

- [12] *Schneider, B. u. W. Müller:* Zur Frage des Wärme-, Wasserdampf- und CO₂-Anfalls in Schweinemast- und Milchviehställen. Tierärztliche Umschau Bd. 40 (1985) Nr. 9, S. 682/88.
- [13] *Niethammer, F.:* Messen und Berechnen von Luftmassenströmen in Luftförderanlagen. Vortrag bei einer Tagung des Förderkreises Stallklima am 17.9.1987 in Kleve.
- [14] *Abshoff, A.:* Stallklima-Ansprüche und technische Ausführungen. Baubriefe Echem Nr. 19, S. 13/18. Echem: Lehr- und Versuchsanstalt für Viehhaltung, 1977.
- [15] ● *Ergebnisse und Auswertungen der Fleischleistungsprüfung 1986.* Schriftenreihe des Landeskuratoriums der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e.V. München: 1986..
- [16] *Heindl, W.:* Zum instationären Verhalten von Wärmebrücken. Bauphysik Bd. 4 (1982) Nr. 4, S. 145/46.
- [17] *Janssen, J. u. F. Schoedder:* Ableitung von Luftzustandsgrößen aus meteorologischen Daten. Grundle. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 3, S. 81/90.
- [18] *Englert, G.:* Kennwerte für den wirtschaftlichen Wärmeschutz. Bayer. Landw. Jahrbuch Bd. 64 (1987) Nr. 4, S. 433/39.

Verdichtung und Expansion von Halmgut

Von Klaus-Peter Wolf-Regett, Braunschweig*)

DK 631.364:633.004.12

Die hohen Expansionskräfte von quaderförmigen Großballen stellen besonders hohe Anforderungen an die Bindeapparate von Großballen-Kolbenpressen und an die Zugfestigkeit der Ballenbindemittel. Da sich die Zugfestigkeit des Bindemittels aus Material- und Kostengründen nicht beliebig steigern läßt, gewinnt die Frage, wie der das Ballenbindemittel belastende Expansionsdruck im Ballen reduziert werden kann, eine besondere Bedeutung für weitere Entwicklungsanstrengungen auf dem Gebiet der Großballen-Kolbenpressen.

In diesem Beitrag wird über eine Forschungsarbeit berichtet, die sich neben der Verdichtung in erster Linie mit dem Verhalten des Halmgutes nach dem Verdichtungs Vorgang befaßt. Es wird die verwendete Versuchsanordnung sowie deren Meß- und Auswertetechnik vorgestellt und über die wesentlichen Forschungsergebnisse berichtet.

1. Einleitung

Mit der Einführung der Großballenpressen in den 70er Jahren wurde ein neuer Ansatz für die Mechanisierung der Ballenbergrung bei der Halmguternte geschaffen. Die auf der Grundlage der frontladergerechten Balleneinheit erreichte Vollmechanisierung führte zu einer raschen Fortentwicklung und Verbreitung der Großballenpressen.

Neben den Großballen-Rollpressen, deren Produktionszahlen mittlerweile in der gleichen Größenordnung wie die der Hochdruckpressen liegen, gewinnen die Großballen-Kolbenpressen, trotz der relativ hohen Investitionskosten, eine ständig zunehmende Bedeutung. Die Gründe hierfür sind:

- Der quaderförmige Ballen stellt hinsichtlich der Ausnutzung der Transport- und Lagerraumkapazität die optimale Ballenform dar.
- Die erreichbaren Ballendichten sind mit etwa 150 kg/m³ bei Stroh um 30–40 % höher als bei Rollballen.
- Die erweiterten Einsatzmöglichkeiten; neben der Stroh- und Heubergung ist auch die Bereitung von Anwelksilage in Form der Ballensilage möglich.

Für die Konstruktion und den Einsatz von Großballen-Kolbenpressen, die auch als Großballen-Packenpressen oder Rechteck-Großballenpressen bezeichnet werden, stellen die aus der großen Ballenquerschnittsfläche resultierenden hohen Expansionskräfte der quaderförmigen Großballen ein besonderes Problem für die automatischen Bindeapparate und das Ballenbindemittel dar. Bei den heutigen Pressenkonstruktionen wird die maximal erreichbare Ballendichte häufig nicht durch das Preßvermögen der Presse, sondern durch die Zugfestigkeit des Ballenbindemittels begrenzt. Da sich die Zugfestigkeit aus Material- und Kostengründen nicht beliebig steigern läßt, ist für die Weiterentwicklung von Großballen-Kolbenpressen die Kenntnis der im Ballen auftretenden Expansionskraft und ihrer Abhängigkeiten von den Konstruktionsparametern der Presse und von den Parametern des Halmgutes von großem Interesse. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Eigenschaften von Halmgut nach der Verdichtung näher zu untersuchen.

2. Aufgabenstellung und Forschungsumfang

In einer Normaldruck-Ballenpresse wird das Halmgut portionsweise zu Preßpaketen in den Preßkanal gepreßt und dort nach der Verdichtung durch die Seitenwandreibkräfte (und z.T. zusätzlich durch mechanische Elemente) zusammengehalten. Jedes Preßpaket verweilt eine bestimmte Zeit, die von mehreren Konstruktions- und Betriebsparametern abhängig ist, im Preßkanal und wird anschließend im abgebundenen Ballen ausgeschoben. Während des Aufenthaltes im Preßkanal wird das Preßpaket aufgrund des sich periodisch wiederholenden Verdichtungs Vorganges in mehrmaligem Wechsel entweder bei konstanter Preßdichte zusammengehalten – die Relaxation bewirkt in dieser Phase eine Absenkung des Verdichtungsdruckes über der Zeit – oder mit einem annähernd konstanten Verdichtungsdruck beaufschlagt – die Nachverdichtung bewirkt in dieser Phase einen Anstieg der Preßdichte über der Zeit –. Die konstruktiv bedingte Fadenlose der automatischen Bindeapparate ermöglicht anschließend beim Ausschub des Ballens aus dem Preßkanal eine teilweise Expansion der Preßpakete.

*) Dipl.-Ing. K.-P. Wolf-Regett ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. H.J. Matthes) der TU Braunschweig

In der landtechnischen Forschung wurden bisher schon zahlreiche Untersuchungen zur Verdichtung von landwirtschaftlichem Halmgut durchgeführt, insbesondere die Arbeiten von *Skalweit* [1], *Mewes* [2, 3], *Sacht* [4] und *Kutzbach* [5] liefern einen wesentlichen Beitrag zur Ermittlung der Stoffgesetze im Verdichtungsdruckbereich der Ballenpressen $100 \text{ kPa} \leq p \leq 1000 \text{ kPa}$. Mit der in diesem Beitrag vorgestellten Forschungsarbeit sollten bislang fehlende Erkenntnisse zur Relaxation, Nachverdichtung und Expansion von verdichtetem Halmgut erarbeitet werden. Bei der Bearbeitung des Themas war es ein wesentlicher Gesichtspunkt, mit den Ergebnissen praxisbezogene Hinweise für die Konstruktion, Entwicklung und den Einsatz von Kolbenpressen formulieren zu können.

Bild 1 zeigt eine Gegenüberstellung der Untersuchungsgegenstände der Forschungsarbeit und der Einflußgrößen, die für die Untersuchungsgegenstände von Bedeutung sind.

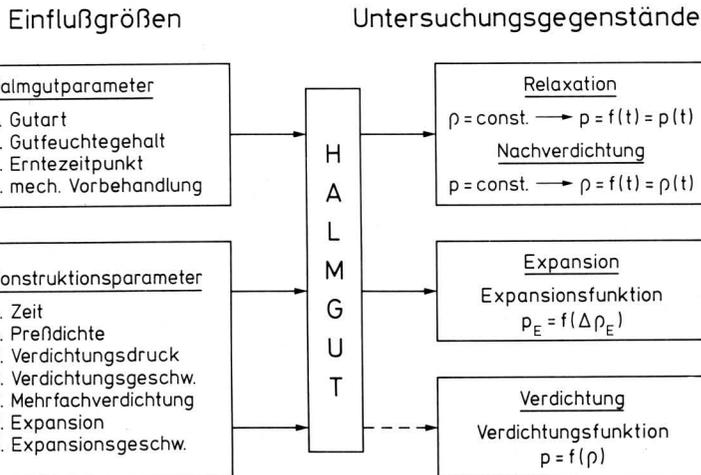


Bild 1. Untersuchungsgegenstände und Einflußgrößen bei der Erforschung des Verdichtungsverhaltens von Halmgut.

- Relaxation und Nachverdichtung: Auf die quasi-viskoelastischen Eigenschaften von verdichtetem Halmgut weisen erstmals *Mewes* [6] und *Scheffter* [7] in ihren Untersuchungen zum Verdichtungs Vorgang hin. Für die Untersuchung dieser Halmguteigenschaften müssen nach der Verdichtung die Versuchsbedingungen zeitlich konstante Preßdichte $p = \text{const} \rightarrow p = f(t) = p(t)$ (Relaxation) und zeitlich konstanter Verdichtungsdruck $p = \text{const} \rightarrow \rho = f(t) = \rho(t)$ (Nachverdichtung) unterschieden werden.
- Expansion: Die konstruktive Gestaltung der automatischen Bindeapparate von Ballenpressen bedingt eine gewisse Überlänge des Ballenbindemittels – die Ursachen hierfür wurden von *Matthies* [8] dargestellt –, so daß eine teilweise Expansion des Ballens möglich ist. Bei der Expansion wird der Abfall des Expansionsdruckes in der Form $p_E = f(\Delta \rho_E)$, d.h. als Funktion des Expansionsgrads

$$\Delta \rho_E = \frac{\rho_{\max} - \rho}{\rho_{\max}} 100 \% \quad (1)$$
 ermittelt.
- Verdichtung: Wenn auch der Verdichtungs Vorgang als weitgehend bekannt angesehen werden kann, so ist doch zur eindeutigen Bestimmung der Ausgangsbedingungen für die Relaxation, die Nachverdichtung und die Expansion die jeweilige Erfassung der Verdichtung vorzunehmen. Die Verdichtung wird durch die Verdichtungsfunktion, die den Zusammenhang zwischen dem Verdichtungsdruck p und der Preßdichte ρ beschreibt, charakterisiert. Im Verdichtungs-

druckbereich der Ballenpressen ist die Verdichtungsfunktion durch das *Skalweitsche* Potenzgesetz [1]

$$p = C \rho^m \quad (2)$$

beschreibbar.

Die untersuchten Einflußgrößen lassen sich gemäß Bild 1 in die Gruppe der Halmgut- und der Konstruktionsparameter unterteilen.

3. Versuchs- und Meßaufbau

Die schematische Darstellung des mechanischen Teils der Versuchseinrichtung in **Bild 2** zeigt die prinzipielle Anordnung der Bauteile Preßkanal, Preßkolben (hydrostatischer Antrieb) und Expansionskolben (elektromechanischer Antrieb) in drei charakteristischen Versuchsphasen. Darüber hinaus werden die auf der Seite des Preß- und des Expansionskolbens meßtechnisch zu erfassenden Größen angegeben.

Das Halmgut wird im Preßkanal durch den hydrostatisch angetriebenen Preßkolben gegen den während der Verdichtung feststehenden Expansionskolben verdichtet (Prinzip der Kastenpresse). Der Preßkanal hat die Querschnittsabmessungen $240 \times 240 \text{ mm}$, der Weg des Preßkolbens beträgt maximal 1000 mm . Das verdichtete Preßpaket wird nach dem Verdichtungs Vorgang in der eigentlichen Versuchszeit entweder bei konstanter Preßdichte zusammengehalten (Relaxation) oder mit einem konstanten Verdichtungsdruck beaufschlagt (Nachverdichtung).

Nach Abschluß des Verdichtungs Vorganges befindet sich das Preßpaket in einem Teil des Preßkanals, dessen Seitenwände geöffnet werden können, so daß eine Expansion bei zurückweichendem Expansionskolben ohne Seitenwandreibung möglich ist. Die Expansion des Halmgutes ohne Seitenwandreibung entspricht den Bedingungen in der Praxis; bei den Ballenpressen expandiert das verdichtete Halmgut nach Verlassen des Preßkanals (Prinzip der Strangpresse) bzw. Preßraumes (Prinzip der Kastenpresse) ohne Seitenwandreibung in die Fadenlose hinein.

Durch die Aufteilung von Verdichtungs- und Expansionsbewegung auf zwei Kolben und durch die Kombination eines hydrostatischen Antriebes für den Preßkolben mit einem elektromechanischen Antrieb für den Expansionskolben lassen sich die unterschiedlichen Versuchsabläufe und die Variation der Versuchsparameter auf einfache Weise realisieren.

Relaxation bei konstanter Dichte mit anschließender Expansion

Der Hydrozylinder des Preßkolbens wird bis zum Endanschlag ausgefahren und bleibt während der Versuchszeit druckbeaufschlagt in dieser Lage. Die Variation der vorgesehenen Preßdichte wird über die Einfüllmenge und über die Positionierung des Expansionskolbens vorgenommen. Nach der Ermittlung der Relaxation wird der Preßkanal geöffnet und das Preßpaket kann bei zurückweichendem Expansionskolben expandieren.

Nachverdichtung bei konstantem Preßdruck mit anschließender Expansion

Der gewünschte Preßdruck wird durch ein Druckbegrenzungsventil im hydrostatischen Antriebsteil des Preßkolbens eingestellt und über der Zeit konstant gehalten. Der Hydrozylinder des Preßkolbens erreicht während der Nachverdichtung nicht seinen Endanschlag. Nach der Ermittlung der Nachverdichtung wird der Preßkolben arretiert, der Preßkanal geöffnet und das Preßpaket kann anschließend bei Zurücknahme des Expansionskolbens expandieren. Die Verstellpumpe des hydrostatischen Preßkolbenantriebes ermöglicht eine stufenlose Einstellung der Preßkolbengeschwindigkeit im Bereich von $v_K = 0-0,5 \text{ m/s}$. Der maximal erreichbare Verdichtungsdruck beträgt $p = 1000 \text{ kPa}$. Der Variator im elektromechanischen Antrieb des Expansionskolbens ermöglicht in Verbindung mit einem Getriebe eine stufenlose Einstellung der Geschwindigkeit des Expansionskolbens im Bereich von $v_{KE} = (1-10) 10^{-3} \text{ m/s}$.

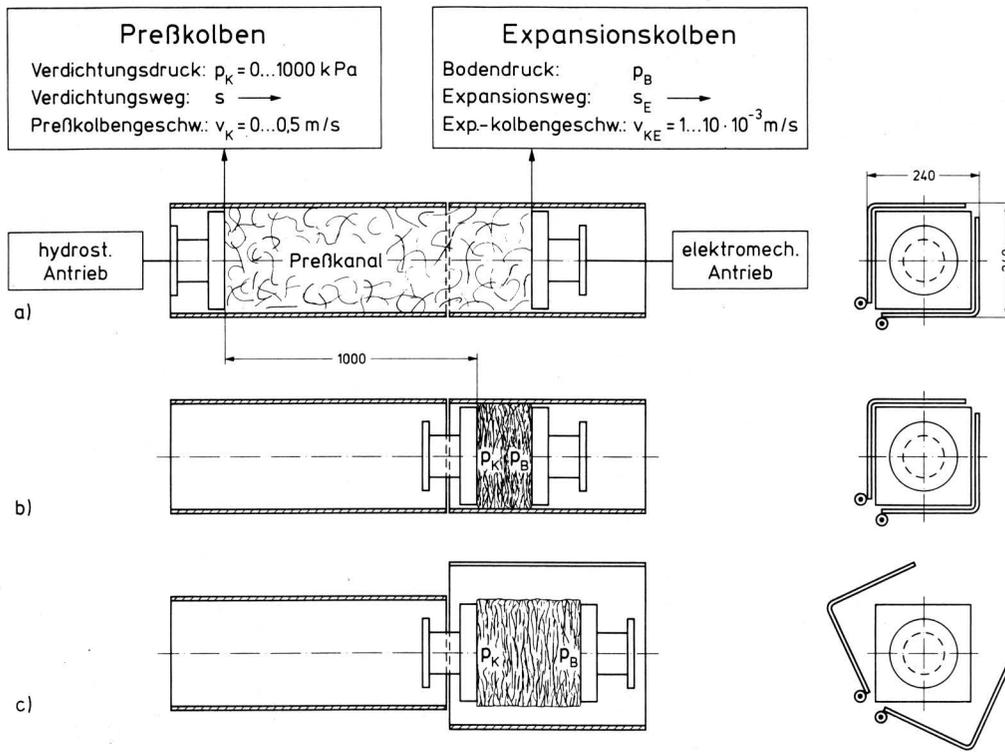


Bild 2. Schematische Darstellung der Versuchsanordnung in drei charakteristischen Versuchsphasen.
 a vor der Verdichtung
 b nach der Verdichtung (Relaxation und Nachverdichtung)
 c während der Expansion

Zur Ermittlung des Verdichtungs- und des Bodendruckes werden zwei speziell für diesen Einsatzfall entwickelte Druckkraftaufnehmer eingesetzt. Die beiden Druckkraftaufnehmer sind baugleich als Preß- bzw. Expansionskolben ausgebildet, ihr Meßbereich beträgt 0–60 kN. Die Bewegungen des Preß- und des Expansionskolbens werden jeweils über einen induktiven Wegaufnehmer aufgezeichnet. Zur besseren Auflösung des 1000 mm langen Preßkolbenweges ist zur Ermittlung der Nachverdichtung eine Parallelschaltung eines zweiten induktiven Wegaufnehmers für die letzten 200 mm des Kolbenweges vorgesehen. Die Ermittlung der Geschwindigkeiten des Preß- und des Expansionskolbens erfolgt durch Differentiation der Wegsignale in einem Auswerterechner, so daß insgesamt fünf Meßkanäle ausreichend sind.

Die Meßsignale der zwei Druckkraftaufnehmer und der drei induktiven Wegaufnehmer werden über angepaßte Meßverstärker verstärkt, **Bild 3**, und einer weiteren rechnergestützten Auswertereinheit zugeführt. Für die Auswertetechnik stellt die unterschiedliche zeitliche Dauer der einzelnen Versuchsphasen (Verdichtungsphase $t = 2-10$ s, Relaxations- bzw. Nachverdichtungsphase $t = 0-200$ s, Expansionsphase $t = 5-20$ s) ein besonderes Problem dar. Werden die einzelnen analogen Meßsignale mit einer konstanten Abtastfrequenz über alle Versuchsphasen digitalisiert, so ist bei vorgegebener Speicherplatzkapazität eine zufriedenstellende Auflösung der Versuchsphasen mit kurzer Dauer nicht möglich. Durch die Integration eines digitalen Zwischenspeichers mit variabler Abtastfrequenz und entsprechender Steuereinheit in den meß- und auswertetechnischen Aufbau kann sowohl eine zeitliche Streckung der kurzen Verdichtungs- und Expansionsphase durch eine hohe Abtastfrequenz als auch eine zeitliche Stauchung der langen Relaxations- bzw. Nachverdichtungsphase durch eine niedrige Abtastfrequenz vorgenommen werden.

4. Forschungsergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen sind mit Weizen-, Roggen-, Hafer- und Gerstenstroh sowie mit Wiesengras und Luzerne durchgeführt worden. Da alle Versuchsgüter die gleichen prinzipiellen Eigenschaften aufweisen, wird das grundsätzliche Verhalten des Halmgutes nachfolgend am Beispiel von Weizenstroh dargestellt.

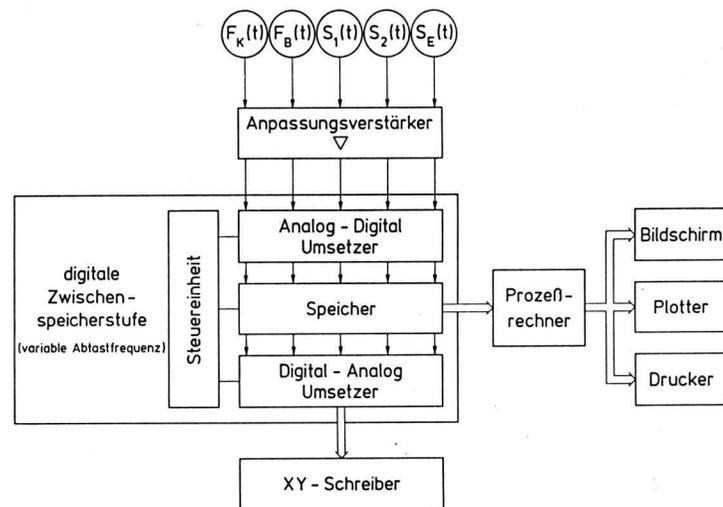


Bild 3. Schaltung der Meß- und Auswerteeinrichtung.

4.1 Relaxation und Nachverdichtung

Zur Ermittlung der Relaxation und Nachverdichtung wurden jeweils fünf Relaxationsversuche mit unterschiedlichen Preßdichten und fünf Nachverdichtungsversuche mit unterschiedlichen Verdichtungsdrücken durchgeführt. **Bild 4** zeigt die während der Relaxations- und Nachverdichtungsversuche aufgezeichneten zeitlichen Verläufe des Relaxationsdruckes $p(t)$ (oben) und der Nachverdichtungs-dichte $\rho(t)$ (unten).

Beim Relaxationsversuch steigt der Verdichtungsdruck während der Verdichtung bis zum Erreichen der maximalen Preßdichte steil an und fällt dann bei konstanter Preßdichte als Relaxationsdruck $p(t)$ über der Zeit ab. Der Zeitpunkt $t = 0$ s kennzeichnet den Übergang von der Verdichtungsphase zur Relaxation.

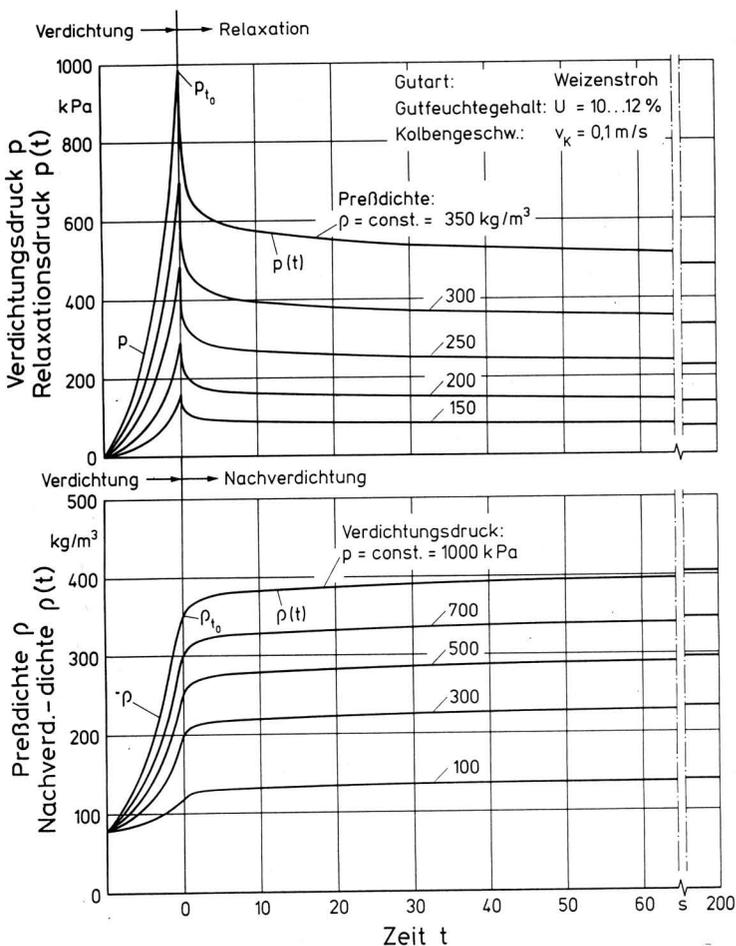


Bild 4. Verlauf des Relaxationsdruckes $p(t)$ (oben) und der Nachverdichtungsdichte $\rho(t)$ (unten) über der Zeit für jeweils fünf Relaxations- bzw. Nachverdichtungsversuche.

Beim Nachverdichtungsversuch steigt die Preßdichte während der Verdichtung steil an und nimmt dann bei konstantem Verdichtungsdruck als Nachverdichtungsdichte $\rho(t)$ über der Zeit allmählich weiter zu.

Definiert man die Quotienten aus den zeitlichen Verläufen des Relaxationsdruckes $p(t)$ bzw. der Nachverdichtungsdichte $\rho(t)$ und den jeweiligen Anfangswerten p_{t_0} und ρ_{t_0} zum Zeitpunkt $t = 0$ s als Relaxationsfunktion

$$R(t) = p(t)/p_{t_0} \quad (3)$$

bzw. Nachverdichtungsfunktion

$$N(t) = \rho(t)/\rho_{t_0} \quad (4),$$

so lassen sich die Relaxations- und Nachverdichtungsversuche des Bildes 4 durch jeweils einen Funktionsverlauf darstellen, **Bild 5**.

Im untersuchten Bereich des Verdichtungsdruckes ist die Relaxationsfunktion unabhängig von der Preßdichte und die Nachverdichtungsfunktion unabhängig vom Verdichtungsdruck; Halmgut weist somit ein linear-quasi-viskoelastisches Verhalten auf. Es kann also allgemein ausgesagt werden, daß jeder beliebige Verdichtungsdruck in einer bestimmten Zeit immer um einen festen prozentualen Wert absinkt bzw. jede Preßdichte um einen festen prozentualen Wert ansteigt.

Durch die Verknüpfung der Relaxations- bzw. Nachverdichtungsfunktion mit der Verdichtungsfunktion lassen sich isochrone Verdichtungsfunktionen für die Relaxation bzw. Nachverdichtung entwickeln, **Bild 6**. Die Verdichtungsfunktion ($t = 0$ s) wird im doppelt-logarithmischen Koordinatensystem durch eine Gerade

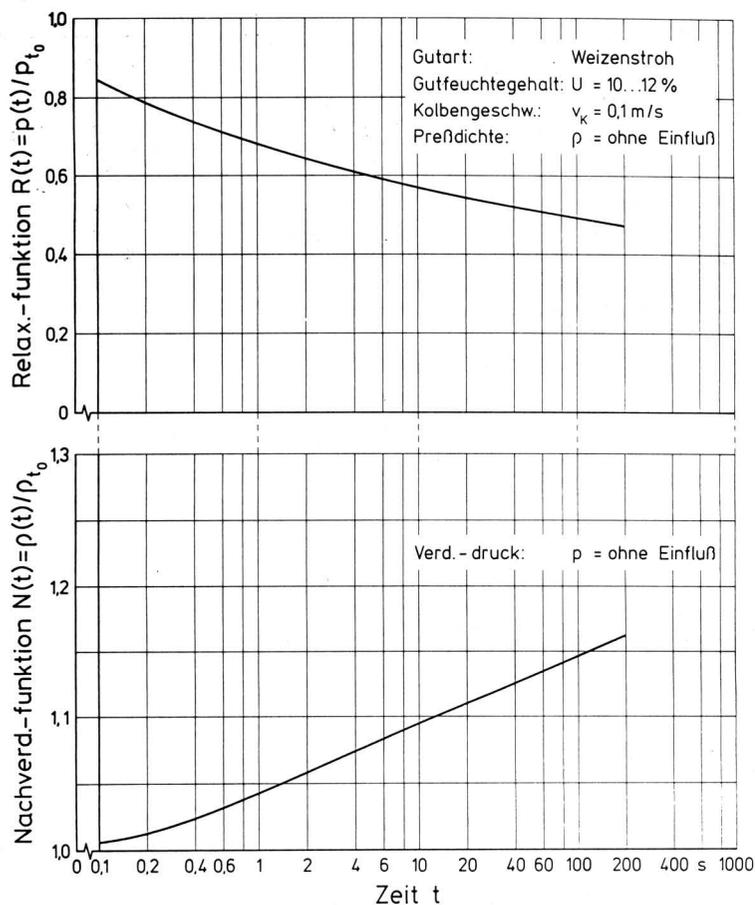


Bild 5. Relaxationsfunktion (oben) und Nachverdichtungsfunktion (unten) für die in Bild 4 dargestellten Einzelversuche.

abgebildet. Mit der Zeit als Parameter verschiebt sich beim Relaxationsvorgang diese Gerade in Richtung $\rho = \text{const}$ zu kleineren Preßdrücken und beim Nachverdichtungsprozess in Richtung $p = \text{const}$ zu höheren Preßdichten. So ist z.B. für eine Preßdichte von $\rho = 200 \text{ kg/m}^3$ bei Weizenstroh ein Verdichtungsdruck von $p = 300 \text{ kPa}$ erforderlich, dieser nimmt bei der Relaxation mit der Zeit ab ($t = 100 \text{ s}$, $p(t) = 150 \text{ kPa}$) oder er bewirkt als konstanter Verdichtungsdruck bei der Nachverdichtung eine zeitliche Zunahme der Preßdichte ($t = 100 \text{ s}$, $\rho(t) = 230 \text{ kg/m}^3$).

Da die isochrone Verdichtungsfunktion und die Relaxationsfunktion besonders gut geeignet sind, die Verdichtung und die Relaxation von Halmgut zu charakterisieren, werden in **Bild 7** die qualitativen Einflüsse der untersuchten Einflußgrößen auf diese Funktionen angegeben. Dabei ist für den Praktiker interessant, durch wen – Konstrukteur oder Landwirt – die Einflußgröße in welcher Weise beeinflusst werden kann.

Im einzelnen gilt für die verschiedenen Einflußgrößen:
Zeit: Aus den bisherigen Ausführungen zur Relaxation und Nachverdichtung kann die allgemeine Forderung nach einer möglichst langen Verweilzeit des Halmgutes im Preßraum der Ballenpresse abgeleitet werden. Die Verweilzeit t des Halmgutes im Preßraum errechnet sich aus der Preßkanalquerschnittsfläche A , der Preßkanallänge l , der Preßdichte ρ und dem Durchsatz \dot{Q} zu:

$$t = \frac{A l \rho}{\dot{Q}} \quad (5).$$

Die Verweilzeit kann der Konstrukteur einer Presse durch die Wahl des Preßprinzips und durch die Festlegung der Preßraumabmessungen beeinflussen. Bei Strangpressen ergeben sich aus ablauftechnischen Gründen prinzipiell längere Verweilzeiten als bei Kastenpressen, so daß einer Pressenkonzeption nach dem Strangpreßprinzip der Vorzug zu geben ist. Das Preßraumvolumen sollte möglichst groß sein. Bei Strangpressen ist eine Verlängerung des

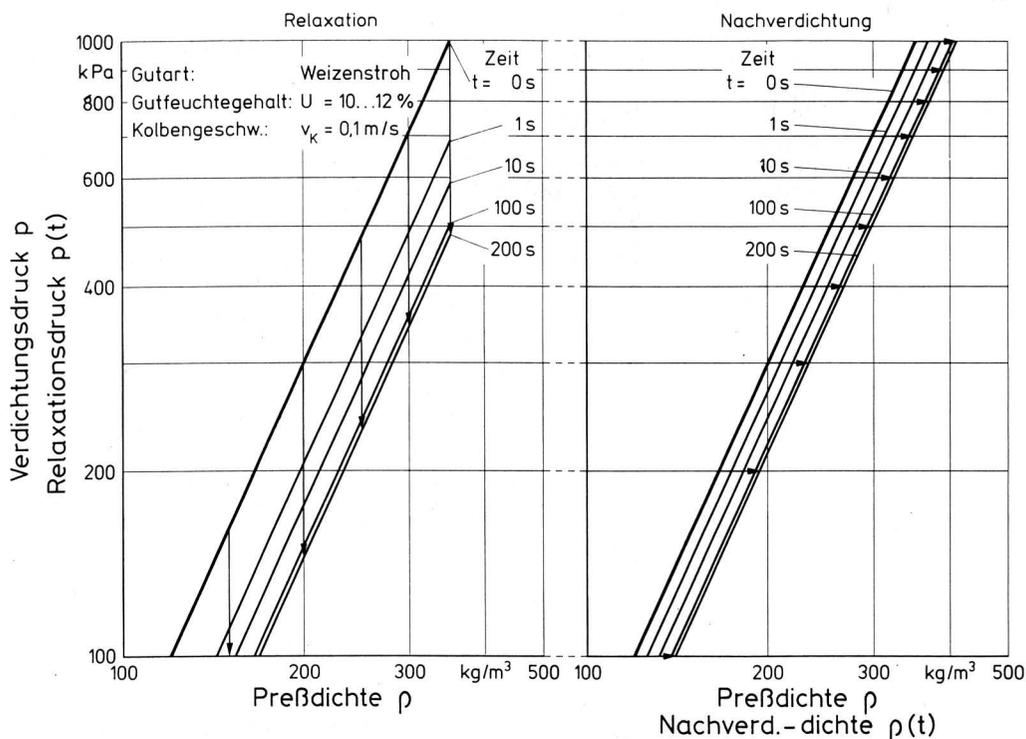


Bild 6. Isochrone Verdichtungs-funktion für die Relaxation (links) und die Nachverdichtung (rechts).

Einflußgröße	Relax.-funktion $R(t)$	isochrone Verd.-funktion $p = f(\rho, t)$	Be-einflußung	
			Kon.	Ldw.
Zeit $t = 5 \dots 200 \text{ s}$			X	X
Gutart				(X)
Gut-feuchtegehalt $U = 10 \dots 80 \%$				(X)
Erntezeitpunkt Rohfaser $RF = 24 \dots 28 \%$				X
mech. Vorbehandlung Intensität I				X
Verdichtungs-geschwindigkeit $v_k = 0,1 \dots 0,5 \text{ m/s}$			X	

Bild 7. Auswirkungen der untersuchten Einflußgrößen auf die Relaxations- und isochrone Verdichtungs-funktion, qualitativ.

Preßkanals ohne Veränderung der Ballenabmessungen möglich. Der Landwirt sollte die Preßdichte so hoch wie möglich einstellen und den Durchsatz nur so hoch wählen, daß ein wirtschaftlicher Einsatz der Presse bei noch ausreichender Schlagkraft gegeben ist. Bei niedrigem Durchsatz lassen sich höhere Preßdichten erzielen, so daß die längere Zeit für das Pressen der Ballen gegebenenfalls durch einen verkürzten Zeitaufwand für den Transport und die Einlagerung wieder ausgeglichen werden kann.

Gutart: Grüngut weist eine ausgeprägtere Relaxation auf als Stroh, auch die Verdichtungs-funktionen sind für Grüngut hin zu einem niedrigeren Verdichtungsdruck verschoben (40–60%). Beim Pressen von Stroh ergeben sich für die Zugfestigkeit des Bindemittels größere Probleme als bei Grüngut. Die Gutart ist durch die Wahl des Ernteproduktes vorgegeben und somit nur bedingt durch den Landwirt beeinflussbar.

Gutfeuchte: Mit steigendem Gutfeuchtegehalt U verstärkt sich die relative Abnahme des Relaxationsdruckes über der Zeit. Allerdings ist bezüglich des absolut wirkenden Relaxationsdruckes zu berücksichtigen, daß sich Halmgut bei einem mittleren Gutfeuchtegehalt von $U = 40 \%$ am leichtesten verdichten läßt, so daß auch nach einer längeren Relaxationszeit die isochrone Verdichtungs-funktion für $U = 40 \%$ den niedrigsten Relaxationsdruck beschreibt. Der Gutfeuchtegehalt wird durch das Ernteprodukt und die Art der Konservierung festgelegt, er ist durch den Landwirt nur bedingt z.B. bei der Anweltsilage beeinflussbar. Der Anwelkgut sollte aus verdichtungstechnischer Sicht möglichst hoch ($U = 40 \%$) sein, hierfür spricht ebenfalls die Verbesserung der Silierfähigkeit und der Silagequalität.

Erntezeitpunkt: Der durch den Erntezeitpunkt bestimmte Rohfasergehalt RF der Pflanze hat bei Anweltsilage einen deutlichen Einfluß auf die Verdichtung und die Relaxation. Mit zunehmendem Rohfasergehalt verlangsamten sich die zeitlichen Relaxationsvorgänge, und die isochronen Verdichtungs-funktionen verschieben sich hin zu höheren Relaxationsdrücken. Dieser Einfluß konnte nur bei Anweltsilage ($U = 40–50 \%$), nicht bei trockenem Heu ($U = 15 \%$) festgestellt werden. Der Landwirt sollte bei der Anweltsilage einen möglichst frühen Erntezeitpunkt bei einem Rohfasergehalt von $RF \leq 24 \%$ anstreben; als optimal kann unter Berücksichtigung eines maximalen Nährwertes der Zeitpunkt unmittelbar vor dem Rispenschieben angesehen werden.

Mechanische Vorbehandlung: Die durch einen Conditioner erreichte Intensität I der mechanischen Vorbehandlung des Halmgutes wirkt sich nicht nur beschleunigend auf den Trocknungsprozeß, sondern auch beschleunigend auf den zeitlichen Abfall des Relaxationsdruckes und durch eine Verschiebung der Verdichtungs-funktion zu einem niedrigeren Verdichtungsdruck aus (5–15%). Ein Conditioner zur Trocknungsbeschleunigung sollte vom Landwirt deshalb auch im Hinblick auf den Verdichtungs-vorgang in einer Ballenpresse eingesetzt werden.

Verdichtungsgeschwindigkeit: Die durch die Preßkolbengeschwindigkeit v_K gekennzeichnete Verdichtungsgeschwindigkeit wirkt sich verstärkend auf die relative Abnahme des Relaxationsdruckes über der Zeit aus. Für eine Gesamtbeurteilung des Einflusses der Verdichtungsgeschwindigkeit auf den absolut wirkenden Relaxationsdruck ist aber zu berücksichtigen, daß der Verdichtungsdruck mit zunehmender Verdichtungsgeschwindigkeit ansteigt. Es überlagern sich demnach zwei Einflüsse mit entgegengesetzter Wirkung. Als Ergebnis dieser Überlagerung ist eine geringfügige Reduzierung (5–10 %) des Relaxationsdruckes nach einer Relaxationszeit von $t > 1$ s festzustellen. Der Ausnutzung dieses Einflusses durch die Konstruktion von Ballenpressen mit höherer Kolbengeschwindigkeit stehen eine stärkere Beanspruchung der Pressenbauteile durch die höheren Preß- und Massenkräfte, eine erhöhte Verdichtungsarbeit und ablauftechnische Probleme entgegen, so daß eine Steigerung der Kolbengeschwindigkeit angesichts der geringen Auswirkung wenig sinnvoll ist.

4.2 Expansion

Um einen Expansionsvorgang ohne Seitenwandreibung zu erhalten, wird vor der Expansion die Preßkanalseitenwand geöffnet. Dabei kann das Halmgut quer zur Verdichtungsrichtung expandieren, es tritt ein geringfügiger, vernachlässigbarer Preßdichteverlust und ein von den Halmguteigenschaften und den Preßpaketabmessungen abhängiger Druckabfall ein. Wie in **Bild 8** dargestellt, bewirkt der Druckabfall Δp am Ende der Relaxation und der Nachverdichtung eine Absenkung der isochronen Verdichtungsfunktion. Der unmittelbar vor dem Expansionsvorgang herrschende Expansionsdruck wird jeweils durch den Kurvenverlauf p_{E0} beschrieben. Ein Vergleich der Kurven für p_{E0} macht deutlich, daß das Niveau für den Expansionsdruck unter sonst gleichen Bedingungen bei der Relaxation niedriger ist als bei der Nachverdichtung. Im Hinblick auf einen möglichst niedrigen Expansionsdruck sollte demnach eine möglichst lange Verweilzeit der Preßpakete im Preßkanal unter der Relaxationsbedingung $\rho = \text{const}$ erreicht werden.

Der Abfall des Expansionsdruckes während der Expansion wird für die einzelnen Expansionsversuche durch die Expansionsdruckverläufe p_E beschrieben. Erkennbar ist, daß der Expansionsdruck schon bei einer geringfügigen Abnahme der Preßdichte sehr steil abfällt. Wie bedeutend der Expansionsvorgang für die Reduzierung des im Ballen wirkenden Expansionsdruckes bei den Ballenpressen ist, verdeutlicht eine Analyse der heute bei Ballenpressen üblichen Zugfestigkeiten der Ballenbindemittel. Der vom Bindemittel aufnehmbare Expansionsdruck liegt je nach Pressenfabrikat zwischen 25 und 50 kPa, also deutlich unterhalb des in **Bild 8** noch dargestellten Druckbereiches. Eine Abbindung der Ballen bei höheren Ballendichten ist mit den heute üblichen Bindemittelfestigkeiten ohne eine geringfügige Expansion überhaupt nicht beherrschbar. Vor diesem Hintergrund ist die als nachteilig erscheinende konstruktiv bedingte Fadenlose an Ballenpressen bis zu einem gewissen Grad sogar notwendig. Da der Preßdichteverlust bei der Expansion sehr gering ist, kann die bewußte und kontrollierte Expansion des Halmgutes als geeignetes Mittel angesehen werden, auch sehr hohe Ballendichten mit einem vertretbaren Aufwand für das Ballenbindemittel noch abbinden zu können.

Die Beschreibung der Expansion kann über die Expansionsfunktion

$$E(\Delta\rho) = p_E/p_{E0} \quad (6)$$

erfolgen. Durch den Bezug auf den Anfangswert des Expansionsdruckes p_{E0} läßt sich der Einfluß der Preßdichte und der Relaxationszeit auf die Expansion eliminieren, **Bild 9**. Die von der Expansionsgeschwindigkeit abhängige untere Expansionsfunktion erhöht sich bei einer teilweisen Expansion des Halmgutes durch einen zeitlichen Expansionsdruckanstieg nach dem Expansionsvorgang, so daß der maximal auftretende Expansionsdruck durch die von der Expansionsgeschwindigkeit unabhängige obere Expansionsfunktion beschrieben wird. Expandiert man z.B. ein Preßpaket um $\Delta\rho_E = 5\%$, so fällt der Expansionsdruck gemäß **Bild 9** zunächst auf 20 % seines Anfangswertes ab, steigt dann aber über der Zeit wieder auf 30 % an. Dies ist eine Erscheinung, die sich in der Praxis häufig als verspätetes Aufplatzen des Ballens auf dem Feld äußert.

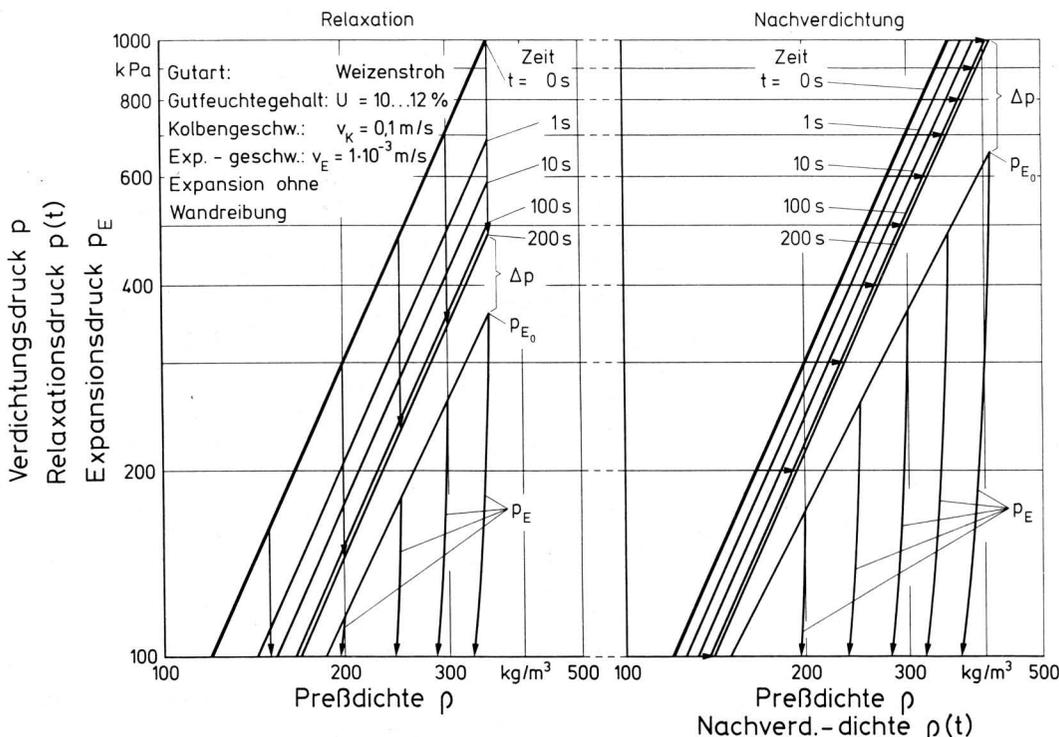


Bild 8. Isochrone Verdichtungsfunktion für die Relaxation (links) bzw. die Nachverdichtung (rechts) mit anschließender Expansion.

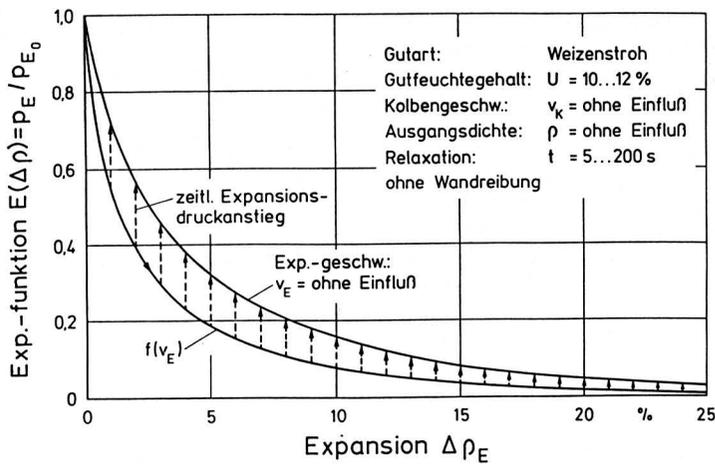


Bild 9. Expansionsfunktion mit (oben) und ohne zeitlichen Expansionsdruckanstieg (unten) nach der Teilexpansion.

Für praktische Dimensionierungsaufgaben bei der Bestimmung der erforderlichen Bindemittelfestigkeit ist deshalb die Expansionsfunktion zur Beschreibung des maximalen Expansionsdruckes (obere Kurve) von größerer Bedeutung.

Bild 10 zeigt qualitativ die Wirkung der untersuchten Einflußgrößen auf den Verlauf der Expansionsfunktion.

Einflußgröße	Expansionsfunktion E	Beeinflussung	
		Kon.	Ldw.
Expansion $\Delta\rho_E = 0 \dots 25\%$	0...100%	X	X
Gutart	Grüngut Stroh 5 - 10%		(X)
Gutfeuchtegehalt U = 10...80%	U 10 - 20%		(X)
Erntezeitpunkt Rohfaser RF = 24...28%	%		X
mech. Vorbehandlung Intensität I	%		X
Verdichtungsgeschwindigkeit $v_k = 0,1 \dots 0,5 \text{ m/s}$	%	X	
Expansionsgeschwindigkeit $v_E = 1 \dots 10^{-3} \text{ m/s}$	%	X	X

Bild 10. Auswirkungen der untersuchten Einflußgrößen auf die Expansionsfunktion, qualitativ.

Expansion: Eine Expansion des Halmgutes um 25 % der Ausgangspreßdichte bewirkt einen nahezu vollständigen Abbau des Expansionsdruckes. Durch den steilen Abfall des Expansionsdruckes erscheint die bewußte geringfügige Überverdichtung mit anschließender Expansion durchaus ein geeignetes Mittel zu sein, um auch höhere Ballendichten mit einem vertretbaren Aufwand für das Ballenbindemittel noch abbinden zu können. An die Konstrukteure von Ballenpressen wäre die Forderung nach der Entwicklung eines Bindeapparates mit variabler Fadenlose zu stellen. Bei den konstanten Fadenüberlängen heutiger Bindeapparate hat der Landwirt ausschließlich die Möglichkeit, die Expansion durch die Veränderung der Ballenlänge zu beeinflussen.

Gutart: Grüngut weist eine höhere Elastizität auf als Stroh. Unter gleichen Bedingungen fällt der Expansionsdruck bei Stroh um 5–10 % stärker ab als bei Grüngut.

Gutfeuchtegehalt: Mit zunehmendem Gutfeuchtegehalt nimmt die Elastizität des Halmgutes zu, so daß zur Erreichung eines bestimmten Expansionsdruckabfalles bei feuchtem Halmgut eine um 10–20 % größere Expansion nötig ist als bei trockenem.

Erntezeitpunkt, mechanische Vorbehandlung und Verdichtungsgeschwindigkeit: Bezüglich dieser drei Versuchsparemeter konnte kein Einfluß auf die Expansionscharakteristik und somit auf die durch die Expansionsfunktion gekennzeichnete relative Abnahme des Expansionsdruckes festgestellt werden. Durch die Einwirkung auf die Verdichtung, die Relaxation und die Nachverdichtung wird aber der absolut wirkende Expansionsdruck über den veränderten Anfangsdruck vor dem Expansionsvorgang beeinflusst.

Expansionsgeschwindigkeit: Der nach dem zeitlichen Expansionsdruckanstieg vorhandene maximale Expansionsdruck ist unabhängig von der Expansionsgeschwindigkeit.

5. Zusammenfassung

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, daß verdichtetes Halmgut nach dem Verdichtungs Vorgang ein ausgeprägtes quasi-viskoelastisches Verhalten aufweist. Die durch die quasi-viskoelastischen Eigenschaften gekennzeichnete Zeitabhängigkeit des Zusammenhanges zwischen dem Verdichtungsdruck und der Preßdichte kann in der Ballenpresse entweder über einen Relaxationsvorgang zur Reduzierung des im Preßpaket herrschenden Druckes (Relaxationsdruck) bei konstanter Preßdichte oder aber über einen Nachverdichtungs Vorgang zur Steigerung der Preßdichte bei konstantem Verdichtungsdruck genutzt werden. Je nach Gutart beträgt der Relaxationsdruckabfall beispielsweise nach einer Zeit von 10 s bereits 35–50 %, die Zunahme der Nachverdichtungs-dichte erreicht nach der gleichen Zeit 8–15 %. Aus dieser Erkenntnis läßt sich für den Konstrukteur und den Landwirt als Anwender die allgemeine Forderung nach einer möglichst langen Verweilzeit des Halmgutes in der Presse ableiten.

Überschreitet der nach dem Verdichtungs Vorgang im Ballen vorhandene Druck bei einer bestimmten Preßdichte einen Grenzwert, der durch die Zugfestigkeit des Ballenbindemittels vorgegeben ist, so ist durch eine geringfügige Expansion des Ballens eine erhebliche Reduzierung des Druckes (Expansionsdruck) erreichbar. Der durch die Expansion eintretende Preßdichteverlust ist aufgrund des sehr steil verlaufenden Abfalls des Expansionsdruckes in Abhängigkeit von der Preßdichte vergleichsweise gering, so daß die bewußte Überverdichtung des Halmgutes durchaus ein geeignetes Mittel sein kann, um die Belastung des Ballenbindemittels zu verringern.

Durch die konsequente Nutzung und Anwendung der Relaxation, der Nachverdichtung und der Expansion ist für den Pressenbau ein Entwicklungspotential gegeben, mit dem der Verdichtungs Vorgang in Ballenpressen im Hinblick auf das Ziel, eine höhere Preßdichte im Ballen zu erreichen, verbessert und optimiert werden kann.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Skalweit, H.*: Kräfte und Beanspruchungen in Strohpressen. 4. Konstrukteur-Kursus (RKTL-Schriften, Heft 88) Berlin 1938, S. 30/35.
- [2] *Mewes, E.*: Zum Verhalten von Preßgütern in Preßtöpfen. Landt. Forschung Bd. 8 (1958) Nr. 6, S. 158/64.
- [3] *Mewes, E.*: Verdichtungsgesetzmäßigkeiten nach Preßtopfversuchen. Landt. Forschung Bd. 9 (1959) Nr. 3, S. 68/75.
- [4] ● *Sacht, H.O.*: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 14, Nr. 4. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [5] ● *Kutzbach, H.-D.*: Die Grundlagen der Halmgutverdichtung. Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 14, Nr. 16. Düsseldorf: VDI-Verlag 1972.
- [6] *Mewes, E.*: Kraftmessungen an Strohpressen. Grundl. Landtechnik H. 10 (1958) S. 18/35.
- [7] *Scheffter, H.*: Das Pressen von Stroh. Technologische und oszillographische Untersuchungen des Preßvorganges bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Diss. TH Berlin, 1943.
- [8] *Matthies, H.J.*: Probleme im Strohpressenbau und ihre Lösungen. Grundl. Landtechnik H. 10 (1958) S. 8/17.

Bessere und sichere Abschätzung von Bauteilen an Schleppern und Landmaschinen

Von Hans-Heinrich Meiners, Overath und Peter Seigert, Siegburg*)

DK 620.169.1:539.43.001.24

Mit Hilfe spezieller Programme können noch genauere Lebensdauerschätzungen von Bauteilen an Schleppern und Landmaschinen durchgeführt werden, als es bisher durch den bekannten Vergleich von Lastkollektiv und Wöhlerlinie möglich war.

An der Zapfwelle gemessene Drehmomente waren der Ausgangspunkt für die Berechnung der Lebensdauer des Zapfwellenstummels. Mit diesen gemessenen Belastungen wurden Lebensdauerversuche auf dem Prüfstand durchgeführt.

Der Vergleich der berechneten mit den auf dem Prüfstand erzielten Lebensdauerwerten führte zu einer erstaunlich guten Übereinstimmung.

1. Vorgehen bei der Dimensionierung

Regellos dynamisch beanspruchte Bauteile wurden in der Vergangenheit vielfach mit Hilfe von Stoßfaktoren berechnet, d.h. unter Ansatz bestimmter Nennlasten wurden je nach Erfahrung und Fingerspitzengefühl des Konstrukteurs Sicherheitszuschläge gemacht. Neuere Methoden und der Einsatz von Rechnern lassen mit Hilfe statistischer Auswertungen eine verbesserte und damit materialsparendere Auslegung zu. Sie gehen von Last- und Fahrgeschwindigkeitskollektiven aus, die die Summe aller Belastungen über die Gesamtlebensdauer berücksichtigen [1, 2, 3].

Das durch Messungen gewonnene Lastkollektiv wird über die Schadensakkumulationshypothese nach *Palmgren-Miner* mit der für einen Werkstoff spezifischen Wöhlerlinie des zu dimensionierenden Bauteils verglichen, **Bild 1**. Befindet sich zwischen Lastkollektiv und Wöhlerlinie ein ausreichender Sicherheitsabstand (quantitativ ausgedrückt durch die Beziehung: Schädigungssumme ≤ 1), so ist das Bauteil ausreichend dimensioniert [4, 5].

*) *Dr.-Ing. H.-H. Meiners* war zur Zeit der Untersuchungen Abteilungsleiter bei der Firma Deutz-Fahr im Entwicklungswerk Köln-Porz; *Dipl.-Ing. P. Seigert* war zur Zeit der Untersuchungen Leiter des Versuchs bei der Firma Jean Walterscheid/Lohmar und ist jetzt Leiter der Versuchsabteilung bei der Firma UNI-CARDAN AG/Siegburg.

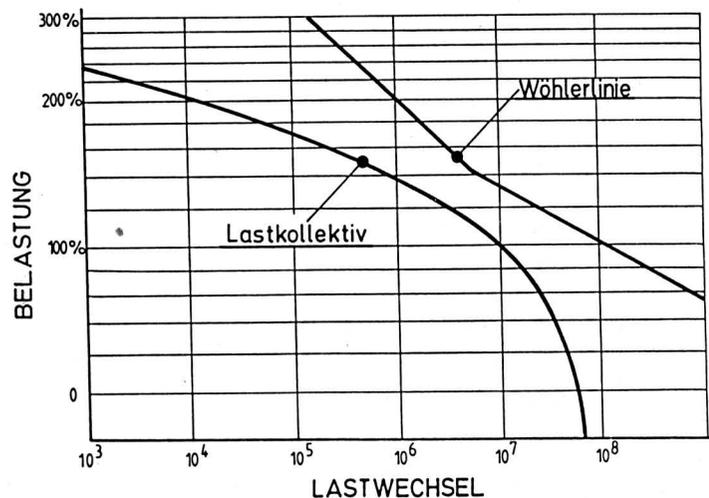


Bild 1. Lastkollektiv und Wöhlerlinie im Belastungs-Lastwechsel-Diagramm.

Eine weitere Verfeinerung der Lastkollektivbetrachtungen ist mit Hilfe einer rechnergestützten Analyse des Belastungs-Zeit-Verlaufs möglich. Danach werden die auf das Bauteil einwirkenden Belastungen aus den verschiedenen landwirtschaftlichen Arbeiten und Bedienungsvorgängen direkt mit den Werkstoffdaten verglichen [6 bis 12].

Die aus jedem Belastungsspiel ermittelten Teilschädigungen werden nach der *Palmgren-Miner*-Methode linear über alle Zyklen kumuliert. Auch hier gilt das Bauteil als ausreichend dimensioniert, wenn die Bedingung Schädigungssumme ≤ 1 erfüllt ist.

Diese Art der Betrachtung führt dazu, daß direkt aus den Belastungs-Zeit-Verläufen die schädigungsrelevanten Belastungen erkannt und Untersuchungen auf dem Prüfstand erheblich verkürzt werden können.

Im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen an der Zapfwelle des Schleppers sollte geklärt werden, welche Übereinstimmungen zwischen Prüfstandsergebnissen und den Berechnungen mit dem Softwarepaket FATIGUE der Firma Johne + Reilhofer zu erzielen sind.