

Jörg Winkelmann und Christian Füll, Potsdam, sowie Günther Schlottmann, Rostock

# Modellierung der Stoßeigenschaften von Kartoffeln

*Die Kartoffel durchläuft zwischen Ernte und Verbrauch zahlreiche Prozesse, bei denen sie mechanischen Stößen ausgesetzt ist. Obwohl Stöße für das Kartoffelgewebe immer schädigend sind, lassen sie sich oftmals nicht vermeiden. Die heutige Technik ermöglicht es, die Verfahren auch unter dem Aspekt einer gutschonenden Behandlung der Kartoffel zu betrachten. Dabei spielt die Simulation des Stoßverhaltens eine zentrale Rolle. Nachfolgend wird ein Berechnungsansatz für die Simulation von Stößen von Kartoffelknollen vorgestellt.*

Dr.-Ing. Jörg Winkelmann war wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Agrartechnik Bornim, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam (Wissenschaftlicher Direktor: Prof. Dr.-Ing. J. Zasko), Abt. Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung, die von Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Füll geleitet wird; e-mail: cfuell@atb-potsdam.de  
 Prof. Dr.-Ing. habil. Günther Schlottmann ist Inhaber des Lehrstuhles für Maschinendynamik am Institut für Technische Mechanik der Universität Rostock

**Referierter Beitrag der Landtechnik, die Langfassung finden sie unter LANDTECHNIK-NET.com.**

## Schlüsselwörter

Prozesssimulation in der Nahrungsmittelverarbeitung, Stoßmodellierung

## Keywords

Simulation of food processing, shock modelling

Literaturhinweise sind vom Verlag unter LT 00204 erhältlich oder über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/local/fliteratur.htm> abrufbar.

Zum Stoßverhalten landwirtschaftlicher Güter, insbesondere für das von Kartoffeln, gibt es bereits eine Reihe von Arbeiten. Dabei geht es zum einen darum, Schädigungen und Beanspruchungen dieser Güter durch Stoß zu untersuchen, zu analysieren und zu vermindern [1, 2, 3, 4], und zum anderen darum, den stoßartigen Belastungseintrag für die qualitative und quantitative Bestimmung spezifischer mechanischer Güteeigenschaften auszunutzen [5, 6, 7, 8]. Zumeist bauen diese Untersuchungen in der Theorie auf den mechanischen Grundlagen für den Kontakt elastischer Körper, insbesondere auf der Hertz'schen Abhandlung über die Berührung fester elastischer Körper [9] oder phänomenologischen linearen viskoelastischen Theorien auf [10, 11]. Die, wenn auch eingeschränkte, Anwendbarkeit dieser unter Vorstellung homogener Eigenschaften technischer Materialien abgeleiteten Grundlagen auf landwirtschaftliche Stoffe und Güter wurde von verschiedenen Autoren beschrieben [2, 3, 12, 13].

Die der Theorie von Hertz zugrundeliegende Materialeigenschaft der kontaktierenden Körper ist lineare Elastizität nach dem verallgemeinerten Hooke'schen Gesetz. Im Folgenden sollen jedoch Gründe aufgeführt werden, die dazu zwingen, andere oder erweiterte Ansätze als den Hertz'schen für das Durchdringen oder Stoßen von festen Körpern aus realen Materialien zu suchen:

- Energiedissipation (Übergang einer umwandelbaren Energieform in Wärmeenergie beziehungsweise Dämpfung) ist eine wesentliche Eigenschaft des abzubildenden Problems.
- Die Geometrien der Oberflächen der kon-

taktierenden Körper entsprechen nicht den von Hertz zugrundegelegten Flächen 2. Grades oder sind während des Kontaktes einer Veränderung unterworfen (Abtragen oder Abbrechen von Partikeln während der Kontaktdeformation).

- Die elastische Komponente in der Beschreibung des Materialverhaltens ist nicht nur linear von der Deformation abhängig.

## Rheologischer Ansatz für den Stoß einer Kartoffel

Häufig werden für das Kraft-Verformungsverhalten von Körpern Ansätze in Form rheologischer Modelle unter phänomenologischer und diskretisierender Betrachtungsweise des Körper- oder Materialverhaltens aufgestellt. Dabei sind die rheologischen Modelle in der Regel Kombinationen aus elastischen Gliedern, viskosen Dämpfern und Reibern sowie aus diskreten Massen. Während einerseits die Flexibilität dieser Modellansätze durch Erhöhung der Anzahl von Komponenten in der Kombination nahezu beliebig gesteigert werden kann, ergibt sich auf der anderen Seite die Schwierigkeit, die Parameter der Komponenten in dieser Kombination im konkreten Anwendungsfall zu identifizieren. Außerdem ist ein deutlich höherer Aufwand bei der Behandlung des Modells in der Analyse und in numerischen Rechnungen erforderlich.

Folgende prägnante Material- oder Gewebeeigenschaften sind bezüglich der Ausbildung des rheologischen Modelles für rohes Kartoffelgewebe zu beachten:

- Progressive elastische Linie
- Ausgeprägtes nichtlinear geschwindig-

Tab. 1: Kraftgesetze für die Glieder des rheologischen Modelles

Table 1: Laws of force for the terms of the rheological model

Modellglied	Kraft-Bewegungs-Abhängigkeit
Plastizität I	$F_{P,I} = c_p (x_{II} - x_I)$ für $\dot{x}_I < \dot{x}_I$ ((Klammer einsetzen)) $0$ für $\dot{x}_I \leq \dot{x}_I$ mit: $c_p$ - Plastizierungskonstante
Viskosität I	$F_{D,I} = b_I (\dot{x}_I - \dot{x}_I)$ mit: $b_I$ - Dämpfungskonstante
Elastizität II	$F_{E,II} = c_E (x_{III} - x_{II})^2 \text{sign}(x_{III} - x_{II})$ mit: $c_E$ - Elastizitätskonstante
Viskosität II	$F_{D,II} = b_{II} / 2\pi \arctan(b_{II,S}(\dot{x}_{III} - \dot{x}_{II}))  x_{III} - x_{II} $ mit: $b_{II}$ - Dämpfungskonstante II $b_{II,S}$ - konstanter Stauchungsfaktor, $0 < b_{II,S} < \infty$

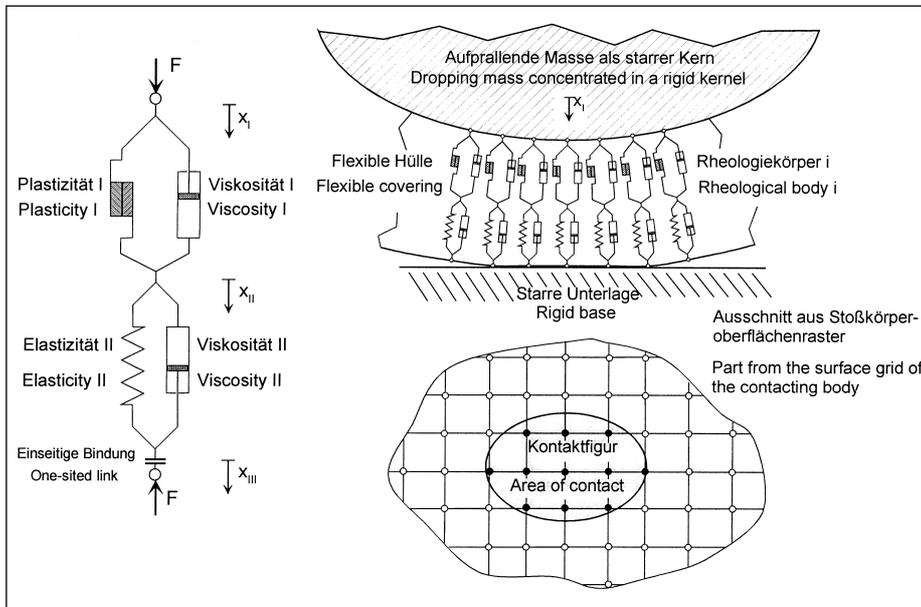


Bild 1: Rheologischer Modellansatz und darauf basierende Diskretisierung der Kartoffelknolle

Fig. 1: Rheological model approach and corresponding discretion of the potato tuber

- keitsabhängiges Dämpfungsverhalten
- Plastische Deformation bei niedrigfrequenter, zyklischer Belastung (Frequenzen < 20 Hz) erfolgt vorrangig im ersten Lastzyklus
- Ausgeprägtes Langzeit-Relaxationsverhalten (Belastungsabnahme bei konstanter Deformation) mit dem Ergebnis bleibender plastischer Verformungen.
- Plastische Verformung ist nur schwach ausgeprägt bei hohen Belastungsfrequenzen oder beim Stoß (Stoßdauern < 10 ms) selbst. Mit anderen Worten, bei wiederholten Stößen mit derselben Knolle wurde eine gute Reproduzierbarkeit der Stoßkraft-Zeit-Verläufe festgestellt.

Ausgehend von diesen Charakteristika wird das in Bild 1: dargestellte, rheologische Modell zur Beschreibung der komplexen Materialeigenschaften von Kartoffelgewebe vorgeschlagen. Der obere Teil des Modelles (Bingham-Körper) mit den durch Index I gekennzeichneten Gliedern dient dabei der Abbildung der langsamer vor sich gehenden Energiedissipation und Plastizierung. Das Einfügen der einseitigen Bindung impliziert, dass die plastische Deformation nur in eine Richtung vor sich geht, sie kann also nur größer werden. Bei hohen Verschiebungsgeschwindigkeiten (oder hohen Belastungsfrequenzen) bewirkt die relativ große Viskosität I einen „Kraftkurzschluss“, so dass das für eine derartige Belastung wirksame rheologische Modell nahezu das Aussehen eines Voigt-Kelvin-Körpers annimmt (unterer Teil des Modellansatzes mit den durch Index II bezeichneten Gliedern).

Dabei haben die einzelnen Glieder des Modells die in Tabelle 1 beschriebenen Kraft-Bewegungs-Abhängigkeiten.

Die Parameter des rheologischen Modells beeinflussen das Materialverhalten in folgender Weise:

- Erhöhung der Dämpfungskonstante I bewirkt eine langsamer, erst im Verlaufe einer größeren Anzahl von Stößen vor sich gehende Plastizierung.
- Erhöhung der Plastizierungskonstante äußert sich in einer belastungsbezogen geringeren Ausbildung der plastischen Deformation.
- Erhöhung der Dämpfungskonstante II bewirkt einen steileren Kraftanstieg und ein früheres Erreichen des Kraftmaximums im ersten Abschnitt des Kraft-Zeitverlaufs sowie einen zunächst ebenso steileren Abfall der Kurve mit einem flachen Auslaufen am Ende.
- Erhöhung der Elastizitätskonstanten führt zu höheren Reaktionskräften des rheologischen Modells sowie zu verkürzten Stoßdauern und zu verstärkter plastischer Deformation.

Im nächsten Schritt wird die Geometrie der Oberfläche des stoßenden Körpers in die Betrachtung einbezogen. Dazu wird die Kontaktfigur (Druckfläche) unter Benutzung eines Rasters diskretisiert. Praktisch senkrecht zur Druckfläche wird in jedem Rasterpunkt ein rheologischer Körper in Form des vorge-

schlagenen Modelles angebracht. Bild 1 verdeutlicht dieses Vorgehen. Zum physikalischen Hintergrund ist diesbezüglich anzumerken, daß der tatsächlich auftretende dreiaxiale Spannungs-Dehnungs-Zustand, der sich in der Kontakteinflusszone ausbildet (wie auch durch das Hertz'sche Modell beschrieben), durch diese Modellierung nicht berücksichtigt wird. Der tatsächliche, aus Messungen bekannte Kraft-Deformations-Zusammenhang wird (einschließlich der Abhängigkeit von der Deformationsgeschwindigkeit) durch Anpassung der Parameter der parallel angeordneten, einaxial belasteten und deformierten, nichtlinearen Rheologiemodelle realisiert. Unter der Voraussetzung, dass auf der Kontaktfläche keine Scherspannungen auftreten, lautet die Ersatzbedingung: Das über der Kontaktfigur ausgeführte Integral der senkrecht auf dieser Fläche stehenden Spannungen ist gleich der Summe der Reaktionskräfte der einzelnen rheologischen Körper.

Im Hinblick auf die Stoßkörpergeometrie wird bei dieser Herangehensweise an die Modellierung der viskoelastisch-plastischen Eigenschaften des Körpers davon ausgegangen, dass die Gitterabstände im Diskretisierungsrastrer den Krümmungsverhältnissen an den Oberflächen der Körper angepasst sind. Bild 2 zeigt ein Anwendungsbeispiel.

### Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Stoßeigenschaften von Kartoffeln mit guter Näherung mathematisch modelliert werden können. Grenzen wurden bei der Anwendung auf das Schälen mit einem oszillierenden mechanischen Planschäler aufgezeigt. Für die Anwendung der beschriebenen Methode ist darauf hinzuweisen, dass die Einflüsse der mechanischen Eigenschaften durch die vorhandene große Sortenspezifität bei Kartoffeln und deren Abhängigkeit von der Lagerungsdauer und den Lagerungsbedingungen bei der praktischen Anwendung des Verfahrens zu berücksichtigen sind.

Bild 2: Exemplarischer Vergleich des Stoßkraft-Zeit-Verlauf aus Simulation und Messung

Fig. 2: Exemplary comparison of shock force – time function by simulation and from measurement

