

Die Auslegung von Landmaschinenbauteilen nach Lastkollektiven

Institut für Landmaschinen, TH Braunschweig

Bei der zukünftigen Entwicklung von Landmaschinen und Acker-schleppern wird man neben der fertigungsgerechten Gestaltung mehr noch als bisher Wert auch auf die optimale Werkstoffausnutzung zu legen haben. Um sie erreichen zu können, muß man die während des Einsatzes einer Maschine in den einzelnen Maschinenteilen auftretenden wirklichen Betriebsbelastungen kennen, die man in anderen Gebieten der Technik heute durch Ermittlung der sogenannten „Belastungskollektive“ oder „Lastkollektive“ erfaßt. Obwohl am Institut für Schlepperforschung in Braunschweig-Völkenrode von GERLACH und COENENBERG bereits Ansätze zur Ermittlung solcher Lastkollektive für Schleppergetriebe gemacht wurden, sind aus dem Gebiete des Landmaschinenbaues bisher keinerlei Arbeiten bekannt geworden, die einen genügenden Einblick in die während des Einsatzes in den Maschinenteilen oder Baugruppen beispielsweise einer Erntemaschine auftretenden Belastungen geben und die damit eine Vorausberechnung und eine optimale Gestaltung dieser Teile ermöglichen.

Die VDI-Fachgruppe Fahrzeugtechnik hat vor einiger Zeit einen Ausschuß gebildet, der sich speziell mit der Erfassung von Lastkollektiven an Fahrzeug-Dieselmotoren beschäftigen soll. Es wäre wünschenswert, wenn die jetzt und in Zukunft in Deutschland an Landmaschinen und Acker-schleppern durchzuführenden Forschungsarbeiten auch auf die Ermittlung solcher Belastungskollektive ausgedehnt würden. Daher ist es der Zweck dieses Aufsatzes, die für die Erfassung von Lastkollektiven notwendigen Grundkenntnisse zu vermitteln, die noch vorhandenen Probleme zu erörtern und die Vorzüge der Benutzung von Lastkollektiven für die Berechnung von Bauteilen, insbesondere für neu zu entwickelnde Maschinen aufzuzeigen.

H. J. MATTHIES

Der Zwang zu wirtschaftlicher Herstellung und zur bestmöglichen Werkstoffausnutzung, wie er bei der Serienfertigung zum Beispiel von Kraftfahrzeugen oder von Landmaschinen in zunehmendem Maße zu verzeichnen ist, erfordert heute mehr als früher exakte Methoden zur Berechnung der dynamisch beanspruchten Bauteile dieser Maschinen. Die herkömmliche Berechnungsmethode, nach der man von einer stationären Belastung der Bauteile ausgeht und die während des Einsatzes in Wirklichkeit vorhandenen dynamischen Belastungen infolge von Schwingungsvorgängen durch die Einführung von Stoßfaktoren berücksichtigt, ermöglicht keine genaue Aussage über die tatsächlich auftretenden Werkstoffbeanspruchungen. Beim Einsatz dynamisch beanspruchter Maschinen stellt sich nämlich in deren Bauteilen eine regellose Folge von Belastungen unterschiedlicher Höhe ein, und diese Belastungen sind nur mit Hilfe statistischer Methoden zu erfassen. Der Werkstoff zeigt aber gegenüber dynamischen Belastungen, die mit statistischen Methoden gekennzeichnet werden müssen, ein ganz anderes Verhalten als bei stationärer Belastung. Da bisher keine Äquivalenz zwischen regellos dynamischen Belastungen und einer stationären Lastannahme gefunden werden konnte, wurde in neuerer Zeit ein Verfahren entwickelt, das eine genaue Dimensionierung und Lebensdauerermittlung von Bauteilen mit dynamischer Belastung ermöglicht.

Dies ist das Verfahren der Auslegung dynamisch beanspruchter Bauteile nach Lastkollektiven, mit dem sich dieser Aufsatz befassen soll.

Schwingungssysteme in den Baugruppen von Landmaschinen

Die Ursache für die beim Einsatz der Landmaschinen auftretenden dynamischen Belastungen sind Schwingungssysteme, die von den Bauteilen der Maschinen gebildet werden. Das soll kurz am Beispiel des Schwingungssystems in der Leistungsübertragung von Acker-schleppern beschrieben werden (Bild 1).

Mit den Rädern als Drehmassen (a) und den Wellen als Drehfedern (b) wird von den leistungsübertragenden Elementen des Schleppergetriebes ein Schwingungssystem gebildet; innerhalb und an den

Enden dieser Übertragungskette sind noch weitere Drehmassen gekoppelt. Auf der Antriebsseite sind das die oszillierenden und die rotierenden Massen des Verbrennungsmotors (c, d) und an der Abtriebsseite die Schleppertriebbräder großen Trägheitsmoments (e). Über die elastischen Triebräder sind ferner die translatorische Schlepper- und Anhängemasse gekoppelt (f). Weitere Schwingungssysteme, die mit dem des Schleppergetriebes gekoppelt werden können, stellen die von der Schlepperzapfwelle angetriebenen Maschinen dar (g). Weitgehende Veränderungen des Schwingungssystems können außerdem noch bei Betätigung der Reibungskupplung (h) und der Reibbremsen (j) und durch Schaltung der Übersetzungsstufen des Getriebes (k) und der Differentialsperrre (l) eintreten.

Die Eigenfrequenzen von Schwingungssystemen lassen sich nun mit den Hilfsmitteln der Mechanik und der Mathematik berechnen. Dazu muß bekanntlich das sogenannte Ersatz-Schwingungssystem ermittelt werden, indem die Drehmassen und Wellen des wirklichen

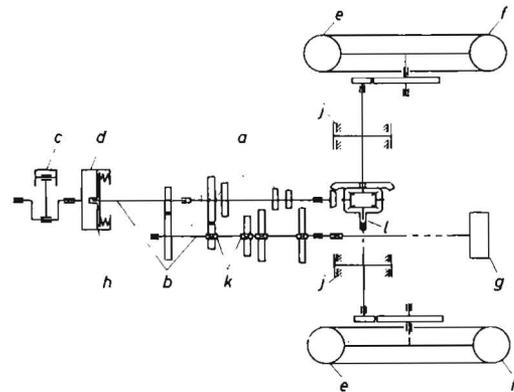


Bild 1: Schwingungssysteme eines Schleppergetriebes nach [1]

- a Getrieberäder als Drehmassen
- b Getriebewellen als Drehfedern
- c oszillierende Massen des Verbrennungsmotors
- d rotierende Massen des Verbrennungsmotors
- e Drehmassen der Triebräder
- f translatorische Schlepper- und Anhängemasse über die Triebräder an das Schwingungssystem gekoppelt
- g weitere Drehmassen über die Zapfwelle an das Schwingungssystem gekoppelt
- h bei Betätigung der Reibungskupplung wird das Schwingungssystem verändert
- j bei Betätigung der Reibbremsen wird das Schwingungssystem verändert
- k durch den Eingriff verschiedener Übersetzungsstufen wird das Schwingungssystem verändert
- l durch die Schaltung der Differentialsperrre wird das Schwingungssystem verändert

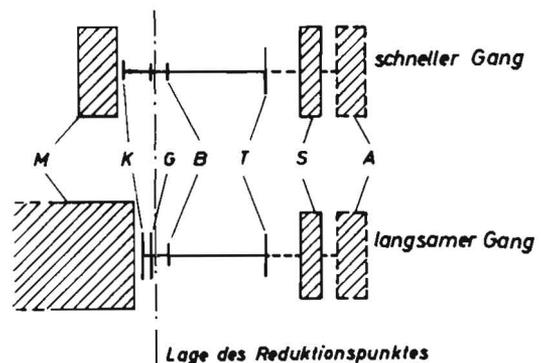


Bild 2: Ersatz-Schwingungssystem des Schleppergetriebes von Bild 1 (mit angehängtem beladenen Ackerwagen)
Die reduzierten Trägheitsmomente und Wellenlängen entsprechen dem Zeichnungsmaßstab nach [1]

- M reduziertes Trägheitsmoment des Verbrennungsmotors
- K reduziertes Trägheitsmoment der Kupplung
- G reduziertes Trägheitsmoment des Wechselgetriebes
- B reduziertes Trägheitsmoment der Bremsen
- T reduziertes Trägheitsmoment der Triebräder
- S reduziertes Trägheitsmoment der Schleppermasse
- A reduziertes Trägheitsmoment der Anhängemasse

Systems auf eine Achse reduziert werden; das Ergebnis einer Reduktion ist in Bild 2 dargestellt. Nach dem Ersatz-Schwingungssystem können die Frequenzgleichungen aufgestellt werden, aus denen sich dann die Eigenfrequenzen berechnen lassen. Bei Wechselgetrieben sind die Eigenfrequenzen des Schwingungssystems mit der jeweils eingeschalteten Übersetzungsstufe veränderlich, und daher werden die Eigenfrequenzen oft in sogenannten Frequenzspektren in Abhängigkeit von der Getriebeübersetzung angegeben [1].

Die Belastungen in den Bauteilen eines solchen schwingungsfähigen Systems sind nun von der Stärke der Anregung und von der Verstärkung durch Resonanz abhängig, keinesfalls aber durch das Moment des Antriebsmotors begrenzt. Zum Beispiel des Schleppergetriebes seien als mögliche Anregungen folgende genannt:

- Schwankungen des Motormoments,
- Motorungleichförmigkeit,
- Kuppelvorgänge,
- Bremsvorgänge,
- Schaltvorgänge,
- Ungleichförmigkeiten des Fahrwiderstandes,
- Ungleichförmigkeiten der Zugkraft und des Zapfwelldrehmomentes durch die angetriebene Landmaschine.

Die Verstärkung der Schwingungsamplituden durch Resonanz tritt ein, wenn die Frequenz der Anregung in der Nähe einer Eigenfrequenz des Schwingungssystems liegt. Sie ist von folgenden Einflüssen abhängig:

- Nähe der Anregungsfrequenz zu einer Eigenfrequenz,
- Werkstoff- und Reibungsdämpfung.

Aus der Vielfalt der die Schwingungsvorgänge bedingenden Einflußfaktoren wird ersichtlich, daß Frequenzen und Amplituden in regellos schwankender Höhe und Folge auftreten; die Amplituden der Schwingungen als für die Festigkeit maßgebende Größe können nicht berechnet werden.

Für eine genaue Dimensionierung von dynamisch beanspruchten Bauteilen ist aber die Kenntnis der während des Einsatzes wirkenden Belastungen erforderlich; diese müssen daher während des Einsatzes der Maschine gemessen werden. Hierzu wird meist der Dehnungsmeßstreifen angewendet, der die Längen- oder Winkeländerungen eines belasteten Meßgliedes mitmacht und diese in elektrische Spannungsschwankungen als Folge der Belastung umsetzt. Die elektrischen Signale des Meßwertgebers können nach Verstärkung auf einem Oszillographen sichtbar gemacht und der Meßwertverlauf kann aufgezeichnet werden. Die Berechnung von Belastungen und Nennspannungen erfolgt dann im Gültigkeitsbereich des HOOKEschen Gesetzes aus den gemessenen Verformungen.

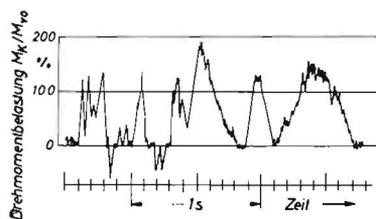


Bild 3: Verlauf der Drehmomentbelastung in der Kupplungswelle eines Schleppers beim Befahren einer Schlaglochstrecke mit angehängtem Ackerwagen nach [1]

M_K Drehmoment in der Kupplungswelle
 M_0 Motornennmoment

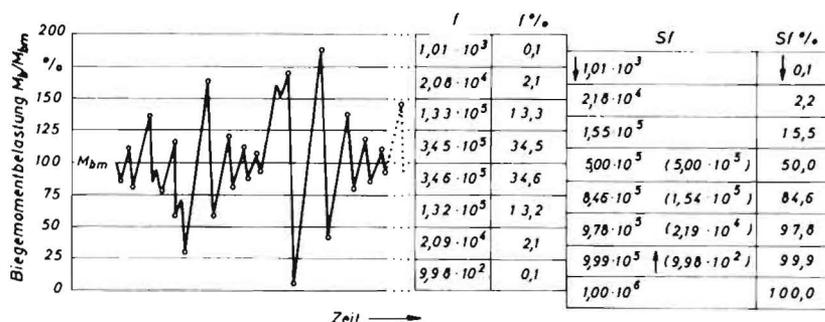


Bild 4: Ermittlung des Lastkollektivs für das Biegemoment einer Schlepperachse nach der Überschreitungshäufigkeit von Lastgrenzen

M_b Biegemoment in der Schlepperachse
 M_{bm} Biegemoment bei der Ruheachslast
 f Klassenhäufigkeit der Lastspitzen (absolut bzw. in Prozent)
 S_f Summenhäufigkeit der Lastspitzen (absolut bzw. in Prozent)

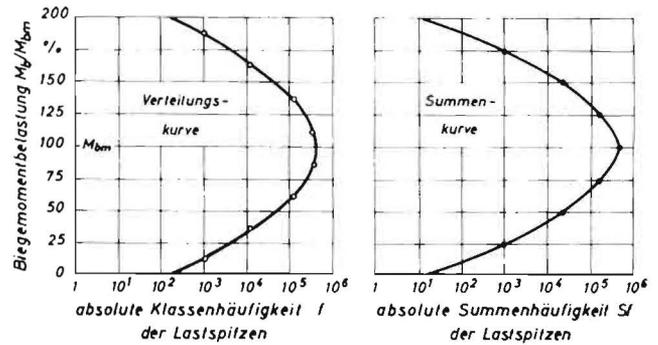


Bild 5: Verteilungskurve und Summenkurve der Lastspitzen entsprechend der Auswertung nach Bild 4

In Bild 3 ist ein Oszillogramm dargestellt, das einen Ausschnitt des Drehmomentverlaufs zeigt, wie er in der Kupplungswelle eines Schleppers beim Befahren einer Schlaglochstrecke mit angehängtem Ackerwagen gemessen wurde. Wie man sieht, wird das Motormoment des Schleppers im Verlauf der Messung mehrfach weit überschritten.

Eine für Festigkeitsberechnungen brauchbare Verarbeitung derartiger Lastverläufe kann nur durch eine statistische Auswertung erfolgen. Daher soll im folgenden Abschnitt auf die Methoden der statistischen Auswertung von Belastungsmessungen eingegangen werden.

Methoden zur stationären Auswertung dynamischer Lastverläufe

Auf Grund der Ergebnisse aus Festigkeitsuntersuchungen bei schwingender Beanspruchung muß vorausgesetzt werden, daß die Werkstoffermüdung eine Folge der durch die Umkehrpunkte gekennzeichneten Hin- und Hergänge der Last ist. Die Aufgabe einer für Festigkeitsberechnungen brauchbaren Auswertung dynamischer Belastungen ist es daher, die Umkehrpunkte oder Lastspitzen festzuhalten. Hierzu ist eine Auswertung nach statistischen Methoden notwendig, die durch die Auszählung der im Oszillogramm sichtbar gemachten Lastverläufe oder durch den Einsatz spezieller Auswertegeräte geschehen kann.

Die Auswertung von sichtbar festgehaltenen Lastverläufen

Als erste statistische Auswertmethode für dynamische Lastverläufe, die in Oszillogrammen festgehalten wurden, sei die Auszählung und Einordnung der Spitzen nach der Überschreitungshäufigkeit von Lastgrenzen [2] genannt. Diese Methode wird in Bild 4 an Hand des Biegemomentverlaufs in einer Schlepperachse gezeigt. Bei ihrer Anwendung wird zunächst der Streubereich der Lastspitzen von der Vorlast, das ist hier die Ruheachslast, ausgehend in eine Anzahl gleicher Lastklassen, unterteilt (beispielsweise 8 Klassen in Bild 4), von denen jede Klasse einen Klassenmittelpunkt und zwei Klassengrenzen hat. Nachdem die Klassengrenzen nach der zugehörigen Last bezeichnet worden sind (auf der Ordinate in Bild 4), werden die in den einzelnen Klassen liegenden Spitzen des Lastverlaufs ausgezählt. Dabei werden Schwankungen aus Oberschwingungen, deren Umkehrpunkte zwischen den Grenzen einer Lastklasse liegen, nicht berücksichtigt. Die in den Klassen festgestellten Spitzenhäufigkeiten f werden in einem Kästchenschema (Bild 4, rechts) registriert.

Mit diesen Werten kann eine Häufigkeitsverteilung gebildet werden, indem man die registrierten Klassenhäufigkeiten f der Spitzen über den jeweiligen Klassenmitten des Streubereichs der Last aufträgt (Bild 5, links); die Punkte der Klassenhäufigkeit sind zu einem Kurvenzug verbunden. Eine derartige für eine bestimmte Einsatzdauer eines Bauteiles gültige Häufigkeitsverteilung der Lastspitzen wird auch als Lastkollektiv bezeichnet. Eine zweckmäßigere Darstellungsform eines Lastkollektives ist jedoch die Summenhäufigkeitsverteilung der Spitzen. Diese wird durch fortlaufendes Aufsummieren der Klassenhäufigkeiten gebildet. Während die Form der Verteilungskurve der Klassenhäufigkeiten von der gewählten Klassenbreite abhängig ist, ist die Summenhäufigkeitsverteilung davon unabhängig. Die Summenhäufigkeiten Sf der Spitzen für den ausgewerteten Lastverlauf wurden im rechten Teil von Bild 4 mit eingetragen. Diese werden, meist von der Seite der höchsten Last ausgehend, aufsummiert, im Beispiel von Bild 4 wurden die Summenhäufigkeiten von beiden Seiten des Streubereichs her gebildet. Die Darstellung der Summenhäufigkeitsverteilung ist im rechten Teil von Bild 5 angegeben, wo die Summenhäufigkeiten Sf der Spitzen an den Klassengrenzen der Lastordinate aufgetragen und zu einem Kurvenzug verbunden wurden.

Im Gegensatz zu der behandelten Biegebeanspruchung ist beispielsweise bei der Drehmomentbelastung in einem Schleppergetriebe (etwa wie sie in Bild 3 gezeigt wurde) während längerer Betriebszeit keine Streuung der Lastschwankungen um einen Mittelwert zu erwarten. Dann könnte die Auswertung nach Lastgrenzen vereinfacht werden, indem nur die Spitzen des Lastanstiegs gezählt werden. Diese Spitzen werden als von der Nullachse ausgehende Schwelllasten mit unterschiedlichen Amplituden angesehen, und die zwischen den Spitzen liegenden unteren Umkehrpunkte werden vernachlässigt. Hieraus folgt ohne Zweifel eine gegenüber den wirklichen Verhältnissen schärfere Beanspruchung. Für die Konstruktion der später zu beschreibenden automatischen Klassiergeräte und für die nach Lastkollektiven durchzuführenden Festigkeitsversuche bedeutet diese Vereinfachung aber eine wesentliche Erleichterung.

Die zweite Methode zur Auszählung regelloser Lastverläufe ist die Auszählung nach Lastbereichen [3], die an Hand von Bild 6 erläutert werden soll. Hierbei werden Lastbereiche verschiedener Größen b_i vorgegeben, und die Zählung eines Bereichs b beginnt in einem Lastminimum. Nachdem der Lastanstieg den Wert b überschritten hat, wird der folgende Lastabfall, vom Maximum ausgehend, wieder mit dem Bereich b verglichen. Eine Zählung ist abgeschlossen, wenn ein Anstieg und der folgende Abfall der Last den vorgegebenen Bereich überschritten haben. Dazwischenliegende Laständerungen, die kleiner als b sind, werden nicht berücksichtigt. Nach der Auswertung eines Lastverlaufes mit einer Reihe vorgegebener Lastbereiche können wieder die Häufigkeitsverteilung und die Summenhäufigkeitsverteilung der Lastbereiche gebildet werden.

Mit dieser Methode werden alle Schwankungen der Last nach Amplitude und Häufigkeit richtig erfaßt. Die Zuordnung zu einem absoluten Lastniveau, also einem Mittelwert, ist allerdings nicht möglich. Daher ist die Methode dann anzuwenden, wenn keine Schwankungen um eine Vorlast vorliegen oder wenn dies für das Festigkeitsverhalten des Werkstoffes unwesentlich ist, wie etwa bei der Verdrehbeanspruchung der Wellen eines Schleppergetriebes.

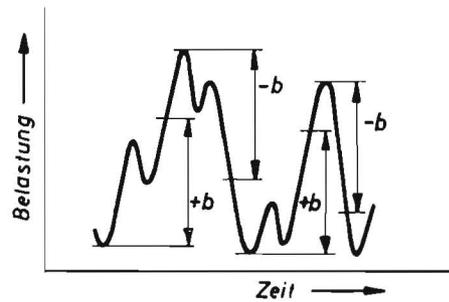


Bild 6: Auswertung eines Lastverlaufes nach Lastbereichen nach [3]
b Breite eines vorgegebenen Lastbereiches

In vielen Fällen sind die aus der Lastgrenzen- oder Lastbereichsauswertung erhaltenen Häufigkeitsverteilungen einer GAUSSschen Normalverteilung ähnlich, so daß der Aufwand für die Auswertung erheblich eingeschränkt werden kann. Um die Ähnlichkeit eines vorhandenen Lastkollektives mit einer GAUSSschen Normalverteilung festzustellen, stellt man am zweckmäßigsten die prozentuale Summenhäufigkeitsverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz [4] dar. Man erhält die prozentuale Häufigkeitsverteilung $f\%$ oder die prozentuale Summenhäufigkeitsverteilung $Sf\%$, indem man die absoluten Werte auf die Gesamtsumme aller Häufigkeiten bezieht und in Prozentwerten angibt (Kästchenschema von Bild 4). Wenn eine GAUSSsche Normalverteilung vorliegt, ergibt sich für die prozentuale Klassenhäufigkeit im Linearnetz eine glockenähnliche Kurve, für die prozentuale Summenhäufigkeit im Wahrscheinlichkeitsnetz eine Gerade (Bild 7). Das entsteht dadurch, daß die Häufigkeitsachse des Wahrscheinlichkeitsnetzes (Abszisse in Bild 7, rechts) nach dem GAUSSschen Integral geteilt ist. Besonders einfach ist die Kennzeichnung der Form einer Normalverteilung im Wahrscheinlichkeitsnetz. Die Gerade im Wahrscheinlichkeitsnetz kann nämlich durch zwei Kennwerte festgelegt werden, den Zentralwert C und den Streufaktor F der Verteilung. Der Zentralwert ist hier die Last, zu deren Seiten je 50% aller Klassenhäufigkeiten liegen, und der Wert wird von der Häufigkeitsabszisse des Wahrscheinlichkeitsnetzes (Bild 7) ausgehend leicht ermittelt. Ein Streufaktor umschließt vom Zentralwert aus eine Spanne der Lastordinate, in der ein bestimmter Prozentsatz aller Klassenhäufigkeiten liegt, beim Streufaktor F_{45} , also 45%. So läßt sich unter Verwendung nur weniger Meßpunkte prüfen, ob ein Lastkollektiv durch eine GAUSSsche Normalverteilung beschrieben werden kann; wenn dies zutrifft, können Messungen leicht durch Extrapolation im Wahrscheinlichkeitsnetz ergänzt werden.

Trotzdem bedingt die Auswertung von Oszillogrammen einen sehr großen Aufwand. Zum Beispiel müssen bei allen im landwirtschaftlichen Betrieb vorkommenden Schlepperarbeiten Messungen und Auswertung durchgeführt werden, wenn man eine genaue Wiedergabe der in einem Schleppergetriebe während der Einsatzdauer auftretenden Drehmomentbelastungen erhalten will. Der Aufwand der Auswertung soll daher mit Hilfe von speziellen Auswertegeräten vermindert werden, bei deren Verwendung die im folgenden niedergelegten Gesichtspunkte zu beachten sind.

Die Anwendung spezieller Auswertegeräte

Bei einfachen mechanischen Geräten wird beispielsweise das Oszillogrammband mit motorischem Antrieb abgspult, und der Lastverlauf wird von Hand mit einer Marke nachgefahren, die senkrecht zur Vorschubrichtung des Bandes verschiebbar ist; von der

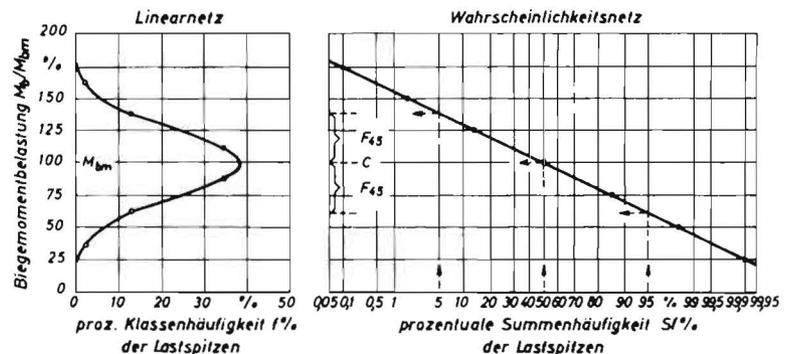


Bild 7: Prozentuale Häufigkeitsverteilung und Summenhäufigkeitsverteilung der Lastspitzen
C Zentralwert der Verteilung
 F_{45} Streufaktor der Verteilung

bewegten Marke werden dann über ein Hebelsystem Zählwerke gesteuert, die die einzelnen Klassenhäufigkeiten registrieren. Ein derartiges Gerät kann durch Umschaltung sowohl für die Auswertung nach Lastgrenzen als auch nach Lastbereichen verwendet werden. Die Auswertung von Oszillogrammen ist allgemein wegen der Möglichkeit vorteilhaft, die Auswertung des sichtbaren Lastverlaufes zu korrigieren.

Entscheidend vermindert wird der Aufwand der statistischen Auswertung durch die Verwendung automatischer Klassiergeräte. Ein solches Klassiergerät wird über einen Verstärker direkt an den Meßwertgeber angeschlossen. Sobald durch einen Impuls der Befehl dazu gegeben wird, ordnet das Gerät die Augenblickswerte des

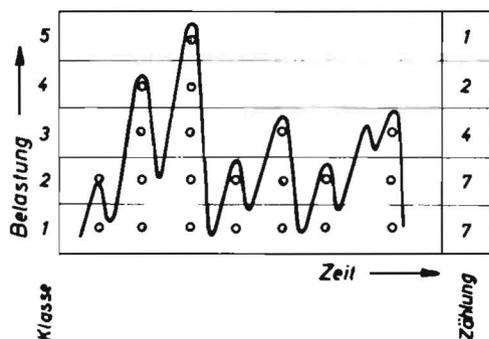


Bild 8: Auswertung eines Lastverlaufes nach Lastgrenzen mit Klassiergerät (es werden die Summenhäufigkeiten der Lastspitzen gezählt)

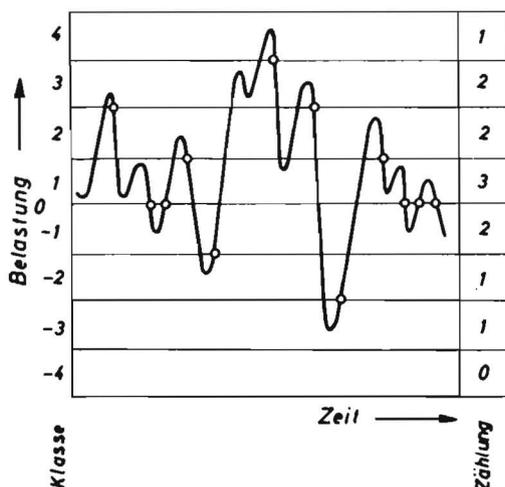


Bild 9: Auswertung eines Lastverlaufes nach Lastgrenzen mit Klassiergerät (es werden die Klassenhäufigkeiten der Lastspitzen gezählt)

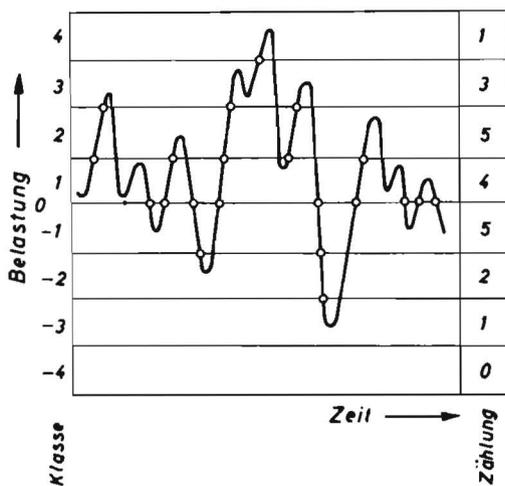


Bild 10: Auswertung eines Lastverlaufes nach Zählung der Klassendurchgänge mit Klassiergerät (es werden alle Klassendurchgänge gezählt)

Meßwertverlaufs bestimmten Klassen zu und speichert sie in Zählwerken. Die auf dem Markt befindlichen Geräte dieser Art unterscheiden sich aber in der Methodik der Auswertung, und ihre Ergebnisse weichen daher voneinander ab.

Bei einer Ausführungsform werden die Klassierbefehle in gleichen oder in willkürlichen Zeitabständen gegeben, ein Verfahren, das im allgemeinen nicht für Festigkeitsuntersuchungen angewendet werden kann, weil mit den Stichproben nicht die Umkehrpunkte der Lastschwankungen erfaßt werden.

Eine andere Bauart bildet die Summenhäufigkeitsverteilung der Spitzen des Lastanstiegs. Jeder Rückgang der Last nach einem Maximum löst dabei einen Zählimpuls aus, und das Gerät zählt alle unterhalb des Maximums liegenden Klassen (Bild 8); diese Zählung ergibt die Summenhäufigkeitsverteilung der Lastspitzen. Dabei kann die Zählung kleiner Schwankungen einstellbar unterdrückt werden, indem der zur Auslösung der Zählung notwendige Lastrückgang variiert wird. Ein Nachteil dieses Gerätes ist, daß nur die Spitzen beim Lastanstieg, nicht aber die dazwischenliegenden Umkehrpunkte registriert werden können.

Ein weiteres Gerät vermag die Klassenhäufigkeiten der Lastspitzen zu bilden. Bei diesem Gerät wird zunächst der Streubereich der Last durch eine einstellbare Vorlastlinie unterteilt, und ein Lastanstieg wird allgemein von dieser Vorlastlinie ausgehend gemessen. Das Gerät zählt und klassiert nun die um die Vorlast streuenden Spitzen des Lastanstiegs, wenn die Last danach wieder um einen einzählbaren Ansprechpegel abfällt (Bild 9). Zwischen den gezählten Spitzen liegende Umkehrpunkte, die aber auf derselben Seite der Vorlastlinie liegen, können auch mit diesem Gerät nicht gezählt werden.

Die beim Anstieg des Meßwertes durchlaufenen Klassen könnten ebenfalls mit einem Klassiergerät gezählt werden (Bild 10). Aus der Häufigkeitsverteilung der Klassendurchgänge kann aber nicht ohne weiteres die Häufigkeitsverteilung oder die Summenhäufigkeitsverteilung der Lastspitzen erhalten werden. Durch Vergleich der Ergebnisse dieses Verfahrens mit denen nach der Zählung von Lastspitzen erhaltenen könnten vielleicht Umrechnungsfaktoren ermittelt werden, mit denen diese Auswertung für Festigkeitsuntersuchungen angewendet werden kann.

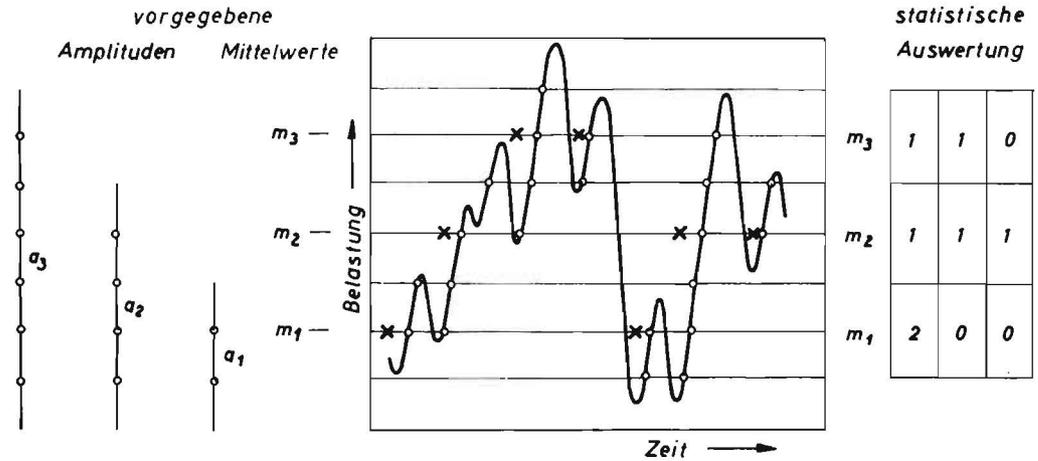
Bei einigen der beschriebenen Klassiergeräten ist die Zählfrequenz durch die elektromagnetischen Zählwerke begrenzt. Vor der Anwendung eines solchen Gerätes ist also zu prüfen, ob die mögliche Zählfrequenz bei den Frequenzen der zu untersuchenden Schwingungsvorgänge genügt.

Zur Ermittlung von Lastkollektiven, die für Festigkeitsuntersuchungen dienen sollen, eignen sich also die Klassiergeräte, welche Häufigkeitsverteilungen oder Summenhäufigkeitsverteilungen der Lastspitzen bilden. Ihre Arbeitsweise entspricht der Auswertung dynamischer Lastverläufe nach Lastgrenzen. Ihre Anwendung war dann sinnvoll, wenn Schwingungen um einen gleichbleibenden Mittelwert auftreten oder wenn die vereinfachende Annahme getroffen werden kann, daß die Last zwischen zwei Spitzen immer einen Rückgang auf den Wert Null hat.

Schließlich ist die Zählung der Lastspitzen für die Wiedergabe der Belastung von Zahnrädern geeignet. Die Festigkeitsrechnung des Zahnrades geht von der Zahl der Eingriffe aus, die ein Zahn des Rades während der Laufzeit durchführt und die ja der Zahl der Radumläufe entspricht. Vor und nach jedem Eingriff hat die Belastung des Zahnes den Wert Null. Wenn die Lastfrequenz die Umlauffrequenz des Rades überschreitet, können während eines Eingriffes auch mehrere Spitzen am Zahn wirken. Zur Auswertung für die Zahnradbeanspruchung könnte also der Lastverlauf bei jedem Radumlauf einmal abgetastet und die gemessene Spitze klassiert werden. Das ist bei der Auswertung von Oszillogrammen leicht möglich, wenn das Oszillogramm Marken der Radumlauf-frequenz trägt. Klassiergeräte könnten diese Auswertung ebenfalls befolgen, indem sie nach der Radumlauf-frequenz gesteuert den Meßwertverlauf abtasten und die während des Zahneingriffes auftretenden Spitzen klassieren. Nach einer anderen Betrachtungsweise werden alle Spitzen des registrierten Lastverlaufes durch die Zahnzahl des zu untersuchenden Rades geteilt. Diese Auswertung ist dadurch ungenau, daß während eines Zahneingriffes mehrere Spitzen gemessen werden können, zwischen denen aber kein Lastabfall auf Null eintritt. Falsche Ergebnisse kommen zustande, wenn

Bild 11: Auswertung eines Lastverlaufes nach Amplituden und Mittelwerten

- Zählung der Amplituden
- × Zählung der Mittelwerte



die Lastfrequenz kleiner als die Umlauffrequenz des Rades ist, also bei sehr schnell laufenden Rädern.

Für die Auswertung nach Lastbereichen ist bisher kein automatisches Klassiergerät entwickelt worden. An dieser Stelle sollen aber die Forderungen an ein Klassiergerät aufgestellt werden, nach dessen Auswertung die von einem Bauteil während des Einsatzes ertragenen Belastungen genau reproduziert werden können. Ein solches Gerät müßte während des Lastanstieges die zwischen den Lastminima und -maxima liegenden Amplituden messen und nach ihrem Mittelwert geordnet registrieren. Das Prinzip dieses Zählverfahrens ist in Bild 11 gezeigt. Für die Zählung werden mehrere Mittelwerte und Amplituden vorgegeben (beispielsweise je drei in Bild 11). Die Amplituden der Lastschwankungen werden mit den vorgegebenen Amplituden verglichen und dem entsprechenden Mittelwert zugeordnet, wie das im Kästchenschema von Bild 11 geschehen ist. Die Kästchen stellen also die Zählwerke für die nach den Mittelwerten eingeordnet zu registrierenden Amplituden dar.

Diese Zählung erfolgt daher in zwei Parametern, und ein Lastverlauf könnte danach stilisiert wiedergegeben werden, indem die zum gleichen Mittelwert gehörigen Amplituden zusammengefaßt werden. Es wäre wünschenswert, wenn in absehbarer Zeit Geräte zur Verfügung ständen, die eine zweiparametrische Klassierung der beschriebenen Art ermöglichen.

Nachdem die Auswertung dynamischer Lastverläufe und deren Darstellung in Lastkollektiven behandelt wurde, soll in den nächsten Abschnitten auf das Festigkeitsverhalten des Werkstoffes gegenüber solchen Belastungen eingegangen werden. Zur Lebensdauerermittlung und Dimensionierung von Bauteilen, die während ihres Einsatzes durch ein Lastkollektiv zu beschreibende Beanspruchungen ertragen, müssen auch gegenüber der bisher üblichen Auslegung nach der Zeit- oder Dauerfestigkeit ganz neuartige Verfahren angewendet werden. Die besten Ergebnisse liefert heute der Mehrstufen-Festigkeitsversuch, bei dem das Bauteil mit einer programmgesteuerten Prüfmaschine nach dem gemessenen Lastkollektiv belastet wird. Dies Verfahren ist recht aufwendig. Nach der zweiten Methode wird versucht, das Kollektiv der Betriebsbeanspruchungen der WÖHLER-Linie der Schwingfestigkeit zuzuordnen. Genaue Lebensdauer Voraussagen können hiermit aber noch nicht erreicht werden, weil bisher eine Schädigungstheorie fehlt, welche die Verbindung zwischen der vielstufigen Beanspruchung des Lastkollektivs und dem einstufigen WÖHLER-Versuch schlägt.

Die Auslegung von Landmaschinenbauteilen mit Hilfe von Mehrstufen-Festigkeitsversuchen

Wenn die während des Einsatzes an einem Bauteil wirkende Beanspruchung (welche für den Bruch maßgebend ist), nach einer geeigneten statistischen Methode ausgewertet, als Lastkollektiv vorliegt, können genaue Aussagen über die Haltbarkeit ermittelt werden, indem das Bauteil entsprechend diesem Kollektiv der Betriebslast im Mehrstufen-Festigkeitsversuch belastet wird. Im Kraftfahrzeugbau sind derartige Betriebsfestigkeitsversuche [2] schon seit langem üblich, um gefährdete Bauteile betriebssicher zu gestalten und um andererseits den Werkstoff bis zur Grenze des

Möglichen auszunutzen. Gegenüber der Erprobung im Fahrversuch bedingt der Betriebsfestigkeitsversuch einen erheblich verringerten Aufwand.

Für die Durchführung von Mehrstufen-Festigkeitsversuchen wird das in der Form der Summenhäufigkeitskurve vorliegende Kollektiv der Betriebslast durch eine Treppenkurve angenähert (in Bild 12 für das Beispiel des Lastkollektivs von Bild 5 gezeigt). Während der Versuchsdurchführung wird das Prüfobjekt dann mit sinusförmigen Lastwechseln zwischen den positiven und den negativen Laststufen gleicher Amplitude (auf die Vorlast M_{bm} bezogen) belastet. Die in den Stufen aufzubringenden Lastwechselzahlen ergeben sich als Differenzen der Summenhäufigkeiten an den Stufen (zum Beispiel $(S/3 - S/2)$ in Bild 12).

Mit diesem Mehrstufenversuch kann eine noch bessere Annäherung an die Verhältnisse während des tatsächlichen Einsatzes erreicht werden, indem das Gesamtkollektiv in mehrere gleiche Teilkollektive unterteilt wird. In den Teilkollektiven müssen dann die einzelnen Laststufen mit Häufigkeiten vorkommen, die im gleichen Verhältnis zu den Häufigkeiten der Laststufen des Gesamtkollektivs stehen.

Die wirklichen Betriebsbedingungen werden durch diese Versuchsanstellung dennoch vereinfacht, als die während des Einsatzes zeitlich nicht zusammenliegenden Lastspitzen gleicher Amplitude zu aufeinanderfolgenden Lastwechseln zusammengefaßt werden. Eine weitere Vereinfachung besteht darin, daß die Lastschwankungen des Einsatzes im Versuch durch sinusförmige Lastwechsel ersetzt werden müssen. Schließlich kann im Versuch die Tatsache nicht berücksichtigt werden, daß bei der statistischen Auswertung der Messungen auch Spitzen gezählt werden, denen kein Durchgang der Last durch die Vorlastlinie folgt. Daher ist die Aussagefähigkeit des Mehrstufenversuches von der Ermittlung des Lastkollektivs angewendeten Methode abhängig. Die im vorigen Abschnitt behandelte zweiparametrische Auswertung würde die besten Ergebnisse liefern.

Zur Prüfung von Bauteilen nach Lastkollektiven im Mehrstufen-Programm werden Dauerschwingprüfmaschinen angewendet. Die Maschinen bestehen aus einer Belastungseinheit, einer Meßeinheit und einer Regeleinheit. Als Belastungseinheiten kommen Resonanzsysteme, Kurbeltriebe oder Hydraulikeinheiten in Frage.

Für industrielle Festigkeitsuntersuchungen ist der Mehrstufen-Festigkeitsversuch interessant, weil auf den oben genannten Prüfmaschinen neben einzelnen Bauelementen auch ganze Baugruppen entsprechend den Belastungen des Einsatzes geprüft werden können. So wäre beispielsweise ein geschlossener Versuch für alle Wellen oder für alle Zahnräder eines Schleppergetriebes möglich. Zur Prüfung der Zahnräder eines Getriebes könnte man zudem auf die Schwingungsprüfmaschine verzichten, wenn man das Lastkollektiv mit Antriebsmotor und Bremse nachfährt.

Ein weiterer Vorteil der Prüfung von Bauteilen im Versuch gegenüber Festigkeitsberechnungen ist dadurch vorhanden, daß zusammengesetzte Beanspruchungen im Versuch ohne Schwierigkeiten nachgeahmt werden können. Zum Beispiel wirken in den Wellen von Zahnradgetrieben überlagerte Verdreh- und Biegebeanspruchungen, die bei der Baugruppenprüfung von Getrieben

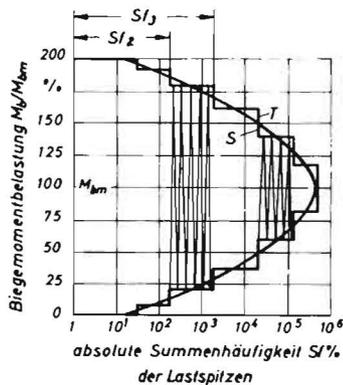


Bild 12: Ersatz der Summenkurve eines Lastkollektivs durch einen Treppenzug nach [2]
S Summenkurve T Treppenzug

gleichsam auftreten. Außerdem bilden sich infolge der meistverwickelten Gestalt der Bauteile komplizierte Spannungszustände in diesen aus, die sich der Rechnung entziehen; im Versuch wird auch das automatisch berücksichtigt. Bei Festigkeitsberechnungen müßten hingegen die Beanspruchungsarten nach einer der Bruchhypothesen zusammengefügt werden, und die Einflüsse der Gestalt könnten nur teilweise durch Kerbfaktoren berücksichtigt werden. Die Ergebnisse von Mehrstufenversuchen sind auf Bauteile ähnlicher Gestalt übertragbar, wenn die Versuche nach Lastkollektiven gleicher Verteilungsfunktion (also einer GAUSSschen oder einer PASCALSchen Verteilung) durchgeführt wurden. Das den Bruch des Prüfobjektes herbeiführende Lastkollektiv kann durch Höchstlast und Gesamthäufigkeit gekennzeichnet werden. Wenn nun in verschiedenen Versuchen der Betrag der Höchstlast und damit maßstäblich die Beträge aller Laststufen des Kollektivs geändert werden (so bleibt die Normalverteilung erhalten), ergeben sich auch verschiedene zum Bruch führende Gesamthäufigkeiten der abgewandelten Lastkollektive. Man würde gleichartige Ergebnisse erhalten, wenn man geometrisch ähnliche Bauteile mit verschiedenen Abmessungen gleichen Lastkollektiven unterwirft; denn durch diese Maßnahme würden die im gefährdeten Querschnitt wirkenden Beanspruchungen ebenfalls maßstäblich verändert. Mit Hilfe dieser Variationen kann die Haltbarkeit eines Bauteiles mit unterschiedlichen Abmessungen oder bei geänderten Einsatzbedingungen im voraus bestimmt werden. Die Darstellung erfolgt am zweckmäßigsten in Diagrammen mit doppellogarithmischer Teilung (Bild 13), indem man als kennzeichnende Werte der Bruchkollektive die zur Höchstlast und Gesamthäufigkeit gehörigen Punkte einzeichnet. Für Bauteile aus Stahl ergibt sich dann als Verbindung der Punkte mehrerer Lastkollektive im Bereich der Lasthäufigkeiten $10^6 \cdot \dots \cdot 10^8$ eine gerade Linie, die als Maßstablinie bezeichnet wird (Bild 13). Derartige aus Mehrstufenversuchen gewonnene Maßstablinien ermöglichen also die Dimensionierung gleichartiger Bauteile nach Lastkollektiven.

Als wichtiges Ergebnis bisher durchgeführter Mehrstufenversuche wird das bessere Festigkeitsverhalten gekerbter Bauteile als gegenüber Einstufenversuchen (WÖHLER-Versuch) genannt. Eine Erklärung hierfür lautet, daß infolge der seltenen hohen Laststufen Verfestigungen eintreten, die den nachfolgenden geringeren Belastungen großer Häufigkeit größeren Widerstand entgegensetzen. Die weitere Tatsache, daß sich bei Mehrstufenversuchen an Serienbauteilen ein sehr großer Lebensdauerstreubereich von etwa 1:3 ergeben hat, konnte bis heute nicht geklärt werden.

Die Bedeutung der Wöhler-Linie als Bemessungsgrundlage für Landmaschinenbauteile

Das herkömmliche Verfahren zur Ermittlung der Schwingfestigkeit von Werkstoffen ist der Einstufen-Versuch (WÖHLER-Versuch), der als Sonderfall des Mehrstufen-Versuches anzusehen ist. Dabei erhält man unter Belastung des Prüfobjektes mit sinusförmigen Lastwechseln konstanter Amplitude als Ergebnis die bekannte WÖHLER-Linie der Schwingfestigkeit.

In den vorhergehenden Abschnitten wurde aber gezeigt, daß die während des Einsatzes schwingungsbeanspruchter Landmaschinenbauteile auftretenden Belastungen in Lastkollektiven darzustellen und daher vielstufig sind, während die WÖHLER-Linie nur

für die einstufige Wechselbelastung (nach der sie ermittelt wurde) gültig ist. Also ist die Dimensionierung schwingungsbeanspruchter Teile nach der WÖHLER-Linie nicht ohne weiteres möglich. Um die WÖHLER-Linie dennoch verwenden zu können, müßte die sogenannte Teilschädigung des Werkstoffes berücksichtigt werden. Durch die bisher vorgenommenen Mehrstufenversuche ist nämlich erwiesen, daß Lastwechsel im Zeitfestigkeitsbereich, deren Lastwechselzahl aber unter der WÖHLER-Linie bleibt, trotzdem eine Teilschädigung des Werkstoffes bewirken. Bei nachfolgenden Belastungen wird also nicht mehr die Zeit- oder Dauerfestigkeit der WÖHLER-Linie erreicht. Dieser als Teilschädigung bezeichnete Einfluß müßte mit einer Schädigungstheorie erfaßt werden.

Für die genaue Auslegung schwingungsbeanspruchter Teile des Flugzeugbaues wurde vielfach die lineare Schädigungstheorie von MINER [5] angewendet. Diese MINERSche Regel besagt, daß der Bruch eintritt, wenn die Summe der Teilschädigungen $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ wird (n_i : die Zahl der Lastwechsel einer Stufe; N_i : die in dieser Laststufe von der WÖHLER-Linie bis zum Bruch angezeigte Lastwechselzahl). Nach neueren Ergebnissen von Mehrstufenversuchen konnte die lineare Schädigungstheorie aber nicht bestätigt werden [6]; je nach der Verteilungsform des Lastkollektivs wurden wesentlich geringere oder höhere Lebensdauern erreicht. Man muß daher warten, bis es der Grundlagenforschung in der Werkstoffkunde gelingt, eine Schädigungstheorie zu schaffen, die eine Anwendung der in Einstufen-Versuchen gewonnenen WÖHLER-Linien für genaue Lebensdauerberechnungen bei statistischer Belastung gestattet.

Daher sind heute nur relativ grobe Abschätzungen möglich, indem man die Belastungen des Kollektivs mit einem Sicherheitsabstand unter den Festigkeitswerten der WÖHLER-Linie hält. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß auch die Dimensionierung nach Mehrstufenversuchen nicht sehr genau ist, da sich große Streuungen der Lebensdauer ergeben haben.

Bevor an zwei Beispielen aus dem Landmaschinenbau eine Abschätzung der Lebensdauer durch Vergleich der in Einsatzversuchen ermittelten Lastkollektive mit der WÖHLER-Linie durchgeführt wird, sollen drei typische statistische Belastungsfälle im Vergleich mit der WÖHLER-Linie betrachtet werden. Bild 14a zeigt ein Lastkollektiv, dessen Größtwert häufiger als 10^6 mal auftritt. In solchen Fällen kann die Dimensionierung auf Dauerfestigkeit nach der WÖHLER-Linie erfolgen, weil die kleineren Lastwechsel großer Häufigkeit vernachlässigt werden dürfen. Dann sollte möglichst auch der Streubereich der WÖHLER-Linie und dessen untere Grenze (etwa durch eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 90% definiert) bekannt sein, da sonst ein größerer Sicherheitsabstand bei der Dimensionierung nach der WÖHLER-Linie eingehalten werden muß. Bei einem anderen Lastkollektiv (Bild 14b) liegen die Laststufen oberhalb der Dauerfestigkeit; daher ist ein Sicherheitsabstand zwischen der Summenkurve des Lastkollektivs und der WÖHLER-Linie erforderlich. In den meisten Fällen ergibt sich das Kollektiv der Betriebslasten einer statistischen Normalverteilung ähnlich (Bild 14c). Die Größtwerte der Last liegen dann im Zeitfestigkeitsbereich der WÖHLER-Linie, und die kleinen Belastungen großer Häufigkeit unterhalb der Dauerfestigkeit. Bis zum Vorliegen einer Schädigungstheorie, die das Zusammenwirken

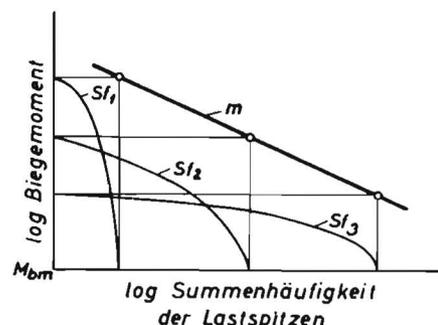


Bild 13: Darstellung der Ergebnisse von Mehrstufen-Versuchen mit unterschiedlichen Lastkollektiven nach [2]
 $S f_{1,2,3}$ Summenhäufigkeitsverteilungen der Lastspitzen
m Maßstablinie (Kennzeichnung der Bruchlastkollektive)

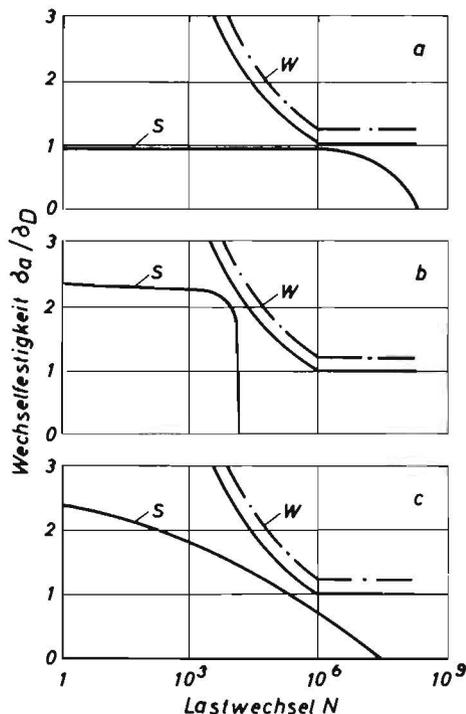


Bild 14: Verschiedene Betriebsbeanspruchungen, dargestellt durch Vergleich der Summenkurve des Lastkollektivs mit der Wöhler-Linie nach [7]

- Bild 14 a (oben); Größtwert des Lastkollektivs tritt häufiger als 10^6 mal auf
 Bild 14 b (Mitte); Belastungen des Kollektivs liegen ausschließlich oberhalb der Dauerfestigkeit
 Bild 14 c (unten); Belastungen des Kollektivs in der Zeit- und Dauerfestigkeit der WÖHLER-Linie
- S Summenhäufigkeitskurve des Lastkollektivs
 W WÖHLER-Linie
 — Mittelwert —
 - - - untere Streugrenze —
 ——— definiert durch Überlebenswahrscheinlichkeit 90%

verschieden hoher und verschieden häufiger Lastwechsel berücksichtigt, muß die Summenkurve des Kollektivs mit großem Abstand unter die WÖHLER-Linie gelegt werden.

Nach diesem kurzen Abriss der Theorie soll im ersten Beispiel das in der Hauptwelle einer Aufsammler-Hochdruckpresse wirkende Kollektiv der Drehmomentbelastung mit der WÖHLER-Linie verglichen werden. In umfangreichen Feldversuchen einer solchen Maschine wurden Art, Beschaffenheit und Durchsatzmenge des verarbeiteten Gutes variiert, so daß die Ergebnisse der Messungen als für den landwirtschaftlichen Einsatz der Maschine repräsentativ gelten können. Neben anderen Größen wurde dabei das Drehmoment in der Hauptwelle (Vorlegewelle) der Presse mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen gemessen und in Oszillogrammen registriert. Der Verlauf der Meßwerte zeigt für jeden Preßvorgang eine Drehmomentspitze beim Schneiden und beim Pressen des Gutes (Bild 15). Zwischen diesen Spitzen fällt die Belastung nahezu auf den Wert Null ab, so daß die Spitzen als Schwelllasten angesehen werden können, zumal da Störungen der Last in den negativen Bereich hinein kaum auftreten. Außer den genannten Spitzen auftretende Schwankungen des Drehmomentes sind so gering, daß sie vernachlässigt werden dürfen.

Bei der Auswertung der vorliegenden Oszillogramme wurden daher nach der Unterteilung des Streubereiches die Spitzen nach der Überschreitungshäufigkeit der Lastgrenzen ausgezählt. Das so ermittelte Lastkollektiv wurde dann auf eine Einsatzdauer von 1000 Betriebsstunden umgerechnet, was einer Lebensdauer der Presse von über fünf Jahren im landwirtschaftlichen Einsatz entspricht. In Bild 16 ist das Lastkollektiv in der Form der Summenhäufigkeitskurve dargestellt, die bekanntlich von der Klassenbreite der Auswertung unabhängig ist und die Summe aller Spitzen angibt, die jenseits der Laststufe auftreten.

Die Hauptwelle der Presse muß nun nach diesem Kollektiv der Drehmomentbelastung ausgelegt werden, denn im gefährdeten Querschnitt wirkt außer dem Drehmoment nur ein vernachlässigbar kleines Biegemoment. Der Wellendurchmesser des gefährdeten Querschnittes liegt infolge konstruktiver Gegebenheiten fest,

so daß durch den Vergleich von Lastkollektiv und WÖHLER-Linie die Werkstoffauswahl getroffen werden muß. Hierzu stellt man das Lastkollektiv am besten im Maßstab der maximalen Schubspannung dar, und für einen Punkt der Summenkurve werde die Umrechnung angegeben. Mit $M_t = 100$ kpm und $d = 35$ mm wird

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{16 \cdot M_t}{\pi \cdot d^3}$$

$$\tau_t = 11,9 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Für die Ursprungsfestigkeit (Schwellfestigkeit) bei Torsion können WÖHLER-Linien nur näherungsweise angegeben werden, und Aussagen über den Streubereich fehlen außerdem. Ferner ist die angenommene Probestab ermittelte Dauerfestigkeit von dem Durchmesser der beanspruchten Welle abhängig, und dieser Größeneinfluß wird durch einen Beiwert β berücksichtigt [8], der für den vorliegenden Wellendurchmesser

$$\beta = 0,78 \text{ beträgt.}$$

Das in den Spannungsmaßstab umgerechnete Lastkollektiv ist zusammen mit der WÖHLER-Linie der Ursprungs-Verdrehfestigkeit (unter Berücksichtigung des Größeneinflusses) für den Einsatzstahl 18 Cr Ni 8 in Bild 17 eingetragen. Die WÖHLER-Linie liegt beträchtlich über der Summenkurve des Lastkollektivs, und bei Anwendung der Schädigungstheorie von MINER würde sich auf keinen Fall eine Schädigung ergeben. Bei Verwendung eines Werkstoffes einer bestimmten geringeren Festigkeit würden sich aber die Summenkurve und die WÖHLER-Linie schneiden, und dann wäre im landwirtschaftlichen Einsatz der Bruch zu erwarten.

Als weiteres Beispiel soll das im Getriebe eines Ackerschleppers während der Einsatzdauer wirkende Lastkollektiv verwendet werden. Aus Einzelmessungen und Abschätzungen für die gesamte Einsatzdauer von Schleppern (zu etwa 12000 Betriebsstunden angenommen) wurde ein Kollektiv der Drehmomentspitzen für die Kupplungswelle des Schleppergetriebes zusammengestellt, vorwiegend mit Versuchsschleppern der 35-PS-Klasse. Dabei rührt der große Anteil der extremen Spitzen von der Vielzahl der Kuppelvorgänge bei landwirtschaftlichen Arbeiten her. Die positiven Spitzen der Lastverläufe wurden nach der Überschreitungshäufigkeit von Lastgrenzen ausgewertet, wobei die zwischen den Spitzen liegenden Umkehrpunkte unberücksichtigt bleiben (also Annahme von Schwelllasten). Außerdem wurde der Verlauf des Drehmomentes im negativen Bereich nicht erfaßt. Bild 18 zeigt die Summenkurve des so erhaltenen Lastkollektivs im doppellogarithmischen

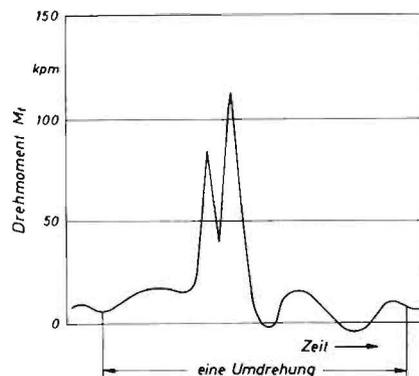


Bild 15: Verlauf des Drehmomentes M_t in der Hauptwelle der Aufsammler-Hochdruckpresse während eines Arbeitsspiels

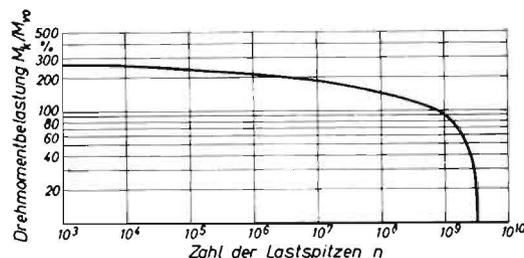


Bild 16: Summenhäufigkeitsverteilung der Drehmomentspitzen in der Hauptwelle einer Aufsammler-Hochdruckpresse (Einsatzdauer etwa 1000 Betriebsstunden)

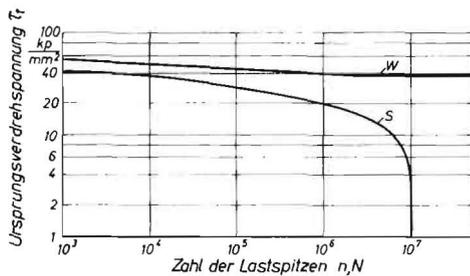


Bild 17: Vergleich der Summenkurve des Beanspruchungskollektivs (von Bild 16) mit der Wöhler-Linie der Schwingfestigkeit
 S Summenkurve der Verdrehschpannung
 W WÖHLER-Linie der Ursprungsverdrehschpannung für 18 Cr Ni 8

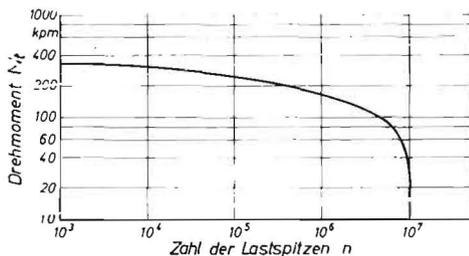


Bild 18: Summenhäufigkeitsverteilung der Drehmomenten in der Kupplungswelle des Schleppergetriebes (Einsatzdauer etwa 12.000 Betriebsstunden)
 M_K Drehmoment in der Kupplungswelle
 M_{vo} Motornennmoment

Netz mit dimensionslosem Lastmaßstab, indem das Drehmoment M_K der Kupplungswelle auf das Motornennmoment M_{vo} des Schleppers bezogen wurde. Es sei aber darauf hingewiesen, daß dieses Lastkollektiv durch genaue Messungen über längere Einsatzdauer noch bestätigt werden müßte, und dann sollten die Einflüsse der Schleppergröße und der unterschiedlichen landwirtschaftlichen Einsätze noch berücksichtigt werden.

Das vorliegende Lastkollektiv soll nun zur Auslegung von Zahnradern des Schleppergetriebes benutzt werden. Für die Festigkeitsberechnung des Zahnrades müssen dabei die Spitzenhäufigkeiten durch die Zahnzahl des betreffenden Rades geteilt werden. Falls zwischen der Meßstelle und dem betrachteten Rad eine Übersetzung liegt, muß außerdem der Lastmaßstab entsprechend der Übersetzung geändert werden. Bei den Radpaaren des Wechselgetriebes, die jeweils nur in einer Schaltstufe die Leistung übertragen, könnte versucht werden, die Lastspitzenhäufigkeiten des vorliegenden Kollektivs entsprechend der Benutzungsdauer des Ganges zu verkleinern. Da aber zu erwarten ist, daß wegen der unterschiedlichen Schlepperarbeiten in den Geschwindigkeitsbereichen der Gänge auch verschiedene Verteilungsformen der Lastkollektive entstehen, bräuchten Einzelmessungen in den Gängen genauere Ergebnisse. Zweifellos wären auch für den Achsantrieb gesonderte Messungen angebracht.

In diesem Beispiel soll nun jenes Radpaar nach dem Lastkollektiv ausgelegt werden, das die Leistung von der Kupplungswelle auf die Vorgelegewelle des Getriebes überträgt; die Abmessungen des Radpaares sollen dazu in Anlehnung an ausgeführte Schleppergetriebe vorgegeben werden.

- Zahnradabmessungen
 20°-V-Verzahnung
 Zähnezahlen: $z_1 = 17; z_2 = 52$
 Übersetzung: $i = 3,06$
 Modul: $m = 3 \text{ mm}$
 Achsabstand: $a = 105 \text{ mm}$
 Profilverschiebungsfaktoren: $x_1 = 0,250; x_2 = 0,238$
 Zahnbreite: $b = 15 \text{ mm}$

Aus dem Vergleich des Kollektivs der kritischen Zahnbeanspruchung mit der entsprechenden WÖHLER-Linie der Zahnfestigkeit ist nun der erforderliche Werkstoff zu ermitteln. Dazu müssen aus dem vorliegenden Kollektiv der Drehmomentbelastung die Kollektive

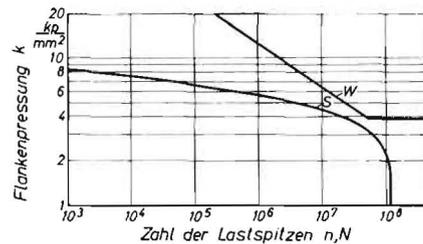


Bild 19: Vergleich der Summenkurve des Beanspruchungskollektivs (von Bild 18) mit der Wöhler-Linie der Zahnfestigkeit
 S Summenkurve der Flankenpressung
 W WÖHLER-Linie der Flankenfestigkeit

der Zahnbeanspruchungen berechnet werden. Am zweckmäßigsten wird diese Umrechnung durchgeführt, indem für einen Punkt des Drehmomentkollektivs die Maßstabsfaktoren zwischen dem Drehmoment und den Zahnbeanspruchungen, nämlich Zahnfußspannung und Flankenpressung, bestimmt werden. Diese Rechnung wurde nach dem Verfahren von NLEMANN [9] für den Punkt $M_K = M_{vo}$ durchgeführt, wobei das Motornennmoment für einen Schlepper der 35-PS-Klasse mit $M_K = 12 \text{ kpm}$ angesetzt wurde. Wegen des Umfangs dieser Rechnung können hier nur die Maßstabsfaktoren als Ergebnisse angegeben werden.

Zahnfußspannung

$$\sigma_{w1(M_{vo})} = 19,80 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \quad \sigma_{w2(M_{vo})} = 18,03 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Flankenpressung

$$k_{w1(M_{vo})} = 3,35 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2} \quad k_{w2(M_{vo})} = 2,64 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Mit diesen Umrechnungsfaktoren wird aus dem Lastkollektiv von Bild 18 das Kollektiv der Flankenpressung für das Ritzel bestimmt (Bild 19). Der Werkstoff für das Ritzel muß nun so gewählt werden, daß die WÖHLER-Linien der Zahnfestigkeit erheblich über den Summenkurven der Zahnbeanspruchung liegen. Für die gebräuchlichen Stähle liegen die WÖHLER-Linien der Zahnfestigkeit nach [9] vor. Die Tabellenwerte müssen noch durch Faktoren für den vorliegenden Fall vermindert werden.

Zahnfußfestigkeit

$$\sigma_{D_{zul}} = \sigma_0$$

Flankenfestigkeit

$$k_{D_{zul}} = 0,78 \cdot k_0$$

In diesem Fall ist die Flankenpressung die kritische Beanspruchung, nach welcher der Werkstoff gewählt werden muß. Für den Einsatzstahl 16 Mn Cr 5 mit $\sigma_0 = 42 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$ und $k_0 = 5,0 \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$ liegt dann die Summenkurve der Flankenpressung erheblich unter der WÖHLER-Linie der zulässigen Flankenfestigkeit (Bild 19), und die Form beider Kurven scheint diese Auslegung zu rechtfertigen.

Zusammenfassung

Die Bauteile der Landmaschinen unterliegen im Einsatz dynamischen Belastungen, deren Frequenzen und Amplituden in so weiten Bereichen streuen und von derart mannigfaltigen Einflüssen abhängig sind, daß ihre Berechnung nicht ohne weiteres möglich ist. Sollen die Festigkeitsberechnungen der Bauteile unter Berücksichtigung der wirklichen Betriebsbeanspruchungen erfolgen, so müssen diese während des Einsatzes gemessen werden und in Lastkollektiven dargestellt vorliegen.

Die bis heute genaueste Methode zur Dimensionierung oder Lebensdauerermittlung derart beanspruchter Bauteile ist das Nachfahren der Lastkollektive im Mehrstufen-Festigkeitsversuch. Der Aufwand ist aber hoch, und die Streuung der ermittelten Lebensdauerwerte ist groß.

Eine einfache Dimensionierung nach der WÖHLER-Linie ist noch nicht in allen Fällen möglich, weil gegenüber der vielstufigen Beanspruchung eines Lastkollektivs die WÖHLER-Linie nur bei einstufiger Schwingungsbeanspruchung streng gültig ist. Eine heute fehlende Schädigungstheorie könnte hier die Brücke bilden. In zwei Beispielen aus dem Landmaschinenbau war dennoch eine grobe Dimensionierung durch Vergleich der in Einsatzversuchen ermittelten Lastkollektive mit WÖHLER-Linien möglich.

Da bisher Lastkollektive für die hochbeanspruchten Bauteile von Landmaschinen und Schleppern nur in Einzelfällen vorliegen, muß deren Ermittlung als eine wichtige Aufgabe auch für die Forschung in der Landtechnik angesehen werden.

Schrifttum

- [1] COENENBERG, H. H.: Dynamische Beanspruchungen bei Ackerschleppern. Landtechnische Forschung 11 (1961), S. 145—150 und 12 (1962), S. 7—12
- [2] GASSNER, E.: Betriebsfestigkeit. Eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen. Konstruktion 6 (1954), S. 97—104
- [3] SVENSON, O.: Beanspruchung und Lastkollektiv am Fahrwerk. Vortrag auf der Tagung der VDI-Fachgruppe Fahrzeugtechnik am 23./24. 10. 1962 in Braunschweig
- [4] DAEVES, K. und A. BECKEL: Großzahl-Methodik und Häufigkeitsanalyse. Weinheim 1958
- [5] MINER, M. A.: Cumulative damage in fatigue. Proceedings Americ. Soc. Mechanical Eng. Metals 67 (1945), S. 159—164
- [6] GASSNER, E. und K. F. HORSTMANN: Einfluß des Start-Lande-Lastwechsels auf die Lebensdauer der böenbeanspruchten Flügel von Verkehrsflugzeugen. Advances in Aeronautical Sciences (1962), Vol. 3 u. 4
- [7] GASSNER, E.: Zur Aussagefähigkeit von Ein- und Mehrstufen-Schwingversuchen. In: Materialprüfung, Band 2, Nr. 4, S. 121—128
- [8] NIEMANN, G.: Maschinenelemente. Band 1. Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959
- [9] NIEMANN, G.: Maschinenelemente. Band 2. Berlin-Göttingen-Heidelberg 1960

Résumé

Manfred Kahrs: «The Interpretation of Farm Machinery Parts According to Load Collectives.»

The construction units of farm machinery in operation are subject to dynamic stresses the frequencies and amplitudes of which vary so widely and depend on so manifold influences that they cannot be readily calculated. If the stability of the construction units is to be computed with regard to the actual operating stresses, measurement has to be made during operation and shown as load collectives.

So far the most exact method for dimensioning or determining the durability of such stressed construction parts is to re-drive the load collectives in a multi-stage stability test. However, the expenditure is high and the values of durability ascertained scatter much.

A simple dimensioning according to Woehler's line cannot be applied yet in all cases, because it is strictly valid only with a one-stage vibration stress as compared with the multi-stage stress of a load collective. Here a still missing theory of damage might form the bridge. Nevertheless, two examples from farm engineering allowed a rough dimensioning by comparing the load collectives determined in operation tests with Woehler's lines.

Since load collectives for highly stressed construction parts of farm machines and tractors exist to date only in individual cases, their determination must be regarded as an essential task for research in agricultural engineering, too.

Manfred Kahrs: «Le dimensionnement des éléments de construction de machines agricoles d'après les collectives de charges.»

Les pièces de machines agricoles subissent pendant l'utilisation des machines des efforts dynamiques dont les fréquences et les amplitudes montrent une dispersion si importante et qui dépendent d'influences si multiples que leur calcul n'est pas toujours possible. Si l'on veut calculer la résistance des pièces en fonction des sollicitations effectives supportées pendant l'utilisation, il faut les charges pendant le fonctionnement des machines et représenter les résultats en collectives de charges.

La méthode la plus précise de dimensionnement ou de détermination de la durée de vie de ces pièces travaillantes consiste en la reproduction des collectives de charges par un essai de résistance à plusieurs paliers. Mais le coût est élevé et la dispersion des valeurs obtenues est grande.

Le simple dimensionnement d'après la ligne de Wöhler n'est pas encore possible dans tous les cas étant donné que la ligne de Wöhler ne s'applique qu'aux efforts dynamiques uniformes tandis que les collectives de charges tiennent compte de toutes les variations des efforts. Une théorie de détérioration qui pourrait constituer le trait d'union, manque encore. Toutefois, il a été possible d'arriver à un dimensionnement grossier dans deux exemples de construction de machines agricoles en comparant la collective de charges déterminée pendant des essais d'utilisation pratique avec les lignes de Wöhler.

Étant donné que l'on ne dispose de collectives de charges que pour quelques cas isolés de construction de machines et de tracteurs agricoles, leur détermination sera très nécessaire et pourrait servir utilement dans la recherche du machinisme agricole.

Maschinelles Legen vorgekeimter Kartoffeln

Das Institut für Pflanzenbau und Saatguterzeugung der „Forschungsanstalt für Landwirtschaft“ (FAL) weist in dem „Bericht über die Tätigkeit der Forschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode im Jahre 1962“ darauf hin, daß es seit Jahren gemeinsam mit dem Institut für Landmaschinen der FAL, der KTL-Versuchsstation Dethlingen und der Landmaschinen-Industrie die Mechanisierungsfragen für den Kartoffelbau bearbeitet. Ein besonderes Problem der letzten Zeit waren Untersuchungen beim Legen vorgekeimter Kartoffeln mit vollautomatischen Pflanzmaschinen. Darüber wird wie folgt berichtet:

In früheren Untersuchungen konnte festgestellt werden, daß vollautomatisches Pflanzen vorgekeimter Kartoffeln Auflaufverzögerung zur Folge hat. Während einer längeren Wachstumszeit glichen sich die Unterschiede in der Pflanzenentwicklung zwischen „Handpflanzung“ und „Maschinenpflanzung“ jedoch weitgehend aus, so daß schließlich keine oder nur geringfügige Ertragsunterschiede entstanden. Diese Ergebnisse sind für den Wirtschaftskartoffelbau von besonderem Interesse.

In den letzten Jahren wurde geprüft, wie sich maschinelles Legen im Pflanzkartoffelbau bei früher Ernte auswirkt. Dem Einfluß der Vorkeimbedingungen und dem Verhalten der Sorten wurde besondere Beachtung geschenkt.

Im Vorkeimhaus, im FRIEBEKeller, im Versuchslagerhaus unter Kunstlicht und im Folienzelt vorgekeimte Pflanzkartoffeln von 86 Sorten wurden zur Hälfte sofort, die andere Hälfte nach dem Durchgang durch eine vollautomatische Pflanzmaschine von Hand ausgepflanzt. Je nach Vorkeimbedingungen, Sorte und Keimentwicklung entstanden durch den Automaten mehr oder weniger starke Beschädigungen an den Keimen und damit Verzögerungen im Auflauf und in der Anfangsentwicklung.

Im Durchschnitt aller Sorten wurde der Auflauf im Jahre 1962 nach Maschinenpflanzung um eine Woche verzögert; die Stengelzahl war erhöht. Der Ertrag lag hier bei Frühernte meist niedriger.

Es dürfte nicht möglich sein, Kartoffeln so vorzukeimen, daß deren Keime bei der mechanischen Beanspruchung durch die zur Zeit im Handel befindlichen Legeautomaten nicht beschädigt werden. Die Technik sollte daher die Pflanzmaschinen zu verbessern versuchen.

Es wurde auch der Frage nachgegangen, ob das maschinelle Pflanzen die Übertragung von Viren begünstigt. Faßt man die Ergebnisse von Versuchen mit 86 Sorten zusammen, so ist unter den Bedingungen des Jahres 1962 die Zahl der viruskranken Stauden nach Maschinenpflanzung nicht erhöht worden.

Manfred Kahrs: «Dimensionado de elementos de máquinas agrícolas por colectivas de carga.»

Los elementos de las máquinas agrícolas están sujetos en su trabajo a cargas dinámicas, cuyas frecuencias y amplitudes varían en márgenes muy amplios, dependiendo de influencias tan numerosas que su cálculo resulta poco menos que imposible. Cuando las resistencias de estos elementos se calculan a base de las sollicitaciones efectivas se las debe medir durante el trabajo práctico, recogidos en valores colectivos de cargas.

El método más exacto que se conoce hasta ahora para fijar las dimensiones o para averiguar la durabilidad de tales elementos, es el de comprobar las colectivas de carga con ensayos prácticos de resistencia escalonados. Sin embargo el coste es muy elevado y el margen de los valores de durabilidad encontrados es muy grande.

Eldimensionado a base de la línea Wöhler todavía no es aplicable en todos los casos, porque ésta, diferenciándose de las sollicitaciones múltiples de la colectiva de cargas, es aplicable en rigor solamente a sollicitaciones oscilatorias de un solo paso. Una teoría sobre los daños que hasta ahora no se ha establecido, podría en este caso servir de enlace. Sin embargo ha sido posible establecer dimensionados aproximados en dos ejemplos del ramo de construcciones de máquinas agrícolas, por comparación de las colectivas de cargas encontrados por ensayos prácticos, con las líneas Wöhler.

Como hasta aquí se dispone solamente de colectivas de cargas para unos pocos elementos de maquinaria agrícola y de tractores para sollicitaciones elevadas, se debe considerar su establecimiento como trabajo muy importante para la investigación de la técnica agrícola.