

DIN 3990-16

ICS 21.200

**Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern –
Teil 16: Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierstoffen im
FZG-Prüfverfahren GT-C/8,3/90**

Calculation of load capacity of cylindrical gears –
Part 16: Determination of the micro-pitting load-carrying capacity of lubricants using
FZG-test-method GT-C/8,3/90

Calculs de résistance à l'écrasement des pignons –
Partie 16: Détermination de la capacité de résistance des lubrifiants aux taches grises par la
méthode d'essai FZG GT-C/8,3/90

Gesamtumfang 57 Seiten

DIN-Normenausschuss Maschinenbau (NAM)
DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)
Fachausschuss Mineralöl- und Brennstoffnormung (FAM) des NMP

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	7
4 Abkürzungen und Formelzeichen	8
5 Kurzbeschreibung des Prüfverfahrens und allgemeine Grundlagen	10
6 Angabe der Präzision	14
6.1 Präzision im Stufentest	14
6.2 Präzision im Dauertest	15
7 Prüfmittel	15
7.1 Prüfzahnräder	15
7.2 Reinigungsflüssigkeit	17
8 Geräte	17
8.1 FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine	17
8.2 Ölaggregat	19
8.3 Evolventenmessgerät	19
8.4 Waage	19
8.5 Zahnflanken-Lehre	19
8.6 Fotografiereinrichtung	20
8.7 Aufheizvorrichtung	20
8.8 Entmagnetisierungsgerät	20
9 Vorbereitung der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine	20
9.1 Allgemeines	20
9.2 Reinigung des Prüfgetriebes	20
9.3 Reinigung des Ölkreislaufs	20
9.4 Prüfung auf Beschädigungen	21
9.5 Vorbereitung der Prüfzahnräder	21
9.6 Montage der Prüfzahnräder	21
9.7 Verspannung der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine	21
10 Prüfverfahren	23
10.1 Allgemeiner Ablauf der Messungen	23
10.2 Detaillierter Ablauf der Messungen	23
10.3 Allgemeine Betriebsdaten	24
10.4 Prüfbedingungen des Stufentests	25
10.5 Prüfbedingungen des Dauertests	26
11 Dokumentation des Tests	26
11.1 Zu dokumentierende Werte	26
11.2 Messverfahren/Messbedingungen	27
11.2.1 Rauheitsmessung im Neuzustand	27
11.2.2 Auswahl der testbegleitend zu dokumentierenden Zähnen	27

11.2.3	Optische Dokumentation/ mittlere Graufleckenfläche nach jeder Kraftstufe bzw. jedem Prüfintervall.....	27
11.2.4	Ermittlung der mittleren Profilformabweichung.....	28
11.2.5	Ermittlung des Massenverlusts.....	29
12	Ermittlung des Schadensfortschritts im Stufen- und Dauertest	29
13	Ermittlung der Schadenskraftstufe des Graufleckentests	33
14	Prüfbericht.....	34
Anhang A (informativ) Beispiel für einen Prüfbericht und eine Wertetabelle		35
Anhang B (informativ) Ermittlung der Graufleckentragfähigkeitsklasse.....		37
Anhang C (informativ) Beispielhafte Verläufe der Graufleckenentwicklung		40
Anhang D (informativ) Beispielhafte Einordnung in eine GF-Klasse		43
Anhang E (informativ) Umwertung von Testergebnissen bei abweichender Flankenrauheit nach FVA 54/7		45
Anhang F (informativ) Beispielhafte Flankenmerkmale für GF-Klassen nach FVA 54/7		46
Anhang G (normativ) Erläuterungen und Ergänzungen zur Beschreibung der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine.....		49
Anhang H (informativ) Checkliste für die Wartung der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine		52
H.1	Erkennen einer Funktionsstörung.....	52
H.1.1	Verteilung der Graufleckigkeit über der Flankenbreite.....	52
H.1.2	Tragbild.....	52
H.1.3	Prüfung von Referenzschmierstoffen	52
H.1.4	Weitere Prüfungen.....	52
H.2	Maschinenteile, die Wartung benötigen	52
H.2.1	Prüfgetriebegehäuse	52
H.2.2	Anschlusswellen und Flansche.....	54
H.2.3	Übertragungsgetriebe	54
H.2.4	Sonstige Einrichtungsteile	55
H.3	Ölaggregat	55
Literaturhinweise.....		56

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 060-34-19 AA „Zahnrad schmierung und Schmierstoffe (SpA ISO/TC 60/SC 2/WG 12)“ im Fachbereich „Antriebstechnik“ des DIN-Normenausschusses Maschinenbau (NAM) erarbeitet. Vertreter der Hersteller und Anwender von Zahnrad schmierung und Schmierstoffen waren an der Erarbeitung beteiligt.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

DIN 3990, *Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern* besteht aus:

- *Teil 1: Einführung und allgemeine Einflußfaktoren*
- *Teil 2: Berechnung der Grübchentragfähigkeit*
- *Teil 3: Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit*
- *Teil 4: Berechnung der Freßtragfähigkeit*
- *Teil 5: Dauerfestigkeitswerte und Werkstoffqualitäten*
- *Teil 6: Betriebsfestigkeitsrechnung*
- *Teil 11: Anwendungsnorm für Industriegetriebe; Detail-Methode*
- *Teil 16: Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierstoffen im FZG-Prüfverfahren GT-C/8,3/90*
- *Teil 21: Anwendungsnorm für Schnelllaufgetriebe und Getriebe ähnlicher Anforderungen*
- *Teil 31: Anwendungsnorm für Schiffsgetriebe*
- *Teil 41: Anwendungsnorm für Fahrzeuggetriebe*

Einleitung

Die heute bekannten Tragfähigkeitsgrenzen von Verzahnungen, die durch Schmierstoffe beeinflusst werden können, sind Fressen (Riefen und Fresser), Langsamlauf-Verschleiß und die Erscheinungsformen der Zahnflankenermüdung wie Grauflecken und Grübchen. Für eine genaue, auf den Anwendungsfall bezogene Schmierstoffauswahl sind entsprechende Schmierstoff-Prüfverfahren erforderlich. Diese können als Werkzeuge für die Ermittlung von charakteristischen Schmierstoffkennwerten angesehen werden, die in die Tragfähigkeitsberechnung der Zahnräder einzusetzen sind. FZG-Prüfverfahren zur Fresstragfähigkeit werden in der Normenreihe DIN ISO 14635 Teil 1 bis Teil 3 beschrieben.

FZG-Prüfverfahren zu den Tragfähigkeitsgrenzen Grauflecken und Grübchen (in Bearbeitung) werden in der Normenreihe DIN 3990 beschrieben.

Dieser Teil der Norm beschreibt den aktuellen Stand des im Rahmen des FVA-Forschungsvorhabens Nr. 54/I-IV entwickelten FZG-Graufleckentest. Mit Hilfe des Graufleckentestes GT-C/8,3/90 kann der Einfluss von Schmierstoffen und deren Schmierstoffadditive auf die Entstehung von Grauflecken für einen weiten Anwendungsbereich, z. B. Fahrzeug-, Industrie-, Windkraft- und Schiffsgetriebe, quantitativ ermittelt werden. Der Graufleckentest differenziert Schmierstoffe hinsichtlich ihrer Graufleckentragfähigkeit und ermöglicht die Auswahl eines ausreichend tragfähigen Schmierstoffs hinsichtlich Graufleckenbildung.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm legt Anforderungen an ein Prüfverfahren fest, das zur Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierölen für Zahnradgetriebe dient, insbesondere Schmierölen CLP entsprechend DIN 51517-3, auf einer FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine. Das Prüfverfahren ist auf alle Schmieröle anwendbar, die in der Prüfung nach DIN ISO 14635-1 bzw. ISO 14635-1 eine ausreichende Belastbarkeit aufweisen.

Als Anhaltswert für die höchste Belastung ohne verstärkte Fressgefährdung im hier beschriebenen Prüfverfahren kann dabei die im Prüfverfahren DIN ISO 14635-1 bzw. ISO 14635-1 erreichte Schadenskraftstufe herangezogen werden.

Das hier festgelegte Prüfverfahren basiert maßgebend auf dem im FVA-Informationsblatt Nr. 54/7 [4] beschriebenen Graufleckentest und ist nur für flüssige Schmierstoffe anwendbar. Auf Basis der in FVA-Informationsblatt Nr. 54/7 [4] gemachten Angaben, können die Prüfbedingungen, insbesondere die Umfangsgeschwindigkeit und die Schmierstoffeinspritztemperatur, entsprechend den Betriebsbedingungen für den vorliegenden Einsatzfall modifiziert werden. Diese Testmodifikationen sind explizit nicht Teil dieser Norm.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ASTM D235, *Standard Specification for Mineral Spirits (Petroleum Spirits) (Hydrocarbon Dry Cleaning Solvent)*

DIN 3960¹, *Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung*

DIN 3961², *Toleranzen für Stirnradverzahnungen — Grundlagen*

DIN 3962-1³, *Toleranzen für Stirnradverzahnungen — Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen*

DIN 3962-2³, *Toleranzen für Stirnradverzahnungen — Toleranzen für Flankenlinienabweichungen*

DIN 3962-3³, *Toleranzen für Stirnradverzahnungen — Toleranzen für Teilungs-Spannenabweichungen*

DIN 3963, *Toleranzen für Stirnradverzahnungen — Toleranzen für Wälzabweichungen*

DIN 51517-3, *Schmierstoffe — Schmieröle — Teil 3: Schmieröle CLP, Mindestanforderungen*

DIN EN ISO 683-3, *Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle — Teil 3: Einsatzstähle*

DIN EN ISO 4259-2, *Mineralölerzeugnisse — Präzision von Messverfahren und Ergebnissen — Teil 2: Anwendung der Präzisionsdaten von Prüfverfahren*

DIN EN ISO 4287, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren — Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*

1 historisch

2 historisch

3 historisch

DIN EN ISO 4288, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) — Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren — Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*

DIN ISO 5725-2, *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen — Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens*

DIN ISO 14635-1, *Zahnräder — FZG-Prüfverfahren — Teil 1: FZG-Prüfverfahren A/8,3/90 zur Bestimmung der relativen Fresstragfähigkeit von Schmierölen*

ISO 16889, *Hydraulic fluid power — Filters — Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element*

ISO/TR 10064-4, *Cylindrical gears — Code of inspection practice — Part 4: Recommendations relative to surface texture and tooth contact pattern checking*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

3.1

Graufleckigkeit

Ermüdungserscheinung der Zahnflankenoberfläche, die die betroffenen Zahnflankenbereiche matt-grau erscheinen lässt

Anmerkung 1 zum Begriff: Zur Definition von Graufleckigkeit siehe auch DIN 3979. Graufleckigkeit tritt insbesondere an Zahnflanken hoher Randhärte, im Bereich negativen spezifischen Gleitens, vorwiegend unter ungünstigen Schmierbedingungen, d. h. bei Betrieb der Testverzahnung im Gebiet der Mischreibung, auf. Graufleckigkeit ist gekennzeichnet durch kleine und kleinste Ermüdungsanrisse der Zahnflankenoberfläche. Bei fortschreitender Graufleckenbildung brechen laufend kleinste und kleine Partikel aus der Oberfläche der Zahnflanke heraus, so dass Abweichungen vom Evolventenprofil der Zahnflanke in Form von Auskolkungen entstehen. Die Graufleckenentstehung, -entwicklung und -intensität werden in hohem Maße von den tribologischen Bedingungen im belasteten Zahnflankenkontakt beeinflusst. Der Schmierstoff und dessen Additivierung stellen eine zentrale Einflussgröße dar [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23].

Anmerkung 2 zum Begriff: Beispiele von veränderten Flankenzuständen sind in Bild 1, Bild 2 und Bild 3 dargestellt und können DIN 3979 entnommen werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Bei entsprechenden Betriebsbedingungen kann Graufleckigkeit auch in weiteren tribologischen Kontakten, wie z. B. im Nocken/Stößelkontakt oder anderen kraftschlüssigen Getriebesystemen, auftreten

3.2

Graufleckentragfähigkeit

größte Belastung, die unter einer Reihe festgelegter Betriebsbedingungen ertragen werden kann, ohne dass es zu einer definierten Änderung des Zahnflankenzustands durch Grauflecken kommt

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Risiko von Graufleckenbildung bzw. die Graufleckentragfähigkeit ist abhängig von der im Zahnflankenkontakt vorliegenden Schmierfilmdicke, den Zahnflankenrauheiten, den Werkstoffeigenschaften der Zahnräder und dem verwendeten Schmierstoff. Als Folge von Graufleckigkeit an Zahnrädern kann es zu einer Minderung der Zahnradqualität, zu dynamischen Zusatzkräften und zu einer Beeinflussung der Grübchentragfähigkeit kommen.

3.3

FZG-Prüfverfahren GT-C/8,3/90

Bezeichnung des Prüfverfahrens unter Angabe der wesentlichen Prüfparameter mit der Bedeutung GT für Graufleckentest, C für die besondere Zahnform der Prüfzahnräder Typ „C-GF“ nach Tabelle 1, 8,3 für die Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis in m/s, 90 für die Schmierstoff-Einspritztemperatur in °C

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Drehrichtung der Zahnräder ist in Bild 5 angegeben. Die Terminologie von Zahnradschäden ist in [3] definiert.

3.4

Schadenskriterium

<Graufleckentest> Grenzwert der durch Graufleckigkeit bedingten Zahnflankenveränderung im vorliegenden Prüfverfahren

Anmerkung 1 zum Begriff: Die im Folgenden definierten Schadenskriterien gelten nur für das in dieser Norm definierte Prüfverfahren und sind für praktische Anwendungen nicht verallgemeinerbar.

3.4.1

Schadenskriterium im Stufentest

<Graufleckentest> Grenzwert der mittleren Profilformabweichung f_{fm} von 7,5 µm

3.4.2

Schadenskriterium im Dauertest

<Graufleckentest> Grenzwert der mittleren Profilformabweichung f_{fm} von 20 µm

3.5

Schadenskraftstufe

Kraftstufe, in der das Schadenskriterium im Stufentest überschritten wurde

3.6

GF-Klasse

Grauflecken-Tragfähigkeitsklasse, in die das Testergebnis anhand der dokumentierten Schadensmerkmale abschließend eingeordnet werden kann

4 Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

API GL 4	Getriebeölspezifikation des American Petroleum Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
C-GF	Zahnradpaar vom Typ "C-GF"; Zahnform "C"; Ausführung "GF"
CHD	Case Hardening Depth
CKC	Mindestanforderung an Getriebeöle nach ISO 6743-6
CKD	Mindestanforderung an Getriebeöle nach ISO 6743-6
CLP	Mindestanforderung an Getriebeöle nach DIN 51517-3
DIN	Deutsches Institut für Normung
EP	Extreme-Pressure
Fa.	Firma
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik
FVA2A, FVA3A	FVA-Referenzöle nach [14]
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau
GF-Klasse	Graufleckentragfähigkeitsklasse
GFT	Graufleckentragfähigkeit

GT-C/8,3/90	Graufleckentest, Prüfzahnräder Typ „C-GF“, Zahnform „C“, Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis 8,3 m/s; Schmierstoff-Einspritztemperatur 90 °C.
HV	Härte nach Vickers
ISO	International Organization for Standardization
ISO VG	ISO-Viskositätsgruppe
ISO/TR	ISO Technical Report
KS	Kraftstufe
L	Linksflanke
LGT-C/Ls	Filtereinstellung der Rauheitsmessung
NAM	DIN-Normenausschuss Maschinenbau
PL	Prüflauf
R	Rechtsflanke
SAE	Society of American Engineers
SKS	Schadenskraftstufe
SKS _p	Schadenskraftstufe im Prüflauf
SKS _w	Schadenskraftstufe im Wiederholungslauf
TKZ	Tastertyp
WL	Wiederholungslauf

Formelzeichen

GF	Graufleckenfläche
H ₁	Belastungshebel
H ₂	Belastungshebel
K	Gehänge
R	Vergleichbarkeit nach DIN EN ISO 4259-2
R _a	arithmetische Mittelrauheit
R _{a1}	arithmetische Mittelrauheit des Ritzels
R _{a2}	arithmetische Mittelrauheit des Rads
R _{max}	die größte der fünf Einzelrautiefen
R _w	Zahnweitenschwankung
R _z	gemittelte Rautiefe
T	Anziehmoment für Schrauben
T ₁	Belastung
T _{1T}	Drehmoment am Ritzel
V _{Schmierstoff}	Gesamtölmenge im Aggregat
W	Massenverlust
W _x	Gewichtsstück x
a	Achsabstand
b	Zahnbreite
d	Durchmesser der Tastkugel
d _{a1}	Kopfkreisdurchmesser des Ritzels
d _{a2}	Kopfkreisdurchmesser des Rads

d_{w1}	Wälzkreisdurchmesser des Ritzels
d_{w2}	Wälzkreisdurchmesser des Rads
f_f	Profilformabweichung
f_{fm}	mittlere Profilformabweichung
f_{fmz10}	f_{fm} nach z10
$f_{f\alpha}$	Profilformabweichung
l_t	Länge der Messstrecke der Rauheitsmessung
m	Normalmodul
n_1	Ritzeldrehzahl
n_2	Raddrehzahl
p_c	Hertzsche Pressung im Wälzpunkt
r	Wiederholbarkeit nach DIN EN ISO 4259-2
x_1	Profilverschiebungsfaktor Ritzel
x_2	Profilverschiebungsfaktor Rad
z_1	Zähnezahl Ritzel
z_2	Zähnezahl Rad
z10	Anzahl der durchgeführten Dauertestabschnitte in KS10 bis Ende des Dauertests ohne Auftreten von Fressen oder Verschleiß
α_n	Normaleingriffswinkel
α_{wt}	Betriebseingriffswinkel
β	Schrägungswinkel
β_{10}	β -Wert, vereinzelt auch als Filtrationswert bezeichnet
$\vartheta_{\text{Schmierstoff}}$	Einspritztemperatur
λ	Messparameter Rauheitsmessung
v_t	Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis oder Vorschub Rauheitsmessung

5 Kurzbeschreibung des Prüfverfahrens und allgemeine Grundlagen

Ein Prüfzahnradpaar nach Tabelle 1 und Tabelle 2 läuft unter Verwendung des zu prüfenden Schmierstoffs im Schmierstoff-Einspritzschmierverfahren bei konstanter Drehzahl für eine festgelegte Anzahl von Umdrehungen. Die Belastung der Zahnflanken ist für jedes Prüfintervall entsprechend Tabelle 5 und Tabelle 6 sowie Tabelle G.2 festgelegt.

Bei Beginn jedes Prüfintervalls muss die Betriebstemperatur des Schmierstoffs $(90 \pm 3)^\circ\text{C}$ betragen und während der Prüfung auf $(90 \pm 3)^\circ\text{C}$ geregelt sein. Beginnend mit der Kraftstufe 5 werden die Zahnflanken am Ende einer jeden Kraftstufe bzw. eines jeden Prüfintervalls durch Ermittlung der mittleren Profilformabweichung, der mittleren prozentualen Graufleckenflechte und des Massenverlusts dokumentiert. Die Prüfung ist beendet, wenn mindestens eines der Schadenskriterien nach Tabelle 5 oder Tabelle 6 erreicht ist oder die Prüfabschnitte ohne Eintreten eines Schadenskriteriums durchlaufen sind.

Ein vollständiger Graufleckentest umfasst einen Prüflauf und einen Wiederholungslauf. Der Prüflauf besteht aus einem Stufentest und einem anschließenden Dauertest. Im Stufentest wird die Graufleckentragfähigkeit des tribologischen Systems Zahnrad-Schmierstoff bei gegebenen Betriebsbedingungen (Schmierstofftemperatur, Umfangsgeschwindigkeit) festgestellt. Das Ergebnis des Stufentests ist i. d. R. die erreichte Schadenskraftstufe bzw. das Durchlaufen der maximalen Kraftstufe ohne Überschreiten des Schadens-

kriteriums. Zur Bestimmung des Schadenskriteriums im Stufentest (siehe 3.4.1) werden die Zahnflanken nach jeder Kraftstufe (KS) inspiziert und vermessen. Dabei wird der Betrag der Profilabweichung f_p , der durch Auskolkung in der graufleckigen Zone entsteht, durch Messung entsprechend Abschnitt 11 festgestellt. Überschreitet die mittlere Profilformabweichung f_{fm} (vgl. 10.2.9) den Grenzwert von $7,5 \mu\text{m}$, so ist das Ende des Stufentests erreicht. Die Kraftstufe, in der der Grenzwert überschritten wird, ist als Schadenskraftstufe anzugeben. Der Dauertest gibt Aufschluss über den Schadensfortschritt bei größeren Lastspielzahlen. Zur Beurteilung des Schadenskriteriums im Dauertest (siehe 3.4.2) werden die Zahnflanken nach einer Prüflaufzeit von jeweils 80 h inspiziert und vermessen. Werden dabei Grauflecken festgestellt, so gilt der Dauertest als beendet und das Schadenskriterium des Dauertests als erreicht, wenn die mittlere Profilformabweichung f_{fm} einen Grenzwert von $20 \mu\text{m}$ (Qualität 9 nach DIN 3961, DIN 3962-1 bis DIN 3962-3 bzw. DIN 3963) überschreitet. Der Prüflauf erfolgt durchgehend mit den Vorflanken der Prüfräder (Definition siehe 7.1) als Lastflanken.

Zur Absicherung der Ergebnisse erfolgt anschließend ein Wiederholungslauf. Der Wiederholungslauf umfasst nur den Stufentest. Der Wiederholungslauf kann unter Verwendung der Rückflanken des Testradpaares als Lastflanken durchgeführt werden.

Der vollständige Graufleckentest bestehend aus Prüflauf (Stufen- und Dauertest) sowie Wiederholungslauf (i. d. R. nur Stufentest) wird mit ein und derselben Schmierstofffüllung durchgeführt.

Der Ablauf des Graufleckentests umfasst im Einzelnen:

Prüflauf:

- Einlauf in KS 3
- Stufentest von KS 5 bis Erreichen des Schadenskriteriums oder max. KS 10
- Dauertest bis Erreichen des Schadenskriteriums oder der max. Laufzeit

Wiederholungslauf:

- Einlauf in KS 3
- Wiederholung Stufentest (KS 5 bis Erreichen des Schadenskriteriums oder max. KS 10 (i. d. R. kein Dauertest))

Testdauer:

- Im Stufentest: Beginn mit einem Einlauf in KS 3, dann stufenweise Steigerung der Belastung, beginnend bei Kraftstufe 5, bis zur in 3.5 definierten Schadenskraftstufe, höchstens jedoch bis zur 10. Kraftstufe. Die Laufzeit im Stufentest beträgt je Kraftstufe $2,1 \times 10^6$ Ritzelumdrehungen (entspricht etwa 16 h).
- Im Dauertest: Durchlaufen von maximal $10,5 \times 10^6$ Ritzelumdrehungen (entspricht etwa 80 h Laufzeit) in Kraftstufe 8 und maximal 5 Prüfintervalle mit jeweils $10,5 \times 10^6$ Ritzelumdrehungen (entspricht etwa 80 h Laufzeit) in Kraftstufe 10.

Die Standardprüfbedingungen sind in Tabelle 4 beschrieben, das Belastungsschema zeigen Tabelle G.1 und Tabelle G.2. Die Schmierstofftemperatur im Tank wird durch eine Temperaturregelung mit Heizung und Kühlung auf dem Sollwert gehalten (Einlauf ohne Temperaturregelung).

Es kann aus unterschiedlichen Gründen zu frühzeitiger Grübchenbildung im Dauertest des Prüflaufs kommen. In diesem Fall kann beim Wiederholungslauf ggf. ein zusätzlicher Dauertest durchgeführt werden. Die Ergebnisse beider Dauertests sind in diesem Fall zu dokumentieren und finden Eingang in die Bewertung des Testergebnisses.

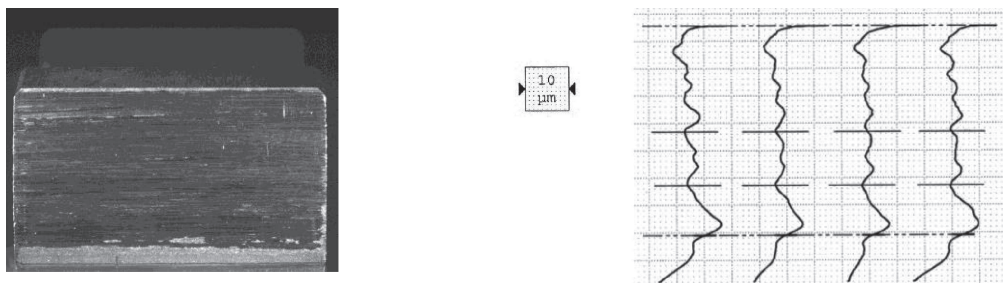
ANMERKUNG Maßgebend für die Laufzeit in Stufen- und Dauertest ist die jeweils angegebene Anzahl an Ritzelumdrehungen. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden in Tabellen und Grafiken dieser Norm z. T. die Laufzeiten in Stunden dargestellt.

Vom Durchführenden dieses Prüfverfahrens wird vorausgesetzt, dass er für die Durchführung des Verfahrens voll ausgebildet und mit aller üblichen Ingenieur- und Laborpraxis vertraut ist oder unter unmittelbarer Aufsicht einer solchen Person steht.

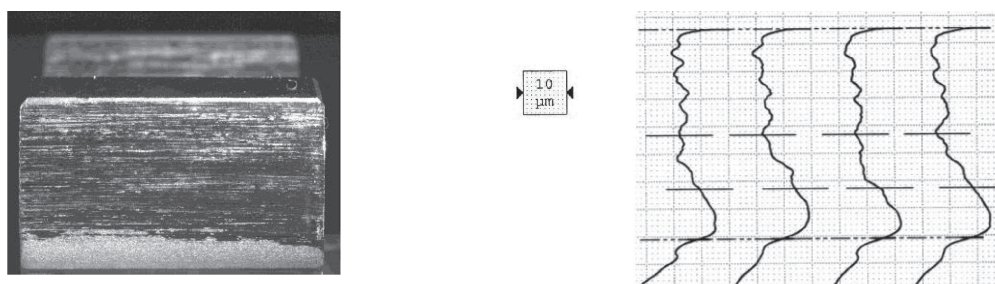
Tritt während des Tests Grübchenbildung größer 4 % der Fläche einer aktiven Zahnflanke, Fressen oder Verschleiß ein, so wird der Test abgebrochen. 4 % der Fläche einer aktiven Ritzelzahnflanke entsprechen etwa 5 mm².

Der Durchführende des Prüfverfahrens ist dafür verantwortlich, dass alle zutreffenden Gesetze, Verordnungen und Bedingungen beachtet werden.

WARNUNG — In der FZG Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine werden hochbelastete Wellen und hochbeanspruchte Prüfräder bei hoher Drehzahl betrieben. Für den Schutz des Personals ist entsprechende Vorsorge zu treffen. Ein Gehörschutz sollte getragen werden.

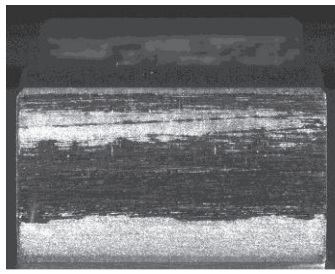


**a) Leichte Graufleckenbildung; Graufleckenfläche etwa 10 %;
mittl. Profilformabweichung < 7,5 µm
(Schadenskriterium des Stufentests nicht erreicht)**

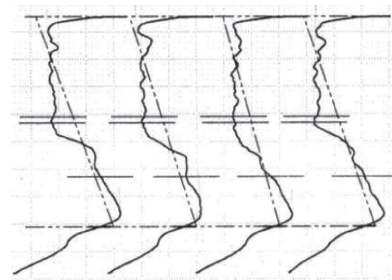


**b) Mittl. Graufleckenbildung; Graufleckenfläche etwa 20 %;
mittl. Profilformabweichung ≥ 7,5 µm
(Schadenskriterium des Stufentests erreicht)**

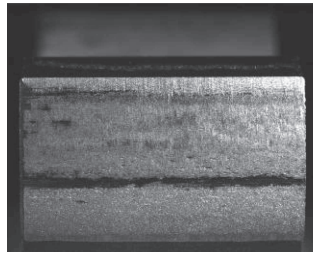
Bild 1 (1 von 2)



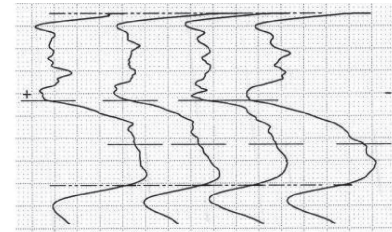
10
μm



c) Starke Graufleckenbildung; Graufleckenfläche etwa 40 %; $7,5\text{ }\mu\text{m}$ < mittl. Profilformabweichung < $20\text{ }\mu\text{m}$ (Schadenskriterium des Dauertests nicht erreicht)



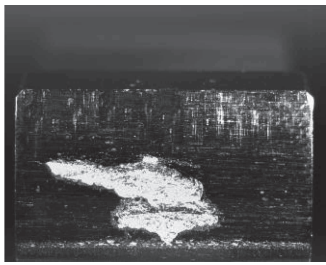
10
μm



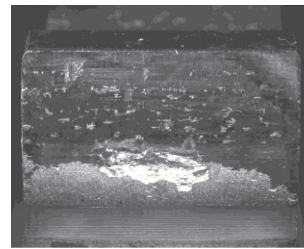
d) Sehr starke Graufleckenbildung; Graufleckenfläche etwa 90 %; mittl. Profilformabweichung > $20\text{ }\mu\text{m}$ (Schadenskriterium des Dauertests erreicht)

ANMERKUNG Bild 1 zeigt typische Veränderungen der Ritzel-Zahnflanken, wie sie bei dem hier beschriebenen Prüfverfahren auftreten. Bild 1 a) zeigt eine geschlossene Graufleckenfläche im Fußflankenbereich eines Testritzels. Der Betrag der graufleckenbedeckten Fläche beträgt etwa 10 % der aktiven Zahnflanke. Die mittlere Profilformabweichung erreicht das Schadenskriterium im Stufentest von $7,5\text{ }\mu\text{m}$ nicht. Bild 1 b) zeigt eine geschlossene Graufleckenfläche im Fußflankenbereich eines Testritzels. Der Betrag der graufleckenbedeckten Fläche beträgt etwa 20 % der aktiven Zahnflanke. Die mittlere Profilformabweichung beläuft sich auf etwa $7,5\text{ }\mu\text{m}$ (bei detaillierter Auswertung ergibt sich eine Profilformabweichung von $7,7\text{ }\mu\text{m}$; hier nicht dargestellt). Bild 1 c) zeigt eine geschlossene Graufleckenfläche im Fußflankenbereich eines Testritzels, sowie beginnende Graufleckigkeit im Zahnkopfflankenbereich des Testritzels. Der Betrag der graufleckenbedeckten Fläche beträgt etwa 40 % der aktiven Zahnflanke. Die mittlere Profilformabweichung ist größer als das Schadenskriterium im Stufentest von $7,5\text{ }\mu\text{m}$, aber kleiner als das Schadenskriterium im Dauertest von $20\text{ }\mu\text{m}$. Bild 1 d) zeigt eine geschlossene Graufleckenfläche im Fußflankenbereich und im Zahnkopfflankenbereich des Testritzels. Der Betrag der graufleckenbedeckten Fläche beträgt etwa 90 % der aktiven Zahnflanke. Die mittlere Profilformabweichung erreicht das Schadenskriterium im Dauertest von $20\text{ }\mu\text{m}$.

Bild 1 — FZG-Zahnform C, Graufleckenausbildungen an den Zahnflanken im Stufentest (2 von 2)



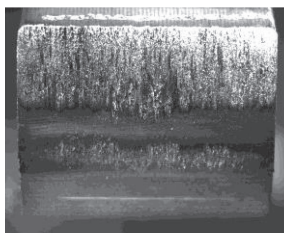
a) Leichte Graufleckenbildung und Grübchenschaden; Graufleckenfläche etwa 5 %; Grübchenfläche > 5 mm²



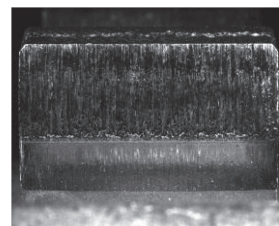
b) Mittl. Graufleckenbildung und Grübchenschaden; Graufleckenfläche etwa 20 %; Grübchenfläche > 5 mm²

ANMERKUNG Bild 2 zeigt typische Veränderungen der Ritzel-Zahnflanken, wie sie bei dem hier beschriebenen Prüfverfahren auftreten können. Bild 2 a) zeigt eine leichte Graufleckenbildung im Fußflankenbereich eines Testritzels und eine Grübchenschädigung, die mehr als 4 % der aktiven Zahnflanke (entspricht etwa 5 mm²) einnimmt. Bild 2 b) zeigt eine mittlere Graufleckenbildung im Fußflankenbereich eines Testritzels, sowie eine Grübchenschädigung, die mehr als 4 % der aktiven Zahnflanke (entspricht etwa 5 mm²) einnimmt.

Bild 2 — FZG-Zahnform C, Grübchen- und Graufleckenbildung



a) Fressen



b) Verschleiß

ANMERKUNG Bild 3 a) und Bild 3 b) zeigen Schäden, die im Einzelfall auftreten können und zu einer Beendigung des Tests führen.

Bild 3 — Sonstige Zahnflankenveränderungen

6 Angabe der Präzision

6.1 Präzision im Stufentest

Die Präzision des Verfahrens wurde nach DIN ISO 5725-2 mit zwei Referenzschmierstoffen in Doppelbestimmung ermittelt. Die Schadenskraftstufe dieser Schmierstoffe umfasst die Bereiche 5 bis einschließlich 10 unter den in der Norm festgelegten Prüfbedingungen. Bei geänderten Prüfbedingungen, speziell Schmierstoffeinspritztemperatur und Drehzahl, gelten diese Präzisionsangaben nicht.

Die Werte der Wiederholbarkeit (r) und der Vergleichbarkeit (R), wie sie in DIN EN ISO 4259-2 definiert sind, betragen für dieses Prüfverfahren:

r 1 Kraftstufe

R 2 Kraftstufen

ANMERKUNG Die obigen Ergebnisse der Präzision gelten für die Schadenskraftstufen 5 bis einschließlich 10.

6.2 Präzision im Dauertest

Für den Dauertest lassen sich keine Präzisionsdaten nach DIN ISO 5725-2 ermitteln. Der Dauertest ist ein Langzeit-Ermüdungs-Lebensdauerprüfung mit mehreren Ausfallkriterien. Für eine gesicherte Aussage zur Präzision stehen zu wenig und teilweise nicht geeignete Daten zur Verfügung.

7 Prüfmittel

7.1 Prüfzahnräder

Für die Prüfung ist ein Zahnradpaar vom Typ „C-GF“ entsprechend den Angaben in Tabelle 1 und Tabelle 2 zu verwenden. Mit Nutzung beider Zahnflanken als Lastflanken kann jedes Paar der Prüfzahnräder zur Durchführung des Prüflaufes (Vorflanken) und zur Durchführung des Wiederholungslaufes (Rückflanken) verwendet werden.

Auswahl und Paarung der Prüfzahnräder:

Eine geringere Zahnflankenrauheit bewirkt im Allgemeinen eine geringere Graufleckenbildung. Im Graufleckentest macht sich dies dadurch bemerkbar, dass bei Durchführung des Testes mit „glatten“ Prüfrädern bei sonst gleichen Prüfbedingungen für denselben Schmierstoff bessere Testergebnisse, d. h. höhere Schadenskraftstufen ermittelt werden. Eine Vergleichbarkeit von Testergebnissen ist deshalb nur bei gleichwertigen Testradrauheiten gegeben. Maßgebliche Kenngröße für die Flankenrauheit der Prüfräder ist der Mittelwert der arithmetischen Mittenrauheit R_a von Ritzel und Rad ($R_a = (R_{a1} + R_{a2})/2$). Die R_a -Werte werden für Ritzel und Rad an je drei gleichmäßig am Umfang verteilten Zähnen in Evolventenrichtung in Zahnbreitenmitte gesondert für Rechts- und Linksflanken mittels elektrischem Tastschnittgerät (siehe auch 11.2.1) ermittelt.

Der zulässige Toleranzbereich der Rauigkeitswerte R_a der Zahnflanken liegt bei $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ bis $0,6 \mu\text{m}$ (siehe auch Tabelle 2). Als zu paarende Referenzflanken ist die Kombination zu wählen, bei der sowohl der Mittelwert aus den R_a -Werten von Ritzel und Rad als auch die jeweiligen Einzelwerte von Ritzel und Rad am nächsten am Referenzwert $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ liegen. Damit bilden diese Flanken die Vorflanken und die gegenüberliegende Seite die Rückflanke. Die Testradrauheit ist in jedem Fall zu dokumentieren und bei der Bewertung der Graufleckentragfähigkeit eines Schmierstoffes anzugeben (siehe auch Anhang A und Anhang E).

Tabelle 1 — Geometrische Daten der Testverzahnung C-GF⁴ für den Graufleckentest

Größen nach [2]		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}	$82,460_{-0,087}^0$	mm
	Rad	d_{a2}	$118,360_{-0,087}^0$	mm
Modul		m	4,5	mm
Zähnezahl	Ritzel	z_1	16	–
	Rad	z_2	24	–
Profilver- schiebungsfaktor	Ritzel	x_1	0,181 7	–
	Rad	x_2	0,171 5	–
Eingriffswinkel		α_n	20,0	Grad
		α_{wt}	22,44	Grad
Schrägungswinkel		β	0,0	Grad
Zahnkorrektur		Ohne Kopf- und Fußrücknahme; keine Breitenballigkeit		

4 Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die hier verwendete "C"-Verzahnung im Gegensatz zur bekannten "A"-Verzahnung (= Fressverzahnung) hinsichtlich Gleitgeschwindigkeit ausgeglichen ist, also mehr dem Praxisfall entspricht. Weiterhin hat die "C"-Verzahnung gegenüber der "A"-Verzahnung zur Entlastung der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine eine verringerte Zahnbreite (14 mm statt 20 mm). Dies wird durch die Wahl eines kleineren Hebelarmes (0,35 m statt 0,50 m) bei der Einstellung des Drehmoments berücksichtigt, so dass die Hertzsche Pressung im Wälzpunkt in jeder Kraftstufe im Graufleckentest wieder etwa der Pressung entspricht, die im Fresstest (DIN ISO 14635-1) bei einer gleichbezahlten Kraftstufe erreicht wird. Weitere Unterschiede: Maag Glattschliff mit $R_a = 0,4 \mu\text{m} - 0,6 \mu\text{m}$ in Evolventenrichtung bei Verzahnung "C" statt Maag 20° Kreuzschliff mit $R_a = 0,35 \mu\text{m} - 0,45 \mu\text{m}$ (max. $0,5 \mu\text{m}$) in Breitenrichtung bei Verzahnung "A"; Werkstoff 16MnCr5 bei Verzahnung "C" statt 20MnCr5 bei Verzahnung "A".

Tabelle 2 — Ausführung der Prüfräder Typ „C-GF“

Werkstoff	16MnCr5 nach DIN EN ISO 683-3
Wärmebehandlung	Die Prüfräder werden einsatzgehärtet. Randhärte 750 HV1 [1], im Bereich der Zahnflanke. Einsatzhärtungstiefe $CHD_{550\text{ HV1}}$: 0,8 mm bis 1,0 mm (nach dem Schleifen), Kernfestigkeit 1 000 N/mm ² bis 1 250 N/mm ² . Die Randzone darf keinen im Mikroskop sichtbaren Restaustenitgehalt (< 20 %) aufweisen.
Verzahnungsqualität	5 nach DIN 3962-1 bis DIN 3962-3, $f_f \leq 5\text{ }\mu\text{m}$. Zahnweite Ritzel: $34,779_{-0,135}^{+0,11}$ mm, gemessen über 3 Zähne. Zahnweite Rad: $35,252_{-0,135}^{+0,11}$ mm, gemessen über 3 Zähne. Zulässige Schwankung R_w : jeweils 0,01 mm
Mittenrauheit R_a der Zahnflanken nach DIN EN ISO 4287	(gesondert bestimmt für Rechts- und Linksflanken, gemessen an 3 Flanken je Rad in Evolventenrichtung in Zahnbreitenmitte. Messung entsprechend Abschnitt 11.) Mittlere Rauheit aus drei Messungen wie oben beschrieben: Ritzel: $R_{a1} = 0,50 \pm 0,10\text{ }\mu\text{m}$ Rad: $R_{a2} = 0,50 \pm 0,10\text{ }\mu\text{m}$ 100%-Prüfung aller Testverzahnungen; der Zahnradhersteller liefert alle Räder in den vorgeschriebenen Grenzen. Das Messprotokoll des Zahnradherstellers ist verbindlich.
Schliff	Maag Glattschliff (0°)

7.2 Reinigungsflüssigkeit

Siedegrenzenbenzine nach ASTM D 235.

8 Geräte

8.1 FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine

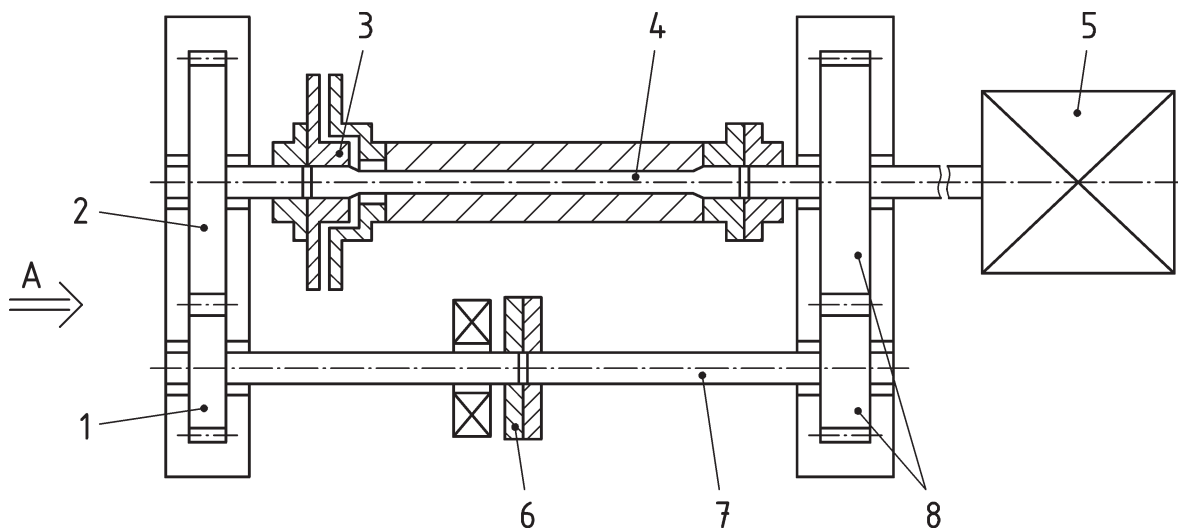
Die FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine ist eine Prüfmaschine mit Leistungskreislauf (siehe Bild 4). Das Übertragungsgetriebe und das Prüfgetriebe sind durch zwei Torsionswellen (nachfolgend nur Wellen genannt) kraftschlüssig verbunden. Auf der Welle 1 befindet sich eine Kupplung zum Aufbringen der Belastung (Belastungskupplung). Das jeweils benötigte Prüfdrehmoment kann auf zwei Arten erzeugt werden. Bei Gewichtsbelastung wird eine Hälfte der Kupplung mittels eines Bolzens arretiert und auf die andere Hälfte der Belastungshebel (hier kurze Ausführung), Gehänge und entsprechende Gewichtsstücke aufgebracht. Die Drehmomente der Belastungshebel und die Gewichtskräfte der Belastungsgewichte sind in Tabelle G.1 zusammengestellt. Das Aufbringen des Prüfdrehmoments mit Spindelbelastung wird im Anhang G näher beschrieben.

Für das hier beschriebene Prüfverfahren gelten folgende Anforderungen:

- Ausführung der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine für den Graufleckentest, wie für den Fresstest nach DIN ISO 14635-1 (Anhang G), jedoch in verstärkter Ausführung und mit Einspritzschmierung.

- Die FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine wird durch einen Elektromotor mit einer Leistung von min. 5,5 kW bei einer Drehzahl von etwa $1\,450\text{ min}^{-1}$ angetrieben.
- Der Durchmesser der Torsionswelle beträgt 20 mm bis 23 mm.
- Die Wellen sind auf Lagern mit Stahlkäfigen gelagert. Auf geeignete Lagerung mit geringer Lagerluft ist zu achten.
- Im Übertragungsgetriebegehäuse kommt eine Schrägverzahnung zum Einsatz. Auf geeignete Lagerung ist zu achten. In Ausnahmefällen ist die Verwendung einer Geradverzahnung im Übertragungsgetriebe auf Kosten der Präzision zulässig. Die Verwendung einer Geradverzahnung im Übertragungsgetriebe ist dann im Prüfzeugnis zu dokumentieren.
- Für die Messung der Anzahl von Umdrehungen in jedem Prüfabschnitt des Prüflaufes ist ein geeigneter Überrollungszähler zu verwenden. Die FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine muss bei einer zutreffenden Anzahl an Umdrehungen zählergesteuert abschalten.

ANMERKUNG Weitere Informationen zur verwendeten FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine sind dem Anhang G zu entnehmen.



Legende

1 Testritzel	5 Elektromotor
2 Testrad	6 Belastungskupplung
3 Torsions-Messkupplung	7 Welle 1
4 Welle 2	8 Übertragungsgetriebe

Bild 4 — Schema der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine