

# Theoretische und experimentelle Untersuchung der Stoßbeanspruchung von eingeschäumten Äpfeln

Von Yoav Sarig, Bet Dagan, Israel, und  
Larry Segerlind, East Lansing, USA \*)

DK 631.358:634.1:519.673

Die Einführung der maschinellen Ernte von Tafelobst wird gegenwärtig durch die bei diesen Verfahren auftretenden Fruchtbeschädigungen verhindert. Ein Verfahren, die Beschädigungen zu vermindern oder zu vermeiden, besteht in der stoßdämmenden Umhüllung von Früchten und Zweigen mit Kunststoffschäum.

Dieser Beitrag untersucht mit Hilfe eines Finite-Element-Modells, wie sich bei vorgegebenen Belastungen — entsprechend den üblichen Fallhöhen der Früchte — die Umhüllung auf die Schwere der Beschädigungen auswirkt. Bei der nachfolgenden praktischen Erprobung in einem Obstgarten wurden die schaumumhüllten Früchte als unbeschädigt und qualitativ erstklassig eingestuft.

## 1. Einleitung

Um das Problem von Fruchtbeschädigungen bei der maschinellen Ernte zu lösen, muß die Wirkung der von der Frucht aufzunehmenden Aufprallenergie verringert werden. Eine der Lösungsmöglichkeiten ist die Aufnahme der Aufprallenergie durch eine "Polsterung", d.h. durch eine stoßdämmende Umhüllung. Dieses kann entweder durch eine Umhüllung der Zweige, durch ein Einkapseln der Früchte oder durch beides gleichzeitig erreicht werden. Solche Lösungen wurden von mehreren Forschern vorgeschlagen [1, 2, 3, 4]. Danach sollte die Frucht vor der Ernte "verpackt", d.h. umhüllt werden, um ihren Widerstand gegen Beschädigung zu erhöhen. Am erfolgversprechendsten waren Versuche, die Fruchtbeschädigungen durch Einschäumen (Schaumeinkapseltechnik) zu verringern [5].

Diese Versuche wurden an Grapefruit-Bäumen durchgeführt, deren Zweige und Früchte mit Harnstoff-Formaldehyd (UF)-Schaum bespritzt wurden. Dieses Material ist ungiftig und wurde wegen seiner die Umwelt nicht belastenden Eigenschaften anderen Materialien vorgezogen. Die Ergebnisse zeigten eine deutliche und statistisch gesicherte Verminderung von Fruchtbeschädigungen. Damit war die Polsterwirkung des UF-Schaumes bei maschinell geernteten Früchten bestätigt, und es war anzunehmen, daß diese Einkapseltechnik nach verfahrenstechnischen Verbesserungen praktikabel sein könnte.

Die Wirksamkeit der Einkapsel-Technik kann durch eine Analyse der bei Stoßbelastung auftretenden Reaktionskräfte an der durch den Schaum eingekapselten Frucht überprüft und durch experimentelle Versuche bestätigt werden. Die theoretische Betrachtung ist jedoch dadurch erschwert, daß Probleme der Elastizität von

dreidimensionalen Körpern mathematisch geschlossen schwer darzustellen sind. Als Alternative zum klassischen mathematischen Ansatz besteht die Möglichkeit, die Verknüpfung durch ein abgestimmtes diskretes Modell darzustellen und mit numerischen Methoden ein Näherungsergebnis zu erzielen. Ein solches Modell ist Grundlage der Finite-Element-Methode, die bereits erfolgreich bei der Erforschung der mechanischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Produkte angewandt worden ist [6, 7, 8]. Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, die Reaktion von in Schaum eingekapselten Äpfeln auf Stoßbeanspruchung durch Einsatz der Finite-Element-Methode vorauszusagen und das rechnerische mit einem experimentellen Ergebnis zu vergleichen. Besonderes Ziel war es dabei, theoretisch und experimentell die Deformation von Äpfeln mit einem Schaumüberzug von unterschiedlicher Dicke und Dichte zu messen und zu vergleichen sowie das Verfahren auf die praktische Anwendbarkeit hin zu überprüfen.

## 2. Versuchsmethodik

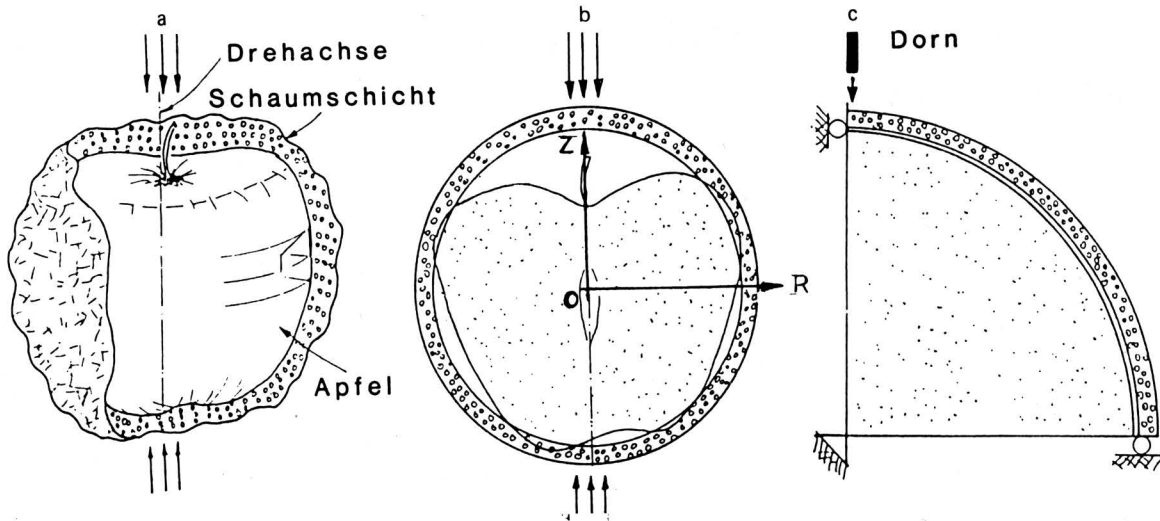
Die Finite-Element-Methode ersetzt näherungsweise eine stetige Funktion, die durch entsprechende Differentialgleichungen definiert und gegebenen Randbedingungen unterworfen ist, und zwar durch eine stückweise Reihung von stetigen Funktionen über eine begrenzte Anzahl von Elementen. Diese Funktionen sind durch Werte am Knotenpunkt des Elements definiert und geben näherungsweise die Deformation über das ganze Gebiet wieder.

Die Randbedingungen für das Modell wurden von der Stärke der Verletzungen abgeleitet, die durch die Stoßkräfte beim freien Fall von maschinell geernteten Äpfeln verursacht werden. Hierzu wurden Fallversuche aus vier verschiedenen Höhen unternommen, die die Fallbedingungen beim Auftreffen von losgelösten Äpfeln auf die tieferen Zweige nachahmen [9].

Die Größe der Verletzung  $\delta$  nach einem freien Fall des Apfels wird von einer Formel abgeleitet, die die erforderliche Kraft  $P$  angibt, die wirken muß, um im Druckversuch mit einem Stempel (Zweigstumpf) eine bestimmte Verletzung des Apfels zu verursachen. Für diese Verknüpfung von Größe der Verletzung und erforderlicher Kraft lag ein Rechnerprogramm vor [10], so daß für jede gegebene Kraft der entsprechende Wert der Verletzung errechnet werden kann.

Bei der modellhaften Betrachtung kann der Apfel als ein drehrunder, fester Körper mit achsensymmetrischer Deformation beschrieben werden [11]. Deshalb besteht das Modell aus einer elastischen Kugel, die in einer elastischen Umhüllung eingekapselt, einer vorgeschriebenen Deformation am Rande unterworfen ist. Bei festgelegter Grenzdeformation wird so die Reaktion eines schaumgekapselften Apfels mit beiderseitigen Druckstellen infolge Aufprallens auf einen Zweig beschrieben, **Bild 1**. Die ausgewählte Deformation in Form eines flachen, oberflächlichen Ringquerschnitts ist als typisch für einen schweren Belastungsfall anzusehen, bei dem ein fallender Apfel bei maschineller Ernte in einer Astgabel aufschlägt. Diese Lösung sollte aber auch mit geringen Änderungen für andere Zweiganordnungen anwendbar sein.

\*) Dr. Y. Sarig ist Direktor des Institute of Agricultural Engineering des Volcani Center in Bet Dagan, Israel; Dr. L. Segerlind ist Professor am Department of Agricultural Engineering der Michigan State University, East Lansing, USA.

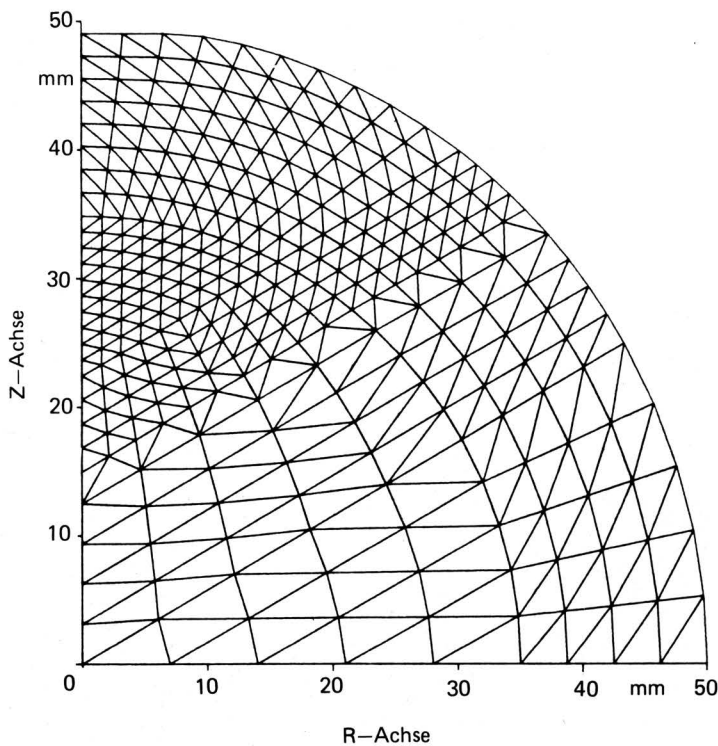


**Bild 1.** Ableitung des Modells für die Finite-Element-Analyse eines in Schaum eingekapselten Apfels.

- a Apfel als drehrunder eingehüllter Körper unter axialer Belastung
- b zweidimensionale Darstellung des untersuchten Bereichs
- c Modell mit Festlegung der Randbedingungen

Ein typisches Finite-Element-Netz für das Modell zeigt **Bild 2**. Wegen der Symmetrie der Kugel und der achsensymmetrischen Beanspruchung genügt es, nur einen Quadranten der Kugel zu betrachten. Der Radius des Apfels wurde auf 35 mm festgesetzt, die Dicke des Schaumüberzuges wurde mit 15, 20 und 25 mm variiert.

Die Aufteilung der Fläche in dreieckige Elemente wurde mit einem netzzeugenden Rechnerprogramm ausgeführt, welches eine Optimierung-Subroutine enthielt, die die Knotenpunkte für einen minimalen Bedarf an Rechnerspeicherplatz kennzeichnete [12]. Die Netzelemente wurden so gestaltet, daß ihre Größe mit Annäherung an den Belastungspunkt abnimmt. Das fertige Netz enthielt 586 Elemente mit 315 Knotenpunkten.



**Bild 2.** Finite-Element-Netz für die Modelluntersuchung eines eingeschäumten Apfels; Schaumschicht 15 mm.

Ein vorhandenes Rechnerprogramm für die Finite-Element-Methode wurde für den achsensymmetrischen Fall eines aus zwei Stoffen bestehenden Bereiches verändert. Die mechanischen Eigenschaften der elastischen Schicht (Schaum) wurden experimentell ermittelt [13] und erbrachten den scheinbaren Elastizitätsmodul  $E_f$  als Funktion der Schaumdichte und die Poissonzahl  $\nu$ . Die mechanischen Eigenschaften von Äpfeln wurden von *Hamann* und *Mohsenin* ermittelt [14, 15]. Die Zahlenwerte der mechanischen Eigenschaften der zwei Stoffe – Äpfel und Schäume – zeigt **Tafel 1**.

Es wurden vier verschiedene Verletzungen gewählt, die der Belastung von Äpfeln bei freiem Fall aus typischen Höhen bei maschineller Ernte entsprechen. Das Programm gibt die axiale Deformation  $U_z$  für die Knotenpunkte im gesamten Bereich an. Die Berechnungen wurden für zwei Schaumdichtewerte mit verschiedenen Elastizitätsmodulen bei Wirkung der vier verschiedenen Druckkräfte vorgenommen und die entsprechenden Randbedingungen der Verletzungen ermittelt.

Material	Elastizitätsmodul $E_f$ N/cm <sup>2</sup>	Poissonzahl $\nu$ –
1. Schaum		
1.1. Dichte 11,2 kg/m <sup>3</sup>	83,3	0,36
1.2. Dichte 19,2 kg/m <sup>3</sup>	132,2	0,36
2. Apfel		
2.1. "Golden Delicious"	378	0,22
2.2. "Red Delicious"	334	0,22

**Tafel 1.** Mechanische Eigenschaften der bei den Versuchen benutzten Materialien.

### 3. Versuchsergebnisse und Diskussion

Ein typisches Beispiel eines deformierten Netzes zeigt **Bild 3** für einen "Golden Delicious"-Apfel, der in UF-Schaum (Stärke 15 mm, Dichte 11,2 kg/m<sup>3</sup>) eingekapselt war und mit einer Stoßkraft von 180 N belastet wurde. **Tafel 2** zeigt die Oberflächendeformation von "Golden Delicious"-Äpfeln, die in UF-Schaum von verschiedener Dicke und Dichte eingekapselt und mit verschiedenen Stoßkräften belastet wurden. Die Ergebnisse zeigen, daß bei geringen Stoßkräften (kleine Fallhöhe) größere Schaumdichte wirkungsvoller ist als eine größere Dicke. Bei größeren Stoßkräften (große Fallhöhe) ist dagegen eine größere Dicke des Schaumpolsters von größerer Wirkung. Da es aber schwierig sein wird, in der

Praxis einen dünnen gleichmäßigen Schaumbelag zu erzeugen, wird es sinnvoll sein, bei der Optimierung der Methode einer größeren Dicke des Schaumbelages den Vorzug zu geben.

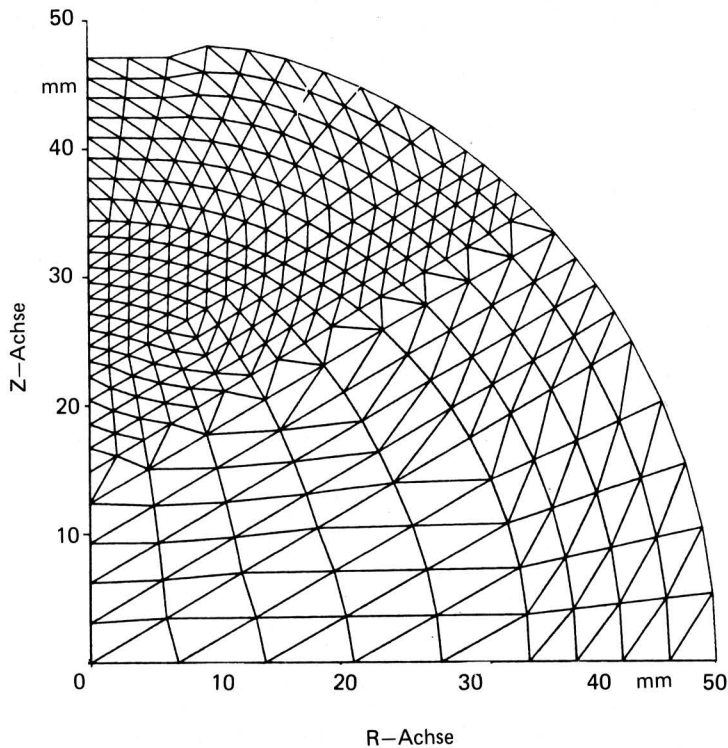


Bild 3. Netz bei Deformation des eingeschäumten Apfels mit einer Kraft von 180 N.

Schaum-Dichte	Schaum-Dicke	Stoßkraft			
		45 N	90 N	180 N	270 N
11,2	15	0,063	0,180	0,414	0,648
	20	0,048	0,140	0,322	0,508
	25	0,043	0,127	0,295	0,465
19,2	15	0,030	0,145	0,363	0,584
	20	0,020	0,112	0,287	0,460
	25	0,018	0,102	0,262	0,422

Tafel 2. Oberflächendeformation in mm am Ort der Belastung für Äpfel der Sorte "Golden Delicious", die in UF-Schaum verschiedener Dicke und Dichte gekapselt und mit verschiedenen Stoßkräften belastet wurden.

Die axiale Deformation in z-Richtung, die beim Einkapseln von Äpfeln mit UF-Schaum von verschiedener Dichte und Dicke auftritt, ist in Bild 4 dargestellt. Bei dem dichteren Schaum nähern sich die Werte der Deformation schneller dem Wert Null. Es ist zu beachten, daß die Werte für die Oberflächendeformation der Äpfel auch bei dünnem Schaumbelag sehr klein sind. Hieraus ist zu schließen, daß ein Schaumbelag mit einer Dichte von 11,2 kg/m<sup>3</sup> und einer Mindestdicke von 15 mm bei freifallenden Äpfeln einen ausreichenden Schutz bietet.

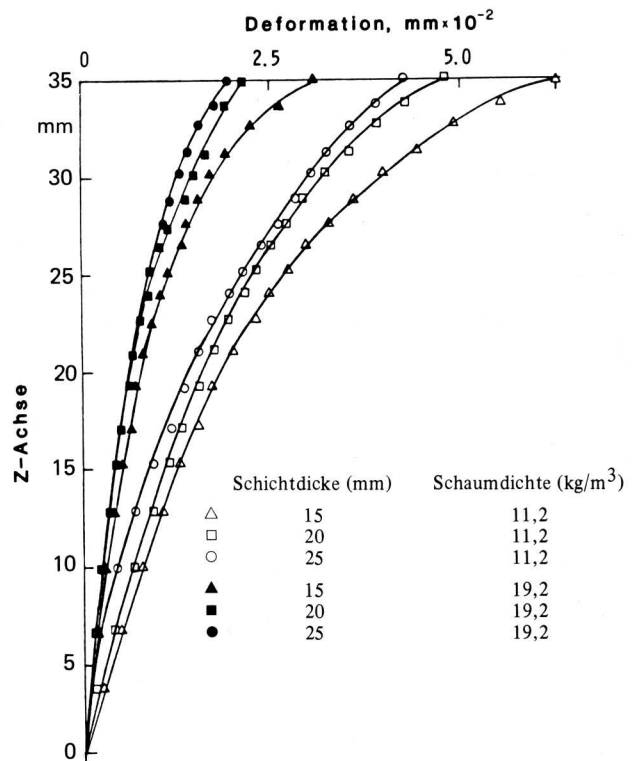


Bild 4. Axiale Deformation des eingeschäumten Apfels bei unterschiedlich dicker und unterschiedlich dichter Ausführung der Schaumschicht, Belastung 45 N.

#### 4. Praktische Versuche

Die Feldversuche zur Überprüfung der theoretischen Analyse wurden in einer landesüblichen Apfelpflanzung durchgeführt. Fünf "Golden Delicious"-Bäume wurden mit einem tragbaren Schaumgerät mit UF-Schaum bespritzt (eingeschäumt), eine andere Gruppe von fünf Bäumen diente als unbehandelte Kontrollgruppe. Der Durchschnittsertrag pro Baum wurde mit 170–200 kg geschätzt, die mittlere Höhe der Bäume betrug 3,5 m. Die Bäume wurden zwar in erster Linie zum Schutz der Früchte mit Schaum bespritzt, tatsächlich wurden aber sowohl die Früchte wie die Zweige in unterschiedlichem Ausmaß eingeschäumt, Bild 5.



Bild 5. Versuchswiese Anwendung von Harnstoff-Formaldehyd-Schaum bei der maschinellen Ernte in einer Apfelpflanzung von "Golden Delicious".

Nach einem Tag wurden die Äpfel maschinell nach einem Schüttel-Auffangverfahren geerntet. Proben der Früchte von beiden Baumgruppen wurden am Förderbandende gesammelt und zur abschließenden Beurteilung in ein 106 km entferntes Labor gebracht. Die Früchte wurden dort für einen Tag bei Zimmertemperatur ( $21 \pm 1$  °C) gelagert, um die Druckstellen deutlicher hervortreten zu lassen. Von jedem Baum wurden 65 Früchte beliebig (zufallsverteilt) entnommen und hinsichtlich ihrer Qualität beurteilt. Hierbei wurde jeder Apfel einzeln untersucht, die Druckstellen gezählt und nach Durchmesser und Tiefe bonitiert. Außerdem wurden Einstiche, Einschnitte und Kratzstellen gekennzeichnet und gezählt. Die zusammenfassende Klassifizierung folgte den Wertungskriterien von Burt [16], der bei den Qualitätsgruppen von Äpfeln in leicht, mittel und schwer beschädigt unterteilt, in Übereinstimmung mit dem offiziellen amerikanischen Standard (USDA standards). Tafel 3 zeigt die Ergebnisse.

Behandlung der Äpfel	Qualitätsgrad		
	1 Leichte Schäden*)	2 Mäßige Schäden	3 Schwere Schäden
Schaumgekapselt	55	30	15
Unbehandelt	8	14	78

\*) 1 entspricht U.S.-Qualität "Extra Fancy"  
 2 entspricht "Fancy und U.S. No 1" und  
 3 entspricht U.S.-Qualität "Utility"

Tafel 3. Beurteilung von in Schaum eingekapselten und von unbehandelten Äpfeln nach maschineller Ernte; Prozentwerte für die Qualitätsklassenzuordnung.

Im allgemeinen hatten die behandelten Äpfel durchschnittlich zwei Druckstellen mit einem mittleren Durchmesser von 10 mm und (entsprechend der Festlegung) weniger als 3 mm Tiefe. Dagegen hatten die unbehandelten Äpfel durchschnittlich fünf Druckstellen mit einem Durchmesser von 15 mm und zwischen 3 und 6 mm Tiefe. Außerdem hatten die unbehandelten Früchte mehr Kratzstellen als die eingekapselten. Dabei ist jedoch darauf hinzuweisen, daß die Ergebnisse für eingekapselte Äpfel von Versuchsfrüchten stammen, deren Oberfläche nur teilweise von Schaum bedeckt war. Das wichtigste Ergebnis ist jedoch die Tatsache, daß der von Schaum bedeckte Teil der Früchte unbeschädigt war. Dieser Befund stimmt mit der theoretischen Analyse überein, wonach ein Einkapseln mit UF-Schaum einer gegebenen Dicke frei fallenden, auf Zweige aufprallenden Äpfeln einen ausreichenden Schutz gegen Beschädigung bietet.

## 5. Zusammenfassung

Es wird eine neue Methode zum Schutz von Äpfeln bei maschineller Ernte vorgeschlagen. Diese besteht darin, daß die Bäume vor der Ernte mit einem Harnstoff-Formaldehyd-Schaum bespritzt werden. Dabei werden sowohl die Äpfel wie die Zweige mit einer Schaumschicht bedeckt, die die Stoßenergie der frei fallenden Äpfel abfängt und die so entstehende Deformation und damit Beschädigung auf ein Mindestmaß senkt.

Die Finite-Element-Methode wurde zur Vorhersage der Deformation bei gegebenen Randbedingungen eingesetzt. Eine Näherungslösung für den ganzen Bereich erhält man durch die kombinierten Lösungen für die Elemente, die den Bereich darstellen. Die Methode hat den Vorteil, daß sie für unregelmäßig geformte Körper anwendbar ist, was für Untersuchungen an landwirtschaftlichen Produkten eine wünschenswerte und notwendige Eigenschaft ist.

Vorversuche mit Apfelbäumen wurden in einem Obstgarten unternommen. Schaumbedeckte Früchte waren unbeschädigt und wur-

den als qualitativ erstklassig beurteilt. Die Feldversuche ergaben Befunde, die mit denen der theoretischen Analyse gut übereinstimmen. Die Anwendung des Spritzvorganges wies noch methodische und verfahrenstechnische Nachteile auf. Da die einheitliche Bedeckung der Früchte ein kritischer Faktor ist, müssen ernsthaftere Anstrengungen zur Entwicklung einer wirkungsvollen Einschäumtechnik gemacht werden.

## Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] *Rehkugler, G.E. u. E.D. Markwardt*: An evaluation of limb padding to reduce damage in mechanical harvesting. Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 2, S. 734/41.
- [ 2 ] *Despain, C.C.*: Fruit harvesting technique. U.S. Patent No. 3,630,758 (1968).
- [ 3 ] *Whitney, L.F.*: Evaluation of foam plastic globules as an energy absorbent for harvesting fruit. Proc. Nat. Agric. Plastics Conference, Chicago, IL (1971) S. 206/13.
- [ 4 ] • *Whitney, L.F., Chokyun Rha* (Ed.): Alteration of apparent properties of fruit for harvesting. Theory, Determinization and Control of Physical Properties of Food Materials. Ch. 9, S. 181/89. Dordecht Holland: D. Reidel Publishing Co. 1975.
- [ 5 ] *Sarig, Y., I. Burshtein u. A. Golomb*: Bruise reduction potential for foam-encapsulated fruit as related to mechanical harvesting. ASAE-Paper No. 75-6506.
- [ 6 ] *Apaclla, R.*: Stress analysis in agricultural products using the finite element method. Unpublished M.S. thesis, Dept. of Agricultural Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI 1973.
- [ 7 ] *Rumsey, T.R. u. R.B. Fridley*: Analysis of viscoelastic contact stresses in agricultural products using a finite element method. ASAE-Paper No. 74-3515.
- [ 8 ] *De Baerdemaker, J.G.*: Experimental and numerical techniques related to the stress analysis of apples under static loads. Unpublished Ph. D. thesis, Dept. of Agricultural Engineering, Michigan State University East Lansing, MI 1975.
- [ 9 ] *Sarig, Y.*: Deformation analysis of foam-encapsulated apple under impact loading. Unpublished Ph. D. Thesis, Dept. of Agricultural Engineering, Michigan State University East Lansing, MI 1976.
- [ 10 ] *Dhaliwal, R.R.*: Punch problem for an elastic layer overlying an elastic foundation. Int. J. Engng Sci. Bd. 8 (1970) S. 273/88.
- [ 11 ] *Clough, R.W. u. Y. Rashid*: Finite element analysis of axi-symmetric solids. J. Engrg. Mech. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. Bd. 91 (1965) S. 71/85.
- [ 12 ] • *Seegerlind, L.J.*: Applied Finite Element Analysis. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1976.
- [ 13 ] *Sarig, Y., R.W. Little u. L.J. Seegerlind*: Mechanical properties of urea-formaldehyde foam. J. Appl. Polymer Sci. Bd. 22 (1978) S. 419/27.
- [ 14 ] *Hamann, D.D.*: Some dynamic mechanical properties of apple fruits and their use in the solution of an impacting problem of spherical fruit. Unpublished Ph. D. thesis, Dept. of Engineering Mechanics, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA (1967).
- [ 15 ] • *Mohsenin, N.N.*: Mechanical properties of plant and animal materials. Vol. 1. New York: Gordon and Breach Science Publishers 1970.
- [ 16 ] *Burt, S.W.*: An experimental packing line for "McIntosh", Apples. Interim report U.S.D.A., Marketing Research Division, AMS No. 330 Washington, D.C. (1959) S. 28.