	-	Gewichtungsfaktor des Parameters i der Effektivität des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
$G_{k,j}$	-	Gewichtungsfaktor des Parameters j der Effizienz des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
$G_{Q,k}$	-	Gewichtungsfaktor der Effektivität des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
$G_{V,i}$	-	Gewichtungsfaktor des Parameters i der Effektivität in einer Verfahrenskette
$G_{V,j}$	-	Gewichtungsfaktor des Parameters j der Effizienz in einer Verfahrenskette
GMD	mm	gewogener mittlerer Durchmesser
i	-	Laufindex der Parameter der Effektivität
j	-	Laufindex der Parameter der Effizienz
k	-	Laufindex der Verfahrensschritte in einer Verfahrenskette
K_{Diesel}	€/l	Kosten Dieselkraftstoff pro Liter
$K_{Personal}$	€/h	stündliche Personalkosten
$K_{Reparatur}$	€/h	stündliche Reparaturkosten
$K_{variabel}$	€/ha	variable Kosten pro Hektar
l	-	Anzahl der Datenpunkte in einem Cluster
l_m	mm	Messstreckenlänge
L_p	mm	Euklidische Norm zwischen dem Datenpunkt p und dem Mittelpunkt einer Kugel
m	-	Anzahl der Parameter der Effizienz
m_g	kg	Masse der Aggregate der Kasse g
m_k	-	Anzahl der Parameter der Effizienz des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
$m_{Verfahren}$	-	Gesamtzahl der Parameter der Effizienz in einer Verfahrenskette
$minPts$	-	Mindestanzahl der Nachbarschaften des DBSCAN-Algorithmus
n	-	Anzahl der Parameter der Effektivität

Formelzeichen	Einheit	Erklärung
n_k	-	Anzahl der Parameter der Effektivität des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
$n_{\text{Verfahren}}$	-	Gesamtzahl der Parameter der Effektivität in einer Verfahrenskette
o	-	Anzahl der Verfahrensschritte in einer Verfahrenskette
O	mm	Ordinatenwerte der Einebnung
O_A	m^2/dm^3	äußere spezifische Bodenoberfläche vor dem Bearbeitungsprozess
O_E	m^2/dm^3	äußere spezifische Bodenoberfläche nach dem Bearbeitungsprozess
p	-	Laufindex der Datenpunkte
Q_i	div	Parameter der Effektivität
$Q_{i,ist}$	div	aktuelle Erfüllung des Parameters i der Effektivität
$Q_{k,i,ist}$	div	aktuelle Erfüllung des Parameters i der Effektivität des Verfahrensschritts k in einer Verfahrenskette
Q_{Schritt}	-	Bewertungsgröße der Effektivität für einen Verfahrensschritt
$Q_{\text{Verfahren}}$	-	Bewertungsgröße der Effektivität für eine Verfahrenskette
$Q_{V,\text{Verfahren}}$	-	vereinfachte Bewertungsgröße der Effektivität für eine Verfahrenskette
QE_{Schritt}	-	Bewertungsgröße der Effektivität und Effizienz für einen Verfahrensschritt
$QE_{\text{Verfahren}}$	-	Bewertungsgröße der Effektivität und Effizienz für eine Verfahrenskette
$QE_{V,\text{Verfahren}}$	-	vereinfachte Bewertungsgröße der Effektivität und Effizienz für eine Verfahrenskette
r	mm	Radius einer Kugel
R	%	Siebrückstand
Rq	mm	quadratischer Mittenrauwert
s	-	Feinheitsparameter RRSB-Verteilung - Steigung der RRSB-Geraden
T	h	Zeitbedarf eines Verfahrensschritts
v	km/h	Bearbeitungsgeschwindigkeit
W	-	Wertebereich einer Funktion
W_a	J	aufgewendete Energie
W_f	J	Energiefehlbetrag
x	mm	Aggregatdurchmesser

Formelzeichen	Einheit	Erklärung
x_p	mm	x-Koordinate des Datenpunkts p
X	div	Parameter X der Effektivität Q oder Effizienz E
X_{Max}	div	Maximum eines Parameters X der Effektivität Q oder Effizienz E
X_{Min}	div	Minimum eines Parameters X der Effektivität Q oder Effizienz E
X_Z	div.	Zielgröße eines Parameters X der Effektivität Q oder Effizienz E
$ X_{Max} - X_Z $	div.	Abstand des Maximums zur Zielgröße eines Parameters X der Effektivität Q oder Effizienz E
$ X_{Min} - X_Z $	div.	Abstand des Minimums zur Zielgröße eines Parameters X der Effektivität Q oder Effizienz E
y_p	mm	y-Koordinate des Datenpunkts p
Y	t/ha	flächenbezogener Ertrag
z_p	mm	z-Koordinate des Datenpunkts p
ε	-	Radius der untersuchten Nachbarschaft des DBSCAN-Algorithmus
κ	m ² /kpm	Zerkleinerungserfolg (1 kpm bzw. Kilopondmeter = 9,80665 Joule)

Abkürzungen

Abkürzung **Erklärung**

CAN	Controller Area Network, deutsch: Steuergerätebereich-Netzwerk
CSF	Cloth-Simulation-Filtering, deutsch: Tuch-Simulation-Filterung
DBSCAN	Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, deutsch: dichte-basierte räumliche Clusterbildung von Anwendungen mit Rauschen
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DSM	Digital Surface Model, deutsch: digitales Oberflächenmodell
DTM	Digital Terrain Model, deutsch: digitales Geländemodell
GMD	gewogener mittlerer Durchmesser
GNSS	Global Navigation Satellite System, deutsch: globales Navigationssatellitensystem
HSV	Hue-Saturation-Value, deutsch: Farbwert-Farbsättigung-Hellwert
Laser	Light amplification by stimulated emission of radiation, deutsch: Licht-Verstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung
Lat	Latitude
LED	Light-Emitting Diode, deutsch: lichtemittierende Diode
LiDAR	Light Detection And Ranging, deutsch: Lichterkennung und Abstandsmessung
Long	Longitude
RGB	Rot-Grün-Blau-Farbraum
ROS	Robot Operating System, deutsch: Roboter-Betriebssystem
RRSB	Rosin-Rammler-Sperling-Bennett