

# System von Programmen zur Konzeption von Landmaschinen

Dipl.-Ing. H. Domsch/Dipl.-Ing. A. Rüdiger, KDT/Dipl.-Math. W. Engel/Dipl.-Ing. Hannelore Schönhoff  
Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR

## 1. Einleitung

Die Entwicklung von Landmaschinen ist ein Prozeß, in dem sich theoretische und experimentelle Untersuchungen gegenseitig ergänzen. Um der Notwendigkeit nach genereller Verkürzung der Entwicklungszeit und Senkung der materiellen Aufwendungen zu entsprechen, ist der experimentelle Entwicklungsanteil, u. a. auch der Bau von Maschinenvarianten, wesentlich zu reduzieren.

Der entscheidende Lösungsweg zur Erfüllung dieser Forderung ist die zunehmende Nutzung von Rechenanlagen, die Anwendung des rechnergestützten Konstruierens und Konzipierens. Die Berechnung einer Auswahl sinnvoller Konzeptionsvarianten ermöglicht vorab eine Bewertung und damit eine Einschränkung experimentell zu untersuchender Varianten.

Die zumeist geringen Kenntnisse über die Größe der Aktionskräfte im Konzeptionsstadium lassen auch bei Anwendung umfangreicher dynamischer Modelle nur bedingt wahre Ergebnisse erwarten. Die Nutzung statischer Modelle in dieser Entwicklungsstufe führt zu ausreichend genauen Aussagen bei einem wesentlich reduzierten Aufwand bei der Rechnung sowie bei der Ermittlung der Recheneingabedaten. Aufgrund des geringeren Umfangs dieser Modelle sind die Nutzung von Kleinrechenanlagen und damit der breite Einsatz solcher Modelle möglich.

Zur Berechnung der wichtigsten kinetischen und fahrkinematischen Bewertungsparameter eines mehrgliedrigen Traktor-Landmaschinen-Aggregats (TLA), z. B. Traktor K-700, Gelenkpflug B 550, Saatbettbereitungsgerät B 601, wurde eine Reihe von Rechenprogrammen auf der Grundlage statischer Modelle für den Kleinrechner KRS 4200 erarbeitet. Diese Programme sind für eine größere Anzahl ähnlicher TLA anwendbar.

## 2. Kinetische Modelle zur Berechnung von Traktor-Landmaschinen-Aggregaten

### 2.1. Allgemeines

Aus der Kenntnis der räumlichen Kräfte an den Stützrädern bzw. -flächen eines gegebenen TLA läßt sich unter Berücksichtigung der Ver-

formung des Bodens durch die Radkräfte die Lageänderung des TLA in bezug zu einer Normallage bestimmen. Durch Variantenberechnungen mit verschiedenen Aktionskräften (Werkzeugkräften) bzw. mit verschiedenen Kraftangriffspunkten innerhalb des real zu erwartenden Bereichs lassen sich die im Betriebszustand auftretenden Kraftschwankungen und in der Folge Lageänderungen ermitteln. Dadurch ist eine Bewertung der Führung des TLA möglich. Bei neu zu entwickelnden TLA ist durch eine Variantenrechnung mit verschiedenen Stützradlagen oder verschiedenen Kopplungssystemen zwischen Traktor und Landmaschine die Bestimmung optimaler Konzeptionsvarianten bezüglich Größe und Gleichmäßigkeit der Kräfte bei Aktionskraftschwankungen möglich.

Mit Hilfe von statischen Modellen ermittelte Stützradkräfte sind geeignet, Vorhersagen über die Führung eines TLA abzuleiten bzw. diesbezügliche Vergleiche zwischen verschiedenen TLA durchzuführen. Sie sind als Grundlage für Festigkeitsberechnungen bzw. für Stabilitätsuntersuchungen nicht geeignet. Für diese Zielstellung müssen dynamische Modelle entworfen werden.

Um sich den spezifischen Anforderungen an ein Traktor- bzw. Gerätemodell und den Möglichkeiten des Kleinrechners anzupassen, wird das TLA durch zwei Teilmodelle beschrieben. Der Zusammenhang zwischen den beiden Teilmodellen wird durch die Kräfte und Momente an einem idealisierten Kopplungspunkt zwischen Traktor und Landmaschine gewährleistet. Sie werden mit Hilfe des Gerätemodells bestimmt und sind die Eingangsgrößen für das Traktormodell.

### 2.2. Programm zur kinetischen Untersuchung eines mehrgliedrigen Geräts (Gelenkpflug)

Grundbaustein des Modells ist ein Geräteteil, an dem 10 Aktionskräfte sowie Kräfte und Momente eines vorgeordneten Geräteteils angreifen können. Zur Abstützung dieser Kräfte dienen bis zu drei vertikale Stützelemente, ein horizontales Stützelement sowie ein Kopplungspunkt zum nachgeordneten Geräteteil (Gelenk) oder zum Traktor (Bild 1). Durch

gerichtete Bearbeitung im Hinblick auf die im Abschn. 2 aufgeführten Anforderungen möglich ist. Die gezielte Ausdeutung der Gleichungen bringt eine rasche und gute Annäherung an das gewünschte Ergebnis in Übereinstimmung mit den konstruktiven Möglichkeiten an Schneidwerk und Grundmaschine. Die Brauchbarkeit der gefundenen Lösung muß durch eine ausführliche rechnerische Untersuchung, die die gesamte Palette aller möglichen variablen Größen erfaßt, nachgewiesen werden. In der beschriebenen Art und Weise lassen sich alle möglichen Varianten von Aufhängungen für bodenkopierende Schneidwerke untersuchen und im Laufe der Zeit in einem Lösungskatalog zusammenstellen.

Aneinanderreihung dieser Grundbausteine kann ein ein- bis dreigliedriges Gerät, d. h. z. B. ein starrer Pflug bzw. ein Pflug mit zwei Horizontalgelenken, berechnet werden. Die Art der Kopplung zwischen Traktor und Gerät, d. h. Anbau-, Aufsattel- oder Anhängesystem, wird im Modell berücksichtigt.

Das Gleichungssystem für das Modell ergibt sich aus den Gleichgewichtsbeziehungen der drei räumlichen Kräfte und Momente und Hilfsbeziehungen an den Koppel- und Gelenkpunkten.

Die Lösungsmatrix besteht aus 35 Zeilen und 30 Spalten und enthält alle Gleichungen für beliebige Konzeptionsvarianten. Durch einen zusätzlichen Eingabebefehl zur Streichung der nicht benötigten Zeilen und Spalten wird für die Rechnung die jeweils gültige quadratische Lösungsmatrix zusammengestellt.

Als Eingabedaten werden im wesentlichen die Ortskoordinaten aller Aktions- und Reaktionskräfte ( $x_i, y_i, z_i$ ), die Größe der Aktionskräfte  $F_{ij}$  sowie die Roll- bzw. Reibwiderstandsbeiwerte für die Stützelemente ( $\mu_{iR}, \mu_{iS}, \mu_{iT}$ ) benötigt. Ausgedrückt werden die Kräfte an den Stützelementen ( $F_{iA}, F_{iR}, F_{iS}, F_{iT}$ ) sowie die Kräfte und Momente an dem Kopplungs- bzw. Gelenkpunkt jedes Gliedes ( $F_{iK}, M_{iK}$ ).

### 2.3. Programm zur kinetischen Untersuchung von Traktoren

Entsprechend der wachsenden Bedeutung allradgetriebener Traktoren mit Knicklenkung als Zugmittel für neue Bodenbearbeitungsgeräte wurde das Modell für diese Traktortypen abgeleitet (4 gleichgroße getriebene Räder, kein Achs- bzw. Zwischenachsdifferential, frei bewegliches Längsgelenk zwischen dem vorderen und hinteren Traktorteil, Knicklenkung). Ziel der kinetischen Untersuchungen am Traktor ist die Ermittlung der an den Rädern auftretenden Stützkräfte (Reaktionskräfte), ausgehend von den am Traktor angreifenden Aktionskräften, der Traktorgewichtskraft und der aus den Zusatzmassen resultierenden Gewichtskraft (unter Beachtung der Fahrbahnneigungswinkel) sowie den am idealisierten Kopplungspunkt wirkenden Kraft- und Momentenkomponenten. Dabei sind an jedem Rad folgende Stützkräfte zu berücksichtigen (Bild 2):

- Stützkräfte in Fahrtrichtung [Triebkraft als Differenz der Umfangs- ( $F_{Uij}$ ) und Rollwiderstandskraft ( $W_{ij}$ )]
- Stützkräfte quer zur Fahrtrichtung [Seitenkräfte ( $Q_{ij}$ )]
- Stützkräfte vertikal zur Fahrbahn [Radlast ( $F_{ij}$ )].

Bei der Erarbeitung des Lösungsalgorithmus waren deshalb die wechselseitigen Abhängigkeiten der Radkraftkomponenten in geeigneter Weise zu berücksichtigen. In Voruntersuchungen wurden dazu aus verschiedenen Veröffentlichungen funktionelle Abhängigkeiten der Radkräfte von Haupteinflußgrößen für zwei repräsentative landwirtschaftliche Fahrbahnen (Stoppelacker, Saatbett) formuliert. Im wesentlichen sind dies:

- Umfangskraft als Funktion
  - der Radlast
  - des Schlupfes

Fortsetzung von Seite 548

Zusammenfassend kann man feststellen, daß die Forderung

$$\gamma - \beta = 0,$$

d. h. parallele Lage beider Lenker, sehr häufig angesprochen wird. Sie ist demzufolge bei der realen Konstruktion vordringlich anzustreben. Der Wert kann auch etwas größer als Null sein.

## 6. Zusammenfassung

Für ein ausgewähltes Konstruktionsprinzip der Aufhängevorrichtung eines bodenkopierenden Schneidwerks konnte gezeigt werden, daß nach Aufstellung der Kräftegleichungen eine ziel-

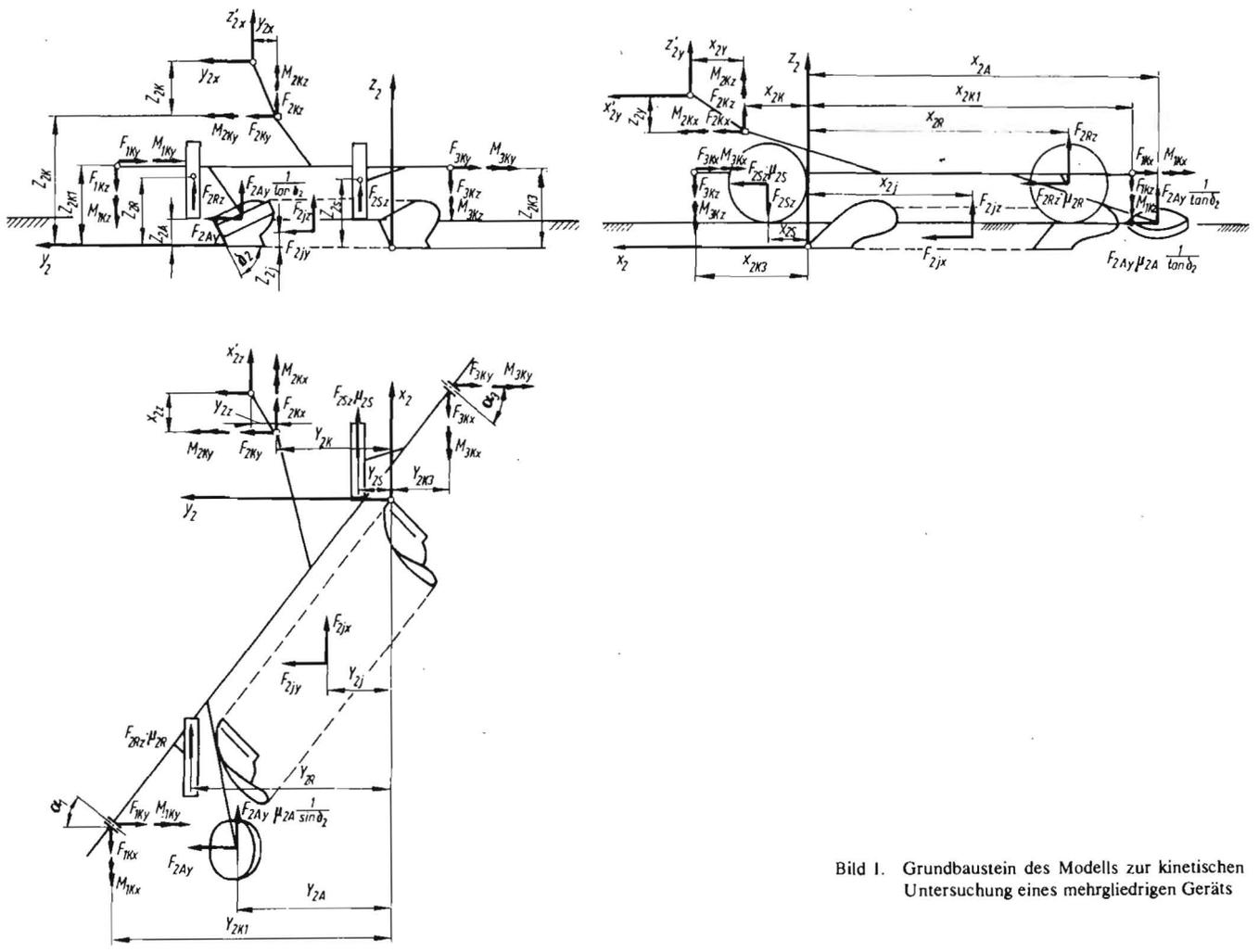


Bild 1. Grundbaustein des Modells zur kinetischen Untersuchung eines mehrgliedrigen Geräts

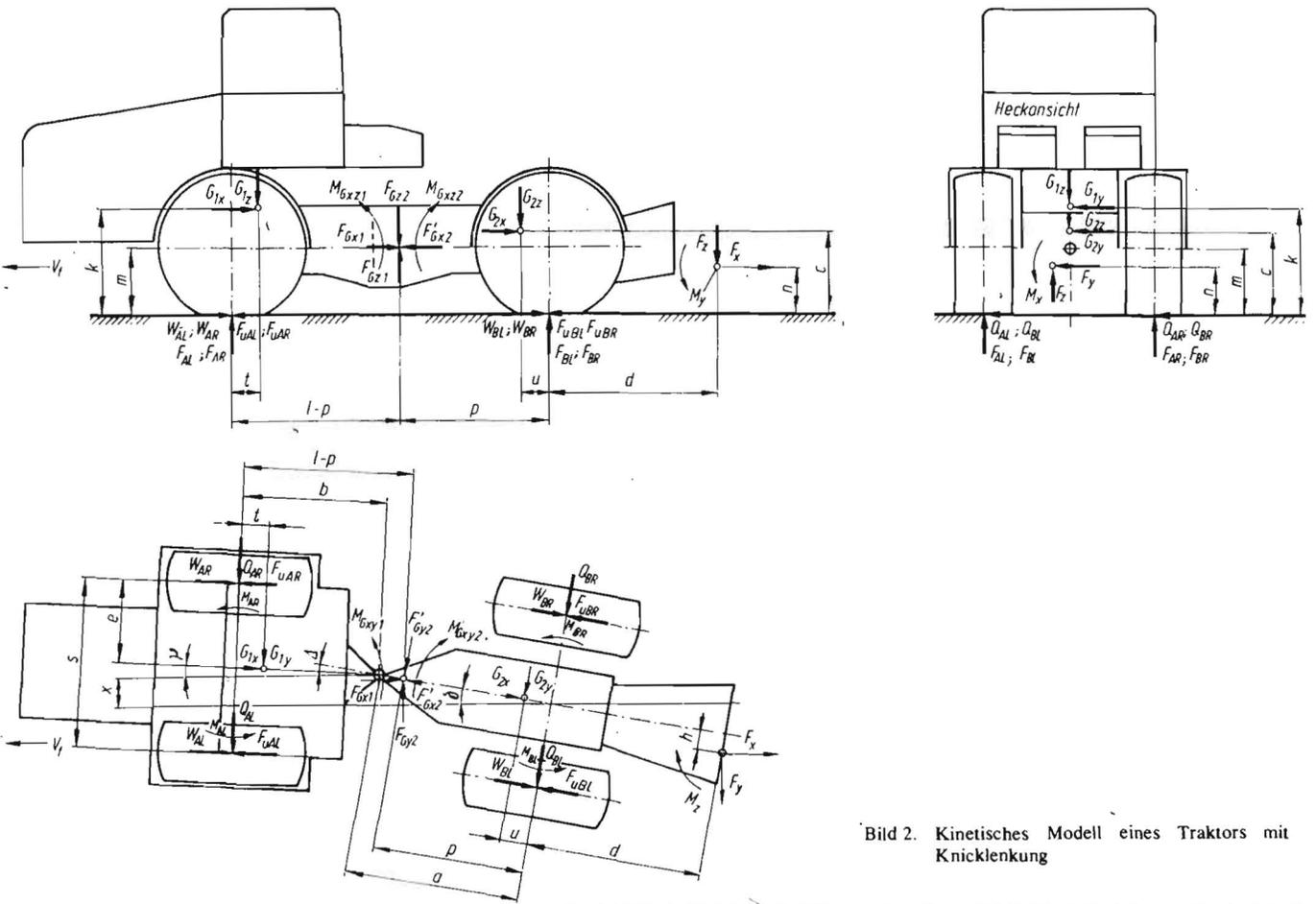


Bild 2. Kinetisches Modell eines Traktors mit Knicklenkung

- Rollwiderstandskraft als Funktion
  - der Radlast
  - des Schlupfes
  - des Schräglaufwinkels
- Seitenkraft als Funktion
  - der Radlast
  - des Schräglaufwinkels.

Der erreichte Erkenntnisstand auf diesem Gebiet genügt jedoch nicht allen Ansprüchen und erfordert eine weitere experimentelle und theoretische Durchdringung. Bei der Ermittlung der Umfangsgeschwindigkeiten in den Radaufstandspunkten wurden weiterhin die momentanen Rollradien der Reifen, ausgehend von den radialen Reifenfederkonstanten und den Radlasten, berücksichtigt.

Aus dem kinetischen Modell des Traktors sowie den kurz dargestellten Randbedingungen kann ein nichtlineares Gleichungssystem aufgestellt werden. Entsprechend den Möglichkeiten des Kleinrechners KRS 4200 wird im vorliegenden Programm das Gleichungssystem iterativ gelöst. Im Ergebnis der Rechnung werden nachfolgende Daten ausgewiesen:

- vertikale Stützkraft an jedem Rad
- Umfangskraft an jedem Rad
- Rollwiderstandskraft an jedem Rad
- Schlupf an jedem Rad
- Seitenkraft an jeder Achse
- Schräglaufwinkel an jeder Achse
- Spurversatz (Abstand der Mitten von Vorder- und Hinterachse senkrecht zur Fahrtrichtung)
- Fahrgeschwindigkeit.

Bei der Ermittlung der Schräglaufwinkel und des Spurversatzes wird davon ausgegangen, daß sich der Traktor immer geradeaus bewegt. Mögliche Fahrtrichtungsänderungen, bedingt durch unterschiedliche Schräglaufwinkel an den Achsen, werden durch Lenkwinkeländerungen kompensiert.

Die berechneten Daten ermöglichen somit einen vollständigen Überblick über die kinetischen Verhältnisse am Traktor unter den vorgegebenen Bedingungen.

### 3. Fahrkinematische Untersuchungen

#### 3.1. Schwerpunkte fahrkinematischer Untersuchungen

Fahrkinematische Untersuchungen an mehrgliedrigen Traktor-Landmaschinen-Aggregaten (z. B. K-700, B 550 und B 601) werden vorrangig mit folgenden Zielstellungen durchgeführt:

- Überprüfung des Fahrverhaltens eines Aggregats bei Kurvenfahrt
- Auslegung von Zwanglenkssystemen an gezogenen Geräten (z. B. Pflüge B 501, 6-PHX-35), wenn dies durch die Anordnung der Stützräder erforderlich wird.

Bei der Überprüfung des Fahrverhaltens ist für den Konstrukteur vorrangig von Interesse, wie weit die angekoppelten Geräte den äußeren bzw. inneren Wendekreisdurchmesser des Traktors überschreiten und ob der maximale Lenkwinkel des Traktors genutzt werden kann.

Für den Zustand der stationären Kreisfahrt (Kreisfahrt ohne Lenkvorgänge) lassen sich diese Aussagen für ungelenkte Geräte mit relativ einfachen grafischen bzw. analytischen Mitteln ableiten. Allerdings wird das Fahrverhalten des Aggregats bei Kurvenfahrt durch die Kennwerte der stationären Kreisfahrt nur unvollständig bestimmt, da dieser Zustand nur selten erreicht wird und außerdem der eigentliche Lenkvorgang, der besonders bei Traktoren mit Knicklenkung fahrkinematische Besonderheiten aufweist, unberücksichtigt

bleibt. Somit macht sich eine nähere Untersuchung der Lenk- sowie der Ein- und Auslaufvorgänge bei Kurvenfahrt erforderlich. Bisher wurden derartige Untersuchungen mit maßstabgerechten Modellen durchgeführt.

Vor allem bei großen Bodenbearbeitungsgeräten wird durch die Arbeitselemente der Freiraum für die Anordnung der Stützräder und damit das Nachlaufverhalten des Geräts bestimmt. Wenn das Nachlaufverhalten den Anforderungen jedoch nicht entspricht, kann es durch Anwendung eines Zwanglenksystems am Gerät verbessert werden. Bei der Auslegung von Zwanglenkssystemen bilden die Ableitung der Übertragungsfunktion des Lenksystems sowie deren betriebstechnische Umsetzung die Schwerpunkte. Die Übertragungsfunktion, die die Abhängigkeit des Lenkwinkels des gelenkten Rades am Gerät vom Knick- bzw. Nachlaufwinkel (Winkel zwischen den Längsachsen des Traktors und des Geräts) funktionell beschreibt, wird aus mehreren Lagen des Aggregats in stationärer Kreisfahrt bestimmt. Vor allem bei asymmetrisch angeordneten Stützrädern läßt sich die Sollfunktion nicht mit einfachen Mitteln bestimmen und erfordert vertiefte Untersuchungen.

#### 3.2. Kurzcharakteristik der Programme

##### 3.2.1. Allgemeines

Für die Bearbeitung der dargestellten fahrkinematischen Probleme wurden analytische Algorithmen und Programme entwickelt. Entsprechend den Möglichkeiten des Kleinrechners KRS 4200 wurden für die Untersuchung des Fahrverhaltens ebene Modelle (Projektionen auf die Fahrbahn) gewählt. Grundlage für die Algorithmen bildeten die Methoden der Getriebekinematik (allgemeine ebene Bewegung einer Ebene) im allgemeinen und das Prinzip der Schleppkurvenkonstruktion im speziellen.

Die Bewegung des Aggregats wird durch die Bahnkurven der Radaufstandspunkte und beliebiger Eckpunkte des Traktors und des Geräts in einem erdfesten, kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Für die fahrkinematische Untersuchung der Aggregate wurden getrennte Programme sowohl für den Traktor, wobei zwischen Standardtraktor (Vorderachslenkung) und Traktor mit Knicklenkung unterschieden wird, als auch für die angekoppelten Geräte erarbeitet. Die Trennung erfolgt im Vertikalgelenk zwischen Traktor und Gerät.

##### 3.2.2. Programm zur fahrkinematischen Untersuchung eines Traktors

Mit diesem Programm können Traktoren mit beliebigen geometrischen Abmessungen mit und ohne Anbaugerät untersucht werden. Der gewünschte Fahrkurs muß durch den Bearbeiter vorgegeben werden. Dazu wurden folgende unterschiedliche Möglichkeiten vorbereitet:

- Vorgabe des Lenkwinkels  $\epsilon$  als Funktion der Fahrzeit in Form von Wertepaaren ( $\epsilon_i$ ,  $T_i$ ); die erforderliche Lenkwinkelgeschwindigkeit wird programmintern ermittelt
- Vorgabe eines gewünschten Wendewinkels  $\varphi$  – Winkel zwischen der Fahrtrichtung vor und nach der Wendung (Geradausfahrt) und der Lenkwinkelgeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$
- Vorgabe der Bewegungsbahn eines festgelegten Führungspunktes am Traktor (Hinterachsmitte am Standardtraktor; Vorderachsmitte am Traktor mit Knicklenkung) im erdfesten Koordinatensystem durch eine beliebige Anzahl von Stützpunkten

der Führungsbahnkurve (x-y-Koordinaten)

eine beliebige Folge frei wählbarer Funktionen (Geraden und Kreise); zur Gewährleistung eines stetigen Bewegungsverlaufs werden zwischen den Funktionen programmintern Übergangsfunktionen berechnet.

Zur Charakterisierung der Bewegungsvorgänge werden in beliebig enger Zeitfolge nachfolgende Größen ausgedrückt:

- Koordinaten der Radaufstandspunkte, des Kopplungspunktes zum Gerät und weiterer ausgewählter Traktorpunkte im erdfesten Koordinatensystem
- momentane Krümmungsradien der Bewegungsbahnen und Bewegungsrichtungen der genannten Punkte, bezogen auf die Traktorlängsachse
- momentaner Lenkwinkel.

Die Bewegungsbahnen ausgewählter Punkte können auf einem Koordinatenschreiber maschinell gezeichnet werden. Zusätzlich werden die Bewegungsbahn des Kopplungspunktes sowie dessen Bewegungsrichtung als Grundlage für die folgenden Geräteuntersuchungen maschinenlesbar (Lochstreifen) ausgegeben.

##### 3.2.3. Programm zur fahrkinematischen Untersuchung eines gezogenen Geräts

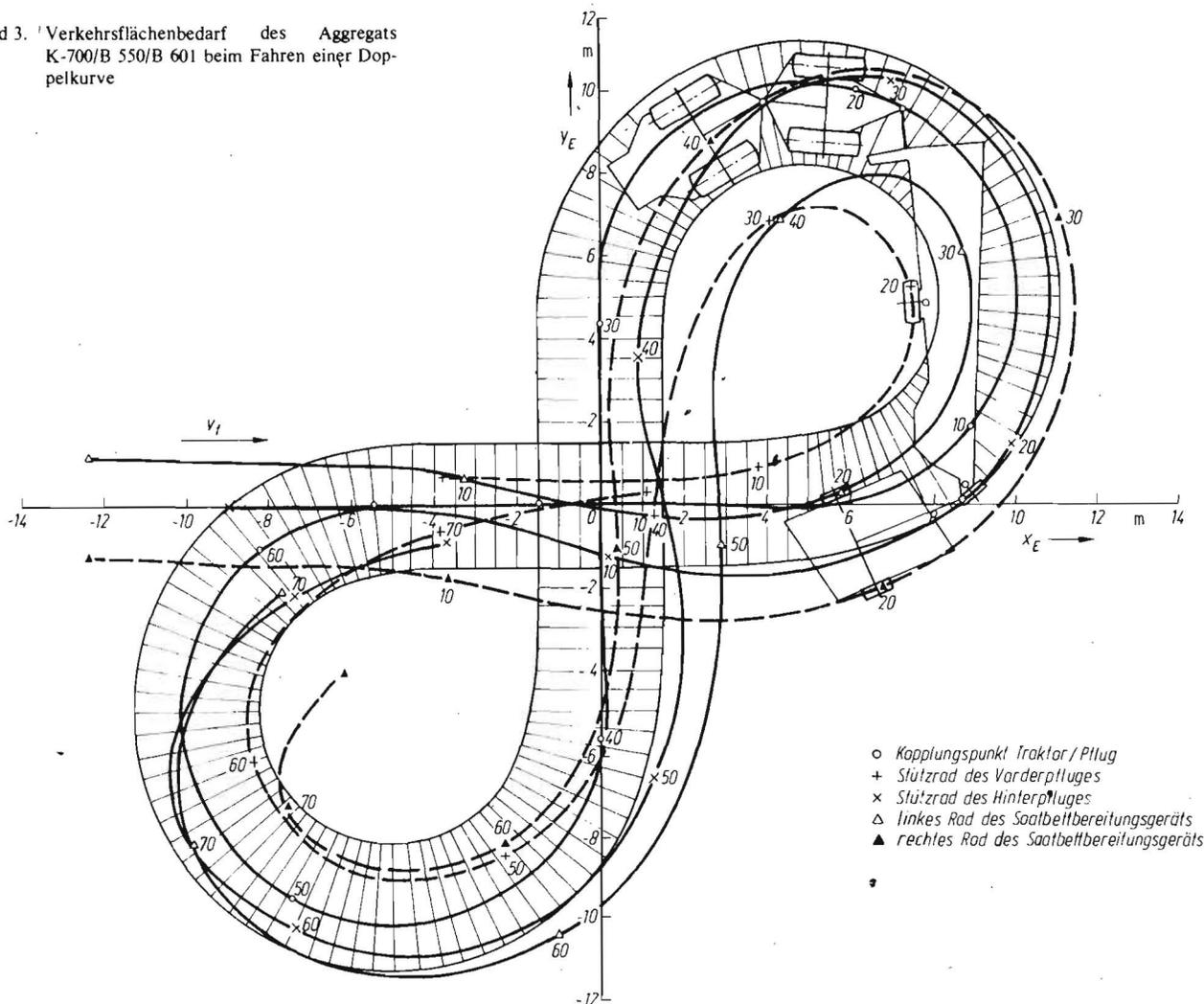
Mit dem vorliegenden Programm können beliebige Aufsattelgeräte, die durch ein Vertikalgelenk mit dem Traktor gekoppelt sind, dreh-schemelgelenkte Anhänger und ähnliche Geräte untersucht werden. Das Modell ermöglicht, daß zur seitlichen Führung des Geräts maximal vier starre bzw. durch Zwanglenk-systeme gesteuerte Stützräder vorgesehen werden können. (Die Anzahl weiterer freinachlaufender Räder ist beliebig.)

Die Übertragungsfunktionen der Zwanglenk-systeme sind für jedes Stützrad getrennt nach einem Polynomansatz analytisch formuliert vorzugeben. Mit Hilfe des Programms lassen sich die Bahnkurven der Radaufstandspunkte berechnen, die sich ergeben, wenn der Kopplungspunkt zwischen Traktor und Gerät auf einer im erdfesten Koordinatensystem vorgegebenen Kopplungspunktbahnkurve bewegt wird. Die Kopplungspunktbahnkurve wird vorzugsweise durch Stützpunkte, die sich aus den vorangegangenen Untersuchungen am Traktor ergeben, vorgegeben. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Kopplungspunktbahnkurven durch frei wählbare Stützpunkte bzw. durch eine Kreisgleichung mit beliebigem Mittelpunkt und Radius zu bestimmen. Zur Charakterisierung der Bewegungsvorgänge werden analog zu den Traktoruntersuchungen Bewegungsbahnen, Bewegungsrichtungen, momentane Krümmungsradien, Nachlaufwinkel sowie momentaner Lenkwinkelfehler an jedem gelenkten Stützrad (Differenz zwischen momentaner Bewegungsrichtung des Radaufstandspunktes und Lenkwinkel) berechnet, gedruckt und auszugsweise aufgezeichnet.

Besteht ein Aggregat aus mehreren gezogenen Geräten (z. B. Pflug und Saatbettberei-tungs-gerät), kann das beschriebene Programm auch für die folgenden Geräte genutzt werden.

Im Bild 3 sind am Beispiel eines TLA, bestehend aus K-700, B 550 und B 601, die mit den beschriebenen Programmen berechneten Bewegungsbahnkurven ausgewählter Punkte beim Befahren einer Doppelkurve dargestellt. Dabei wird das bekannte Ausschwenken von Pflug- und Saatbettberei-tungs-gerät während der Lenk- und Einlaufvorgänge deutlich sichtbar.

Bild 3. Verkehrsflächenbedarf des Aggregats K-700/B 550/B 601 beim Fahren einer Doppelkurve



- Kopplungspunkt Traktor/Pflug
- + Stützrad des Vorderpfluges
- × Stützrad des Hinterpfluges
- △ linkes Rad des Saatbettbereitungsgeräts
- ▲ rechtes Rad des Saatbettbereitungsgeräts

### 3.2.4. Programm zur Ableitung von Übertragungsfunktionen von Zwanglenksystemen

Wie eingangs bereits erwähnt, kann das Fahrverhalten eines Geräts wesentlich durch die gewählte Übertragungsfunktion des Zwanglenksystems beeinflusst werden. Die Ableitung dieser Funktionen ist besonders bei mehreren gelenkten Rädern mit den herkömmlichen grafischen Mitteln sehr aufwendig und erfordert eine große Genauigkeit. Deshalb wurde durch die Modifikation des bereits erläuterten Programms für die Untersuchung gezogener Geräte ein weiteres zur Ableitung der Übertragungsfunktionen erarbeitet. Ziel der Untersuchungen ist es dabei, dem Konstrukteur einen möglichst breiten und detaillierten Überblick über die möglichen Nachlaufverhalten sowie die dazu erforderlichen Übertragungsfunktionen zu vermitteln. Deshalb werden für die Links- und Rechtskurve bei fünf verschiedenen Krümmungsradien der Kopplungspunktbahnkurve und einer größeren Anzahl möglicher Gerätestellungen hinter

dem Traktor die charakteristischen Kennwerte, wie z. B. die Krümmungsradien ausgewählter Gerätepunkte, die maximalen Abstände der äußeren bzw. inneren Bahnkurven des Geräts vom Wendekreis des Traktors, der Nachlaufwinkel, die erforderlichen Lenkwinkel der Räder sowie einige kinetische Kenngrößen berechnet. Damit liegt dem Konstrukteur ausreichend fundiertes Datenmaterial vor, um aus einer geeigneten grafischen Darstellung in effektiver Weise das gewünschte Nachlaufverhalten und die entsprechenden Übertragungsfunktionen für das Zwanglenksystem ableiten zu können. Eine nähere Beschreibung des Lösungswegs für die Auslegung eines Zwanglenksystems ist an dieser Stelle nicht möglich. Entsprechende Erfahrungen bei der Entwicklung komplizierter Lenksysteme, die mit Hilfe der Programme durchgeführt wurden, liegen jedoch bereits vor [1].

Die Überprüfung des Nachlaufverhaltens in den instationären Phasen erfolgt mit den bereits beschriebenen Programmen.

### 4. Zusammenfassung

Zur Erhöhung der Effektivität und Sicherheit bei der Entwicklung von Traktor-Landmaschinen-Aggregaten sind in wachsendem Maß rechnergestützte theoretische Untersuchungen durchzuführen. In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Rechenprogrammen für kinetische und fahrkinematische Untersuchungen entwickelt, die im Beitrag kurz vorgestellt wurden.

Das Programmsystem bietet dem Konstrukteur gute Möglichkeiten, eine Vielzahl konzeptioneller Varianten in kurzer Zeit zu untersuchen und schafft damit Grundlagen für fundierte Entscheidungen.

### Literatur

- [1] Rüdiger, A.; Schönhoff, H.: Ableitung einer Übertragungsfunktion für ein Lenksystem eines gezogenen Gerätes durch Anwendung des Programms FAKILE. FZM Schlieben/Bornim, Arbeitsmaterial 1979 (unveröffentlicht).