

Ermittlung und Anwendung von Lastkollektiven im Traktorenbau

Von Ulrich Lüpfer, Porz

DK 531.221.23:631.372.001:629.114.2

Das Optimieren der Bauteile von Landmaschinen und Traktoren ist ein zeitraubender Prozeß, wenn man für die Erprobung ausschließlich auf den saisongebundenen Feldeinsatz angewiesen ist. Der Entwicklungs-Ingenieur zieht es daher vor, mit Prüfständen zu arbeiten, die vorher ermittelte Einsatzbedingungen simulieren. Dadurch kann man nicht nur die Dauer der Entwicklung verkürzen, sondern auch ihre Kosten senken. Die im praktischen Betrieb auftretenden, in kurzen Feldversuchen erfaßten Belastungen überführt man mit Klassiergeräten in Lastkollektiv-Programme, die zum Steuern der Prüfmaschinen geeignet sind.

1. Grundlagen

Der Entwicklungs-Ingenieur ist bestrebt, die Bauteile so auszulegen, daß ihr Werkstoff während der zu erwartenden Einsatzzeit optimal ausgenutzt wird. Anzustreben ist ein Ausnutzungsgrad $A = 1$: geht die angestrebte Nutzungsdauer eines Produktes zu Ende, so soll das eingesetzte Material das höchstzulässige Verschleiß- oder Ermüdungsmaß erreicht haben. Ein Ausnutzungsgrad $A > 1$ bedeutet vorzeitigen Ausfall eines Teiles, ein Ausnutzungsgrad $A < 1$ hingegen ungenutzte Materialreserven.

Durch Betriebslastenversuche – den realistischen Feldeinsatz von Versuchsmaschinen – kann man die ausreichende Haltbarkeit nachweisen, jedoch dauert dies sehr lange. Beim Betriebslasten-Nachfahrversuch simuliert man die während der Nutzzeit zu erwartenden, meist regellosen Belastungsvorgänge durch eine Prüfmaschine. Diese wird von einem Magnetband gesteuert, auf dem die zuvor unter repräsentativen Bedingungen aufgenommenen Lastwerte gespeichert sind.

Der Mehrstufen-Programm-Versuch ersetzt die unregelmäßigen Belastungen der Praxis durch sinusförmige Belastungsschwingungen diskreter Amplitude und Häufigkeit. Man muß die im kurzen Feldeinsatz gemessenen Werte in eine für das Programm geeignete Form überführen; dazu dient ein Klassiergerät. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurde vorwiegend mit dem Klassendurchgangs-Verfahren (Level crossing counting) nach DIN 45667, Ziff. 4.4, [1] gearbeitet: Überschreitet die Meßgröße im Bereich positiver Klassen eine vorgewählte Lastgrenze, Bild 1, so löst das Gerät einen Zählimpuls aus; im Bereich negativer Klassen zählt es, wenn die Meßgröße eine Lastgrenze unterschreitet.

Vortrag, gehalten auf der Jahrestagung der VDI-Fachgruppe < Landtechnik > in Braunschweig am 22. Okt. 1971.

Dipl.-Ing. Ulrich Lüpfer ist Leiter der Abteilung Grundlagenversuch für Traktoren und Baumaschinen der Klöckner-Humboldt-Deutz AG, Köln.

Zwischenschwingungen unbedeutender Amplituden von beispielsweise 3 bis 15 % des Höchstwertes kann das Gerät durch eine einstellbare Hysterese unterdrücken. Die Zählergebnisse, das Lastkollektiv, stellt man in Diagrammen dar, in denen die Meßgrößen auf der Ordinate und ihre Häufigkeit auf der Abszisse aufgetragen sind, Bild 2¹⁾. Dieses Arbeitsverfahren liefert zwar nicht die an sich gewünschte Summenhäufigkeitsverteilung der Spitzenwerte, sondern die Überschreitungshäufigkeit von Signalgrenzen. Wenn jedoch die Belastungsschwingungen annähernd symmetrisch zu einer quasistatischen Mittellast verlaufen, deckt sich das Zählergebnis mit der Summenhäufigkeitsverteilung [2; 3].

¹⁾ Die von der üblichen Art der Darstellung (Häufigkeit auf der Ordinate, Merkmal auf der Abszisse) abweichende Form ist hier gewählt, um einen Vergleich zwischen Lastkollektiv und Wöhler-Kurve (vgl. Bild 8) zu erleichtern.

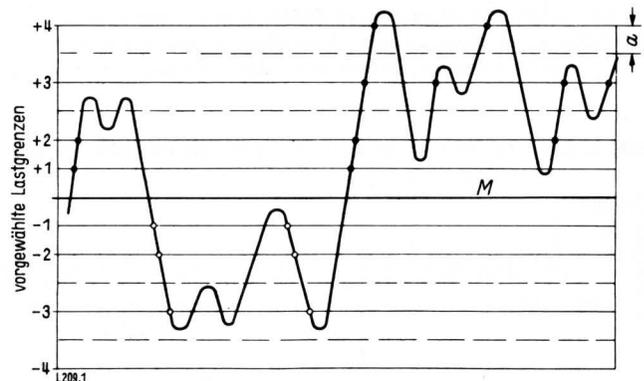


Bild 1. Klassieren nach der Überschreitungshäufigkeit (Klassendurchgangsverfahren).

- Zählwerte in positiven Klassen
- Zählwerte in negativen Klassen
- M mittlere Last
- a Hysterese

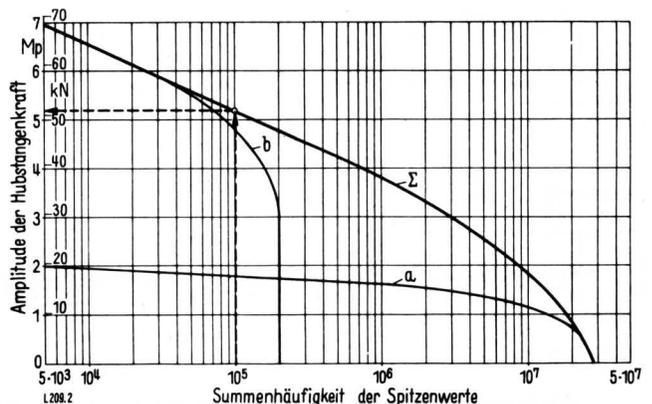


Bild 2. Summenhäufigkeit der Hubstangenkraft-Spitzenwerte während der Gesamteinsatzdauer.

- a, b zwei Teillastkollektive als Beispiele
- Σ Gesamtlastkollektiv

Mit demselben Klassiergerät kann man auch die zeitliche Verteilung regelloser Meßsignale ermitteln. In diesem Fall beaufschlagt ein Zeittaktgeber mit 10, 100 oder 1000 Hz die vom Meßsignal angesprochenen Zähler. Die Zählwerke geben nunmehr nicht die Häufigkeiten, sondern die Dauer von Grenzwert-Überschreitungen an, entsprechend der aufsummierten Klassenverweildauer nach dem Verweildauer-Verfahren in DIN 45 667, Ziff. 4.2. [1].

2. Das Ermitteln von Lastkollektiven

Im folgenden sei das Ermitteln von Lastkollektiven an drei Beispielen – Kraftheber, Lenkung und Getriebe – erläutert.

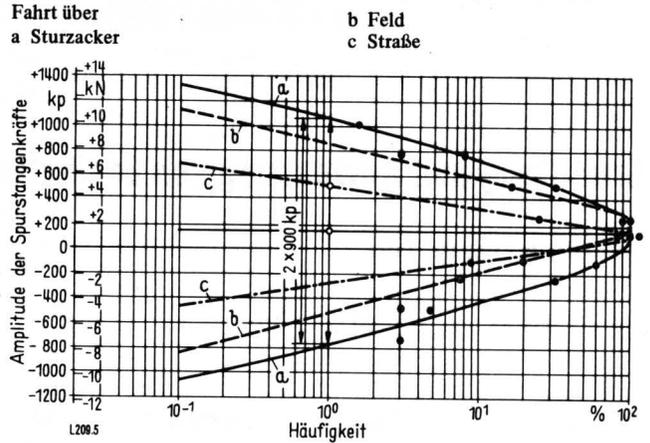
2.1. Lastkollektiv für die Hubstange eines Krafthebers

An einem Traktor mit einer Leistung von 67 PS (50 kW) sollten Lastkollektive für die Kraftheber-Hubstangen aufgestellt werden, um die Festigkeit von Teilen des Krafthebers und des Dreipunktgestänges auf einer Schwingprüfmaschine testen zu können.

Der Kraftverlauf wurde mit Dehnmeßstreifen gemessen und auf Magnetband gespeichert, und zwar unter allen möglichen Betriebsbedingungen – mit verschiedenen Anbaugeräten sowohl bei der Feldarbeit als auch beim Transport – unter normalen und unter erschwerten Verhältnissen. Die Messungen dauerten 2 bis 20 min je Versuchsvariante, das sind 0,1 bis 1 % der voraussichtlichen Einsatzzeit, was für solche Untersuchungen im allgemeinen ausreicht. Die höchsten Beanspruchungen wurden bei schneller Transportfahrt auf schlechter Straße mit angebautem Drei-Schar-Volldrehpflug gemessen, Bild 3. Unter anderen Einsatzverhältnissen ist der Verlauf der Schwingungen dem hier gezeigten ähnlich, jedoch ist die Häufigkeitsverteilung der Amplituden unterschiedlich.

Die statistische Auswertung erfolgte im Labor, wobei das Klassiergerät die auf dem Magnetband gespeicherten Lastschwingungen nach dem Klassendurchgangsverfahren auszählte. Die den verschiedenen Lastgrenzen zugeordneten Zähler zeigten Überschreitungshäufigkeiten an, die anschließend auf diejenige geschätzte Einsatzzeit extrapoliert wurden, für welche die Meßbedingungen repräsentativ waren.

Bild 5. Häufigkeit der Amplituden von Spurstangenkräften.



Die Ergebnisse für zwei Betriebszustände sind in Bild 2 als Lastkollektive a und b dargestellt. Das Gesamlastkollektiv Σ erhält man, indem man für verschiedene Lastniveaus die Häufigkeiten aller Teillastkollektive addiert. Aus der Summenkurve kann man ablesen, daß während der Gesamteinsatzdauer der Hubstange beispielsweise 10^5 Lastschwingungen zu Schwelllasten von mindestens 5200 kp (51 kN) führen werden. Die Form dieser Summenkurve ist typisch für ein Gesamlastkollektiv, das sich aus mehreren normal verteilten Teillastkollektiven zusammensetzt.

2.2. Lastkollektiv für Spurstangenkräfte

In einer weiteren Versuchsreihe wurden an einem allradgetriebenen, mit Servolenkung ausgerüsteten Traktor (Leistung 100 PS bzw. rd. 75 kW) Spurstangenkräfte und Lenkstangenkräfte mit Dehnmeßstreifen gemessen. Bild 4 zeigt den zeitlichen Kraftverlauf in der Spurstange und in der Lenkstange bei der Fahrt über einen Sturzacker mit zulässiger Vorderachslast. Hier schwingen die Kräfte

Bild 3. Zeitlicher Verlauf der Kraft in der Hubstange eines Krafthebers.

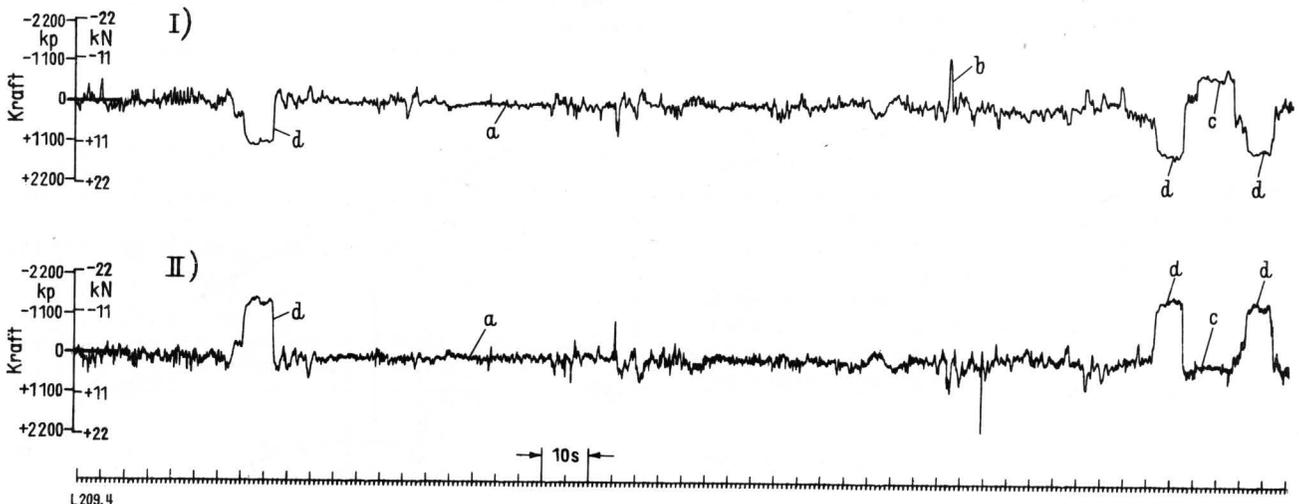
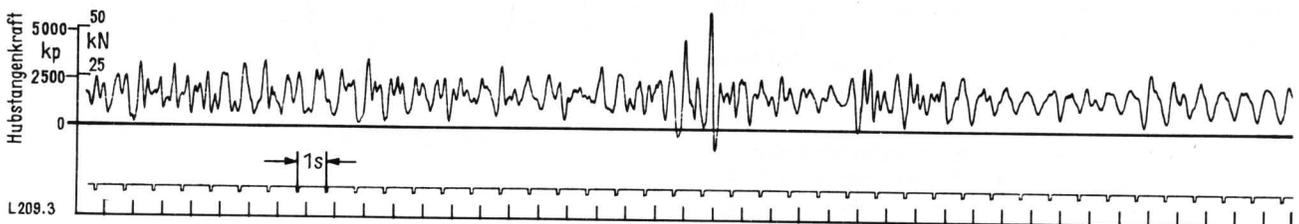


Bild 4. Zeitlicher Verlauf der Lenkstangenkraft und der Spurstangenkraft bei Fahrt über einen Sturzacker.

I Lenkstangenkraft
II Spurstangenkraft

a Geradeausfahrt
b großes Hindernis

c Linkskurve
d Rechtskurve

um einen Mittelwert nahe null. Die Amplituden sind bei Geradeausfahrt (Bereich a in Bild 4) relativ klein, erreichen jedoch beim Herausfahren aus Furchen (b) oder beim vollen Einlenken gegen den Anschlag (c, d) gelegentlich recht hohe Werte.

Im Labor wurden die Meßwerte wiederum nach dem Klassendurchgangsverfahren statistisch ausgewertet. Das Ergebnis – in Bild 5 für drei repräsentative Betriebsbedingungen a, b und c dargestellt – bezieht sich jedoch in diesem Fall nicht auf eine geschätzte Einsatzzeit, sondern auf die Gesamtschwingungszahl. Demnach erreicht bei Fahrt über Sturzacker 1 % der Schwingungen Kraftamplituden von mindestens ± 900 kp ($\pm 8,8$ kN) bei einer mittleren Last von etwa 150 kp (1,5 kN). Auch in dieser Art der Darstellung ist das Lastkollektiv, das sich aus dem Klassiervorgang ergeben hat, im Gegensatz zum ursprünglichen Meßschrieb übersichtlich, und es läßt die Größenordnungen der Belastungen sehr gut erkennen.

2.3. Lastkollektive für Getriebe

Für den Entwicklungs-Ingenieur ist es wichtig, die Belastungen im Fahrgetriebe sehr genau zu kennen, denn die Getriebe-Auslegung beeinflußt maßgeblich die Herstellkosten des ganzen Traktors.

Als Beispiel für die Aufnahme von Lastkollektiven an Getrieben mögen die Messungen an einem Traktor, Leistung 67 PS (50 kW), beim Einsatz mit zapfwellengetriebenen Untergrundlockerern dienen. Der Schlepper wurde für Messungen vorbereitet, indem Drehmoment- und Drehzahlmeßstellen an der Getriebeeingangswelle, an den Steckwellen, an der Antriebsgelenkwelle für den Vorderradantrieb und an der Zapfwelle angebracht wurden. Die Drehmomente an der Eingangswelle nahm ein drahtloser Übertrager ab. Verstärker, Oszillograph, Bandgerät und Stromaggregat waren auf einem Kotflügel bzw. auf dem Dach des Schleppers aufgebaut.

Der Schlepper konnte auch in schweren Böden einen zweiarmigen, zapfwellengetriebenen Untergrundlockerer bei 70 cm Arbeitstiefe mit 1 bis 3 km/h ziehen. Ein typisches Beispiel für den Beanspruchungsverlauf enthält Bild 6. Die tiefliegende Wirkungslinie der Widerstandskraft eines solchen Arbeitsgerätes hat, wie die Messungen zeigten, große vertikale Zusatzlasten auf Hinter- und Vorderachse zur Folge, so daß bei einem Betriebsgewicht des Schleppers von nur 4,2 Mp (42 kN) Zugkräfte bis 5000 kp (50 kN) gemessen wurden und Drehmomente je hintere Steckwelle in der ungewöhnlichen Größe von max. 1500 kpm (15 kNm).

Es läßt sich nachweisen, daß Getriebeprüfstände den Verschleiß und die Ermüdung rotierender Teile besser simulieren, wenn sie nach Kollektiven der Drehmomentdauer und nicht der Drehmomenthäufigkeit gesteuert werden. Daher wertete man diese Messungen, im Gegensatz zu den bisherigen Beispielen, nach dem im Abschn. 1. erläuterten Verfahren der Überschreitungsdauer aus.

Bild 7 enthält die zeitliche Verteilung der Drehmomente für je eine Steckwelle der Hinter- und Vorderachse. Nach den bisherigen Messungen gibt dieses Lastkollektiv die obere Belastungsgrenze für Gänge mit Fahrgeschwindigkeiten zwischen 1 und 3 km/h an. Für andere Geschwindigkeitsbereiche und verschiedene Arbeitsgeräte wurden die Getriebemomente ebenfalls gemessen, um entsprechende Lastkollektive aufstellen zu können. Zum Überprüfen dieser aus Kurzzeitmessungen stammenden Ergebnisse und um weitere Daten von Getriebebelastungen zu sammeln, arbeiten ständig Schlepper mit robusten Klassiergeräten im Kundeneinsatz. Das Auswerten des umfangreichen Zahlenmaterials ist nur durch elektronische Datenverarbeitung (EDV) möglich.

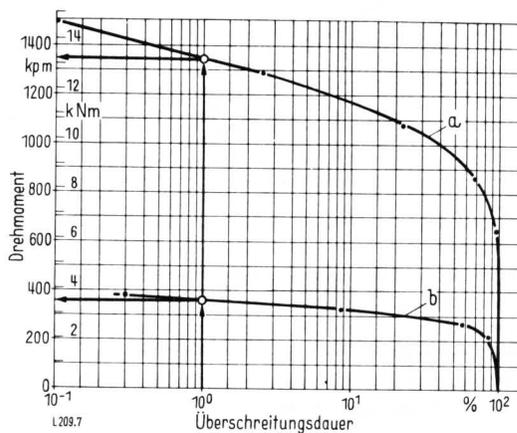


Bild 7. Zeitliche Verteilung der Drehmomente in einer hinteren und einer vorderen Steckwelle, dargestellt als Summenkurven.
a hintere Steckwelle
b vordere Steckwelle

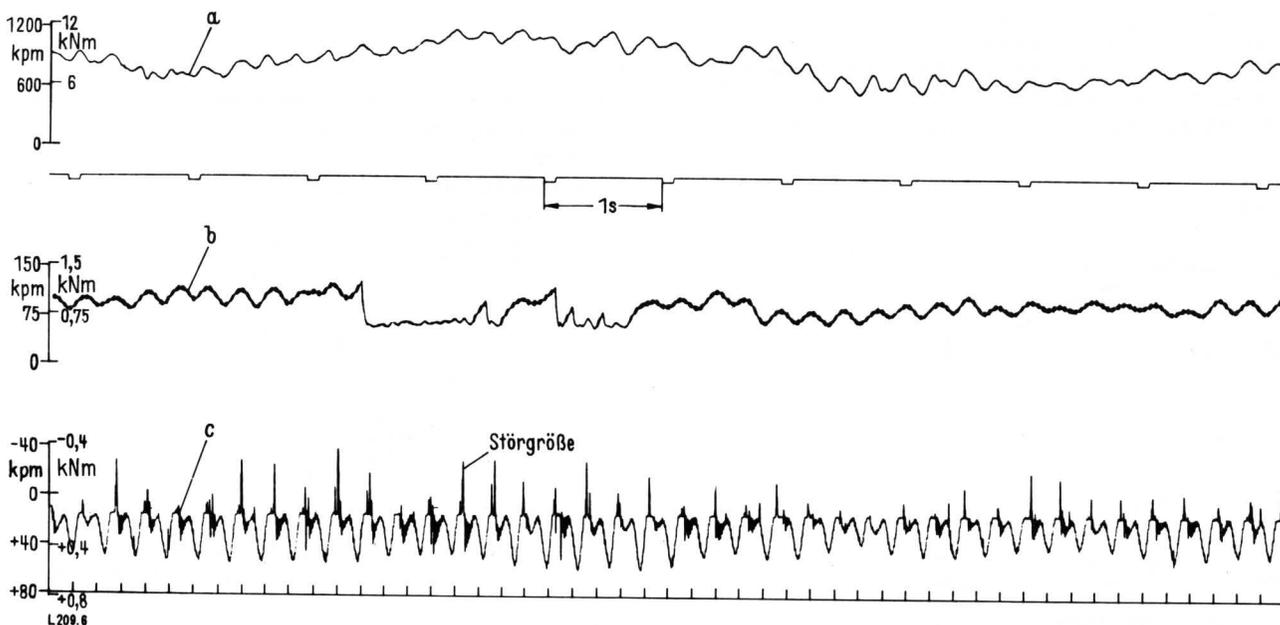


Bild 6. Zeitlicher Verlauf von Drehmomenten in einer Steckwelle der Hinterachse, in der zur Vorderachse führenden Gelenkwelle und in der Zapfwelle eines Schleppers mit angebaubtem Untergrundlockerer.

a Steckwelle, hinten links b Gelenkwelle c Zapfwelle
(Der Drehmomentenverlauf an der Zapfwelle enthält Störspitzen, die vom Meßwertaufnehmer herrühren)

3. Anwendung von Lastkollektiven

3.1. Anwendung im Bereich Konstruktion

Die Berechnung der Lebensdauer von Bauteilen ist in einigen Fällen bereits möglich, stößt jedoch meist noch auf Schwierigkeiten, weil es bisher keine allgemein gültige Theorie der Schadensakkumulation gibt.

In **Bild 8** ist eine Wöhlerkurve *a* in üblicher Form als ertragbare Spannungsamplitude in Abhängigkeit von der Bruchlastspielzahl dargestellt, und außerdem zeigt ein Beanspruchungskollektiv *b*, wie oft bestimmte Spannungsamplituden während der Gesamteinsetzeit des betreffenden Teiles erreicht bzw. überschritten werden. Es ist offensichtlich, daß in dieser Darstellung das Beanspruchungskollektiv *b* unterhalb der Wöhlerkurve *a* liegen muß. So ausgewertet, sind Lastkollektive aussagekräftige Arbeitsunterlagen, die Belastungen aller Art besser charakterisieren als Angaben über Mittelwerte und Stoßfaktoren.

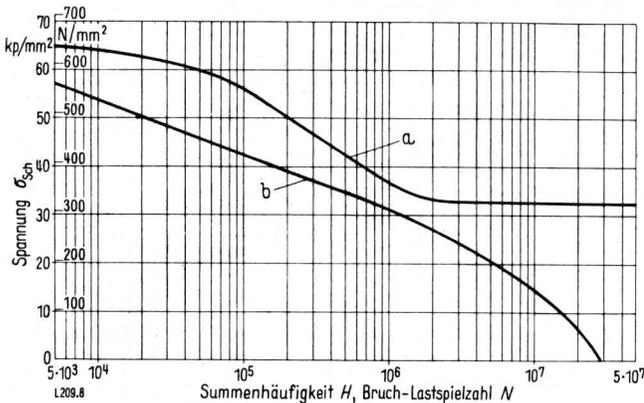


Bild 8. Beanspruchungskollektiv und Wöhler-Kurve.

a Wöhler-Kurve $\sigma_{Sch} = f(N)$

b Beanspruchungskollektiv $\sigma_{Sch} = f(H)$

3.2. Anwendung von Lastkollektiven im Versuch

Auf Simulations-Prüfständen, z.B. auf dem <Resonanzpulsler> und dem <Hydropulsler>, auf Leistungsprüfständen, Verspannungsprüfständen und Rüttelprüfständen, ist das Lastkollektiv Grundlage für den Mehrstufen-Programm-Versuch. Dabei bringt man Lastschwingungen verschiedener Amplituden und verschiedener Häufigkeit auf das Bauteil auf, um dessen ertragbare Lastspielzahl zu ermitteln. Die stetige Verteilung des Lastkollektivs wird, da die Arbeitsweise der Prüfmaschinen dies erfordert, nach **Bild 9** und **Tafel 1** wieder in einzelne Klassen zerlegt, indem man

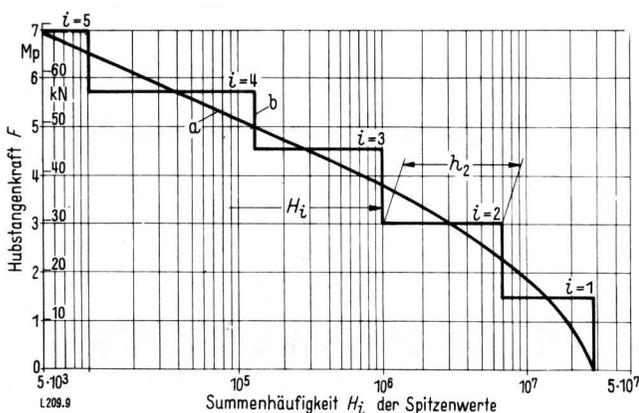


Bild 9. Zerlegen eines Lastkollektivs in Klassen.

a stetige Summenhäufigkeitskurve

b Stufenzug

i Stufen

h_i Stufenhäufigkeit $h_i = H_i - H_{i+1}$

H_i Summenhäufigkeit

Tafel 1. In Klassen zerlegtes Lastkollektiv nach Bild 9.

Laststufe <i>i</i>	Hubstangenkraft <i>F</i> kp	Summenhäufigkeit H_i 10 ⁶ Lastspitzen	Stufenhäufigkeit h_i 10 ⁶ Lastspitzen
5	7000	0,02	0,02
4	5700	0,15	0,13
3	4500	1,0	0,85
2	3000	7,0	6,0
1	1500	30,0	23,0

die Häufigkeitssummenkurve *a* durch einen Treppenzug *b* ersetzt. Im kritischen oberen Lastbereich sollte man diesen Treppenzug durch kleine Stufensprünge x_i möglichst gut der stetigen Verteilungskurve angleichen. Die regellosen Lastschwingungen während der Nutzung eines Bauteils sind somit durch regelmäßige Schwingungen unterschiedlicher Amplituden ersetzt worden. Nach *Gaßner* [4] zerlegt man das Kollektiv außerdem in Teilfolgen, um eine betriebsähnliche Vermischung hoher und niedriger Lasten zu erhalten.

Belastet man die Bauteile bzw. Baugruppen auf Prüfmaschinen nach Lastkollektiv-Programmen, so erreicht man damit einen erheblichen Zeitraffer-Effekt. Einmal entfallen die betriebsüblichen Pausen; das ist besonders wichtig bei den nur in der Saison betriebenen Landmaschinen. Zum anderen kann man die Frequenz der Lastschwingungen je nach Leistungsfähigkeit der Prüfmaschinen erhöhen, wobei man allerdings das Bauteil thermisch nicht überlasten darf. Schließlich kann man Laststufen niedrigen Niveaus (bis etwa 20% der Spitzenlasten) aus dem Prüfprogramm streichen, denn sie beeinflussen im Rahmen der üblichen Genauigkeit die Materialschädigung meist nur unbedeutend. Solche Arbeitsmethoden gestatten es, den mehrjährigen Einsatz von Bauteilen und Baugruppen innerhalb weniger Wochen nachzuahmen. Eine rationelle Teile-Optimierung wird dadurch überhaupt erst möglich.

Die durch den Labortest gefundene Bauteilauslegung wird desto besser den praktischen Anforderungen genügen, je mehr es gelang, alle Umwelteinflüsse einschließlich Korrosion, Verschmutzung und Wärmeeinwirkung am Prüfobjekt genau zu simulieren.

Schrifttum

- [1] DIN 45667: Klassierverfahren für das Erfassen regelloser Schwingungen. Hrsg. Deutscher Normenausschuß. Aug. Okt. 1969.
- [2] *Buxbaum, O.*: Statistische Zählverfahren als Bindeglied zwischen Beanspruchungsmessung und Betriebsfestigkeitsversuch. Bericht Nr. TB-65 des Laboratoriums für Betriebsfestigkeit Darmstadt (1966).
- [3] *Dietz, J., u. O. Svenson*: Einfluß des Zählverfahrens auf das Ergebnis der statistischen Analyse von Beanspruchungsvorgängen. Bericht Nr. FB-70 des Laboratoriums für Betriebsfestigkeit Darmstadt (1967).
- [4] *Gaßner, E.*: Betriebsfestigkeit – eine Bemessungsgrundlage für Konstruktionsteile mit statistisch wechselnden Betriebsbeanspruchungen. Konstr. Bd. 6 (1954) S. 97/104.

Weiteres Schrifttum

- [5] *Lipp, W.*: Simulation von Betriebsbeanspruchungen im Nachfahrversuch. TM Nr. 59/71 des Laboratoriums für Betriebsfestigkeit Darmstadt (1971).
- [6] *Kahrs, M.*: Die Auslegung von Landmaschinenteilen nach Lastkollektiven. Landtechn. Forsch. Bd. 13 (1963) S. 171/78.
- [7] *Kühlborn, H.*: Drehschwingungsverhalten des Systems Ackerschlepper – Landmaschine. Grndl. Landtechnik Bd. 21 (1971) Nr. 5, S. 129/35.

L 209