

- McNAMARA, R. S.: An address on the Population Problem of the Massachusetts Institute of Technology, Cambridge/Mass. World Bank, Washington, D. C. 1977.
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Pakistan. Länderkurzberichte. Allg. Statistik des Auslandes. Wiesbaden 1976.
- STURROCK, F.: Sugar Beet or Sugar Cane? The Cane Farmer, Trinidad, No. 4, 1969, S. 104ff.
- URFF, W. v. et al.: Die wirtschaftliche Situation Pakistans nach der Sezession Bangladeshs. Beiträge zur Südasienforschung, Bd. 6, Wiesbaden 1974.
- WEBER, A.: Welternährungswirtschaft. Art. im HdWW, Lfg. 22. Stuttgart, Tübingen, Göttingen 1980, S. 612–637.
- WILLER, H.: Agriculture: Toward 2000 – Zielsetzung, Ergebnisse, Bewertung. Berichte üb. Landw. 61, 1983, S. 30–43.

## ENERGIEWIRKSAMKEIT DER WEIZENPRODUKTION UNTER SEMI-ARIDEN KLIMABEDINGUNGEN

Zum Wechselspiel zwischen Energieeinsatz und -umsatz und geoökologischer und kulturtechnischer Variabilität in den zentralen Great Plains von Nordamerika\*)

Mit 9 Abbildungen und 4 Tabellen

HANS-JOACHIM SPÄTH

*Summary:* Energy effectiveness of wheat production under semi-arid climatic conditions

Rising energy costs and decreasing energy availability force dry-land farmers to improve their production energy budgets. Related innovations require information provided by detailed local and regional energy-input/output-analysis, which in turn are based on field-scaled monitoring of the daily flow of cultural energy-input and of food energy-output under the complete spectrum of tillage systems, reflecting the full range of geo-ecological variability. Available moisture, plant residue on the field surface, and soil texture are the dominant geo-ecological and agro-technical parameters to which energy-output/input-ratios and yield performance will be related to in this project.

The energy-ratio, averaged for unfertilized and fertilized wheat, is 17.41 in the east and 10.77 in the west; related yields are at the 42.91 bu/acre (ca. 28,8 dz/ha) level in the east and at 31.58 bu/acre (ca. 21,2 dz/ha) in the west. \$-budgets, the traditional means for quantifying farm production performance, on the other hand result in output/input-ratios of no higher than 3 to 5. The regional and seasonal variation of energy efficiency and of yield is closely related to the pattern of distribution of rainfall and of available moisture and to the rate of remaining residue, a numerical resultant of the impact of tillage operations on plant residue rates on the field surface. Moisture and yield, energy ratios and moisture, yield and ratios, and remaining residue and moisture show strong correlations. The resulting individual equations are applicable as planning tools in areas with 11 to 20 inches (280 to 510 mm) of annual rainfall, between 10 and 60 bu of wheat per acre (6,7 and 40,3 dz/ha), and at energy-ratio levels from 3 to 40.

Traditionellerweise wurden Budgets in Währungseinheiten als Mittel zur Bewertung der Farmproduktions-Wirtschaftlichkeit verwendet. Räumlicher und zeitlicher Transfer solcher Haushalte und deren Interpretation sind aus vielfäl-

tigen Gründen sehr begrenzt; so sind – um nur drei Beispiele zu nennen – Preise für einen bestimmten Energie-Input (künftig E-Input genannt) zeitlich und räumlich starken Schwankungen unterlegen; das gleiche trifft für Ertrags-erlöse und steuerliche Abschreibungsmöglichkeiten für betriebliche Investitionen zu. Produktionshaushalte, die auf kulturtechnischen E-Inputs (auch Kulturenergie-Inputs genannt) und auf Nahrungsenergie-Output basieren, tragen zur Lösung dieses Dilemmas in der Betriebsevaluierung bei. GREEN (1978), HEYLAND u. SOLANSKY (1979), LEACH (1976), PATRICK (1977), PIMENTEL u. PIMENTEL (1979), PIMENTEL et al. (1973) und SPÄTH (1981) stellen hierzu methodische Ansätze vor und gehen auf deren Anwendbarkeit in großregionalen Maßstäben ein. Die Resultate aus Analysen der Produktionswirksamkeit unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme (künftig Tillage-Systeme genannt) auf der Basis eines kontinuierlich beobachteten Kulturenergie-Flusses werden jedoch noch (und hauptsächlich) aus folgendem Grunde dringend benötigt: Das Angebot an fossilen Energie-Ressourcen als Hauptenergiequelle für Farmproduktionsenergie-Inputs schrumpft; damit wird sich das Preisgefüge für solche energieintensiven E-Inputs, die bislang noch auf einer \$/E-Einheit-Basis relativ billig waren, so verschieben, daß sie (im Rahmen mehr oder weniger stagnierender Erlöse) sehr teuer bis unerschwinglich werden und als Produktions-Inputs mehr und mehr ausfallen, zumindest in heute üblichen Größenordnungen. Insbesondere sind hiervon Treibstoffe und Düngemittel betroffen. Im Zuge dieser Entwicklung wird

\*) Ein Heisenbergstipendium und finanzielle Hilfen der Deutschen Forschungsgemeinschaft ermöglichten die Durchführung dieses Projektes. Für diese Förderung sei herzlich gedankt.

die heute noch gültige Forderung nach Ertragsmaximierung durch das Streben nach Optimierung der Energie-Output/Input-Quotienten (künftig E-Quotient genannt) abgelöst werden. Diese Bestrebungen können dann fundiert und praktisch erfolgreich sein, wenn für Einzelbetriebe wie für den Planungssektor solche Planungsleitlinien vorgegeben werden können, die aus Analysen des täglichen Kulturenergie-Flusses sowie seiner Alternativen im Farmbetriebs- und Feldmaßstab – mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Produktionsmethoden und der beträchtlichen lokalen und regionalen geökologischen Variabilität – der einzelbetrieblichen Realität entstammen. Diese Planungsleitlinien müssen also im Rahmen einer agro-energetischen Regionalanalyse induktiv entwickelt werden. Da Daten, die diesen Anforderungen entsprechen, in der Regel nicht vorgegeben sind und erst erhoben werden müssen, sind solche Projekte sehr kostenintensiv. Die vorliegende Abhandlung will zu diesem Zukunftsproblem einen Lösungsbeitrag leisten.

### Problemstellung

Die Problemstellung erfordert eine

- kurze Einführung in die Methodik der Berechnung von Agrarproduktions-Energiehaushalten, die dazu geeignet sind, für Vorhaben zur E-Quotient-Optimierung die entscheidenden Leitlinien abzugeben, sowie eine
- Darstellung und Analyse raum-zeitlicher Variation der Energiewirksamkeit unterschiedlicher kulturtechnischer Weizenanbausysteme in Relation zur geökologischen Variabilität.

Energiehaushalte und Feuchteparameter der hydrologisch extrem unterschiedlichen Anbaujahre 1978/79/80, 1979/80/81 und 1980/81/82 sowie die ackerbaulich genutzten Böden im Bereich der zentralen Great Plains (zwischen 101,5° und 105,5° w.L. und 39,5° und 41,5° n.Br.) sind dazu geeignet, diese Variationen zu beschreiben. Hierzu weitere Ausführungen im Kapitel ‚Methodik‘.

### Methodik

(1) Berechnung der Produktionsenergie-Haushalte: Treibstoffe, Arbeit, fixierte Energie in Geräten (amer.: embodied energy), Saatgut, Düngemittel, Herbizide und Pestizide sowie Transportenergie werden pro Arbeitsgang – soweit zutreffend – addiert und ergeben den Input pro Feldbearbeitung.

Alle einzelnen E-Inputs werden in kcal gegeben, um mit früheren Arbeiten unmittelbar vergleichbare Daten zu liefern. Weiterhin werden auch die Maßeinheiten gal, acre, lb, feet, inch, mile per hour (mph) und bu/acre geführt, um den Bezug zu den im Untersuchungsgebiet üblichen Einheiten nicht zu verlieren. Die folgende Zusammenstellung gibt die entsprechenden Faktoren zur Umrechnung in metrische Werte:

acre	× 4 047	= m <sup>2</sup>
bu (US)		~ 60 lb
calorie	× 4,187	= J
ft	× 0,3048	= m
gal (US)	× 0,003785	= m <sup>3</sup>
inch	× 0,02540	= m
lb	× 0,4536	= kg
lb/acre	× 1,12	= kg/ha
mph	× 0,447	= m/s

Treibstoff-Energie wird mit Hilfe der Daten des NEBRASKA TRACTOR TEST LABORATORY der University of Nebraska zum Verbrauch der einzelnen Schlepper berechnet. Der Umrechnungsfaktor ist für Diesel = 34772 kcal/gal, für Benzin = 31 320 kcal/gal und für LPG = 23 256,9 kcal/gal. Dies sind Brennwerte nach DOWNS u. HANSON (1979).

Die Zeit, die zum Zwecke der Verrichtung von Feldarbeit auf dem Feld zugebracht wird, wird als Arbeitsenergie erfaßt. Der Umrechnungsfaktor von 465 kcal/hr deckt im wesentlichen die Nahrungsenergie, die ein Erwachsener pro Arbeitsstunde während einer 40 Stunden-7 Tage-Woche im Stoffwechselprozeß verbraucht (nach PIMENTEL u. PIMENTEL 1979).

Fixierte Energie wird zur Herstellung von Schleppern und Ackergerät verbraucht; sie ist nach der Produktion des Gerätes in diesem „fixiert“. Sie wird nach folgender Konzeption berechnet: All jene industriellen E-Inputs, die von Maschinen und Arbeitern während der Fertigung von Landmaschinen aus Rohmaterialien verbraucht werden, werden summiert. E-Inputs, die z. B. im Bergwerk zur Erzgewinnung und im Stahlwerk zur Stahlproduktion verbraucht worden sind, bleiben unberücksichtigt. Nur die zwischen Anlieferort und Auslieferungslager des Landmaschinenherstellers in dieses Rohmaterial investierte Energie wird verbucht und einem Ausgangswert Null zugeschlagen. Dieses „Mehrwert-Konzept“ geht zum einen davon aus, daß die bereits zum Zeitpunkt der Anlieferung im Rohmaterial enthaltene Energie auch am Ende der Einsatzzeit des Gerätes im dann noch gegebenen Altmaterial vorhanden ist, und daß zum anderen bei Projekten, die an Zukunftsproblemen arbeiten, alle Möglichkeiten der Energie- und Rohstoff-Rückgewinnung genutzt werden. Das vorliegende Modell praktiziert rechnerisch also ein Recycling der im Rohprodukt fixierten Energie. Dieses „Mehrwert-Konzept“ ist an DOERING III (1978) angelehnt und weicht von diesem im nachfolgend erörterten Abschreibungsmodell ab. Die Mehrwert-Konzeption steht im starken Kontrast zu allen in früheren Arbeiten verwendeten Verfahren zur Berechnung der fixierten Energie. Die hier verwendeten Umrechnungsfaktoren von 1426 kcal/lb für Traktoren und 850 kcal/lb für Primär- und Sekundärtillagegeräte berücksichtigen alle modernen Möglichkeiten der industriellen Energieeinsparungen; sie wurden in Zusammenarbeit mit den wichtigsten amerikanischen Landmaschinenherstellern entwickelt.

Auf der Grundlage von 90 Farmen wurde ein lineares Abschreibungsmodell und ein Instandhaltungsmodell mit folgenden Eckwerten entwickelt:

- Motorisierte Geräte sind 10 Jahre in Gebrauch, nicht-motorisierte Geräte 15 Jahre,
- Schrottwert nach Abschreibungsphase 10% des ursprünglichen Mehrwert-Energiebetrages;
- Instandhaltungs-Energie für motorisierte Geräte 8%, für nicht-motorisierte Geräte 3% des ursprünglichen Energiebetrages pro Einsatzjahr;
- Abschreibung der fixierten Energie pro Jahr und pro bearbeitetem acre demnach gleich 90% des ursprünglichen Energiebetrages, dividiert durch 10 bzw. durch 15 Einsatzjahre, dividiert durch die Gesamtzahl der bearbeiteten acres. Gleiche Berechnung der jährlichen Instandhaltungsenergie pro Gerät pro bearbeitetem acre.

Saatenergie basiert auf 1500 kcal/lb Weizenkorn als im Stoffwechsel verwertbare Energie (nach USDA 1975).

Die folgenden Umrechnungsfaktoren ergeben die Energie, welche zur Produktion der Elemente N, P, K, S und Zn in Düngemitteln und der Wirkstoffe in Pflanzenschutzmitteln verbraucht wird:

- N 6486 kcal/lb, P 1360,8 kcal/lb, K 725,8 kcal/lb, S 12100 kcal/lb, Zn und alle anderen Elemente 1000 kcal/lb (nach LOCKERETZ 1979 und FRITSCH 1975),
- Dicamba 31927 kcal/lb, Atrazin 20580 kcal/lb, Paraquat 49825 kcal/lb, Glyphosat 49136 kcal/lb, 2-4D 9207 kcal/lb, Endrin 11000 kcal/lb, Cygon 1362 kcal/lb, Bladex-80W 20580 kcal/lb, DDT und alle anderen 11000 kcal/lb (nach GREEN 1976, LEACH u. SCHLESSER 1974 und PIMENTEL et al. 1973).

Transportenergie, die zur Beförderung von Ackergerät zum Zwecke der Verrichtung eines Arbeitsganges zwischen Farm und Feld verbraucht wird, berechnet sich nach der folgenden Modellvorstellung: Farmspezifische mittlere Distanzen zwischen Farmhaus und Feldern werden bei 15 mph und 25% Ladungsfaktor zweimal pro Arbeitsgang zurückgelegt. Nur Treibstoff wird verbucht. Die Verbrauchswerte errechnen sich an Hand der Nebraska Tractor Test-Daten für 100%, 75% und 50% Ladungsfaktor durch Extrapolierung für 25% mittels optimaler Kurvenanpassung.

Als Input werden all jene Feldarbeiten verbucht, die direkt mit der mechanischen und chemischen Unkrautkontrolle, mit der Winderosionskontrolle, dem Düngen und mit dem Saatvorgang verbunden sind. Alle anderen Feldarbeiten bleiben unberücksichtigt, da sie zum einen keine direkten Produktionsinputs darstellen. Zum anderen werden sich alle Bemühungen zur Optimierung der E-Quotienten ausschließlich auf diese hier berücksichtigten direkten Inputs konzentrieren. (Über diese Optimierungsbemühungen wird an anderer Stelle ausführlich berichtet werden.) Folglich bleiben auch die zum Ernten erforderlichen Energieaufwendungen unberücksichtigt – findet doch die Ernte erst dann statt, wenn die Kornproduktion abgeschlossen ist.

Der Ertrag als produzierte Nahrungsenergie ist der Output. Der Output/Input-Quotient ist damit ein Maß für die Energiewirksamkeit der verschiedenen Weizenanbausysteme.

Ein Fortran-Computerprogramm berechnet in Verbindung mit System 2000-Software die individuellen Feld-Energiehaushalte für 90 Farmen. Dieses Programm steht auf Anfrage oder über den Software Catalogue, Winter Edition

1983 von ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS (1983) zur Verfügung. Auf 1000 Einzelfeldern wurden die hier ausgewerteten Daten auf Tagesbasis erhoben. Alle Tillage-Systeme – von der Schwarzbrache über die verschiedenen Abstufungen des Stoppelmulchens bis hin zur Öko-Tillage oder Chemischen Tillage – sind erfaßt; die Betriebsgrößen liegen zwischen 80 acres (ca. 32 ha) und 7000 acres (ca. 2850 ha); alle heute gebräuchlichen Weizensorten und die im Weizengürtel der zentralen Great Plains genutzten Bodenserien sind berücksichtigt.

Die verschiedenen Tillage-Systeme sind nur mit den anderen Parametern des hier untersuchten Wirkgefüges zu korrelieren, wenn sie numerisch beschrieben werden können. Die an der Feldoberfläche zum Saattermin noch vorhandene Strohrestrate (künftig %RR genannt) nimmt diese Beschreibung objektiv vor. Sie wird berechnet, indem pro Arbeitsgang der vor demselben noch gegebene %RR-Betrag um einen gerätespezifischen Anteil reduziert wird. %RR wird also um so kleiner, je häufiger und intensiver Feldarbeiten durchgeführt werden. Die Reduktionsfaktoren sind an FENSTER et al. (1965), WOODRUFF (1972), SPÄTH (1980) und erhobene Farmdaten angelehnt. Bei dieser Berechnung bleiben Witterungseinflüsse und natürlicher Verfall unberücksichtigt.

(2) Durch die gewählte Größe des Untersuchungsgebietes kann die räumliche Variabilität der Einzelparameter pro Anbaujahr erfaßt werden. Dem in der Trockenlandwirtschaft für Testparzellen gegebenen Bedarf an 30jährigen Datenreihen wird hier entsprochen, indem z. B. für ein bestimmtes Tillage-System auf einer bestimmten Bodenart im Untersuchungsgebiet während eines Kalenderjahres eine Vielzahl unterschiedlicher Klimaeinflüsse erfaßt wird und so über drei bis vier Beobachtungsjahre eine weit breitere Datenbasis pro Standorteigenschaft (Boden, Tillage-System) vorhanden ist, als dies für einen isolierten Standort über 30 Jahre hinweg möglich wäre. Der Forderung nach langen Datenreihen pro Standorteigenschaft zur Erfassung der zeitlichen Variabilität einzelner Wirkfaktoren wird hier also voll und ganz entsprochen.

Die verfügbare Feuchte (künftig auch M genannt) wird errechnet nach 40% Brachewirksamkeit (= Niederschlags-speicherung während der 14monatigen Bracheperiode) plus 80% Niederschlagsaufnahme während der Vegetationsperiode (hierzu vgl. SPÄTH 1980). Diese verfügbare Feuchte ersetzt den Faktor ‚Niederschlag‘, da dieser selbst nicht unmittelbar auf die anderen Parameter im hier behandelten ökologischen Funktionsmodell „Tillage-System/Pflanzenrestrate/Feuchte/Ertrag/E-Quotient“ einwirkt. Die Einbeziehung dieser verfügbaren Feuchte stellt eine brauchbare Zwischenlösung dar; die besten Korrelationen ergeben sich zwischen den Einzelfaktoren des Funktionsmodells und der pflanzenverfügbaren Bodenfeuchte. Daten hierzu liegen aber noch nicht in ausreichender Breite vor.

Der Begriff „geoökologische Variabilität“ ist demnach verknüpft mit der raum-zeitlichen Abwandlung des Niederschlagsdargebotes und mit der lokalen und räumlichen Abwandlung jener Bodeneigenschaften, die das Umsetzen des Niederschlages in pflanzenverfügbare Bodenfeuchte regu-

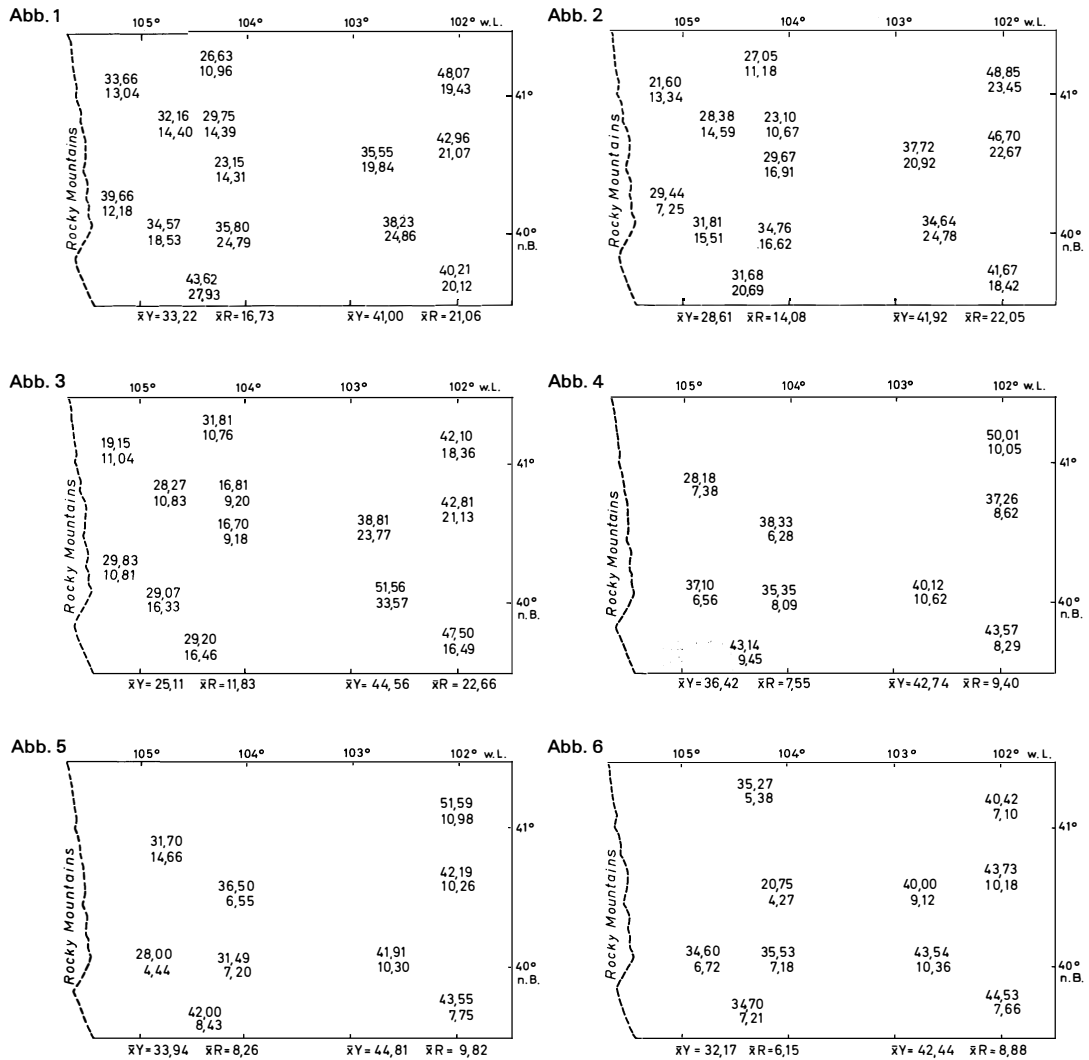


Abb. 1–6: Ertrag (Y, obere Ziffer in bu/acre) und Energie-Output/Input-Quotient (R, untere Ziffer). Mittelwerte für Ost und West am unteren Kartenrand

Yield (Y, upper number in bu/acre) and energy-output/input-ratio (R, lower number). Mean for East and West at lower edge of map

Abb. 1: Ungedüngter Weizen im Anbaujahr 1978/79/80  
 Unfertilized wheat for the crop year 1978/79/80

Abb. 2: Ungedüngter Weizen im Anbaujahr 1979/80/81  
 Unfertilized wheat for the crop year 1979/80/81

Abb. 3: Ungedüngter Weizen im Anbaujahr 1980/81/82  
 Unfertilized wheat for the crop year 1980/81/82

Abb. 4: Gedüngter Weizen im Anbaujahr 1978/79/80  
 Fertilized wheat for the crop year 1978/79/80

Abb. 5: Gedüngter Weizen im Anbaujahr 1979/80/81  
 Fertilized wheat for the crop year 1979/80/81

Abb. 6: Gedüngter Weizen im Anbaujahr 1980/81/82  
 Fertilized wheat for the crop year 1980/81/82

lieren. Diese geoökologische Variabilität ist gekoppelt mit der lokalen, räumlichen und zeitlichen Abwandlung der Tillage-Systeme (= kulturtechnische Variabilität), welche die im Rahmen der erwähnten Bodeneigenschaften gegebenen Bodenfeuchtespeichervermögen differenziert ausschöpfen.

### Die Energiewirksamkeit der Weizenproduktion

Die raum-zeitliche Abwandlung der E-Quotienten und der zugeordneten Ertragsdaten für gedüngten und ungedüngten Weizenanbau für die 1980er, 1981er und 1982er Ernten ist in den Abb. 1–6 gegeben. Insgesamt werden hier 1500



Tabelle 1: Mittel der Weizenenerträge (Y in bu/acre) und der Energie-Output/Input-Quotienten (R) im Osten und Westen der zentralen Great Plains für ungedüngten und gedüngten Anbau für die Ernten von 1980, 1981 und 1982

Average wheat yields (Y in bu/acre) and energy-output/input-ratio (R) in the East and West of the central Great Plains for unfertilized and fertilized wheat for 1980-, 1981-, and 1982-crops

		West	Ost	% (West = 100)	
ungedüngt:	Y <sub>80</sub>	33,22	41,00	123,42	
	R <sub>80</sub>	16,73	21,06	125,88	
	Y <sub>81</sub>	28,61	41,92	146,52	
	R <sub>81</sub>	14,08	22,05	156,61	
	Y <sub>82</sub>	25,11	44,56	177,46	
	R <sub>82</sub>	11,83	22,66	191,55	
	$\bar{X}$ Y	28,98	42,49	146,62	
	$\bar{X}$ R	14,21	25,45	179,10	
	gedüngt:	Y <sub>80</sub>	36,42	42,74	117,35
		R <sub>80</sub>	7,55	9,40	124,50
Y <sub>81</sub>		33,94	44,81	132,03	
R <sub>81</sub>		8,26	9,82	118,89	
Y <sub>82</sub>		32,17	42,44	131,92	
R <sub>82</sub>		6,15	8,88	144,39	
$\bar{X}$ Y		34,18	43,33	126,77	
$\bar{X}$ R		7,32	9,37	128,01	

den 1981er und 1982er sowie den 1980er und 1982er Ernten des Westens mit den Prozentunterschieden zwischen den 1981er und 1982er Ernten des Ostens verglichen werden.

Folgender Exkurs schließt die Ausführungen zu den regionalen Ergebnissen ab: Auf der Basis einer Ertragslage von 35 bis 40 bu/acre und einem Erlös von höchstens (und fast nie erreichten) \$ 3,50 bis \$ 4,00 pro bu errechnen sich in Anlehnung an ANDERSON (1981) für ungedüngten Weizen \$-Output/Input-Quotienten von bestenfalls 3 bis 5. Hierbei sind nur jene Inputs veranschlagt, die auch in die E-Haushaltsberechnungen aufgenommen worden sind. Das so gegebene Mißverhältnis von \$-Quotient und E-Quotient zeigt an, daß entweder die in die Weizenproduktion investierten Inputs im Vergleich zum Erlös zu teuer sind, oder daß der Erlös relativ zu niedrig fixiert ist. Möglicherweise sind sowohl Investitionen zu teuer und Erlöse zu niedrig. Die \$-Quotienten spiegeln also eine wirtschaftliche Ungereimtheit wider, die sich an Hand der E-Haushalte nachweisen läßt. Dort werden nämlich Quotienten errechnet, die der Trockenlandwirtschaft auf der Grundlage von E-Einheiten einen bislang nicht vermuteten hohen Wirkungsgrad und ein hohes theoretisches Wirtschaftlichkeitsniveau bescheinigen. In jedem Falle wird durch diese Gegenüberstellung gezeigt, daß \$- (oder auch DM-)Quotienten nur bedingt dazu geeignet sind, betriebliche Leistungsniveaus zu beschreiben. E-Haushalte hingegen sind in der Lage, diese Beschreibungen objektiv und zeitlos zu geben, sind doch die in den einzelnen Inputs enthaltenen E-Mengen – in krassem Gegen-

satz zu ihren Kosten – von Ort zu Ort und von Zeitpunkt zu Zeitpunkt relativ konstant.

#### Wechselbeziehungen zwischen Energie-Quotienten, Erträgen, verfügbarer Feuchte und kulturtechnischen Praktiken

Die Wechselbeziehungen zwischen den hier erfaßten einzelnen geoökologischen und agro-technischen Parametern lassen sich für die Anbaujahre 1978/79/80, 1979/80/81 und 1980/81/82 für ungedüngten und gedüngten Weizen durch lineare Regressionen beschreiben. Die Tab. 2 und 3 geben die Kenngrößen – Y-Achsenabschnitt, Steigungsmaß und Korrelationskoeffizient – der Gleichungen für die Einzelbeziehungen zwischen verbleibender Pflanzenrestrate (%RR) und verfügbarer Feuchte (M), Ertrag (Y) und verfügbarer Feuchte, E-Quotient (R) und verfügbarer Feuchte sowie Ertrag und E-Quotient für ungedüngten und gedüngten Anbau. Diese Kenngrößen differenzieren die Aussagen der Abb. 1–9. Folgende Schlußfolgerungen sind daraus zu ziehen:

Steigungsmaß und Y-Achsenabschnitt für die Gerade %RR/M in Tab. 2 zeigen für gedüngten und ungedüngten Weizen, daß mit zunehmendem Feuchtedargebot der Strohrstbetrag an der Feldoberfläche generell eine abnehmende Tendenz aufweist. Diese Tendenz ist darauf zurückzuführen, daß die hier verbuchte Zunahme der verfügbaren Feuchte zumeist auch mit einer zunehmenden Anzahl der Niederschlagsereignisse gleichzusetzen ist und damit die Anzahl der zur Unkrautkontrolle nötigen mechanischen Feldbearbeitungen zunimmt. Ist dies nicht der Fall, dann können maximale Niederschlagsdargebote auf der Basis relativ geringen Unkrautwachstums zu minimalem Tillagebedarf (= maximale %RR) führen. Farmen in Bereichen maximaler Niederschlagshöhen mit minimaler Anzahl von

Tabelle 2: Wechselbeziehungen zwischen zur Saatzeit an der Feldoberfläche verbleibender Pflanzenrestrate (%RR), verfügbarer Feuchte (M in inches)<sup>\*)</sup> und Weizenenertrag (Y in bu/acre) für ungedüngten (oD) und gedüngten (D) Anbau für alle Tillage-Systeme im Bereich der zentralen Great Plains

Relationship between remaining residue (%RR), available moisture (M in inches) and wheat yield (Y in bu/acre) for unfertilized (oD) and for fertilized (D) wheat for all tillage systems in the central Great Plains

	A <sup>1)</sup>	B <sup>2)</sup>	r <sup>3)</sup>
%RR / M <sub>oD</sub>	47,84	-1,06	-0,58
%RR / M <sub>D</sub>	39,34	-0,40	-0,49
Y / M <sub>oD</sub>	-1,20	1,98	0,84
Y / M <sub>D</sub>	20,64	1,00	0,70

<sup>\*)</sup> Definiert als 40% Niederschlagsspeicherung während der 14monatigen Bracheperiode plus 80% der Niederschläge während der Vegetationsphase

<sup>1)</sup> A = Y-Achsenabschnitt

<sup>2)</sup> B = Steigung der Regressionsgeraden

<sup>3)</sup> r = Korrelationskoeffizient

Niederschlagsereignissen und in Bereichen minimaler Niederschlagshöhen und maximaler Niederschlagsereignisse liefern zu dieser Feststellung die Daten. Die zunehmende Anzahl der Tillagegänge führt zu einer Zunahme der Produktionsenergie-Inputs. So wird der Trend zu abnehmenden E-Quotienten bei konstanter Ertragslage begründet.

Möglicherweise läßt sich eine noch engere Korrelation zwischen %RR und M nachweisen, wenn Niederschlagsdaten aus einem Farmstationsnetz das bislang verwendete Netz offizieller Wetterstationen verdichten. Weiterhin ließe sich der Korrelationskoeffizient erhöhen, wenn der Einfluß des Wendepfluges hier eliminiert werden würde. Sein Einsatz leitet sich nicht wie der aller anderen Tillagegeräte als kulturtechnisch notwendiges aus dem Niederschlagsgeschehen ab. Er kommt vielmehr dann zum Einsatz, wenn die Bodenfeuchtedurchlässigkeit verbessert und Verdichtungshorizonte aufgebrochen werden sollen, wenn persistente Unkräuter periodisch zu vernichten sind oder wenn eine tiefgreifende Bodenumschichtung eine gleichmäßige Verteilung (und Verbesserung) des natürlichen Nährstoffangebotes bewirken soll. Darüber hinaus kommt er auch mangels vernünftiger kulturtechnischer Alternativkonzepte als Allzweckgerät noch häufig zum Einsatz. Er bewirkt die Minimalwerte für %RR. In der Regel hat seine kontinuierliche Anwendung starke Reduzierungen der Bodenfeuchte im Pflughorizont und Ertragsdepressionen zur Folge. Bei periodischer Anwendung können sich seine Einsatzfolgen durchaus positiv auf Bodenfeuchte und Ertrag auswirken. Aus den hier zugrunde gelegten Daten lassen sich diese Störeffekte jedoch nicht überzeugend ausschließen. Ein weiterer Grund für die gegebene Größe des Korrelationskoeffizienten liegt in der Tatsache, daß in Zeiten häufiger Niederschlagsereignisse zwar starkes Unkrautwachstum häufige

Tillage erforderlich macht, daß die starke Vernässung der Krume aber einen Maschineneinsatz zeitlich stark verzögert. So bleiben dann die %RR auf einem der Menge der verfügbaren Feuchte nicht entsprechenden hohen Niveau, und die Höhe der pflanzenverfügbaren Bodenfeuchte bleibt hinter dem möglichen Maximum zurück (СРЯТН 1975, S. 90).

Für die Beziehung von Y/M geben die Tab. 2 und 3 die Eckwerte. Bei gleichem M-Zuwachs zeigen die drei %RR-Gruppen etwa gleiche Y-Zuwachsraten. Leicht ansteigende Vorteile sind jedoch für steigende %RR gegeben. Nur die Gruppe 60–99% RR für gedüngten Anbau bildet hierin eine Ausnahme. Innerhalb der mittleren Ertragsspanne von 20–30 bu/acre werden für die 0–29% RR-Systeme am wenigsten Feuchte zur Produktion eines gegebenen Ertrages dargeboten, für die Gruppe 60–99% RR am meisten. Dies trifft für den gesamten Bereich der berücksichtigten Spanne verfügbarer Feuchte von 11 bis 26 inches zu. Die Erträge sind jedoch nur mittelbar mit M verknüpft. So beschränkt sich die hier vorgegebene Beziehung auf Aussagen zum Ertragspotential unter bestimmten Niederschlagsbedingungen. Das Maß der Abwandlung und der unterschiedlichen Ausschöpfung dieses Potentials wird direkt bestimmt durch die Höhe der pflanzenverfügbaren Feuchte, welche ihrerseits von der Art und Intensität der praktizierten Tillage abhängig ist. Die Bodenfeuchte also stellt den unmittelbar und eng mit dem Ertrag korrelierten Faktor dar. Weiterführende Untersuchungen werden sich mit diesem Sachverhalt befassen.

Die aus den vorgegebenen Eckwerten für die Beziehung Y/M abzuleitende Schlußfolgerung, daß bei gleichem M die Erträge mit zunehmender Tillageintensität (= abnehmende %RR) anwachsen, widerspricht zunächst der in der Literatur durch Daten gestützten These, daß die Bodenfeuchte mit

Tabelle 3: Wechselbeziehungen zwischen Weizenanbau (Y in bu/acre), verfügbarer Feuchte (M in inches)<sup>\*)</sup> und Energie-Output/Input-Quotient (R) für ungedüngten (oD) und für gedüngten (D) Weizenanbau für Schwarzbrache, modifizierte Schwarzbrache, Stoppelmulchen, Minimum-Tillage und Öko-Tillage

Relationship between wheat yield (Y in bu/acre), available moisture (M in inches), and energy-output/input-ratio (R) for unfertilized (oD) and for fertilized (D) wheat for clean tillage, modified black fallow, stubble mulching, minimum-tillage and eco-tillage

Korrelation von	Tillage System								
	Schwarzbrache und modifiz. Schwarzbrache			Stoppelmulchen und Minimum-Tillage			Minimum-Tillage und Öko-Tillage		
	0–29% RR			30–59% RR			60–99% RR		
	A <sup>1)</sup>	B <sup>2)</sup>	r <sup>3)</sup>	A	B	r	A	B	r
Y / M <sub>oD</sub>	1,35	1,89	0,80	-2,58	1,97	0,88	-2,72	2,00	0,87
Y / M <sub>D</sub>	21,24	1,00	0,63	17,35	1,13	0,68	37,35	0,26	0,40
R / M <sub>oD</sub>	1,09	0,82	0,64	-2,25	1,15	0,71	20,62	0,26	0,56
R / M <sub>D</sub>	5,83	0,12	0,58	4,06	0,22	0,59	2,85	0,29	0,69
Y / R <sub>oD</sub>	14,00	1,22	0,78	14,93	0,97	0,83	25,57	0,29	0,68
Y / R <sub>D</sub>	24,10	2,14	0,78	25,25	1,78	0,67	34,30	0,72	0,64

<sup>\*)</sup> Definiert als 40% Niederschlagspeicherung während der 14monatigen Bracheperiode plus 80% der Niederschläge während der Vegetationsperiode

<sup>1)</sup> A = Y-Achsenabschnitt; <sup>2)</sup> B = Steigung der Regressionsgeraden; <sup>3)</sup> r = Korrelationskoeffizient

zunehmender Tillageintensität abnimmt und so die Erträge reduziert werden. Diese Unstimmigkeit kann durch folgende Sachverhalte mit erklärt werden: Die hohen %RR entstammen aus Observationen und Gebieten mit relativ starken und häufigen Niederschlagsereignissen. Die Häufigkeit und Termine der resultierenden Tillage wurden nicht vom Verdunstungsgang und Unkrautwachstum, sondern überwiegend von der Konsistenz der Ackerkrume bestimmt, und relativ hohe Feuchteverluste waren die Folge. Anhaltende überdurchschnittliche Bodenfeuchtedargebote in der Anbauphase führten dann zusätzlich zu überaus starkem Unkrautwachstum, welches seinerseits erfolgreich um die zur Kornproduktion benötigte Bodenfeuchte konkurrierte und so Ertragsdepressionen bewirkte. Die Beziehung R/M wiederholt dieses Verhalten zwischen den Feuchtwerten 11 und 17,25. Bemühungen um Einhaltung von Minimum-Tillage-Prinzipien machen sich unter diesen Bedingungen also nicht bezahlt.

Für die Beziehung zwischen R und M (in Tab. 3) ist wie im Falle der Beziehung %RR/M von der Annahme auszugehen, daß bei zunehmender Niederschlagsfülle die Notwendigkeit der Unkrautbekämpfung zunimmt, die %RR deshalb abnehmen und bei konstanter Ertragslage der E-Quotient auf Grund eines zunehmenden E-Inputs reduziert wird. Zwischen  $M = 11$  und  $26$  gestaltet sich die Beziehung R/M recht unterschiedlich: Von ca.  $M = 17,25$  bis  $26$  nehmen die Vorteile wachsender %RR für gedüngten Anbau mit wachsendem Feuchtedarbot progressiv zu. Bei einem gegebenen M verbessert sich die E-Wirksamkeit mit zunehmenden %RR. Steigende Erträge bei gleichem E-Input, sich

verringern E-Inputs bei konstantem Ertrag sowie die Kombination von schrumpfenden E-Inputs und steigenden Erträgen erhöhen den E-Quotienten. Bei  $M \leq 17,25$  kehren sich diese Sachverhalte für gedüngten Anbau um. Wie im Falle der Beziehung Y/M resultieren hier zunehmende Tillagehäufigkeit bzw. schrumpfende %RR bei konstantem Feuchtedarbot in ansteigenden E-Quotienten. Dieser Zustand ist für die beobachteten Felder, z.B. im Bereich des absoluten Feuchteminimums, auf ebenfalls absolute Minimalernten von 10 bis 20 bu/acre zurückzuführen. Minimum-Tillage setzt hier den Niederschlag nicht in lokal maximale Bodenfeuchte um und kann sich so nicht in höheren Erträgen und E-Quotienten niederschlagen. Da also die relativ hohen E-Quotienten in diesem Feuchtebereich nur über die höheren Tillage-Inputs zu erzielen sind, diese E-Quotienten aber auf die hier untersuchte Gesamtspanne der verfügbaren Feuchte von 11 bis 26 inches bezogen die absolut kleinsten Beiträge erreichen, da darüber hinaus die exzessive Tillage gerade in diesen Gebieten über die Winderosion zu starken standortökologischen Schäden führt, sollte bei  $M \leq 17,25$  gedüngter Weizenanbau durch ungedüngten Anbau (mit 50% höheren E-Quotienten) oder gar durch Weidewirtschaft ersetzt werden. Diese Feuchtegebiete sind bei der Suche nach förderungswürdigen Regionen auszusondern. Die energieintensiven Anbauformen werden hier am ehesten ausfallen. Für ungedüngten Anbau werden die Vorteile der höheren %RR in allen M-Bereichen herausgehoben.

Ertrag (Y) und E-Quotient (R) sind wie folgt korreliert: Für ungedüngten wie gedüngten Weizen sind die niedrigen R mit den niedrigen %RR verbunden, die höheren R mit den

Tabelle 4: Sommerbrache-Bearbeitungssysteme und entsprechende agro-ökologische Parameter. Mittelwerte für alle Weizensorten, Bodenarten, ungedüngten und gedüngten Anbau

Tillage systems and related agro-ecological parameters. Average values for all wheat varieties, soil series, and for unfertilized and fertilized wheat

Bodenbearbeitungssystem	Aktivitäten	Anzahl der mechanischen Operationen	Pflanzenrestrate %*)	Brachewirksamkeit %**)	Ertrag bu/acre	Energie-Quotient
Schwarzbrache	Wendepflug; Einweg- und Zweiweg-Scheibenpflug tief 2-3 mal; Eggen	5-8	0 (0)	20-24 23-27	25-35	5-15
Semi-Schwarzbrache	Scheibenpflug 1 mal; Ritzpflug; Jätstab	4-6	8-24 (5-10)	24-27 /	30-40	10-15
Stoppelmulchen (Konservationstillage)	Breitscharpflug breit und schmal; Jätstab	4-5	40-55 (15-30)	30-33 35-38	35-40	15-20
Minimum-Tillage	Breitscharpflug breit und schmal; Jätstab	2-4	50-60 (25-35)	30-40 /	40-50	20-30
Öko-Tillage (Chemische Tillage)	Herbizide im Herbst; Breitscharpflug; Jätstab	1-3	60-80 (35-50)	33-45 35-45	45-55	20-35

\*) Daten ohne Klammer: Nur mechanische Reduktion berücksichtigt;

Daten in Klammer: Schätzwert, der mechanische Reduktion plus natürlichen Verfall berücksichtigt

\*\*) Im Boden gespeicherter Anteil der Niederschläge der 14monatigen Bracheperiode für Akron/Colorado und North Platte/Nebraska



höheren %RR. In beiden Fällen schwächt sich die Ertragszunahme bei anwachsendem R degressiv ab. Dies bedeutet, daß eine konstante Zunahme der E-Wirksamkeit mit Hilfe immer kleiner werdender Anteile an Produktionsenergie-Inputs erreicht werden kann. Die Gesamtkurve, zusammengesetzt aus einem linken Abschnitt für 0–29% RR, einem mittleren Abschnitt für 30–59% RR und einem rechten Abschnitt für 60–99% RR, zeigt also einen abflachenden Trend für die Ertragsentwicklung bei gleichbleibenden Zuwachsraten für R. Dieses Level-Off-Phänomen tritt bei gedüngtem Anbau in höheren Ertragsbereichen als bei ungedüngtem Anbau auf; es setzt aber auch bereits im halb so hohen R-Niveau ein.

Diese Gleichungen sind zur Quantifizierung jener grundlegenden Einzelbeziehungen geeignet, welche das Nahrungsenergie-Produktionspotential des Weizenbaus regulieren. Sie gelten für Gebiete mit 12 bis 20 inches Jahresniederschlag und einer Verteilung mit einem dominanten Minimum und Maximum pro Jahr (vgl. SPÄTH 1983). Sie gelten weiterhin für die Ertragsspanne von 10 bis 60 bu/acre und den E-Wirksamkeitsbereich von 3 bis 40; sie stellen Mittelwerte für alle Bodenarten und Weizensorten dar. Wenngleich auch die Korrelationskoeffizienten noch keine optimale Beschreibung der Einzelbeziehungen andeuten, so sind sie doch dazu geeignet, brauchbare Leitlinien für die Lösung energiebezogener Planungsaufgaben abzugeben und ein neues Verständnis der E-Wirksamkeit landwirtschaftlicher Produktionssysteme zu begründen.

#### Fazit

Die fortlaufenden Beziehungen zwischen verbleibender Pflanzenrestrate, verfügbarer Feuchte, Ertragslage und E-Wirksamkeit werden in Tab. 4 für ungedüngten und gedüngten Weizenanbau zusammengefaßt:

- Mit zunehmender Anzahl mechanischer Tillagegänge nimmt die an der Feldoberfläche zum Saattermin noch vorhandene Pflanzenrestrate ab,
- hohe Pflanzenrestraten bewirken eine hohe Brachewirksamkeit,
- zunehmende Bodenfeuchte steigert die Erträge,
- gesteigerte Erträge erhöhen den E-Quotienten, und
- der Betrag des E-Quotienten schließlich wird mitbestimmt durch die Anzahl der mechanischen Bodenbearbeitungsgänge.

Das Konzept möglicher Bemühungen um E-Quotientenoptimierung sieht demnach stark vereinfacht wie folgt aus: Durch die Reduzierung der Anzahl und der Intensität der Bodenbearbeitungen und einen Wechsel von schwerem, den Boden wendenden Geräte zu leichtem, ritzendem Gerät wird der Produktions-Gesamtinput reduziert; ökologisch wird gleichzeitig die Voraussetzung geschaffen für höhere Erträge und damit für eine höhere E-Wirksamkeit.

#### Literatur

- ANDERSON, E. G.: Economics of Eco-Fallow versus Conventional Tillage in a Wheat-Summer Fallow System. In: SMIKA, D. et al. (Hrsg.): Proceedings – Eco-Fallow Conferences. Lamar 1981, S. 17–21.
- DOERING, O. C. III: A General Procedure für Counting Energy in Farm Machinery. Purdue University, Dept. of Economics, West Lafayette/Ind. 1978.
- DOWNES, H. u. HANSEN, R.: Estimating Farm Fuel Requirements. Colorado State University Extension Service, Service in Action No. 5.006, 1979.
- FENSTER, C. R., WOODRUFF, N. P., CHEPIL, W. S. u. SIDDOWNAY, F. H.: Performance of Tillage Implements in a Stubble Mulch System: III. Effects of Tillage Sequences on Residues, Soil Clodiness, Weed Control, and Wheat Yields. In: Agron. Journ. Vol. 57, 1965, S. 52–55.
- FRITSCH, A. J., DUKACK, L. W. u. JIMERSON, D. R.: Energy and Food: Energy used in Produktion, Processing, Delivery, and Marketing of Selected Foods Items. CSPI Energy Series VI, Washington, DC 1975.
- GREEN, M. B.: Energy in Agriculture. In: Chem. and Ind. No. 15, 1976.
- : Eating Oil. Boulder/Colorado 1978.
- HEYLAND, K.-U. u. SOLANSKY, S.: Energieeinsatz und Energieumsatz im Bereich der Pflanzenproduktion. In: Agrarwirtschaft und Energie. Ber. über Landwirtschaft NF 195, Sonderheft, 1979, S. 15–30.
- LEACH, G.: Energy and Foodproduction. Guildford/Surrey 1976.
- LEACH, G. u. SLESSER, M.: Energy Equivalents of Network Inputs to Food Producing Processes. Strathclyde University, Glasgow 1973.
- LOCKERETZ, W.: Energy Inputs for Nitrogen, Phosphorus, and Potash Fertilizer. In: PIMENTEL, D. (Hrsg.): Energy in Agriculture. West Palm Beach/Florida 1979.
- PATRICK, N. A.: Energy Use Patterns for Agricultural Production in New Mexico. In: LOCKERETZ, W. (Hrsg.): Agriculture and Energy. New York 1977, S. 31–40.
- PIMENTEL, D. u. PIMENTEL, M.: Food, Energy, and Society. New York 1979.
- PIMENTEL, D., HURD, L. E., BELLOTTI, A. C., FORSTER, M. J., OKA, I. N., SHOLES, O. D. u. WHITEMAN, R. J.: Food Production and the Energy Crisis. In: Science 182, 1973, S. 443–449.
- SPÄTH, H.-J.: Die agro-ökologische Trockengrenze in den zentralen Great Plains von Nord-Amerika. Erdwiss. Forschung Bd. XV, 1980.
- : Energieverbrauch der Landwirtschaft im semi-ariden Ost-Colorado/USA. In: Beiträge zur Hydrologie, Sonderheft 2, Freiburg 1981, S. 161–175.
- : Zur harmonischen Analyse des Jahresgangs der pflanzenverfügbaren Bodenfeuchte als Agrar-Planungsinstrument. In: Beiträge zur Hydrologie 1983.
- University of Nebraska, Nebraska Tractor Test Reports, Lincoln/Nebraska.
- USDA: Nutritive Value of American Foods. ARS Agric. Handbook No. 456, 1975.
- WOODRUFF, N. P.: Wind Erosion as Affected by Reduced Tillage. In: Center for tomorrow (Hrsg.): No-Tillage Systems. Columbus/Ohio 1972, S. 2–20.