

## Über die Ausnutzung des Sonnenlichtes beim Wachstum der grünen Pflanzen unter natürlichen Bedingungen\*)

Von Prof. Dr. W. NODDACK

und JOSEF KOMOR

Institut für physikalische Chemie  
der Universität Freiburg i. Br.

Inhalt: Einleitung. — I. Die Messung der aufgestrahlten Energie. — II. Das Pflanzenmaterial. — III. Die Bestimmung der aufgespeicherten chemischen Energie. — IV. Die Versuchsergebnisse. — V. Auswertung der Versuchsergebnisse

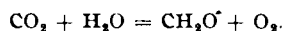
Eingeg. am 4. März 1937

### Einleitung.

Die Assimilation der Kohlensäure durch die grünen Pflanzen unter der Einwirkung des Sonnenlichtes stellt die großartigste photochemische Reaktion dar, die wir kennen. Sie bietet die stoffliche und energetische Grundlage für das gesamte höhere organische Leben. Es hat daher auch nicht an Versuchen gefehlt, den Chemismus dieser Lichtreaktion zu ergründen und ihre Energiebilanz zu erfassen.

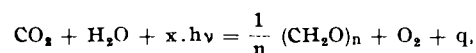
Im Lichte nehmen die grünen Pflanzen Kohlensäure und Wasser auf und stellen daraus Zucker, Stärke und zahlreiche andere organische Verbindungen her; bei diesem Aufbau wird elementarer Sauerstoff frei. Bei Abwesenheit von Licht spielt sich der umgekehrte Vorgang ab: Die organischen Substanzen werden unter Sauerstoffaufnahme abgebaut und Kohlensäure wird frei — die Pflanzen atmen und erhalten also im Dunkeln ihr Leben auf Kosten der verschwindenden organischen Substanz, wie dies die Tiere immer tun.

Da die wichtigsten von der Pflanze gebildeten Substanzen (Zucker, Stärke, Cellulose usw.) die allgemeine Zusammensetzung  $(\text{CH}_2\text{O})_n$  haben und da ferner das Verhältnis Verschwindende Kohlensäure: Auftretender Sauerstoff bei der Assimilation annähernd = 1 ist, lag der Gedanke nahe, daß das bei der Assimilation primär gebildete Produkt vielleicht ebenfalls die Formel  $(\text{CH}_2\text{O})_n$  besitzt, also im einfachsten Falle für  $n = 1$  aus Formaldehyd besteht. Die chemische Gleichung für die Assimilation ließe sich dann folgendermaßen schreiben:



Eine experimentelle Bestätigung für die Entstehung von Formaldehyd bei der Assimilation hat sich bisher nicht erbringen lassen, und ebensowenig konnte die Bildung eines anderen einfachen Primärproduktes nachgewiesen werden, so daß die chemische Seite der Assimilationsreaktion noch völlig im Dunkeln liegt. Etwas besser steht es mit der energetischen Seite dieser Reaktion. Aus dem Befund, daß bei der Assimilation organische Verbindungen von der allgemeinen Formel  $(\text{CH}_2\text{O})_n$  gebildet werden, läßt sich abschätzen, daß die bei der Assimilation wirksame Strahlung eine Arbeit von etwa 120000 cal leisten muß, um 1 Mol C-Atome aus der Kohlensäure in organische Substanz überzuführen. Dieser außerordentlich hohe Energiebetrag macht die Deutung der Assimilationsreaktion noch schwieriger: Wenn man nämlich annimmt, daß die Strahlung im Sinne der Planckschen Quantentheorie in Energiequanten von der Größe  $h\nu$  von den Pflanzen absorbiert wird, so muß zur Reduktion eines Mols C-Atome mindestens 1 Mol  $h\nu$  absorbiert werden. Berechnet man aber die Energie von

1 Mol  $h\nu$  in dem assimilatorisch wirksamen roten Licht, so ergibt sich, daß diese Energie etwa 45000 cal beträgt. Zur Reduktion von 1 Mol C-Atomen sind aber 120000 cal, d. h. die dreifache Energie, notwendig. Schreibt man die Gleichung für die Reaktion der Assimilation in folgender Form:



wobei  $x$  die Zahl der wirksamen  $h\nu$  und  $q$  die bei der Reaktion übrigbleibende Wärmemenge ist, so muß bei optimaler Quantenausbeute (also kleinem  $q$ ) die Zahl  $x = 3$  sein. Da nun aber  $q$  stets einen erheblichen Teil der absorbierten Energie ausmacht, muß  $x = 4$  oder noch größer sein. Nun werden die Strahlungsquanten  $h\nu$  nach unseren Vorstellungen einzeln und unabhängig voneinander absorbiert, und wir kennen keine Lichtreaktion, bei der gleichzeitig 2 oder gar mehr  $h\nu$  zu einer chemischen Umsetzung verwandt werden. Danach müßte also schon der erste photochemische Prozeß bei der Assimilation aus 3—4 Einzelreaktionen bestehen. Über den chemischen Charakter dieser Reaktionen und über ihre Energiebilanz ist noch nichts bekannt.

Dagegen ist die Frage nach dem Anteil des Lichtes, der bei der Assimilation in chemische Energie umgewandelt wird, mehrfach mit Erfolg beantwortet worden. Zuerst beschäftigten sich N. J. C. Müller<sup>1)</sup> und Dellefsen<sup>2)</sup> mit dieser Frage. Sie versuchten den Unterschied zwischen der Lichtabsorption des assimilierenden und des nicht-assimilierenden grünen Blattes zu ermitteln. Da sie aber die Menge der gespeicherten chemischen Energie nicht beachteten, sind ihre Ergebnisse nicht brauchbar. Pfeffer<sup>3)</sup> versuchte als erster die aufgestrahlte Energie mit der gespeicherten chemischen Energie zu vergleichen. Er belichtete ein Oleanderblatt mit vollem Sonnenlicht und maß die während der Belichtung vom Blatt zerlegte Kohlensäure. Eine Messung der strahlenden Energie nahm er nicht selbst vor, sondern benutzte eine Angabe von Pouillet über die auf die Erdoberfläche treffende Sonnenenergie. Pfeffer erhielt aus seinen Messungen das Ergebnis, daß bei der Assimilation des betreffenden Blattes etwa 0,6% der Sonnenenergie in chemische Energie umgewandelt werden. Nach dem Vorbilde von Pfeffer arbeiteten Brown und Escombe<sup>4)</sup>. Sie bestimmten die während der Assimilation verschwindende Kohlensäure, indem sie mehrere Arten von Laubblättern in einem Glaskasten belichteten, und maßen die eingestrahelte Energie mittels eines registrierenden Radiometers. Als „ökonomischen Koeffizienten“ der Strahlung fanden sie bei vollem Sonnenlicht etwa

<sup>1)</sup> N. J. C. Müller, Botanische Untersuchungen 1, 339 [1876].

<sup>2)</sup> Dellefsen, Arbeiten des bot. Inst. in Würzburg 3, 534 [1888].

<sup>3)</sup> Pfeffer, Pflanzenphysiologie 1, 332 [1897].

<sup>4)</sup> Brown u. Escombe, Proc. Roy. Soc., London, Ser. B 76, 29 [1903].

\*) Vorgetragen in der Fachgruppe für Photochemie und Photographische Chemie auf der 49. Hauptversammlung des VDCh. in München am 9. Juli 1936.

0,66 %, bei Schwächung des Sonnenlichtes auf den 12. Teil eine Ausnutzung der Lichtenergie von 4,1 %. Mit einer andern Frage beschäftigte sich O. Warburg<sup>5)</sup>. Da sich aus den Versuchen von Brown und Escombe ergeben hatte, daß mit der Verminderung der Intensität des eingestrahlt Lichtes eine Vergrößerung der Energieausbeute parallel geht, suchte er das Optimum der Energieausbeute zu bestimmen. Er züchtete besonders assimilationstüchtige Kulturen der Alge *Chlorella vulgaris* und belichtete sie monochromatisch mit verschiedenen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums. Die eingestrahlte Energie bestimmte er mit dem Bolometer. Warburg fand, daß die Lichtausbeute mit sinkender Intensität ständig zunimmt. Bei sehr geringen Lichtintensitäten erhielt er Energieausbeuten bis zu 60 %. Als Maß für die gespeicherte chemische Energie benutzte Warburg — ebenso wie Pfeffer und Brown und Escombe — die Abnahme der Kohlensäure im Gasraum der Umgebung.

Wenn man die bisher vorliegenden Versuche zur Messung der Energieausbeute der Strahlung bei der Assimilation überblickt, so fällt auf, daß immer die aus der Umgebung der Pflanzen verschwindende Kohlensäure als Maß für die gespeicherte chemische Energie benutzt wurde. Der Grund hierfür dürfte in der leichten Bestimmbarkeit des Kohlensäuredefizits auf titrimetrischem oder manometrischem Wege liegen. Berechtigt ist aber die genannte Verwendung der Kohlensäureabnahme nur dann, wenn die oben angegebene Gleichung für die Assimilation streng und allein gültig ist. Es muß also erstens jeder verschwundene Molekel  $\text{CO}_2$  genau 1 C-Atom im Zucker oder in der Stärke entsprechen, und es darf zweitens das Licht keine andere chemische Arbeit leisten, als die in der obigen Gleichung angegebene. Nun sind aber beide Forderungen nicht genau erfüllt. Gleichzeitig mit der Assimilation der Kohlensäure findet eine Assimilation von Nitrat statt<sup>6)</sup>, d. h. der Stickstoff der aus dem Boden aufgenommenen Nitrate wird zu Ammoniak oder zu andern Stickstoffverbindungen reduziert. Diese Reaktion verbraucht Energie und bindet einen Teil des assimilierten Kohlenstoffs anders als an Zucker oder Stärke. Dieser anders gebundene Kohlenstoff ist bei der Energiebilanz anders zu werten als der im Saccharid gebundene. Ferner verursacht das Licht mit Sicherheit noch andere Reaktionen in den assimilierenden Pflanzen — genannt seien die Chlorophyllbildung und die Zellteilung —, deren Energiebilanz sich nicht direkt aus der Kohlensäureabnahme abschätzen läßt.

Die Kohlensäureabnahme in der Umgebung der assimilierenden Pflanzen ist also nur ein unsicheres Maß für die Menge der gespeicherten chemischen Energie. Durch Anbringung genau begründeter Korrekturen läßt sie sich im Einzelfall dazu verwenden.

Bei der Suche nach einem besseren Maß für die in den Pflanzen gespeicherte chemische Energie ergab sich der Plan, diese Energie durch die Bestimmung der **Verbrennungswärme** zu messen. Wenn bei der Assimilation aus gasförmiger Kohlensäure und flüssigem Wasser unter der Wirkung des Lichtes Verbindungen und Formen von bestimmtem Energieinhalt entstehen, so muß sich der gesamte Energieinhalt in Form von Verbrennungswärme wiederfinden, wenn man die bei der Assimilation entstandenen Gebilde in der Calorimeterbombe verbrennt und sie so wieder in Wasser und Kohlensäure umwandelt. Auch der organisch gebundene Stickstoff und die mineralischen Bestandteile der Pflanzen reagieren bei einer derartigen Verbrennung in eindeutiger, bekannter Weise, so daß der Anteil ihrer Reaktionen an der Energiebilanz leicht ermittelt werden kann.

<sup>5)</sup> O. Warburg: Katalytische Wirkungen der lebendigen Substanz, Springer, Berlin 1928.

Bei den bisherigen Untersuchungen über die Energieausbeute bei der Assimilation wurden einzelne Pflanzenarten oder Pflanzenteile unter künstlich hergestellten Bedingungen kurze Zeit beobachtet. Man hat mehrfach versucht, aus den erhaltenen Resultaten Schlüsse auf das Verhalten der Pflanzen unter natürlichen Bedingungen zu ziehen.

Es schien daher von Interesse, die assimilatorische Energieausbeute an einer größeren Zahl von Pflanzenarten, die unter ihren natürlichen Bedingungen wuchsen, wirklich zu bestimmen. In der vorliegenden Untersuchung werden die ersten Versuche in dieser Richtung, die Arbeitsweise und die Ergebnisse kurz beschrieben.

## I. Die Messung der aufgestrahlten Energie.

Zur summarischen Messung der von der Sonne, von den Wolken und vom Himmel aufgestrahlten Energie wurden eine Thermosäule, ein Galvanometer und ein Quecksilbercoulometer benutzt. Die Thermosäule lieferte unter dem Einfluß der Strahlung einen Strom, dessen Augenblickswert am Galvanometer abgelesen werden konnte, während das Coulometer den Integralwert des Stromes über längere Zeit lieferte.

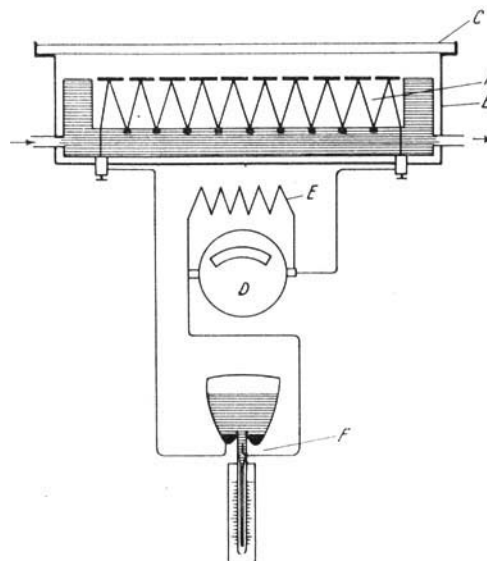


Abb. 1.

Anordnung zur Messung der Energie der Sonnenstrahlung.

**1. Die Thermosäule:** Nach längeren Vorversuchen wurde für die Thermosäule die in Abb. 1 wiedergegebene Form A gewählt. Die Säule bestand aus 100 hintereinandergeschalteten Elementen aus Eisen-Konstantan von einer Drahtdicke von 0,5 mm. Die Elemente waren auf einer Fläche von 10 cm × 10 cm angeordnet. Auf der oberen, der Strahlung zugewandten Lötstelle jedes Elements saß ein Kupferblech von 1 cm<sup>2</sup> Fläche und 0,05 mm Dicke. Die Bleche waren so ausgerichtet, daß sie einander nicht berührten und möglichst die ganze Fläche von 10 cm × 10 cm bedeckten. Die Oberseite der Bleche war mit einer Aufschlammung von Ruß in Gelatine-lösung geschwärzt. Die unteren Lötstellen der Thermoelemente waren durch eine Lackschicht isoliert und in kleinen Kupferblöcken befestigt. Diese Blöcke tauchten in ein Wasserbad, das den ganzen Boden der Säule und ihre Seiten bis zur Höhe der geschwärzten Bleche umgab. Während der Versuche wurde ein Wasserstrom bekannter Temperatur durch das Bad geleitet. Zum Schutz gegen Luftzug und Verunreinigungen stand die Thermosäule bei den Untersuchungen im Freien in einem Kasten aus Zinkblech B, der oben durch eine polierte Glasscheibe C abgeschlossen war.

Die Thermosäule wurde im Laboratorium mit Hilfe der Hefnerkerze geeicht und an den von Gerlach<sup>6)</sup> ermittelten Energiewert der Meterkerze angeschlossen. 1 Meterkerze =  $22,6 \cdot 10^{-8}$  cal/cm<sup>2</sup>.s lieferte bei der beschriebenen Thermosäule eine Klemmspannung von  $1,61 \cdot 10^{-4}$  V  $\pm$   $0,03 \cdot 10^{-4}$  V bei einer Kühlwassertemperatur von 14,0°. Da die Sonnenstrahlung im Sommer mittags mehrere hundert energetische Meterkerzen beträgt, mußte die Thermosäule auf die Linearität ihrer Klemmspannung im benutzten Intensitätsbereich geprüft werden. Diese Untersuchung wurde in der Weise vorgenommen, daß eine hochkerzige Glühlampe (2000 opt. Kerzen) im Laboratorium so weit von der Thermosäule entfernt aufgestellt wurde, daß ihre Strahlung an der Thermosäule gerade die Klemmspannung der Meterkerze erzeugte. Dann wurde die Glühlampe der Säule genähert und das Anwachsen der Klemmspannung verfolgt. Unter Zugrundelegung des Entfernungsgesetzes wurde für den Bereich von 1 bis 200 energetischen Meterkerzen eine Eichentabelle aufgestellt. Aus dieser Tabelle ergab sich, daß die Säule mit wachsender Intensität ein wenig empfindlicher wird. Bei einer Strahlungsintensität von 100 energetischen Meterkerzen (die etwa der mittleren Ortshelligkeit entspricht) beträgt diese Zunahme der Klemmspannung gegenüber der Eichung mit der Hefnerkerze 3,6%, so daß bei den Assimilationsversuchen im Freien mit einer Klemmspannung von  $1,67 \cdot 10^{-4}$  V je Meterkerze gerechnet wurde.

Da die Thermosäule die gesamte Himmelsstrahlung bei wechselndem Sonnenstande richtig messen sollte, mußte ferner geprüft werden, ob sie dem Cosinusetz der Beleuchtung folgte. Zu diesem Zwecke wurde senkrecht über der waagerecht aufgestellten Säule im Abstande von einigen Metern eine Glühlampe angebracht und die erhaltene Klemmspannung  $e$  gemessen. Dann wurde die Lampe bei gleichem Abstand von der Säule so verschoben, daß ihr Licht unter dem Einfallswinkel  $\alpha$  auf die Säule fiel. Die Säule sollte dann die Klemmspannung  $e \cdot \cos \alpha$  besitzen. Die Beobachtung zeigte, daß bei Einfallswinkeln zwischen 0° und 70° ein geringes, fast lineares Zurückbleiben des Ausschlags gegenüber dem Cosinusetz eintrat. Bei einem Einfallswinkel von 70° war die Klemmspannung um 2% kleiner als berechnet.

**2. Das Galvanometer.** Als Strommesser diente in der Meßanordnung ein Amperemeter D, das im Nebenschluß des Widerstandes E lag. Die Empfindlichkeit der Meßanordnung wurde so reguliert, daß bei voller Mittagshelligkeit im Juni ein Ausschlag von etwa  $\frac{1}{3}$  der Skala erreicht wurde. Dann ließ sich die Ortshelligkeit bis auf 0,2% ablesen. Bemerkte sei, daß diese Ortshelligkeit im Juni um 12 h mittags an der später beschriebenen Stelle in Günterstal bei wolkenlosem Himmel etwa 280 energetische Meterkerzen betrug. Es wurden also auf 1 cm<sup>2</sup> waagerechter Fläche in der min 0,38 cal aufgestrahlt. Vom Morgen gegen Mittag stieg die Ortshelligkeit i. allg. an, am Nachmittag fiel sie ab. An bedeckten und regnerischen Tagen betrug sie manchmal mittags nur wenige Prozent des zu erwartenden maximalen Wertes. Da die Beobachtungen der Ortshelligkeit und ihre Beziehungen zur Solarkonstante und zum Trübungsgrad der Atmosphäre bisher mehr meteorologischen Charakter haben und ihre Bewertung für das Pflanzenwachstum in den Einzelheiten noch nicht erkannt ist, sollen Einzeldaten hier nicht gebracht werden.

**3. Das Coulometer.** Bei der Messung der aufgestrahlten Energie handelte es sich im vorliegenden Fall weniger darum, Augenblickswerte dieser Energie zu erhalten. Es sollte vielmehr eine Summation der Strahlungsenergie über Wochen und Monate ausgeführt werden. Für derartige Messungen erwies sich ein Quecksilbercoulometer (F) geeignet. Aus einem der gebräuchlichen Stia-Zähler wurde der Nebenschlußwiderstand entfernt, so daß der gesamte Strom durch die elektrolytische Zelle fließen mußte. Der Thermostrom zersetzte die Kalium-Quecksilberjodid-Lösung und schied an der Kathode Quecksilber aus, das sich in der Capillare des Stia-Zählers ansammelte. Die Höhe der Quecksilbersäule war dann ein Maß für die eingestrahlte Energie. Zur genauen Messung des Verhältnisses Eingestrahlte Energie : Höhe der Quecksilbersäule wurde folgender Weg eingeschlagen:

Die Versuchsanordnung (Abb. 1) wurde in solche Entfernung von einer hochkerzigen Glühlampe gesetzt, daß die

Thermosäule gerade 100 energetische Meterkerzen erhielt (über den Anschluß an die Hefnerkerze vgl. Abschnitt I, 1). Dann wurde beobachtet, um wieviel Teilstriche das Quecksilber in der Röhre des Coulometers während einer längeren Zeit stieg. Es zeigte sich, daß während einer Belichtungszeit von 44 h die Quecksilbersäule um 3,75 Teilstriche anstieg. Also ergab eine Energieeinstrahlung von  $100 \cdot 22,6 \cdot 10^{-8} \cdot 44 \cdot 60 \cdot 60$  cal = 357,98 cal einen Anstieg von 3,75 Teilstrichen. 1 Teilstrich des Coulometers entsprach also  $95,50$  cal pro cm<sup>2</sup> an aufgestrahlter Energie. Da die Netzspannung, an der die verwendete Glühlampe hing, Schwankungen unterworfen war, erschien uns der erhaltene Wert noch nicht sicher genug. Es wurde daher die belichtete Thermosäule durch einen Akkumulator ersetzt, von dem die Spannung abgehuntet wurde, die die Thermosäule gibt, wenn sie mit 100 energetischen Meterkerzen bestrahlt wird. Der Strom wurde wieder durch das Galvanometer geleitet. Bei dieser Versuchsanordnung ergab sich, daß 1 Teilstrich des Coulometers  $96,2 \pm 0,4$  cal an aufgestrahlter Energie entspricht. Dieser Wert ist um etwa 0,7% größer als der durch direkte Belichtung gewonnene. Da er aber von den genannten Schwankungen der Netzspannung frei ist, erschien er uns sicherer und wurde bei der Auswertung der Assimilationsversuche benutzt.

**4. Aufstellung der Meßanordnung.** Die in Abb. 1 wiedergegebene Meßanordnung wurde in einem sehr sonnigen Garten am Niederweilersbacher Weg (47° 58' n. Br., 7° 52' ö. L.) in Günterstal bei Freiburg im Br. aufgestellt<sup>7)</sup>. Bei der Aufstellung im Freien mußte die Thermosäule gegen Luftzug und Verunreinigung durch eine Glasplatte geschützt werden. Da diese Glasplatte aber einen Teil der Sonnenstrahlung (vor allem das Ultrarot und Ultraviolett) absorbiert und von allen Wellenlängen einen Teil reflektiert, war zu erwarten, daß die Thermosäule bei der Bestrahlung ohne Glasplatte einen größeren Thermoeffekt geben würde als mit Glasplatte. Dies trat auch stets ein, wenn die mit den Auffangblechen austemperierte Glasplatte für kurze Zeit über die Thermosäule gebracht wurde. Der Energieverlust betrug dann etwa 30%. Bei länger dauernden Versuchen mit Glasplatte stieg aber der Thermoeffekt wieder an und konnte sogar den Effekt ohne Glasplatte übertreffen. Diese Beobachtung läßt sich folgendermaßen erklären: Die Glasplatte nimmt etwa 30% der aufgestrahlten Energie weg, und zwar dürfte sie im Mittel 10% reflektieren und 20% absorbieren. Für die Thermosäule bleiben zuerst nur 70% der strahlenden Energie übrig; diesen 70% entspricht der verminderte Ausschlag des Galvanometers. Allmählich erwärmt sich aber die Glasplatte durch die von ihr absorbierte Energie und beginnt nun ihrerseits langwelliges Ultrarot ausstrahlen. Von dieser Strahlung fällt ein Teil direkt auf die Auffangbleche der Säule und vergrößert so den Thermoeffekt. Ein anderer Teil der von der Glasplatte ausgesandten Strahlung wird von der Luft zwischen der Glasplatte und den Auffangblechen absorbiert und dient so ebenfalls zur Erwärmung der Bleche und damit zur Vergrößerung des Thermoeffektes. Schließlich stellt sich ein stationärer Zustand her, bei dem die Temperatur der Auffangbleche und damit der Thermoeffekt durch die Intensität der Strahlung, durch die Dimensionen der Säule und durch den Abstand zwischen der Glasplatte und den Auffangblechen gegeben ist. Durch Versuche stellten wir fest, daß sich bei Intensitäten, die der mittleren Ortshelligkeit entsprechen, der stationäre Zustand in einigen Minuten einstellt. Durch Veränderung des Abstandes zwischen der Glasplatte und den Auffangblechen kann man es leicht erreichen, daß der Thermoeffekt mit Glasplatte kleiner, ebenso groß oder größer wird als der ohne Glasplatte. Bei den Versuchen im Freien wählten wir daher den Abstand so, daß bei mittlerer Ortshelligkeit der Thermoeffekt mit Glasplatte im stationären Zustand ebenso groß war wie ohne Glasplatte. Es brauchte dann keine Korrektur der Energiemessung wegen der Bedeckung der Thermosäule mit der Glasplatte vorgenommen zu werden. Das Verfahren hat aber zur Folge, daß die Thermosäule bei voller Mittagshelligkeit etwa 3% zuviel Energie mißt, während ihre Angabe in den späten Nachmittagsstunden um 2–3% zu gering ist. Durch den unregel-

<sup>7)</sup> Frau Dr. A. Sämisch sind wir für die Überlassung der Gartenflächen, für ihre Hilfe bei der Kontrolle der Meßanordnung und für die Bestimmung der Pflanzenarten zu großem Danke verpflichtet.

<sup>6)</sup> W. Gerlach, Physik. Z. 14, 577 [1913].

mäßigen Wechsel von hellen und dunklen Tagen dürfte ein Fehler von  $\pm 2\%$  bei der Energiemessung entstehen.

Bei der Aufstellung wurde darauf geachtet, daß während der ganzen Zeit des wirksamen Tageslichtes sowohl auf die Meßanordnung als auch auf die nahe dabei liegenden Versuchsf Flächen kein Schatten von Bäumen und Gebäuden fiel. Die Thermosäule wurde in ihrem Schutzkasten auf einem 2 m hohen Pfahl befestigt. Darunter befanden sich unter einem Schutzdach das Galvanometer und das Coulometer. Unmittelbar neben der Meßstelle war ein Hydrant, der die Thermosäule während der ganzen Versuchszeit mit Kühlwasser versorgte. Die Wassertemperatur schwankte während der Versuchszeiten zwischen  $14,4^\circ$  und  $15,3^\circ$ . Da sie bisher nicht registriert wurde, dürfte diese Schwankung die Energiemessung mit einem Fehler von  $\pm 1\%$  belasten. Die Ablesung der Quecksilbersäule des Coulometers wurde täglich vorgenommen, ebenso wurde die Schutzplatte der Thermosäule täglich gesäubert.

## II. Das Pflanzenmaterial.

**1. Die Versuchsf Flächen.** Als Wachstumsflächen wurden bei den bisherigen Versuchen zwei Rasenstücke gewählt, die nahezu horizontal in der Nähe der Meßstelle lagen. Die eine Fläche maß  $9\text{ m}^2$  und besaß einen helleren, etwas sandigen Boden (Fläche I). Die andere maß  $74\text{ m}^2$  und hatte einen dunklen, fruchtbaren Gartenboden (Fläche II). Die Flächen wurden vor Beginn der Versuche vom Gärtner von Hand gemäht und das abgemähte Gras sorgfältig entfernt. Während der Versuchszeit wurden die Rasenflächen in der üblichen Weise mit Wasser versehen. Der Versuch wurde beendet, wenn die inzwischen gewachsenen Pflanzen etwa 90% des Bodens bedeckten (vgl. II, 3). Dann wurde wiederum von Hand gemäht und das geschnittene Gras gesammelt und gewogen. Von der gesamten Menge des Frischgrases wurde ein Teil abgenommen und für die Messung der Verbrennungswärme präpariert.

**2. Die Pflanzenarten.** Die unter 1. beschriebenen Rasenflächen waren gewählt worden, um für die ersten Versuche zur Messung der Strahlungsausnutzung bei der Assimilation unter natürlichen Bedingungen einen Mittelwert über recht viele Pflanzenarten zu bekommen.

In der folgenden Tabelle ist eine Übersicht der Pflanzenarten beider Flächen gegeben.

### Fläche I.

a) Gräser, auf 60% der Gesamtmenge geschätzt:

<i>Holcus lanatus</i>	Wolliges Honiggras
<i>Phleum pratense</i>	Thimoteusgras
<i>Nardus</i>	Borstengras
<i>Bromus mollis</i>	Trespe
<i>Agrostis alba</i>	Weißes Strausgras

b) Rotklee, auf 20% der Gesamtmenge geschätzt.

c) Wiesenblumen, auf 20% der Gesamtmenge geschätzt:

<i>Alchemilla vulgaris</i>	Frauenmantel
<i>Galium saxatile</i>	Labkraut
<i>Ranunculus repens</i>	Hahnenfuß
<i>Vicia angustifolia</i>	Schmalblättrige Wicke
<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume
<i>Plantago major</i>	Großer Wegerich
<i>Brunella vulgaris</i>	Kleine Braunelle
<i>Stellaria media</i>	Vogelmiere
<i>Hypericum humifusum</i>	Liegendes Hartheu
<i>Sonchus arvensis</i>	Ackergänsedistel
<i>Crepis virens</i>	Pippau
<i>Chrysanthemum leucanthemum</i>	Margerite
<i>Bellis perennis</i>	Maßliebchen
<i>Taraxacum officinale</i>	Löwenzahn.

### Fläche II.

a) Gräser, auf 80% der Gesamtmenge geschätzt, dieselben Arten wie auf Fläche I.

b) Rotklee, auf 10% der Gesamtmenge geschätzt.

c) Wiesenblumen, auf 10% der Gesamtmenge geschätzt, die gleichen Arten, wie auf Fläche I, außerdem:

<i>Cichorium intybus</i>	Wegwarte.
--------------------------	-----------

Entsprechend der verschiedenen Bodenbeschaffenheit ist auch die Häufigkeit der verschiedenen Pflanzenarten auf beiden Flächen verschieden.

**3. Die Bodenbedeckung.** Das auf die Versuchsf Flächen gestrahlte Tageslicht fällt wegen der unvollkommenen Bedeckung des Bodens nur zum Teil auf die Pflanzen, ein Teil trifft den zwischen den Pflanzen sichtbaren Untergrund. Dieser absorbiert seinen Strahlungsanteil nicht vollkommen, sondern reflektiert ihn teilweise wieder auf die Pflanzen. Zur genauen Bestimmung der Lichtausnutzung müssen daher die Bodenbedeckung und das Reflexionsvermögen des Untergrundes berücksichtigt werden.

Bezeichnet man die Menge der Strahlung mit  $I$ , die Größe der angestrahlten Fläche mit  $F$ , die Bodenbedeckung durch die Pflanzen mit  $b$  und das Reflexionsvermögen des Bodens mit  $r$ , so fällt die Lichtmenge  $b \cdot I \cdot F$  direkt auf die Pflanzen, während auf den Boden  $(1-b) \cdot I \cdot F$  kommt. Die vom Boden reflektierte Lichtmenge ist dann  $(1-b) \cdot r \cdot I \cdot F$ .

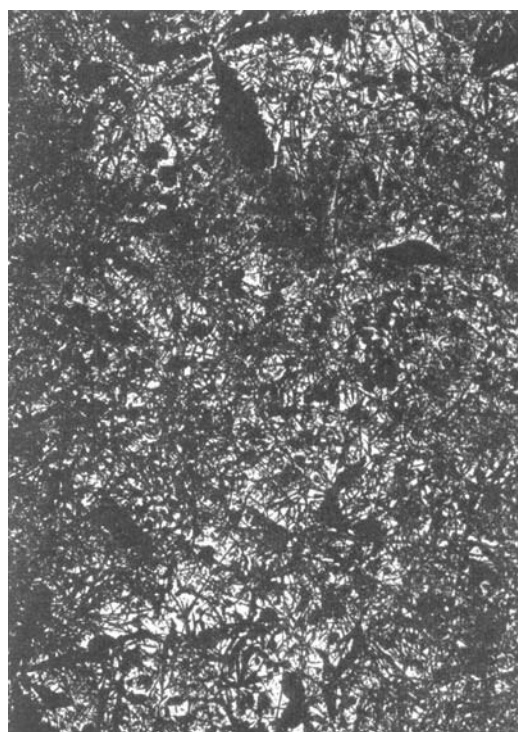


Abb. 2.

Bedeckungsaufnahme hinter Grünfilter,  
2 mal umkopiert, Pflanzen schwarz, Boden hell.

Von dieser Lichtmenge trifft der Anteil  $b(1-b) \cdot r \cdot I \cdot F$  die Pflanzen von der Unterseite, so daß sie insgesamt die Lichtmenge

$$b \cdot I \cdot F [1 + (1-b)r]$$

erhalten. Bei dieser Art der Berechnung wird angenommen, daß der Boden diffus reflektiert. Dies trifft mit großer Annäherung zu. Es wird ferner keine Rücksicht auf mehrfache Reflexion des Lichtes zwischen Boden und Pflanzen genommen. Auch diese Vereinfachung ist hier zulässig, da das Reflexionsvermögen des Bodens klein ist.

Versuche zur Messung des Reflexionsvermögens des Bodens ergaben, daß für den dunklen Untergrund der Fläche II  $r = 0,08$  ist. Der hellere sandige Boden der Fläche I ergab  $r = 0,15$ .

Die Bedeckung  $b$  nimmt im Laufe eines jeden Versuches zu. Es zeigte sich, daß sie zu Beginn etwa 0,5 war und

dann annähernd linear zunahm. Bei einer Bedeckung von 0,9 wurden die Versuche abgebrochen, da bei weiterem Wachstum der Pflanzen eine merkliche gegenseitige Überdeckung eintritt. Zur Messung der Bedeckung wurde folgender Weg eingeschlagen:

Die Versuchsflächen wurden alle 2 bis 3 Tage photographiert, und zwar aus dem Abstände von 3 m und senkrecht zur Fläche. Als Aufnahmeplatte wurde eine hart arbeitende Kontrastplatte gewählt und die Aufnahme hinter einem Grünfilter (Durchlässigkeit 560—500 m $\mu$ ) gemacht. Bei dieser Aufnahme bildeten sich die Pflanzen, die das grüne Licht reflektierten, dunkel ab, während der Untergrund hell blieb. Durch zweimaliges Umkopieren des Negativs mit hart arbeitenden Emulsionen gelang es, von ihm eine Reproduktionsplatte herzustellen, auf der alle Pflanzenteile tief schwarz sind, während der Boden glasklar erscheint. In Abb. 2 ist eine derartige Reproduktion wiedergegeben, die von der Fläche I 10 Tage nach Beginn des Versuchs aufgenommen wurde und einer Bedeckung von 72% entspricht.

Die im Abstände von mehreren Tagen fortlaufend wiederholten Aufnahmen der Bedeckung ergaben eine ständige Zunahme des bedeckten Anteils der Flächen.

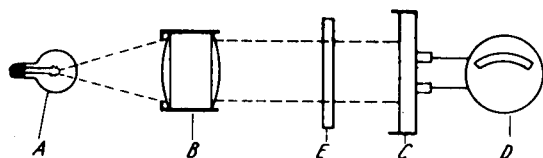


Abb. 3.

Anordnung zur Auswertung von Bedeckungsaufnahmen.

Die quantitative Bestimmung des bedeckten Anteils wurde in folgender Weise ausgeführt (vgl. Abb. 3): Das Licht einer Punktlanpe A wurde durch einen Kondensor B parallel gemacht und fiel dann auf eine Photozelle C von 11,3 cm<sup>2</sup> wirksamer Fläche. In dem Stromkreis der Photozelle lag das Galvanometer D. Wurde nun in den Gang der Lichtstrahlen bei E eine ausfixierte photographische Platte gestellt, die einem völlig unbedeckten Boden entsprechen sollte, so ergab das Galvanometer der Zelle einen Ausschlag von x Skalensteilen.

Wurde die ausfixierte Platte durch eine Bedeckungsaufnahme (vgl. Abb. 2) ersetzt, so zeigte das Galvanometer einen kleineren Ausschlag y. Da die bedeckten Teile auf der Platte praktisch undurchsichtig waren, ergibt sich für die Bedeckung:

$$b = 1 - y/x.$$

Die Werte der Bedeckung b wurden für jede Fläche verfolgt und nach Beendigung der Versuche auf graphischem Wege ein Mittelwert gebildet. Dieser Mittelwert lag immer zwischen 0,7 und 0,8. Er wurde bei der Auswertung der Energiebilanz benutzt.

### III. Die Bestimmung der aufgespeicherten chemischen Energie.

**1. Die Trocknung der Pflanzen.** Nach dem Arbeitsprogramm sollten die gewachsenen Pflanzen möglichst unverändert im Calorimeter verbrannt werden. Diesem Plan stellten sich aber verschiedene Schwierigkeiten entgegen, die hauptsächlich in der Sperrigkeit und schlechten Verbrennbarkeit des frischen Pflanzenmaterials begründet waren und die erst schrittweise überwunden werden konnten. So begannen wir die ersten Versuche mit getrockneten Pflanzen. Das geerntete Frischgras, das meist mehrere Kilogramm wog, wurde möglichst genau gewogen und dann ein Teil von etwa 100 g abgezweigt und getrocknet. Da bei längerem Lagern

ein Abbau der organischen Substanzen und damit eine Abnahme der chemischen Energie eintritt, mußte die Trocknung möglichst schnell vorgenommen werden.

Nach einigen Vorversuchen erwies sich folgende Arbeitsweise als zweckmäßig:

Eine gewogene Menge des Frischgrases (etwa 100 g) wurde auf einer Porzellanscheibe ausgebreitet und so in einen großen mit Chlorcalcium beschickten Exsiccator gebracht. Dann wurde evakuiert und 6 h bei 15° getrocknet. Danach wurde das Chlorcalcium durch Phosphorpentoxyd ersetzt und im Vakuum nochmals 6 h getrocknet. Von Zeit zu Zeit wurden gewogene Proben des Grases auf ihren Gewichtsverlust untersucht. Nach 12 h war die Trocknung so weit fortgeschritten, daß 3 weitere Stunden Trocknung bei 1 g einen Gewichtsverlust von weniger als 0,2 mg ergaben. Das so energisch getrocknete Gras läßt sich leicht zu Pulver zerreiben und ist sehr hygroskopisch. Sein Aschengehalt lag zwischen 15 und 18%. Der Wasserverlust des Frischgrases betrug zwischen 70 und 90%.

Neben den Versuchen, die eine möglichst vollständige Entwässerung der Pflanzen bezweckten, wurden auch Untersuchungen ausgeführt, bei denen dem Frischgras nur ein Teil des Wassers entzogen wurde. Für diese Versuche genügte meist eine Trocknung im Vakuum über Chlorcalcium (vgl. III, 3). Die Bestimmung des Wasserverlustes erfolgte einmal durch die Gewichtsabnahme der Pflanzen, zum andern durch die Bestimmung des Aschengehaltes, der mit zunehmender Trocknung größer wurde.

**2. Die Bestimmung der Verbrennungswärme.** Die Verbrennungswärme der Grassubstanz wurde in einem der gebräuchlichen Calorimeter bestimmt<sup>8)</sup>. Der Wasserwert wurde durch die Verbrennung einer gewogenen Menge von reiner Salicylsäure (Verbrennungswärme 5237 ± 1 cal je g) ermittelt. Schon die ersten Versuche zeigten, daß die reine, zu Tabletten gepreßte, trockne Grassubstanz nur unvollkommen verbrannt. Daher wurde sie bei weiteren Versuchen mit der 10fachen Menge Salicylsäure gemischt, die Mischung gepreßt oder geschmolzen und dann verbrannt. Da nur die geschmolzenen Mischungen reproduzierbare Resultate gaben und die Erhitzung der Mischung auf 160° bedenklich erschien, verließen wir diese Methode und verwandten als Anreger nach dem Vorschlage von W. A. Roth Paraffinöl. Das getrocknete Gras wurde in kleinen Stücken oder als Pulver in das Paraffinöl gerührt und die Mischung verbrannt. Diese Methode arbeitete einwandfrei. Sie ergab bei Verbrennung von 60—80 mg Grassubstanz bei zahlreichen Versuchen einen mittleren Fehler von ± 1,4%, mit dem wir uns bei den bisherigen Versuchen begnügten. Von der gemessenen Verbrennungswärme mußten die Verbrennungswärmen des zugesetzten Paraffinöls und des zur Zündung benutzten Eisendrahts abgezogen werden. Dann stellte die Verbrennungswärme der Grassubstanz — unter Berücksichtigung der unter III, 3 angeführten Korrekturen — die von den Pflanzen bei der Assimilation gespeicherte chemische Energie dar.

**3. Korrekturen an der Verbrennungswärme.** Bei der bisherigen Beschreibung der Arbeitsmethode wurde vorausgesetzt, daß die von den Pflanzen während der Assimilationsperiode gespeicherte chemische Energie ausschließlich in den Blättern, Blüten und Stielen sitzt, die beim Mähen gewonnen werden. Diese Voraussetzung trifft nicht ganz zu. Ein Teil der chemischen Energie wandert in die Wurzeln und entzieht sich so der direkten Bestimmung. Bei Pflanzen, die aus Samen gezogen werden oder die während der Belichtungszeit Wurzelknollen bilden, kann diese abgewanderte Energie

<sup>8)</sup> Vgl. F. Kohlrausch: Praktische Physik, S. 263, Verlag Teubner, Berlin 1935.



einen erheblichen Teil der gesamten ausmachen; dagegen konnte man annehmen, daß sie bei ziemlich alten Rasenflächen mit ausgebildeten Wurzeln nur einen geringen Teil der gesamten, während der Bestrahlung neu zukommenden, chemischen Energie bildet.

Beobachtungen an einzelnen der untersuchten Pflanzen zeigten, daß sich allmählich neue Wurzelfasern bilden, während alte absterben oder abgefressen werden. Dieser durch Bakterien und Tiere verursachte Abgang hätte auch ein Mitverbrennen von Wurzeln illusorisch gemacht. Wir schätzen, daß die gesamte, während eines Versuchs in die Wurzeln abgewanderte Energie in unserem Falle kleiner als 2% ist und erhöhen die gemessene Verbrennungswärme daher um 2%. Eine genauere Bestimmung dieses Anteils unter Berücksichtigung des in den Wachstumsflächen vorhandenen tierischen Lebens soll später erfolgen.

Von größerer Bedeutung ist eine andere Korrektur, die sich durch die energische Trocknung des Frischgrases einstellt. In den Zellen der lebenden Pflanzen sind die organischen Stoffe und die Salze teils in fester Form, teils in gelöstem Zustande vorhanden. Bei der sehr energischen Trocknung der Pflanzen werden die gelösten Stoffe ausgeschieden, und ihr Energieinhalt wird verändert. Weiterhin wird bei der Trocknung eine chemische Änderung — und damit ebenfalls eine Änderung des Energiegehalts — bei manchen hochorganisierten Verbindungen eintreten. Schließlich werden leichtflüchtige Stoffe, wie z. B. ätherische Öle usw., verdampfen und für die Verbrennung verlorengehen. Das während der Trocknung verdampfte Wasser wird zu einem Teil aus „Lösungswasser“, zum andern aus „Bindungswasser“ bestehen. Das Lösungswasser wird fast restlos entfernt, und seine Verdampfungswärme aus den capillaren Zellgebilden wird eine andere und wohl größere sein als die Kondensationswärme, die in der Bombe abgegeben wird. Das Bindungswasser der hydratisierten organischen Substanzen wird beim Trocknen ebenfalls zum Teil abgegeben werden, und damit wird ein Teil der chemischen Energie der feuchten Substanz verlorengehen. Schließlich werden sich die aus dem Boden entnommenen Salze nach der Verbrennung nicht alle in der Bindungsform wiederfinden, die sie im Boden hatten.

Die meisten dieser bei der Trocknung eintretenden Energieänderungen werden in der Richtung einer Energieabnahme gehen, so daß bei der Verbrennung weniger chemische Energie bestimmt wird, als in den Pflanzen vorhanden war.

Für eine genaue Bestimmung der gesamten gespeicherten Energie ist die Kenntnis des bei der Trocknung verlorengegangenen Anteils notwendig. Ein großer Teil dieser Korrekturen hätte sich erübrigt, wenn es möglich wäre, das frisch gemähte Gras unmittelbar zu verbrennen. Dies war bei den ersten Versuchen ohne Zusatz oder bei Zusatz von Salicylsäure nicht zu erreichen. Später, als wir Paraffinöl als Hilfssubstanz verwandten, ließen sich die Pflanzen auch schon bei höherem Wassergehalt vollständig verbrennen. Wir stellten daher eine Serie von Versuchen an, indem

wir zunächst völlig getrocknete Pflanzen verbrannten, dann solche, die noch 5, 10 und 20% des bei der Trocknung (vgl. III, 1) entfernbaren Wassers enthielten. Die gemessenen Verbrennungswärmen wurden auf die Trockensubstanz umgerechnet. Dabei ergab sich, daß die Verbrennungswärme je Gramm Trockensubstanz mit steigendem Wassergehalt zuerst merklich, dann langsamer zunimmt und sich asymptotisch einem Grenzwert nähert. Die Versuche sind noch nicht abgeschlossen, sie zeigen aber bereits, daß dieser Grenzwert um 5—6% höher liegen wird als der Wert für das völlig getrocknete Material. Bei der Aufstellung der Energiebilanz wurde daher die gemessene Verbrennungswärme um 6% vergrößert.

Verhältnismäßig leicht abzuschätzen ist die Korrektur für die Verbrennung des Ammoniakstickstoffs, der in der Bombe zu Salpetersäure verbrennt. Da der Stickstoffgehalt der verwendeten Pflanzen klein ist, spielte diese Korrektur bei den bisherigen Messungen keine Rolle. Ebenso wenig brauchte wegen ihrer Kleinheit die chemische Änderung in Betracht gezogen werden, die die Asche gegenüber den aus dem Boden entnommenen mineralischen Bestandteilen aufweist. Insgesamt wurde also an der gemessenen Verbrennungswärme eine Korrektur von +8% angebracht.

Tabelle 1.

Fläche =	I. Versuchsreihe 25. 4. — 14. 5. 36 28,0 Skalenteile am Coulometer = 2693,6 cal/cm <sup>2</sup>		II. Versuchsreihe 14. 5. — 13. 6. 36 40,3 Skalenteile am Coulometer = 3876,9 cal/cm <sup>2</sup>	
	9 m <sup>2</sup>	74 m <sup>2</sup>	9 m <sup>2</sup>	74 m <sup>2</sup>
1. Frischgras in kg .....	1,510	13,950	2,640	25,614
2. H <sub>2</sub> O-Verlust in % von 1	79,0	76,8	89,0	85,0
3. Trockengas in kg .....	0,317	3,24	0,290	3,84
4. Verbrennungswärme bestimmt .....	62,0 mg = 218 cal 68,5 mg = 238 cal 58,2 mg = 200 cal 70,8 mg = 258 cal		63,5 mg = 221 cal 58,0 mg = 200 cal 72,1 mg = 256 cal 65,2 mg = 230 cal	
5. Mittlere Verbrennungswärme je g Trockengras ....	3,52 kcal		3,51 kcal	
6. Gesamte Verbrennungswärme von 3 .....	1,12 · 10 <sup>5</sup> kcal	1,14 · 10 <sup>5</sup> kcal	1,02 · 10 <sup>5</sup> kcal	1,35 · 10 <sup>5</sup> kcal
7. Auf die Fläche gestrahlte Energie .....	2,42 · 10 <sup>5</sup> kcal	1,99 · 10 <sup>5</sup> kcal	3,49 · 10 <sup>5</sup> kcal	2,87 · 10 <sup>5</sup> kcal
8. Mittlere Bodenbedeckung	72 %	76 %	75 %	78 %
9. Auf die Pflanzen gestrahlte Energie	1,80 · 10 <sup>5</sup> kcal	1,54 · 10 <sup>5</sup> kcal	2,70 · 10 <sup>5</sup> kcal	2,28 · 10 <sup>5</sup> kcal
10. Ausnutzungsfaktor ohne Korrektur als Quotient aus 6 und 9 .....	0,62 %	0,74 %	0,38 %	0,59 %
11. Ausnutzungsfaktor, korrr..	0,67 %	0,80 %	0,41 %	0,64 %

#### IV. Die Versuchsergebnisse.

Versuche über die Ausnutzung des Lichtes durch die grünen Pflanzen wurden seit 15 Jahren ausgeführt. Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen über den Nutzeffekt unter natürlichen Bedingungen fanden im Frühjahr und Sommer 1936 in Freiburg statt. Es wurden im ganzen vier Versuchsreihen in Angriff genommen, von denen aber nur zwei, und zwar Reihe 2 und 3, einwandfrei durchgeführt werden konnten. Die erste Reihe im Frühjahr und die vierte im Spätsommer mußten wegen der ungünstigen Wetterverhältnisse abgebrochen werden. Die Daten der brauchbaren Versuchsreihen — hier I und II genannt — sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Reihe 1 gibt die Menge des geernteten Frischgrases an, das sofort nach dem Schnitt gesammelt und gewogen wurde. Der Fehler bei der Bestimmung ist nicht durch die Ungenauigkeit der Wägung, sondern durch Verlust nicht gesammelter Blätter und Halme gegeben, er dürfte etwa 0,5% betragen. In der Reihe 2 steht der Wasserverlust des

Frischgrases, der an einer oder mehreren Proben ermittelt wurde, wenn die Substanz in der in Abschnitt III, 1, geschilderten Weise getrocknet wurde. Rechnet man den Wasserverlust von den Proben auf das Gesamtgewicht des Frischgrases um, so ergeben sich die Zahlen der Reihe 3. Von jeder Trockenprobe wurden je 2 Verbrennungen ausgeführt. In der Tabelle sind in Reihe 4 die Werte der verbrannten Menge mit den erhaltenen Wärmemengen angeführt. Aus allen Verbrennungsdaten jeder Versuchsreihe wurde ein Mittelwert gebildet und so die Verbrennungswärme je Gramm berechnet, die in Reihe 5 steht. Aus diesem Wert ergab sich die Verbrennungswärme der gesamten Trockensubstanzen in Kilocalorien in Reihe 6. In der Reihe 7 findet sich die gesamte während der Wachstumszeit auf die Flächen gestrahlte Lichtenergie, die sich durch Multiplikation der oben in jeder Spalte stehenden Energie je Quadratcentimeter mit der Flächengröße ergibt. Die nach Abschnitt II, 3 berechnete mittlere Bodenbedeckung der Pflanzen in Prozenten findet sich in Reihe 8. Die in 9 angegebene, auf die Pflanzen fallende Strahlung ergibt sich aus 7 und 8 unter Anwendung der in Abschnitt II, 3 angeführten Formel. Der Wert für die aufgestrahlte Energie dürfte nach den Angaben der Abschnitte I und II mit einem Fehler von  $\pm 6\%$  belastet sein.

In der Reihe 10 ist der Quotient aus Reihe 6 — der Verbrennungswärme der gesamten Pflanzensubstanz — und Reihe 9 — der auf die Pflanzen gestrahlten Energie — gebildet. Dieser Quotient stellt also den Nutzungsfaktor der Strahlung ohne Korrekturen dar. Da aber nach Abschnitt III, 3 die gemessene Verbrennungswärme um 8% erhöht werden muß, ist der in Reihe 10 angegebene Wert für den Nutzungsfaktor etwas zu klein. Berechnet man ihn mit Hilfe der korrigierten Verbrennungswärme, so ergeben sich die Zahlen von Reihe 11. Diese Werte zeigen, welchen Anteil der gesamten auf sie fallenden Sonnenstrahlung die grünen Pflanzen in chemische Energie umzuwandeln vermögen, wenn sie unter natürlichen Bedingungen wachsen. Nach unserer Abschätzung dürfte der Nutzungsfaktor mit einem Fehler von  $\pm 8\%$  belastet sein.

## V. Auswertung der Versuchsergebnisse.

Die Werte für den Nutzungsfaktor der Sonnenstrahlung in Tab. 1 zeigen, daß die untersuchten Pflanzen während einer längeren Wachstumsperiode 0,4–0,8% der aufgestrahlten Energie in Form von chemischer Energie zu speichern vermögen. Die Schwankung der gefundenen Werte ist erheblich größer als die Versuchsfehler, auf die Gründe soll weiter unten eingegangen werden. Die von uns gefundenen Zahlen lassen sich nicht unmittelbar mit den von Pfeffer und von Brown und Escombe erhaltenen vergleichen, da sie unter ganz anderen Bedingungen gewonnen wurden. Der Unterschied besteht in der verschiedenen Arbeitsmethode, vor allem aber in der Dauer der Belichtungen. Pfeffer, Brown und Escombe belichteten einzelne Pflanzenteile nur kurze Zeit mit meist sehr hellem Licht, während unsere Pflanzen über eine längere Zeit dem natürlichen Wechsel von Tag und Nacht ausgesetzt waren. Daher dürfte auch die recht gute Übereinstimmung der mittleren Ausnutzung von 0,6% bei unseren Versuchen mit den Zahlen von Pfeffer (0,6%) und von Brown und Escombe (0,66%) etwas zufällig sein. Die Tatsache, daß die auf so verschiedenen Wegen ermittelten Ausnutzungsfaktoren einander sehr ähnlich sind, bleibt natürlich bestehen.

Die Pflanzen vermögen von der Fülle des ihnen gebotenen Sonnenlichtes nur einen kleinen Teil unmittelbar in chemische Energie umzusetzen. Der weitaus größte Anteil der auffallenden Strahlung wird reflektiert oder in Wärme umgewandelt. Man darf bei dieser Betrachtung allerdings nicht vergessen, daß die in Form von Wärme auftretende absorbierte Sonnenenergie, wenigstens zum Teil, den Pflanzen wieder zugute kommt. Die Erwärmung der Luft, der Pflanzen selbst und des Erdbodens durch die Sonnenstrahlung schafft die Temperatur, bei der das Wachstum der Pflanzen stattfinden kann.

Da die hier untersuchten Pflanzen unter „natürlichen“ Bedingungen wuchsen, wird es von Interesse sein, der Frage nachzugehen, inwieweit die Variation der natürlichen Bedingungen auch eine Änderung des Nutzungsfaktors bedingen kann. Einige Schlüsse in dieser Hinsicht lassen sich bereits aus den Daten der Tabelle 1 ziehen. Wie man dort erkennt, ist der Nutzungsfaktor für die feuchte, fruchtbare Fläche II in jeder der beiden Versuchsreihen merklich größer als der für die trockene, sandige Fläche I. Weitere Untersuchungen sollen zeigen, wie weit dieser Faktor heruntergehen kann, wenn man sehr armen Boden verwendet, und wie weit er sich steigern läßt, wenn man den Boden besonders fruchtbar macht. Auch der Einfluß der Jahreszeit ist deutlich erkennbar. Obwohl die mittlere tägliche Energieaufstrahlung in beiden Versuchsreihen nicht sehr verschieden ist (134,7 cal/cm<sup>2</sup> bei Reihe I und 129,2 cal/cm<sup>2</sup> bei Reihe II), sind die Nutzungsfaktoren bei Reihe II bei beiden Flächen erheblich kleiner als bei Reihe I. Nun fiel die erste Versuchsreihe von Ende April bis Mitte Mai in die Hauptwachstumszeit des Frühjahrs, während Versuchsreihe II von Mitte Mai bis Mitte Juni bereits im Sommer lag. Es ist sicher, daß hier der Einfluß der Wuchsstoffe auf den Nutzungsfaktor erkennbar wird, doch muß dieser Einfluß noch über längere Zeiten verfolgt werden, ehe man weitere Schlüsse ziehen darf. Ebenso soll der Einfluß der Temperatur auf die Größe des Nutzungsfaktors der Strahlung noch näher studiert werden.

Bei den bisherigen Untersuchungen hatten wir als Versuchsflächen Rasenflächen gewählt, weil auf ihnen eine große Zahl verschiedener Pflanzen wuchs und man so hoffen konnte, einen Mittelwert des Nutzungsfaktors über viele Pflanzenarten zu erhalten. Es erhebt sich nun die Frage, ob man die an diesen Flächen erhaltenen Werte auch auf ganz andere Pflanzenarten übertragen darf, d. h., ob dem Nutzungsfaktor eine allgemeinere Bedeutung zukommt. Aus den vorliegenden Untersuchungen darf man wohl den Schluß ziehen, daß dieser Faktor für alle grasartigen Gewächse, soweit sie als Lichtpflanzen wachsen, derselbe sein wird. Welchen Betrag er bei ganz andersartigen Pflanzen, z. B. bei Bäumen, erreicht und vor allem, ob die Schattenpflanzen einen höheren Nutzungsfaktor besitzen, muß durch weitere Untersuchungen klargestellt werden.

Zum Schluß sei noch auf die Größe der Verbrennungswärme je Gramm Trockensubstanz der Pflanzen in Tab. 1, Reihe 5, hingewiesen. Der mittlere Betrag für diese Verbrennungswärme ergab sich zu 3,52 kcal/g. Berücksichtigt man, daß diese Trockensubstanz etwa 15% Asche enthält, so ergibt sich für die mittlere Verbrennungswärme der rein organischen Substanz eine Wärmemenge von 4,15 kcal je Gramm. Dieser Betrag stimmt nahezu mit der Verbrennungswärme der Polysaccharide (4,17 kcal je Gramm) überein. Diese nahe Übereinstimmung ist ein thermochemischer Beweis dafür, daß die Pflanzen in der Hauptsache derartige Substanzen bilden. Auch in dieser Richtung soll der Assimilationsvorgang noch näher untersucht werden. [A. 30.]