

Beurteilung landwirtschaftlicher Mechanisierungsverfahren im Rahmen industrieller Produktforschung mit Hilfe des programmierten Rechnens

Von **Wolfgang Vornkahl**, Stuttgart-Hohenheim¹⁾

Einzeluntersuchungen für die Beurteilung landwirtschaftlicher Mechanisierungsverfahren genügen dem landtechnischen Produktforscher nicht mehr. Heute muß er für ein gesamtes Mechanisierungsverfahren mathematische Modelle entwerfen, die die Beziehungen der benutzten Maschinen und Arbeitsgänge zueinander beschreiben. Eingehend wird dargelegt, daß man von „Materialfluß-Diagrammen“ ausgeht, die mittels verschiedener Methoden aufgestellt werden. Ist das Mechanisierungsverfahren in mathematischen Beziehungen erfaßt, gilt es Programme für die Optimierungsrechnungen zu entwickeln. Es wird gezeigt, daß die lineare Programmierung sich für landwirtschaftliche Probleme als besonders brauchbar erwiesen hat. Die Lösung der meist komplizierten Probleme wird mit elektronischen Rechenanlagen (Digitalrechner) in kurzer Zeit durchgeführt. Zum Schluß werden die Schwierigkeiten genannt, die bei der Prognostizierung von landwirtschaftlichen Mechanisierungsverfahren mit der programmierten Rechnung zu überwinden sind.

Verschiedenartige Motive haben in allen industrialisierten Ländern seit etwa 20 Jahren zu einem Stadium besonders lebhafter technischer Entwicklung in der Landwirtschaft geführt [1]. Besondere Merkmale dieser Entwicklung sind die Dynamik des Marktes und die schwierige Übersicht, die eine Beurteilung für den landtechnischen Produktforscher nicht einfach macht. Aber auch für den Landmaschinenhersteller und -konstrukteur sind die Analyse und die sorgfältige Beurteilung von landwirtschaftlichen Mechanisierungsverfahren bei verantwortungsvollen Entscheidungen wichtiger denn je, wenn sie sich vor Fehlinvestitionen schützen wollen. Die Anlässe zu solchen Beurteilungen können vielfältig sein, wie beispielsweise

der Vergleich mehrerer möglicher Mechanisierungsverfahren für die Entscheidung über die zweckmäßige Wahl einer Maschinenkette und deren sinnvolle Auslegung nach Funktion und Größe;

die Festlegung der genauen Leistungsfähigkeit einer Maschine bei verschiedenen Arbeitsbedingungen und die Prüfung der Faktoren, die für ein optimales Ergebnis ausschlaggebend sind;

die Festlegung verschiedener Größenabstufungen für einen großräumigen Markt, wenn man dazu übergeht, Maschinen in Baureihen zu entwickeln

oder Voraussagen über die weitere Entwicklung der Mechanisierungsverfahren zu machen.

Besonders die Kursbestimmung auf lange Sicht wird immer schwieriger und deren Tücke wächst ständig mit der Größe des Marktes, wobei zusätzlich zu berücksichtigen ist, daß neue Märkte im In- und Ausland in die Interessensphären der Firmen rücken, nationale Marktgrenzen im Zuge der Integration verschwinden oder mittels Filialisierung und Kapitalbeteiligungen übersprungen werden.

Landtechnische Produktforschung des Maschinenherstellers

Trotz der Vielfalt der technisch möglichen Lösungen und Entwicklungswege in der modernen mechanisierten Landwirtschaft mit seinen zahlreichen und oft schwankenden Einflußfaktoren möchte man Methoden zur Bestimmung der optimalen Organisation eines landwirtschaftlichen Mechanisierungsverfahrens möglichst ohne großen Fehlerbereich entwickeln.

¹⁾ Vorgetragen auf der 23. Tagung der Landmaschinen-Konstrukteure in Braunschweig-Völkenrode am 13. 10. 1965.

Dipl.-Ing. Wolfgang Vornkahl war wissenschaftlicher Assistent am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Georg Segler) der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim und ist jetzt in der Versuchsabteilung für Radschlepper bei der Rhein Stahl Hanomag AG, Hannover tätig.

Der landtechnische Produktforscher ist heute weitgehend auf Einzeluntersuchungen angewiesen, wobei gewöhnlich Methoden aus der Betriebswirtschaft angewendet werden und die Kosten pro Fläche beispielsweise von Pflügen, Mähreschern oder Schleppern ausgerechnet und unter bestimmten Bedingungen verglichen werden [2]. Um dabei alle Einflußfaktoren zu erfassen, ist er bei diesen Vergleichen auf eine Menge von Einzeldaten angewiesen, die durch umfangreiche Zeitstudien gewonnen werden. Dabei ist es nicht möglich, alle Einflußfaktoren in den in der Praxis auftretenden Schwankungsbereichen zu erfassen: für bestimmte Faktoren müssen Annahmen gemacht werden. Soll beispielsweise die wirtschaftlich günstigste Arbeitsbreite eines Pfluges berechnet werden, so müssen dafür etwa 30 bis 50 feste Annahmen gemacht werden, wenn sich die Berechnung nicht über längere Zeit erstrecken soll. Es sind unter anderem die Schlaglänge, die Geschwindigkeit, der Bodenwiderstand, die Arbeitstiefe, die Lohnkosten. Das Rechnen mit den Annahmen kann natürlich nur eine Notlösung sein.

Darüber hinaus wurde auf der letzten ASAE-Sommertagung bemängelt [3], daß die bisherigen Kostenuntersuchungen keinesfalls den modernen Anforderungen genügen. Mit ihnen ist es nicht möglich, weiterzuplanen und Verbesserungen herauszufinden.

Ein weiterer entscheidender Nachteil ist, daß Einzeluntersuchungen zum Beurteilen von Mechanisierungsverfahren nicht mehr genügen. Bei der heutigen Spezialisierung und Rationalisierung in der modernen Landwirtschaft ist es wichtig, die möglichen Methoden und die zur Erfüllung der Mechanisierung der Arbeitsgänge notwendigen Maschinen und Geräte in ein möglichst wirksames Mechanisierungsverfahren zu bringen. Der landtechnische Produktforscher muß dieser Erscheinung bei sorgfältigen Untersuchungen gerecht werden. Mögen bei den oben erwähnten Einzeluntersuchungen die daraus getroffenen Entscheidungen für den betrachteten Bereich auch optimal sein, so brauchen sie sich, dem punktuellen Charakter von Einzeluntersuchungen entsprechend, doch nicht auf das gesamte Mechanisierungsverfahren günstig auszuwirken.

Es ist jetzt wohl verständlich, daß die traditionellen Untersuchungsmethoden den veränderten Anforderungen an eine rationelle Planung nicht mehr gerecht werden. Sie genügen dem landtechnischen Produktforscher nicht, und er möchte, wie es in anderen Bereichen der Industrie bereits üblich ist, aus den modernen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen Nutzen ziehen, bei denen zur Lösung der Aufgaben mathematische Methoden und moderne technische Hilfsmittel wesentlich helfen. Wie lauten die Aufgaben für den vorliegenden Fall?

Optimierung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren

Es wird von der Voraussetzung ausgegangen, daß es wichtiger ist, ein gesamtes Mechanisierungsverfahren, wie die Halmfutterernte, mit den darin vorkommenden Maschinen und Geräten und die Beziehungen und Beeinflussungen der Maschinen und Geräte unter- und zueinander zu betrachten, als eine Maschine für Einzelaufgaben auszuwählen. Die Aufgabe besteht dann darin, mathematische Modelle zu entwerfen, die die Beziehungen zwischen den benutzten Maschinen und Methoden im gesamten Produktionsverfahren beschreiben. Hierfür bietet sich die Anwendung moderner ingenieurmäßiger Methoden aus der Produktionstechnik geradezu an.

So revolutionär die Leistung der neuartigen Beurteilungsmethoden auch ist, so erfordert sie ein völlig neues organisatorisches System. Leider ist dabei die menschliche Vorarbeit unerlässlich und bei den vorliegenden komplexen Vorgängen schwierig. Der Ablauf des gewählten Verfahrens läßt sich in sechs Punkte gliedern:

1. Auswahl des Mechanisierungssystems.

Für die Halmfütterernte wird untersucht, welche Produktionsverfahren in Frage kommen: die Frischverfütterung, die verschiedenen Trocknungsverfahren oder ähnliche [4].

- 2. Graphische Konstruktion eines Materialflußdiagrammes.
- 3. Auswahl der Maschinenprogramme.
- 4. Benennung der erforderlichen Daten und Variablen.

Hier werden die Daten und variablen Einflußgrößen in Beziehung gesetzt, die für eine Optimierungsrechnung wichtig sind: die festen und beweglichen Kosten, die Dauer der Arbeitsvorgänge; in Nebenbedingungen wird die Schwankungsbreite der Veränderlichen festgelegt, beispielsweise die Häufigkeit der Betriebsgrößenverteilung für den zu untersuchenden Markt. Diese Methoden sind heute so weit entwickelt, daß wir uns anschließend darauf beschränken können, nur spezifisch landtechnische Sonderprobleme zu behandeln.

- 5. Aufbereitung der Beziehungen für die Optimierungsrechnung.
- 6. Lösung der Rechnung mit der digitalen Rechenanlage.

Die Punkte 1 bis 4 erfordern gut fundiertes landtechnisches Fachwissen, Punkte 5 und 6 vorwiegend mathematische Kenntnisse.

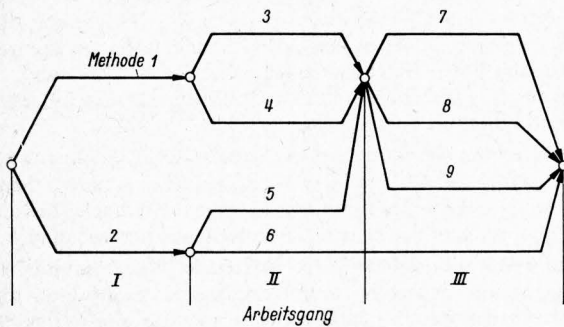


Bild 1. Aufbau eines Materialflußdiagramms.

Für die Anwendung der theoretischen Methoden ist die Entwicklung eines brauchbaren mathematischen Modells wichtig, das in übersichtlicher Form die Beziehungen zwischen den benutzten Maschinen und den Methoden darstellt. Die Analyse der Vorgänge ergibt, daß bei den landwirtschaftlichen Produktionsverfahren Material transportiert wird. Es ist naheliegend, in anderen Wirtschaftsbereichen nach analogen Methoden zur Lösung des Materialtransportes zu suchen.

Materialfluß in der landwirtschaftlichen Produktion

In der industriellen Fertigung ist das Transportieren in vielen Fällen mit den gleichen Verfahren rationalisiert worden, die sich in letzter Zeit für die allgemeine Betriebsrationalisierung bewährt haben und vielfach unter Einsatz von Rechenanlagen gelöst werden [5 bis 9]. In Anlehnung an diese Arbeiten wurde bei der Beurteilung der Mechanisierungsvorgänge von den so-

genannten „Materialfluß-Diagrammen“ ausgegangen. Die Materialflußgestaltung hat bekanntlich einen wesentlichen Anteil an der Organisation und Durchführung industrieller Fertigungsaufgaben, und die technisch-wirtschaftlichen Untersuchungen des Materialflusses sowie die Materialflußanalyse mit den verschiedenen Lösungsmethoden haben in vielen Bereichen der Industrie bereits ihre Bewährungsprobe bestanden. Der Materialfluß verbindet die einzelnen Lager- und Produktionsstellen und umfaßt den gesamten Arbeitslauf.

Zweck solcher Untersuchungen [7; 8] ist

- 1. übersichtliche Darstellung der Materialflußsituation im gesamten Betrieb;
- 2. Entwicklung von Plänen für eine verbesserte Materialflußgestaltung, d. h. eine harmonische Verbesserung der einzelnen Arbeitsgänge;
- 3. Wertung von arbeitswissenschaftlichen, organisatorischen, technischen und wirtschaftlichen Einflußgrößen auf die Kosten, die Zeit usw.;
- 4. Entwicklung von neuen Möglichkeiten zur Verbesserung des Materialflusses.

Die Wirtschaftlichkeit des Materialflusses ist davon abhängig, ob zum richtigen Zeitpunkt das gewünschte Material in der verlangten Menge und Form zur Bedarfsstelle fließt. Die Festlegung erfordert damit unter anderem auch die Wahl geeigneter Maschinen, beispielsweise geeigneter Förderer, die alle gestellten Forderungen, hinsichtlich Geschwindigkeit, Tragfähigkeit, Automatisierbarkeit, Verkettungsmöglichkeiten mit anderen Förderern oder Speichern optimal erfüllen.

Anwendung der Netzplantechnik

Entscheidend für den Erfolg bei solchen Untersuchungen über den Materialfluß ist die Wahl der am besten geeigneten Methode. Ihre Auswahl hängt vom Fertigungsverfahren, von der Materialflußart, von der Art des Erzeugnisses und sonstigen speziellen Problemen des Materialflusses ab. Verschiedene Methoden sind bereits entwickelt worden.

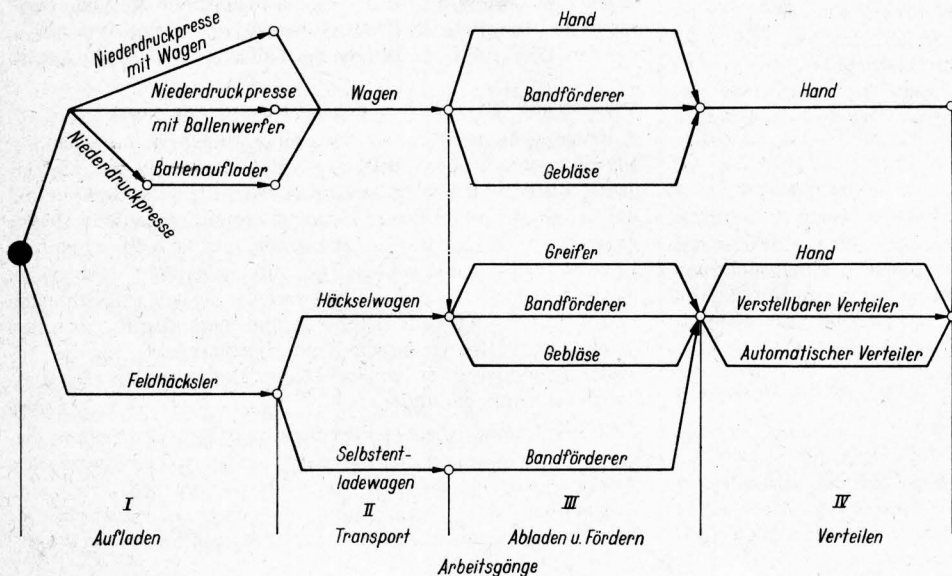
Die Anwendung hat gezeigt [10 bis 15], daß bei den vorliegenden Problemen vorteilhaft eine Abart der Netzplantechnik gewählt wird, die eine besondere mathematische Planungsmethode darstellt und in den USA bei Materialflußuntersuchungen weitverbreitet ist. Bild 1 zeigt ein einfaches Beispiel für einen Materialfluß. Folgende Definitionen werden gemacht:

- 1. Die Arbeitsgänge I, II, III sind der reguläre Ablauf der durchzuführenden Arbeiten für das Mechanisierungssystem. Sie sind in einem Netzplan längs der Zeitachse von links nach rechts aufgetragen. In den Arbeitsgängen wird das Gut bearbeitet oder weiterbewegt.
- 2. Die Methoden sind die verschiedenen Möglichkeiten, die Arbeitsgänge zu erledigen. Sie schließen die Arbeiten, die Kosten, die Zeit genau so ein wie die benutzten Maschinen, Geräte, Gebäude und baulichen Verhältnisse.

- 3. Jeder Faden im Netzwerk stellt eine Methode zur Erfüllung der Arbeitsgänge dar.
- 4. Jede Kombination der Netzfäden von links nach rechts bedeutet ein vollkommenes Mechanisierungsverfahren.
- 5. Die Verbindungspunkte der Fäden, die Knoten, trennen die Arbeitsgänge oder die Methoden.

Bild 2 zeigt den Materialfluß bei der Ernte von Belüftungsheu für die vier Arbeitsgänge Laden aus dem Schwad, Transport

Bild 2. Beispiel eines Materialflußdiagramms für die Ernte von Belüftungsheu.



zum Hof, Abladen mit Fördern und das Verteilen. Dieses Beispiel ist zur besseren Anschaulichkeit in vereinfachter Form dargestellt. Unterschieden werden die Häcksel- und die Ballengutlinie. Beim Arbeitsgang III Abladen mit Fördern sind für die Ballengutlinie laut Bild drei Methoden zur Erledigung möglich. Jede kann mit der eingezeichneten Methode des Arbeitsganges IV Verteilen zu einem Verfahren kombiniert werden, so daß drei Verfahren möglich sind. Ähnliches gilt in den gleichen Arbeitsgängen für die Häckselgutlinie, wobei der Einsatz des Gebläses nur vollständigkeithalber als Netzfaden eingezeichnet ist — aus funktionellen Gründen ist er praktisch nicht zu empfehlen. Ein Übergangsweg vom Ballen zum Häckselgut (gestrichelte Linie) mit einer weiteren Aufbereitung wäre denkbar und könnte rechnerisch mit den anderen Verfahren verglichen werden. Es zeigt sich, daß der Zwang, die Transportorganisation in mehreren Möglichkeiten darzustellen, oft bereits ein ausreichendes Heilmittel gegen unentdeckte Übel ist. Manchmal genügt die Entwicklung solcher Vorstellungen, um einzelne Wege als unbrauchbar und ungeeignet zu erkennen und zu beseitigen oder um neue Wege und Möglichkeiten zu finden.

Ist die Darstellung des Diagramms abgeschlossen, so erhebt sich sofort die Frage, ob man sich nicht aufgrund der bei der Planung gemachten Erfahrungen und der erworbenen Kenntnisse um eine weitere Verbesserung des Mechanisierungsverfahrens bemühen kann; ob also mit Hilfe des Netzplanes [7; 8], der ja gewöhnlich den Istzustand des Produktionsverfahrens darstellt und auf der Voraussetzung beruht, daß das Netzwerk hinsichtlich seiner Struktur sowie der Zeitkomponente während der Lebensdauer der Mechanisierungskette keinen wesentlichen Änderungen unterworfen ist, Verbesserungen für den Materialfluß entwickelt und die Netzpläne somit zur Sollwertvorgabe herangezogen werden können.

Ein kleines Beispiel möge zeigen, welche Möglichkeiten in dieser Darstellung vorhanden sind: Zur Festlegung des Materialflusses lassen sich anschaulich Analogievorstellungen aus der Strömungslehre heranziehen [7]. Die Kontinuitätsgleichung

$$Q = \rho v F$$

ist auch für den Materialfluß gültig, denn die Forderung eines in allen Fertigungs- und Transportstufen konstanten und gleichbleibenden Durchsatzes entspricht der Kontinuität des Durchsatzes einer Rohrströmung. Dadurch bietet die Netzplantechnik, beispielsweise durch die Abstimmung auf eine Geschwindigkeit, einen bedeutenden Beitrag zur Integration einzelner Maschinen zu einem optimalen System. Vorteilhafterweise können die Kapazität und die Nutzungswahrscheinlichkeit der eingesetzten Maschinen dabei genau ermittelt werden.

Wird die Zeitdauer beim Einfahren des Belüftungsheues (Bild 2) nicht etwa aus physikalischen Gründen, wie die Trocknungszeit, begrenzt, so kann der Ablauf des Einfahrens durch die Erhöhung der Kapazität einzelner Maschinen beschleunigt werden. Nach der Kontinuitätsgleichung gibt es dafür folgende Möglichkeiten: Die Vergrößerung des Querschnittes F , so daß mehr Material fließt oder die Erhöhung der Geschwindigkeit v , daß das Material schneller fließt. Beide Veränderungen wirken sich entsprechend auf die eingesetzten Maschinen aus. Dann ist es aber auch möglich, die Dichte ρ zu erhöhen. Damit wird praktisch ein stärkerer Materialfluß durch Verdichtungsmaßnahmen erreicht, und die erhöhte Arbeitsgeschwindigkeit tritt ohne einen erhöhten Platzbedarf oder Raumbedarf auf. Im Beispieldiagramm müßte in einem Modell oder in einem neuen Netzfaden durchgerechnet werden, welche Vorteile die stärkere Verdichtung des Halmgutes mit einer Hochdruckpresse oder einer ähnlichen Maschine bringt. Alle Einflußdaten, die sich aus der stärkeren Verdichtung des Gutes vom Feld bis zum Verteilen in der Scheune ergeben, müssen in einer sogenannten Modellrechnung berücksichtigt werden. Sind sie nicht vorhanden, müssen sie geschätzt werden oder sie sind gegebenenfalls mit Hilfe mathematisch-statistischer Verfahren abzuschätzen. Der neue Netzfaden wird als neues Mechanisierungsverfahren im gesamten System im Hinblick auf die durchgeführte Optimierung mit den anderen Verfahren verglichen. Besonders interessant ist ein Vergleich mit einer Rohrströmung in einer Leitung, die einen veränderlichen Querschnitt aufweist. Dann ergeben sich unter-

schiedliche Geschwindigkeiten im Materialfluß. Auch dieses Analogon kann in der landwirtschaftlichen Praxis von großer Bedeutung sein, da es Beispiele gibt, in denen längs eines Verfahrens unterschiedliche Bearbeitungszeiten auftreten. In ähnlicher Weise können auch die sogenannten absätzigen Verfahren behandelt werden, die in bestimmten Fällen wirtschaftlich günstiger als die sogenannten Fließverfahren sind.

Datenermittlung für die Modellrechnungen

Bei den erwähnten Modellrechnungen ergeben sich gewöhnlich keine Veränderungen in der logischen Struktur der Netzpläne. Sie sind nur dann zu erwarten, wenn bei kritischen Netzwegen eine Beschleunigung durch technologisch verbesserte Verfahren eingeführt wird.

Ist das Materialflußdiagramm mit den verschiedenen Methoden konstruiert und sind die dazugehörigen Maschinen ausgewählt, so ist die nächste Aufgabe, die mathematischen Funktionen aufzustellen. Dazu müssen die vielen Einflußfaktoren zahlenmäßig erfaßt werden, sofern die Werte nicht schon vorliegen und übernommen werden können. Das Ergebnis einer Planung hat natürlich nur in dem Maße Gültigkeit, in dem die zugrunde gelegten Werte den Betriebswirklichkeiten auch entsprechen. Zwei Verfahren sind üblich:

- a) das Kurzverfahren, das mit Schätzungen arbeitet und für den unter Zeitdruck stehenden Marktforscher besonders geeignet ist;
- b) das Normalverfahren mit genauen zahlenmäßigen Erhebungen.

Dem Umfang einer solchen Arbeit entsprechend sind eingehende systematische Untersuchungen über einen längeren Zeitraum erforderlich. Sie sind deshalb so schwierig und umfangreich, weil die Anwendung der Landmaschinen von speziellen wirtschaftlichen, technischen, klimatischen und pflanzenbaulichen Gesichtspunkten beeinflusst wird. Besonders die Streubreiten der kleinräumigen Klimadaten und Bodenbedingungen machen die Datensammlung so aufwendig. Leider gibt es im Schrifttum hierüber wenig Material, wenn man vom Einfluß des Klimas auf den möglichen Mähdreschereinsatz absieht [16; 17]. Bei diesen Datensammlungen sind Zeitanalysen für die menschliche Arbeit und für die Maschinen unbedingt erforderlich. Besonders Isaacs [12] hat vorgeschlagen, diese Datensammlungen in bestimmten Tabellenformen durchzuführen. Entscheidend ist aber bei den Erhebungen über die beteiligten Veränderlichen, daß in der Summe der Einzeluntersuchungen die Kapazität des gesamten Mechanisierungsverfahrens möglichst lückenlos erfaßt wird. Dabei muß bei der Festlegung der Materialflußkomponenten das Auftreten von Beschränkungen beachtet werden, die gewöhnlich in der begrenzten Kapazität einzelner Maschinen liegen.

Programm für die Optimierung eines Produktionsverfahrens

Ist das entwickelte Produktionsverfahren mit all seinen Einflußgrößen und deren Schwankungswerten in mathematischen Beziehungen erfaßt, so heißt nun die Aufgabe, Programme für die Optimierung des Systems zu entwickeln [11].

Bei diesen Aufgaben handelt es sich mathematisch um Optimierungsrechnungen, in denen das Problem besteht, Punkte eines Gebietes aufzusuchen, in denen eine Funktion ihre Extremwerte annimmt. Es ergibt sich sofort die Frage, weshalb sich die klassischen Methoden zur Lösung von Extremalaufgaben wie die Lagrange-Methode nicht anwenden lassen. Die klassischen Methoden erfordern die Existenz von partiellen Ableitungen der Funktionen in den Punkten, in denen das Extremum angenommen wird [18]. Bei den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen hat man es aber vorwiegend mit linearen Funktionen zu tun, und lineare Funktionen nehmen ihre Extremwerte nur auf dem Rande des betrachteten Bereiches an, wo keine partiellen Ableitungen existieren.

Daher wurden neue Methoden zur Lösung derartiger Aufgaben entwickelt, zu denen auch die lineare Programmierung gehört [19]. Sie ist im Vergleich zu anderen mathematischen Verfahren für die Beurteilung von Mechanisierungssystemen sehr geeignet.

Die lineare Programmierung

Die typische Aufgabe der linearen Programmierung ist das Transportproblem. Bei der Planung von Materialtransporten entsteht oft die Frage nach der rationellsten Transportorganisation von mehreren Erzeugungsorten zu mehreren Bestimmungsorten. In einem Fall handelt es sich dabei um die Bestimmung eines Transportplanes, bei dem die Kosten für den Transport ein Minimum haben sollen. In anderen Fällen ist vielleicht der Zeitgewinn am wichtigsten, und es wird unter allen möglichen Transportplänen derjenige gesucht, der Transportgüter vom Erzeugungsort bis zum Verbraucher in kürzester Zeit gewährleistet. Bei der Aufstellung des Transportproblems ist in vielen Fällen gerade die Betrachtung der Zeit äußerst wichtig, und in der Zukunft dürfte gerade bei landtechnischen Mechanisierungsproblemen der Faktor Zeit aus mehreren Gründen eine wichtige Rolle spielen. Beispielsweise beim Transport leichtverderblicher Produkte ist die Lieferung an die Bestimmungsorte in minimaler Zeit unbedingt erforderlich. Auch der Begriff „timeliness“, also das rechtzeitige Arbeiten, sei hier erwähnt. In weiteren Fällen könnte verlangt werden, daß die Energie, das Kapital oder die Zahl der Arbeitskräfte bei den Transportvorgängen zu einem Minimum werden. Die lineare Programmierung umfaßt nun Methoden zur Lösung solcher Optimierungsaufgaben mit vielen ineinandergekoppelten Veränderlichen, die obendrein bestimmten einschränkenden Bedingungen unterworfen sind. Die Aufgabenstellung läßt sich kurz wie folgt umreißen [18]: Eine gewisse Größe (wie die Kosten, die Zeit, die Energie, die Zahl der Arbeitskräfte) ist eine lineare Funktion mehrerer Veränderlicher. Diese werden durch Nebenbedingungen eingeschränkt, die in Form von linearen Ungleichungen oder Gleichungen gegeben sind.

Die einzelnen Methoden der linearen Programmierung haben eine immer breitere Anwendung in den verschiedensten Gebieten gefunden. Theorie und Methoden werden dabei ständig vervollkommen, weil immer neue Aufgaben zu lösen sind. Über die einzelnen Lösungsverfahren ist heute grundlegendes Schrifttum vorhanden [19]. Die einzelnen Methoden für die Optimierung müssen gewöhnlich wegen der Kompliziertheit und der Dynamik der Probleme auf die Vorgänge abgewandelt oder zugeschnitten werden. *Peart* [11] hat Lösungen zur Beurteilung der gesamten Mechanisierungsverfahren unter besonderer Berücksichtigung der eingesetzten Maschinen im landwirtschaftlichen Betrieb angegeben. Er unterscheidet:

1. das Minimum-Path-Modell, das sich besonders für die Optimierung der Mechanisierungsverfahren nach Arbeitskräften, Energie und Kapital eignet. Hiermit sind Untersuchungen geringeren Umfanges noch am Schreibtisch durchzuführen;
2. das Unit-Flow-Modell, das besonders für Kostenoptimierungen geeignet ist und Maschinen berücksichtigen kann, die innerhalb des Mechanisierungsverfahrens in mehreren Arbeitsgängen eingesetzt werden. Die Bestimmung der tatsächlichen Kosten ist für solche Maschinen oder Schlepper nicht einfach, da die Höhe der zugewiesenen Kosten für die einzelne Methode von der Zahl der Benützerungen im gesamten Verfahren abhängt. Für einige Fälle haben *Hirsch* und *Dantzig* [20] Lösungen angegeben, in welcher mathematischen Form die in mehreren Arbeitsgängen eingesetzten Maschinen zu berücksichtigen sind.

Eine andere Schwierigkeit liegt beispielsweise vor, wenn die Abhängigkeit der beteiligten Veränderlichen nicht linear, sondern progressiv oder degressiv ist. Um die lineare Programmierungsrechnung durchführen zu können, müssen die Funktionen dann in Bereichen annäherungsweise linearisiert werden.

Einsatz elektronischer Rechenanlagen

Die Praxis der Behandlung von Aufgaben der linearen Programmierung zeigt, daß bei einer großen Anzahl Veränderlicher, die bei den komplexen Vorgängen der landwirtschaftlichen Mechanisierung immer vorhanden sind, zweckmäßigerweise elektronische Rechenanlagen zur Lösung benützt werden [11]. Die Optimierung nach den minimalen Kosten läßt sich beispielsweise mit der bekanntesten Methode der linearen Programmierung, der Simplexmethode, lösen. Wegen ihrer Besonderheiten läßt sie sich mathematisch viel einfacher auch mit den sogenannten

kombinatorischen Methoden behandeln. Bei einer kleinen Anzahl von Ausgangs- und Bestimmungspunkten kann die Aufgabe noch durch manuelle Rechnungen gelöst werden, bei der ein geübter Rechner vielleicht mehrere Tage benötigt. Solche Aufgaben werden von elektronischen Rechenanlagen in wenigen Minuten gelöst, was für den unter Zeitdruck stehenden Produktforscher entscheidend sein kann.

Liegt jedoch eine große Anzahl von Veränderlichen, vielleicht zu mehreren Hundert vor, so lassen sich die Aufgaben nur mittels elektronischer Rechenmaschinen wirtschaftlich lösen. Die stürmische Entwicklung der Rechentechnik machte es möglich, beliebige Aufgaben auf dem Gebiet der Optimierungsrechnungen zu lösen, so daß es mit ihrer Hilfe unter anderem möglich ist, vielfältige und komplizierte Betriebsvorgänge gleichzeitig zu beobachten und zu beurteilen. Nach der Aufbereitung der Daten in dem entsprechenden mathematischen Modell wird für die Durchführung der Rechnungen die digitale Rechenanlage eingesetzt. Dabei müssen dem Gerät die Daten durch Zahlenkombinationen und Buchstabensymbole verdolmetscht werden, wobei beispielsweise jede Maschine und jedes Gerät mit den Angaben über Fassungsvermögen, Durchsatz sowie Arbeitsgeschwindigkeit verständlich dargestellt wird. Diese Übertragung ist in den meisten Fällen nicht einfach, da für die vorliegenden komplizierten Probleme in den Programmbibliotheken der verschiedenen Rechner noch keine Einheitsschaltungen oder Standardprogramme vorhanden sind und hierzu umfangreiche Kleinarbeit notwendig ist. Bei einfachen Problemen sind aber Einheitsprogramme erhältlich, und die Handhabung kann ohne Vorkenntnisse innerhalb weniger Tage erlernt werden.

Der Vorteil der Rechenanwendung zeigt sich bei der Auswertung der dem Rechner gegebenen Informationen, da das Gedächtnis, die Genauigkeit und die Schnelligkeit in kürzester Zeit detaillierte Analysen ermöglicht, für die der Mensch vielleicht Jahre benötigen würde. Ist das Programm für die Rechenanlage erst einmal vorhanden, so kann die Rechnung von vorn beliebig wiederholt werden unter Veränderung der angenommenen Einflußdaten, beispielsweise der Betriebsfläche, der Nutzungsform usw., bis die gewünschten optimalen Lösungen gefunden sind. Diese Spielereien mit den Veränderlichen werden vom Rechner in kürzester Zeit gelöst. Zusammenfassend ist über die Anwendung der mathematischen Methoden gegenüber den traditionellen zu sagen:

1. Das Mechanisierungssystem kann mit all seinen Zwischenbeziehungen beschrieben werden, so daß die Auswahl der Maschinen nicht aus Einzeluntersuchungen gewonnen werden muß.
2. Die mathematische Beschreibung erfordert die sachliche, knappe und vollkommene Analyse des gestellten Problems mit all seinen Einflußfaktoren.
3. Die mathematische Beschreibung, die zur endgültigen Lösung mit einer Rechenanlage programmiert wird, spart Rechenzeit und erlaubt, größere Probleme in Angriff zu nehmen als bisher.

Prognose der künftigen landtechnischen Entwicklung

Da die Möglichkeiten zu einer kompletten Momentaufnahme der Gegenwart teilweise schon weit entwickelt sind, dürfte das nächste Ziel der beschriebenen Methode sein, mit ihr die Zukunft in der Art von Prognosen zu erschließen [21; 22]. In der Landmaschinenindustrie ist in vielen Fällen eine mehrjährige Vorbereitungszeit — fünf bis sieben Jahre — für Investitionen erforderlich [1], ehe diese marktwirksam werden. Damit kommt den Zukunftsrechnungen heute eine besondere Bedeutung zu. Tatsächlich werden sie bereits durchgeführt, besonders in den Vereinigten Staaten, aber auch in Westdeutschland, und nicht nur in Hochschulen, sondern in immer zunehmenderem Maße in der Industrie. Da die Rechenanlage die Fähigkeit hat, den zukünftigen Tatbestand an allen verfügbaren Daten zu messen und mit ihnen zu vergleichen, wird er bei der Kursbestimmung auf lange Sicht zu einem idealen Mitarbeiter. Die programmierte Rechnung hilft bei der Investitionsplanung, indem einfach im Materialflußdiagramm ein sogenanntes Zukunftsmodell durchgerechnet und verschiedene technologisch

mögliche Modelle durchgespielt werden. Die Methoden, die Zukunft in dieser Art zu erschließen, treten unter den Namen „Statistische Entscheidungstheorie“, „Simulation“ oder „Theorie der Spiele“ auf. Eine typische Rechnung dieser Art wäre, unter dem Einfluß der landwirtschaftlichen Betriebsflächenentwicklung bei verschiedenen Nutzungssystemen und Erträgen die erforderlichen Schlepperstärken und den Schlepperbestand zu bestimmen.

Diese Zukunftsrechnungen erscheinen wahrscheinlich manchem wie eine Zauberei. Bevor man ihnen in der Industrie bei Organisationsproblemen Vertrauen schenkte, wurden sie auf einfache Weise getestet: Eine namhafte Erdölfirma, die sich sehr umfangreich mit der programmierten Rechnung beim Transport des Öls vom Hafen zum Verbraucher befaßt, ließ die Methode unter historischen, also aus der Vergangenheit bekannten Bedingungen im voraus arbeiten, und sie lieferte erfreulicherweise die erwarteten Betriebsresultate von heute. Natürlich ist die Antwort auf die Frage schwierig, ob man vor 15 Jahren die Mähreschwendung hätte voraussagen können. Bei einer sorgfältigen Analyse für die Motive der Mechanisierung und der Größenabschätzung der Einflußfaktoren ist das aber anzunehmen.

Bei der Prognostizierung von landwirtschaftlichen Mechanisierungsverfahren mit der programmierten Rechnung sind vorerst noch einige Schwierigkeiten zu überwinden. Es sind:

1. Die Beschaffung brauchbarer Daten für exakte Zukunftsbilder ist schwierig; z. B. ist die Berechnung der Lohn- und Preisentwicklung nicht einfach, aber auch nicht unlösbar. Denn das weite Feld der Prognostik ist heute für den Marktforscher kein Neuland mehr [23, 24]. Eine Fülle von Verfahren und Techniken, wie die Trendanalyse, das Regressionsverfahren, das Sättigungsverfahren und andere stehen zur Verfügung, die ständig vervollkommen und verfeinert werden. Dieses Werkzeug erlaubt zumindest theoretisch Prognosemodelle zu entwerfen. In vielen Fällen scheidet heute die Durchführung solcher Prognosen nicht mehr an einem Mangel an Verfahrensmöglichkeiten als vielmehr an einem Mangel an geeignetem statistischen Material. Schwieriger sind gewisse Unbekannte, wie das Verbraucherverhalten, Aktionen der Konkurrenz, politische Einflüsse auf dem Exportmarkt und ähnlich schwer wägbare Momente zu berücksichtigen. Möglichkeiten dazu liegen teilweise in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Wenn die benutzten Wertansätze aber sorgfältig ermittelt werden und geschätzt werden, so weichen die tatsächlichen Ergebnisse höchstens innerhalb eines tragbaren Fehlerbereiches von den errechneten Werten ab.

2. Modellrechnungen sind gewöhnlich äußerst kompliziert und dem Rechner schwierig verständlich zu machen; die Probleme müssen, da noch keine Einheitsschaltungen beim Rechnen vorhanden sind, dem Rechner in geduldiger Kleinarbeit verdeutlicht werden, wozu ein Mathematiker erforderlich ist.

3. Bei den Modellrechnungen mit sehr vielen Einflußfaktoren und folglich mit sehr vielen Gleichungen, vielleicht mehreren Tausend, dauert selbst bei den sehr schnell arbeitenden Rechnern die Rechenzeit mehrere Stunden. Diese Tatsache verteuert solche Untersuchungen erheblich.

Derartige Rechenprozesse sind auch auf dem Gebiet der landtechnischen Produktforschung noch selten. Sie leiten aber ohne Zweifel eine Ära ein, die wie in anderen Bereichen der Industrie unaufhaltsam zu sein scheint, und es dürfte wohl die bedeutungsreichste aller Möglichkeiten sein, die in dem neuen Verfahren liegen. Auf der letzten ASAE-Sommertagung [3] war bereits festzustellen, daß die Untersuchungen über optimale Organisationssysteme im landwirtschaftlichen Betrieb nicht nur wie bisher einige Pioniere, sondern zahlreiche Industrieingenieure aus der Produktplanung, Produktentwicklung und der Marktforschung anzogen.

Zusammenfassung

Das Ziel war, die Vielzahl der marktbedingten Risiken und Chancen überschaubarer und kalkulierbarer für die unternehmerischen Entscheidungen zu machen. Mit der beschriebenen Methode sind Modellrechnungen durchzuführen und im gewissen Rahmen Beurteilungen für die zukünftige Entwicklung möglich.

Zum Abschluß sei betont: Niemand braucht zu befürchten, daß mit sicherlich zunehmender Anwendung der programmierten Rechnung die letzte Entscheidung nur noch eine Summe von Einzelrechnungen wäre, die im Rechenautomaten erledigt werden. Das Zusammenspiel aller Einzelfaktoren muß letzten Endes immer dem wirtschaftenden Menschen überlassen bleiben. Er hat die Entscheidung, und sein endgültiges Urteil kann immer noch eine Reihe von Faktoren berücksichtigen, die sich dem Rechenstift bisher entzogen haben, und wenn es das berühmte Fingerspitzengefühl ist. Der Computer erfährt nicht alles und kann auch nicht alles speichern [25], so daß für den dynamischen Unternehmer der Entscheidungsspielraum immer noch bleibt. Wenn auch mancher Unternehmer — auf sich allein bauend und rein intuitiv — die richtige Entscheidung zu treffen vermag, so gibt doch erst die nüchterne Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine sichere Basis für seine Entschlüsse. Sie sollte er zur Entscheidung mit heranziehen, um sie sorgfältig zu untermauern.

Schrifttum

- [1] Segler, G.: Motive für die Fortentwicklung von Schleppern und Arbeitsmaschinen in Vergangenheit und Zukunft. VDI-Ber. Nr. 91. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965, S. 9/17.
- [2] Schaefer-Kehnert, W.: Kosten und Wirtschaftlichkeit des Landmaschineneinsatzes. Ber. Landtechn. Nr. 74. Wolfratshausen: H. Neureuter 1963, 129 S.
- [3] Zimmermann, M.: What they're doing in farm machinery management. Implement and Tractor **80** (1965) Nr. 17, S. 32/35.
- [4] Stolzenburg, W. L.: Das Mechanisierungssystem „Halmfutter“ (1. Teil). Dt. Landwirtsch. **16** (1965) H. 6, S. 271/74.
- [5] Bartz, A.: Materialflußtechnik im Lagerwesen. Fortschr. Ber. VDI-Z. Reihe 13, Nr. 1.
- [6] Bechtloff, G.: Methoden der Materialflußuntersuchung. Fördern und Heben **15** (1965) H. 5, S. 331/42.
- [7] Dreger, W.: Netzplantechnik — eine mathematische Planungsmethode. Fördern und Heben **15** (1965) H. 6, S. 377/81.
- [8] Dreger, W.: Materialflußplanung mit Hilfe der Netzplantechnik. Fördern und Heben **15** (1965) H. 6, S. 412/16.
- [9] Lacher, L.: Die Untersuchung des Materialflusses. Dt. Hebe- und Fördertechn. **11** (1965) H. 2, S. 24/29.
- [10] Hall, C. W.: Theoretical considerations in materials handling systems. Agric. Engng. **39** (1958) Nr. 9, S. 524/29, 539, 551.
- [11] Peart, R. M.: Optimizing materials handling systems by mathematical programming. Ph. D. thesis, Purdue University, June 1960.
- [12] Peart, R. W., G. W. Isaacs und C. E. French: Optimizing materials handling systems by mathematical programming. Transactions ASAE **6** (1963) Nr. 1, S. 26/31.
- [13] Sammet, L. L.: Systems engineering in agriculture. Agric. Engng. **40** (1959) Nr. 11, S. 663, 685/87.
- [14] Link, D. A.: The systems approach to farm machinery selection. ASAE-Paper Nr. 65-161, St. Joseph 1965.
- [15] Larsen, W. E., und W. Bowers: Engineering analysis of machinery costs. ASAE-Paper Nr. 65-162, St. Joseph 1965.
- [16] Seibold, K. H.: Die Verfahren der Mähdruschernte. Ber. Landtechn. Nr. 42. Wolfratshausen: H. Neureuter 1954.
- [17] Voigt, V.: Der Kornfeuchtigkeitsverlauf auf dem Halm stehenden Getreides unter dem Einfluß der Witterung und Folgerungen für den Mähdrusch. Diss. L. H. Hohenheim 1955.
- [18] Barsow, A. S.: Was ist lineare Programmierung? Deutsch-Taschenbücher H. 5. Zürich und Frankfurt 1964.
- [19] Dantzig, G. B.: Lineare Programmierung und Verallgemeinerungen. Berlin/Göttingen/Heidelberg 1965.
- [20] Hirsch, W. M., und G. B. Dantzig: The fixed charge problem. R.M-1383, The RAND-Corporation, Santa Monica, Calif., Dezember 1954.
- [21] Freudemann, H.: Planung neuer Produkte. Stuttgart 1964.
- [22] Sutter, W.: Wirtschaftlichkeitsberechnungen als Planungsinstrument. Methoden und Untersuchungen für verfahrensmäßige und industrielle Planung mit Beispielen und Schaubildern. Herne-Berlin: Neue Wirtschafts-Briefe XIV. 1964. 201 S.
- [23] Vornkahl, W.: Voraussage der Bestandsentwicklung von landwirtschaftlichen Maschinen mit Hilfe einer graphischen Methode. Landtechn. Forsch. **13** (1963) H. 2, S. 40/46.
- [24] Frieauff, F. L.: Prognosen verändern Märkte. Volkswirt **19** (1965) H. 17, S. 734/35.
- [25] Poth, L.: Der Markt bleibt unberechenbar. VDI-Nachrichten **19** (1965) Nr. 23, S. 17.