

Steuerung und Regelung biologischer Produktionssysteme

Einsatz der Informationselektronik in der Landwirtschaft / Von Friedrich Kuhlmann

Nachhaltige biologische und technische Fortschritte haben bewirkt, daß die Intensitäten der Landbewirtschaftung und der zugehörigen Nutztierhaltung in den letzten Jahren enorm gesteigert wurden. Den damit zunächst verbundenen Vorteilen erheblicher Arbeits- und Flächeneinsparungen – der Nutzflächenbedarf zur Erzeugung einer Getreideeinheit sank während der vergangenen 30 Jahre auf die Hälfte des Ausgangswertes, der Arbeitsbedarf sogar auf ein Sechstel – stehen inzwischen immer deutlicher werdende Nachteile gegenüber. Insbesondere führten die Fortschritte dazu, daß sich die landwirtschaftlichen Produzenten einer sehr großen und weiterhin rasch wachsenden Vielfalt von ertragsbildenden, ertragssichernden und leistungssteigernden Betriebsmitteln, z. B. Pflanzenbehandlungs- und Düngemitteln sowie Futtermitteln gegenübersehen. Diese Vielfalt führt früher oder später zur Unüberschaubarkeit und damit schließlich zwangsläufig zu Fehleinsätzen. Fehleinsätze – namentlich durch zu hohe und zu umfangreiche sowie durch zeitlich und sachlich falsche Verwendungen der Betriebsmittel – bewirken zunächst ökonomische Nachteile für den einzelnen Landwirt. Darüber hinaus können sie ökologische Schäden infolge steigender Belastungen der natürlichen Ressourcen hervorrufen.

Zur Begrenzung dieser negativen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen sind die Agrarwissenschaften mit ihren verschiedenen Teildisziplinen zumindest in doppelter Weise herausgefordert:

Zum einen können wir den Einsatzumfang der verschiedenen Produktionsmittelarten zu begrenzen versuchen, indem wir weniger krankheitsanfällige und Nährstoffe effizienter verwertende Pflanzensorten und Nutztierassen züchten, die Anwendungstechniken für Betriebsmittel mit dem Ziel geringerer Aufwandsmengen verbessern, und schließlich die natürlichen Ressourcen weniger belastende Anbau- und Tierhaltungstechniken entwickeln. Als Ingenieure sprechen wir generell vom Problem der *Strukturoptimierung*.

Zum zweiten können wir Spektrum und Niveau des Einsatzes der Betriebsmittel aber auch dadurch senken, daß wir dem einzelnen Landwirt und seinem Fachberater Entscheidungshilfsmittel und Verfahren der Produktionsführung an die Hand geben, mit deren Unterstützung Fehleinsätze bei den Betriebsmitteln verhindert oder zumindest stark reduziert werden. Der Stand der Informationselektronik erlaubt inzwischen, daß wir dazu wissenschaftliche, computergestützte Steuerungs- und Regelungsverfahren entwickeln, die eine zielgerechte Führung der biologischen Produktionssysteme ermöglichen. Als Ingenieure sprechen wir generell vom Problem der *Prozeßoptimierung*. Auf diesen Bereich soll im folgenden näher eingegangen werden.

Komplexe Entscheidungsräume

Warum ist die Vermeidung von Fehleinsätzen bzw. – was das gleiche ist – die Erreichung optimaler Wirkungsgrade beim Betriebsmitteleinsatz eigentlich ein so schwie-

riges Problem? Diese Frage sei mit einem Beispiel aus dem Bereich der pflanzlichen Produktion beantwortet: Bei pflanzlichen Produktionsprozessen werden die erzielbaren Wirkungsgrade zu wesentlichen Teilen von einer sachgerechten Auswahl der Mittel bzw. Sorten sowie der Applikationsmengen und -zeitpunkte beeinflusst. Tabelle 1 zeigt für Weizen in grober Annäherung die gegenwärtige Zahl der möglichen Handlungsalternativen – bzw. der sich daraus ergebenden Entscheidungsergebnisse – für die Hauptgruppen der ertragsbildenden und -sichernden Betriebsmittel.

Dabei ist noch vereinfachend unterstellt, daß die Ausbringungsmengen und -zeitpunkte nur in Stufen variiert werden können. Die in der rechten Spalte aufgeführte Anzahl der möglichen Ergebnisse entsteht durch Multiplikation der Sorten/Mittel mit den Ausbringungsmengen und den Ausbringungszeitpunkten. Zur Berechnung der Summen aller Entscheidungsergebnisse wurde zudem angenommen, daß die einzelnen Maßnahmenblöcke voneinander unabhängig sind. Falls wir diese Annahme aufgeben – wofür gute Gründe sprechen –, steigt die Anzahl der möglichen Ergebnisse nochmals sprunghaft an.



Abb. 1: Datenerfassung mit mobilen Geräten im Pflanzenbaubetrieb.

Die relative wirtschaftliche Vorzüglichkeit einer Handlungsstrategie im Vergleich zu anderen Strategien hängt nun außer von den Preisen der Betriebsmittel und Produkte vor allem von den zugehörigen Aufwuchs- und Ertragsrelationen (den sog. Mengengerüsten) der Produktionsprozesse ab. Diese Mengengerüste bestehen aus den Produktions- und Verbrauchsfunktionen, d. h. aus den quantitativen Relationen zwischen dem Ertrag einerseits und der Mittelart, den Mittelmengen und den Ausbringungszeitpunkten andererseits. Die genauen Verläufe dieser Funktionen werden ihrerseits wieder von zahlreichen bodenmäßigen, klimatischen und epidemiologischen Standorteigenschaften sowie von der Jahreswitterung, von der angewandten Aus-

Maßnahmenbereich	Sorten	Mengen	Applikationszeitpunkt	Anzahl der möglichen Ergebnisse
Aussaat	50	5	8	2000
Stickstoffdünger	10	10	10	1000
Herbizideinsatz	50	4	6	1200
Fungizideinsatz	30	4	10	1200
Insektizideinsatz	4	4	6	100
Summe	144	–	–	5500

Tabelle 1: Zahl der möglichen Entscheidungsergebnisse für ertragsbildende und -sichernde Maßnahmen in Weizen

bringungstechnik und von verschiedenen Anfangsbedingungen, wie z. B. der jeweiligen Wasserverfügbarkeit des Bodens und dem Wachstumsstadium des Weizens, bestimmt.

Diese biologischen Kausalbeziehungen müssen neben den relevanten Betriebsmittel- und Produktpreisen bekannt sein, wenn wir die jeweils optimale Strategie vorhersagen wollen. Aus Tabelle 1 geht hervor, daß dazu schon bei den vereinfachenden Annahmen Kenntnisse von ca. 150 Preisen und ca. 5500 Produktions- und Verbrauchsfunktionen, die ihrerseits wieder nach Maßgabe der angesprochenen unabhängigen Variablen aufgefächert sind, erforderlich wären. Es liegt bei dieser Vielfalt von Alternativen auf der Hand, daß die jeweils vom einzelnen Landwirt realisierten Maßnahmen mehr oder weniger zufällig richtig oder falsch sind und jedenfalls nicht das Optimum darstellen.

Tatsächlich ist die Entscheidungssituation jedoch noch schwieriger. Selbst unter der Annahme, daß die Mengengerüste vollständig bekannt sind, bleibt zusätzlich zu berücksichtigen, daß die Produktionsfunktionen neben den kontrollierbaren Inputvariablen auch nicht-kontrollierbare Variable wie den Witterungsverlauf enthalten. Deren Werte lassen sich nicht vorhersagen. Sie müßten sich aber vorhersagen lassen, um exakte Aussagen über Wirkungen potentieller Maßnahmen auf den Ertrag machen zu können.

Insgesamt können wir also festhalten, daß die Entscheidungssituation bei der landwirtschaftlichen Prozeßführung in hohem Maße durch unvollkommene Information bzw. durch Unsicherheit gekennzeichnet ist. Namentlich sind dafür nun zwei Ursachenbereiche verantwortlich. Der erste Bereich ergibt sich aus der Komplexität des Entscheidungsraumes, d. h. aus der Vielzahl der Handlungsalternativen. Das ist die sog. „strukturelle Komponente der Unsicherheit“. Der zweite Bereich ergibt sich aus der mangelhaften Vorhersehbarkeit einiger nicht-kontrollierbarer Inputvariablen. Das ist die sog. „dynamische Komponente der Unsicherheit“.

Verminderung der Unsicherheit

Die aus der strukturellen Komponente resultierende Unsicherheit kann mit Hilfe quantitativer Modelle vermindert werden. Sie enthalten neben einem Gleichungssystem zur Kalkulation der relativen ökonomischen Vorzüglichkeit von Handlungsalternativen vollständige Gleichungssysteme zur Abbildung der Mengengerüste für die verschiedenen durchführbaren Strategien. In einigen Fällen können wir diese Gleichungssysteme anhand von bereits dokumentierten Versuchsergebnissen mit geeigneten Näherungsverfahren schätzen. Für

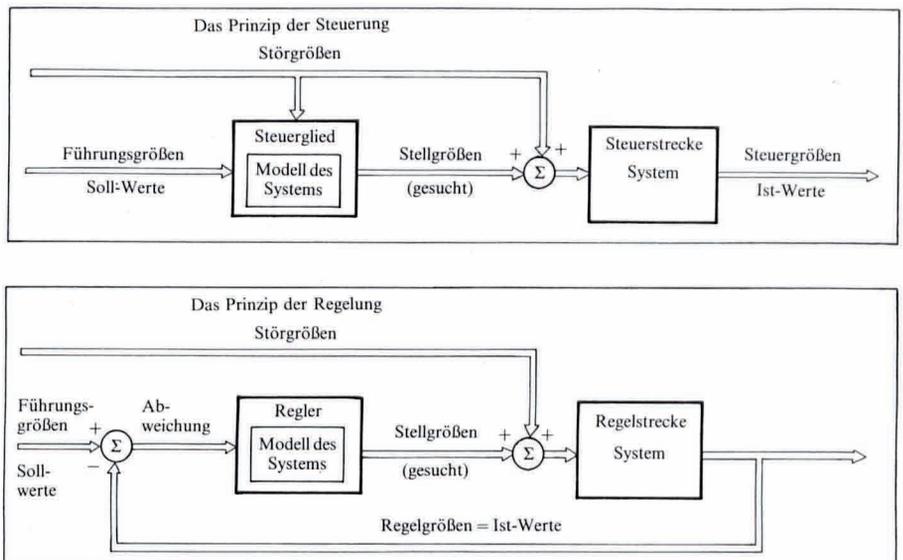


Abb. 2: Rechnergestützte Prognosen über Maßnahmen bei der Pflanzenbetriebsführung.

viele Bereiche stehen jedoch Datengrundlagen nicht zur Verfügung, entsprechende Experimente müßten erst durchgeführt werden. Wir können aber noch einen weiteren Weg einschlagen, indem wir auf das vorhandene Fachwissen von Experten – z. B. von erfahrenen Wissenschaftlern, Landwirten und Produktionsberatern – zurückgreifen. Wir stützen uns dann bei der Festlegung von Gleichungen und zugehörigen Handlungsalternativen auf Expertenaussagen oder – genauer – auf möglichst plausible Expertenannahmen. Unter anderem aus diesem Grund werden derartige Modelle heute „wissensbasierte Systeme“ oder eben „Expertensysteme“ genannt. Sie bilden einen Teilbereich dessen, was man im Jargon der Informatiker als „künstliche Intelligenz“ bezeichnet.

An dieser Stelle sei angemerkt, daß wir oftmals vor der Konstruktion von entscheidungsorientierten Expertensystemen die betrachteten biologischen Produktionssysteme mit ihren Stoffkreisläufen und Rück-

kopplungsprozessen durch computergestützte Simulationsmodelle abzubilden versuchen. Da sich die Prozesse im Zeitablauf vollziehen, bestehen die Modelle aus Differentialgleichungen. Mit solchen Modellen lassen sich Simulationsexperimente durchführen. Sie vermitteln uns Einsichten in das komplexe Gefüge der zugrundeliegenden realen Systeme und liefern uns Hinweise, wo die wichtigsten Entscheidungsvariablen für ein erwünschtes Beeinflussen bzw. Steuern und Regeln der biologischen Produktionsprozesse gesucht werden müssen. Mit der letztlich beabsichtigten Konstruktion von Entscheidungsmodellen wird jedoch auch eine Reduktion der zweiten, nämlich der dynamischen Komponente der Unsicherheit verfolgt. Zum Verständnis der dabei zugrundeliegenden Ideen sei dazu die Gesamtheit der Entscheidungsprobleme nach den aus der Kybernetik bzw. der Kontrolltheorie stammenden Gruppen der Steuerungs- und Regelungsprobleme unterschieden.



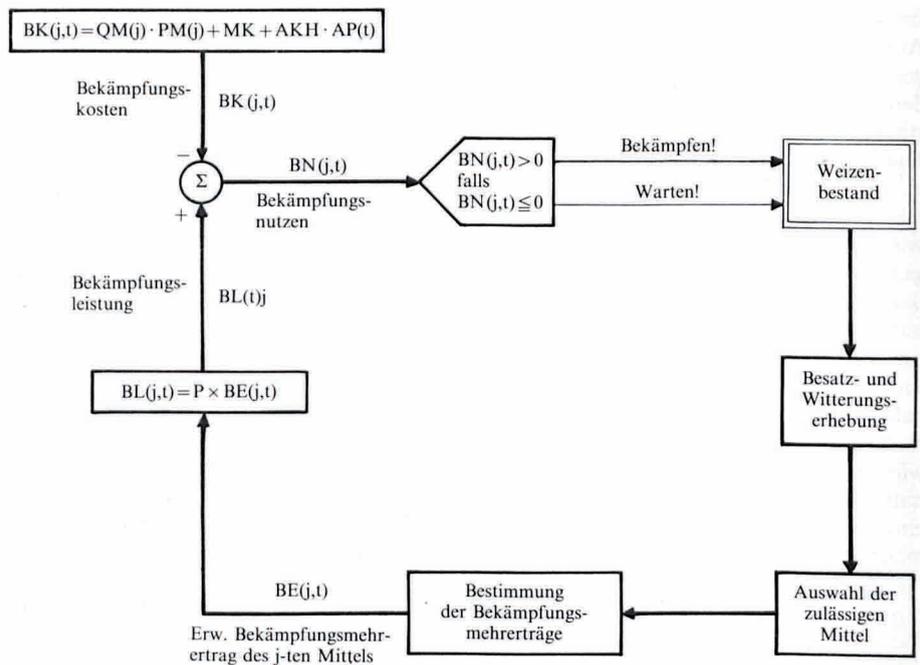
Schema 1: Steuerung und Regelung

Steuerung und Regelung

Steuerungsprobleme liegen z. B. in der Pflanzenproduktion immer dann vor, wenn einmalige Entscheidungen für die gesamte Vegetationsperiode getroffen und umgesetzt werden müssen, die während der Vegetationsperiode nicht mehr korrigiert werden können. Das trifft aus naheliegenden Gründen z. B. auf die Sortenwahl oder die Anbautechnik zu. Der Steuerungsansatz erfordert die Prognose der während der gesamten Vegetationsperiode relevanten Umweltvariablen und ihrer Wirkungen auf den Pflanzenbestand. Da nun die Witterung, die z. B. den Krankheitsbefall der einzelnen Sorten beeinflusst, nicht vorhersehbar ist, können wir zur Reduktion der Unsicherheit nur versuchen, möglichst objektive, in einzelnen Fällen aber auch nur subjektive, Wahrscheinlichkeiten für den Eintritt der einen oder anderen Umweltkonstellation zu schätzen. Auf dieser Grundlage kalkulieren wir dann bei den Zielvariablen mit Erwartungswerten und verwenden Entscheidungsregeln für mehrwertige Datenkonstellationen.

Das Prinzip der Steuerung ist im oberen Teil des Schemas 1 dargestellt. Das System – die *Steuerstrecke* – wird durch nicht-kontrollierbare Variablen – die *Störgrößen* – und durch kontrollierbare Variablen – die gesuchten *Stellgrößen* – beeinflusst. Zur Bestimmung der *Stellgrößen* prognostiziert der Entscheider (das *Steuerglied*) den Verlauf der *Störgrößen* und bestimmt dann mit Hilfe geeigneter *Modelle* nach Maßgabe der Zielvorgaben (*Führungsgrößen*) die *Stellungsgrößen*, d. h. die anzuwendenden Maßnahmen, z. B. die für einen bestimmten Standort optimale Getreidesorte.

Einen zweiten Weg, die Unsicherheit zu vermindern, die als Folge der dynamischen Komponente auftritt, liefert das Prinzip der Regelung. Es läßt sich in der pflanzlichen Produktion anwenden, wenn während der Vegetationsperiode wiederholt korrigierende oder ergänzende Entscheidungen zum gleichen Problembereich getroffen und umgesetzt werden können. Das trifft z. B. für Düngungs- und Pflanzengesundheitsmaßnahmen zu, generell also immer dann, wenn aufgrund von Messungen des aktuellen Zustandes eines Systems Abweichungen gegenüber einem erwünschten Zustand festgestellt werden, die sich durch geeignete Maßnahmen beseitigen lassen. Der Regelungsansatz hat den großen Vorteil, daß keine Umweltvariablen für längere Zeiträume prognostiziert werden müssen. Andererseits muß jedoch der jeweils aktuelle Systemzustand, z. B. der Unkrautdeckungsgrad, u. U. wiederholt ermittelt werden. Das Prinzip der Regelung ist im unteren Teil des Schemas 1 skizziert. Die gesuchten *Stellgrößen*, z. B. eine Unkrautbekämpfungsmaßnahme, werden hier vom *Regler* als Ent-



Schema 2: Regelungssystem der Unkrautbekämpfung

scheider mit Hilfe von geeigneten *Modellen* nach Maßgabe festgestellter *Abweichungen* zwischen den erwünschten *Führungsgrößen* und den tatsächlich ermittelten *Regelgrößen* (jeweiliger Ist-Zustand) bestimmt. Das ist die Führung im Rückkopplungsprozess.

Ein Beispiel

Zur Verdeutlichung diene der in Schema 2 skizzierte Regelungsansatz für die Unkrautbekämpfung in Weizen. Das Verfahren beginnt zu einem bestimmten Zeitpunkt mit einer Erhebung des Unkrautbesatzes und des Bodenzustandes auf einem Feldstück sowie mit einer Feststellung der Witterungsbedingungen. Diese Daten werden dann in ein Computermodell eingegeben. Zur Bestimmung der biologisch zulässigen Pflanzenbehandlungsmittel enthält das Computermodell einen Satz von sog. „Produktionsregeln“, die einen automatisierten Auswahlprozess für die Behandlungsmittel ermöglichen. Im nächsten Schritt werden die zu erwartenden Erntemehrerträge vom Modell für den Fall geschätzt, daß eine Bekämpfung mit einem der geeigneten Mittel zu diesem Zeitpunkt durchgeführt werden soll. Dafür enthält das Modell einen Satz von zeitabhängigen Produktionsfunktionen. Die zu erwartenden Erntemehrerträge sind nicht nur vom Unkrautbesatz und der Bekämpfungswirkung, sondern auch vom Zeitpunkt der Bekämpfung, d. h. vom Wachstumsstadium des Weizens, abhängig. Durch Multiplikation des Bekämpfungsmehrertrages mit dem Weizenpreis (P) errechnet das Modell dann die geldlichen Be-

kämpfungskosten der jeweiligen zulässigen Bekämpfungsmittel. Diese Leistungen werden im nächsten Schritt den Bekämpfungskosten, die sich aus Mittelkosten ($QM_j \times PM_j$), Maschinenkosten (MK) und Arbeitskosten [$AKH \times AP(t)$] zusammensetzen, gegenübergestellt. Falls der daraus resultierende Bekämpfungsnutzen für mindestens eines der zulässigen Mittel positiv ist, empfiehlt das Modell, die Bekämpfung durchzuführen, anderenfalls empfiehlt es zu warten, um zu einem späteren Zeitpunkt eine erneute Besatz- und Witterungserhebung durchzuführen. Dieser Rückkopplungsprozess kann sich im Zeitablauf, u. U. mehrfach, wiederholen.

Insgesamt sollte das kleine Beispiel zeigen, daß Modelle zur Steuerung und Regelung biologischer Produktionssysteme sowohl naturwissenschaftlich-technische Zusammenhänge als auch ökonomische Komponenten enthalten müssen, wenn sie als Entscheidungshilfsmittel dienen sollen. Letztlich wird Landbau nach ökonomischen Zielen unter Beachtung zahlreicher Nebenbedingungen – Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit, Vermeidung von Belastungen der natürlichen Ressourcen etc. – betrieben. Von computergestützten Steuerungs- und Regelungssystemen, die wir im Institut für landwirtschaftliche Betriebslehre entwickeln und auf dem Versuchsbetrieb Marienborn-Heldenbergen testen, erhoffen wir eine Verbesserung der einzelwirtschaftlichen Effizienz für die Landbewirtschaftung ebenso wie eine Begrenzung und Verminderung der Ressourcenbelastung durch die Landbewirtschaftung.