

DK 631.372:621.398

Möglichkeiten zum Erzeugen von Kurssignalen für das automatische Lenken von Landfahrzeugen

Von Gerhard Jahns, Braunschweig-Völkenrode

Während die Landtechnik bisher u. a. den Menschen von körperlichen Anstrengungen zu befreien suchte, werden die künftigen Bemühungen vor allem dahin zielen, den Menschen von regelmäßig wiederkehrenden und eine hohe Konzentration erfordernden Tätigkeiten zu entlasten: eine solche Tätigkeit ist das Führen von Landfahrzeugen. Will man ein System zum automatischen Lenken von Fahrzeugen schaffen, so stellen sich zwei Teilaufgaben: Erzeugen des Kurssignals und Auslegen des Reglers. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die wichtigsten Möglichkeiten, die sich in der landwirtschaftlichen Produktion zum Erzeugen eines Kurssignals eignen.

Das Lenken von Fahrzeugen in landwirtschaftlichen Produktionsprozessen erfordert mit seinen regelmäßig wiederkehrenden Arbeitsgängen eine hohe Konzentration. Die Folge ist, daß das Überwachen oder Ausführen der eigentlichen Produktionsaufgaben von einer Person oft nur begrenzt wahrgenommen werden kann, ja in besonderen Fällen sogar eine zweite Arbeitskraft eingesetzt werden muß. Daher könnte eine höhere Produktivität und Arbeitsqualität erreicht werden, wenn man den Menschen teilweise oder völlig von dieser Aufgabe der Fahrzeugführung entlasten würde. Dies läßt sich erreichen, indem die Aufgaben des Lenkens von Landfahrzeugen ein Regler übernimmt, der außer gleichmäßiger Arbeitsqualität, unabhängig von der Arbeitsdauer und der Tageszeit, eine größere Produktivität und Arbeitsgeschwindigkeit ermöglicht. Der Mensch hätte dann die Maschine bzw. die Geräte nicht mehr zu bedienen, sondern lediglich ihre Funktion zu überwachen.

Dipl.-Ing. Gerhard Jahns ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Um ein automatisches Führen von Fahrzeugen zu ermöglichen, ist außer der Auslegung des Reglers, der an die Stelle des Menschen tritt, das Erzeugen des Kurssignals eine wichtige Aufgabe. Die derzeitigen Arbeiten im Institut für landtechnische Grundlagenforschung auf diesem Gebiet gelten daher sowohl der Auslegung des Reglers als auch der Erzeugung von Kurssignalen. Gegenstand der Untersuchungen sind vor allem die in den Abschnitten 2.1.3., 2.2.2. und 4. geschilderten Systeme. Für das Auslegen des Reglers wird das dynamische Fahrverhalten des Fahrzeugs – die Regelstrecke – analysiert. Hierfür wird ein Unimog verwendet, der mit einem elektro-hydraulischen Lenksystem ausgerüstet wurde.

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich jedoch auf das Erzeugen der Kurssignale und gibt einen Überblick der hier möglichen Systeme. In diesem Zusammenhang wird abschließend auch auf Möglichkeiten einer automatischen Lenkhilfe hingewiesen, die geeignet sind, den Fahrer zu entlasten, ihn jedoch noch nicht zu ersetzen.

Die verschiedenen hier betrachteten Lenkverfahren lassen sich wie folgt unterscheiden:

1. indirekte Fahrzeugführung durch den Menschen,
 - 1.1. Führung durch Leitfahrzeuge,
 - 1.2. Führung durch Funkfernsteuerung,
2. Fahrzeugführung an Leitlinien,
 - 2.1. Führung an einer beim ersten Arbeitsgang erzeugten Leitlinie,
 - 2.1.1. Führung mittels mechanischer Abtastung,
 - 2.1.2. Führung mittels berührungsloser Abtastung,
 - 2.1.3. Führung mittels mechanischer oder berührungsloser Abtastung und zusätzliche Winkelmessung,
 - 2.2. Führung an einer auf dem Feld installierten Leitlinie,
 - 2.2.1. Führung an einer mechanischen Leitlinie,
 - 2.2.2. Führung an einem Wechselstrom durchflossenen Leitkabel,
 - 2.2.3. Führung an einem Lichtstrahl,
 - 2.3. Führung an einer mit Hilfe von Fixpunkten errechneten Leitlinie,
3. Fahrzeugführung durch Bilderkennung,
4. Fahrzeugführung durch den Menschen mit teilweise automatischer Lenkung.

1. Indirekte Fahrzeugführung durch den Menschen

1.1. Führen durch Leitfahrzeuge

Diese Verfahren gehen von der Überlegung aus, daß es bereits ein Fortschritt wäre, wenn ein durch den Menschen gesteuertes Leitfahrzeug mit einem oder mehreren anderen fahrerlosen Fahrzeugen gestaffelt im Verband fahren würde. In England wurde zu diesem Zweck ein mechanisches Kopplungssystem entwickelt, das mit Hilfe von Bowdenzügen arbeitet [1]. Diese Ankopplung hat den Vorteil, daß die hierbei entstehenden Signale bereits die Regelabweichung für das nachfolgende Fahrzeug sind, d.h. durch die Art der Ankopplung entsteht eine Rückkopplung. Führt beispielsweise eines der nachfolgenden Fahrzeuge auf Grund einer höheren Belastung der Arbeitsgeräte langsamer, so wird infolge der mechanischen Rückkopplung die Brennstoffzufuhr des nachfolgenden Fahrzeugs entsprechend der Differenz der Fahrzeuggeschwindigkeit verstellt. Das Analoge gilt für das Kurssignal.

Ankopplungen an das Leitfahrzeug mittels Funk [2] haben diesen Vorteil nicht, da die Funksignale reine Steuersignale sind. Leit- und Folgefahrzeuge erhalten also das gleiche Signal. Der Fahrer muß daher außer dem eigenen auch die nachfolgenden Fahrzeuge ständig kontrollieren.

Das mechanische Kopplungssystem wurde von einer englischen Firma für weniger als DM 2000 angeboten. Erfahrungen mit den vorgenannten Systemen sind bisher nicht bekannt geworden.

1.2. Führung durch Funkfernsteuerung

Alle durch Funksignal ferngesteuerte Fahrzeuge [2 bis 7], die oft vielartige Aufgaben erfüllen können (Lenken, Beschleunigen, Schalten, Betätigen von Arbeitsgeräten usw.) werden letztlich aber doch von einem Menschen bedient, wenn dieser sich auch nicht auf dem Fahrzeug befindet.

Da es aber praktisch nicht möglich ist, ein Fahrzeug aus größerer Entfernung mit der erforderlichen Genauigkeit zu führen, auch dann nicht, wenn auf dem Fahrzeug eine Fernsehkamera angebracht ist [2], ergeben sich – abgesehen von den Fällen, in denen der Fahrer gefährdet würde – keine Vorteile; Personal wird nicht eingespart, und die Kosten für eine solche Anlage sind hoch.

2. Fahrzeugführung an Leitlinien

Will man den Menschen gänzlich von der Aufgabe der Fahrzeugführung befreien, so muß man dem Fahrzeug einen Kurs vorgeben, dem es selbsttätig folgen kann. Dieser vorgegebene Kurs, der „Sollkurs“ oder die „Leitlinie“, kann wirklich (real) vorhanden sein oder auch als Rechenprogramm existieren. Der Kurs läßt sich durch ein einmaliges Vorbereiten des Feldes festlegen, wie bei den in Abschn. 2.2. genannten Verfahren, oder er kann, wie bei Abschn. 2.1., durch eine bei dem jeweils vorhergehenden Arbeitsgang entstehende Leitlinie festgelegt werden.

2.1. Führen an einer beim ersten Arbeitsgang erzeugten Leitlinie

Wird der erste Arbeitsgang vom Menschen ausgeführt, z.B. die erste Ackerfurche gezogen oder Schnittkante erstellt, so können diese für weitere Arbeitsgänge als Leitlinie dienen. Ein derartiges System bedarf keiner speziellen Vorbereitung des Feldes und ist daher auf jedem Feld anwendbar. Alle Leitsysteme dieser Art erfordern allerdings besondere Vorkehrungen für das Wenden. Jedoch könnte der Mensch, der während der Fahrt die Arbeitsgeräte vorläufig noch kontrolliert, das Wenden vornehmen. Es wäre auch möglich, bei manchen Bearbeitungsvorgängen das Wenden völlig überflüssig zu machen [8], indem man das Fahrzeug zwischen zwei Feldseiten hin- und herpendeln läßt. Dies ist jedoch regelungstechnisch bei einem konventionell vierrädrigen Fahrzeug schwierig, weil es abwechselnd durch die Vorderräder oder Hinterräder gelenkt werden müßte. Diese Schwierigkeiten können aber z.B. durch Knicklenkung, Zweiachslenkung oder durch ein Einachsfahrzeug weitgehend umgangen werden.

2.1.1. Führen mittels mechanischer Abtastung

Die Versuche, ein Fahrzeug automatisch mit Hilfe eines mechanischen Tasters zu lenken, gehen bis zum Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts zurück [9; 10]. Als Taster wurden Leiträder, Tastbügel oder Tastkurven verwandt [11 bis 14]. Die Taster ihrerseits betätigten Mikroschalter, Potentiometer oder hydraulische Ventile. Abgetastet für das Nachführen werden Leitlinien (wie bei dem Autodux von Ventzki) oder Schnittkanten (beim Mähvorgang), Pflanzenreihen und vor allem Ackerfurchen, die sich auf Grund ihrer großen mechanischen Stabilität für dieses Verfahren gut eignen.

Bis heute ist es jedoch nicht gelungen, mit diesem System beliebig lange ohne korrigierenden Eingriff des Menschen zu arbeiten. Dies liegt daran, daß bei diesem Verfahren kleine Unregelmäßigkeiten bei jeder neuen Durchfahrt des Fahrzeugs vergrößert werden. Wurde der Fühler z.B. beim ersten Mal durch einen Stein zufällig ausgelenkt, so entsteht in der zweiten Furche bereits ein kleiner Bogen, der sich dann schnell ausweitet, bis der Taster durch die große Verformung der Furche nach 10 bis 15 Durchfahrten aus ihr herausgelenkt [11]. Durch einen grundsätzlich anderen Aufbau des Regelsystems (s. Abschn. 2.1.3.) läßt sich dieser Fehler weitgehend vermeiden.

2.1.2. Führen mittels berührungsloser Abtastung

Nicht alle bei dem ersten Arbeitsgang oder bei vorangegangenen Bearbeitungsvorgängen entstandenen Leitlinien sind zur mechanischen Abtastung geeignet, beispielsweise die Bearbeitungsgrenze beim Eggen, die Schnittkante frischgemähten Klees oder Reihen junger Pflanzen. Solche empfindlichen Grenzen können aber berührungslos abgetastet werden, beispielsweise mit Schallwellen, Licht- und anderen elektromagnetischen Wellen. Von den vielen sich daraus ergebenden möglichen Meßverfahren scheidet die meisten aus, weil sie die Grundbedingungen für landtechnische Geräte nicht erfüllen: Einfachheit in Aufbau und Bedienung, hohe Zuverlässigkeit und Robustheit sowie niedrige Anschaffungskosten. Zu den aus diesem Grunde nicht brauchbaren Verfahren gehören das Radar (8 und 4 cm Radar) [15] und die optische Entfernungsbestimmung mittels Laufzeitmessung oder moduliertem Licht; kapazitive Meßverfahren sind für spezielle Anwendungsfälle, z.B. für das Abtasten von Pflanzenreihen [16], geeignet. Optische Entfernungsmessungen durch Winkelmessung, Bild 1, wie sie aus der Vermessungskunde bekannt sind, besonders aber Entfernungsmessung mit Ultraschall [17 bis 19], erscheinen am geeignetsten.

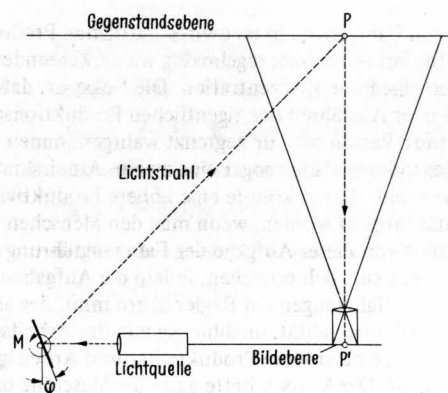


Bild 1. Möglichkeiten der Entfernungsmessung durch Winkelmessung und Reflexion, z.B. mit einem Lichtstrahl.

$$\overline{MP'} = \text{const}$$

P' Mitte der Bildebene

M Drehpunkt des Spiegels

P P' = $\overline{MP'} \cot \varphi$ Abstand zwischen Bildebene und Gegenstand

Es ist anzunehmen, daß sich Schnittkanten und Bearbeitungsgrenzen auch durch andere Merkmale unterscheiden; so wird frisch aufgeworfener Boden Strahlen anders absorbieren bzw. reflektieren als der unbearbeitete. Möglicherweise lassen sich für diese Grenzen auch charakteristische Farbunterschiede bei einer Spektralanalyse feststellen. Über allgemeine Untersuchungen in dieser Richtung wurde bisher noch nicht berichtet. Ein System, das die im ersten Arbeitsgang erzeugten Leitlinien abtastet, sollte für die verschiedenen Bearbeitungsvorgänge (Pflügen, Eggen, Säen, Mähen usw.) ohne zusätzliches Umrüsten geeignet sein. Bisher ist dieses System noch nicht gefunden worden.

2.1.3. Führen mittels mechanischer oder berührungsloser Abtastung und zusätzlicher Winkelmessung

Den vorgenannten Verfahren, die eine beim ersten Arbeitsgang entstehende Leitlinie abtasten, haftet der Fehler an, daß sie nur den Abstand des Fahrzeugs zu jeweils einem Punkt der Leitlinie abtasten und auswerten. Bildlich ausgedrückt entspricht dies einem Blinden, der sich mit Hilfe seines Stockes an einer unbekanntem Linie (Bordsteinkante) entlangtastet. Die daraus entstehenden Schwierigkeiten bei mehrmaliger Wiederholung wurden bei der Schilderung der mechanischen Abtastung kurz skizziert. Bleibt man bei dem benutzten Bild, so bedeutet es eine erhebliche Erleichterung, wenn der Blinde zusätzlich weiß, daß es sich bei der abgetasteten Leitlinie um eine Gerade handelt und ihm die Richtung einer zweiten Geraden bekannt ist. Übertragen auf ein Leitsystem heißt dies, daß man zusätzlich zum Abtasten der Leitlinie noch eine weitere Gerade ermitteln mußte.

Die Richtung dieser zweiten Geraden kann mit Hilfe eines Kreisel erzeugt, durch das Magnetfeld der Erde vorgegeben oder das Einpeilen eines Senders ermittelt werden. Ein gewöhnlicher Rundfunksender würde genügen, er müßte nur weit genug entfernt stehen, damit er von allen Stellen des Feldes mit ausreichender Genauigkeit unter der gleichen Richtung erscheint. Die Genauigkeit des magnetischen Erdfeldes würde ebenfalls völlig ausreichen, da die Abweichung des Erdfeldes in einem Bereich von etwa 1 km^2 geringer als $0,5^\circ$ ist. Benutzt man Kreisel, so kann man hierzu die einfachsten Kreisel benutzen, d.h. sie dürfen eine für die Luftfahrt bereits nicht mehr zulässige Drift haben. Dies ist deshalb möglich, weil nicht das Richtungssignal selbst, sondern nur die Richtungsstabilität regelungstechnisch genutzt wird. Kreisel dieser Art sind durchaus billig zu haben. Auch durch Anbringen je eines Meßsystems am vorderen und hinteren Ende des Fahrzeugs läßt sich unter Benutzung eines Rechners Abstand und Richtung des Fahrzeugs zur Leitlinie ermitteln, Bild 2.

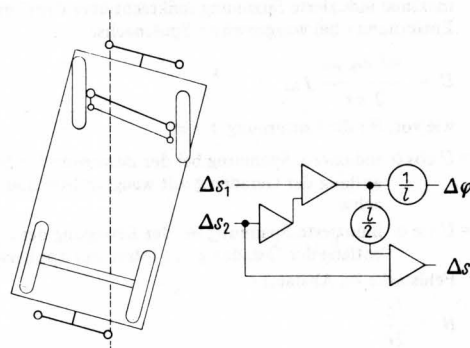


Bild 2. Anordnung der Meßfühler am Fahrzeug und Rechenschaltung zum Ermitteln von Abstand und Richtung des Fahrzeugs von der Leitlinie.

- $\Delta s_1, \Delta s_2$ Abstand der hinteren und vorderen Fahrzeugmitte von der Leitlinie
- Δs Abstand des Fahrzeugmittelpunktes zur Leitlinie
- $\Delta \varphi$ Richtung der Fahrzeuglängsachse zur Leitlinie
- l Entfernung der Meßfühler am vorderen und hinteren Ende des Fahrzeugs

Ein Fahrzeug mit einem Regler, der das Richtungssignal und das Abstandssignal (Abstandsmessung zur Leitlinie) bewertet und zu einem Regelsignal verarbeitet, das dann dem Stellglied zugeführt werden kann, hätte ein erheblich stabileres Lenkverhalten, als es bei der Benutzung nur eines Abstandssignales möglich wäre. Regler dieser Art sollen nach mündlicher Mitteilung von einer deutschen und einer italienischen Firma im Versuch untersucht worden sein.

2.2. Führen an einer auf dem Feld installierten Leitlinie

Diese Systeme haben den Nachteil, daß sie auf jedem automatisch zu bearbeitenden Feld installiert werden müssen, wodurch sich entsprechende Installationskosten ergeben.

Sie haben andererseits den Vorteil, daß sie einmal installiert, viele Jahre benutzt werden können. Außerdem ist ihre Funktion unabhängig von dem jeweiligen Anbau bzw. den jeweiligen Bearbeitungsvorgängen, für die eine stets gleiche Genauigkeit ermöglicht wird, so daß sich besonders nachfolgende Pflegearbeiten leicht ausführen lassen.

2.2.1. Führung an einer mechanischen Leitlinie

Hierzu eignen sich Schienen und gespannte Drähte, die von einem am Fahrzeug befindlichen System abgetastet werden, ein Verfahren, das aus anderen Bereichen bereits bekannt ist und sich dort bewährt hat (z.B. bei der Eisenbahn, bei Seilbahnen und beim automatischen Lenken von Flurförderzeugen). Solche Verfahren haben den Vorteil, daß das erhaltene Signal ohne technischen Aufwand als Steuersignal und sogar direkt zum Antrieb verwendet werden kann. Der Aufbau solcher Systeme zur Signalerzeugung ist einfach, robust und wenig störanfällig. Sie können jedoch nicht für beliebig große Felder angewandt werden.

Der Vollständigkeit halber sei hier auf drei Verfahren hingewiesen, die auf diesem Prinzip beruhen und von denen das zuletzt genannte durchaus praktikabel und für die zukünftige Entwicklung interessant sein könnte. Praktische Erfahrungen oder auch wirtschaftliche Überlegungen, die eine genauere Beurteilung zuließen, liegen jedoch noch nicht vor.

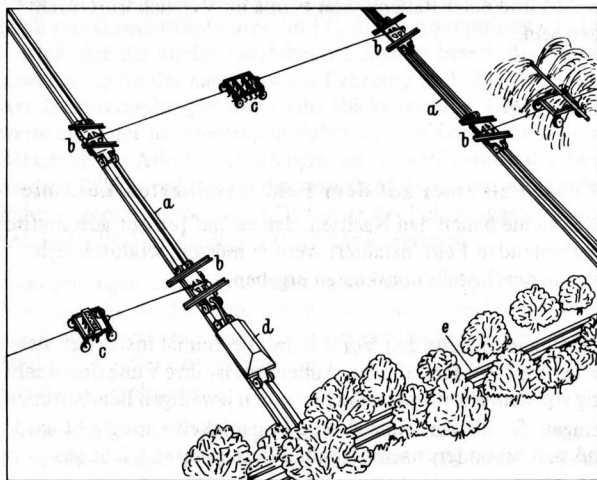
Bei dem einen Verfahren beschreibt das an einem Seil gefesselte Fahrzeug eine spiralförmige Bahn. Ein Ende des Seiles ist an einer Trommel in der Mitte des Feldes befestigt, das andere am Steuerrod des Fahrzeugs, auf das in entgegengesetzter Richtung eine Feder wirkt. Durch die Bewegung des Fahrzeugs verkürzt sich das Seil laufend um eine Arbeitsbreite je Umlauf. Der Umfang der Trommel muß der Arbeitsbreite entsprechen.

Ein weiteres Verfahren: 1966 wurde in der Sowjetunion ein Patent veröffentlicht. Hier bewegt sich ein Fahrzeug entlang eines Führungsseiles, nimmt dieses auf und legt es – um eine Arbeitsbreite versetzt – parallel zur Fahrtrichtung wieder ab. Dieses Verfahren wird bereits schon von *Morgan* [9] 1964 beschrieben [20].

Das von *Reece* [21] vorgeschlagene Verfahren verbannt den Schlepper völlig vom Felde: der Hof liegt in der Mitte eines quadratischen, beispielsweise 300 ha großen Feldes, das in vier Quadrate unterteilt ist, die ihrerseits in sechs Parzellen zu je 915 m Länge und 135 m Breite geteilt sind. Diese rd. 12 ha großen Parzellen sind dann die „Felder“; an ihren beiden Längsseiten liegen Betonschienen, auf denen gegenüberliegend je ein Wagen läuft. Der Geräteträger wird mit auf den Wagen befindlichen Seil-

Bild 3. Version einer automatischen Farm nach *Reece* [21]

- a Betonschiene
- b Wagen mit Seilwinde und elektrischem Antrieb
- c Geräteträger
- d Versorgungswagen
- e Schienenweg zum Hof (Zentrale)



winden über das Feld gezogen, **Bild 3**, ein Verfahren, das an das Prinzip der Dampfpflüge erinnert. Seil und Schienen sind mit Wegmarken versehen, so daß ein genaues Positionieren des Geräteträgers möglich ist. Ein Wendemanöver entfällt hierbei. Gesteuert wird das gesamte System von einer Zentrale mit einem Rechner.

2.2.2. Führen an einem Wechselstrom durchflossenen Leitkabel

Das Verfahren, Fahrzeuge mit Hilfe eines Wechselstrom durchflossenen Leitdrahtes zu führen, ist seit den fünfziger Jahren im Gespräch und am weitesten entwickelt [22 bis 31]. Außerhalb der Landwirtschaft wird diese Möglichkeit bereits wirtschaftlich zum fahrerlosen Führen von Flurförderzeugen genutzt [32; 33]. Für dieses System interessieren sich auch Verkehrsfachleute im Hinblick auf einen automatisierten Verkehrsfluß auf den Autobahnen und Straßen [34 bis 39].

Bei den Verfahren mit einem Leitkabel wird das magnetische Feld eines Wechselstrom durchflossenen Drahtes mit Spulen abgetastet. Daß die Konzentrität des Magnetfeldes bei der Verlegung des Kabels im Erdboden erhalten bleibt, wurde bis zu einer Tiefe von 1,2 m von *Pichon* und *Steinbruegge* [40] nachgewiesen. Je nach Führung der Spule werden dabei die in **Bild 4** dargestellten Spannungen induziert.

Zwischen dem Verlauf der Spannung U_{x1} und dem der Spannung U_{x2} besteht eine strenge Phasenbeziehung. Die Zuordnung von U_{x2} zu s/a ist zweideutig, im Falle U_{x1} kann sie sogar vierdeutig sein, auch die Spannungsdifferenz von je zwei Spulen ist nicht eindeutig. Eine für alle Positionen eindeutige Zuordnung ergibt sich nur für eine Kombination von U_{x2} und dem Phasenwinkel φ . Dabei ergibt sich gleichzeitig der Vorteil, daß sich der Leitkopf auf kleinem Raum in Form von zwei gekreuzten Spulen aufbauen läßt. Durch Anordnung mehrerer Spulensysteme an dem Schlepper im Abstand der vorgesehenen Arbeitsbreite oder durch Verschieben eines einzelnen Spulensystems jeweils um die entsprechende Arbeitsbreite läßt sich ein Führungsdraht für mehrere (6 bis 8) parallele Fahrten des Fahrzeugs ausnutzen. Das Wenden kann entweder durch entsprechende Verlegung des Drahtes ganz entfallen oder es wird, ausgelöst durch einen Begrenzungsdraht, automatisch vorgenommen.

Für das induktive Verfahren, auch Leitkabelsysteme genannt, liegen bereits wirtschaftliche Betrachtungen von *Finn-Kelcey* [41 bis 43] vor, die zeigen, daß schon bei dem heutigen Stand der Entwicklung mit diesem System eine Automatisierung möglich ist, die außer einer Entlastung des Menschen auch wirtschaftliche Vorteile bietet.

Grundsätzlich ist es auch denkbar, nur sehr wenige (z. B. zwei) Drähte am Feldrand zu verlegen. Ein solches System wäre dann allerdings kein Leitsystem im Sinne von Abschn. 2.2.2. mehr, denn das Fahrzeug würde nicht mehr entlang eines Drahtes geleitet, sondern mit Hilfe der am Feldrand befindlichen Induktionskabel seine Position auf dem Felde bestimmen. Dazu ist ein erheblich größerer elektronischer Aufwand erforderlich, da die Intensität der Induktionsfelder reziprok der Entfernung abnimmt (s. **Bild 4**). Weiter ist ein Rechner erforderlich, der die ermittelte Position errechnet und mit einem vorprogrammierten Kurs, einschließlich des Wendekurses, vergleicht. Eine zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich aus der Störanfälligkeit schwacher Induktionsfelder gegenüber Verzerrungen durch ferromagnetische Stoffe.

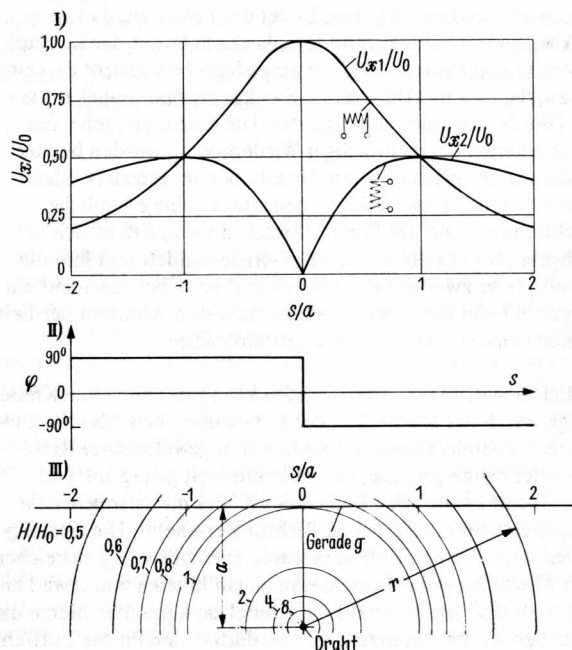


Bild 4. Induzierte Spannung U_x (bezogen auf U_0) bei waagerechter Bewegung einer Spule senkrecht über einem von Wechselstrom durchflossenen Leiter in Abhängigkeit vom Abstand s/a .

Feldstärke H/H_0 auf der Geraden g im Abstand s/a vom Strom durchflossenen Draht.

U maximal induzierte Spannung senkrecht über dem Draht in der Entfernung r bei waagerechter Spulenachse

$$U = \frac{wF\mu_0\mu_r}{2\pi r} J\omega$$

U_0 wie vor, für die Entfernung $r = a$

$U_{x1} = U \cos \alpha$ induzierte Spannung bei der Bewegung der Spule entlang der Geraden g mit waagerechter Spulenachse

$U_{x2} = U \sin \alpha$ induzierte Spannung bei der Bewegung der Spule entlang der Geraden g mit lotrechter Spulenachse

H Feldstärke im Abstand r

$$H = \frac{J_0}{2r}$$

H_0 Feldstärke im Abstand $r = a$

r radiale Entfernung vom Wechselstrom durchflossenen Draht

a senkrechte Entfernung der Spule vom Wechselstrom durchflossenen Draht

s waagerechte Entfernung der Spule vom Wechselstrom durchflossenen Draht

w Windungszahl der Spule

F Fläche der Spule

μ_0, μ_r Permeabilitätskonstanten

J Stromstärke

ω Kreisfrequenz

2.2.3. Führen an einem Lichtstrahl

Auch ein Laserstrahl kann eine gerade „Leitlinie“ bilden, der das Fahrzeug folgt. Dieses Leitprinzip wurde bereits bei Tunnelbohrmaschinen und dem Verlegen von Drainagerohren angewendet. Nach je einem Arbeitsgang wäre der Laser um eine Arbeitsbreite zu versetzen. Die dabei einzuhaltende Genauigkeit des Winkels zwischen Feldrand und Laserstrahl muß bei einem 100 m langen Feld und einer zulässigen Abweichung von $\pm 2,5$ cm der Arbeitsgänge zueinander $\pm 0,014^\circ$ betragen. Durch eine festverlegte Schiene am Feldrand wäre dies evtl. erreichbar. Dieses Verfahren ist jedoch im hügeligen Gelände nicht einsetzbar. Auch ein Wendemanöver könnte mit Hilfe dieser Leiteinrichtung nicht ausgeführt werden.

2.3. Führen an einer mit Hilfe von Fixpunkten errechneten Leitlinie

Soll der Standpunkt eines Fahrzeuges in einer Ebene mit Hilfe von Fixpunkten, deren Lage bekannt ist, bestimmt werden, so kann dies entweder vom Fahrzeug oder von den Fixpunkten aus geschehen. Hierbei kommen Verfahren zur Anwendung, die auch in der Navigations- und Vermessungskunde bekannt sind. Dabei lassen sich die Fixpunkte oder die jeweiligen Fahrzeuge mittels akustischer, optischer oder Funkwellen einpeilen. Ein Markieren durch Radioisotopen scheidet für landwirtschaftliche Zwecke wegen der Sicherheitsbestimmungen praktisch aus. In Kanada wurde bereits versuchsweise [44] ein Verfahren erprobt, bei dem die Position des Auspuffs eines Fahrzeuges von zwei Fixpunkten aus durch Infrarotdetektoren gemessen wurde.

Für die Standortbestimmung vom Fahrzeug aus durch Winkelmessungen müssen drei Fixpunkte bekannt sein, Bild 5. Bei Abstandsmessungen genügt die Kenntnis der Lage von zwei Fixpunkten. Ist nur ein Fixpunkt bekannt, so muß außer dem Abstand die Richtung gemessen werden. In allen Fällen wäre die Position des Fahrzeuges aus den Messungen zu errechnen, mit dem vorprogrammierten Kurs einschließlich des Wendekurses zu vergleichen und daraus das Steuersignal zu bilden. Meßsystem, Rechner und Regler könnten sich auf dem Fahrzeug befinden und eine Funktionseinheit bilden.

Wird – umgekehrt – der Standort des Fahrzeuges durch Messungen von den Fixpunkten aus bestimmt, so genügt es, von zwei Fixpunkten aus [45] den jeweiligen Winkel oder den Abstand zu messen, Bild 6. Benutzt man nur einen Fixpunkt, so sind Winkel und Abstand zum Fahrzeug zu messen. Ein ortsfester Rechner hätte die Position des Fahrzeuges aus den Meßwerten zu errechnen und mit dem jeweiligen vorprogrammierten Kurs zu vergleichen, daraus die Regelabweichung zu bilden und diese über Funk als Steuersignal an das Fahrzeug zu senden.

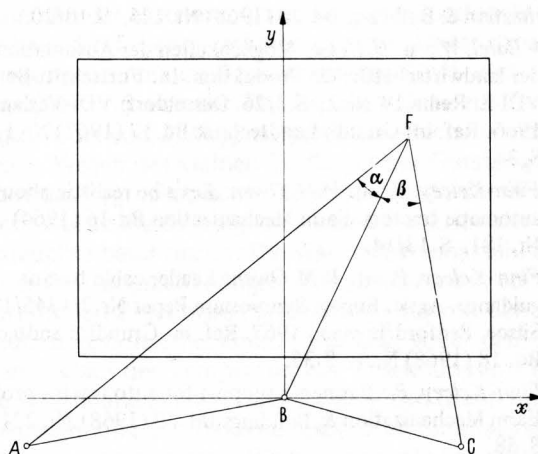
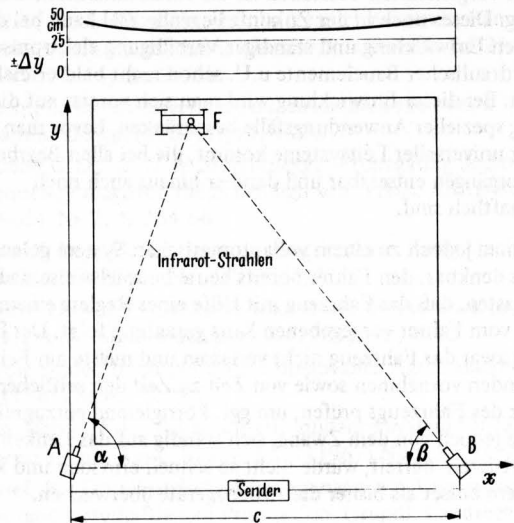


Bild 5. Bestimmung der Position eines Fahrzeuges F durch Anpeilen von drei bekannten Fixpunkten A, B und C und Messung der Winkel α und β .

Bild 6. Bestimmung der Position eines Fahrzeuges durch Winkelmessung von zwei bekannten Fixpunkten aus.



In allen Fällen könnte man die Fixpunkte von mehreren Feldern bzw. von einem großen Gebiet, je nach Geländeform, bis zu einigen Quadratkilometern benutzen. Der Abstand der Fixpunkte untereinander wäre in einem solchen Fall zweckmäßigerweise groß zu wählen, wodurch man eine größere Genauigkeit erzielt.

An die Meßgenauigkeit werden hohe Anforderungen gestellt, so muß beispielsweise bei einer zulässigen Kursabweichung von $\pm 2,5$ cm und einer Entfernung von nur 100 m die Winkelmessung genauer als $1/100^\circ$ sein (vgl. Bild 6). Die Abstandsmessung muß in allen Fällen auf einen cm genau sein. Es scheint daher zweifelhaft, Einzelfahrzeuge mit einem diesen Anforderungen genügenden Meßsystem, Rechner und Regler auszurüsten, da einmal die Anschaffungskosten sehr hoch wären und zum anderen solche Geräte nur von entsprechend geschulten Personen bedient und gewartet werden können.

Anders ist es jedoch, wenn man die Messungen von den Fixpunkten aus vornimmt, dann wäre bei einem entsprechenden Rechenprogramm nur ein Meßsystem und ein zentraler Rechner erforderlich, um eine Vielzahl von Fahrzeugen zu leiten. Die einzelnen Fahrzeuge wären nur mit einem Empfänger für die Steuersignale und dem Regler auszurüsten.

3. Fahrzeugführung durch Bilderkennung

Bei allen bisher genannten Verfahren muß jedoch das Fahrzeug vom Menschen zunächst auf den richtigen Kurs gelenkt werden, um danach diesem folgen zu können. Kommt das Fahrzeug aus irgendeinem Grund von diesem Kurs ab, so kann es die Leitlinie nicht selbständig wiederfinden, weil alle bisher beschriebenen Systeme nur die Möglichkeit haben, einer Leitlinie zu folgen, nicht aber die Fähigkeit besitzen, eine Leitlinie zu erkennen.

Ein Erkennen der Leitlinie würde einen Erkennungsprozeß bzw. Lernprozeß voraussetzen, ähnlich wie er bei dem Problem der Zeichenerkennung von Ziffern und Buchstaben bekannt ist. Die heute zur Verfügung stehenden Algorithmen und dazugehörigen Recheneinheiten sind so aufwendig, daß eine Lösung des Problems des fahrerlosen Führens eines Fahrzeuges mit dem „Erkennungsverfahren“ heute noch nicht angezeigt erscheint. Dies bedeutet aber nicht, daß es in späteren Jahren nicht doch sinnvoll sein kann, ein universelles Leitsystem für Fahrzeuge zu schaffen. Streng genommen könnte erst dann, wenn das Fahrzeug selbständig die Leitlinie suchen und erkennen kann, von einer vollautomatischen Fahrzeuglenkung gesprochen werden.

4. Fahrzeugführung durch den Menschen mit teilweise automatisierter Lenkung

Ziel der vorgenannten Verfahren ist die vollautomatische Fahrzeugführung. Dieses noch in der Zukunft liegende Ziel kann bei der schnellen Entwicklung und ständiger Verbilligung elektronischer und hydraulischer Bauelemente u.U. schon recht bald erreicht werden. Bei dieser Entwicklung wird man sich vorerst auf die Lösung spezieller Anwendungsfälle beschränken, bevor man zum Einsatz universeller Leitsysteme kommt, die bei allen Bearbeitungsvorgängen einsetzbar und darüber hinaus auch noch wirtschaftlich sind.

Bevor man jedoch zu einem vollautomatischen System gelangt, wäre es denkbar, den Fahrer bereits heute beispielsweise dadurch zu entlasten, daß das Fahrzeug mit Hilfe eines Reglers einem einmal vom Fahrer vorgegebenen Kurs geradlinig folgt. Der Fahrer könnte zwar das Fahrzeug nicht verlassen und müßte am Feldende das Wenden vornehmen sowie von Zeit zu Zeit den seitlichen Versatz des Fahrzeugs prüfen, um ggf. korrigierend einzugreifen. Er wäre jedoch von dem Zwang, sich ständig auf das Lenken zu konzentrieren, befreit, würde nicht so schnell ermüden und könnte außerdem besser als bisher die Arbeitsgeräte überwachen.

Durch ein Blockieren des Lenkrades ließe sich dies nicht erreichen, da der seitliche Versatz des Fahrzeugs, z.B. durch den Schlupf der Räder, zu erheblichen Fehlern führen kann. Man muß vielmehr dem Fahrzeug eine Gerade oder die Richtung einer Geraden vorgeben. Hierzu eignen sich einige Verfahren, die bereits im Abschn. 2.1. dargestellt wurden. So kann man eine Gerade durch Kreisel vorgeben und eine Richtung mit Hilfe des Erdfeldes oder durch Einpeilen eines Senders (Abschn. 2.1.3.). Dabei kann das Fahrzeug nicht nur in Richtung der vorgegebenen Gerade geradlinig fahren, sondern auch in jedem beliebigen Winkel, d.h. die gewünschte Fahrtrichtung würde vom Fahrzeug beibehalten. Jedes Abweichen löste einen entsprechenden korrigierenden Regelvorgang aus.

Eine Gerade kann aber auch – wie schon dargelegt – durch den ersten Arbeitsgang erzeugt werden, jedoch verringert sich der Aufwand der unter Abschn. 2.1.1. und 2.1.2. genannten Verfahren erheblich, wenn man auf ein automatisches Wenden verzichtet und einen korrigierenden Eingriff des Fahrers zuläßt, sich somit auf eine Lenkhilfe beschränkt. Im Gegensatz zu den ersten drei Verfahren kann das Fahrzeug in diesem Fall nur in der vorgegebenen Geraden, nicht aber einem bestimmten Winkel dazu folgen.

Besonders Fahrzeuge, die bereits eine hydraulische Servolenkung besitzen, ließen sich mit einer automatischen Lenkhilfe leicht ausrüsten. Ob und wann sich automatische Lenkhilfen bzw. automatische Lenksysteme durchsetzen werden, hängt neben vielen Faktoren besonders von der technischen und preislichen Entwicklung der Bauelemente für diese Systeme ab und nicht zuletzt von der Situation auf dem Arbeitskräftemarkt.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet.

- [1] One man/multi-tractor operation. Farm Implement and Machinery Review Bd.91 (1965) Nr.1081, S. 611/12.
- [2] Reflexions prospectives sur la conduite automatique des tracteurs agricoles et la construction eventuelle d'un prototype de tracteur automatique. Bulletin d'Information CNEEMA (1966) Nr. 107, S.15/27.
- [3] Mikhailov, V., B. Suprunenko u. V. Yankevich: A radio-controlled tractor. J. Agric. Engng. Res. Bd. 5 (1960) S. 128/31.
- [4] Pichon, J.D.: A tractor radio-control system. Trans. ASAE Bd. 4 (1961) Nr. 2, S. 177/78.
- [5] Remote control by radio. Farm Implement and Machinery Review Bd. 92 (1966) Nr. 1095, S. 795/96.
- [6] L'automatisation des matériels mobiles en agriculture 1^{ère} partie: les tracteurs agricoles sans pilote. Bull. d'Information CNEEMA (1966) Nr.97/98, S.23/24.

- [7] En 1967: les cinquante ans de Ford dans la branche tracteurs agricoles. Marchand – réparateur tract. et mach. agric. Bd.43 (1967) Nr.1, S.58.
- [8] Mittelbach, B.: Ein automatischer Pflug. Landtechn. Forsch. Bd. 13 (1963) Nr. 2, S.51/52.
- [9] Morgan, K.E.: The agricultural tractor – some unorthodox concepts. J. Proc. Inst. Agric. Engrs. Bd. 20 (1964) Nr. 2, S.104/13.
- [10] ● Europäische Wirtschaftskommission: Automatisierung in der Landwirtschaft. AGRI-WP. 2–69, 8. August 1962.
- [11] Bronstejn, Ja. L., u. L. A. Baranov: Issledovanie ustrojstv avtomaticheskogo upravlenija traktorom (Untersuchungen von Vorrichtungen für die automatische Lenkung eines Schleppers; Orig. russ.). Vestnik sel'skochozjajstvennoj nauki (1961) Nr. 9, S. 87/99.
- [12] Gel'fenbejn, S.P.: Issledovanie sistem avtomaticheskogo vozdenija metodom modelirovanija (Untersuchungen automatischer Regelung mit dem Analogrechner; Orig. russ.). Vestnik sel'skochozjajstvennoj nauki (1962) Nr. 11, S. 105/10.
- [13] Gol'dstejn, L., u. V. Verejutin: Avtomaticheskoe i distanconnoe upravlenie traktorom DT–54 (Selbststeuerung und Fernlenkung des Schleppers DT–54; Orig. russ.). Technika v sel'skom chozjajstve Bd.19 (1959) Nr. 8, S. 49/51.
- [14] Richey, C.B.: "Automatic Pilot" for farm tractors. Agric. Engng. Bd.40 (1959) Nr.2, S. 78/79, 93.
- [15] Allaries, H.: Radar mit 4-mm-Wellen. Philips' Techn. Rundschau Bd. 25 (1963/64) Nr. 9, S. 321/34.
- [16] Hesse, H.: Ein automatisches Nachführungs- und Vereinzlungssystem mit kapazitiven Fühlern. Vortr. „Kolloquium über Automatisierung in der Landtechnik“, Braunschweig-Völkenrode, 24. April 1969.
- [17] Böhme, J.: Elektronische Füllstandsmessungen – Helfer in der Verfahrenstechnik. Verfahrenstechn. Bd. 2 (1968) Nr.9, S. 384/91.
- [18] Hesse, H., u. Chr. von Zabeltitz: Untersuchungen von optischen und elektrischen Fühlern für automatische Vereinzlungs- und Nachführungssysteme. Grndl. Landtechnik Bd. 18 (1968) Nr. 3, S. 107/12.
- [19] Warner, M. G. R.: Automatic guidance without leader cables. Agric. Engng. Symposium Paper Nr. 2/1345/D/19. Silsoe, Bedford/England 1967. Ref. in: Grndl. Landtechnik Bd.18 (1968) Nr.1, S.36.
- [20] Tanasev, F. G.: Vorrichtung zur automatischen Schlepperführung. Pat. UdSSR Nr. 184544/Kl. 45 a, 69/04. Anm. 6. 3. 1964.
- [21] Keece, A. R.: An automatic electric arable farm. Farm-Mechanization & Buildings Bd.20 (1968) Nr.226, S. 18/20.
- [22] ● Batel, W., u. H. Hesse: Möglichkeiten der Automation bei der landwirtschaftlichen Produktion. In: Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14 Nr.2, S.3/26. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966. Ref. in: Grndl. Landtechnik Bd. 17 (1967) Nr. 1, S. 34.
- [23] Finn-Kelcey, P., u. V.M. Owen: Let's be realistic about automatic tractors. Farm Mechanization Bd.16 (1964) Nr. 181, S.13/14.
- [24] Finn-Kelcey, P., u. V.M. Owen: Leader cable tractor guidance. Agric. Engng. Symposium Paper Nr. 2/1345/18, Silsoe, Bedford/England 1967. Ref. in: Grndl. Landtechnik Bd. 18 (1968) Nr.1, S.35.
- [25] Finn-Kelcey, P.: Farmers's support for auto tractor project. Farm Mechanization & Buildings Bd. 20 (1968) Nr. 221, S. 58.
- [26] Gordon, C.: An automated lawnmower. Radio Electronics Bd. 32 (1961) Nr. 4, S.35/38.
- [27] Morgan, K.E.: Automation in agriculture. The New Scientist (1959) Nov., S.991/93.

- [28] • *Nastenko, N.N.*, u. *L.A. Borosok*: Automatisierung von Produktionsprozessen in der Landwirtschaft. Moskau: Masgiz 1963.
- [29] *Zimmermann, M.*: Automatic tractors . . . (Mechanisierung einer 1600 ha großen Zukunftsfarm). *Implement & Tractor* Bd. 84 (1969) Nr. 2, S.30/31.
- [30] Driverless farm tractors. *J. IEE* Bd. 5 (1959) Nr.58, S. 584/85.
- [31] Driverless tractor used by Ford in testing and development work. *Implement & Tractor* Bd.73 (1958) Nr.11, S.38/39.
- [32] *De Liban, R.*: Automatic driverless warehouse trains. *SAE Paper* Nr.556 B 1962.
- [33] *Meyercordt, W.*: Automatisierung durch selbstgesteuerte Flurförderzeuge – Elektro-Gehgabelhubwagen und Elektro-Gehschlepper. *Klepzig Fachberichte* (1967) Sept., S.542/44.
- [34] *Zworykin, V.K.*: Possibilities of electronic control of automobiles. *Electric. Engng.* (1953) Sept., S.849/50.
- [35] *Bidwell, J.B.*, *A.F. Welch* u. *E.A. Hanysz*: Electronic highways. *General Motors Research Labor* 1960, GMR-245.
- [36] *Hoops, A.*: Modell eines auf festgelegter Fahrbahn elektronisch gelenkten Fahrzeugs. *Elektron. Rdsch.* Bd. 11 (1957) Nr.9, S.277/78.
- [37] *Morrison, H.M.*, *A.F. Welch* u. *E.A. Hanysz*: Automatic highway and driver aid developments. *SAE-Trans.* Bd.69 (1961) S.31/53.
- [38] *Müller, R.H.*: Das elektronische Versuchswagen-System (contidrom). *Kautschuk u. Gummi, Kunststoffe* Bd. 21 (1968) Nr. 11, S.637/38.
- [39] Ideas pile up for driverless cars, automated roadways. *Machine Design* (1968) April, S.20/29.
- [40] *Pichon, J.D.*, u. *G.W. Steinbruegge*: Propagating audio-frequency magnetic fields through soil. *Trans. ASAE* Bd. 8 (1965) Nr.2, S.264/66.
- [41] *Finn-Kelcey, P.*: Automation in agriculture. *Farm Mechanization* Bd.18 (1966) Nr.201, S.41/42.
- [42] *Finn-Kelcey, P.*: Automatic tractor will do the work in five years' time. *Agric. Machinery J.* (1966) Mai, S. 23.
- [43] Cable-guided tractors for field operations. *Agric. Machinery J.* (1967) Sept., S.29/30.
- [44] *Mac Hardy, F.V.*: An automatic guidance system for farm tractors. *Can. Agric. Engng.* Bd.9 (1967) Nr.1, S.17/19.
- [45] *Batel, W.*: Grundsätzliche Überlegungen zur Automatisierung der landwirtschaftlichen Produktion. *Grundl. Landtechnik* Bd.18 (1968) Nr. 1, S.14/20.

DK 631.879.4:66.047
518.61:66.015.23/24

Ein Beitrag zur numerischen Behandlung des gekoppelten Stoff- und Wärmeaustauschs bei der Trocknung von Frischkompost

Von Anton G. Meiering, Morgantown/USA, Oskar B. Hoffmann, Gießen, und Frederick W. Bakker-Arkema, East Lansing/USA

Die Trocknung von Frischkompost wurde experimentell und in einem Simulationsverfahren untersucht. Da die Biotzahlen für das Trocknungsgut kleiner als 0,1 angenommen werden konnten, blieben bei der Trocknung die Gradienten der Guttemperatur und der Gutsfeuchte innerhalb der Teilchen unberücksichtigt. Unter diesen Bedingungen sind zum Beschreiben des Stoff- und Wärmeübergangs von der Teilchenoberfläche zur Trocknungsluft die von *E. Klapp* aufgestellten Rechenansätze zulässig. Wegen des kleinen Einflusses der Guttemperatur auf das hygroskopische Gleichgewicht in der Grenzschicht wurde dieses lediglich als eine Funktion der Gutsfeuchte beschrieben. Die Wärmeübergangszahl und die Verdunstungszahl hängen vom Dampfdruck ab. Die theoretischen Ergebnisse stimmen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein. Es gelang, außer dem zeitlichen Verlauf der Temperatur der Trocknungsluft und anderen Abhängigkeiten insbesondere den Stand und die Ausdehnung der Trocknungszone im Simulationsmodell zu reproduzieren. Weiterhin wurde sowohl theoretisch als auch experimentell eine sehr große Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Trocknungsvorgangs von der Eingangstemperatur der Trocknungsluft festgestellt.

Die theoretische Behandlung des gekoppelten Stoff- und Wärmeaustauschs hat in letzter Zeit neuen Auftrieb erhalten, da es mit Hilfe der elektronischen Rechenanlagen möglich wurde, die oft recht verwickelten Rechenansätze numerisch zu lösen. Eine einwandfreie, allgemeingültige mathematische Beschreibung der Übertragungsvorgänge von der Teilchenoberfläche innerhalb einer Teilchenschüttung zum Trocknungsmedium gelang zunächst *E. Klapp* [1;2]. Obwohl er das aufgestellte System von partiellen Differentialgleichungen auf Grund einiger sehr vereinfachender Annahmen analytisch einer nur begrenzt gültigen Lösung zuführte, bleiben doch seine Rechenansätze im Hinblick auf das Anwenden von elektronischen Rechenanlagen von weit größerer Bedeutung.

Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden im Auftrage der Stadtverwaltung der Stadt Heidelberg im Institut für Landtechnik in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrobiologie in Gießen begonnen. Der Trocknerbau, die Instrumentierung und die Versuchsausführung lagen in Händen von Herrn Ing. grad. W. G. Schröder. Die theoretische Auswertung wurde von Herrn Prof. A. G. Meiering nach seinem Institutswechsel im Rahmen eines Forschungsauftrages der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Agricultural Engineering Department der Michigan State University in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. F. W. Bakker-Arkema abgeschlossen.