

Schwierigkeiten im Dauerbetrieb treten durch Ablagerungen und Krustenbildung in der Vorkammer und im Zylinder, vornehmlich an der Einspritzdüse und am Kolben, insbesondere bei Verwendung von nicht raffinierten Pflanzenölen auf.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen aber, daß eine wesentliche Minderung der Ablagerungen durch geringfügige Maßnahmen am Motor (z.B. Änderung der Lage der Einspritzdüse und Änderungen bei der Motorkühlung) möglich ist. Dadurch wird die Chance, roh gepreßte Öle ohne Raffination als Kraftstoff einzusetzen, wesentlich erhöht.

Die Untersuchungen haben ebenfalls ergeben, daß eine allgemeingültige Aussage über die Eignung von Motoren für den Pflanzenölbetrieb nicht gemacht werden kann. Es ist eine Einzelprüfung von Motortypen notwendig.

Bei der Durchführung der Forschungsarbeit hat die Firma Hatz, Ruhstorf, das Vorhaben durch die Bereitstellung des Motors und von Ersatzteilen unterstützt. Die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit in Eschborn hat einen Teil der Forschungsmittel bereitgestellt. Herr Dipl.-Ing. G. Vellguth, Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft in Braunschweig, war bei der Auswertung der Kolbensauberkeit behilflich. Allen gilt der Dank der Autoren.

Schrifttum

- [1] Batel, W., M. Graef, G.-J. Mejer, R. Möller u. F. Schoedder: Pflanzenöle für die Kraftstoff- und Energieversorgung. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 2, S. 40/51.
- [2] Vellguth, G.: Eignung von Pflanzenölen und Pflanzenölderivaten als Kraftstoff für Dieselmotoren. Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 5, S. 177/86.
- [3] Schubert, M.: Pflanzenöle für Dieselmotoren. Studienarbeit, TU Berlin, 1982.
- [4] DIN 51 601 (April 1978): Flüssige Kraftstoffe; Dieselkraftstoff, Mindestanforderungen. Berlin und Köln: Beuth 1978.
- [5] Walt, van der, A.N.: Diesel engine test with sunflower oil as an alternative fuel. 3. Int. Conf. on Energy Use Management; Berlin 1981.
- [6] Peterson, C.L., G.L. Wagner u. D.L. Auld: Vegetable oil substitutes for diesel fuel. ASAE Paper 81-3578, St. Paul, USA 1981.
- [7] Dietrich, W.: Einsatzmöglichkeiten vegetativer Öle und Alkohole beim Betrieb von Dieselmotoren. Bericht der MWM-Diesel-Motorenwerke, Mannheim.
- [8] Van Husen, A. u. M. Kowalke: Pflanzenöle, eine Alternative zum Dieselöl? Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 1982.
- [9] Bonde, M. u. B. Hamphoff: Untersuchung auf die Eignung des Rapsöls für Dieselmotoren. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 1984.
- [10] Mündliche Mitteilung der Firma KHD, Köln: 100 h-Dauertest mit raffiniertem und halbraffiniertem Rapsöl an einem Dreizylinder-Deutz-Dieselmotor.
- [11] Hitzler, G. u. P. Knorsch: Verbesserung der Einsatzmöglichkeit von Pflanzenölen für den Dieselmotor durch konstruktive Maßnahmen am Motor. Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, 1986.
- [12] DIN 51 361, Teil 2 (Juni 1977): Prüfung von Schmierstoffen; Prüfung von Motorschmierölen im MWM-Prüfdieselmotor, Verfahren zur visuellen Beurteilung der Kolbensauberkeit. Berlin/Köln: Beuth 1977.

Bestimmung des Zugkraftbedarfs von Pflügen aus Messungen als Analyse stochastischer Vorgänge

Von Béla Borsa, Gödöllő, Ungarn*)

DK 631.312:531.222:519.216

Viele in der Landtechnik wichtige Größen ergeben sich aus kontinuierlichen stochastischen Vorgängen, bei denen die zeitlich diskretisierten Einzelvorgänge nicht voneinander unabhängig sind. Die stichprobenweise Bestimmung kennzeichnender Größen, beispielsweise des wahren Mittelwertes, muß daher die Beziehungen zwischen den diskretisierten Einzelvorgängen berücksichtigen.

Dieser Beitrag untersucht mit Hilfe der Autokorrelationsfunktionen, welcher Stichprobenabstand beim Pflügen eine zuverlässige Bestimmung des Zugkraftbedarfs ermöglicht. Ausgehend von diesem Stichprobenabstand werden die Werte der Meßdauer ermittelt, die für die Bestimmung des Zugkraftbedarfs mit bestimmtem relativem Fehler und bestimmter Konfidenz notwendig sind.

*) Dipl.-Ing. Dr. B. Borsa ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Meßtechnik des Instituts für Landtechnik (Dir.: Dr. Gyula Bánházi) in Gödöllő, Ungarn.

1. Einführung, Problemerkörterung

Zahlreiche unter Feldbedingungen durchgeführte Messungen in der Landtechnik beruhen auf Signalen, die aus zufälligen Prozessen mit kontinuierlichen Zeitparametern stammen, z.B.:

- zwischen Kraft- und Arbeitsmaschine bzw. in der kinematischen Kette der Arbeitsmaschine ablaufende Prozesse des Energieflusses (z.B. Zugkraft, Antriebsmoment)
- Schwingungs- und Schwankungsprozesse an bestimmten Rahmenpunkten (Ortsänderung, Beschleunigung)
- aus den technologischen Prozessen bzw. aus der Ortsänderung an den Rahmen entstehende Vorgänge der Beanspruchung und daraus folgend die an den verschiedenen Rahmenpunkten entstehenden Spannungszustände.

Die betrachteten Signale stammen erfahrungsgemäß aus zufälligen Vorgängen, die über innere Beziehungen verfügen, Bild 1.

Bei der Projektierung von Messungen dieser korrelierten Prozesse ist die Frage aufzuwerfen, über welche Zeit Messungen benötigt werden, um eine Schätzung mit bestimmtem Zuverlässigkeitsniveau und bestimmter Genauigkeit von den Größen des Prozesses (z.B. Erwartungswert, Streuung) zu ermöglichen. In zahlreichen

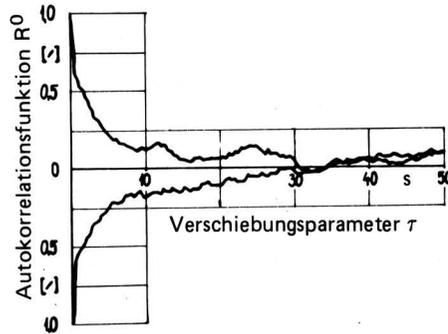
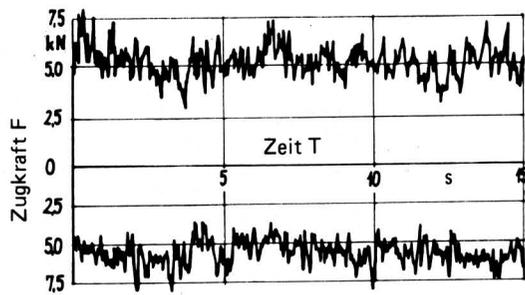


Bild 1. Zugkraftbedarf als sich zufällig ändernde Größe (links) und zugehörige Autokorrelationsfunktion (rechts) für ein verschlissenes gezahntes Pflugschar (A) und ein verschlissenes gerades Pflugschar (B).

Fällen wird zur Verhinderung von Informationsverlusten die möglichst dichte Meßwertaufnahme angestrebt, und die Frage der Unabhängigkeit der Meßwerte bleibt unberücksichtigt. Bei der Anwendung dieser Methode werden die für nicht unabhängige Reihen geltenden ergodischen Sätze zugrunde gelegt [1, 2].

Wenn die für unabhängige Reihen geltenden bekannten Sätze angewendet werden sollen — z.B. bei der Projektierung der Messungen sowie auch bei deren Auswertung — taucht die Frage auf, wie die Meßwerte aufzunehmen sind. Bei einer in jedem Falle Informationsverluste verhindernden, zu häufigen Meßwertaufnahme beinhaltet die Reihe nichtunabhängige und redundante Elemente, andererseits verursacht die zu seltene Meßwertaufnahme Informationsverluste.

Bei feststehender Meßdauer konvergiert z.B. der bestimmte Durchschnittswert nicht zum Erwartungswert, sondern zum linearen Integralmittelwert [1].

Für die untersuchten Prozesse wird vorausgesetzt, daß ihre statistischen Eigenschaften zeitlich stabil sind — der Prozeß ist stationär —, bzw. die Prozeßgrößen (Erwartungswert, Streuung, Autokorrelationsfunktion) können bei einer entsprechend langen Messung auch geschätzt werden — der Prozeß ist ergodisch.

Die Prozeßabschnitte, die offensichtlich nichtstationär sind — wie z.B. Anfahren, Aufladen, Abstellen — werden in der Untersuchung nicht berücksichtigt. Für die Ermittlung der gewünschten Prozeßgrößen, z.B. die Schätzung des Erwartungswertes unter Verwendung der Methode von *W. Giloi* [1], wird die Aufnahme von weitestgehend unkorrelierten Signalreihen angestrebt. Im Falle des normalverteilten Prozesses ist die unkorrelierte Signalreihe gleichzeitig auch unabhängig.

2. Ziel der Untersuchungen

Grundlegendes Ziel ist es, die notwendige Meßzeit, die zur Konfidenzschätzung des Erwartungswertes mit einem bestimmten Niveau und festgelegter Genauigkeit benötigt wird, bei einigen landtechnischen zufälligen Prozessen — insbesondere beim Pflügen — zu schätzen.

Dazu werden bestimmt:

- die inneren Beziehungen des Signals
- der Stichprobenabstand, der weitestgehend unkorrelierte Stichproben ergibt
- die relative Streuung des Prozesses.

3. Mathematische Hilfsmittel

Die Schwierigkeiten der Stichprobenentnahme aus dem Signal werden dadurch verursacht, daß die allgemein vorhandenen inneren Beziehungen der Prozesse nicht die Herstellung der weitestgehend unkorrelierten Stichprobenreihe durch Stichprobenentnahme von beliebiger Dichte ermöglichen. In diesem Problembereich ist die Autokorrelationsfunktion (AKF) bei stationär-ergodischen Prozessen von grundlegender Bedeutung.

Bei normalverteilten Prozessen, die in der praktischen Anwendung eine große Rolle spielen, bedeutet — neben der Kenntnis der ersten Verteilungsfunktion — die Kenntnis der AKF auch die vollständige (der Wahrscheinlichkeitsrechnung entsprechende) Beschreibung des Prozesses: Es können beliebig höhere Verteilungen realisiert werden. Alle Fragen der Stichprobenentnahme im klassischen Sinne stehen mit der AKF im Zusammenhang.

Nach einer möglichen Interpretation der AKF ist diese Funktion eine Beziehung von zwei Werten, die in einer Entfernung τ voneinander liegen und die als abhängige und unabhängige Variable aufgefaßt werden können, also die Meßfunktion der linearen Beziehung der Stichprobenelemente mit einer Entfernung von τ . Hier wird die AKF mit dem Durchschnittswert und mit der Streuung normiert (NAKF). In den Untersuchungen wird in erster Näherung vorausgesetzt, daß Prozesse mit normaler Verteilung vorliegen. Dann ist die NAKF auch die Meßfunktion für die Unabhängigkeit.

Der zur Schätzung des Erwartungswertes notwendige Abstand der Stichprobenentnahme Δt ist nach *W. Giloi* [1]

$$\Delta t = \frac{T}{N_T} = 2 I_T,$$

darin drückt

T die Meßzeit

N_T die Elementenanzahl der zur Meßzeit gehörigen unabhängigen Stichprobe

$$I_T = \int_0^T (1 - \frac{\tau}{T}) R^0(\tau) d\tau$$

das Integral mit der normierten AKF $R^0(\tau)$ aus.

Hier ist

$$R^0(\tau) = \frac{R(\tau) - M^2}{\sigma^2},$$

worin

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) x(t + \tau) dt$$

die zum zufälligen Prozeß $x(t)$ gehörende AKF mit dem Erwartungswert M und der Streuung σ ist.

Die Konfidenzschätzung des Erwartungswertes unter Verwendung der aus der Realisation $\bar{x}(t)$ des zufälligen Prozesses im Abstand Δt entnommenen Stichprobe ist

$$P(\bar{x} - \epsilon \leq M(\xi) \leq \bar{x} + \epsilon) = p$$

oder

$$P(1 - \epsilon_R \leq \frac{M(\xi)}{\bar{x}} \leq 1 + \epsilon_R) = p \quad (1).$$

Hier sind

$$\epsilon = t_p \frac{s_x}{\sqrt{n}} \text{ der absolute Fehler} \quad (2)$$

$$\epsilon_R = \frac{\epsilon}{\bar{x}} \text{ der relative Fehler} \quad (3)$$

p die Sicherheit

t_p^{n-1} der entsprechende Wert der Student-Verteilung.

Die Differenz zwischen den Erwartungswerten zweier normalverteilter Prozesse ist bei gleichen Streuungen und n Stichprobenelementen

$$P(\bar{x} - \bar{y} - t_p^{2n-1} s \sqrt{\frac{2}{n-1}} \leq M(\xi) - M(\eta) \leq \bar{x} - \bar{y} + t_p^{2n-1} s \sqrt{\frac{2}{n-1}}) = p \quad (4)$$

Führt man die Bezeichnung

$$D = M(\xi) - M(\eta)$$

bzw. für deren empirische Entsprechung

$$\hat{D} = \bar{x} - \bar{y}$$

ein und setzt für den festlegbaren absoluten Fehler

$$\epsilon = t_p^{2n-1} s \sqrt{\frac{2}{n-1}},$$

dann ergibt sich für den relativen Fehler der Differenz

$$\epsilon_R = \frac{\epsilon}{\hat{D}} \quad (5)$$

4. Meßbedingungen

Den Untersuchungen wurden Messungen mit einem Aufsattelpflug Typ RIH 10-720-4-16 zugrunde gelegt, der für die Messungen umgestaltet wurde, Bild 2.

Der Pflug wurde so ausgerüstet, daß der Zugkraftbedarf von drei Pflugkörpern einzeln bzw. der gesamte Zugkraftbedarf des Pfluges gemessen werden kann. Am Pflug wurden zwei Arten von Pflugscharen montiert: einerseits das vom Hersteller mit gerader Schneide, andererseits ein sog. gezahntes Pflugschar mit der Bezeichnung PFSZ-2, das sich noch in der Entwicklung befindet.

Im Hinblick auf den Zustand der selbstschärfenden, hartmetallbeschichteten Pflugschare wurden zwei Kategorien gebildet und dementsprechend Messungen mit fabrikneuen, sog. "scharfen" und mit "verschlissenen" Pflugscharen (nach 12 ha Pflugarbeit) durchgeführt. Die verschiedenen Pflugschararten wurden zum Teil miteinander kombiniert, Bild 3, andererseits wurde der Pflug aber auch mit einer Sorte von Pflugscharen gemessen. Grundsätzlich wird angenommen, daß die gleichzeitig an den einzelnen Pflugkörpern durchgeführten Messungen als voneinander unabhängig angesehen werden können.

Die durchschnittlichen Geschwindigkeiten während der Meßfahrten waren in den drei Gängen des Schleppers: 7,7–8,0 km/h, 6,8–7,0 km/h und 5,6–5,8 km/h. Alle Messungen fielen in eine Meßstrecke von 1050–1500 m.

Außerdem werden noch Meß- und Berechnungsergebnisse erwähnt, die aus Messungen des Zugkraftbedarfs am ersten Pflugkörper eines Aufsattelpflugs KLC 5M45 und des gesamten Zugkraftbedarfs der Aufsattelpflüge Rabewerk Kleiber CS-III/80 (fünfscharig), RIH 10-720-6-16 (sechsscharig) und Kverneland CC (sechsscharig) stammen. Als Zugmaschine wurde ein Raba Steiger 245 eingesetzt. Einen Überblick über die bei den verschiedenen Messungen vorliegenden Bedingungen gibt Tafel 1.



Bild 2. Meßeinrichtung, bestehend aus Meßwagen, Schlepper T150K und dem Meßpflug.



Bild 3. Meßpflug mit verschiedenen Schararten an den Pflugkörpern.

Pflugtyp	Arbeits-		Boden-			Art	Oberfläche
	Tiefe	Breite	Feuchte	Dichte	Festigkeit n. Arany		
	cm	cm	%	g/cm ³			
RIH 10-720-4-16	25–29	156–164	16–20	1,34–1,54	42	Lehm	Weizenstoppel, geschält
KLC 5M45	26	46	9	1,50	38	Lehm	Weizenstoppel, steinig
RIH 10-720-6-16	29–30	236	26–28*)	1,21–1,43	51	Lehm	Maisstoppel, nach Häckseln
Rabewerk	31	200					
Kverneland CC	30	240					

*) Die letzten drei Pflüge wurden auf demselben Feld gemessen.

Tafel 1. Bedingungen.

5. Ergebnisse der Messungen und Berechnungen

5.1 Die Autokorrelationsfunktion

Für jede Messung wurde die NAKF des Zugkraftsignals bestimmt, teilweise auf die Pflugkörper bezogen, teilweise (bei gleichen Pflugkörpern) auf den Pflug bezogen. Als Grundansatz wurde angenommen, daß die NAKF des gesamten Zugkraftbedarfs des Pfluges mit gleichen Pflugkörpern im gleichen Gang mit der NAKF des Zugkraftbedarfs der einzelnen Pflugkörper übereinstimmt. Wenn also

- die Zugkraftvorgänge der einzelnen Pflugkörper voneinander unabhängig sind
 - ihre Erwartungswerte und Streuungen übereinstimmen und
 - der Rollwiderstand der Pflugräder unberücksichtigt bleibt,
- dann ist diese Annahme gültig.

Beweis: Es sei ξ_j der Zugkraftbedarf des j-ten Pflugkörpers als Wahrscheinlichkeitsvariable, deren Erwartungswert gleich M, deren Streuung σ , deren AKF $R(\tau)$ und deren NAKF $R^0(\tau)$ ist. Unter Verwendung der für die unabhängigen Variablen gültigen Sätze existieren folgende Zusammenhänge für das Summensignal bei einem Pflug mit i Pflugkörpern:

$$\text{Erwartungswert: } M_{\Sigma} = i M$$

$$\text{Streuung: } \sigma_{\Sigma} = \sqrt{i} \sigma$$

$$\text{rel. Streuung: } \sigma_{R\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{i}} \frac{\sigma}{M}$$

$$\text{AKF: } R_{\Sigma}(\tau) = i(i-1)M^2 + iR(\tau) \quad (6).$$

Damit wird

$$R_{\Sigma}^0(\tau) = \frac{R_{\Sigma}(\tau) - i^2 M^2}{i^2 \sigma^2} = \frac{R(\tau) - M^2}{\sigma^2} = R^0(\tau),$$

was zu beweisen war.

Die Konsequenzen hieraus sind:

- der Abstand der Stichprobenentnahme für den gesamten Zugkraftbedarf des Pfluges ist gleich dem Abstand, der für einen Pflugkörper bestimmt wurde
- der relative Fehler der Schätzung für den Erwartungswert des Gesamtzugkraftbedarfs reduziert sich bei i Pflugkörpern im Vergleich mit einem Pflugkörper auf den Wert $1/\sqrt{i}$.

Als Beispiel zeigt Bild 4 vier NAKF: jeweils eine für einen Pflugkörper mit geraden bzw. gezahnten Pflugscharen und jeweils eine für einen Pflug mit den genannten Pflugscharen.

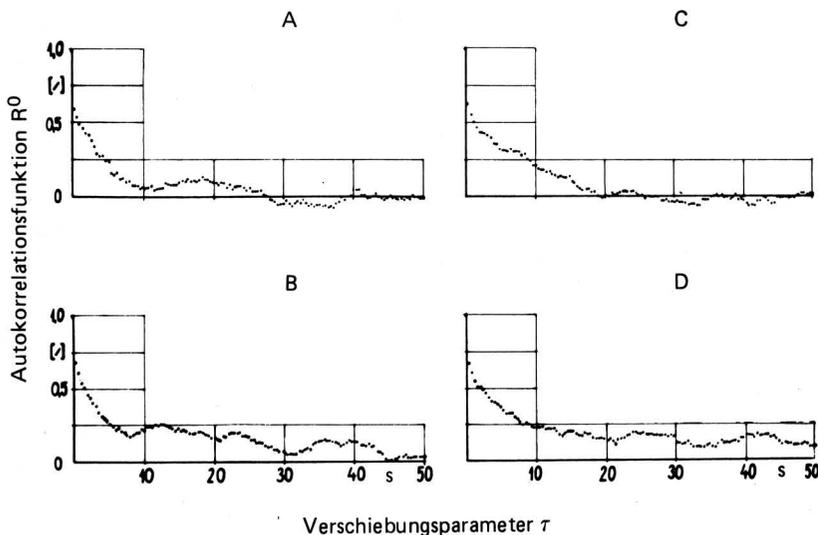


Bild 4. Normierte Autokorrelationsfunktionen für einzelne Pflugkörper bzw. für Pflüge mit verschiedenen Schararten.

- A Pflugkörper mit scharfem geradem Schar
- B Pflugkörper mit scharfem gezahntem Schar
- C Ges. Pflug mit scharfen geraden Scharen
- D Ges. Pflug mit scharfen gezahnten Scharen

Davon ausgehend bietet sich die Möglichkeit, eine Konfidenzschätzung für die NAKF abzugeben, beim Pflugkörper mit scharfem, geradem Pflugschar anhand von 7 und beim Pflugkörper mit scharfem, gezahntem Pflugschar anhand von 6 Messungen, Bild 5.

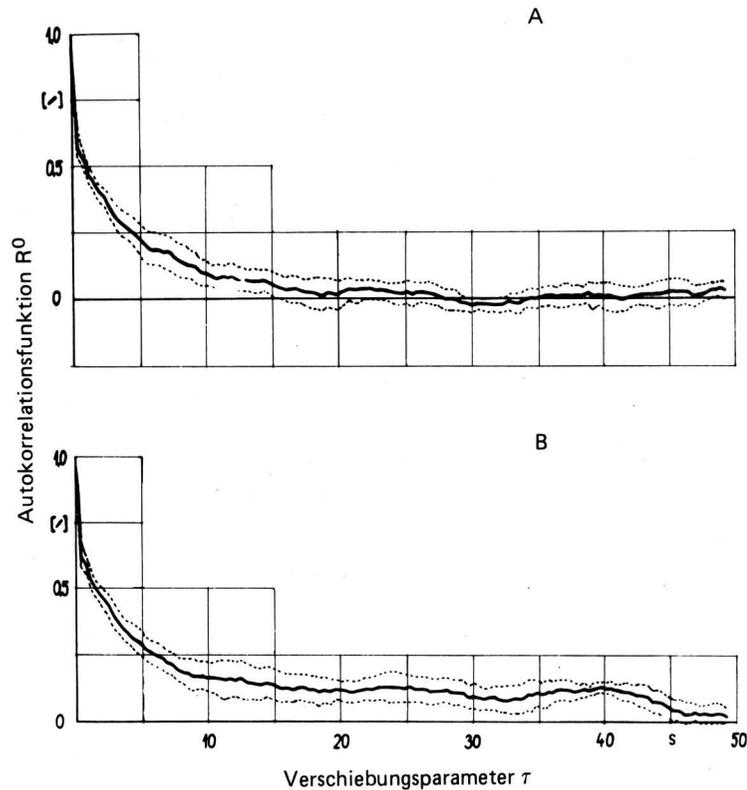


Bild 5. Normierte Autokorrelationsfunktion mit 95 %-Konfidenzintervallen für Pflugkörper mit verschiedenen Schararten.

- A Scharfes, gerades Schar, N = 7
- B Scharfes, gezahntes Schar, N = 6

5.2 Untersuchungen zum Abstand der Stichprobenentnahme

Nach dem Ergebnis des vorigen Abschnitts stimmen die NAKF der Zugkraft des Pfluges und die NAKF des Zugkraftbedarfes eines Pflugkörpers in gleichen Gängen miteinander überein. Für den Fall eines scharfen Pflugschares läßt sich auch die Frage untersuchen, ob der Erwartungswert und die Streuung des Abstandes der Stichprobenentnahmen von der Arbeitsgeschwindigkeit abhängen. Es wurde angenommen, daß die Abstände der Stichprobenentnahmen normalverteilt sind, und nachdem die Tests (F-, t- bzw. Welch-Test) auf dem Niveau von 95 % und 99 % wiederholt durchgeführt waren, wurde festgestellt, daß die Streuung und der Erwartungswert der Abstände der Stichprobenentnahmen auf dem Niveau von 99 % immer gleich, auf dem Niveau von 95 % jeweils einmal ungleich waren.

Nachdem aufgrund dieser Feststellungen die Stichproben für Δt aus der Sicht der Arbeitsgeschwindigkeit zusammengefaßt werden können, wäre die nächste Frage, ob die Erwartungswerte und die Streuungen von Δt für scharfe, verschlissene, gerade bzw. gezahnte Pflugschare gleich sind. Die Tests (6mal durchgeführt) führten zu folgendem Resultat: auf dem Niveau von 95 % ergaben sich in einem Fall verschiedene Erwartungswerte und zweimal verschiedene Streuungen, auf dem Niveau von 99 % konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Daraus ist die Folgerung zu ziehen, daß der Erwartungswert und die Streuung des Stichprobenabstandes sich für unterschiedlichen Zustand und verschiedene Arten der Pflugschare nicht unterscheiden.

Demnach kann aus den Ergebnissen von sämtlichen Untersuchungen die folgende Konfidenzschätzung für den Erwartungswert des Stichprobenabstandes abgeleitet werden:

$$P(7,61 \leq M(\Delta t_i) \leq 9,61) = 95\%$$

$$P(7,28 \leq M(\Delta t_i) \leq 9,94) = 99\%$$

dabei wurden folgende Meßwerte verwendet:

$$\text{Mittelwert: } \bar{\Delta t}_i = 8,61 \text{ s}$$

$$\text{Streuung: } s_{\Delta t} = 3,20 \text{ s}$$

$$\text{Stichprobenumfang: } n = 42$$

Auch wurde mit Hilfe des χ^2 -Tests geprüft, ob für Δt_i eine Normalverteilung vorliegt, und gefunden, daß auf dem Niveau von 95 % für Δt_i eine Normalverteilung anzunehmen ist. Obwohl aus dem Ergebnis für die Übereinstimmung der Stichprobenabstände nicht die Gleichheit der NAKF folgt — da das Integral I_T auch bei verschiedenen NAKF gleich sein kann —, wird trotzdem die aus 42 Messungen berechnete NAKF mit ihrer Konfidenzschätzung auf 95 % gezeigt, Bild 6.

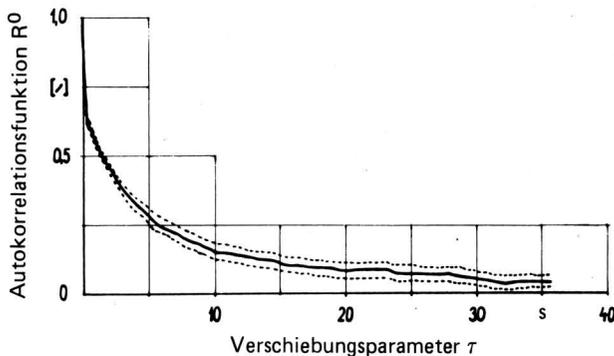


Bild 6. Aus 42 Messungen mit verschiedenen Schararten und bei unterschiedlicher Geschwindigkeit resultierende normierte Autokorrelationsfunktion mit 95 %-Konfidenzintervall.

Unter Verwendung der Methode von *Laning-Battin* [3, 1] wurde auch die bestmögliche Näherung der resultierenden NAKF bestimmt, die mit einer Reihe von Exponentialfunktionen möglich ist.

Man erhält die analytische Funktion

$$R^0(\tau) = 1,65 \exp(-c \tau) - 8,26 \exp(-2 c \tau) + 18,83 \exp(-3 c \tau) - 11,79 \exp(-4 c \tau) - 7,93 \exp(-5 c \tau) + 8,37 \exp(-6 c \tau),$$

für die

$$c = c_{\text{opt}} = 0,12 \text{ und } |c_{\text{Fehler}}| < 0,02$$

und die mittlere quadratische Abweichung zwischen der analytischen und der empirischen NAKF 0,0187 beträgt. Wenn also die NAKF in der Form

$$R^0(\tau) = \sum_{k=1}^n A_k \exp(-k c \tau)$$

geschrieben wird, dann ergibt sich der Zusammenhang

$$\Delta t = 2 I_T = \frac{2}{c} \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{k} - \frac{2}{c^2} \sum_{k=1}^n \frac{1 - \exp(-k c T)}{T}$$

für den Stichprobenabstand nach dem Integrieren. Damit ist in unserem Fall $\Delta t = 7,78$ s. Die Stichprobenabstände, die für die anderen vier Pflüge ermittelt wurden, zeigt Tafel 2.

Pflugtyp	Stichprobenabstand		Probenzahl	Bemerkungen
	Mittelwert s	Streuung s		
KLC 5M45	6,66	2,73	4	1. Pflugkörper
RIH 10-720-6-16	7,34	7,93 (I)	4	Gesamtzugkraft des Pfluges
Rabewerk	6,84	2,57	6	
Kverneland CC	4,69	2,90	4	

Gewogener Mittelwert aus sämtlichen Messungen $N = 60$: 7,96 s.

Tafel 2. Charakteristische Werte für den Stichprobenabstand bei den verschiedenen Pflügen.

5.3 Relative Streuung der Zugkraft

Nach dem, was in Abschn. 3 ausgeführt wurde, u.a. Gln. (2) u. (3), ist auch die Kenntnis der relativen Streuung für die Schätzung der Erwartungswerte der Zugkraft notwendig.

Eine normale Verteilung der relativen Streuung voraussetzend, lieferten die Untersuchungen für einzelne Pflugkörper folgende Ergebnisse:

- bei scharfen Pflugscharen erwies sich der Erwartungswert der relativen Streuung als von der Geschwindigkeit unabhängig; das wird auch für verschlissene Pflugschare angenommen
- bei verschiedenen Sorten von Pflugscharen und verschiedenem Verschleißzustand (gerade, gezahnt, verschlissen, scharf) war kein Unterschied zwischen den Erwartungswerten der relativen Streuung festzustellen.

Eine ähnliche statistische Analyse für den gesamten Pflug war wegen des kleinen Stichprobenumfanges nicht durchzuführen. Es wird angenommen, daß auch hier die Messungen zusammengefaßt werden können. Auf dieser Grundlage ergeben sich die folgenden Schätzungen des Erwartungswertes der relativen Streuung:

- für einen Pflugkörper:

$$P(19,3 \leq M(s_R) \leq 20,4) = 95\%$$

$$P(19,1 \leq M(s_R) \leq 20,6) = 99\%$$

$$\text{mit Mittelwert } \bar{s}_R = 19,8\%$$

$$\text{Streuung } s_{sR} = 1,52\%$$

$$\text{Anzahl der Stichproben } n = 34$$

- für den gesamten Pflug:

$$P(11,1 \leq M(s_R) \leq 13,8) = 95\%$$

$$P(10,4 \leq M(s_R) \leq 14,5) = 99\%$$

$$\text{mit Mittelwert } \bar{s}_R = 12,5\%$$

$$\text{Streuung } s_{sR} = 1,64\%$$

$$\text{Anzahl der Stichproben } n = 8$$

$$\text{Anzahl der Pflugkörper: } 4$$

Die für die anderen Pflüge errechneten Werte der relativen Streuung sind in Tafel 3 zusammengefaßt. Hier sind in der letzten Spalte auch die berechneten Werte der relativen Streuung aufgeführt, die für die in Abschn. 5.1 festgelegten Bedingungen mit Gl. (6) ermittelt wurden.

Es bleibt zu bemerken, daß der Mittelwert der relativen Streuung für den ersten Pflugkörper des Pfluges KLC 5M45 aus vier Messungen 36,6 % (!) und die Streuung 5,7 % betragen.

Pflugtyp	relative Streuung		Stichprobenzahl	Pflugkörperzahl	rel. Streuung eines Pflugkörpers (berechnet)
	Mittelwert	Streuung			
	%	%			%
RIH 10-720-6-16	11,3	1,30	4	6	27,7
Rabewerk	8,3	1,17	4	5	18,6
Kverneland CC	8,2	0,50	3	6	20,1

Tafel 3. Relative Streuungen für den Gesamtzugkraftbedarf von Pflügen.

6. Projektierung von Messungen

6.1 Schätzung des Zugkraftbedarfs eines Pflugkörpers

Nach den Untersuchungsergebnissen scheint die Annahme folgender Grunddaten wirklichkeitsnah zu sein

- Stichprobenabstand: 8 s
- relative Streuung: 20 %.

Hiervon ausgehend, ist die Konfidenzschätzung des Erwartungswertes des Prozesses mit dem relativen Fehler ϵ_R und der Sicherheit p unter Verwendung von Gl. (1) möglich, wobei Gl. (3) folgendermaßen geschrieben werden kann:

$$\epsilon_R = t_p^{N-1} \frac{s_{xR}}{\sqrt{N}} = t_p^{\frac{T}{\Delta t}} s_{xR} \sqrt{\frac{\Delta t}{T}}$$

Darin ist

- t_p^{N-1} der Tabellenwert der Student-Verteilung
- s_{xR} die rel. Streuung des Zugkraftprozesses
- Δt der Stichprobenabstand beim Zugkraftprozeß
- T die Meßzeit.

Bild 7 zeigt die zur Schätzung des Erwartungswertes benötigte Meßzeit T in Abhängigkeit vom relativen Fehler ϵ_R und der Sicherheit p . Ob sie auch ausreichend ist, sollte eine Analyse der jeweiligen Messung zeigen, wie es in dieser Arbeit dargelegt wurde. Die Beziehung

$$T = (t_p^{N-1} s_{xR})^2 \frac{\Delta t}{\epsilon_R^2} \quad (7)$$

läßt erkennen, daß von den gewählten Ausgangsdaten die relative Streuung den größeren Einfluß auf die notwendige Meßzeit ausübt.

Aus dem Diagramm kann abgelesen werden, daß die notwendige Meßzeit, die zu einer nicht zu strengen Schätzung ($\pm 10\%$ Genauigkeit, 90 % Sicherheit) benötigt wird, etwa 1,5 min beträgt und daß die Meßzeit, die zu einer strengen Schätzung ($\pm 2,5\%$ Genauigkeit, 99 % Sicherheit) benötigt wird, schon etwa 69 min beträgt. In der Praxis, wo eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ und eine Sicherheit von 95 % ausreichend ist, wird eine Meßzeit von 10 min benötigt. Sie bedeutet bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 7–8 km/h eine Meßstrecke von etwa 1200–1300 m.

Wenn für die Ausgangsdaten eine relative Streuung von 30 % angenommen wird, dann erhöhen sich die Meßzeiten – und die Meßstrecken – auf mehr als das 2fache ($(3/2)^2$).

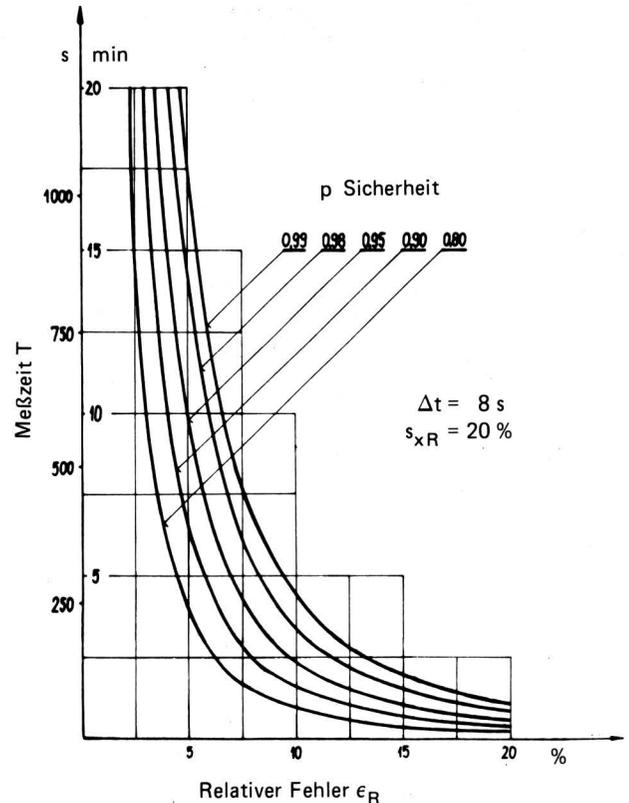


Bild 7. Zur Schätzung des Erwartungswertes für den Zugkraftbedarf eines Pflugkörpers notwendige Meßzeit T in Abhängigkeit vom relativen Fehler ϵ_R und der Sicherheit p .

6.2 Schätzung des Zugkraftbedarfs des Pfluges

Nach den Feststellungen in Abschn. 5.1 steht die relative Streuung der Zugkraft des gesamten Pfluges in engem Zusammenhang mit der relativen Streuung der Zugkraft der einzelnen Pflugkörper (Gl. (6)), bzw. es stimmt der für den Pflug ermittelte Stichprobenabstand mit dem für einen Pflugkörper ermittelten überein. Unter diesen Bedingungen ergibt sich

$$T_{\Sigma} = (t_p^{N-1} s_{xR})^2 \frac{\Delta t}{\epsilon_R^2} \quad (8)$$

Diese Beziehung liefert mit den Ausgangsdaten $s_{xR} = 20\%$ bzw. $\Delta t = 8$ s die Ergebnisse in Bild 8.

Bei einem Pflug mit 5–6 Pflugkörpern soll die Meßzeit zur Erreichung einer Sicherheit von 95 % bei einem relativen Fehler $\pm 5\%$ 1,5–2 min betragen, was bei einer Geschwindigkeit von etwa 7 km/h eine Meßstrecke von 150–250 m bedeutet.

6.3 Projektierung von Vergleichen

Es soll der Zugkraftbedarf eines Pfluges mit dem eines anderen Pfluges verglichen werden, es ist also der Unterschied zwischen den Erwartungswerten der Zugkräfte mit Hilfe von Messungen zu schätzen. Es ist offensichtlich, daß dieser Fall strengere Bedingungen in bezug auf die Meßzeit fordert, da beide Zugkraftsignale sich zufällig ändern.

Hier kann die Projektierung der Messungen ein wenig vom Vorausgegangen abweichend vorgenommen werden.

Als Ausgangsbedingung wird vorausgesetzt, daß beide Vorgänge mit der gleichen Streuung normalverteilt sind und der Stichprobenumfang der Untersuchungen gleich ist. Dann kann vom t-Test ausgegangen werden [4, 5], der auf die einfache Form

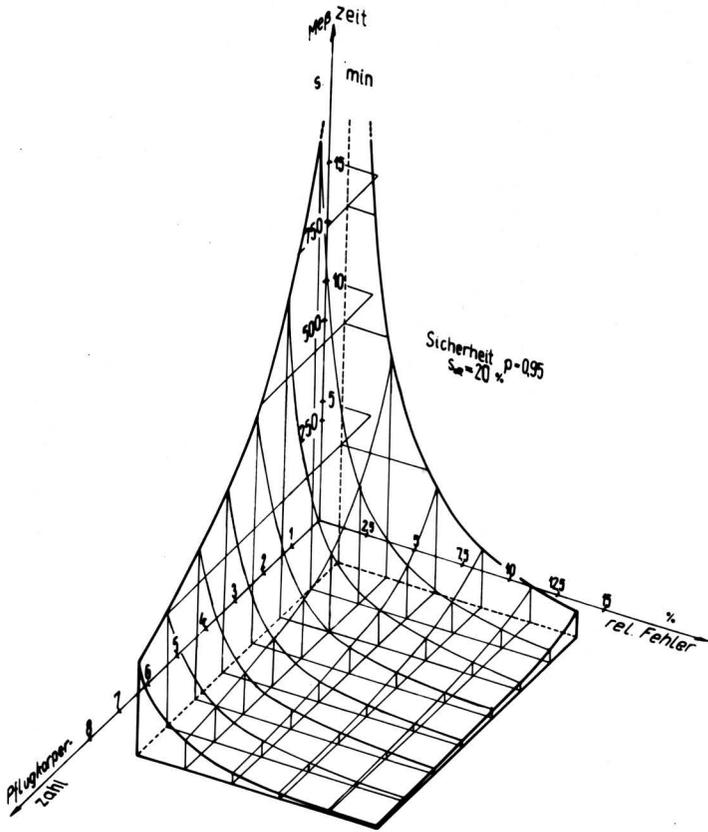


Bild 8. Zur Schätzung des Zugkraftbedarfs eines Pfluges notwendige Meßzeit T in Abhängigkeit von der Zahl der Pflugkörper i und vom relativen Fehler ϵ_R bei einer Sicherheit $p = 0,95$.

$$t_p^{2N-2} = \sqrt{N} \frac{\hat{D}}{\sqrt{s_x^2 + s_y^2}}$$

gebracht werden kann. Daraus folgt

$$N = \frac{T}{\Delta t} = \frac{s_x^2 + s_y^2}{\hat{D}^2} (t_p^{2N-2})^2 \approx 2 \left(\frac{s}{\hat{D}} t_p^{2N-2}\right)^2,$$

und somit kann geschrieben werden

$$T \approx 2 \Delta t \left(\frac{s}{\hat{D}} t_p^{2N-2}\right)^2 = 2 \Delta t \left(\frac{s/\bar{x}}{\hat{D}/\bar{x}} t_p^{2N-2}\right)^2 = 2 \Delta t \left(\frac{s_R}{\hat{D}_R} t_p^{2N-2}\right)^2 \quad (9).$$

Das bedeutet: wenn man den relativen Unterschied \hat{D}_R auf dem Niveau p sichtbar machen will, dann wird dazu mit beiden Pflugkörpern eine Messung mit der Dauer T benötigt. Wenn die Messung durchgeführt ist, und es ergibt sich ein Wert \hat{D}_R , der kleiner ist als die vorgegebene Differenz D_R , dann wird die Verschiedenheit der Erwartungswerte auf dem Niveau p von der Messung nicht bestätigt, die Schätzung der Differenz unter Verwendung von Gl. (4) ist ohne Bedeutung.

Zwei Bemerkungen sind notwendig:

- Für die Schätzung der Meßzeit wird die Näherung $s_x \approx s_y$ verwendet. Es ist deshalb zweckmäßig, bei Kenntnis der wahren Werte den t-Test durchzuführen, ob tatsächlich eine signifikante Differenz zwischen den Erwartungswerten besteht
- In Gl. (9) ist der aus der Tafel abzulesende Wert eine Funktion von N, Gl. (9) ist also eine implizite Funktion von T.

Da aber N allgemein hinreichend groß ist, kann näherungsweise der Wert als geeignete Konstante aus der Tafel abgelesen werden.

Unter Verwendung von Gl. (9) wurde Bild 9 zusammengestellt, das folgendermaßen benutzt werden kann:

- Der in Bild 9 mit Pfeilen gekennzeichnete Bereich rechts von den Kurven p beinhaltet die Punkte (D_R, T) , bei deren Realisierung die Werte der Hypothese $M(\xi) = M(\eta)$ auf dem Niveau p widersprechen. Die relative Differenz D_R ist die Differenz der Erwartungswerte bezogen auf den Erwartungswert des einen Prozesses
- Bei der Projektierung der Messung kann man auch so vorgehen, daß man die notwendige Meßzeit T für eine festgelegte relative Differenz D_R und für ein Niveau p aus dem Diagramm entnimmt
- Man führt mit beiden Pflugkörpern eine Messung mit der Dauer T durch und bestimmt die auftretende relative Differenz \hat{D}_R . Wenn der Punkt (\hat{D}_R, T) sich oberhalb der Kurve mit dem Niveau p befindet, dann ist die Hypothese $M(\xi) = M(\eta)$ zurückzuweisen und unter Verwendung von Gl. (4) der Erwartungswert der Differenz D bzw. mit Gl. (5) ihr relativer Fehler zu schätzen. Im umgekehrten Fall bestätigt die Messung nicht die Verschiedenheit der Erwartungswerte, also ist die Schätzung von D ohne Bedeutung.

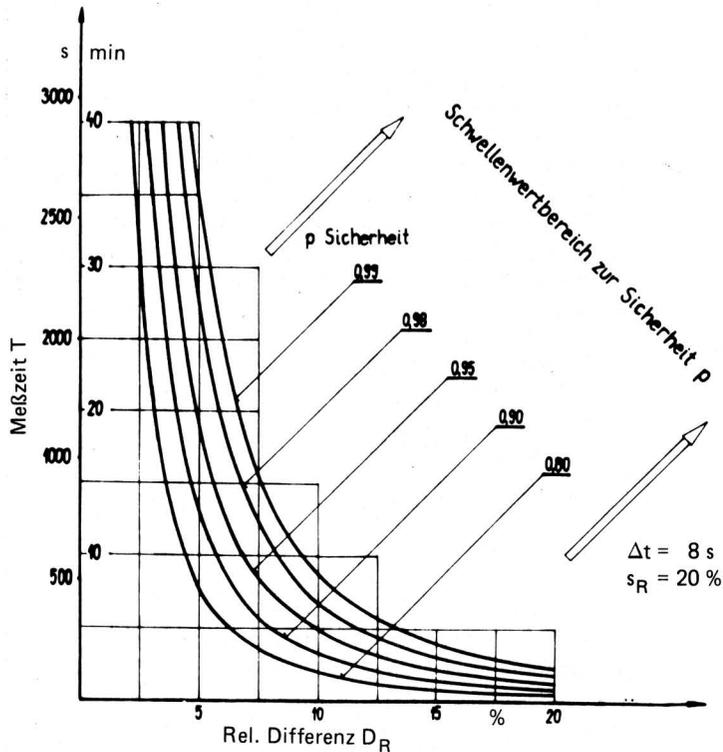


Bild 9. Meßzeit T, die für die Schätzung einer gegebenen relativen Differenz des Zugkraftbedarfs zweier Pflugkörper D_R bei bestimmter Sicherheit p benötigt wird.

In dem unter Praxisbedingungen interessanten Fall - bei der Schätzung einer Differenz von $\pm 5\%$ mit der Sicherheit von 95% - sollte mit beiden Pflugkörpern eine Messung über eine Dauer von 20 min realisiert werden. Wenn zwei Pflüge mit je i Pflugkörpern zur Verfügung stehen, dann ergibt sich mit den Gln. (9) und (6) bei Erfüllung der Ausgangsbedingungen

$$T_{\Sigma} = \frac{T}{i},$$

eine Beziehung, die formal mit der aus den Gln. (7) und (8) abzuleitenden Beziehung völlig übereinstimmt. Es wird also beim Pflug verglichen mit einzelnen Pflugkörpern für den Nachweis der gleichen Differenz auf dem gleichen Niveau nur eine Meßzeit benötigt, die der Anzahl der Pflugkörper umgekehrt proportional ist.

7. Zusammenfassung

Beim Pflügen ergeben sich für die Zugkraft zufällig schwankende Signale, die durch ausgeprägte innere Beziehungen gekennzeichnet sind. Mit der Methode von Giloi [1] wurde die Meßzeit bestimmt, die zur Schätzung des Erwartungswertes auf dem Niveau p und mit dem relativen Fehler ϵ_R aus solchen korrelierten Signalreihen benötigt wird. Dazu war die Erstellung der normierten Autokorrelationsfunktionen der Signale der Zugkraft notwendig. Sie erwiesen sich als relativ langsam abklingende Funktionen. Der hieraus abgeleitete Stichprobenabstand, der weitestgehend unkorrelierte Stichproben sichert, wurde zu 8 s bestimmt. Dieser Wert ergab sich nicht nur für das Zugkraftsignal eines Pflugkörpers, sondern auch für das Gesamtzugkraftsignal des Aufsattelpfluges. Beim Einsatz von verschiedenen Pflugscharen (gerade Schneide, gezahnte Schneide, verschlissen, scharf) und bei unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten (5,6–8,0 km/h) wurden zwischen den Erwartungswerten keine signifikanten Unterschiede gefunden.

Die zweite Größe, die zur Projektierung von Messungen benötigt wird, die relative Streuung des Prozesses, wurde anhand von zahlreichen Messungen bestimmt und ergab sich zu etwa 20 %. Diese Größe kann für den gesamten Zugkraftbedarf eines Pfluges mit i Pflugkörpern mit dem Kehrwert der Quadratwurzel von i multipliziert werden. Der Erwartungswert der relativen Streuung des Zugkraftbedarfes eines Pflugkörpers wurde als von der Gestaltung des Pflugschares und auch von der Arbeitsgeschwindigkeit unabhängig gefunden.

Ausgehend von diesen Ausgangsdaten, wurde für den einzelnen Pflugkörpern und für einen Pflug mit i Pflugkörpern die Meßdauer angegeben, die die Schätzung des Erwartungswertes mit einer Sicherheit von p und einer Genauigkeit von ϵ_R ermöglicht. Für einzelne Pflugkörper ist für eine Schätzung mit einer Sicherheit von 95 % und einer Genauigkeit von ± 5 % eine Meßdauer von 10 min notwendig. Eine Schätzung mit dem gleichen Niveau für die gesamte Zugkraft eines Pfluges mit i Pflugkörpern erfordert eine Meßdauer von $10/i$ min.

In ähnlicher Weise wurde abgeleitet, wie die Zeitdauer der Untersuchung projiziert werden kann, die notwendig ist zum Nachweis der Differenz D_R mit dem Niveau p , die zwischen zwei in ihren Eigenschaften ähnlichen Pflugkörpern bzw. Pflügen besteht.

Zum Nachweis einer Differenz des Zugkraftbedarfs von ± 5 % (mit einer Sicherheit von 95 %) zwischen zwei Pflugkörpern wird eine Meßdauer von 20 min für die beiden Pflugkörper benötigt. Beim Vergleich von Pflügen, die über i Pflugkörper verfügen, soll – ähnlich wie zuvor – eine Meßdauer von jeweils $20/i$ min geplant werden.

Wie bei der Schätzung des Erwartungswertes ist auch bei der Schätzung der Differenz zwischen den Erwartungswerten die notwendige Meßzeit dem Quadrat der relativen Streuung des Zugkraftprozesses und dem Kehrwert der Anzahl der Pflugkörper proportional.

Anhand der wiedergegebenen Diagramme kann die Dauer der Messungen einfach bestimmt werden. Bei anderen Ausgangsdaten kann sie mit Hilfe der dargelegten Zusammenhänge vorausberechnet werden.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] • Giloi, W.: Simulation und Analyse stochastischer Vorgänge. München/Wien: R. Oldenbourg 1967.
- [2] • Korn, G.A. u. T.M. Korn: Mathematical handbook for scientists and engineers. Ungar. Ausgabe; Budapest: Müszaki Könyvkiado 1973.
- [3] • Laning, J.H. u. R.H. Battin: Random processes in automatic control. New York/Toronto/London: McGraw-Hill 1956.
- [4] • Graf, V., H.J. Henning u. K. Stange: Formeln und Tabellen der mathematischen Statistik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer 1966.
- [5] • Vincze, I. u. K. Sarkadi: Mathematical methods of statistical quality control. Budapest: Akademia Könyvkiado 1974.
- [6] • Otnes, R.K. u. L. Enochson: Digital time series analysis. New York/London/Sydney/Toronto: John Wiley & Sons 1972.

Veranstaltungen der VDI-Fachgruppe Landtechnik 1987

Nachdem am 7./8.5.1987 in der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, schon ein Kolloquium "Mikroelektronik in der Agrartechnik für den Umweltschutz" stattgefunden hat, verbleiben auf dem Plan für das Jahr 1987 noch zwei Veranstaltungen, die ebenfalls die VDI-Fachgruppe Landtechnik gemeinsam mit der Max-Eyth-Gesellschaft durchführen wird:

45. Tagung Landtechnik
22./23. Okt. 1987, Stadthalle Braunschweig

Kolloquium
"Mikroelektronik in der Innenwirtschaft"
7./8. Dez. 1987, Forschungsanstalt für Landwirtschaft,
Braunschweig-Völkenrode.



VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1987
Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Braunschweig

Printed in Germany. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil dieser Schriftenreihe darf in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikrokopie oder ein anderes Verfahren – ohne schriftliche Genehmigung des Verlages, auch nicht auszugsweise, reproduziert werden. – All rights reserved (including those of translation into foreign languages). No part of this issue may be reproduced in any print, microfilm, or any other means, without written permission from the publishers. – Herstellung: Druckerei Ruth, Braunschweig.