

Zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften landwirtschaftlicher Stoffe

Prof. em. Dr. sc. nat. Dr. h. c. E.-J. Gießmann, KDT/Prof. Dr. sc. nat. J. Hellebrand

1. Einleitung

Die Untersuchung physikalischer Eigenschaften landwirtschaftlicher Stoffe verfolgt das Ziel, Ausgangsdaten für konstruktive bzw. technologische Lösungen zur Verfügung zu stellen und objektive Meßverfahren für die Prozeß- und Qualitätskontrolle nutzen zu können. Ein weiteres grundsätzliches Anliegen besteht in der Erweiterung der Kenntnisse über Struktur und Eigenschaften biologischer Objekte mit ihren Wechselwirkungen zur Umwelt bzw. Technik.

Dem Studium mechanischer Eigenschaften von Boden, Pflanzen und Erntegut kommt unter dem Aspekt, daß mechanische Vorgänge in verschiedener Form Bestandteil der landwirtschaftlichen Produktion sind, besondere Bedeutung zu. Die Spannweite mechanischer Eigenschaften umfaßt Größen wie z. B. Abmessungen, Volumen, Oberfläche, Porosität, Masse, Dichte, Reibung, Viskosität, Druck-, Biege- und Scherfestigkeit, Schallgeschwindigkeit u. a. m. Einen Überblick dazu geben u. a. die Literaturquellen [1 bis 6]. Typische Belastungsformen von Früchten, Knollen und anderen pflanzlichen Produkten während Ernte, Transport, Lagerung oder beim Sortieren sind Stoßvorgänge und ein- bzw. mehrachsige Druckbeanspruchungen. Deshalb sind einerseits mit Modellmeßkörpern die auftretenden Belastungen in Mechanisierungsmitteln zu erfassen [7], und andererseits ist das Belastungsverhalten des Erntegutes zu analysieren, um für die maschinelle Ernte und Aufbereitung stoßempfindlicher Güter sorten- bzw. artspezifische Kennwerte der Grenzbelastbarkeit zur Verfügung zu haben.

Landwirtschaftliche Stoffe sind i. allg. viskoelastische Stoffe. Wegen des zellulären Aufbaus stellen sie komplizierte mechanische Gebilde dar, bei denen meist ein unter innerer Spannung gespanntes Netz der Zellwände die mechanischen Eigenschaften bei einer Deformation bestimmt. Die mechanischen Kennwerte hängen damit wesentlich von den Eigenschaften der Zellwände ab. Diese können als eine Kombination von elastischen, plastischen und viskosen Eigenschaften aufgefaßt werden, so daß die mechanischen Parameter pflanzlicher Stoffe von der Stärke der Belastung bzw. Deformation, von der Belastungsgeschwindigkeit und von der Temperatur abhängig sind.

2. Druckfestigkeit und elastische Eigenschaften von Kartoffeln

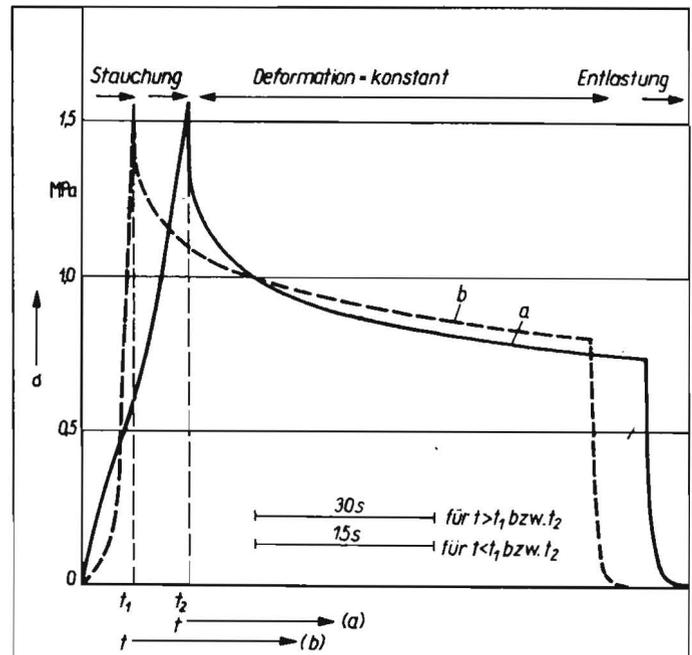
Das Belastungsverhalten bei niedrigen Deformationsgeschwindigkeiten spiegelt das Spannungs-Deformations-Diagramm des Druckversuchs wider. Dieses von der Materialprüfung bekannte Meßverfahren hat sich bei der Untersuchung landwirtschaftlicher Stoffe bewährt [1, 2, 8 bis 11]. Die dabei erhaltene Spannungs-Stauchungs-Kennlinie ist nichtlinear und abhängig von Lagerzeit, Lagerbedingungen, Meßtemperatur, Probenform (Proben definierter Geometrie) und Knollenform (Masse und Belastungsrichtung ganzer Kartoffeln). Es sind Sortenunter-

schiede beobachtbar, und ein Einfluß von Standort, Klima und Düngung ist nicht völlig auszuschließen, obwohl bisherige Untersuchungen zu dieser Frage zu keiner klaren Aussage führten [12].

Die Belastungskennlinie ist i. allg. leicht positiv gekrümmt, d. h. mit zunehmender Druckspannung erhält man einen etwas steileren Anstieg der Kurve, es werden jedoch auch schwach ausgeprägte Wendepunkte (bei 0,3 bis 0,5 MPa) mit anschließender Änderung des Anstiegs gemessen (Bild 1). Aufgrund der Nichtlinearität kann eigentlich kein Elastizitätsmodul angegeben werden. Zur Kennzeichnung des elastischen Verhaltens wird aber manchmal ein Sekantenmodul eingeführt (Verbindungsgerade zwischen zwei Punkten des Diagramms, zweckmäßigerweise bei der Spannung $\sigma = 0$ und der maximalen Spannung σ_{max}). Die beobachteten Werte des Sekantenmoduls liegen in der Größenordnung von 2 bis 6 MPa und werden von obigen Bedingungen beeinflusst. Als Bruchspannung bei Proben definierter Geometrie findet man Werte im Bereich von 1 bis 3 MPa, die Bruchkräfte bei ganzen Knollen schwanken großensabhängig zwischen 500 N und mehr als 1 000 N. Die spezifische Bruchdeformationsenergie ganzer Kartoffelknollen hat eine Größenordnung von 100 J/kg. Die Bruchstauchung erwies sich als unabhängig von der Knollengröße und beträgt bei ganzen Knollen $\epsilon_B = 0,55 \pm 0,04$ [10, 11], bei Proben mit definierter Geometrie werden Werte zwischen $\epsilon_B = 0,35$ und $\epsilon_B = 0,45$ beobachtet. Der Einfluß der Probenabmessungen auf das Festigkeitsverhalten wird an der positiven Korrelation der Bruchspannung zum Verhältnis von Querschnitt und Länge der Proben erkennbar. Wenn der Druckversuch nicht bis zum Bruch der Probe geführt wird, sondern nach dem Erreichen einer vor-

gegebenen Maximalspannung die Entlastung mit unmittelbar anschließender zweiter Beanspruchung folgt, so erkennt man an der stärkeren Krümmung der Kennlinie der wiederholten Belastung die Änderung der mechanischen Eigenschaften (Bild 1). Bei niedrigen Spannungen der zweiten Belastungsphase liegt eine Erweichung vor, bei Erhöhung der Spannung tritt deutlich eine Verfestigung auf. Der Anstieg der Kennlinie, als Tangentenmodul bezeichnet, wächst dabei von Werten kleiner als 1 MPa auf über 40 MPa in der Nähe der Bruchspannung an. Das Verhalten während der zweiten Belastungsphase wird dabei von mehreren Faktoren bestimmt. Wesentlich sind zum einen die Erholungsphase, die Zeit zwischen Entlastung und Beginn der wiederholten Belastung, und zum anderen die Maximalspannung der Erstbelastung. In der Erholungsphase relaxiert die Probe und hat nach etwa zweistündiger Erholungszeit die Eigenschaften unbelasteten Probenmaterials, vorausgesetzt, das Austrocknen der Proben wird verhindert und eine bestimmte kritische Spannung wird nicht überschritten. Diese kritische Spannung liegt im Bereich von 0,3 bis 0,5 MPa, höhere Beanspruchungen in der Erstbelastung verändern die Probe irreversibel, obwohl die Bruchspannung nicht erreicht wurde. Weitere Hinweise für das Vorliegen einer kritischen Belastungsspannung ergeben sich aus der Auswertung des Relaxationsverhaltens (vgl. Abschn. 3) und der Hysteresearbeit eines Belastungs-Entlastungs-Zyklus mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit [13]. Als Ursache für die Änderung der mechanischen Eigenschaften bei Überschreiten einer Spannung von 0,3 bis 0,5 MPa kann das Entstehen von Mikrorissen im Kartoffelgewebe angesehen werden. Mikroskopische Untersuchungen von unter-

Bild 1
Spannungs-Stauchungs-Diagramm ($t < t_1$ bzw. t_2) und Relaxation ($t > t_1$ bzw. t_2) von Kartoffelproben (Sorte „Sokol“, Zylinder mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Länge $l_0 = 20$ mm) mit Maximalspannung ($\sigma_{max} = \sigma_0$) von 1,56 MPa bei erstmaliger (a) und wiederholter (b) Beanspruchung; Vorschubgeschwindigkeit: $v = 8,3 \cdot 10^{-4}$ m/s
Deformation ϵ :
 $\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{vt}{l_0}$



schiedlich belasteten Kartoffeln bestätigen die beginnende Ribbildung in diesem Spannungsbereich [14].

3. Spannungsrelaxationsuntersuchungen pflanzlicher Stoffe

Im Spannungsrelaxationsversuch wird ein Probekörper in definierter Weise belastet. Danach wird die Deformation bei gleichzeitiger Messung der Spannung an der Probe konstant gehalten. Die Auswertung der Zeitabhängigkeit erfolgt häufig mit einem mehrstufigen Maxwell-Modell, d. h. der Summe aus mehreren fallenden Exponentialfunktionen unterschiedlicher Relaxationszeit:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}; \quad (1)$$

$\sigma(t)$ zeitabhängige Spannung
 σ_0 Anfangsspannung
 A_i Relaxationsanteil
 τ_i Relaxationszeit.

Bei Annahme einer thermisch aktivierten Bewegung der mikroskopischen Struktureinheiten im Gradienten des angelegten Spannungsfeldes kann mit Hilfe der Raten Theorie von Eyring ein Ansatz für die Beschreibung dieser Bewegung gewonnen werden, der mit zulässigen Näherungen zu folgender Beziehung führt [9, 15, 16, 17]:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \left[1 - \frac{1}{C} \ln(b t + 1) \right] \quad (2)$$

$$C = \frac{V \sigma_0}{k T}$$

$$b = \frac{V E'}{k T} \dot{\epsilon};$$

$\dot{\epsilon}$ Deformationsgeschwindigkeit vor Beginn der Relaxation
 E' elastischer Modul des Maschinen-Proben-Systems
 V Aktivierungsvolumen
 k Boltzmann-Konstante
 T absolute Temperatur
 C, b Parameter.

Die Anpassungsgüte der Gl. (2) an experimentelle Werte der Relaxation verschiedener Materialien wurde anhand von Literaturauswertungen und von Messungen überprüft. Dabei zeigte sich, daß für Rindermuskeln, Makkaroniteig, Kartoffeln, Algen, Möhren, Rüben, Radieschen, Äpfel, Tomaten, Gurken, aber auch für Getreide Gl. (2) anwendbar ist und sich trotz der Reduzierung auf zwei Parameter eine mindestens gleich gute Anpassung ergibt wie bei einem Maxwell-Modell mit sechs Parametern.

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber einem Maxwell-Modell ist in der physikalischen Interpretierbarkeit der Parameter C und b begründet. Messungen zur Temperaturabhängigkeit der Spannungsrelaxation an Kartoffeln bestätigten die nach Gl. (2) erwartete Temperaturabhängigkeit [18]. Die unterschiedliche Änderung von C (Bild 2) als Funktion der Temperatur legt jedoch nahe, von vier Bereichen auszugehen, in denen bei Überschreitung bestimmter Temperaturen andere, mit Strukturveränderungen verbundene Relaxationserscheinungen auftreten. Bei einer Temperatur von rd. -4°C beginnt das Gefrieren der Kartoffel, oberhalb einer Temperatur von 57°C erweichen Pektine bei gleichzeitiger Stärkegelierung, unklar sind die Ursachen für eine Änderung des Relaxationsverhaltens bei einer Temperatur von 12°C .

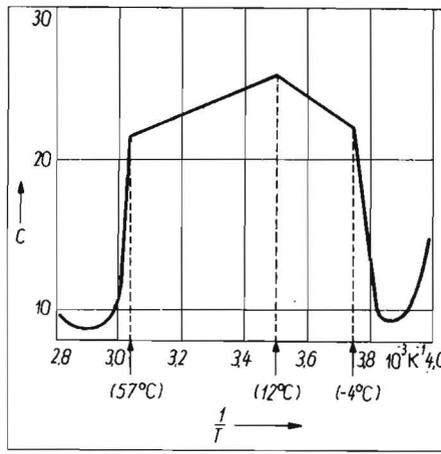


Bild 2. Temperaturabhängigkeit der Spannungsrelaxation von Kartoffeln nach [18]; C berechnet nach Gl. (2)

Messungen zur Abhängigkeit der Relaxation von der Deformationsgeschwindigkeit [19] bestätigen in guter Näherung den Zusammenhang nach Gl. (2).

Bei Variation von $\dot{\epsilon}$ im Bereich von $8,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ bis $8,3 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ wuchs b ebenfalls um drei Größenordnungen, während C eine wesentlich geringere Veränderung um den Faktor 1,7 aufwies. Das Studium der Relaxation in Kartoffeln als Funktion der Anfangsspannung σ_0 führte zu dem Ergebnis, daß nur bei geringen Belastungen eine Proportionalität für C vorliegt, C dann ein Maximum bei rd. 0,3 bis 0,5 MPa durchläuft und wieder absinkt. Diese Messungen führen ebenfalls zu der Schlußfolgerung, daß in Kartoffeln eine kritische Spannung existiert, die zur Änderung des Mechanismus der Relaxation führt. Diese kritische Spannung, bei deren Überschreitung über die Ribbildung das „Aktivierungsvolumen“ der relaxierenden Bereiche beeinflusst wird, bewirkt eine Veränderung, die deutlich am Parameter C festzustellen ist. Damit eröffnet sich über die Auswertung nach Gl. (2) die Möglichkeit, Strukturveränderungen im biologischen Material aus der Belastungsabhängigkeit und der Temperaturabhängigkeit des Relaxationsverhaltens abzuleiten.

4. Akustische Messungen an pflanzlichen Stoffen

Traditionelle Materialprüfmaschinen erlauben Vorschubgeschwindigkeiten bis 1 m/min, die damit untersuchten mechanischen Eigenschaften pflanzlicher Stoffe sind überwiegend als quasistatisch anzusehen, dynamische Belastungen bei Stoßvorgängen können mehr als das Hundertfache dieser Geschwindigkeit erreichen (3 bis 10 m/s). Für das Studium mechanischer Parameter unter dynamischer Belastung sind deshalb andere Meßverfahren erforderlich. Neben direkten zeitaufgelösten Stoßkraftmessungen ist eine Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Schallausbreitung in pflanzlichen Stoffen möglich.

Bei der Resonanzmethode wird ein Prüfkörper definierter Geometrie zu Schwingungen angeregt. Aus den Abmessungen und der Resonanzfrequenz sind die elastischen Eigenschaften ableitbar, die Breite der Resonanzkurve wird vom Dämpfungsverhalten des Prüfkörpers bestimmt und liefert somit indirekt Aussagen über plastisch-viskose Eigenschaften. Über Resonanzuntersuchun-

gen im Niederfrequenzbereich (2 bis 100 s^{-1}) an ganzen Früchten (Äpfel, Tomaten, Pfirsiche) berichtet Mohsenin [2]. Ultraschallmessungen werden zur Festigkeitsuntersuchung von Holz und Strohhalmen eingesetzt, bei Früchten und Knollen gibt es dazu wenig Ergebnisse. Schallmessungen an Kartoffelproben im Labor der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg ergaben, daß im Niederfrequenzbereich (100 Hz bis 1 kHz) Dehnwellen mit Ausbreitungsgeschwindigkeiten um 65 m/s auftreten und im Ultraschallgebiet (20 kHz bis 500 kHz) Longitudinalwellen mit Geschwindigkeiten zwischen 400 m/s und 800 m/s nachweisbar sind. Im Gegensatz zur Dämpfung, die deutlich mit der Frequenz anwächst, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit in diesem Frequenzbereich nahezu unbeeinflusst. Die Ultraschallgeschwindigkeit ist ausgesprochen knollenspezifisch, Sortenunterschiede und lagerzeitbedingte Änderungen sind feststellbar [20, 21]. Die Kombination von Dehnwellen und Longitudinalwellen ermöglicht die Berechnung elastischer Konstanten isotroper homogener Medien, des Elastizitätsmoduls E und der Querkontraktionszahl μ . Für μ finden sich Werte nahe dem Grenzwert inkompressibler Medien ($\mu = 0,497 \pm 0,003$). Der Elastizitätsmodul läßt sich ebenfalls angeben. Die Werte liegen zwischen 3 MPa und 10 MPa, wobei die Streuung groß ist, da kleine Schallmeßfehler starke Schwankungen in der Berechnung von E ergeben, wenn μ nahe 0,5 liegt. Daher sind Longitudinalwellen zur Ermittlung elastischer Kennwerte aus Ultraschallmessungen wenig geeignet. Da jedoch die Ultraschallgeschwindigkeit deutlich knollen- und sortenspezifisch ist, könnte diese Größe zur Sortencharakterisierung herangezogen werden. Dafür sind jedoch noch umfangreichere Messungen notwendig, um verschiedene Sorten zu erfassen, um den Einfluß von Inhaltsstoffen und von Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit festzustellen und um die Auswirkungen verschiedener Lagerbedingungen auf diesen Kennwert zu überprüfen.

5. Zusammenfassung

Es werden Druckversuch, Relaxationsversuch und Schallgeschwindigkeitsmessung bei Anwendung auf pflanzliche Stoffe, besonders am Beispiel der Kartoffel, diskutiert.

Bei wiederholter Belastung sind über die elastischen Größen und bei Relaxationsversuchen über die Relaxationsparameter Strukturänderungen im Stoffsystem nachweisbar. Im Fall von Kartoffeln ist mit einer kritischen Spannung im Bereich von 0,3 bis 0,5 MPa zu rechnen, die zu irreversiblen Änderungen innerhalb des Gewebes führt. Diese Spannung liegt bei rd. 20 bis 50 % der Bruchspannung, somit können äußerlich ganze Kartoffeln innere Schäden durch Überschreiten der kritischen Spannung aufweisen. Ultraschalluntersuchungen an Kartoffelproben ergeben knollenspezifische und sortenspezifische Werte für die Schallgeschwindigkeit im Bereich von 400 bis 800 m/s.

Literatur

- [1] Burnistrova, M. F.; Komolkova, I. K.; Klemm, N. V.; Panina, M. T.; Polunochev, I. M.; Pjanov, A. I.; Sokolov, A. F.; Tetjanko, N. G.; Chaus, V. M.; Eglit, E. G.: Fisiko mehaničeskije svojstva sel'skochozjajstvennych rastenij (Physikalisch-mechanische Eigenschaften landwirtschaftlicher Pflanzen). Moskva:

- [2] Mohsenin, N. N.: Physical Properties of Plant and Animal Materials (Physikalische Eigenschaften pflanzlicher und tierischer Stoffe). New York: Gordon and Breach Science Publishers 1970.
- [3] Tagungsband der Internationalen Konferenz „Physical Properties of Plant Materials and their Influence on Technological Processes“ in Lublin vom 13. bis 19. September 1976. Warszawa: Polska Akademia Nauk 1978.
- [4] Konferenz „Mathematische Modellierung in der Landwirtschaft und physikalische Eigenschaften pflanzlicher Stoffe“ in Berlin am 7. und 8. November 1979. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin 188 (1981).
- [5] Tagungsband der 2. Internationalen Konferenz „Physical Properties of Agricultural Materials“ in Gödöllő vom 26. bis 28. August 1980.
- [6] 2. Tagung „Agrophysik“ in Kühlungsborn vom 15. bis 19. März 1982 „Physik und Landwirtschaft“. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin 208 (1982).
- [7] Herold, B.; Wendler, R.: Anwendungsprobleme bei Modell-Meßkörpern zur Erfassung der Beanspruchung von Früchten in Mechanisierungsmitteln. agrartechnik, Berlin 34 (1984) 6, S. 265–267.
- [8] Baganz, K.: Untersuchungen über den Tempe-

atureinfluß auf verschiedene Festigkeitskennwerte der Kartoffel. Thaer-Archiv, Berlin 12 (1968) 3, S. 219–226.

- [9] Gießmann, E.-J.; Grau, P.: Spannungsrelaxationsmessungen an Kartoffeln. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin 188 (1981), S. 225–234.
- [10] Gießmann, E.-J.: Druckfestigkeit von Kartoffeln. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Bericht G 4 1980.
- [11] Gießmann, E.-J.; Hellebrand, J.: Deformation landwirtschaftlicher Stoffe. Symposium „Verformung und Bruch“ in Magdeburg vom 7. bis 9. September 1982, Tagungsband VI, S. 80.
- [12] Blahovec, J.; Patocka, K.; Celba, J.; Mica, B.: Jednoduché testovani mechanických vlastností hlíz brambor (Einfache Testverfahren mechanischer Eigenschaften von Kartoffelknollen). Zemědělská Technika, Praha 29 (1983) 2, S. 81–96.
- [13] Kiesewetter, R.; Hellebrand, J.: Untersuchungen zu wiederholten Belastungen von Kartoffelproben. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Bericht G 3 1982.
- [14] Stroppe, H.; Streitenberger, P.; Vogt, M.: Untersuchungen zum Deformations- und Bruchverhalten von Kartoffelknollen bei Druckbelastung. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin 208 (1982) Teil I, S. 106–122.
- [15] Gießmann, E.-J.; Grau, P.: Representation of

stress relaxation behaviour of agricultural materials (Darstellung des Spannungsrelaxationsverlaufes von landwirtschaftlichen Stoffen). 2. Internationale Konferenz „Physical Properties of Agricultural Materials“ in Gödöllő vom 26. bis 28. August 1980, Tagungsband Nr. 8.

- [16] Grau, P.; Berg, G.; Gießmann, E.-J.: Rheologische Untersuchungen landwirtschaftlicher Stoffe. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin 208 (1982) Teil I, S. 86–105.
- [17] Dotsenko, V. I.: Stress Relaxation in Crystals (Spannungsrelaxation in Kristallen). phys. stat. sol. (b), Berlin 93 (1979) 11, S. 11–43.
- [18] Sager, D.: Temperaturabhängigkeit der Spannungsrelaxation in Kartoffeln. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR Berlin, Dissertation A 1984.
- [19] Gießmann, E.-J.; Szot, B.: Einfluß der Verformungsgeschwindigkeit auf den Wert der Relaxationskonstanten. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin 208 (1982) Teil II, S. 53–61.
- [20] Zinke, J.; Hellebrand, J.: Akustische Messungen an Kartoffeln. Tagungsberichte der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin 208 (1982) Teil II, S. 201–206.
- [21] Vette, M.; Hellebrand, J.: Anwendung akustischer Meßverfahren zur Kennwertgewinnung landwirtschaftlicher Stoffe. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Bericht G 4 1984.

A 4178

Magnetische Meßmethoden für die Saatgutuntersuchung

Prof. Dr. sc. nat. H. Weiß/Prof. Dr. sc. nat. J. Hellebrand/Dr. U. Zerrenthin

1. Einleitung

Gegenwärtig werden weltweit zuverlässige Schnelldiagnoseverfahren zur Ermittlung der Saatgutqualität gesucht, denn vom hochwertigen Saatgut hängen wesentlich die Pflanzenerträge ab. Die Saatgutprüfung soll zerstörungsfrei erfolgen und eine Einzelkornanalyse zulassen. Die erfolgreiche zerstörungsfreie Werkstoffprüfung in der Industrie beruht auf physikalischen Meßverfahren, die heute auch die Grundlage für Sensorenentwicklungen für Industrieroboter darstellen. Im vorliegenden Beitrag wird die Frage gestellt, ob magnetische Meßverfahren vom landwirtschaftlichen Stoff „Saatgut“ analoge produktionsrelevante Kennwerte für die industriemäßige Pflanzenproduktion liefern können, wie es beim unbelebten industriellen Werkstoff der Fall ist.

2. Prinzip des magnetischen Meßverfahrens

Jeder Körper, auch Saatgut, hat sog. magnetische Momente, die in erster Näherung als atomare Kompaßnadel mit Nord- und Südpol vorstellbar sind. Sie werden durch die Bewegung der Elektronen um ihre eigene Achse und um den Atomkern verursacht. Das Saatgut wird in einen starken Elektromagneten gebracht, und das äußere Magnetfeld wirkt mit der Flußdichte B im Saatgut auf die magnetischen Momente der Elektronen, Atome, Moleküle und Molekülgruppen ein. Als Antwortreaktion auf das äußere Magnetfeld entsteht durch die magnetischen Momente ein resultierendes Feld im Saatgut, die sog. magnetische Polarisation I . Für nichtferromagnetische Stoffe ist die äußere Feldstärke B proportional I , und die Proportionalitätskonstante χ_m (statische magnetische Suszeptibilität) gibt Aufschluß über die magnetischen

Saatguteigenschaften: Es gilt also die Beziehung $I = \chi_m \cdot B$. I und B werden in Tesla (T) gemessen. Wenn auf das Saatgut eine magnetische Flußdichte von $B \approx 2$ T einwirkt, ist die Antwortflußdichte etwa $I = 10^{-5}$ T. Die Apparatur muß demzufolge so empfindlich gemacht werden, daß ein Antwortsignal registriert wird, das 10^5 mal kleiner ist als die Ursache.

Die magnetische Suszeptibilität und damit die resultierende magnetische Polarisation des Saatgutes, die als Summe aller magnetischen Phänomene aufgefaßt werden kann, ist nun meßtechnisch nachzuweisen. Eine Möglichkeit ergibt sich aus der Kraftwirkung magnetischer Momente in inhomogenen Magnetfeldern.

3. Saatgut als physikalisches Meßobjekt

Für den Physiker ist Saatgut als Meßobjekt ungewöhnlich. Weder Erkenntnisse der Festkörper- und Kristallphysik noch quantenmechanische Aussagen sind auf das biologische Objekt unmittelbar anwendbar. Dennoch sind einige physikalische Strukturaussagen über das Saatgut vor der experimentellen Messung möglich und notwendig:

Diamagnetismus

In diamagnetischen Stoffen kompensieren sich die magnetischen Momente aller Elektronenbahnen und aller Spins gegenseitig. Wirkt jedoch ein äußeres Meßmagnetfeld auf die Gesamtheit der Elektronen des Saatgutes ein, so werden dem einwirkenden Feld entgegengerichtete magnetische Momente induziert, die als resultierende diamagnetische Magnetisierung meßbar sind. Bei hochmolekularen Stoffen, wie sie überwiegend im Saatgut vorliegen, kann dieser Diamagnetismus den Paramagnetismus übertreffen.

Magnetische Eigenschaften stehen in Beziehung zur biologischen Aktivität. Wird Hefe abgetötet, nimmt der Diamagnetismus zu [1], bei Saatgut ist ähnliches zu erwarten.

Paramagnetismus

Paramagnetische Spezies haben im Gegensatz zum Diamagnetismus auch ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes ein magnetisches Moment. Als Beispiel seien für das Saatgut aus der Reihe der paramagnetischen Ionen der Übergangselemente Fe^{2+} und Fe^{3+} sowie Mn^{2+} und Mn^{3+} genannt. Ferner ist O_2 stark paramagnetisch, was für den Gasaustausch beim Saatgut bemerkenswert ist. Allgemein spielen paramagnetische freie Radikale in biologischen Systemen eine wesentliche Rolle. Sie treten in Zwischenstufen bei vielen biochemischen Reaktionen auf oder sind als langlebige Radikale in biologischen Makromolekülen sterisch stabilisiert [2].

Atmungskette

In der Atmungskette spielen die Redoxsysteme eine entscheidende Rolle, und speziell das Redoxsystem Fe^{2+}/Fe^{3+} ist magnetisch nachweisbar. Natürlich sind die Verhältnisse bei der Oxydation organischer Substanzen in biologischen Objekten wesentlich komplexer als bei technisch-chemischen Oxydationsprozessen. Die biologische Oxydation ist enzymatisch katalysiert. Sie ist aus vielen Einzelreaktionen zusammengesetzt. Es ergeben sich ebenso viele Zwischenprodukte, und die Energie wird im Verlauf der Oxydation von Wasserstoff zu H_2O freigesetzt.

Kollektive magnetische Phänomene

Die Makromoleküle spielen im Biosystem eine entscheidende Rolle. Es handelt sich dabei um Zusammenschlüsse von vielen Atomen, die durch starke Austauschbindungs-