

Bewertung der Zuverlässigkeit von landtechnischen Arbeitsmitteln durch die Kenngröße Verfügbarkeit

Prof. Dr. sc. techn. G. Ihle, KDT, Technische Universität Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik

1. Zum Inhalt der Kenngröße Verfügbarkeit

Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit landtechnischer Arbeitsmittel wachsen mit dem Übergang zu industriemäßigen Produktionsverfahren. Die Landmaschinenkombinate der DDR und das Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung (ASMW) tragen diesem Umstand Rechnung, indem konkrete Zuverlässigkeitskenngrößen in die Entwicklungsvorgaben für neue landtechnische Arbeitsmittel aufgenommen werden. Eine zentrale Stellung nimmt dabei die Kenngröße Verfügbarkeit ein.

Nach der Systematik der Standards TGL 26096/03 [1] und TGL 20987/03 [2] wird landtechnischen Arbeitsmitteln die Aufgabenverfügbarkeit als Zuverlässigkeitskennwert zugeordnet. Hierzu definiert der Standard TGL 26096/01 [3]:

„Wahrscheinlichkeit, daß eine reparierfähige Betrachtungseinheit zu einem vorgegebenen Zeitpunkt arbeitsfähig ist und in dem darauf folgenden Zeitintervall, in dem eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen ist, arbeitsfähig bleibt“.

Innerhalb des Zuverlässigkeitsnachweises für landtechnische Arbeitsmittel beginnt das Bezugsintervall entweder mit dem Einsatz einer neuen Maschine oder nach einer komplexen vorbeugenden Instandhaltungsmaßnahme. Näherungsweise kann also angenommen werden, daß alle Maschinen am Beginn des Bezugsintervalls arbeitsfähig sind. Als Bezugsintervall für die Berechnung der Aufgabenverfügbarkeit dient dann ein Teil (aber immer ab Beginn) oder die gesamte mittlere Arbeitsmenge in einer Einsatzkampagne bzw. in einem Kalenderjahr. Unter diesen Bedingungen nimmt die Aufgabenverfügbarkeit folgende Formen an:

$$V_A = \frac{T_{02}}{T_{02} + t_W + t_{WN}}; \quad (1)$$

V_A	Aufgabenverfügbarkeit
T_{02}	summarische Operativzeit (nach TGL 22289 [4]) im Bezugsintervall
t_W	stochastisch beeinflusste Wartezeit im Bezugsintervall
t_{WN}	normative summarische Wartezeit im Bezugsintervall.

An dieser Stelle muß eingefügt werden, daß eine Verfügbarkeitskenngröße auch zur Bewertung technologischer Prozesse in der Land- und Forstwirtschaft Anwendung findet. Sie wird als „technologische Verfügbarkeit“ bezeichnet. Die vorliegenden Aussagen beziehen sich nur auf Verfügbarkeitskennwerte zur Bewertung der Zuverlässigkeit landtechnischer Arbeitsmittel, die im Bereich des Landmaschinenbaus meist die Bezeichnung „technische Verfügbarkeit“ tragen. Die „technologische Verfügbarkeit“ ist eine komplexe Bewertungsgröße für die Eignung des Arbeitsmittels und das Niveau der Produktionsorganisation. Um eine Verfügbarkeitskenngröße auf die Bewertung eines Arbeitsmittels zu spezialisieren, muß zwangsläufig der Einfluß der Organisation des Einsatzes und der Instandhaltung zurückgedrängt werden. Hierfür bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- Alle Teilzeiten, die normativ vorgegeben sind bzw. vorgegeben werden können, wie z. B. die Zeit für Pflege und Wartung, gehen als Planwerte t_{WN} ein.
- Die Verfügbarkeitsaussagen werden nur anerkannt, wenn nachweislich die vorgeschriebenen Instandhaltungsvorschriften qualitativ und quantitativ eingehalten wurden bzw. wenn die Auswertung getrennt für bestimmte Instandhaltungsorganisationsformen erfolgt.

Mit der Zeitgliederung des Standards TGL 22289 [4] können die Bestandteile der Wartezeit dann folgende Form annehmen:

$$t_W = T_{42} \quad (2)$$

$$t_{WN} = T_{31N} + T_{81N} + T_{7N}; \quad (3)$$

T_{42}	Zeit für Behebung technischer Störungen
T_{31}	Zeit für Pflege und Wartung während der Schicht
T_{81}	Standzeiten aus organisatorischen Gründen
T_7	Zeit für die tägliche technische Wartung der Maschinen, die mit der Prüfmaschine aggregiert sind.

Der Autor vertritt die Meinung, daß die Beziehungen (2) und (3) nicht standardisiert werden sollten, sondern daß die Möglichkeit offen bleibt, die Bestandteile t_W und t_{WN} ergebnisspezifisch anzupassen, um eine möglichst einfache Datenerfassung realisieren zu können. Nur dadurch kann man Unterlagen aus exakt geführten Bordbüchern für den Verfügbarkeitsnachweis und für Garantieanforderungen verwenden. Der konkrete Inhalt der Aufgabenverfügbarkeit muß vor der Erprobung des neuen Erzeugnisses zwischen Landmaschinenhersteller und ASMW vereinbart werden.

2. Die Aufgabenverfügbarkeit als stochastisch beeinflusste Größe

Die Aufgabenverfügbarkeit einer Maschine wird durch die stochastisch verteilten Ausfallzeitpunkte und Ausfalldauerwerte bestimmt. Praktische Verfügbarkeitsuntersuchungen an Halm- und Hackfruchterntemaschinen durch den Landmaschinenbau der DDR zeigen, daß sich die Verfügbarkeit mit der Länge des Bezugsintervalls systematisch verringern kann und daß abweichende Einsatzbedingungen, die zu größerer Abnutzung führen, wie z. B. hoher Steinbesatz für die Kartoffelvollerntemaschinen, einen wesentlichen Einfluß besitzen.

An den Verfügbarkeitsnachweis müssen deshalb folgende Anforderungen gestellt werden:

- Die Datenerfassung und -auswertung erfolgt für alle in die Analyse einbezogenen Maschinen in gleichlangen Bezugsintervallen bei gleicher Ausgangssituation aller Maschinen (volle Arbeitsfähigkeit der Maschinen nach komplexer Instandsetzung oder im Neuzustand). Multimomentanalysen von Tagesverfügbarkeiten werden nicht anerkannt.
- Für den Nachweis der Altersabhängigkeit der Verfügbarkeit erfolgt eine Auswertung für wachsende Bezugsintervalle.
- Für wesentlich abweichende Einsatzbedingungen sind getrennte Datenerfassungen und -auswertungen zu organisieren.

Eine Bewertung der Zuverlässigkeit landtechnischer Arbeitsmittel auf der Basis der Aufgabenverfügbarkeit muß die statistischen Eigenschaften dieser Kenngrößen berücksichtigen.

Die stochastische Verteilung des Ausfallzeitpunkts und der Dauer der Ausfälle führt zu wesentlichen, zufällig beeinflussten Schwankungen der Verfügbarkeit einer Maschine in Abhängigkeit von der Länge des Bezugsintervalls und zu bedeutenden Unterschieden zwischen verschiedenen Maschinen im gleichlangen Bezugsintervall.

Für die qualitative Analyse der Verteilung der Verfügbarkeit spielt der normative Bestandteil der Wartezeit t_{WN} keine Rolle. Er läßt sich nachträglich leicht wieder einführen. Die weiteren Betrachtungen beziehen sich deshalb auf eine Aufgabenverfügbarkeit vom Typ

$$V_A = \frac{T_B}{T_B + t_W}; \quad (4)$$

T_B Länge des Bezugsintervalls als summarische Operativzeit T_{02} .

Die Gesamtzeit T_B setzt sich aus einer zufälligen Folge von $(n+1)$ ausfallfreien Nutzungsdauerwerten zusammen, die näherungsweise als exponentialverteilt angenommen werden können. In die praktische Verfügbarkeitsberechnung gehen jedoch nur n ausfallfreie Nutzungsdauerwerte ein. Das Intervall nach dem letzten Ausfall bis zum Ende des Bezugsintervalls muß unberücksichtigt bleiben.

Die n ausfallfreien Nutzungsdauerwerte werden dann durch n Ausfälle im Bezugsintervall begrenzt, deren Ausfalldauer ebenfalls einer Exponentialverteilung unterliegen soll. Die Annahme von Exponentialgesetzen sowohl für die ausfallfreie Nutzungsdauer als auch für die Ausfalldauer läßt sich folgendermaßen begründen:

- In vielen Fällen konnte eine Exponentialverteilung in der Praxis nachgewiesen werden.
- In Fällen, in denen andere Verteilungstypen gefunden wurden, würde sich das Ergebnis wahrscheinlich ändern, wenn sehr kleine Ausfalldauern τ bis gegen Null einbezogen würden. Praktische Erfassungen sind für kleine Ausfalldauerwerte meist durch eine vorgegebene Ausfalldefinition verfälscht.
- Theoretische Betrachtungen zur Verteilung der Verfügbarkeit sind mit sinnvollem Aufwand nur für das Exponentialgesetz möglich.

In der Arbeit [5] wird für diese Bedingungen eine Wahrscheinlichkeit $R(t_W)$ dafür abgeleitet, daß die Gesamtausfalldauer einer Maschine unabhängig von der Ausfallanzahl im Bezugsintervall T_B/T_m größer oder kleiner als t_W ist:

$$R(t_W) = e^{-\left(\frac{T_B}{T_m} + \frac{t_W}{T_m}\right)} \sum_{j=1}^{\left[\frac{T_B}{T_m}\right]} \left[\frac{1}{j!} \left(\frac{T_B}{T_m}\right)^j \right]$$

$$\sum_{i=1}^j \frac{1}{(i-1)!} \left(\frac{t_w}{\tau_m} \right)^{(i-1)} \Big]; \quad (5)$$

T_B/T_m auf die mittlere ausfallfreie Nutzungsdauer T_m normiertes Bezugsintervall für den Verfügbarkeitsnachweis

t_w/τ_m auf die mittlere Ausfalldauer normierte Gesamtausfalldauer im Bezugsintervall.

Der Ausdruck (5) konvergiert trotz der unendlichen Summen. Führt man den Begriff der Dauerverfügbarkeit V_D nach TGL 26096/01 [3] ein, der sich für die betrachteten Bedingungen aus der mittleren ausfallfreien Nutzungsdauer T_m und der mittleren Ausfalldauer τ_m mit

$$V_D = \frac{T_m}{T_m + \tau_m} \quad (6)$$

ergibt, so kann unter Berücksichtigung der Beziehung (4) die Größe t_w/τ_m in (5) ersetzt werden durch

$$\frac{t_w}{\tau_m} = \frac{(1 - V_A) V_D T_B}{V_A (1 - V_D) T_m} \quad (7)$$

Somit liegt ein theoretisches Verteilungsgesetz für die Wahrscheinlichkeit $F(V_A)$ vor, mit welchem die Aufgabenverfügbarkeit einer Maschine in einem Bezugsintervall T_B/T_m bei einer Dauerverfügbarkeit V_D gleich oder kleiner einer Größe V_A ist. In den Bildern 1 und 2 sind derartige Verteilungen der Aufgabenverfügbarkeit $F(V_A)$ für drei Varianten der Dauerverfügbarkeit ($V_D = 0,60; 0,70; 0,90$) dargestellt. Die Bedingung $T_B/T_m = 1$ entspricht für den Mährescher E 512 einem Bezugsintervall für die Verfügbarkeitsauswertung von etwa einem Einsatztag, die Variante $T_B/T_m = 20$ einem Bezugsintervall von etwa einer Normkampagne.

Die theoretischen Abhängigkeiten der Bilder 1 und 2 lassen sich durch praktische Messungen ausreichend bestätigen, so daß sie Grundlage für konkrete Bewertungsalgorithmen der Zuverlässigkeit landtechnischer Arbeitsmittel sein können.

Aus den theoretischen Betrachtungen ergeben sich folgende Schlußfolgerungen:

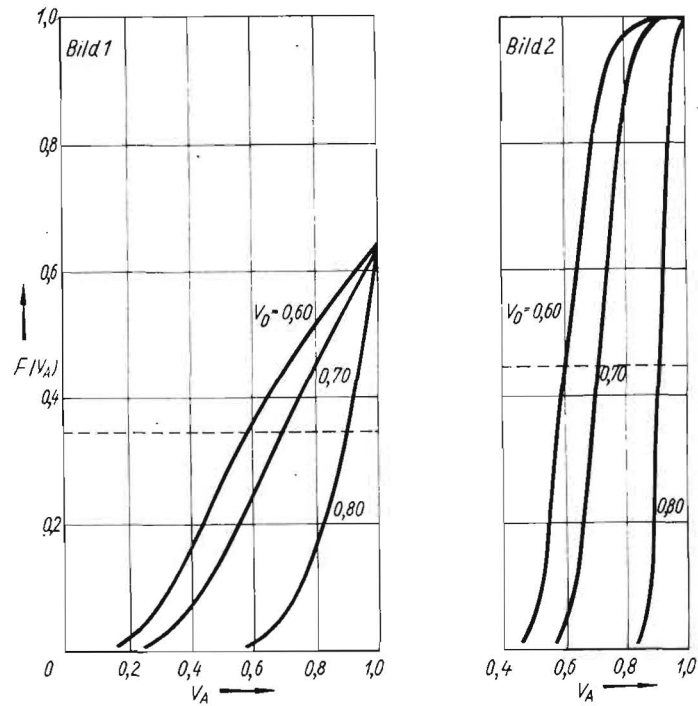
- Die Aufgabenverfügbarkeit V_A für begrenzte Bezugsintervalle schwankt um die Dauerverfügbarkeit V_D .
- Die Streubreite ist um so geringer, je größer das Bezugsintervall für den Verfügbarkeitsnachweis ist. Für $T_B/T_m \rightarrow \infty$ streben alle V_A -Werte gegen V_D .
- Die mittlere Aufgabenverfügbarkeit für eine unendliche Grundgesamtheit in einem begrenzten Bezugsintervall ist gleich der Dauerverfügbarkeit.
- Für den Zuverlässigkeitsnachweis bieten sich zwei Bewertungsformen an:
 - die mittlere Aufgabenverfügbarkeit in einem begrenzten Bezugsintervall als komplexe Bewertung des Maschinentyps
 - eine untere Grenze der Aufgabenverfügbarkeit, die mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugsintervall von keiner Maschine unterschritten werden darf.

3. Die untere Grenze der Aufgabenverfügbarkeit für Einzelmaschinen

Die Gewährleistung einer unteren Grenze der Aufgabenverfügbarkeit im Bezugsintervall für jede Maschine kann die Grundlage für eine Verfügbarkeitsgarantie durch den Hersteller sein. Die Wahrscheinlichkeit der Nichtunter-

Bild 1
Verteilung der Aufgabenverfügbarkeit V_A im Bezugsintervall
 $T_B/T_m = 1$;
--- Niveau der Dauerverfügbarkeit V_D

Bild 2
Verteilung der Aufgabenverfügbarkeit V_A im Bezugsintervall
 $T_B/T_m = 20$;
--- Niveau der Dauerverfügbarkeit V_D



Tafel 1. Untere Grenzen der Aufgabenverfügbarkeit V_{AG} (zulässige Wahrscheinlichkeit des Unterschreitens von V_{AG} 0,02, statistische Sicherheit 0,95)

mittlere Aufgabenverfügbarkeit des Maschinentyps	untere Grenze der Aufgabenverfügbarkeit für Bezugsintervall T_B/T_m		
	5	10	20
0,60	0,366	0,411	0,467
0,70	0,473	0,520	0,577
0,80	0,606	0,650	0,701
0,90	0,776	0,807	0,840
0,95	0,880	0,898	0,917
0,98	0,950	0,958	0,966

schreitung der Verfügbarkeitsgrenze V_{AG} ist dabei so auszuwählen, daß

- der Hersteller durch Garantieansprüche nicht unmäßig belastet wird
- die untere Grenze aber nicht zu weit von der mittleren Aufgabenverfügbarkeit des Maschinentyps abweicht.

In der Tafel 1 sind derartige untere Grenzen der Aufgabenverfügbarkeit für die Wahrscheinlichkeit des Unterschreitens von 0,02 bei einer statistischen Sicherheit von 0,95 zusammengestellt.

Sollte z.B. für einen Mähreschertyp eine mittlere Verfügbarkeit in der Normkampagne ($T_B/T_m \approx 20$) von 0,90 vorgesehen sein, so ergibt sich eine untere Grenze der Aufgabenverfügbarkeit für jede einzelne Maschine von 0,84, die bei Einhaltung der Bedienanweisung und der Instandhaltungsvorschriften nur von 2% der Maschinen unterschritten werden darf. Diese Form der Zuverlässigkeitsvorgabe für ein neues Erzeugnis stimuliert die Aktivität jedes einzelnen Nutzers. Insbesondere wäre sie eine Anregung für das exakte Führen von Bordbüchern, wenn gleichzeitig der Hersteller eine Verfügbarkeitsgarantie übernimmt. Über die zweckmäßige Form und Größe der Garantieleistungen durch den Hersteller müßten weiter-

gehende Untersuchungen durchgeführt werden.

Tafel 1 verdeutlicht auch, daß bei mittleren Aufgabenverfügbarkeiten im Bereich von 0,6 bis 0,8 eine derartige untere Grenze nicht mehr sinnvoll ist. Sie weicht bei einem vertretbaren Niveau der Unterschreitungswahrscheinlichkeit zu weit vom Mittelwert ab. Deshalb wird vorgeschlagen, bei der Festlegung des Verfügbarkeitsnachweises für ein neues Erzeugnis die untere Grenze der Aufgabenverfügbarkeit nur in Erwägung zu ziehen, wenn die mittlere Verfügbarkeit des Maschinentyps größer als 0,85 zu erwarten ist.

4. Die mittlere Aufgabenverfügbarkeit zur Bewertung eines Maschinentyps

Die mittlere Aufgabenverfügbarkeit in einem bestimmten Bezugsintervall ist nur dann eine maschinentypspezifische Kenngröße, wenn die Anzahl der untersuchten Maschinen gegen Unendlich (mehrere Tausend) geht. Da der Verfügbarkeitsnachweis einen solchen Umfang nicht annehmen darf, kann als Bewertungsniveau nur die untere Vertrauensgrenze der mittleren Aufgabenverfügbarkeit einer endlichen Stichprobe dienen. Bei der vertretbaren Annahme, daß die ausfallfreien Nutzungsdauerwerte exponentialverteilt sind, darf hierfür aus den ausfallfreien Nutzungsdauerwerten aller in die Untersuchung einbezogenen Maschinen (bei Serienmaschinen nicht unter 20) eine gemeinsame Stichprobe der Größe n gebildet werden.

Im Bild 3 ist die Abweichung ΔV_{Au} der unteren Vertrauensgrenze der Aufgabenverfügbarkeit V_{Amu} vom Mittelwert der Stichprobe V_{Am} in Abhängigkeit von der Anzahl der zur Verfügung stehenden ausfallfreien Nutzungsdauerwerte n und der mittleren Aufgabenverfügbarkeit V_{Am} der Stichprobe aufgetragen. Wenn z.B. 50 ausfallfreie Nutzungsdauerwerte zur Verfügung stehen, die eine mittlere Aufgabenverfügbarkeit von $V_{Am} = 0,85$ ergeben, so läßt sich mit dieser Stichprobe nur eine mittlere Aufgabenverfügbarkeit des Maschinentyps von $V_{Am} = 0,85 - 0,05 = 0,80$ absichern. Die mittlere Aufgabenverfügbarkeit ist ein komplexer Zuverlässigkeitsparameter des Maschinentyps.

Sie ist nicht auf einen bestimmten Verfügbarkeitsbereich beschränkt, spricht aber auch nicht den einzelnen Nutzer an.

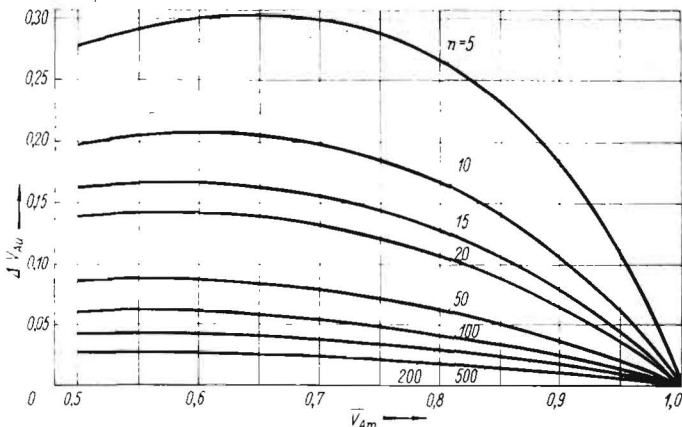
5. Schlußfolgerungen

Die Aufgabenverfügbarkeit ist eine zweckmäßige Kenngröße für die Bewertung der Zuverlässigkeit landtechnischer Arbeitsmittel, wenn der Einfluß der Produktionsorganisation und der Einsatzbedingungen zurückgedrängt oder eliminiert wird. Vor Beginn der Entwicklung eines neuen Erzeugnisses, spätestens in der Stufe K 5, muß die konkrete Form des Verfügbarkeitsnachweises — untere Grenze der Aufgabenverfügbarkeit für die Einzelmaschine oder mittlere Aufgabenverfügbarkeit des Maschinentyps — und das Bezugsintervall (z. B. Normarbeitsmenge in einer Einsatzkampagne) zwischen Hersteller, ASMW und Nutzer vereinbart werden.

Literatur

[1] TGL 26096/03 Zuverlässigkeit in der Technik, Auswahl der Zuverlässigkeitskenngrößen. Ausgabe vom Mai 1975.

Bild 3
Untere Vertrauensgrenze der mittleren Aufgabenverfügbarkeit (statistische Sicherheit 0,95)



- [2] TGL 20987/03 Landtechnische Arbeitsmittel, Instandhaltungsgerechte Konstruktion, Grundsätze der Vorgabe und Bewertung der Instandhaltungseignung. Ausgabe vom Jan. 1976.
- [3] TGL 26096/01 Zuverlässigkeit in der Technik, Begriffe. Ausgabe vom Dez. 1971.
- [4] TGL 22289 Zeitgliederung in der Land- und

- Forstwirtschaft. Begriffe, Kurzzeichen, Erläuterungen. Ausgabe vom Juni 1974.
- [5] Ihle, G.: Richtlinie zur Erfassung und Auswertung der Verfügbarkeit landtechnischer Arbeitsmittel. TU Dresden, Sektion Kraftfahrzeug-, Land- und Fördertechnik, Forschungsbericht für die VVB Landtechnische Instandsetzung 1976. A 1746

Beitrag zur Ermittlung der Größe von Austauschstöcken in Abhängigkeit von Bedarf und Transportorganisation

Dipl.-Ing. M. Reichel, KDT, Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik

Damit in der sozialistischen Landwirtschaft der DDR die anspruchsvollen Aufgaben zur Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln und der Industrie mit Rohstoffen gelöst werden können, ist u. a. eine hohe Verfügbarkeit der eingesetzten landtechnischen Arbeitsmittel erforderlich.

Das bestehende Baugruppenversorgungssystem trägt zur Erhöhung der Verfügbarkeit und zur Verkürzung der instandsetzungsbedingten Stillstandszeiten der Arbeitsmittel bei. Zur Zeit erfolgen Untersuchungen zur Gestaltung des Baugruppenversorgungssystems in Anpassung an die sich verändernden Produktionsbedingungen in der Landwirtschaft.

Im nachfolgenden Beitrag werden Ergebnisse zur Berechnung der Größe von Austauschstöcken in Abhängigkeit vom Bedarf und von der Transportorganisation vorgestellt.

1. Voraussetzungen für Berechnungsmodelle

Für die Berechnung der Größe von Austauschstöcken werden im folgenden zwei Modelle betrachtet und die Bedingungen für deren Anwendung untersucht. Die Größe des Austauschstocks in Ebene II ist vom Bedarf nach Baugruppentausch und vom Lieferregime in Ebene I abhängig (Bild 1).

Die erste Voraussetzung für die Nutzung der vorzustellenden Modelle ist das Vorliegen eines Poissonschen Ereignisstromes, d. h., die Häufigkeit des Baugruppentausches je Zeiteinheit wird durch eine Poisson-Verteilung beschrieben. Von den drei Möglichkeiten des Nachweises

- Nachweis eines stationären, nachwirkungsfreien und ordinären Stromes
 - Verteilung des Ankunftsabstands der Tauschforderungen nach der Exponentialverteilung
 - Verteilung der Häufigkeit der Tauschforderungen nach der Poisson-Verteilung
- wurden die zweite und dritte Möglichkeit genutzt, da sich im ersten Fall keine Nachwirkungsfreiheit darstellen läßt. Die Untersuchungen in der Ebene II des Baugruppenversorgungssystems (Bild 1) haben gezeigt, daß sich für die individuelle Instandsetzung (individueller Baugruppentausch) eine poissonverteilte Häufigkeit der Tauschforderungen je Zeiteinheit ergibt.
- Die zweite Bedingung ist die Realisierung der Transportorganisation entsprechend dem Lieferregime 2 (Tafel 1), das sich bereits in der Praxis des Baugruppentausches bewährt hat.

2. Berechnungsmodelle

2.1. Modell I

Das erste zu betrachtende Modell M I ist ein Bedienungsmodell von Zav'jalov und

Mařtak [1].

Ausgehend von der Anzahl der Forderungen nach Baugruppentausch je Zeiteinheit (λ als Intensität des Forderungenstromes, wobei als Länge eines Lieferzyklus ein Zeitraum von einer Woche gewählt wird) werden folgende Wahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von der Größe des Austauschstocks berechnet:

- Wahrscheinlichkeit des Soforttausches P_A (Ereignis des Soforttausches im Austauschstützpunkt)
- Wahrscheinlichkeit des Wartens P_B (Ereignis des Tausches am nächsten Liefertag des LIW)
- Wahrscheinlichkeit des Wartens P_C (Ereignis des Tausches am übernächsten Liefertag des LIW).

Im Verlauf des Lieferzyklus D werden I Tausche durchgeführt, wenn zu Beginn des Lieferzyklus (Liefertag des LIW) mehr als I Baugruppen im Austauschstützpunkt zum Tausch bereitstanden und I Tauschforderungen auftraten bzw. I Baugruppen zur Verfügung standen und mindestens I Tauschforderungen auftraten.

Bild 1
Baugruppenversorgungssystem der Landwirtschaft der DDR

