

Karl Theodor Renius, Garching

# Betriebsfestigkeit von Traktorgetrieben

Die „Betriebsfestigkeit“ in der Antriebstechnik begann rückblickend 1924 mit A. Palmgren. Bedeutende Fortschritte kamen später aus der Landtechnik: nach dem 2. Weltkrieg namentlich für „Traktorgetriebe“. Der hier erreichte Stand ist zum Teil der richtungsweisenden Förderung des Gebietes durch Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-J. Matthies zu verdanken.

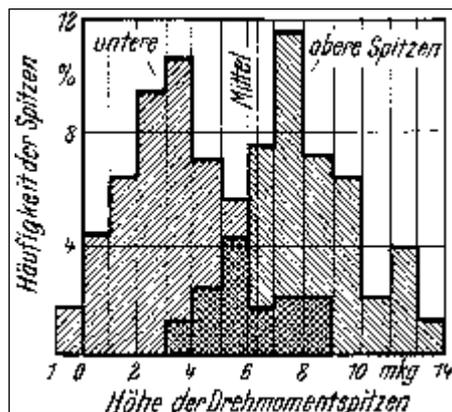


Bild 1: Zapfwellen-Lastkollektiv eines Binders 1932 [2], Originaldiagramm, gekürzt

Fig. 1: Cumulative load spectrum (binder)1932 [2], original diagram, simplified

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Karl Theodor Renius ist Inhaber des Lehrstuhls für Landmaschinen der Technischen Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, und hat 1973 bei Prof. Matthies promoviert; e-mail: renius@ltm.mw.tum.de

## Schlüsselwörter

Traktoren, Traktorgetriebe, Lastkollektive, Getriebe, Antriebstechnik, Betriebsfestigkeit, Schadensakkumulation

## Keywords

Tractors, tractor transmission, load spectra, transmissions, drive lines, random load fatigue, cumulative damage in fatigue

Nach Kenntnis des Autors wurden die ersten „Lastkollektive“ im weltweiten Schrifttum 1932 von den Landtechnikern W. Kloth und Th. Stoppel [2] veröffentlicht (Bild 1), wenngleich diese den Begriff „Kollektiv“ erst ab 1936 benutzten [3]. In [3] wird auch schon ein Vergleich von Spannungskollektiven mit Wöhlerlinien empfohlen. Einflüsse der Lastspielzahl auf die Zahnraddimensionierung von Traktorgetrieben findet man schon 1931 bei L. Jacobi [4].

### Lastkollektive für Traktorgetriebe: Erste Impulse aus Braunschweig

1953 begann A. Gerlach unter H. Meyer („Schlepper-Meyer“) in der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Völkerrode mit der messtechnischen Ausrüstung eines Traktors (Telemetrie) und legte erste Getriebe-Lastkollektive vor [5, 6]. 1956 fand H. Straub [7], dass die Drehmomente am Getriebeeingang bei hartem Kupplern auch bei Traktoren das Kupplungsrutschmoment überschreiten können (siehe frühere Veröffentlichungen von H. Glaubitz für Straßenfahrzeuge).

Die Arbeiten von Gerlach wurden in der FAL von H. H. Coenberg fortgeführt in Kontakt mit dem Institut für Landmaschinen der TH Braunschweig unter damaliger Leitung von Prof. Dr.-Ing. H. J. Matthies. Coenberg legte zum ersten Mal umfassende Erkenntnisse zum dynamischen Drehmomentverhalten von Traktorgetrieben vor [8]. Um die Anwendung von Lastkollektiven voranzutreiben, veröffentlichte M. Kahrs (unter Matthies) 1963 eine Übersichtsarbeit [9]. Die von Matthies erkannte Bedeutung einer verbesserten Auslegung von Traktorgetrieben führte zu einem speziellen Übungskursus „Konstruktion und Berechnung von Schleppergetrieben“ am Institut (Matthies / Kahrs) mit großem Zulauf.

Der Autor wurde mit derartigen Fragen während seiner Tätigkeit bei KHD 1965/66 konfrontiert, wo bei einem damals ersten Festigkeitsproblem mit Zahnradern die Diskussionen über die Höhe der anzusetzenden Stoßfaktoren stark divergierten. Als Assistent von Matthies begann er danach, Auslegungsrichtlinien mit Hilfe von Nachrechnungen von in großen Stückzahlen ausgeführten Traktorgetrieben zu gewinnen – die guten Beziehungen von Matthies zu Traktor-

firmen waren dabei sehr hilfreich. Kernpunkt der Ergebnisse waren die sogenannten „Sternhimmel“-Diagramme, in denen für Zahnfuß und Flanke in Abhängigkeit von der Gesamtlastspielzahl Auslegungsgrenzen erarbeitet werden konnten. H. Regenbogen veröffentlichte später unter Matthies hierzu erste qualitative Deutungen aus der Sicht der Betriebsfestigkeit [10]. Etwa gleichzeitig wurden unter H. Kühlborn in der FAL Belastungsmessungen an einem 70 kW Traktor durchgeführt [11], später von R. H. Biller fortgesetzt.

### Traktorindustrie entdeckt die Betriebsfestigkeit

1973 wechselte der Autor nach Promotion bei Prof. Matthies in die Leitung der Vorentwicklung Traktoren der Klöckner-Humboldt-Deutz AG (KHD) nach Köln. Hier liefen seit mehreren Jahren unter B. Breuer und U. Lüpfer Lastkollektivmessungen an Traktoren [12], die der KHD-Vorstand O. May initiiert hatte. Für verschiedene Traktorkomponenten lagen schon gute Auslegungsgrundlagen vor [12] – beim Getriebe gab es noch Unsicherheiten. Tendenzmäßig kamen im Vergleich zu den oben beschriebenen Arbeiten aus Braunschweig zu scharfe Lastkollektive heraus. Daher erarbeitete der Autor eine Gesamtbilanz [13], in der das damals verfügbare Schrifttum zur Betriebsfestigkeit von Traktorgetrieben und ähnlichen Komponenten ausgewertet wurde. Details wurden nachträglich mit Autoren diskutiert, Erfahrungen aus den oben genannten Nachrechnungen flossen ein und Messergebnisse von KHD wurden berücksichtigt. In Übereinstimmung mit einer frühen Arbeit aus dem Hause J. Deere [14] wurde erkannt, dass Lastkollektive für die Zahnraddimensionierung auf der Zählmethode „drehzahlsynchrone Stichproben“ (oder bei konstanter Drehzahl „Zeitanteile“) beruhen sollten [12, 15, 16]. Die Normierung für die Getriebeeingangskollektive wurde in [13] nach Coenberg [8] mit dem Motornennmoment durchgeführt. Für die treibradseitigen Lastkollektive schlug der Autor das Traktorleergewicht oder alternativ das Mittel aus Leergewicht und maximal zulässigem Gesamtgewicht vor. Die Arbeit enthält ferner Fahrgeschwindigkeitskollektive, die man zur Abschätzung der Einschalt Dauern einzel-

ner Gänge oder Fahrbereiche benötigt.

Die Anwendung dieser und weiterer interner Grundlagen auf ein neu entwickeltes Deutz-Traktorgetriebe [17] führte in Verbindung mit dem Geschick des Getriebekonstrukteurs W. Zenker zum „TW90“ (später „TW900“) mit günstigen Kosten und gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit.

Die 1976 in [13] mitgeteilten Gesamtlastkollektive sind noch heute als erster Anhalt brauchbar. R. H. Biller bestätigte 1982 [18] ungefähr das vom Verfasser vorgelegte Gesamtkollektiv für den Getriebeeingang, wenn man die unterschiedlichen Abdeckwahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Das von ihm vorgeschlagene treibradseitige Gesamtlastkollektiv liegt deutlich unter dem von [13], erwies sich in der industriellen Anwendung auch tatsächlich als zu niedrig. H.-H. Meiners arbeitete als Schüler von Matthies in [19] erstmalig die schwingungsdämpfende Wirkung von Strömungskupplungen für Traktorgetriebe heraus. Später legte er mit [20] eine Zusammenfassung zur Anwendung von Traktorgetriebe-Lastkollektiven bei KHD vor. R. H. Biller publizierte 1983 Zapfwellenlastkollektive eines 70kW-Traktors für Bodenbearbeitungseinsätze [21].

### Betriebsfestigkeit etabliert sich in der Antriebstechnik

Viele Fachleute misstrauten lange Zeit der Treffsicherheit linearer Schadensakkumulationshypothesen für Getriebe. Der Autor vertrat hingegen seit etwa 1974 (belegbar 1975 [22]) die empirisch breit gestützte These, dass bei zyklisch beanspruchten Maschinenelementen wegen der Nähe der Beanspruchung zum Wöhler-Versuch nicht die Schadensakkumulation, sondern die Berechnung der „Bauteilwöhlerlinien eingebaut“ das kritische Glied der Auslegungskette ist – hierauf solle man daher die ersten Laborversuche einer Neukonstruktion ausrichten [17]. 1976 legte er ein auf „Palmgren-Miner-Haibach“ [23] aufbauendes allgemeines Optimierungskonzept für die Dimensionierung von Zahnrädern nach Lastkollektiven vor [24, 25] (Modell der „gestaffelten Wöhlerlinien“). Zwischenzeitlich konnte in FVA-Projekten (unter Prof. B. R. Höhn, TU München) gezielt bestätigt werden, dass die lineare Schadensakkumulationsrechnung für einsetzgehärtete Einzelzahnäder brauchbar ist: für die Grübchenfestigkeit in [26], für die Zahnfußfestigkeit in [27]. Weitere Arbeiten unter B.R. Höhn zeigten, dass die Lastreihenfolge bei der Grübchen-Betriebsfestigkeit nicht negativ wirkt [28]. Am Lehrstuhl des Autors erarbeitete B. Vahlensieck erste Lastkollektive für stufenlose Traktorfahrantriebe, insbesondere mit Leistungsregelung

[28]. Damit wurde die Berechnung und Erprobung neuer stufenloser Automatikgetriebe für Traktoren unterstützt. Ferner wird in [28] ein neues Dimensionierungsmodell für die (leistungsbestimmenden) Laschen von Zugkettenwandlern [27] (siehe auch Audi „multitronic“) über abgeleitete Rainflow-Laschenkraftkollektive vorgelegt. H. Mariutti ermittelte am gleichen Lehrstuhl Belastungskollektive an einem Traktor mit Bandlaufwerk (unter anderem mit Rainflow-Zählung) [30].

### Zusammenfassung

Methoden der Betriebsfestigkeit gelten im Maschinenbau als wirtschaftlich und zukunftsfruchtig. Der Beitrag skizziert diesbezügliche Fortschritte für die Auslegung von Traktorgetrieben in den letzten Jahrzehnten. Bedeutende Impulse kamen hierzu aus Braunschweig – anfangs eher von Wissenschaftlern der FAL, später mehr aus der „Schule Matthies“. Diese Arbeiten trugen nicht nur zur verbesserten Berechnung und Erprobung von Traktorgetrieben bei, sondern befruchteten auch andere Bereiche der Antriebstechnik.

### Literatur

Bücher sind mit • gekennzeichnet

- [1] Palmgren, A.: Die Lebensdauer von Kugellagern. Z. VDI 68 (1924), H. 14, S. 339-341
- [2] Kloth, W. und Th. Stroppe: Der Energiefluß im Zapfwellenbinder, Teil 1 bis 3. TidL 13 (1932), H. 2, S. 49-50; H. 3, S. 66-69 und H. 4, S. 88-91
- [3] Kloth, W. und Th. Stroppe: Kräfte, Beanspruchungen und Sicherheiten in den Landmaschinen. Z. VDI 80 (1936), H. 4, S. 85-92
- [4] Jacobi, L.: Gear Loading Practice in Tractor Design. Vortrag ASAE Meeting Dec. 1931 Chicago. Abdruck in Agric. Engng. 13 (1932), H. 3, S. 59-60
- [5] Gerlach, A.: Über die Kräfte in Zahnradgetrieben von Schleppern. Grundl. Landtechnik 6 (1956), H. 7, S. 107-110
- [6] • Gerlach, A.: Messung der Triebwerksbelastung eines Ackerschleppers. Diss. TH Braunschweig 1966 (Koeßler, Emschermann, Meyer)
- [7] Straub, H.: Dremomentmessungen an Lastwagen und Ackerschleppern. ATZ 58 (1956), H. 5, S. 139-144
- [8] • Coenenberg, H. H.: Zum Verhalten der Kupplung im Schleppertriebwerk. Diss. TH Braunschweig 1962 (Matthies, Meyer)
- [9] Kahrs, M.: Die Auslegung von Landmaschinenbauteilen nach Lastkollektiven. Landtech. Forsch. 13 (1963), H. 6, S. 171-179
- [10] Regenbogen, H.: Festigkeitsgerechte Auslegung von Ackerschleppertriebwerken. antriebstechnik 17 (1978), H. 1 + 2, S. 54-56
- [11] Kühlborn, H.: Beanspruchung der Antriebswellen leistungsstarker Ackerschlepper. Landtechnik 28 (1973), H. 2, S. 45-48
- [12] Lüpfer, U.: Ermittlung und Anwendung von Lastkollektiven im Traktorenbau. Grundl. Landtechnik 23 (1973), H. 1, S. 7-10
- [13] Renius, K. Th.: Last- und Fahrgeschwindigkeitskollektive als Dimensionierungsgrundlagen für die Fahrgetriebe von Ackerschleppern. Fortschritt-Ber. VDI-Z Reihe 1, Nr. 49; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1976
- [14] Graham, J. A., D. K. Berns and D. R. Olberts: Cumulative Damage Used to Analyze Tractor Final Drives. ASAE paper 61-642 (1961) und Transactions ASAE 5 (1962), H. 2, S. 139-146
- [15] Seifried, A., G. Buck und W. Maier: Statistische Fahrmechanik als Grundlage zur Berechnung von Fahrzeugantrieben. ATZ 75 (1973), H. 5, S. 163-169
- [16] Buck, G.: Eine Berechnungsmethode für die Lebensdauerorientierte Dimensionierung von Schleppertriebwerken und Achsen. Grundl. Landtechnik 33 (1983), H. 5, S. 138-148
- [17] Renius, K. Th.: Betriebsfestigkeitsberechnung und Laborerprobung von Zahnrädern in Ackerschleppergetrieben. In: VDI-Berichte 332, S. 225-234; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1979
- [18] • Biller, R. H.: Ermittlung repräsentativer Lastkollektive für Antriebselemente eines auf einem Modellbetrieb eingesetzten 70-kW-Schleppers. Diss. TU Braunschweig 1982 (Matthies, Ritter). Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 23; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1983
- [19] • Meiners, H.-H.: Der Einfluß der hydrodynamischen Kupplung auf die Belastungen in einem Ackerschlepper. Diss. TU Braunschweig 1982 (Matthies, Ritter). Fortschritt-Ber. VDI-Z. Reihe 14, Nr. 24; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1983
- [20] Meiners, H.-H.: Die Beanspruchung einzelner Schlepperaggregate bei unterschiedlichen landwirtschaftlichen Arbeiten. Landtechnik 39 (1984), H. 10, S. 438-441
- [21] Biller, R. H.: Zur Belastung der Schlepperzapfwelle bei unterschiedlichen Arbeitseinsätzen. Landtechnik 38 (1983), H. 11, S. 470-473
- [22] Renius, K. Th.: Elemente einer modernen Festigkeitsberechnung und -erprobung von Traktorgetrieben. Vortrag 20.11.1975 TU München und 7.1.1976 TU Braunschweig
- [23] • Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- [24] Renius, K. Th.: European Tractor Transmission Design Concepts. ASAE paper 76-1526 (1976)
- [25] Renius, K. Th.: Betriebsfestigkeitsberechnungen von Maschinenelementen in Ackerschleppern mit Hilfe von Lastkollektiven. Konstruktion 29 (1977), H. 3, S. 85-93
- [26] • Schaller, K. V.: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsetzgehärteten Stirnradflanken. Dissertation TU München 1990 (Höhn, Renius)
- [27] Suchandt, Th.: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsetzgehärteter Zahnräder und zur Betriebsfestigkeit vergüteter Laschenketten. Dissertation TU München 1994 (Höhn, Renius)
- [28] • Eberspächer, C.: Reihenfolgeeffekte bei der Grübchen-Betriebsfestigkeit einsetzgehärteter Zahnräder. Diss. TU München 1995 (Höhn, Renius)
- [29] • Vahlensieck, B.: Messung und Anwendung von Lastkollektiven für einen stufenlosen Kettenwandler-Traktorfahrantrieb. Dissertation TU München 1998 (Renius, Höhn); Fortsch.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 385; VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999
- [30] Mariutti, H.: Driveline Torque Loads of a Challenger Rubber Belt Tractor. AgEng 2000, Warwick, 2.-7.7.2000, Proceed. II, S. 160-161.