

Kinematik von Nachführungsvorrichtungen für landwirtschaftliche Maschinen und Geräte

Von Kurt Hain, Braunschweig-Völkenrode

Ein wichtiges Problem der Landtechnik ist es, den Ackerschlepper mit seinen Geräten bei der Aussaat, bei Pflegearbeiten und bei der Ernte den verschiedenartigen Anforderungen entsprechend zu steuern. Bei einigen Arbeiten ist außer dem Schlepperfahrer noch ein zweiter Mann zum Nachsteuern der Geräte notwendig. Die meisten übrigen Arbeiten, bei denen ein zweiter Mann nicht notwendig ist, erfordern hohe Aufmerksamkeit des Schlepperfahrers und führen zu raschen Ermüdungen. Mit dem Ziele der Einsparung der zweiten Bedienungsperson und zur Entlastung des Schlepperfahrers werden kinematische Untersuchungen an Nachführungsvorrichtungen für Werkzeuge durchgeführt; diese Aufgabe schließt auch die Ermöglichung höherer Arbeitsgeschwindigkeiten mit ein. Die kinematischen Untersuchungen können zur Regelungstechnik überleiten und damit Wege zur Automatisierung landwirtschaftlicher Arbeiten aufzeigen.

Nachführungsvorrichtungen landwirtschaftlicher Maschinen und Geräte dienen dazu, hinter dem Ackerschlepper oder einem Schlepperzugsystem ein oder mehrere Arbeitswerkzeuge in einer vorgeschriebenen Arbeitsrichtung zu halten oder auf eine gewünschte Sollrichtung zu bringen. Im einen Falle kommt es z. B. darauf an, eine gerade Furche auf dem Acker zu erzeugen und hierbei die seitlichen Schwankungen des Schleppers bzw. des das Werkzeug tragenden Fahrzeuges auszugleichen; im anderen Falle, z. B. bei Pflegearbeiten, muß das Bodenbearbeitungswerkzeug auf einer vorhandenen krummlinigen Bahn (Pflanzenreihe) nachgeführt werden, wobei es eine Vereinfachung bedeutet, wenn man eine geradlinige Bezugsbahn des Werkzeugträgers oder des Ackerschleppers voraussetzt. Am schwierigsten ist eine Kombination beider Probleme, da hierbei zwei grundsätzlich verschiedene Bewegungsaufgaben zu lösen sind.

Ein weiterer Unterschied muß noch hinsichtlich der Art der Nachführung gemacht werden. Wird das Werkzeug, wie z. B. beim Rübenroden, zwischen einzelnen Punkten, nämlich von Pflanze zu Pflanze, geführt, so ist die Bewegungsbahn des Werkzeuges zwischen diesen Punkten zunächst noch offen. Die Übergangskurven sind aber bei höheren Arbeitsgeschwindigkeiten insofern von Bedeutung, als es einen günstigsten Verlauf mit kleinsten Beschleunigungen gibt. Im Gegensatz zur schrittweisen Nachführung von Punkt zu Punkt muß das Werkzeug bei einer stetigen Nachführung auf einer vorgegebenen Kurvenbahn bewegt werden. Hierbei sind keine Freiheiten bezüglich der Form der Übergangskurven mehr vorhanden; es sei denn, daß in bestimmten Bereichen der vorgegebenen Bahnkurve größere Abweichungen in Kauf genommen werden können als in anderen Bereichen und daß diese Abweichungen für eine günstigere Nachführung bezüglich geringerer Beschleunigungen ausgenutzt werden können.

Für die meisten Nachführungsaufgaben ist ein Meßglied notwendig, das die vom Werkzeug zu erreichenden Punkte bzw. die nachzuführende Kurve abtastet und auf das Werkzeugsystem entsprechende Bewegungsimpulse gibt. Ein solches Meßglied kann auf mechanischer, elektrischer oder auch optischer Grundlage arbeiten. In der vorliegenden Arbeit soll eine Systematik über Kombinationen von mechanischen Tastern und entsprechenden Steuereinrichtungen für Werkzeug und Werkzeugträger aufgestellt werden.

Ing. Kurt Hain ist Abteilungsleiter im Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode.

Durch die Art der gelenkigen Verbindungen ergeben sich vielfältige Bauformen. Wesentliche Merkmale der Systematik sind die Unterschiede der Relativbewegungen zwischen Taster, Werkzeug und Werkzeugträger sowie die Kräfte in den Steuereinrichtungen. Es gibt Nachführungsvorrichtungen, bei denen zur Seitenbewegung des sich im Boden bewegenden Werkzeuges hohe Kräfte aufzubringen sind. Bei zweckmäßiger Ausnutzung der Schleppkurven kommt man jedoch zu einer nahezu kräftefreien Nachführung.

Allgemeine kinematische Grundlagen

Bei der systematischen Aufstellung der Nachführungsvorrichtungen wird den Systemen mit Führung der Werkzeuge auf Schleppkurven besondere Beachtung geschenkt. Die Schleppkurven können in jedem Falle kinematisch durch Polbahnen gekennzeichnet werden. Für geschleppte, rollende Räder ist die Gangpolbahn eine Gerade, nämlich die Radachse [1]. Für alle Fahrzeugbewegungen sind außerdem noch der augenblickliche Pol der Bewegung (Momentanzentrum) und der Krümmungsmittelpunkt wichtig. Zwischen beiden Punkten besteht ein wesentlicher Unterschied, der gelegentlich im Schrifttum nicht eindeutig zum Ausdruck kommt. Der augenblickliche Pol ist derjenige Punkt, um den sich das Fahrzeug bei seiner Übergangsbewegung in einem unendlich kurzen Augenblick dreht. Er verändert dauernd seine Lage und bewegt sich auf der sogenannten Rastpolbahn, die zur ruhenden Fahrbahnebene gehört. Überträgt man diese Rastpolbahn in die bewegte Fahrzeugebene, so erhält man die Gangpolbahn, die, wie bereits erwähnt, für alle rollenden Räder die Radachse selbst ist. Da bei beliebiger Bewegung alle Punkte dieser Fahrzeugebene verschiedene Bahnkurven beschreiben, durchläuft auch jeder Punkt dieser Ebene augenblicklich eine Bahn, die gegenüber allen anderen Punktbahnen eine andere Krümmung aufweist. Zu jedem bewegten Punkt gehört also jeweils ein anderer Krümmungsmittelpunkt, der immer auf der Verbindungsgeraden des seine Bahn beschreibenden Punktes mit dem augenblicklichen Pol liegt. Eine Ausnahme hiervon bilden alle Punkte der geradlinigen Gangpolbahn, also der Radachse. Alle diese Punkte haben ihren gemeinsamen Krümmungsmittelpunkt im augenblicklichen Pol [2].

Bei der einfachsten Schleppkurve wird ein Rad in der Gabel einer starren Stange gelagert und diese in einem meist vor dem Rad liegenden Punkt auf einer gegebenen Bahn geführt. Die Normale im jeweiligen betrachteten Punkt dieser Bahn schneidet die Radachse im augenblicklichen Pol der das Rad tragenden Ebene. Ersetzt man die gegebene Führungskurve durch gerade Teilstücke und verbindende Kreisbögen, so kann man die daraus entstehende Schleppkurve des Rades in Abhängigkeit von der gegebenen Deichsellänge, das ist die Entfernung des Führungspunktes von der Radmitte, unmittelbar aus Kurventafeln entnehmen [3].

Denkt man sich im Führungspunkt der oben erwähnten, mit dem geschleppten Rad verbundenen Ebene ein weiteres schwenkbares Rad, so entsteht die sogenannte Achsschenkelenkung, bei der die Bewegung der Fahrgestellebene von den Relativdrehungen dieses gesteuerten Rades gegenüber der Fahrgestellebene selbst abhängig ist. Die Beziehungen zwischen der Relativdrehung dieses gesteuerten Rades gegenüber seiner Fahrgestellebene und den Schleppkurven des Hinterrades sind bisher noch nicht kinematisch gedeutet worden. Deshalb werden hier Konstruktionen angegeben, wie die Lage des augenblicklichen Poles

bei gegebenen Abmessungen und relativer Steuergeschwindigkeit bestimmt werden kann. Wesentlich komplizierter werden die kinematischen Untersuchungen bei Steuersystemen mit Gelenkvierecken. Sie sind in der nachfolgenden Systematik enthalten, ihre Untersuchung soll jedoch später durchgeführt werden. Eine rechnerische Behandlung der einfachen Schleppkurven im Hinblick auf Nachführungsvorrichtungen in der Landwirtschaft wurde kürzlich von *Jamieson* und *Reece* gezeigt [4].

Systematik von Nachführungsvorrichtungen

Bei einer Systematik von Nachführungsvorrichtungen müssen diese nach bestimmten, für die Nachführung wesentlichen Merkmalen gegliedert werden. Nachstehend werden Beziehungen zwischen Taster und Werkzeug und deren Anordnung an einem vom Schlepper gezogenen Aufsattelgerät bzw. am Schlepper selbst aufgestellt. Weiterhin werden Unterschiede im Hinblick auf die Art der Nachführung gemacht.

Als starr wird ein Nachführungssystem bezeichnet, bei dem das Werkzeug bzw. der Werkzeugträger quer zur Fahrtrichtung gegen eine Seitenführungskraft bewegt wird, um auf die geforderte Sollrichtung zu kommen. Es ist deshalb beim Stillstand des Fahrzeuges unmöglich, eine solche Querbewegung auszuführen. Im Gegensatz hierzu steht die sogenannte Schleppkurvennachführung, die dadurch gekennzeichnet ist, daß sich das Werkzeug auf einer Schleppkurve seinem vorgeschriebenen Ziel nähert. Hierbei wird die seitliche Nachführungsbewegung nicht unmittelbar dem Werkzeug aufgezwungen, sondern einem oder mehreren Führungspunkten am Werkzeugträger bzw. an Getriebegliedern, die mit dem Werkzeugträger in gelenkiger Verbindung stehen. Die Steuerbewegungen können hierbei im allgemeinen nahezu und unter besonderen Voraussetzungen vollkommen kräftefrei ausgeführt werden.

Starre Nachführung am Aufsattelgerät

Bild 1 zeigt sieben verschiedene Nachführungseinrichtungen, bei denen eine starre Nachführung erfolgt und als Bezugssystem ein vom Schlepper gezogener Aufsattel-Einachsanhänger gilt. Bei allen in der Systematik aufgeführten Systemen wird der Taster A mit einem nach rückwärts weisenden Pfeil und das Werkzeug B mit einem nach vorwärts weisenden Keil gekennzeichnet.

Bei dem System A1 ist der Taster A in einer Führung quer zur Fahrtrichtung verschiebbar angeordnet und in der gleichen Weise in einer bestimmten Entfernung dahinter auch das Werkzeug B. Steht also der Taster A auf dem neuen Ziel und befindet sich das Werkzeug B noch seitlich verschoben in der alten Arbeitsstellung, so ist durch die seitliche Differenz zwischen den Punkten A und B ohne jede Umrechnung unmittelbar der seitlich auszusteuende Betrag gegeben.

Im System A2 ist das Werkzeug ebenfalls in einer Gleitführung seitlich verschiebbar, während der Taster um einen Gelenkpunkt,

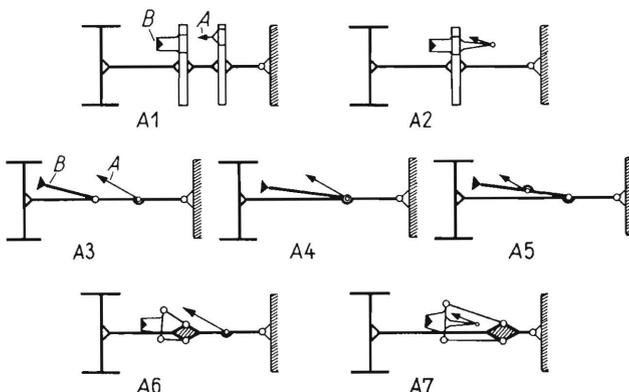


Bild 1. Nachführungssysteme (A), bei denen ein Werkzeug B relativ zu einem Taster A gesteuert wird. Das Werkzeug wird unmittelbar in Querrichtung (starr) nachgeführt. Ein vom Schlepper gezogener Aufsattel-Einachsanhänger, der das Werkzeug trägt, gilt als Bezugssystem.

der am Gleitschieber des Werkzeuges sitzt, schwenkbar angeordnet ist. Bei den Systemen A3, A4 und A5 sind sowohl der Taster A als auch das Werkzeug B um je einen Gelenkpunkt schwenkbar angeordnet. Diese beiden Gelenkpunkte können getrennt (A3) oder zusammenfallend als Doppelgelenk (A4) im Aufsattelgerät angeordnet werden; der Taster kann sich aber auch um einen Punkt auf dem Werkzeugträger drehen (A5).

Die Ausführungen A6 und A7 sind durch die Verwendung eines Gelenkviereckes gekennzeichnet, von dem zwei Gelenkpunkte am Fahrgestell des Aufsattelgerätes sitzen und die beiden anderen Gelenkpunkte den Werkzeugträger als Koppel führen. Der Taster kann unabhängig von dem Gelenksystem des Werkzeuges um einen Punkt der Ebene des Aufsattelgerätes drehen (A6) oder auch um einen Gelenkpunkt, der sich auf der Werkzeugkoppel befindet (A7).

Schleppkurvennachführung am Aufsattelgerät

Auch bei den Nachführungssystemen nach **Bild 2** wird das Aufsattelgerät als Bezugssystem verwendet. Bei allen zwölf Vorrichtungen bewegt sich das Werkzeug aber auf Schleppkurven, deren Verlauf durch die Art der Kopplung des Werkzeuges mit anderen Getriebegliedern und durch die Abmessungen aller dieser Getriebeglieder bedingt ist. Die Ausführung B1 hat ähnlich wie A1 zwei quer zur Fahrtrichtung angeordnete Schieber, in deren einer sich der Taster bewegen kann. In der dahinter liegenden Gleitführung bewegt sich hier aber ein Schieber mit einem Gelenkpunkt für den Werkzeugträger. Im Gerät B2 sind Taster und Werkzeugträger in einem Doppelgelenk eines quer beweglichen Schiebers gelagert. Bei einer weiteren, nicht gezeichneten Form könnte ebenso wie bei den Vorrichtungen von Bild 1 der Werkzeugträger bzw. sein Führungsschieber quer verschiebbar sein und der Taster sich um ein Gelenk in der Ebene des Aufsattelgerätes drehen.

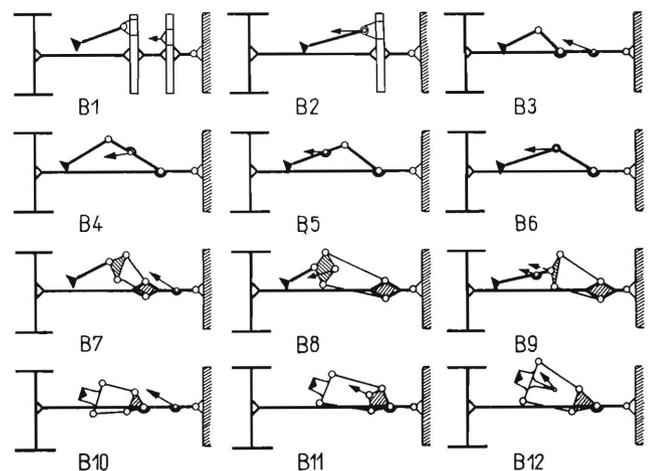


Bild 2. Nachführungssysteme (B), bei denen das Werkzeug sich auf Schleppkurven bewegt. Ein reeller oder ideeller Führungspunkt des Werkzeuges wird quer zur Fahrtrichtung bewegt. Der Einachsanhänger gilt als Bezugssystem.

Eine weitere Gruppe bilden in Bild 2 die Vorrichtungen B3, B4, B5 und B6, bei denen der Werkzeugträger gelenkig mit einem Steuerhebel verbunden ist, der sich um ein Gelenk in der Ebene des Aufsattelgerätes dreht. Die Unterschiede der genannten vier Ausführungen bestehen in der gelenkigen Anordnung des Tasters, der entweder in der Fahrgestellebene (B3), auf dem Steuerhebel (B4), auf dem Werkzeugträger (B5) oder in dem Gelenk zwischen Steuerhebel und Werkzeugträger angelinkt werden kann (B6). Dazu käme noch eine nicht gezeichnete Anlenkung in dem Gelenk zwischen Steuerhebel und Aufsattelgerät.

Die Vorrichtungen B7, B8 und B9 bilden wieder eine gesonderte Gruppe insofern, als der Werkzeugträger ein einfacher Hebel ist, der in der Koppel eines Gelenkviereckes gelagert wird. Zwei Gelenkpunkte des Gelenkviereckes sind Steggelenke, d. h., sie befinden sich auf dem Fahrgestell. Zum Zwecke der Werkzeugsteuerung wird eine Kurbel dieses Gelenkviereckes ver-

schwenkt, wobei der Koppelpunkt als Anlenkpunkt für den Werkzeugträger eine bestimmte Koppelkurve beschreibt, die die Schleppkurve des Werkzeuges bestimmt. Der Taster kann bei diesen drei Ausführungen ebenfalls wieder, wie aus den Zeichnungen zu erkennen ist, auf verschiedenartige Weise angeordnet werden.

Die Vorrichtungen B10, B11 und B12 zeigen die Befestigung des Werkzeuges auf der Koppel eines Gelenkviereckes. Die beiden der Koppel gegenüberliegenden Gelenkpunkte des Gelenkviereckes sind hier aber nicht unmittelbar mit dem Fahrgestell des Aufsattelgerätes gelenkig verbunden, sondern mit einem zusätzlichen Winkelhebel, der dann in gelenkiger Verbindung mit dem Fahrgestell des Aufsattelgerätes steht und infolge seiner Schwenkmöglichkeit als Steuerhebel dient. Seine Verschwenkungen und die Abmessungen des Gelenkviereckes, sowie die Lage des Werkzeuges auf der Koppel des Gelenkviereckes bestimmen die Form der Schleppkurven des Werkzeuges. Auch hier sind wieder verschiedene gelenkige Verbindungen des Tasters angegeben.

Als besondere Variationsmöglichkeit aller Vorrichtungen B1 bis B12 muß noch hervorgehoben werden, daß die Steuerimpulse, d. h. die Antriebsbewegungen für das Steuersystem, nicht unbedingt zwischen dem Fahrgestell und dem Steuerhebel wirken müssen. Sie können vielmehr zwischen ganz beliebigen Gliedern eingeleitet werden, z. B. bei den Ausführungen B4, B5 und B6 zwischen dem Steuerhebel und dem Werkzeugträger. Hierfür gelten andere mathematische und kinematische Beziehungen, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

Mittelbare Radlenkungen gezogener Geräte

In der folgenden Gruppe von Nachführungsvorrichtungen für Bodenbearbeitungswerkzeuge werden mittelbare Radlenkungssysteme behandelt. Als mittelbar sollen solche Systeme bezeichnet werden, bei denen das Werkzeug, bzw. das mit dem Werkzeug fest verbundene Glied, seine Seitenbewegung durch andere mit ihm gelenkig verbundene Teile des Nachführungssystems erfährt. Die Systeme in **Bild 3** benutzen die Führung einer zweirädrigen Karre oder, auch von Einzelrädern zur Durchführung der Arbeitsbewegung des Werkzeuges. Da hier alle hinter dem Schlepper laufenden Teile seitliche Bewegungen ausführen, ist es notwendig, den Schlepper als Bezugssystem für die Bewegungen anzusehen.

Bei den Vorrichtungen C1 und C2 ist das das Werkzeug tragende Fahrgestell in einem einfachen Gelenk mit dem Schlepper fest verbunden. Relativ zu der Fahrgestellebene wird die Radachse der zweirädrigen Aufsattelkarre verschwenkt (C1), wobei das so entstandene System als Drehschemellenkung bezeichnet wird. Im Gegensatz hierzu erfolgt bei einem Achsschenkellenkungssystem (C2) eine Verschwenkung der beiden Einzelräder relativ zur Fahrgestell- bzw. Werkzeugebene. Diese zur Steuerung dienenden Drehbewegungen der beiden Räder müssen, wie dies bei Achsschenkellenkungen notwendig ist, durch ein besonderes, in **Bild C2** nicht eingezeichnetes Gelenksystem zwangsläufig erfolgen. Es ist bekannt, daß sowohl bei der Drehschemel- als auch bei der Achsschenkellenkung beide Räder durch ein einziges in der Mitte der Achse gelagertes Rad ersetzt werden können, ohne daß an den Bewegungen des Fahrzeuges grundsätzlich etwas geändert wird. Das in den Bildern C1 und C2 gestrichelt gezeichnete Mittenrad als Ersatz für die beiden Außenräder führt bei beiden Ausführungen zu dem gleichen System eines Aufsattelgerätes mit einem Einzelrad. Solche Vorrichtungen sind für den praktischen Gebrauch durchaus denkbar und auch schon ausgeführt worden; es muß hier nur durch entsprechende gelenkige Verbindungen zwischen Schlepper und Aufsattelgerät für eine Stabilität des Fahrzeuges in der Horizontalebene gesorgt werden.

Als Sonderfall einer Nachführung durch Radlenkung kann das System nach **Bild C3** angesehen werden, bei dem das Werkzeug samt zwei Seitenführungsscheiben relativ zu seinem Tragarm verschwenkt werden kann und damit eine entsprechende seitliche Bewegung durchführt. Das Werkzeug mit dem Trägerglied ist hier auf einem hinter dem Schlepper laufenden Einachsanhänger aufmontiert.

Die Systeme C4, C5 und C6 zeigen die möglichen Variationen für Koppelbewegungen in Gelenkvierecken anstelle einfacher Relativdrehungen. Bei dem System C4 ist das Werkzeug mit einem am Schlepper einfach angelenkten Tragarm fest verbunden, der zwei Steggelenke für ein Gelenkviereck aufweist. Die Koppel dieses Gelenkviereckes ist mit der gemeinsamen Achse zweier Räder fest verbunden. Die Steuerbewegung erfolgt zwischen dem Werkzeugträger und einem der beiden Lenker des Gelenkviereckes. Bei einer Ausschwenkbewegung werden die Räder gezwungen, auf bestimmten Bahnen zu laufen, wodurch in einem bestimmten Übersetzungsverhältnis eine seitliche Bewegung des Werkzeuges stattfindet. Im System C5 ist das Werkzeug mit der Koppel eines Gelenkviereckes fest verbunden. Dieses Gelenkviereck hat seine beiden Steggelenke am Schlepper. In der als Werkzeugträger dienenden Koppel des Gelenkviereckes ist ein weiterer Gelenkpunkt vorgesehen, um den die Radachse mit den beiden Rädern verschwenkt werden kann. Diese Schwenkbewegung ist die Steuerbewegung des Systems, die wiederum in einem bestimmten Übersetzungsverhältnis eine Seitenbewegung des Werkzeuges erzwingt. Eine Kombination der beiden Systeme C4 und C5 ist im System C6 insofern verkörpert, als das Werk-

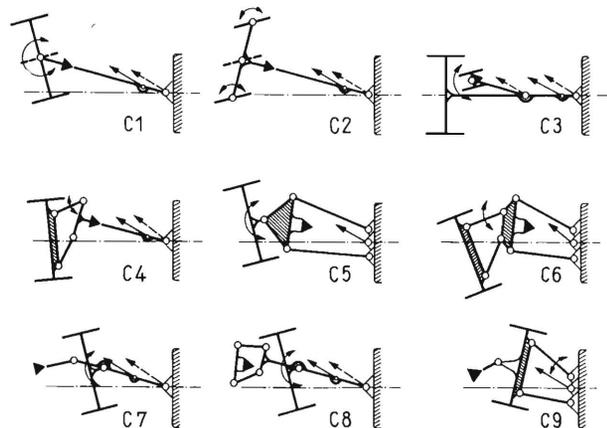


Bild 3. Nachführungssysteme (C) sind mittelbare Radlenkungssysteme, bei denen das auf dem Einachsanhänger befestigte Werkzeug durch Verdrehung der Räder oder Radachsen Querbewegungen ausführt. Hier gilt der Schlepper als Bezugssystem.

zeug wie im System C5 an der Koppel eines Gelenkviereckes sitzt und die Radachse mit ihren beiden Rädern fest mit der Koppel eines zweiten Gelenkviereckes entsprechend dem System C4 verbunden ist. Die Stegpunkte dieses zweiten Gelenkviereckes sitzen in der Koppelenebene des ersten Gelenkviereckes. Die Steuerbewegung erfolgt wie im System C4 durch eine Verschwenkung einer der Kurbeln des der Radbewegung dienenden Gelenkviereckes, und das Werkzeug wird wiederum durch die Bewegungen der Räder gezwungen, eine Seitenbewegung auszuführen, die von sämtlichen Abmessungen des Systems abhängt.

Die Nachführungssysteme C1 bis C6 sind starr im Sinne der Erläuterungen zu **Bild 1**. Dem Werkzeug werden seitliche Bewegungen gegen den Seitenführungswiderstand aufgezwungen. Im Gegensatz hierzu stehen die Systeme C7, C8 und C9, bei denen sich das Werkzeug entsprechend den Erläuterungen zu **Bild 2** auf Schleppkurven bewegt, wobei eine nahezu kräftefreie Nachführung erzielt werden kann.

Die Vorrichtung in **Bild C7** besteht aus einem Schwenkarm, der in einem Gelenk mit dem Schlepper verbunden ist und außerdem noch in gelenkiger Verbindung mit der Radachse und mit dem Werkzeugträger steht. Die Steuerbewegung erfolgt zwischen Radachse und diesem Schwenkarm. Der Anlenkpunkt für den Werkzeugträger wird durch diese Steuerbewegung seitlich ausgelenkt, und das Werkzeug wird gezwungen, auf einer der Steuerbewegungen und den Abmessungen des Systems entsprechenden Schleppkurve nachzufolgen. Das System C8 hat die gleichen Merkmale; das Werkzeug wird hier aber als Koppel eines Gelenkviereckes nachgeführt und ist deshalb in der Lage, wesentlich schwierigere Schleppkurven zu beschreiben als bei der

einfacheren gelenkigen Anordnung. Eine weitere Variationsmöglichkeit zeigt Bild C9 insofern, als hier die Radachse und damit beide Räder fest mit der Koppel eines Gelenkviereckes verbunden sind, das seine Steggelenke am Schlepper hat. An der Radachse ist ein einfaches Gelenk angeordnet, das der Führungspunkt für die Schleppkurvenbewegung des Werkzeuges ist. Die Steuerbewegung für diese kräftefreie Nachführung erfolgt als Verschwenkung einer der beiden Kurbeln des Gelenkviereckes relativ zur Schlepperlängsachse.

Eine Ausweitung der mittelbaren Radlenkungsnachführung mit kräftefreier Steuerbewegung besteht noch in der Kombination der Systeme C8 und C9, wenn man sowohl für die Bewegung der Radachse als für die Schleppkurvenbewegung des Werkzeuges je ein Gelenkviereck vorsieht. Solche aufwendigen Ausführungen sind natürlich erst dann gerechtfertigt, wenn einfachere Vorrichtungen die gestellten Bedingungen nicht zu erfüllen vermögen. Darüber lassen sich erst nach eingehenden Untersuchungen sichere Aussagen machen, auf die im vorliegenden Rahmen jedoch nicht eingegangen werden kann. Der Vollständigkeit der Systematik halber sei aber auf die gegenwärtig noch nicht verwendeten bzw. noch nicht diskutierten vielgliedrigen Nachführungssysteme hingewiesen, die z. B. zustande kommen, wenn man anstelle der Gelenkvierecke 6- oder sogar 8-gliedrige Getriebe verwendet, bei denen wesentlich kompliziertere Koppelbewegungen erzielt werden können.

In den Systemen nach Bild 3 wurden zum Teil verschiedenartige Anordnungen des Tasters angezeigt. Seine Auslenkungen dienen auch hier zur Einleitung der Steuerbewegung. Da der Taster nach Bild 3 mit verschiedenen Getriebegliedern gelenkig verbunden sein kann, entstehen in jedem einzelnen Falle andere Beziehungen zwischen der Tasterbewegung, der Steuerbewegung und schließlich auch der Werkzeugbewegung. Die Untersuchung aller dieser Abhängigkeiten muß für jeden einzelnen Fall in Abhängigkeit von den Abmessungen des Systems durchgeführt werden.

Unmittelbare Radlenkungen gezogener Geräte

Die unmittelbare Radlenkungsnachführung eines Werkzeuges ist dadurch gekennzeichnet, daß das Werkzeug unmittelbar mit der Radachse verbunden ist. Systeme dieser Art sind in Bild 4 dargestellt. Die Vorrichtung D1 besteht aus einem mit dem Schlepper in einem einfachen Gelenk verbundenen Zwischenglied,

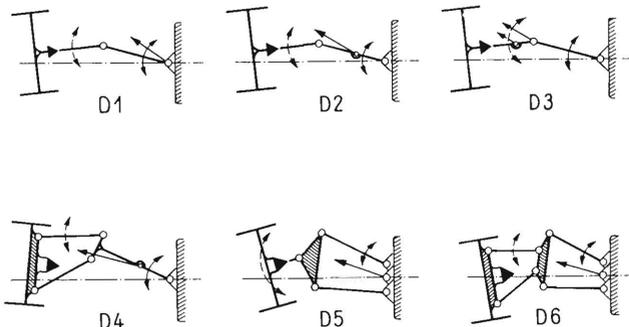


Bild 4. Nachführungssysteme (D), bei denen das Werkzeug unmittelbar mit der Radachse verbunden ist. Ein reeller oder ideeller Führungspunkt des Einachsanhängers wird in Querrichtung bewegt. Das Werkzeug wandert auf Schleppkurven. Der Schlepper gilt als Bezugssystem.

das an seinem anderen Ende ein zweites Drehgelenk hat, in dem das eigentliche Fahrgestell als Werkzeugträger angelenkt ist. Verschwenkt man nun das mit dem Schlepper gelenkig verbundene Zwischenglied, so wird das Werkzeug gezwungen, auf Schleppkurven nachzulaufen. Man kann aber auch eine Relativbewegung zwischen dem am Schlepper angelenkten Zwischenglied und dem Fahrgestell als Werkzeugträger vorsehen und kommt dadurch zu einer zweiten Möglichkeit der Steuerbewegung. Eine grundsätzliche Klärung wäre erwünscht, wie weit eine Kombination dieser beiden Steuerbewegungen eine Verbesserung der Nachführung bedeutet. Die Unterschiede zwischen den Systemen D1,

D2 und D3 bestehen in der Anordnung des Tasters, der sowohl am Schlepper, am Zwischenglied oder auch am eigentlichen Werkzeugglied angelenkt werden kann.

Die Vorrichtungen D4, D5 und D6 weisen als besondere Merkmale wiederum den Ersatz einfacher Getriebeglieder durch Gelenkvierecke auf. Das System D4 hat als Werkzeugträger die Koppel eines Gelenkviereckes, die zugleich auch die Radachse ist. Dieser Werkzeugträger macht gegenüber dem einfachen, mit dem Schlepper gelenkig verbundenen Zwischenglied eine Koppelbewegung. Man kann auch wie bei der Vorrichtung D5 das mit dem Schlepper gekoppelte Zwischenglied durch ein Gelenkviereck ersetzen und den Werkzeugträger als Einachsanhänger in einem Koppelpunkt der Koppel dieses Gelenkviereckes anlenken. Die Anforderungen an ein Nachführungssystem können noch mehr gesteigert werden, wenn man, wie bei der Vorrichtung D6, zwei Gelenkvierecke verwendet, wobei das erste das Zwischenglied der anderen Ausführungen und das zweite das einfache Werkzeugträgerglied ersetzen. Bei den Vorrichtungen D4, D5 und D6 können zwei verschiedene Steuerbewegungen, wie kreisförmige Richtungspeile anzeigen, eingeleitet werden.

Alle Vorrichtungen in Bild 4 können, da die Werkzeuge Schleppkurven beschreiben, als kräftefreie Nachführungssysteme bezeichnet werden. Über die durch die Koppelbewegung in Gelenkvierecken entstehenden Schleppkurven gibt es bisher nur spärliche Unterlagen; es wird notwendig sein, solche zu schaffen, um über die Möglichkeiten des Gelenkviereckes bei der Verwendung von Nachführungssystemen einen Überblick zu gewinnen.

Schleppkurvennachführungen am Schlepper

Bei den Nachführungen in Bild 5 werden unmittelbare Schleppkurvensysteme behandelt, bei denen der Schlepper als Bezugssystem gilt, bei denen also angenommen wird, daß der Schlepper sich auf einer geraden Bahn bewegt. Die Schlepp-

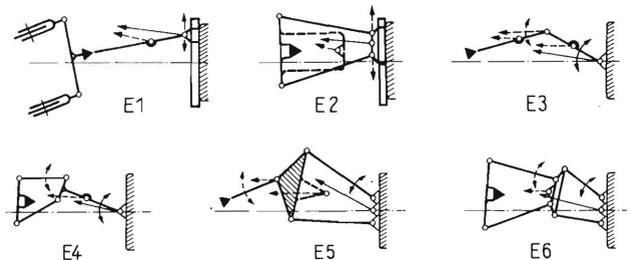


Bild 5. Nachführungssysteme (E); das Werkzeug wandert auf Schleppkurven, die unmittelbar vom Werkzeug abhängig sind. Es wird von einem Anhänger mit Nachlaufrädern getragen oder wird auf andere Weise in vertikaler Richtung gegen den Boden abgestützt. Der Schlepper gilt als Bezugssystem.

kurven der bereits erwähnten Vorrichtungen in Bild 3 und 4 sind, soweit man annimmt, daß die Seitenführungskräfte der Räder ausreichen, durch die Schleppkurven der Räder bestimmt, d. h., die Werkzeugbewegungen liegen damit eindeutig fest. Im Gegensatz hierzu sind bei den Vorrichtungen E1 bis E6 in Bild 5 die Schleppkurven unmittelbar vom Werkzeug selbst abhängig; es gibt hier also keine Seitenführung durch die Räder, die zu anderen Schleppkurven führt als bei Systemen ohne eine solche Seitenführungskraft durch Räder.

In Bild E1 sind zwei Tragräder angegeben, die lediglich zur Aufnahme des Eigengewichts dienen und die Bewegungen des gesamten Systems nicht beeinflussen können. Durch ihre gelenkige Verbindung mit dem Werkzeugträger müssen sie als Schleppräder alle seitlichen Bewegungen des Werkzeuges mitmachen. Solche Tragräder können in allen anderen Systemen von Bild 5 vorgesehen werden; sie sind aber der Einfachheit wegen weggelassen worden.

Der Werkzeugträger des Systems E1 ist mit einem an der Schlepperrückfront quer beweglichen Schieber gelenkig verbunden. Erfolgt also eine seitliche Verschiebung dieses Gleitstückes, so wird der Werkzeugträger auf der vom Werkzeug bestimmten Schleppkurve nachgeführt. Auf die hierbei notwendigen Übersteuerungen, d. h. auf die Überwege des Gleitschiebers über die

Sollpunkte des Werkzeuges hinweg, wird im zweiten Teil dieses Aufsatzes näher eingegangen. Beim System E2 ist wieder an der Rückfront des Schleppers ein seitenbeweglicher Schieber vorgesehen, der aber zwei Gelenkpunkte zur Anlenkung eines Gelenkviereckes aufweist. Mit der Koppel des Gelenkviereckes ist das Werkzeug fest verbunden, dessen Bewegungen hier Schleppkurven in einem Gelenkviereck sind.

Bei dem System E3 ist an der Rückfront des Schleppers ein einfach angelenkter Steuerhebel vorgesehen, dessen Länge und seitliches Ausschwenken die Schleppkurven des mit ihm gelenkig verbundenen Werkzeugträgers bestimmen. Die Steuerbewegung kann hier auch, wie bei den Systemen in Bild 4, durch eine Winkelbewegung zwischen Führungshebel und Werkzeugträger bewirkt werden.

Für die Nachführungsvorrichtungen E4, E5 und E6 in Bild 5 gelten ähnliche Betrachtungen wie für die Systeme D4, D5 und D6 in Bild 4. In beiden Fällen wurden einfache Drehbewegungen von Hebeln durch Bewegungen der Koppel in Gelenkvierecken ersetzt. Der Unterschied besteht darin, daß bei den D-Ausführungen die Schleppkurven durch die Räder und bei den E-Ausführungen die Schleppkurven durch das Werkzeug selbst bewirkt werden.

Bei allen Vorrichtungen in Bild 5 sind wiederum einige Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Tasteranordnung zu erkennen, wobei auch hier durch die Verschiedenartigkeit der Anlenkung ein jeweils anderes Verhältnis zwischen der Größe der seitlichen Bewegung des Tasters und der der Nachführung des Werkzeuges ermöglicht wird.

Schlepper und Werkzeug als gesteuertes System

Zu den Nachführungssystemen gehören auch solche Vorrichtungen, bei denen der Schlepper selbst mit seiner Lenkung als steuernder Teil der Nachführung betrachtet wird. Die einfachste Anordnung ist darin zu sehen, daß man das Werkzeug an irgendeinem Punkt des Schlepperfahrgerüstes starr anordnet und den Schlepper auf Bahnen bewegt, die das Werkzeug von einer Iststellung in eine vorgeschriebene Sollstellung gelangen lassen. Hierbei kann der Taster an einem beliebigen anderen Punkt des Fahrgerüstes angelenkt werden. Es gibt hier also nur ein einziges Bezugssystem, das entweder mit Vorderradlenkung oder, wenn der Schlepper z. B. rückwärts fährt, mit Hinterradlenkung bestimmte Bewegungen ausführt, von denen Punktbahnen auszusuchen sind, die sich am besten zur Bewegung des Werkzeuges und des Tasters eignen. Es ist klar, daß die Möglichkeiten dieses einen starren Bezugssystemes begrenzt sind.

Das Nachführungssystem F1 in Bild 6 zeigt einen normalen Schlepper mit Vorderradlenkung, an dessen Rückseite der Werkzeugträger und der Taster in einem Gelenk angeordnet sind. Da sich das Werkzeug als kräftefreies System auf Schleppkurven bewegt, muß der Gelenkpunkt Bahnen beschreiben, die als Führungskurven der verlangten Schleppkurve geeignet sind. Bei den Systemen F2 und F3 ist der gemeinsame Gelenkpunkt für Taster und Werkzeug in die Mitte der Vorderachse bzw. vor die Vorderachse gelegt worden. Durch die Vorverlegung dieses Gelenkes sind bei gleichen Schlepperbewegungen die seitlichen Auslenkungen größer, und damit wird es leichter, eine für das Werkzeug vorgeschriebene Schleppkurve zu erzeugen. Am geringsten sind die seitlichen Auslenkungen der Schlepperpunkte, wenn diese auf der un gelenkten Hinterachse liegen; sie werden wieder größer, wenn sie ihre Lage hinter der Hinterachse haben. Im letzteren Falle muß allerdings berücksichtigt werden, daß die Auslenkungen der Schleppervorderräder im umgekehrten Sinne zu erfolgen haben als die Auslenkungen der hinter der Hinterachse liegenden Punkte.

Bei den Systemen F4 und F5 werden die einfachen Schwenkbewegungen des am Schlepper befestigten Werkzeugträgers durch Koppelbewegungen in einem Gelenkviereck ersetzt. Bei den Ausführungen F4 und F5 wird auf eine neuartige Möglichkeit der Werkzeugführung bzw. der Fahrstellführung hingewiesen. Man erhält nämlich eine „geschobene“ Vorrichtung, wenn man dafür sorgt, daß der ideelle Führungspunkt eines Gelenkviereckes als Schnittpunkt der beiden Lenker vor dem

Werkzeug bzw. vor der Radachse liegt [5]. Unter solchen Voraussetzungen ist eine stabile Führung möglich, die einer Anlenkung entspricht, bei der augenblicklich ein reelles Gelenk mit dem ideellen Führungspunkt zusammenfällt. Die Anordnungen F4 und F5 unterscheiden sich durch die Lage der gelenkten Räder. Im ersten Falle liegt ein normaler Schlepper mit Vorderradlenkung vor, bei dem das mit Hilfe eines Gelenkviereckes „geschobene“ Werkzeug stabil vor dem Schlepper geführt wird. Bei der Anordnung F5 ist eine Hinterradlenkung vorgesehen bzw. ein normaler Schlepper wird als rückwärts fahrendes Fahrzeug verwendet, und das Werkzeug befindet sich auf der Koppel eines Gelenkviereckes vor der nunmehr starren Vorderachse des Fahrzeuges.

Das System F6 stellt die Kombination eines normalen Schleppers mit einem auf Schleppkurven nachlaufenden Werkzeug dar, wobei die Steuerausschläge der Achsschenkel der Vorderradlenkung über ein Zwischenglied auf ein (schraffiert gezeichnetes) weiteres Glied übertragen werden. Auf diesem Glied ist der Führungspunkt für den Werkzeugträger. Die Bewegungen dieses Führungspunktes bestimmen die Schleppkurven des Werkzeuges und damit seine Übergangsbewegung von einer Sollstellung in eine Iststellung.

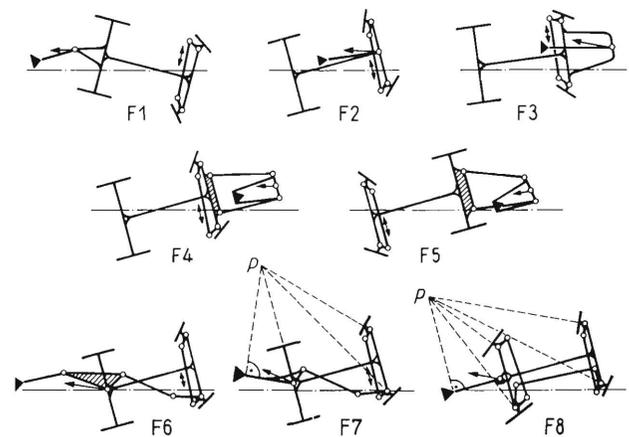


Bild 6. Nachführungssysteme (F), bei denen der Schlepper selbst mit seiner Lenkung zum steuernden Teil der Nachführung gehört.

Der Werkzeugträger kann unter Vermeidung eines besonderen (schraffiert gezeichneten) Führungsgliedes unmittelbar an dem von der Achsschenkellenkung bewegten Glied befestigt werden, und es entsteht die Vorrichtung F7. Der Schlepper dreht augenblicklich um seinen Pol P und das Werkzeug bewegt sich auf kräftefreien Schleppkurven, wenn die Längsachse des Werkzeugträgers, wie in F7 dargestellt, senkrecht auf dem Polstrahl steht. Voraussetzung ist hier also, daß dies für alle Steuerausschläge zutrifft. Allerdings ist diese kräftefreie Bewegung nicht möglich, wenn die Verschwenkung der Achsschenkellenkung im Stillstand des Fahrzeuges geschieht. Bei der Fahrt des Schleppers muß außerdem eine stetige Lenkbewegung vorausgesetzt werden, damit das Werkzeug ohne Seitenkräfte in einer stetigen Bahn nachfolgt.

Das Werkzeug kann auch zur Erzielung einer kräftefreien Nachführung starr am Schlepper befestigt werden. Am einfachsten ist es, beim normalen Schlepper mit Vorderradantrieb das Werkzeug auf der Hinterachse zu befestigen. Sitzt es aber z. B. hinter der Hinterachse, so kann seine kräftefreie seitliche Nachführung durch eine Vierradlenkung ermöglicht werden. Bei einer durch Achsschenkel bewegten Vierradlenkung muß zum Zwecke des einwandfreien Rollens aller vier Räder dafür gesorgt werden, daß die Achsen dieser Räder sich jeweils in einem Punkt P, dem augenblicklichen Pol des gesamten Schleppersystems, schneiden (F8). Liegt nun das fest mit der Schlepperfahrgerüstebene verbundene Werkzeug so, daß seine Verbindungslinie zu diesem augenblicklichen Drehpunkt mit der Schlepperlängsachse einen rechten Winkel bildet, dann ist eine kräftefreie Bewegung des Werkzeuges im Boden gewährleistet. Dies wird von besonderer Wichtigkeit, wenn anstelle eines Einzelwerkzeuges eine quer zur

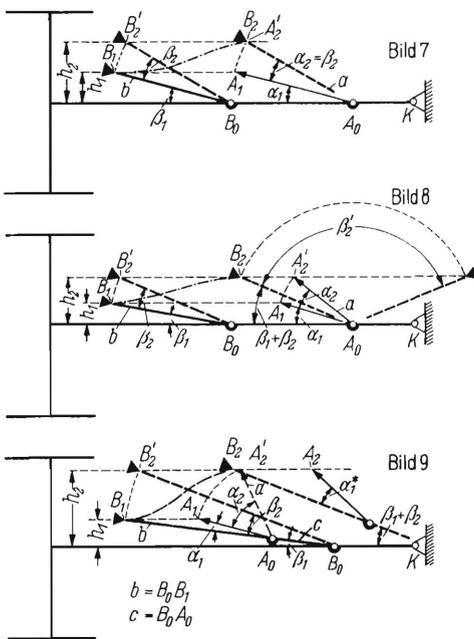
Fahrtrichtung angeordnete Werkzeugreihe aus mehreren Einzelwerkzeugen vorhanden ist und wenn die Verbindungslinie aller dieser Werkzeuge ebenfalls wieder durch den augenblicklichen Drehpunkt des Schleppers geht. Diese Ausführung war bereits beim Alpenlandschlepper [6] verwirklicht.

Kinematik von Nachführungsvorrichtungen

Die Kinematik von Nachführungsvorrichtungen muß sich damit befassen, die Gesetzmäßigkeiten zur Erfüllung der geforderten Nachführung des Werkzeuges aufzuzeigen und danach die Abmessungen der zur Nachführung notwendigen Teile und Zwischengetriebe zu bestimmen. Für die praktischen Bedürfnisse fordert man eine mathematisch genaue Nachführung meist gar nicht und läßt bei den Seitenbewegungen des Werkzeuges gewisse Toleranzen zu. Im allgemeinen sind Vorrichtungen und Getriebe um so weniger aufwendig und damit um so billiger, je größere Abweichungen bei ihren Bewegungen in Kauf genommen werden können. Aus diesem Grunde ist es notwendig, die Getriebe bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit zu untersuchen und vor allen Dingen ihre Grenzen in Abhängigkeit von ihrer Gliederzahl und damit dem zu treibenden Aufwand zu finden.

Mathematische Beziehungen bei starrer Nachführung

Zunächst sollen die einfachsten Systeme nach Bild 1, d. h. die sogenannten starren Nachführungen mit dem Aufsattelgerät als Bezugssystem, untersucht werden. Die Vorrichtung A3 nach Bild 1 ist in **Bild 7 und 8** mit zwei verschiedenen Abmessungen wiedergegeben. Die Ausführung in Bild 7 hat einen Werkzeugträger mit der Länge b und einen Taster mit der Länge a , wobei



Bilder 7 bis 9. Mathematische Beziehungen zwischen den Winkelbewegungen von Taster und Werkzeug bei starrer Nachführung. Bei diesen Systemen (A) gilt der Einachsanhänger als Bezugssystem.

$a = b$ ist. Nun sei angenommen, daß das Aufsattelgerät mit seinem am Schlepper befindlichen Kupplungspunkt K geradeaus fährt und damit als Bezugssystem für sämtliche Steuerbewegungen gilt. Das Werkzeug befindet sich in seiner durch die Lage der eben bearbeiteten Pflanze bedingten Stellung $B_0 B_1$ und schließt mit der Längsachse des Bezugssystems den Winkel β_1 ein. Um diese eben bearbeitete Pflanze abzutasten, befand sich der Taster in der entsprechenden Lage $A_0 A_1$ und schloß mit der Geräte-trägerlängsachse den Winkel α_1 ein. Er hat aber nunmehr die neue Pflanze abgetastet und deshalb eine neue Stellung $A_0 A_2$ eingenommen, die mit der ersten Stellung den Winkel α_2 einschließt. Dieser Winkel ist damit die Steuergröße für die vom Werkzeug durchzuführende Seitenbewegung, und es ist sofort

einzu sehen, daß bei der Gleichheit der Länge von Werkzeugträger und Taster der Winkel β_2 des Werkzeugträgers mit dem Winkel α_2 des Tasters übereinstimmen muß. Diese trifft für jede beliebige Anfangsseitenlage h_1 und für jede beliebige Zwischenseitenlage h_2 zu. Die Entfernung zwischen den Lagerpunkten A_0 und B_0 hat für diese Seitensteuerbewegungen keinen Einfluß; sie richtet sich bei einer Punktnachführung nach dem Abstand dieser beiden anzusteuern den Punkte in Fahrtrichtung.

Die Steuerverhältnisse bleiben nicht so einfach, wenn, wie bei der Vorrichtung in Bild 8 dargestellt, die Werkzeuglänge b nicht mit der Tasterlänge a übereinstimmt. Auch hier soll die Anfangslage von Werkzeug und Taster wieder durch die gleiche seitliche Auslenkung h_1 gekennzeichnet sein, wobei aber wegen der unterschiedlichen Länge von a und b verschiedene große Anfangswinkel β_1 und α_1 auftreten. Bei einer geforderten neuen Seitenlage h_2 ist dann auch der Anzeigewinkel α_2 des Tasters unterschiedlich zum Seitenbewegungswinkel β_2 des Werkzeuges. Bei gleicher Aussteuerdifferenz $h = h_2 - h_1$ ist aber bei gleichbleibendem Verhältnis $a:b$ das Verhältnis $\alpha_2:\beta_2$ je nach der Anfangslage h_1 verschieden. Um also die notwendige Werkzeugseitenbewegung β_2 aus den Tasterstellungen $A_0 A_1$ und $A_0 A_2$ ausrechnen zu können, muß man sowohl den Anfangswinkel α_1 als auch den Steuerwinkel α_2 berücksichtigen, d. h., der Werkzeugwinkel β_2 ist eine Funktion der Tasterwinkel α_1 und α_2 :

$$\beta_2 = f(\alpha_1, \alpha_2) \dots \dots \dots (1).$$

Der Winkel β_2 kann nach den folgenden Gleichungen ausgerechnet werden:

$$\beta_2 = \arcsin A \pm \sqrt{A^2 - B} \dots \dots \dots (2),$$

$$A = \frac{a \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sqrt{1 - \left(\frac{a \sin \alpha_1}{b}\right)^2}}{b} \dots \dots \dots (3),$$

$$B = (a/b^2) [\sin^2(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin^2 \alpha_1] \dots \dots \dots (4).$$

Für den Winkel β_2 gibt es wegen des Wurzel ausdruckes in Gl. (2) zwei Lösungen, von denen jedoch die zweite mit dem Ergebnis β'_2 , wie im Bild 8 dargestellt, ohne praktische Bedeutung ist; es gilt immer derjenige Winkel β_2 , der beim Verschwenken des Werkzeuges von der Anfangslage β_1 aus zuerst erreicht wird.

Die Vorrichtung A5 in Bild 1 hat einen Taster, der um einen Punkt des Werkzeugträgers verschwenkt wird. Hat man sich entsprechend **Bild 9** auf bestimmte Hebellängen a, b und c festgelegt, so sind damit die mathematischen Zusammenhänge aufstellbar. Es muß wiederum von einer Anfangsseitenlage h_1 ausgegangen werden, die auf die Sollseitenlage h_2 auszusteuern ist. Das Werkzeug hat in der ersten Lage seine Anfangsstellung β_1 zur Längsachse des Aufsattelgerätes und der Taster seine Anfangslage α_1 zur Längsachse des Werkzeuges. Beim Abtasten des neuen, anzusteuern den Punktes hat sich der Taster von der Lage $A_0 A_1$ in die relative Lage $A_0 A_2$ verdreht und erzeugt damit eine Steuerimpulsgröße α_2 . Bei gleicher Seitenverschiebung $h = h_2 - h_1$ ist das Verhältnis des Winkels β_2 des zu verschwenkenden Werkzeuges zum Anzeigewinkel α_2 des Tasters außerdem noch abhängig von der Anfangsseitenlage h_1 und damit von dem Anfangswinkel β_1 des Werkzeuges. Die Seitenverdrehung β_2 des Werkzeuges ist damit also eine Funktion seiner Anfangslage β_1 und des Tasteranzeigewinkels α_2 :

$$\beta_2 = f(\beta_1, \alpha_2) \dots \dots \dots (5).$$

Der Winkel β_2 errechnet sich in Abhängigkeit von den konstanten Werten a, b und c nach den folgenden Gleichungen:

$$\beta_2 = \arcsin [A \pm \sqrt{A^2 - B}] \dots \dots \dots (6),$$

$$A = \frac{\cos \beta_1 [c \sin \beta_1 + a \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1)]}{b} \dots \dots (7),$$

$$B = \sin^2 \beta_1 \left[1 - \left(\frac{c}{b}\right)^2 \right] - \left[\frac{a \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1)}{b} \right]^2 - \frac{2 a c \sin \beta_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \beta_1)}{b^2} \dots \dots \dots (8),$$

$$a_1 = \arcsin \left\{ \sin \beta_1 \left[\frac{b-c}{a} \cos \beta_1 \pm \sqrt{\left(\frac{b-c}{a} \cos \beta_1 \right)^2 - 1} \right] \right\} \dots (9).$$

Die mathematischen Beziehungen sind damit komplizierter als diejenigen für die Vorrichtung nach Bild 8, und sie werden noch schwieriger, wenn man z. B. die Vorrichtungen A6 und A7 in Bild 1 mit den Koppelbewegungen im Gelenkviereck untersucht.

Kinematik von Schleppkurvennachführungen

In Bild 10 sollen einige Betrachtungen am Nachführungssystem B2 in Bild 2 angestellt werden. Im Aufsattelgerät, das als Bezugssystem gelten soll, ist ein im rechten Winkel quer zur Fahrtrichtung angeordneter Schieber vorhanden, in dem der Führungspunkt B_{01} des Werkzeugträgers quer so verschoben wird, daß bei der Vorwärtsfahrt des Aufsattelgerätes eine sinusförmige Kurve s_0 des Werkzeugführungspunktes zustande kommt. Dabei sei gefordert, daß ein Werkzeugträger von der Länge b aus seiner zur Fahrtrichtung parallelen Anfangsstellung $B_{01} B_1$ in eine durch eine Seitenbewegung h_b vorgeschriebene, ebenfalls zur Fahrtrichtung parallele Lage $B_{02} B_2$ zu bringen ist. Dabei entsteht in Abhängigkeit von der Führungskurve s_0 die Schleppkurve s des Werkzeuges B zwischen seinen Lagen B_1 und B_2 , die sowohl in der Anfangs- als auch in der Endstellung tangential in die Längsachse des Werkzeuges aus- bzw. einläuft. Das besondere Merkmal der einfachen Schleppkurve ist dadurch gekennzeichnet, daß in jeder Zwischenstellung die Verbindungsgerade zwischen dem Führungspunkt B_{03} und der geführten Werkzeugschulter B_3 immer eine Tangente an die entstehende Schleppkurve s sein muß. Um den Werkzeugträger wieder in eine zur Längsachse parallele Lage zu bringen, muß der Führungspunkt B_0 um einen Betrag u , „übersteuert“ werden. Zur Seitenbewegung h_b des Werkzeuges gehört also eine Seitenbewegung $h_b + u$ des Führungspunktes B_0 .

Nimmt man nun dieselbe Führungskurve s_0 für einen kürzeren Werkzeugträger b' an und läßt man dessen Führungspunkt wieder auf der Führungskurve s_0 so lange gleiten, bis wieder eine Parallellage $b' = B'_{02} B'_2$ erreicht ist, so muß eine Schleppkurve s' entstehen, die von der Ausgangslage $B_{01} B'_1$ tangential ausläuft und in die Endlage $B'_{02} B'_2$ tangential wieder einläuft. Wegen der kürzeren Werkzeuglänge b' gegenüber der Länge b im ersten Falle ist bei größerer seitlicher Auslenkung h_b' des Werkzeuges eine kleinere Übersteuerung u' des Führungspunktes B_0 notwendig. Außerdem ist die neue Fahrstrecke l' für die Nachführung um den Betrag Δl geringer als die Fahrstrecke l für die Werkzeuglänge b . Die Übersteuerung u ist also eine Funktion der geforderten seitlichen Werkzeugbewegung h_b , der Werkzeugträgerlänge b und schließlich der Form der Führungskurve s_0 .

Bewegungsverhältnisse in Radlenkungsnachführungen

Bei den Radlenkungsnachführungen gibt es, wie bereits in Bild 3 gezeigt wurde, zwei grundsätzlich verschiedene Ausführungsformen, nämlich die Achsschenkelenkung als Einzelradlenkung und die Drehschemellenkung als Radachsenlenkung. In den Bildern 11 bis 14 sollen grundsätzliche Betrachtungen für beide Lenkungsarten angestellt werden. Wird nach Bild 11 ein Aufsattelgerät mit Achsschenkelenkung zur Nachführung benutzt und wird dabei eine geradlinige Bezugsbewegung des Kupplungspunktes entsprechend den Punkten K_1 , K_2 und K_3 vorausgesetzt, so muß auch die Bedingung erfüllt sein, daß das geschleppte Fahrzeug mit seinen Rädern in Geradeausfahrt mit parallelen Radbahnen zur Bezugsbahn des Kupplungspunktes K bewegt werden kann. Bei diesen Bewegungen mit den Abständen a_1 und a_2 von der Bezugslinie müssen aber beide Räder parallel zueinander stehen, unabhängig davon, welchen Winkel die Längsachse des Anhängers mit der geradlinigen Vorwärtsbewegung einschließt. Die Einhaltung paralleler Lagen der Radachsen und damit auch der projizierten Radebenen kann sehr einfach mit Hilfe eines Parallelkurbelgetriebes verwirklicht werden, wie in Bild 12 gezeigt ist. Befindet sich das Fahrzeug in einer Übergangskurve, soll es also von einer Geradeausfahrttrichtung in eine dazu parallele Fahrtrichtung gebracht werden, so bleiben

wegen des Parallelkurbelgetriebes die Radachsen ebenfalls parallel. Damit ist aber niemals die Achsschenkelgeometrie erfüllt, bei der ein einwandfreies Rollen der Räder bei Kurvenfahrt nur gewährleistet ist, wenn der Schnittpunkt P der beiden Radachsen auf der Normalen n der Bewegungsbahn des Führungspunktes K liegt. Die beiden Radachsen sind aber immer, weil sie mit Hilfe eines Parallelkurbelgetriebes miteinander verbunden sind, parallel zueinander und schneiden deshalb diese Normale n in verschiedenen Punkten P_a und P_i , so daß für einen Punkt P immer die Winkelabweichungen δ_a und δ_i vorhanden sind und die Räder deshalb bei der Übergangs-, also bei Kurvenfahrt, niemals sauber abrollen können.

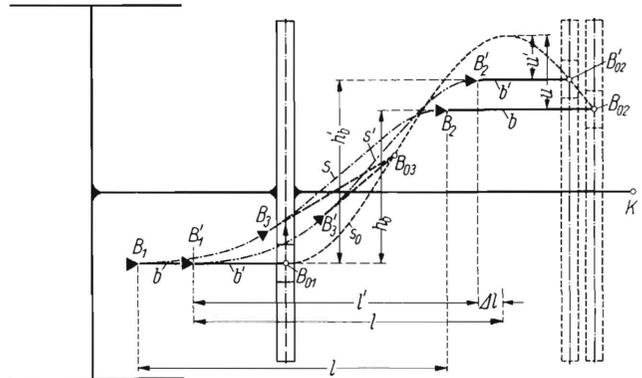
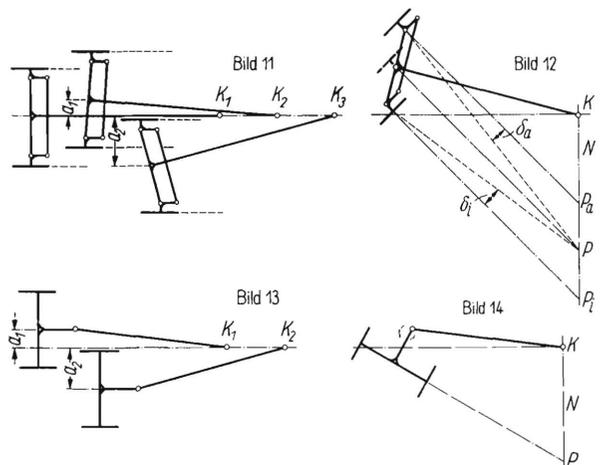


Bild 10. Nachführung eines Werkzeuges auf einfachen Schleppkurven (System B2). Querverschiebung des reellen Führungspunktes des Werkzeuges.

Geometrisch einwandfreie Verhältnisse können bei einer Drehschemellenkung nach Bild 13 und 14 erzielt werden. Bei der Geradeausfahrt mit verschiedenen Seitenlagen a_1 und a_2 ist ohne weiteres wegen der Anordnung der Räder auf einer starren Achse die parallele Lage dieser Räder gewährleistet. Die Lenkgeometrie ist aber nach Bild 14 in jeder beliebigen Stellung, also auch bei der Übergangsfahrt, dadurch erfüllt, daß es nur einen einzigen Schnittpunkt P der beiden ineinander fallenden Radachsen mit der Normalen n gibt.



Bilder 11 bis 14. Lenkgeometrie in Geradeaus- und Kurvenfahrt bei Nachführung durch Achsschenkel- und Drehschemellenkung.

Die Nachführungsverhältnisse bei der geometrisch einwandfrei arbeitenden Drehschemellenkung werden in Bild 15 gezeigt. Dabei wird angenommen, daß der Kupplungspunkt K des drehschemelgelenkten Aufsattelgerätes sich auf einer geradlinigen Bezugsbahn bewegt. Das Werkzeug B befindet sich in der Lage B_1 auf einer dieser Bezugsgerechten parallelen Bahn und soll nunmehr tangential aus dieser Bahn auf einer Übergangskurve in eine zweite parallel liegende Bahn gebracht werden, wobei in der Lage B_2 die Übergangskurve tangential in diese geradlinige Bahn einlaufen soll. In den Lagen B_1 und B_2 des Werkzeuges müssen also die beiden Räder jeweils parallel zur Bezugsgerechten rollen.

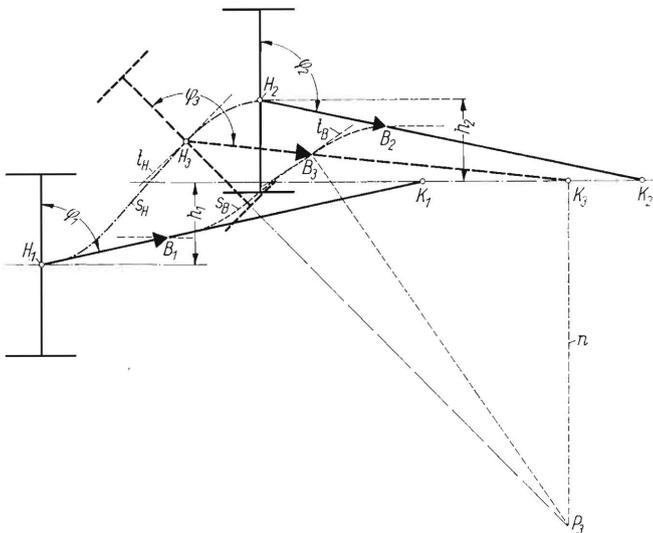


Bild 15. Nachführung eines Werkzeuges auf Schleppkurven eines durch Drehschemellenkung gesteuerten Aufsattleinachsanhängers (System C1).

$$\sphericalangle H_3 K_3 P_3 = 90^\circ$$

Dann muß sich aber auch der Mittelpunkt H der Radachse von seiner Anfangslage H_1 bis zu seiner Endlage H_2 auf einer tangential in die beiden Längsgeraden verlaufenden Kurve s_H bewegen. In jeder beliebigen Zwischenlage $K_3 H_3$ des Aufsattlerätes muß die Radachse senkrecht auf der Tangenten t_H der Bahn s_H sein. Die Radachse schneidet die Normale n der Bahn des Kupplungspunktes K im augenblicklichen Pol P_3 . Verbindet man diesen Pol mit der zugehörigen Werkzeuglage B_3 , so muß diese Verbindungslinie wiederum senkrecht auf der Tangente t_B an die Bahn s_B des Werkzeugpunktes B stehen.

Wird nun als Steuerbewegung die Änderung des Winkels φ zwischen Radachse und Längsachse KH angenommen, so erkennt man, daß dieser Winkel von seinem Anfangswert φ_1 bis zu seinem Endwert φ_2 ansteigen muß, daß aber sein Größtwert φ_3 , der im Wendepunkt der Kurve s_H eintritt, wesentlich größer als der Endwert φ_2 ist. Damit ist aber auch bei diesem System, ähnlich wie im System nach Bild 10, eine Übersteuerung notwendig, deren Größe von den Abmessungen der gesamten Nachführungsvorrichtung und vor allen Dingen von der vorgegebenen Form der Übergangskurven s_H und s_B abhängt.

Polbestimmung bei Radlenkungssystemen

Die Krümmungsmittelpunkte und die Relativpole im Radlenkungssystem sind nicht so leicht zu bestimmen wie bei der einfachen Schleppkurve, die durch Bewegung einer starren Stange entsteht. Die durch die Relativpole gekennzeichneten Bewegungsverhältnisse lassen sich aber kinematisch klären; es sollen deshalb im folgenden einige einführende Betrachtungen angestellt werden.

In **Bild 16** wird angenommen, daß der Führungspunkt K einer Stange 3 mit der Geschwindigkeit v_{41} auf einer geraden Bahn bewegt wird. In einem zweiten Punkt S der Stange 3 ist ein Rad 2 drehbar angeordnet, das relativ zur Stange 3 augenblicklich mit einer Winkelgeschwindigkeit ω_{23} gedreht wird. Zu bestimmen sind die augenblicklichen Pole 12 des Rades 2 und 13 der Stange 3. Nach den vorangegangenen Betrachtungen ist der augenblickliche Pol 12 der Radebene 2 gleichzeitig auch der Krümmungsmittelpunkt der Bahn des Punktes S, der sich also augenblicklich auf einem Kreisbogen k um 12 mit dem Halbmesser S-12 bewegt.

Vor der Lösung der gestellten Aufgabe müssen an einem äquivalenten Getriebe im **Bild 17** einige grundlegende kinematische Betrachtungen angestellt werden. Es ist ein viergliedriges Schubkurbelgetriebe mit dem Gestell 1, der Kurbel 2, der Koppel 3 und dem Gleitstein 4 dargestellt. Durch die Paarungen der vier Ziffern 1, 2, 3 und 4 gibt es in diesem Getriebe sechs Relativpole, von denen die drei Pole 12, 23 und 34 als benachbarte glieder-

verbindende Drehgelenke auftreten. Der Pol 14 als Relativpol der Bewegung des Gleitsteines 4 in seiner geradlinigen Bahn 1 liegt im Unendlichen senkrecht zur geradlinigen Bahn des Gleitsteines 4. Die restlichen Pole 24 und 13 sind sogenannte augenblickliche oder ideale Pole, die während der Bewegung des Getriebes ihre Lage dauernd ändern; sie wandern auf der sogenannten Rastpolbahn. Den Pol 13 findet man, wenn man seine beiden Einzelziffern 1 und 3 mit den Ziffern der noch übrigbleibenden Glieder paart. Genauso findet man auch den Pol 24, wenn man seine Ziffern 2 und 4 mit den Ziffern 1 und 3 der beiden übrigbleibenden Glieder paart. Es ergeben sich somit die beiden folgenden Zahlenkombinationen:

13		24	
12	23	12	14
14	34	23	34

Nach diesem Schema ergibt sich also der Pol 13 als Schnittpunkt der Geraden 12—23 mit der Geraden 14—34 und der Pol 24 als Schnittpunkt der Geraden 12—14 mit der Geraden 23—34.

In der augenblicklichen Stellung der Schubkurbel in **Bild 17** kann man nun die augenblickliche Geschwindigkeit v_{41} ins Verhältnis zur augenblicklichen Winkelgeschwindigkeit ω_{32} des Gliedes 3 relativ zum Glied 2 setzen und erhält damit als Längenmaß die sogenannte Drehschubstrecke m_R :

$$m_R = v_{41}/\omega_{32} \dots \dots \dots (10).$$

Die vertikale Zuordnung der Fußzeichenziffern in dieser Gleichung ergibt die sogenannte Kollineationsachse k_{12-34} als Verbindung der beiden reellen Pole 12 und 34 [7]. Fällt man in **Bild 17** vom reellen Pol 23, in dem also die augenblickliche Winkelgeschwindigkeit ω_{32} wirkt, das Lot auf die Wirkungslinie der Geschwindigkeit v_{41} und bringt man dieses Lot zum Schnitt R mit der Kollineationsachse k_{12-34} , so ist im Längenmaßstab mit der Strecke 23-R sofort auch die sogenannte Drehschubstrecke m_T bestimmt. Man kann aber auch eine zweite Drehschubstrecke m_T aufstellen:

$$m_T = v_{41}/\omega_{23} \dots \dots \dots (11).$$

Hier ist also anstelle der Winkelgeschwindigkeit ω_{32} des Gliedes 3 relativ zum Glied 2 die entgegengesetzt gerichtete, aber gleich große Winkelgeschwindigkeit ω_{23} des Gliedes 2 relativ zum Glied 3 eingesetzt worden. Durch die vertikale Zuordnung der Fußzeichenziffern ergibt sich eine neue Kollineationsachse k_{13-24} als die Verbindungsgerade der beiden ideellen Pole 13 und 24. Die neue Drehschubstrecke m_T ergibt sich hier als das Lot vom reellen Drehpunkt 23 auf den Geschwindigkeitsvektor v_{41} , das man bis zum Schnitt T mit der Kollineationsachse k_{13-24} zu zeichnen hat. Die Drehschubstrecke m_T muß dieselbe Länge haben wie die vorher ermittelte, entgegengesetzt gerichtete Drehschubstrecke m_R .

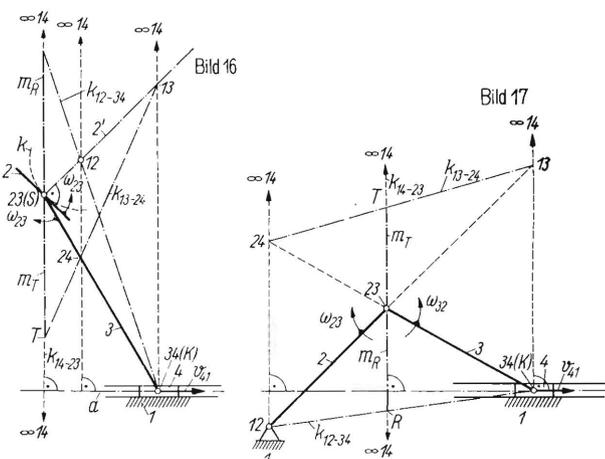
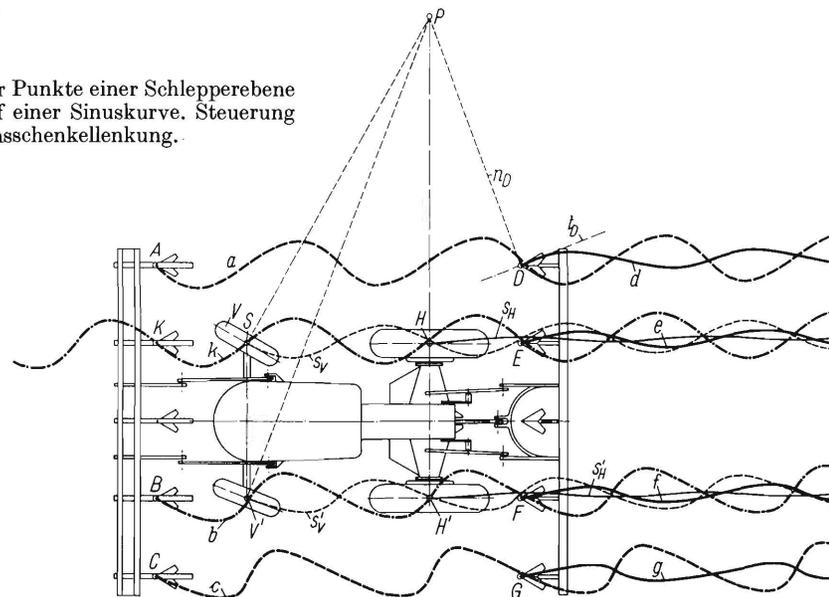


Bild 16 und 17. Polbestimmung in einem mit gegebener Achsschenkel-drehgeschwindigkeit gesteuerten Aufsattel-Einachsanhänger und in dem zugehörigen Analoggetriebe. Führung des Kupplungspunktes K auf einer Geraden.

Bild 16: Schema der Achsschenkelanordnung.
Bild 17: Schubkurbel als Analoggetriebe.

Bild 22. Bahnkurven verschiedener Punkte einer Schlepperebene bei Führung eines Punktes K auf einer Sinuskurve. Steuerung durch Vorderrad-Achsschenkelenkung.



Kennt man also die Polbahn des Poles P, so kann man die Bewegungen der gesamten Schlepperebene leicht analysieren. So ist es u. a. für die Nachführung der Werkzeugpunkte wichtig, daß die Bahnkurven, die in einer Reihe quer zur Fahrtrichtung liegen, z. B. die Kurven a und c, nicht nur zueinander phasenverschoben sind, sondern ihre Steigungen sogar zum Teil entgegengesetzt gerichtet sind. Diese Unterschiede weisen auf die zusätzlichen Schwierigkeiten bei der Nachführung von Reihenwerkzeugen hin, denen man in gewisser Annäherung damit begegnen kann, daß man die Werkzeuge für die Aussaat und für die Pflege an genau denselben Stellen der Schlepperebene anordnet und außerdem bei Aussaat- und Pflegearbeiten in denselben Schlepperspuren fährt. Dann ist die Gewähr gegeben, daß durch Nachsteuern eines Punktes alle anderen Punkte auf ihrer vorher gefahrenen Spur nachfolgen.

Die Frage nach der günstigsten Anordnung der Werkzeuge in der Schlepperebene muß in verschiedenen Richtungen gestellt werden. Zunächst wird es erwünscht sein, die Querbewegungen des Schleppers geringer zu halten als diejenigen des Werkzeuges. Dabei besteht aber die Gefahr, daß bei einer zu großen Übersetzung der Seitenbewegung die Steuerkräfte für den Schlepper zu groß werden und dieser seitlich rutscht. Weiterhin ist zu fordern, daß die Lenkbewegungen der Vorderräder gleichsinnig mit der Bewegung des Visierpunktes erfolgen. Dies trifft z. B. für den Werkzeugpunkt K, der gleichzeitig Visierpunkt ist, für die angenehme Form der Führungskurve k zu. Bei an der Rückseite des Schleppers liegenden Visierpunkten muß gegenseitig gesteuert werden. Wenn die Werkzeuge hinter dem Schlepper und der Führungspunkt vor dem Schlepper liegen, entsteht eine schwer zu erfüllende Forderung; denn die Kurven beider Punkte sollen sich mit Zeitverzögerung decken, und außerdem müssen die Schleppervorderräder mit entsprechender Übersetzung verdreht werden.

Schlußbetrachtungen

In den vorstehenden Untersuchungen wurde versucht, einige Grundlagen der Nachführungsvorrichtungen zu schaffen. Als Ergebnis stehen in einer systematischen Zusammenstellung verschiedene Vorrichtungen einzeln und in Gruppen mit unterschiedlichen Merkmalen einander gegenüber, wobei durchaus eine spätere Erweiterung dieser Systematik denkbar ist, wenn andere, neue Merkmale wichtig erscheinen.

Nach Aufstellung einer Systematik entsteht sofort die Frage nach Bewertung und Vergleich der in ihr aufgeführten Systeme. Erschöpfende Vergleiche lassen sich aber erst dann aufstellen, wenn genügend tiefe Erkenntnisse über die Wirkungsweise und über die Möglichkeiten der einzelnen Systeme bzw. auch schon ganzer Systemgruppen erarbeitet worden sind. Der Anfang hierzu wurde im zweiten Teil dieser Arbeit gemacht. Da es über die Kinematik der Nachführungsvorrichtungen bisher noch verhältnismäßig wenige Veröffentlichungen gibt, werden noch weitere Forschungsarbeiten notwendig sein.

Für bestimmte Nachführungsprobleme sind Vorrichtungen erstellbar, die in einfacher Weise arbeiten, indem der vom Taster angezeigte Sollwert nach einer gewissen Zeit selbsttätig vom Werkzeug erreicht wird. Treten aber während der Nachführung selbst noch unvorhergesehene Änderungen ein, so wird es schwierig, einem mechanisch arbeitenden System zu kurze Folgezeiten einzugeben. Deshalb müssen in solchen Fällen laufend Vergleiche zwischen Soll- und Istwerten angestellt und stetige Nachführungsbewegungen durchgeführt werden. Damit ist aber der Übergang zur Regelungstechnik vollzogen, mit deren Hilfe nach Ausnutzung aller kinematischen Möglichkeiten ein genaueres Arbeiten der landwirtschaftlichen Geräte, eine Entlastung des Bedienungspersonals und schließlich der Übergang zu höheren Arbeitsgeschwindigkeiten erreicht werden können.

Schrifttum

- [1] Hain, K.: Die zeichnerische Bestimmung der Schleppkurven. Ingenieur-Archiv **18** (1950) S. 302/09.
- [2] Müller, R.: Einführung in die Kinematik. Berlin: Springer 1932. S. 27.
- [3] Hain, K.: Schleppkurvenbestimmung mit Hilfe von Kurventafeln. Autom. techn. Z. **54** (1952) S. 248/51.
- [4] Jamieson, M. und A. R. Reece: The kinematics of rowcrop tractors. J. Agricult. Engng. Research **6** (1961) Nr. 4, S. 278/87.
- [5] Hain, K.: Die Lenkungen des Einachs-Anhängers. Landtechn. **4** (1949) S. 769/71.
- [6] Seifert, A.: Die Schlepper in Hannover und München. Landtechn. **4** (1949) S. 687/97, Abb. 3 und 4.
- [7] Hain, K.: Das Übersetzungsverhältnis in periodischen Getrieben von Landmaschinen. Landtechn. Forsch. **3** (1953) S. 97/108.