

Hamburg, August 2002

16/02

## **Kurztestverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Graufleckenbildung bei Zahnrädern**

### **Forschungsstelle:**

Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau der TU München (FZG)

Leitung: Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. G. Steinberger

Forschungsgruppenleiter: Dr.-Ing. P. Oster

### **DGMK Projektbegleitung:**

DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest

Obmann: Dipl.-Ing. E. Laukotka

Deutsche Shell GmbH, Hamburg

### **Zusammenfassung:**

Die Standardprüfmethode zur Feststellung der Eigenschaften von Schmierstoffen hinsichtlich Graufleckenbildung ist der FVA-FZG-Graufleckentest. Dieser Test liefert eine sehr umfassende Aussage, ist jedoch mit hohem Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Ein effizientes Kurz-Testverfahren fehlte bisher. Somit sollte der bestehende FVA-FZG-Graufleckentest um eine einheitlich festgelegte Kurz-Testmethode ergänzt werden, die die Einordnung von Schmierstoffen in Tragfähigkeitklassen analog zum FVA-FZG-Graufleckentest ermöglicht.

Im Rahmen des DGMK Forschungsvorhabens 575 wurde der DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest anhand von Schmierstoffen, deren Graufleckentragfähigkeit im FVA-FZG-Graufleckentest bekannt ist, entwickelt und getestet.

Der DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest ordnet Schmierstoffe in Graufleckentragfähigkeitsklassen analog zum FVA-FZG-Graufleckentest ein. Diese Tragfähigkeitsklassen korrelieren gut mit den Klassen des FVA-FZG-Graufleckentests. Mit zunehmender Graufleckentragfähigkeit im FVA-FZG-Graufleckentest zeigen sich, wie zu erwarten, in der Grundtendenz abnehmende mittlere maximale Auskolkungen nach Kraftstufe 9 des DGMK-FZG Grauflecken-Kurztests. Es zeigt sich eine gute Korrelation zwischen den mittleren maximalen Auskolkungen nach Kraftstufe 9 des DGMK-FZG Grauflecken-Kurztests und den Schadenskraftstufen des FVA-FZG-Graufleckentests.

Somit stellt der DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest als Ergänzung zum FVA-FZG-Graufleckentest ein geeignetes, einheitlich festgelegtes Kurz-Testverfahren dar, das unterschiedliche Schmierstoffe hinsichtlich ihrer Graufleckentragfähigkeit differenziert.

## 1 Zweck des Kurz-Testes

Der DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest GFKT-C/8,3/90 (abgekürzt GFKT) stellt eine Ergänzung zum FVA-FZG-Graufleckentest dar, der weiterhin u. a. als Freigabetest maßgebend ist. Der GFKT kann auf jedem FZG-Verspannungsprüfstand mit Achsabstand  $a = 91,5 \text{ mm}$  mit Tauchschmierung durchgeführt werden. Mit Hilfe des Grauflecken-Kurztestes kann der Einfluss von Schmierstoffen (speziell Additiven), der Schmierstofftemperatur und anderen Einflussgrößen auf die Entstehung von Grauflecken, Schmierstoffe gleicher Anwendung vergleichend, ermittelt werden. Durch die im Vergleich zum FVA-FZG-Graufleckentest wesentlich verkürzte Laufzeit und die deutlich geringere Prüfölmenge von nur ca. 1,5 l durch die Verwendung von Tauchschmierung ist der GFKT ein geeignetes Tool zur Entwicklung verbesserter Schmierstoffe und Additivierungen sowie zur zügigen Beurteilung von Gebrauchschemierstoffen bestehender Anlagen. Der GFKT differenziert Öle hinsichtlich ihrer Graufleckentragfähigkeit und ordnet ihnen analog zum FVA-FZG-Graufleckentest die Graufleckentragfähigkeitsklassen GFKT-niedrig, GFKT-mittel und GFKT-hoch zu.

## 2 Anwendungsbereich und Bezeichnung des Grauflecken-Kurztests

Die Bezeichnung des GFKT erfolgt analog zum FVA-FZG-Graufleckentest durch Verzahnungstyp / Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis / und Schmierstofftemperatur, entsprechend den gewählten Prüfbedingungen (z. B. Standard-Grauflecken-Kurztest: GFKT-C/8,3/90; GFKT = Grauflecken-Kurztest). Zur vergleichenden Prüfung von Schmierstoffen für unterschiedliche Anwendungen können die Betriebsbedingungen (Umfangsgeschwindigkeit und Schmierstofftemperatur) im DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest angepasst werden. Die oben genannte Bezeichnung dient der Unterscheidung der verschiedenen Testvarianten, die nach dem gleichen Testablauf,

aber unter abweichenden Testbedingungen durchgeführt werden.

## 3 Beschreibung des Testverfahrens

Der Grauflecken-Kurztest ist ein Stufentest auf den Kraftstufen 3 (Einlauf), 7 und 9. Die Graufleckentragfähigkeit des tribologischen Systems Zahnrad – Schmierstoff bei gegebenen Betriebsbedingungen (Schmierstofftemperatur, Umfangsgeschwindigkeit) wird in Form einer Schadenskraftstufe festgestellt.

### 3.1 Prüfbedingungen

Die Standardprüfbedingungen für den DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest sind in **Tafel 1** zusammengefasst. Die Ölsumpftemperatur wird durch einen Thermostaten auf dem Sollwert gehalten. Die Drehmomente und Hertz'schen Pressungen der zu fahrenden Kraftstufen können **Tafel 2** entnommen werden.

Ritzeldrehzahl $n_1$ in $\text{min}^{-1}$	etwa 2250 <sup>1)</sup>
Umfangsgeschwindigkeit $v$ am Wälzkreis in m/s	$0,00383 \cdot n_1$
Treibendes Prüfrad	Ritzel
Schmierung	Tauchschmierung ca. 1,5 l im Prüfgetriebekasten
Ölsumpftemperatur	$90 \pm 2 \text{ °C}$ <sup>2)</sup>
Laufzeit im Einlauf (KS 3)	etwa 1 h = $1,3 \cdot 10^5$ Ritzel- umdrehungen
Laufzeit je Kraftstufe im Stufentest	etwa 16 h = $2,1 \cdot 10^6$ Ritzel- umdrehungen
<sup>1)</sup> Umfangsgeschwindigkeit ca. 8,3 m/s <sup>2)</sup> Ölsumpftemperatur je nach Einsatzbedingungen des Schmierstoffes alternativ 60°C	

**Tafel 1:** Prüfbedingungen im DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest

Kraftstufe	Drehmoment am Ritzel in [Nm]	Hertz'sche Pressung im Wälzpunkt $p_c$ in [N/mm <sup>2</sup> ]
3 (Einlauf)	28,8	510,0
7	132,5	1093,9
9	215,6	1395,4

**Tafel 2:** Kraftstufen des GFKT-C/8,3/90

### 3.2 Durchführung des Tests

Vor dem Start des GFKT ist sicherzustellen, dass die Ölsumpftemperatur den vorgeschriebenen Testbedingungen (in der Regel 90°C) entspricht. Vor Beginn des Einlaufes auf Kraftstufe 3 kann eine geringfügig niedrigere Ölsumpftemperatur (80°C) toleriert werden.

Der Grauflecken-Kurztest beginnt mit einem Einlauf von 1 h auf Kraftstufe 3, direkt im Anschluss beginnt der eigentliche Stufentest. Zunächst wird ein Lauf von 16 h auf Kraftstufe 7 durchgeführt, dann folgt ein Lauf auf Kraftstufe 9.<sup>1</sup> Nach den Läufen auf Kraftstufe 7 und Kraftstufe 9 sind die Prüfräder auszubauen und die Profilform dreier gleichmäßig am Umfang verteilter Zähne zu vermessen.

Um die Sicherheit der Aussage des Grauflecken-Kurztests zu erhöhen wird die Durchführung des Testes auf der Rückflanke der Prüfräder ausdrücklich empfohlen.

<sup>1</sup> Der Lauf auf Kraftstufe 9 muss nicht zwingend durchgeführt werden, wenn das in Kapitel 3.6 definierte Schadenskriterium nach Kraftstufe 7 überschritten wurde. Ein Prüflauf auf KS 9 erlaubt jedoch den Vergleich der mittleren maximalen Auskolkungen nach dieser Kraftstufe und wird deshalb empfohlen.

### 3.3 Testräder

Als Prüfverzahnung wird die gleiche Prüfverzahnung wie beim FVA-FZG-Graufleckentest verwendet. Hierbei handelt es sich um die bezüglich Gleitgeschwindigkeit ausgeglichene Verzahnung „FZG-C“, Ausführung „C-GF“. Die Geometriedaten der Verzahnung sind **Tafel 3** zu entnehmen.

Größe	Formelzeichen	Zahlenwert	Einheit
Achsabstand	a	91,5	mm
Zahnbreite	b	14,0	mm
Wälzkreisdurchmesser	Ritzel	$d_{w1}$	73,2 mm
	Rad	$d_{w2}$	109,8 mm
Kopfkreisdurchmesser	Ritzel	$d_{a1}$	82,46 mm
	Rad	$d_{a2}$	118,36 mm
Modul	m	4,5	mm
Zähnezahl	Ritzel	$z_1$	16
	Rad	$z_2$	24
Profilverschiebungsfaktor	Ritzel	$x_1$	0,1817
	Rad	$x_2$	0,1715
Eingriffswinkel	$\alpha$	20	°
	$\alpha_{wt}$	22,44	°
Schrägungswinkel	$\beta$	0	°
Teilkreisdurchmesser	Ritzel	$d_1$	72,0 mm
	Rad	$d_2$	108,0 mm
Grundkreisdurchmesser	Ritzel	$d_{b1}$	67,66 mm
	Rad	$d_{b2}$	101,49 mm
Profilüberdeckung	$\epsilon_\alpha$	1,46	-
Zahnkorrektur	Ohne Kopf- und Fußrücknahme; keine Breitenballigkeit		

**Tafel 3:** Geometriedaten der Testverzahnung für den DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest

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

Werkstoff	16 MnCr 5 nach DIN 17210
Wärmebehandlung	Die Prüfräder werden einsatzgehärtet. Randhärte 750 HV 1, im Bereich der Zahnflanke. Einsatzhärtungstiefe EHT 550 HV 1: 0,8 -1,0 mm (nach dem Schleifen), Kernfestigkeit 1000-1250 N/mm <sup>2</sup> . Die Randzone darf keinen im Mikroskop sichtbaren Restaustenitgehalt (< 20%) aufweisen.
Verzahnungsqualität	5 nach DIN 3962, $f_f \leq 5 \mu\text{m}$ . Zahnweite Ritzel: $34,779 \begin{smallmatrix} -0,11 \\ -0,135 \end{smallmatrix}$ mm, gemessen über 3 Zähne. Zahnweite Rad: $35,252 \begin{smallmatrix} -0,11 \\ -0,135 \end{smallmatrix}$ mm, gemessen über 3 Zähne. zulässige Schwankung $R_w$ : jeweils 0,01 mm
Rauheit $R_a$ der Zahnflanken	$0,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$ in Evolventenrichtung
Schliff	Maag Glattschliff

**Tafel 4:** Ausführung der Prüfräder „C/GF“

### 3.4 Prüfmaschine

Der Grauflecken-Kurztest wird auf einem Standard FZG-Verspannungsprüfstand nach DIN 51354 mit Tauchschmierung durchgeführt.

### 3.5 Einbau der Prüfräder

Analog zum FVA-FZG-Graufleckentest wird das Großrad (24 Zähne) auf der Motorwelle montiert. Das Prüfritzel (16 Zähne) ist das treibende Rad.

### 3.6 Schadenskriterium und Einordnung in GF-Klassen

Die Zahnflanken werden im Neuzustand und nach den Läufen auf Kraftstufe 7 und Kraftstufe 9 nach Kapitel 4 vermessen. Überschreitet die mittlere Profilformab-

weichung  $f_{fm}$  den Grenzwert von  $7,5 \mu\text{m}$ , so ist das Testende erreicht. Die Kraftstufe, nach deren Lauf der Grenzwert überschritten ist, wird als Schadenskraftstufe ( $SKS_{GFKT}$ ) des GFKT angegeben. Nach **Tafel 5** sind Schmierstoffe in die Graufleckentragfähigkeitsklassen GFKT-niedrig, GFKT-mittel und GFKT-hoch einzuordnen.

GF-Klasse des Grauflecken-Kurztestes	Schadenskraftstufe $SKS_{GFKT}$ im Grauflecken-Kurztest
GFKT-niedrig	$SKS_{GFKT} = KS 7$ ( $f_{fm}$ nach KS 7 > $7,5 \mu\text{m}$ )
GFKT-mittel	$SKS_{GFKT} = KS 9$ ( $f_{fm}$ nach KS 9 > $7,5 \mu\text{m}$ )
GFKT-hoch	$SKS_{GFKT} > KS 9$ ( $f_{fm}$ nach KS 9 < $7,5 \mu\text{m}$ )

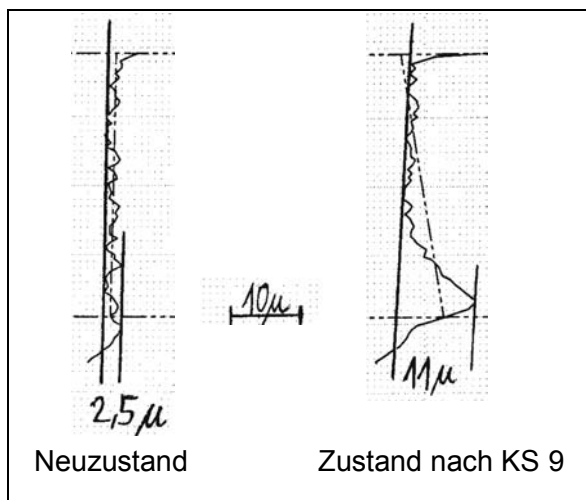
**Tafel 5:** Einordnung in GF-Klassen

## 4 Bestimmung der Profilformabweichung $f_{fm}$

### 4.1 Vermessen der Evolvente

Die Profilform von drei gleichmäßig am Umfang verteilten Zähnen wird im Neuzustand und nach den Läufen auf Kraftstufe 7 und Kraftstufe 9 vermessen. Entsprechend DIN 3960 wird die Profilformabweichung  $f_f$  ermittelt. Als Bezugslinie im Profildiagramm ist dabei die vermittelnde Ist-Evolvente des neuen Prüfrades zu verwenden. **Bild 1** zeigt beispielhaft den Profilschrieb der gleichen Zahnflanke im Neuzustand und nach Kraftstufe 9 im Grauflecken-Kurztest. Im Neuzustand weist die Zahnflanke eine maximale Profilformabweichung  $f_f$  von  $2,5 \mu\text{m}$  auf, nach der Kraftstufe 9 im Grauflecken-Kurztest zeigt sich deutliche Auskolkung. Die maximale Profilformabweichung beträgt  $11 \mu\text{m}$ .

Erreicht der Mittelwert  $f_{fm}$  der drei Messwerte den kritischen Wert ( $7,5 \mu\text{m}$ ), so gelten die Schadenskraftstufe bzw. das Ende des Testes als erreicht. Durch lichtmikroskopische Kontrolle der Zahnflanken ist sicherzustellen, dass die Auskolkungen durch Graufleckigkeit (mattes, gleichmäßig graues Erscheinungsbild des Schadensbereiches ohne deutliche Orientierung bzw. Riefen in Zahnhöhenrichtung) und nicht z. B. durch Schaben der Gegenradkopfkante verursacht wurden.



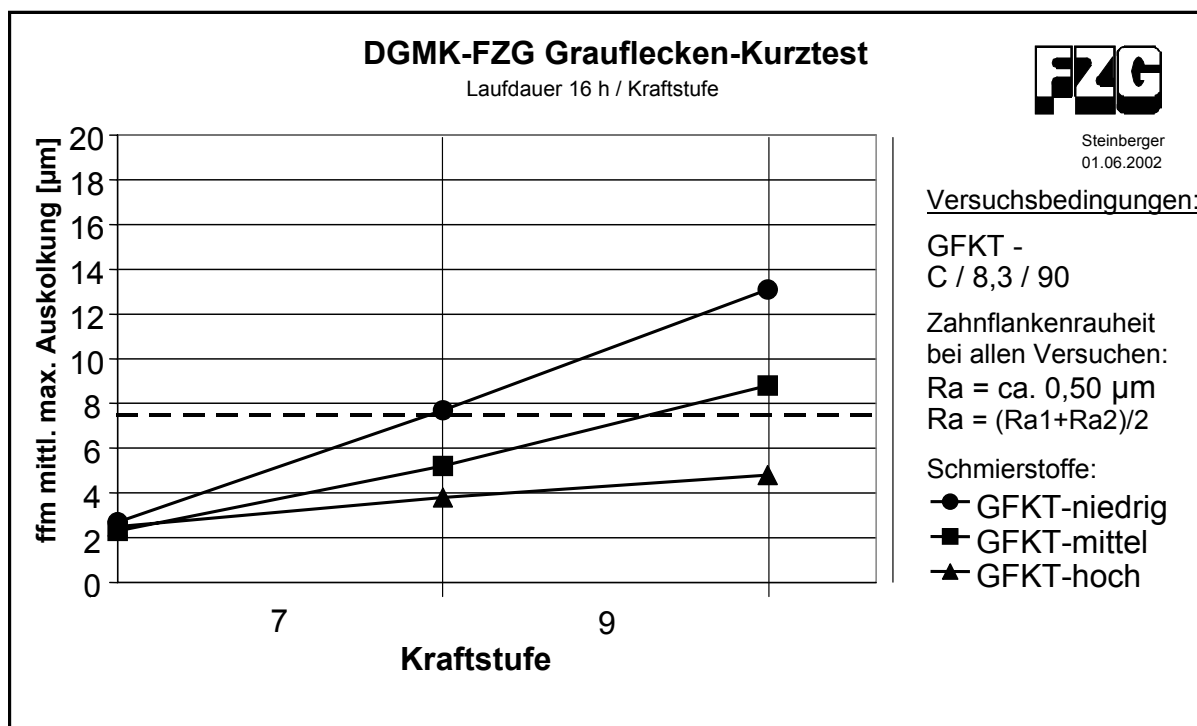
**Bild 1:** Evolventenschrieb einer Zahnflanke im Neuzustand und nach Kraftstufe 9 im Grauflecken-Kurztest

### 5 Übertragbarkeit der Ergebnisse des Grauflecken-Kurztests

Der DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest ordnet Schmierstoffe in die Tragfähigkeitsklassen GFKT-niedrig, GFKT-mittel und GFKT-hoch ein. Der FVA-FZG-Graufleckentest weist Schmierstoffen die Tragfähigkeitsklassen GFT-niedrig, -mittel und -hoch zu. Vorliegende Versuchsergebnisse zeigten eine gute Zuordbarkeit der Graufleckentragfähigkeitsklassen des DGMK Grauflecken-Kurztests zu den Tragfähigkeitsklassen des FVA-FZG-Graufleckentests.

### 6 Beispiele für Testabläufe

**Bild 2** zeigt Ergebnisse von Schmierstoffen, die im Rahmen des DGMK Forschungsvorhabens 575 getestet wurden. Dargestellt sind die Verläufe der mittleren maximalen Profilformabweichung  $f_{fm}$  über den gefahrenen Kraftstufen je eines Schmierstoffes der Tragfähigkeitsklassen gemäß dem DGMK-FZG Grauflecken-Kurztest GFKT-niedrig, GFKT-mittel und GFKT-hoch.



**Bild 2:** Mittlere Profilformabweichung  $f_{fm}$  der Testritzeln

