

Betriebsfeste Auslegung der Antriebstechnik von Landmaschinen

In der Antriebstechnik von Landmaschinen – besonders bei Getrieben und Achsen von Traktoren, Selbstfahrern und anderen Landmaschinen mit mechanischen Antrieben – ist die Methode der Betriebsfestigkeit bereits seit einigen Jahren aus der Auslegungsberechnung und dem Festigkeitsnachweis nicht mehr wegzudenken. Der vorliegende Beitrag zeigt eine Übersicht über die Literatur zu diesem Thema und gibt Einblick in das derzeit fortschrittlichste Verfahren zur Erstellung von Lastkollektiven.

Dr.-Ing. Bernd Vahlensieck war bis zum 30. Juni 1999 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Landmaschinen (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. K.Th. Renius) der Technischen Universität München, Boltzmannstraße 15, 85747 Garching, e-mail: vck@lrz.tum.de.

Schlüsselwörter

Betriebsfestigkeit, Traktor, Landmaschine, Lastkollektiv, Rainflow-Methode

Keywords

Fatigue load analysis, load spectra, rainflow-counting, tractor, farm machinery

Literaturhinweise sind vom Verlag unter LT 99420 erhältlich oder über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/local/fliteratur.htm> abrufbar.

Hinter der Methode der Betriebsfestigkeit steht der Gedanke, Bauteile so auszulegen, dass diese mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit eine bestimmte endliche Lebensdauer ohne unnötigen Aufwand an Werkstoff erreichen. Dazu werden die Belastungen auf das Bauteil und seine Belastbarkeit in Kennlinien oder -funktionen umgerechnet und diese Kennlinien zum Nachweis zusammengeführt, dass die gewünschte Lebensdauer erreicht werden kann.

Schon zu Zeiten, als der Begriff der Betriebsfestigkeit noch nicht geprägt war, legten die Landtechniker Kloth und Stroppel ein erstes Lastkollektiv für Antriebs-elemente eines zapfwellengetriebenen Garbenbinders vor. In ihrer Veröffentlichung aus dem Jahre 1932 zeigen sie eine Spitzenwertklassierung der Drehmomente in der Antriebswelle zwischen Traktor und Gerät [1]. Vier Jahre später veröffentlichten dieselben Forscher eine weitere bedeutende Arbeit, in der am Beispiel der Drehmomente im Antrieb einer Mähmaschine neben der Spitzenwertklassierung auch die Klassierung nach Zeitanteilen vorgestellt und in Zusammenhang mit der Wöhlerlinie des beanspruchten Bauteils gebracht wird [2]. Auch die Begriffe des Lastkollektivs, seiner Extrapolation, seiner Summenkurve und seiner Abdeckungswahrscheinlichkeit werden dort bereits diskutiert. Der Grundstein für die Entwicklung der betriebsfesten Auslegung von Landmaschinen war gelegt.

Einfache und komplexe Klassierverfahren

Wie die Übersicht zeigt, sind die am häufigsten eingesetzten Zähl- beziehungsweise Klassierverfahren – vor allem für zyklisch beanspruchte Antriebsstrangteile wie Zahnräder, Wellen und Lager – die Klassierung nach Zeitanteilen (Stichproben) und die drehzahlsynchrone Klassierung. Auch in der DIN 3990 (Teil 6) wird letztere zur betriebsfesten Zahnradauslegung empfohlen.

Offensichtlich haben sich diese beiden einfachen Verfahren in der Praxis bewährt. Trotz einer starken Vereinfachung bei der Zusammenfassung der Lastgeschichte eines

Weitere Veröffentlichungen in der Übersicht

- *Glaubit* 1948 [3]: Spitzenwerte des Gelenkwellenmoments an einem Lkw
- *Gerlach* 1956 [4]: Zeitanteile-Lastkollektive des Traktor-Getriebeeingangsmoments beim Pflügen
- *Coenenberg* 1962 [5]: Einfluss der Traktor-Kupplung auf Lastkollektive
- *Graham* 1962 [6]: Momente im Traktor-Endtrieb: Drehzahlsynchrone Klassierung
- *Buck, Seifried* 1973 [7, 8, 9]: Getriebeeingangsmomente: Klassierung nach Zeitanteilen und drehzahlsynchrone Klassierung
- *Renius* 1976 bis 1979 [10, 11, 12]: Standardlastkollektive für Getriebeeingang und Treibräder, Geschwindigkeitsverteilungen, Auslegungsbeispiele; in [10] Zusammenfassung der vorangegangenen Entwicklung der betriebsfesten Auslegung von Traktorgetrieben
- *Biller* 1982 [13]: Einsatzspektrum Modellbetrieb: Lastkollektive für Traktor-Getriebeeingang und Treibräder
- *Meiners* 1982 [14]: Einfluss einer hydrodynamischen Kupplung, Zeitanteile- und Rainflow-Lastkollektive
- *Biller* 1983 [15]: Zeitanteile-Lastkollektive für die Zapfwelle
- *Schönönenbeck* 1994 und 1995 [16, 17]: Zeitanteile-Lastkollektive und Auslegung für den Einsatz eines Kettenwandlers im Fahrtrieb eines Traktors
- *Vahlensieck* 1995 bis 1999 [18, 19, 20]: Ermittlung der Einflüsse leistungsgeregelter stufenloser Fahrtriebe auf die Lastkollektive des Gesamtantriebsstrangs, neue Methoden zur Lastkollektiv-Erstellung für Kettenwandler-Bauteile

Bauteils mit einem dementsprechend hohen Informationsverlust haben sie auch heute noch ihre Berechtigung. Dennoch ist vor ihrem Einsatz immer wieder zu prüfen, ob die Bedingungen erfüllt werden, unter denen die Vereinfachungen gelten: für das Stichprobenverfahren muss eine repräsentative Durchschnittsdrehzahl verfügbar sein [10], und für beide Verfahren ist sicherzustellen,

dass das Bauteil am Umfang gleichmäßig beansprucht wird (beispielsweise alle Zähne eines Zahnrades). So können in der Antriebstechnik Bauteile auszulegen sein, die nur auf den ersten Blick zyklisch belastet werden, für die sich jedoch bei genauerer Betrachtung eine stochastische oder einseitige Belastung aus äußeren Lasten ergibt. Als Beispiel seien die Ausgleichsräder eines Differentialgetriebes genannt, die für einen großen Anteil ihrer Lebensdauer nicht oder nur sehr langsam rotieren. Auch für quasi-zyklisch beanspruchte Bauteile – wie die Kette in einem stufenlosen Umschlingungsgetriebe – reichen unter Umständen die einfachen Klassierverfahren nicht aus [20]. Eine genauere Wiedergabe der Lastgeschichte solcher Bauteile wird durch Klassierverfahren möglich, die komplette Lastzyklen entnehmen und zusammenfassen. Ein einfaches Verfahren dieser Gruppe ist die Zählung nach Klassengrenzenüberschreitungen. Dieses – einparametrische – Verfahren wird oft angewandt, erfordert jedoch einige Erfahrung, da es die tatsächliche Qualität und Quantität der Lastzyklen nur bedingt abbildet. Eine bessere Abbildung leistet die sogenannte Rainflow-Methode als modernster Vertreter der zweiparametrischen Klassierverfahren.

Rainflow-Methode

Die Rainflow-Zählung hat in den letzten Jahren durch ihre Eignung zur zusammenfassenden Darstellung von stochastischen Lastverläufen und durch die zunehmende

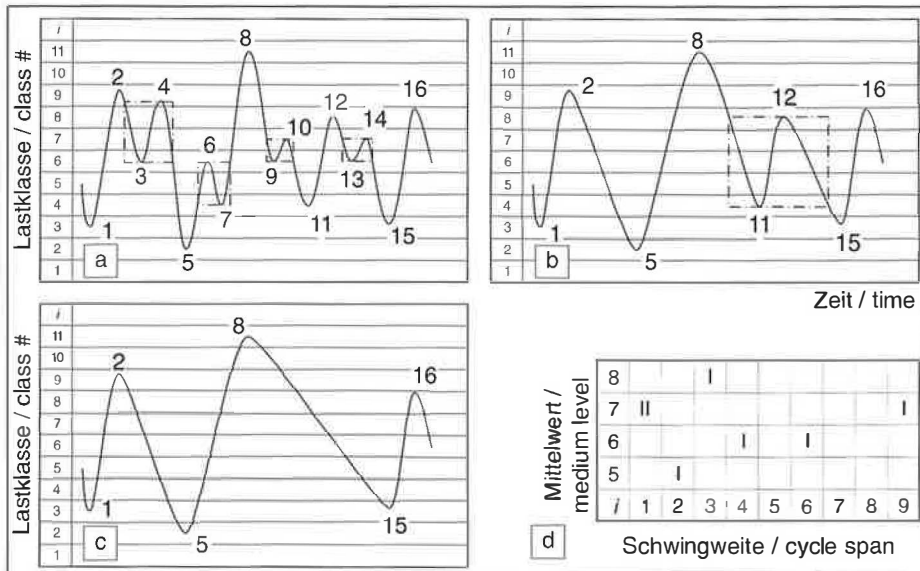
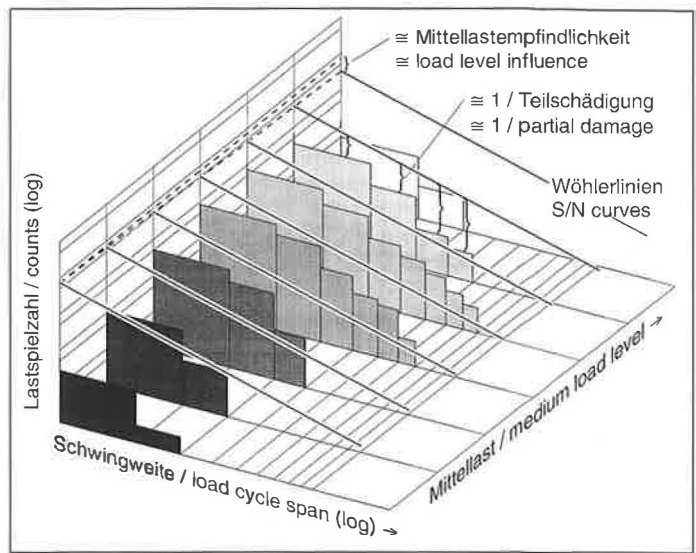


Bild 1: Klassierung nach der Rainflow-Methode; strichpunktierte Rechtecke kennzeichnen die geschlossenen Schwingspiele, die nach den Klassierkriterien entnommen werden. Der verbleibende Lastverlauf wird als Residuum bezeichnet (c) und in diesem Beispiel am Schluss der Auswertung mitklassiert. Eine Entscheidung über die Behandlung des Residuums hat von Fall zu Fall zu erfolgen

Fig. 1: Example for classifying with the Rainflow method. The dashed squares mark closed load cycles which are taken out and counted. The residuum (c) can be counted if necessary (done here). A decision about the treating the residuum must be made from case to case.

Bild 2: Beispiel für eine Schädigungsrechnung: Rainflowkollektiv, Wöhlerlinien, Teilschädigungen

Fig. 2: Calculation of damage: rainflow load spectrum vs. S/N curves, partial damage examples



Marktverfügbarkeit von Rechenprogrammen als Klassiermethode an Bedeutung gewonnen. Die Methode hat eine zweiparametrische Matrix zum Klassierergebnis, in der Schwingspiele entweder nach Mittelwert/Schwingweite oder nach ihrem oberen/unteren Extremwert (ähnlich einer Übergangsmatrix) gezählt werden. Durch die Abspeicherung von Schwingspielen beziehungsweise Lastzyklen durch jeweils zwei Parameter ist der Informationsverlust vergleichsweise gering. Das Besondere an der Rainflow-Methode ist die Entnahme geschlossener Schwingspiele, was mehrere Durchläufe bei der Analyse eines Lastverlaufs notwendig macht, Bild 1. Dadurch, dass geschlossene Zyklen klassiert werden, wird der Hypothese Rechnung getragen, dass zwischen dem das Bauteil beanspruchenden Spannungs-Dehnungspfad (Hysterese) und dem Verlauf der äußeren Belastung ein direkter Zusammenhang besteht.

Durch den hohen Informationsgehalt ist es möglich, Ergebnisse anderer untergeordneter Klassierverfahren aus einer Rainflow-Matrix zu gewinnen. Dies gilt in erster Linie für solche Verfahren, die Minima und Maxima auswerten, also beispielsweise nicht für die Stichprobenklassierung.

Auslegungsbeispiel

Das Ergebnis einer Rainflow-Klassierung sieht man in Bild 2. Zusätzlich wird beispielhaft die Auslegung eines Bauteils auf Betriebsfestigkeit dargestellt. Die Kennfunktion für die Bauteilbelastung ist ein Rainflow-Kollektiv, die Bauteilbelastbarkeit wird durch mehrere von der Mittelspannung abhängige Wöhlerlinien repräsentiert. Diese Abhängigkeit ist durch die sogenannte Mittellastempfindlichkeit des Werkstoffs beziehungsweise des Bauteils gegeben. Ihr Wert liegt zwischen 0 (keine Abhängigkeit) und 1 und zeigt sich im Bild 2 durch das nach hinten fallende Höhenniveau der Wöhlerlinien.

Eine Schädigungsrechnung erfolgt heute üblicherweise mit Hilfe sogenannter linearer Schadensakkumulationshypothesen. Diese stützen sich auf die Annahme, dass jede Schwingung das Bauteil unabhängig von Zeitpunkt des Auftretens und der Frequenz schädigt. Jede Lastklasse trägt mit einer Teilschädigung zur Gesamtschädigung bei, die Schädigung je Klasse steigt linear mit der jeweiligen Schwing- oder Lastspielzahl an. Eine Teilschädigung errechnet sich in jeder Lastklasse aus dem Quotienten „zu ertragende Lastspielzahl“ (aus dem Kollektiv) geteilt durch „ertragbare Lastspielzahl“ (aus der Bauteilwöhlerlinie). Wird die Lastspielzahl logarithmisch aufgetragen, ergibt sich der Kehrwert der Teilschädigung als Abstand zwischen Kollektivbalken und Wöhlerlinienpunkt in Klassenmitte, vergleiche Beispiel in Bild 2. Die Teilschädigungen werden aufsummiert, für eine betriebsfeste Auslegung soll diese Summe einen bestimmten Maximalwert – beispielsweise 1 – nicht überschreiten.