

## **Widerstandsmessung bei der Kartoffellagerung**

Ing. Eberhard Leppack, KTBL- Versuchsstation Dethlingen

Das Messen der Stapelfeuchtigkeit ist genauso wichtig wie das Messen der Temperatur. Verluste durch Fäulnis nach zu geringer Belüftung oder durch Lagerdruckstellen nach zu häufiger Belüftung können die einer falschen Lagerungstemperatur sogar überschreiten. Das Naßfäulerisiko frisch eingelagerter Kartoffeln kann durch eine sofortige Abtrocknungsbelüftung gesenkt werden, weil dadurch den bakteriellen Fäulnisregnern die Lebensgrundlage entzogen wird. Allerdings führt eine übermäßige Belüftung zur Austrocknung der Knollen und dadurch zur Verstärkung der Lagerdruckstellen. Mit Hilfe geeigneter Meßverfahren der Stapelfeuchtigkeit kann die Erzielung eines ausreichenden Abtrocknungszustands sicherer bestimmt werden als mit der üblichen, visuellen Methode.

### **Zwei Feuchtigkeitsbereiche**

In Kartoffellagern kommen zwei Feuchtigkeitsbereiche vor, nämlich das Sättigungsdefizit bei trockenen Partien mit einer relativen Feuchtigkeit unterhalb von 100 % und der Wasserüberschuß bei feuchten und nassen Kartoffeln über 100 %. Im Wasserüberschußbereich können an Hand der relativen Feuchtigkeit keine Unterschiede des Wassergehaltes der Stapeloberfläche gemessen werden. Die relative Luftfeuchtigkeit von Kartoffelstapeln ist in der oberen Zone auch meistens sehr hoch. Sie sinkt während der Belüftung nur kurzzeitig und steigt nach Beendigung der Belüftung innerhalb weniger Stunden wieder an. Bei automatischer Steuerung der Abtrocknungsbelüftung durch einen Hygrostaten mit den Grenzwerten von 92 und 95 % würden die Gebläse im Intervall des Feuchtigkeitsanstiegs wiederholt eingeschaltet und dadurch würde die Anzahl der Belüftungsstunden erheblich zunehmen. Hygrometer müssen außerdem regelmäßig gewartet und justiert werden, weil sie im Kartoffelstapel einer hohen Schmutzbelastung und häufig auftretender Kondensation ausgesetzt sind. Der nutzbare Meßbereich von 92 % bis 95 % ist auch sehr klein. In der Außenluft und in der unteren Stapelzone bestehen dagegen mit der Messung der Luftfeuchtigkeit weniger Probleme.

### **Grundlagen der Widerstandsmessung**

Zur Bestimmung der Stapelfeuchtigkeit hat sich das Prinzip des elektrischen Leitwiderstandes, auch "Bioimpedanz" genannt, als besser erwiesen, weil dieser Meßwert wesentlich vom Wassergehalt der Knollenschale und nicht von der relativen Feuchtigkeit der Umgebungsluft abhängig ist. Prinzipiell wird bei der Widerstandsmessung an zwei Punkten einer Knolle - ohne Verletzung der Schale-

eine Gleichspannung angelegt. Der Meßstrom kann eine dicke Knollenschale nur schwer durchdringen und fließt deshalb bei feuchten Kartoffeln viel leichter über die Knollenoberfläche zum anderen Pol als durch die Knolle hindurch. Die trockene Knollenschale wirkt dabei als Isolator. Bei trockener Knollenoberfläche zeigt das Meßgerät deshalb einen großen und bei nasser Schale einen kleinen elektrischen Leitwiderstand an, der in k-Ohm gemessen wird. Ähnlich fließt der elektrische Strom auch in Kartoffelstapeln zwischen den voneinander weit entfernten Meßpolen über die Berührungspunkte der Knollen untereinander. Deshalb spielt die Beschädigung der Knollen durch das Einstechen der Stäbe nur eine untergeordnete Rolle. Als Meßpole werden rostfreie Stäbe, Metallgittermatten oder auch blanke Kabel verwendet.

Zum Meßverfahren der KTBL-Versuchsstation Dethlingen gehören zwei Metallstäbe, zwei Kabel und ein Handmeßgerät. Die Metallstäbe sollen so lang sein, daß sie mindestens 50 cm tief in die obere Stapelzone eingesteckt werden können, einen Durchmesser von 8 bis 10 mm haben, rostfrei sein und sich für den Anschluß von Kontaktsteckern eignen. Der Abstand der Stäbe soll ebenfalls 50 cm betragen (Abb. 1). Die von Rasmussen (1) beschriebene Messung auf dem gleichen Grundprinzip erfolgt mit Hilfe von zwei engmaschigen Metallnetzen, die in einem Abstand von 20 bis 30 cm in einer Tiefe von 15 bis 20 cm in die Stapeloberfläche eingelegt werden (Abb. 2). Von Pringle (2) wurde eine dritte Meßmethode auf der Basis der Widerstandsmessung zur Erfassung der Kondensation entwickelt. Er legte zwei parallele Drahtschlingen, die an ein Meßgerät angeschlossen wurden, um einzelne Knollen und konnte so am wechselnden Leitwiderstand die Häufigkeit von Kondensationsintervallen in Kartoffellagern nachweisen (Abb. 3).

Eine entscheidende Bedeutung hat auch die Meßspannung, die bei tragbaren Geräten für Gleichstrom 9 V nicht unterschreiten soll. Bei Gleichstrom bestand der Nachteil, daß der Meßwert mit zunehmender Meßdauer anstieg. Zur Standardisierung mußte eine Meßdauer von 10 bis 20 s vereinbart werden (Abb. 5). Bei den später auf Wechselstrombasis entwickelten Geräten bleiben die Meßwerte konstant und können schon innerhalb weniger Sekunden zuverlässig abgelesen werden. Erst diese Verbesserung hat die Nutzung der Widerstandsmessung für die Prozessorsteuerung erschlossen. Allerdings zeigen Wechselstromgeräte im Vergleich zur Gleichstrom nur den halben Widerstandswert an. Um die Ergebnisse vergleichen und allgemeine Anwendungsempfehlungen entwickeln zu können, müssen diese Meßwerte von Wechselstromgeräten verdoppelt werden. Nach dem bisherigen Standard bestehen folgende Feuchtigkeitsbereiche (Bei Wechselstrom gilt der halbe Wert):

< 20 k-Ohm	: Kartoffeln sind naß
20 bis 80 k-Ohm	: Kartoffeln sehr feucht
80 bis 150 k-Ohm	: Kartoffeln sind leicht feucht
>150 k-Ohm	: Kartoffeln sind trocken

Eine Kalibrierung der Meßwerte nach dem Wassergehalt der Schale ist bisher nicht gelungen. Die Meßwerte stellen deshalb nur Vergleichswerte zum Standard dar. Auf der Basis langjähriger Erfahrungen können Grenzwerte empirisch abgeleitet werden. Die Abtrocknungsbelüftung nach der Einlagerung sollte auf dieser Basis nur solange fortgesetzt werden bis ein lagerfähiger Bereich der Kartoffeln von 150 bzw. 75 k-Ohm erreicht ist.

### **Anwendung der Widerstandsmessung**

Die Meßstelle von 50 x 50 cm erfaßt ein Stapelvolumen in Form einer Halbkugel mit einem etwa 1 m großen Radius. Wegen der thermisch verursachten Luftbewegung im Stapel von unten nach oben, sammelt sich freies Wasser immer in der oberen Stapelzone. Deshalb kann davon ausgegangen werden, daß der gesamte Stapel unterhalb dieser Meßstelle trocken ist, wenn die Meßstelle einen hohen Widerstand anzeigt. Rückschlüsse auf den Feuchtigkeitszustand in der horizontalen Ausdehnung sind nur in homogenen Stapeln möglich, weil sich Partien aus gleichen Herkünften im Widerstandsverlauf sehr ähnlich verhalten. In Flächenlagern mit stark wechselnden Partien können einzelne Streifen mit Fäulnis eine Schichtdicke von etwa 0,5 m im Schwenkbereich des Förderbandes umfassen. Nur einen Meter weiter können die Kartoffeln schon ausreichend trocken sein. Wegen der geringen Reichweite sind in Flächenlagern mit häufig wechselnden Partien mehr Meßstellen erforderlich als bei homogenen Kartoffelpartien.

Die Auswahl der Meßstelle hat deshalb eine entscheidende Bedeutung für die Bewertung des gesamten Stapels. Eine ständige Beobachtung der Oberfläche zur Erkennung feuchter Stellen kann mit dieser Meßmethode nicht ersetzt werden. Jedoch hilft die Umsetzung der Meßstelle in kritische Stapelbereiche bei der Bedienung und Erfolgskontrolle der weiteren Belüftungsmaßnahmen. Vorzugsweise wird man die Meßstelle in die Mitte eines Lagers und bei Boxen im Bereich der Schüttkegel einsetzen. Während in Boxen mit bis zu 50 t eine Meßstelle ausreicht, sollten in Flächenlagern mit 5000 t mindestens 6 Meßstellen gleichmäßig verteilt werden. Die Fühler werden nach der Befüllung der Lagersektionen eingesetzt und dort bis zur Auslagerung belassen. Das Messen in Boxenlagern kann durch Verlegen loser Kabel, die zum Arbeitsgang herunterreichen, erheblich vereinfacht werden. In großen Lagerhäusern empfiehlt sich die Fernmessung (Abb. 6). Während der Einlagerung sollte mindestens einmal täglich und später wöchentlich gemessen

werden. Empfehlenswert ist die Führung einer Belüftungsliste, in die die Meßwerte einzutragen sind.

### **Bisherige Erfahrungen mit der Widerstandsmessung**

Die wesentlichen Vorteile dieser Methode liegen in ihrer einfachen Anwendung, ihrer Schnelligkeit und der Wartungsfreiheit der Geräte. Mit Hilfe dieser Meßwerte kann der Abtrocknungsvorgang ständig verfolgt werden. Auch noch nach der ersten Abtrocknungsbelüftung läßt sich an der Veränderung der Widerstandswerte die Notwendigkeit weiterer Abtrocknungsmaßnahmen erkennen. Mängel, wie eine zu geringe Luftmenge und fehlende Temperaturdifferenz sowie Funktionsstörungen der Anlage, lassen sich mit Hilfe dieser Meßmethode besser erkennen als mit der Temperaturmessung alleine.

Der Leitwiderstand steigt grundsätzlich während der Belüftung mit kalter Außenluft bei gleichzeitig sinkender Stapeltemperatur als Folge des Trocknungsvorganges. In den Belüftungspausen kehren sich die Meßwerte wieder um, d. h. die Temperatur steigt und der Widerstand fällt. (Abb. 4). Die Abtrocknung und damit die Widerstandsänderung läßt durch eine größere Temperaturdifferenz, niedrige Luftfeuchtigkeit und Verlängerung der Belüftungsdauer beschleunigen. Frisch gerodete oder sortierte Partien haben meistens einen Leitwiderstand zwischen 20 und 30 k-Ohm. Bei abgereiften, fäulnisfreien Partien steigt der Widerstand durch die Abtrocknungsbelüftung innerhalb weniger Stunden auf 150 k-Ohm an, nach geteiltem Ernteverfahren sogar wesentlich schneller und höher als nach direkter Ernte. Die intensive Abkühlung auf die Lagerungstemperatur führt zum höchsten Widerstand. Gegen das Frühjahr mit geringer Belüftungsmöglichkeit fällt der Widerstand meistens wieder langsam ab. Große Unterschiede zeigten sich auch zwischen warmer und kalter Lagerung. So lagen die Widerstandswerte bei kalter Lagerung nach erzielter Endtemperatur zwischen 1000 bis 2000 k-Ohm und im Warmlager höchstens bei 500 k-Ohm. Diese Beobachtung bedeutet, daß die geringe Temperaturdifferenz und eingeschränkte Abkühlungsbelüftung feuchtere Stapel zur Folge hat. Nur bei problematischen Partien blieben die Meßwerte auch in der späteren Lagerungsphase niedrig und ließen sich nur mit zusätzlichen Belüftungsstunden erhöhen. Die Unterschiede der Partien waren in der Feuchtigkeit meistens viel größer als in der Temperatur.

### **Automatische Steuerung nach der Stapelfeuchtigkeit**

Die Widerstandsmessung eignet sich auch zur automatischen Steuerung. Der Sollwert kann im Unterprogramm "Abtrocknen" eingestellt werden. Bis dieser erreicht ist, wird vorrangig ohne Beachtung der Stapel-Soll-Temperatur mit kalter Außenluft belüftet. In Abtrocknungsprogrammen lassen noch weitere Grenzwerte so

vorwählen, daß auch Außenluftzustände mit geringerer Luftfeuchtigkeit und größerer Temperaturdifferenz zur Beschleunigung der Abtrocknung genutzt werden. Erst nach Unterschreitung des Soll-Widerstandes wird das Unterprogramm "Abtrocknen" entweder automatisch oder von Hand auf die nachfolgende "Wundheilung" mit anderen Grenzwerten umgestellt. Dann verliert die Stapelfeuchtigkeit an Bedeutung, weil der Widerstand - außer von schwieriger Partien - mit zunehmender Lagerungsdauer unvermeidlich weiter ansteigt. Einige Fachfirmen verzichten bei ihren Prozessoren aber auf die Messung der Stapelfeuchtigkeit und wenden dafür ein zusätzliches Unterprogramm zur Berechnung der abzuführenden Wassermenge aus der Taupunktdifferenz an.

Bietet das Programm für die Abtrocknungsphase keine Hilfen an, muß ein versierter Lagermeister die Automatik auf Umwegen zum Abtrocknen nutzen. Hilfsmittel bestehen in der Wahl einer tieferen als der gewünschten Produkttemperatur und einer schnelleren als der gewünschten Abkühlungsgeschwindigkeit für maximal zwei Tage. Nach erzielter Abtrocknung ist eine schnelle Rückstellung erforderlich, um ungewolltes Abkühlen zu verhindern. Weniger empfehlenswert ist die Umstellung auf Handbetrieb, weil Belüftungsfehler während der Einlagerung das Lagerungsergebnis beeinträchtigen können.

### **Grenzen der Widerstandsmessung**

Die Eignung der Widerstandsmessung ist eingeschränkt, wenn der Leitwiderstand durch andere Faktoren als durch die Knollenschale beeinflusst wird, z. B. durch leitfähige Beimengungen, wie Unkraut, feuchten Boden und auch Keime. Die Keime leiten den Strom mit geringerem Widerstand als die Knollenschalen. Niedrige Widerstandswerte können auch bei geringer Schalendicke und besonders bei Losschaligkeit entstehen.

### **Zusammenfassung**

Die Bedeutung der Feuchtigkeitsmessung in der oberen Stapelzone liegt in der besseren Anpassung der Anfangsbelüftung an den tatsächlichen Bedarf zur Verminderung von Fäulnis durch eine ausreichende Abtrocknungsbelüftung und von Lagerdruckstellen durch die Vermeidung einer Überbelüftung. Mit Hilfe der Widerstandsmessung können auf einfache Weise die Vorgänge der Abtrocknung und Befeuchtung im Stapel gemessen und verfolgt werden. Für Einzelmessungen gibt es Handmeßgeräte und zur kontinuierlichen Beobachtung auch Fernmeßanlagen. Die Einbeziehung der Feuchtigkeitsmessung in die automatische Steuerung durch Prozessoren erleichtert die Abtrocknungsbelüftung und trägt zur Verminderung von Lagerdruckstellen bei.