

INFORMATION

Hamburg, Dezember 2006

16/2006

Kurztestverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Grübchenbildung bei Zahnrädern

Forschungsstelle:

Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der TU München (FZG)

Leitung: Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. M. Hergesell

Forschungsgruppenleiter: Dr.-Ing. T. Tobie

DGMK Projektbegleitung:

DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtest

Obmann: Dipl.-Ing. E. Laukotka

Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH, Hamburg

Zusammenfassung:

Zur Erfassung des Schmierstoffeinflusses auf die Grübchentragsfähigkeit von Zahnrädern besteht die Pittingtestmethode nach FVA 2/IV bzw. deren Weiterentwicklung zum Praxisnahen Pittingtest nach FVA 371. Diese Teste liefern eine umfassende Aussage, sind jedoch relativ zeit- und kostenintensiv. Ein effizientes Kurz-Testverfahren als Screeningtest zur Differenzierung von Schmierstoffen unterschiedlicher Grübchentragsfähigkeit fehlte bisher.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde der DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtest entwickelt und anhand von Schmierstoffen, deren Grübchentragsfähigkeit aus bestehenden Pittingtesten bekannt ist, getestet.

Mit dem DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtest werden Schmierstoffe hinsichtlich ihrer Grübchentragsfähigkeit in die Tragsfähigkeitsklassen niedrig, mittel und hoch eingeordnet. Die Prüfdauer beträgt dabei ca. 2 Wochen. Die ermittelten Tragsfähigkeitsklassen korrelieren gut mit Ergebnissen der Pittingteste FVA 2/IV und FVA 371, wobei allerdings ein möglicher Einfluss der Graufleckigkeit auf die Grübchenlebensdauer im Test FVA 2/IV zu berücksichtigen ist.

Der DGMK-Kurzzeit-Pittingtest stellt ein geeignetes Kurz-Testverfahren dar, das unterschiedliche Schmierstoffe mit guter Wiederholbarkeit bei verkürzter Prüfdauer hinsichtlich ihrer Grübchentragsfähigkeit differenziert. Dieses Testverfahren ist in erster Linie als Ergänzung zu den bestehenden FVA-Pittingtestmethoden zu sehen.

Dieses Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) gefördert (14036 N).

1 Einleitung

Die Grübchenbildung an Zahnflanken ist auf die Ermüdung des Grundwerkstoffes mit zunehmender Laufzeit zurückzuführen. Ein typischer Grübchenschaden ist in **Bild 1** zu sehen.



Bild 1: Grübchenschaden beim Kurzzeit-Pittingtest mit FVA2+4%A99

Da die Einflüsse von Additivchemie und Grundöl auf Grund ihrer hohen Komplexität bis heute nur bedingt der Berechnung der Grübchentragfähigkeit von Zahnrädern zugänglich sind, ist die praktische Prüfung von Schmierstoffen in einem festgelegten Testverfahren unverzichtbar. Der Schmierstofftest liefert wichtige Ergebnisse zur Entwicklung neuer Schmierstoffe und Schmierstoffadditiverungen. Bei der Schmierstoffauswahl seitens des Getriebeherstellers oder des Betreibers beschreibt er die Eignung eines Schmierstoffes im Bezug auf seine Grübchentragfähigkeit.

2 Zweck des Kurzzeit-Pittingtestes

Der DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtest (abgekürzt KPTX) /4/ stellt eine Ergänzung zu den bestehenden Pittingtesten nach FVA 2/IV /2/ bzw. FVA 371 /3/ dar, die weiterhin u.a. als Freigabetest maßgebend sind. Der KPTX kann auf jedem FZG-Verspannungsprüfstand mit Achsabstand $a = 91,5$ mm mit Tauchschmierung durchgeführt werden. Mit Hilfe des Kurzzeit-Pittingtestes kann der Einfluss von Schmierstoffen auf die Grübchentragfähigkeit ermittelt werden. Durch die im Vergleich zu den

bestehenden FVA-Standard-Pittingtesten wesentlich verkürzte Laufzeit ist der DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtest eine geeignete Methode zur Entwicklung verbesserter Schmierstoffe und Additivierungen sowie zur zügigen Beurteilung von Gebrauchtschmierstoffen z.B. in Reklamationsfällen. Der KPTX differenziert Öle hinsichtlich ihrer Grübchentragfähigkeit und ordnet ihnen die Pittingtragfähigkeitsklassen niedrig, mittel und hoch zu.

3 Anwendungsbereich des Kurzzeit-Pittingtestes

Die bestehenden, relativ zeit- und kostenaufwendigen Pittingtestmethoden nach FVA 2/IV /2/ bzw. FVA 371 /3/ liefern eine umfassende Aussage zur Grübchentragfähigkeit von Schmierstoffen, wobei die Testergebnisse auch in der Tragfähigkeitsrechnung nach DIN 3990 /1/ berücksichtigt werden können. Diese Testmethoden werden deshalb weiter als Freigabetest für Schmierstoffe notwendig sein. Allerdings ist der mit diesen Testen verbundene Zeit- und Kostenaufwand nicht immer vertretbar oder akzeptabel. So ist die Durchführung des Kurzzeit-Pittingtest besonders beim Vergleich von Schmierstoffen gleicher Anwendung, im Rahmen der Schmierstoffentwicklung oder bei Reklamationsfällen empfehlenswert.

4 Beschreibung des Testverfahrens

Der Kurzzeit-Pittingtest ist ein Zweistufentest in den Momentenstufen MS 9 und MS 10. Als Ergebnis erfolgt die Einordnung des Prüfschmierstoffes in die Pittingtragfähigkeitsklasse niedrig, mittel oder hoch.

4.1 Prüfbedingungen

Die Prüfbedingungen für den DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtest sind in **Tafel 1** zusammengefasst. Die Ölumpftemperatur wird beim Prüflauf durch einen Thermostaten auf dem Sollwert gehalten. Die Drehmomente und Hertzschen Pressungen der zu fahrenden Momentenstufen können **Tafel 2** entnommen werden.

| EINLAUF | |
|---------------------|--|
| Dauer | $2,6 \cdot 10^5 \text{ LW}_{\text{Ri}} \approx 2 \text{ h}$ |
| Drehmoment | 94,1 Nm am Ritzel (Momentenstufe 5) |
| Drehzahl | $n_1 = 2250 \text{ min}^{-1}$, Ritzel treibt |
| Öltemperatur | $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ °C}$ Starttemperatur |
| PRÜFLAUF | |
| Drehmoment | Laststufe 1 $T_1 = 302,0 \text{ Nm}$ (Momentenstufe 9) |
| | Laststufe 2 $T_1 = 372,6 \text{ Nm}$ (Momentenstufe 10) |
| Drehzahl | $n_1 = 2250 \text{ min}^{-1}$, Ritzel treibt |
| Öltemperatur | $\vartheta_{\text{Öl}} = 90 \pm 3 \text{ °C}$ |
| Schmierung/ Ölstand | Tauchschmierung; Ölstand bis Wellenmitte |
| Dauer | Bis Ausfallkriterium erreicht wird (s. u.), max. $12,7 \cdot 10^6 \text{ LW}_{\text{Ri}}$ $\approx 98 \text{ h}$ je Laststufe |
| Ausfallkriterium | Grübchenfläche des am meisten geschädigten Zahnes größer als 4 % der Flankenfläche (ca. 5 mm^2) |
| Kontrollintervall | jeweils nach $1,8 \cdot 10^6 \text{ LW}_{\text{Ri}}$ $\approx 14 \text{ h}$ |

Tafel 1: Prüfbedingungen im DGMK-FZG
Kurzzeit-Pittingtest

| Momenten- stufe | Ritzel- drehmoment T_1 [Nm] | max. örtliche Flankenpressung [N/mm ²] |
|--------------------|-------------------------------------|--|
| 5 (Einlauf) | 94,1 | 1433 |
| 9 | 302,0 | 2069 |
| 10 | 372,6 | 2243 |

Tafel 2: Prüflasten im Kurzzeit-Pittingtest

4.2 Durchführung des Tests

Vor dem Start des Einlaufs ist sicherzustellen, dass die Ölsumpftemperatur mindestens 60 °C beträgt. Anschließend wird die Temperatur, entsprechend den definierten Testbedingungen, auf $90 \pm 3 \text{ °C}$ geregelt. Vor Beginn des Prüflaufs ist eine Öltemperatur von 90 °C zu gewährleisten.

Der Kurzzeit-Pittingtest beginnt mit einem Einlauf von 2 h in MS 5. Anschließend fängt der eigentliche Stufentest an. Zunächst werden die Testräder in MS 9 geprüft. Die maximale Prüfdauer beträgt dabei 12,7 Mio. Lastwechsel am Ritzel. Fällt die Prüfverzahnung während dieser Zeit durch einen Grübchenschaden aus, ist ein Wiederholungslauf auf der Rückflanke durchzuführen. Erreicht die Testverzahnung die maximale Prüfdauer schadensfrei, wird die Prüflast auf MS 10 erhöht und der Prüflauf auf der selben Flankenseite fortgeführt. Der Versuch ist beendet, sobald ein Grübchenschaden auftritt bzw. wenn die maximale Prüfdauer von 12,7 Mio. Lastwechsel am Ritzel erreicht ist.

Nach Testende sowie ggf. vor Erhöhung der Prüflast sind die Zahnräder auszubauen und der Flankenzustand ist zu dokumentieren.

4.3 Testräder

Als Prüfverzahnung wird die gleiche Prüfverzahnung wie beim Praxisnahen Pittingtest nach FVA 371 /3/ verwendet. Hierbei handelt es sich um die bezüglich Gleitgeschwindigkeit ausgeglichene Verzahnung „FZG-C“, Ausführung „C-PTX“, welche korrigiert und gleitgeschliffen ist. Die Geometriedaten der Verzahnung sind **Tafel 3** zu entnehmen.

| Größe | | Formelzeichen | Zahlenwert | Einheit |
|--------------------------------|--------|---|------------|---------|
| Achsabstand | | a | 91,5 | mm |
| Zahnbreite | | b | 14,0 | mm |
| Wälzkreis- durchmesser | Ritzel | d_{w1} | 73,2 | mm |
| | Rad | d_{w2} | 109,8 | mm |
| Kopfkreis- durchmesser | Ritzel | d_{a1} | 82,46 | mm |
| | Rad | d_{a2} | 118,36 | mm |
| Normalmodul | | m_n | 4,5 | mm |
| Zähnezahl | Ritzel | z_1 | 16 | - |
| | Rad | z_2 | 24 | - |
| Profilverschie- bungsfaktor | Ritzel | x_1 | 0,1817 | - |
| | Rad | x_2 | 0,1715 | - |
| Eingriffswinkel | | α | 20 | ° |
| | | α_{wt} | 22,44 | ° |
| Schrägungswinkel | | β | 0 | ° |
| Teilkreis- durchmesser | Ritzel | d_1 | 72,0 | mm |
| | Rad | d_2 | 108,0 | mm |
| Grundkreis- durchmesser | Ritzel | d_{b1} | 67,66 | mm |
| | Rad | d_{b2} | 101,49 | mm |
| Profilüber- deckung | | ε_α | 1,46 | - |
| Zahnkorrektur | | Ritzel unkorrigiert; lange, evolventische Kopf- und Fußrücknahme von $50 \pm 4 \mu\text{m}$, sowie $30 \pm 3 \mu\text{m}$ Breitenballigkeit am Rad | | |

Tafel 3: Geometriedaten der Testverzahnung C-PTX

Die Daten zu Werkstoff, Wärmebehandlung und Verzahnungsqualität der Testräder sind in **Tafel 4** zusammengestellt.

| | |
|----------------------------------|--|
| Werkstoff | 16MnCr5 nach DIN EN 10084 |
| Wärme- behandlung | einsatzgehärtet |
| Kernfestigkeit | 1000 – 1300 N/mm ² |
| Randhärte | 59 – 63 HRC |
| Einsatzhärte- tiefe | 0,8 – 1,0 mm |
| bei Grenzhärte | 550 HV 1 |
| Restaustenit- gehalt | < 30 % |
| Qualität | 5 nach DIN 3962, Teil 1 |
| Rauheit R_a der Zahnflanken | $0,1 \pm 0,05 \mu\text{m}$ in Evolventen- richtung nach DIN 3969, Teil 1 |
| Schleifver- fahren | Formschleifverfahren mit abrichtbaren Korundscheiben (Samputensili) |
| Feinstbearbei- tung | Gleitschleifen nach SMS-Vibra- tions-Feinschleifverfahren der Fa. Schnarrenberger GmbH |

Tafel 4: Ausführung der Prüfräder C-PTX

4.4 Prüfmachine

Der Kurzzeit-Pittingtest wird auf einem FZG-Verspannungsprüfstand (mit mechanischer oder hydrostatischer Belastungseinheit) mit Tauchschmierung durchgeführt.

4.5 Einbau der Prüfräder

Analog zu den bestehenden Pittingtesten nach FVA 2/IV /2/ bzw. FVA 371 /3/ wird das Großrad (24 Zähne) auf der Motorwelle montiert. Das Prüfritzel (16 Zähne) ist das treibende Rad.

4.6 Schadenskriterium und Einordnung in die Pittingtragfähigkeitsklassen

Der Prüflauf gilt als beendet, wenn eine Grübchenfläche von 4 % an einem Zahn (ca. 5 mm²) überschritten wird. Abhängig vom in **Tafel 5** dargestellten Zeitpunkt des Schadenseintritts können die Schmierstoffe in die Pittingtragfähigkeitsklassen niedrig, mittel und hoch eingeordnet werden. Liegt nach Testende ein Grübchenschaden mit einer Größe unterhalb des Ausfallkriteriums vor, so ist der Versuch ggf. trotzdem als Ausfall zu werten.

| Pittingtragfähigkeitsklasse des Kurzzeit-Pittingtestes | Zeitpunkt des Schadenseintritts |
|--|---|
| Pittingtragfähigkeitsklasse niedrig | Ausfall durch Grübchenbildung während Prüfung in Laststufe 1 (innerhalb von 12,7 Mio. LW _{Ri} in MS 9) |
| Pittingtragfähigkeitsklasse mittel | kein Grübchenschaden in Laststufe 1, Ausfall durch Grübchenschaden während der Prüfung in Laststufe 2 (innerhalb von 12,7 Mio. LW _{Ri} in MS 10) |
| Pittingtragfähigkeitsklasse hoch | kein Grübchenschaden während des Prüflaufs |

Tafel 5: Einordnung in die Pittingtragfähigkeitsklassen

5 Dokumentation der Ergebnisse

Als Versuchsergebnisse sind die erreichten Lastwechsel am Ritzel sowie die erzielte Tragfähigkeitsklasse zu protokollieren. Bei Graufleckenbildung ist die Graufleckenfläche in % der Gesamtfläche zu vermerken. Nach dem Prüflauf ist das Schadensbild wie folgt zu dokumentieren:

- Fotos der geschädigten Zahnflanke sowie jeweils einer ungeschädigten Zahnflanke des Ritzels und des Großrades.

Zusätzlich wird empfohlen den Flankenzustand durch Messung an jeweils drei ungeschädigten Zahnflanken des Ritzels und des Großrades in Profil- und Breitenrichtung zu belegen.

6 Ergebnis des Referenzschmierstoffs Shell Spirax MA 80W

Die Versuche mit dem Referenzschmierstoff Shell Spirax MA 80W wurden durch typische muschelförmige Grübchen in MS 10 nach einer mittleren Laufzeit von 3 Mio. LW_{Ri} beendet. Somit erreichte dieser Schmierstoff die Pittingtragfähigkeitsklasse mittel. Es konnte keine Graufleckengeschädigung festgestellt werden.

7 Übertragbarkeit der Ergebnisse des Kurzzeit-Pittingtestes

Der DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtest ordnet Schmierstoffe in die Pittingtragfähigkeitsklassen niedrig, mittel und hoch ein. Die bestehenden FVA-Pittingteste weisen Schmierstoffen eine Grübchenlebensdauer für 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit zu. Vorliegende Versuchsergebnisse zeigten eine gute Korrelation der Pittingtragfähigkeitsklassen des DGMK-FZG Kurzzeit-Pittingtestes mit Ergebnissen der bestehenden FVA-Pittingteste. Beim KPTX kommt es ähnlich wie bei Praxisnahen Pittingtest nach FVA 371 /3/ durch Verwendung der gleitgeschliffen C-PTX-Verzahnung zu keiner Graufleckenbildung auf der Flanke. Auf Grund der im Test FVA 2/IV /2/ verwendeten C-PT-Verzahnung (R_a = 0,2 ... 0,4 µm) ist für einen Vergleich der Ergebnisse auch ein möglicher Einfluss der Graufleckigkeit auf die Grübchenlebensdauer zu berücksichtigen.

8 Literatur

- /1/ DIN 3990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern. Dezember 1987.
- /2/ FVA-Informationsblatt zum Forschungsvorhaben 2/IV „Pittingtest“. 1997.
- /3/ FVA-Informationsblatt zum Forschungsvorhaben 371 „Praxisnaher Pittingtest“. 2006.
- /4/ Hergesell, M.: Entwicklung eines Kurzzeit-Pittingtestes zum Einfluss des Schmierstoffs auf die Grübchentrugfähigkeit von Stirnrädern. Abschlussbericht zum DGMK-Vorhaben 623, 2006.