

- [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 testování 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-

kräfte miteinander verbunden sind. Ein Makromolekül besteht i. allg. aus mehr als 100 monomeren Grundmolekülen und entspricht einer relativen Molekularmasse von mehr als 10 000. Ferner sind flüssigkristalline Strukturen existent. Daher sind superparamagnetische und Nahordnungsphänomene nicht auszuschließen.

Unter dem Aspekt, daß die magnetischen Eigenschaften eines Systems von der Zusammensetzung, von der Struktur und vom physikalisch-chemischen und damit auch vom biologischen Zustand abhängen, scheint es sinnvoll, auch magnetische Messungen am Saatgut vorzunehmen. Die magnetische Meßmethode arbeitet berührungsfrei und zerstörungsfrei und wäre deshalb prinzipiell sehr gut für eine Schnellanalysemethode geeignet. Jedoch existieren auch Faktoren, die diese Möglichkeit einschränken.

4. Probleme bei der Untersuchung biologischer Stoffe

Magnetische Meßmethoden spielen in der Werkstoffprüfung industrieller Stoffe eine bedeutende Rolle. Bei biologischen Stoffen ergeben sich Besonderheiten, die eine Nutzung magnetischer Methoden für die Saatgutprüfung erschweren:

- Im Unterschied zum Meßobjekt „Festkörper“ ist das Biosystem „Saatkorn“ von höchster struktureller und funktioneller Komplexität, von ausgeprägter Individualität und wegen der Existenz von Lebensprozessen in ständiger Wechselwirkung mit seiner Umgebung. Daher sind reproduzierbare physikalische Meßwerte keinesfalls selbstverständlich.
- Die Wirkung angelegter Felder, die zur Polarisation der Stoffe führt, spiegelt die Suszeptibilität wider. Vergleicht man elektrische und magnetische Suszeptibilität, erkennt man, daß die magnetische Meßgröße etwa um den Faktor 10^5 kleiner ist. Daher erfordern magnetische Meßverfahren hohe Empfindlichkeit, um Signale vom Biosystem zu gewinnen.
- Die Existenz von eindeutigen Korrelationen zwischen den magnetischen Eigenschaften und den Eigenschaften des Saatgutes, die für hohe Keimfähigkeit und für erfolgreichen Feldaufgang Voraussetzung sind, ist noch nicht gefunden.

Aus dem Dargestellten folgt, daß die Thematik noch ganz der Grundlagenforschung angehört und auch nicht von Physikern allein gelöst werden kann. Die Gemeinschaftsarbeit von Agrar- und Naturwissenschaftlern sowie Gerätebauspezialisten ist Voraussetzung für das Studieren der grundlegenden Zusammenhänge und die spätere Realisierung von Saatgutkennwertgeräten im Praxis-einsatz.

5. Aufgaben des Physiklers

Meßwerte von biologischen Objekten werden bereits viele Jahrzehnte publiziert. Die Reproduzierbarkeit solcher Meßwerte erweist sich jedoch bisweilen als unzureichend, weil nicht alle Einflußgrößen in solchen Experimenten erfaßt bzw. ermittelt werden konnten. Die Signale kamen z. B. nicht allein vom biologischen Objekt, sondern Störungen aus der Umgebung verfälschten das Ergebnis oder Annahmen über die Modelle zur Interpretation der Ergebnisse waren nicht dem Objekt angepaßt. Wenn man dann auf dieser unsicheren Basis Geräte entwickelte, hielten diese dem Praxis-

einsatz nicht stand. Daher ergeben sich für den Physiker folgende Aufgaben:

- Die Apparatur muß den Besonderheiten des Saatgutes (inhomogenes Saatgut-Luft-Gemisch mit geometrisch undefinierten Einzelkörnern) entsprechen und ausreichende Empfindlichkeit haben.
- Störungen aus der Apparatur selbst und aus der Umgebung sind weitgehend zu eliminieren, um die Meßwerte des Biosystems selbst eindeutig zu registrieren.
- Physikalisch begründete Annahmen (Hypothesen) zur Signalursache, die eine theoretische Beschreibung der magnetischen Struktur biologischer Objekte zulassen, sind aufzustellen.
- Die Bedingungen für reproduzierbare Meßwerte sind zu ermitteln.
- Zu suchen sind Korrelationen zwischen den magnetischen Meßwerten und den physiologischen Eigenschaften des Saatgutes.

Ausgangspunkt für alle weiteren Arbeiten zur Realisierung von Schnellanalyseverfahren ist die Gewinnung reproduzierbarer Meßwerte.

6. Meßtechnische Probleme der Reproduzierbarkeit

Die statische magnetische Suszeptibilität eines Stoffes kann nach verschiedenen Meßmethoden bestimmt werden, bei denen vorwiegend die Kraftwirkung eines inhomogenen magnetischen Feldes auf den Probekörper ausgenutzt wird. Prinzipiell lassen sie sich in zwei Gruppen einteilen. Bei der einen wirkt die Kraft auf einen kleinen Probekörper an einer definierten Stelle des inhomogenen Magnetfeldes. Zur anderen Gruppe gehört z. B. die Zylindermethode nach Gouy, bei der die addierten Kraftwirkungen des inhomogenen Feldes auf die gesamte Länge eines zylinderförmigen Probekörpers gemessen werden. Im Rahmen der Magnetochemie wird diese Methode bei homogenen festen und flüssigen Proben bei hoher Reproduzierbarkeit der Meßwerte mit Erfolg angewendet.

Saatgutproben liegen jedoch als inhomogenes, über die Probenlänge ungleich verteiltes Saatgut-Luft-Gemisch vor. Der magnetische Anteil der Luft am Gesamtsignal ist gering (rd. 5 %). Er kann nach grober Volumenbestimmung der Hohlräume rechnerisch hinreichend genau kompensiert werden. Problematisch ist die für die Berechnung der magnetischen Suszeptibilität notwendige Bestimmung des Saatgutvolumens mit hoher Genauigkeit. Zum Vergleich von Saatgut-Luft-Gemischen wird deshalb i. allg. die spezifische (massebezogene) magnetische Suszeptibilität χ_{ms} herangezogen, wobei gilt:

$$\chi_{ms} = \rho^{-1} \chi_m$$

ρ Dichte der Probe.

Tafel 1. Spezifische magnetische Suszeptibilität und Standardabweichung bei jeweils zehnmaliger Neueinfüllung von Proben verschiedener Korngrößen und destilliertem Wasser

Probe	Korngröße mm	χ_{ms} $10^{-9} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	S_x $10^{-9} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
Wasser		-9,05	0,02
Casein	1	-6,90	0,05
Weizen	5	-6,98	0,10
Mais	9	-7,18	0,56

Die Reproduzierbarkeit solcher Suszeptibilitätsmessungen wird vor allem durch die Güte der Gleichverteilung des Saatgutes über die Probenlänge bestimmt.

Wie in Tafel 1 ersichtlich ist, nimmt die Reproduzierbarkeit der Suszeptibilitätsmessungen an jeweils der gleichen Probe mit steigender Partikelgröße ab. Suszeptibilitätsunterschiede gröbkörniger Saatgutproben sind deshalb mit der herkömmlichen Zylindermethode kaum erfassbar.

Nach der von Prun [3] beschriebenen Methode lassen sich durch Messung der Probe in zwei Eichmedien auch bei großer Korngröße und erheblicher Ungleichverteilung des Saatgut-Luft-Gemisches geringe Streuungen der magnetischen Suszeptibilität erzielen. Diese Methode weist jedoch den Nachteil auf, daß die Eichlösung (z. B. Wasser) das Saatgut kurzfristig in seinen Eigenschaften verändert und auch eine Wiederholung der Messung an derselben Probe nicht möglich ist.

Im Labor der IH Berlin-Wartenberg wurde eine magnetische Waage entwickelt, mit der die Kraft des inhomogenen Magnetfeldes auf ein Einzelkorn mit nur sehr geringer Streuungen der magnetischen Suszeptibilität erzielt. Diese Methode weist jedoch den Meßsignal großen Signals des Probenträgers ließ sich die Empfindlichkeit der Meßapparatur um Größenordnungen gegenüber der herkömmlichen Anordnung steigern. Erste Untersuchungen an Weizensaatgut zeigten, daß Sortenunterschiede und Vorbehandlungseffekte (z. B. Vorquellen) zuverlässig mit Hilfe der so bestimmten spezifischen magnetischen Suszeptibilität nachgewiesen werden können.

7. Zusammenfassung

Physikalische Meßverfahren werden international zunehmend auf landwirtschaftliche Stoffe angewendet, um agrotechnische Kennwerte für den technologischen Prozeß und für Landmaschinenkonstrukteure zu erhalten. Ein Problem bei der Untersuchung verschiedener physikalischer Größen kann die Gewinnung reproduzierbarer Meßwerte sein, weil der landwirtschaftliche Stoff von äußerst komplexer Zusammensetzung ist und oft Lebensprozesse sowie Vorgeschichte die Meßwerte beeinflussen.

Am Beispiel der Untersuchung magnetischer Eigenschaften von Saatgut werden die physikalischen Grundbeziehungen, das Meßprinzip und Besonderheiten bei Anwendung auf biologische Stoffe dargelegt. Die Ergebnisse zeigen, daß bei ausreichender Nachweismempfindlichkeit saatguttypische Suszeptibilitätswerte sowie Zustandsänderungen im Saatgut festzustellen sind. Weitere Grundlagenuntersuchungen müssen die Basis einer Korrelation dieser Meßwerte zu agrotechnischen Kennwerten oder Sortenmerkmalen schaffen.

Literatur

- [1] Schoffa, G.: Elektronenspinresonanz in der Biologie. Karlsruhe: Verlag G. Braun 1964, S. 322.
- [2] Hellebrand, J.; Stöber, R.: Zur natürlichen Radikalkonzentration in Biopolymeren. Plaste und Kautschuk, Leipzig 29 (1982) 11, S. 667-668.
- [3] Prun, A. F.; Očarenko, V. P.; Kalugin, N. L.: Gidrostatičeskij metod ismerenija magnitnoj vospriimčivosti slabomagnitnij tel (Eine hydrostatische Methode der Messung der magnetischen Suszeptibilität schwach magnetischer Körper). Elektronnaja obrabotka materialov, Kišinjov (1970) 1, S. 79-80.