

# **Die Verdichtung von Laub in Rundballenpressen**

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. Ingo Bönig  
aus Braunschweig

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Eingereicht am:       | 13.01.2006  |
| Mündliche Prüfung am: | 20.06.2006  |
| Referenten:           | Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms<br>Prof. Dr.-Ing. J. Schwedes |
| Vorsitzender:         | Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-J. Matthies                       |
|                       | 2006  |



Forschungsberichte des Instituts für Landmaschinen und  
Fluidtechnik

**Ingo Bönig**

## **Die Verdichtung von Laub in Rundballenpressen**

Shaker Verlag  
Aachen 2006

**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., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5430-7

ISBN-13: 978-3-8322-5430-8

ISSN 1616-1912

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 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 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms, dem Leiter des Institutes für Landmaschinen und Fluidtechnik der Technischen Universität Braunschweig, der mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat. Unter seiner Leitung konnte ich die Arbeiten zum Forschungsprojekt „Laubverdichtung“ mit der notwendigen fachlichen und menschlichen Unterstützung durchführen und den gewährten Freiraum zur selbständigen Arbeit nutzen. Für die konstruktiven Anregungen und die persönliche Förderung möchte ich mich bei Ihm bedanken.

Bei Prof. Dr.-Ing. J. Schwedes bedanke ich mich für die Übernahme des Mitberichters sowie für seine wertvollen Anregungen und Hinweise.

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

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes für Landmaschinen und Fluidtechnik danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit und Unterstützung. Die vielen interessanten und konstruktiven Gespräche unter den wissenschaftlichen Mitarbeitern haben ebenso zum Gelingen der Arbeit beigetragen wie die gute Zusammenarbeit mit der Werkstatt und der Messtechnik.

Auch den Studierenden, die mich durch Studien- und Diplomarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskraft bei den Versuchen unterstützt haben, hierzu zählt insbesondere Herr Robert Thiess, gilt mein Dank.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie für die konstruktive und solidarische Unterstützung, die einen wesentlichen Anteil am Gelingen der vorliegenden Arbeit bildete.



---

## Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1      | Stand der Technik bei der Laubbergung.....                             | 2         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Forschung bei der Verdichtung organischer Stoffe.....</b> | <b>8</b>  |
| 2.1      | Normaldruckpressverfahren.....   | 8         |
| 2.2      | Eigene Voruntersuchungen zum Normaldruckpressverfahren .....           | 20        |
| 2.3      | Radialdruckpressverfahren .....  | 23        |
| 2.4      | Eigene Voruntersuchungen zum Radialdruckpressverfahren.....            | 34        |
| 2.5      | Zusammenfassung und Ziele dieser Arbeit.....                           | 37        |
| <b>3</b> | <b>Grundlegende Betrachtungen zur Verdichtung von Laub .....</b>       | <b>38</b> |
| 3.1      | Eigenschaften von Laub .....   | 38        |
| 3.1.1    | Einfluss der Blattform und -größe.....                                 | 39        |
| 3.1.2    | Einfluss des Feuchtegehaltes.....                                      | 40        |
| 3.2      | Systematik und Auswahl eines Verdichtungsverfahrens.....               | 44        |
| 3.2.1    | Anforderungen an das Verdichtungsverfahren.....                        | 44        |
| 3.2.2    | Systematische Auswahl eines geeigneten Verdichtungsverfahrens .....    | 45        |
| 3.3      | Konstruktion einer Rundballenpresse zur Verdichtung von Laub .....     | 49        |
| 3.4      | Funktionsweise und Wirkprinzipien.....                                 | 52        |
| 3.4.1    | Belastungen am Presskammerumfang.....                                  | 54        |
| 3.4.2    | Belastungen an den Presskammerseitenwänden .....                       | 58        |
| 3.4.3    | Belastungen an den Presskammerverschlüssen.....                        | 59        |
| 3.4.4    | Antriebsleistungsbedarf.....   | 64        |
| 3.4.5    | Drehzahl- und Durchsatzeinflüsse .....                                 | 66        |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>Experimentelle Untersuchungen</b> .....                        | <b>68</b>  |
| 4.1      | Versuchsaufbau .....  | 68         |
| 4.2      | Versuchsdurchführung .....  | 72         |
| 4.3      | Versuchsauswertung .....  | 73         |
| <b>5</b> | <b>Versuchsergebnisse</b> .....                                   | <b>81</b>  |
| 5.1      | Qualitative Ergebnisse des Pressvorganges .....                   | 81         |
| 5.2      | Betriebstechnische Parameter .....                                | 83         |
| 5.2.1    | Durchsatz .....   | 83         |
| 5.2.2    | Stabkettengeschwindigkeit .....                                   | 89         |
| 5.3      | Gutspezifische Parameter .....                                    | 96         |
| 5.3.1    | Gutfeuchte .....  | 96         |
| 5.3.2    | Laubsorte .....   | 104        |
| <b>6</b> | <b>Wirtschaftliche Betrachtungen</b> .....                        | <b>110</b> |
| <b>7</b> | <b>Bewertung der Ergebnisse und Hinweise für die Praxis</b> ..... | <b>116</b> |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung</b> .....                                      | <b>120</b> |
| <b>9</b> | <b>Literatur</b> .....  | <b>121</b> |

## Formelzeichen

| Zeichen                           | Einheit                             | Größe   |
|-----------------------------------|-------------------------------------|---|
| $\dot{m}_{TM}$                    | kg/s                                | Trockenmassedurchsatz   |
| $\dot{m}$ , $\dot{m}_m$           | kg/s                                | Mittlerer Halmgutstrom  |
| A                                 | m <sup>2</sup>                      | Presskolbenfläche   |
| A <sub>1</sub>                    | -                                   | Parameter in Glg. 4.6   |
| a, b                              | -                                   | Zahl der eingesetzten Personen der jeweiligen Kategorie               |
| b <sub>Pr</sub>                   | m                                   | Presskammerbreite   |
| C                                 | bar(m <sup>3</sup> /t) <sup>m</sup> | Stoffwert für das Skalweitsche Potenzgesetz                           |
| d <sub>Pr</sub>                   | m                                   | Presskammerdurchmesser  |
| E                                 | N/mm <sup>2</sup>                   | Elastizitätsmodul   |
| E <sub>max</sub> (Δρ)             | -                                   | Expansionsfunktion  |
| F                                 | N                                   | Sondeneindringwiderstand  |
| F <sub>0x</sub> , F <sub>0y</sub> | N                                   | Horizontale und vertikale Kraftkomponente im Drehpunkt der Heckklappe |
| F <sub>G, Ballen</sub>            | N                                   | Resultierende Gewichtskraft des Ballens auf die Heckklappe            |
| F <sub>ges</sub>                  | N                                   | Resultierende Gesamtkraft an den Heckklappenverschlüssen              |
| F <sub>HK, links</sub>            | N                                   | Kraft im linken Heckklappenverschluss                                 |
| F <sub>HK, rechts</sub>           | N                                   | Kraft im rechten Heckklappenverschluss                                |
| f <sub>i</sub>                    | m                                   | Hebelarm der rollenden Reibung  |
| F <sub>K</sub>                    | N                                   | Kraft am Presskolben  |
| F <sub>K</sub>                    | N                                   | Zugkraft in der Stabkette   |
| F <sub>N</sub>                    | N                                   | Normalkraft   |
| F <sub>r</sub>                    | N                                   | Radialkraft am Ballen   |
| F <sub>R</sub>                    | N                                   | Reibkraft   |
| F <sub>r, Si, i</sub>             | N                                   | Radialdruckkraft des Stabes I auf der Heckklappe                      |
| F <sub>Reib, i</sub>              | N                                   | Reibkraft des Lagers des Stabes i an der Führungsschiene              |
| F <sub>Reib, R, i</sub>           | N                                   | Reibkraft des Lagers des Stabes i auf die Rücklaufschiene             |
| F <sub>res, i</sub>               | N                                   | Resultierende Kraft im Punkt i  |
| F <sub>ri</sub>                   | N                                   | Radialkraft im Punkt i  |

---

|                    |          |  |
|--------------------|----------|--|
| $F_S$              | N        | Seitenwandreibkraft                              |
| $F_{li}$           | N        | Tangentialkraft im Punkt i                       |
| $F_V$              | N        | Kraft in den Heckklappenverschlüssen             |
| $G_0$              | N        | Gewicht einer Druckplatte                        |
| I                  | -        | Intensität der mechanischen Aufbereitung         |
| $K_{An}$           | €        | Anschaffungspreis                                |
| $K_{Container}$    | €        | Transportkosten für einen Container              |
| $K_M$              | €/a      | Maschinenkosten pro Jahr                         |
| $K_P$              | €        | Personalkosten                                   |
| $K_{P,Fahrer}$     | €/h      | Lohnkosten für einen Fahrer                      |
| $K_{P,Hilfskraft}$ | €/h      | Lohnkosten für einen Hilfsarbeiter               |
| $K_T$              | €        | Transportkosten                                  |
| L                  | m        | Häcksellänge                                     |
| l                  | m        | Hebelarm der Reibkraft an der Seitenwand         |
| $l_0$              | m        | Presskanallänge                                  |
| $l_U$              | m        | Länge des Verdichtungsraumes vor der Verdichtung |
| m                  | -        | Stoffwert für das Skalweitsche Potenzgesetz      |
| M                  | Nm       | Drehmoment an Umlenkrolle 1                      |
| $M_0$              | kg       | Eingefüllte Halmgutmasse                         |
| $M_{An}$           | Nm       | Gesamtantriebsmoment                             |
| $m_B$              | kg       | Ballenmasse                                      |
| $M_{ges,m}$        | Nm       | Mittleres Gesamtdrehmoment                       |
| $M_R$              | Nm       | Reibmoment an der Presskammerseitenwand          |
| $M_{Reib,St}$      | Nm       | Drehmoment aus Lagerreibung                      |
| $M_S$              | Nm       | Reibmoment an der Seitenwand                     |
| $M_{TM0}$          | kg       | Halmguttrockenmasse im Pressraum                 |
| $M_W$              | Nm       | Ballendrehwiderstandsmoment durch Walken         |
| $N(t)$             | -        | Nachverdichtungsfunktion                         |
| $n_{An}$           | $s^{-1}$ | Antriebsdrehzahl                                 |
| $n_{Anzahl}$       | -        | Gesamtanzahl der zu entsorgenden Container       |
| $O_B$              | -        | Ballenmittelpunkt                                |
| p                  | MPa      | Verdichtungsdruck                                |

---

|                 |          |   |
|-----------------|----------|---|
| $p_l$           | MPa      | Längsdruck  |
| $p_a$           | MPa      | Axialdruck  |
| $P_{An}$        | kW       | Erforderliche Antriebsleistung  |
| $P_{An, spez.}$ | kW/(t/h) | Spezifische Antriebsleistung  |
| $p_B$           | MPa      | Bodendruck  |
| $p_E$           | MPa      | Expansionsdruck   |
| $p_{E0}$        | MPa      | Expansionsdruck ( $\Delta p_E = 0\%$ )  |
| $p_{Emax}$      | MPa      | Maximaler Expansionsdruck nach Expansionsdruckanstieg                                     |
| $p_K$           | MPa      | Presskolbendruck  |
| $P_{Kmax}$      | MPa      | Maximaler Presskolbendruck  |
| $p_r$           | MPa      | Radialdruck an der Ballenoberfläche   |
| $p_S$           | MPa      | Seitenwanddruck   |
| $p_{t0}$        | MPa      | Relaxationsdruck ( $t = 0s$ )   |
| $R$             | N        | Reibkraft   |
| $R(t)$          | -        | Relaxationsfunktion   |
| $r_0$           | m        | Hebelarm der Auflagerkräfte im Drehpunkt der Heckklappe                                   |
| $RF$            | %        | Rohfasergehalt des Gutes  |
| $r_G$           | m        | Hebelarm des Angriffspunktes der resultierenden Gewichtskraft des Ballens im Punkt G      |
| $r_{mm}$        | m        | Hebelarm der resultierenden Stabkettenzugkraft aus den Zugkräften $F_{K,m}$ und $F_{K,n}$ |
| $r_{Pr}$        | m        | Presskammerradius   |
| $r_{Pr, theo.}$ | m        | Theoretischer Presskammerradius   |
| $r_{Reib,i}$    | m        | Hebelarm der Reibkraft des Lagers des Stabes $i$ an der Führungsschiene                   |
| $r_{Reib,R,i}$  | m        | Hebelarm der Reibkraft des Lagers des Stabes $i$ auf die Rücklaufschiene                  |
| $r_{St,i}$      | m        | Hebelarm der Radialdruckkraft des Stabes $i$  |
| $r_V$           | m        | Hebelarm der Heckklappenverschlusskräfte  |
| $s$             | m        | Weg des Presskolbens bei der Verdichtung  |
| $t$             | s        | Zeit  |
| $t_0$           | s        | Beginn der Relaxation und Nachverdichtung ( $t = 0s$ )                                    |
| $t_l$           | -        | Parameter in Glg. 4.6   |

---

|                                |                          |   |
|--------------------------------|--------------------------|---|
| $t_E$                          | s                        | Ende der Relaxation und Nachverdichtung ( $t = t_E$ ) |
| $t_{E\text{insatz}}$           | h                        | Geleistete Arbeitsstunden                             |
| $t_{\text{Nutz}}$              | a                        | Nutzungsdauer   |
| U                              | %                        | Feuchtegehalt des Gutes                               |
| v                              | m/s                      | Verdichtungsgeschwindigkeit                           |
| $v_B$                          | m/s                      | Ballenumfangsgeschwindigkeit                          |
| $v_K$                          | m/s                      | Presskolbengeschwindigkeit                            |
| $V_{KE}$                       | m/s                      | Expansionsgeschwindigkeit                             |
| $V_{Pr}$                       | m <sup>3</sup>           | Volumen der Presskammer                               |
| $v_{U,Wa}$                     | m/s                      | Umfangsgeschwindigkeit einer Walze                    |
| $v_{VTM}$                      | m/s · m <sup>2</sup> /kg | Verdichtungsgeschwindigkeit auf Trockenmasse bezogen  |
| x                              | m                        | Laufkoordinate  |
| $y_0$                          | -                        | Parameter in Glg. 4.6                                 |
| $\alpha$                       | °                        | Anstellwinkel der Spannschienen                       |
| $\eta_K$                       | -                        | Wirkungsgrad des Kettentriebes                        |
| $\varphi$                      | -                        | Seitenwandflächenverhältnis                           |
| $\lambda$                      | -                        | Druckverhältniswert                                   |
| $\mu, \mu_0$                   | -                        | Gleitreibbeiwert, Haftreibbeiwert                     |
| $\mu_{\text{außen}}$           | -                        | Reibbeiwert Blatt – umgebendes Material               |
| $\mu_{\text{innen}}$           | -                        | Reibbeiwert Blatt – Blatt                             |
| $\rho$                         | kg/m <sup>3</sup>        | Mittlere Pressdichte                                  |
| $\rho_0$                       | kg/m <sup>3</sup>        | Einfülldichte   |
| $\rho_{FM}$                    | kg/m <sup>3</sup>        | Feuchtmassedichte                                     |
| $\rho_{\text{max}}$            | kg/m <sup>3</sup>        | Maximale Pressdichte                                  |
| $\rho_{\text{mittel, th}}$     | kg/m <sup>3</sup>        | Mittlere theoretische Pressdichte                     |
| $\rho_m, \rho_{\text{mittel}}$ | kg/m <sup>3</sup>        | Mittlere Pressdichte                                  |
| $\rho_R$                       | kg/m <sup>3</sup>        | Reindichte  |
| $\rho_{t0}$                    | kg/m <sup>3</sup>        | Nachverdichtungsdichte ( $t = 0s$ )                   |
| $\rho_{th}$                    | kg/m <sup>3</sup>        | Theoretische Pressdichte                              |

---

|                |                 |                                       |
|----------------|-----------------|---------------------------------------|
| $\rho_{TM}$    | $\text{kg/m}^3$ | Trockenmassedichte                    |
| $\Delta\rho_E$ | %               | Expansionsgrad                        |
| $\tau_S$       | MPa             | Schubspannung an den Seitenwänden     |
| $\tau_U$       | MPa             | Tangentiale Schubspannung             |
| $\omega_B$     | $\text{s}^{-1}$ | Winkelgeschwindigkeit des Rollballens |
| $\omega_{St}$  | $\text{s}^{-1}$ | Winkelgeschwindigkeit der Stabkette   |
| $\psi$         | $^\circ$        | Drehwinkel des Rollballens            |