

Ein stochastisches Simulationsmodell für arbeitswirtschaftliche Untersuchungen von Melkverfahren

Von Char Lie Pen und Hans Schön,
Freising-Weihenstephan *)

DK 518.5:637.125

Ingenieur und Landwirt benötigen für die Verbesserung oder Neuentwicklung landtechnischer Arbeitsverfahren arbeitswirtschaftliche Aussagen, um mit ihrer Hilfe den voraussichtlichen Erfolg geplanter Maßnahmen abzuschätzen. Solche Aussagen können durch Simulation des Arbeitsablaufes gewonnen werden. Die Simulation mit Hilfe eines deterministischen Modells ist allerdings in vielen Fällen nur eingeschränkt gültig, da besonders bei Arbeitssystemen mit biologischen Komponenten erhebliche zufallsbedingte Schwankungen auftreten können, deren Nichtbeachtung zu fehlerhaften oder aussage-schwachen Simulationsergebnissen führen kann. In diesem Beitrag wird am Beispiel der Melkarbeiten ein stochastisches Simulationsmodell vorgestellt, welches die zufälligen Einflüsse berücksichtigt und wegen seines wirklichkeitsnahen Aufbaus die gleichen Versuche und Messungen wie an wirklichen Systemen erlaubt.

1. Einleitung

Die Simulation setzt arbeitswirtschaftliche Analysen an bestehenden Systemen voraus, bei denen der gesamte Arbeitsablauf in Zeitelemente, die durch Zeitmeßpunkte abgetrennt und definiert sind, zerlegt wird. Diese Zeitelemente sind austauschbar und können in verschiedenen Arbeitsmodellen frei kombiniert werden [1]. Dafür wurden bisher deterministische Modelle angewandt, in die das Zeitelement als ein – möglichst repräsentatives – Datum einging, obwohl bei landwirtschaftlichen Arbeitsverfahren in der Realität große Streuungen auftreten.

Auch der Arbeitsablauf ist bei diesen Modellen starr vorgegeben, während in der Praxis zufällige Änderungen laufend vorkommen. Für verfeinerte arbeitswirtschaftliche Untersuchungen von Systemen mit stark variierenden Bedingungen, wie sie vor allem bei Arbeiten am lebenden Tier gegeben sind, empfiehlt sich deshalb ein stochastisches Modell.

Ein solches Modell setzt die Beschreibung der Systemstruktur voraus, wobei logische Schalter eine dynamische Ablaufänderung ermöglichen. Weiterhin gehen in dieses Modell Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die einzelnen Zeitelemente ein.

Aus den Arbeiten des DFG-Sonderforschungsbereiches 141: Technik und Bauwesen in der tierischen Produktion.

*) Dr. agr. Char Lie Pen, BSAE, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, Dr. agr. Hans Schön ist Akademischer Oberrat am Institut für Landtechnik (Direktor: Prof. Dr. H.L. Wenner) der TU München-Weihenstephan. Dr. Schön leitet im DFG-Sonderforschungsbereich 141 die Projektgruppe < Maschinelles Milchentzug >.

2. Darstellung der Systemstruktur durch einen Graph

Nach der Graphentheorie läßt sich die Struktur komplexer Systeme durch Knotenpunkte darstellen, die durch gerichtete Kanten verbunden sind. Diese Knotenpunkte beschreiben Zeitelemente, bzw. Ereignisse eines Arbeitsvorganges; die gerichteten Kanten stellen Beziehungen zwischen den Elementen her. Die Eingangs-pfeile eines Knotenpunktes symbolisieren gleichzeitig den Zustand vor der Ausführung der im Knoten genannten Tätigkeit. Knoten mit mehreren Ausgängen sind logische Schalter, welche den weiteren Ablauf des Arbeitsprozesses dynamisch steuern. Der Arbeitsablauf in einem Melkkarussell, das hier als Beispiel für die verschiedenen Melkverfahren steht, läßt sich demnach wie folgt beschreiben, Bild 1.

Eine Kuh K_1 wird in den Melkstand eingetrieben (E), gefüttert (F), angerüstet (AR) und es wird das Melkzeug angesetzt (AN). Ist im Melkstand noch keine andere Kuh mit der Milchabgabe fertig (Schalter 1 <N>), der Melkstand gefüllt (Schalter 2 <J>) und keine Kuh fertig gemolken (Schalter 3 <N>) muß der Melker warten (W). Ist dagegen eine andere Kuh bereits mit der Milchabgabe fertig (Schalter 1 <J>) kommt es zu Blindmelkzeiten (B). Der Melker wird – um die Blindmelkzeiten gering zu halten – möglichst bald zu dieser Kuh L gehen, diese ausmelken (AM) und ihr die Melkzeuge abnehmen (AB). Steht die Kuh beim Ausgang des Karussellmelkstandes (Schalter 4 <J>) wird sie aus dem Melkstand entlassen (AUS) und – soweit noch Kühe zu melken sind (Schalter 5 <N> und Schalter 6 <N>) – ein neues Tier eingetrieben (E).

Durch Darstellungen dieser Art können nicht nur alle anderen Melkverfahren, sondern alle in der Praxis vorkommenden Arbeitsabläufe genau und eindeutig beschrieben werden.

3. Darstellung der Zeitelemente nach einer empirisch ermittelten Verteilung

In einem zweiten Schritt erfolgt die quantitative Beschreibung der im Graph dargestellten Zeitelemente nach ihrer Verteilung. Da diese das Simulationsergebnis wesentlich beeinflusst, müssen die einzelnen Zeitelemente hinsichtlich ihres Mittelwertes und Streumaßes untersucht werden, Tafel 1.

3.1 Form der Verteilung

Die Zeitelemente für das Melken weisen aber nicht nur unterschiedliche Durchschnittswerte und Streuungen auf, sondern auch jeweils typische Formen ihrer Verteilung. Dabei muß bei den Arbeitszeitelementen – im Gegensatz zu den bisherigen Unterstellungen [2, 3, 4] – eine Normalverteilung weitgehend ausgeschlossen werden, häufig auch eine Übereinstimmung mit einer anderen theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilung (z. B. Binomial-, Poisson- oder Gleichverteilung) [5, 6].

Als Beispiel ist in Bild 2 die Verteilung des Arbeitszeitelementes < Ausmelken > dargestellt. Lediglich Werte für einige Prozeßzeiten, z. B. die Melkzeit für das Hauptgemelk, scheinen aus einer normalverteilten Grundgesamtheit zu stammen, Bild 3. Es empfiehlt sich deshalb, für alle Zeitelemente die jeweils typische Verteilungsform gesondert zu ermitteln.

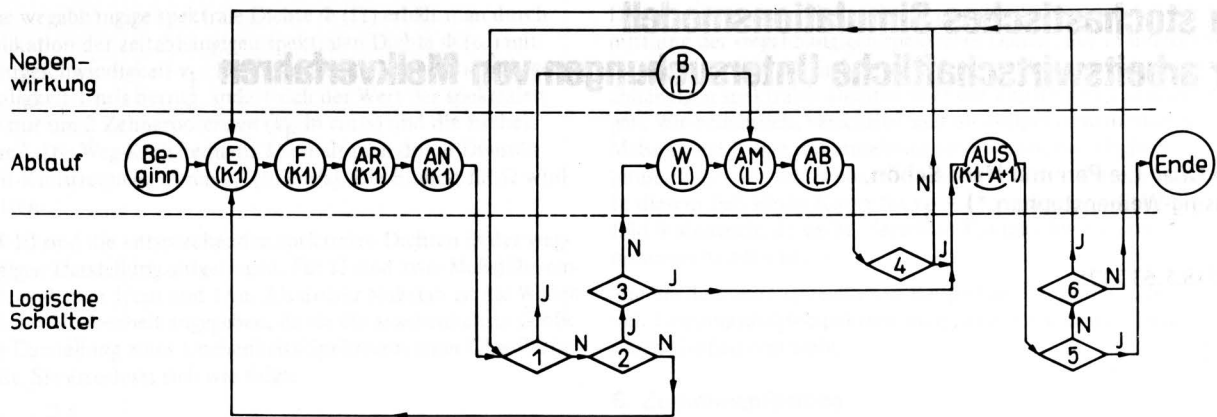


Bild 1. Arbeitsablauf im Karussellmelkstand, dargestellt als Graph.

Tafel 1. Zeitelemente für das Melken (Mittelwerte und Streuungen)

Zeitelemente	Anzahl der Werte n	Mittelwert *) \bar{x} cmin/Kuh und Melken	Streuung s
Eintreiben	599	19,0	11,7
Anrücken	175	42,5	20,8
Melkzeuge ansetzen	195	26,6	5,1
Milchflußzeit	1473	557,8	173,0
Ausmelken	241	71,1	69,0
Melkzeuge abnehmen	474	18,0	6,9
Austreiben	599	8,1	5,0

*) Mit cmin wird der hundertste Teil der Minute benannt

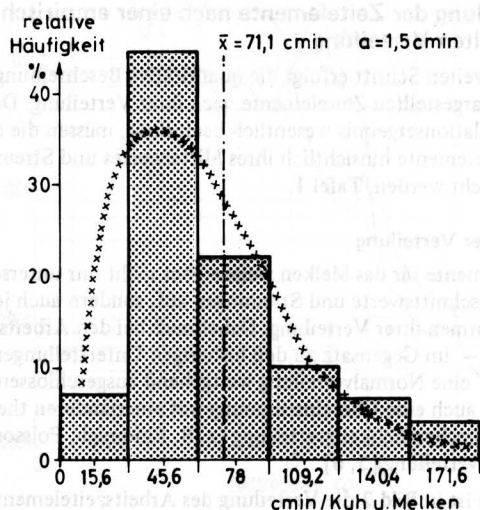


Bild 2. Verteilung der empirisch ermittelten Zeitelemente beim Ausmelken, n = 241.

xxxxxxx Prüfung auf Poissonverteilung

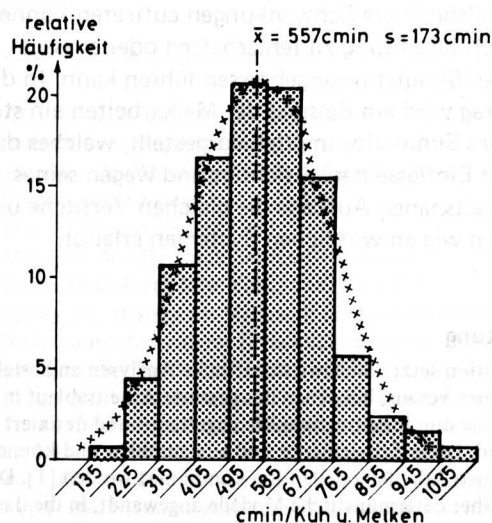


Bild 3. Verteilung der empirisch ermittelten Zeitelemente für das Maschinenhauptmelken, n = 1473.

xxxxxxx Prüfung auf Normalverteilung

3.2 Darstellung der Verteilung

Für die Simulation werden die Formen der Verteilungen durch eine Klassifizierung nach Sturges [7] festgelegt. Je nach Stichprobenumfang n wird die Klassenzahl k nach folgender Formel berechnet:

$$k = 1 + 3,32 \cdot \log n.$$

Die Klassenbreite b ist dann der Quotient aus der Differenz R des größten und kleinsten Meßwertes und der Klassenzahl k:

$$b = \frac{R}{k}.$$

Damit kann die Form der jeweiligen Verteilung einzelner Zeitelemente durch die relative Klassen- bzw. Summenhäufigkeit festgelegt werden. Die Verteilung der einzelnen Arbeitszeitelemente für das Melken ist in Tafel 2 aufgeführt.

Tafel 2. Empirisch ermittelte Verteilungen der Zeitelemente für das Melken

	Kleinsten Wert cmin	Klassenbreite cmin	Klassenzahl	Zahl der O-Werte	Relative Klassenhäufigkeit											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Eintreiben	6,0	4,0	7	0	21,2	28,1	27,9	13,9	4,5	3,3	1,1					
Anrüsten	14,0	6,9	7	0	31,8	35,8	15,8	13,3	0,8	1,7	0,8					
Melkzeuge ansetzen	10,0	3,33	6	0	20,0	11,4	22,9	31,4	5,7	8,6						
Milchflußzeit	126,0	90,7	11	0	1,1	4,2	11,9	16,3	20,5	20,1	15,1	6,4	2,3	1,4	0,7	
Ausmelken	8,0	31,2	6	5	7,2	45,3	22,5	10,2	7,4	6,4						
Melkzeug abnehmen	4,0	2,7	6	0	43,9	41,5	4,9	4,9	2,4	2,4						
Austreiben	5,0	2,2	4	0	42,0	38,0	14,0	6,0								

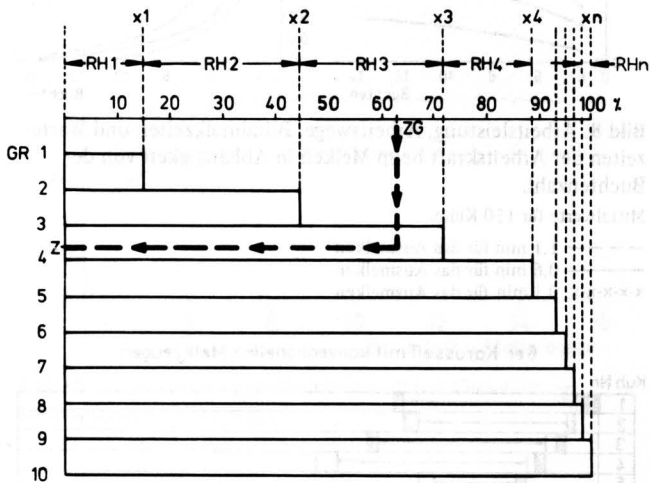


Bild 4. Simulation der Zufallszahlen nach einer vorgegebenen, diskreten Verteilung.

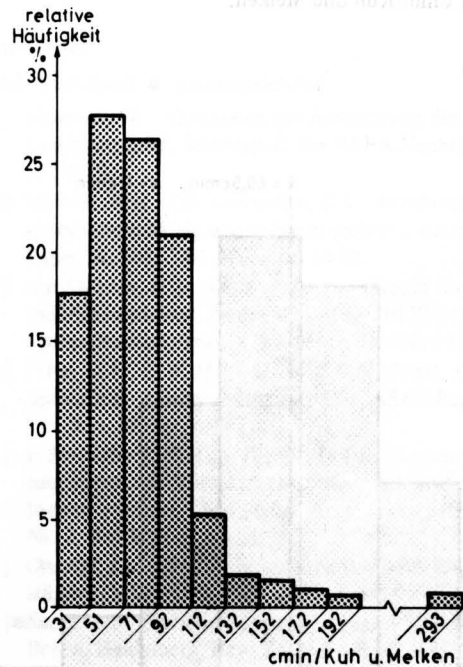


Bild 6. Durch Simulation gewonnene Verteilung, n = 1000.

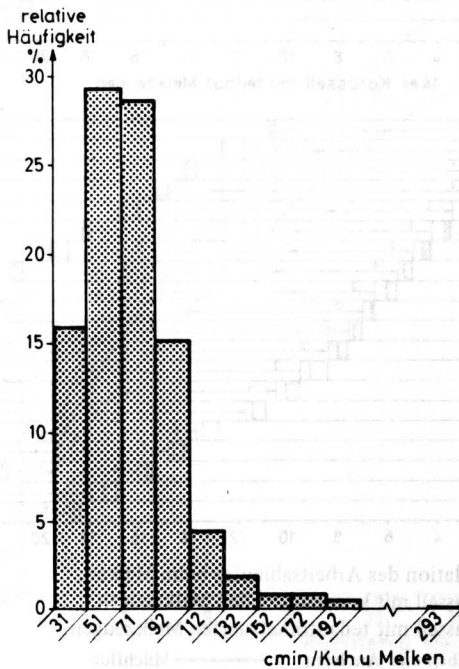


Bild 5. Empirisch ermittelte Verteilung, n = 202.

3.3 Simulation der Verteilung

Diese empirisch ermittelten Verteilungen gehen in das Simulationsmodell ein. Mit Hilfe einer für die Monte-Carlo-Methode [8, 9] entwickelten Technik, Bild 4, werden aus den gleichverteilten Zufallszahlen ZG von 1 bis 100 die benötigten Zeitwerte Z erzeugt. Von einer Klasse mit größerer relativer Häufigkeit (RH) ist zu erwarten, daß diese auch eine größere Anzahl Zeitwerte liefert als eine Klasse mit kleineren RH-Werten. Somit können aus einer beschränkten durch Arbeitszeitstudien gewonnenen Zahl von Meßwerten beliebig viele Zeitwerte für die Simulation erzeugt werden. Für einen Vergleich ist in Bild 5 die empirisch ermittelte Verteilung und in Bild 6 die durch Simulation gewonnene Verteilung aufgetragen. Es ergibt sich eine hinreichende Übereinstimmung in der Verteilungsform.

4. Durchführung und Anwendung der Simulation

Mit Hilfe des Graphes und der einzelnen durch ihre Verteilung gegebenen Zeitelemente kann die arbeitswirtschaftliche Simulation durchgeführt werden. Dafür muß bei komplizierten Modellen eine EDV-Anlage genutzt werden, wobei sich zur Lösung des Algorithmus ein Programm aus FORTRAN- und GPSS-Elementen anbietet. Die vielfältigen Möglichkeiten einer stochastischen Simulation sollen abschließend an einigen Beispielen bei modernen Melkverfahren aufgezeigt werden.

4.1 Ermittlung des Arbeitszeitbedarfes

Für die Planung neuer Arbeitsverfahren sind exakte arbeitswirtschaftliche Kennzahlen unerlässlich. Diese sollten aber nicht nur als repräsentative Mittelwerte angegeben werden, sondern auch einzukalkulierende Abweichungen bei günstigen und ungünstigen Bedingungen nennen. In Bild 7 ist der durch 100 Simulationläufe ermittelte Arbeitszeitbedarf für das Melken in einem 14er Karussellmelkstand in Form einer Häufigkeitsverteilung dargestellt. Als arbeitswirtschaftliche Kennzahl interessiert hier neben dem Mittelwert mit 69 cmin/Kuh und Melken auch die Standardabweichung mit 11 cmin/Kuh und Melken.

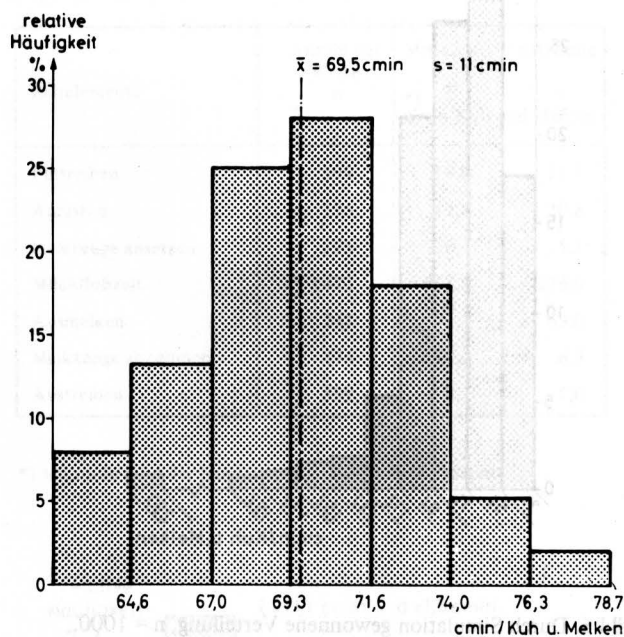


Bild 7. Arbeitszeitbedarf, ermittelt durch Simulation mit einem stochastischen Modell. Melkkarussell mit 14 teilautomatisierten Melkzeugen, Herdengröße: 150 Kühe.

4.2 Einfluß verschiedener Maschinenkapazitäten auf Arbeitsleistung und Arbeitsqualität

Die Planung optimaler Maschinenkapazitäten für die verschiedenen Melkverfahren ist nicht nur wegen der erhöhten Kapitalaufwendungen, sondern auch in Hinblick auf die Arbeitsleistung und Arbeitsqualität notwendig. Eine differenzierte Simulation kann hier Entscheidungshilfen bieten, indem in Abhängigkeit von der Melkstandgröße nicht nur Aussagen über die Arbeitsleistung einer Arbeitskraft, sondern auch über Blindmelkzeiten, Arbeitswege und Wartezeiten gemacht werden, Bild 8.

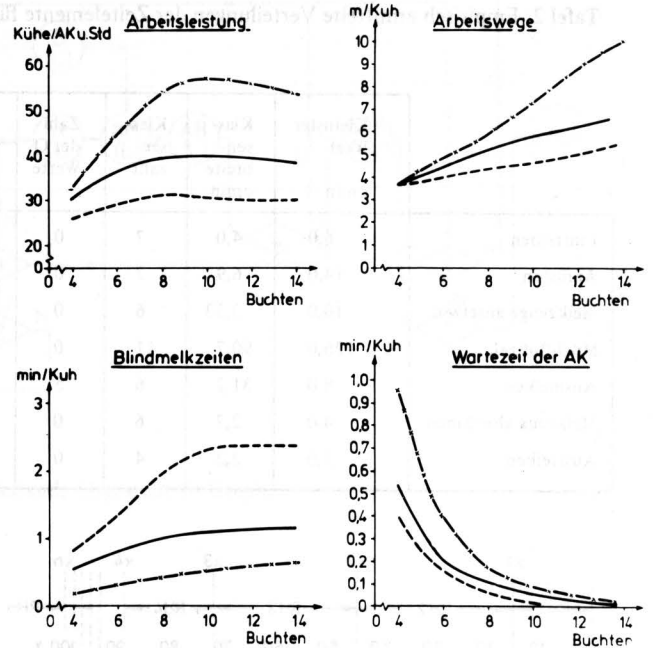
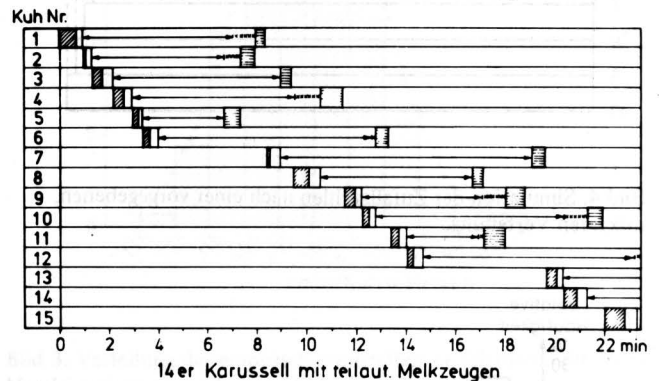


Bild 8. Arbeitsleistung, Arbeitswege, Blindmelkzeiten und Wartezeiten der Arbeitskraft beim Melken in Abhängigkeit von der Buchtenzahl.

Mittelwerte für 150 Kühe:

- 1,1 min für das Ausmelken
- 0,6 min für das Ausmelken
- x-x-x-x-x-x- 0,1 min für das Ausmelken

6er Karussell mit konventionellen Melkzeugen



14er Karussell mit teilaut. Melkzeugen

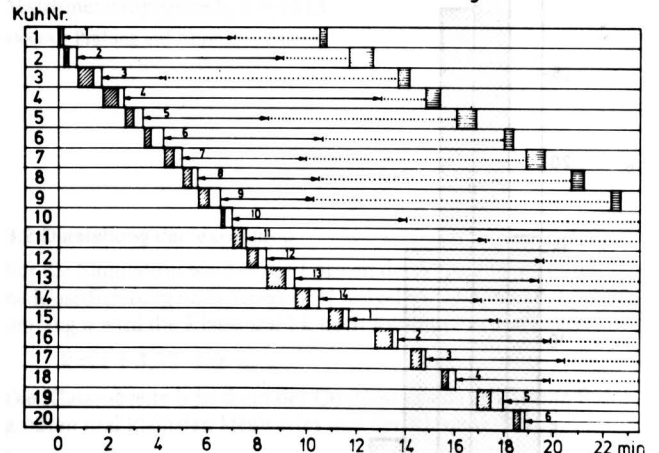


Bild 9. Simulation des Arbeitsablaufes beim Melken; a) 6er Karussell mit konventionellen Melkzeugen, b) 14er Karussell mit teilautomatisierten Melkzeugen.

- ▨ Eintreiben und Anrücken
- ▨ Melkzeuge ansetzen
- ▨ Ausmelken und Melkzeuge abnehmen
- Milchfluß
- x-x-x-x-x-x- Blindmelken
- Melkzeuge abgeschaltet abnehmen

4.3 Vorkalkulation des arbeitswirtschaftlichen Effektes neuer Arbeitsverfahren und Maschinen

Diese Studien können bereits vor der Entwicklung verbesserter Arbeits- und Mechanisierungsverfahren angestellt werden. Häufig können für diese Modelle aus anderen Verfahren bekannte Arbeitselemente unterstellt und durch einige zusätzlich geschätzte ergänzt werden.

Dieses Vorgehen wird am Beispiel konventioneller und teilautomatisierter Melkzeuge [10] im Karussellmelkstand dargestellt. Bei letzteren neu zu entwickelnden Melkanlagen wurde der Zeitaufwand für die Melkzeugabnahme mit 0 geschätzt und die Notwendigkeit zur sofortigen Melkzeugabnahme verneint. Bild 9 zeigt die simulierten Arbeitsabläufe, die vom Rechner direkt aufgezeichnet

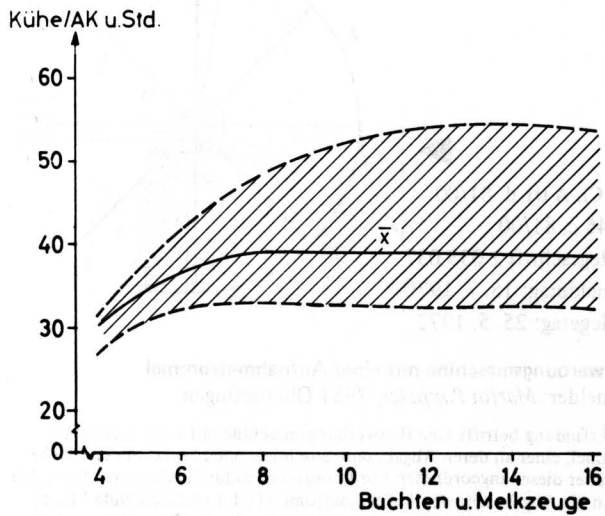


Bild 10. Arbeitsleistung im Melkkarussell bei Verwendung konventioneller Melkzeuge.

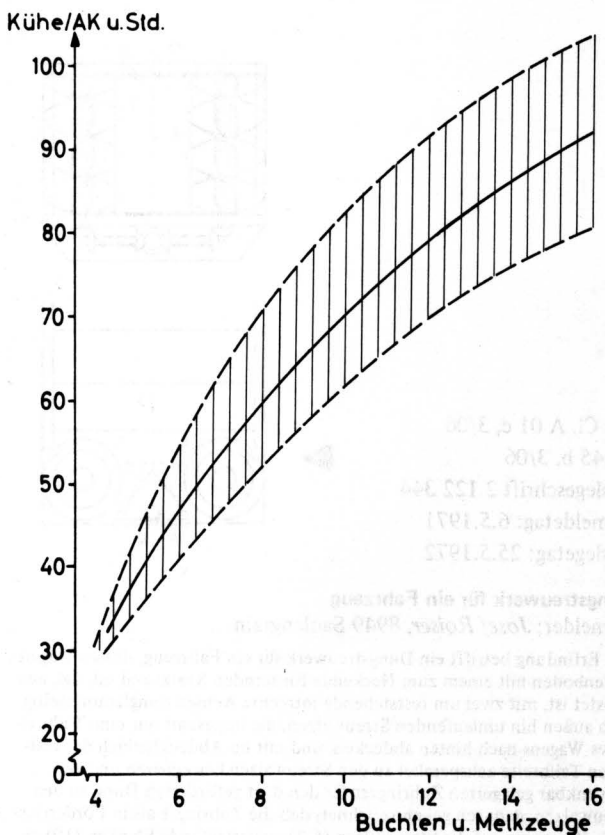


Bild 11. Arbeitsleistung im Melkkarussell bei Verwendung teilautomatisierter Melkzeuge mit selbsttätiger Abnahme.

wurden. Dabei geht eindeutig hervor, daß durch den Einsatz dieser teilautomatisierten Melkzeuge – im Gegensatz zu konventionellen Melkzeugen – ein geregelter Arbeitsablauf möglich wird. Die Arbeitsleistung der beiden Verfahren ist in Abhängigkeit von der Melkstandgröße in Bild 10 und Bild 11 dargestellt. Bei schlechter Arbeiterleistung können im 8er Karussellmelkstand mit konventionellen Melkzeugen 30 Kühe/AKh, mit teilautomatisierten Melkzeugen 50 Kühe/AKh gemolken werden. Bei guter Arbeiterleistung, obere Grenzkurve, ergeben sich für den 8er Karussellmelkstand die entsprechenden Werte zu 48 bzw. 62 Kühe/AKh. Bei guter Arbeiterleistung kann aber bei einem größeren Karussellmelkstand, mit mehr als 16 Melkplätzen, mit teilautomatisierten Melkzeugen die Arbeitsleistung bis auf 100 Kühe/AKh gesteigert werden.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Hammer, W.: Gedanken zur Anwendung der SvZ in der Landwirtschaft. Sonderheft der REFA-Nachrichten 1969, S. 17/25.
- [2] Bickert, W.G., J.B. Gerrisch u. D.V. Armstrong: Semi-automatic milking in a polygon parlor: a simulation. ASAE-Paper No. 70 - 349, Michigan 1970.
- [3] van Elderen, E. u. S.P. van Hoven: Model for machine-milking in parlors. Proceeding of the 1970 Summer Computer Simulation Conference. Denver / USA 1970.
- [4] Price, D.R., K.W. Hentington u. R.M. Peart: Computer simulation of dairy milking parlors. ASAE-Paper No. 71 - 354, Michigan 1971.
- [5] v. Henneberg, B., C.L. Pen u. H. Auernhammer: Untersuchungen von Verteilungen einiger Arbeitselemente in der Innenwirtschaft. Die Landarbeit, wissenschaftliches Beiheft Nr. 2, Bad Kreuznach 1973.
- [6] Ordolff, D.: Der Arbeitszeitbedarf beim Melken in Melkständen. KTBL-Schrift Nr. 158, Frankfurt 1972.
- [7] ● Sachs, L.: Statistische Auswertungsmethoden. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1969, S. 51 u. S. 95.
- [8] Marsaglia, G.: Generating discrete random variables in a computer. Comm. of the ACM Bd. 6 (1963).
- [9] Namneck, P.: Vergleich von Zufallszahlengeneratoren. Elektron. Rechenanlagen (1966) H. 8, S. 28/32.
- [10] Pen, C.L., H. Schön u. K.O. Semmler: Entwicklung und Anwendung teilautomatisierter Melkzeuge. Grndl. Landtechnik Bd. 23 (1973) Nr. 1, S. 18/22.
- [11] Bickert, G.W., J.B. Gerrisch u. J.H. Hutt: Simulated milking rates in various semi-automatic milking-parlors. ASAE-Paper No. 71 - 353, Michigan 1971.
- [12] Peart, R.M.: Applications of systems techniques to design and planning agricultural system engineering. Transaction of the ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 5, S. 835/836.
- [13] ● Lindemann, P.: Betriebswirtschaftliche Funktionsmodelle in < Fortschritte der Kybernetik > München, Wien: Oldenbourg 1967, S. 431/444.
- [14] Link, D.A. u. W.E. Splinter: Survey of simulation techniques and applications to agricultural problems. Transactions of the ASAE Bd. 13 (1970) Nr. 5, S. 837/843.
- [15] Schön, H., C.L. Pen u. K.O. Semmler: Arbeitswirtschaftliche Beurteilung moderner Melkverfahren. Mitt.d.DLG Bd. 87 (1972) Nr. 50, S. 1261.
- [16] Schön, H. u. C.L. Pen: Untersuchungen über Melkarbeit und Melktechnik in Laufställen. Mitt.d.DLG Bd. 83 (1968) Nr. 37, S. 1275/78.