

Schneiden landwirtschaftlicher Güter mit Hochdruckwasserstrahl

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

zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Andreas Ligoeki
aus Braunschweig

Eingereicht am:	16.09.2004
Mündliche Prüfung am:	24.01.2005
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. H.-H. Harms Prof. Dr.-Ing. J. Schwedes
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-J. Matthies

2005

Forschungsberichte des Instituts für
Landmaschinen und Fluidtechnik

Andreas Ligocki

**Schneiden landwirtschaftlicher Güter
mit Hochdruckwasserstrahl**

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3941-3

ISSN 1616-1912

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Während dieser Tätigkeit ermöglichte mir der Institutsleiter, Herr Professor Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms, die Promotion. Unter seiner Leitung konnte ich das durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Projekt „Wasserstrahlschneiden“ mit der nötigen Unterstützung durchführen und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse die vorliegende Dissertation anfertigen.

Für den fachlichen Beistand, die konstruktiven Anmerkungen in der Bearbeitungsphase des Projektes sowie für die menschlich sehr angenehme Führungsform in Verbindung mit den mir entgegengebrachten großen Freiräumen, die zu meiner persönlichen Entwicklung beigetragen haben, gilt ihm an dieser Stelle mein ganz besonderer Dank.

Bei Professor Dr.-Ing. J. Schwedes bedanke ich mich für die Übernahme des Mitberichters, die gründliche Durchsicht der Arbeit sowie für seine wertvollen Hinweise und Anregungen.

Herrn Professor em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H. J. Matthies danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt darüber hinaus dem Unternehmen FLOW Europe GmbH sowie der DFG, die durch ihre finanzielle Unterstützung die Bearbeitung des Projektes ermöglicht haben.

Allen Mitarbeitern des Institutes für Landmaschinen und Fluidtechnik danke ich für die fruchtbare Zusammenarbeit, die stets durch ein außergewöhnlich freundschaftliches und kollegiales Verhältnis geprägt war. Insbesondere die mit dem Team der wissenschaftlichen Mitarbeiter geführten fachlichen Diskussionen und die mir entgegengebrachte Hilfsbereitschaft werde ich stets in sehr guter Erinnerung behalten.

Ferner gilt auch den Studierenden, die mich durch Studien- und Diplomarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte bei den Versuchen unterstützt haben, an dieser Stelle mein Dank.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meiner Familie, insbesondere meiner Frau Regina, die mir durch ihre tatkräftige Unterstützung außerhalb des Institutes die Freiräume geschaffen hat, die ich für die Bearbeitung meines Forschungsprojektes benötigt habe. Dabei hat sie mir mit ihren Ermutigungen stets den Rücken gestärkt und zusammen mit unseren zwei Kindern Lennart und Louis auf viele gemeinsame Familienstunden verzichtet. Die Arbeit widme ich aus diesem Grund meiner Frau und meinen Kindern sowie meinem Vater und meiner im Februar 2004 nach kurzer und schwerer Krankheit verstorbenen Mutter.

- Meiner Familie -

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Historische Entwicklung des Schneidens	2
1.2	Systematisierung landtechnischer Schneidmaschinen.....	5
2	Stand der Forschung und Zielsetzung der Arbeit.....	11
2.1	Konventionelle Schneidverfahren	11
2.1.1	Definition des Schneidens mit klingenbasierten Körpern	11
2.1.2	Allgemeine Untersuchungen	13
2.1.3	Anwendungsorientierte Untersuchungen und Forschungsschwerpunkte.....	17
2.2	Wasserstrahlschneiden.....	18
2.2.1	Definition des Wasserstrahlschneidens	20
2.2.2	Anlagenkomponenten	21
2.2.3	Anwendungsorientierte Untersuchungen und Forschungsschwerpunkte.....	26
2.3	Zusammenfassung und Ziele der Arbeit.....	29
3	Theoretische Betrachtungen.....	31
3.1	Gegenüberstellung der Werkzeuge Klinge und Wasserstrahl	31
3.2	Bildung und Eigenschaften des Schneidfreistrahls	33
3.3	Belastungen des Schnittgutes und Vorgänge beim Wasserstrahlschneiden	37
3.3.1	Einzeltropfenschlag	38
3.3.2	Mehrfachtropfenschlag und zusammenhängender Strahl.....	40
3.4	Schnittfronterzeugung.....	46
3.5	Besonderheiten beim Schneiden landwirtschaftlicher Güter	58
4	Experimentelle Untersuchungen	65
4.1	Versuchsaufbau	65
4.2	Versuchsparameter	72
4.3	Versuchsdurchführung	76
4.4	Versuchsauswertung.....	78

5	Versuchsergebnisse	83
5.1	Versuchsgutunabhängige Ergebnisse	83
5.1.1	Leistungs- und Wirkungsgradbetrachtungen	83
5.1.2	Wasserverbrauchskennlinien.....	85
5.2	Intensiv untersuchte Güter	87
5.2.1	Vorschub (WS).....	88
5.2.2	Schneiddruck (WS)	92
5.2.3	Abstand Düse/ Gut (WS)	96
5.2.4	Düsendurchmesser (WS)	100
5.2.5	Vorschub (WAIS).....	104
5.2.6	Abstand Düse/ Gut (WAIS).....	108
5.2.7	Abrasivmittelmenge (WAIS)	112
5.2.8	Abrasivmittelkörnung (WAIS).....	116
5.2.9	Alternative Abrasivmittel (WAIS)	120
5.2.10	Vorpressdruck Gras (WAIS).....	124
5.3	Güter zur Abschätzung des Schneidpotenzials	127
5.3.1	Maisstängel	127
5.3.2	Maiskolben.....	130
5.4	Schnittanalyse mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	133
6	Zusammenfassung	140
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	141
6.2	Hinweise für mögliche Einsatzgebiete	149
6.3	Kurzfassung	152
7	Literaturverzeichnis	153
Anhang A	166

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
A_{Auftreff}	m^2	Auftrefffläche
A_{Schnitt}	m^2	Mittlere Schnittfläche
A_{α}	m^2	Freifläche
A_{γ}	m^2	Spanfläche
a_{DG}	m	Abstand Düse/ Gut
c_{Schall}	m/s	Schallgeschwindigkeit
d_{D}	m	Düsendurchmesser
d_{F}	m	Fokussierrohrinnendurchmesser
F_{m}	N	Kraft an der Stelle m
F_{Schub}	N	Schubkraft
F_{Stau}	N	Staukraft
$F_{\text{Stoß}}$	N	Stoßkraft
K	1	Konstante zur Beschreibung der geometrischen Form eines Flüssigkeitsvolumens (nach [Kro95a])
k_{Schnitt}	m	Schnitttiefe
l_{Schnitt}	m	Schnittlänge
M_{An}	Nm	Antriebsdrehmoment
\dot{m}_{W}	kg/s	Wassermassenstrom
n_{An}	s^{-1}	Antriebsdrehzahl
p	MPa	Druck
$p_{\text{H}_2\text{O,HD}}$	MPa	Schneiddruck
$P_{\text{Hyd,Aus}}$	W	Hydraulische Leistung
$P_{\text{Mech,An}}$	W	Mechanische Antriebsleistung
$P_{\text{S,m}}$	W	Freistrahlleistung im Punkt m
$P_{\text{S,m,n}}$	W	Freistrahlleistung in Richtung m an der Stelle n
p_{Stau}	MPa	Staudruck
$p_{\text{Stoß}}$	MPa	Stoßdruck
$Q_{\text{H}_2\text{O,HD}}$	m^3/s	Schneidvolumenstrom

S_m	m	Schnittfrontverzug zum Zeitpunkt m
S_{Schnitt}	m	Schnittweg
t	s	Zeit
t_{Ein}	s	Strahleinwirkdauer
t_m	s	Zeit zum Zeitpunkt m
t_{Schnitt}	s	Schnittzeit
$V_{\text{H}_2\text{O},\text{Schnitt}}$	m^3	Schnittwasservolumen
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{Ab}	m/s	Radiale Abflussgeschwindigkeit
$v_{\text{A},m}$	m/s	Abtragsgeschwindigkeit in Richtung m
$v_{\text{A},m,n}$	m/s	Abtragsgeschwindigkeit in Richtung m, an der Stelle n
$v_{\text{A},\text{Res}}$	m/s	Resultierende Abtragsgeschwindigkeit
$v_{\text{A},\text{Res},m}$	m/s	Resultierende Abtragsgeschwindigkeit im Punkt m
$v_{\text{A},z,\text{theo}}$	m/s	Theoretische Abtragsgeschwindigkeit in z-Richtung
v_{D}	m/s	Düsengeschwindigkeit
$v_{\text{D},m}$	m/s	Düsengeschwindigkeit in Richtung m
v_{K}	m/s	Klingengeschwindigkeit
$v_{\text{K},m,n}$	m/s	Klingengeschwindigkeit in Richtung m, an der Stelle n
v_n	m/s	Normalgeschwindigkeit
v_{P}	m/s	Partikelgeschwindigkeit
v_{S}	m/s	Strahlgeschwindigkeit
$v_{\text{S},m}$	m/s	Strahlgeschwindigkeit in Richtung m
$v_{\text{S},m,n}$	m/s	Klingengeschwindigkeit in Richtung m, an der Stelle n
$v_{\text{S},\text{Res}}$	m/s	Resultierende Strahlgeschwindigkeit
$v_{\text{S},\text{Res},m}$	m/s	Resultierende Strahlgeschwindigkeit im Punkt m
v_t	m/s	Tangentialgeschwindigkeit
W_{Aktiv}	Nm	Aktivierungsenergie
$W_{\text{Aktiv},m,n}$	Nm	Aktivierungsenergie in Richtung m, an der Stelle n
$W_{\text{A},m,n}$	Nm	Abtragsenergie in Richtung m, an der Stelle n
$W_{\text{Dämpf},\text{Abrasive}}$	Nm	Energie infolge Abrasivmitteldämpfung
$W_{\text{Dämpf},\text{Abtrag}}$	Nm	Energie infolge Abtragsmaterialdämpfung

$W_{\text{Dämpf,H}_2\text{O}}$	Nm	Energie infolge Wasserdämpfung
W_{Reib}	Nm	Energie infolge Reibung
$W_{\text{S,m}}$	Nm	Strahlenergie im Punkt m
$W_{\text{S,m,n}}$	Nm	Freistrahlergie in Richtung m, an der Stelle n
$W_{\text{S,m,spez}}$	Nm/m ²	Spezifische Strahlenergie im Punkt m
x_D	1	Laufvariable der Düse in x-Richtung
x_K	1	Laufvariable der Klinge in x-Richtung
z_D	1	Laufvariable der Düse in z-Richtung
z_K	1	Laufvariable der Klinge in z-Richtung
α	Grad	Freiwinkel
α_{Auftreff}	Grad	Auftreffwinkel
α_D	1	Durchflussziffer
α_K	Grad	Krümmungswinkel der Schnittfront
$\alpha_{K,\text{Grenz}}$	Grad	Grenzwinkel der Stufeninitiierung
$\alpha_{K,m}$	Grad	Krümmungswinkel der Schnittfront im Punkt m
α_S	Grad	Strahlneigung infolge Vorschub
β	Grad	Keilwinkel
γ	Grad	Spanwinkel
δ	Grad	Schneidwinkel
ε	1	Expansionszahl
ζ	1	Widerstandsbeiwert
η_{System}	1	Systemwirkungsgrad
λ	Grad	Neigungswinkel des Messers
μ	1	Reibbeiwert
ρ_{Fm}	kg/m ³	Feuchtmassendichte
ρ_0	kg/m ³	Dichte von Wasser bei 0,1 MPa ($\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$)
τ	N/m ²	Schubspannung
Ω	1	Zügigkeit

Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
LT	Landtechnik
WS	Reinwasserstrahl
WAIS	Wasserabrasivinjektorstrahl
WAS	Wasserabrasivstrahlen
WASS	Wasserabrasivsuspensionsstrahl
HD	Hochdruck