

Landtechnische Forschung

HERAUSGEBER: KURATORIUM FÜR TECHNIK IN DER LANDWIRTSCHAFT
UND LANDMASCHINEN- UND ACKERSCHLEPPER-VEREINIGUNG IM VDMA

Hef 6/1964

MÜNCHEN

14. JAHRGANG

Essex E. Finney und Carl W. Hall

Der Einfluß der Belastungsfläche bei mechanischer Zerstörung des Kartoffelgewebes

Institut für Landtechnik, Michigan State University, East Lansing

1. Einleitung

Die Empfindlichkeit des Zellgewebes der Kartoffelknolle gegenüber Beschädigungen ist ein ernstes Problem bei der Mechanisierung der Ernte- und Verladearbeiten. Es wurden viele Versuche durchgeführt, um den Einfluß verschiedener Faktoren auf die Widerstandsfähigkeit der Kartoffel gegen mechanische Beschädigungen festzustellen. GREENE [1] berichtete über die Wirkung solcher Faktoren wie Fallhöhe, Knollengewicht und Art der Aufprallfläche. Er sagt beispielsweise, daß schon bei einem Fall von nur 6" (152,4 mm) vom Elevator auf den Holzboden eines Anhängers die Kartoffelknollen beschädigt werden können. LAMPE [2] untersuchte den Einfluß von Witterung, Klima, Sorte und Lagerung auf die Widerstandsfähigkeit der Kartoffeln gegen Beschädigungen unter statischen und dynamischen Belastungen. PARKE [3] berichtete über die Beziehung zwischen der von einem schwingenden Pendel auf die Knolle ausgeübten Aufprallenergie und dem sich daraus ergebenden Ausmaß der Gewebequetschung. Faktoren wie der Durchmesser des Aufprallkörpers, Gewicht der Probe und Aufprallgeschwindigkeit wurden berücksichtigt.

In dieser Arbeit soll die Beziehung zwischen der Größe der Kontaktfläche (Belastungsfläche) und der Größe der aufgebrachten Kraft, der Deformation und der von der mechanisch beanspruchten Kartoffel bis zum Bruch absorbierten Energie besprochen werden. Ferner wird untersucht, ob sich Lösungen der Elastizitätstheorie für die Deutung und Auswertung von Versuchsergebnissen dieses Forschungsgebietes verwenden lassen.

2. Versuchstechnik

2.1. Gerät

Verwendet wurde ein Prüfgerät (Bild 1), das dem von MOHSEIN und GÖHLICH [4] entwickelten ähnelte. Das Belastungsaggregat für dieses Prüfgerät bestand aus einem doppelt wirkenden, pneumatisch angetriebenen Luftmotor mit 4" Kolbenhub und hydraulisch gesteuerter Kolbengeschwindigkeit beim Vor- und Rücklauf. In diesen Untersuchungen wurde die Kolbengeschwindigkeit (oder Deformationsgeschwindigkeit der Probe) mit 1" je Minute konstant gehalten bei einer Genauigkeit von $\pm 10\%$. Mit dem Prüfgerät konnte maximal ein Druck von 300 pounds (136 kp) ausgeübt werden.

Die Fühler dieses Prüfgerätes bestanden aus einem mit Dehnungsmeßstreifen versehenen Geber für das Messen der Kräfte und einem ebenfalls mit Dehnungsmeßstreifen besetzten Auslegerbalken zur Ermittlung der Verschiebung. Der Kraft-Meßwertgeber war an der Kolbenstange des Luftmotors (Bild 1) angebracht und diente so als beweglicher „Kreuzkopf“ des Gerätes. Für Kräftemessungen unter 50 pounds (22,71 kp) wurde ein handelsüblicher Geber mit einem Meßbereich von 50 pounds und einer Genauigkeit von $\pm 0,25\%$ bei einer maximalen Nichtlinearität von $\pm 10\%$

verwendet. Vor jeder Versuchsserie wurde die Eichung des Kraft-Meßwertgebers an Hand bekannter Gewichte überprüft.

Ein Auslegerbalken mit vier SR-4 Dehnungsmeßstreifen vom Typ A-5, die so angebracht waren, daß sie eine vierarmige WHEATSTONEsche Brücke mit Temperaturkompensation bildeten, diente als Deformations-Meßwertgeber des Prüfgerätes. Die Eichung wurde mittels einer Meßuhr mit einem Bereich von 1" und einer Teilung von 0,001" (0,0254 mm) vorgenommen.

Für eine ständige automatische Aufzeichnung der Kraft-Deformations-Kurven wurde ein Koordinatenschreiber verwendet. Millivoltssignale vom Kraft-Meßwertgeber und Deformations-Meßwertgeber wurden ohne Vorverstärkung gleichzeitig direkt auf den Koordinatenschreiber übertragen.

2.2. Verfahren

Die Druckversuche wurden mittels starrer, massiver zylindrischer Stempel mit den Querschnittsflächen 0,01; 0,02; 0,05; 0,10; 0,20 und 0,50 square inch (6,45; 12,9; 32,25; 64,51; 129,03 und 322,57 mm²) sowie mit parallelen Plattenbelastungen durchgeführt. Beim Versuch lag die Knolle auf einer flachen Platte, ein starrer Stempel wurde an dem Einschraubende des Kraft-Meßwertgebers (Bild 2) befestigt und der Test mit den in Bild 1 gezeigten Instrumenten durchgeführt.

Da die Kartoffelknolle durch Zerschneiden oder Änderung ihrer anatomischen Struktur nicht verändert werden sollte, wurde beschlossen, einen „zerstörungsfreien“ Test durchzuführen, in

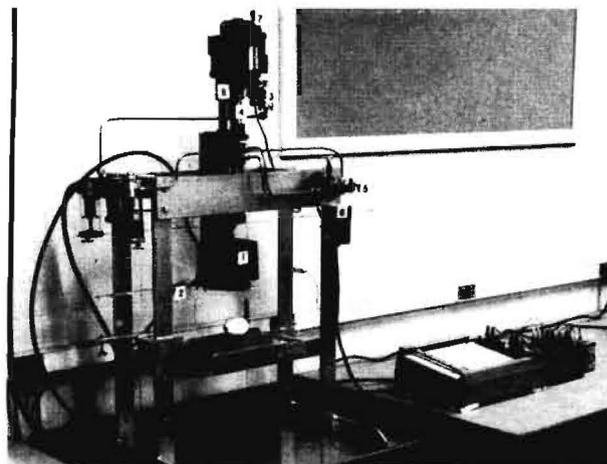


Bild 1: Das Prüfgerät

- 1 = Kraft-Meßwertgeber
- 2 = Meßwertgeber mit Dehnungsmeßstreifen zum Messen der Verschiebungen
- 3 = Stoppeinrichtung zum Abhalten und Festhalten des Kolbens
- 4 = Luftmotor und Feinsteuervorrichtung für hydraulische Haltevorrichtung
- 5 = Handbetätigtes Ventil zur Regelung der Arbeitsrichtung
- 6 = Schalter zur Bedienung der Magnetspule der Stoppeinrichtung
- 7 = Ventil zur Einstellung der Kolbengeschwindigkeit für den Vorlauf
- 8 = Ventil zur Einstellung der Kolbengeschwindigkeit für den Rücklauf

Approved for publication as Journal Article Number 3352 of the Michigan Agricultural Experiment Station, Michigan State University, East Lansing, Michigan/USA

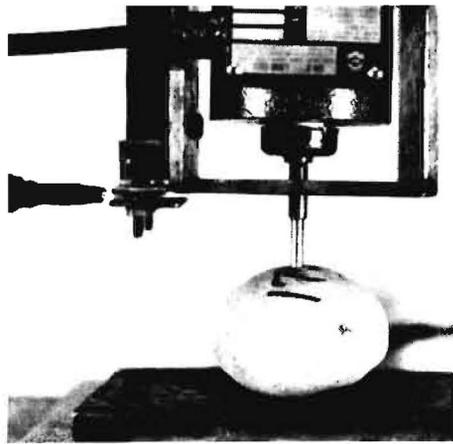


Bild 2: Eine auf einer ebenen Fläche ruhende ganze Kartoffelknolle, dem Druck eines zylindrischen Stempels ausgesetzt

dem die ganze Knolle auf einer ebenen Fläche ruhte (Bild 2). Der zylindrische Stempel wurde mit der Knollenoberfläche an einer Stelle in Berührung gebracht, die einen ziemlich einheitlichen Kontakt zwischen Stempel und Knolle lieferte. Gleichzeitig wurde das freie Ende des Auslegerbalkens zum Messen der Verschiebung fixiert und jede weitere Abwärtsbewegung der Kolbenstange des Prüfgerätes aufgenommen und als Deformation der Knolle aufgezeichnet. Die Kräfteeinrichtung gab gleichzeitig die auf die Probe ausgeübte Kraft an.

Die Aufzeichnungen der Kraft über der Deformation waren in Wirklichkeit Angaben der Kraft über dem Kolbenstangenweg, da der Auslegerbalken die Bewegung der Kolbenstange maß. Auf Grund der Reaktionskraft an der Tragplatte erfuhr die Knolle natürlich auch dort ein gewisses Maß an Deformation. Die insgesamt aufgezeichnete Deformation war die Summe der Deformationen, die über die ganze Dicke der Kartoffelknolle auftraten; sie umfaßte die Deformation direkt unter dem starren Stempel und die entsprechende Knollendeformation an der Auflagefläche. Um die Größe der Deformation zu bestimmen, die im Bereich der Auflageplatte auftrat, wurden sechzig Versuche unternommen, in denen einmal die ganze Knolle auf der ebenen Platte lag und zum anderen eine Knollenhälfte mit ihrer flachen Seite, wie in Bild 3 gezeigt. Die Kraft-Deformations-Versuche wurden in beiden Fällen mit einem 0,05 square inch (32,25 mm²) großen zylindrischen Stempel ausgeführt. Die Ergebnisse sind in den Kurven A und B in Bild 3 zusammengefaßt. Die zur Zerstörung der Knollenschale erforderliche durchschnittliche Kraft war in beiden Fällen gleich, und zwar $6,29 \pm 0,0045$ kp. Wie erwartet, werden also die Kraftanzeigen nicht von der Deformation der Knolle in der

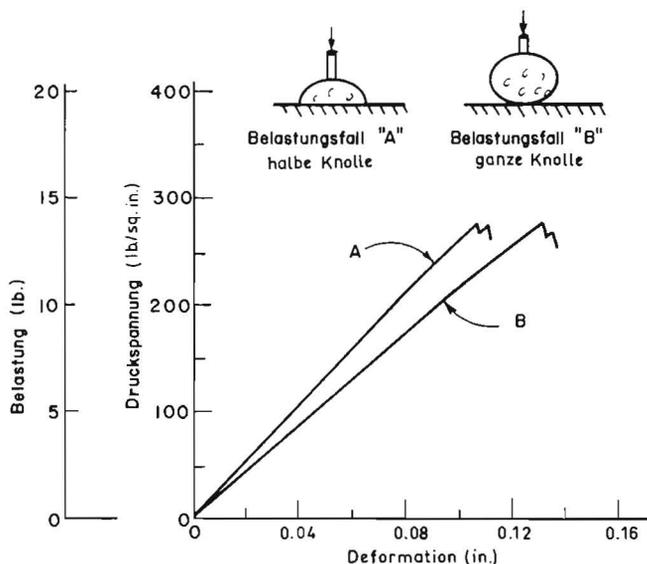


Bild 3: Vom Koordinatenschreiber aufgezeichneten Kraft-Deformations-Kurven für die auf einer flachen Platte liegenden ganzen und halben Knolle

(Querschnittsfläche des Belastungsstiftes: 0,05 square inch (32,26 mm²))

Tafel 1: Berichtigungsfaktoren zur Umrechnung der registrierten Kraft-Deformations-Kurven

Mit ihnen erhält man die äquivalenten Bruchparameter für eine Hälfte einer Kartoffel, die auf einer starren Auflagefläche ruht

Belastungsfläche [sq. in.]	[mm ²]	Berichtigungsfaktor für		
		Kraft	Deformation	Energie*)
0.01	6,45	1.00	0.95	0.92
0.02	12,90	1.00	0.91	0.88
0.05	32,25	1.00	0.85	0.82
0.10	64,51	1.00	0.81	0.78
0.20	129,03	1.00	0.77	0.74
0.50	322,57	1.00	0.71	0.68
Parallele Platten		1.00	0.50	0.50

*) Berechneter Fehler der Berichtigungsfaktoren: $\pm 0,05$

Nähe der Auflageplatte beeinflusst. Der durchschnittliche Kolbenweg für die Zerstörung der ganzen Knolle betrug 3,07 mm, im Vergleich zu 2,64 mm bei der halben Knolle. Es wurde daraus gefolgert, daß bei der ganzen, auf einer ebenen Fläche ruhenden und mit einem starren 0,05 square inch großen Stempel belasteten Knolle durchschnittlich 15% der Deformation in dem unteren Teil der Knolle an der Auflageplatte und 85% in dem oberen Teil direkt unter der Kontaktfläche des starren Stempels auftraten.

Die Deformation im unteren Teil der Knolle, die auf die Kraft an der Auflageplatte zurückzuführen ist, trug zu einem systematischen Fehler bei, der berechnet werden konnte und bei der endgültigen Analyse der Ergebnisse Berücksichtigung fand. Der relative Betrag der in der Knolle nahe der Auflagefläche auftretenden Deformation wurde sowohl mathematisch als auch statistisch abgeschätzt (Tafel 1). Nach einer statistischen Analyse können die Berichtigungsfaktoren in Tafel 1 innerhalb eines absoluten Wertes von $\pm 0,05$ schwanken, das heißt also, daß der Berichtigungsfaktor für die aufgezeichneten Deformationen bei Verwendung des 0,05 square inch großen Stempels zwischen 0,80 und 0,90 liegt bei einem Durchschnittswert von 0,85. Bei der Belastung durch parallele Platten beträgt der Berichtigungsfaktor 0,50, da angenommen wurde, daß die Knolle von symmetrischer Form, homogener Struktur und gleichmäßiger mechanischer Reaktion war. Die eine Hälfte der Gesamtdeformation trat also in dem oberen und die andere Hälfte in dem unteren Teil der Knolle auf. Die äquivalente Deformation in der einen Hälfte der Kartoffelknolle, die einem parallelen Plattendruck ausgesetzt war, würde demnach 0,50 mal so groß wie die vom Koordinatenschreiber aufgezeichnete Gesamtdeformation sein.

Um die Energieaufnahme des Materials zu ermitteln, wurde die Fläche unter der Kraft-Deformations-Kurve bis zum Bruchpunkt mittels eines Planimeters auf $\pm 2\%$ genau gemessen. Wie im Falle der Deformation wurde eine bestimmte Menge der aufgezeichneten Energie von einem Teil der Knolle in der Nähe der Reaktionsunterlage absorbiert. Dieser Prozentsatz schwankte von durchschnittlich 8% für den 0,01 square inch großen Stempel bis zu 50% bei der Belastung mit parallelen Platten (Tafel 1).

Die Deformations- und Energie-Berichtigungsfaktoren differierten etwas, da die Kraft-Deformations-Kurven nicht genau gerade waren, sondern eine geringe Krümmung zeigten. Wären alle Kraft- und Deformations-Kurven gerade gewesen, so wären die Berichtigungsfaktoren für beide Parameter gleich gewesen. Die Abweichungen von der Linearität waren jedoch ganz gering, und die Vertrauensgrenzen für beide Parameter überlappten sich, was bedeutet, daß einige Knollen tatsächlich eine lineare Beziehung zwischen Kraft und Deformation zeigen können.

3. Ein verwandtes Problem der Elastizitätstheorie

Ein Körper wird als vollkommen elastisch bezeichnet, wenn bei Aufbringung einer Spannung sofort Deformation oder Dehnung auftritt und diese Deformation bei Wegfall der Spannung sofort vollständig verschwindet [5]. Es wurde weder unterstellt, noch ist es wahrscheinlich, daß die Kartoffelknolle ein elastischer Körper ist. Trotzdem ist man der Auffassung, daß gewisse Lösungen für Elastizitätsprobleme bei der Auswertung und Inter-

pretation von Versuchsergebnissen von Nutzen sein können, wenn man nämlich das Verhalten eines entsprechenden elastischen Körpers unter mechanischer Beanspruchung rechnerisch untersucht. Die dem Oberflächendruck eines starren, massiven zylindrischen Plungers oder Stempels ausgesetzte Kartoffelknolle kann ein solches Beispiel sein. Diese Art der mechanischen Belastung wurde in dieser Untersuchung und auch in Arbeiten von LAMPE [2], MOHSEIN und GÖHLICH [4] und anderen angewendet.

1885 löste BOUSSINEQ [6] theoretisch das Problem einer Einzellast auf der Oberfläche des elastischen halb unendlich ausgedehnten Körpers (elastischen Halbraumes). Diese Lösung kann erweitert werden durch Anwendung des Superpositionsprinzips für die Bestimmung der Verschiebungen und Spannungen, die durch eine Flächenlast auf der Oberfläche des Halbraums hervorgerufen werden. TIMOSHENKO und GOODIER [6] wandten dieses Verfahren an zur Ermittlung der Beziehung zwischen einer über die Fläche eines Kreises mit dem Radius a einheitlich verteilten Last und der Verschiebung eines Punktes der Halbraumboberfläche in der Entfernung r von der Mitte der belasteten Fläche.

Die von LAMPE [2] bei seinen Untersuchungen über Kartoffelbeschädigungen angewandte Druckstift-Belastung kommt diesem Belastungsfall sehr nahe, da die Querschnittsfläche der Knollen etwa 100mal so groß wie die Querschnittsfläche des Belastungsstiftes von 3 mm Durchmesser war. Die Autoren sind deshalb der Auffassung, daß die Lösung der Elastizitätstheorie für einen starren Stempel in der Form eines festen, runden Zylinders, der gegen die ebene Oberfläche eines elastischen Halbraums gedrückt wird, bei gewisser Vorsicht auch gut für die Deutung von Ergebnissen aus Druckstiftuntersuchungen an bestimmten Früchten und Gemüsearten einschließlich Kartoffeln angewendet werden kann, wenn diese offensichtlich homogener Struktur sind.

Im Falle eines starren Stempels ist die Verschiebung u_z über den runden Stempelboden (Bild 4) konstant. Die Verteilung der Belastung ist jedoch nicht konstant, sondern wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$p = \frac{P}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}}, \quad (1)$$

wobei P = Belastung durch den Stempel
 a = Radius des Stempels und
 r = Abstand vom Mittelpunkt der Kreisfläche, auf die der Stempel wirkt.

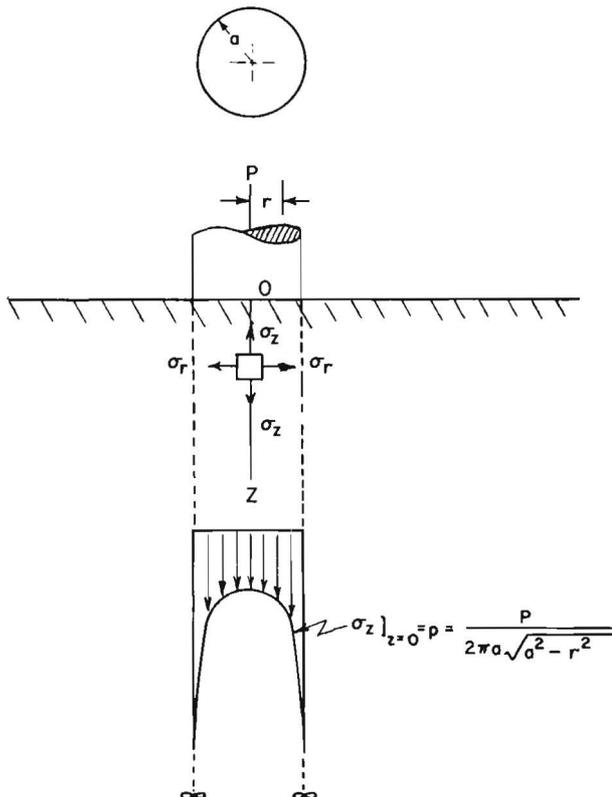


Bild 4: Theoretische Spannungsverteilung im elastischen Halbraum unter einem starren Stempel

Der niedrigste Druck tritt im Mittelpunkt $r = 0$ auf,

$$p_{\min} = \frac{P}{2\pi a^2}, \quad (2)$$

welcher die Hälfte des auf die runde Kontaktfläche ausgeübten durchschnittlichen Druckes ist. Am äußersten Rand der belasteten Fläche ($r = a$) wird der Druck unendlich groß. TIMOSHENKO und GOODIER [6] wiesen darauf hin, daß entlang diesem äußersten Rand ein Fließen auftritt. Dieses Fließen ist jedoch lokal und beeinflusst nicht wesentlich die Verteilung des Druckes nach Gl. (1) an den in einiger Entfernung von dem äußersten Rand der Kreisfläche liegenden Stellen.

Die Beziehung zwischen der aufgebrachten Kraft P (Bild 4) und der Deformation u_z des unter dem Stempel befindlichen Materials wird durch die Formel

$$u_z = \frac{P(1-\nu^2)}{2aE} \quad (3)$$

wiedergegeben, wobei E und ν der Elastizitätsmodul beispielsweise die Poissonsche Zahl (Querkontraktion) für das Material bedeuten. Unter der Voraussetzung, daß die elastischen Eigenschaften des Körpers konstanten sind, ist die Beziehung zwischen Kraft und Deformation bei einem beliebigen gegebenen Stempel linear.

4. Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

4.1. Zerstörung des Kartoffelgewebes unter mechanischer Beanspruchung

Kartoffelknollen lassen keine gut definierte Streckgrenze (oder Bio-Streckgrenze) erkennen, wie es MOHSEIN und GÖHLICH [4] von Äpfeln berichten. Unter bestimmten Bedingungen wichen die Kraft-Deformations-Kurven der Kartoffeln von der Linearität ab; dies hing im wesentlichen von der Art der Belastungsfläche und dem Reifestadium des Materials ab. Im allgemeinen jedoch waren die Kraft-Deformations-Kurven annähernd linear.

Bild 5 zeigt typische Kraft-Deformations-Kurven für Kartoffelknollen, die mit einem 0,05 square inch großen Stempel zu zwei verschiedenen Zeiten belastet waren. Beim früheren Versuchsdatum (23. August 1962) wies die Beziehung zwischen Kraft und Deformation eine merkliche Krümmung auf, beim späteren Versuch nach der Ernte und Lagerung trat diese kaum noch in Erscheinung (Kurve B in Bild 5). Keine der beiden Kurven zeigte irgendwelche ausgeprägten Merkmale, die mit einer Streckgrenze oder „Bio-Streckgrenze“ im Material in Zusammenhang gebracht werden könnten. Im allgemeinen ergaben die Kraft-Deformations-Kurven entweder eine glatte, nicht lineare (Kurve A in Bild 5) oder eine annähernd lineare Beziehung (wie Kurve B in Bild 5), ohne augenscheinliche Diskontinuität bis zum Punkt R, wo die Widerstandsfähigkeit der Knolle für die spezielle Belastungsfläche ihren Maximalwert erreicht hatte.

Bei den Kraft-Deformations-Kurven scheint der Punkt R mehr der Bruchfestigkeit der Knolle als der Streckgrenze des Materials zu entsprechen. TRIFFET [8] definierte die äußerste Festigkeit

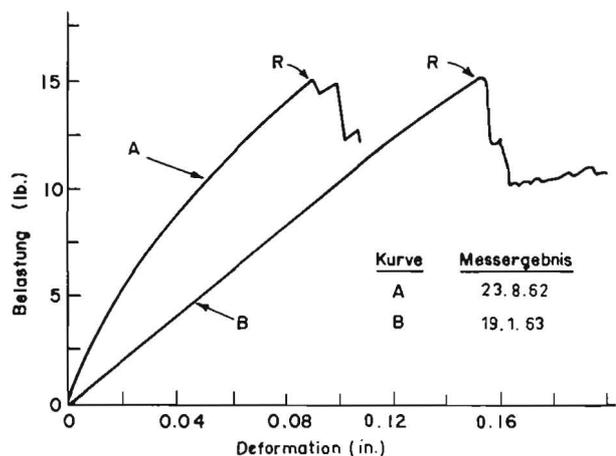


Bild 5: Kraft-Deformations-Kurven für „Kennebec“-Kartoffeln, die mit einem starren Stempel in Form eines festen, runden Zylinders von 0,05 square inch (32,26 mm²) Querschnitt belastet wurden

eines Material-Einheitswürfels als den Punkt auf der Kraft-Deformations-Kurve, wo die Kraft ein Maximum aufweist. Die absolute Festigkeit beim Apfel entspricht anscheinend dem Punkt, den MOHSEIN und GÖHLICH [4] als Bruchpunkt bezeichnen, also dem Punkt, bei dem der Stift die Schale der Frucht durchbohrt oder zerbricht. Aus Gründen der Übereinstimmung werden die von MOHSEIN und GÖHLICH [4] gewählten Begriffe in dieser Arbeit übernommen. Der Punkt, bei dem die auf die Probe ausgeübte Kraft bei einer gegebenen Belastungsfläche ein Maximum erreicht, wird hiernach als „Bruchpunkt“ bezeichnet. Für diesen Bruchpunkt sind drei Parameter in dieser Untersuchung von primärem Interesse, nämlich die Bruchkraft, die Bruchdeformation und die Brucharbeit oder -energie.

Als Bruchkraft (Spannung) wird die Kraft (Spannung) definiert, die vom Material bei seinem Bruchpunkt aufgenommen wird. Die entsprechende Deformation an diesem Punkt ist die Bruchdeformation. Die Bruchenergie ist das Integral oder die Fläche unter der Kraft-Deformations-Kurve bis zum Bruchpunkt, das heißt

$$\Theta_B = \int_{u=0}^{u=u_B} P du, \quad (4)$$

wobei Θ = Bruchenergie
 P = aufgebrachte Kraft
 u = Deformation des Produktes unter der Kraft P
 u_B = Deformation am Bruchpunkt.

Der Bruchpunkt der Kartoffelknolle entspricht dem Punkt, wo einige lokale Zerstörungen oder Verletzungen des Knollengewebes auftraten. Die Schwere der Beschädigungen und ihre Lage im Knollengewebe hing hauptsächlich von der Geometrie und der Größe der Belastungsfläche ab. Die Zerstörung des Gewebes innerhalb der Kartoffel schwankte von geringfügiger Verletzung des Oberflächengewebes bis zum ausgeprägten Bruch in das Zentralgewebe hinein entlang einer fehlerhaften Stelle oder einer Ebene.

Die Belastung von Knollen mit zylindrischen Stempeln ähnelte den in Bild 4 gezeigten Randbedingungen. Anschließend Betrachtungen der nach diesem Verfahren belasteten Knollen (Bild 6) ergab eine lokale Zerstörung des Oberflächengewebes unmittelbar unter der Schale rund um die belastete Fläche, die mit dem starren zylindrischen Stempel in Berührung gekommen war. Wie an Hand von theoretischen Betrachtungen vorausgesagt (Gl. 1), führten die an der Peripherie des starren Stempels erzeugten Spannungskonzentrationen zu lokalen Beschädigungen der Knollenschale und des direkt unter der durchbrochenen Schale befindlichen Gewebes. Diese Art der Zerstörung war lokal. Die Wirkung der durch die Lage des zerquetschten oder verfärbten Gewebes angezeigten Spannungskonzentration war auf einen kleinen Bereich längs des Umfangs der Kontaktfläche (Bild 6) begrenzt. Es ist jedoch möglich, daß diese Art der Belastung die Zellstruktur der Knolle schwächte, ohne daß sich eine Verfärbung ergab, und so die belastete Fläche für die Herz- und Trockenfäule empfänglich machte, wie sie von WIANT beschrieben worden ist [9].

Die Belastung der Knolle mit einem starren, kugelförmigen Körper führte zu der in Bild 7 gezeigten Gewebeerletzung.

Das durch das verfärbte Gewebe angezeigte Ausmaß an beschädigtem Gewebe war beträchtlich größer als bei Belastung mit einem zylindrischen Stempel. Die kugelförmige Belastungsfläche ist von TIMOSHENKO und GOODIER [6] behandelt worden. Die maximale Spannung stellt die Druckspannung in der Mitte der Kontaktfläche dar. Die maximale Scherspannung, von der die Zerstörung einiger Materialien wie beispielsweise Stahl abhängt, ist in der Mitte der Kontaktfläche verhältnismäßig gering. Die Scherspannung erreicht ein Maximum längs der Belastungsachse in einer Tiefe von etwa dem halben Radius der Kontaktfläche. Unter der Voraussetzung, daß der Knollenradius im Vergleich zum Radius der Kugel ($0,5'' = 12,7 \text{ mm}$), die zur Belastung der Knolle verwendet wurde, groß ist, müßte die maximale Schubkraft in der Knolle innerhalb $1/4''$ von der Knollenoberfläche auftreten. Beobachtungen des verletzten Gewebes (Bild 7) bestätigten, daß der am meisten beschädigte Bereich gerade unter der Oberfläche der Kontaktfläche liegt.

Weitere Nachweise über den Einfluß der Scherspannung auf die Zerstörung des Kartoffelgewebes werden in Bild 8 gebracht. Es wurden Knollen zwischen parallelen Platten belastet, bis die Kraft-Deformations-Kurve eine Diskontinuität oder einen Punkt aufzeigte, wo eine Zunahme der Deformation zu einer nichtpositiven Kraftzunahme führte, also ein Bruchpunkt in Erscheinung trat. Nach Erreichung des Bruchpunktes wurde die Knolle entlastet; danach wurden die Knollen bei Zimmertemperatur gelagert. Sechs Tage nach der Belastung zeigte ein Schnitt quer durch die Knollen die Entwicklung verfärbten Gewebes in der Mitte der Knolle, wie es in Bild 8 zu sehen ist. Wendet man die bei TIMOSHENKO und GOODIER [6] besprochene Theorie des HERTZschen Problems an, so wird offensichtlich, daß sich das verfärbte Gewebe, das Zellverletzungen anzeigt, in einer Region hoher Scherspannung im Zentralgewebe der Knolle entwickelt hat. Diese Beobachtung ist insofern von großer Bedeutung, als sie auf die Gefahr hinweist, die sich aus einer übermäßig hohen Kartoffellagerung ergibt. Zu starke über die äußere Kartoffeloberfläche verteilte Drücke können zu inneren Scherspannungen führen, die ausreichen, um das innere Knollengewebe zu zerstören, ohne daß die Beschädigung des Produktes äußerlich sichtbar wird.

In einigen Fällen entstand beim Zusammendrücken der Knollen zwischen parallelen Platten eine Zerstörung der Knolle, die auf Zugspannungen entlang der äußeren Oberfläche der Knolle zurückzuführen ist. Es ist anzunehmen, daß die Art der Knollenzerstörung bei Belastung zwischen parallelen Platten außer von der Knollengeometrie auch von der Knollenstruktur abhängig ist. Geringfügige Abweichungen von der dominierenden Struktur innerhalb der Knolle können einen begrenzten Bereich der Knolle schwächen und diesen für Zellbeschädigung oder mechanische Zerstörung empfänglich machen.

4.2. Einfluß der Belastungsfläche auf die Bruchparameter

Wie schon erwähnt, wurde der Bruch innerhalb der Kartoffelknolle von der Geometrie der Belastungsfläche beeinflusst. In diesem Abschnitt soll die Beziehung zwischen der Größe der Kontaktfläche und der Größe der angewandten Kraft, Deformation und Energie am Bruchpunkt erörtert werden. Die Ergebnisse

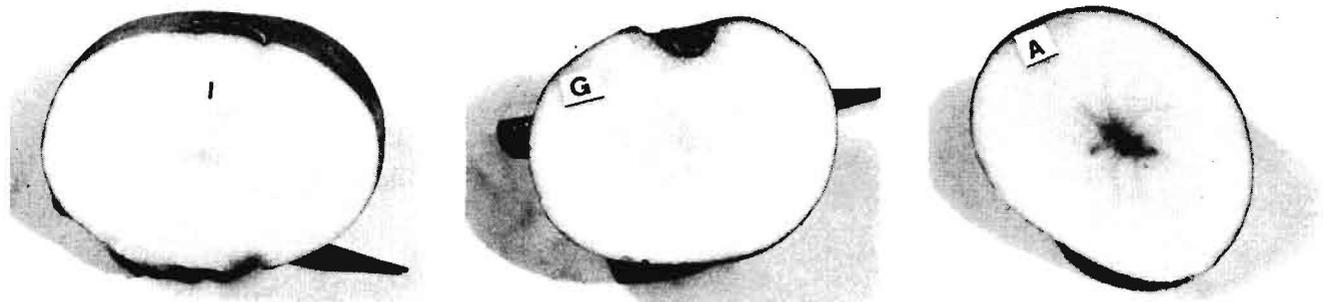


Bild 6 (links): Gewebeerstörung einer Knolle, die mit einem starren, massiven zylindrischen Stempel ($0,50 \text{ square inch} = 322,6 \text{ mm}^2$) belastet wurde — Bild 7 (Mitte): Gewebeerstörung einer Knolle, die mit einer starren Kugel von $1''$ Durchmesser belastet wurde — Bild 8 (rechts): Zerstörung des inneren Gewebes einer Knolle, die zwischen parallelen Platten zusammengedrückt wurde

Tafel 2: Bruchparameter für „Emmet“-Kartoffelknollen bei verschiedenen Belastungsflächen
Jeder Wert stellt das Mittel von zehn Wiederholungen dar

Belastungsfläche		Kraft		Bruchparameter				Gesamtenergie		Energie je Flächeneinheit	
[sq. in.]	[mm ²]	[lb.]	[kp]	Spannung		Deformation		[in.-lb.]	[kpm]	[in.-lb./sq. in.]	[kpm/mm ²]
				[lb./sq.in.]	[kp/mm ²]	[milli-in.]	[mm]				
0,01	6,45	4,11	1,87	411	0,29	43	1,092	0,100	0,00115	10,0	0,00018
		(11,9%)*		(11,94)		(13,1%)		(13,0%)		(13,0%)	
0,02	12,90	7,06	3,21	353	0,25	53	1,346	0,210	0,00242	10,5	0,00019
		(11,2%)		(11,2%)		(13,6%)		(23,8%)		(23,8%)	
0,05	32,25	14,2	6,34	284	0,197	71	1,803	0,536	0,00617	10,7	0,00019
		(13,4%)		(13,4%)		(13,9%)		(24,8%)		(24,8%)	
0,10	64,51	28,2	12,8	282	0,198	103	2,616	1,51	0,0174	15,1	0,00027
		(10,5%)		(10,5%)		(10,8%)		(18,1%)		(18,1%)	
0,20	129,03	44,9	20,4	225	0,158	129	3,267	3,00	0,0346	15,1	0,00027
		(11,8%)		(11,8%)		(15,5%)		(22,3%)		(22,3%)	
0,50	322,57	87,7	39,8	175	0,124	203	5,156	8,6	0,0989	17,1	0,00031
		(6,6%)		(6,6%)		(16,2%)		(17,4%)		(17,4%)	
Parallele Platten		236		—	—	226	5,740	23,9	0,276	1,88**)	1,3·10 ^{-6**)}

* Die Werte in den Klammern sind die Variationskoeffizienten für die über ihnen stehenden Mittelwerte
 ** Bei der Belastung zwischen parallelen Platten stellen die Zahlen 1,88 bzw. 1,3 · 10⁻⁶ die durchschnittliche Energieaufnahme der getesteten Knollen je Volumeneinheit dar, also in [in. lb./cubic in.] bzw. [kpm/mm³] anstatt [in.-lb./sq. in.] bzw. [kpm/mm²]

dieser Untersuchungsphase werden in Tafel 2 sowie in den Bildern 9, 10 und 11 wiedergegeben.

Mit der Vergrößerung der Querschnittsfläche der Belastungsfläche von 0,01 square inch bis zur Belastung zwischen parallelen Platten erhöhten sich die Bruchkraft, Deformation und Energiekapazität der Knollen (Tafel 2). Bei Stempeln mit den Querschnittsflächen 0,01 bis 0,50 square inch konnten auf der Oberfläche der Knollen Flächen gefunden werden, die einen gleichförmigen Kontakt mit der ebenen Oberfläche des starren Stempels gaben. Bei größeren Flächen und bei Belastungen mit parallelen Platten war es schwierig und manchmal unmöglich, einen gleichförmigen Kontakt zwischen der Knolle und der belastenden Fläche zu erhalten. Bei Belastungsflächen über 0,50 square inch änderte sich die Beanspruchungsfläche daher laufend während der Be- und Entlastungen. Aus diesem Grunde liegen den in Bild 9 und 11 graphisch dargestellten Werten die Belastungsflächen von 0,01 bis 0,50 square inch zugrunde.

Von Interesse ist die Feststellung, daß, obwohl die Kraft, die Verformung und die Energiekapazität der Knollen bei Belastung mit parallelen Platten ihre höchsten Werte erreichen, die Belastungskapazität der Knollen je Einheit der Belastungsfläche (die Spannung) mit zunehmender Belastungsfläche abnimmt (Bild 9). Die Beziehungen zwischen Bruchspannung und Belastungsfläche läßt sich durch folgenden Ausdruck näherungsweise wiedergeben:

$$\sigma_B = \sigma_0 - m \ln A, \quad (5)$$

wobei σ_B = durchschnittliche Bruchspannung,
 A = Kontaktfläche (Belastungsfläche),
 m und σ_0 = positive Parameter, die von der Sorte und dem Reifegrad abhängen.

Beim Vergleich von Versuchsergebnissen kann es wichtig sein, daß die Größe der Belastungsfläche berücksichtigt wird. LAMPE [2] beispielsweise berichtet über Bruchkräfte in der Größenordnung von 2,0 bis 2,4 kp, wobei ein Prüfstift mit einem Durchmesser von 3 mm (0,0111 square inch) verwendet wurde. Die Bruchspannungen lagen daher in dem Bereich von 0,278—0,335 kp/mm² und stimmen so mit den in diesen Untersuchungen beobachteten gut überein. MOHSEIN und TUKEY [10], die einen 0,05 square inch großen Teststift verwendeten, gaben bei „Kennebec“-Kartoffeln eine mittlere Bruchspannung von 0,169 kp/mm² an. Ein Teil der beträchtlichen Differenz zwischen den beiden zitierten Werten kann auf den Einfluß der Unterschiede der verwendeten Belastungsflächen zurückgeführt werden (Bild 9 und Tafel 2).

Diese Unterschiede zeigen, daß Belastungsflächen verwendet werden sollten, die den bei Ernte, Transport und Lagerung auftretenden ähneln.

An dieser Stelle scheint es angezeigt, die Verwendbarkeit von Gl. (3) zu prüfen, wenn nämlich ein Bruchparameter (z. B. die Deformation) bekannt oder vorgegeben ist und die beiden anderen gesucht sind. Nehmen wir an, daß die Bruchverformung u_B spezifiziert ist, wie genau sagt dann Gl. (3) die Bruchkraft P_B voraus und wie genau kann die Bruchenergie für verschiedene Belastungsflächen angegeben werden? Die Bruchkraft P_B wurde aus folgender Formel errechnet:

$$P_B = (2a E u_B)/(1-\nu^2), \quad (6)$$

die Gl. (3) entspricht, wobei a den Radius der Kontaktoberfläche bezeichnet. Für die Abschätzung der entsprechenden Bruchenergie Θ_B wird eine lineare Beziehung zwischen der Kraft und der Deformation vorausgesetzt und Gl. (3) auf

$$\Theta_B = (1/2) (P_B u_B) = a E u_B^2/(1-\nu^2) \quad (7)$$

erweitert, wobei Θ_B die der Bruchverformung entsprechenden Bruchenergie und a wieder den Radius der Kontaktoberfläche bedeutet. Der einachsige Elastizitätsmodul E wurde zu 0,382 kp je mm² [7] bestimmt, und die Knolle als nicht zusammendrückbar angenommen, die Poissonsche Zahl wurde also mit 0,50 angesetzt.

Da der Elastizitätsmodul E stets bei einer einzigen Belastung ohne Berücksichtigung des bei der Entlastung auftretenden Effekts ermittelt wurde, kann die Lösung nach BOUSSINESQ auch angewendet werden, wenn vorausgesetzt wird, daß die Kartoffel ein plastisches Material mit linearer Verfestigungskurve ist, das sich entsprechend den Gleichungen von LEVY und von MISES [11] $dE_{ij}^p \sim \sigma_{ij}$ verhält.

Da die Hauptspannungsrichtungen sich während des Belastungsvorganges an keiner Stelle ändern (nach BOUSSINESQ) und sich alle Spannungen im Verhältnis zur Belastung erhöhen, können die

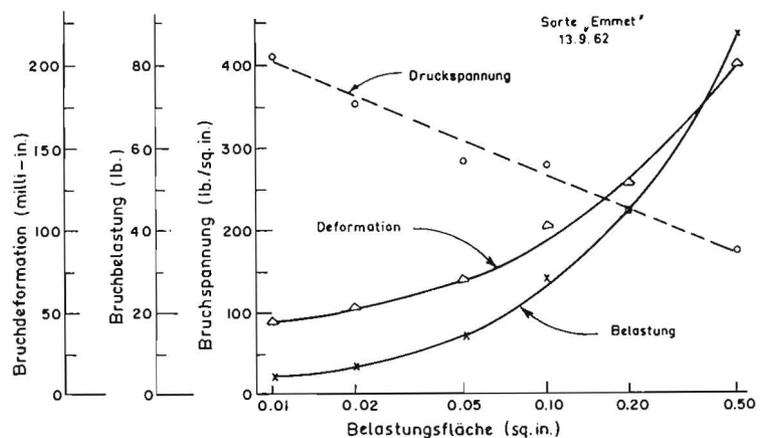


Bild 9: Einfluß der mit der Knolle in Kontakt befindlichen Fläche auf die Gesamtkraft, Kraft je Flächeneinheit (Spannung) und Deformation am Bruchpunkt

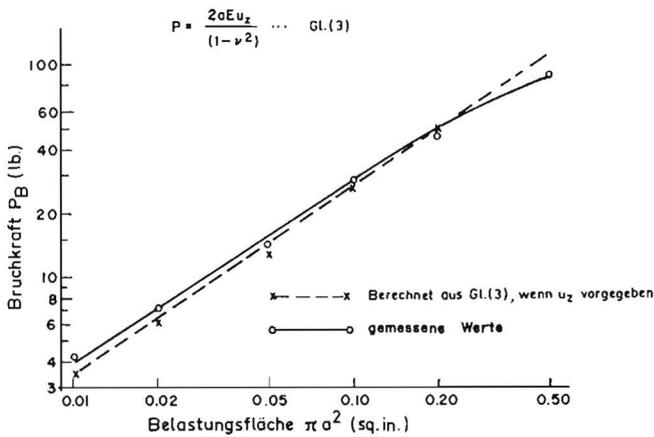


Bild 10: Vergleich zwischen der gemessenen Bruchkraft und der aus der Bruchdeformation errechneten für verschiedene Belastungsflächen

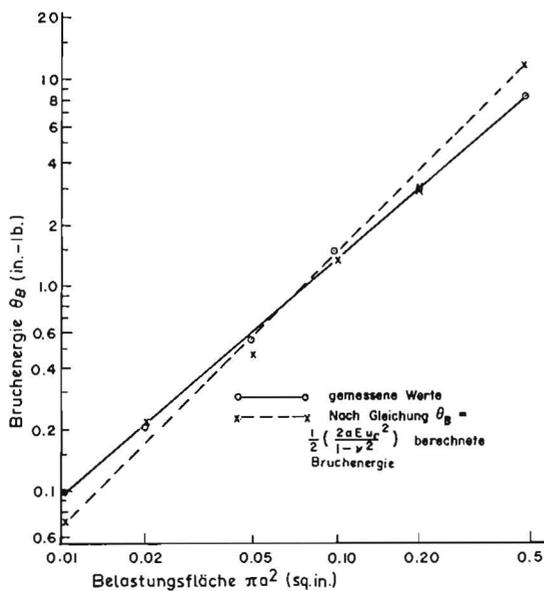


Bild 11: Vergleich der gemessenen Bruchenergie mit der aus der Bruchdeformation errechneten für verschiedene Belastungsflächen

LEVY-MISESSchen Gleichungen unter der Voraussetzung einer linearen Verfestigungskurve integriert werden, so daß HENCKY-Gleichungen $E_{ij}^p \sim \sigma_{ij}$ entstehen, die gleichbedeutend mit dem HOOKEschen Gesetz sind. Da die Plastizitätsgleichungen die Unzusammendrückbarkeit enthalten, würde das „äquivalente HOOKEsche Gesetz“ eine POISSONSche Zahl von 0,50 aufweisen.

Die errechneten Ergebnisse werden in den Bildern 10 und 11 mit der experimentell gemessenen mittleren Bruchkraft beziehungsweise der mittleren Bruchenergie verglichen. Die errechneten und gemessenen Werte stimmen für die Belastungsflächen von 0,01 bis 0,50 square inch gut überein. Eine Fehleranalyse zeigte, daß ± 2 Standardabweichungen (0,0302 kp/mm²) [7] vom Mittelwert des einachsigen Elastizitätsmoduls 0,382 kp/mm² in den meisten Fällen zwischen den errechneten und gemessenen Werten in den Bildern 10 und 11 erklären. Im Bereich von 0,50 square inch und darüber weichen die verglichenen Werte voneinander ab. Dieses war zu erwarten, da Gl. (3) für einen auf einen unendlichen Halbraum wirkenden Stempel aufgestellt wurde. Da sich jedoch die Kontaktfläche der Größenordnung der Knollenprojektion nähert, ist damit zu rechnen, daß die Gültigkeit von Gl. (3) und der daraus resultierenden Beziehungen hinfällig wird.

4.3 Versuchsstreuungen

Bild 12 stellt die Beziehung zwischen der mittleren Bruchenergie je Einheit der Belastungsfläche und der Größe der Belastungsfläche

dar. Es wurden außerdem Punkte eingezeichnet, die ± 2 Standardabweichungen vom Mittel bedeuten, um eine Grundlage für die Schätzung der Variationsbreite zu schaffen. Im allgemeinen erhöht sich die Energiekapazität der Knollen je Flächeneinheit mit der Belastungsfläche. Die Variationsbreite der Energiekapazität zwischen den Knollen einer bestimmten Gruppe war jedoch sehr groß. Der Variationskoeffizient — die Standardabweichung geteilt durch den Mittelwert — schwankte von 13 bis 25%. Allein dieser Faktor veranschaulicht eines der Hauptprobleme bei der mechanischen Handhabung der Kartoffeln. Ein kleiner, aber doch bedeutender Prozentsatz der Knollen ist sehr empfänglich für mechanische Beschädigungen. PARKE [3] beobachtete ebenfalls große Schwankungen bei der für die Beschädigung von Kartoffelknollen erforderlichen Energie. Im Mittel ist bei ihm wenigstens eine Energie von 0,013 kpm notwendig gewesen, um eine Beschädigung hervorzurufen. Jedoch sagte die Durchsicht der Einzelwerte aus, daß eine Knolle schon bei Aufnahme von 0,009 kpm gequetscht wurde, während eine andere Knolle 0,057 kpm absorbierte, ohne Beschädigungen zu zeigen.

Sollte also gewünscht werden, die mechanischen Beschädigungen von Kartoffeln beispielsweise unter 5% zu halten, so müßten die Maschinen und Geräte für die Kartoffeln nicht auf der Basis der mittleren Energiekapazität, sondern unter Zugrundelegung des Mittels minus zwei Standardabweichungen konstruiert werden. Für Konstruktionszwecke sollte man nicht den mittleren Energiewert von $0,18 \cdot 10^{-3}$ kpm/mm² aus Bild 12 verwenden, sondern vielmehr $0,09 \cdot 10^{-3}$ kpm/mm², also den Mittelwert minus zwei Standardabweichungen. Dieses Verfahren würde theoretisch die Beschädigungen auf 2,5% reduzieren. Ein solches Verfahren ist gleichbedeutend mit der Einführung des Sicherheitsfaktors 2 bei Verwendung des mittleren Energiewertes für die 0,05 square inch große Belastungsfläche. Für größere Belastungsflächen könnte nach Bild 12 der notwendige Sicherheitsfaktor, der in Verbindung mit den mittleren Energiewerten anzuwenden ist, geringer sein. Sollen die Beschädigungen unter die 2,5%-Grenze gesenkt werden, müßte der erforderliche Sicherheitsfaktor erhöht werden.

5. Schlußfolgerungen

Kartoffeln weisen keine Streckgrenze (oder „Bio-Streckgrenze“) auf. Der einzige ausgezeichnete Punkt auf der Kraft-Deformationskurve ist der Bruchpunkt, der in Erscheinung tritt, wenn das Knollengewebe irgendwo lokal zerstört wird. Das zerstörte Gewebe muß nicht unbedingt an der Kontaktfläche liegen, sondern kann sich mitten in der Knolle befinden, wo Schubspannungen einen kritischen Wert erreichen.

Der über die äußere Knollenfläche verteilte Druck kann in dem mittleren Bereich der Knolle Zellschäden verursachen, ohne daß diese äußerlich sichtbar werden.

Die zur Zerstörung des Kartoffelgewebes erforderliche Kraft, Deformation und Energie steigen mit zunehmender Belastungs-

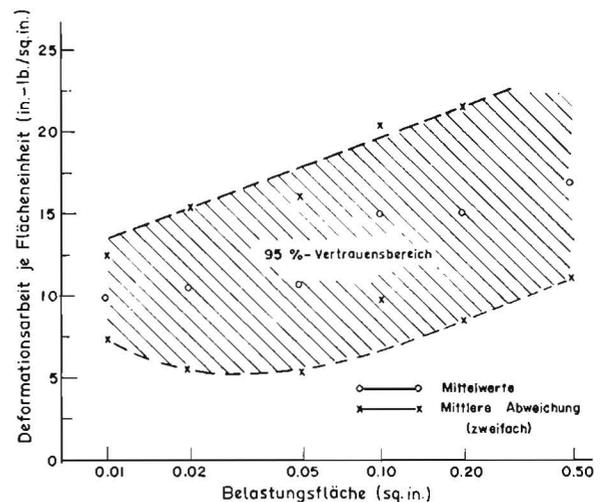


Bild 12: Die von „Emmet“-Kartoffelknollen unter quasistatischer Belastung aufgenommenen Energie in Abhängigkeit von der Belastungsfläche und die Streuungen zwischen den Knollen

fläche an. Die Kraft je Flächeneinheit, die Spannung also, nimmt ab mit dem Logarithmus der Belastungsfläche.

Lösungen der Elastizitätstheorie können zur Bestimmung des Verhaltens der unter mechanischem Druck stehenden Kartoffelknolle angewendet werden.

Die Variationskoeffizienten für die Energiekapazität der Kartoffeln aus einer wahllos ausgesuchten Gruppe von Knollen betragen 10 bis 25%. Es ist daher notwendig, bei der Konstruktion von Geräten für Kartoffeln den Sicherheitsfaktor 2 einzubauen, wenn nur die mittleren oder durchschnittlichen Werte der Energiekapazität der Knollen bekannt sind.

Zusammenfassung

Das Kraft-Deformations-Verhalten der Kartoffelknolle beim Zusammendrücken durch einen starren Stempel wurde mittels Dehnungsmeßstreifen-Gebern und einem elektronischen Meßschreiber gemessen und aufgezeichnet. Zum Be- und Entlasten der Knolle wurde ein Prüfgerät verwendet, das auf eine Verformungsgeschwindigkeit von 1" je Minute eingestellt war.

Die Festigkeit der Knolle wurde charakterisiert durch die für das Eintreten des Bruches und der Verfärbung des Zellgewebes erforderliche Kraft, Deformation und Energie. Für die Interpretation der Versuchsergebnisse wurden die auf der Elastizitätstheorie basierenden analytischen Lösungen der Probleme von BOUSSINESQ und HERTZ verwendet.

Obwohl die für den Bruch des Kartoffelgewebes benötigte Kraft, Deformation und Energie mit der Zunahme der Belastungsfläche anstiegen, verringerte sich die durchschnittliche Widerstandsfähigkeit der Knolle gegenüber der aufgetragenen Spannung von 0,289 auf 0,123 kp/mm², bei einer Vergrößerung der Belastungsfläche von 0,01 auf 0,50 square inch (6,452 auf 322,6 mm²). Die Variationskoeffizienten der mechanischen Eigenschaften der Kartoffeln liegen in der Größenordnung von 25%.

Schrifttum

- [1] GREENE, H. C.: Potato damage. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1 (1956), S. 56—62
- [2] LAMPE, K.: Entwicklung und Erprobung einer Methode zur Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Kartoffelknollen gegen Beschädigungen. Diss. Bonn 1959
- [3] PARKE, D.: The resistance of potatoes to mechanical damage caused by impact loading. *Journal of Agricultural Engineering Research* 8 (1963), S. 173—177
- [4] MOHSEIN, N. N., und H. GÖHLICH: Techniques for determination of mechanical properties of fruits and vegetables as related to design and development of harvesting and processing machinery. *Journal of Agricultural Engineering Research* 7 (1962), S. 300—315
GÖHLICH, H., und N. N. MOHSEIN: Untersuchungen über mechanische Eigenschaften von Obst unter besonderer Berücksichtigung einer maschinellen Ernte. *Landtechnische Forschung* 12 (1962), S. 103—107
- [5] FITZGERALD, R. R.: Yield Strength of crystalline solids from dynamic mechanical measurements. *Developments in Mechanics*. Bd. 1, S. 10—38. (Herausgegeben von L. E. LAY und L. E. MALVERN) Plenum Press, New York 1961
- [6] TIMOSHENKO, S., und J. N. GOODIER: *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill Book Company, New York 1951
- [7] FINNEY, E. E.: The visco-elastic behavior of the potato, *Solanum Tuberosum*, under quasi-static loading. Diss., Michigan State University 1963 (unveröffentlichtes Manuskript)
- [8] TRIFFET, T.: Introduction to the mechanics of discontinuous media. Unveröffentlichte vervielfältigte Unterrichtsnotizen für angewandte Mechanik. 835 Vorträge. Michigan State University 1962
- [9] WIAIT, J. S.: Internal blackspot of Long Island potato tubers. *American Potato Journal* 22 (1945), S. 6—11
- [10] MOHSEIN, N. N., und L. D. TUKEY: Annual Report of Cooperative Regional Project 1397 (NE-44). Pennsylvania Agricultural Experiment Station, 1962
- [11] HILL, R.: *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford University Press, New York 1960

Résumé

Essex E. Finney and Carl W. Hall: "Mechanical failure of potato tissue as influenced by traction area."

The force-deformation behaviour of the potato tuber under rigid die compression was measured and recorded directly by means of strain gauge transducers and an electronic recorder. A testing machine, adjusted to provide a constant rate of deformation of one inch per minute, was used to load and unload the tuber. The strength of the tuber was characterized in terms of the force, deformation, and energy required to initiate rupture and discoloration of cellular tissue. Analytical results from the BOUSSINESQ and HERTZ problems based upon the theory of elasticity were used in the interpretation of some experimental observations. Even though the force, deformation, and energy required to rupture potato tissue increased with increasing loading areas, the average capacity of the tuber to resist applied stress

Dezimalklassifikation

Abteilung 62: Ingenieurwesen, Technik

herausgegeben vom Deutschen Normenausschuß (DNA), Berlin, zweite deutsche Gesamtausgabe, 8. Internationale Ausgabe. Berlin 15, Köln, Frankfurt (Main): Beuth-Vertrieb GmbH 1964, 248 S., DIN A 4, Lose-Blatt-Ausgabe. Preis: 80,— DM.

Die Dezimalklassifikation (DK) ist das seit Jahrzehnten international eingeführte Ordnungssystem für alle Zwecke der Dokumentation und Information. Die Deutsche Ausgabe der DK wird seit 1934 vom Deutschen Normenausschuß (DNA) bearbeitet, der jetzt die auf den neuesten Stand (März 1964) gebrachte Abteilung 62 Ingenieurwesen, Technik vorlegt.

Der Entwicklung des Wissens und der Erkenntnisse folgend, wird die DK vom Internationalen Verband für Dokumentation (FID) auf dem laufenden gehalten. Die von der FID halbjährlich herausgegebenen Ergänzungen und Änderungen waren von den DK-Benutzern bisher nur mit Schwierigkeiten zu berücksichtigen. Das damit zusammenhängende Problem der Veralterung der DK-Ausgaben ist vom DNA erstmalig durch eine Lose-Blatt-Ausgabe beseitigt worden: Kurz nach dem Erscheinen der von der FID bekanntgegebenen Ergänzungen und Änderungen werden in der Zeitschrift „DK-Mitteilungen“ Ergänzungsblätter zur Abteilung 62 veröffentlicht, in denen diese Veränderungen berücksichtigt sind. Durch Auswechseln der Blätter kann die in einer Ringmappe vorgelegte Abteilung 62 der DK stets auf dem neuesten Stand gehalten werden.

decreased from 411 to 175 pounds per square inch as the traction area increased from 0,01 to 0,50 square inch. Statistical coefficients of variation in the mechanical properties of the potato are in the order of 25 per cent.

Essex E. Finney et Carl W. Hall: «L'influence de la surface de charge sur la destruction mécanique de la pulpe de pommes de terre.»

Pour connaître le comportement de la pomme de terre sous la compression d'un tampon rigide, on a mesuré et enregistré la courbe effort-déformation au moyen d'une bande d'allongement et d'un enregistreur électronique. On a utilisé pour la charge et la décharge de la pomme de terre un appareil de mesure réglé de façon à provoquer une vitesse de déformation de 1" par minute.

La résistance du tubercule a été déterminée par l'effort, la déformation et l'énergie nécessaires pour provoquer la rupture et la coloration de la pulpe. Les résultats d'essais ont été interprétés en se servant des solutions analytiques des problèmes de BOUSSINESQ et HERTZ basées sur la théorie de l'élasticité.

Bien que l'effort, la déformation et l'énergie nécessaires à la rupture de la pulpe de la pomme de terre accroissent au fur et à mesure que la surface de charge agrandit, la résistance moyenne du tubercule contre la tension appliquée ne varie que de 0,289 à 0,123 kp/mm² tandis que la surface de charge agrandit de 0,01 à 0,5 square inch (6,45 à 322,57 mm²). Les coefficients de variation des propriétés mécaniques des pommes de terre se situent à environ 25%.

Essex E. Finney y Carl W. Hall: «La influencia de la superficie de carga en la destrucción mecánica de los tejidos de la patata.»

Se midió con indicador de dilatación y con un instrumento de medición electrónico con impresor el comportamiento de los tubérculos en cuanto al esfuerzo y a la deformación, al comprimirlos con macho rígido. Para medir la carga y la descarga del tubérculo se ha empleado un instrumento que estaba ajustado a una velocidad de deformación de 1" por minuto.

La solidez del tubérculo se caracterizó por el esfuerzo necesario para la rotura y para el cambio de color del tejido, por la deformación y la energía, fundándose para la interpretación de los resultados de los ensayos en las soluciones analíticas de los problemas de BOUSSINESQ y de HERTZ, basadas en la teoría de la elasticidad.

Aumentando el esfuerzo, la deformación y la energía, necesarios para la rotura del tejido, con el aumento de la superficie de carga quedaba reducida la resistencia media del tubérculo a la carga de 0,289 a 0,123 kp/mm² con el aumento de la superficie de carga de 0,01 a 0,50 pulgadas cuadradas (6,45 a 322,57 mm²). Los coeficientes de variación de las cualidades mecánicas de las patatas oscilan alrededor del 25%.