Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Compactrollenpressen

Research and Development into the Compact-Roller-Baler

Hans Jürgen Matthies[1)], Heiner Wesche[2)], Bernd Johanning[1)]

[1)] Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik der TU Braunschweig

[2)] Fachbereich Landmaschinentechnik der FH Köln

Kurzfassung: Zur Verdichtung landwirtschaftlicher Halmgüter werden heute überwiegend Großballenrollpressen oder Großballenkolbenpressen eingesetzt. Mit der Entwicklung des Compactrollenverfahrens wurden die Voraussetzungen für eine neuartige Halmgutpresse - der Compactrollenpresse (CRP) - geschaffen, die sich durch eine optimale Energieausnutzung, durch eine kontinuierliche Arbeitsweise und durch hochverdichtete Ballen auszeichnet. Wesentliche Forschungsziele sind die Ermittlung von verfahrenstechnischen Kenngrößen, wie z. B. Leistungsbedarf oder Ballendichte, die Entwicklung eines für das Compactrollenverfahren notwendigen Trennverfahrens und die Optimierung der Dichteregelung der CRP.
Deskriptoren: Halmgutverdichtung, Compactrollenpresse, Energiebedarf, Dichteregelung

***Abstract**: Today it is mainly the round balers or the square balers which are used to compact agricultural crop. The development of the compact-roller variety provided basic features for a new kind of crop baler, the Compact-Roller-Baler (CRP), which is characterized by optimal energy consumption, continuous working process and highly compact bales. The most important research aims are to determine process-based data such as power consumption or bale density as well as to develop a cutting device necessary to operate the compact-roller baler. Another important point of the investigations is to optimize the density control of the CRP.*
***Keywords**: Compaction of fibrous material, Compact-Roller-Baler, energy consumption, density control*

1 Das Verfahren

Das in Braunschweig entwickelte und inzwischen in Europa, in den USA und in Japan patentierte Compactrollenverfahren [1] basiert auf dem schon früher erprobten aber gescheiterten Wickelbrikettierverfahren. Dabei wird [2] der Halmgutschwad dem Preßraum durch einen Spalt zwischen zwei Walzen zugeführt. Zwischen den gleichsinnig rotierenden Preßwalzen und dem rotierenden Preßstrang werden die zugeführten Halme einem intensiven Quetschvorgang unterworfen und um den Preßstrang gewickelt. Infolge der leichten Verschränkung der Preßwalzen wird der Preßstrang dann axial aus dem Preßraum gefördert. Vorher jedoch wird dem im Preßraum noch unter Druck stehenden Preßstrang ein Bindemittel - ein schmales Netzband oder ein Bindegarn - zugeführt, das den rotierenden und kontinuierlich aus dem Preßraum geförderten Preßstrang selbsttätig und schraubenlinienförmig umwickelt. Der umwickelte hochverdichtete Preßstrang wird außerhalb des Preßraums durch eine Trennvorrichtung - etwa durch ein Doppelmesser - in die einzelnen Compactrollen zerteilt, deren Länge frei wählbar ist **(Bild 1)**. Auf diese Weise kann zum Beispiel bei Wahl eines kleineren Preßkammerdurchmessers in kontinuierlicher Arbeitsweise - d. h. im non-stop-Verfahren - ein völlig neuartiges Produkt mit einer sehr hohen Dichte von etwa 350 bis 400 kg/m³ erzeugt werden. Dieses Produkt kann in kurzer Form als eine Art Schüttgut, in längerer Ausführung in Form hochfester, stapelbarer Ballen oder, beispielsweise in holzarmen Entwicklungsländern, eventuell auch als Baustoff verwendet werden.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, daß grundsätzlich alle wichtigen landwirtschaftlichen Halmgüter, wie Silage, Heu oder Stroh, mit dem Compactrollenverfahren verarbeitet werden können [3]. Lediglich bei Verarbeitung von sehr trockenem Stroh mit geringer Oberflächenfeuchtigkeit der Halme sind bei Verwendung großer Durchmesser z. Z. noch Schwierigkeiten vorhanden, weil hier infolge der geringen Reibung zwischen den Schichten u. U. ein Gleiten der Schichten untereinander, verbunden mit einer mangelnden Ballenstabilität, eintreten

kann. Bei Verwendung großer Durchmesser geht natürlich auch der Vorteil der mit diesem Verfahren erzielbaren sehr hohen Dichte verloren. Als wesentliche Vorteile verbleiben dann aber noch die kontinuierliche Arbeitsweise und die frei wählbare Ballenlänge.

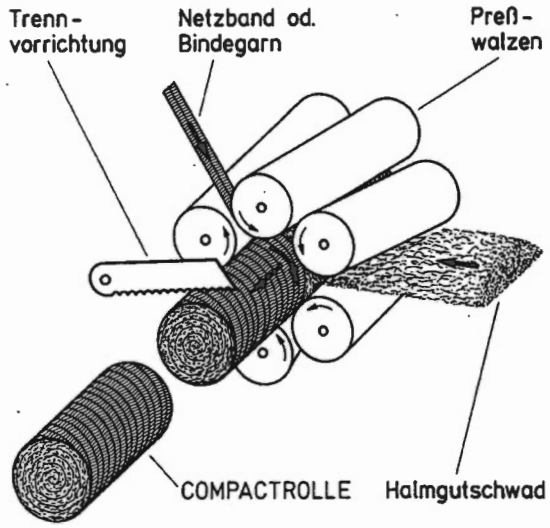
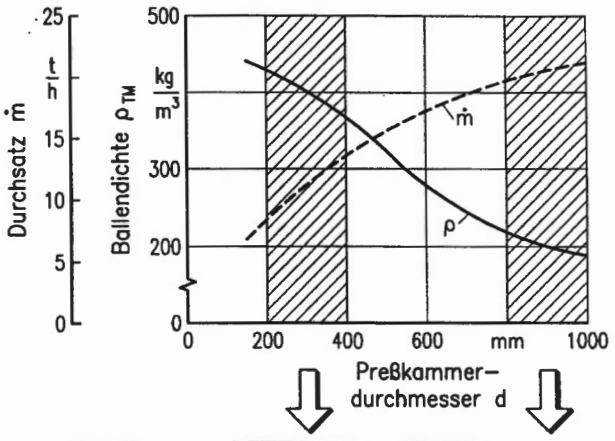


Bild 1: Funktionsskizze einer Compactrollenpresse
Fig. 1: Operational sketch of a Compact-Roller-Baler



Preßkammer-durchmesser d	unterer Bereich	oberer Bereich
Dichte ρ_{TM} [kg/m³]	350 – 400	150 – 250
Durchsatz ṁ [t/h]	8 – 14	18 – 22
spez. Energiebedarf [kWh/t]	3 – 6	3,5 – 7

Bild 2: Betriebsdaten von Compactrollenpressen (Anhaltswerte für Stroh bei Feuchte U = 15 %)
Fig. 2: Operating data of the Compact-Roller-Baler (estimated data for straw at a humidity U = 15 %)

Bei Verwendung kleinerer Preßkammer-, bzw. Ballendurchmesser können dagegen - wie oben erwähnt - extrem hohe Dichten erreicht werden, wie sie z. Z. mit keiner der bisherigen, in Serie hergestellten Aufsammelpressen erzielt werden können. Dementsprechend kann ein sehr niedriger Transport- und Lagerraumbedarf erreicht werden. Dieser Vorteil verringert sich bei Verwendung größerer Durchmesser erheblich. **Bild 2** zeigt dies sehr deutlich. Man kann erkennen, daß das Compactrollenverfahren bei Verwendung von Preßkammerdurchmessern zwischen 200 bis etwa 400 mm besonders gravierende Vorteile bietet. Es eröffnet somit eine Vielzahl neuer Anwendungsmöglichkeiten und nicht zuletzt auch einen wirtschaftlich tragbaren Transport von nachwachsenden Rohstoffen und deren raumsparende Lagerung.

2 Zur Verdichtungstechnik

Zur Erforschung der verdichtungstechnologischen Eigenschaften des Compactrollenverfahrens wurden eine stationäre Versuchspresse sowie eine leistungsfähige Auswertemethodik zur Durchführung und Analyse experimenteller Untersuchungen entwickelt [4].

Im Vordergrund der Untersuchungen - von denen hier nur eine kleine Auswahl wiedergegeben werden kann - standen die Überprüfung der grundsätzlichen Funktionstauglichkeit des Verfahrens selbst sowie die Ermittlung der wichtigsten Kenngrößen und Abhängigkeiten des Verfahrens von Konstruktions- und Betriebsgrößen. Die Ergebnisse bilden die Basis für eine Verfahrensoptimierung und für den Bau von feldtauglichen Maschinen. Im Rahmen dieses Beitrages soll ein Einblick in folgende Bereiche gegeben werden.

- globale Funktions- und Leistungsmerkmale
- Zusammenhang zwischen Schränkwinkel, Walzenumfangsgeschwindigkeit und axialer Ausschubgeschwindigkeit
- Momentenbedarf und spezifischer Energieverbrauch
- Zusammenfassung mit Beurteilung der Untersuchungsergebnisse für das Verfahren und die Maschinenkonstruktion

Erkenntnisse zu Funktion und Leistung

Zunächst galt es, das neuartige Verdichtungsverfahren auf seine grundlegende Funktionstauglichkeit zu überprüfen. Gleichzeitig wurden dabei erste Leistungseckdaten für die stationäre Compactrollenpresse am Institut für Landmaschinen der TU-Braunschweig mit einem Preßraumdurchmesser von 25 cm ermittelt. Sie sind in **Tabelle 1** denen konventioneller Verfahren gegenübergestellt. Kennzeichnend sind die hohe erzielbare Dichte mit bis zu 350 kg/m³ in Stroh und bis zu 450 kg/m³ in Heu bei Durchsätzen bis zu 16 t/h in Stroh und bis zu 20 t/h in Heu.

Tabelle 1: Leistungskenndaten der Compactrollenpresse CRP-250 im Vergleich zu etablierten Verdichtungsverfahren
Table 1: Performance characteristics of the Compact-Roller-Baler compared to established compaction systems

Verdichtungsprinzip	TM-Durchsatz m_{TM}			Preßdichte ρ_{TM}			spez. Energiebedarf E_{spez}		
	Stroh	Heu	Silage	Stroh	Heu	Silage	Stroh	Heu	Silage
	[t/h]	[t/h]	[t/h]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kWh/t]	[kWh/t]	[kWh/t]
CRP-250	8..14	9..16	9..16	250..350	350..450	350..450	3..6	2..5	2..5
GB-Rollenpresse	6..12	8..15	8..10	110..120	100..150	120..150	2..3	2..3	2..3
GB-Kolbenrollenpresse	14..22	20..28	15..22	150..170	200..220	200..220	3..5	--	--
HD-Kolbenpresse	8...12	10..22	--	120..140	150..160	--	--	--	--

Zusammenspiel von Schränkwinkel und axialer Ausschubgeschwindigkeit

Für die Funktionssicherung des Compactrollenverfahrens ist die Beeinflussung der Ausschubgeschwindigkeit über die Variation des Schränkwinkels der Preßwalzen von besonderer Bedeutung. Es ist wünschenswert, daß jede Schränkwinkeländerung in eine definierte Änderung der Axialgeschwindigkeit umgesetzt wird. Nur so kann über die Anpassung des Schränkwinkels eine stets konstante Dichte im Preßstrang gewährleistet werden.

Die Berechnung des Durchsatzes und der Axialgeschwindigkeit geschieht gemäß der Durchsatzgleichung in **Bild 3**. Demnach erfolgt die Bestimmung der Ausschubgeschwindigkeit $v_{ax,th}$ unter der Annahme, daß der Preßstrangdurchmesser gleich dem Nenn-Durchmesser des Preßraumes $d_{PR,o}$ (entspricht dem in die Preßwalzen eingeschriebenen Tangentialkreis) ist. Wegen des elastischen Expansionsdranges des Preßstranges ist jedoch zu erwarten, daß auch die Zwickel zwischen benachbarten Preßraumwalzen teilweise ausgefüllt werden (Walkeffekt).

Außerdem ist zwischen Walze und Preßstrang Schlupf anzunehmen. Beides läßt eher eine geringere Ausschubgeschwindigkeit vermuten als über den theoretischen Ansatz errechnet wird. Die experimentellen Untersuchungen zeigten nun überraschenderweise ein gerade gegenteiliges Verhalten, also eine fast immer etwas höhere, tatsächliche Ausschubgeschwindigkeit $v_{ax,m}$ **Bild 4**.

Dieses Phänomen wird als "Ausquellen" bezeichnet. Es wird verursacht durch ein in der Regel geringfügiges axiales Abgleiten der konisch aufgewickelten Lagen voneinander unter Wirkung des Radialdruckes der Preßwalzen. Es ist erwartungsgemäß in starkem Maße abhängig von den Stoffeigenschaften. Bei glattem und sehr trockenem Stroh finden sich höhere Werte für die Ausquellgeschwindigkeit $v_{ax,Q}$, die als die Differenz von tatsächlicher und theoretischer Ausschubgeschwindigkeit definiert ist. Sowohl die Ursachen als auch die Bedeutung dieses Sachverhaltes für die technologische Sicherung des Verfahrens konnten erst durch gezielte weitere Forschungsarbeiten erkannt werden. Zur Erläuterung zeigt **Bild 5** [5] den schematischen Preßstrangaufbau.

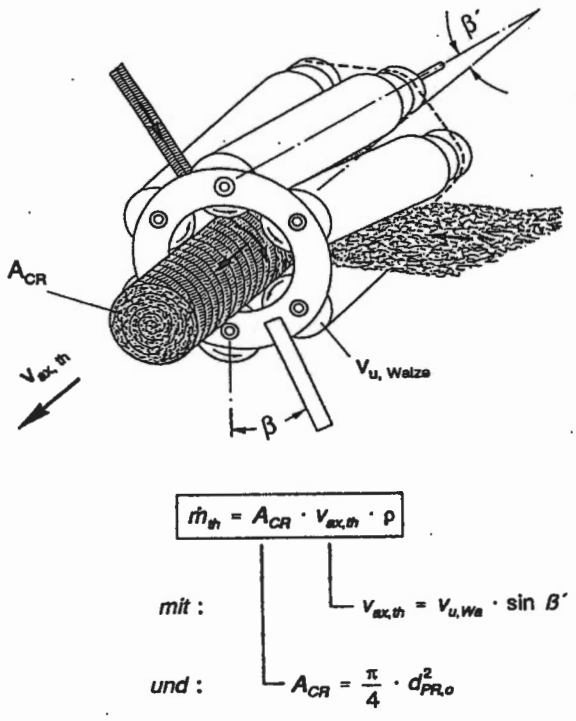


Bild 3: Durchsatzbestimmende Faktoren einer Compactrollenpresse
Fig. 3: Output relations of the Compact-Roller-Baler

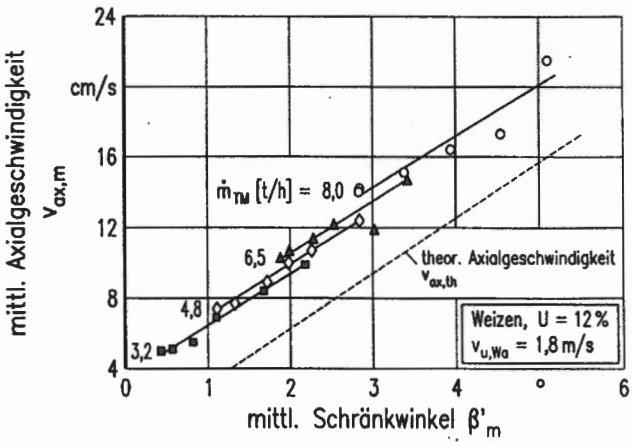


Bild 4: Ausquellverhalten einer Compactrollenpresse; mittl. tats. Axialgeschwindigkeit $v_{ax,m}$ in Abhängigkeit vom mittl. Schränkwinkel ß'm
Fig. 4: Real output speed of the bale as a function of the angle of the compaction rollers

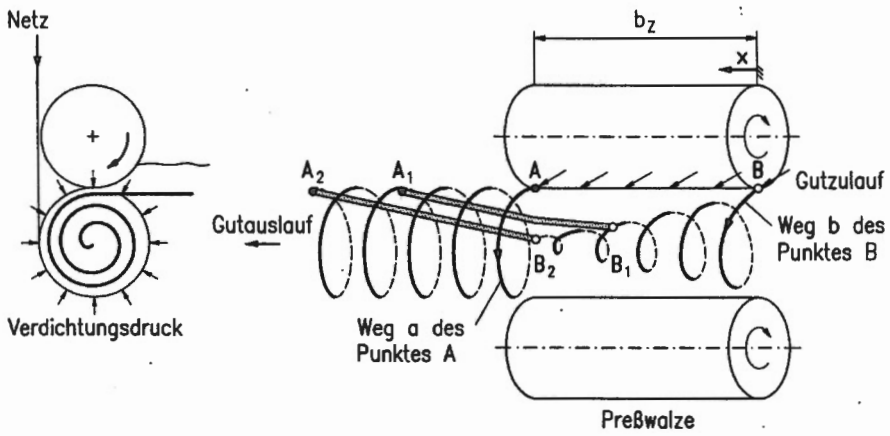


Bild 5: Lagenaufbau bei der Compactrollenpresse, schematisch nach Harms [2]
Fig. 5: Structure of the layers inside the bale in the Compact-Roller-Baler (schematic view to Harms [2])

Dabei sind die Aufbauzone innerhalb der Zuführbreite b_Z und die sich daran anschließende Ausschubzone zu unterscheiden. Die eigentliche Preßstrangformung geschieht nur innerhalb der Zuführbreite (Aufbauzone). Dort am Anfang zulaufendes Halmgut wird während seines axialen Durchlaufs durch die Zuführzone durch nachlaufendes Gut nach innen verdrängt. Dadurch steigt die Anzahl der Wicklungen über die Zuführlänge in Richtung zur Ausschubseite an. Die Anzahl der Wicklungen am Ende des Zuführbereichs wird zusätzlich durch den Preßstrangvorschub also den Schränkwinkel mitbestimmt. Da das Halmgut den Preßraum jeweils vollständig ausfüllt, steigt auch die Dichte in Richtung Ausschub an. Ein dazu entwickeltes Theoriemodell [6] läßt die Abhängigkeiten der Lagenschichtung erkennen. Es ist also festzustellen, daß die Schichtung abhängig ist vom Schränkwinkel ß' und vom Zuführbreitenverhältnis b'_Z. Die grafische Auswertung in **Bild 6** zeigt den Verlauf der Lagenlinien gegenüber der Preßstrangachse dargestellt als bezogene Zuführbreite für zwei unterschiedliche Schränkwinkel und jeweils zwei unterschiedliche Zuführbreitenverhältnisse.

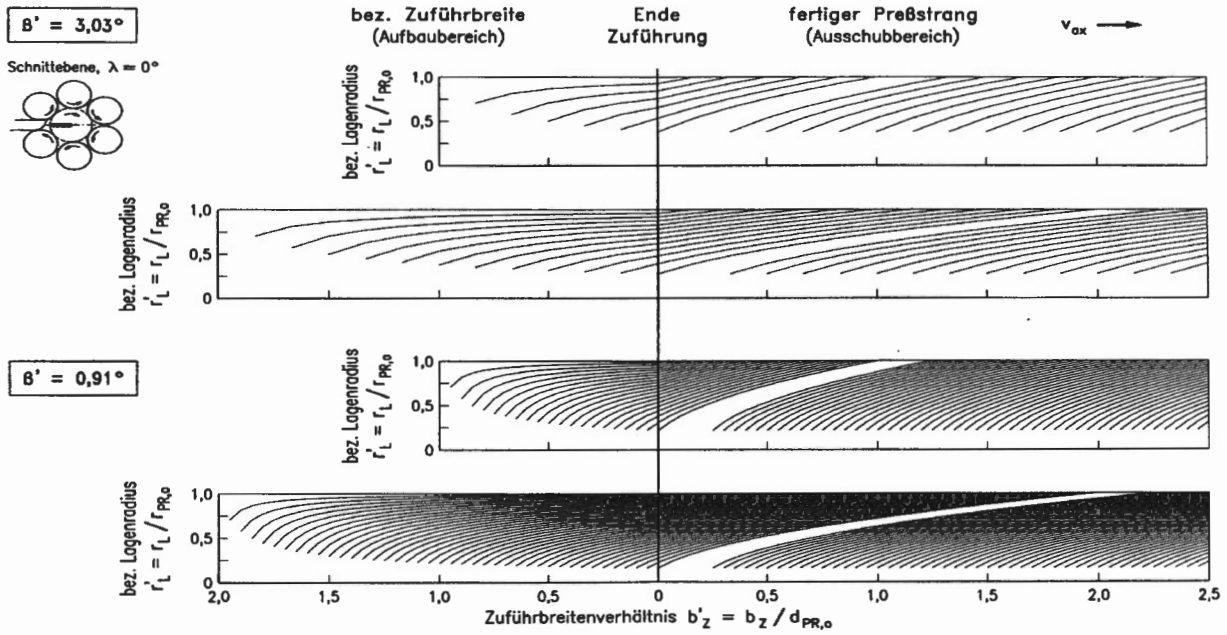


Bild 6: Lagenlinien innerhalb der Zuführbreite (Aufbauzone) und außerhalb der Zuführbreite (fertiger Preßstrang, Ausschubzone) für unterschiedliche Zuführbreitenverhältnisse b'_Z = 1,0; 2,0; und bei einem Schränkwinkel von ß'= 1° und ß'= 3°

Fig. 6: Sectional drawing of visible lines of the layers within and outside the feeding width for different feeding width and angle of the compaction rollers of ß' = 1° and ß = 3°

Der Schichtungswinkel verändert sich außerdem entlang der Zuführbreite. Es ist leicht einzusehen, daß für die innere Preßstrangstabilität ein möglichst geringer (flacher) Lagenneigungswinkel ϵ(x) (Schichtungswinkel der einzelnen Gutlagen gegenüber der Preßstrangachse) zu fordern ist, um ein Lagengleiten unter radialem Druck zu vermeiden. Dies wird erfüllt durch große Zuführbreiten gepaart mit großen Schränkwinkeln. Die Trennlinie zwischen zwei Wicklungslagen stellt eine bevorzugte Gleitebene dar, weil nachlaufende Gutschichten stets auf die jeweils glattgewalzte Oberfläche der vorangegangenen Schichtung aufgebracht werden. Der Halmgutverbund ist an dieser Stelle daher geringer als innerhalb der Lagen selbst, wo das Gut wegen der Wirrlage aus dem aufgenommenen Schwad gut miteinander verwirkt ist.

Die bereits jetzt erkennbaren komplexen Vorgänge, die zum Ausquellen führen, weisen auf die Notwendigkeit einer weiteren Erforschung hin. Aus den bisherigen Erkenntnissen läßt sich folgende Betriebsempfehlung ableiten: Um stets im regelbaren Bereich der Ausschubgeschwindigkeit zu arbeiten, sollte ein großer Schränkwinkelbereich eingeplant werden. Dadurch und durch einen genügend hohen Durchsatz wird sichergestellt, daß sich der reale Betriebspunkt stets im Bereich positiver Schränkwinkel und somit im regelbaren Bereich befindet. Unter besonders widrigen Verhältnissen ist als wirksame Maßnahme die Reduzierung der Walzenumfangsgeschwindigkeit einzuplanen. Durch eine ausreichend große Zuführbreite, die mehr als das 2-fache des Preßraumdurchmessers betragen sollte, werden zu steile Lagenneigungswinkel vermieden, was die Stabiltät des Preßstranges erhöht.

Einfluß von Walzenumfangsgeschwindigkeit und Schränkwinkel auf Drehmoment und Energiebedarf

Nach der Durchsatzgleichung gemäß Bild 3 beeinflussen die Walzenumfangsgeschwindigkeit und der Schränkwinkel den Durchsatz in gleicher Weise. In ihren Auswirkungen auf den Durchsatz sind sie demzufolge gegeneinander austauschbar. Die Beantwortung der Frage, wie die Betriebsparameter Walzenumfangsgeschwindigkeit und Schränkwinkel günstigerweise zu kombinieren sind, verlangt deshalb die Einbeziehung weiterer Auswahlkriterien. Dazu gehören neben dem konstruktionstechnischen Aufwand vor allen Dingen die Auswirkungen auf den Momenten- und Leistungsbedarf (**Bild 7**).

Bild 7 a zeigt, daß das mittlere Gesamtmoment $M_{ges,m}$ mit steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit $v_{u,Wa}$ für jeweils gleichen Durchsatz und bei gleicher Dichte abnimmt.

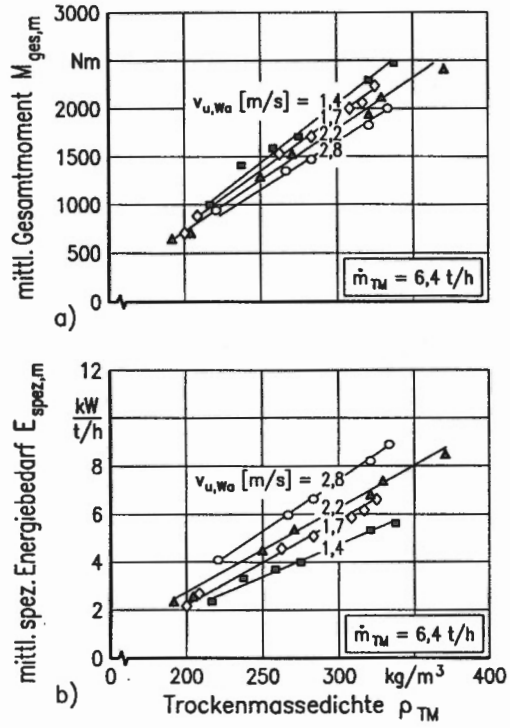


Bild 7: Einfluß der Walzenumfangsgeschwindigkeit $v_{u,Wa}$ auf das mittl. Gesamtmoment $M_{ges,m}$ (a) und den mittl. spez. Energiebedarf $E_{spez,m}$ (b) in Abhängigkeit von der TM-Dichte ρ_{TM} (bei: m_{TM}= 6,4 t/h)
Fig. *7: P.T.O.-torque $M_{ges,m}$ (a) and specific energy consumption $E_{spez,m}$ (b) as related to roller speed $v_{u,Wa}$ and bale density ρ_{TM}*

Dies wird erklärt durch die Abhängigkeit des Verdichtungserfolges von der Verdichtungsintensität I_V, von der Verdichtungshäufigkeit H_V (Anzahl der Walzenkontakte) sowie von der Verdichtungsdauer T_V. Bei gleichem Durchsatz und gleicher Dichte muß die Ausschubgeschwindigkeit unabhängig von der gewählten Kombination zwischen Walzenumfangsgeschwindigkeit und Schränkwinkel gleich sein. Somit bleibt die Verweildauer T_V unverändert. Mit steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit ist - wie beschrieben - eine Verringerung des Schränkwinkels erforderlich. Dadurch läuft das Preßgut bis zum Verlassen des Preßraumes häufiger um. Die Beanspruchungshäufigkeit H_V wird also erhöht, ebenso wie die Wicklungsanzahl, während die Lagendicke abnimmt. Die davon ausgehende Verdichtungswirkung aufgrund der Mehrfachbeanspruchung muß zur Beibehaltung der gleichen Dichte durch eine Reduzierung der Beanspruchungsintensität I_V - also der Radialkraft, die ja in erster Linie für den Momentenbedarf verantwortlich ist - kompensiert werden. Vordergründig mag sich der sinkende Momentenbedarf mit steigender Walzenumfangsgeschwindigkeit als Vorteil darstellen. Allerdings ist dies nur ein Teilaspekt. Da die Umfangskraft an den Walzen nicht in dem Maße abnimmt, wie dabei die Umfangsgeschwindigkeit erhöht wurde, steigt die Antriebsleistung und somit auch der spez. Energieberbrauch $E_{spez,m}$, siehe Bild 7 b. Die Verdichtung mit geringerer Intensität aber erhöhter Anzahl von Verdichtungsimpulsen ist also energetisch ungünstiger.

Einfluß von Durchsatz und Dichte auf Moment und spezifischem Energiebedarf

Ein steigender Durchsatz m_{TM} verlangt nur eine geringfügige Momentenerhöhung, **Bild 8 a**.

Bei Durchsatzverdoppelung ist beispielsweise nur ein um etwa 15 % höheres Moment aufzubringen. Der mittl. spezifische Energiebedarf $E_{spez,m}$ sinkt demzufolge bei gleicher Dichte mit steigendem TM-Durchsatz m_{TM}, **Bild 8 b**.

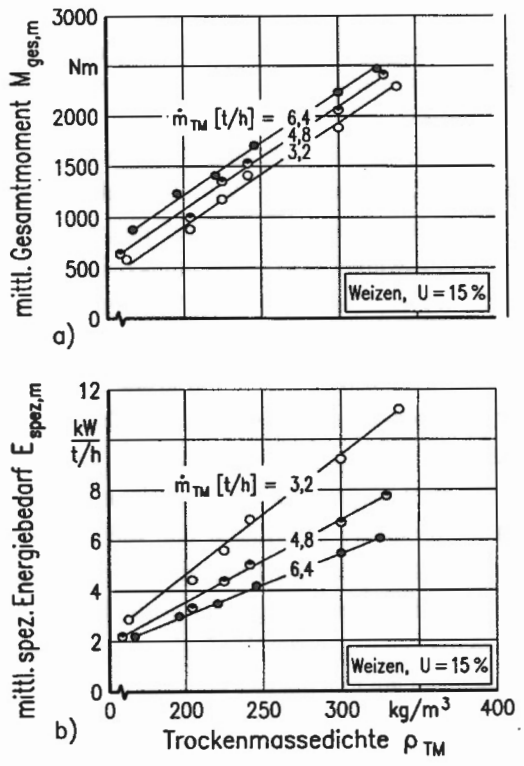


Bild 8: Einfluß des TM-Durchsatzes m_{TM} auf das mittl.Gesamtmoment $M_{ges,m}$ (a) und den mittl. spez. Energiebedarf $E_{spez,m}$ (b) in Abhängigkeit von der TM-Dichte ρ_{TM} (bei: $v_{u,Wa}$ = 1,4 m/s)
Fig. *8: P.T.O.-torque $M_{ges,m}$ (a) and specific energy consumption $E_{spez,m}$ (b) as related to throughput rate $\dot{m}_{TM}$ and bale density ρ_{TM}*

Mit steigender Dichte ρ_{TM} muß auch das mittl. Gesamtmoment $M_{ges,m}$ der CRP-250 im dargestellten Bereich bis 350 kg/m nahezu linear erhöht werden. Zur Verdoppelung der Dichte ist etwa ein dreifaches mittl. Gesamtmoment $M_{ges,m}$ bzw. ein dreifacher mittl. spezifischer Energiebedarf $E_{spez,m}$ erforderlich **(Bild 9)**.

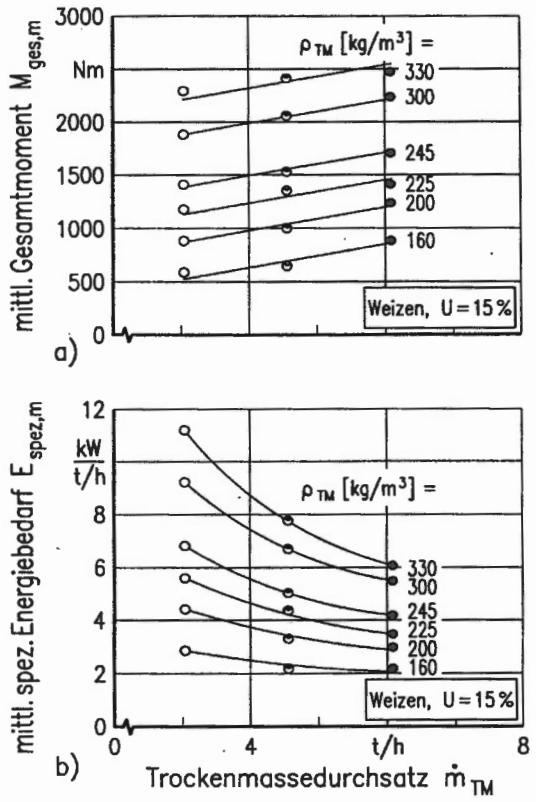


Bild 9: Einfluß der TM-Dichte ρ_{TM} auf das mittl. Gesamtmoment $M_{ges,m}$ (a) und den mittl. spez. Energiebedarf $E_{spez,m}$ (b) in Abhängigkeit von der TM-Durchsatz $\dot{m}_{TM}$ (bei: $v_{u,Wa}$ = 1,4 m/s)

Fig. 9: P.T.O.-torque $M_{ges,m}$ (a) and specific energy consumption $E_{spez,m}$ (b) as related to bale density ρ_{TM} and throughput rate $\dot{m}_{TM}$

3 Zur Regelungstechnik [7]

Eine Regelung der Preßstrangdichte ist für die Funktion der kontinuierlich arbeitenden Compactrollenpresse von elementarer Bedeutung, da stark schwankende Preßstrangdichten die Ballenstabilität der Compactrollen verringern und zu großen Schwankungen der benötigten Antriebsleistung führen. Die Regelung wirkt Dichteschwankungen entgegen, indem sie über die Verschränkung der Preßwalzen die axiale Ausschubgeschwindigkeit des Preßstrangs und damit die Preßstrangdichte beeinflußt. Kriterien einer optimalen Regelung für die Praxis sind:

- Funktionssicherheit in allen Betriebspunkten
- einfache Bedienung auch ohne Systemkenntnisse
- kostengünstiger und robuster Aufbau

Im folgenden wird zunächst auf einige Besonderheiten des Verdichtungsraumes als Regelstrecke eingegangen. Anschließend werden drei verschiedene Regelungskonzepte vorgestellt, die den oben genannten Kriterien unterschiedlich gerecht werden.

Regelstrecke

Ein besonderes Merkmal der Dichteregelung ist die Tatsache, daß die Regelgröße (Preßstrangdichte) nicht online gemessen werden kann. Daher muß eine Hilfsregelgröße, die ein bekanntes dichteproportionales Verhalten besitzt, verwendet werden. Als mögliche Hilfsregelgrößen sind die Radialkräfte F_r und das Antriebsmoment M an den Preßwalzen geeignet. Der Zusammenhang zwischen der Preßstrangdichte ρ und den möglichen Hilfsregelgrößen (F_r, M) wird empirisch ermittelt, da der Verdichtungsvorgang nicht analytisch beschrieben werden kann. Die hier vorgestellten Regelungskonzepte nutzen das Antriebsmoment als Hilfsregelgröße.

Das statische und dynamische Verhalten der Regelstrecke wird von konstruktiven und stofflichen Parametern beeinflußt. Zu den stofflichen Parametern gehören alle gutartspezifischen Eigenschaften. Wichtige konstruktive Parameter sind das Verhältnis von Preßraumdurchmesser d_{PR} zur Zuführbreite b_z des Halmgutes und der damit qualitativ vorgegebene Lagenneigungswinkel ϵ sowie das Preßkammervolumen V_{PK}. Die stofflichen Parameter beeinflussen im Zusammenspiel mit dem Lagenneigungswinkel das bereits beschriebene Ausquellen des Preßstrangs. Das Ausquellen führt als Störgröße zu geringen Preßstrangdichten, sofern ein nicht mehr regelbarer Zustand ereicht wird. Das ist der Fall, wenn der Preßstrang aus dem Preßraum austritt, obwohl sich der Schränkwinkel der Preßwalzen in Nullstellung befindet. Als diesbezüglich kritisch haben sich große Preßraumdurchmesser, die entsprechend große Lagenneigungswinkel bedingen, in Verbindung mit sehr trockenem Stroh erwiesen.

Das Preßkammervolumen V_{PR} bestimmt die zeitliche Dichteänderung im Preßstrang bei einem Durchsatzsprung. Für ein sehr stark vereinfachtes Modell, bei dem die Dichte ρ_{PR} innerhalb der Preßraumes über der Zuführbreite linear ansteigt ($\rho_{PR,m} = \rho_{PR,aus}/2$) kann unter der Voraussetzung einer konstanten Axialgeschwindigkeit des Preßstrangs

(v_{ax}=const) die zeitliche Dichteänderung nach Gleichung (1) durch eine Differentialgleichung 1. Ordnung beschrieben werden.

$$\frac{V_{PK}}{2\ v_{ax}\ A_{PK}}\ \dot{\rho}_{PK,m} + \rho_{PK,m} = \frac{1}{2\ v_{ax}\ A_{PK}}\ \dot{m}_i \qquad (1)$$

Der Einfluß des Preßraumvolumens kann praktisch mit dem des Preßraumdurchmessers gleichgesetzt werden, da der Durchmesser quadratisch in das Preßraumvolumen eingeht und die Preßkammerbreiten aufgrund der standardisierten Pickupbreiten nur geringfügig differieren. Die Zeitkonstanten der Dichteänderung sind in **Bild 10** für eine sprungförmige Durchsatzerhöhung dargestellt.

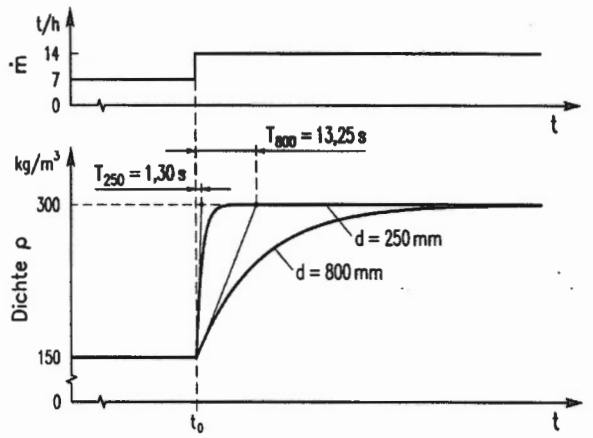


Bild 10: Dichteänderung bei einem Durchsatzsprung in Abhängigkeit vom Preßraumdurchmesser
Fig. 10: Change of density inside the compressing chamber after increase the throughput rate as a function of the diameter of the compressing chamber

Aus regelungstechnischer Sicht sind große Preßraumdurchmesser wünschenswert, da die dynamischen Anforderungen an das Stellglied der Regelung geringer sind und die Gefahr einer Verstopfung des Preßraumes in Folge eines Durchsatzsprunges abnimmt. Allerdings fördern große Durchmesser die Ausquellneigung, so daß bei ungünstigen stofflichen Parametern wesentlich früher ein nicht mehr regelbarer Zustand erreicht wird.

Kennlinienregelung

Das Blockschaltbild der entwickelten Kennlinienregelung ist in **Bild 11** dargestellt. Die Kennlinienregelung besitzt eine kaskadenförmige Reglerstruktur. Der innere Regelkreis besteht aus einer einfachen Lageregelung eines Hydraulikzylinders, der den vorgegebenen Schränkwinkel der Preßwalzen einstellt. Der Zylinder wird von einem elektrohydraulischen Proportionalventil betätigt. Die Führungsgröße der Lageregelung wird durch den Kennlinienregler des äußeren Regelkreises vorgegeben. Die Kennlinie stellt den Zusammenhang zwischen Moment und Schränkwinkel her. Steigt z. B. der Gutdurchsatz an, muß die damit verbundene Momentenerhöhung eine Schränkwinkelerhöhung bewirken, die die Axialgeschwindigkeit genau so weit erhöht, daß die Dichte konstant bleibt. Der experimentell ermittelte Zusammenhang zwischen Momenten- und Schränkwinkelerhöhung bei konstanter Dichte kann nach Gleichung 2 durch eine Gradengleichung approximiert werden.

$$\begin{aligned} M_{ist} > M_S &\rightarrow \beta_{soll} = K_\rho (M_{ist} - M_S) \\ M_{ist} < M_S &\rightarrow \beta_{soll} = 0 \end{aligned} \qquad (2)$$

Die Einstellung der Kennlinienregelung erfolgt durch die Vorgabe der Steigung K_ρ und des Schwellmoments M_S. Erst nachdem das Antriebsmoment M_{ist} den Schwellwert M_S überschritten hat, beginnt der Regler die Preßwalzen zu verschränken. Über das Schwellmoment wird somit praktisch die gewünschte Preßstrangdichte eingestellt. Die Steigung K_ρ bestimmt die durch eine Momentenerhöhung hervorgerufene Schränkwinkelerhöhung.
Für eine gute Abstimmung von Momentenanstieg und Schränkwinkelerhöhung ist eine optimale Kennliniensteigung K_ρ erforderlich, die nur am Versuchsstand durch eine vorherige Ermittlung des Verdichtungsverhaltens des Halmgutes zu erzielen ist. Im praktischen Feldeinsatz müssen Dichteschwankungen toleriert werden, da eine optimale Reglereinstellung aufgrund der oftmals wechselnden Bedingungen nur selten gefunden werden kann.

Adaptive Kennlinienregelung

Es hat sich gezeigt, daß die Einstellung der Kennlinienregelung ein relativ großes Fachwissen des Bedieners erfordert. Um die Reglereinstellung grundsätzlich zu vereinfachen, wurde die bestehende Kennlinieregelung durch eine gesteuerte Adaption ergänzt (siehe **Bild 12**). Die Kennliniensteigung K_ρ des Reglers wird in festen Zeitintervallen überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Das Kriterium zur Überprüfung der Kennliniensteigung ist ein vorzugebender Momentenbereich. Sofern das gemessene Antriebsmoment außerhalb des gewählten Bereiches liegt, wird die Kennliniensteigung entsprechend korrigiert.

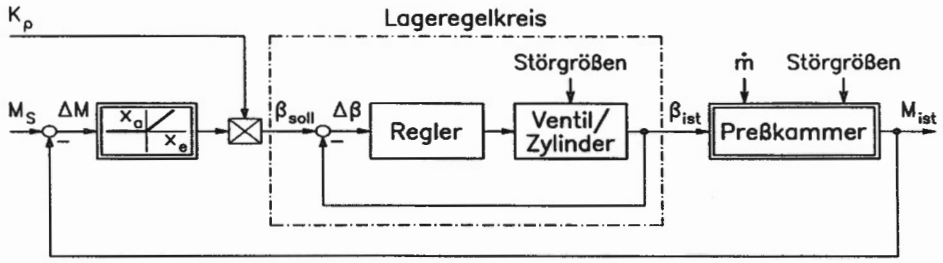


Bild 11: Blockschaltbild der Kennlinienregelung
Fig. 11: Block diagramm of the characteristic line control

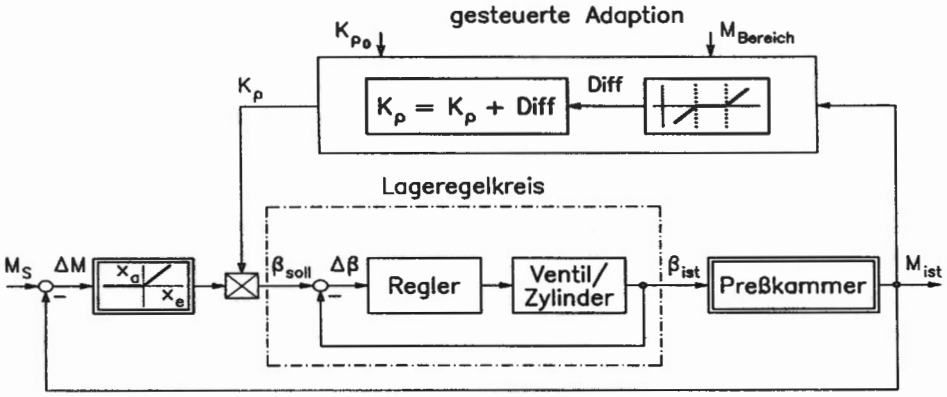


Bild 12: Blockschaltbild der adaptiven Kennlinienregelung
Fig. 12: Block diagramm of the characteristic line adaptation control

In **Bild 13** sind die Zeitverläufe von Antriebsmoment M, Schränkwinkel β' und Kennliniensteigung K_ρ dargestellt. Um die Adaption der Kennliniensteigung möglichst deutlich zu machen, wurde eine unrealistische Anfangsteigung $K_{\rho 0}$ gewählt. Es ist zu erkennen, daß bereits nach ca. zwei Ballen eine Reglerkennlinie gefunden wird, die für die speziellen Verhältnisse des Feldes ein relatives Optimum darstellt. Insgesamt haben die Erfahrungen aus den Feldversuchen gezeigt, das die adaptive Kennlinienregelung eine sehr gute bedienerfreundliche Alternative zur einfachen Kennlinienregelung darstellt.

Mechanische Regelung

Eine ganz andere Zielsetzung wird mit der mechanischen Regelung verfolgt. Sie soll als einfache robuste Regelung ohne hydraulische und elektronische Komponenten eine akzeptable Regelgüte erreichen. Ein eingeschränkter Funktionsumfang und ein geringerer Bedienungskomfort muß bei diesem Konzept akzeptiert werden.

Für die mechanische Regelung muß eine wesentliche konstruktive Voraussetzung erfüllt sein: Der Antrieb der Preßwalzen und die Schränkscheibe zu ihrer Verschränkung müssen auf der gleichen Preßraumseite angeordnet sein. In **Bild 14** ist die notwendige Antriebsgestaltung für eine mechanische Regelung als Prinzipskizze dargestellt.

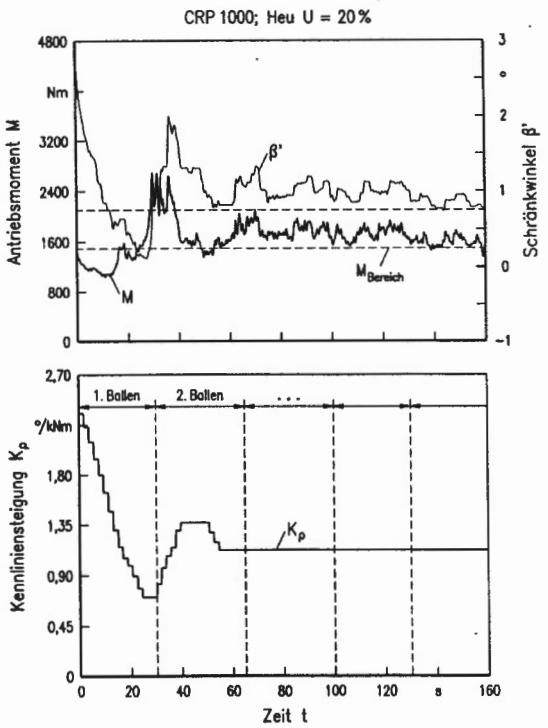


Bild 13: Zeitlicher Verlauf von Antriebsmoment M, Schränkwinkel β' und Kennliniensteigung K_ρ zu Beginn des Preßvorganges beim Betrieb einer adaptiven Kennlinienregelung
Fig. 13: Curve of P.T.O.-torque M, angle of the compaction rollers β' and gradient of the characteristic line K_ρ at the start of compaction with the characteristic line adaptation control

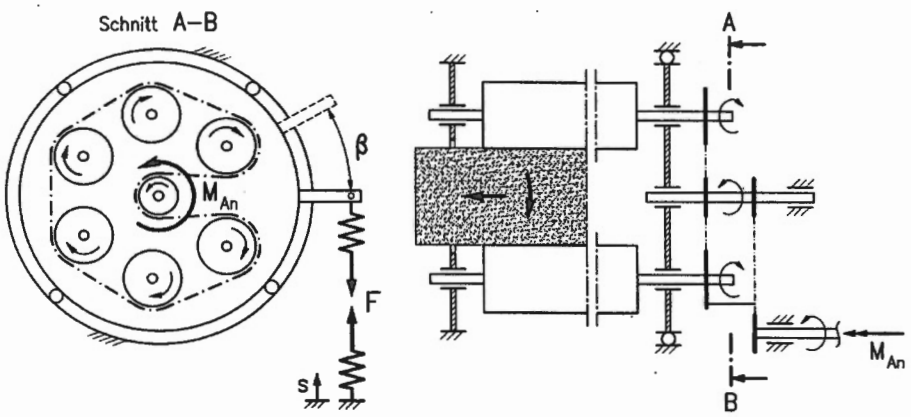


Bild 14: Prinzip einer mechanischen Dichteregelung und des dafür notwendigen Antriebschemas

Fig. 14: Principle of the mechanical density control and the required drive unit

Die Preßwalzen werden über eine Kette von einem zentral auf der Schränkscheibe sitzenden Kettenrad angetrieben. Die Schränkscheibe selbst ist gegenüber dem Gestell drehbar gelagert. Bei dieser Antriebskonstellation bewirkt das Antriebsmoment ein Drehmoment auf die Schränkscheibe, das über eine Feder abgestützt werden kann. Da sich Federkraft und Schränkscheibenmoment im Gleichgewicht befinden müssen, wird eine zum Antriebsmoment proportionale Verschränkung der Preßwalzen erzielt. Die mechanischen Regelparameter sind die Federvorspannung und die Federkonstante.

Im Vergleich zum Kennlinienregler besitzt die mechanische Regelung keine prinzipiellen Vor- oder Nachteile. Die Einstellung der Regelparameter Federvorspannung und Federkonstante ist allerdings deutlich aufwendiger und nicht so flexibel wie beim Kennlinienregler. Die Vorteile der mechanischen Regelung sind der einfache und robuste Aufbau sowie die niedrigen Herstellungskosten.

4 Zusammenfassung

Die Entwicklung des Compactrollenverfahrens erfordert umfangreiche Forschungsarbeiten. In den bereits durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen wurde der Einfluß von betriebs- und verfahrenstechnischen Parametern auf das Compactrollenverfahren ermittelt. In diesem Beitrag werden Teilprobleme wie der Lagenaufbau des Preßstranges und seine Beeinflussungsmöglichkeiten behandelt. Die Erkenntnisse über die verdichtungstechnischen Eigenschaften insbesondere des Momenten- und Energiebedarfs in Abhängigkeit von Walzenumfangsgeschwindigkeit, Durchsatz, Dichte und Schränkwinkel liefern Entscheidungshilfen zur konstruktiven Festlegung von Schränkwinkel und Walzenumfangsgeschwindigkeit. Darüber hinaus werden unterschiedliche Konzepte für die Regelung der Preßstrangdichte vorgestellt. Die Einstellung und Funktionssicherheit der Dichteregelung hängt stark von den für den Verdichtungsvorgang relevanten Stoffeigenschaften des Halmgutes ab. Um das Compactrollenverfahren mit der heute notwendigen Betriebssicherheit unter allen denkbaren Halmgutbedingungen zur Praxisreife zu führen ergeben sich offene Fragestellungen insbesondere hinsichtlich der Sicherung der Preßstrangstabilität unter extrem trockenen Gutbedingungen.

Literatur

[1] Matthies, H.-J.: Europäisches Patent 0366.936.81, US Patent 5.020.311, Japanisches Patent 7-100237

[2] Matthies, H.-J.: Die Compactrollenpresse - Eine richtungsweisende Neuentwicklung für die Halmguternte. Landtechnik 46 (1991) H. 5, S. 225-229

[3] Wilkens, D. u. H. Kreienbaum: Wettbewerber entwickeln gemeinsame Grundlagen - Compactrollenpresse im Praxiseinsatz. VDI-Berichte 1211, 1995, S. 153-154

[4] Wesche, H.: Untersuchungen zur Optimierung des Compactrollenverfahrens. Dissertation am Institut für Landmaschinen der Technischen Universität Braunschweig, VDI-Verlag Düsseldorf, Reihe 14/Nr. 71

[5] Harms, H.-H.: Machines for crop compaction and their lines of development. Vortrag auf der AgEng '92 in Uppsala (Schweden) am 02.06.1992

[6] Meyer, H.: Regelungskonzepte für eine Compactrollenpresse. Technische Universität Braunschweig, unveröffentlichte Studienarbeit am Institut für Landmaschinen, 1992, Institutsbibliothek E. 4/143

[7] Johanning, B.: Entwicklung und Optemierung verschiedener Regelungskonzepte für Compactrollenpressen. VDI Berichte Nr. 1211, 1995, S. 155-158