

# Elektrische Messung von Bodenverdichtungen unter landwirtschaftlichen Fahrzeugen

Institut für landtechnische Grundlagenforschung, Braunschweig-Völkenrode

## Allgemeine Grundlagen

Die elektrische Leitfähigkeit eines Bodens hängt wesentlich von folgenden Faktoren ab:

1. der Ionenkonzentration,
2. der Temperatur,
3. dem Porenvolumen.

Unter der Voraussetzung, daß zwei dieser Faktoren konstant gehalten werden, lassen sich Änderungen des dritten Faktors durch die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit messen.

Bei der Leitung elektrischer Ströme durch den Boden sind zu unterscheiden:

1. die elektrolytische Leitung der Bodenlösung,
2. die kapazitive Leitung der Trockensubstanz.

Der kapazitive Anteil gewinnt nur bei Wechselstrom Bedeutung. Bei Gleichstrom folgt der Strom im wesentlichen den Gesetzen der elektrolytischen Leitung [1] und den Gesetzen für den Stromübergang in der Grenzschicht zweier Substanzen (Elektrophorese) [2].

Es gilt also in erster Näherung das Ohmsche Gesetz  $I = U/R$ , wobei sich der Widerstand  $R$  aus der Leiterlänge  $l$  und dem Leiterquerschnitt  $q$  als  $R = \rho \cdot l/q$  ergibt, worin der „spezifische Widerstand“  $\rho$  eine Materialkonstante ist. Diese Beziehung gilt jedoch nur für den Fall, daß der Strom den Leiterquerschnitt ganz und gleichmäßig ausfüllt. Würde man den Strom z. B. im freien Gelände zwischen zwei parallelen Rohren oder zwei Kugeln fließen lassen, so verteilt sich der Strom im Boden nach den Gesetzen der Potentialtheorie. In solchen Fällen ist der Formfaktor  $\frac{l}{q}$  komplizierter und läßt sich oft nur experimentell als sogenannte Widerstandskapazität der betreffenden Anordnung bestimmen.

Den reziproken Widerstand bezeichnet man als Leitfähigkeit. Nach dem Ohmschen Gesetz ist also der Strom umgekehrt proportional dem Widerstand, aber direkt proportional der Leitfähigkeit.

Beim Boden hängt der „spezifische Widerstand“  $\rho$  in erster Linie von der Ionenkonzentration, der Temperatur und dem Porenvolumen ab. Er fällt mit steigender Ionenkonzentration, steigender Temperatur und Verringerung des Porenvolumens.

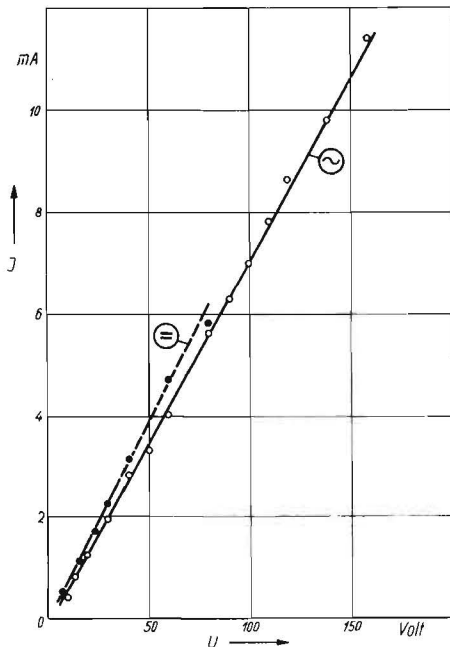


Abb. 1: Das Ohmsche Gesetz gilt auch im Ackerboden

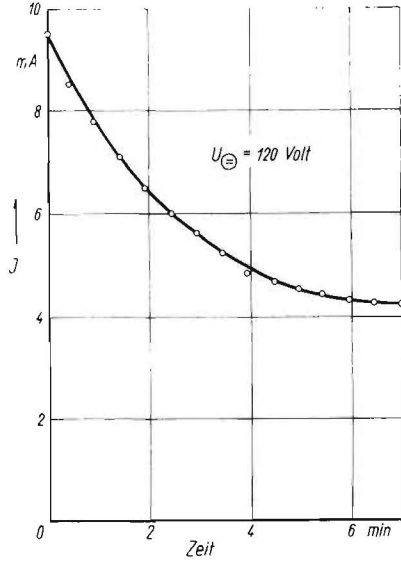


Abb. 2: Einfluß der Polarisationsspannung auf Gleichstrom bei konstanter Klemmenspannung

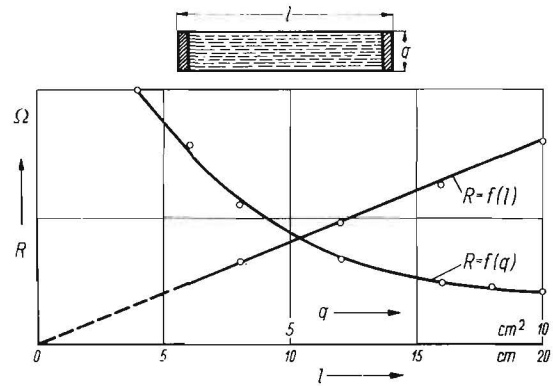


Abb. 3: Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge  $l$  und dem Querschnitt  $q$  einer zylindrischen Bodenprobe

Da sich beim Durchgang von Strömen durch Elektrolyte die Ionenkonzentration an den Elektroden ändert (Polarisation) und die wandernden Ionen gleichzeitig neutrale Wassermoleküle zur Kathode befördern (Elektrophorese), sind Gleichstrommessungen am Boden nur unter bestimmten Bedingungen möglich. Sie haben dann aber den Vorteil großer experimenteller Einfachheit.

Bevor der Zusammenhang zwischen Widerstand und Porenvolumen besprochen wird, sollen einige Messungen an Ackerböden das oben Gesagte belegen.

Abbildung 1 zeigt, daß auch im Boden das Ohmsche Gesetz weitgehend erfüllt ist. Die Gleichstrommessungen werden jedoch schon bei geringen Stromstärken durch Polarisationserscheinungen erschwert. Abbildung 2 zeigt, wie nach Anlegen einer Gleichspannung der durch den Boden fließende Strom durch den Einfluß der Polarisation mit der Zeit abfällt. Bei Wechselstrom stört keine Polarisation, jedoch ist es oft notwendig, im Gebiet der Ton- oder sogar der Hochfrequenz zu arbeiten [3, 4]. Deshalb wurden die folgenden Versuche in der Hauptsache mit Wechselstrom durchgeführt.

Die Abhängigkeit des Widerstandes von den Leiterdimensionen wurde zunächst an einer 1,50 m langen und 6 cm weiten zylindrischen Bodensäule kontrolliert. Die Elektroden erfüllten hierbei den ganzen Querschnitt. Abbildung 3 bestätigt, daß der Widerstand linear mit der Leiterlänge wächst

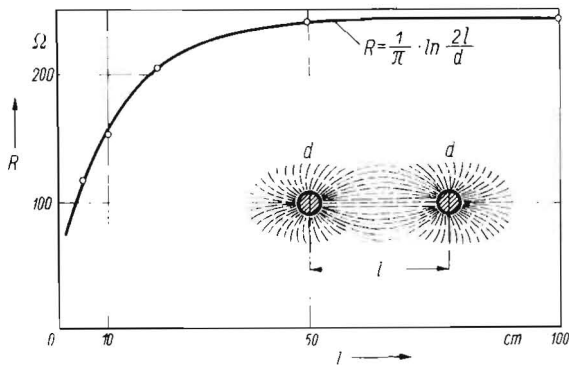


Abb. 4: Bei flächenhafter Stromausbreitung im Boden wächst der Widerstand nach einem logarithmischen Gesetz

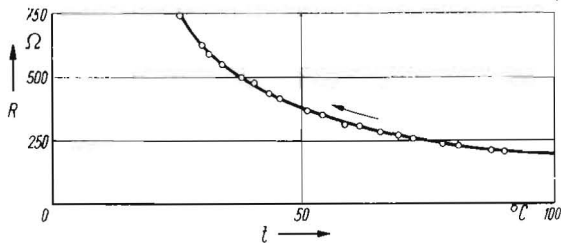


Abb. 5: Im Ackerboden fällt der elektrische Widerstand mit steigender Temperatur

und umgekehrt proportional dem Querschnitt ist. Erfüllt der Strom den Leiterquerschnitt jedoch nicht gleichmäßig, z. B. wenn zwei Elektroden vom Durchmesser  $d$  im Abstand  $l$  parallel zueinander in den freien Boden eingeführt werden, so folgt der Widerstand dem Gesetz:

$$R = \frac{1}{\pi} \cdot \ln 2l/d$$

Die logarithmische Beziehung zwischen  $R$  und  $l$  zeigt Abbildung 4. Bei räumlichen Anordnungen, z. B. bei den weiter unten beschriebenen Sonden, läßt sich die Widerstandskapazität nur experimentell bestimmen. Dies ist jedoch nur nötig, wenn Absolutwerte des spezifischen Widerstandes gemessen werden sollen.

Schließlich zeigt Abbildung 5 noch die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur. Die Messung wurde während der Abkühlung einer durch elektrischen Strom auf  $90^\circ \text{C}$  erhitzten zylindrischen Bodenprobe gemacht. Es bestätigt sich, daß der Temperaturkoeffizient des Widerstandes negativ ist. Die Änderung der Leitfähigkeit beim Boden mit dem Porenvolumen ist eine Folge der Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen den einzelnen Bodenteilchen nach der Zusammenpressung. Bei Wechselstrom kommt noch eine scheinbare Vergrößerung der Dielektrizitätskonstante hinzu, weil sich nach der Zusammenpressung zwischen den Elektroden mehr Trockensubstanz befindet, die den kapazitiven Widerstand verringert.

Die Befürchtung, mit der Bodenpressung würde sich der Wassergehalt und damit die Ionenkonzentration ändern, ist unbegründet, solange man nicht an der Grenze der Wasserkapazität des Bodens arbeitet. Dies ist bei der praktischen Bodenbearbeitung aber nie der Fall [5, 6, 10].

Unter dem Porenanteil  $n$  versteht man bekanntlich den prozentualen Anteil von Luft und Wasser am Gesamtvolumen, d. h.

$$n = \frac{\text{Luftvolumen} + \text{Wasservolumen}}{\text{Gesamtvolumen}} \cdot 100$$

Füllt man den Boden in einen weiten Zylinder aus nicht leitendem Material, auf dessen Grundfläche zwei Elektroden in festem Abstand liegen, so fließt nach Anlegen einer Spannung ein bestimmter Strom. Preßt man nun den Boden durch Belastung zusammen, so ändert sich sein Porenvolumen und der Strom zwischen den Elektroden. Trägt man den Strom in Abhängigkeit vom Porenvolumen auf, so ergibt sich die in Abbildung 6 wiedergegebene Abhängigkeit. Der Strom wächst annähernd linear mit fallendem Porenvolumen.

Das gleiche Ergebnis zeigt Abbildung 7. Als Meßstrecke diente eine der weiter unten beschriebenen Sonden. Hier ist der mit einer Tonfrequenzmeßbrücke [11] gemessene Widerstand in Abhängigkeit von  $n$  aufgetragen. Es ergibt sich recht genau eine Hyperbel a. Die Umrechnung für  $I = 1/R$  ergibt mit guter Annäherung die Gerade b.

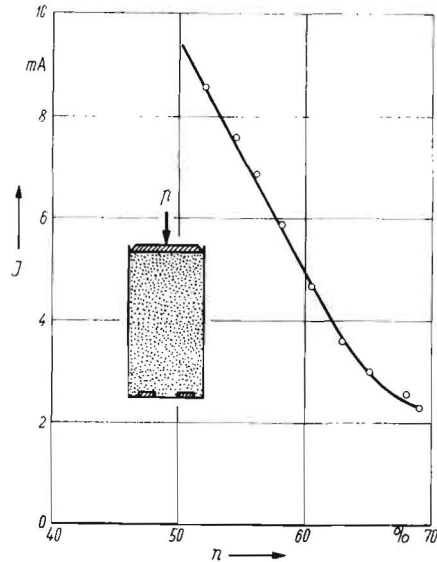


Abb. 6: Bei Verringerung des Porenvolumens steigt der Strom annähernd linear

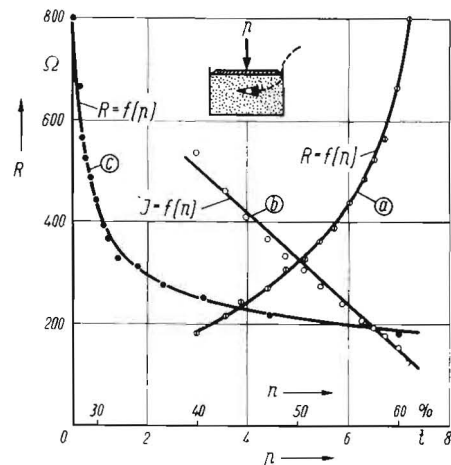


Abb. 7: Kurve a: Bei Verdichtung eines Bodens fällt der Widerstand nach Art einer Hyperbel  
Kurve b: Die Umrechnung von Widerstand auf Strom ( $J \sim 1/R$ ) ergibt wie in Abbildung 6 mit guter Annäherung eine Gerade  
Kurve c: Mit steigender Belastung  $p$  fällt der elektrische Widerstand eines Ackerbodens wie bei Kohledruckmessern

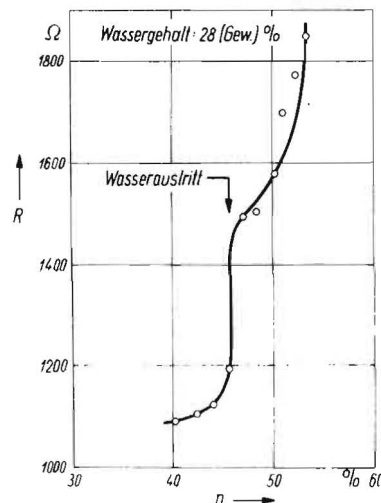


Abb. 8: Bei Verdichtung eines Bodens an der Grenze der Wasserkapazität fällt der Widerstand bei Austritt des Bodensaftes steil ab

Kurve c in Abbildung 7 zeigt noch die Beziehung zwischen dem Druck  $p$  und dem elektrischen Widerstand. Die Bodenprobe befand sich in einem etwa 30 cm weiten und 25 cm hohen Zylinder und wurde unter einer Zerreißmaschine bis zu  $7 t = 11,4 \text{ kg/cm}^2$  belastet. Es ist von Interesse, daß Kurve c den gleichen Verlauf zeigt wie die entsprechende Beziehung bei sogenannten Kohledruckmessern [7]. Tatsächlich besteht zwischen beiden Vorgängen eine starke Verwandtschaft, nur liegt die Grenze für bleibende Verformungen im Boden bei sehr viel niedrigeren Belastungen als bei Kohle.

berschreitet man bei der Zusammenpressung die Grenze der Wasserkapazität des betreffenden Bodens, so fällt sein Widerstand sprunghaft etwa auf den Wert der Bodenlösung. In Abbildung 8 ist dieser Vorgang dargestellt, wie er sich bei der Belastung einer Bodenprobe mit 28 % Wassergehalt (Gewichtsprozent bezogen auf Trockensubstanz) ergab. Während die Kurve zunächst normal verläuft, fällt sie bei Beginn des sichtbaren Wasseraustritts plötzlich auf einen niedrigen Wert.

Beim berfahren eines Ackers durch Schlepper und Arbeitsmaschinen können die Ionenkonzentration und die Temperatur des Bodens praktisch als konstant angenommen werden. Unter dieser Voraussetzung ist die Änderung des elektrischen Widerstandes beziehungsweise der Leitfähigkeit ein Maß für die Änderung des Porenvolumens. Absolutwerte des Porenvolumens, wie man sie mit Stechzylindern erhält, sind bei dieser elektrischen Meßmethode nicht zu erwarten. Von besonderem Vorteil für eine solche Meßmethode ist aber der lineare Zusammenhang zwischen Porenvolumen und Strom. Es lag deshalb nahe, eine Methode zur Messung des Porenvolumens möglichst als Strommessung zu entwickeln.

### Entwicklung einer Bodensonde

Zunächst wurde ein kleiner Spaten aus Pertinax mit zwei Messingstreifen als Elektroden versehen. Es zeigte sich, daß die Einführung dieses Spatens in den Boden unpraktisch war. Ein an einem  $\frac{1}{2}$ "-Rohr befestigter Rotationskörper aus Pertinax mit zwei Ringen als Elektroden vermied zwar diese Schwierigkeiten, verwischte durch seine Größe aber wesentliche Vorteile der Methode.

Um zu erkennen, ob es für die Empfindlichkeit der Sonde wichtiger war, die Oberfläche der Elektroden oder ihren Abstand zu vergrößern, wurden hierzu systematische Verdichtungsversuche unter der Zerreißmaschine gemacht. Es ergab sich, daß die Vergrößerung des Abstandes der Elektroden bei gleicher Änderung des Porenvolumens eine größere Widerstandsänderung erzeugt als die Vergrößerung der Elektrodenfläche. Hierdurch wurde die Entwicklungsrichtung für die Sonde bestimmt. Zugleich bedeutet dies aber auch, daß die Sonde empfindlicher auf die Dichteänderung des Bodens reagiert als auf die Änderung des Übergangswiderstandes vom Boden zu den Elektroden.

Nach verschiedenen Zwischenentwicklungen ergaben sich die beiden Sondenformen in Abbildung 9. Das Modell a läßt sich vor ein 10-mm-Stahlrohr schrauben und mit diesem in den Boden drücken. Für das Modell b wird zunächst mit einem Rohr ein Loch vorgebohrt, dessen Wände praktisch unverfestigt bleiben. Dann wird die Sonde mit ihrem zylindrischen Ansatz vor das Rohr gesteckt, mit dem vorher das Loch gebohrt wurde und in das Bohrloch eingeführt. Zuletzt wird das Rohr entfernt, so daß nur die Sonde mit ihren beiden Zufhrungsdrhten im Boden liegt.

Die Empfindlichkeit der Sonden ist abhängig von ihrer Lage zur Druckrichtung. Jedoch ergaben Vergleichsmessungen mit

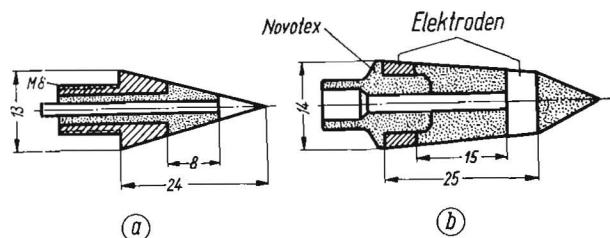


Abb. 9: Ausführungsformen von Bodensonden

fünf Sonden unter verschiedenem Winkel zur Druckrichtung, daß der Richtungseinflu gering ist.

### Entwicklung des Meßverfahrens

Im Prinzip gibt es zwei Möglichkeiten zur Widerstandsmessung an Sonden.

#### 1. Die Strom-Spannungsmessung

Hierbei wird eine Gleich- oder Wechselspannung für die Dauer der mechanischen Belastung des Bodens an die Sonde gelegt und der Verlauf des Stromes gemessen. Diese Methode hat zwar den Vorteil großer experimenteller Einfachheit, sie wird aber recht unempfindlich bei großen Absolutwerten des Widerstandes. Man wird die Strom-Spannungsmessung deshalb nicht bei sehr nährstoffarmen Böden anwenden, deren Widerstand durchweg sehr hoch liegt [8, 9].

#### 2. Die Widerstandsmessung mit der Wheatstoneschen Brücke

Zur Messung von Widerstandsänderungen ist diese Methode wesentlich besser geeignet als die Strom-Spannungsmessung. Im Prinzip besteht sie bekanntlich darin, daß eine Spannung durch ein bekanntes und ein unbekanntes Widerstandsverhältnis so geteilt wird, daß ein Meßinstrument keinen Potentialunterschied mehr anzeigt. Als Stromquelle kommt Gleichstrom oder Wechselstrom geeigneter Frequenz in Frage, als Indikator ein Nullinstrument für die betreffende Stromart, oder eine Meschleife, beziehungsweise ein „Magisches Aug“, ein Kopfhörer oder ein Kraftverlaufmesser [12], an dessen Ausgang zweckmäßig ein Schleifenzillograph angeschlossen wird.

Welche dieser Kombinationsmöglichkeiten gewählt wird, hängt vom Versuchszweck ab. Für die Messung bleibender Widerstandsänderungen nach berfahren des Bodens mit einem Schlepper hat sich eine Kombination folgender Art bewährt: Tongenerator (1000 Hz) — Brücke mit Phasenausgleich — Verstärker — Kopfhörer. Die Stromquellen sind durch geeignete Rhrenwahl so bemessen, daß die ganze Apparatur bequem als Koffergert getragen werden kann.

Der größte Vorteil der elektrischen Methode liegt aber nicht in der Schnelligkeit, mit der eine einzelne Messung gemacht werden kann, sondern in der Möglichkeit, während der Belastung des Bodens den Verfestigungsvorgang zu registrieren. Für diesen Zweck hat sich folgende Kombination bewährt: Tongenerator (6 Volt, 6000 Hz) — Brücke — Kraftverlaufmesser — Verstärker — Schleifenzillograph. Der Kraftverlaufmesser (KM) besteht aus einem Gleichrichter für die Spannung im Nullzweig der Brücke, der so vorbelastet ist, daß er die Stromänderung in der Sonde nach Richtung und Größe fast linear wiedergibt.

Legt man die Nullspannung der Brücke ohne Kraftverlaufmesser über einen Verstärker an die Meschleife des Oszillographen, so wird die Widerstandsänderung an der Sonde als Amplitudenänderung der Meßfrequenz registriert. Hierbei erspart man den Aufwand eines Kraftverlaufmessers. Bei mehreren gleichzeitig registrierten Sonden würde aber die Überlagerung der Bilder stören.

Unter günstigen Bodenverhältnissen, d. h. bei kleinem spezifischen Widerstand ergibt allerdings die einfache Strom-Spannungsmessung ( $U/I$ ) ohne jeglichen apparativen Aufwand Registrierungen des Gleichstromes, deren Verlauf vom Ergebnis der KM-Registrierung kaum zu unterscheiden ist. Voraussetzung ist jedoch, daß zur Vermeidung größerer Polarisationsspannungen der Gleichstrom erst kurz vor der Messung eingeschaltet wird, was durch einen vom Schlepper überfahrenen Kontakt leicht zu erreichen ist. Die Störung des Meßergebnisses durch Polarisation kann dann unmerklich klein gehalten werden. Da als Ziel der Entwicklung die gleichzeitige Registrierung von 6 bis 8 Sondenmessungen angestrebt wird, würde der Aufwand bei Verwendung von Kraftverlaufmessern recht groß werden. In diesem Falle können die Vorteile der einfachen Gleichstrommethode überwiegen. Es wird deshalb versucht, bei Böden mit sehr hohem spezifischen Widerstand eine Gleichstromregistrierung mittels Gleichstromverstärker zu erreichen. Für sechs Sonden werden sechs Verstärkerröhren aus gemeinsamen Heiz- und Anoden-

batterien gespeist. Die sechs getrennten Sondenbatterien werden nur mit je 3 mA belastet und sind aus Taschenlampenbatterien zusammengestellt. Sie werden über ein Relais mit Druckknopfschalter oder Schlepperkontakt für die Dauer der Messung (etwa 10 sec) gleichzeitig eingeschaltet.

### Versuchsergebnisse

1. Bei Vorversuchen in einer Bodenrinne des Instituts wurden die Amplitudenänderungen des 1000 Hz Brückenstromes während der Belastung des Bodens registriert. In der Bodenrinne war ein lehmiger Sand. Gemessen wurde bei etwa 18 % Wassergehalt. Aus der großen Reihe von Registrierungen, die die Grundlagen des Verfahrens klären sollten, sind zwei in Abbildung 10 a und b wiedergegeben. Abbildung 10 a zeigt die Widerstandsänderung an einer Sonde bei Belastung und Entlastung. Man sieht, daß der Brückenstrom nach der Entlastung zunächst sprunghaft, dann langsamer kleiner wird. Dies bedeutet aber, daß der Widerstand an der Sonde größer geworden ist. Dies ist nur möglich durch Auflockerung des Bodens. Da äußere Kräfte hierfür fehlen, so ist die Stromänderung bei der Entlastung unmittelbar ein Maß für die Elastizität des Bodens. In Abbildung 10 b sieht man die Widerstandsänderung an einer Sonde beim langsamen Überrollen mit einem gezogenen Rad. Es fällt auf, daß der Widerstand nach dem Überrollen größer ist als vorher, was zunächst völlig unerklärlich war. Bei genauerem Zusehen ergab sich jedoch, daß bei der geringen Ausdehnung der benutzten Sonde die Widerstandserhöhung zweifellos ihre Ursache in der bekannten Bildung von Rissen z. B. hinter einer Walze hat. Daraufhin wurde die Länge der Sonde verdoppelt. Der Wunsch nach möglichst kleiner Meßstrecke hat also seine natürliche Grenze in der Bodenstruktur, genau so wie dies auch für die Messung mit Stechzylindern gilt.

2. Die Abbildungen 11 a und b zeigen zwei typische Registrierungen mit Kraftverlaufmessern und kurzer Sonde (8 mm) auf dem Acker (Sandboden) unter einem Schlepperhinterrad bei mehrfachem Überfahren. In Abbildung 11 a zeigt sich nach dem ersten Überfahren ebenfalls die Rißbildung in einer Widerstandserhöhung an der zu kurzen Sonde. Bei weiterem Überfahren verdichtet sich dann jedoch der Boden in dem erwarteten Ausmaß. Der Schlepper fuhr hierbei vor und zurück, so daß nur das Hinterrad über die Sonde rollte. Es sei besonders auf die überraschende Ähnlichkeit des Widerstandsverlaufes in gleicher Fahrtrichtung hingewiesen. In Abbildung 11 b wird die bleibende Bodenverdichtung nach jedem Überrollen größer. Auch hier fällt auf, mit welcher Genauigkeit die Kurven gleicher Fahrtrichtung übereinstimmen.

Die Abbildungen 12a und b zeigen zum Vergleich die gleichzeitige Widerstandsänderung an zwei 15 mm langen Sonden, von denen eine (Abb. 12 a) nach der U/I-Methode die Änderung des Gleichstromes zeigt, während die andere (Abb. 12 b) hinter einem Kraftverlaufmesser erhalten wurde. Beide Messungen zeigen in diesem Boden den gleichen Verlauf; es handelt sich um Tonboden mit 23 Gew. % Wassergehalt und einem  $pH$ -Wert von 7. Ein gleicher Versuch in Sandboden mit 22 % Wassergehalt und einem  $pH$ -Wert gleich 4 schlug fehl, weil der spezifische Widerstand des aufgefahrenen Sandbodens ungewöhnlich groß war.

Die große Mannigfaltigkeit der verschiedenen Böden ist ohne Einfluß auf die Anwendbarkeit der Methode. Sie will nicht die Dichte verschiedener Böden untereinander vergleichen, sondern die Dichteänderung an einer Meßstelle unter dem Einfluß einer Last. Die Anschaulichkeit der Registrierungen erscheint als besonderer Vorteil neben der Möglichkeit, in kurzer Zeit eine große Anzahl von Messungen ausführen zu können. Für den Fall, daß Absolutwerte des Porenvolumens gesucht werden, ist es notwendig, eine Eichkurve für den untersuchten Boden aufzustellen, die den Zusammenhang zwischen Porenvolumen und Widerstand unter Belastung wiedergibt.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die wichtigsten Gesetze über die Leitung elektrischer Ströme durch den Boden werden durch Messungen belegt. Hierbei

ergibt sich aus der Beziehung zwischen Bodendichte (Porenvolumen) und elektrischer Leitfähigkeit ein Verfahren zur Registrierung von Bodenverdichtungen unter landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Die Methode besteht darin, daß eine Sonde in den Boden eingeführt wird und nach Messung des Widerstandes zwischen den Elektroden der Sonde der Boden durch das Fahrzeug verdichtet wird. Aus der Widerstandsänderung während der Verdichtung wird auf die Änderung

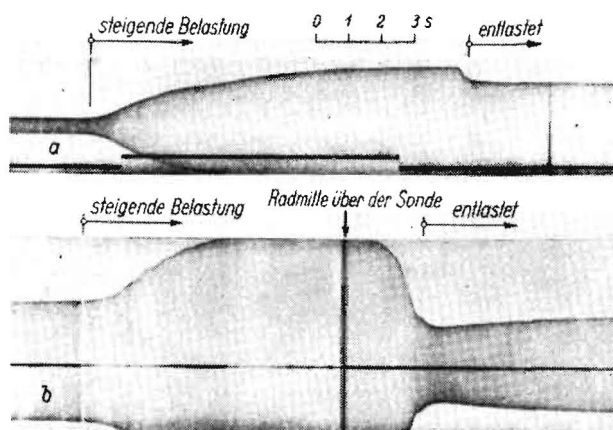


Abb. 10: a: Sonde unter ruhender Last. Der Strom im Nullzweig der Meßbrücke wächst bei Belastung. Nach plötzlicher Entlastung dehnt sich der Boden elastisch, der Strom verringert sich dabei zunächst sprunghaft, dann langsam bis zu einem Endwert.  
b: Sonde unter rollender Last. Nach der Überrollung ist in diesem Beispiel der Brückenstrom kleiner als vor der Belastung. Ursache: Rißbildung im Boden.

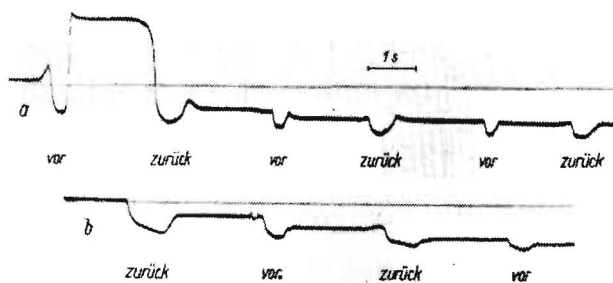


Abb. 11: a und b: Messungen mit Kraftverlaufmessern unter Schlepper-rädern. Bei mehrfachem Überrollen nähert sich die bleibende Verdichtung einem Endwert. Im Augenblick des Raddruckes entsteht eine starke Verdichtung, die jedoch zum größten Teil durch elastische Rückwirkung des Bodens wieder verschwindet. Bemerkenswert ist die große Ähnlichkeit der Kurven gleicher Fahrtrichtung.

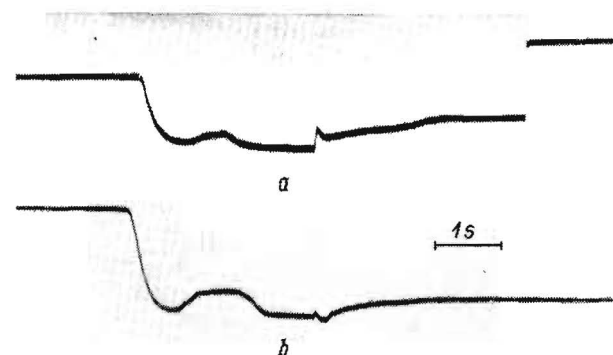


Abb. 12: Vergleich der Meßmethoden bei langsamer Überrollung durch Schlepper in schwerem Tonboden.  
a Gleichstrommessung  
b Messung mittels Tonfrequenz-Brücke und Kraftverlaufmesser

## August Claas geehrt

des Porenvolumens geschlossen. Der besondere Vorteil der Methode liegt in der unmittelbaren Anschaulichkeit der Registrierung und dem geringen Aufwand an Zeit und Arbeit für jede Messung. Durch die gleichzeitige Registrierung mit mehreren Sonden, die quer zur Spur oder in anderer Weise angeordnet sind, ergibt sich in kurzer Zeit ein Einblick in den Ablauf der Verdichtungen unter Rädern, Raupen, Walzen oder dergleichen.

Die Verschiedenartigkeit der Böden und Bodenzustände hat auf die Methode keinen Einfluß, weil immer nur die Änderung an einer Meßstelle registriert wird. Sollen Aussagen gemacht werden über den Absolutwert der Porenvolumenänderung, so ist für die betreffende Bodenart der Zusammenhang zwischen Dichte und Widerstand in einer Eichkurve festzulegen.

### Schrifttum:

- [1] Handbuch der Physik, Berlin 1928, Bd. XIII Elektrizitätsbewegung in festen und flüssigen Körpern, Kap. 13/14
- [2] Pohl, R. W.: Elektrizitätslehre. Berlin 1931, S. 179—202
- [3] Fritsch, V.: Meßverfahren der Funkmutung. Berlin und München 1943
- [4] Heine, W.: Elektrische Bodenforschung. Berlin 1928, Sammlung geophys. Schr. Nr. 8
- [5] Voltz, E.: Messung der Wassergehaltsschwankungen des Bodens auf elektrischem Wege. Fortschr. d. landw. chem. Forsch. 1937. Berlin 1938, S. 34—38
- [6] Hirt, E.: Die Leitfähigkeit des Bodens in Abhängigkeit von seiner Feuchtigkeitsverteilung. ETZ 59/1 (1938) S. 43
- [7] Hoffmann, F.: Kohledruckwiderstände. ETZ 58/II (1937) S. 1138—1142
- [8] v. Nostitz, A.: Untersuchungen über die Leitfähigkeit des Bodens für elektrischen Strom. Bodenkunde und Pflanzenernährung 12 (57) (1939) S. 1
- [9] v. Harvath, B.: Über die Einteilung der Böden nach ihrer elektrischen Leitfähigkeit. Int. Mitt. f. Bodenkunde 1916
- [10] Bayoucas, G. J.: Measurement of soil moisture by the electrical resistance method. Agricultural Engineering December 1949 (mit umfangreichen Literaturangaben)
- [11] Kohlrausch, F.: Praktische Physik. Berlin u. Leipzig 1935  
Schwerdfeger, W.: Elektrische Meßtechnik Teil II. Leipzig 1939  
Wigge, H.: Hochfrequenzmeßtechnik. Stuttgart 1937
- [12] Corsten und Walter: Über ein Gerät zur Aufzeichnung von Kapazitätsänderungen und dessen Anwendung bei der Fertigungsüberwachung in der Gummiindustrie. Siemens-Z. 11 (1931) S. 155—162 u. S. 267—272

## Résumé:

*Dr.-Ing. H. Jäger: „Elektrische Messung von Bodenverdichtungen unter landwirtschaftlichen Fahrzeugen.“*

Die wichtigsten Gesetze über die Leitung elektrischer Ströme durch den Boden werden durch Messungen belegt. Hierbei ergibt sich aus der Beziehung zwischen Bodendichte (Porenvolumen) und elektrischer Leitfähigkeit ein Verfahren zur Registrierung von Bodenverdichtungen unter landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Die Methode besteht darin, daß eine Sonde in den Boden eingeführt wird und nach Messung des Widerstandes zwischen den Elektroden der Sonde der Boden durch das Fahrzeug verdichtet wird. Aus der Widerstandsänderung während der Verdichtung wird auf die Änderung des Porenvolumens geschlossen. Der besondere Vorteil der Methode liegt in der unmittelbaren Anschaulichkeit der Registrierung und dem geringen Aufwand an Zeit und Arbeit für jede Messung. Durch die gleichzeitige Registrierung mit mehreren Sonden, die quer zur Spur oder in anderer Weise angeordnet sind, ergibt sich in kurzer Zeit ein Einblick in den Ablauf der Verdichtungen unter Rädern, Raupen, Walzen oder dergleichen. — Die Verschiedenartigkeit der Böden und Bodenzustände hat auf die Methode keinen Einfluß, weil immer nur die Änderung an einer Meßstelle registriert wird. Sollen Aussagen gemacht werden über den Absolutwert der Porenvolumenänderung, so ist für die betreffende Bodenart der Zusammenhang zwischen Dichte und Widerstand in einer Eichkurve festzulegen.

*Dr. Ing. H. Jäger: "The Measurement by Electrical Means of Soil Compression caused by the Passage of Agricultural Vehicles."*

The most important laws concerning the passage of electric currents through soil are confirmed by actual measurements. It was found possible by using these results to develop a method of registering the compression of soil caused by the passage of agricultural vehicles from the relation between soil density (volume of the pores) and the electrical conductivity of the soil. The method consists in inserting a search electrode into the soil, measuring the resistance between the electrodes and then compressing the soil by passage of a vehicle. The change in pore volume thereby caused can be determined by the changes in resistance during compression of the soil. The special advantage of this method lies in the fact that a clear and effective reading is obtained with a very small expenditure of time and labour. Simultaneous measurements made on a number of sounding tubes placed in the track of the vehicle or elsewhere enable a clear picture of the magnitude of the compression of soil resulting from the passage of wheels, caterpillar tracks, rollers, etc., to be obtained. The varying differences in soils and conditions of soils exercise no influence on the results obtained, since it is only the alteration in density at one specific point that is measured. If it is desired to obtain information on the absolute value of the change in pore volume for any given type of soil, the relationship between the soil density and the resistance can be determined from a calibration curve.

*Dr.-Ing. H. Jäger: «Mesure électrique des tassements du sol sous les véhicules agricoles.»*

Les lois essentielles sur le passage de courants électriques à travers le sol, sont démontrées par des mesures. Les rapports entre la densité de la terre (volume de pores) et la conductibilité électrique ont permis de mettre au point une méthode d'enregistrement des tassements que le sol subit par le passage des véhicules agricoles. La méthode consiste à introduire dans le sol une sonde; après avoir mesuré la résistance entre les électrodes de la sonde, le sol est comprimé par le passage d'un véhicule. La variation de la résistance pendant le passage du véhicule permet de déterminer la variation du volume de pores. L'avantage essentiel de la méthode réside dans le fait qu'elle permet une lecture immédiate des résultats et qu'elle n'exige que peu de temps et de travail. En enregistrant simultanément les valeurs indiquées par plusieurs sondes introduites dans le sol perpendiculairement à la trace ou d'une toute autre façon, on acquiert rapidement des connaissances précises sur l'évolution des tassements sous des roues, chenilles ou rouleaux. La diversité des terres et des états de sol n'influe pas sur la mesure, étant donné que l'on enregistre les variations toujours au même endroit. Quand on veut obtenir des indications sur la valeur absolue de la variation du volume de pores, il faut établir une courbe de repère pour le type de terre en question reproduisant les rapports entre la densité et la tenacité.

*Ing. Dr. H. Jäger:*

*«Medición eléctrica de la compresión del suelo debajo de vehículos agrícolas.»*

Las leyes más importantes sobre la conducción de corrientes eléctricas por el suelo se prueban por medición, resultando de la relación entre el espesor de la tierra (volumen de los poros) y de la conductibilidad eléctrica un procedimiento para el registro de la compresión del suelo debajo de vehículos agrícolas. El método consiste en que se introduce una sonda en la tierra y, medida la resistencia entre los electrodos de la sonda, se comprime la tierra con el vehículo, sacándose del cambio de la resistencia durante la compresión conclusiones sobre el cambio del volumen de los poros. La ventaja especial del método consiste en la evidencia manifiesta del registro y en el poco tiempo y trabajo que requiere cada medición. Registrándose al mismo tiempo con varias sondas, dispuestas en sentido transversal u otro, en poco tiempo se forma una idea del proceso de compresión debajo de ruedas, orugas, cilindros etc. La diferencia en la calidad del terreno y su estado no ejercen influencia alguna en el método, porque el cambio sólo se registra en un punto de medición. Desandose obtener indicaciones sobre el valor absoluto del cambio de volumen de los poros, es preciso establecer para la clase de tierra que se trate, la relación entre espesor y resistencia en una curva contrastada.