

Geometrische Spur eines Knickschleppers

Von Akira Oida, Kyoto, Japan*)

DK 631.372:629.1.014:513

Ein großer Vorteil der Knickschlepper besteht in dem sehr kleinen Wenderadius, so daß der Knickschlepper besonders dort eingesetzt wird, wo wenig Platz vorhanden ist, nämlich als Schmalspurschlepper im Gartenbau und in Obst- und Weinkulturen. Probleme treten auf, wenn Anbaugeräte verwendet werden, die ebenfalls Bodenkontakt haben und die Lenkgeometrie stören. In dieser Arbeit wird die Bewegung des Schlepperrumpfes ohne Anbaugerät beim Steuern im Stand und während der Fahrt mit Hilfe der geometrischen Analyse ermittelt.

1. Einleitung

Der in diesem Aufsatz behandelte Knickschlepper hat eine Knicklenkung, die in **Bild 1** gezeigt wird. Der Schlepperrahmen ist zwischen Vorder- und Hinterachse geteilt, und die beiden Teile sind durch ein Kreuzgelenk verbunden. Die Lenkung erfolgt mit Hilfe von Hydraulikzylindern um dieses Gelenk. Bekanntlich ist diese Bauart des Schleppers von den Erdbaumaschinen abgeleitet. In Japan gibt es bisher keine Knickschlepper. In der Bundesrepublik Deutschland werden sie hauptsächlich als Schmalspurschlepper im Obst- und Weinbau verwendet, weil sie einen kleinen Wendekreis und damit unübertroffene Wendigkeit beim Einsatz auf engstem Raum, z.B. in schmalen Reihenkulturen, haben.

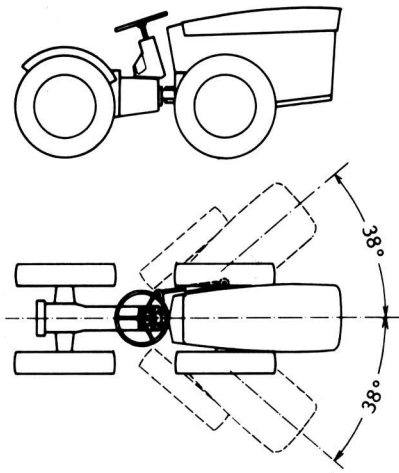


Bild 1. Allradschlepper mit Knicklenkung Holder A45 (31 kW).

*) Dr.-Landw. Akira Oida ist wissenschaftlicher Assistent im "Farm Power and Machinery Laboratory" der Universität Kyoto und arbeitete im Institut für Landmaschinen (Direktor: Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der TU München von Febr. 1977 bis Febr. 1978 als Stipendiat der Alexander von Humboldt-Stiftung.

Wenn man annimmt, daß Vorder- und Hinterräder beim Kurvenfahren immer in gleicher Spur laufen, dann entfällt eine Verspannung der Vorder- und Hinterradreifen gegeneinander beim Kurvenfahren und der Rollwiderstand ist kleiner. Bei langen angebauten Geräten ergeben sich jedoch Schwierigkeiten, ebenso bei Frontanbau von Hack- und Pflegegeräten. Wird der Knickschlepper beim Fahren am Hang gesteuert, so kann er wegen der Querbewegung des Schlepper-Schwerpunkts leicht umkippen. Bisher fehlt eine Untersuchung zur dynamischen Analyse der Bewegung des Knickschleppers. In diesem Aufsatz wird als Anfang der dynamischen Analyse die verschiedenen Lenkraddrehwinkeln entsprechende Spur des Knickschleppers geometrisch analysiert.

2. Bewegung des Schlepperrahmens beim Lenken im Stand

Das Lenkrad des Schleppers, dessen Abmessungen in **Bild 2** gezeigt werden, wird im Stand gedreht. Der Einschlag δ_S , **Bild 3**, läßt sich als Funktion des Lenkraddrehwinkels w annähernd wie folgt darstellen:

$$\delta_S(t) = \frac{1}{18,9474} w(t) \quad (1)$$

Bei Rechtsdrehung ist w positiv.

Bei einem beliebigen Einschlag δ_S bewegt sich nicht nur das Vorderteil, sondern Vorder- und Hinterteil drehen sich in entgegengesetzter Richtung. Im Grundriß, **Bild 3**, wird das Koordinatensystem (x, y) auf den Schlepper bezogen so festgelegt, daß der Nullpunkt O an der dem Winkel $\delta_S = 0$ entsprechenden Stelle des Kreuzgelenks K der Knicklenkung liegt. Bewegt sich der Punkt K der Einfachheit halber auf der x -Achse, dann bilden das Vorder- und das Hinterteil jeweils den Winkel δ_V und δ_H gegen die y -Achse:

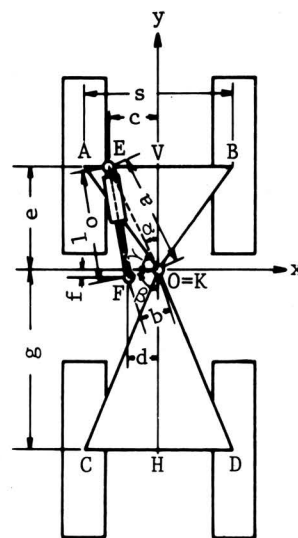


Bild 2. Knickschlepper im Grundriß, Geometrie und Bezeichnungen.

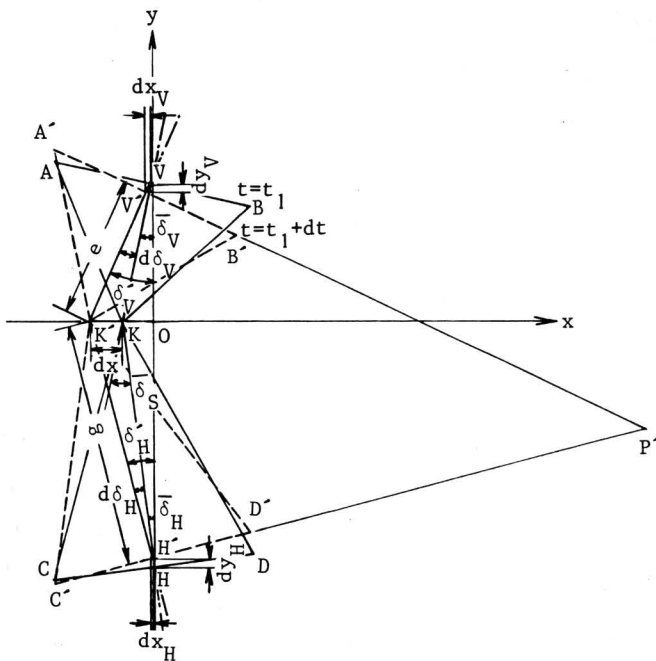


Bild 3. Bewegung der bestimmenden Punkte beim Lenken.

$$\delta_S = \delta_V + \delta_H \quad (2).$$

Für einen beliebigen Zeitpunkt $t = t_1$ liegen mit $K(\bar{x}, \bar{y})$, $V(\bar{x}_V, \bar{y}_V)$ und $H(\bar{x}_H, \bar{y}_H)$ drei bestimmende Punkte vor, aus denen sich die Winkel δ_S , δ_V und δ_H ergeben. Die Vorzeichen der Winkel sind im dargestellten Fall positiv. In einem kurzen Zeitabschnitt dt (d.h. bis $t = t_1 + dt$) bewegen sich die drei Punkte in die Lagen K' , V' und H' . Und es wird:

$$\delta_{H'} = \bar{\delta}_H + d\delta_H \quad (3)$$

$$\delta_{V'} = \bar{\delta}_V + d\delta_V \quad (4)$$

$$dx = e \cos \bar{\delta}_V \tan \delta_{V'} \quad (5)$$

$$\text{oder } dx = g \cos \bar{\delta}_H \tan \delta_{H'} \quad (6)$$

Durch Gleichsetzen von Gl. (5) und Gl. (6):

$$\tan \delta_{V'} = \frac{g}{e} \cos \bar{\delta}_H \frac{\tan \delta_{H'}}{\cos \bar{\delta}_V} \quad (7)$$

$$d\delta_V = \arctan \left(\frac{g \cos \bar{\delta}_H \tan \delta_{H'}}{e \cos \bar{\delta}_V} \right) - \bar{\delta}_V \quad (8)$$

Dann,

$$\begin{aligned} dx_V &= e (\sin \bar{\delta}_V - \cos \bar{\delta}_V \tan \delta_{V'}) \\ dy_V &= e (\cos \bar{\delta}_V - \cos \delta_{V'}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} dx_H &= g (\sin \bar{\delta}_H - \cos \bar{\delta}_H \tan \delta_{H'}) \\ dy_H &= g (\cos \bar{\delta}_H - \cos \delta_{H'}) \end{aligned} \quad (10)$$

Deshalb als allgemeine Form,

$$\delta_V = \int_0^t d\delta_V dt \quad (t=0; \delta_V=0),$$

$$\delta_H = \int_0^t d\delta_H dt \quad (t=0; \delta_H=0)$$

$$x = \int_0^t dx dt \quad (t=0; x=0), \quad y=0$$

$$x_V = \int_0^t dx_V dt \quad (t=0; x_V=0),$$

$$y_V = \int_0^t dy_V dt \quad (t=0; y_V=e)$$

$$x_H = \int_0^t dx_H dt \quad (t=0; x_H=0),$$

$$y_H = \int_0^t dy_H dt \quad (t=0; y_H=-g) \quad (11).$$

Wenn $\bar{\delta}_V$ auf der rechten Seite der Gl. (8) als Integral dargestellt wird, läßt sich das System der Gln. (11) näherungsweise durch numerische Rechnung lösen. Die kleinen Zeitabschnitte werden von $\Delta t_1, \Delta t_2 \dots$ mit der Inkremental-Form dargestellt. In der n-ten Stufe ist:

$$t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (12)$$

$$\delta_{Hn} = \sum_{i=1}^n \Delta \delta_{Hi} = \delta_{Hn-1} + \Delta \delta_{Hn} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \delta_{Vn} = \arctan \left\{ \frac{1}{e \cos \delta_{Vn-1}} \left[g \sum_{i=1}^n (\cos \delta_{Hi-1} \tan \delta_{Hi} - \sin \delta_{Hi-1}) \right. \right. \\ \left. \left. - e \left(\sum_{i=1}^{n-1} \cos \delta_{Vi-1} \tan \delta_{Vi} - \sum_{i=1}^n \sin \delta_{Vi-1} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$x_{Vn} = e \sum_{i=1}^n (\sin \delta_{Vi} - \cos \delta_{Vi-1} \tan \delta_{Vi}) \quad (15)$$

$$y_{Vn} = e \cos \delta_{Vn} \quad (16)$$

$$x_{Hn} = g \sum_{i=1}^n (\sin \delta_{Hi} - \cos \delta_{Hi-1} \tan \delta_{Hi}) \quad (17)$$

$$y_{Hn} = g \cos \delta_{Hn} \quad (18)$$

$$x_n = x_{Vn} - e \sin \delta_{Vn} \quad (19).$$

Die Koordinaten von A, B, C und D werden leicht aus obigen Werten errechnet. Zum Beispiel:

$$\begin{Bmatrix} x_{An} \\ y_{An} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{Vn} \\ y_{Vn} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \frac{s}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{s}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \cos \delta_{Vn} \\ \sin \delta_{Vn} \end{Bmatrix} \quad (20).$$

Bild 4 stellt den Bewegungsbereich einiger Punkte des Knickschleppers bei Lenkbewegungen im Stand dar. Die Koordinaten des Momentanpols $P_n(x_{Pn}, y_{Pn})$ sind:

$$x_{Pn} = \frac{y_{Vn} - y_{Hn} + x_{Vn} \tan \delta_{Vn} + x_{Hn} \tan \delta_{Hn}}{\tan \delta_{Vn} + \tan \delta_{Hn}}$$

$$y_{Pn} = -x_{Pn} \tan \delta_{Vn} + y_{Vn} + x_{Vn} \tan \delta_{Vn} \quad (21).$$

3. Geometrische Spur des Knickschleppers beim Kurvenfahren

Der Schlepper dreht sich im stationären Zustand beim Einschlag δ_{Si} um den Momentanpol $P_i(x_{Pi}, y_{Pi})$ vom beliebigen Zeitpunkt t_i bis zur Zeit $t_{i+1} = t_i + \Delta t$, Bild 5. Der Krümmungsradius r_i und der Drehwinkel ξ_i sind:

$$r_i = \sqrt{x_{Pi}^2 + y_{Pi}^2} \quad (22)$$

$$\xi_i = \frac{v \Delta t}{r_i} \quad (23).$$

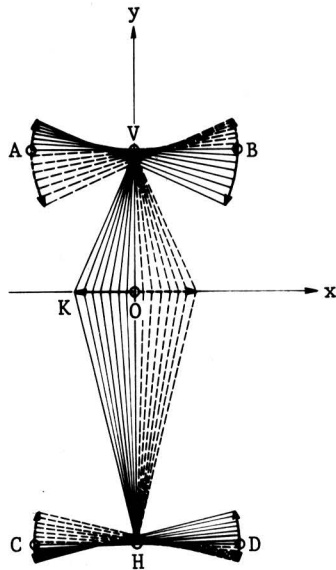


Bild 4. Lage der Punkte A, B, C, D, H, K und V bei Lenkbewegungen im Stand.

Wenn $x_{Pi} < 0$, ist $\zeta_i = -v\Delta t/r_i$.

Die Koordinaten von O_{i+1} ($x_{O_{i+1}}, y_{O_{i+1}}$) ergeben sich aus den i-ten Koordinaten wie folgt:

$$x_{O_{i+1}} = \overline{O_i O_{i+1}} \cos \psi$$

$$\psi = \frac{\pi - |\zeta_i|}{2} - \Theta, \quad \Theta = \arctan \left| \frac{y_{Pi}}{x_{Pi}} \right|$$

$$\overline{O_i O_{i+1}} = 2 r_i \sin \frac{|\zeta_i|}{2}$$

Damit wird:

$$x_{O_{i+1}} = 2 r_i \sin \frac{|\zeta_i|}{2} \cos \left(\frac{\pi - |\zeta_i|}{2} - \arctan \left| \frac{y_{Pi}}{x_{Pi}} \right| \right) \quad (24)$$

Wenn $x_{Pi} < 0$, wird der Ausdruck negativ.

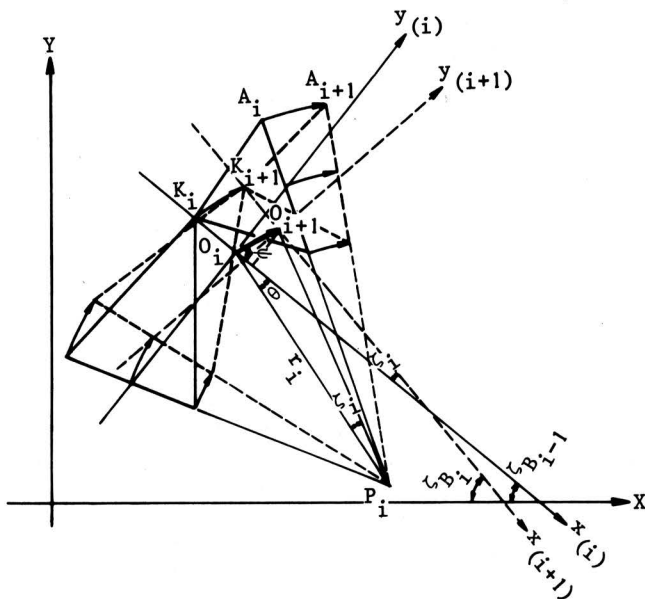


Bild 5. Beschreibung von Punkten in Allgemeinkoordinaten.

Und

$$y_{O_{i+1}} = 2 r_i \sin \frac{|\zeta_i|}{2} \sin \left(\frac{\pi - |\zeta_i|}{2} - \arctan \left| \frac{y_{Pi}}{x_{Pi}} \right| \right) \quad (25)$$

Als besonderer Fall für $\delta_{Hi} = 0$ sind:

$$r_i = \infty, \quad \zeta_i = 0, \quad x_{O_{i+1}} = 0, \quad y_{O_{i+1}} = v\Delta t \quad (26)$$

Um beliebige Punkte des Schleppers in Allgemeinkoordinaten darzustellen, wird der Punkt O_{i+1} ($X_{O_{i+1}}, Y_{O_{i+1}}$) zuerst durch die Koordinaten ($x_{O_{i+1}}, y_{O_{i+1}}$), die sich aus den i-ten Lokalkoordinaten ($x_{(i)}, y_{(i)}$) ergeben, und durch den Winkel $\zeta_{B_{i-1}}$ zwischen den Lokalkoordinaten ($x_{(i)}, y_{(i)}$) und den Allgemeinkoordinaten ausgedrückt, Bild 5. Das heißt:

$$\begin{Bmatrix} X_{O_{i+1}} \\ Y_{O_{i+1}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \zeta_{B_{i-1}} & \sin \zeta_{B_{i-1}} \\ -\sin \zeta_{B_{i-1}} & \cos \zeta_{B_{i-1}} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{O_{i+1}} \\ y_{O_{i+1}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_{O_i} \\ Y_{O_i} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

$$\zeta_{B_{i-1}} = \sum_{j=1}^{i-1} \zeta_j \quad (28)$$

Wenn $i = 1$ sind

$$X_{O_i} = Y_{O_i} = 0 \quad (29)$$

Mit den Koordinaten ($X_{O_{i+1}}, Y_{O_{i+1}}$) werden dann die anderen Punkte, die durch die i+1-ten Lokalkoordinaten ausgedrückt sind, wie folgt in Allgemeinkoordinaten dargestellt:

$$\begin{Bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \zeta_{B_i} & \sin \zeta_{B_i} \\ -\sin \zeta_{B_i} & \cos \zeta_{B_i} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_{O_{i+1}} \\ Y_{O_{i+1}} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{Bmatrix} X_{A_{i+1}} \\ Y_{A_{i+1}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \zeta_{B_i} & \sin \zeta_{B_i} \\ -\sin \zeta_{B_i} & \cos \zeta_{B_i} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{A_{i+1}} \\ y_{A_{i+1}} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} X_{O_{i+1}} \\ Y_{O_{i+1}} \end{Bmatrix} \quad (31)$$

usw.

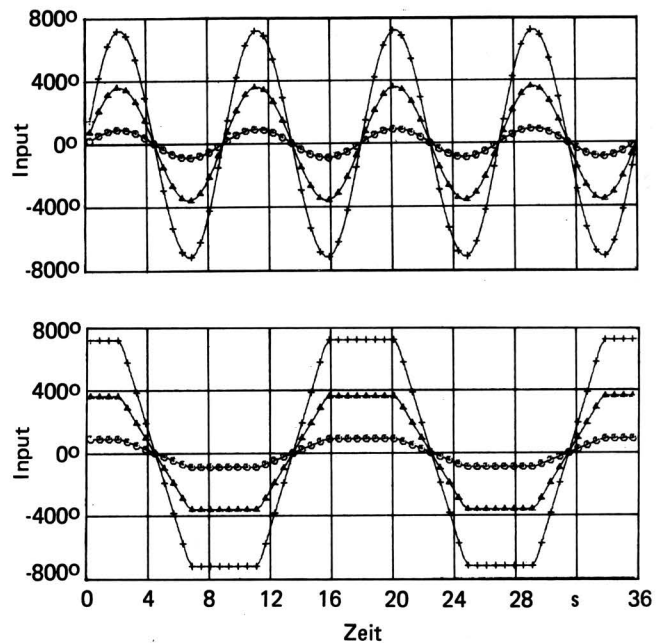


Bild 6. Beispiele für die eingegebenen Funktionen des Lenkraddrehwinkel-Verlaufs; oben: $w(t) = w_m \sin(t)$, unten: $w(t) = At + B$, $t_{end} = 18$ s.

4. Ergebnis der Rechnung

Bei der Rechnung werden 8 verschiedene Verläufe für den Lenkraddrehwinkel $w(t)$ vorgegeben. Einige Beispiele sind in **Bild 6** dargestellt. Die maximalen Drehwinkel betragen 90° , 360° und 720° , t_{end} 6, 18 und 30 s und $\Delta t = 0,5$ s. Beim Berechnen der Lokalkoordinaten von Punkten des Schleppers wird $\Delta\delta_H = 0,5^\circ$ festgesetzt. Die Rechnung ist mit dem Rechner CDC CYBER 175 im Leibniz Rechenzentrum der Technischen Universität München für den Schmalspur-Allrad-Schlepper Holder Cultitrac A45 (31 kW) ausgeführt worden. Er hat folgende Abmessungen, s. auch Bild 2:

$$\begin{aligned} a &= 51,7 \text{ cm}, & b &= 14,6 \text{ cm}, & c &= 23,0 \text{ cm}, & d &= 14,0 \text{ cm} \\ e &= 46,3 \text{ cm}, & f &= 4,0 \text{ cm}, & g &= 82,2 \text{ cm}, & l_o &= 51,1 \text{ cm} \\ s &= 68,0 \text{ cm}, & \alpha &= 26,4^\circ, & \beta &= 74,1^\circ \end{aligned}$$

Als Geschwindigkeit wird $v = 34,72$ cm/s (1,25 km/h) im 1. Vorwärtsgang gewählt.

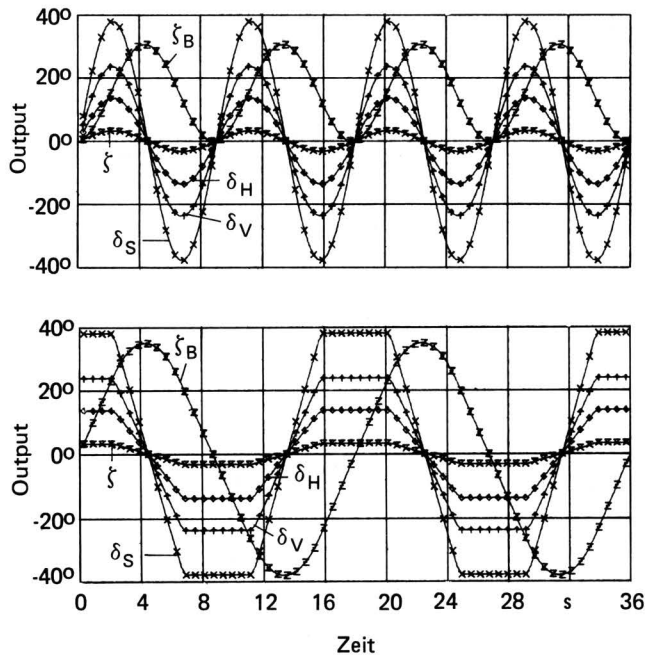


Bild 7. Verlauf der Winkel in Abhängigkeit von der Zeit, bei Eingabe verschiedener Funktionen für den Lenkraddrehwinkel, oben: $w(t) = w_m \sin(4\pi t/t_{\text{end}})$, unten: $w(t) = At + B$, $w_m = 720^\circ$.

4.1 Winkelverlauf

Bild 7 zeigt den Verlauf der Winkel δ_S , δ_H , δ_V , ζ und ζ_B bei Eingabe eines sinusförmigen und eines trapezförmigen Verlaufs des Lenkraddrehwinkels, $w(t) = w_m \sin(4\pi t/t_{\text{end}})$ bzw. $w(t) = At + B$ (Trapez) mit $w_m = 720^\circ$ und $t_{\text{end}} = 18$ s. Aus diesem Bild wird deutlich, daß δ_S , δ_H , δ_V und ζ sich in Abhängigkeit von $w(t)$ verändern. Jedoch hat ζ_B eine Phasenverzögerung von etwa 2 s bei Eingabe der Sinusfunktion. Bei der Trapez-Eingabe tritt ebenfalls eine Phasenverzögerung auf. Diese Phasenverzögerung ist einleuchtend, weil ζ_B das Integral von ζ ist.

4.2 Spur des Punktes 0

Bild 8 zeigt die Spur des Nullpunktes 0 der auf den Schlepper bezogenen Lokalkoordinaten. Als Zeitfunktion für den Lenkraddrehwinkel wurde wieder ein sinus- und ein trapezförmiger Signalverlauf vorgegeben. Wenn $w_m = 90^\circ$ ist, führt der Schlepper nur eine geringe schlangenförmige Bewegung in beiden Fällen aus.

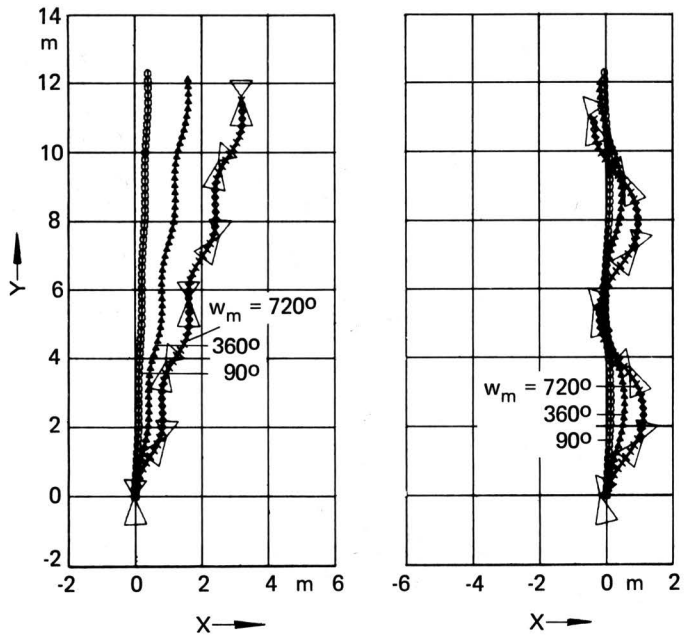


Bild 8. Spur des Punktes 0 (Nullpunkt der Lokalkoordinaten), links: $w(t) = w_m \sin(t)$, rechts: $w(t) = At + B$, $t_{\text{end}} = 18$ s.

Je größer w_m in $w(t) = w_m \sin(4\pi t/t_{\text{end}})$ wird, desto weiter entfernt sich der Schlepper von der Grundlinie (d.h. $X = 0$), da ζ_B in diesem Fall immer positiv ist, **Bild 7**.

4.3 Spur aller Punkte

Bild 9 stellt die Spur der Punkte A, B, C, D, H, K, O und V des Schleppers und die Bewegung des Momentanpols P dar. Dabei ist wieder $w(t) = w_m \sin(4\pi t/t_{\text{end}})$ und $w(t) = At + B$ (Trapez), $w_m = 720^\circ$, $t_{\text{end}} = 30$ s. Man kann aus diesem Bild ersehen, daß der minimale Krümmungsradius (d.h. Abstand des Momentanpols zur Spur des äußeren Rads beim Kurvenfahren) 2,3 m beträgt und mit dem gemessenen Wert (techn. Angaben der Betriebsanleitung) übereinstimmt. Hier muß man berücksichtigen, daß die Vorder- und Hinterräder nicht immer in gleicher Spur laufen. Das ist selbstverständlich, weil der Abstand e von der Vorderachse zum Drehzapfen nicht gleich dem Abstand g von der Hinterachse zum Drehzapfen ist.

5. Diskussion und Zusammenfassung

Mit Hilfe einer rein geometrischen Analyse wurden die Spuren des Knickschleppers für verschiedene Zeitfunktionen des Lenkraddrehwinkels gefunden. Die Richtigkeit dieser Analyse ergibt sich daraus, daß der mit dieser Analyse erhaltene minimale Krümmungsradius dem gemessenen Wert gleich war. Es wurde auch klar gemacht, daß die Vorder- und Hinterräder beim Kurvenfahren des Knickschleppers nicht immer in gleicher Spur laufen. In der Zukunft müssen folgende Probleme erforscht werden:

1. Aufstellen eines Programms, in dem der Einfluß des Schräglaufwinkels der Räder in Abhängigkeit von den Radseitenkräften beim Kurvenfahren betrachtet wird.
2. Bestätigen der Analyse durch den Versuch mit dem Knickschlepper.
3. Bewegung des Schleppers, wenn beliebige äußere Kräfte auf den Schlepper wirken.
4. Verhalten beim Umsturz.
5. Analyse der Beeinflussung des Fahrers durch die der Einschlagrichtung entgegengesetzte Bewegung des Fahrersitzes.

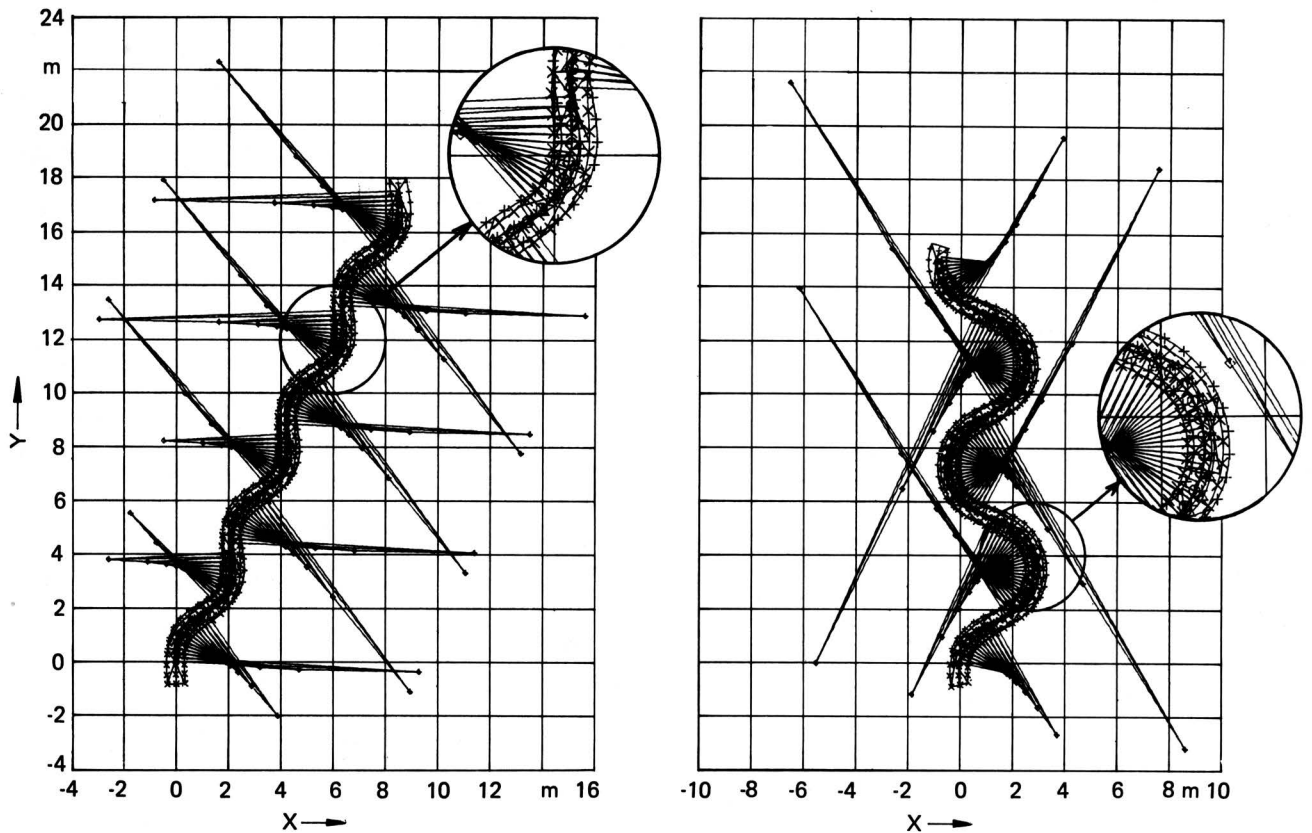


Bild 9. Spur des Knickschleppers und die Bewegung des Momentanpols, links: $w(t) = w_m \sin(t)$, rechts: $w(t) = At + B$; $w_m = 720^\circ$, $t_{\text{end}} = 30 \text{ s}$, $v = 34,72 \text{ cm/s}$.

Untersuchungen zum Abscheidegrad und Druckverlustanstieg von Schüttstofffiltern

Von R. Nied, München*)

DK 621.928.004.1

Für Schüttstofffilter sind die Filtrationsmechanismen am Einzelement weitgehend bekannt, für das Zusammenwirken im Filterverband liegen jedoch nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. In der nachfolgend dargestellten Arbeit werden der Druckverlust und Gesamtabscheidegrad eines Labor-Schüttstofffilters experimentell untersucht. Die Parameter — Höhe der Schüttstoffschicht, Durchmesser der Filterelemente, Luftgeschwindigkeit, Staubbelastung des Rohgases, relative Luftfeuchte — wurden in weiten Bereichen variiert. Gleichungen zur Berechnung von Druckverlust und Gesamtabscheidegrad werden vorgestellt.

Für die finanzielle Förderung dieses Projektes sei der Deutschen Forschungsgemeinschaft auch an dieser Stelle gedankt.

*) Dipl.-Ing. R. Nied ist wiss. Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. J. Wessel am Lehrstuhl für Landmaschinen (Direktor: o.Prof. Dr.-Ing. W. Söhne) der Technischen Universität München.

1. Einleitung

Schüttstofffilter sind Filter, deren Filtermedium aus einer Festkörperpackung besteht. Die Elemente dieser Packung können sowohl regellose Form (Kies, Sand, Koks etc.) als auch definierte geometrische Formen (Kugeln, Ringe, Sattelkörper) aufweisen. Ihre Beständigkeit gegen hohe Gastemperaturen und schleißende Stäube ist höher als bei Faserfiltern. Die Filtrationsmechanismen am Einzelement sind weitgehend bekannt, für das Zusammenwirken der Grundvorgänge im Filterverband liegen jedoch nur wenige Untersuchungsergebnisse vor.

2. Beschreibung der Versuchsanlage und Versuchsmethodik

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde der Einfluß der volumenbezogenen spezifischen Filterbelegung W , des Filterelementdurchmessers d_F , der Schütthöhe H , der auf den freien Querschnitt bezogenen mittleren Anströmgeschwindigkeit v_f und des Massenstromes des Staubes \dot{m}_t auf den Gesamtabscheidegrad η_{ges} und den Druckverlust Δp untersucht. Ferner wurden die relative Luftfeuchte φ_L und die Lufttemperatur ϑ bei jedem Versuch mitgemessen. Die Versuchsparameter wurden in folgenden Bereichen variiert: