

Ermittlung der Aggregatgrößenverteilung des Bodens mit Hilfe der quantitativen Lichtmikroskopie

Dipl.-Ing. A. Baur, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der AdL der DDR
Dr. rer. nat. K. Schmidt, KDT, VEB Carl Zeiss Jena

1. Problemstellung

In der Bodenbearbeitung stellt die Aggregatgrößenverteilung ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der erzielten Bearbeitungsqualität dar. Das Erreichen der laut ATF geforderten Werte bildet die Grundlage für die optimale Gestaltung wichtiger physikalischer, chemischer und biologischer Bodeneigenschaften und für das Herstellen der technologischen Eignung der Böden für die weiteren Feldarbeiten. Gegenwärtig wird die Größenverteilung von Bodenaggregaten mit Hilfe der Siebanalyse [1], durch Auszählen nach bestimmten Größenklassen oder mit Hilfe der Bonitur ermittelt [2]. Da es bei der Entwicklung von Bodenbearbeitungswerkzeugen von großer Bedeutung ist, eine hinreichende Anzahl von Einzelversuchen jeweils unter gleichen Witterungsbedingungen durchzuführen, sind solche Verfahren zur Beurteilung des Zerteilungsergebnisses vorteilhaft, die den Zeitaufwand während der Versuchsdurchführung wesentlich verringern. Gleichzeitig ist eine Verringerung des Fehlers bei der Ermittlung der Aggregatgrößenverteilung anzustreben. Durch den Einsatz von automatischen quantitativen Mikroskopen zur Analyse der Teilchengrößen, lockerer Teilchenhäufungen (Pulver, Granulate, Suspensionen usw.) und auch kompakter Stoffe [3] hat die wissenschaftliche Mikroskopie neue Bedeutung als Analyseverfahren erlangt. Die ursprünglich für geologische und metallurgische Aufgabenstellungen entwickelte Stereometrie [4] findet in zunehmendem Maß Anwendung in anderen Wissenschaftszweigen [5, 6]. Im folgenden sollen die Möglichkeiten und Grenzen der lichtoptischen Korngrößenmeßtechnik bei der Bestimmung der Aggregatgrößenverteilung diskutiert werden.

2. Meßprinzip

In vielen Wissenschaftszweigen ist die Erfassung des räumlichen Aufbaus der zu analysierenden Objekte nicht direkt möglich. Die Analyse ist auf ebene Darstellungen (Anschnitte, Dünnschnitte, Fotonegative u. a.) angewiesen. Die Aufgabe der stereometrischen Analyse besteht in der Gewinnung räumlicher Kennwerte durch Messen entlang ebener Flächen von dispersen Gebilden, mit deren Hilfe eine quantitative Beurteilung der tatsächlich in der räumlichen Struktur existierenden geometrischen Parameter (z. B. Größenverteilung) möglich ist.

Ohne Zerstörung von Aggregaten und der damit eintretenden Verfälschung des Zerteilungsergebnisses kann bei der Beurteilung des Arbeitseffekts von Bodenbearbeitungsgeräten die Analyse nur an der Oberfläche erfolgen. Deshalb wird zur Ermittlung der Aggregatgrößenverteilung mit Hilfe der quantitativen Lichtmikroskopie der zu analysierende Teil der Bodenoberfläche fotografiert. Die Auswertung erfolgt dann am Negativ. Zur Beurteilung der erzielten Bodenzerteilung von nur flach arbeitenden Saatbettbereitungswerkzeugen ist die Analyse an der Bodenoberfläche repräsentativ.

Um auch bei tiefer wirkenden Werkzeugen von

den an der Oberfläche ermittelten Ergebnissen mit Hilfe stereometrischer Methoden auf die Größenverteilung im gesamten von den Werkzeugen gleichmäßig (z. B. Fräse) bearbeiteten Bodenvolumen schlußfolgern zu können, müssen folgende Forderungen erfüllt sein [4]:

- Die Verteilung der Bodenaggregate muß im Bearbeitungsvolumen statistisch gleichmäßig sein.
- Alle Bodenaggregate haben annähernd die gleiche geometrische Form und unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer Größe.
- Die Orientierung der Bodenaggregate im Volumen ist zufällig.

Es ist bekannt, daß der Siebrückstand eines mechanisch zerkleinerten Bodens einer Exponentialfunktion genügt, die als Gesetzmäßigkeit der Hartzerkleinerung bekannt ist [1]. Darüber hinaus werden Bodenaggregate häufig mit guter Näherung als Kugeln abstrahiert [1, 7]. Eine ausgeprägte Orientierung der Bodenaggregate (z. B. Zeiligkeit) liegt ebenfalls nicht vor, so daß die genannten Forderungen zur Anwendung stereometrischer Verfahren bei gleichmäßiger Bearbeitung des betrachteten Bodenvolumens hinreichend erfüllt sind.

Wegen der Einfachheit und Genauigkeit der Messung von Längenabschnitten im Vergleich zur Flächenmessung und wegen der Möglichkeit, diesen Meßprozeß zu automatisieren [4], wird häufig die Linearanalyse als Meßprinzip angewendet. Das Wesen der Linearanalyse besteht darin, daß das im Mikroskop oder auf einer Mikroaufnahme sichtbare Gebilde, das aus einer Vielzahl von Phasen oder Bestandteilen (z. B. Bodenaggregate, feinkrümeliger Untergrund, Pflanzenrückstände und Steine) besteht, von einer hinreichend langen, nicht

unbedingt geradlinigen Meßlinie, die wiederum aus mehreren Teilstücken bestehen kann (Meßfeld), geschnitten wird. Die Schnittflächenkonturen bzw. die Konturen der projizierten Flächen der Mikroteilchen einzelner Phasen des zu analysierenden Gebildes teilen diese Meßlinien in einzelne Abschnitte (Sehnen), die dann für jede Phase getrennt summiert werden (Bild 1). Dividiert man die Summen der Sehnenlängen, die auf jede Phase des zu analysierenden Gebildes entfallen, durch die Gesamtlängene, dann sind die erhaltenen Brüche jeweils gleich dem Volumen- bzw. Flächenanteil des dispersen Gebildes, den jede von diesen Phasen einnimmt [4]. Darüber hinaus können aus den erhaltenen Meßdaten z. B. die mittlere lineare Teilchengröße, die Größenverteilung, die spezifische Grenzfläche oder der spezifische Umfang, die spezifische Oberfläche, die Nachbarschaftsverhältnisse u. a. m. bestimmt werden [8].

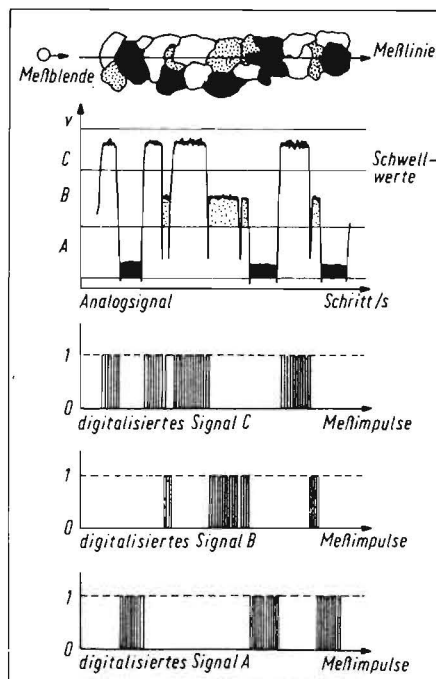
Die Anwendung geeigneter statistischer Methoden bei der Analyse erlaubt eine objektive Abschätzung dieser Parameter mit einer für praktische Zwecke erforderlichen Genauigkeit [4]. Nach dem Prinzip der Linearanalyse arbeitet der im VEB Carl Zeiss Jena entwickelte automatische Gefügeanalysator EPIQUANT — ein für metallographische Zwecke geschaffenes Gerät (Bild 2). In Verbindung mit einer Durchlichteinrichtung kann das Gerät für Untersuchungen von Fotonegativen oder anderen durchscheinenden Präparaten (z. B. Dünnschliffen) verwendet werden.

3. Arbeitsweise des automatischen Gefügeanalysators EPIQUANT

Die Linearanalyse wird im EPIQUANT nach dem Prinzip der optisch-mechanischen Objektabtastung vollautomatisch durchgeführt [4, 9]. Der von einem Taktgenerator gesteuerte Scanningtisch bewegt das zu analysierende Präparat entsprechend dem gewählten Meßprogramm mäanderförmig am Mikroskopobjekt vorbei.

Mit dem EPIQUANT ist eine Klassierung der Sehnenlängen der interessierenden Objekt-details in 13 Größenklassen bei einer geometrischen Klassenteilung mit dem Modul $\sqrt{2}$ möglich [9]. Diese logarithmische Klassenteilung garantiert auch für sehr unterschiedliche Größenbereiche eine annähernd symmetrische Häufigkeitsverteilung trotz kleiner Klassenanzahl. Vollautomatische Messungen haben den Vorteil, daß leicht große Probenmengen zuverlässig ausgewertet werden können und damit eine hohe statistische Reproduzierbarkeit gesichert ist. Die Ergebnisse sind jedoch mit Fehlern behaftet, die aus der Präparation oder schwierigen Unterscheidbarkeit der Details resultieren. Beim EPIQUANT ermöglicht die Anordnung der Meßblende in der Zwischenbildebene des Mikroskops, daß neben der Qualität des Analysematerials (z. B. Negativ) als Quelle von Meßfehlern auch die Messung selbst visuell kontrolliert werden kann. Das ist besonders bei Analysematerial von Bedeutung, bei dem die Kontrastierung zwischen Bodenaggregaten, Untergrund, Pflanzenrückständen usw. keine

Bild 1. Meßprinzip des Gefügeanalysators EPIQUANT



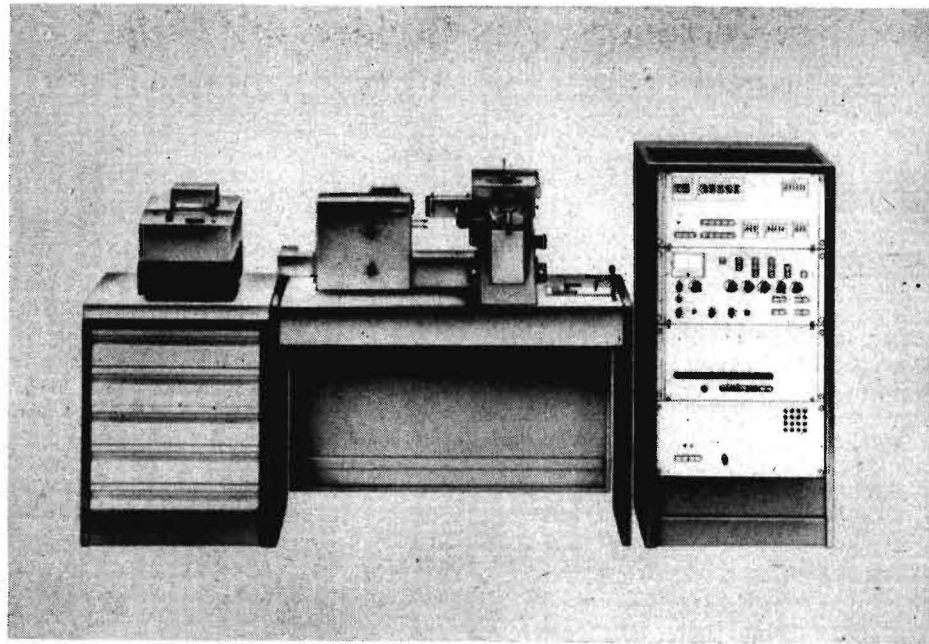


Bild 2. Der automatische Gefügeanalysator EPIQUANT

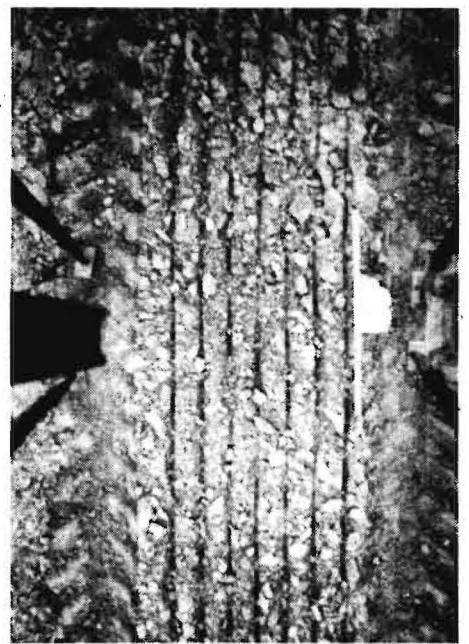


Bild 3. Helligkeitsunterschiede auf der Bodenoberfläche infolge eines rillenförmigen Bearbeitungsbildes

größeren Reflexions- bzw. Transmissionsunterschiede als 5% ergibt [9], oder derart große Helligkeitsunterschiede auftreten, daß eine konstante Schwellereinstellung nicht möglich ist und somit keine vollautomatische Analyse durchgeführt werden kann. Ein in der Grundplatte des Mikroskops eingebautes Bedienpult erlaubt dann die Durchführung halbautomatischer Analysen. Dabei erfolgt die Abtastung des Präparats automatisch entsprechend dem gewählten Scanningtischprogramm, die Diskriminierung der ausgewählten Objektdetails und die Trennung der verschiedenen Formen erfolgt durch visuelle Beobachtung. Die Signaleingabe in die Logikeinheit, die dann die Weiterverarbeitung der Signale übernimmt, erfolgt manuell durch den Beobachter mit Hilfe einer Tastatur [4, 9].

4. Herstellung des Analysenmaterials

Voraussetzung für die Durchführbarkeit automatischer Analysen ist, daß die auf dem Negativ abgebildeten Objektdetails sich hinsichtlich des Transmissionsverhaltens unterscheiden. Das setzt voraus, daß auf der Bodenoberfläche zwischen der Phase A, den zu analysierenden Bodenaggregaten und der Matrix C, bestehend aus dem feinkrümeligen Untergrund, ein unterschiedliches Reflexionsvermögen vorliegen muß. Anhand von Testversuchen [10] konnte festgestellt werden, daß unter Beachtung der folgenden Hinweise auf den Negativen zwischen Bodenaggregaten und Untergrund Kontraste entstehen, die eine automatische Registrierung mit dem EPIQUANT ermöglichen:

- Für die Aufnahmen ist feinkörniges Filmmaterial (NP 15) zu verwenden, um eine Verfälschung durch Mitzählen der Filmkörnung zu vermeiden.
- Die Ausleuchtung des zu analysierenden Teils der Bodenoberfläche muß möglichst homogen sein, um immer die gleichen Grauwerte zu erhalten und damit eine hohe Grauwertauflösung zu ermöglichen. Bei Helligkeitsunterschieden infolge rillenartiger Bearbeitung (Bild 3) müssen die Meßlinien senkrecht zu den Rillen gelegt werden.
- Die Aufnahmen dürfen nur bei diffusem Licht gemacht werden, da sonst durch die

Schattenbildung eine unzulässige Verfälschung der Aggregatgrößen eintritt. Bei Sonnenschein muß die zu fotografierende Bodenoberfläche abgeschattet werden.

- Für die stereologische Analyse der Größenverteilung von Bodenaggregaten mit dem EPIQUANT stellt die Begrenzung der noch klassierbaren Teilchengröße auf $1024 \mu\text{m}$ [9] einen Nachteil dar. Entsprechend dem Abbildungsmaßstab auf dem Negativ ist bei der Verwendung eines Objektivs von nur 20 mm Brennweite (Flektogon 4/20) schon ein Abstand von 2 m zwischen Objektiv der Kamera und abzubildender Bodenoberfläche erforderlich, wenn Aggregate mit 100 mm Sehnenlänge (im Original) noch klassiert werden sollen.

5. Auswertung der Ergebnisse der Analyse

5.1. Zerkleinerungserfolg

Zur Beurteilung von Bodenbearbeitungsgeräten und -maschinen werden häufig die erzielte Bodenzerteilung und der Energieaufwand genutzt. Regge [1] definierte den „Zerkleinerungserfolg“ als Verhältnis der erzielten Bodenzerteilung zum dafür erforderlichen Energieaufwand. Dabei kennzeichnet er den Grad der Bodenzerteilung durch den Zuwachs an äußerer spezifischer Bodenoberfläche im bearbeiteten Bodenvolumen, so daß sich folgende Gleichung ergibt:

$$\kappa = \frac{O_E - O_A}{E_{sp}} \quad (1)$$

- κ Grad der Bodenzerkleinerung in m^2/kNm
- O_A äußere spezifische Oberfläche vor dem Bearbeitungsprozeß in m^2/dm^3
- O_E äußere spezifische Oberfläche nach dem Bearbeitungsprozeß in m^2/dm^3
- E_{sp} spezifischer Energieaufwand für den Bearbeitungsprozeß in kNm/dm^3 .

Der Zuwachs an spezifischer Oberfläche je Einheitsvolumen (Bearbeitungsvolumen) läßt sich mit Hilfe stereometrischer Verfahren sehr einfach und genau bestimmen. Die Gesamtober-

fläche der Bodenaggregate in dem von den Werkzeugen bearbeiteten Bodenvolumen, dessen Oberfläche auf dem Negativ abgebildet ist, kann mit dem Verfahren der zufälligen Schnittlinien nach Saltykov [4] und das Gesamtvolumen mit der Linearanalyse nach Rosival [4] ermittelt werden, so daß sich die auf das Bearbeitungsvolumen bezogene spezifische Oberfläche O in mm^2/mm^3 wie folgt ergibt:

$$O = \frac{4}{h} \quad (2)$$

Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, daß zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche lediglich die Ermittlung der mittleren Sehnenlänge h erforderlich ist. Diese kann aus den vom EPIQUANT registrierten Meßdaten wie folgt errechnet werden:

$$h = \frac{L_{Ph}}{N_{Ph}} \quad (3)$$

- L_{Ph} Gesamtlänge der auf eine Phase entfallenden Schnittlängen
- N_{Ph} Anzahl der geschnittenen Teilchen einer Phase.

Damit ist die Kennziffer „Zerkleinerungserfolg“ mit Hilfe des Verfahrens der lichtoptischen Korngrößenmeßtechnik in einfacher Weise zur Beurteilung von Bodenbearbeitungsgeräten und -maschinen anwendbar. Dabei ist jedoch zu beachten, daß das betrachtete Bodenvolumen gleichmäßig bzw. in exakt definierbarer Weise bearbeitet sein muß. Wird auf einer 20 cm tiefen Pflugfurche nur eine 5 cm tiefe Saatbettbereitung durchgeführt, kann mit Hilfe der anschließend gemachten Aufnahmen von der Bodenoberfläche natürlich nicht auf ein Bodenvolumen bis zur Pflügetiefe geschlossen werden.

Entsprechend den laut ATF festgelegten Richtwerten und Güteerkmalen für die Bodenbearbeitung müssen auch Aussagen zur Größenverteilung der Bodenaggregate getroffen werden, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

5.2. Ermittlung der Größenverteilung im gleichmäßig bearbeiteten Bodenvolumen
5.2.1. Ermittlung der Größenverteilung kugelförmiger Modellkörper

Während die Ermittlung der spezifischen Oberfläche bei beliebiger Teilchenform möglich ist, kann die Durchmesserverteilung der Bodenaggregate nur dann ermittelt werden, wenn die Verteilungsfunktion für die Länge der zufälligen Sehnen, die beim Schnitt eines dieser Aggregate durch eine große Anzahl von zufällig angeordneten Geraden entstehen, bekannt ist. Bisher ist die Ermittlung der Längenverteilung zufälliger Sehnen nur für die Kugel auf analytischem Wege möglich [4]. Deshalb liegt allen bisher abgeleiteten Gleichungen zur Berechnung der Durchmesserverteilung aus ebenen Verteilungen [4, 11, 12] die Kugelform zugrunde. Um die auf der Basis der Kugelform abgeleiteten Gleichungen zur Berechnung der räumlichen Größenverteilung auch auf unregelmäßig geformte Bodenaggregate anwenden zu können, sind bestimmte Äquivalenzbetrachtungen erforderlich, auf die im Punkt 5.2.2. eingegangen wird.

Wird die Linearanalyse zur Ermittlung der ebenen Verteilung mit dem EPIQUANT durchgeführt, so wird vorgeschlagen, zur Berechnung der räumlichen Aggregatgrößenverteilung die Sehnenlängenmethode von Saltykov [4] zu benutzen. Zwar ist man zunächst geneigt anzunehmen, daß durch das Verfahren der Linearanalyse die Größenverteilung der Bodenaggregate nicht richtig erfaßt wird, da die Meßlinien einen beträchtlichen Teil der im Blickfeld liegenden Aggregate ungeschnitten lassen. Sind jedoch die Voraussetzungen erfüllt, daß die Bodenaggregate statistisch verteilt und in ausreichender Menge vorliegen und die zu analysierende Fläche gleichmäßig mit Schnitlinien bedeckt ist, erweisen sich diese Bedenken vom Standpunkt der Wahrscheinlichkeitstheorie aus als ungerechtfertigt [1, 5]. Bei der Ermittlung der Aggregatgrößenverteilung sind vor allem zwei statistische Effekte zu berücksichtigen: »Erfassungseffekt« und »Verkleinerungseffekt« [5]. Ersterer entsteht dadurch, daß große Aggregate wesentlich öfter geschnitten werden, als es ihrer Häufigkeit entspricht. Der »Verkleinerungseffekt« hingegen berücksichtigt, daß die Schnitlinien in der Mehrzahl der Fälle kleiner als der größte Durchmesser der Bodenaggregate ausfallen. Unter Berücksichtigung der genannten Effekte wurde von Sal-

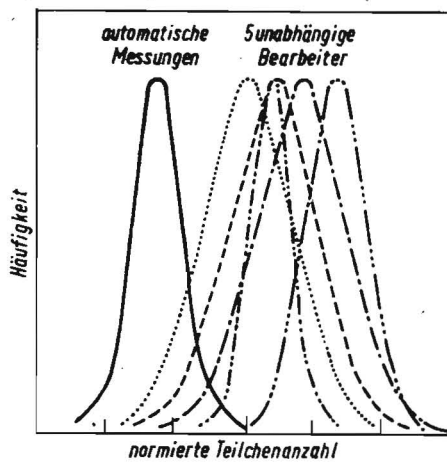


Bild 4. Idealierte Normalverteilung von automatischen und halbautomatischen Messungen [13]

tykov [4] eine einfache Formel zur Berechnung der Anzahl N_k der Bodenaggregate je Volumeneinheit für jede Größenklasse k abgeleitet, die sich unter Berücksichtigung der Klassenteilung des EPIQUANT wie folgt darstellt:

$$N_k = \frac{4}{D_k^2} (2Z_k - Z_{k-1}) \quad (4)$$

Die Anzahl der Sehnenlängen Z_k in der Größenklasse k erhält man als Ergebnis der Linearanalyse mit dem EPIQUANT. Der Durchmesser D_k berechnet sich entsprechend der Klassenteilung (Tafel 1). Dabei ist zu beachten, daß D_1 gleich der oberen Grenze der größten Größenklasse gesetzt wird. Bei der Auswertung von Mikroaufnahmen zur Bestimmung der Größenverteilung von Bodenaggregaten ist der Abbildungsmaßstab zu berücksichtigen.

5.2.2. Äquivalenzbetrachtungen zur Größenverteilung unregelmäßig geformter Bodenaggregate

Eingangs wurde darauf hingewiesen, daß die hier erläuterte Berechnung der Größenverteilung streng genommen nur für Mengen ideal kugelförmiger Körper in vollkommen zufälliger räumlicher Verteilung gilt. In der Natur ist die Voraussetzung der zufälligen Verteilung in vielen Fällen hinreichend erfüllt [4, 12]. Ideal

kugelförmige Teilchen existieren jedoch nur selten. Für die Entwicklung von Bodenbearbeitungsgeräten ist die Kenntnis der genauen Gestalt der einzelnen von einer Größenverteilung erfaßten Bodenaggregate gar nicht erforderlich. Viel wichtiger sind die aus der Verteilung abgeleiteten Größen, wie spezifische Oberfläche, mittlerer Durchmesser in den Größenklassen u. ä. Bockstiegel [12] führt den Begriff der »äquivalenten Kugelgrößenverteilung« ein als »diejenige räumliche Verteilung verschieden großer Kugeln, welche bei der Linearanalyse die gleiche Sehnenlängenverteilung ergibt, wie die Menge der untersuchten unregelmäßig geformten Gebilde, und welche mit der letztgenannten in der Gesamtzahl der Individuen übereinstimmt«. Das bedeutet, daß die »äquivalente Kugelgrößenverteilung« mit der untersuchten Menge von Bodenaggregaten oder sonstigen Teilchen oder Poren außer der Gesamtzahl auch noch folgende wichtige Eigenschaften gemeinsam hat [12]:

- gleicher Volumenanteil an dem Einheitsvolumen (z. B. am bearbeiteten Bodenvolumen), in dem sich die Teilchen oder Poren befinden
 - gleicher mittlerer Teilchen- bzw. Aggregatdurchmesser
 - gleiche spezifische Oberfläche.
- Mit Hilfe des Begriffs der »äquivalenten Kugelgrößenverteilung« kann die Gl. (4) zur Berechnung der Größenverteilung in sinnvoller Weise auch auf Mengen nichtkugelförmiger Individuen übertragen werden.

6. Diskussion der Fehlerquellen

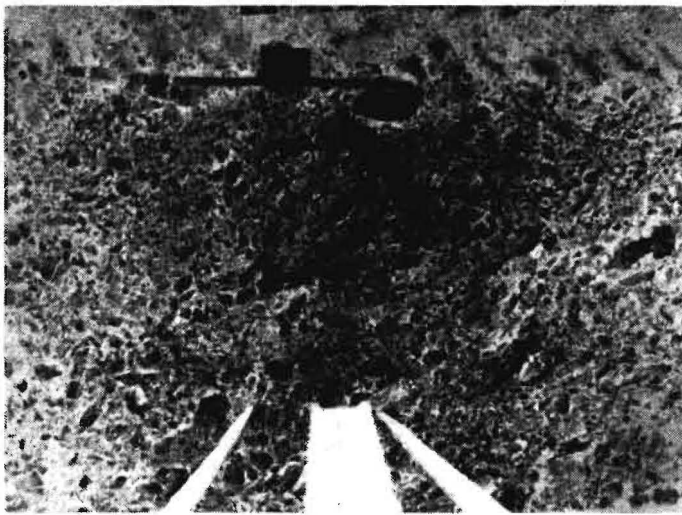
Die automatische Auswertung der Fotonegative beinhaltet eine Reihe von Fehlerquellen, die erst durch umfangreiche Untersuchungen auf unterschiedlichen Bodenarten und -zuständen quantifiziert werden können. Da die manuell ermittelten Ergebnisse (s. Abschn. 3) frei von Fehlern sind, die aus der Präparation oder schwierigen Unterscheidbarkeit der Details resultieren, wird zunächst nur die halbautomatische Auswertung empfohlen und in der Fehlerdiskussion berücksichtigt.

6.1. Stichprobenumfang

Die Linearanalyse ist eine statistische Methode. Daher unterliegen die Ergebnisse statistischen Schwankungen um einen Erwartungswert. Zur Sicherung einer vorgegebenen Genauigkeit des Ergebnisses muß eine entsprechend große Anzahl von Sehnen (Schnitlinien mit Bodenaggregaten) ausgemessen werden. Dabei ist es unzuweckmäßig, eine große Anzahl von Sehnen durch Verwendung einer kleinen Vergrößerung zu erreichen, weil die Genauigkeit der Messung mit kürzer werdender Sehnenlänge abnimmt. Sollte die notwendige Anzahl von Sehnen bei der Auswertung eines Meßfeldes nicht erreicht werden, müssen mehrere Meßfelder ausgewertet werden. Der Stichprobenumfang wird durch Bodenart und -zustand, vor allem aber durch die Art der Bearbeitung, beeinflußt. Erfolgt eine gleichmäßige Bearbeitung bei konstanten Bodenbedingungen, so muß bei 200 gezählten Aggregaten mit einem Fehler von 10% des Meßwertes gerechnet werden. Bei 1000 gezählten Aggregaten beträgt der abschätzbare Fehler nur etwa 3%. Diese Angaben beziehen sich auf die mittlere Aggregatgröße. Obwohl eine solche Angabe für die Verteilungskurve wenig aussagt, da die gering besetzten Klassen mit größerer Unsicherheit behaftet sind, als stärker besetzte Klassen, kann aus der gemessenen Gesamtteilchenanzahl die Genauigkeit der Verteilungsangaben abgeschätzt werden.

Tafel 1. Verteilung kugelförmiger Teilchen und zufälliger Sehnen nach Größenklassen, die nach dem Modul $\sqrt{2}$ gestaffelt sind

Größenklasse	kugelförmige Teilchen		zufällige Sehnen		
	Durchmesser mm	Anzahl der Teilchen je Volumeneinheit 1/mm ³	Grenzen der Sehnenlängen mm	relativer Anteil der Sehnen %	Anzahl je Längeneinheit der zufälligen Schnitlinie 1/mm
1	D_1	N_1	$l_1 = 1,000$	$D_1 \dots 0,7071 D_1$	Z_1
2	$D_2 = 0,7071 D_1$	N_2	$l_2 = 0,7071$	$D_1 \dots 0,5000 D_1$	Z_2
3	$D_3 = 0,5000 D_1$	N_3	$l_3 = 0,5000$	$D_1 \dots 0,3536 D_1$	Z_3
4	$D_4 = 0,3536 D_1$	N_4	$l_4 = 0,3536$	$D_1 \dots 0,2500 D_1$	Z_4
5	$D_5 = 0,2500 D_1$	N_5	$l_5 = 0,2500$	$D_1 \dots 0,1768 D_1$	Z_5
6	$D_6 = 0,1768 D_1$	N_6	$l_6 = 0,1768$	$D_1 \dots 0,1250 D_1$	Z_6
7	$D_7 = 0,1250 D_1$	N_7	$l_7 = 0,1250$	$D_1 \dots 0,0884 D_1$	Z_7
8	$D_8 = 0,0884 D_1$	N_8	$l_8 = 0,0884$	$D_1 \dots 0,0625 D_1$	Z_8
9	$D_9 = 0,0625 D_1$	N_9	$l_9 = 0,0625$	$D_1 \dots 0,0442 D_1$	Z_9
10	$D_{10} = 0,0442 D_1$	N_{10}	$l_{10} = 0,0442$	$D_1 \dots 0,0312 D_1$	Z_{10}
11	$D_{11} = 0,0312 D_1$	N_{11}	$l_{11} = 0,0312$	$D_1 \dots 0,0221 D_1$	Z_{11}
12	$D_{12} = 0,0221 D_1$	N_{12}	$l_{12} = 0,0221$	$D_1 \dots 0,0156 D_1$	Z_{12}



Ein Stichprobenumfang von rd. 1 000 Bodenaggregaten wird meist schon bei der Auswertung von nur einem Negativ erreicht.

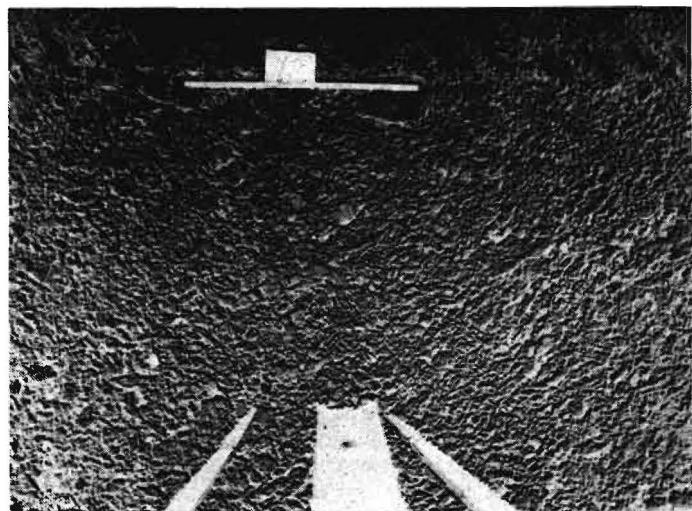
6.2. Meßfeldgröße

Die Wahl der Größe des Meßfeldes auf dem Negativ richtet sich nach der zu analysierenden Teilchengröße. Da stets auch Bodenaggregate zu analysieren sind, deren Durchmesser im Bereich der oberen Grenze der mit dem EPIQUANT noch klassierbaren Teilchengröße liegt, ist es vorteilhaft, große Meßfelder zu wählen, um eine ausreichende statistische Sicherheit zu erreichen. Große Meßfelder haben darüber hinaus den Vorteil, daß der Einfluß des bei der Linearanalyse auftretenden Randfehlers [12] gering wird.

6.3. Subjektiver Fehler

Halbautomatische Messungen werden auch durch die subjektiven Fehler der Bedienperson beeinflusst. Einen Eindruck, wie subjektiv beeinflusste Messungen schwanken, erhält man beim Vergleich von Ergebnissen verschiedener Beobachter bzw. automatischer Geräte an einer Testprobe [13] (Bild 4). Die häufig außerhalb des Erwartungswertes liegenden Ergebnisse von

Bild 5
Oberfläche eines gepflügten anlehmigen Sandes;
a) Positiv
b) Negativ
c) Pseudoplastik



Automaten müssen auf ihre Quellen untersucht werden.

7. Meßbeispiel

Bei der Auswertung wird zur Verbesserung der Identifizierungssicherheit auch ein Positiv verwendet (Bild 5a), weil das „Umdenken“ der Grauwerte beim Fotonegativ (Bild 5b) zu Fehlern führen kann. Um die Objektdetails noch stärker hervortreten zu lassen, sind verschiedene fototechnische Verfahren anwendbar. Z. B. erhält man durch Kombination von Positiv und Negativ sowie Verschiebung beider Komponenten um einen kleinen Betrag eine Pseudoplastik (Bild 5c). Die Auswertung der Bilder 5a, b, c erfolgt mit dem halbautomatischen Meßverfahren am EPIQUANT. Ein großer Vorteil der halbautomatischen Registrierung mit einem Scanningtisch und angeschlossener Datenverarbeitung besteht in der günstigen Auswertzeit, verglichen mit Arbeitsverfahren, die Schablonen oder Skalen zur Größenklassierung benötigen. Für die halbautomatische Registrierung von 1 000 Bodenaggregaten benötigt man rd. 25 min. Im Anschluß an die Registrierung der Sehnenlängenverteilung wird in die entsprechende Durchmesserverteilung umgeformt (s. Abschn. 5.2.).

Die grafische Darstellung der Ergebnisse geschieht am zweckmäßigsten im Wahrscheinlichkeitsnetz, weil sich dann die charakteristischen Verteilungswerte D_{50} und σ auf grafischem Wege ermitteln lassen bzw. die Umformung der Größenverteilung in die Volumen- oder Gewichtsverteilung durch Geradenver-

schiebung einfach realisieren läßt.

Im Diagramm (Bild 6), das der halbautomatischen Auswertung der Bilder 5a, b und c entspricht, sind diese Werte gekennzeichnet. Beim verwendeten Wahrscheinlichkeitsnetz mit logarithmischer Abszisse ermittelt man D_{50} aus dem Schnittpunkt der Summenhäufigkeitsgeraden mit der 50%-Linie und σ aus den Logarithmen der 15,87%- bzw. 84,13%-Werte:

$$\lg D_{50} (18 \text{ mm}) = 2.2553$$

$$\lg D_{84,13} (30 \text{ mm}) = 2.4771$$

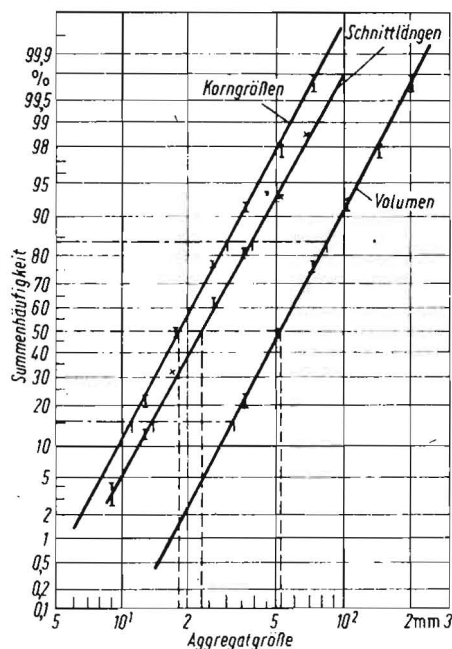
$$\lg D_{15,87} (11 \text{ mm}) = 2.0424.$$

Im vorliegenden Beispiel haben 50% aller Teilchen einen größeren Durchmesser als 18 mm. Die Verteilungsbreite im logarithmischen Maßstab beträgt $D_{50} \pm 0,22$. Die zugehörige Volumen- bzw. Gewichtsverteilung hat ihren 50%-Wert bei 50 mm^3 entsprechend einer Verschiebung der sich aus der Durchmesserverteilung ergebenden Geraden um den dreifachen Wert der Klassenbreite. Das entspricht bei logarithmisch äquidistanter Klassenverteilung dem jeweiligen Teilchenvolumen beim Wert der oberen Klassengrenze.

8. Schlußbemerkung

Mit dem EPIQUANT ist bei Anwendung des halbautomatischen Meßverfahrens die Ermittlung der Verteilungsfunktion der Bodenaggregate auf der Bodenoberfläche möglich. Darüber hinaus kann aus den so erhaltenen Ergebnissen mit Hilfe stereometrischer Verfahren auf das gesamte bearbeitete Bodenvolumen geschlossen werden, wenn dieses gleichmäßig oder

Bild 6. Verteilungsfunktion der Aggregatgrößen eines gepflügten anlehmigen Sandes (Bilder 5a, b und c)



in exakt definierbarer Weise bearbeitet wird. Das vorgeschlagene Verfahren benötigt bei der Durchführung von Versuchen mit Bodenbearbeitungswerkzeugen unter Feldbedingungen nur wenig Zeit, da die Auswertung nach Abschluß und unabhängig von den experimentellen Untersuchungen erfolgen kann. Wird die halbautomatische Auswertung aller zu vergleichenden Arbeitsergebnisse durch den gleichen Bearbeiter durchgeführt, so bestimmt sich die Größe des Meßfehlers fast ausschließlich durch den Stichprobenumfang.

Durch entsprechend umfangreiche Untersuchungen muß nachgewiesen werden, ob die bei der automatischen Auswertung von Bodenaufnahmen entstehenden Fehler sich in zulässigen Grenzen bewegen oder ob unter erschwerten Bedingungen (Helligkeitsunterschiede auf dem Bild, viele Pflanzenrückstände, Steine usw.) oder auch generell der aufwendigeren halbautomatischen Messung der Vorzug zu geben ist, da dann vom Beobachter die Bodenaggregate exakt unterschieden werden können.

9. Zusammenfassung

Die Möglichkeiten der Bestimmung der Größenverteilung von Bodenaggregaten mit Hilfe

der lichtoptischen Korngrößenmeßtechnik am automatischen Gefügeanalysator EPIQUANT werden vorgestellt. Das Meßprinzip und die Arbeitsweise des EPIQUANT werden ausführlich erläutert. Es werden Hinweise zur Herstellung der zur Analyse notwendigen Fotonegative gegeben und Anregungen für eine effektive Weiterverarbeitung des anfallenden Zahlenmaterials vermittelt. Die wesentlichen Fehlerquellen werden diskutiert.

Literatur

- [1] Regge, H.: Der Zerkleinerungserfolg als Bewertungsmaßstab für Bodenbearbeitungsgeräte und -maschinen. *agrartechnik* 15 (1965), H. 7, S. 376—378.
- [2] Petelkau, H., u. a.: Richtwerte und Gütemerkmale für die Bodenbearbeitung in der industriemäßigen Pflanzenproduktion. Markkleeberg: *agra-Buch* 1977.
- [3] Schmidt, K.: Die Anwendung des automatischen Gefügeanalysators EPIQUANT in der Korngrößenmeßtechnik. *Quantitative Mikroskopie*, Firmenschrift des VEB Carl Zeiss Jena, 1979.
- [4] Saltykov, S. A.: *Stereometrische Metallographie*. Leipzig: VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1974.
- [5] Richter, H.; Fröhlich, H.: Zum Einsatz der quantitativen Lichtmikroskopie bei der Versetz-

zungsdichtebestimmung von GA As-100-Kristallen. *Jenaer Rundschau* (1976) H. 5, S. 267—271.

- [6] Beyersdorfer, G.; Gernand, U.: *Linearanalyse histologischer Präparate mit dem automatischen Gefügeanalysator EPIQUANT* ... *Jenaer Rundschau* (1977) H. 6, S. 293—296.
- [7] Kalk, W.-D.: *Untersuchung des Einflusses der Abdeckung einer Bodenfräse auf das Arbeitsergebnis*. TU Dresden. Dissertation 1972 (unveröffentlicht).
- [8] Adams, F. G.: *Stereometrische Meßgrößen und ihre Gewinnung mit dem EPIQUANT*, eine Einführung. *Quantitative Mikroskopie*, Firmenschrift des VEB Carl Zeiss Jena, 1979.
- [9] Fröhlich, H.: *EPIQUANT — ein neues Gerät zur automatischen Gefügeanalyse*. *Jenaer Rundschau* (1974) Messesonderheft, S. 85—91.
- [10] Baur, A.; Kalk, W.-D.; Bosse, O.: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Saatbettbereitungswerkzeugen* ... *Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg, Zwischenbericht 1978* (unveröffentlicht).
- [11] Bockstiegel, G.: *Eine einfache Formel zur Berechnung räumlicher Größenverteilungen aus durch Linearanalyse erhaltenen Daten*. *Z. f. Metallkunde* 57 (1966) H. 8, S. 647—652.
- [12] Exner, H. E.: *Analyse der Größenverteilung von Körnern, Poren und Pulverteilchen*. *Z. f. Metallkunde* 57 (1966) H. 10, S. 755—763.
- [13] Abrams, H.: *Grainsize measurement by the intercept method*. *Metallography* (1971) H. 4, S. 59—78.

A 2599

Arbeitsproduktivität der Hauptberegnungsverfahren

Dr. sc. agr. R. Kappes, KDT, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der AdL der DDR

1. Anforderung an die Hauptberegnungsverfahren

Grundbedingung für eine hohe Arbeitsproduktivität ist die Eignung der Maschinen für die industriemäßige Produktion in der sozialistischen Landwirtschaft.

Die Arbeitskräfte müssen mit leistungsfähigen Maschinen eine große Fläche und eine hohe ausgebrachte Wassermenge erreichen. Die Anlagen haben den produktiven Einsatz der Maschinen im Komplex zu gewährleisten. Dabei sind ökonomische Bedingungen zu erfüllen, wie z. B. den Investitionsaufwand und die technologischen Kosten sowie den Einsatz von Bau- und Ausrüstungsmaterial gering zu halten.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf solche Verfahren, die zukünftig die Forschung und Entwicklung der RGW-Staaten bestimmen. Ausgenommen wurden ortsfeste Beregnungsanlagen, die in der DDR wegen hoher Aufwendungen an Investitionen und Material zukünftig nur im beschränkten Umfang für Sonderkulturen gebaut werden [1].

2. Methodische Grundlagen und Voraussetzungen

Die nachfolgenden Angaben beziehen sich auf die produktivsten Hauptberegnungsverfahren, wobei den Berechnungen konkrete Konstruktionen zugrunde liegen, die aus Untersuchungen, aus der Literatur oder aus Prospekten bekannt sind.

Die Grundparameter für den Vorschub, die Zeit für die Beaufsichtigung, das Umsetzen und die Wegezeit wurden geschätzt. Dabei werden analytische Kennwerte von bekannten und untersuchten Maschinen übertragen, die in ihrer Aussage sicher sind. Die folgenden Ausführungen enthalten keine technischen Einzelheiten, sondern nur technologische Hauptprobleme,

die wesentlich die Leistung und den ökonomischen Aufwand bestimmen. Die Berechnungen setzen voraus, daß die Maschinen technisch einwandfrei arbeiten, keine erhöhten Ausfälle auftreten und zusätzliche Beaufsichtigungen entfallen. Technologisch ist das zentrale Problem, entsprechende technisch-technologische Voraussetzungen zu schaffen, um die Zeitaufwendungen für den Vorschub und die Wegezeit gering zu halten. Wie Auswertungen projektierte Anlagen zeigen, ist es auch unter Berücksichtigung von Flurmeliorationen nicht möglich, die Arbeitsbreite der Maschinen voll zu nutzen. Daher werden bei den Berechnungen nur rd. 75 % der maximalen Arbeitsbreite angesetzt. Aus der Literatur sind Maschinen bekannt, die die hier ausgewiesenen maximalen Arbeitsbreiten erheblich übertreffen. Als Gabenhöhe wurden 25 mm bei einem Beregnungsturnus von 8 Tagen angesetzt. Die Nutzer wollen mit modernen Maschinen möglichst kleine Einzelgaben ausbringen. Eine Vergrößerung der Gaben verbessert aber alle Leistungsparameter [2]. Das Umsetzen der Maschinen nach beendetem Beregnungsturnus in die Ausgangsposition wird als zusätzliche Arbeitsaufwendung berücksichtigt. Die Angabe in der Einheit Arbeitskräfte je 100 Beregnungshektar enthält die Beregnungstechniker und das Personal für das Umsetzen der Maschine. Die Auswertungen beziehen sich auf einen kompletten Beregnungsturnus.

Nur auf diese Weise läßt sich anteilmäßig das Umsetzen der Maschinen berücksichtigen, das zum Arbeitsablauf beim Beregnen gehört. Die Berechnungen nach Tafel I erfolgten nach dem Arbeitsblatt Projekt 39 des VEB Ingenieurbüro für Meliorationen Bad Freienwalde für Feldkulturen. Zusätzliche Arbeitskräfte für einen durchgehenden Dreischichtbetrieb werden hier nicht berücksichtigt.

3. Arbeitswirtschaftliche Parameter der Hauptberegnungsverfahren

3.1. Geradeaus fahrende Regnerleitungen (RL)

Die Maschinen arbeiten positionsweise (Tafel I), die Variante I.1. ist mit einer Regnerwechselschaltung ausgerüstet, die Variante I.2. hat eine hohe Wasserabnahme. Der Bedarf an Arbeitskräften je 100 Beregnungshektar beider Varianten entspricht sich fast. Die hohe Wasserabnahme der Maschine nach I.2. bedingt eine große Schlaglänge, die sich unter praktischen Bedingungen jedoch nur schwer nutzen läßt. Sie erhöht die Dimension für die Hydrantenleitung und damit die Investitionsaufwendungen. Für das Umsetzen der RL wurde ein halbkreisförmiges Schwenken der gesamten Maschine auf die andere Hydrantenseite angenommen. Die Regnerwechselschaltung erfordert durch den Einsatz von Weitstrahlregnern hohe Betriebsdrücke. Angehängte Schleppleitungen vergrößern den Aufwand für das Umsetzen. Es sollte möglichst auf eine Variante nach I.1. orientiert werden.

3.2. Kontinuierlich geradeaus fahrende Beregnungsmaschinen

Solche Maschinen sind aus Literatur und Prospekten bekannt. Arbeitswirtschaftlich am wichtigsten ist die bewegliche Wasserüberführung Hydrant-Maschine und die daraus resultierende mögliche Vorfahrlänge, die hier mit 90 m und 180 m unterstellt wurde. Da die Aufstellungsdauer (Vorfahrlänge zwischen 2 Hydranten) über der täglichen Nettoarbeitszeit von 7,5 Stunden liegt, begrenzt das die technologische Einheit n.

Die Unterschiede im Bedarf an Arbeitskräften sind daher nicht sehr groß. Wegen eines geringeren technischen Aufwands scheint daher