

Auswirkungen einer Reduzierung der Schwankungen für Funktionen mit zwei Variablen mit Zufallscharakter

Von Bela Borsa und Andras Fekete, Gödöllő, Ungarn*)

DK 519.23

Die Betriebsparameter von Landmaschinen weisen aufgrund äußerer Belastungsänderungen bestimmte Schwankungen auf. Ziel von Regel- und Anzeigevorrichtungen ist es, diese Schwankungen in bestimmten Grenzen zu halten. Dazu ist es notwendig zu wissen, wie sich die Eigenschaften einer zufällig schwankenden, unabhängigen Variablen auf die Eigenschaften einer zweiten abhängigen Variablen auswirken. In dieser Studie wird für zwei verschiedene Formen der Abhängigkeit zwischen den Variablen (Polynom bzw. Exponentialfunktion) der Einfluß der unabhängigen Variablen auf Erwartungswert und Standardabweichung der abhängigen Variablen abgeleitet.

1. Einführung, Problemerkörterung

Unter Feldbedingungen sind die Landmaschinen zum größten Teil zufälligen Einwirkungen ausgesetzt. Die Analyse der Auswirkungen sich ändernder Belastung auf die Betriebsparameter der Maschinen gewinnt durch die zunehmende Verbreitung von Anzeige- und Regeleinrichtungen für die Belastung an Aktualität. Bei der Anwendung verschiedener Regeleinrichtungen wird angestrebt, Maschinenparameter in bestimmten Wertebereichen zu halten, um die Schwankungen der Belastung zu reduzieren und eine Erhöhung der Leistung zu erreichen. In dieser Studie wird ein möglicher Ansatz für die Lösung dieser Aufgabe analysiert. Es wird aufgezeigt, welche Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden können, wenn bestimmte Abhängigkeiten zwischen Belastungsparametern bestehen.

Der Problematik des Einflusses der sich ändernden Belastung auf die Betriebsverhältnisse des Schleppermotors haben sich bereits mehrere Wissenschaftler gewidmet [1 bis 5]. Das Wesentliche dieser Arbeiten kann in der Erkenntnis zusammengefaßt werden, daß eine Verminderung der Streuung eines Belastungsparameters (z.B. Zugkraft) günstigere Betriebsverhältnisse sichert (z.B. Erhöhung der Zugleistung, Senkung des spezifischen Kraftstoffverbrauches).

Es wird im folgenden gezeigt, daß dieser Erkenntnis ein allgemeingültiger Zusammenhang zugrunde liegt, dessen jeweilige praktische Ableitung beim Betrieb von Maschinen, die anderen zufälligen Einwirkungen ausgesetzt sind, angestrebt werden sollte. Die nachfolgend aufgeführten Beispiele stellen zwei Anwendungsgebiete dieser Methode dar.

Die Autoren danken Dipl.-Math. Laszlo Gaal für die unterstützenden Hinweise und für das Ableiten des Zusammenhanges.

*) Dipl.-Ing. Dr. Bela Borsa ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Meßtechnik, Dr.-Ing. Andras Fekete leitet die Abteilung Automatisierung im Institut für Landtechnik (Direktor: Dr.-Ing. habil Gyula Banhazi) MEMMI Gödöllő, Ungarn.

2. Ziel

Das Ziel unserer Arbeit ist es aufzuzeigen, wie die Eigenschaften einer zufällig schwankenden, unabhängigen Variablen – erster Belastungsparameter – die Eigenschaften einer mit ihr in streng deterministischem Zusammenhang stehenden abhängigen Variablen – zweiter Belastungsparameter – beeinflussen. Unser weiteres Ziel war die Analyse dieser Beziehung bei Mähreschern und beim Maschinensystem Schlepper/Bodenbearbeitungsgerät.

3. Auswirkungen zufälliger Schwankungen der unabhängigen Variablen bei deterministischer Funktionsbeziehung

Wenn eine stetige Wahrscheinlichkeitsvariable (im weiteren WV) mit der Dichtefunktion $f(x)$ gegeben ist, dann ist

$$M_{\xi j} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_{\xi 1})^j f(x) dx \quad (1)$$

das j -ste zentrale Moment mit dem Erwartungswert $m_{\xi 1}$ und die Varianz

$$M_{\xi 2} = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_{\xi 1})^2 f(x) dx \quad (2),$$

die als existent angenommen werden. Des weiteren wird angenommen, daß eine WV η existiert, die mit der WV ξ in dem funktionalen Zusammenhang

$$y = y(x) \quad (3),$$

steht. Dann ist der Erwartungswert der WV η – bei stetiger Funktion $f(x)$ –:

$$m_{\eta} = \int_{-\infty}^{\infty} y(x) f(x) dx \quad (4),$$

vorausgesetzt, daß das Integral absolut konvergent ist. Die Bestimmung des Integrals kann in Hinsicht auf $f(x)$, aber auch in Hinsicht auf $y(x)$ Probleme verursachen. Theoretisch besteht die Möglichkeit, einen oder beide Bestandteile des Integrals der Taylor-Transformation zu unterziehen. Hier wird sie für den Zusammenhang Gl. (3) angewendet für den mit x_0 bezeichneten Erwartungswert $x_0 = m_{\xi 1}$ der WV ξ ; dabei wird vorausgesetzt, daß die Taylor-Reihe existiert und den Zusammenhang Gl. (3) auch herstellt:

$$y(x) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(x - x_0)^i}{i!} y^{(i)}(x_0) \quad (5).$$

Gl. (5) wird in Gl. (4) eingesetzt und – angenommen, daß man mit $f(x)$ gliedweise multipliziert und integrieren kann – ergibt sich:

$$m_{\eta} = y(x_0) + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{1}{i!} y^{(i)}(x_0) M_{\xi i} \quad (6).$$

Wenn man annimmt, daß die WV ξ normalverteilt ist, dann gilt:

$$m_{\eta} = y(x_0) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{y^{(2i)}(x_0)}{i! \cdot 2^i} D_{\xi}^{2i} \quad (7).$$

Hier wurde ausgenutzt, daß die WV ξ über ein Zentralmoment verfügt, das von gerader Ordnung und mit der Standardabweichung beschreibbar ist. Nach ähnlichen Überlegungen ist die Varianz der WV η auf der Grundlage der Gln. (2) und (4) (nur die Näherung dritter Ordnung aufgeschrieben):

$$D_{\eta}^2 \approx D_{\xi}^2 [y'(x_0)]^2 + y'(x_0) y''(x_0) M_{\xi_3} + \frac{1}{12} [4 y'(x_0) y'''(x_0) M_{\xi_4} + 3 y''(x_0)^2 M_{\xi_4} - 3 y''(x_0)^2 M_{\xi_2}^2] \quad (8)$$

Bei Gültigkeit der Gl. (3) wird die Existenz von zwei Vorgängen vorausgesetzt, deren Erwartungswerte x_0 gleich, für die aber die Verteilungen der zugehörigen WV $\xi(k)$ ($k = 1, 2$) unterschiedlich sind. Dann kann nach Gl. (6) der Erwartungswert $m_{\eta(k)}$ der WV $\eta(k)$ ($k = 1, 2$) wie folgt aufgeschrieben werden:

$$m_{\eta(k)} = y(x_0) + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{1}{i!} y^{(i)}(x_0) M_{\xi_i(k)} \quad (k=1, 2) \quad (9)$$

Für die Differenz gilt:

$$m_{\eta(1)} - m_{\eta(2)} = \sum_{i=2}^{\infty} \frac{1}{i!} y^{(i)}(x_0) (M_{\xi_i(1)} - M_{\xi_i(2)}) \quad (10)$$

Interessant ist hier, daß in der Gleichung der Erwartungswert x_0 der WV $\xi(k)$ ($k = 1, 2$) nicht erscheint.

4. Einführung von Regressionen, Konsequenzen

In den meisten in der Praxis vorkommenden Fällen ist Gl. (3) leider strenggenommen nicht gültig. Es muß daher angenommen werden, daß Gl. (3) nicht unbedingt einen deterministischen Zusammenhang darstellt, sondern nur näherungsweise die Beziehung zwischen x und y ausdrückt. Die Beziehung nach Gl. (3) wird von uns auch deshalb als eine Regressionsbeziehung akzeptiert, weil wir ihre genaue Form nicht kennen, aber wir setzen voraus, daß sie anhand von Messungen oder aus theoretischen Überlegungen geschätzt werden kann. Andererseits ist es ein häufiger Fall, daß zwischen den WV ξ und η ein komplexer Zusammenhang mit mehreren Unbekannten gültig ist. Als Beispiel dienen folgende zwei Fälle:

- bei Mähreschern die WV ξ für das Dreschtrommeldrehmoment und die WV η für die Körnerverluste;
- bei Schleppern die WV ξ für das Motordrehmoment und die WV η für die Motordrehzahl.

Es wird vorausgesetzt, daß bei bestimmten Aufgaben bestimmte Funktionsgleichungen mehr oder weniger gültig sind und eine Näherung mit Messungen nachgewiesen werden kann. In diesem Sinne ist diese Studie eine mögliche näherungsweise Beschreibung der erwähnten Beispiele.

Bei einem gegebenen Problem wird also Gl. (3) einer Funktionsklasse zugeordnet und ihre Parameter werden geschätzt. Bei unseren Untersuchungen wurden - in Erwägung der praktischen Anwendungen und ohne die allgemeinen Möglichkeiten auszuschließen - zwei Funktionstypen ausgewählt: die sog. unvollständigen Polynome:

$$y = a x^n + b \quad (11)$$

und die Exponentialfunktionen:

$$y = c \exp(d x) \quad (12)$$

Nachfolgend wird untersucht, welche Folgerungen gültig sind, wenn die Differenz nach Gl. (10) unter Verwendung der Gln. (11) und (12) gesucht wird. Die Ergebnisse können als genau angesehen werden, wenn Gl. (3) streng gültig ist, sonst nur als Näherung.

5. Anwendung von Regressionen

5.1 Unvollständige Polynomfunktion

Wenn Gl. (11) nach Gl. (5) der Reihenbildung unterzogen wird, nimmt Gl. (6) folgende Form an:

$$m_{\eta} = a x_0^n + b + a \sum_{i=2}^n \binom{n}{i} x_0^{n-i} M_{\xi_i} \quad (13)$$

Das führt - vorausgesetzt, daß die WV ξ normalverteilt ist - ausgehend von Gl. (7) zu folgender Form:

$$m_{\eta} = a x_0^n + b + a \sum_{i=1}^{\lfloor n/2 \rfloor} \frac{n(n-1) \cdot \dots \cdot (n-2i+1)}{i! \cdot 2^i} \cdot x_0^{n-2i} D_{\xi}^{2i} \quad (14)$$

Hier bedeutet $[\]$ die Bildung von ganzen Zahlen. Gl. (14) wird analog zu Gl. (10) angewendet. Dann gilt für die Veränderung des Erwartungswertes der WV η bei $\xi(k)$ ($k = 1, 2$) mit gleichem Erwartungswert x_0 , aber unterschiedlicher Verteilung (da $\xi(k)$ normalverteilt ist, mit unterschiedlicher Standardabweichung):

$$\begin{aligned} n=2: m_{\eta(1)} - m_{\eta(2)} &= a (D_{\xi(1)}^2 - D_{\xi(2)}^2) \\ n=3: m_{\eta(1)} - m_{\eta(2)} &= 3a x_0 (D_{\xi(1)}^2 - D_{\xi(2)}^2) \\ n=4: m_{\eta(1)} - m_{\eta(2)} &= 6a x_0^2 (D_{\xi(1)}^2 - D_{\xi(2)}^2) + 3a (D_{\xi(1)}^4 - D_{\xi(2)}^4) \end{aligned} \quad (15)$$

für drei verschiedene Werte von n . Es fällt auf, daß bei $n=2$ die Veränderung des Erwartungswertes der WV η nur von der Standardabweichung der WV $\xi(1)$ und $\xi(2)$ abhängig und die Richtung der Veränderung eine Funktion des Vorzeichens des Parameters a ist.

5.2 Exponentielle Funktion und deren Konsequenzen

Nachdem Gl. (12) nach Gl. (5) der Reihenbildung unterzogen wurde, erhält man für Gl. (6):

$$m_{\eta} = c \exp(d x_0) + \sum_{i=2}^{\infty} \frac{c d^i}{i!} M_{\xi_i} \exp(d x_0) \quad (16)$$

Wenn die WV ξ normalverteilt ist, dann ist die WV η logarithmisch normalverteilt mit dem Erwartungswert:

$$m_{\eta} = c \exp\left(d x_0 + \frac{d^2 D_{\xi}^2}{2}\right) \quad (17)$$

und mit der Varianz:

$$D_{\eta}^2 = m_{\eta}^2 [\exp(d^2 D_{\xi}^2) - 1] \quad (18)$$

(Die Gleichungen können auch durch Integration der Gl. (4) abgeleitet werden.)

6. Anwendungsmöglichkeiten

6.1 Abhängigkeit zwischen Motordrehmoment und -drehzahl beim Schleppermotor

Bei Prüfstanduntersuchungen von Schleppermotoren ist die Aufnahme der Abhängigkeit zwischen Drehmoment und Drehzahl, Bild 1, eine der wichtigsten Aufgaben. Diese Abhängigkeit wird auch statische Kennlinie genannt, da hier die unabhängige Variable Drehmoment ein eingestellter Wert mit der Standardabweichung von nahezu Null ist.

Die Kennlinien werden in den Untersuchungen als der Gl. (3) ähnelnde Abhängigkeiten betrachtet, die annähernd, also nicht streng gültig sind. Deshalb besitzen die sich daraus ergebenden Folgerungen auch nur annähernd Gültigkeit.

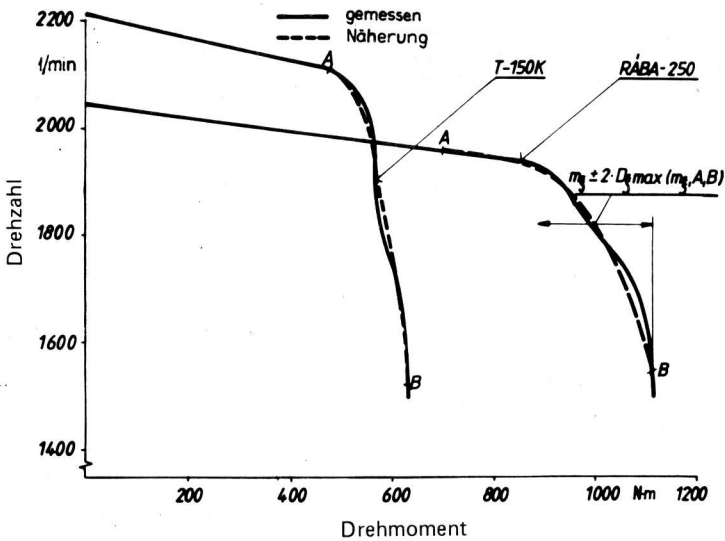


Bild 1. Motordrehmoment-Drehzahl-Kennlinien der Schlepper RABA-250 und T-150K.

Die Kennlinie wird – vorausgesetzt, daß Gl. (11) näherungsweise Gültigkeit hat – auf der Abregellinie mit $n = 1$, auf der Vollastlinie mit $n = 4$ durch die Gleichung

$$y = a(x - c)^4 + b \quad (19)$$

beschrieben. Im weiteren – da es kein Mißverständnis mehr verursacht – wird die Bezeichnung $x_0 \equiv m_\xi$ eingeführt. Auf dem linearen Abschnitt gilt:

$$\left. \begin{aligned} m_\eta &= a m_\xi + b \\ D_\eta &= |a| D_\xi \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Auf den Erwartungswert m_η der Drehzahl η hat die Standardabweichung des Drehmomentes ξ keinen Einfluß. Die Kennlinie gliedert sich in zwei Bereiche, hier gilt die einfache lineare Transformation.

Auf der Vollastlinie, wo die Krümmung ungleich Null ist, können unter Verwendung von Gl. (19) – vorausgesetzt, daß das Drehmoment normalverteilt ist – die Gln. (14) und (8) in der Form:

$$m_\eta = b + a(m_\xi - c)^4 + 6a(m_\xi - c)^2 D_\xi^2 + 3a D_\xi^4 \quad (21)$$

$$D_\eta \approx |4a(m_\xi - c)^3| D_\xi \quad (22)$$

aufgeschrieben werden. In Bild 1 wurde die für den Abschnitt AB gültige und mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate nach Gl. (19) ermittelte Näherung als gestrichelte Linie eingezeichnet; die Parameter und die Gültigkeitsbereiche sind in **Tafel 1** zusammengefaßt. Beide Schlepper haben Vierradantrieb, der T-150K hat eine Leistung von 125 kW und eine Masse von 7 t, für den RABA-250 gilt: 184 kW und 12 t.

Aus Gl. (21) ist zu entnehmen, daß bei $D_\xi = 0$ der statische Fall eintritt. Bei Kenntnis der statischen Kennlinie besteht also die Möglichkeit, Vorgänge unter dynamischen Bedingungen zu analysieren. Da $a < 0$, verringert bei konstantem Erwartungswert eine Vergrößerung der Standardabweichung des Drehmomentes den Erwartungswert der Drehzahl und somit der Leistung. Die Abhängigkeit nach Gl. (21) ist in **Bild 2** dargestellt.

Das mit durchgezogenen Linien eingezeichnete Dreieck entstand aus folgenden Überlegungen:

Für den Drehmomentenverlauf kann die erzwungene aber sehr praktische Randbedingung festgelegt werden, daß der Endpunkt des Bereiches für den Erwartungswert mit zweifacher Standardab-

weichung auf den jeweiligen naheliegenden Endpunkt des Abschnittes AB (Bild 1) fällt mit der folgenden Interpretation:

$$D_{\xi \max} = \begin{cases} \frac{m_\xi - m_{\xi A}}{4} & \text{wenn } m_{\xi A} \leq m_\xi \leq \frac{m_{\xi A} + m_{\xi B}}{2} \\ \frac{m_{\xi B} - m_\xi}{4} & \text{wenn } \frac{m_{\xi A} + m_{\xi B}}{2} < m_\xi \leq m_{\xi B} \end{cases}$$

Damit wurde ein Drehmomentenverlauf definiert, der mit einer Wahrscheinlichkeit von $p \approx 0,952$ in diesen Bereich fällt. So beinhaltet in der Praxis das Dreieckfeld den Erwartungswert der Drehzahl. Zur weiteren Information wurde mit der Strich-Punkt-Linie der Flächenteil eingezeichnet, der bei Begrenzung auf die einfache Standardabweichung realisiert werden kann. Für den Schlepper RABA-250 wurden bei Mitteltieflockerung Variationskoeffizienten von 7,8–8,6 % und beim Pflügen auf mittelbindigem Lehmboden 8,1–10,8 % gemessen. Damit erweist sich die Wahl von $2D_\xi$ als eine günstige Näherung.

Motor	a 1/min (N m) ⁴	b 1/min	c N m	Gültigkeitsgrenzen Motordrehmoment N m		mittlere quadratische Abweichung 1/min
				unten	oben	
RABA-250	$-7,361 \cdot 10^{-9}$	1961	630	700	1115	24,7
T-150K	$-1,556 \cdot 10^{-7}$	2132	380	480	630	21,7

Tafel 1. Parameterwerte und Gültigkeitsgrenzen von Gl. (19) als Näherung für die Vollastlinie der Motoren RABA-250 und T-150K.

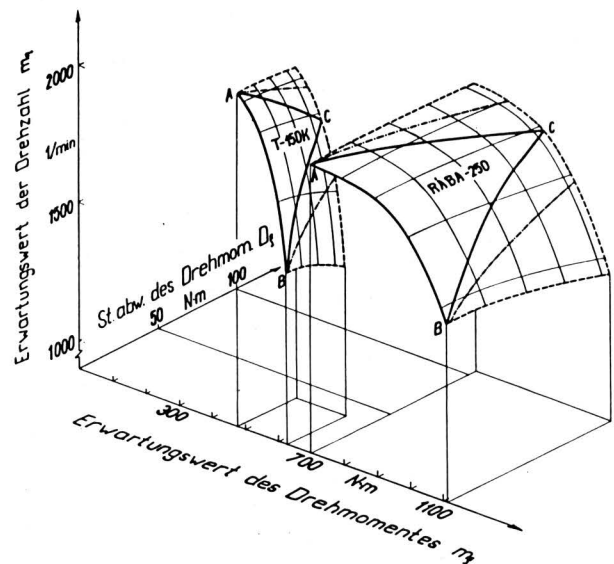


Bild 2. Erwartungswert der Drehzahl in Abhängigkeit von Erwartungswert und Standardabweichung des Drehmomentes für die Motoren RABA-250 und T-150K.

— Standardabweichung von $2D$
 - - - Standardabweichung von $1D$

Die in Richtung der Achse für die Standardabweichung des Drehmomentes abfallende Fläche zeigt die Abnahme des Erwartungswertes der Drehzahl. Wenn ein in der Praxis häufiger Betriebszustand – beide Motoren arbeiten im Vollastbereich mit dem Erwartungswert gleich Nenndrehmoment – betrachtet wird, dann erlaubt die größtmögliche Standardabweichung des Drehmomentes einen Variationskoeffizienten von etwa 6,4 % bei dem weniger

elastischen Motor des T-150K und von etwa 10,0 % beim Motor des RABA-250. Für diesen Betriebszustand wurde in Bild 3 die relative Leistungsabnahme, bezogen auf statische Bedingungen, für den Fall eines konstanten Erwartungswertes des (Nenn-) Drehmoments aufgetragen.

Ähnliche Analysen können für das System Schlepper/Arbeitsmaschine durchgeführt werden unter Verwendung der Zugkraft-Kennlinien. Die Art der Abhängigkeit zwischen Zugkraft ξ und der WV η (z.B. Zugleistung, Schlupf, spez. Kraftstoffverbrauch, Arbeitsgeschwindigkeit) bestimmt den Charakter des zu erwartenden Ergebnisses. Wenn also der gekrümmte Abschnitt der Gl. (3) untersucht wird, kann festgestellt werden, daß die Reduzierung der Standardabweichung bei unverändertem Erwartungswert der WV ξ den Erwartungswert der WV η erhöht, wenn die Funktion in diesem Abschnitt nach unten konkav ist (z.B. Zugleistung oder Geschwindigkeit), und reduziert, wenn die Funktion in dem Abschnitt nach unten konvex ist (z.B. spezifischer Kraftstoffverbrauch oder Schlupf wird reduziert).

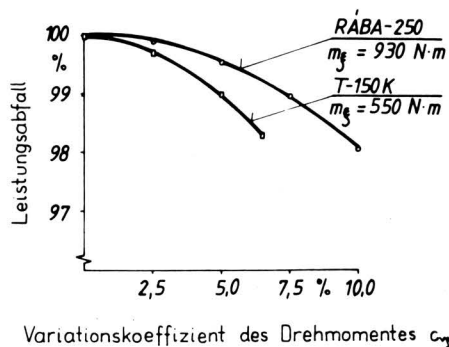


Bild 3. Leistungsabfall als Funktion des Variationskoeffizienten des Drehmoments bei konstantem Erwartungswert des (Nenn-) Drehmoments.

6.2 Abhängigkeit zwischen Dreschtrommeldrehmoment und Verlust beim Mähdrescher

Das nächste Beispiel beschreibt die Untersuchungen zur Abhängigkeit zwischen Drehmoment der Dreschtrommel (ξ , N m) und Schüttlerverlusten (η , %) in der Weizenerte. In diesem Falle ist die Beziehung auch nicht deterministisch, darum sind die dargestellten Ergebnisse nur als Näherung gültig und können nur im Bereich der gemessenen Werte verwendet werden. Aus diesem Grund wurden die Kurven und Flächen in Bild 4 bis 6 begrenzt.

Hier muß — im Gegensatz zu Abschn. 6.1 — berücksichtigt werden, daß drei Variablen des dynamischen Falles aus Messungen zur Verfügung stehen: die Schätzungen des Erwartungswertes und der Standardabweichung für das Dreschtrommeldrehmoment und des Erwartungswertes für die Schüttlerverluste. Es wird vorausgesetzt, daß das Dreschtrommeldrehmoment eine normalverteilte Größe ist — dies wurde auch durch unsere Untersuchungen bestätigt (Chi-Quadrat-Test auf dem Niveau von 95 %) — und eine exponentielle Abhängigkeit besteht, so daß eine Näherung nach Gl. (12) die Gln. (17) und (18) liefert.

Für die Schätzung des Erwartungswertes des Verlustes wird die Methode der kleinsten Quadrate angewendet:

$$m_\eta = 8,887 \cdot 10^{-2} \exp(2,485 \cdot 10^{-2} m_\xi + 3,090 \cdot 10^{-4} D_\xi^2) \quad (23)$$

(Stichprobenumfang: 10; Mittelwert der quadratischen Abweichung: 0,275 %).

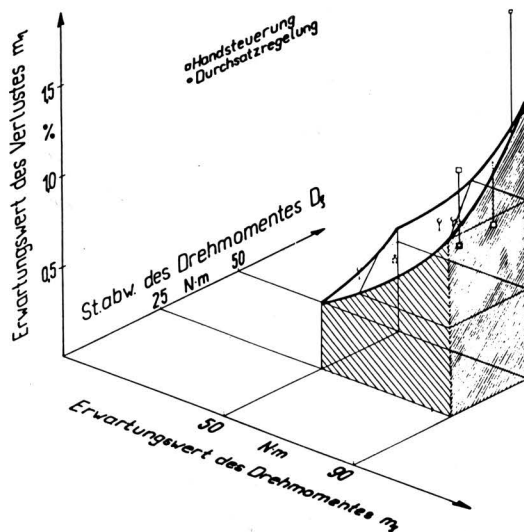


Bild 4. Erwartungswert der Schüttlerverluste in Abhängigkeit von Erwartungswert und Standardabweichung des Dreschtrommeldrehmomentes mit Angabe von Meßpunkten.

Um die sich aus der Reduzierung der Standardabweichung des Dreschtrommeldrehmomentes ergebenden Verminderungen des Verlustes deutlich zu machen, werden zwei Messungen vorgestellt, bei denen die Erwartungswerte des Drehmomentes $m_\xi = 80 \text{ N m}$ gleich, aber die Standardabweichungen $D_{\xi(1)} = 40 \text{ N m}$ bzw. $D_{\xi(2)} = 30 \text{ N m}$ unterschiedlich sind.

Dann ergibt sich

$$m_{\eta(1)} - m_{\eta(2)} = 1,06 - 0,86 = 0,20 \%$$

$$D_{\eta(1)} = 1,38 \%$$

$$D_{\eta(2)} = 0,74 \%$$

für den Verlustverlauf. Bei Einhaltung eines ausgewählten Verlustniveaus $m_{\eta 0}$ kann

$$m_\xi = m_\xi(D_\xi) = \frac{1}{d} \ln \frac{m_{\eta 0}}{c} - \frac{d}{2} D_\xi^2$$

aufgeschrieben werden als Beziehung zwischen der Standardabweichung des Trommeldrehmomentes D_ξ , als unabhängiger Variable, und ihrem Erwartungswert m_ξ , als unabhängiger Variable, Bild 5.

Der Zusammenhang zeigt, wie der Erwartungswert des Dreschtrommeldrehmomentes (und damit auch die Maschinenbelastung) bei konstantem Erwartungswert des Verlustes erhöht werden kann, wenn es möglich ist, die Standardabweichung D_ξ zu reduzieren. Das Ergebnis ist umso günstiger, je weiter die Standardabweichung des Drehmomentes bei immer kleiner werdendem Verlustniveau gesenkt werden kann.

In Bild 5 wurde auch die Standardabweichung des Verlustes und der zugehörige Variationskoeffizient $C_{v\eta}$ dargestellt, beide nehmen bei konstantem Verlustniveau ab, wenn die Standardabweichung des Drehmomentes kleiner wird. Allgemein sinkt die Variabilität des Verlustverlaufes bei Senkung der Standardabweichung des Drehmomentes.

Im folgenden wird der Verlustverlauf in Abhängigkeit vom Erwartungswert des Dreschtrommeldrehmomentes bei konstantem Variationskoeffizienten $C_{v\xi}$ untersucht. Er kann mit

$$m_\eta = c \exp(d m_\xi + \frac{d^2}{2} m_\xi^2 C_{v\xi}^2)$$

beschrieben werden.

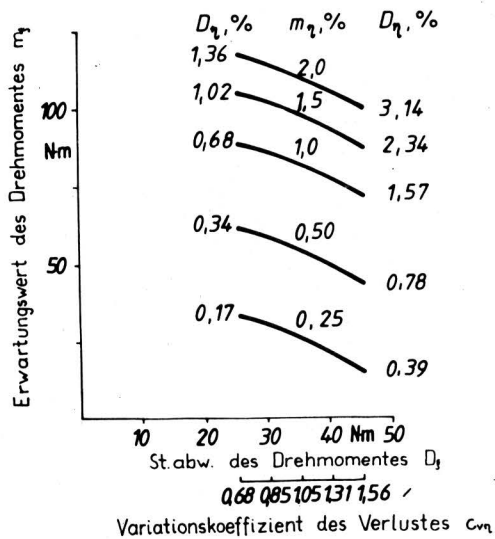


Bild 5. Erwartungswert des Dreschtrommeldrehmomentes als Funktion der Standardabweichung, Verlustniveau als Parameter.

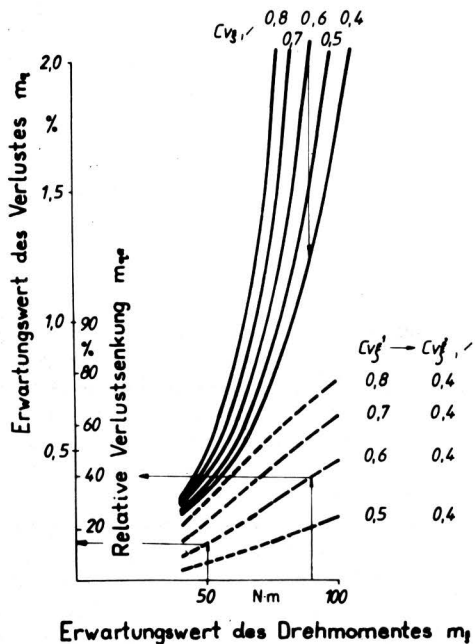


Bild 6. Erwartungswert des Verlustes als Funktion des Erwartungswertes des Drehmomentes bei verschiedenen konstanten Werten des Variationskoeffizienten und relative Verlustsenkung als Funktion des Erwartungswertes des Drehmomentes bei unterschiedlicher Verminderung des Variationskoeffizienten.

Aus Bild 6 ist zu entnehmen, daß eine gleich große Reduzierung des Variationskoeffizienten das Ergebnis stärker positiv beeinflusst, wenn sie bei größerem Drehmoment geschieht. Allgemein hat die mit $m_{\eta R}$ (%) bezeichnete relative Einsparung, die sich in dem Erwartungswert des Verlustes ausdrückt, bei zwei Variationskoeffizienten $C_{v\xi(1)}$ und $C_{v\xi(2)}$ (/), als Funktion des Erwartungswertes des Drehmomentes m_{ξ} folgende Form:

$$m_{\eta R} = \left\{ 1 - \exp \left[\frac{d^2}{2} m_{\xi}^2 (C_{v\xi(2)}^2 - C_{v\xi(1)}^2) \right] \right\} \cdot 100 \%$$

wobei $C_{v\xi(1)} > C_{v\xi(2)}$ und $C_{v\xi(1)}$ die Bezugsgröße (siehe gestrichelte Linien in Bild 6) ist. Das zeigt, daß die Schüttlerverluste mit Reduzierung des Variationskoeffizienten $C_{v\xi}$ von 0,6 auf 0,4 bei dem Erwartungswert von 90 N m von 2,05 % auf 1,25 % gesenkt werden können. Das bedeutet eine relative Verlustsenkung von 40 %. Die gleiche Reduzierung des Variationskoeffizienten bewirkt bei einem Erwartungswert von 50 N m eine Verlustsenkung von 0,41 % auf 0,35 %, die relative Verlustsenkung beträgt also nur 15 %.

Zur Interpretation der Kurven, die als gestrichelte Linien gezeichnet sind, ist zu sagen, daß entlang dieser Kurven die prozentuale Änderung der Standardabweichung des Drehmomentes konstant ist, in dem eben behandelten Fall beträgt sie 33 %.

Bei den Untersuchungen am Mähdrescher wurde — im Gegensatz zu denen an Schleppern — eine indirekte Methode angewendet. Beim Schleppermotor gelten die unter Laborbedingungen ermittelten Kennlinien als statisch (Standardabweichung nahezu Null), in dem Zusammenhang Dreschtrommeldrehmoment-Schüttlerverluste konnten sie als solche kaum interpretiert werden. Es mußten die unter dynamischen Bedingungen (Standardabweichung ungleich Null) meßbaren Mittelwerte und Standardabweichungen genügen, außerdem ist eine Näherungsform (z.B. Gl. (12)) für die Beziehung Gl. (3) vorauszusetzen, woraus die für den dynamischen Fall ableitbare Gl. (17) folgt; für die ist eine Regression durchzuführen, die Gl. (23) ergibt. Es kann so mit Gl. (23) bei $D_{\xi} = 0$ ein fiktiver statischer Fall dargestellt werden. Damit ist die beim Mähdrescher angewendete Methode genau die entgegengesetzte von der beim Schleppermotor. Somit wurde die direkte und die indirekte Methode vorgestellt.

7. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Reduzierung zufälliger Schwankungen, die unter Betriebsbedingungen (auch) bei Belastungsvorgängen von Landmaschinen auftreten, machen die Analyse der Abhängigkeiten zwischen den Parametern notwendig, die sich zufällig verändern. Den Ausgangspunkt bildet dabei die Annahme, daß zwischen zwei zufällig schwankenden Größen eine strenge (deterministische) Abhängigkeit besteht. Daraus können die Eigenschaften der abhängigen Variablen als Funktion der Eigenschaften der unabhängigen Variablen für Abhängigkeiten unterschiedlicher Art abgeleitet werden. In den meisten Praxis-Fällen kann nur eine stärkere oder schwächere regressive Beziehung zwischen beiden Variablen vorausgesetzt werden, daher sind die abgeleiteten Zusammenhänge in diesem Fall mit schwächer werdender Abhängigkeit zunehmend als Näherung zu verstehen. Eine wichtige Bedingung für die Anwendung der Methode ist eine enge Beziehung zwischen den beiden Variablen. Natürlich besteht die Möglichkeit, auch die Methode "breiter" zu gestalten.

Es wurde gezeigt, welche Rolle die Eigenschaften des Belastungsparameters — darunter hauptsächlich die Größe der Schwankungen, die Standardabweichung — für die Veränderung des Erwartungswertes der untersuchten Variablen spielen. Ein qualitativer Parameter für den Transformationszusammenhang zweier Variablen ist die Krümmung der Funktion — im linearen Fall kann keine Einsparung erreicht werden —, und das Vorzeichen der Krümmung definiert die Richtung der Veränderung. Demnach ist mit einer Reduzierung der Schwankungen der Belastungsgröße bei konstantem Erwartungswert eine Erhöhung des Erwartungswertes der untersuchten Größe verbunden, wenn sie in Abhängigkeit von der Belastungsgröße eine nach unten konkave Funktion darstellt. Im entgegengesetzten Fall tritt eine Reduzierung auf. In zwei Beispielen wurde auch der Verlauf der Abhängigkeiten vorgestellt:

- mit Reduzierung der Standardabweichung des Motordrehmomentes am Schlepper nimmt der Erwartungswert für die abgegebene Leistung zu;
- mit Reduzierung der Standardabweichung des Dreschtrommeldrehmomentes am Mähdrescher nimmt der Erwartungswert für die Schüttlerverluste ab.

Es ist zu wünschen, daß Eigenschaften des Funktionsverlaufes für den Zusammenhang zwischen den Variablen (Steilheit, Krümmung) auch bei der Konstruktion der Maschinen an Bedeutung gewinnen. Es ist dabei unabweisbar, daß die Versuche zur Stabilisierung einer Größe in dem komplexen Prozeßfeld abgewogen werden müssen, in dem nach bestimmten Zielstellungen eine Optimierung durchzuführen ist. Darum ist es z.B. beim Pflügen nicht unbedingt vorteilhaft, die Schwankungen der Zugkraft zu reduzieren, weil daraus wahrscheinlich eine ungleichmäßige Arbeitstiefe folgt, was z.B. unter ackerbaulichen Aspekten als unerwünscht gelten kann.

Allgemein kann festgestellt werden, daß die hier vorgestellte Methode geeignet ist für die Analyse, Projektierung und Untersuchung von unterschiedlichsten Wirkungen, die zwischen miteinander in engem Zusammenhang stehenden Variablen bestehen. Im Komplex dieser Zusammenhänge wurde sowohl qualitativ als auch quantitativ gezeigt, welche Bedeutung den Schwankungen der unabhängigen Variablen für den Erwartungswert der abhängigen Variablen zugemessen werden kann.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] •Jofinov, S.A.: *Expluatacia maschino-traktornovo parka*. Moskau: Kolos 1974.
- [2] Skarlet, A.F. u. I.I. Gelman: *Vlijanije njeravnomerosti momenta sovprotivlenija na tjavovije pokasateli traktorov. Traktory i sel'hozmasiny* (1978) Nr. 1, S. 7/9.
- [3] Kawamura, N.: *Performance of draft position control system*. Research Report of Agricultural Machinery 1984/14, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- [4] •Fekete, A.: *Durchsatzregelung von Mähdreschern*. Budapest: Akademiai Kiado 1985, S. 1/85.
- [5] Fekete, A.: *Optimaler Lastbereich des Traktormotors*. Jarmüvek, Mezögazdasági Gepek, Budapest (1987) Nr. 8, S. 289/91.
- [6] •Korn, G.A. u. T.M. Korn: *Mathematical handbook for scientists and engineers*. Ungar. Ausgabe: Budapest: Műszaki Könyvkiado 1973.

Beurteilung von neuen Futtergetreide-Feuchtkonservierungsverfahren mit biochemischem Wirkprinzip

Von Thomas Jungbluth und Gabriele Schneider, Stuttgart-Hohenheim, sowie Ekkehard Fiedler, Rheinstetten-Forchheim*)

DK 664.8.032:664.8.035.7:664.8.039.7:636.084

Zur Feuchtgetreidekonservierung werden neben der Lagerung ganzer Körner im gasdichten Hochsilo zunehmend Verfahren wie Einlagerung von Getreideschrot unter Wasserzusatz im gasdichten Hochsilo und Einlagerung von Getreideschrot im Fahrsilo in der Praxis eingesetzt. Diese Verfahren sind noch weiter zu entwickeln. In praktischen Lagerungs- und Fütterungsversuchen zeigte sich, daß auch diese neueren Verfahren für die Konservierung grundsätzlich geeignet sind und ein hochwertiges Futter für Mastschweine erzeugt werden kann.

1. Einleitung

Zunehmende Verwertung von Getreide in der Fütterung, sinkende Getreidepreise und steigende Energiekosten haben zur Verbreitung von Feuchtkonservierungsverfahren geführt.

Bei den chemischen Verfahren wird durch Einsatz von Propionsäure oder Harnstoff eine pH-Wert-Verschiebung im Futterstock bewirkt, wodurch für die Mikroorganismen ungünstige Bedingungen geschaffen werden [1]. Zusätzlich werden durch die bakterizide bzw. fungizide Wirkung Mikroorganismen abgetötet. Nachteilig können sich bei diesen Verfahren die hohen variablen Kosten auswirken.

*) Dr. T. Jungbluth ist Akademischer Rat, Dipl.-Ing. agr. G. Schneider ist wissenschaftliche Angestellte am Institut für Agrartechnik, Fachgebiet Verfahrenstechnik in der Tierproduktion und landwirtschaftliches Bauwesen (Leiter: Prof. Dr. Th. Bischoff) der Universität Hohenheim; Dr. E. Fiedler ist Leiter der Landesanstalt für Schweinezucht in Rheinstetten-Forchheim

Das Wirkprinzip der biochemischen Feuchtkonservierungsverfahren beruht auf der Veratmung des Restsauerstoffs im Behälter und der Bildung einer CO₂-Atmosphäre bzw. bei höheren Feuchten auf einer Milchsäurebildung und damit einhergehender pH-Wert-Absenkung. Das bekannteste Verfahren ist die Lagerung ganzer Körner im gasdichten Hochsilo, ein Verfahren, mit dem erntefeuchtes Getreide sicher konserviert werden kann und dessen Konservat eine gute Futterqualität aufweist [2].

In den letzten Jahren wurde als neues Verfahren die Einlagerung geschroteten Materials unter Wasserzusatz entwickelt. Dieses Verfahren bietet sich für Schweinemastbetriebe an, die Getreide oder CCM flüssig verfüttern [3 bis 6]. Für CCM hat die Flüssigkonservierung schon eine gewisse Verbreitung in der Praxis gefunden, für Getreide aber ist sie noch im Erprobungsstadium [7].

Ein weiteres Verfahren ist die Lagerung geschroteten Getreides im Fahrsilo. Eine Lagerung von Getreideschrot im Holzhochsilo wurde bisher noch nicht erprobt. Da bei diesen Verfahren der nicht gasdichten Lagerung während der Entnahme Luftzutritt an die Gutoberfläche möglich ist, wird das Getreide sofort nach der Ernte geschrotet und kann bis zu einem Feuchtegehalt von 20 % ohne Propionsäurezusatz konserviert werden. Teilweise wird, wenn mit einem höheren Feuchtegehalt als 20 % eingelagert wird, ein Propionsäurezusatz zur Sicherung empfohlen [8, 9].

Für die Verwertung durch Mastschweine ist neben dem Nährstoffgehalt die Schrotfeinheit eine wichtige Einflußgröße. Bei Trockengetreide werden optimale Mastleistungen erreicht, wenn 80 % der Partikel kleiner als 1 mm sind [10]. Für Feuchtgetreide liegen zur optimalen Partikelgröße noch keine ausreichenden Kenntnisse vor, einige Arbeiten weisen darauf hin, daß auch eine gröbere Zerkleinerung tolerierbar ist [11 bis 14].

Bei erntefeuchtem Getreide kann die geforderte Zerkleinerung (80 % der Partikel kleiner als 1 mm) bei ausreichend hohen Durch-