

Über das Gleichgewicht von Schlepper-Anhängepflügen

Von K. S. CHWYLJA, Moskau¹⁾

DK 631.312.083.2.001.5

Wir wollen den Zustand des Pfluges, in dem er sich unter dem Einfluß der angreifenden Kräfte geradlinig und gleichmäßig bewegt und die erforderlichen Arbeitsbedingungen einhält, das Gleichgewicht des Pfluges nennen.

Zur Bestimmung dieses Gleichgewichts setzen wir ihn in ein rechtwinkliges Koordinatensystem, das sich mit dem Pflug mitbewegt. Im Bild 1 ist der Pflug schematisch in drei zu einander senkrechten Ebenen XOZ , XOY und YOZ dargestellt.

Während des Pflügens wirken auf den Pflug folgende Kräfte:

- P die an der Zugvorrichtung angreifende Zugkraft,
- G das im Schwerpunkt angreifende Pfluggewicht,
- N' die Resultierende der auf die Arbeitsflächen der Pflugkörper wirkenden Bodenbalkenkräfte,
- R_a die Resultierende der auf die Stützflächen der Pflugkörper wirkenden senkrechten Bodenkräfte,
- R_s die Resultierende der von der Furchenwand aus auf die Anlagen wirkenden Bodenkräfte,
- F_a die Resultierende der Kräfte der Reibung zwischen Stützflächen und Furchensohle,
- F_s die Resultierende der Kräfte der Reibung zwischen Anlagen und Furchenwand,
- R_l, R_f, R_h die vertikalen Komponenten der auf das Landrad, Furchenrad und Hinterrad wirkenden Bodenkräfte,
- T_l, T_f, T_h die horizontalen, in der X-Achse auf das Landrad, das Furchenrad und das Hinterrad wirkenden Komponenten der Bodenkräfte,
- R_h' die horizontale, in der Y-Achse auf das Hinterrad wirkende Komponente der Bodenkraft.

Wenn wir die Zugkraft P in eine horizontale und vertikale Komponente zerlegen, erhalten wir eine Kraft P_x , die in der Bewegungsrichtung wirkt und die wir Horizontalzugkraft nennen wollen, und eine senkrecht nach oben wirkende Kraft P_z .

Von den Kräften, die die Horizontalzugkraft P_x bestimmen, ist nur das Pfluggewicht nach Größe und Richtung unveränderlich.

Die anderen Kräfte sind komplizierte Funktionen der Eigenschaften und des Zustandes des Bodens, des Bodenprofils usw. und ändern sich dauernd nach Größe, Richtung und gegenseitigen Beziehungen. Durch diese Veränderungen wird das Pfluggleichgewicht gestört. Das Pfluggleichgewicht ist also ein praktisch nicht erreichbarer Zustand bzw. ein Sonderfall der Pflugbewegung.

Die bei Zugkraftmessungen aufgenommenen Schwankungen der Zugkraft P bestätigen diese Schlußfolgerung. Kennzeichnend für die Schwankungen ist, daß sie nach Größe und zeitlicher Aufeinanderfolge vollkommen unregelmäßig erfolgen. Irgend eine Gesetzmäßigkeit in der Änderung der auf den Pflug wirkenden Kräfte ist nicht vorhanden. Sie hängen nur von zufälligen Bedingungen ab.

Trotzdem ist es möglich, die Gleichgewichtsbedingungen des Pfluges zu erforschen und sehr wichtige praktische Schlußfolgerungen zu ziehen.

Aus der Skizze ist zu ersehen, daß die auf den Pflug wirkenden Kräfte sich nicht in einem Punkt schneiden. Daher ist der Begriff vom sogenannten „Mittelpunkt des Pflugwiderstandes“ falsch, trotzdem man ihn bis heute in der Literatur findet.

Die Unrichtigkeit dieses Begriffes hat *Gorjatschkin* bereits 1910 nachgewiesen [1].

Die Gleichgewichtsbedingungen des Pfluges werden durch folgende sechs statischen Gleichungen ausgedrückt:

$$\begin{aligned} \Sigma x_i &= 0; & \Sigma y_i &= 0; & \Sigma z_i &= 0; \\ \Sigma M_x &= 0; & \Sigma M_y &= 0; & \Sigma M_z &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Änderungen der Radeinstellung während des Pflügens ändern die Lage und die Größe der auf den Pflug wirkenden Kräfte wesentlich und damit auch die Größe der Zugkraft und den Gang des Pfluges. Zwei Grenzfälle sind hierbei von besonderem Interesse.

Der erste Grenzfall ist der, bei dem die Pflugeräder nur durch ihr Eigengewicht belastet sind und folglich keine vertikalen Bodenkräfte auf den Pflugrahmen übertragen. Diese Kräfte greifen hierbei nur an den Stützflächen der Pflugkörper an.

Beim zweiten Grenzfall sind die Pflugeräder so stark belastet, daß die vertikalen Bodenkräfte nur an ihnen angreifen und von den Stützflächen der Pflugkörper gar nicht aufgenommen werden. In diesem Fall „hängt“ der Pflug während des Pflügens an den Rädern.

Wir wollen die Bedingungen für den ersten Fall anschreiben, bei dem die Räder nur durch ihr Eigengewicht belastet sind. Die vertikalen Bodenkräfte R_l, R_f, R_h werden hierbei nicht auf den Pflugrahmen übertragen. Die horizontalen Bodenkräfte T_l, T_f, T_h und R_h' sind gegenüber den anderen Kräften so verschwindend klein, daß sie zur Vereinfachung vernachlässigt werden können. Dann erhalten wir aus der Skizze folgende sechs Gleichungen als Gleichgewichtsbedingungen des Pfluges:

$$\Sigma x = P_x - N_x' - F_a - F_s = 0; \quad (2)$$

$$\Sigma y = R_s - N_y' = 0; \quad (3)$$

$$\Sigma z = R_a + P_z - G - N_z' = 0; \quad (4)$$

$$\Sigma M_x = R_a k + P_z l + R_s q - N_y' s_1 - N_z' s_2 - G i = 0; \quad (5)$$

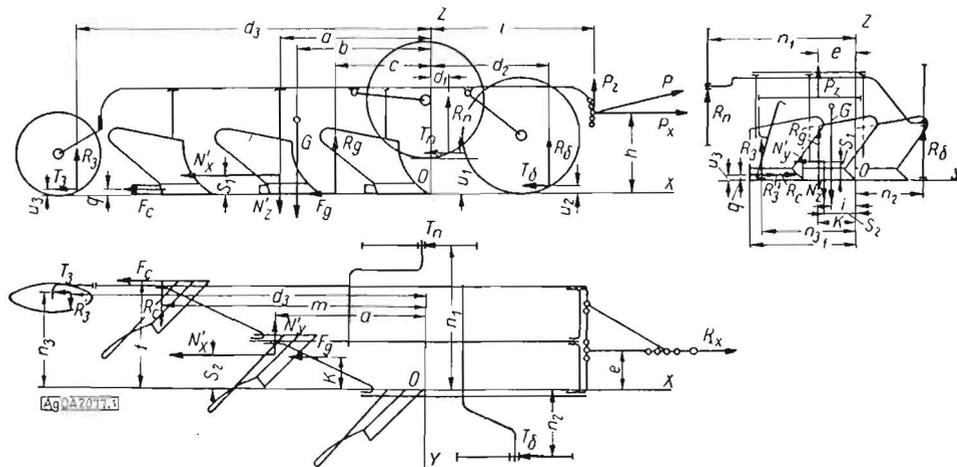
$$\Sigma M_y = P_x h + R_a s - P_z l - G b - N_x s_1 - N_z' a - F_s q = 0; \quad (6)$$

$$\Sigma M_z = P_x l + N_y' a - N_x' s_2 - R_s m - F_s l - F_a k = 0. \quad (7)$$

Nun schreiben wir die Bedingungen für den zweiten Fall auf, bei dem die vertikalen Bodenkräfte von den Rädern aufgenommen werden. In diesem Fall ist die Resultierende der auf die Stützflächen der Pflugkörper wirkenden vertikalen Bodenkräfte und die Resultierende der Kräfte der Reibung zwischen Stützfläche und Furchensohle gleich Null

$$R_a = 0, \quad F_a = 0.$$

Die Gleichgewichtsbedingungen des Pfluges für den zweiten Fall lauten:



¹⁾ Aus *Сельхозмашина* (Die Landmaschine) Moskau (1954) H. 12, S. 6 bis 10. Übers.: Dipl.-Ing. W. Balkin.

$$\Sigma x = P_x - N_x' - T_l - T_f - T_h - F_s = 0; \quad (8)$$

$$\Sigma y = R_s + R_h' - N_y' = 0; \quad (9)$$

$$\Sigma z = P_z + R_l + R_f + R_h - G - N_z' = 0; \quad (10)$$

$$\Sigma M_x = R_l n_1 + R_h n_3 + P_z l + R_h' u_3 + R_s q - R_f n_2 - G i - N_y' s_1 - N_z' s_2 = 0; \quad (11)$$

$$\Sigma M_y = P_x h + R_h d_3 - P_z l - R_l d_1 - R_f d_2 - T_l u_1 - T_f u_2 - T_h u_3 - F_s q - N_x' s_1 - N_z' a - G b = 0; \quad (12)$$

$$\Sigma M_z = P_x l + T_f n_2 + N_y' a - N_x' s_2 - F_s l - R_s m - T_l n_1 - T_h n_3 - R_h' d_3 = 0. \quad (13)$$

Die komplizierten Beziehungen zwischen den auf den Pflug wirkenden Kräften und die Veränderlichkeit der diese Kräfte bestimmenden Faktoren stören, wie oben bereits gesagt, das Gleichgewicht des Pfluges und machen eine geradlinige und gleichmäßige Bewegung des Pfluges unmöglich.

Die Gleichungen der wirklichen Pflugbewegung ergeben sich aus den angeführten statischen Gleichgewichtsbedingungen, wenn man die bei ungleichmäßiger Pflugbewegung entstehenden Trägheitskräfte und ihre Momente berücksichtigt.

Diese Trägheitskräfte und Momente des arbeitenden Pfluges müssen in den Bewegungsgleichungen abwechselnd sowohl positive als auch negative Vorzeichen haben, da nur dann die Pflugarbeit einigermäßen den Anforderungen entsprechen kann. Bei einer in der Y-Achse wirkenden Trägheitskraft von bestimmtem Vorzeichen drängt der Pflug z. B. entweder in die Furche oder in das ungepflügte Feld ab und bildet eine Bodenglatze. Bei einer in der Z-Achse wirkenden Trägheitskraft von bestimmtem Vorzeichen steigt der Pflug entweder aus der Furche hoch und pflügt nicht mehr oder dringt tiefer in den Boden ein, als der maximalen Arbeitstiefe entspricht.

Eine normale Arbeit des Pfluges ist also nur dann möglich, wenn die Trägheitskräfte abwechselnd in entgegengesetzten Richtungen wirken und die Summe der durch diese Kräfte hervorgerufenen positiven und negativen Abweichungen des Pfluges vom Gleichgewichtszustand auf einem gewissen Wegabschnitt ΔL gleich Null ist.

Die Erforschung der ungleichmäßigen Pflugbewegung ist für die Bestimmung der Bedingungen eines gleichmäßigen, ruhigen Pflugganges erforderlich, gehört jedoch nicht zu dem Kreis der in diesem Artikel behandelten Fragen.

Mit den das Pfluggleichgewicht bestimmenden Gleichungen läßt sich die Abhängigkeit der Zugkraft und des Pflugwirkungsgrades von der Rädereinstellung ermitteln. Hierbei wollen wir unter horizontaler Zugkraft die mittlere horizontale Zugkraft verstehen, bei der sich die Wirkungen der Trägheitskräfte gegenseitig aufheben.

Die Abhängigkeit der Zugkraft von der Räderbelastung

Die Gleichgewichtsbedingungen des zweiten Grenzfalls unterscheiden sich wesentlich von denen des ersten Falles. Durch den Vergleich dieser Unterschiede kann man feststellen, welcher der beiden Fälle eine geringere Zugkraft erfordert.

Zur Beantwortung dieser Frage bestimmen wir die Größe von P_x für beide Fälle bei gleichem Querschnitt des Bodenbalkens und gleicher Richtung der Gesamtzugkraft P .

Aus der Gleichung (2) für die Projektionen der Kräfte in die X-Achse beim ersten Fall erhalten wir

$$P_x' = N_x' + F_a + F_s. \quad (14)$$

Hierbei ist:

$$F_a = R_a \operatorname{tg} \varrho_a; \quad (15)$$

$$F_s = R_s \operatorname{tg} \varrho_s. \quad (16)$$

$\operatorname{tg} \varrho_a$ und $\operatorname{tg} \varrho_s$ sind die Koeffizienten der Reibung zwischen Pflug und Furchensole sowie Furchenwand.

Aus den Gleichungen (4) und (3) bestimmen wir R_a und R_s :

$$R_a = G + N_z' - P_z; \quad (17)$$

$$R_s = N_y'. \quad (18)$$

Wenn wir die Werte für R_a und R_s in die Gleichungen (15) und (16) einsetzen, erhalten wir

$$F_a = (G + N_z' + P_z) \operatorname{tg} \varrho_a. \quad (19)$$

und

$$F_s = N_y \operatorname{tg} \varrho_s. \quad (20)$$

Wenn wir in Gleichung (14) für F_a und F_s deren Werte aus den Gleichungen (19) und (20) einsetzen, ergibt sich

$$P_x' = N_x' + (G + N_z' - P_z) \operatorname{tg} \varrho_a + N_y' \operatorname{tg} \varrho_s. \quad (21)$$

Aus der Gleichung (8) für die Projektion der Kräfte in die X-Achse beim zweiten Fall erhalten wir

$$P_x' = N_x' + T_l + T_f + T_h + F_s. \quad (22)$$

Für die horizontalen Komponenten der auf die Räder wirkenden Bodenkräfte können wir schreiben:

$$T_l = \kappa R_l; \quad (23)$$

$$T_f = \kappa R_f; \quad (24)$$

$$T_h = \kappa R_h; \quad (25)$$

Hierbei ist $\kappa = \frac{f}{r}$ der Rollwiderstandskoeffizient, der für alle Räder gleich groß angenommen werden kann, wobei f der Arm der rollenden Reibung und r der Rollkreishalbmesser sind.

Dann können wir die Gleichung (22) in folgender Form schreiben:

$$P_x'' = N_x' + (R_l + R_f + R_h) \kappa + F_s. \quad (26)$$

Aus der Gleichung (10) für die Projektion der Kräfte in die Z-Achse erhalten wir

$$R_l + R_f + R_h = G + N_z' - P_z. \quad (27)$$

Für die Kraft der Reibung zwischen Pflug und Furchenwand gilt die Gleichung

$$F_s = R_s \operatorname{tg} \varrho_s. \quad (28)$$

Aus Gleichung (9) erhalten wir jedoch

$$R_s = N_y' - R_h'. \quad (29)$$

und können daher schreiben

$$F_s = (N_y' - R_h') \operatorname{tg} \varrho_s. \quad (30)$$

Setzen wir den Wert für die Summe $R_l + R_f + R_h$ aus der Gleichung (27) und den Wert für F_s aus der Gleichung (30) in die Gleichung (26) ein, so erhalten wir

$$P_x'' = N_x' + (G + N_z' - P_z) \kappa + (N_y' - R_h') \operatorname{tg} \varrho_s. \quad (31)$$

Subtrahieren wir Gleichung (31) von Gleichung (21), so erhalten wir

$$\Delta P_x = P_x' - P_x'' = (G + N_z' - P_z) (\operatorname{tg} \varrho_a - \kappa) + R_h' \operatorname{tg} \varrho_s. \quad (32)$$

Es ist offensichtlich, daß die Differenz ΔP_x der Gleichung (32) positiv sein muß, denn der Koeffizient der Reibung zwischen Pflugstützflächen und Boden $\operatorname{tg} \varrho_a$ ist wesentlich größer als der Rollwiderstandskoeffizient κ . Es ist also im ersten Fall, wenn die vertikalen Bodenkräfte von den Stützflächen der Pflugkörper aufgenommen werden, der Zugwiderstand P_x wesentlich größer als im zweiten Fall, wenn die Räder diese Kräfte aufnehmen. Diese Schlußfolgerung wird durch die Forschungen von *Ordynski* vollauf bestätigt [4].

Trotz der großen Wirkung der Pflugeinstellung auf die Zugkraft und die Pflugarbeit ist auf diesem Gebiete noch sehr wenig geforscht worden. Die diesbezüglichen Literaturangaben sind unbestimmt und nicht überzeugend [2 und 3].

Als wir die horizontale Zugkraft bei den zwei Grenzfällen der Räderbelastung untersuchten, stellten wir uns die Bedingung, daß die Pflugarbeit und die Richtung der resultierenden Zugkraft P in beiden Fällen die gleichen sein müssen, da es sonst unmöglich gewesen wäre, die mechanische Abhängigkeit zwischen der horizontalen Zugkraft und den beiden Räderbelastungsfällen festzustellen. Unter normalen Bedingungen hat die Änderung der Räderbelastung unweigerlich eine Änderung des Bodenbalkenquerschnittes oder der Richtung der resultierenden Zugkraft zur Folge.

Bei einer bestimmten Pflugeinstellung mögen die senkrechten Bodenkräfte zunächst von den Rädern aufgenommen werden. Wenn man nun die Räder entlastet und die senkrechten Bodenkräfte auf die Stützflächen der Pflugkörper überträgt, so beginnt der Pflug tiefer in den Boden einzudringen. Hierbei ändert sich der Querschnitt des Bodenbalkens und die Richtung der resultierenden Zugkraft. Um die alte Arbeitstiefe wieder

herzustellen, muß man die Anhängervorrichtung am Pflug tiefer stellen. Dann ändert sich die Richtung der resultierenden Zugkraft P und vergrößert sich ihre vertikale Komponente P_z . Dadurch wird die senkrechte Belastung des Schlepperzughakens vergrößert.

Beim praktischen Pflügen befindet sich die tatsächliche Verteilung der senkrechten Bodenkräfte zwischen den beiden Grenzfällen, d. h. die Kräfte werden zum Teil von den Rädern und zum Teil von den Stützflächen der Pflugkörper aufgenommen. Wenn die Pflügräder während der Arbeit nur mit ihrem Eigengewicht belastet wären, würde es unmöglich sein, die Arbeitstiefe mit Hilfe der Tiefeneinstellvorrichtungen zu vergrößern, die die Stellung der Halbachsen gegenüber dem Pflugrahmen regeln, und es müßte die Einstellung der Anhängervorrichtung entsprechend geändert werden. Eine Verringerung der Arbeitstiefe mit Hilfe der Tiefeneinstellvorrichtungen hätte aber zur Folge, daß ein Teil der senkrechten Bodenkräfte, der bisher von den Stützflächen der Pflugkörper aufgenommen wurde, auf die Laufräder überginge. Damit die Räder nur mit ihrem Eigengewicht belastet bleiben, dürfte man auch hier nur die Einstellung der Anhängervorrichtung ändern.

Arbeitsbedingungen, bei denen die Räder keine senkrechten auf den Pflug wirkenden Bodenkräfte aufzunehmen haben, lassen sich also nur dann erreichen, wenn die Arbeitstiefe der Pflugkörper nur mit der Anhängervorrichtung geregelt wird.

In der Praxis zwingen aber die Änderungen der Bodenverhältnisse bereits innerhalb einer Furchenlänge, die Arbeitstiefe mit Hilfe der Tiefeneinstellvorrichtungen zu regeln. Das ist um so mehr nötig, als zur Verstellung der Zugvorrichtung der Schlepper angehalten werden müßte, während die Arbeitstiefe mit Hilfe der Tiefeneinstellvorrichtungen während der Fahrt geregelt werden kann. Ferner hat die Anhängervorrichtung verhältnismäßig wenig Einstellmöglichkeiten und kann nur zur Grobregelung der Arbeitstiefe benutzt werden, während mit den Tiefeneinstellvorrichtungen, z. B. mit den Spindelvorrichtungen Feinregelung und Anpassung an die große Vielfalt der Bodenverhältnisse möglich ist. Bei der Arbeitstiefeneinstellung mit den Tiefeneinstellvorrichtungen ist eine Belastung der Räder durch die vertikalen Bodenkräfte jedoch unvermeidlich.

Die Bestimmung des Wirkungsgrades des Schlepperpfluges

Durch Untersuchung der Gleichgewichtsbedingungen und der auf den Pflug wirkenden Kräfte ist es möglich, den Wirkungsgrad des Pfluges zu bestimmen. Die Kenntnis des Wirkungsgrades ist für die Bewertung der dynamischen und wirtschaftlichen Kennwerte des Pflügens sehr wichtig.

Als Pflugwirkungsgrad gilt gewöhnlich

$$\eta_{pfl} = \frac{P - P'}{P} \quad (33)$$

Hierbei ist:

P die mit dem Zugkraftmesser ermittelte resultierende Zugkraft;

P' die für die Überwindung der Reibung zwischen Stützflächen des Pfluges und Furchensohle erforderliche Kraft.

Für diese Kraft gilt

$$P' = G \operatorname{tg} \varrho \quad (34)$$

Hierbei ist:

$\operatorname{tg} \varrho$ der Koeffizient der Reibung zwischen Pflugstützflächen und Furchensohle;

G das Pfluggewicht.

Setzen wir den Wert für P' in die Gleichung (33) ein, so erhalten wir

$$\eta_{pfl} = \frac{P - G \operatorname{tg} \varrho}{P} \quad (35)$$

Diese Gleichung ist nur dann richtig, wenn das Pfluggewicht allein durch die an den Pflugstützflächen angreifenden verti-

kalen Bodenkräfte ausgeglichen wird. Wie schon gezeigt, werden die vertikalen Bodenkräfte während des Pflügens auch durch die Pflügräder aufgenommen. Ferner ist an der Aufrechterhaltung des Pfluggewichtes auch die Vertikalkomponente P_z der Zugkraft beteiligt, die das Pfluggewicht teilweise ausgleicht.

Um die Abhängigkeit zwischen dem Pfluggewicht und den in der Z -Achse wirkenden Kräften festzustellen, schreiben wir die Gleichgewichtsbedingung für die in der Richtung der Z -Achse wirkenden Kräftekomponenten für den Fall an, daß die Vertikalkomponenten der Bodenkräfte teilweise an den Rädern und teilweise an den Pflugstützflächen angreifen.

Unserem Bild entnehmen wir:

$$R_a + R_l + R_f + R_h + P_z - G - N_z' = 0 \quad (36)$$

Wenn wir für die Summe der an den Rädern angreifenden vertikalen Bodenkräfte

$$\Sigma R_r = R_l + R_f + R_h \quad (37)$$

setzen und Gleichung (36) nach G auflösen, erhalten wir

$$G = R_a + \Sigma R_r + P_z - N_z' \quad (38)$$

Aus Gleichung (38) ist zu ersehen, daß die das Pfluggewicht ausgleichenden vertikalen Bodenkräfte an Pflugteilen angreifen, die horizontale Bodenkräfte von völlig verschiedener Größe hervorrufen.

Die Kraft N_z' (die vertikale Bodenbalkenkraft) gehört zu den Kräften, die den Boden direkt bearbeiten. Die durch diese Kraft hervorgerufenen Bodenauflegekräfte und Widerstände wollen wir als Nutzkräfte ansehen. Darum müssen sie aus der vorliegenden Untersuchung ausgeschaltet werden.

Zu diesem Zweck führen wir folgende Bezeichnungen ein:

R_a' die Resultierende der durch das Pfluggewicht hervorgerufenen und an den Pflugstützflächen angreifenden vertikalen Bodenkräfte;

$\Sigma R_r'$ die Summe der durch das Pfluggewicht hervorgerufenen und an den Pflügrädern angreifenden vertikalen Bodenkräfte;

P_z' die durch das Pfluggewicht hervorgerufene an der Anhängervorrichtung angreifende Vertikalkomponente der Zugkraft.

Dann können wir folgende Gleichung schreiben

$$G = R_a' + \Sigma R_r' + P_z' \quad (39)$$

Die Bodenkraft R_a' ruft die an den Stützflächen der Pflugkörper angreifende und gegen die Fahrtrichtung wirkende Reibungskraft hervor. Diese Kraft ist

$$F_a' = R_a' \operatorname{tg} \varrho_a \quad (40)$$

Die Summe $\Sigma R_r'$ bestimmt die Größe der Summe der horizontalen an die Räder angreifenden Bodenkraftkomponenten. Für diese gilt der Ausdruck

$$\Sigma T_r' = \Sigma R_r' x_p \quad (41)$$

Hierbei ist

x_p der Rollwiderstandskoeffizient der Pflügräder.

Die Zugvorrichtung übt auf den Zughaken eine senkrecht nach unten gerichtete Kraft aus, die der Vertikalkomponente P_z der Zugkraft gleich und entgegengerichtet ist. Diese Kraft erhöht den Druck der Schlepperräder oder Raupenkette auf den Boden und vergrößert dadurch den Rollwiderstand des Schleppers. Für den durch diese Kraft hervorgerufenen Schlepperwiderstand gilt

$$F_t = P_z' x_t \quad (42)$$

Hierbei ist

x_t der Rollwiderstandskoeffizient des Schleppers.

Die zum Überwinden des Pflugwiderstands erforderliche und durch das Pfluggewicht hervorgerufene Zugkraft ist also

$$P_z' = R_a' \operatorname{tg} \varrho_a + \Sigma R_r' x_p + P_z' x_t \quad (43)$$

Nimmt man zur Vereinfachung an, daß die Rollwiderstandskoeffizienten des Schleppers und der Pflügräder gleich sind,

d. h. setzt man $\kappa_p = \kappa_l = \kappa$, so erhält Gleichung (43) folgende Form

$$P_x' = R_a' \operatorname{tg} \varrho_a + (\Sigma R_r' + P_z') \kappa. \quad (44)$$

Gleichung (39) kann man in folgender Form schreiben

$$\Sigma R_r' + P_z' = G - R_a'. \quad (45)$$

In Gleichung (44) eingesetzt ergibt das

$$P_x' = R_a' (\operatorname{tg} \varrho_a - \kappa) + G \kappa. \quad (46)$$

Wir drücken R_a' durch das Pfluggewicht aus

$$R_a' = \tau G. \quad (47)$$

Hierin ist

τ ein Koeffizient, der kleiner als 1 ist und angibt, ein wie großer Teil des Pfluggewichtes durch die Pflugkörperstützflächen aufgenommen wird.

Setzen wir diesen Wert von R_a' in die Gleichung (46) ein, so erhalten wir

$$P_x' = G [\tau (\operatorname{tg} \varrho_a - \kappa) + \kappa]. \quad (48)$$

Da unter normalen Umständen $\operatorname{tg} \varrho_a > \kappa$ ist, so hat P_x' seinen größten Wert bei $\tau = 1$ und ist dann

$$(P_x')_{\max} = G \operatorname{tg} \varrho_a. \quad (49)$$

Seinen Mindestwert hat P_x' bei $\tau = 0$ und ist dann

$$(P_x')_{\min} = G \kappa. \quad (50)$$

Der Wirkungsgrad des Pfluges muß nach folgender Gleichung errechnet werden

$$\eta_{pl} = \frac{P_x - P_x'}{P_x}. \quad (51)$$

Gleichung 51 enthält nicht die resultierende Zugkraft P sondern ihre horizontale Komponente, da die Widerstandskräfte in der Richtung der X -Achse wirken.

Setzen wir den Wert von P_x' aus Gleichung (48) in die Gleichung (51) ein, so erhalten wir

$$\eta_{pl} = \frac{P_x - G [\tau (\operatorname{tg} \varrho_a - \kappa) + \kappa]}{P_x}. \quad (52)$$

Gleichung (52) gibt nicht nur die Abhängigkeit des Pflugwirkungsgrades vom Pfluggewicht, sondern auch von der Verteilung des Gewichtes auf die stützenden Teile an. Je größer τ , d. h. je weniger die Pflügräder belastet sind, um so geringer ist der Wirkungsgrad. Wir wollen in einem Beispiel zeigen, wie stark der Wirkungsgrad von der Pflugeinstellung abhängt.

Ein Fünffurchenpflug mit einer Arbeitsbreite von 175 cm und einem Gewicht von 1100 kg möge mit einer Arbeitstiefe von 20 cm pflügen. Wir wählen für den Koeffizienten der Reibung zwischen Boden und Stahl den bei mittleren Verhältnissen gültigen Wert $\operatorname{tg} \varrho_a = 0,5$ und für den mittleren Rollwiderstandskoeffizienten der Pflug- und Schlepperräder den Wert $\kappa = 0,15$ und bestimmen den Wirkungsgrad des Pfluges für die zwei Grenzwerte der Pfluggewichtsverteilung $\tau = 1$ und $\tau = 0$.

Im ersten Fall (bei $\tau = 1$) ist

$$\eta_{pl} = \frac{P_{x_1} - G \operatorname{tg} \varrho_a}{P_{x_1}} \quad (53)$$

und im zweiten Fall

(bei $\tau = 0$) ist

$$\eta_{pl} = \frac{P_{x_1} - G \kappa}{P_{x_1}}. \quad (54)$$

Wenn im ersten Fall der spezifische Bodenwiderstand

$$\kappa_l = 0,5 \text{ kg/cm}^2$$

beträgt, dann ist

$$P_{x_1} = 0,5 \cdot 175 \cdot 20 = 1750 \text{ kg}$$

und der Wirkungsgrad

$$\eta_{pl} = \frac{1750 - 1100 \cdot 0,5}{1750} = 0,685.$$

Wenn im zweiten Fall bei den gleichen Bodenverhältnissen und dem gleichen Bodenbalkenquerschnitt gepflügt wird, so ist der Nutzwiderstand des Pfluges genauso groß wie im ersten Fall, d. h. es ist

$$P_{x_2} - G \kappa = P_{x_1} - G \operatorname{tg} \varrho_a.$$

Hieraus folgt

$$P_{x_2} = P_{x_1} - G \operatorname{tg} \varrho_a + G \kappa. \quad (55)$$

Setzen wir die Zahlenwerte ein, so erhalten wir

$$P_{x_2} = 1750 - 1100 \cdot 0,5 + 1100 \cdot 0,15 = 1365 \text{ kg}.$$

Setzen wir diese Werte in die Gleichung (54) ein, so erhalten wir

$$\eta_{pl} = \frac{1365 - 1100 \cdot 0,15}{1365} = 0,905.$$

Der spezifische Bodenwiderstand ist im zweiten Fall

$$K_2 = \frac{1365}{175 \cdot 20} = 0,39 \text{ kg/cm}^2.$$

Das angeführte Beispiel zeigt, daß Wirkungsgrad und spezifischer Bodenwiderstand stark von der Verteilung des Pfluggewichtes auf die stützenden Teile abhängen. Je größer der Teil des Pfluggewichtes ist, der von den Rädern und der Anhängervorrichtung aufgenommen wird, um so größer ist der Pflugwirkungsgrad und um so geringer der spezifische Bodenwiderstand.

Zusammenfassung

1. Die in der Literatur übliche Bestimmung der Gleichgewichtsbedingungen des Schlepper-Anhängepfluges in einer Ebene gibt keine Vorstellung von der Bewegung des Pfluges unter der Einwirkung eines räumlichen Kräftesystems. Diese Stellen in der Literatur sind daher unvollständig und empfehlen manchmal sogar falsche Maßnahmen.

2. Die Untersuchung der Gleichgewichtsbedingungen des Pfluges in einem räumlichen Koordinatensystem zeigt, daß die in der Literatur empfohlene Pflugeinstellung, bei der die Räder nicht durch das Pfluggewicht belastet sind, eine größere Zugkraft erfordert, als die Einstellung, bei der das Pfluggewicht von den Rädern aufgenommen wird.

3. Je größer der Teil des Pfluggewichtes ist, den die Räder aufnehmen, um so geringer ist der Kraftaufwand für das Pflügen und um so größer ist der Pflugwirkungsgrad. Der Unterschied zwischen den Werten des Pflugwiderstandes bei verschiedener Verteilung des Pfluggewichtes auf die stützenden Teile ist so groß, daß man bei der Ermittlung der Abhängigkeit des Pflugwiderstandes von anderen Faktoren, z. B. von der Bodenfeuchtigkeit, zu falschen oder widersprechenden Werten kommen kann, wenn sich bei den Messungen die Verteilung des Pfluggewichtes auf die Stützen ändert. Die durch die Änderung der Gewichtsverteilung hervorgerufene Änderung des Zugwiderstandes verringert oder vergrößert die durch die untersuchten Faktoren hervorgerufene Differenz.

4. Das bei der Bestimmung des durch das Pfluggewicht hervorgerufenen Pflugwiderstandes übliche Verfahren, den Pflug ohne Umpflügen durch die Furche zu ziehen, kann nicht den Pflugwiderstand ergeben, der durch das Pfluggewicht beim Pflügen hervorgerufen wird, da die Verteilung des Pfluggewichtes auf die Stützen in beiden Fällen verschieden ist.

Literatur

- [1] Gorjatschkin, W. P.: Gesammelte Werke, Band VII, Selchogis, 1949.
- [2] Kapurulin, K. N., und B. G. Turbin: Landmaschinen. Selchogis, 1945.
- [3] Polewizki, K. A., und A. N. Karpenko: Landmaschinen. Selchogis, 1952.
- [4] Ordynski, M. S.: Der Einfluß der Einstellung der Zugvorrichtung und des Zustandes der Schare auf die beim Schlepperpflug aufzuwendende Zugkraft. „Mechanisierung der Landwirtschaft“, Nr. 4, 1931. AU 2077