

dichtungsarbeit aufzuwenden. Mit hohen Drücken, wie sie beispielsweise in Brikettierpressen verwendet werden, lassen sich jedoch gerade bei geringen Feuchtegehalten die höchsten Trockenmassendichten erzielen, da das mitverdichtete, inkompressible Wasser nur ein minimales Volumen einnimmt.

Die Oberflächenrauheit trockenen Gutes ist verhältnismäßig gering, so daß auch die beim Reiben auf einer Stahlfläche übertragenen Kräfte nur etwa ein Viertel der Normalkräfte betragen. Dabei ist es mit hinreichender Genauigkeit gleichgültig, ob es sich um Wiesensheu, Luzerneheu, Weizenstroh oder Haferstroh handelt.

Halbtrockenes Wiesengras mit rd. 35% Feuchtegehalt, wie es häufig zu Belüftungszwecken eingebracht wird, läßt sich im Druckbereich der Ballenpressen bereits mit geringem Druck- und Arbeitsaufwand auf hohe Trockensubstanzdichten bringen, da die feinen Halme des Wiesengrases in diesem Welkzustand besonders schlaff und biegeweich sind. Dieser Effekt tritt bei dem halmförmigen und verhältnismäßig feinen Wiesengras sehr viel stärker in Erscheinung als bei Luzernegut, da die Feuchtigkeit die dickeren Luzernestengel nicht so stark in ihrer Festigkeit beeinträchtigt.

Die Reibungskräfte die das halbtrockene Halmgut überträgt, sei es Wiesengras oder Luzerne, sind wegen der in diesem Zustand besonders anschiessamen und rauhen Oberfläche recht hoch — sie betragen rd. drei Viertel der Normalkräfte.

Bei mähfrischem Wiesengras oder frischer Luzerne mit Feuchtegehalten zwischen 70 und 80% bestimmt der große Wasseranteil weitgehend die Verdichtungs- und Reibungsvorgänge. Schon mit geringen Drücken läßt sich sämtliche Luft aus dem Halmgut herauspressen. Dabei ist jedoch nur wenig Trockensubstanz in der Preßmenge enthalten, so daß die Trockensubstanzdichte gering ist. Die spezifische Verdichtungsarbeit

ist minimal, da das Wasser bekanntlich keine Kompressionsarbeit aufnehmen kann. Die Seitendrücke beim Pressen feuchten Gutes sind hoch; — der große Wasseranteil verursacht schon fast ein hydraulisches Verhalten. Die Reibbeiwerte mähfrischen Halmgutes sind, solange keine Zellbeschädigungen auftreten, wegen der steifen Härchen und Kanten noch größer als im Welkbereich, fallen jedoch stark ab, wenn durch den Normaldruck Halmgutzellen zerstört werden, so daß Zellsaft austritt und die Reibfläche benetzt. Dadurch wird eine Schmiering hervorgerufen, die die übertragbaren Reibungskräfte erheblich herabsetzt.

Schrifttum

- [1] *Busse, W.*: Das Verdichten von Halmgütern mit hohen Normaldrücken. Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 1. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [2] *Sacht, H. O.*: Das Verdichten von Halmgütern in Strangpressen. Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 4. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [3] *Matthies, H. J., und W. Busse*: Neuere Erkenntnisse auf dem Gebiete des Verdichtens von Halmgut mit hohem Normaldruck. Grundl. Landtechn. 16 (1966) Nr. 3, S. 87/92.
- [4] *Wieneke, F.*: Wickel- und Reibungsuntersuchungen an Wellen und anderen umlaufenden Maschinenteilen. Diss. TH Braunschweig 1956. VDI-Forsch.-heft 463. Düsseldorf: VDI-Verlag 1957.
- [5] *Skalweit, H.*: Kräfte und Beanspruchungen in Strohpressen. In: 4. Konstrukteurkursus. RKTU-Schriften Heft 88. Berlin: Beuth-Vertrieb 1938, S. 30/35.
- [6] *Wieneke, F.*: Reibungswerte von Pflanzen und Faserstoffen. Landtechn. Forsch. 6 (1956) H. 5, S.146/51.
- [7] *Blevins, F. Z., und H. J. Hansen*: Analysis of forage harvester design. Agric. Engng. 37 (1956) Nr. 1, S. 21/26, 29.

DK 621-5:631.358.44:631.362:633.004.12

Über die Trennung von Kartoffeln und Steinen durch Lichtreflexion

Von **Christian von Zabeltitz**, Braunschweig-Völkenrode

Es wird die Frage untersucht, inwieweit eine Trennung von Kartoffeln und Steinen mit Hilfe von reflektiertem Licht durchzuführen ist. Dabei wird zunächst nur das Fühlersystem Beleuchtung-Meßelement betrachtet und festgestellt, ob für den Trennvorgang hinreichende Unterschiede der reflektierten Lichtmenge bei Kartoffeln und Steinen auftreten. Parameter der experimentellen Untersuchungen sind verschiedene Beleuchtungssysteme und verschiedene Empfindlichkeiten der als Meßglieder verwendeten Photoelemente, der Wellenlängenbereich des reflektierten Lichtes sowie der äußere Zustand der Kartoffeln (Sorten, anhaftender Boden) und der Steine. Von seiten des Fühlersystems sind günstige Trennergebnisse bei Verwendung von rot empfindlichen Photoelementen und Licht aus dem roten Spektralbereich zu erzielen.

Die Mechanisierung der trockenen Trennung von Kartoffeln und Beimengungen (Steine und Erdkluten) bei der Kartoffelsammelernte befindet sich noch in voller Entwicklung. Die nasse Trennung von Kartoffeln und Steinen nach dem Prinzip der Schwerflüssigkeitssortierung ist bei Ernteverfahren nicht günstig, da bei der anschließenden Lagerung sehr hohe Verluste auftreten. Bei den zur Zeit verwendeten Trennorganen für die trockene Trennung sind Verlesepersonen notwendig, um fehlergeleitete Kartoffeln und Steine auszulesen. Um diese Notwendigkeit auszuschalten, sind viele Lösungen vorgeschlagen worden, physikalische Merkmale von Kartoffeln und Beimengungen für die mechanische Trennung anzuwenden. Solche physikalischen Eigenschaften sind die geometrischen Ab-

messungen, die Dichte bzw. der spezifische Flächendruck, der Reibungskoeffizient und das Rollvermögen auf verschiedenen Flächen, die Elastizität, die Härte, der Luftwiderstand, die Absorption von Strahlen und die Schallintensität beim Aufprall auf Platten.

Eine Reihe von Trennmechanismen, die auf diesen Eigenschaften beruhen, wie z. B. die Trennung nach der Dichte aufgrund des spezifischen Flächendrucks mit Hilfe von Bürstenwalzen und durch Gummifingerbänder [1; 2], die Trennung durch unterschiedliches Rollvermögen [3; 4; 5], die Trennung im Luftstrom [6; 7], durch akustische Signale [8], durch Strahlungsabsorption [9] und durch verschiedenes Sinkvermögen im Fließbett [10], sind untersucht und erprobt worden, wobei sich in der Praxis die Trennung nach der Dichte bisher am besten bewährt hat.

Im Schrifttum werden Unterschiede von Kartoffeln, Steinen und Erdkluten hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit, der Ausbreitung von Ultraschall und der Lichtreflexion kaum erwähnt. In den UdSSR sind in letzter Zeit einige Versuche über die Unterschiede der trennenden Produkte hinsichtlich der Lichtreflexion durchgeführt worden [11; 12]. Die folgenden Untersuchungen stellen einen weiteren Beitrag zu der Frage dar, inwieweit eine Trennung von Kartoffeln und Steinen mit Hilfe der Lichtreflexion möglich ist. Um dieses Problem zu lösen, ist zunächst zu klären, ob bei der Messung der Lichtreflexion, die bei Beleuchtung der Trennkörper auftritt, hinreichende Unterschiede der Meßwerte im Hinblick auf einen Trennvorgang auftreten. Bei den folgenden Untersuchungen wird nur das Fühlersystem Beleuchtung-Meßelement betrachtet, ohne auf nachzuschaltende Übertragungs- und Trennsysteme näher einzugehen. Letztere sind als eine weitere, noch näher zu untersuchende regelungstechnische Aufgabe anzusehen.

Dr.-Ing. Christian von Zabeltitz ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Versuchsanstellung

Lichtstrahlen, die auf die Oberfläche eines Körpers treffen, werden zu einem Teil reflektiert, zum anderen Teil von dem Körper absorbiert. Bei der Reflexion unterscheidet man zwischen der regulären und der diffusen Reflexion. Für die reguläre Reflexion, die an sehr blanken und glatten Flächen auftritt, gilt das Reflexionsgesetz. Ein auftreffender Lichtstrahl ändert dabei nur seine Richtung und wird nicht zerstreut. An matten Flächen dagegen wird ein Lichtstrahl nach allen Seiten hin zerstreut. Man spricht hier von diffuser Reflexion, die auch bei der Bestrahlung von Kartoffeln und Steinen vorliegt. Das Reflexionsvermögen eines Körpers, d. h. das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Strahlungsleistung, ist abhängig vom Brechungsindex sowie von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers. Der Absorptionskoeffizient hängt ebenfalls von den Stoffeigenschaften des Körpers ab. Die Abhängigkeiten der optischen Eigenschaften von den Stoffwerten sind bisher nur für einige reine mineralische Stoffe und für einige Metalle bekannt. Für Kartoffeln und Steine kennt man solche Zusammenhänge noch nicht.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, das Reflexionsvermögen von Kartoffeln und Steinen zu messen und miteinander zu vergleichen. Um einen Trennvorgang zu ermöglichen, soll dabei die Differenz der reflektierten Strahlungsmengen möglichst groß sein. Das Grundprinzip der Messung besteht darin, daß Kartoffeln und Steine durch eine Lichtquelle bestrahlt werden und die diffus reflektierte Strahlungsintensität mit Hilfe von Photoelementen gemessen wird. Dabei sollen insbesondere Einflüsse der Wellenlänge des Lichtes, der äußeren Beschaffenheit der Kartoffeln und des an Kartoffeln und Steinen haftenden Bodens untersucht werden.

Zur Erzeugung von Licht verschiedener, begrenzter Wellenlängenbereiche (verschiedener Farbe) gibt es mehrere Möglichkeiten [13]:

1. Weiß- oder Glühlicht wird durch ein Prisma in ein kontinuierliches Spektrum zerlegt und aus diesem mit einer Schablone der gewünschte Wellenlängenbereich herausgefiltert;
2. mit Hilfe von Farbfiltern werden aus Weiß- oder Glühlicht bestimmte Wellenlängenbereiche herausgefiltert;
3. Verwendung von Lichtquellen mit begrenztem Wellenlängenbereich.

Bei den vorliegenden Untersuchungen werden die beiden letzten Verfahren angewendet. Verschiedene Farbfilter werden den Photoelementen, die das reflektierte Licht in Photostrom umsetzen, direkt vorgeschaltet, so daß aus dem reflektierten Licht ein bestimmter Wellenlängenbereich ausgefiltert und dessen Intensität gemessen wird. Zum Vergleich mit dem einfallenden Weißlicht, welches alle Spektralfarben enthält, sollte auch einfallendes Licht begrenzter Wellenlänge untersucht werden. Da die Farbfilter nur mit großem Aufwand in den einfallenden Lichtstrahl gebracht werden konnten, wurden aus Zweckmäßigkeitsgründen farbige Lichtquellen verwendet. Der Wellenlängenbereich des einfallenden Lichtes bestimmter Farbe war nicht genau bekannt. Daher wurden zusätzlich mit ent-

Verwendete Formelzeichen

I	Photostrom
ΔI	Differenz der mittleren Photoströme bei der Lichtreflexion von Kartoffeln und Steinen
I_K	mittlerer Photostrom bei der Lichtreflexion von Kartoffeln
I_{St}	mittlerer Photostrom bei der Lichtreflexion von Steinen
I_T	Photostrom, der die Trennschwelle zwischen Kartoffeln und Steinen angibt
N	Gesamtzahl der Meßwerte
s	Standardabweichung
s_K	Standardabweichung bei Kartoffeln
s_{St}	Standardabweichung bei Steinen
x_1	Einzelmeßwert
\bar{x}	Mittelwert der Einzelmeßwerte
\bar{x}_K	Mittelwert der Einzelmeßwerte bei Kartoffeln
\bar{x}_{St}	Mittelwert der Einzelmeßwerte bei Steinen
λ	Wellenlänge des Lichtes

sprechenden Farbfiltern vor den Photoelementen definierte Wellenlängenbereiche ausgefiltert.

Die verwendeten Versuchsanordnungen sind aus **Bild 1 und 2** zu ersehen. Kartoffeln und Steine wurden auf einem Förderband hintereinanderliegend durch einen abgedeckten Tunnel von 800 mm Länge geführt. In der Mitte des Tunnels befanden sich jeweils die Lichtquelle und das Photoelement mit Farbfilter. Bei der ersten Versuchsreihe wurden die auf dem Förderband vorbeiziehenden Körper durch sechs konzentrisch um das Photoelement angeordnete Lampen mit Linsenkopf beleuchtet, **Bild 1**. Die Lampen hatten einen Anschlußwert von 3,7 V und 0,3 A, wurden aber hintereinandergeschaltet mit 24 V betrieben. Diese Beleuchtung gab Weißlicht ab. Die Lichtstrahlen wurden durch die Linsenköpfe scharf gebündelt, so daß sie auf der Oberfläche der zu trennenden Körper eine begrenzte hellbeleuchtete Zone bildeten, von der das Licht reflektiert wurde. Bei weiteren Versuchen wurden die Lampen rot gefärbt, so daß sie hellrotes Licht ausstrahlten. Bei einer anderen Versuchsanordnung, **Bild 2**, wurde eine Rotlichtlampe (Osram-Theratherm) mit einem Anschlußwert von 220 V und 250 W verwendet, die dunkelrotes Licht abgab.

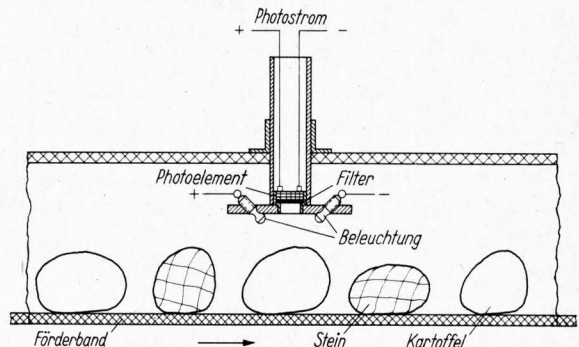


Bild 1. Versuchseinrichtung zur Ermittlung der physikalischen Unterschiede von Kartoffeln und Steinen hinsichtlich der Lichtreflexion.

Beleuchtung durch 6 konzentrisch um das Photoelement angeordnete Lampen
Anschlußwert der Einzellampen: 4 V und 0,3 A
Lichtfarbe: weißgelb und hellrot

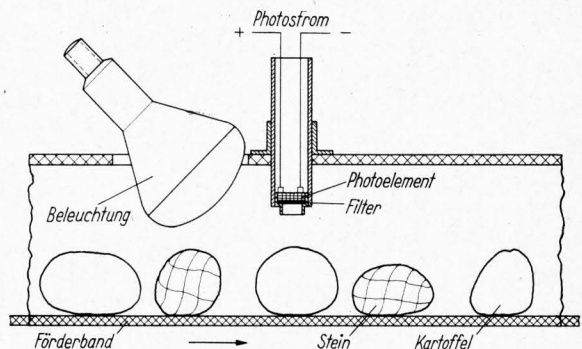


Bild 2. Versuchseinrichtung zur Ermittlung der physikalischen Unterschiede von Kartoffeln und Steinen hinsichtlich der Lichtreflexion.

Beleuchtung durch eine Osram Theratherm Rotlichtlampe 220 V und 250 W
Lichtfarbe: dunkelrot

Für die Erzeugung des Photostromes durch das reflektierte Licht wurden zwei verschiedene Selenphotoelemente mit einem Durchmesser von 28 mm verwendet. Die spektrale Empfindlichkeit der Photoelemente in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes ist aus **Bild 3** zu ersehen. Dabei sind der Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes, der zwischen 390 und 770 nm liegt, und die Spektralbereiche der Farben besonders gekennzeichnet [14]. Die spektrale Empfindlichkeit des Photoelementes E 1 (normal) liegt fast ganz im Bereich des sichtbaren Lichtes mit dem Maximum bei einer Wellenlänge von 550 nm, dem Übergang zwischen dem grünen und gelben Spektrum. Das Photoelement E 2 (ultrarotempfindlich) reicht mit seiner spektralen Ansprechempfindlichkeit erheblich in den ultraroten Bereich hinein. Sein Maximum liegt bei einer Wellenlänge von 680 nm im roten Spektrum. Da die spektrale Emp-

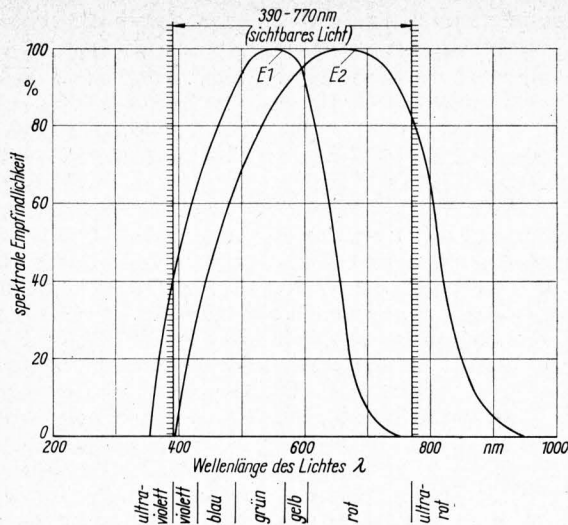


Bild 3. Die spektrale Empfindlichkeit der verwendeten Photoelemente, Bauart B. Lange [15].
E 1 normales Photoelement
E 2 ultratempfindliches Photoelement
Wellenlänge in nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

findlichkeit der einzelnen Photoelemente in Abhängigkeit von der Wellenlänge nicht konstant ist, ist die Ansprechempfindlichkeit bei gleicher Beleuchtungsstärke in den verschiedenen Wellenlängenbereichen verschieden. Da die Photoelemente aber nur als Meßfühler für den Trennvorgang dienen sollen, ist die unterschiedliche Ansprechempfindlichkeit in diesem Fall von geringerer Bedeutung.

Bild 4 zeigt die Lichtdurchlässigkeit der verwendeten Farbfilter in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes. Dabei ist zu beachten, daß das ultraviolette, das blaue und das grüne Farbfilter noch eine geringe Durchlässigkeit im roten und ultraroten Bereich haben. Die angegebenen Werte für die spektrale Empfindlichkeit der Photoelemente und für die Lichtdurchlässigkeit der Farbfilter sind Meßwerte vom Hersteller [15].

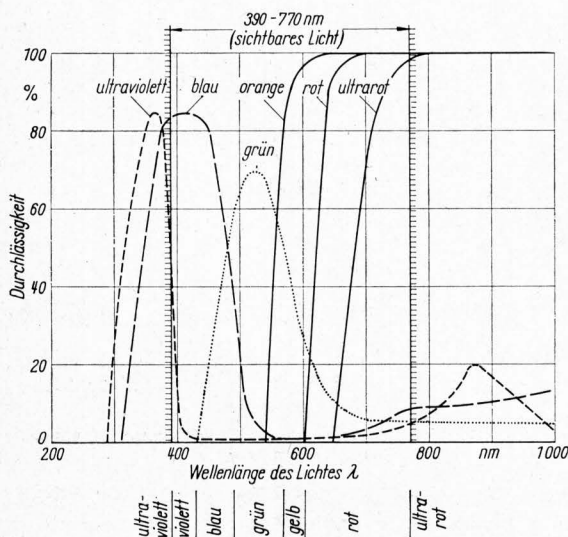


Bild 4. Lichtdurchlässigkeit der verwendeten Farbfilter.

In **Bild 5** ist der Photostrom aufgetragen, der bei Direktbestrahlung der Photoelemente durch die verschiedenen Beleuchtungsanordnungen nach Bild 1 und 2 erzeugt wird. Dabei sind die Photoelemente mit vorgeschalteten Farbfiltern an den Stellen angebracht, an denen beim Versuch die Trennkörperoberfläche bei mittlerer Größe der Körper angestrahlt und das Licht reflektiert wird. Dieser Photostrom kann für die beschriebenen Versuchsanordnungen als Maß für die Lichtintensität der Lichtquellen unter Berücksichtigung der nicht konstanten spektralen Empfindlichkeit der Photoelemente angesehen

werden. Die Abszissenwerte der eingetragenen Meßpunkte entsprechen den maximalen Durchlässigkeitswerten der Farbfilter. Die Lichtstärke der konzentrisch angebrachten 6 Lampen mit Weißlicht ist im Maximum bei $\lambda \approx 650 \text{ nm}$ etwa doppelt so groß wie die Lichtstärke der Rotlichtlampe. Dabei spielt auch die durch die Versuchsanordnung bedingte größere Entfernung des Photoelementes von der Lichtquelle beim Rotlicht eine Rolle. Der Strom des ultratempfindlichen Photoelementes E 2 liegt bei allen Beleuchtungsarten nur im äußersten Rotbereich über dem Wert des Photoelementes E 1, der in diesem Bereich entsprechend der Empfindlichkeitskurve, Bild 3, sehr stark abfällt. Bei hellem und dunkelrotem Licht geht der Photostrom beim Übergang zum gelben und grünen Spektralbereich entsprechend der Durchlässigkeit bis nahe an den Nullpunkt zurück. Das Ansteigen des Photostromes beim ultravioletten Filter hängt mit der noch vorhandenen Durchlässigkeit im ultraroten Spektralbereich nach Bild 4 zusammen.

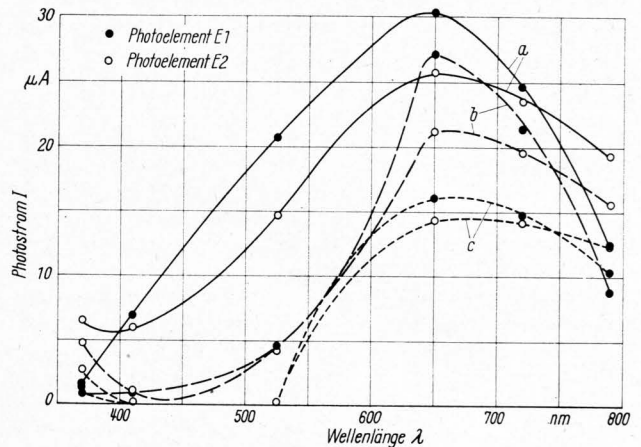


Bild 5. Photostrom in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes bei Direktbestrahlung, erzeugt durch Vorschalten der Farbfilter.

- a weißgelbes Licht, 6 Lampen zu je 4 V
- b hellrotes Licht, 6 Lampen zu je 4 V
- c dunkelrotes Licht, 1 Lampe 220 V

Optimierung des Fühlersystems

Für eine fehlerfreie Trennung von Steinen und Kartoffeln ist es wichtig, daß der Unterschied der durch das reflektierte Licht erzeugten Stromwerte von Steinen und Kartoffeln genügend groß ist. Die Streubereiche dürfen sich nicht überschneiden, damit es möglich ist, zwischen die Stromwerte eine Stromschwelle zu legen. Ober- oder unterhalb dieser Stromschwelle wird bei Erreichen der Strommaxima von Kartoffeln oder Steinen ein Trennmechanismus betätigt. Die Absolutwerte der Photostrome spielen dabei eine geringere Rolle, da sie zur Steuerung der Trennmechanismen sowieso verstärkt werden müssen.

Bild 6 zeigt einen Regsterschrieb, auf dem die von einem Photoelement abgegebenen Stromwerte bei der Lichtreflexion von Kartoffeln (hohe Werte) und Steinen (niedere Werte) aufgezeichnet sind. Durch eine Stromschwelle, auf dem Schrieb durch die gestrichelte Linie angedeutet, lassen sich die Maximalwerte der Stromstöße eindeutig voneinander trennen. Es handelt sich hier um eine Aufzeichnung mit dem Photoelement E 2

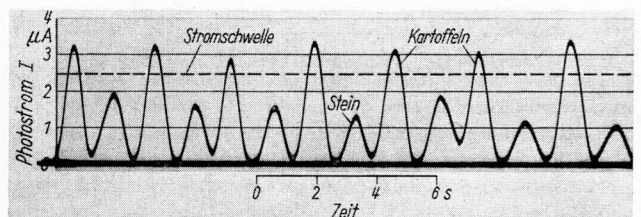


Bild 6. Meßschrieb der aufgenommenen Photostrome bei der Lichtreflexion von Steinen und Kartoffeln.

- Photoelement E 2 mit ultrarotem Filter
- Beleuchtung: 6 Lampen mit hellrotem Licht

mit vorgeschaltetem ultrarotem Filter und der Beleuchtung durch die sechs konzentrisch angeordneten hellroten Lampen nach Bild 1. Um zunächst Aussagen über Optimalwerte der gemessenen Photoströme bei den verschiedenen Photoelementen, Farbfiltern und Beleuchtungsarten zu erhalten, wurden die Optimierungsversuche mit einer Auswahl von 50 trockenen Steinen verschiedener Form, Größe, Oberflächenbeschaffenheit und Farbe sowie mit 4 bis 6 Wochen lang gelagerten, hellfarbigen, sauberen Frühkartoffeln verschiedener Form und Größe durchgeführt.

Bild 7 bis 11 zeigen den durch die Reflexion erzeugten mittleren Photostrom in Abhängigkeit von der Wellenlänge des durch die Filter auf das Photoelement dringenden Lichtes, d.h., die mittleren Photoströme wurden unter Vorschaltung der einzelnen Farbfilter gemessen und bei der dem Maximum der Durchlässigkeit entsprechenden Wellenlänge aufgetragen. Senkrecht schraffiert eingetragen ist als Maß für die Streuung der Einzelmeßwerte die Standardabweichung $\pm s$, die aus den Versuchswerten nach der Beziehung

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_1^N x_i^2 - \bar{x} \sum_1^N x_i \right)} \quad (1)$$

ermittelt wurde.

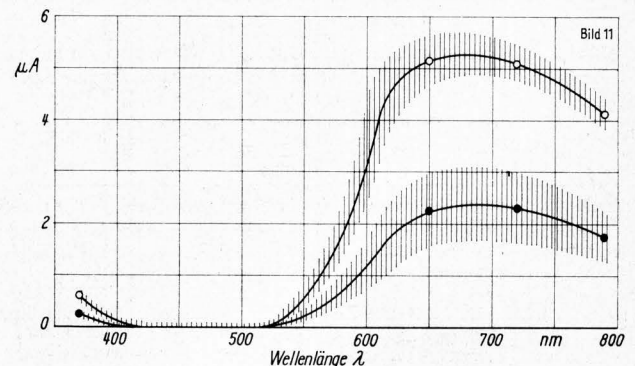
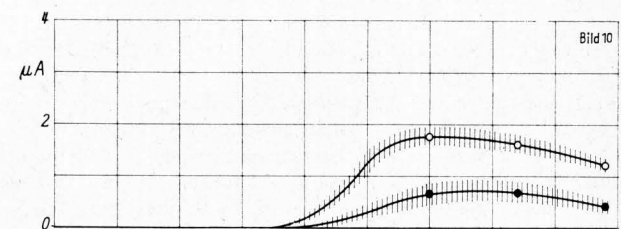
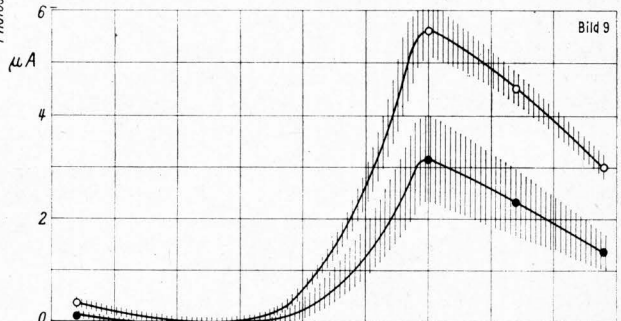
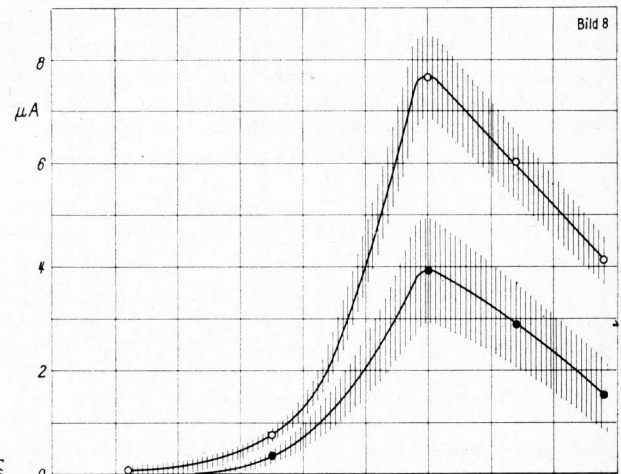
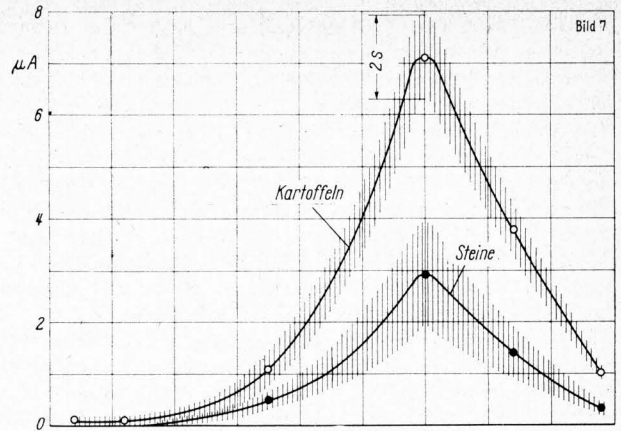
Das Maximum des aus dem reflektierten Licht erzeugten Photostromes liegt bei allen Beleuchtungsarten und Photoelementen für Steine und Kartoffeln im Hellrotbereich des Spektrums bei einer Wellenlänge von etwa 650 nm. Unterhalb einer Wellenlänge von 550 nm wird sowohl bei Steinen als auch bei Kartoffeln nur wenig Licht reflektiert. Besonders ausgeprägt ist das Maximum bei weißer Beleuchtung, bei der der Photostrom zum Grün- und Dunkelrotbereich hin ziemlich steil abfällt, Bild 7 und 8. Vor allem das Photoelement E 1, dessen Empfindlichkeitsmaximum im grünen Spektrum liegt, ist in dieser Hinsicht ungünstig, Bild 7. Hier kommt als Arbeitspunkt nur ein sehr schmaler Wellenlängenbereich des Lichtes um 650 nm in Frage. Das ultrarotempfindliche Photoelement E 2 liefert bei weißgelbem (Bild 8) und hellrotem (Bild 9) Licht etwas günstigere Photoströme. Der Stromabfall hat hier mit zunehmender Wellenlänge im Rotbereich einen kleineren Gradienten. Dunkelrotes Licht der Therathermlampe liefert im ganzen Rotspektrum einen nur leicht abfallenden Photostrom, Bild 10 und 11. Im grünen Farbbereich und bei kleineren Wellenlängen, mit Ausnahme derjenigen, die dem Maximum des ultravioletten Filters entspricht, wird durch Reflexion kein Photostrom erzeugt, weil sich das Spektrum des Rotlichtes und die Durchlässigkeit der Blau- und Grünfilter nicht überschneiden. Da das Photoelement E 1 im roten Spektralbereich eine zu geringe Empfindlichkeit hat, liegen auch die Stromwerte dieses Elementes bei roter Beleuchtung mit maximal nur $1,8 \mu A$ für Kartoffeln zu niedrig, Bild 10. Das Verhältnis der bei der Reflexion von Kartoffeln und Steinen erzeugten mittleren Photoströme I_K und I_{St} liegt für die verschiedenen Beleuchtungsarten, Photoelemente und Filter bei

$$\frac{I_K}{I_{St}} = 1,7 \text{ bis } 3,3 \quad (2).$$

Aus Bild 7 bis 11 ist zu entnehmen, daß eine Trennung von Steinen und Kartoffeln bei Vorschalten von Rotfiltern im Wellenlängenbereich von etwa 650 bis 800 nm günstig ist, da hier brauchbare Unterschiede der Photoströme bei der Reflexion

Bild 7 bis 11. Photostrom in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes bei der Reflexion von Steinen und Kartoffeln (Optimierungsversuche).

- Kartoffeln: hellfarbig mit sauberer Oberfläche
 Steine: trocken, von verschiedener Farbe, Form und Größe
- Bild 7. Photoelement E 1, verschiedene Farbfilter, Licht weißgelb, 6 Lampen je 4 V;
 - Bild 8. Photoelement E 2, verschiedene Farbfilter, Licht weißgelb, 6 Lampen je 4 V;
 - Bild 9. Photoelement E 2, verschiedene Farbfilter, Licht hellrot, 6 Lampen je 4 V;
 - Bild 10. Photoelement E 1, verschiedene Farbfilter, Licht dunkelrot, 1 Lampe 220 V;
 - Bild 11. Photoelement E 2, verschiedene Farbfilter, Licht dunkelrot, 1 Lampe 220 V.



des Lichtes von Kartoffeln und Steinen vorliegen. Um Aussagen über den optimal zu erwartenden Trenneffekt machen zu können, muß die Differenz der Photoströme von Kartoffeln und Steinen näher betrachtet werden. Bei einer möglichst fehlerfreien Trennung dürfen sich die Streubereiche der Einzelmeßwerte von Kartoffeln und Steinen nicht überschneiden. Wählt man einen Streubereich mit der doppelten Standardabweichung $\pm 2s$ um den jeweiligen Mittelwert der Photoströme, so enthält dieser Bereich theoretisch 95,46% aller möglichen Einzelmeßwerte. Da bei Kartoffeln für die Trennung nur die Minimal- und bei Steinen nur die Maximalwerte von Interesse sind, liegen außerhalb der Grenze $(\bar{x}_K - 2s_K)$ bei Kartoffeln und außerhalb der Grenze $(\bar{x}_{St} + 2s_{St})$ bei Steinen theoretisch jeweils nur 2,27% Kartoffeln bzw. Steine, die bei einem Trennvorgang fehlgeleitet würden. Man kann also die Photostromdifferenz zwischen den Streubereichen aus der doppelten Standardabweichung, welche durch den Ausdruck

$$\Delta I = (\bar{x}_K - 2s_K) - (\bar{x}_{St} + 2s_{St}) \quad (3)$$

dargestellt wird, als Maß für die Güte einer möglichen Trennung von Steinen und Kartoffeln wählen. Dieser Wert ΔI ist über der Wellenlänge des Lichtes in **Bild 12** aufgetragen. Zum Vergleich dazu zeigt **Tafel 1** die Differenzwerte ΔI für die verschiedenen Beleuchtungsarten ohne vorgeschaltete Farbfilter.

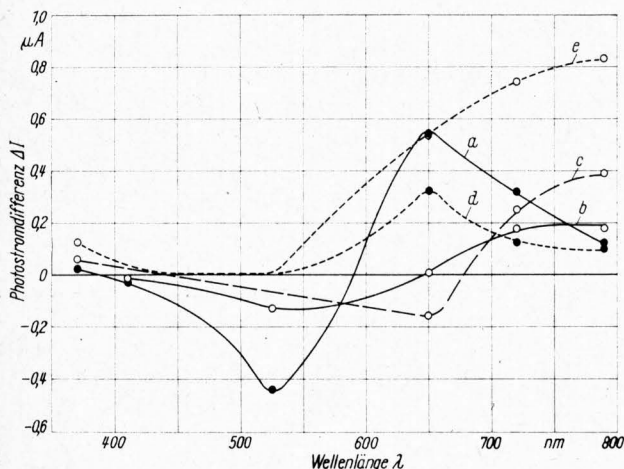


Bild 12. Die Photostromdifferenz ΔI nach Gl. (3) in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes als Maß für die Trenngüte.

- a Photoelement E 1, weißgelbes Licht
- b Photoelement E 2, weißgelbes Licht
- c Photoelement E 2, hellrotes Licht
- d Photoelement E 1, dunkelrotes Licht
- e Photoelement E 2, dunkelrotes Licht

Negative Werte von ΔI in **Bild 12** bedeuten ein Überschneiden der Streubereiche und mit Fehltrennungen von mehr als 2,27% weniger günstige Trennbedingungen. $\Delta I > 0$ bedeutet, daß die Fehltrennungen kleiner als 2,27% sind. Die Trenngüte wird mit steigendem ΔI besser. Die Maximalwerte von ΔI liegen bei verschiedenen Beleuchtungsarten für das Photoelement E 1 (Kurve a und d) übereinander bei $\lambda = 650$ nm und für Photoelement E 2 (Kurve b, c und e) entsprechend der zum roten Spektrum verschobenen Empfindlichkeit bei $\lambda = 790$ nm im äußersten sichtbaren Rotbereich. Das Photoelement E 1 liefert nur in einem schmalen Maximalbereich brauchbare

Tafel 1. Photostromdifferenz ΔI nach Gl. (3) bei verschiedenen Beleuchtungsarten und Photoelementen ohne vorgeschaltete Farbfilter.

	Beleuchtung	Photoelement	ΔI μA
a	weißgelb 24 V	E 1	0,23
b	weißgelb 24 V	E 2	0,14
c	hellrot 24 V	E 2	0,08
d	dunkelrot 220 V	E 1	0,2
e	dunkelrot 220 V	E 2	0,76

*) gemessen in Versuchseinrichtung nach **Bild 1**

***) gemessen in Versuchseinrichtung nach **Bild 2**

Werte. Mit Ausnahme der Dunkelrotbeleuchtung liegen alle Werte unterhalb $\lambda = 600$ nm im negativen Bereich. Die Differenzwerte der Photoströme, die ohne Vorschalten der Farbfilter von den Photoelementen abgegeben werden, **Tafel 1**, sind kleiner als die jeweiligen Maximalwerte bei Verwendung von Filtern im roten Spektralbereich, **Bild 12**.

Messung der Lichtreflexion unter Rodebedingungen

Für die optimale Trennung von Steinen und Kartoffeln durch die Reflexion von Lichtstrahlen ist also der rote Spektralbereich mit Wellenlängen zwischen 650 und 800 nm am günstigsten. Die durchgeführten Optimierungsversuche zeigen, daß das ultrarotempfindliche Photoelement E 2 in Verbindung mit dem roten oder ultraroten Farbfilter (100% durchlässig für Licht mit Wellenlängen größer als 700 nm) bei dunkelroter Beleuchtung (Wellenlängenbereich > 700 nm) optimale Werte für die Trenngüte liefert, **Kurve e** in **Bild 12**. Aus diesem Grund wurden die weiteren Versuche mit solchen Kartoffeln und Steinen, wie sie beim Roden auf dem Felde und nach kurzer Lagerzeit anfallen, mit dieser optimalen Kombination von Photoelement E 2 (ultrarotempfindlich) mit roten Farbfiltern ($\lambda > 650$ nm) und dunkelroter Beleuchtung durchgeführt.

Tafel 2 zeigt eine Zusammenstellung und Beschreibung der bei den folgenden Versuchen verwendeten Trennkörper und deren Herkunft bezüglich der Bodenart. Die Lichtreflexion der verschiedenen Kartoffeln und Steine wurde unter den gleichen Bedingungen untersucht, wie sie bei der Ernte auftreten. Einmal waren die Körper feucht und — je nach Bodenart und Sorte — mehr oder weniger mit Schmutz behaftet, so wie sie bei der Sammelernte an die Trennorgane gelangen, und zum anderen trocken und abgelagert, wie bei der zweistufigen Kartoffelernte, bei der die Kartoffeln erst gerodet und später vom Boden aufgenommen werden. Von den auf den verschiedenen Böden gewachsenen Kartoffeln, die sehr verschiedene äußere Beschaffenheit hatten, wurden für die Versuche Knollen verschiedener Form und Größe, wie sie bei der Ernte anfielen, verwendet. Gleichzeitig wurden den jeweiligen Böden je 50 Steine verschiedener Form, Größe und Farbe entnommen.

Tafel 2. Zusammenstellung und Beschreibung der verwendeten Trennkörper und Bodenarten.

Kartoffelsorte	äußere Beschaffenheit der Kartoffel	Bodenart	Steine
Rata	sauber und hellfarbig glatte Oberfläche	trockener Sand	jeweils 50 Steine verschiedener Form, Größe und Farbe aus dem ent- sprechenden Boden
Datura	fleckig, mit anhaftenden Bodenteilen, feucht	feuchter, humoser Sand (schwarz)	
Datura	dunkelfleckig, mit anhaftenden Boden- teilen, feucht	feuchter, lehmiger Sand	
Saskia	schorfig, mit anhaftenden Lehmteilen, feucht	feuchter, sandiger Lehm	
Capella 5	schorfig, dunkel farbig, trocken	abgelagert	trockene dunkle und helle Steine

Die Kartoffeln der Sorte Rata, auf Sandboden gewachsen, hatten eine glatte und helle Oberfläche, an der wenig Boden beim Roden haften blieb. Die Kartoffeln der Sorte Datura waren mit größeren dunklen Flecken und Schorf besetzt, so daß ihr äußeres Aussehen dunkler wirkte. Außerdem blieben beim Roden Bodenteile des schwarzen, humosen Sandes und des lehmigen Sandes an den Knollen haften. Die Kartoffeln (Saskia) aus dem sandigen Lehm waren ebenfalls schorfig und mit Bodenteilchen behaftet. Die Kartoffeln der Sorte Capella 5 hatten nach dem Roden einige Zeit gelagert, wodurch sie abgetrocknet waren und die meisten Bodenteilchen sich gelöst hatten.

In **Bild 13 bis 17** sind die Photoströme als Funktion der Wellenlänge des Lichtes für die verschiedenen Kartoffel-Bodenkombinationen nach **Tafel 2** aufgetragen. Alle Versuche wurden mit dem Photoelement E 2 und dunkelroter Beleuchtung nach

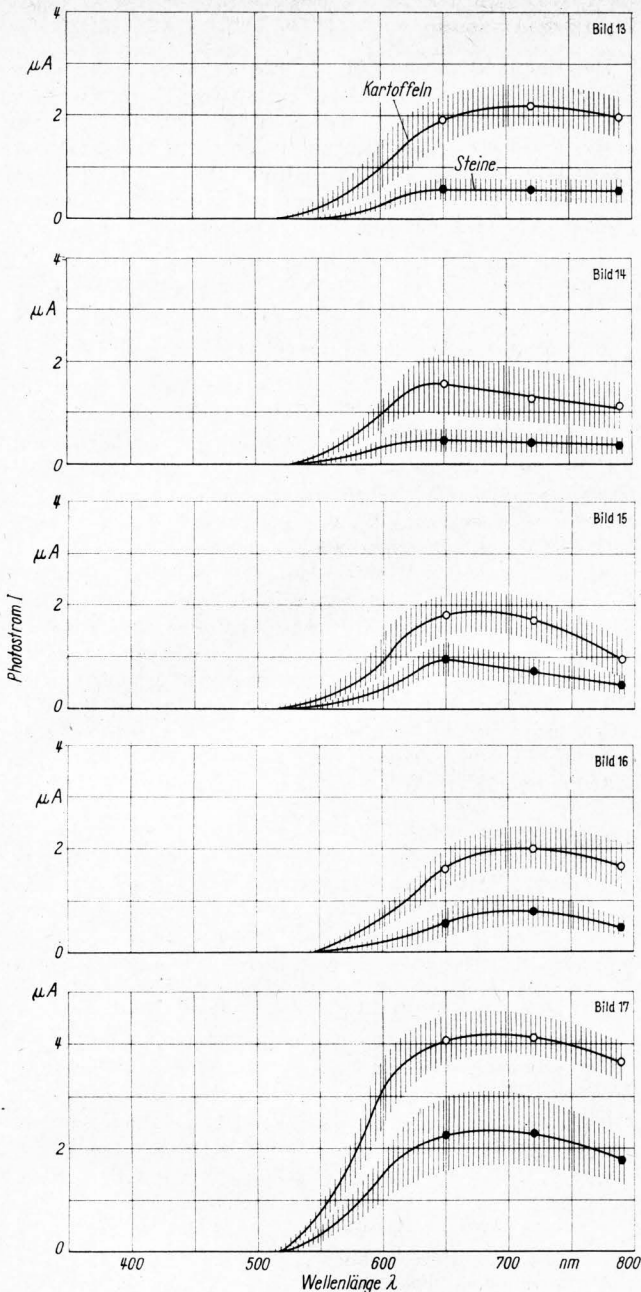


Bild 13 bis 17. Die Abhängigkeit des Photostromes von der Wellenlänge des Lichtes für die verschiedenen Kartoffel-Bodenkombinationen nach Tafel 2.

- Bild 13. Kartoffelsorte Rata; trockener Sand.
- Bild 14. Kartoffelsorte Datura; feuchter, humoser Sand.
- Bild 15. Kartoffelsorte Datura; feuchter, lehmiger Sand.
- Bild 16. Kartoffelsorte Saskia; feuchter, sandiger Lehm.
- Bild 17. Kartoffelsorte Capella 5; nach dem Roden abgelagert.

Bild 2 durchgeführt, wobei sich die gleiche Tendenz der Kurven wie in Bild 11 ergibt, d. h., die Funktionen verlaufen im roten Spektrum bei Wellenlängen zwischen 650 und 800 nm mit geringer Neigung. Die Absolutwerte der abgegebenen Photoströme sind aber geringer als bei den Optimierungsversuchen. Durch anhaftende Bodenteile an den frisch gerodeten Kartoffeln und Steinen ist die Lichtreflexion kleiner. Darauf beruht auch die im Vergleich zu den Absolutwerten größere Streuung der Einzelwerte, dargestellt durch die eingezeichnete Standardabweichung $\pm s$. Bei den abgelagerten und trockenen Kartoffeln, Bild 17, ist ein Teil des Bodens abgefallen, und es wird infolge des helleren Äußeren mehr Licht reflektiert und dadurch ein höherer Photostrom erzeugt. Da hier auch die Steine trocken sind und der anhaftende Boden zum Teil abgefallen ist, kommt die unterschiedliche Farbe der hellen und dunklen Steine mehr zur Geltung, wodurch die Streuung wesentlich größer ist als

bei den Steinen, die mit den Kartoffeln frisch aus der Erde kommen.

Zur Beurteilung des möglichen Trenneffektes sind in **Bild 18** wiederum die aus den Meßwerten der vorstehenden Versuche (Bild 13 bis 17) nach Gl. (3) errechneten Photostromdifferenzen ΔI in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ des vor dem Photoelement gefilterten reflektierten Lichtes aufgetragen. Die ΔI -Werte für Rotlichtbeleuchtung ohne vorgeschaltete Filter sind, wie schon oben beschrieben, ungünstiger als die Differenzen bei Verwendung der verschiedenen Rotfilter und werden daher nicht weiter betrachtet. Bei der Sorte Datura, die auf dem schwarzen humosen Sand und auf lehmigem Sand gewachsen ist, überdecken sich die Streubereiche der zweifachen Standardabweichung im ganzen Bereich des roten Spektrums (Kurve b und c), d. h., eine Trennung der Kartoffeln von den Steinen ist nur innerhalb einer bestimmten Fehlergrenze möglich. Die abgelagerten Kartoffeln der Sorte Capella 5 und die Sorte Saskia aus dem sandigen Lehm (Kurve d und e) haben im äußersten roten Spektralbereich beim Übergang zum unsichtbaren infraroten Spektrum positive Werte, d. h., rechnerisch sind hier maximal 2,27% der möglichen Streuwerte von Kartoffeln und Steinen nicht voneinander zu trennen. Die Kartoffeln der Sorte Rata, die auf Sandboden gewachsen sind, lassen sich theoretisch gut von den Steinen trennen (Kurve a). Die Differenzwerte ΔI liegen bei Rotlichtbestrahlung und Rotfilterung im positiven Bereich, sind aber kleiner als die in Bild 12 dargestellten Werte von den sauberen, trockenen Kartoffeln (Kurve f).

Nach Bild 18 ist auch bei frisch gerodeten Kartoffeln und Steinen eine optimale Trenngüte zu erreichen; Voraussetzung ist: Bestrahlung der Trennkörper mit dunkelrotem Licht, Verwendung eines ultrarot-empfindlichen Photoelementes unter Vorschalten eines Ultrarotfilters, welches Licht der Wellenlänge $\lambda < 700$ nm ausfiltert. Eine optimale Trennung von Steinen und Kartoffeln durch Lichtreflexion ist also bei Licht hoher Wellenlänge am Übergang zum ultraroten Spektralbereich, d. h. im Bereich der beginnenden Wärmestrahlung, möglich. Ob die Reflexion von reinen Wärmestrahlern im Bereich außerhalb des sichtbaren Lichtes bessere Trenngütegrade ergibt, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten. Mit der beschriebenen Versuchseinrichtung kann diese Frage nicht eindeutig beantwortet werden, da die Empfindlichkeit der verwendeten Photoelemente nicht bis zu diesen hohen Wellenlängen reicht.

Zur Untersuchung der experimentellen Ergebnisse wurde unter Berücksichtigung der doppelten Standardabweichung $2s$ eine Trennschwelle I_T des Photostromes zwischen den Mittelwerten des bei der Lichtreflexion erzeugten Photostromes

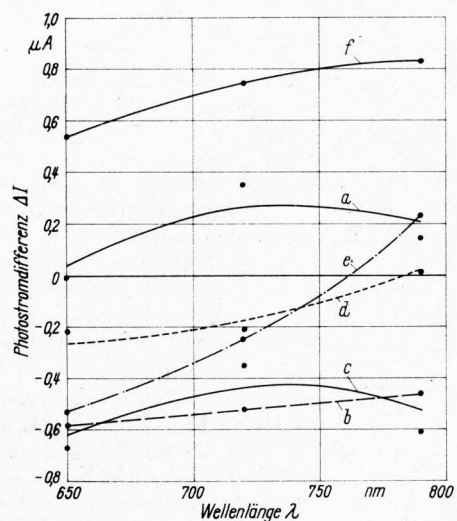


Bild 18. Die Photostromdifferenz ΔI , nach Gl. (3) aus den Meßwerten für die verschiedenen Kartoffel-Bodenkombinationen (Bild 13 bis 17) errechnet, in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichtes.

- a Rata; trockener Sand
- b Datura; feuchter, humoser Sand
- c Datura; feuchter, lehmiger Sand
- d Saskia; feuchter, sandiger Lehm
- e Capella 5; abgelagert
- f entspricht Kurve e in Bild 12

von Kartoffeln und Steinen angenommen und die Schwellenüberschreitungen der Meßwerte der zu trennenden Körper Kartoffeln und Steine ausgezählt. Die prozentualen Werte dieser Schwellenüberschreitungen, die bei einem Trennvorgang Fehltrennungen zur Folge haben, sind in **Bild 19** in Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen. Die hier angenommene Photostromschwelle, die in der Mitte zwischen denjenigen Streubereichen liegt, welche aus der doppelten Standardabweichung berechnet sind, ergibt sich zu

$$I_T = \frac{\bar{x}_K - 2 s_K + \bar{x}_{St} + 2 s_{St}}{2} \quad (4).$$

Die Kartoffeln der Sorte Rata, die auf Sandboden wuchsen, sind durch das Fühlersystem Rotbeleuchtung-Photoelement sehr gut von den Steinen dieses Bodens zu trennen. Die Stromschwelle I_T wurde bei den untersuchten Kartoffeln und Steinen unter den beschriebenen Optimalbedingungen in keinem Fall überschritten (Meßpunkte a). Bei den übrigen Kartoffelsorten beträgt die Schwellenüberschreitung, mit Ausnahme der mit dunklen Flecken behafteten Kartoffeln aus dem lehmigen Sandboden, in keinem Fall mehr als 6%. Die Schwellenüberschreitung oder Fehlerquote der Steine ist bei der angenommenen Schwelle durchweg etwas höher. Vor allem bei den Steinen, die von den mit vielen dunklen Flecken behafteten Kartoffeln der Sorte Datura zu trennen sind, liegt die Fehlerquote zwischen 10 und 15%, Kurve b und c. Die Schwellenüberschreitungen bei Kartoffeln und Steinen aus dem feuchten, sandigen Lehm liegen dagegen unter 7%, Kurve d. Sind die Kartoffeln also gesund und hellfarbig, so ist eine Trennung von Steinen mit Hilfe der Lichtreflexion nach den vorliegenden Untersuchungen auch auf schwereren und sogar schwarzen Böden innerhalb einer Fehlerquote von 5 bis 6% möglich. Nur ungesunde, mit starken dunklen Flecken und Schorf besetzte Kartoffeln lassen sich durch Lichtreflexion schwer von Steinen unterscheiden. Es ist also weniger der Boden, der bis zu einem gewissen Grad an den Kartoffeln haftet, für die Trenngüte maßgebend, als die äußere Beschaffenheit der Kartoffelhaut. Es zeigte sich, daß die Kartoffeln, bei denen Schwellenüberschreitungen auftraten, durchweg minderer Qualität und ungesund waren, so daß der Verlust durch Fehltrennungen, z. B. bei Anbau von Qualitätskartoffeln, geringer wird. Weitere Untersuchungen müssen ergeben, ob evtl. eine Qualitätssortierung von Kartoffeln durch Lichtreflexionsmessung möglich ist.

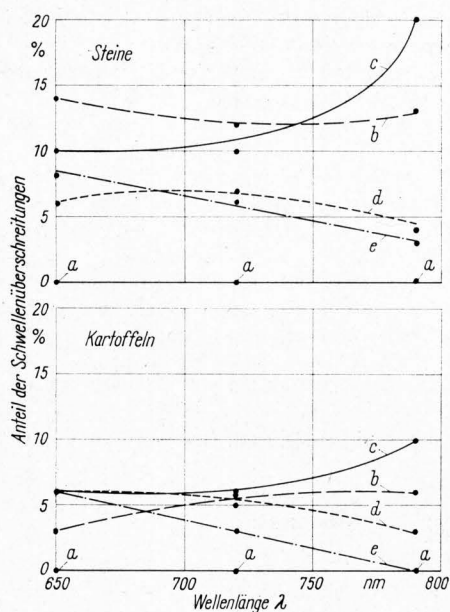


Bild 19. Überschreitungen der Photostromschwelle bei Kartoffeln und Steinen als Maß für die Beurteilung der Trenngüte nach den experimentellen Meßwerten.

- a Rata; trockener Sand
- b Datura; feuchter, humoser Sand
- c Datura; feuchter, lehmiger Sand
- d Saskia; feuchter, sandiger Lehm
- e Capella 5, abgelagert

Zusammenfassung

Die Untersuchungen über die Eignung des beschriebenen Fühlersystems der Reflexion von Lichtstrahlen für die Trennung von Kartoffeln und Steinen haben ergeben, daß eine Trennung unter bestimmten Voraussetzungen innerhalb kleiner Fehlergrenzen möglich ist. Optimale Unterschiede der erzeugten Photoströme bei der Lichtreflexion von Kartoffeln und Steinen ergeben sich, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

1. Bestrahlung der zu trennenden Körper mit dunkelrotem Licht,
2. Verwendung eines ultrarot-empfindlichen Photoelementes, dessen maximale Empfindlichkeit im roten Spektralbereich liegt, und
3. Vorschalten von Farbfiltern, deren maximale Durchlässigkeit ebenfalls im roten Spektrum liegt.

Unter diesen Bedingungen lassen sich saubere, hellfarbige Kartoffeln, die trocken und abgelagert sind, und ebenso gesunde, fleckenfreie Kartoffeln, die auf Sandboden gewachsen sind, mit sehr gutem Trenngütegrad von Steinen trennen. Die Untersuchungen zeigen in diesen Fällen, daß von seiten des Fühlersystems keine Fehltrennungen auftreten. Bei lehmigen und dunklen Böden sowie bei Kartoffeln, deren äußere Haut fleckig und mit Schorf besetzt ist, überschneiden sich die Streubereiche, so daß nach den vorliegenden Versuchen vom Fühler her schon einige Fehltrennungen auftreten. Bei Kartoffeln erfolgen die Überschreitungen der Photostromschwelle meist bei Knollen niederer Qualität, so daß eine Qualitätssortierung von Kartoffeln denkbar ist.

Schrifttum

- [1] Schäfer, E.: Untersuchungen über die Trennung von Kartoffeln und Steinen mit umlaufenden Trennbürsten. Landtechn. Forsch. **11** (1961) H. 6, S. 170/75.
- [2] Röhrs, F.: Trennung von Kartoffeln und Steinen auf einem Gummifingerband mit Bürstenwalzen. Landtechn. Forsch. **14** (1964) H. 4, S. 106/10.
- [3] Schäfer, E.: Trennung von Kartoffeln und Steinen mit geeigneten Bändern. Landtechn. Forsch. **10** (1960) H. 5, S. 131/37.
- [4] Maack, O.: Trennung von Kartoffeln und Steinen nach Rückprallvermögen und Rollwiderstand. Landtechn. Forsch. **7** (1957) H. 4, S. 106/10.
- [5] Maack, O.: Die mechanische Trennung von Kartoffeln und Steinen. Landtechn. Forsch. **7** (1957) H. 3, S. 71/78.
- [6] Baganz, K.: Untersuchungen über die Abscheidung kartoffelähnlicher Fremdkörper. Dt. Agrartechn. **5** (1955) H. 5, S. 162/64.
- [7] Baganz, K.: Zur Frage des Sammelrodens von Kartoffeln bei hohem Beimengungsanteil. Grndl. Landtechn. Heft 12 (1960) S. 25/31.
- [8] Koch, M.: Ein neues Verfahren zum Trennen von Steinen und Kartoffeln mit Hilfe akustischer Impulse. Grndl. Landtechn. Heft 21 (1964) S. 56/65.
- [9] x-rays can sort potatoes from clods and stones. Farm Implement Machinery Rev. **89** (1963) S. 1098/99.
- [10] v. Zabeltitz, Chr.: Über die Trennung von Körpern verschiedener Dichte in einem Fließbett. Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 3. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [11] Batjaev, F. I.: Photoelektrisches Verfahren zum Trennen von Kartoffeln und Beimengungen. Traktory i sel'chozmašiny **35** (1965) Nr. 3, S. 23/26.
- [12] Batjaev, F. I.: Trennung von Kartoffelknollen, Boden und Steinen und anderen Beimengungen durch eine photoelektrische Einrichtung. Traktory i sel'chozmašiny **36** (1966) H. 9, S. 34/37.
- [13] Pohl, R. W.: Einführung in die Physik, Band III. Berlin - Göttingen - Heidelberg: Verlag Springer 1963.
- [14] Westphal, W. H.: Physik. Berlin - Göttingen - Heidelberg: Springer-Verlag 1948.
- [15] Lange, B.: Photoelektrische Meß- und Schaltgeräte. Hauptkatalog 1964, Berlin.