

# Experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten von Tierwaagen

Dipl.-Ing. C. Lankow/Dipl.-Ing. H. Reichart, Forschungszentrum für Tierproduktion Dummerstorf-Rostock der AdL der DDR

## Verwendete Formelzeichen

A, B	m	Amplitudenwerte
b	N·s/m	Dämpfungskonstante
c <sub>w</sub>	N/m	Federkonstante der Wägezellen
f <sub>0</sub>	s <sup>-1</sup>	Eigenfrequenz der Plattform in belastetem Zustand
F <sub>DYN</sub>	N	dynamischer Kraftanteil, als Wechselkraft definiert
F <sub>N</sub>	N	Nennkraft der Wägezellen Typ 10126 (5 kN)
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung (Fallbeschleunigung)
h(m)		Klassenhäufigkeit der Momentanwerte
h( $\bar{m}$ )		Klassenhäufigkeit der Momentanmittelwerte
m	kg	Masse der Meßeinrichtung
m <sub>0</sub>	kg	Masse der Meßeinrichtung einschließlich der aufgetragenen Zusatzmassen
m <sub>L</sub>	kg	Masse des lebenden Tiers
m <sub>p</sub>	kg	Masse der Wägeplattform
m <sub>x</sub>	kg	mittlerer Fehler des Mittelwerts der Meßstichprobe
m <sub>z</sub>	kg	aufgetragene Zusatzmasse (Kalibriermasse)
N		Gesamtanzahl der Impulse (402)
n		Anzahl der Perioden der auseinanderliegenden Maxima der Amplitudenwerte
p( $\bar{m}$ )		Wahrscheinlichkeitswert der Verteilungsdichte von m <sub>i</sub>
s	N/m	Federsteifigkeit des Wägesystems
s <sup>2</sup>	kg	Varianz der Meßstichprobe
s <sub>p</sub>	N/m	Federsteifigkeit der Wägeplattform
t	s	Integrationszeit
v <sub>w</sub>	m	Meßweg bei Nennkraft der Wägezelle Typ 10126 (0,0001 m)
x	m	vertikale Translationsschwingung in x-Richtung
$\bar{x}$	kg	Mittelwert der Meßstichprobe
x(t)	N	Kraftschwingung infolge Tierbewegung unter Stoßerregung
δ	s <sup>-1</sup>	Abklingkonstante
θ		Dämpfungsgrad
σ	kg	Streuung der Meßstichprobe
φ	rad	Phasenverschiebung (Differenz der Nullphasenwinkel zweier gleichfrequenter Wechselgrößen)
Ω	s <sup>-1</sup>	Erregerkreisfrequenz durch das Tier
ω	s <sup>-1</sup>	Eigenkreisfrequenz der Meßeinrichtung im eingeschwungenen Zustand
ω <sub>0</sub>	s <sup>-1</sup>	Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung

## 1. Problemstellung

Die unregelmäßigen Bewegungen der Tiere während des Wägevorgangs erzeugen Schwingungen im Wägesystem und erschweren dadurch die genaue Bestimmung der Lebendmasse. Als Voraussetzung für Maßnahmen zur Verbesserung der Meßgenauigkeit sind sowohl Kenntnisse über das Eigenschwingungsverhalten des Meßsystems als auch über die dynamische Erregung, die durch das sich bewegende Tier verursacht wird, erforderlich [1].

Für die Bestimmung der als Folge der Schwingungen des Meßsystems durch Tierbewegung entstehenden Meßfehler F<sub>DYN</sub> gibt es nur die Möglichkeit der experimentellen Untersuchungen, d. h. Aufbau und Funk-

tionserprobung einer Versuchsanlage sowie Durchführung von Tierversuchen.

## 2. Aufbau der Versuchsanlage

Die Untersuchungen wurden an einer im Forschungszentrum für Tierproduktion Dummerstorf-Rostock entwickelten und gefertigten Sauenwaage durchgeführt. Die Anlage besteht aus einer Abferkelbuch, die verbunden mit einem Wägerahmen (U-Profil 100 × 50 × 6), auf einer statisch bestimmten Dreipunktauflage ruht (Bild 1). Daher sind alle drei Auflager mit Wägezellen vom Typ 10126 des VEB Robotron Meßelektronik „Otto Schön“ Dresden versehen. Aufbau und Prinziplösung, sowohl für die konstruktive Gestaltung der Wägeplattform als auch für die elektronische Erfassungsanlage, sind in [2] ausführlich erläutert. Da unter Einwirkung der Tierbelastung eine elastische Verformung der Wägezellen mit ihren Einbauteilen (Befestigungs-, Zwischen- und Druckplatte) und der Auflagekonstruktion eintritt, wird die Plattform seitlich durch Spannbänder aus Flachstahl in horizontaler Richtung arretiert. Zum Schutz gegen dynamische Überlastung der Wägezellen infolge von Tierbewegungen sind Überlaststützen am Wägerahmen angebracht, da die verwendeten Wägezellen keine eingebaute Überlastsicherung haben. Das System der Meßwerterfassung besteht aus dem HLW-Meßgerät Typ 10057 und einem Digitalteil (Eigenentwicklung) mit Anzeige und digitalem Ausgabekanal (Bild 2). Das HLW-Meßgerät setzt sich aus dem Speise- und Abgleichteil für jede Wägezelle und dem Kanalwähler zusammen. Die Digita-

lisierung erfolgt über einen Analog-Digital-Umsetzer (ADU), der nach dem Charge-Balancing-Prinzip arbeitet. Der digital angezeigte Meßwert läßt sich mit Hilfe verfügbarer Datenerfassungstechnik (Drucker, Lochbandstanzer, Magnetbandgerät) registrieren.

## 3. Versuchsauswertung

### 3.1. Belastungsfunktionscharakter

Die Wägezellen stellen zusammen mit der Wägeplattform ein Schwingungssystem mit geringer Dämpfung dar. Vom angewendeten Meßverfahren gibt es praktisch keine Einschränkung in der dynamischen Meßfähig-

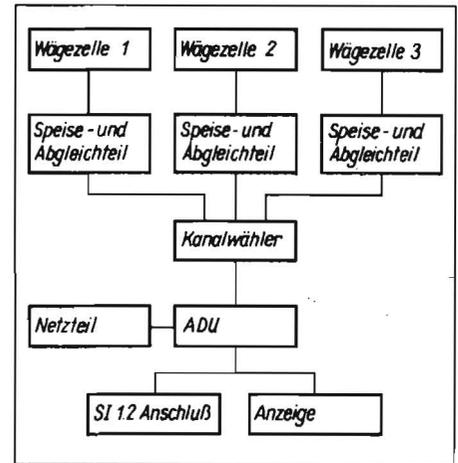


Bild 2. Digitale Wägedatenerfassung

## Bild 1. Aufbau der Versuchsanlage:

a Anschlußwand, b Vorderwand, c Trogsperr, d Trog, e Kabel (kombiniertes HF-Kabel Typ 70301), f Rückwand, g Riegel, h Tür, i Sauenbügel, k Anlenkung (Flachstahl 25 × 6), l Spaltenboden, m U-Profil 100 × 50 × 6, n Wägezelle Typ 10126, o elektronische Auswerteeinheit

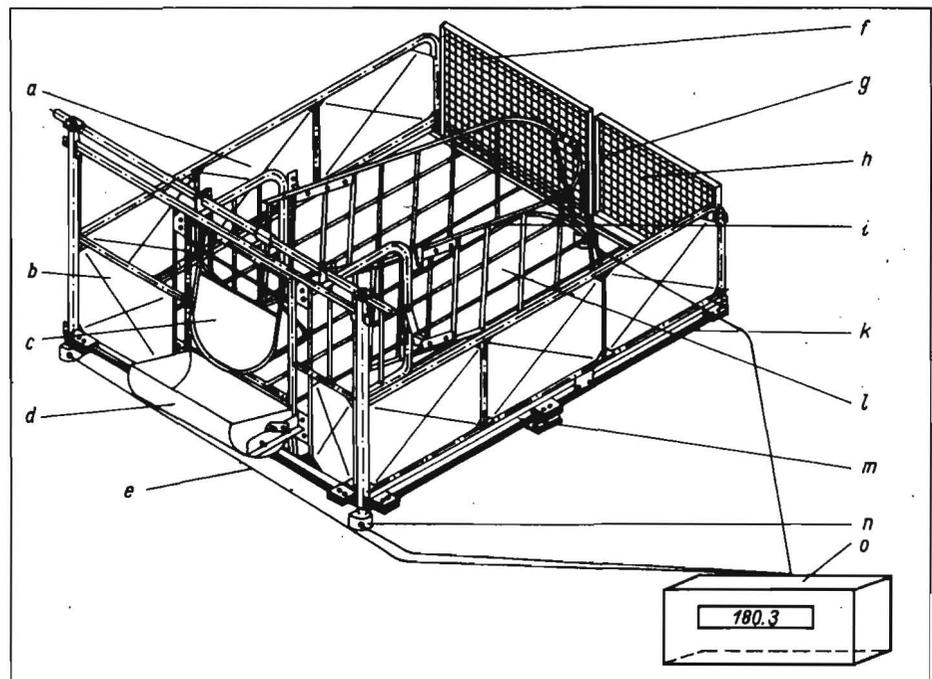
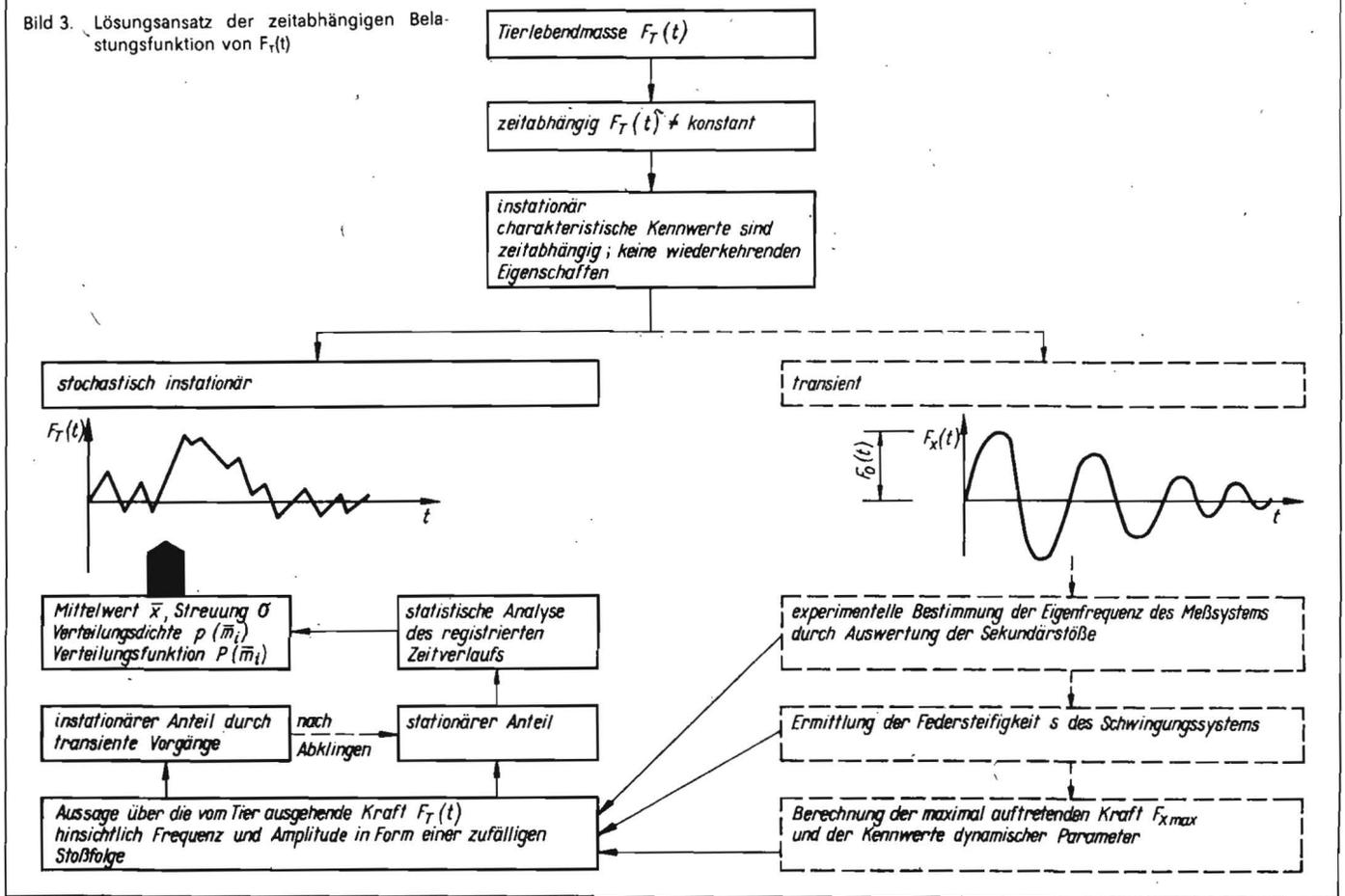


Bild 3. Lösungsansatz der zeitabhängigen Belastungsfunktion von  $F_T(t)$



keit. Bedingung für eine exakte Messung ist aber, daß die Erregung (Eingangsfunktion) und die Parameter<sup>1)</sup> des schwingungsfähigen Systems „Waage“, die das Übertragungsverhalten bestimmen, bekannt sind. Da bei der Lebendmassebestimmung die vom Tier ausgehende Kraft  $F_T(t)$  Erregungsgröße für das Schwingungssystem ist, interessieren die Frequenz und die Amplitude, mit denen diese physikalische Größe wechselt. Der Zeitverlauf des Betrags von  $F_T(t)$  entspricht einer kontinuierlichen stochastischen Funktion, deren Verlauf in stationäre und instationäre Funktionsabschnitte gegliedert werden kann (s. Abschnitt 3.3.). Unter diesen Bedingungen führt eine systematische Gliederung der zeitabhängigen Belastungsfunktion von  $F_T(t)$  auf eine instationäre Funktion (Bild 3). Bei der Prüfung zur Ermittlung der Kennwerte dynamischer Parameter kann das Schwingungssystem unverändert bleiben, wobei aber die Eingangsgröße einer definierten Zeitfunktion folgen sollte.

Aus diesem Grund eignen sich transiente Funktionen<sup>2)</sup> zur Anregung des Wägesystems unter Einwirkung der gemessenen Stoßerregung, da sie einer definierten Zeitfunktion unterliegen (vgl. Bild 3). Dabei muß das Schwingungsverhalten meßtechnisch ermittelt werden, da die Randbedingungen zur

analytischen Lösung des Schwingungsproblems mathematisch nicht beschreibbar sind. Somit erweist sich eine Versuchsdurchführung als notwendig.

### 3.2. Meßtechnische Erfassung und Analyse des Eigenschwingungsverhaltens

Durch Stoßerregung mit Hilfe des freien Falls von Kalibriermassen auf den Schwerpunkt der Wägeeinrichtung erfolgte die Anregung in ein Schwingungssystem. Messungen an Schwingungssystemen zeigen, daß nur wenige Eigenfrequenzen und Schwingformen eine Rolle spielen [3 bis 8].

Es wird angenommen, daß entsprechend der konstruktiven Ausführung (starre Wägeeinrichtung, eindeutige Führung) das Prüfsystem nur eine Eigenfrequenz hat, in der es schwingt, wenn durch einen Stoß Energie eingebracht wird. Unter diesen Voraussetzungen soll für die Klärung spezieller Fragen der Steifigkeits- und Dämpfungsbestimmung unter Stoßerregung ein Schwingungsmodell mit einem Freiheitsgrad genügen (Bild 4). Die Grundschiwingung wird eine vertikale Translationsschiwingung in x-Richtung sein.

Die Aufzeichnung des Stoßverlaufs erfolgte mit einem Acht-Kanal-Lichtstrahlloszillographen 8 LS-1. Dabei wird beim Ausschlagen bei bekannter Masse aus der gemessenen Schwingungsfrequenz die Federsteifigkeit (Federkonstante) und aus dem Abklingen der Schwingung die Dämpfung bestimmt. Gemessen und ausgewertet werden die Sekundärstöße<sup>3)</sup>. Über die Größe der Kräfte

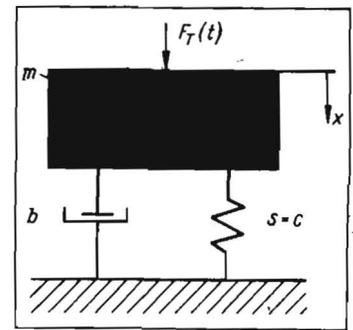


Bild 4. Einfach gedämpftes Feder-Masse-System mit einem Freiheitsgrad als Schwingungsmodell

kann keine Aussage gemacht werden, wenn die Federsteifigkeit des Wägesystems  $s$ , auf das die Masse fällt, unbekannt ist.

#### 3.2.1. Ermittlung der Federsteifigkeiten des Wägesystems

Die Federsteifigkeit des Wägesystems  $s$  setzt sich wie folgt zusammen:

- Federsteifigkeit der Wägeplattform  $s_p$
- Federkonstanten der Wägezellen  $c_w$
- Federsteifigkeit des Fundaments  $s_f$ .

Bezüglich  $s_f$  gilt, daß das Wägesystem zusammen mit dem Fundament durch äußere Stöße nicht in Bewegung gerät, die Fundamentalschwingungen somit ausbleiben, und das Fundament als steif betrachtet werden kann ( $s_f = 0$ ).

Die Federkonstanten der Aufnehmer werden als linear angenommen, obwohl entsprechend dem Meßfehler der Wägezellen eine geringe Abweichung der Übertragungskennlinie bei steigender Meßkraft von der tatsächlichen Sollgeraden zu erwarten ist. Sie

1) die in den Bewegungsgleichungen auftretenden Größen, die durch Massen, Federn, Dämpfer und Erreger im Berechnungsmodell gegeben sind

2) alle Signale, die nur während eines bestimmten Zeitintervalls verschieden von Null sind und sich in unregelmäßiger Reihenfolge wiederholen können [5]

3) Antwort mechanischer Schwingungssysteme auf Primärstöße (Sprung, Rechteckstoß, Halbsinusstoß). Sie zählen zu den transienten Funktionen [4, 5]

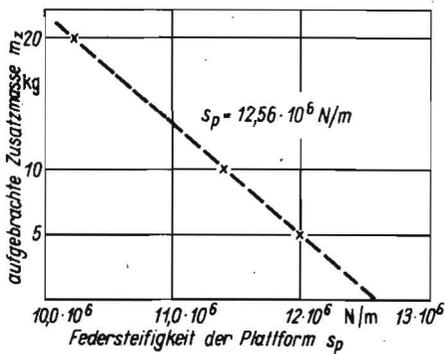


Bild 5. Grafische Ermittlung der Federsteifigkeit der Wägeplattform  $s_p$

ergeben sich zu:

$$c_w = \frac{F_N}{v_w} = 50 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (1)$$

Bei Stoßerregung der Plattform folgt eine vertikale absolute Lageänderung der Plattform, verbunden mit einer Schwingung im Eigenfrequenzbereich des Systems. Im belasteten Zustand ist die Eigenfrequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_p}{m_g}}; \quad (m_g = m_p + m_z) \quad (2)$$

Durch Umformung ergibt sich

$$s_p = f_0^2 m_g 4\pi^2 \quad (2a)$$

Aus der gemessenen Schwingungsfrequenz wurde die Federsteifigkeit als Funktion der Zusatzmasse (Kalibriermasse) bestimmt (Bild 5). Wie ersichtlich, kann die Federsteifigkeit der Plattform durch eine empirisch gefundene Gerade näherungsweise mit

$$s_p = 12,56 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

angenommen werden.

Somit folgt für die Federsteifigkeit des Wäge-systems:

$$s = \frac{s_p 3 c_w}{s_p + 3 c_w} = 11,589566 \cdot 10^6 \text{ N/m} \quad (3)$$

### 3.2.2. Ermittlung der Kennwerte dynamischer Parameter

Da die auftretenden Schwingungen durch äußere Bewegungswiderstände (Reibung in Führungen und Lagern) sowie Verformungswiderstände in den federnden Bauteilen praktisch doch gedämpft sind, entspricht die Berücksichtigung eines Dämpfungsgliedes besser dem wirklichen Verhalten realer Schwingungen. Für den stationären, also eingeschwingenen Zustand, beträgt die Eigenkreisfrequenz [3, 4, 5, 6]:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \delta^2} \quad (4)$$

Darin errechnet sich die Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung  $\omega_0$  zu:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s}{m}} = 193,229 \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

Mit dem logarithmischen Dekrement  $\lambda$ , das beim Ausschwingungsversuch aus dem Verhältnis zweier aufeinanderfolgender Amplitudenwerte bzw. aus den um  $n$  Perioden auseinanderliegenden Maxima zu  $\lambda = 0,17$  bestimmt wurde, läßt sich der Dämpfungsgrad  $\delta$  als echter Systemparameter berechnen [3, 4]:

$$\delta = \frac{\lambda}{\sqrt{4\pi^2 + \lambda^2}} = 0,027 \quad (6)$$

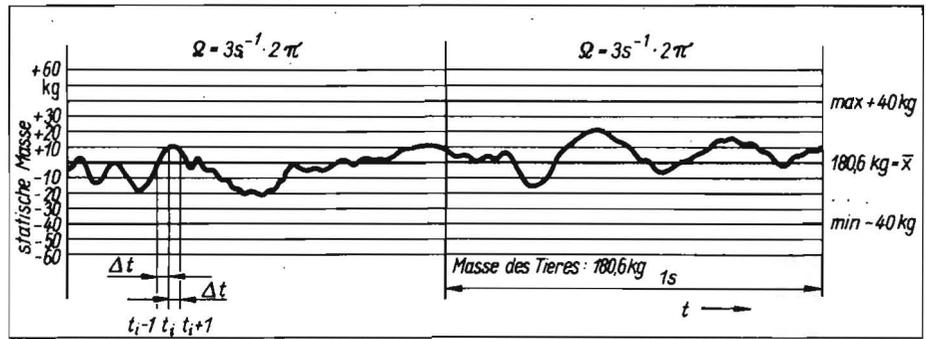


Bild 6. Diagramm des Signalverlaufs der Tierkraft  $F_T(t)$  beim Wägevorgang infolge der Tierbewegungen (Ausschnitt)

Somit ergibt sich die Eigenkreisfrequenz  $\omega$  gemäß Gl. (4) zu

$$\omega = 193,159 \text{ s}^{-1}$$

Da es sich im betrachteten Fall nicht um ein System mit speziellen Dämpfern handelt, bestätigt das Ergebnis mit  $\delta = 0,027$  ( $\delta \ll 0,1$ ) die oft in der Literatur getroffene Annahme, daß für die Bestimmung der Federkonstanten die Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung  $\omega_0$  verwendet werden kann. Daher gilt [3, 4]:

$$s = m \omega_0^2 = 11,589543 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Das Ergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem aus Gl. (3) errechneten Wert. Weitere aus den Kennwerten der konstruktiven Ausführung des Dämpfungssystems zu ermittelnde Parameter sind [3, 4, 5, 9]:

- Dämpfungskonstante

$$b = 2\sqrt{m s} \delta = 3238,83 \text{ Ns/m} \quad (7)$$

- Abklingkonstante

$$\delta = \frac{b}{2m} = 5,217 \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

### 3.3. Dynamische Belastung der Meßeinrichtung durch das Tier

Bei der dynamischen Belastung durch das Tier sind die gemessenen Bewegungsstööße die Eingangsgröße für das Schwingungssystem (Bild 6). Zur Aufstellung der Differentialgleichung (Dgl.) für die Bewegung ist entsprechend der bekannten Beziehung  $F = m \ddot{x} = m(d^2x/dt^2)$  davon auszugehen, daß die zu betrachtende Schwingung gedämpft ist, so daß außer der Rückstellkraft  $-sx$  noch eine Dämpfungskraft  $b\dot{x}$  vorhanden ist. Da im Berechnungsmodell keine Einzeldämpferelemente vorhanden sind, die auf speziell bekannte Dämpfungen hinweisen ( $\delta = 0,027$ ), ist es günstig, die Dämpfung durch die Abklingkonstante  $\delta$  zu erfassen. Es kommt weniger auf die Berechnung des genauen zeitlichen Verlaufs der Schwingungen an, als auf das Abklingverhalten der Amplituden. Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge lautet die Dgl. für den konkreten Anwendungsfall:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \frac{s}{m} x = 0 \quad (9)$$

Die Lösung dieser Dgl. ist infolge der Bewegung der Masse durch die Übergangsfunktionen zu beschreiben mit [10]:

$$x(t) = e^{-\delta t} (A \cos \omega t + B \sin \omega t) + \frac{m_L g}{s} \quad (10)$$

Darin sind  $\delta$  und  $\omega$  entsprechend Gl. (8) und Gl. (4) definiert. Eine reelle Möglichkeit zur Darstellung der

Anfangsbedingungen besteht in der Annahme, daß für  $t=0$  gilt:  $x=0$  und  $\dot{x}=0$ . Daraus schlußfolgernd geht Gl. (10) über in

$$x(t_0) = A + \frac{m_L g}{s} = 0 \quad (10a)$$

und es ergibt sich der Amplitudenwert  $A$  zu

$$A = -\frac{m_L g}{s} = -1,529 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Unter Berücksichtigung dieses Ergebnisses folgt aus Gl. (10) entsprechend der Produktregel für  $x(t)$  zur Zeit  $t=0$ :

$$\dot{x}_0 = -\delta A + B\omega = 0 \quad (10b)$$

so daß sich der Amplitudenwert  $B$  errechnet zu

$$B = A \frac{\delta}{\omega} = 4,127 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Durch Einsetzen der gefundenen Amplitudengleichungen und entsprechend den Beziehungen zwischen den trigonometrischen Funktionen läßt sich Gl. (10) wie folgt schreiben [10]:

$$x(t) = \frac{m_L g}{s} [1 - e^{-\delta t} \cos(\omega t - \varphi)]$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} \quad (10c)$$

Aus Gl. (10c) ist ersichtlich, daß der statischen Verlagerung  $(m_L g)/s$  eine gedämpfte Schwingung überlagert ist.

Diese Schwingungserscheinung äußert sich in Gewichtskräften, als Wechselkraft definiert, deren Amplitude bestimmt wird durch:

$$F_{DYN} = (m_L + m_p)$$

$$\left[ e^{-\delta t} \omega^2 \frac{m_L g}{s} \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2} \right] \quad (11)$$

Dieser dynamische Kraftanteil wird von den Wägezellen mit gemessen und ruft eine Verfälschung des Meßergebnisses hervor. Die Eliminierung erfolgt auf elektrischem Wege durch die Wandlung der analogen Meßwerte in digitale Ausgangswerte mit Hilfe eines ADU (vgl. Bild 2). Dabei kommt die integrierende Umsetzung zur Anwendung, da eine Integration über beliebig wählbare Zeitperioden  $t$  möglich ist. Die auftretende Wechselkraft beim Wägevorgang, hervorgehoben durch die Bewegung des Tieres während der Messung seiner Masse, wird mit Gl. (11) mathematisch erfaßt. Somit ergeben sich bei unterschiedlichen Integrationszeiten:

$$t = 0,1 \text{ s} \Rightarrow F_{DYN} = 1662,5 \text{ N}$$

$$t = 0,5 \text{ s} \Rightarrow F_{DYN} = 206,3 \text{ N}$$

$$t = 1,0 \text{ s} \Rightarrow F_{DYN} = 15,2 \text{ N}$$

$$t = 2,0 \text{ s} \Rightarrow F_{DYN} = 0,08 \text{ N}$$

Diese Ergebnisse sagen aus, daß der dynamische Anteil nach 2 s bei einer einmaligen Stoßbelastung durch das Tier vernachlässigbar abgeklungen ist und praktisch nur der statische Wert gemessen wird. Dabei wurden die bisherigen System-Eingangsrößen und damit auch die entsprechenden Ausgangsrößen durch deterministische Signale beschrieben, d. h. durch Funktionen, bei denen jedem Zeitpunkt, in dem das Signal existiert, in eindeutiger Weise ein Zahlenwert zugewiesen ist [11].

Bei der Lebendmassebestimmung werden jedoch durch die dem Tier „inwohnenden Kräfte“ stochastische Eingangsrößen bewirkt. Es wird im folgenden angenommen, daß diese Zufallskräfte in Form einer zufälligen Stoßfolge nach o. g. Muster erzeugt werden. Die transienten Vorgänge, hervorgerufen durch die wechselnde Belastung, sollen abgeklungen sein. Damit wird die Versuchsauswertung nur für die stationären Anteile vorgenommen. Die so erzeugte stochastische Funktion ist dadurch gekennzeichnet, daß ihr Funktionswert für keinen Zeitpunkt vorausbestimmt werden kann. Der zu betrachtende stochastische Prozeß wird als stationär und ergodisch angenommen, da sich die statistischen Eigenschaften, d. h. Mittelwert  $\bar{x}$ , Streuung  $\sigma$  und Verteilungsdichte  $p(x)$ , durch eine beliebige zeitliche Verschiebung des Prozesses nicht ändern sollen. Die Meßeinrichtung und das Meßobjekt sind weiter frei von äußeren Einflüssen (keine Veränderung an der Waage, keine Ermü-

dungserscheinungen bei Tier und Material). Die statistische Analyse der Versuche erfolgt durch Auswertung des mit Hilfe eines Lichtstrahlzillographen registrierten Zeitverlaufs, wobei zu bestimmten Zeitpunkten  $t_i$  der Meßwert festgestellt und bestimmten Betragsklassen zugeordnet wurde [12]. Dabei ist eine Digitalwertklassierung durchgeführt worden, d. h., es wurde zunächst eine Quantisierung des Funktionswerts zum Zeitpunkt  $t_i$  und danach eine Einordnung des Zahlenwerts in eine der Klassen vorgenommen. Die Quantisierung erfolgte nicht stufenlos, sondern ließ nur bestimmte diskrete Funktionswerte zu. Als Klassierverfahren kam das Stichprobenverfahren zur Anwendung, wobei die Funktion zu Zeitpunkten  $t_i$  mit gleichen Zeitintervallen  $\Delta t$  abgefragt wurde (vgl. Bild 6). Die Verteilung der Zählimpulse auf die einzelnen Zählregister entspricht der absoluten Klassenhäufigkeit der Momentanwerte  $h(m_i)$  (Bild 7). Unter Vernachlässigung der Tatsache, daß die Klassierung aus praktischen Gründen nur während einer endlich langen Zeitdauer erfolgen kann, ist  $h(\bar{m}_i)$ , bezogen auf die Gesamtanzahl der Impulse  $N$ , gleich dem Wahrscheinlichkeitswert der Verteilungsdichte  $p(\bar{m}_i)$  des Wägevorgangs. Der Mittelwert  $\bar{x}$  ergibt sich zu

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{m}_i = 180,67 \text{ kg} \quad (12)$$

Die Varianz  $s^2$  beträgt:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{m}_i - \bar{x})^2 = 83,66 \text{ kg} \quad (13)$$

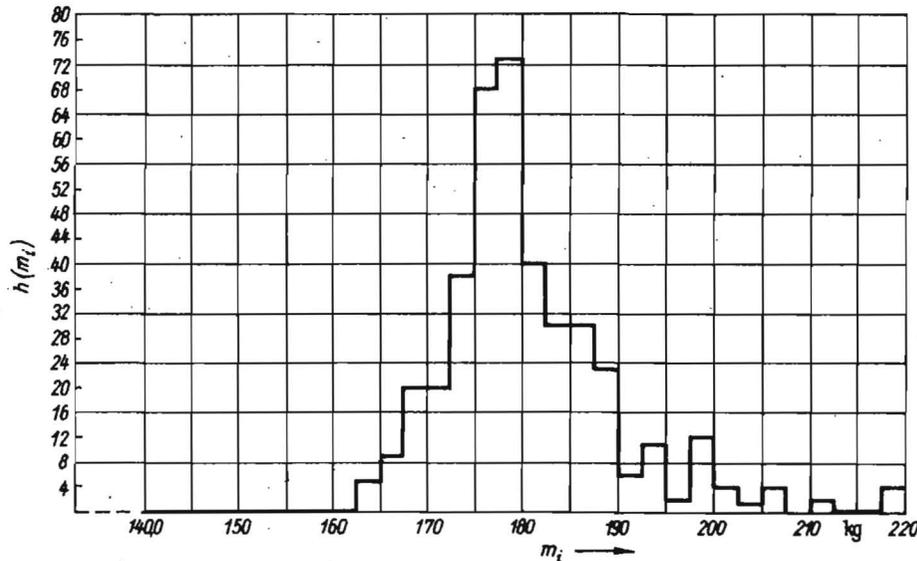


Bild 7  
Klassenhäufigkeit in Abhängigkeit von den Momentanwerten

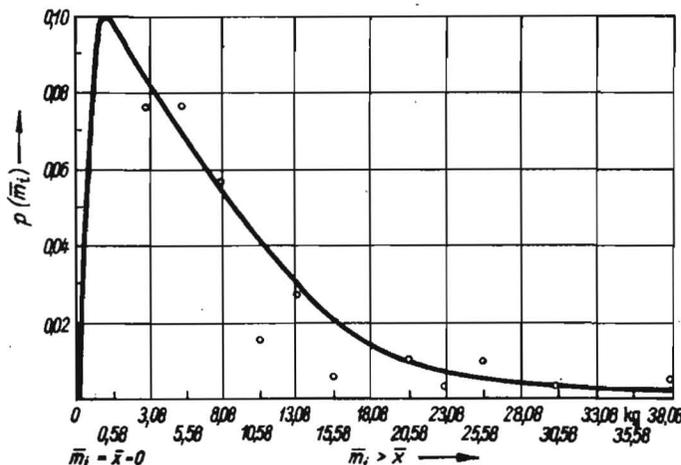


Bild 8  
Verteilungsdichte der stochastisch schwankenden Masse  $m_i$  nach der Rayleigh-Verteilung

Darin berechnet sich die Streuung  $\sigma$ :  
 $\omega = \sqrt{s^2} = \pm 9,15 \text{ kg}$ .  
Für den mittleren Fehler des Mittelwerts folgt aufgrund des Fehlerfortpflanzungsgesetzes [13]:

$$m_x = \sqrt{\frac{(\bar{m}_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} = 0,208 \text{ kg} \quad (14)$$

Das Ergebnis der Meßreihe  $\bar{m}_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) lautet somit:

$$\bar{x} \pm m_x = 180,67 \text{ kg} \pm 0,208 \text{ kg}$$

Für die diskrete Zufallsgröße „Tiermasse“ (sog. Zufallsvariable) können Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben werden, die gewissen Modellvorstellungen entsprechen. Die Prüfung der Versuchsergebnisse auf Gaußsche Normalverteilung mit Hilfe des grafischen Verfahrens durch Wahrscheinlichkeitspapier ergab, daß die empirischen Werte keiner Normalverteilung unterliegen [10].

Ein Vergleich der Wahrscheinlichkeitsfunktion mit der Rayleigh-Verteilung [5]

$$p(\bar{m}_i) = \frac{\bar{m}_i - \bar{x}}{s^2} e^{-\frac{(\bar{m}_i - \bar{x})^2}{2s^2}} \quad (15)$$

läßt erkennen, daß eine große Übereinstimmung vorhanden ist (Bild 8). Dabei sind die Abweichungen an den Rändern weniger bedenklich, da die Ordinatenwerte stark auseinander gezogen sind. Holzweißig [5] zeigt, daß Systeme (Vorgänge) mit statisch schwankender Amplitude meist eine Rayleigh-Verteilung aufweisen und als schmalbandig in bezug auf die spektrale Leistungsdichte charakterisiert werden können, wenn die Meßgröße Ausgangsgröße des Schwingungssystems mit ausgeprägter Resonanz ist.

Die getroffene Feststellung einer Rayleigh-Verteilung stellt einen Neuheitswert für die Wägetechnik dar. Unter diesen Voraussetzungen und entsprechend den abgeleiteten Beziehungen erweist sich die Aussage einer Rayleigh-Verteilung als eine statistische Hypothese, die zwar eine gute Anpassung ermöglicht, aber schwierige und u. U. unmögliche Weiterverarbeitung hervorrufen kann. Aus diesem Grund sollte die Überprüfung auf Normalverteilung durch den  $\chi^2$ -Anpassungstest bzw. bei dessen Ablehnung durch eine geeignete Transformation (z. B. Logarithmierung [14]) erfolgen.

#### 4. Zusammenfassung

Mit der aufgebauten Versuchsanlage konnten für die Untersuchungen an Säuen Genauigkeiten der Wägedaten von 0,2 % erreicht werden. Für versuchsspezifische Untersuchungen lieferte die Anlage bei relativen Messungen Auflösungen von  $10^{-4}$  entsprechend 100 g. Mit der Integrationszeit von 4 s ergab sich ein in der Praxis erprobter Wert, der einen guten Kompromiß zwischen Meßzeit und Genauigkeit darstellt. Eine Optimierung zwischen einer eventuell notwendigen Beruhigungszeit, bedingt durch das Einschwingen der Waage nach Belastung mit dem Tier, und der Integrationszeit muß erfolgen, um die Gesamtmeßzeit minimieren zu können.

Der als Folge der Schwingungen des Meßsystems durch Tierbewegungen entstehende Meßfehler  $F_{\text{DYN}}$  würde für eine einmalige Stoßbelastung nach Gl. (11) ermittelt. Die Annahme entsprechend Abschn. 3.3. über die Beschreibung des Zufallscharakters des Wä-

