

gramm in der Programmiersprache FORTRAN 4200 erstellt.

Die Aufprallenergie soll aber das Energieminimum für das Auftreten von Kartoffelbeschädigungen nicht übersteigen. Für einen Siebstab mit einem Durchmesser von 12 mm ohne Gummiummantelung wurde ein Wert von  $0,18 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)/s}^2$  für dieses Minimum ermittelt [4]. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung der berechneten spezifischen Aufprallenergien die Stoßmasse, die bei den einzelnen Schwingungszuständen mit maximaler Aufprallenergie nicht überschritten werden darf, wenn Kartoffelbeschädigungen vermieden werden sollen (Tafel 2). Stoßmassen von 0,069 kg und 0,114 kg werden von

einer Vielzahl von Kartoffeln mit Sicherheit übertroffen, zumal nicht nur die Masse der Kartoffeln selbst, sondern auch die des beim Aufprall auf ihr lastenden Erdbolsters zu beachten ist. Von den herausgefundenen Schwingungszuständen mit maximaler spezifischer Aufprallenergie erfüllt somit nur der mit einer Schwingwegamplitude von 0,01 m und einer letztlich durch Anstiegswinkel und Phasengeschwindigkeit der Siebkette bestimmten Frequenz im Bereich von 8,0 bis 10,0 Hz die Forderung nach höchstmöglicher Absiebleistung unter Ausschluß von Kartoffelbeschädigungen.

## Literatur

- [1] Petrov, G. D.: Kartofeleuboročnye mašiny (Kartoffelerntemaschinen). Moskva: Izdatel'stvo Mašinoštroenie 1972.
- [2] Recker, W.: Untersuchungen über das Bewegungsverhalten von Siebketten für Kartoffelerntemaschinen. Dt. Agrartechnik, Berlin 22 (1972) 12, S. 571–574.
- [3] Batel, W.: Untersuchungen zur Absiebung feuchter, feinkörniger Haufwerke auf Schwing-sieben. Technische Hochschule Aachen, Dissertation 1954.
- [4] Schlesinger, F.: Messung der zulässigen Belastungsimpulse für Kartoffeln als Grundlage für Siebwerkgestaltungen. Institut für Mechanisierung der Landwirtschaft Potsdam-Bornim, Teilbericht 1968 (unveröffentlicht).

A 3805

# Ultraschallmessungen an Kartoffeln

Dipl.-Phys. M. Vette/Prof. Dr. sc. nat. J. Hellebrand

Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Sektion Mechanisierung der Tierproduktion

## 1. Einleitung

Im Zuge der Mechanisierung der Landwirtschaft wird die Tendenz beobachtet, daß mit der Zunahme von Belastungen des landwirtschaftlichen Stoffs durch den verstärkten Einsatz von Mechanisierungsmitteln eine Erhöhung der Beschädigung verbunden sein kann. Für die gutschonende Gestaltung technologischer Prozesse müssen Kenntnisse über die Größen gewonnen werden, die die Wechselwirkung zwischen landwirtschaftlichem Stoff und Mechanisierungsmittel beeinflussen. Das ist eine notwendige Voraussetzung, um begründete Anforderungen sowohl an die Züchtung neuer – beschädigungswiderstandsfähiger – Sorten als auch an die Zulässigkeit von Belastungsgrenzen durch Mechanisierungsmittel zu formulieren.

Die häufigste Belastungsform im Ernteprozess der Kartoffel ist die Stoßbelastung. In Mechanisierungsmitteln treten Stoßzeiten von 10 bis 40 ms auf [1]. Baganz [2] konnte mit Hilfe von Retardationsmessungen zeigen, daß bei Spannungsperioden  $< 1$  s das Gesamtverhalten zu 60% elastisches Verhalten ist. Der Stoßvorgang als dynamische Beanspruchung kann durch die Hertz'sche Theorie zur Berührung fester elastischer Körper beschrieben werden [1].

Als Parameter sind somit Stoßenergie, Krümmungsradien und die elastischen Konstanten beider Partner festzustellen.

Ultraschallmessungen ermöglichen die Bestimmung „dynamischer“ elastischer Konstanten. Während die Ultraschallmeßtechnik in der Industrie (Werkstoffprüfung) vielfach eingesetzt wird und Routinemessungen durchgeführt werden, gibt es nur wenige Untersuchungen an landwirtschaftlichen Stoffen [3, 4, 5].

Mit Hilfe von Ultraschallmeßtechnik als dynamische Methode wird eine Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in der Kartoffel vorgenommen und geprüft, ob die Schallgeschwindigkeitswerte und die daraus ermittelten elastischen Konstanten knollenspezifische bzw. sortenspezifische Kenngrößen der Kartoffeln darstellen.

## 2. Methoden und Materialien

In der Vielfalt der verschiedenen Prüfverfahren der Ultraschallmeßtechnik nimmt das Impuls-Laufzeitverfahren die dominierende Stellung ein. Es gestattet Messungen der Schallgeschwindigkeit und der Absorption. Prüfverfahren werden auch passive Verfahren genannt, da die Energiedichten (etwa  $10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  bei Dauereinstrahlung) nicht zu Veränderungen des Materials führen. Die Ausbreitung von Ultraschallwellen kann z. T. mit den Regeln der geometrischen Optik beschrieben werden, da die Ultraschallwellen stark gebündelt sind. So wird beim Impuls-Laufzeitverfahren durch einen Geber dem Probekörper eine Schwingung definierter Frequenz aufgeprägt. Die Meßgröße ist die Laufzeit der sich ausbreitenden Welle bis zum Empfänger. Zum Einsatz kam ein Ultraschallmeßgerät USME5 (Fa. Krompholz, Pirna). Als Ultraschallgeber standen Prüfköpfe im Frequenzbereich von 20 bis 500 kHz zur Verfügung. Die Messungen erfolgten an den Sorten 'Sola', 'Adretta', 'Libelle', 'Fringilla', 'Maxilla' und 'Koretta N'.

Von jeder Sorte wurden sieben Knollen ausgewählt, und mit Hilfe eines Korkbohrers (Durchmesser 15 mm) wurden mindestens drei Zylinder (Länge 20 mm) aus dem Mark der Kartoffel entnommen, so daß je Sorte mindestens 21 Proben zur Verfügung standen.

## 3. Ergebnisse

Im Bild 1 ist die Schallgeschwindigkeit einiger Sorten als Funktion der Prüffrequenz dargestellt, dem Bild 2 kann man den Einfluß der Lagerzeit auf die Schallgeschwindigkeit entnehmen. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt:

- Da im MHz-Bereich aufgrund der hohen Absorption keine Messung der Schallgeschwindigkeit mehr möglich ist, muß in den kHz-Bereich ausgewichen werden.
- Der Größtfehler für die Einzelmessung der Schallgeschwindigkeiten ist mit 4% anzugeben.
- Die Variationskoeffizienten für die Schallgeschwindigkeit der einzelnen Sorten liegen zwischen 10% und 15%. Bildet man

aus den Meßwerten aller Knollen einer Sorte „gewogene Varianzen“ [6], so erhält man Werte von 5 bis 8%. Die Schallgeschwindigkeit ist also in erster Linie eine knollenspezifische Größe.

- Die größten Schallgeschwindigkeiten treten bei den Sorten 'Sola' und 'Maxilla' auf, die kleinsten Werte wurden für 'Adretta' und 'Koretta N' gefunden.
- Eine Varianzanalyse weist zwischen den Sorten bei allen Prüffrequenzen signifikante Unterschiede aus.

## 4. Diskussion und Schlußfolgerungen

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen im Kartoffelgewebe liegt im Bereich von rd. 450 m/s bis über 800 m/s und damit deutlich unter dem Wert von Wasser, dem Hauptbestandteil der Kartoffel. Im Unterschied zur konventionellen Werkstoffprüfung erfolgt die Untersuchung nicht im MHz-Bereich. Mit der Reduzierung der Frequenz zur Vermeidung von hoher Absorption wächst die Wellenlänge an. Sollte diese die Größenordnung der Probe erreichen, sind Veränderungen des Charakters der Wellenausbreitung zu berücksichtigen. Da innerhalb des Frequenzbereichs von 20 bis 500 kHz keine ausgeprägte Schalldispersion beobachtbar war, können Routineuntersuchungen bei einer Festfrequenz durchgeführt werden. Mit der relativ hohen Meßgenauigkeit der Einzelmessung sind erhebliche Schwankungen des biologischen Materials festzustellen. Die Meßergebnisse weisen darauf hin, daß die Schallgeschwindigkeit zur Charakterisierung der Sorten geeignet sein kann. Da jedoch knollenspezifische Größen das Ergebnis bilden, sind Messungen an einem noch größeren Kollektiv erforderlich, um Sortenunterschiede zu bestätigen.

Die Schallausbreitung im Ultraschallbereich kann mit Longitudinalwellen beschrieben werden, für die in isotropen und ausgedehnten Medien (Wellenlänge klein im Vergleich zu Probenabmessungen) folgende Beziehung gilt:

$$c_l = \left[ \frac{E}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (1)$$

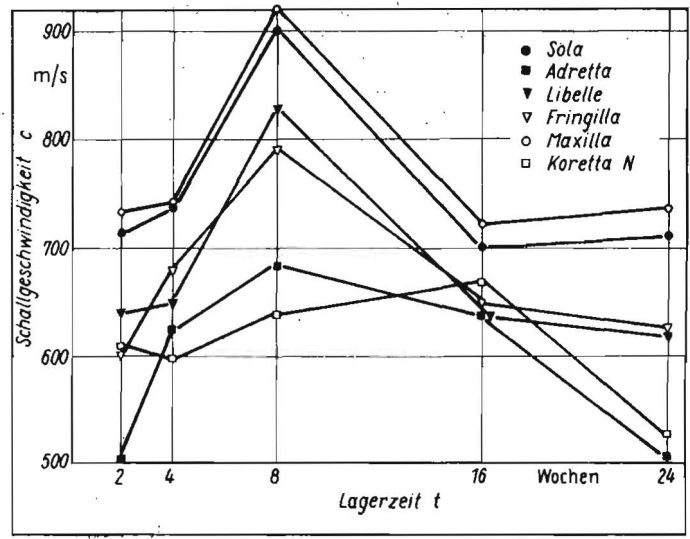
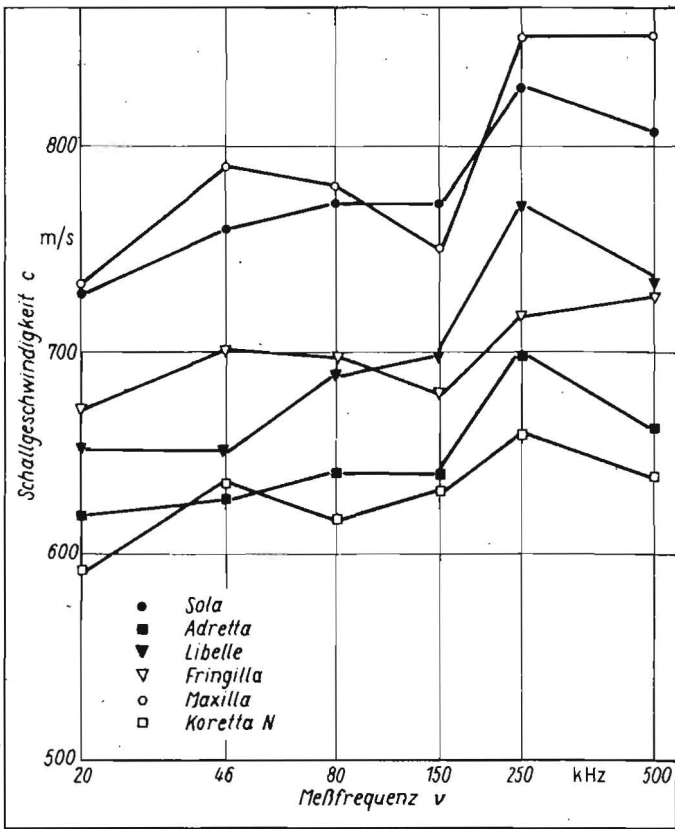


Bild 2. Schallgeschwindigkeit  $c$  in Abhängigkeit von der Lagerzeit  $t$  nach der Ernte bei der Meßfrequenz 20 kHz

Bild 1. Schallgeschwindigkeit  $c$  verschiedener Kartoffelsorten in Abhängigkeit von der Meßfrequenz  $\nu$  (Messungen 4 Wochen nach der Ernte)

- $c_l$  Schallgeschwindigkeit (longitudinal)  
 $E$  Elastizitätsmodul  
 $\rho$  Dichte  
 $\mu$  Querkontraktionszahl.

Um aus der Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen den  $E$ -Modul zu ermitteln, muß die Querkontraktionszahl  $\mu$  bekannt sein, oder es sind parallele Messungen mit anderen Wellenformen erforderlich, die dann die Berechnung der elastischen Konstanten  $E$  und  $\mu$  zulassen. Für Kartoffeln wurden aus dem Kompressionsverhalten Werte für  $\mu$  von 0,49 bzw. 0,492 abgeleitet [7, 8]. Damit ergeben sich elastische Moduln im Bereich von 8 bis 33 MPa, die im Widerspruch zu den aus dem Druckversuch bestimmten Sekantenmoduln von 2 bis 6 MPa [9] stehen.

Bei Schalluntersuchungen im Niederfrequenzgebiet [10] hat man Dehnwellen (Wellenlänge groß zum Probendurchmesser) mit

$$c_d = \left( \frac{E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} ; \quad (2)$$

- $c_d$  Ausbreitungsgeschwindigkeit der Dehnwelle.

Die von den Autoren ermittelten Geschwindigkeiten im Niederfrequenzbereich liegen zwischen 50 und 70 m/s und führen zu  $E$ -Moduln von rd. 3 bis 5 MPa. Die Kombination mit Ultraschallmessung erlaubt den Schluß, daß die Querkontraktionszahl  $\mu$  überwiegend im Bereich von  $0,497 \pm 0,003$  liegen sollte und damit nahe dem Grenzwert von 0,5, der gummiähnliches Verhalten bzw. Flüssigkeitseigenschaften widerspiegelt. Das vorliegende Untersuchungsmaterial reicht

jedoch nicht aus, um die Querkontraktionszahl als eine spezifische Größe für Kartoffelmark, Einzelknollen oder Sorten auszuweisen. Da geringe Änderungen von  $\mu$  bei einem Grundwert von nahe 0,5 starke Schwankungen in der Berechnung von  $E$  nach Gl. (1) zur Folge haben, ist gegenwärtig die Ultraschallmeßtechnik nur bedingt für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Kartoffelproben geeignet. Andererseits zeigen die bisherigen Untersuchungen, daß die Ultraschallgeschwindigkeit ein kartoffelspezifisches Merkmal darstellt und daher für die Sortenklassifizierung, für die Untersuchung der lagerzeitbedingten Änderungen und ggf. für die Kartoffelsortierung geeignet sein sollte.

### 5. Zusammenfassung

Mit Hilfe des Impuls-Laufzeitverfahrens wird die Ultraschallausbreitung in Kartoffeln verschiedener Sorten untersucht. Aufgrund starker Absorption im MHz-Gebiet sind Frequenzen im Bereich von 20 bis 500 kHz zu bevorzugen. Da in diesem Bereich keine starke Frequenzabhängigkeit feststellbar ist, kann ein Ultraschallprüfverfahren für Kartoffeln auf eine Frequenz beschränkt werden. Die Ultraschallgeschwindigkeit erweist sich als eine knollenspezifische Größe, Sortenunterschiede sind beobachtbar. Elastische Konstanten können aus Ultraschallmessungen nur bedingt ermittelt werden, da die Poissonzahl  $\mu$  nahe dem Grenzwert 0,5 liegt. Für die Kartoffelprüfung ist deshalb die Schallgeschwindigkeit als Kennwert gegen-

über daraus abgeleiteten mechanischen Parametern vorzuziehen.

### Literatur

- [1] Herold, B.: Untersuchung der mechanischen Beanspruchung landwirtschaftlicher Produkte in Mechanisierungsmitteln. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Dissertation 1978.
- [2] Baganz, K.: Technologically Effective Material Parameters of Potatoes. Transactions Int. Conference Agrophysics, Lublin, 13.-18. 9. 1976, Zeszyty Problemowe Postępow Nauk Rolniczych 1978, Z-203, S. 427.
- [3] Vette, M.; Hellebrand, J.: Anwendung akustischer Meßverfahren zur Kennwertgewinnung landwirtschaftlicher Stoffe. IH Berlin-Wartenberg, Forschungsbericht 1984 (unveröffentlicht).
- [4] Fasold, W., u. a.: Taschenbuch der Akustik. Berlin: VEB Verlag Technik 1984.
- [5] Tietz, H.-D.: Ultraschallmeßtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1969.
- [6] Weber, E.: Grundriß der biologischen Statistik. Jena: Gustav Fischer Verlag 1980.
- [7] Finney, E. E.; Hall, C. W.: Elastic Properties of Potatoes. Trans. of the ASAE, St. Joseph, Mich. 10 (1967) 1, S. 4-8.
- [8] Mohsenin, N. N.: Physical properties of agricultural materials. New York: Gordon And Breach 1970, S. 208.
- [9] Hellebrand, J.: Mechanische Eigenschaften von Kartoffeln bei wiederholter Belastung. Wissenschaftliche Beiträge der IH Berlin (1984) 6, S. 51.
- [10] Zinke, J.; Hellebrand, J.: Akustische Messungen an landwirtschaftlichen Stoffen. Tagungsbericht der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin (1982) 208 II, S. 201-205.