

Aufgrund des Umfangs der Software können nicht alle Möglichkeiten aufgeführt werden.

5. Zusammenfassung

Entsprechend dem heutigen Entwicklungsstand von Wissenschaft und Technik reichen die bisher üblichen Werkstoffkennwerte als Grundlage für die Dimensionierung und Prüfung nicht mehr aus. In Abhängigkeit vom Werkstoff sollten vorrangig die Kenngrößen ermittelt werden, die den Einsatzbedingungen entsprechen, da eine Bestimmung aller möglichen Kennwerte volkswirtschaftlich nicht effektiv erscheint. Im Vordergrund stehen dabei das statische Kurzzeit- und Langzeitverhalten sowie das Verschleißverhalten und die Widerstandsfähigkeit gegenüber konstanten, regellosen und dynamischen Beanspruchungen. Hierbei sind die statistischen Methoden [13] und die Kenngrößen der Belastungsfunktionen (Verteilung, Größtwert, Umfang, Erwartungswahrscheinlichkeit, Leistungsspektrum) einzubeziehen. Im Interesse einer optimalen Dimensionierung und Erhöhung der Zuverlässigkeit müssen noch umfangreiche Untersuchungen an Werkstoffen, Halbzeugen und Bauteilen durchgeführt werden.

Literatur

- [1] Betriebsfestigkeit. 3. Lehrbrief für das Fernstudium. TU Dresden, Sektion Grundlagen des Maschinenwesens, 1975.
- [2] Luber, H.: Einstufenversuche an Stahlproben aus C ST 3 sp 2. TU Dresden, Sektion 13/DB, Forschungsbericht 1977.
- [3] Haibach, E.: Modifizierte lineare Schadensakkumulationshypothese zur Berücksichtigung des Dauerfestigkeitsabfalls mit fortschreitender Schädigung. TM Nr. 50/70.
- [4] Serensen; Kogajew; Schneiderowitsch: Tragfähigkeit und Berechnung auf Festigkeit von Maschinenteilen. Moskau: „Maschinenbau“ 1975.
- [5] Pfeiffer, F.: Beitrag zur Klärung des Einflusses regelloser Beanspruchungsfolgen auf die Bauteilmüdung. TU Dresden, Dissertation 1975.
- [6] Bussa, S.L.: Fatigue life of a low carbon steel notched specimen under stochastic conditions. Technical Report 900, 21-1 MTS.
- [7] Jacoby, G.: Vergleich der Lebensdauer aus Betriebsfestigkeits-, Einzelflug- und digital programmierten Random-Versuchen sowie nach der linearen Schadensakkumulationshypothese. Lebensdaueranalyse bei unregelmäßig schwankender Beanspruchung (random load fatigue). Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 5 (1969) Nr. 7, S. 63—69.
- [8] Jacoby, G.: Comparison of fatigue life estimation

- processes for irregularly varying loads. Proceedings of the Third Conference on Dimensioning and Strength Calculations. Hungarian Academy of Sciences, Budapest 1968, S. 81—95.
- [9] Swanson, S.R.: Random load fatigue testing. A state of the art survey. Material Research and Standards (1968) H. 8, S. 10—44.
- [10] Laudert, H.; Jacoby, G.; Wowack, H.; Weber, H.-D.: Einige Möglichkeiten der Ermüdungsprüfung bei Random-Beanspruchung. Lebensdaueranalyse bei unregelmäßig schwankender Beanspruchung (random load fatigue). Fortschr.-Ber. VDI-Z., Reihe 5 (1969) Nr. 7 S. 29—62.
- [11] Jacoby, G.: Neuzeitliche Prüfverfahren und Prüfmaschinen. Sonderdruck aus Rhein Stahl Technik, 10 (1972) 1, S. 20—30.
- [12] Jacoby, G.: Beitrag zum Vergleich der Aussagefähigkeit von Programm- und Randomversuchen. Sonderdruck aus Zeitschrift für Flugwissenschaften 18 (1970) H. 7.
- [13] Prochnow, H.; Hanel, W.: Statistische Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen. Maschinenbautechnik 24 (1975) H. 6, S. 274—276.

A 1922

- 1) Überarbeitete Fassung eines Referats zur wissenschaftlich-technischen Tagung „Zuverlässigkeits- und instandhaltungsgerechte Konstruktion von Maschinen und Anlagen“ am 8. und 9. Dezember 1977 in Dresden

Untersuchung der Lebensdauer von Zahnradgetrieben auf Prüfständen¹⁾

Ing. R. Seibicke, KDT, Zentrale Prüfstelle für Landtechnik Potsdam-Bornim

Lebensdaueruntersuchungen auf Prüfständen sind ein wichtiges Mittel, um schnell zu sicheren Ergebnissen bezüglich der Haltbarkeit von Zahnradgetrieben zu kommen. Neben der anzustrebenden Prüfung der gesamten Maschine besteht für die wichtigen Baugruppen der Leistungsübertragung, wie Getriebe, Gelenkwellen und Kupplungen, ein spezielles Aufgabengebiet, um mit einer gewissen Grundanschaffung von technischen Hilfsmitteln den Nutzungsdauernachweis für diese Baugruppen führen zu können. Deshalb haben Prüfstandsuntersuchungen von Getrieben seit Jahren einen festen Platz in der Arbeit der Zentralen Prüfstelle für Landtechnik Potsdam-Bornim.

1. Prüfprogramm

Auf dem Prüfstand sind möglichst praxisnahe Belastungen nachzubilden. Landmaschinen und deren Baugruppen sind im praktischen Einsatz stochastischen Belastungsschwankungen unterworfen. Um diese Belastungen originalgetreu nachzubilden, ist der technische Aufwand sehr groß. Daher werden bei der Belastungsnachbildung Mehrstufenprogramme angewendet, die bei Getrieben größte Berechtigung finden, da deren Bauteile Zahnräder, Wellen und Lager funktionsbedingt einer Schwellbelastung mit hoher Frequenz unterworfen sind. Die Prüfstandsuntersuchung ist in drei Etappen gegliedert:

- Vorbereitung
- Prüflauf
- Auswertung.

Die Vorbereitung hat den entscheidenden Anteil am Erfolg eines Prüflaufes. Während der Vorbereitung sind das Prüfprogramm, die Art des Prüfstands und damit die Art der Belastungsnachbildungen und die Überwachung und Erfassung aller wichtigen Kenngrößen festzulegen. Die genannten Punkte können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, da sie sich jeweils wechselseitig beeinflussen.

Die Prüfprogramme stellen im allgemeinen ein Mehrstufenprogramm mit 6 bis 8 Belastungsstufen dar. Von dem Belastungskollektiv, das der Nutzungsdauer entspricht, bleiben die unteren 20 bis 25 % im Mehrstufenprogramm unberücksichtigt. Bei den für Landmaschinen typischen wenig vollen Kollektiven mit relativ hohen Spitzenwerten bis in die Nähe der Streckgrenze kann ein Kompromiß in dieser Form vertreten werden. Damit kann eine wesentliche Zeitersparnis erreicht werden, da erfahrungsgemäß die niedrigen Belastungen häufiger auftreten und damit einen größeren Zeitanteil ausmachen.

Bei der Festlegung der Anzahl der Teilfolgen ist es wichtig, ob ein automatischer Programmablauf möglich oder Handverstellung notwendig ist. Bei der Handverstellung ist die Anzahl der Teilfolgen so zu wählen, daß sich die Einstellarbeiten der Arbeitszeit und dem Wochenrhythmus anpassen. Dabei kommt man auf 8 bis 14 Teilfolgen, wobei dann 1 oder 2 Teilfolgen je Woche aufgebracht werden. Die Belastungsstufen innerhalb der

Teilfolgen können dann in willkürlicher Reihenfolge aufgebracht werden.

Wird die Folge der steigenden und fallenden Belastung eingehalten, so werden die niedrigste und die höchste Laststufe jeweils zweimal hintereinander aufgebracht. Bei der niedrigsten Laststufe hat das den Vorteil, daß der in dieser Stufe bereits hohe Zeitanteil verdoppelt und damit das Wochenende genutzt werden kann. Bei den hohen Laststufen ist dieses Zusammenreffen oft problematisch — Erwärmung und Schmierung können kritische Zustände erreichen — und sollte daher durch Vertauschen von Laststufen möglichst vermieden werden. Diese Überlegungen sollen an einem Beispiel erläutert werden:

Bei Getrieben, die 2000 h zu prüfen waren, betrug der Zeitanteil der höchsten Belastungsstufe 0,4 %, der der niedrigsten Belastungsstufe 36 %. Bei 14 Teilfolgen sind das 137 h/Woche und somit rd. 52 h in der niedrigsten Stufe.

Diese Zeit wurde genutzt, um den Prüfstand von Freitag, 15.00 Uhr, bis Sonntag, 19.00 Uhr, ohne Aufsicht auszulasten. Die höchste Belastungsstufe mit einer Dauer von 34 min wurde von diesen Getrieben, begünstigt durch eine relativ große Ölfüllung, gut vertragen. Durch Verlegen einiger Belastungsstufen konnte erreicht werden, daß alle Einstellarbeiten in der normalen Arbeitszeit durchgeführt werden konnten. Die erreichte Dauer eines Prüflaufs von 137 h/Woche entsprechend einer Auslastung von mindestens 82 % bei einem Stufenprogramm und Handeinstellung stellt

dabei einen hohen Wert dar, da die Nachtstunden nicht voll genutzt werden können und neben den Einstellzeiten auch noch die anfallenden Wartungs- und Pflegezeiten zu berücksichtigen sind.

2. Prinzip des Prüfstands

Der Betrieb von Prüfständen für formschlüssige Getriebe und andere Drehmomentübertragende Bauteile wird fast ausschließlich nach dem Energiekreislaufverfahren vorgenommen. Dabei spielen der geringere gerätetechnische Aufwand und die Energie- und damit Kosteneinsparung eine wesentliche Rolle. Die Antriebsleistung beträgt rd. 15% der Leistung, die im Verspannkreis realisiert wird. Bei einer Dauer des Prüflaufs von 2000 h und einer Antriebsleistung von 7 kW statt 45 kW bedeutet dies eine Einsparung von 76 000 kWh. Bei dem Energiekreislaufverfahren werden stets zwei Getriebe (Prüfgetriebe, Gegengetriebe) für die Verspannung benötigt. Das Gegengetriebe wird entgegen der normalen Belastungsrichtung verspannt, wodurch Aussagen aus dem Verhalten dieses Getriebes nur unter Berücksichtigung des Getriebeaufbaus auswertbar sind. Weiterhin sind im Verspannkreis die Verspanneinrichtung und bei Bedarf Umkehrgetriebe mit oder ohne Schwellgeber eingeordnet. Verteilergetriebe mit zwei Ausgängen auf einer Seite können direkt über eine Verspanneinrichtung zu einem Verspannkreis verbunden werden (Bild 1).

Das Gegengetriebe muß bei der Variante 1 kopfstehend angeordnet werden. Bei Verteiler- und Umkehrgetrieben ist dies oft möglich, wenn die Schmierung und Öldichtheit dies zuläßt.

Bei einem Verteilergetriebe mit sechs Ausgängen war das die einzige Möglichkeit, um mit vertretbarem Aufwand eine Prüfung durchzuführen zu können. Hierbei wurden alle Ausgänge gegeneinander verspannt. Das Einstellen der Momente, das statisch erfolgte, stellte dabei ein besonderes Problem dar, da das Verspannen eines Ausganges die anderen Ausgänge jeweils mit beeinflusst.

„Statisch einstellen“ heißt in diesem Fall, den Meßwert ohne Schleifringübertrager, d. h. bei Stillstand des Prüfstands, direkt über Kabel abzunehmen und den Prüfstand beim Einstellen von Hand zu bewegen, um Reibung und eventuelle Klemmstellen zu berücksichtigen. Dynamische Kontrollmessungen haben wiederholt gezeigt, daß die statische Handeinstellung ihre Berechtigung hat. Werden im Verspannkreis allerdings Schwellgeber eingesetzt, so sind dynamische Messungen unumgänglich.

Verspannt wird mit einer Einrichtung, die im wesentlichen aus zwei Scheiben mit gemeinsamer Drehachse besteht und deren Relativbewegung über 2 bis 4 am Umfang angebrachte Spindeln und Druckfedern erfolgt. Die Druckfedern sind dafür vorgesehen, einen infolge von Verschleiß eintretenden Verspannmomentverlust zu kompensieren und die durch die nacheinander erfolgende Betätigung der einzelnen Spindeln auftretenden unterschiedlichen Kräfte auszugleichen.

Das Einstellen der Momente mit diesen Verspannscheiben ist verhältnismäßig zeitaufwendig. Beim Betrieb der Prüfstände mit mehreren Gelenkwellen als Übertragungsglieder wurde festgestellt, daß die Elastizität der Gelenkwellen ausreicht, um den durch Verschleiß eintretenden Spannungsverlust ausreichend auszugleichen. Aus dieser Erkenntnis heraus wurde eine neue Verspanneinrichtung ohne Federn entwickelt, die auch aus zwei

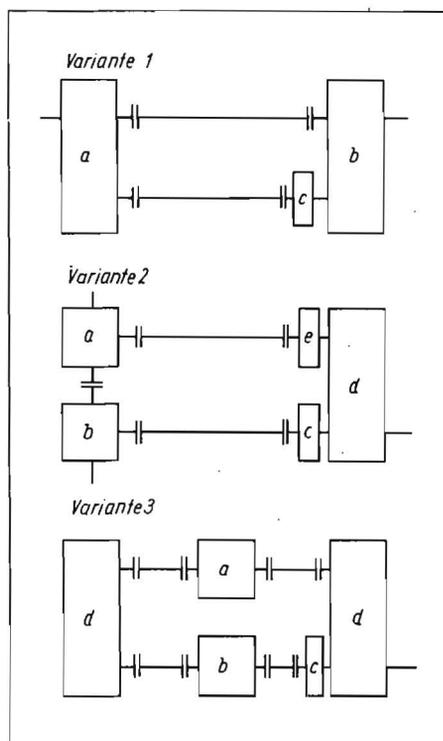


Bild 1. Möglichkeiten der Anordnung von Prüfgetrieben in einem Verspannkreis

Scheiben besteht und nur durch eine Spindel verstellt wird.

Die Verspanneinrichtung wird folgendermaßen verstellt:

Die Spindel ist an der Scheibe 1 gelagert; über die Spindelmutter und eine Koppel wird die Kraft auf die Scheibe 2 übertragen. Diese Verspanneinrichtung wurde für ein Drehmoment bis zu 500 Nm eingesetzt. Damit läßt sich ein Verdrehwinkel von 60° ohne Nachsetzen erreichen. Für größere Verdrehwinkel ist ein Nachsetzen mit einfachen Hilfsmitteln möglich. Mit diesen Verspannscheiben kann das Einstellen wesentlich erleichtert und beschleunigt werden.

Neben diesen Verspanneinrichtungen, die aufgrund ihres geringen technischen Aufwands bevorzugt eingesetzt werden, besteht noch die Möglichkeit, Verspanngetriebe in Form von vierradrigen Umlaufgetrieben einzusetzen. Mit diesen Getrieben läßt sich das Verspannmoment auch während des Betriebs verstellen. Durch das vom Wert 1 abweichende Übersetzungsverhältnis (1:2,9) bedingt, müssen aber zwei dieser Getriebe im Verspannkreis installiert werden.

Als Schwellgeber wird ein Eigenbaumodell nach dem Prinzip eines doppelten Kreuzgelenks verwendet. Durch mehr oder weniger starke Abwinkelung läßt sich das Schwellmoment einstellen. Die Schwellfrequenz ist nicht unabhängig einstellbar, sie beträgt das Doppelte der Drehzahl.

3. Prüfstandbetrieb

Die Prüfstände werden durchgängig und ohne ständige Aufsicht betrieben. Die Geräte zur Überwachung und zur Programmablaufsteuerung bzw. -regelung haben daher besondere Bedeutung. Die Überwachung der Prüfstände erfolgt durch entsprechende Motorschutzschalter, durch Temperaturfühler an allen kritischen Stellen, durch Endschalter und gegebenenfalls durch Laufuhrewächter.

Die Temperaturfühler wirken zusammen mit einem 12kanaligen Motorkompensator und einem eingebauten Grenzwertschalter. Die von dem Motorkompensator aufgezeichneten Temperaturen lassen anschauliche Rückschlüsse auf den Prüfstandbetrieb zu.

Der Laufuhrewächter ist ein aus der Turbinenüberwachung her bekanntes Gerät. Bei der Getriebeprüfung ist es problematisch, einen bezüglich der Schwingungsbelastung geeigneten Anbringer für die Geber zu finden.

Bei der Programmablaufsteuerung muß zwischen den Prüfständen mit Handverstellung und Prüfständen mit automatischem Programmablauf unterschieden werden. Bei den Prüfständen mit Handverstellung reicht es aus, wenn die einzelnen Programmstufen durch einen Zeitbaustein mit eingebautem Vorwahlzählwerk abgeschaltet werden. Beim automatischen Programmablauf werden im Eigenbau gefertigte Programmzeitgeber und Sollwertgeber eingesetzt. Durch Rückführung des Meßsignals erfolgt eine Einregelung des Sollwerts. Durch eingebaute Grenzwertschalter wird der Prüfstand außerdem bei Über- oder Unterschreiten der vorgegebenen Werte abgeschaltet.

Neben den beschriebenen Überwachungseinrichtungen ist außerdem noch die manuelle Kontrolle notwendig.

Außer den obligatorischen Sichtprüfungen geben die Temperaturaufzeichnungen von allen kritischen Stellen gewisse Anhaltspunkte über starken Verschleiß bzw. Schmierungsprobleme. Eine Temperatursteigerung tritt aber oft erst kurz vor dem endgültigen Ausfall des Bauteils ein.

Verschleißerscheinungen durch die veränderte Geräuschkulisse festzustellen, ist nur mit geübtem Ohr und bei täglichem Umgang mit dem Prüfstand in begrenztem Maß möglich. Über die absoluten Geräuschpegel ist der Verschleißzustand praktisch nicht feststellbar. Folgende charakteristische Schäden wurden an den geprüften Getrieben festgestellt:

- Zahnbrüche am Zahnfuß
- Ursache hierfür waren feinste Härterisse; durch Änderung der Härte-technologie konnte die Schwachstelle beseitigt werden.
- Lagerschäden infolge mangelnder Schmierung
- Durch verbesserte Ölzuführung (Ölleitungen) bzw. durch zusätzliche Abdichtung und Fettfüllung wurde das Problem gelöst.
- Fluchtungsfehler der Zahnräder auf fliegend gelagerten Wellen
- Hier mußten die Lagerung geändert bzw. die Gehäusesteifigkeit verbessert werden.
- Sichtbarer Verschleiß an den Zahnflanken trat nur in wenigen Fällen auf.
- Zusammenfassend ist einzuschätzen, daß Getriebe als hochwertige Baugruppen die Zuverlässigkeit der Gesamtmaschine wesentlich beeinflussen. Daher muß die Getriebeprüfung ständig weiterentwickelt werden. Besondere Schwerpunkte sind dabei die weitere Automatisierung des Prüfstandbetriebs und die Verbesserung der Methoden der Verschleiß- und Schadensfeststellung.

A 1901

1) Überarbeitete Fassung eines Referats zur Fachtagung „Getriebetechnik“ im Oktober 1977 in Rostock-Warnemünde