

INSTITUT FÜR mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge



# Forschungsberichte

# **Florian Schramm**

# Untersuchung von Verschleißvorgängen bei der Bodenbearbeitung

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

Shaker Verlag

# Untersuchung von Verschleißvorgängen bei der Bodenbearbeitung

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: geboren in: Florian Robert Schramm Fulda

eingereicht am:20.05.2021mündliche Prüfung am:10.12.2021

Gutachter:

Prof. Dr. Ludger Frerichs Prof. Dr.-Ing. Frank Beneke

Forschungsberichte aus dem Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

**Florian Schramm** 

Untersuchung von Verschleißvorgängen bei der Bodenbearbeitung

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 978-3-8440-8438-2 ISSN 2196-7369

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren Telefon: 02421/99011-0 • Telefax: 02421/99011-9 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.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ludger Frerichs für die Möglichkeit der Promotion und die Betreuung dieser Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich für die Ermutigung zu diesem Schritt und für das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiräume bei meiner wissenschaftlichen Tätigkeit und Gruppenleitungsaufgaben bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Beneke danke ich für die Übernahme des Koreferats dieser Arbeit und dem gezeigten Interesse für dieses Thema. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg-Peter Ostermeyer bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit am IMN möchte ich allen aktuellen und ehemaligen Kollegen herzlich danken. Die große Hilfsbereitschaft und die gegenseitige Unterstützung bei der Bewältigung der vielen Aufgaben macht die Zeit am Institut zu etwas Besonderem. Dies gilt vor Allem auch für meine Arbeitsgruppe, deren positive Arbeitsatmosphäre ich sehr schätze. Besonderer Dank gilt Johannes Bührke für die vielen gemeinsamen Stunden bei der Konstruktion und im Betrieb der Bodenrinne, insbesondere aber für die vielen fachlichen Diskussionen.

Dem Research Fund for Coal and Steel danke ich für die finanzielle Unterstützung in meinem Projekt und den internationalen Projektkollegen für die hilfreichen Diskussion und aufschlussreichen Einblicke in die jeweiligen Fachgebiete. Dr. Ralf Kattenstroth und der Firma Köckerling danke ich für die Durchführung der Feldversuche, dem IFW der TU Braunschweig, der Firma GOM und VTT sowie der Abteilung Agrartechnik der Universität Göttingen für die messtechnische Untersuchung der Werkzeuge und Proben.

Mein persönlicher Dank gilt meiner Familie, die mir meinen Weg ermöglicht hat und allen, die mich bei meinem Vorhaben unterstützt haben. Besonders danke ich für die liebevolle Rücksichtnahme meiner Frau Carolin und für den Verzicht auf gemeinsame Zeit, die zur Erstellung dieser Arbeit notwendig waren.

Braunschweig, im Januar 2022

#### Kurzfassung

Werkzeuge in der Bodenbearbeitung werden zum Aufbrechen, Lockern, Durchmischen und Zerkleinern des Bodens eingesetzt. Über die Beschaffenheit des Bodens, wie dessen Zusammensetzung und dem Wasseranteil, ergeben sich unterschiedliche mechanische Eigenschaften. Dies verändert das Bruchverhalten und den Fluss des Bodens entlang der Werkzeuge. Neben der Werkzeugform beeinflussen vor allem die Prozessparameter Geschwindigkeit und Arbeitstiefe die erforderliche Zugkraft und damit die hauptsächliche Belastung auf die Werkzeuge. Die Belastung in Kombination mit der Relativgeschwindigkeit der Bodenbestandteile entlang der Werkzeuge resultiert in Verschleiß in Form von Materialverlust. Die Durchführung von Messungen zur Bestimmung der Belastungen, und in Folge insbesondere der Beanspruchungen, sind zeitintensiv und an die saisonale Verfügbarkeit der Feldarbeit geknüpft. Die Ergebnisse unterliegen dabei meist einer hohen Streuung durch die individuelle und lokale Beschaffenheit der Böden. Aus diesem Grund hat sich die Diskrete Elemente Methode als Simulationsverfahren in diesen und ähnlichen Bereichen etabliert, über das die Prozesse abgebildet und darüber unabhängig und ganzjährig eingesetzt werden können.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Vorgehen zur Abbildung der Beanspruchung mit der Diskreten Elemente Methode vorgestellt. Dazu wird über Versuchsaufbauten das Gesamtverhalten eines Bodens betrachtet und dazu ein geeignetes Kontaktmodell identifiziert und eingestellt. Die Beanspruchung wird anhand verschiedener Materialien wie Stahl und Aluminium über Dauerversuche unter kontrollierbaren Bedingungen untersucht. Die Diskrete Elemente Methode zeigt eine gute Eignung zur Umsetzung des Verschleißmodells nach Archard. Die versuchstypische Verschleißkonstante kann aus diesen Experimenten bestimmt werden. Die bisherige Limitierung der Simulation, den Volumenverlust zwar zu bestimmen, aber nicht abbilden zu können, wurde über eine automatisierte Berechnung behoben. Diese Erweiterung ermöglicht die Verschleibung der Elemente des Geometrienetzes auf Grundlage des bestimmten Volumens aus beliebigen Verschleißmodellen.

Der Abgleich der Werkzeugbelastungen an verschiedenen Werkzeugen und Materialien konnte in der Simulation in großer Übereinstimmung getroffen werden. Die daraus abgeleitete Beanspruchung über das Verschleißmodell entspricht den Versuchswerten und ist auf verschiedene Materialien übertragbar. Anhand des Kratztests wird die Übereinstimmung der Geometrieverformung zu den Modellberechnungen nachgewiesen.

#### Abstract

Soil tillage tools are used to break up, loosen, mix and crush the soil. The properties of soil, such as its composition and water content, result in different mechanical behaviour. This changes the fracture behaviour and the flow along the tools. In addition to the tool shape, process parameters such as speed and working depth influence the required draft and thus the load on the tools. The load in combination with the relative velocity of the soil components along the tools result in wear in the form of material loss. The performance of measurements to determine the loads and the stresses caused are time-consuming and linked to the seasonal availability of field work. The results are usually subject to a high level of scatter due to the individual and local condition of the soils. For this reason, the discrete element method has become established as a simulation method in this field, through which the processes can be modelled and used independently and throughout the year.

In the present work a procedure for the modelling of the stress with the discrete element method is presented. For this purpose, the overall behaviour of a soil is considered by means of experimental setups and a suitable contact model is identified and adjusted. Stress is applied to various materials such as steel and aluminium in endurance tests under controllable conditions. The discrete element method shows good applicability for implementing the Archard wear model. The experimental wear constant can be determined from these tests. The limitation of the simulation, of being able to determine the wear but not to represent it, was removed by an automated co-simulation. In addition, it is possible to take into account the volume calculated from any wear model by shifting the node elements of the geometry mesh.

The comparison of the tool loads on different tools and materials could be made in the simulation in great agreement. The stresses derived from this through the wear model correspond to the test values and can be transferred to different materials. The scratch test is used to demonstrate that the geometry deformation agrees with the model calculations.

### Inhaltsverzeichnis

Fo	rmelz	zeichen	Х	Ш
Ab	okürz	ungen u	ınd IndizesX	VII
1	Einl	eitung.		1
2	Grundlagen und Stand des Wissens			5
	2.1	Besch	reibung des Bodens	5
	2.2	Boden	-Werkzeug-Interaktionen	7
	2.3	Grund	lagen zum Verschleiß	9
		2.3.1	Verschleißarten und -mechanismen	9
		2.3.2	Verschleiß in der Bodenbearbeitung	.14
	2.4	Simula	ationen zur Boden-Werkzeug-Interaktion	.21
		2.4.1	Grundlagen und Kontaktmodelle der Diskreten Elemente Methode.	.23
		2.4.2	Simulation der Bodenmechanik	.30
		2.4.3	Verschleißsimulation	.35
3	Ziel	setzung	der Arbeit	. 37
4	Material und Methode			
	4.1	Boden	auswahl und Texturanalyse	.40
	4.2	Param	eterprüfstände zur Bestimmung der Materialeigenschaften	.43
	4.3	Boden	rinne und Werkzeuge	.45
	4.4	Vorge	hensweise zur Abbildung des Werkzeugverschleißes	. 53
5	Exp	eriment	telle Untersuchung der Boden-Werkzeug-Interaktionen	. 55
	5.1	Param	etertests zur Bodenbeschreibung	. 55
	5.2	Werkz	eugbelastung im Bodeneingriff	.57
		5.2.1	Kräfte am Gänsefußschar	.57
		5.2.2	Kräfte an den Probenhalterungen	. 59
	5.3	Mikro	skopische und makroskopische Materialbeanspruchung	.62
		5.3.1	Verschleißvorgänge im Feldversuch	.62
		5.3.2	Einzelbetrachtung des Verschleißmechanismus über den Kratztest .	.64
		5.3.3	Materialuntersuchungen im Dauerversuch	.66
6	Sim	ulative	Abbildung der Boden-Werkzeug-Interaktion	.75
	6.1	Partike	el- und Geometrieeigenschaften des Bodenmodells	.75
	6.2	Model	lierung der Werkzeugbelastung durch den Boden	.77
		6.2.1	Modell- und Parameterbestimmung	.78
		6.2.2	Validierung der Werkzeugbelastung	.85

	6.3	Model	llierung der Materialbeanspruchung	
		6.3.1	Implementierung und Beanspruchung im Einzelkontakt	
		6.3.2	Beanspruchung im Partikelbett	91
		6.3.3	Validierung der Materialbeanspruchung	95
		6.3.4	Beschreibung und Implementierung einer Formänderung	98
		6.3.5	Anwendung und Grenzen der Verformung	
		6.3.6	Validierung der Volumenanpassung	104
7	Fazi	it und p	raktischer Nutzen	
8	Zus	ammen	fassung	
9	Lite	raturve	rzeichnis	

### Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
$\vec{a}, \vec{b} \vec{c}$	m	Richtungsvektoren
$a_G$	m <sup>2</sup>	Fläche des Geometrieelements
$a_{K,H}$	m <sup>2</sup>	Kontaktfläche nach Hertz
$a_{K,JKR}$	m <sup>2</sup>	Kontaktfläche nach JKR
$A_D$	m <sup>2</sup>	Fläche des Dreieckelements
d	kg/m	Dämpfungskonstante
Dp		Eindringgrad
Ε	Pa	Elastizitätsmodul
E*	Pa	Äquivalenter Elastizitätsmodul
ĕ	m	Einheitsvektor
F	Ν	Kraft
$F_R$	Ν	Reibkraft
G	Pa	Schubmodul
Н	HV	Härte
$h_F$	m	Fasenhöhe
J	kg·m <sup>2</sup>	Massenträgheitsmoment des Partikels
С	Pa	Kohäsion
K		Verschleißkonstante
k	N/m	Federkonstante
K*		Kombinierte Verschleißkonstante
1	m	Länge
L	m	Reibdistanz
Μ	Nm	Moment
m	kg	Masse
$\vec{n}$	m	Normalenvektor
$n_D$		Anzahl der Dreieckflächen
n <sub>RO</sub>		Anzahl der Rechenoperationen
Р		Knotenposition
Q	m <sup>3</sup>	Verschleißvolumen
r	m	Radius

Symbol	Einheit	Beschreibung
<i>R</i> *	m	Äquivalenter Radius
R <sub>a</sub>	m	Mittenrauwert
$R_{mr(c)}$	%	Materialanteil des Profils
$r_p$	m	Partikelradius
R <sub>Sm</sub>	m	Mittlere Rillenbreite
R <sub>z</sub>	m	Gemittelte Rautiefe
S	m	Distanz
s <sub>e</sub>	m	Versuchsdistanz
S <sub>S</sub>	m	Simulationsdistanz
t	m	Arbeitstiefe
Т	m	Verschleißtiefe
to-1, t'1-2		Zeitschritt
t <sub>krit</sub>		Kritischer Zeitschritt
V	m/s	Geschwindigkeit
V	m <sup>3</sup>	Volumen
W	%	Bodenfeuchtigkeit
W	J	Arbeit
W <sub>T</sub>	%	Bodenfeuchtigkeit bezogen auf Trocken-
		masse
$\vec{x}$	m	Ortsvektor des Partikelmittelpunktes
$\ddot{\vec{x}}$	m/s	Translatorische Partikelgeschwindigkeit
α	0	Schnittwinkel
β	0	Bruchwinkel
γ	J/m <sup>2</sup>	Oberflächenenergie
δ	m	Überlappung
ε	0	Freiwinkel
ε	0	Negativer Freiwinkel
λ	0	Keilwinkel
μ		Reibbeiwert
$\mu_i$		Reibbeiwert der inneren Reibung
ρ	kg/m³	Dichte
σ	Ра	Normalspannung

Symbol	Einheit	Beschreibung
τ	Ра	Scherspannung
υ		Poissonzahl
arphi	0	Scherwinkel
$\psi$	0	Schüttwinkel
$ec{\omega}$	rad/s	Rotatorische Partikelgeschwindigkeit
К		Längenskalierung

### Abkürzungen und Indizes

Abkürzung	Bedeutung
API	Anwenderprogrammierschnittstelle (Application Programming Interface)
C++	Programmiersprache
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSV	Dateiformat Comma Separated Values
DEM	Diskrete Elemente Methode
Е	Experiment
EEPA	Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion
FEM	Finite Elemente Methode
HM	Hertz-Mindlin
HS	Hysteric-Spring
HV	Härte nach Vickers
i	Definierter Zähler
IMN	Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge
j	Definierter Zähler
JKR	Johnson, Kendall und Roberts
KMR	Kraftmessrahmen
LC	Linear Cohesion
max	Maximum

\_

Abkürzung	Bedeutung
min	Minimum
MPM	Material Point Methode
N	Zähler
n	Normalkomponente
PBM	Population Balance Models
P-G	Partikel-Geometrie
pulloff	Ablösekraft
S	Simulation
SPH	Smooth-Particle-Hydrodynamics
STL	Dateiformat Stereo Lithographie
SyncInter- vall	Synchronisierungsintervall
t	Tangentialkomponente
x, y, z	Komponente im Koordinatensystem
Δ	Differenz

XVIII