

zeugnisses die geplante Qualität und Effektivität zu erreichen bzw. zu überbieten.

— Die im Verlauf der Kontrollen festgestellten Abweichungen zu Vorgaben aus der Aufgabenstellung sind so zu regulieren, daß die geplante Erzeugnisqualität und Effektivität insgesamt gesichert und nach Möglichkeit weiter überboten werden.

Mit diesen Darlegungen sollten einige Methoden aufgezeigt werden, wie z. B. auf der Grundlage einer TÖA im Verlauf des Entwicklungsprozesses leitungseitig eine hohe Erzeugnisqualität gesichert werden kann.

Die praktische Anwendung dieser Grundlagen brachte im VEB Weimar-Kombinat bereits kurzfristig eine wesentliche Verbesserung der planmäßigen Erfüllung der geplanten Entwicklungsaufgaben.

Durch Anwendung der hier vorgestellten und beschriebenen Methoden wurden u. a. die Haupterzeugnisse Rodelader E 684 und automatische Trennanlage E 691 vorfristig in die Produktion überführt. Dabei konnte die Erzeugnisqualität im Verlauf des Entwicklungsprozesses im Vergleich zur ursprünglich vorgegebenen Aufgabenstellung weiter verbessert

werden. Beide Erzeugnisse stellen in bezug auf ihre Gebrauchseigenschaften internationale Spitzenerzeugnisse dar.

Damit wurde der Nachweis erbracht, daß die praktische Anwendung der hier dargelegten theoretischen Grundsätze eine wesentliche Voraussetzung darstellt, damit zukünftige Entwicklungsvorhaben auf der Grundlage von entsprechenden Aufgabenstellungen mit hoher Qualität und Effektivität geplant und im Entwicklungsprozeß bis hin zur Produktionseinführung auch realisiert werden.

A 2138

## Lastannahmen — eine Übersicht über das Gebiet der Belastungsermittlung für Bemessungszwecke

Dr.-Ing. E. Puls, KDT, VEB Kombinat Fortschritt Landmaschinen, Betrieb Traktorenwerk Schönebeck

### 1. Allgemeine Grundlagen

Bei der Entwicklung von Landmaschinen und Traktoren werden konkrete Nutzungsdauern vorgegeben. Zum Nachweis dieser Nutzungsdauern sind Lebensdauernachweise erforderlich. Diese sind nicht nur auf einen prinzipiellen Eignungsnachweis gerichtet, sondern erfordern, daß zur Sicherung der projektierten Werte nur die unbedingt notwendigen Material- und Fertigungsaufwendungen erbracht werden. Dabei ist es das Ziel dieses Nachweises, die Bauteile so zu bemessen, daß innerhalb der projektierten Nutzungsdauer Funktionsausfälle oder maßgebliche Funktionseinschränkungen nur mit begrenzten Wahrscheinlichkeiten erfolgen.

Bei Neu- und Weiterentwicklungen von kompletten Maschinen, deren Baugruppen und Bauteilen ist vor der Produktionsaufnahme die Serienreife nachzuweisen. Dieser Nachweis ist innerhalb des Konstruktions- und Erprobungsprozesses zu erbringen und betrifft folgende Bereiche:

- Funktion
- Zuverlässigkeit
- Ergonomie.

Der Nachweis einer ausreichenden Zuverlässigkeit erfordert innerhalb dieses Prozesses die größten zeitlichen und materiellen Aufwendungen. Die Erreichung einer hohen Zuverlässigkeit ermöglicht über Steigerungen der Verfügbarkeit, der Materialökonomie und der Instandhaltungseignung einen maßgeblichen Beitrag zur Intensivierung der gesellschaftlichen Produktion. Das erfordert die Anwendung moderner Bemessungsverfahren.

Alle Bemessungsverfahren, unabhängig welchem Nachweis sie dienen und ob sie analytisch oder experimentell erfolgen, erfordern die Beachtung folgender Einflußgrößen:

- Belastung
- Werkstoff
- Gestaltung
- Umstände, unter denen die drei erstgenannten Einflußgrößen wirken.

Der Belastung kommt dabei eine außerordentlich große Bedeutung zu, denn Analysen im Bereich des Traktoren- und Landmaschinenbaus ergaben als Hauptursache für unzulässige Ausfälle vor allem mangelhafte Kenntnisse über die Betriebsbelastungen.

Unter Belastung wird im folgenden die Einwirkung von Kräften und Momenten auf die Bauteile verstanden, unter Lastannahme die für analytische oder experimentelle Bemessung aufbereitete Belastung. Teilweise ist es im Rahmen dieser Darlegungen erforderlich, statt der Belastung die Beanspruchung der Bauteile (Einwirkung der Schnittgrößen) zu betrachten.

### 2. Gliederung der Betriebsbelastung

Die Erscheinungsformen der Betriebsbelastungen bzw. -beanspruchungen sind außerordentlich vielfältig. Eine sinnvolle Bearbeitung erfordert deshalb die Einführung bestimmter ordnender Grundsätze. Im folgenden wird durch Anwendung mehrerer aufeinander aufbauender Kriterien eine Systematik zu Bauteilbeanspruchungen aufgestellt.

Landmaschinen und Traktoren sind Maschinen, in denen Energieübertragungs- und Energieumformungsprozesse ablaufen. Dabei treten gewollte und ungewollte Massenkräfte durch ungleichförmige Bewegungen und durch Bauteilverformungen auf. Daraus ergibt sich eine Untergliederung der Bauteilbeanspruchungen nach der Funktion (Bild 1):

- Eigenspannungen
- energetische Beanspruchungen
- dynamische Beanspruchungen.

Die dynamischen Beanspruchungen sind von größter Bedeutung für die Bemessung. Sie werden deshalb im folgenden gesondert behandelt. Der allgemeine Fall ist durch die Überlagerung von Beanspruchungen aller drei beschriebenen Kategorien gekennzeichnet.

Die dynamischen Betriebsbeanspruchungen resultieren aus dem Schwingungsverhalten der Maschinen einschließlich ihrer Anbau- und Anhängergeräte. Dieses Schwingungsverhalten ist die Reaktion des durch konstruktive Parameter gekennzeichneten Systems auf die Einwirkung von Kräften, deren Frequenz, Amplitude und Einwirkungsstelle. Die wesentlichsten Erregerquellen sind Massenkräfte infolge ungleichförmiger Bewegungen und Unwuchten sowie die Kopplung des Schwingungssystems mit der Fahrbahn. Zur Beschreibung der dynamischen Betriebsbeanspruchung ist deshalb die Antwort des Schwingungssystems zu beschreiben. Sie ist folgendermaßen gliederbar:

- Stationäre Beanspruchung:
  - harmonisch
  - periodisch
  - stationär stochastisch
- Instationäre Beanspruchung:
  - transient
  - instationär stochastisch
  - pseudoperiodisch.

Grundlage des experimentellen und rechnerischen Betriebsfestigkeitsnachweises ist das Lastkollektiv. Das Lastkollektiv enthält die während der gesamten Lebensdauer (bzw. während bestimmter Zeitabschnitte) auftretenden Belastungen geordnet nach Größe und Häufigkeit. Die kennzeichnenden Parameter eines Kollektivs sind im folgenden dargestellt:

- Lastkollektivparameter:
  - Umfang

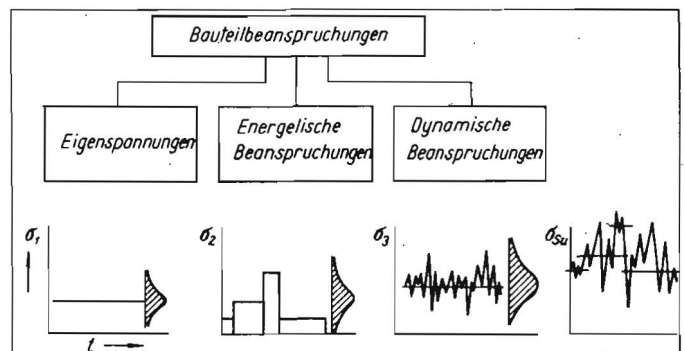


Bild 1. Gliederung der Bauteilbeanspruchungen

- Mittelwert
- Höchstwert
- empirische Momente
- Regellosigkeitskoeffizient
- Korrelationskoeffizient
- Verteilungsfunktion
- Belastungsintensität
- erweiterte Beschreibung:
  - Lastanstiegsgeschwindigkeit
  - Reihenfolge
  - Belastungspausen
  - Lastwechselform
  - Spektraldichte.

Unabhängig von der Beschreibungsweise erfordert jede Belastungs- bzw. Beanspruchungsangabe folgende zusätzlichen Informationen:

- Umstände, unter denen sie wirken
- Einsatzzeit (Lebensdauer, teilweise auch als Nutzungsdauer bezeichnet), die durch die Belastungsangabe erfaßt wird
- Belastungsart:
  - ein- oder mehrachsrig
  - Axial-, Biege- oder Torsionsbelastung.

Die Ermittlung der Kollektivparameter erfolgt, bis auf Kollektivhöchstwert und Belastungsintensität, mit geeigneten Geräten ohne wesentliche Schwierigkeiten.

### 3. Belastungsermittlung

Der Belastungsermittlung muß in jedem Fall die Ermittlung der maßgeblichen Einflußgrößen vorangehen. Die Belastungsermittlung kann experimentell und analytisch erfolgen, teilweise werden beide Bearbeitungsweisen verknüpft. Zweckmäßig hat sich erwiesen, den Prozeß der Belastungsermittlung als System zu betrachten, wobei der Systemausgang die Belastung darstellt. Alle Systemeingänge stellen Einflußgrößen dar. Die experimentelle und die analytische Belastungsermittlung stellt unterschiedliche Anforderungen bezüglich der Kenntnisse über die einzelnen Systemelemente.

#### 3.1. Experimentelle Belastungsermittlung

Die experimentelle Methode ist eine Arbeitsweise, mit der über Hypothesen allgemeine Gesetzmäßigkeiten gefunden werden können. Daraus können Theorien abgeleitet werden, die eine Beschreibung der Wirklichkeit gestatten. Dazu sind Vorarbeiten auf dem Gebiet der Versuchsplanung erforderlich. Folgende Arbeitsschritte sind zu absolvieren (Bild 2):

##### 3.1.1 Einsatzspiegel aufstellen

Der Einsatzspiegel ist die Beschreibung von Art und Umfang des Einsatzes, wobei der Gesamteinsatz in Zyklen gegliedert wird. Diese Einsatzzyklen werden für die einzelnen Bauteile bis zu Belastungszuständen aufgeteilt. Im Bild 3 ist dieser Schritt schematisch dargestellt. Der zeitliche Belastungsverlauf ist dabei dem Einsatzparameter Beladungszustand (statische Radlast) zugeordnet. Von besonderer Bedeutung sind in diesem Zusammenhang die Umstände, unter denen der Einsatz erfolgt. Eine bedeutungsvolle Rolle spielt dabei die Verhaltensweise des Maschinenführers. Den hohen psycho-physischen Belastungen der Maschinenführer stehen nur begrenzte und individuell verschiedene Leistungsfähigkeiten gegenüber. Als Rückwirkung davon treten u. a. erhebliche Belastungsstreuungen auf.

##### 3.1.2. Meßprogramm

Auf der Basis der Belastungszustände erfolgt die Meßprogrammfestlegung unter Berücksichtigung weiterer Umstände, wie z. B. Meßstreckenlänge und Wiederholungsanzahl.

Bild 2. Teilsysteme zur Ermittlung der Betriebsbelastungen

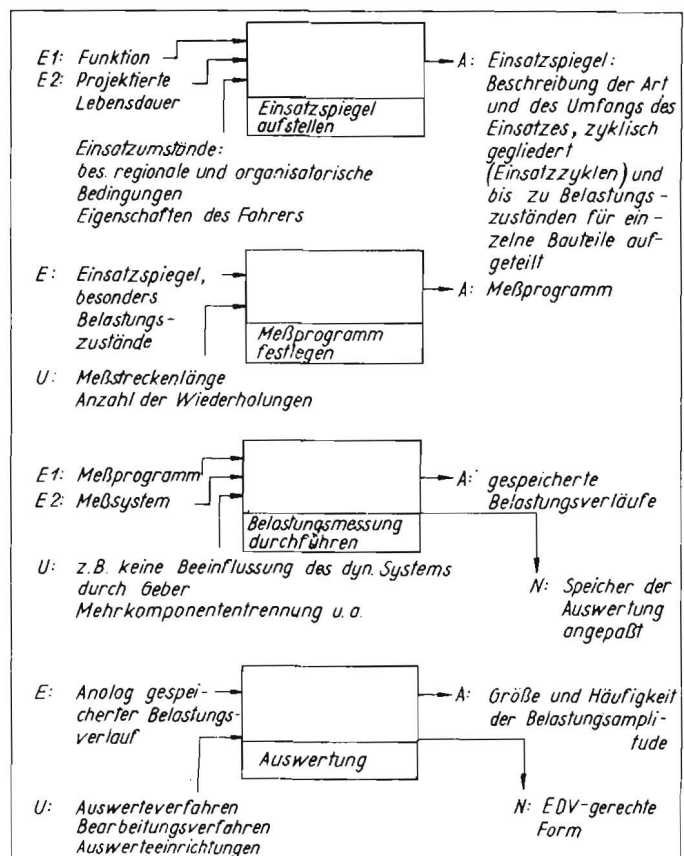
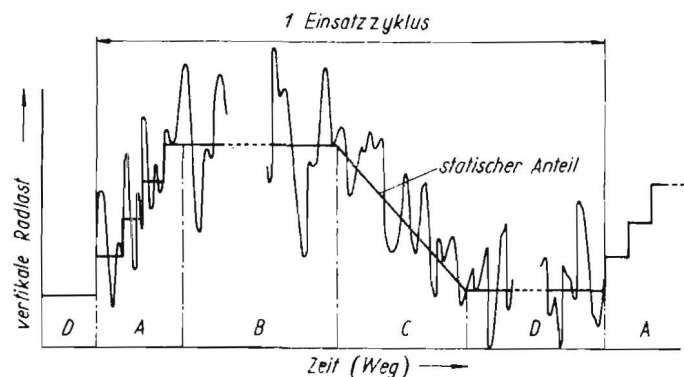


Bild 3. Einsatzspiegel eines Dungstreuanhängers; zeitlicher Verlauf der vertikalen Radlast Betriebszustände: A Beladen, B Transport (voll), C Entladen (Dung verteilen), D Transport (leer)



#### 3.1.3. Durchführung der Belastungsmessungen

Von großer Bedeutung für diesen Arbeitsschritt ist die Leistungsfähigkeit des Meßsystems. Unter Meßsystem ist die Gesamtheit aller Einrichtungen und Methoden zur Meßwertaufnahme und Meßwertauswertung zu verstehen. Die Eignung des Systems ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Technische Parameter der Geräte und Ausrüstungen
- Bearbeitungsmethoden und -verfahren bezüglich der Anforderungen der Betriebsfestigkeit
- hohe Genauigkeit der Meßergebnisse
- Organisationsformen, die die Durchführung der Messungen mit möglichst geringen Aufwendungen für Arbeitszeit und Kosten ermöglichen. Das betrifft alle drei genannten Bereiche.

Neben den Meßsystemen sind für diesen Arbeitsschritt folgende Probleme von Bedeutung:

- Beeinflussung des dynamischen Systems durch den Geber
- Mehrkomponententrennung
- Meßfehlerermittlung.

#### 3.1.4. Auswertung

Unter Auswertung ist die Ermittlung der Kollektivparameter aus den gespeicherten Belastungsverläufen zu verstehen. Dazu sind geeignete Geräte sowie Verfahren der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik notwendig. Die folgenden Klassierverfahren haben derzeit die größte Bedeutung:

- Zählen aller Maxima und aller Minima, unabhängig von ihrer Lage (einparametrig)
  - Zählen der Spannen zwischen benachbarten Extremwerten und das zugehörige Minima (zweiparametrig)
- Diese Methode enthält die vorhergenannte Methode. Die Verteilung der Maxima und der Minima sind Randverteilungen der Korrelationsmatrix.
- Momentanabfragung in zeitgleichen Abständen.

Die Erhöhung der Genauigkeit der Ergebnisse durch Anwendung zweiparametrischer Klassierverfahren ist in einem Beispiel im Bild 4 dargestellt. Zwei unterschiedliche Belastungsverläufe weisen gleiche Häufigkeitsverteilungen auf. Sie unterscheiden sich jedoch im Korrelationskoeffizienten. Dieser kann beim Klassie-

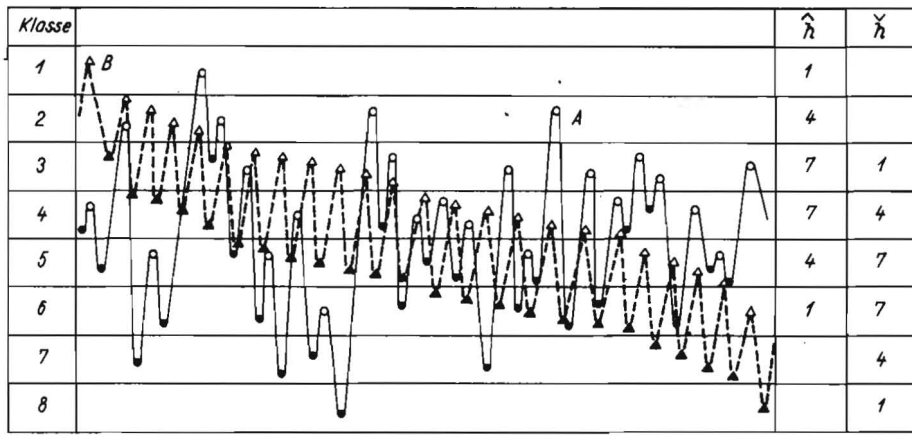


Bild 4. Auswertung von Beanspruchungsverläufen

Verlauf	A	B
Lastwechselanzahl $n$	24	24
Regellosigkeitskoeffizient $i$	0,58	0,58
Korrelationskoeffizient $r$	0,26	1,00

ren nur über zweiparametrische Verfahren ermittelt werden. Im vorliegenden Beispiel bewirkt der Unterschied der Korrelationskoeffizienten einen Lebensdauerunterschied von rd. 100 %.

Darüber hinaus gewinnen solche neuen Verfahren an Bedeutung, die verbesserte Kenntnisse über das Belastungsgeschehen ermöglichen. Vorrangig ist hierbei die Spektraldichte zu nennen. Aus ihr lassen sich sowohl die bisher üblichen Kollektive als auch alle statistischen Parameter ableiten. Die derzeit bestehenden verfahrenstechnischen Probleme sollten kein Hinderungsgrund für die Anwendung sein.

Abschließend einiges zu Problemen bei der Aufstellung von Gesamtnutzungsdauer-Lastkollektiven. Darunter ist die Zusammenfassung der Einzelkollektive der unterschiedlichen Belastungszustände zu verstehen. Im Bild 5 ist dies schematisch dargestellt. Dabei entsteht ein relativ großer Bereich, für den Größe und Häufigkeit meßtechnisch belegt sind. Abhängig von der Länge der Meßfahrten verbleibt ein Bereich, für den das Belastungsgeschehen unbekannt ist. Die Ausfüllung dieser Lücke erfolgt durch Sonderversuche und Extrapolationen. Mit Sonderversuchen wird die größte bei der Bemessung zu berücksichtigende Beanspruchung bezeichnet. Die Probleme liegen dabei besonders bei der Abgrenzung zur Havarie. Die Häufigkeit muß meistens geschätzt werden, da bisher noch wenig Möglichkeiten für eine meßtechnische Erfassung bestehen. Der Bereich zwischen den Sonderversuchen und dem gemessenen Kollektiv wird durch Extrapolation der Einzelkollektive ausgefüllt.

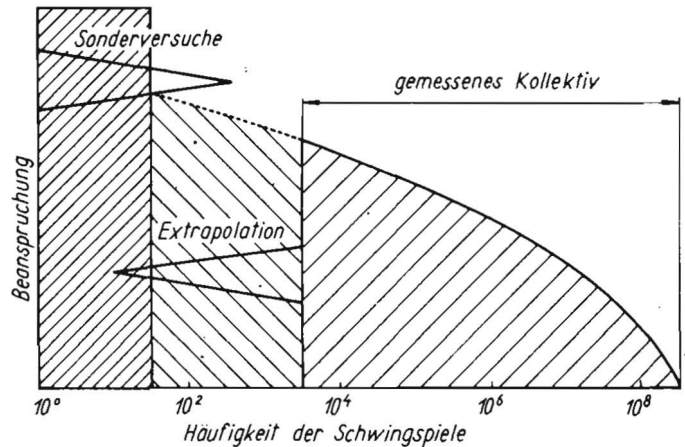
### 3.2. Analytische Belastungsermittlung

Die Probleme dieser Bearbeitungsweise liegen in der Aufstellung geeigneter Fahrzeug-Fahrbahn-Modelle. Für die Abarbeitung der Programme geben die heutigen EDVA ausreichende Möglichkeiten. Die besten Ergebnisse liegen bisher bei der Ermittlung der Kollektivendwerte und bei Vergleichsrechnungen des Schwingungsverhaltens vor.

Ein ständiger Fortschritt auf diesem Gebiet ist von großer Bedeutung, da die damit erreichten Ergebnisse viel eher als die experimentellen in den Entwicklungsprozeß einfließen.

Von Bedeutung sind die ersten Ergebnisse über

Bild 5. Aufstellung von Gesamtnutzungsdauer-Lastkollektiven



die Einbeziehung der Fahreigenschaften in den Prozeß der analytischen Belastungsermittlung.

### 4. Verallgemeinerte Belastungen

In vielfältiger Weise werden Erkenntnisse über das Belastungsgeschehen gesammelt, um sie bei neuen Aufgaben anwenden zu können. Sie lassen sich in allgemeingültige und ergebnisgebundene Aussagen unterteilen, wobei letztere die größere Bedeutung erlangt haben. Verallgemeinert werden derzeit vor allem folgende Bereiche:

- Erregung durch standardisierte Fahrbahnebenen; das betrifft sowohl Einzelhindernisse als auch Straßen
- Systematisierung der Kollektive in Form von Normkollektiven; sie dienen vor allem einer rationellen Betriebsdauerermittlung mit minimalen mathematischen Aufwendungen
- Stoßfaktorensysteme, das sind Darstellungen von Höchstbelastungen in Form von Lastvielfachen, geordnet nach wesentlichen Einflußgrößen.

### 5. Normen und Richtlinien

Die Notwendigkeit von einheitlichen und übertragbaren Daten- und Informationsangaben ist unbestritten. Leider stehen derzeit dazu noch keine geeigneten Vorschriften zur Verfügung. Ein Anfang wird mit den demnächst erscheinenden

den Standards TGL 33787 (Schwingfestigkeit; statistische Auswertung regelloser Amplituden-Zeit-Funktionen) und TGL 19330/01 (Schwingfestigkeit; Begriffe und Definitionen) gemacht. Die Ausarbeitung weiterer Normen und Standards sollte verstärkt vorgenommen werden. Positive Lösungen für Richtlinien liegen in den wissenschaftlich-technischen Arbeitsunterlagen des Instituts für Landmaschinentechnik Leipzig vor, in denen fachgebietsspezifische Methoden der Betriebsfestigkeit dargelegt sind.

### 6. Zusammenfassung

Für alle Bemessungsverfahren sind die Lastannahmen von großer Bedeutung. Sie beeinflussen maßgeblich die Zuverlässigkeit der Erzeugnisse des Traktoren- und Landmaschinenbaus. Ausgehend von einer Systematisierung wird eine Übersicht über die Ermittlung der Betriebsbelastungen gegeben. Entsprechend der derzeitigen Anwendungsbreite wird dem experimentellen Verfahren der größte Umfang eingeräumt. Es wird auf die vorteilhafte Möglichkeit hingewiesen, die analytischen Verfahren bereits vor dem Bau der ersten Muster durchzuführen. Abschließend wird auf die Notwendigkeit zur breiteren Anwendung von Normen und Standards hingewiesen.