

Energieverwertung in der pflanzlichen Produktion unter dem Aspekt der Welternährungslage*

Energy use in plant production under the aspect of world food supply

Von S. Rehm**)

1. Energiebilanz der pflanzlichen Produktion

Die künftige Energieversorgung der Menschheit ist ein weltweites Problem. Je schwieriger die Versorgung mit fossiler Energie wird, desto wichtiger wird die Tropenzone für den Energiehaushalt der anderen Zonen werden; denn nur sie hat das ganze Jahr über einen Überschuß an Sonnenenergie, an dem die höheren Breiten durch Luftmassenaustausch und Meeresströmungen teilhaben (Blüthgen 1966, „Strahlungshaushalt“, S. 56–76), der aber auch die Voraussetzung für eine bis zu viermal höhere jährliche Festlegung der Sonnenenergie als in der gemäßigten Zone bietet. Beispiele bringen Tabelle 1 und 2.

Tabelle 1: Energiefixierung auf der Erde (nach Lieth 1972)

Vegetationseinheit	Fläche (10 ⁶ km ²)	Jährliche Energiefixierung	
		pro m ² (10 ⁶ cal)	für die gesamte Fläche (10 ¹⁸ cal)
Geschlossener Wald	50	2,4–8,2	277,0
Offener Wald	7	2,8	19,6
Offenes Gestrüpp	26	0,3–0,6	10,2
Grasland	24	2,0–2,8	60,0
Kulturland	14	2,7	37,8
Inlandgewässer	4	2,3–8,4	21,4
Wüsten	24	—	0,1
Gesamte Landfläche	149		426,1
Gesamte Ozeanfläche	361		260,8
Gesamte Erde	510		686,9

*) Referat, gehalten am 25. 11. 1974 im Seminar für Tierproduktion des Instituts für Tierzucht und Haustiergenetik der Universität Göttingen.

***) Prof. Dr. S. Rehm, Direktor des Instituts für Tropischen und Subtropischen Pflanzenbau der Universität Göttingen.

Anschrift: D 34 Göttingen, Grisebachstraße 6

Tabelle 2: Stoffproduktion und Energiefixierung verschiedener Vegetationsgruppen (nach Loomis et al. 1971)

Vegetation	Gebiet	Nettoprimärproduktion (g m ⁻² Jahr ⁻¹)	Mittlere tägliche Produktion (g m ⁻² Tag ⁻¹)	Energiefixierung (10 ⁶ cal m ⁻² Jahr ⁻¹)
Fichtenwald	Europa	700–1400	1,9–3,8	3,5–6,6
Tropischer Regenwald	Afrika	3250	8,9	13
Grasland	UdSSR	400–1400	1,1–3,8	1,7–5,0
Weide (Lolium perenne)	UK, Niederlande, Neuseeland	1700–2500	4,7–6,8	7–11
Tropische Futtergräser	Karibik, Hawaii	3000–8500	8,2–23,2	13–36
Zuckerrohr	Hawaii	4200	11,5	17
Zuckerrübe	Kalifornien	2800	7,7	11

Die beste Nutzung der Sonnenenergie (Energiefixierung und Stoffproduktion) haben natürliche Formationen, die einen hohen Blattflächenindex während des ganzen Jahres behalten (geschlossener Wald in Tab. 1, tropischer Regenwald in Tab. 2). Kulturland (Tab. 1) steht im Weltdurchschnitt keineswegs günstig da, vor allem deswegen, weil dort die assimilierende Blattfläche jedes Frühjahr neu gebildet werden muß, so daß nur während weniger Monate der optimale Blattflächenindex (etwa 4, vgl. Lieth 1972) für die Fixierung der Sonnenenergie vorhanden ist. Ein anderes Bild ergeben die Leistungen des Dauergrünlandes schon in der gemäßigten Zone, vor allem aber die tropischen Futtergräser und das Zuckerrohr (Tab. 2). Sie erreichen nicht nur die höchsten Tagesmaxima der Stoffproduktion, sondern auch Jahresleistungen der Energiefixierung, die deutlich über denen des tropischen Regenwaldes liegen.

Die Energiefixierung durch die Photosynthese auf der ganzen Erde beträgt $687 \cdot 10^{18}$ cal im Jahr (Tab. 1), das ist mehr als das Zehnfache des jährlichen Energieverbrauchs durch den Menschen, der etwa $500 \cdot 10^{17}$ cal beträgt (Weinberg 1974). Dieser Vergleich könnte beruhigend wirken, wenn der Mensch die erneuerbare (photosynthetische) Energie vollständiger nutzen und seinen Energieverbrauch nicht im gleichen Maße wie bisher steigern würde.

Der Pflanzenbauer muß zum Einfangen der Sonnenenergie vorhandene Energiequellen einsetzen. Sie sind gering, solange er sein Feld mit eigener Hand und geringem Düngereinsatz bebaut, steigen durch tierische Bespannung und sind in der modernen Landwirtschaft mit voller Mechanisierung und optimaler Minereraldüngung sehr hoch. Eine Bilanz des Energieeinsatzes und -gewinns im heutigen Maisbau der USA gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Energiebilanz für 1 acre Mais in den USA 1970
(nach Pimentel et al. 1973)

Kornertrag	$8,2 \cdot 10^6$ kcal
Energieeinsatz	$2,9 \cdot 10^6$ kcal
Energiegewinn	$5,3 \cdot 10^6$ kcal
Ertrag/Einsatz	2,82

Aus der letzten Zahl ergibt sich, daß die Landwirtschaft 0,35 cal fossiler Energie verbraucht, um 1 cal als Körnermais zu erzeugen. Um den Problemen besser begegnen zu können, die durch die Energieverknappung und -verteuerung aufgeworfen wurden, ist eine nähere Betrachtung der Zahlen von Tabelle 3 nötig. Die Körner sind nur ein Teil der in den gesamten Maispflanzen festgelegten Energie; diese beträgt $25,7 \cdot 10^6$ kcal/acre, mit dem nutzbaren Teil der Pflanze (Kornertrag = $8,2 \cdot 10^6$ kcal) verwertet der Mensch also nur 32% der fixierten Sonnenenergie. 68% gehen verloren, es sei denn, der Mensch nutze das Stroh als Futter oder als Heizmaterial. Niedrig ist in dem Beispiel die Fixierung der während der Vegetationszeit eingestrahlteten Sonnenenergie. Die gesamte Einstrahlung auf 1 acre während der Wachstumsperiode beträgt $2043 \cdot 10^6$ kcal. Davon sind 43% = $878 \cdot 10^6$ kcal photosynthetisch wirksame Strahlung (PAR, photosynthetically active radiation, vgl. Loomis et al. 1971). In den $26,7 \cdot 10^6$ kcal der Pflanzen bzw. den $8,2 \cdot 10^6$ kcal der Körner sind also nur 3% bzw. 0,9% von PAR verwertet. Die theoretisch mögliche Ausbeute von PAR ist 12%, in der pflanzenbaulichen Praxis werden maximal 9%, meist nicht über 5%, im Durchschnitt 2–3% erreicht (Loomis et al. 1971). Die Folgerungen aus dieser Feststellung werden in Teil II besprochen.

In der Arbeit von Pimentel et al. (1973) werden die verschiedenen Quellen, aus denen der gesamte Energieeinsatz ($2,9 \cdot 10^6$ kcal) resultiert, im einzelnen angegeben. Die größten Einzelfaktoren sind N-Dünger (940 800 kcal = 32,4%), Treibstoff (797 000 kcal = 27,4%) und Maschinen (420 000 kcal = 14,5%). Der Energieeinsatz durch Vollmechanisierung beträgt also 41,9% des gesamten Einsatzes. Für die Frage, wie weit die Mechanisierung der Landwirtschaft in den Entwicklungsländern zu treiben ist, ist dies bei der heutigen Energielage ein wichtiger Gesichtspunkt. Unter diesem Aspekt muß sicher auch die Frage des Mineraldünger-einsatzes in der Landwirtschaft der Entwicklungsländer neu überdacht werden.

Die geernteten Pflanzenprodukte sind meist noch nicht genießbar. Vielfach benötigt die moderne Nahrungsmitteltechnologie einen hohen Energieaufwand (Transport, Konservieren, Kühlen, Kochen usw.), bis die Produkte auf dem Tisch des Endverbrauchers stehen. Dieser Energieeinsatz übersteigt in den USA heute den Energiewert des Nahrungsmittels durchschnittlich um das Neunfache (Steinhart u. Steinhart 1974). Diese hohe Zahl schließt tierische Produkte ein, bei denen der Energieaufwand pro cal des Nahrungsmittels bis zu 20 cal betragen kann. Aber auch bei pflanzlichen Nahrungsmitteln werden von der verarbeitenden Industrie und im

Haushalt 2–5 cal Fremdenergie (zum größten Teil fossile Energie) pro cal des Nahrungsmittels eingesetzt. Die Nahrungs- und Futtermittelproduktion, die eigentlich dem Energiegewinn dienen sollte, ist durch die technologische Entwicklung zu einem hohen Energieverbraucher pervertiert worden. In den Industrieländern wird sich daran nichts ändern, in der Nahrungs- und Energiepolitik der Entwicklungsländer sollte aber dieser Tendenz entgegengearbeitet werden.

2. Verbesserung der Energieverwertung in der pflanzlichen Produktion

Im Pflanzenbau gibt es verschiedene Wege, die Energiebilanz zu verbessern. Um die Fülle der Möglichkeiten zu erfassen, wird im folgenden eine schematische Darstellung gebracht; sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Welche der Methoden im Einzelfall anwendbar sind, hängt von verschiedenen Umständen ab, die oft außerhalb der Einflußmöglichkeit des Landwirts liegen werden. Der Pflanzenbau der Tropen und Subtropen hat größere Möglichkeiten, rationeller mit der Energie umzugehen, als es im Pflanzenbau der gemäßigten Zone üblich geworden ist. Die Energieverknappung und -verteuerung zwingt dazu, diese Möglichkeiten zu nutzen. Die Methoden lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen: (1) Optimale Nutzung der Sonnenenergie, (2) Verwertung eines möglichst hohen Anteils der Photosyntheseprodukte und (3) Minimierung des Bedarfs an fossiler Energie.

2.1 Optimale Nutzung der Sonnenenergie

- 2.1.1 Intensivierung des Pflanzenbaus in Gebieten, in denen andere meteorologische Faktoren, vor allem Regenfall und Temperatur, und edaphische Faktoren, wie Nährstoffangebot, Textur, pH und Wasserführung, nicht produktionsbegrenzend sind. Damit ist eine Regionalisierung des Anbaus verbunden, der erhebliche politische Widerstände entgegenstehen (Rehm 1973).
- 2.1.2 Anbau bzw. Züchtung von Pflanzen, die die Lichtenergie maximal verwerten.
 - 2.1.2.1 Anbau ausdauernder Pflanzen, die permanent eine große assimilierende Blattfläche haben oder diese nach dem Schnitt schnell wieder aufbauen. Als Beispiele solcher Pflanzen sind die tropischen Baumkulturen, Zuckerrohr und Futtergräser zu nennen. Zu denken ist aber auch an ratoon cropping bei Reis (Prashar 1970) oder an mehrjährigen Ricinus-Anbau.
 - 2.1.2.2 Anbau von Pflanzen mit hohem effizientem Blattflächenindex, wie er für die hocheertragfähigen Reis- und Weizensorten charakteristisch ist, bei denen die schräg nach oben stehenden Blätter eine bessere Nutzung der Sonnenstrahlung erlauben als horizontale oder hängende Blätter.

2.1.2.3 Anbau von Pflanzen mit physiologisch hoher Photosyntheseleistung (C_4 -Weg der Photosynthese, vgl. Alexander 1973, Laetsch 1974).

2.2 Verwertung eines möglichst hohen Anteils der Photosyntheseprodukte

2.2.1 Anbau bzw. Schaffung von Pflanzen mit einem hohen Anteil nutzbarer Produkte. Es gibt mehrere Nutzpflanzen, von denen, außer den Wurzeln, alle Teile verwertet werden, wie die Dattelpalme, die Süßkartoffel oder die Zuckerrübe. Das in Abschnitt 1 angeführte Maisbeispiel zeigt, daß der genutzte Teil aber oft nur einen kleinen Teil der gesamten Pflanzenmasse darstellt. Er kann züchterisch erhöht werden (Zwergformen von Getreide, von Kokosnuß usw.), durch Wachstumsregulatoren (Luckwill 1973, Luckwill u. Child 1973) oder durch Pfropfung (verzweigende Unterlagen; Manihot glaziovii auf M. esculenta, vgl. de Bruijn u. Dharmaputra 1974).

2.2.2 Nutzung von Nebenprodukten oder des Abfalls. Bekannte Beispiele sind die Nutzung von Bagasse als Brennmaterial (jährlich 87 Mio. t), neuerdings auch von Reisspelzen (jährlich 70 Mio. t) und Erdnußschalen (jährlich 6 Mio. t), die Gewinnung von Furfural aus Stroh und anderem Material, das reich an Pentosanen ist, die Zucht von Volvariella volvacea auf Reisstroh oder die Verarbeitung von Zitruschalen als Futtermittel.

2.3 Minimierung des Bedarfs an fossiler Energie

2.3.1 Einschränkung des Bedarfs an Mineraldünger
Die Zeiten, in denen die Pflanzenbauer Methoden entwickelten, die nur durch hohen Düngereinsatz Ertragssteigerungen brachten (z. B. Anbau von Kaffee ohne Schatten, vgl. Acland 1971, Müller 1966), sind vorbei. Auch der Nutzen der hocheertragfähigen Sorten von Weizen, Reis, Sorghum ist durch die Düngerknappheit eingeschränkt. Der Pflanzenbau muß neue Wege beschreiten.

2.3.1.1 Stickstoff

2.3.1.1.1 Nutzung vorhandener N-Vorräte: Pflanzenabfälle, tierischer Dung, Wald, Grasland. „Die Gesamtmenge organischen Düngers, die 1970/71 in den Entwicklungsländern hätte gewonnen werden können, würde 7- bis 8mal mehr Pflanzennährstoffe enthalten haben als der damals in diesen Ländern verbrauchte Mineraldünger“ (FAO-Aktuell, Nr. 39/74). Beim Abbrennen von 1 ha Regenwald gehen etwa 2000 kg N verloren, beim Abbrennen von 1 ha Grasland etwa 100 kg N. Trockener Dung sollte nicht als Brennmaterial dienen, dafür müßte der Anbau brennholzliefernder Sträucher und Bäume gefördert werden.

- 2.3.1.1.2 Einsatz biologischer N_2 -Bindung. Tropische Leguminosen fixieren bis zu 500 kg N/ha · Jahr. Ihr Einsatz in Baumkulturen (Ölpalme, Hevea) macht jede N-Düngung überflüssig. Blaualgen fixieren etwa 50 kg N/ha und können einen Teil des N-Bedürfnisses von Reis decken. Azotobacter in der Rhizosphäre tropischer Gräser und Spirillum lipoferum als Symbiont von Pangolagras (Digitaria decumbens) binden bis zu 350 kg N/ha · Jahr (Döbereiner u. Day 1974). Moderne biologische Techniken eröffnen ganz neue Wege der N-Versorgung unserer Kulturpflanzen (Marx 1974).
- 2.3.1.2 P und andere Elemente
- 2.3.1.2.1 Das Mineralstoff-Aufnahmevermögen der Kulturpflanzen ist z. T. genetisch bedingt. Durch Selektion lassen sich Arten und Sorten finden, die auch auf ungünstigen Böden gedeihen und lohnende Erträge bringen (Koyana et al. 1973, Rehm 1962).
- 2.3.1.2.2 Endotrophe Mykorrhiza und Bakterien der Rhizosphäre verbessern die Mineralstoffaufnahme (Russel 1973). Der Pflanzenbauer sollte praktische Methoden entwickeln, die diese Fähigkeit der Mikroflora maximal zu nutzen gestatten.
- 2.3.2 Einschränkung der Mechanisierung
Bedenken gegen eine unüberlegte Förderung der Mechanisierung in Entwicklungsländern bestehen unter verschiedenen Gesichtspunkten (Kosten, Arbeitsmarkt usw. vgl. Dopieralla 1974). Auch wegen der unsicheren Energieversorgung sollte sie nur bedingt gefördert werden.
- 2.3.3 Einschränkung des Bedarfs an chemischen Pflanzenschutzmitteln
Im tropischen Pflanzenbau werden die Ernteverluste durch Krankheiten und Schädlinge auf durchschnittlich 35% geschätzt, weitere 20–25% der Produkte verderben im Lager (Cramer 1967). Der Pflanzenschutz nimmt also eine hohe Priorität in der Pflanzenproduktion ein. Herstellung und Ausbringung der Mittel erfordern aber oft großen Energieeinsatz. Alle Verfahren, die den Gebrauch chemischer Mittel unnötig machen oder doch einschränken, verdienen daher besondere Beachtung. Zu nennen sind hier vor allem:
- 2.3.3.1 Hygiene (Kranz 1974), einschließlich Sanierung, Fruchtwechsel, Mischkulturen, Pflanzzeiten, Pflanzabständen.
- 2.3.3.2 Züchtung und Anbau resistenter Sorten und synthetischer bzw. multilinearer Sorten.
- 2.3.3.3 Biologische Schädlingsbekämpfung.
- 2.3.4 Rationalisierung des Transports

Die hier genannten Punkte beziehen sich hauptsächlich auf die Produktion von Nahrungsmitteln und Rohstoffen des Pflanzenbaus. Die größte Energieverschwendung findet sich wahrscheinlich bei den Produkten des Waldes. Von der Weltholzproduktion werden 85% als Brennmaterial verbraucht, mit einer Energienutzung, die oft unter 10% liegt (offene Feuer, Meilerei). Die technischen Anlagen, um eine wesentlich bessere Nutzung zu erzielen, sind nicht sehr kostspielig und könnten an vielen Stellen zur Verbesserung der Energiesituation eingesetzt werden.

3. Schlußbemerkung

Das Referat beschränkt sich vom Thema her auf die Energieverwertung. Es wäre ein Fehler, aus der gegenwärtigen Situation heraus bei Planung und Entwicklung die anderen Faktoren aus dem Auge zu verlieren. Wasser ist in globaler Betrachtung sicher der physische Faktor, der die landwirtschaftliche Entwicklung ernster als die Energieknappheit begrenzt. Wasserbeschaffung kann durchaus einen hohen Energieeinsatz rechtfertigen. Das gleiche gilt in bestimmten Situationen für den Einsatz von Mineraldüngern (hochertragfähige Sorten unter Bewässerung) oder chemischen Pflanzenschutzmitteln (Baumwolle). Je intensiver Landwirtschaft betrieben wird, desto höhere Einsätze auch von Energie sind gerechtfertigt.

Trotz der schwindenden Energievorräte und der steigenden Kosten für Energie wird es möglich sein, die 7 Milliarden Menschen des Jahres 2000 zu ernähren, wenn alle Ressourcen vernünftig eingesetzt werden. Dazu bedarf es nicht nur ausreichender Kenntnisse und Fähigkeiten, sondern auch politischer Einsicht und guten Willens. Ob diese in ausreichendem Umfang verfügbar sein werden, ist freilich fraglich.

4. Zusammenfassung

Die Fixierung der Sonnenenergie ist am höchsten in den Tropen; sie haben das Potential, in den kommenden Jahrzehnten die zur Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung benötigten Nahrungsmittel zu liefern. Der Bedarf an Energie ist im Pflanzenbau geringer als bei anderen Nahrungsmitteln; dabei verlangen Stickstoffdünger, Treibstoff und Maschinen den höchsten Energieeinsatz. Die Nettoenergieproduktion im Pflanzenbau kann verbessert werden durch Steigerung der Photosyntheseleistung, maximale Verwertung aller Photosyntheseprodukte und Einschränkung des Bedarfs an fossiler Energie. Besonders im extensiven Pflanzenbau der Entwicklungsländer können solche Maßnahmen erfolgreich eingesetzt werden.

Summary

The highest rate of energy fixation is found in the tropics; they have the capacity of supplying the additional food for a growing world population in the coming decades. Crops need a low energy subsidy compared with

other kinds of food. The highest energy inputs for vegetable food production are nitrogen fertilizers, fuel, and machinery. Ways of improving the net energy output in crop production are optimizing the efficiency of photosynthesis, maximizing the use of fixed energy and minimizing the need for fossil energy. The possibilities of implementing these measures are given particularly in the extensive agriculture of the developing countries.

Literaturverzeichnis

- ACLAND, J. D., 1971: East African Crops. Longman, London.
- ALEXANDER, A. G., 1973: Sugarcane Physiology. Elsevier, Amsterdam—London—New York.
- BLÜTHGEN, J., 1966: Allgemeine Klimageographie. 2. Aufl. Walter de Gruyter, Berlin.
- BRUIJN, G. H. de, und DHARMAPUTRA, T. S., 1974: The Mukibat system, a high-yielding method of cassava production in Indonesia. Neth. J. Agric. Sci. 22, 89—100.
- CRAMER, H. H., 1967: Pflanzenschutz und Welternte. Pflanzenschutznachrichten „Bayer“, Leverkusen.
- DÖBEREINER, J., und DAY, J. M., 1974: Associations of nitrogen fixing bacteria with roots of grass species. Vortrag auf der Reunião Latinoamericana do Trigo, Porto Alegre (Umdruck).
- DOPIERALLA, D., 1974: Pflanzenbauliche Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität kleinbäuerlicher Betriebe in der Zentralregion Malawis. Materialsammlung Heft 25, Z. Ausländ. Landw., DLG-Verlag, Frankfurt (Main).
- KOYANA, T., et al., 1973: Varietal difference of Thai rice in the resistance to phosphorus deficiency. Techn. Bull. TARC 4, p. I—IV, 1—32 (zitiert nach Trop. Abstr. 29, Nr. X 2369, 1974).
- KRANZ, J., 1974: Plant hygiene and its importance for plant protection. In: Conference on Plant Protection in Tropical and Subtropical Areas. Federal Agency for Economic Cooperation, Eschborn, 47—55.
- LAETSCH, W. M., 1974: The C₄ syndrome: a structural analysis. Ann. Rev. Plant Physiol. 25, 27—52.
- LIETH, H., 1972: Über die Primärproduktion der Pflanzendecke der Erde. Angew. Bot. 46, 1—37.
- LOOMIS, R. S., WILLIAMS, W. A., und HALL, A. E., 1971: Agricultural productivity. Ann. Rev. Plant Physiol. 22, 431—468.
- LUCKWILL, L. C., 1973: Die hormonelle Steuerung der Ergiebigkeit von Frucht-ernten. Gartenbauwiss. 38, 27—34.
- LUCKWILL, L. C., und CHILD, R. D., 1973: The "meadow orchard" — a new concept of fruit production based on growth regulators. Acta Hort. 34, 213—220.
- MARX, J. L., 1974: Nitrogen fixation: research efforts intensify. Science 185, 132—136.
- MÜLLER, L., 1966: Coffee nutrition. In: CHILDERS, N. F., Temperate and Tropical Fruit Nutrition. 2. Aufl. Horticultural Publications, Rutgers State University, New Brunswick, N. J., 685—776.
- PIMENTEL, D., HURD, L. E., BELLOTI, A. C., FORSTER, M. J., OKA, I. N., SHOLES, O. D., und WHITMAN, R. J., 1973: Food production and the energy crisis. Science 182, 443—449.

- PRASHAR, C. R. K., 1970: Paddy ratoons. *World Crops* 22, 145–147.
- REHM, S., 1962: Angewandte Pflanzenphysiologie. Mineraldüngung. *Fortschr. Bot.* 24, 508–514.
- REHM, S., 1973: Landwirtschaftliche Produktivität in regenreichen Tropenländern. *Umschau* 73, 44–48.
- RUSSELL, E. W., 1973: *Soil Conditions and Plant Growth*. 10. Aufl. Longman, London.
- STEINHART, J. S., und STEINHART, C. E., 1974: Energy use in the U.S. food system. *Science* 184, 307–316.
- WEINBERG, A. M., 1974: Global effects of man's production of energy. *Science* 186, 205.