

# Grundsätzliche Gesichtspunkte zur Gestaltung von Wickelbrikkettiermaschinen

## Teil 1: Vorteile der Brikkettierung und Verdichtungsverfahren

Von Eckhard Scheffler, Braunschweig

Die Wickelbrikkettierung ermöglicht das Verdichten von Futterpflanzen beliebigen Feuchtegehalts. Es sind zwei Wickelverfahren üblich, und zwar mit achsparallelen und verschränkten Walzen; die Maschinen mit verschränkten Walzen bieten die Möglichkeit, die Ausschubgeschwindigkeit des Wickels zu steuern, die Dichte des Wickels konstant zu halten und den Leerlauf ohne Hilfsmittel zu vermeiden.

### 1. Einführung

Als vor etwa fünf Jahren das Verfahren der Wickelbrikkettierung in der Bundesrepublik Deutschland allgemein bekannt wurde, griffen Landwirtschaft und Industrie diese Idee begeistert auf; denn dieses Verfahren bot im Gegensatz zur Normaldruck-Brikkettierung die Möglichkeit, alle Futterpflanzen bei beliebigem Feuchtegehalt und bei verhältnismäßig geringem Leistungsbedarf zu brikkettieren. Mit dem Wickelverfahren bot sich der Landwirtschaft somit die Aussicht, die mit der Feldbrikkettierung verbundenen betriebstechnischen Vorteile auch unter ungünstigen klimatischen Verhältnissen zu nutzen.

Die zur Überprüfung dieser Möglichkeiten vorgenommenen Untersuchungen zeigten jedoch bald, daß die Einführung des Verfahrens in die landwirtschaftliche Praxis von der Überwindung mancher Schwierigkeiten und Probleme abhängen würde; so ist eine Konservierung für die sichere Lagerung von Wickelbrikketts mit mehr als 12 bis 15 % Feuchtigkeit erforderlich. Diese ist, wie die bisherigen Versuche ergaben, unter bestimmten Voraussetzungen durch Trocknen oder Silieren möglich (beim Silieren von Brikketts sind sogar Vorteile gegenüber der Häckselsilage vorhanden) [1; 2]. Ebenfalls sind Fragen der Gutzuführung in den Verdichtungsraum und des Zerschneidens des Wickelstranges in einzelne Brikketts zu klären.

*Dipl.-Ing. Eckhard Scheffler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Landmaschinen der Technischen Universität Braunschweig. (Institutsdirektor: Prof. Dr.-Ing. H. J. Matthies).*

Zunächst seien aber die Probleme behandelt, die mit dem Verdichtungsprozess selbst zusammenhängen und damit die Gestaltung von Wickelaggregaten betreffen. Große Schwierigkeiten bestehen darin, mit einer Wickelmaschine zwei Forderungen gleichzeitig zu erfüllen: sie sollte nämlich

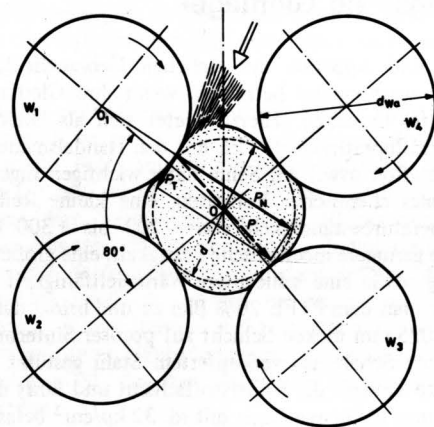
1. einen möglichst hohen Halmgutdurchsatz funktionssicher bewältigen können (aus Preisgründen mit einem oder höchstens zwei Wickelaggregaten) und
2. Wickelbrikketts mit ausreichender Festigkeit, hoher Schüttdichte und guten Schütteeigenschaften herstellen können. Zwei weitere Beiträge werden sich daher mit den wichtigen Fragenkomplexen „Halmgutdurchsatz“ und „Wickelfestigkeit“ befassen.

### 2. Allgemeines zur Wickelverdichtung

#### 2.1. Grundsätzliche Ausführungen zu dem Verfahren

Bei der Wickelverdichtung werden Schichten von nicht gehäckseltem Halmgut in einem Verdichtungsraum übereinander aufgewickelt, der von mehreren rotierenden Wickelwalzen begrenzt wird. Die für die Verdichtung erforderlichen Kräfte auf den Halmgutwickel werden von diesen Walzen übertragen.

Am Beispiel einer Wickelverdichtung zwischen zylindrischen parallel stehenden Walzen sind die zwischen einer Walze und dem Wickel wirkenden Kräfte in **Bild 1** dargestellt. Vier Walzen umschließen einen (gestrichelt eingezeichneten) Verdichtungsraum, dessen Durchmesser im folgenden mit „theoretischer Wickeldurchmesser“ bezeichnet sei; er ist beim Bestimmen der „theoretischen Dichte“ zugrundegelegt. Durch den größten Spalt zwischen zwei Walzen, den Einzugsspalt, wird das Halmgut dem Verdichtungsraum zugeführt. Die äußeren Kräfte greifen in den Berührungsfächen zwischen Walzen und Wickel am Wickel an. Analog zu den



**Bild 1.** Kräfte zwischen Walze und Wickel.  
Erläuterungen im Text

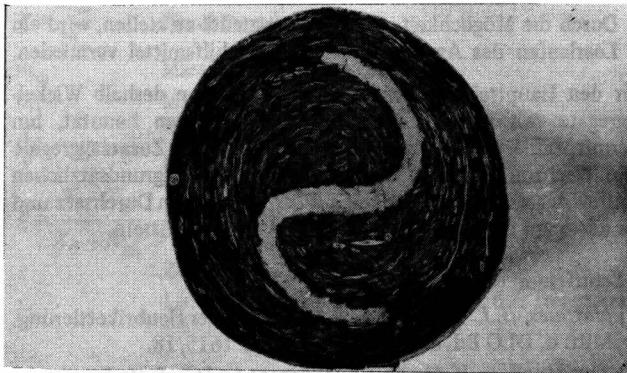
Verhältnissen zwischen einem starren Rad und nachgiebigem Boden liegt der Kraftangriffspunkt – um den „Hebelarm der rollenden Reibung“ versetzt – vor dem idealen Berührungspunkt auf der Verbindungslinie 0,0 zwischen Walzen- und Wickelmittelpunkt.

Senkrecht zur Walzenoberfläche wirkt die Normalkraft  $P_N$ , die für die Verdichtung des Gutes sorgt. Ihre Größe ist in erster Linie von der Wickeldichte und dem Feuchtegehalt des Halmgutes abhängig. Die in Umfangsrichtung wirkende Tangentialkraft  $P_T$  wird durch Oberflächenreibung auf den Wickel übertragen und bewirkt die Drehbewegung des Wickels, deren Höchstwert von der jeweils wirkenden Normalkraft und der Reibungszahl zwischen Walzen und Wickel abhängt. Wenn keine weiteren äußeren Kräfte auf den Wickel einwirken, stehen die Resultierenden  $P$  der einzelnen Walzen miteinander im Gleichgewicht.

Zum Übertragen der für den Verdichtungsprozess erforderlichen Kraft muß zu Beginn des Wickelvorganges ein sog. Startwickel im Verdichtungsraum vorhanden sein. Um Verstopfungen weitgehend zu vermeiden, sollte man eine hohe Reibungszahl zwischen Walze und Wickel anstreben, z.B. durch Gummibeschichtung der Walzen.

Verdichtet man mit achsparallelen Walzen in einem seitlich verschlossenen Wickelraum, also ohne Ausschleiben des gewickelten Halmgutstranges, wachsen mit größer werdender Gutmasse im Wickelraum deren Dichte und damit auch die Verdichtungskräfte. Da sich das verdichtete Gut elastisch verhält, dehnt es sich zwischen den Walzen wieder um einen bestimmten Betrag gegenüber dem theoretischen Durchmesser aus und bildet hier einen Wulst. Dieser Wulst vergrößert sich mit zunehmender Dichte, so daß die von den Walzen auf den Wickel übertragbaren Kräfte bei einem bestimmten Grenzwert nicht mehr zum Überwinden des ebenfalls gestiegenen Rollwiderstandes ausreichen und die Walzen bei stehendem Wickel durchrutschen. Durch ein möglichst großes Verhältnis von Walzen- zu Wickeldurchmesser läßt sich die Einzugsfähigkeit des Aggregates erhöhen und damit die Verstopfungsgefahr verringern, da dann der Wulst kleiner bleibt und der Rollwiderstand abnimmt. Versuche mit Weidelgras (Feuchtegehalt 53 %) zeigten, daß durch Steigern dieses Verhältnisses von 0,6 auf 1,25 die „theoretische Wickeldichte“ von etwa 1000 auf 1200 kg/m<sup>3</sup> erhöht werden konnte, ehe die Stahlwalzen durchrutschten.

Infolge der Wulstbildung wird der Wickel, der unmittelbar nach Beendigung der Gutzufuhr aus dem Aggregat genommen ist, einen größeren Durchmesser annehmen, als dem theoretischen Durchmesser entspricht. Bei längerem Überrollen des fertigen Wickels im Verdichtungsraum verringert sich der Wulst allmählich, ebenso nimmt die Rückdehnung ab. Beim Wickelvorgang werden somit die Halmgutschichten nicht nur radial verdichtet, sondern die aufgewickelten Lagen auch gegeneinander in Umfangsrichtung verschoben. Diesen Effekt, der z.B. auch beim Rollen von aufgewickeltem Papier unter radialem Druck auftritt, haben



**Bild 2.** Mit Hilfe von Knetmasse sichtbar gemachte Lagenverschiebung im Wickelbrikett.

Drehrichtung: ↻

J. Molitorisz und H. F. McColly [3] mit „Modellhalmen“ veranschaulicht.

Um die Lagenverschiebung in Halmgutwickeln sichtbar zu machen, wurde der Verdichtungsprozess unterbrochen, der Wickel radial durchbohrt und die Bohrung mit Knetmasse ausgefüllt, anschließend weiteres Halmgut zugeführt und der Wickel einige Sekunden überrollt. Als Ergebnis sieht man in **Bild 2** die Verschiebung der Schichten, d.h. den gebogenen Verlauf der ehemals geradlinigen Knetmasse. Durch diese Verschiebung wird eine intensive Verbindung der einzelnen Schichten erreicht, außerdem verringern die zwischen den Halmgutlagen wirkenden Kräfte die Rückdehnung. Hieraus läßt sich folgern, daß für eine gute Formstabilität und für den guten Zusammenhalt der äußeren Schichten mehrere Überrollungen des fertigen Wickels erforderlich sind.

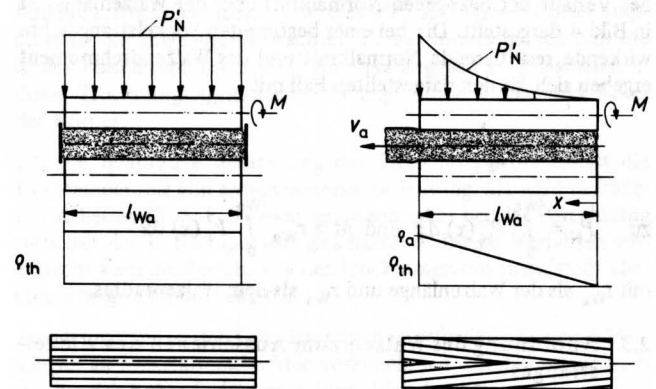
**2.2. Verdichtungskräfte beim Aufwickeln im seitlich geschlossenen Raum und beim gleichzeitigen Verdichten und Ausschleiben des Halmgutstranges**

Zum Bemessen von Wickelaggregaten ist außer der Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Verdichtungskraft, Wickeldichte und Feuchtegehalt auch die der Beanspruchungsverteilung über die Walzenlänge erforderlich.

Vergleicht man die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten der Wickelverdichtung,

1. das Aufwickeln im seitlich geschlossenen Wickelraum und
2. das kombinierte Verdichten und Ausschleiben des Wickelstranges,

so ergeben sich die in **Bild 3 und 4** dargestellten Verhältnisse. Wird das Halmgut in beiden Fällen über die ganze Walzenlänge gleichmäßig verteilt zugeführt, erreicht man beim Aufwickeln im seitlich geschlossenen Raum zu jedem Zeitpunkt der Verdichtung eine gleichmäßige Dichte über die Walzenlänge, **Bild 3**, während beim kontinuierlichen Verfahren bei zylindrischem Wickelraum und konstanter Ausschubgeschwindigkeit die Dichte entsprechend der

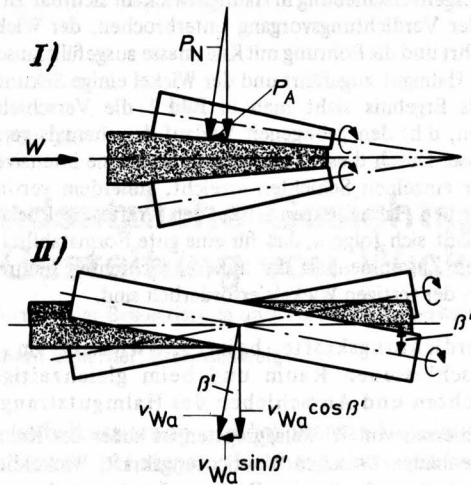


**Bild 3 und 4.** Beanspruchungsverteilung über der Walzenlänge und Wickelstruktur im Längsschnitt beim Aufwickeln im seitlich geschlossenen Raum und beim gleichzeitigen Verdichten und Ausschleiben des Wickelstranges (schematisch).

Gutverteilung im Verdichtungsraum linear von 0 bis auf die am Austritt erreichte Dichte  $Q_a$  steigt, **Bild 4**. Entsprechend der Gutverteilung unter den Walzen zeigen auch die fertigen Wickelstränge eine grundsätzlich unterschiedliche Struktur im Längsschnitt, die in **Bild 3 und 4** schematisch dargestellt ist.

In umfangreichen Versuchen (über die in einer späteren Arbeit ausführlich berichtet wird) wurde beim Aufwickelvorgang im seitlich geschlossenen Raum die Abhängigkeit zwischen der auf die Walzenlänge bezogenen Normalkraft  $P'_N$ , die an jeder Stelle der Walzen konstant ist, und der jeweiligen theoretischen Dichte  $Q_{th}$  im Wickelraum während des Verdichtungsprozesses ermittelt. Für

**Bild 5. Wickelausschub durch Neigung oder Verschränkung der Walzen.**



einen bestimmten Wickeldurchmesser läßt sie sich durch folgende Exponentialfunktion ausdrücken

$$P'_N = a e^{(b Q_{th} + c \frac{2}{th})}$$

Diese Gleichung gilt für  $Q_{th} \geq 200 \text{ kg/m}^3$ .

Dabei hängen die Koeffizienten  $a$ ,  $b$  und  $c$  vom Feuchtegehalt des Gutes,  $a$  außerdem von der Gutzufuhr ab. Weiterhin wurde ein Anstieg der bezogenen Normalkraft  $P'_N$  mit größer werdendem theoretischem Wickeldurchmesser festgestellt. Ähnliche Zusammenhänge ergeben sich auch für die bezogene Tangentialkraft  $P'_T$ . Unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeit läßt sich die Beanspruchungsverteilung beim kontinuierlichen Verfahren für jede Wickelraumform, Walzenlänge und Zuführbreite ziemlich genau berechnen; der Verlauf der bezogenen Normalkraft über der Walzenlänge ist in Bild 4 dargestellt. Die bei einer bestimmten Wickelstrangdichte wirkende resultierende Normalkraft und das Walzendrehmoment ergeben sich für den dargestellten Fall mit

$$th(x) = \frac{a}{l_{Wa}} x$$

$$\text{zu } P_N = \int_0^{l_{Wa}} P'_N(x) dx \text{ und } M = r_{Wa} \int_0^{l_{Wa}} P'_T(x) dx$$

mit  $l_{Wa}$  als der Walzenlänge und  $r_{Wa}$  als dem Walzenradius.

### 2.3. Anordnung der Walzen zum Ausschieben des Wickelstranges

In der inzwischen recht umfangreichen Patentreiteratur über die Wickelbrikettierung sind verschiedene Anordnungen von Walzen mit zylindrischer, konischer oder hyperboloidischer Form sowie unterschiedliche Zusatzwerkzeuge beschrieben, mit denen das aufgewickelte und verdichtete Halmgut aus dem Verdichtungsraum axial ausgeschoben werden kann. Bild 5 zeigt die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten für eine allein durch die Walzenanordnung hervorgerufene Axialbewegung des Wickelstranges.

Den Wickelausschub kann man erreichen

1. durch Neigen der Walzenmantellinien zur Wickelraumachse. Durch die konische Erweiterung des Wickelraumes in Ausschubrichtung findet eine Axialbewegung des Wickelstranges statt, wenn man neue Halmgutschichten zuführt und um den vorhandenen Wickelkern wickelt. Die Normalkraft  $P_N$  hat eine Komponente  $P_A$  in Ausschubrichtung; diese steht im Gleichgewicht mit dem äußeren Widerstand  $W$  und der Reibung zwischen Walze und Wickel. Der äußere Widerstand  $W$ , der z.B. durch eine Düse oder ein Nachrollaggregat aufgebracht werden kann, ist erforderlich, um auch bei unterbrochener Gutzufuhr

für einen Kontakt zwischen Wickel und Walze zu sorgen und damit ein Leerlaufen des Aggregates zu verhindern.

2. durch Verschränken (d.h. Schrägstellen) der Walzenachsen gegenüber der Wickelraumachse um den Winkel  $\beta'$ .

Unabhängig von der Größe der Gutzufuhr bewirkt die Walzendrehung mit der Umfangsgeschwindigkeit  $v_{Wa}$  mit der Komponente  $v_{Wa} \cos \beta'$  die Drehung des Wickels, und mit der Komponente  $v_{Wa} \sin \beta'$  die Axialbewegung des Wickelstranges. Bei unterbrochener Gutzuführung kann man durch Parallelstellen der Walzen ( $\beta' = 0^\circ$ ) den Wickelausschub verhindern.

Außer diesen beiden grundsätzlichen Möglichkeiten kann man auch Kombinationen beider Systeme (geneigt und verschränkt angeordnete Walzen) verwenden. Weiterhin läßt sich die Axialbewegung durch Zusatzwerkzeuge – z.B. einen in der Wickelraumachse rotierenden konischen Dorn oder eine Spindel – erzeugen, wobei der Unterschied zwischen Spindel- und Wickeldrehzahl maßgebend für die Ausschubgeschwindigkeit ist.

Für die Auswahl eines Wickelaggregates sind u.a. folgende Gesichtspunkte wichtig: Das Aggregat sollte einen möglichst hohen Halmgutdurchsatz haben und außerdem die Möglichkeit zur Dichteregulation bieten, d.h. die Wickeldichte sollte bei der im praktischen Einsatz vorkommenden unterschiedlichen Zufuhr konstant gehalten werden können.

Nach der Beziehung

$$Q = Q_{wi} F_{wi} v_a$$

hängt der Halmgutdurchsatz  $Q$  für ein kontinuierlich arbeitendes Wickelaggregat erwartungsgemäß von dem Produkt aus Wickeldichte  $Q_{wi}$ , Wickelquerschnitt  $F_{wi}$  und Ausschubgeschwindigkeit  $v_a$  des Wickelstranges ab. Soll außer der Dichte auch der im allgemeinen vorgegebene Durchmesser der Wickelbriketts konstant bleiben, dann wird der maximale Halmgutdurchsatz maßgeblich von der erreichbaren Ausschubgeschwindigkeit bestimmt, die bei ungleichmäßiger Gutzufuhr entsprechend angeglichen werden muß.

Wird die Axialbewegung des Wickelstranges allein durch die Walzenneigung hervorgerufen, ist die Ausschubgeschwindigkeit begrenzt und liegt bei gleichen Voraussetzungen beträchtlich unter den mit verschränkten Walzen erzielten Werten, wie Versuche ergaben. Außerdem ist sie nicht leicht vorher zu bestimmen und nur indirekt, z.B. durch Ändern des äußeren Widerstandes zu beeinflussen. Es sind deshalb im wesentlichen drei Gründe, die für verschränkt angeordnete Walzen sprechen:

1. Die Ausschubgeschwindigkeit  $v_a$  ist direkt bestimmbar durch die Umfangsgeschwindigkeit der Walzen und den Verschränkungswinkel.
2. Durch Ändern des Verschränkungswinkels kann die Ausschubgeschwindigkeit dem jeweiligen Durchsatz angepaßt und damit die Dichte konstant gehalten werden.
3. Durch die Möglichkeit, die Walzen parallel zu stellen, wird ein Leerlaufen des Aggregates ohne Zusatzhilfsmittel vermieden.

Für den Hauptteil der Untersuchungen wurden deshalb Wickelaggregate mit verschränkt angeordneten Walzen benutzt, um hiermit, ohne Beeinflussung durch irgendwelche Zusatzaggregate (wie Nachrollwalzen, Düse oder Spindel) den grundsätzlichen Einfluß der wichtigsten Größen auf den erzielbaren Durchsatz und vor allem auf die erreichte Wickelfestigkeit zu ermitteln.

### 3. Schrifttum

- [1] *Matthies, H.J.*: Verfahren und Aussichten der Heubrikettierung. Mitt. d. DLG Bd. 83 (1968) Nr. 49, S. 1615/18.
- [2] *Zimmer, E., u. H. Honig*: Brikettierung und Gärfutterbereitung. Mitt. d. DLG Bd. 83 (1968) Nr. 49, S. 1622/26.
- [3] *Molitorisz, J., u. H. F. Mc Colly*: Development and Analysis of the Rolling-Compressing Wafering Process. ASAE-Paper No. 68-634 (1968).