

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
TUM School of Engineering and Design

**Zuverlässige Beurteilung der Zahnrad-Graufleckentragfähigkeit
von Getriebeölen**

Nadine Larissa Sagraloff

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Malte Jaensch, Ph.D.

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl
2. Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht

Die Dissertation wurde am 21.04.2022 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design
am 12.09.2022 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme (FZG) der Technischen Universität München (TUM). Sie basiert auf dem Forschungsvorhaben FVA 779 „Graufleckentragfähigkeit praxisnaher Verzahnungen – Anwendbarkeit des FVA-Graufleckentests als praxisnaher Anwendungstest“ (Kurztitel: Grauflecken-Anwendungstest), welches von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) und der Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) finanziell gefördert wurde.

Mein Dank gilt allen, die im beruflichen sowie im privaten Umfeld zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich:

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl für die Möglichkeit zur Promotion, das entgegengebrachte Vertrauen und die wissenschaftliche Ausbildung.

Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht für die Übernahme des Koreferates und Prof. Malte Jaensch, P.h.D. für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie die angenehme Prüfungsatmosphäre.

Meinem Forschungsgruppenleiter Dr.-Ing. Thomas Tobie für das entgegengebrachte Vertrauen, die Möglichkeit zur fachlichen Weiterentwicklung und die stete Unterstützung im beruflichen Umfeld sowie die zahlreichen hilfreichen Anmerkungen, welche zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Den Mitgliedern des FVA-Arbeitskreises „Schmierstoffe und Tribologie“, die zum Erfolg des Forschungsvorhabens beigetragen haben.

Den Kolleg:innen der FZG aus Werkstatt, Prüffeld, Labor, E-Labor und Verwaltung für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung in vielen fachlichen und organisatorischen Belangen. Besonders hervorzuheben hierbei sind Ingeborg Brodschelm, Marco Breidinger, Reiner Duschek, Franz Hofmann, Heike Preuß, Robert Kiermeier, Kornelia Güth, Cornelia Ambrosch-Fischer und Andrea Baur.

Der studentischen Unterstützung insbesondere durch Franziska Jurosch, Robert Höfer, Gregor Egger und Yves Barth für den langjährigen Einsatz und die zuverlässige Arbeitsweise.

Meinen wissenschaftlichen Kolleg:innen für das gute Arbeitsklima und die gegenseitige Unterstützung sowie der wertvolle fachliche Austausch. Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Johannes König, Dr.-Ing. Michael Hein und Holger Cermak sowie der Segler-Crew bestehend aus Dr.-Ing. Christian Günther, Karl-Jakob Raddatz, Daniel Fuchs, Dominik Kratzer, Dr.-Ing. Christopher Illenberger, Marco Mileti, Benedikt Siewerin und Christian Weber auch für die entstandenen Freundschaften und vielen gemeinsamen Aktivitäten außerhalb der FZG.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, welche mir diesen Weg erst ermöglicht haben, für die immerwährende Unterstützung und den Rückhalt. Mein besonderer Dank gilt meinem lieben Niklas, welcher mit seiner Geduld, Liebe und Unterstützung insbesondere in den letzten Zügen der Promotion mir das Leben sehr erleichtert hat.

Die Zeit an der FZG werde ich in bester Erinnerung behalten.

Nadine Sagraloff

München, im Januar 2023

Kurzfassung

Auftretende Graufleckigkeit führt insbesondere in Industriegetrieben und Windenergieanlagen zu hohen Kosten durch den notwendigen Tausch von betroffenen Zahnrädern. Durch den Einsatz eines Schmierstoffs mit entsprechend hoher Graufleckentragfähigkeit kann Graufleckigkeit maßgebend reduziert bzw. vermieden werden. Deshalb müssen Schmierstoffe hinsichtlich ihrer Graufleckentragfähigkeit, z. B. mit der Testmethode nach FVA 54/7, charakterisiert und freigegeben werden. Diese allgemein anerkannte Prüfmethode wurde vor ca. 30 Jahren insbesondere für Getriebeanwendungen mit Ölen geringer Viskosität bei mittlerer und hoher Umfangsgeschwindigkeit entwickelt. Inzwischen wird der Graufleckentest auch für unterschiedliche und vielfältige Anwendungsbereiche wie z. B. Turbo-, Schiffs-, Industrie-, Windkraft- und Fahrzeuggetriebe genutzt. Zudem können für die Betrachtung von unterschiedlichen Getriebeanwendungen spezielle Bedingungen in einem Praxistest nötig sein, welche bislang nicht mit dem Graufleckentest nach FVA 54/7 abgedeckt sind. Deshalb werden oftmals zusätzliche hausinterne Tests durchgeführt. Das Ziel der Arbeit war es, den Graufleckentest nach FVA 54/7 auf dessen Praxistauglichkeit zu untersuchen sowie die bestehende Prüfmethode weiterzuentwickeln, um eine zuverlässige Prüfmethode zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit für Getriebeöle sicherzustellen. Es konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse aus dem Graufleckentest auf unterschiedliche Anwendungen in der industriellen Praxis übertragen werden können. Zusätzlich wurden wirkungsvolle Maßnahmen zur Vermeidung der Schabe-
marke abgeleitet. Optimierungspotenziale, beispielweise zur Reduzierung des Zeit- und Dokumentationsaufwand des Testverfahrens, und Möglichkeiten für Ergänzungen verschiedener anwendungsspezifischer Prüftemperaturen wurden herausgearbeitet. Eine weitergehende Differenzierung hochtragfähiger Schmierstoffe gegenüber dem Stufentest nach FVA 54/7 wurde nachgewiesen.

Abstract

The occurrence of micro-pitting leads to high costs, especially in industrial gearboxes and wind turbines, due to the necessary replacement of affected gears. By using a lubricant with a high micro-pitting resistance, micro-pitting can be significantly reduced or avoided. For this purpose, lubricants must be characterised and approved with regard to their micro-pitting resistance for example by using the test method according to FVA 54/7. This widely used test method was developed approx. 30 years ago, in particular for gear applications with oils of low viscosity at medium and high circumferential speeds. In the meantime, the micro-pitting test is also used for different and diverse applications such as turbo, marine, industrial, wind power and automotive gearboxes. In addition, special conditions may be necessary in a practical test for the consideration of different gear applications, which have not been covered by the micro-pitting test according to FVA 54/7 so far. Therefore, additional in-house tests are often carried out. The aim of the present work was to examine the micro-pitting test according to FVA 54/7 for its suitability in practice and to further develop the existing test method in order to ensure a reliable test method for determining the micro-pitting resistance of gear oils. It was shown that the results from the micro-pitting test can be transferred to different applications in industrial practice. Furthermore effective measures for avoiding the scrape mark could be shown. In addition, potential for optimisation, e.g. for reducing the time and documentation effort of the test procedure and possibilities for integrating different application-specific test temperatures, were identified. In addition, a further differentiation of high load-carrying lubricants compared to the load stage test according to FVA 54/7 could be shown.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens	3
2.1	Schadensbild und –mechanismus der Graufleckigkeit	3
2.2	Einflussgrößen auf die Graufleckentragfähigkeit	6
2.2.1	Einflussgrößen aus dem Zustand der Zahnflanke	7
2.2.2	Einflussgrößen aus den Betriebsbedingungen	12
2.2.3	Einflussgrößen aus dem Schmierstoff	15
2.3	Testverfahren zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit	16
2.3.1	Graufleckentest nach FVA 54/7 / DIN 3990-16	17
2.3.2	Gegenüberstellung weiterer Graufleckentestverfahren	19
2.4	Berechnungsverfahren zur Graufleckentragfähigkeit.....	20
2.4.1	Berechnungsverfahren nach ISO/TS 6336-22	20
2.4.2	Berechnungsverfahren nach AGMA 06FTM06	22
2.4.3	Berechnungsmethode nach Walkowiak	23
2.4.4	Weitere Berechnungsverfahren	24
2.5	Fazit zum Stand des Wissens.....	26
3	Zielsetzung und Lösungsweg	29
3.1	Zielsetzung der Arbeit	29
3.2	Überblick über den Lösungsweg.....	30
3.3	Detaillierte Darstellung der experimentellen Arbeiten	31
4	Theoretische Untersuchungen	35
4.1	Reduzierung von Zeit- und Dokumentationsaufwand im Dauertest.....	35
4.1.1	Analyse der Graufleckenentwicklung ausgewählter Testergebnisse	35
4.1.2	Entwicklung der Methode zur Extrapolation der Graufleckenentwicklung	36
4.1.3	Validierung der Methode zur Extrapolation der Graufleckenentwicklung	38
4.1.4	Gegenüberstellung der Einteilung in die GF-Klassen nach DIN 3990-16	41
4.2	Reduzierung von Dokumentationsaufwand im Stufentest	42
4.3	Berechnungsstudie zur vergleichender Bewertung von Graufleckentestverfahren .	44
4.3.1	Durchführung der Berechnungen	45
4.3.2	Vergleichende Analyse verschiedener Testverfahren	45
4.3.3	Vergleichende Analyse verschiedener Prüfverzahnungen	47
4.3.4	Vergleichende Analyse verschiedener Prüfbedingungen	53
4.3.5	Fazit der Studie zu Testverfahren, Prüfverzahnungen und Prüfbedingungen.....	56
4.4	Auslegung der Prüfverzahnungen und Festlegung der Prüfbedingungen	58
4.4.1	Theoretische Studie zur Auswahl der Makrogeometrie	59

4.4.2	Theoretische Studie zur Auswahl der Mikrogeometrie	60
4.4.3	Theoretische Studie zur Auswahl der Prüfbedingungen	68
5	Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung	71
5.1	FZG-Zahnradverspannungsprüfstand	71
5.2	Prüfverzahnungen	72
5.3	Versuchsdurchführung	72
5.3.1	Verwendete Drehmomente der erweiterten Kraftstufen im Stufentest	74
5.3.2	Verwendete Drehmomente der Prüfverzahnung IV ($\beta \neq 0$)	74
5.4	Versuchsschmierstoffe	75
5.5	Genauigkeit der Untersuchungen	75
6	Herstellung und Dokumentation der Prüfverzahnungen	79
6.1	Werkzeugdaten und Fertigungsablauf	79
6.2	Werkstoffe und Wärmebehandlungsvorgaben	79
6.3	Messverfahren zur Dokumentation der Prüfverzahnungen	80
6.3.1	Messung der Verzahnungsqualität	81
6.3.2	Messung der Oberflächentopographie	81
6.3.3	Metallographische Untersuchungen	81
6.4	Dokumentation der Verzahnungsqualität	81
6.5	Dokumentation der Oberflächentopographie	83
6.6	Dokumentation des metallographischen Gefügestands	84
6.7	Dokumentation der Schleifbrandprüfung	86
7	Versuchsergebnisse	87
7.1	Untersuchungen zum Werkstoffeinfluss	87
7.2	Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest	89
7.3	Variation der Prüfverzahnung	91
7.4	Variation der Prüfbedingungen	95
7.4.1	Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest	96
7.4.2	Betrachtung ausgewählter industrieller Anwendungsfälle	100
7.4.3	Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke	105
7.4.4	Einfluss der Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest auf den Dauertest	111
8	Auswertung und Diskussion	113
8.1	Bewertung der Praxis-Übertragbarkeit der Ergebnisse des Graufleckentests	113
8.1.1	Einfluss des Werkstoffs	113
8.1.2	Einfluss der Geometrie und des Herstellverfahrens	114
8.1.3	Einfluss der Treibrichtung	116
8.2	Weiterentwicklung des Testverfahrens	117

8.2.1	Begrenzung von Zeit- und Dokumentationsaufwand im Testverfahren.....	117
8.2.2	Berücksichtigung von Anwendungsfällen durch modifizierte Prüfbedingungen	122
8.2.3	Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest.....	124
8.2.4	Auswirkung der Anfangszustände auf die Entwicklung im Einstufenversuch....	126
8.2.5	Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke	128
8.3	Ableitung von Empfehlungen für die zuverlässige Beurteilung von Getriebeölen .	130
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	133
9.1	Zusammenfassung	133
9.2	Ausblick.....	134
10	Literaturverzeichnis	137
A	Anhang.....	1
A.1	Werkzeugdaten.....	1
A.2	Flankenlinien der Prüfverzahnungen C-GF, Variante I, Variante II und Variante III ..	2
A.3	Linienlasten der Varianten für die Auslegung der Prüfverzahnungen.....	3
A.4	Verläufe der Graufleckenfläche und des Masseverlusts.....	7
A.4.1	Theoretische Untersuchungen	7
A.4.2	Experimentelle Untersuchungen	8
A.5	Ergänzende Profilmessschriebe und Zahnflankenfotos.....	17
A.6	Zuordnung der GF-Klassen im Graufleckentest nach DIN 3990-16	18

Nomenklatur

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	mm	Achsabstand
b	mm	Zahnbreite
d	mm	Teilkreisdurchmesser
d _a	mm	Kopfkreisdurchmesser
d _b	mm	Grundkreisdurchmesser
d _{Nf}	mm	Fußnutzkreisdurchmesser
d _w	mm	Wälzkreisdurchmesser
dW/dN	µm/10 ⁶	Örtliche Verschleißrate pro 10 ⁶ Zyklen
f _f	µm	Profilformabweichung
f _{fm}	µm	mittlere Profilformabweichung
f _q	-	Oberflächenparameter nach Hansen [Han21]
g ₀	µm	Unverformte Geometrie
h	µm	Schmierfilmdicke
h ₀	µm	zentrale Schmierfilmdicke
h _{aP0}	mm	Kopfhöhe des Werkzeugs
h _{FfP0}	mm	Fußformhöhe des Werkzeugs
h _m	µm	mittlere Schmierfilmdicke
h _{min}	µm	minimale Schmierfilmdicke
h _ξ	µm	Schmierfilmdicke nach Ertel-Grubin [Ert84, Gru49]
k _S	-	Schmierstoffkennwert
k _w	µm	Werkstoffkennwert
l	mm	Länge
m _n	mm	Normalmodul
n	min ⁻¹	Drehzahl
p _H	N/mm ²	Hertz'sche Pressung
pr	mm	Protuberanzbetrag
r	mm	Radius
r	-	Wiederholbarkeit
u	-	Zähnezahlverhältnis
v	m/s	Geschwindigkeit
v _g	m/s	Gleitgeschwindigkeit

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
V_{pn}	HV	Vickershärte
x	-	Profilverschiebungsfaktor
z	-	Zähnezahl
C_a	μm	Betrag der Kopfrücknahme
C_b	μm	Betrag der Breitenballigkeit
CHD_{550HV1}	mm	Einsatzhärtetiefe mit Härtegrenzwert 550 HV1
C_Y	-	Anzahl der Lastwechsel
G_M	-	Materialparameter
GF	%	Graufleckenfläche
H	HV	Vickershärte
M	-	Gesamtanzahl aller berechneten Schmierfilmdicken
M_p	μm	Formabweichung durch Grauflecken
MP_{rate}	$\mu\text{m}/N_L$	Werkstoffabhängige Verschleißrate
N	-	Lastwechsel
Q	-	Verzahnungsqualität nach DIN 3962 [DIN78a]
R	-	Vergleichbarkeit
R_a	μm	Arithmetischer Mittenrauhwert
R_p	μm	Glättungstiefe
R_{pk}	μm	Reduzierte Spitzenhöhe (Rauheit)
R_{pm}	μm	Mittlere Glättungstiefe
R_q	μm	Quadratische Mittenrauheit
R_z	μm	Gemittelte Rautiefe
S	μm	Rauheitsprofil der Oberfläche
$S_{GF,Y}$	-	Örtlicher Gleitparameter
S_{pk}	μm	3-D Rauheitsparameter (reduzierte Spitzenhöhe)
$S_{\lambda_{min}}$	-	Geforderter Mindest-Sicherheitsfaktor
S_{λ}	-	Graufleckensicherheit (bezüglich relativer Schmierfilmdicke) nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a]
U_e	m/s	Wälzgeschwindigkeit
U_s	m/s	Gleitgeschwindigkeit
U_Y	-	Örtlicher Geschwindigkeitsparameter
V	μm	Elastische Deformation

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
W	mg	Masseverlust
W_Y	-	Örtlicher Belastungsparameter
X	-	Schalter für $\lambda > 3$ in Berechnungsmethode nach Barnett et al. [Bar06]
X_S	-	Schmierfaktorfaktor in Berechnungsmethode ISO/TS 6336-22 [ISO18a]
Z_{GF}	-	Einflussfaktor zur Berücksichtigung von Graufleckigkeit für DIN 3990/ISO 6336 [DIN87a, ISO19b]
α_n	°	Normaleingriffswinkel
α_{pr}	°	Protuberanzwinkel
β	°	Schrägungswinkel
ε_α	-	Profilüberdeckung
ε_R	-	Einlaufgrad
ζ_f	-	Spezifisches Gleiten im Zahnfuß
η	Pa·s	Dynamische Viskosität
$\vartheta_{\text{Öl}}$	°C	Schmierstofftemperatur
λ	-	Spezifische Schmierfilmdicke nach
λ_C	mm	Grenzwellenlänge
λ_{lim}	-	Kritische Schmierfilmdicke
λ_{GF}	-	Berechnete spezifische Schmierfilmdicke
λ_{GFP}	-	Zulässige spezifische Schmierfilmdicke
μ	-	Reibungszahl
ν	mm ² /s	Kinematische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte des Schmierstoffs
ρ	mm	Ersatzkrümmungsradius
ρ_{aP0}	mm	Kopfabrundungsradius des Werkzeugs
ρ_C	mm	Ersatzkrümmungsradius am Wälzkreis
ρ_K	µm	Kopfantenabrundungsradius
σ_H	N/mm ²	Zahnflankenpressung
$3\sigma_{50}$	µm	Rauheitsparameter basierend auf Häufigkeit der Rauheitsspitzen innerhalb von 30s der mittleren Rauheit nach Bell et al. [Bel13]
Λ	-	Spezifische Schmierfilmdicke (berechnet mit R_q)
Λ^*	-	Spezifische Schmierfilmdicke nach Hansen [Han21]

Indizes

1	Ritzel bzw. unterer Wälzkörper	2	Rad bzw. oberer Wälzkörper
C	am Wälzpunkt	L	Bezugsgrößen
f	Zahnfuß	Last	unter Last
max	maximal	min	minimal
n	Bezogen auf Normalschnitt	y	Punkt auf der Eingriffstrecke
Σ	Summe		

Abkürzungen

A99	Anglamol99	PAO	Polyalphaolefin
AW	Anti-Wear	RAG	Restaustenitgehalt
DIN	Deutsches Institut für Normung	PD	Plastic Deformation
DT	Dauertest	PG	Polyglykol
EHD	Elastohydrodynamic Deformation	RIKOR	Ritzel-Korrektur Programm
EHL	Elastohydrodynamic Lubrication	S	Schwefel
EP	Extreme Pressure	SKS	Schadenskraftstufe nach FVA 54/7
ES	Einspritzschmierung	ST	Stufentest
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.	TEHD	Thermo Elastohydrodynamic Deformation
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme	TS	Tauchschmierung
ISO	International Organization for Standardization	VI	Viskositätsindex
ISO VG	ISO-Viskositätsklassifikation	ZF	Zahnradfabrik
KS	Kraftstufe	ZnDTP	Zinkdialkyldithiophosphat
MoDTC	Molybdän-Dithiocarbamat	ZFWP	ZF Wind Power
MIN	Mineralöl	pGFT	Prüfverfahren Graufleckentragfähigkeit
P	Phosphor	ZF-N-PT	ZF-N-Pittingtest
PAE	Produkte, Anwendung, Entwicklung		

1 Einleitung

Insbesondere in Industriegetrieben und Windenergieanlagen müssen Zahnräder aufgrund von auftretender Graufleckigkeit häufig getauscht werden. Der Wechsel von betroffenen Zahnrädern führt zu hohen Kosten und wird deshalb unter vielen verschiedenen Blickwinkeln untersucht. Die Relevanz dieser Thematik insbesondere in der praktischen Anwendung zeigt die Fülle von Veröffentlichungen zu dieser Thematik. [Bee10, Cla16, Din11, Lit12, McG19, Mic11, Mor17, O'CO3, Oil05b, Raj21, Sol19, Vrc19b]

Graufleckigkeit ist eine Ermüdungserscheinung. Das Auftreten von Graufleckigkeit ist maßgeblich von der Beschaffenheit der Zahnflanke, den vorherrschenden Betriebsbedingungen und dem verwendeten Schmierstoff abhängig. Durch Einsatz eines Schmierstoffs mit entsprechend hoher Graufleckentragfähigkeit kann unter Beachtung der weiteren Rahmenbedingungen das Auftreten von Graufleckigkeit maßgebend reduziert bzw. vermieden werden. [Sch99b]

Der Einsatz hochleistungsfähiger Schmierstoffe kann somit kostenintensive Maßnahmen, wie beispielsweise die Feinbearbeitung oder Beschichtung der Zahnflanken ersetzen bzw. reduzieren. Aus diesem Grund ist es notwendig, Schmierstoffe hinsichtlich ihrer Graufleckentragfähigkeit unter geeigneten Prüfbedingungen zu testen.

Der Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] dient als allgemein anerkannte Prüfmethode zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen und wird häufig als Freigabetest für die industrielle Anwendung von Getriebeölen verwendet. Dieses Prüfverfahren wurde vor ca. 30 Jahren insbesondere für Getriebeanwendungen mit Ölen geringer Viskosität bei mittlerer und hoher Umfangsgeschwindigkeit entwickelt. Inzwischen wird der Graufleckentest auch für unterschiedliche und vielfältige Anwendungsbereiche wie z. B. Turbo-, Schiffs-, Industrie-, Windkraft- und Fahrzeuggetriebe genutzt.

Für die Betrachtung von unterschiedlichen Getriebeanwendungen können ggf. spezielle Bedingungen in einem Praxistest nötig sein. Für Anwendungen, bei welchen dies nicht vollständig durch den Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] abgedeckt wird, werden in der Industrie oftmals zusätzliche hausinterne Verfahren z.B. von Flender oder ZF Group [Fle97, Lit12] durchgeführt. Dies führt zu einem erhöhten zeitlichen Aufwand sowie Kosten und unterstreicht die Relevanz nach einer zuverlässigen Beurteilung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen.

2 Stand des Wissens

Im Folgenden wird auf den Stand des Wissens zu Schadensbild und –mechanismus der Graufleckigkeit sowie den Einflussgrößen auf die Graufleckentragfähigkeit eingegangen. Zudem werden verschiedene Testverfahren zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit und unterschiedliche Berechnungsmethoden dargestellt. Abschließend wird ein Fazit zum Stand des Wissens gezogen.

2.1 Schadensbild und –mechanismus der Graufleckigkeit

Graufleckigkeit kann allgemein an wälzbeanspruchten, geschmierten Kontaktpartnern auftreten und ist optisch als zusammenhängende mattgraue Oberfläche erkennbar. Sie entsteht insbesondere an hochbelasteten, einsatzgehärteten, aber auch an hochvergüteten oder nitrierten Zahnflanken. Kleinste Ausbrüche an der Oberfläche im Mikrometerbereich führen zum Materialabtrag. Bei zunehmendem Materialabtrag entstehen Auskolkungen, welche die Profilform verändern. [Sch81]

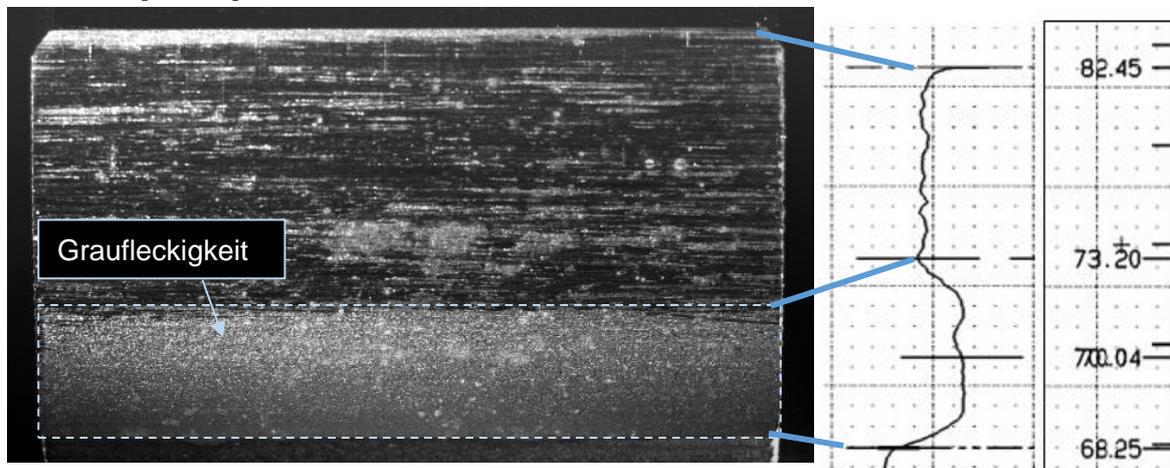


Bild 2-1: Graufleckigkeit auf der Zahnflanke eines einsatzgehärteten Zahnrads (links) und exemplarischer Profilmessschrieb [Mül21]

Diese Profilformabweichung und die daraus resultierende charakteristisch Schadensausprägung sind in Bild 2-1 beispielhaft dargestellt.

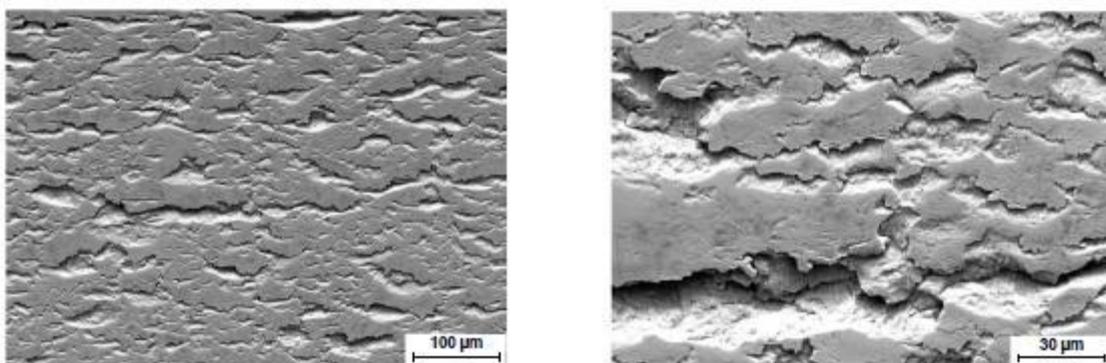


Bild 2-2: 250-fache (links) und 950-fache (rechts) Vergrößerung einer graufleckigen Zahnflanke [Fel18]

Bild 2-2 zeigt die 250- bzw. 950-fache Vergrößerung einer graufleckigen Zahnflanke. Es sind die typischen porenartigen Ausbrüche zu sehen, welche durch den englischen Namen „Micro-pitting“ (zu Deutsch: Mikro-Grübchen) treffend beschrieben werden. Die porenartigen Ausbrüche entstehen durch eine Vielzahl von oberflächennahen Rissen. Diese Risse sind klein und

wachsen nicht zwingend weiter in das Material hinein. Sie stagnieren oder wachsen zurück zur Oberfläche. Dies führt zu kleinen Ausbrüchen, welche typischerweise 10 - 20 µm tief in das Material hineinreichen. Deshalb spricht man bei Graufleckigkeit auch von einem ermüdungsbedingten Materialabtrag. [Sch99b]

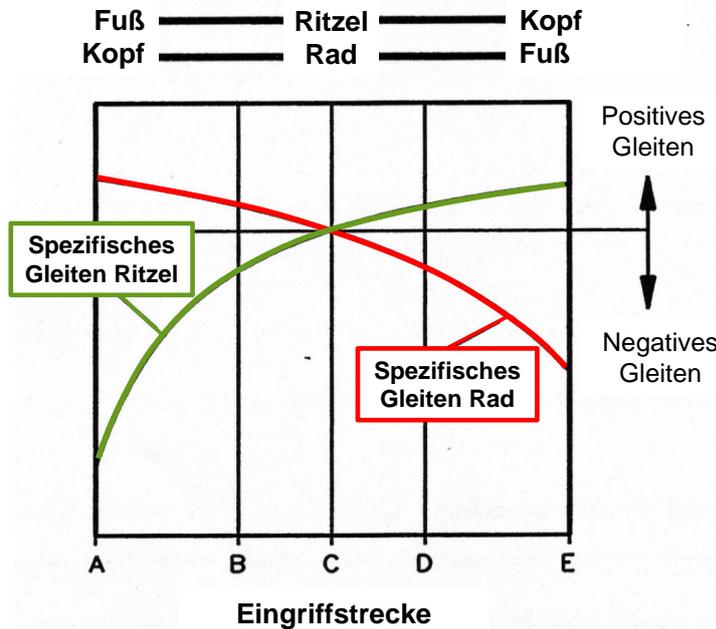


Bild 2-3: Gleitanteile über die Eingriffstrecke an Ritzel und Rad [Lin10]

Die Graufleckenbildung findet zudem unter ungünstigen Schmierbedingungen (s. Kapitel 2.2) und bevorzugt im Bereich negativen spezifischen Gleitens statt. In Bild 2-3 sind die Gleitverhältnisse für ein außen- und geradzahnantes Zahnradpaar mit treibenden Ritzel dargestellt. Das spezifische Gleiten ζ ist am Rad und am Ritzel jeweils im Flankenbereich unterhalb des Wälzpunktes negativ und oberhalb des Wälzpunktes positiv. Dies ist unabhängig von der Treibrichtung. [Sch99b]

durch die jeweilige Gleitgeschwindigkeit $v_{g,Y,1/2}$ und die jeweilige Tangentialgeschwindigkeit $v_{T,Y,1/2}$ an diesem Punkt definiert. Die Gleitgeschwindigkeit wird anhand der Tangentialgeschwindigkeiten von Ritzel und Rad berechnet. Die Gleitgeschwindigkeit am Ritzel $v_{g,Y,1}$ kann nach Formel (2-2) und am Rad $v_{g,Y,2}$ nach Formel (2-3) berechnet werden. [Nie83]

Das spezifische Gleiten $\zeta_{Y,1/2}$ an einem beliebigen Punkt am Ritzel oder am Rad ist nach Formel (2-1)

$$\zeta_{Y,1/2} = \frac{v_{g,Y,1/2}}{v_{T,Y,1/2}} \tag{2-1}$$

$$v_{g,Y,1} = v_{T,Y,1} - v_{T,Y,2} \tag{2-2}$$

$$v_{g,Y,2} = v_{T,Y,2} - v_{T,Y,1} \tag{2-3}$$

Anschaulich betrachtet nach Bild 2-4 wird die Gleitgeschwindigkeit am treibenden Partner und damit auch das spezifische Gleiten

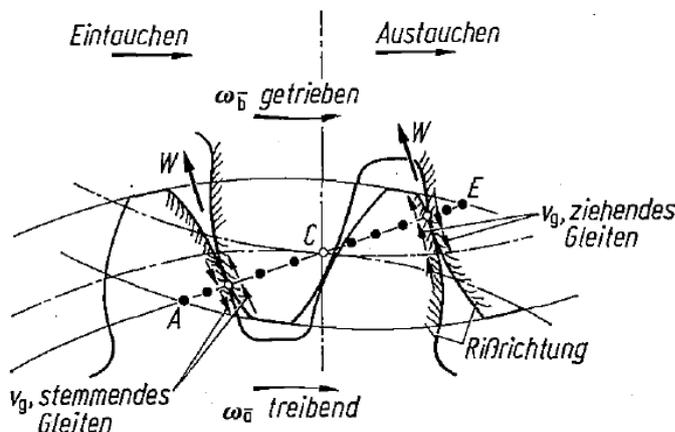


Bild 2-4: Ziehendes und stemmendes Gleiten im Zahneingriff an einem außenverzahnten Stirnradpaar [Nie83]

negativ, wenn die Tangentialgeschwindigkeit am treibenden Partner betragsmäßig kleiner ist als am getriebenem Gegenrad. Es sind zudem die Bereiche des stemmenden und ziehenden Gleitens auf der Eingriffstrecke veranschaulicht. Das stemmende Gleiten tritt im Eingriffsbereich im Zahnfußbereich des treibenden Partners und im Zahnkopfbereich des Gegenrades auf. Dementsprechend findet das ziehende Gleiten am Eingriffsende im Zahnkopfbereich des treibenden Partners und im Zahnfußbereich des Gegenrades statt. [Nie83]

damit auch das spezifische Gleiten negativ, wenn die Tangentialgeschwindigkeit am treibenden Partner betragsmäßig kleiner ist als am getriebenem Gegenrad. Es sind zudem die Bereiche des stemmenden und ziehenden Gleitens auf der Eingriffstrecke veranschaulicht. Das stemmende Gleiten tritt im Eingriffsbereich im Zahnfußbereich des treibenden Partners und im Zahnkopfbereich des Gegenrades auf. Dementsprechend findet das ziehende Gleiten am Eingriffsende im Zahnkopfbereich des treibenden Partners und im Zahnfußbereich des Gegenrades statt. [Nie83]

Untersuchungen von Clarke et al. [Cla16] zeigen, dass die charakteristische Rissorientierung in oberflächennahen Bereichen gegen die Gleitrichtung angeordnet ist. In Bild 2-5 ist rechts eine Nahaufnahme eines Risses einer mit Grauflecken behafteten Oberfläche zu sehen. Dieser Zusammenhang von oberflächennahen Rissen und Gleitrichtung wurde von Brecher [Bre17] bereits festgestellt. Bild 2-5 zeigt auf der linken Seite eine solche Rissorientierung für ein treibendes Ritzel.

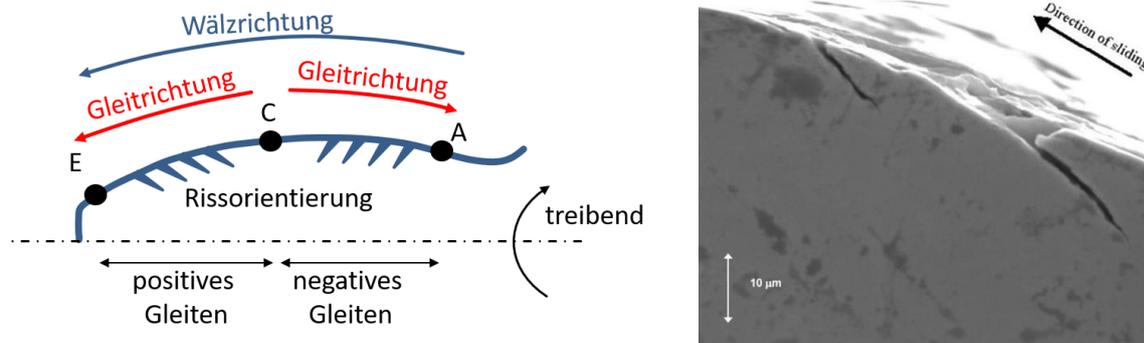


Bild 2-5: Rissorientierung am treibenden Ritzel nach Brecher [Bre17] (links) und Nahaufnahme eines Risses einer graufleckigen Zahnflanke unter Beachtung der Treibrichtung [Cla16] (rechts)

In den Untersuchungen von Clarke et al. [Cla16] wurde zudem die plastische Verformung, die in der Anfangsphase des Einlaufens von Zahnrädern stattfindet, und deren Auswirkung auf Graufleckigkeit untersucht. Es wurde gezeigt, dass Effekte auftreten, die zu einer frühen Bildung von oberflächeninitiierten Rissen beitragen können. [Cla16]

Erichello [Err12] vertritt die Theorie, dass Graufleckigkeit an Stellen, die aus der übrigen Zahnoberfläche hervorragen, entsteht oder an Bereichen, an welchen der Schmierfilm unterbrochen wird. Als Beispiel für solche Bereiche gelten die Ränder von Schleifriefen oder Formabweichungen. [Err12]

Im Bereich negativen spezifischen Gleitens tritt beim Überrollen Schmierstoff in bereits vorhandene Anrisse in der Zahnoberfläche ein und erzeugt dabei hydraulischen Druck. Der Theorie nach Erichello [Err12] zur Folge, erfolgt durch den hydraulischen Druck eine zusätzliche Belastung, welche das Risswachstum und folglich auch die Ausbildung von Graufleckigkeit beschleunigt.

Graufleckigkeit tritt zumeist im Bereich des Eingriffsbeginns auf und wächst von dort in Richtung des Wälzpunkts [Err12, Sch99b]. Der kritische Bereich für die Graufleckenbildung ist unter Anderem abhängig von der Pressungsverteilung [Sch99b]. Diese und weitere Einflussgrößen auf die Grauflecken­tragfähigkeit sind unter 2.2 näher beschrieben.

Mit zunehmender Laufzeit kann sich die Graufleckigkeit über die gesamte Zahnflanke ausbreiten. Die entstehenden Auskolkungen mindern in der Regel die Qualität der Verzahnung. [Sch81]

Graufleckigkeit führt zu höheren Reibungskoeffizienten und damit zu einem ungünstigerem Wirkungsgrad und Temperaturverhalten [Tou21, Tou20]. Zudem nehmen die dynamischen Zusatzkräfte sowie Getriebegeräusche zu. Nicht zuletzt kann Graufleckigkeit zur Grübchenbildung führen. [Sch81]

Hergesell [Her12] und Felbermaier [Fel18] untersuchten ausführlich den Einfluss der Graufleckigkeit auf die Grübchentragfähigkeit und leiteten eine erweiterte Modellvorstellung zur Grauflecken- und Grübchenbildung ab. Es konnte ein Einflussfaktor Z_{GF} zur Berücksichtigung des Einflusses der Graufleckigkeit auf die Grübchentragfähigkeit erarbeitet werden, welcher auf

die Normrechnungen nach DIN 3990 / ISO 6336 [DIN87a, ISO19b] anwendbar ist, aber bisher noch nicht integriert wurde.

König [Kön20] untersuchte, ob bei vorhandener Graufleckigkeit das Auftreten von Grübchen durch einen Schmierstoffwechsel gemindert werden kann. Es zeigte sich, dass der negative Einfluss vorliegender Graufleckigkeit durch einen Schmierstoffwechsel nur dann vollständig gemindert werden kann, wenn kein weiteres Wachstum der Graufleckigkeit auf den Zahnflanken stattfindet. Das weitere Wachstum der Graufleckigkeit ist abhängig davon, ob eine maßgebende Ermüdung von Werkstoffbereichen unterhalb der Oberfläche bereits während der vorliegenden Graufleckenbildung aufgetreten ist.

Graufleckigkeit kann ebenfalls an Wälzlagern beispielsweise in Windkraftgetrieben insbesondere an langsam laufenden Stufen auftreten [Bon13]. Bild 2-6 zeigt Graufleckigkeit an einem Pendelrollenlager.



Bild 2-6: Graufleckigkeit auf der Laufbahn eines Pendelrollenlagers [FAG06]

In FVA 627/I [Bon13] wurde die Graufleckigkeit an Axialzylinderrollenlagern untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Graufleckenentstehung maßgeblich vom eingesetzten Additiv abhängt. Die Graufleckigkeit trat nur unter Mischreibungsbedingungen auf. Die Ausprägung der Graufleckigkeit nahm mit steigender Kontaktpressung und einer abnehmenden spezifischen Schmierfilmdicke weiter zu. [Bon13]

Im Folgeprojekt FVA 627/II [Ber18] wurden die Mechanismen weiter untersucht und es erfolgten Untersuchungen zur Erarbeitung einer Testmethodik zur Bestimmung der Wälzlagern-Graufleckigkeit. Es hat sich gezeigt, dass eine hohe Oberflächenrauheit die Graufleckenbildung begünstigt. Bei Erhöhung des Schlupfs wurde kein Anstieg der Graufleckigkeit festgestellt. Dies entspricht nicht den Erwartungen, da in Zweischeibenversuchen gezeigt wurde, dass bei Zunahme von Schlupf mehr Graufleckigkeit auftritt [Sch99b]. Zudem wurde in FVA 627/II [Ber18] dargelegt, dass die Graufleckigkeit in den untersuchten Verzahnungen insgesamt signifikant stärker ausgeprägt war als in den untersuchten Wälzlagern. Es wurde deutlich, dass die Prüfung hinsichtlich Graufleckentragfähigkeit anhand von Zahnrädern kritischer ausfällt als die Prüfung an Wälzlagern. [Ber18]

2.2 Einflussgrößen auf die Graufleckentragfähigkeit

Graufleckigkeit tritt in einem tribologischen System zwischen den Zahnflanken und dem sich dazwischen befindenden Schmierstoff auf. Die Schmierfilmdicke bildet dabei eine Haupteinflussgröße, welche rechnerisch erfasst werden kann. Voraussetzung für die Bewertung der Graufleckentragfähigkeit ist ein Testergebnis, z.B. aus dem Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93], welches als zulässige minimale Schmierfilmdicke in die Berechnung der Grauflecken-sicherheit nach Schrade [Sch99b] eingeht.

Schrade [Sch99b] teilt die Einflussgrößen auf die Graufleckentragfähigkeit in drei Gruppen auf, welche in Bild 2-7 dargestellt sind. Diese sind der Schmierstoff, die Betriebsbedingungen und Einflüsse, die den Zustand der Zahnflanke charakterisieren. Der Einfluss des Schmierstoffs

lässt sich aufteilen in das System bestehend aus Grundöl und Additivierung sowie die Nennviskosität. Zu den Betriebsbedingungen zählen die Belastung, die Betriebstemperatur und die Umfangsgeschwindigkeit. Unter den maßgebenden Eigenschaften der Zahnflanke werden die Rauheit, die Verzahnungsgeometrie, die Baugröße, der Werkstoff und das Fertigungsverfahren zusammengefasst. Die Einflussgrößen, welche aus experimentellen Untersuchungen bestimmt wurden, werden im Folgenden näher beschrieben.

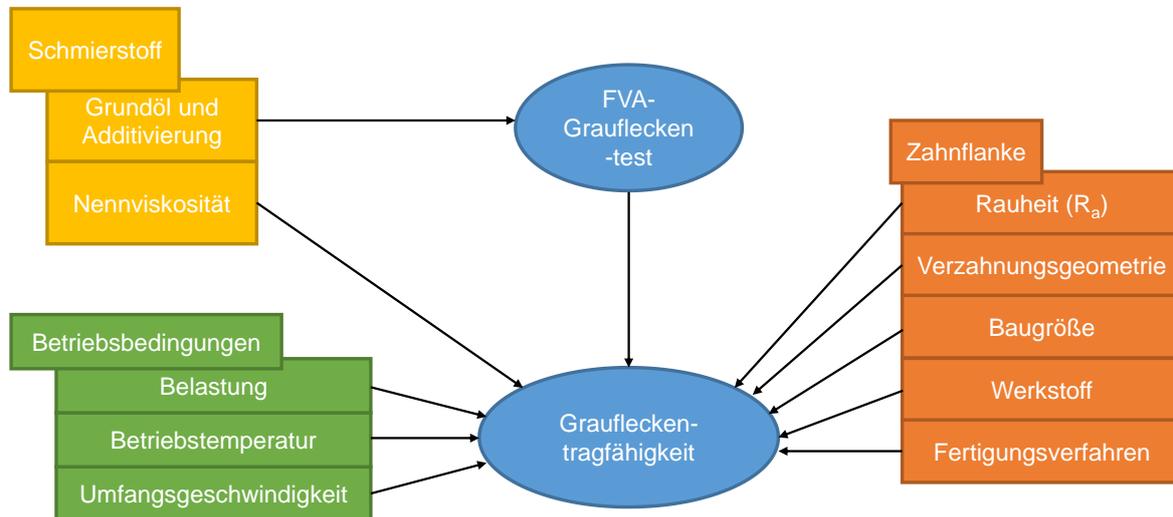


Bild 2-7: Einflussgrößen auf die Graufleckentragfähigkeit nach Schrade [Sch99b]

2.2.1 Einflussgrößen aus dem Zustand der Zahnflanke

Die Zahnflankenrauheit stellt neben dem Schmierstoff den größten Einflussfaktor auf die Graufleckbildung dar. Der Einfluss der Rauheit wird mit steigender Schmierstoffviskosität aufgrund der größeren Schmierfilmdicke kleiner. Eine höhere gemittelte Rauheit der Paarung führt zu einer Abnahme der Graufleckentragfähigkeit. [Emm93, Vol91]

Paarungen mit Zahnrädern gleicher Rauheit führen zu einer höheren Graufleckentragfähigkeit als Paarungen mit stark unterschiedlichen Zahnflankenrauheiten. Sind Zahnräder mit stark abweichenden Rauheiten im Eingriff, so tritt die Graufleckigkeit bevorzugt am Gegenrad des Partners mit dem höheren Rauheitswert auf. Die Graufleckigkeit wird durch die Rauheit des Gegenrades somit stärker beeinflusst, als durch die Rauheit des Rades selbst. [Her12, Sch99b]

Bei Berührung von Rauheitsspitzen der Kontaktpartner verformen sich diese bzw. scheren sich ab. Deshalb ist insbesondere die Anfangsrauheit der Zahnflanken für die Schadensintensität von großer Bedeutung. [Sch84]

Als charakteristische Kenngröße für die Rauheit wurde von Schönnenbeck [Sch84] der arithmetische Mittenrauhwert R_a eingeführt, da für die Schadensentwicklung der Graufleckigkeit entsprechend der Definition nicht ein Extremwert, sondern ein Mittelwert maßgeblich ist. Eine gleichmäßig dichte Anzahl von schadensauslösenden Stellen auf der Zahnflanke führen zu Graufleckigkeit. [Sch84]

In Untersuchungen von Bell et al. [Bel13] wurden unterschiedliche Rauheitsparameter untersucht, welche die Oberfläche von Zahnrädern oder Wälzlagern charakteristisch beschreiben. Es wurde neben den üblicherweise herangezogenen Rauheitsparametern R_a , R_q , R_z und R_{pm} ein weiterer Rauheitsparameter $3_{\sigma 50}$ verwendet, um insbesondere hochfeine Oberflächen zu beschreiben. Die Studie ergab, dass die Parameter $3_{\sigma 50}$ und R_{pm} am besten geeignet sind

Oberflächenrauheitsprofile zu beschreiben. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Oberflächen geschliffen, gehont und hochfeinbearbeitet wurden. [Bel13]

Prajapati et al. [Pra20] führten experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung von Graufleckigkeit und verschiedenen Topographieparametern durch. Es konnte eine deutliche Verschlechterung der Oberflächentextur nach 6 Millionen Lastwechseln festgestellt werden.

Die Oberflächen-Rauheit von Kontaktpartnern sowie ihre genaue Beschaffenheit hat zudem eine große Auswirkung auf den Schmierfilmaufbau [Han21, May13].

In Untersuchungen von Hansen [Han21] konnte gezeigt werden, dass Oberflächen mit einer quer zum Schmierstoffeintrag ausgerichteten Rauheitsstruktur einen besseren Schmierfilmaufbau zeigen, als eine längs zum Schmierstoffeintrag ausgerichteten Rauheitsstruktur oder isotropen Rauheitsstruktur. Es wurde dennoch festgestellt, dass Oberflächen mit einer quer zum Schmierstoffeintrag ausgerichteten Rauheitsstruktur schneller zu Graufleckigkeit führen als Oberflächen mit längs zum Schmierstoffeintrag ausgerichteten Rauheitsstruktur. [Han21]

Emmert [Emm93] belegte einen positiven Einfluss der Kopfrücknahme auf die Grauflecken-tragfähigkeit. Dies lässt sich auf die Entlastung der graufleckengefährdeten Bereiche der Zahnflanke sowie der Reduzierung des vor- und nachzeitigen Eingriffs zurückführen. Durch die Kopfrücknahme wird das Auftreten der Schabemarke reduziert [Liu03].

Nazifi [Naz10a] untersuchte den Einfluss von Kopfkantenabrundungen auf das Schaben während des vorzeitigen Eingriffs. Durch die verwendete Kopfkantenabrundung in Verbindung mit

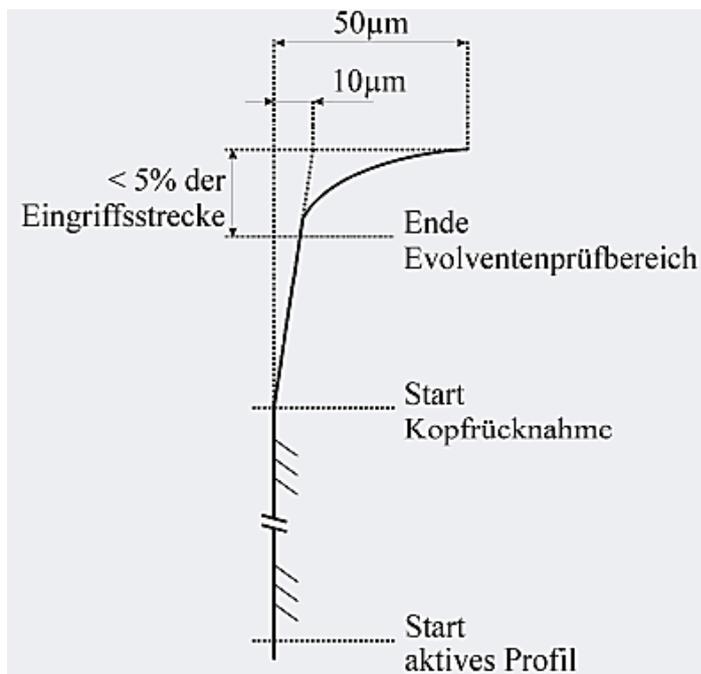


Bild 2-8: Verwendete lineare Kopfrücknahme mit einer überlagerten Kopfabrundung mit $m_n = 4,5 \text{ mm}$ in FVA 286 II [Naz10b]

einer Kopfrücknahme, welche schematisch in Bild 2-8 dargestellt ist, konnte das Schaben reduziert und somit die Schmierung im Eingriffsbeginn verbessert werden. Die Untersuchungen erfolgten hauptsächlich an großen Baugrößen ($m_n = 22 \text{ mm}$). Es wurden zusätzlich vergleichende Untersuchungen mit mittleren Baugrößen ($m_n = 4,5 \text{ mm}$) durchgeführt. Für die Untersuchungen an den mittleren Baugrößen wurde für die Kopfkantenabrundung ein Radius $\rho = 50 \mu\text{m}$ verwendet. Um den Einfluss der Kopfkantenabrundung auf den Pressungsverlauf möglichst klein zu halten, wurde die Länge der zusätzlichen Korrektur sehr klein gewählt (s. Bild 2-8). [Naz10b]

Bei Reduzierung der Hertz'schen Pressung im Bereich des Eingriffsbeginns und –endes durch Kopf- oder Fußrücknahmen, erhöht sich im Gegenzug die Hertz'sche Pressung an einem weiteren eingegriffenen Zahnpaar. Um die Grauflecken-tragfähigkeit zu steigern, muss die unvermeidliche Pressungserhöhung in einem wenig graufleckengefährdeten Bereich gelegt werden. Im Einzeleingriffsgebiet bleibt die Hertz'sche Pressung weitgehend unbeeinflusst von der Kopf- oder Fußrücknahme. [Sch99b]

Lohmann [Loh16a] untersuchte rechnerisch den Einfluss unterschiedlicher Variationen der Kopfkorrekturgestaltung auf die Graufleckigkeit anhand von Geradverzahnungen mittlerer und großer Baugröße ($m_n = 4,5$ mm und $m_n = 22$ mm). Er empfiehlt zur Reduzierung von Graufleckigkeit einen hohen Kopfrücknahmebetrag, einen weichen Übergang und einen großen Kopfeckradius. Der Kopfrücknahmebetrag sollte mindestens $C_a = 5 \cdot m_n/1000$ betragen. Der Kopfeckradius liegt idealerweise zwischen $m_n/2$ und m_n und ist mit einer Länge von $l \approx m_n/5$ im Zahnkopf begrenzt.

Bei mittel- und großmoduligen Verzahnungen ($m_n = 4,5$ mm und $m_n = 22$ mm) konnte der graufleckenmindernde Einfluss der Kopfrücknahme von Lützig [Lüt07] bestätigt werden. Bei großen Kopfrücknahmebeträgen fällt die Profilformabweichung zunächst geringer aus als bei kleinen Beträgen. Ab einem gewissen Betrag der Kopfrücknahme lässt sich dieser Effekt nicht weiter steigern. Bei großmoduligen Verzahnungen zeigt sich die Abnahme der Graufleckigkeit besonders deutlich.

Schrade [Sch99b] untersuchte den Einfluss des Moduls auf die Graufleckentragfähigkeit. Um die Graufleckentragfähigkeit zu bewerten, legt er die Schadensgrenze für die Standardbaugröße mit Achsabstand $a = 91,5$ mm und Modul $m_n = 5$ mm analog zur Schadensgrenze im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] auf eine Profilformabweichung $f_{fm} = 7,5$ μm fest. Da die dynamische Wirkung einer Profilformabweichung durch Auskolkung von ihrer Größe im Vergleich zur Zahnverformung unter Last abhängt, wurde die Schadensgrenze ausgehend von der Schadensgrenze im Graufleckentest nach FVA54/7 proportional zum Modul ($f_{fm} = 7,5$ $\mu\text{m} \cdot (m_n/5$ mm)) umgerechnet. Mit diesem Vorgehen konnte gezeigt werden, dass mit einem steigenden Modul von $m_n = 3,75$ mm auf $m_n = 10,93$ mm geometrisch ähnlicher Verzahnungen die Schadenskraftstufe beziehungsweise Graufleckentragfähigkeit mit einer degressiven Steigung zunimmt. Schrade begründet den Einfluss des Moduls auf die Graufleckentragfähigkeit mit den Einflüssen der Umfangsgeschwindigkeit und Betriebstemperatur auf die Schmierfilmdicke, Verlustleistung und Wärmeabfuhr. Durch die größere Baugröße nimmt die Umfangsgeschwindigkeit bei konstanter Drehzahl zu und somit die isotherm berechnete Schmierfilmdicke zu. Die zur Wärmeabfuhr vorhandene Fläche vergrößert sich linear, während die übertragbare Leistung und damit die Verlustleistung bei konstanter zulässiger Hertz'scher Pressung und bei konstanter Zahnbreite quadratisch zunimmt. Als Folge weisen größere Getriebe bei gleicher spezifischer Nenn-Belastung höhere Betriebstemperaturen auf. Der Gewinn der höheren Schmierfilmdicke durch die erhöhte Umfangsgeschwindigkeit wird durch die höheren Betriebstemperaturen reduziert.

In Untersuchungen von Haske [Has00] und Lützig [Lüt07] mit geometrisch ähnlichen Verzahnungen der Baugröße Normalmodul $m_n = 4,5$ mm und $m_n = 22$ mm wurde ebenfalls deutlich, dass mit steigendem Modul die Profilformabweichung in der Regel weniger als modulproportional zunimmt. Eine Erhöhung des Normalmoduls geht folglich mit einer Zunahme der Graufleckentragfähigkeit einher. Predki et al [Pre10] bestätigen dies und zeigen zudem, dass das Schmierstoffverhalten und der Einfluss der Oberflächenrauheit auf das Graufleckenverhalten bei Verzahnungen mit einem großen Modul $m_n = 22$ mm vergleichbar ist zu Verzahnungen mit $m_n = 4,5$ mm.

Hergesell [Her12] zeigt in theoretischen und experimentellen Untersuchungen anhand von Zahnrädern mit $m_n = 0,6$ mm und $m_n = 0,45$ mm, dass mit abnehmender Baugröße eine höhere Graufleckenbildung vorliegt. Die erhöhte Graufleckenbildung lässt sich mit der geringeren Umfangsgeschwindigkeit bei kleiner Baugröße und konstanter Drehzahl begründen.

Graufleckigkeit tritt bevorzugt im Bereich negativen spezifischen Gleitens auf. Bei langen Fußeingriffsstrecken wird der Bereich des negativen spezifischen Gleitens vergrößert, was sich ungünstig auf die Graufleckentragfähigkeit auswirkt. Mit einer positiven Profilverschiebung kann der längeren Fußeingriffsstrecke und somit der ungünstigen Graufleckentragfähigkeit entgegengewirkt werden. Zusätzlich vergrößert sich bei einer positiven Profilverschiebung der Krümmungsradius der Zahnflanke und die Hertz'sche Pressung wird verringert. Dies führt zu einer Zunahme der Graufleckentragfähigkeit. [Sch99b]

In Untersuchungen von Schönnenbeck [Sch84] unterschiedlicher Werkstoffvarianten trat an den Werkstoffvarianten 16MnCr5, 17CrNiMo6 und 18NiCrMo14 eine tendenziell niedrigere Graufleckentragfähigkeit als bei der Werkstoffvariante 15CrNi6 auf. Ein Einfluss der hier vorliegenden streuenden Fertigungsqualität war nicht auszuschließen. Emmert [Emm93] zeigte nachträglich, dass der festgestellte Einfluss auf die Zahnflankenrauheit zurück zuführen war und die Werkstoffvarianten 16MnCr5 und 15CrNi6 hinsichtlich Graufleckigkeit gleichwertig sind.

Von Bongardt et al. [Bon13] wurden Untersuchungen an Verzahnungen aus dem Werkstoff 100Cr6, welcher typischerweise als Wälzlagerstahl verwendet wird, durchgeführt. Es waren Unterschiede im Vergleich zum Werkstoff 16MnCr5 lediglich im Bereich der Versuchsstreuung zu erkennen.

Bezüglich der Graufleckentragfähigkeit zeigte sich bei den Untersuchungen von Schönnenbeck [Sch84] ein geringfügig positiver Einfluss eines hohen Restaustenitgehalts (RAG) von $RAG > 50\%$ bei der Werkstoffvariante 15CrNi6. Bild 2-9 fasst die Untersuchungen zum Werkstoffeinfluss von Schönnenbeck [Sch84] zusammen.

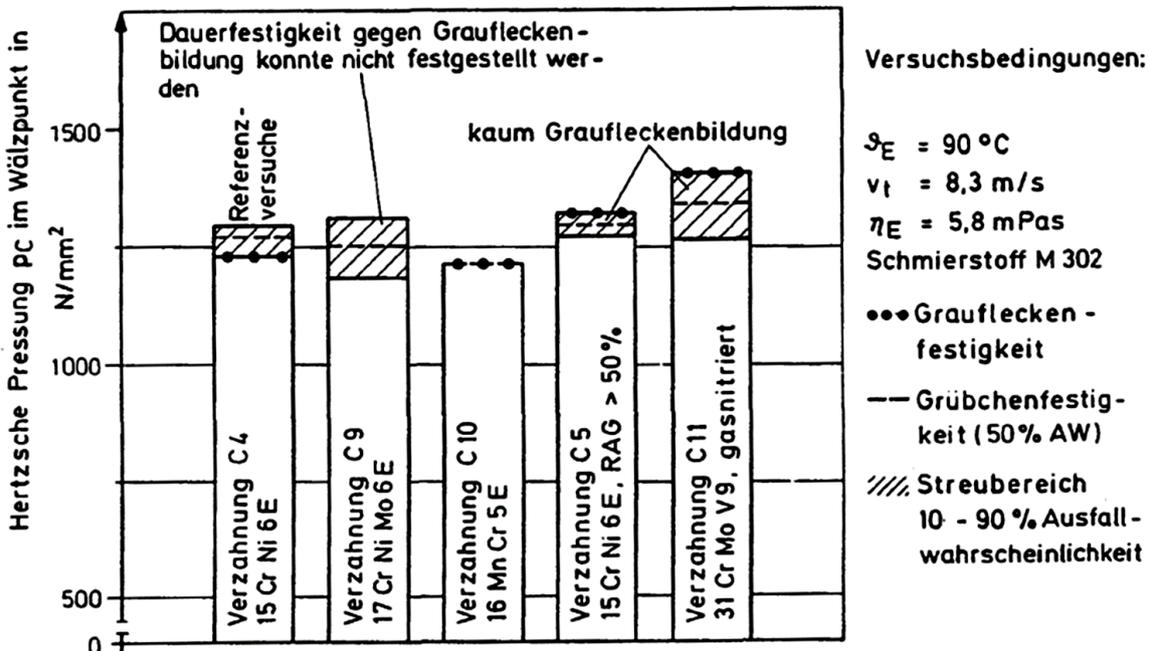


Bild 2-9: Einfluss verschiedener Werkstoffe auf die Dauertestigkeit aus Untersuchungen von Schönnenbeck [Sch84]

Durch einen höheren Restaustenitanteil wird die Härte reduziert und die Zähigkeit erhöht. Dies führt zum Abbau von Spannungsspitzen und wirkt sich somit für Anteile von 20...30 % günstig auf die Graufleckentragfähigkeit aus. [Nie83]

Oila et al. [Oil03, Oil05a] zeigen, anhand von Untersuchungen mit zwei verschiedenen Stählen, dass die Ausbreitung von Graufleckigkeit bei Stahl mit einer stärker ausgeprägten Martensit-Umwandlung signifikant höher ausfällt. In einer weiteren Studie [Oil05b] wurden eine Reihe von metallografischen Untersuchungen an graufleckigen Zahnrädern durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die Entstehung und Ausbreitung von Rissen, die zur Bildung von mikroskopischen Ausbrüchen führen, mit den Phasenumwandlungen von Martensit zusammenhängen.

In Untersuchungen von Schönnenbeck [Sch84] wies die gasnitrierte Werkstoffvariante 31CrMoV9 eine höhere Graufleckentragfähigkeit als die einsatzgehärtete Werkstoffvariante 15CrNi6 auf. Emmert [Emm93] zeigte eine deutlich höhere Graufleckentragfähigkeit bei gasnitrierten Prüfrädern aus 31CrMoV9 als bei einsatzgehärteten Prüfrädern aus 16MnCr5. In metallografischen Untersuchungen wird deutlich, dass die Rissbildung durch die Verbindungsschicht der gasnitrierten Prüfräder vermieden wird. Zornek et al. [Zor17] bestätigten den positiven Einfluss einer Nitrierbehandlung auf die Graufleckentragfähigkeit. Zur Steigerung der Graufleckentragfähigkeit sind vor allem die Eigenschaften der Verbindungsschicht maßgebend.

Zwischen den Werkstoffvarianten 16MnCr5 und 17CrNiMo6 konnte bezüglich der Graufleckentragfähigkeit in Untersuchungen von Lützig [Lüt07] kein Unterschied festgestellt werden. Lombardo [Lom14] zeigte in Form von geringeren Graufleckenflächen und geringeren Massenverlusten eine geringere Graufleckenbildung bei carbonitrierten Prüfrädern als bei einsatzgehärteten.

Durch die Oberflächenbehandlungsverfahren Brünieren, Phosphatieren und Verkupfern konnte von Emmert [Emm93] ein positiver Einfluss auf die Graufleckentragfähigkeit aufgrund

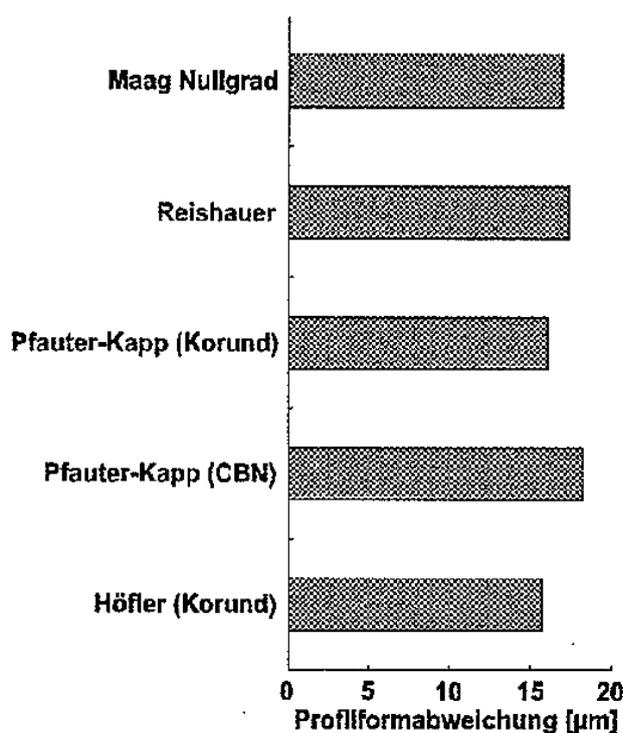


Bild 2-10: Resultierende Profilformabweichung an mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren gefertigten Testritzeln aus Untersuchungen von Liu [Liu03]

eines besseren Einlaufverhaltens durch den stärkeren Abbau der Rauheitsspitzen festgestellt werden.

Liu [Liu03] zeigt, dass bei gleichen arithmetischen Mittenrauwerten R_a kein Einfluss verschiedener Wälz- und

Profilschleifverfahren auf die Graufleckentragfähigkeit von gleich geschliffenen Paarungen zu erwarten ist. Bild 2-10 zeigt die resultierende Profilformabweichung für mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren

gleich geschliffenen Paarungen. Alle Prüfräder wiesen nahezu gleiche

mittlere Profilformabweichungen auf, deren Mittelwert ca. 16,8 µm betrug. Paarungen von

unterschiedlich geschliffenen Prüfrädern zeigten in seinen Untersuchungen eine höhere Graufleckentragfähigkeit als Paarungen mit gleich geschliffenen Prüfrädern.

2.2.2 Einflussgrößen aus den Betriebsbedingungen

Durch eine äußere Belastung werden die Kontaktpartner zusammengedrückt. Steigt die Belastung, wirkt sich dies zum einen erschwerend auf die EHD-Schmierfilmbildung aus und zum anderen berühren sich mehr Rauheitsberge der Oberflächen, wenn die Kontaktpartner nicht vollständig durch den Schmierfilm getrennt sind. Dies führt zu größeren Berührflächen der Kontaktpartner und somit zu einer höheren Anzahl an Mikrorissen. Obwohl die Graufleckenbildung schon bei niedrigen Belastungen auftritt, führen höhere Belastungen grundsätzlich zu mehr Graufleckenbildung. [Sch84]

Durch einen geeigneten Einlauf werden die Zahnflanken geglättet und Graufleckigkeit kann vermindert und ggf. ganz vermieden werden. Während des Einlaufs kann leichter Verschleiß oder Graufleckigkeit auftreten. Führt die auftretende Graufleckigkeit auch bei steigender Belastung zu keinem kontinuierlich ansteigenden Masseverlust und zu keinen oder nur geringen Auskolkungen, wird diese entstandene Graufleckigkeit als Einlaufgraufleckigkeit bezeichnet. [Emm94, Sch84]

Emmert [Emm94] führt umfassende Untersuchungen zum Einlauf und der Zahnflankenrauheit durch. Er berechnet den Einlaufgrad mittels eines Vergleich der gemittelten Zahnflankenrauheit im gelaufenen Zustand mit dem Neuzustand zu $\epsilon_R = Ra(\text{gelaufen}) / Ra(\text{neu})$. Für einsatzgehärteten Zahnradern liegt der Einlaufgrad nach Emmert bei $\epsilon_R = 0,7 - 0,8$. Emmert stützt sich hierbei auf seine eigenen Untersuchungen sowie den Erfahrungswerten aus den Grübchenversuche nach dem Einlauf.

Bei steigender Schmierstofftemperatur nimmt die Viskosität des Schmierstoffs ab. Durch eine Abnahme der Viskosität sinkt die Schmierfilmdicke, was wiederum die Graufleckentragfähigkeit herabsetzt. Ein deutlich größerer Einflussfaktor ist allerdings die chemische Wirksamkeit der Additive in Abhängigkeit der Schmierstofftemperatur. Je nach Schmierstoff können bei höheren Schmierstofftemperaturen mehr Additive oder auch andere Additivkomponenten aktiviert werden, wodurch die Graufleckentragfähigkeit in diesem Temperaturbereich im Vergleich zu niedrigeren Temperaturen wieder steigen kann. [Sch84]

Emmert [Emm94] führt Untersuchungen zum Einfluss der Schmierstofftemperatur durch. Mit einer von 90 °C auf 40 °C reduzierten Schmierstofftemperatur zeigten vier von sechs der betrachteten Schmierstoffe eine Zunahme der Graufleckentragfähigkeit, während zwei eine Abnahme der Graufleckentragfähigkeit aufzeigten. Dies wurde ebenfalls von Haske [Has00] beobachtet. Die Abnahme der Graufleckentragfähigkeit bei Verringerung der Schmierstofftemperatur von 90 °C auf 60 °C begründete er durch eine bessere Aktivierung der Additive bei höherer Schmierstofftemperatur. Der Einfluss der durch die höhere Schmierstofftemperatur verringerten Viskosität spielt dabei eine untergeordnete Rolle. [Emm94]

Bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten nimmt die Schmierfilmdicke rechnerisch zu. Eine Zunahme der Schmierfilmdicke wirkt sich positiv auf die Graufleckentragfähigkeit aus. Allerdings wird die Verlustleistung bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten erhöht und somit auch die Temperatur. Dies wirkt sich wiederum hinderlich auf die Schmierfilmbildung aus. [Sch84]

Emmert [Emm94] untersuchte den Einfluss von Umfangsgeschwindigkeiten von $v_t = 8,3$ m/s bis 60 m/s. Durch Verdopplung der Umfangsgeschwindigkeit von 8,3 m/s auf 16,6 m/s wird die Zunahme der Graufleckentragfähigkeit um circa eine Kraftstufe im Stufentest nach

FVA 54/7 [Sch93] erreicht. Durch die Zunahme von dynamischen Zusatzkräften bei einer weiteren Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit im Bereich von $v_t = 60$ m/s zeigte sich eine Abnahme der Graufleckentragfähigkeit.

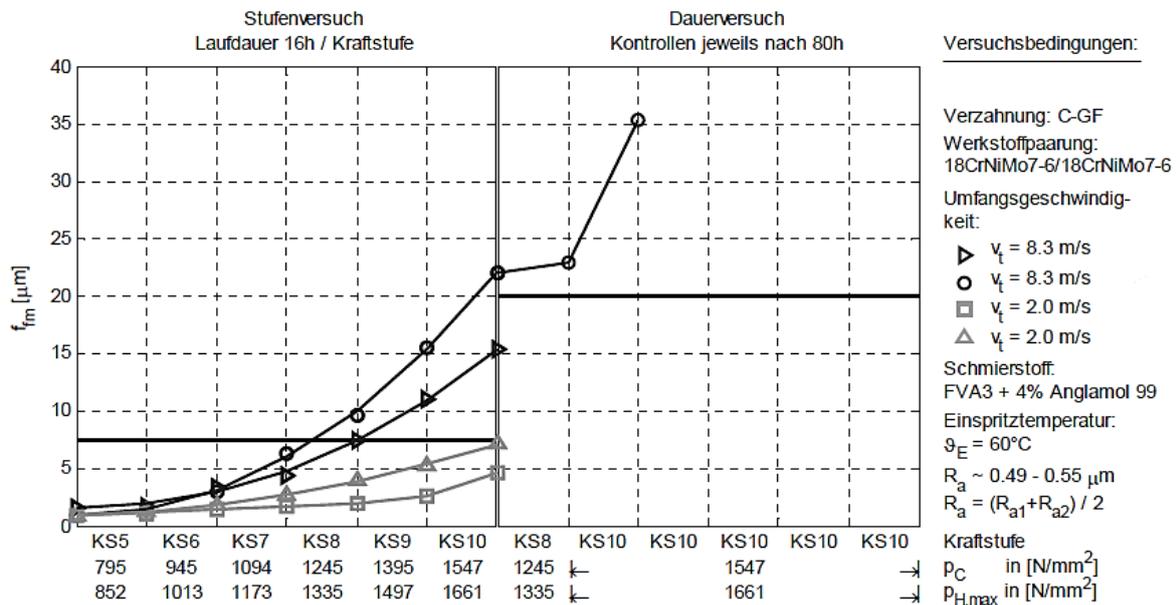


Bild 2-11: Ermittelter Einfluss auf die Profilformabweichung f_{fm} bei reduzierter Umfangsgeschwindigkeit von 8,3 m/s auf 2 m/s aus Untersuchungen von Schudy [Sch10]

Zum Einfluss einer geringeren Umfangsgeschwindigkeit führte Schudy [Sch10] experimentelle Untersuchungen bei Umfangsgeschwindigkeit von 8,3 m/s und 2 m/s durch. Es war eine deutliche Zunahme der Graufleckentragfähigkeit durch Verringerung der Umfangsgeschwindigkeit auf 2 m/s zu erkennen. Bild 2-11 zeigt die Ergebnisse aus den Untersuchungen von Schudy. Als Begründung nennt Schudy [Sch10] die stärkere Glättung der Zahnflankenoberfläche, geringere dynamische Zahnkräfte und niedrigere Temperaturen im Zahneingriff bei kleinerer Umfangsgeschwindigkeit. Dies wirkt den ungünstigeren Schmierungsbedingungen, welche aus einer kleineren Schmierfilmdicke resultieren, entgegen. In diesen Untersuchungen ist kein Einfluss der Lastspielzahl auf die Graufleckigkeit erkennbar.

Felbermaier [Fel15] untersuchte die Graufleckentragfähigkeit bei Umfangsgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 7 m/s. Hinsichtlich der Profilformabweichungen ergaben sich vergleichbare Graufleckentragfähigkeiten. Mit sinkender Umfangsgeschwindigkeit von 7 m/s auf 1 m/s wurde eine Zunahme der Graufleckenfläche insbesondere oberhalb des Wälzkreises deutlich. Zusätzlich kann einer Überlagerung mit Verschleiß auftreten. Hierfür wurden in Abhängigkeit der spezifischen Schmierfilmdicke Grenzkriterien für die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] definiert.

In Untersuchungen von Schrade [Sch99b] mit der 17/18-Verzahnung war kein deutlicher Einfluss der Treibrichtung erkennbar. Beim Betrieb mit treibendem Rad konnte lediglich eine etwas kleinere Auskolkung im Fußflankenbereich des Ritzels festgestellt werden als beim Betrieb mit treibendem Ritzel. Dies kann mit dem Wegfall des Eingriffsstoßes im Fußflankenbereich des Ritzels begründet werden. Bei Betrieb mit treibenden Ritzel entsteht der Eingriffsstoß im Fußflankenbereich des Ritzels und der Austrittsstoß im Fußflankenbereich des Rads. Der Austrittsstoß fällt insgesamt weniger stark aus als der Eintrittsstoß. Durch die Änderung der

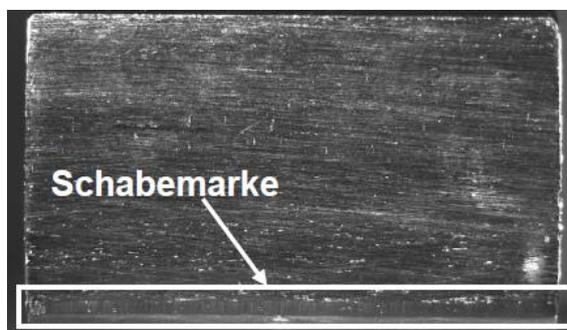
Treibrichtung wandert der Eintrittsstoß vom Fußflankenbereich des Ritzels in den Fußflankenbereich des Rads. Umgekehrt wandert der Austrittsstoß vom Fußflankenbereich des Rads in den Fußflankenbereich des Ritzels. Bild 2-4 veranschaulicht dies.

Der Eingriffsstoß, welcher durch den vorzeitigen Eingriff der Gegenradkopfkante im Fußflankenbereich hervorgerufen wird, kann durch plastische Verformung und Wegschaben der Zahnflankenoberfläche zum Auftreten einer Schabemarke führen. Die Schabemarke tritt als ein schmales Band von Riefen in Zahnhöhenrichtung im Fußflankenbereich auf, welche in einer Nahaufnahme in Bild 2-12 zu erkennen sind, und verursacht neben der Graufleckigkeit ebenfalls Profilformabweichungen. [Emm94, Liu03]



Bild 2-12: Nahaufnahme einer Schabemarke [DIN09]

Bild 2-13 zeigt eine Schabemarke sowie die zugehörige Profillinie. Die typische, spitz zulaufende Profilformabweichung ist durch die Schabemarke bedingt. [Eng16]



Diese zusätzlichen durch die Schabemarke verursachten Flankenformänderungen sind als Profilformabweichung in einem Messschrieb erkennbar und müssen für die zuverlässige Bewertung der Graufleckentragfähigkeit herausgerechnet werden. [DIN20, Emm93, Liu03]

Bild 2-13: Beispielhafte Darstellung einer Schabemarke und der ermittelte Profillinie [DIN09]

Bild 2-14 zeigt anhand eines Beispiels die Entwicklung der mittleren Profilformabweichung eines Ritzel mit Schabemarke im Vergleich zur mittleren Profilformabweichung mit herausgerechneter Schabemarke. Es ergeben sich deutlich unterschiedliche Bewertungen der Graufleckentragfähigkeit des Schmierstoffs mit und ohne Schabemarke.

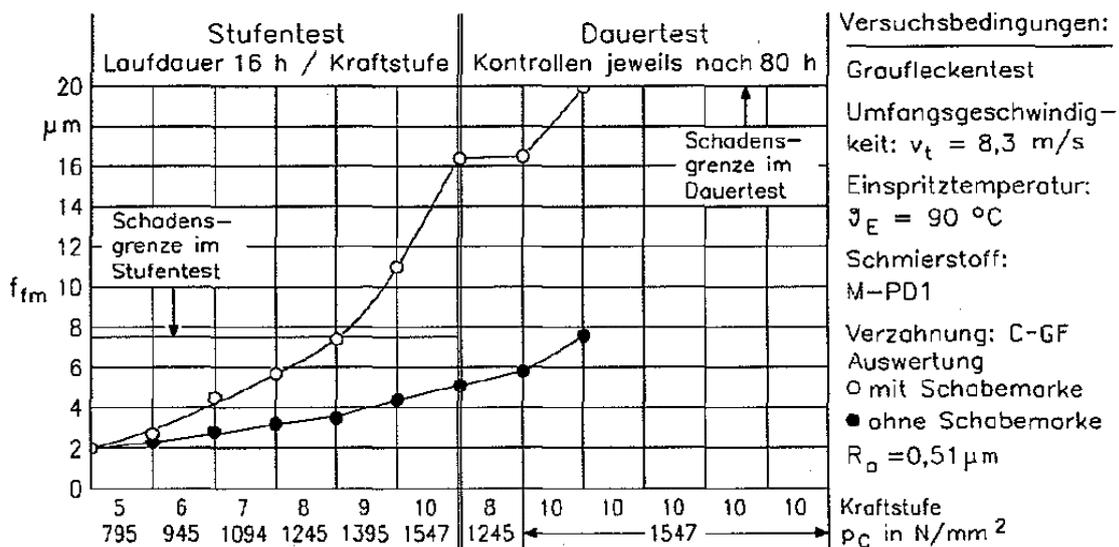


Bild 2-14: Entwicklung der mittleren Profilformabweichung f_{fm} eines Ritzel mit und ohne Schabemarke aus Untersuchungen von Liu [Liu03]

Liu [Liu03] führte ebenfalls einen Versuch anhand der 17/18-Verzahnung zum Einfluss der Umkehr der Treibrichtung von treibenden Ritzel auf treibendes Rad auf die Schabemarke im Fußflankenbereich des Ritzels durch. Es trat eine deutlich kleinere durch die Schabemarke verursachte Profilformabweichung am Ritzel auf.

Untersuchungen von Nazifi [Naz10a] zeigten bei Umkehrung der Treibrichtung von treibenden Ritzel auf treibendes Rad insbesondere am Großgetriebeprüfstand eine Verschiebung der maximalen Profilformabweichung vom Fußflankenbereich des Ritzels in den Fußflankenbereich des Rads. Als Begründung wird das stärkere Schaben der Gegenradkopfkante zu Eingriffsbeginn als zu Eingriffsende herangezogen.

Schrade [Sch99b] stellt fest, dass bei Tauchschmierung im Vergleich zur Einspritzschmierung die Graufleckentragfähigkeit steigt. Diese Beobachtung wird auf Basis von Berechnungen der Zahnmittentemperatur mit dem besseren Kühlungseffekt bei Tauchschmierung begründet.

2.2.3 Einflussgrößen aus dem Schmierstoff

Mit steigender Viskosität nimmt die Schmierfilmdicke zu. Dies wirkt sich positiv auf die Graufleckentragfähigkeit aus [Sch84]. Emmert [Emm93] und Schrade [Sch99b] konnten in experimentellen Untersuchungen eine Zunahme der Graufleckentragfähigkeit um eine halbe bis eine Kraftstufe im Graufleckentest bei $\vartheta_{\text{ö1}} = 60 \text{ °C}$ bei Verwendung eines Schmierstoffs der ISO-VG 460 im Vergleich zu einem Schmierstoff gleicher chemischer Zusammensetzung und Additivierung der ISO-VG 46 zeigen. Der Einfluss der Viskosität auf die Schmierfilmdicke lässt sich berechnen. Im Vergleich zu den Einflüssen der Rauheit und den Additiven ist der Einfluss der Viskosität gering.

Die Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere die Rauheit, wirkt sich auf die Schmierfilmbildung aus [Han21, May13]. Die Schmierfilmbildung wirkt sich wiederum auf die Graufleckentragfähigkeit aus [Han21, Sch84]. So wurde in Untersuchungen von Mayer [May13] bei den betrachteten Betriebsbedingungen gezeigt, dass an glatten Oberflächen die größten Schmierfilmdicken aufgebaut werden können.

Schmierstoffe bestehen aus einem Grundöl, für welches in der Regel ein Mineralöl oder ein synthetischer Schmierstoff verwendet wird, und verschiedenen Leistungsadditiven.

Nach Untersuchungen von Elstorpff [Els93] zeigen synthetische Öle eine deutlich größere Graufleckentragfähigkeit als Mineralöle. Elstorpff [Els93] begründet dies damit, dass Mineralöle tendenzielle höhere Reibungszahlen aufweisen als synthetische Öle. Der Zusammenhang von Schmierstoffbasis und Reibungszahl wird ebenfalls von Mayer [May13] bestätigt.

Ein tribologisches System besteht aus den Kontaktpartnern und dem sich zwischen den Kontaktpartnern befindenden Schmierstoff. In diesem tribologischen System erfolgen zwischen den Kontaktpartnern und dem Schmierstoff chemische Reaktionen, welche allgemein als tribo-chemische Reaktionen bezeichnet werden. Durch diese tribo-chemischen Reaktionen bilden sich neue Reaktionsprodukte und Grenzschichten oder es werden bestehende Grenzschichten abgerieben. Zudem werden die lokalen Festigkeitseigenschaften in den oberflächennahen Bereichen durch tribo-chemische Reaktionen verändert. Durch die Änderungen der Eigenschaften in der äußeren Grenzschicht, kann der Abrieb zwischen den Kontaktpartnern begünstigt oder vermindert werden. Zudem können sich durch tribo-chemische Reaktionen schützende Schichten bilden. Diese Schutzschichten verhindern den direkten metallischen Kontakt der Körper und minimieren somit den metallischen Abrieb. [Loh16a]

Ein positiver Einfluss auf die Graufleckentragfähigkeit ist nach Schrade [Sch99b] durch Verwendung von Schwefel(S)-Additiven und ein negativer Einfluss durch Phosphor(P)- und Zinkdialkyldithiophosphat(ZnDTP)-Additive zu erwarten.

In Untersuchungen von Lainé et al. [Lai07, Lai08] wurde der negative Einfluss der Verschleißschutzadditive beispielsweise aus ZnDTP-Additiven auf die Graufleckentragfähigkeit bestätigt. Dieser Zusammenhang wird durch das fehlende Glätten der Oberflächen durch den Verschleißschutz erklärt. Das Glätten von Kontaktoberflächen durch z. B. einen Einlauf wirkt sich positiv auf die Graufleckentragfähigkeit aus [Emm94]. Vrcek et al. [Vrc19b] bestätigen die Wechselwirkung von Verschleißschutz und Graufleckigkeit.

In weiteren Untersuchungen von Lainé et al. [Lai09] wird deutlich, dass durch Zugabe des Additives Molybdän-Dithiocarbamat(MoDTC) zur Reibungsminderung zu Ölen mit Verschleißschutz ZnDTP-Additiven das Graufleckenverhalten wieder verbessert werden konnte. Als Begründung des verbesserten Graufleckigkeitsverhaltens wird die Verringerung der lokalen Zugspannung aufgrund der verringerten Reibung an der Oberfläche genannt. Dies könnte die Öffnung der Oberflächenrisse verringert und ihre Ausdehnung verhindert haben.

Vrcek et al. [Vrc19a] zeigen zudem in experimentellen Untersuchungen, dass Graufleckenbildung und Verschleißschäden stark vom Anwendungsfall abhängen. Es zeigt sich, dass bei Motoröl auf PAO-Basis im Vergleich zu Motoröl auf Mineralölbasis bei weniger verschärften Schmierbedingungen tendenziell weniger Graufleckigkeit auftritt.

Liu [Liu03] zeigte in seinen Untersuchungen, dass sich Plastic-Deformation(PD)-Additive positiv auf die Graufleckentragfähigkeit auswirken. Durch plastische Verformung ermöglichen PD-Additive eine bessere Glättung der Rauheitsspitzen bzw. ein besseres Einlaufverhalten [Liu03]. Es konnte in Untersuchungen von Liu dagegen kein deutlicher Einfluss der Extreme-Pressure(EP)-Additive auf die Graufleckentragfähigkeit gezeigt werden.

O'Connor [O'C03] untersucht den Einfluss der Additiv-Chemie auf die Graufleckigkeit anhand von verschiedenen Additive-Paketen, welche häufig in Ölen für Windkraftgetriebe verwendet werden. Das in diesen Untersuchungen verwendete EP-Additiv zeigte die beste Wirkung zur Reduzierung von Grauflecken.

Additive wirken je nach Betriebsbedingungen sehr unterschiedlich auf die Graufleckenbildung. Deshalb ist der Einfluss der Additive auf die Graufleckigkeit rechnerisch nicht erfassbar und lässt sich nur experimentell ermitteln [Emm94, Her12, Sch84, Sch99b]. Aus diesem Grund müssen Graufleckentests durchgeführt werden, um Schmierstoffe bei vorliegenden Betriebsbedingungen charakterisieren zu können.

2.3 Testverfahren zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit

Im Folgenden wird das Testverfahren zur Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit nach FVA 54/7 [Sch93] beschrieben. Zudem werden weitere Testverfahren vorgestellt und mit dem Graufleckentest nach FVA 54/7 verglichen. Ergänzend sind noch weitere Verfahren zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit anhand von Drei-Scheiben Prüfständen, wie in [Kad16, Lai07, Lai08, Lai09, Mor11] verwendet, verfügbar. Kock et al. [Koc18] beschäftigten sich mit der Entwicklung von Robustheitstests gegen spezifische Ausfälle der Planeten- und HSS-Lager in den Getrieben von Windkraftanlagen. Hierbei wird unter anderem die Graufleckigkeit an Wälzlagern untersucht. Da diese Methoden nicht anhand von Zahnradtests erfolgen und somit deutlich von der in dieser Arbeit betrachteten Prüfmethode abweichen, werden diese im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.3.1 Graufleckentest nach FVA 54/7 / DIN 3990-16

Der Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] wurde im Rahmen von mehreren FVA-Forschungsvorhaben [Emm93, Sch81, Sch83] an der Forschungsstelle entwickelt und ist im FVA-Informationsblatt 54/7 [Sch93] beschrieben. Um eine einheitliche Durchführung zu gewährleisten, wurde die Norm DIN 3990-16 [DIN20] auf Grundlage des Graufleckentests nach FVA 54/7 erstellt und in die Reihe der DIN 3990 [DIN87a, DIN87b, DIN87c] eingeordnet.

Der Graufleckentest ist ein weitverbreitetes Testverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Graufleckenbildung an Zahnrädern. Er dient gleichzeitig als Freigabetest von Schmierstoffen. Der Graufleckentest besteht aus einem Prüf- sowie einem Wiederholungslauf. Der Prüflauf ist aufgeteilt in einen Stufen- und einen Dauertest. Im Stufentest ergibt sich die Klassifizierung des Schmierstoffs in Form einer Schadenskraftstufe. Zur Untersuchung der Schadensentwicklung bei längerer Laufzeit wird an den Stufentest ein Dauertest angeschlossen. Um die Ergebnisse abzusichern, wird ein Wiederholungslauf durchgeführt. Dieser Wiederholungslauf besteht in der Regel nur aus einem Stufentest und kann mit einem Dauertest erweitert werden.

Der Standardtest wird bei fest definierten Prüfbedingungen durchgeführt. Hierfür wird eine Umfangsgeschwindigkeit von $v_t = 8,3 \text{ m/s}$ am Wälzpunkt, welche einer Ritzeldrehzahl von $n_1 = 2250 \text{ min}^{-1}$ entspricht, und eine Schmierstoffeinspritztemperatur von $\vartheta_{\text{ö1}} = 90 \text{ °C}$ am FZG-Zahnradverspannungsprüfstand mit Achsabstand $a = 91,5 \text{ mm}$ (siehe Abschnitt 5.1) eingestellt. Der FZG-Zahnradverspannungsprüfstand bietet die Möglichkeit die Prüfbedingungen zu variieren. Sofern erforderlich können Schmierstoffe bei Einspritztemperaturen von z.B. 40 °C und 60 °C getestet werden. Im Graufleckentest wird ein hinsichtlich Mikro- und Makrogeometrie fest definiertes Prüfradpaar vom Typ C (C-GF-Verzahnung, siehe Abschnitt 6.1) verwendet. Die Kurzbezeichnung des Graufleckentests wird in Form von Verzahnungsform/Umfangsgeschwindigkeit/Schmierstofftemperatur angegeben. GT-C/8,3/90 beschreibt beispielweise den Standardtest.

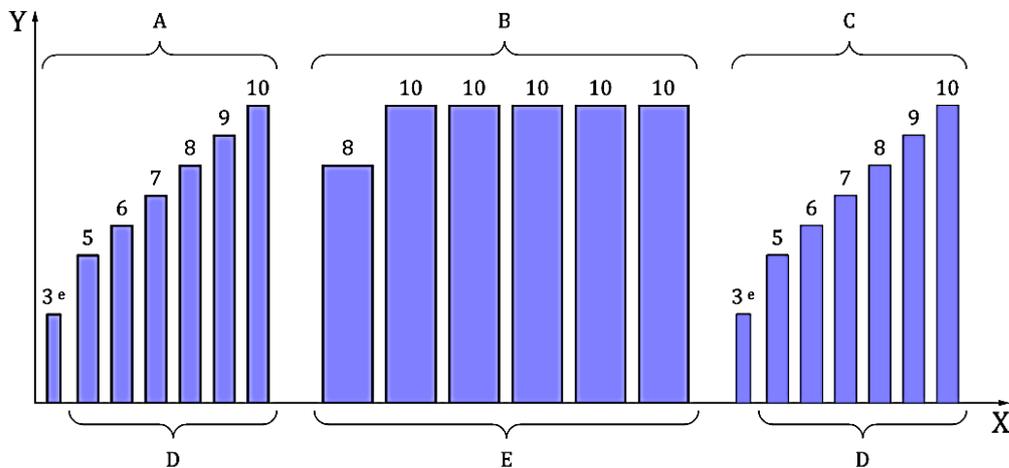
Im Stufentest wird zunächst ein einstündiger Einlauf in Kraftstufe 3 zur Glättung von Rauheitsspitzen durchgeführt. Es schließen sich Prüfintervalle mit jeweils 16 h in Kraftstufe 5 bis maximal Kraftstufe 10 an. Im Dauertest erfolgt zunächst ein Prüfintervall von 80 h in Kraftstufe 8. Es folgen maximal fünf Prüfintervalle von jeweils 80 h in Kraftstufe 10. Der Ablauf des Stufen- und Dauertests ist in Bild 2-15 schematisch dargestellt. Die Tabelle 2-1 zeigt die aufzubringenden Ritzeldrehmomente T_1 für jede Kraftstufe und die daraus resultierende Hertz'sche Pressung $p_{H,C}$ am Wälzpunkt.

Tabelle 2-1: Drehmomente und Hertz'sche Pressung der Kraftstufen im Graufleckentest

Größe	Einheit	Kraftstufe						
		Einlauf	5	6	7	8	9	10
Drehmoment am Ritzel T_1	Nm	29	70	99	133	172	216	265
Hertz'sche Pressung am Wälzpunkt $p_{H,C}$	N/mm ²	510	795	945	1094	1245	1396	1547

Im Anschluss an jedes Prüfintervall im Stufen- und Dauertest wird der Prüfradsatz ausgebaut, gewogen und auf einem 3D-Koordinatenmessmaschine vermessen. Anhand der 3D-Profilmessschriebe werden die Profilformabweichungen f_f von in der Regel drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Zahnflanken des Ritzels bestimmt und anschließend gemittelt. Zudem werden die Zahnflanken lichtmikroskopisch kontrolliert und fotografiert. Mittels einer durchsichtigen Lehre werden die prozentualen Anteile der Graufleckenflächen GF an ausgewählten

Zähnen ermittelt und ein Durchschnittswert berechnet. Durch Verläufe der mittleren Profilformabweichung f_{fm} , der mittleren prozentualen Graufleckenfläche GF und des Massenverlusts W des Ritzels wird der Schadensfortschritt gekennzeichnet.



Legende

- | | | | |
|---|---|---|-----------------------------------|
| A | Stufentest (Prüflauf) | e | Laufzeit im Einlauf: |
| B | Dauertest (Prüflauf) | | $1,3 \times 10^5$ Ritzelumdrehung |
| C | Stufentest (Wiederholungslauf) | | (ca. 1 h) |
| D | Laufzeit je Kraftstufe: $2,1 \times 10^6$ Ritzelumdrehung (ca. 16 h) | X | Laufzeit |
| E | Laufzeit je Kraftstufe: $10,5 \times 10^6$ Ritzelumdrehung (ca. 80 h) | Y | Kraftstufe |

Bild 2-15: Ablauf des Graufleckentests [DIN20]

Der Stufentest wird beendet, sobald die mittlere Profilformabweichung f_{fm} nach einer Kraftstufe im Stufentest zu größer als $7,5 \mu\text{m}$ bestimmt wird. Die zuletzt gefahrene Kraftstufe wird als Schadenskraftstufe definiert. Ab einer Schadenskraftstufe von 8, wird in der Regel ein Dauertest angeschlossen. Wird das Schadenskriterium von $20 \mu\text{m}$ überschritten, gilt der Dauertest als beendet. Bei Auftreten von Fressen, Verschleiß oder Grübchen im Stufen- und Dauertest wird der Test beendet. Die Graufleckentragfähigkeit wird nach FVA 54/7 in die drei Graufleckentragfähigkeitsklassen (GF-Klassen) „GFT-niedrig“, „GFT-mittel“, „GFT-hoch“ eingeteilt. Die Tabelle 2-2 zeigt die Einteilung nach FVA 54/7 [Sch93]. In DIN 3990-16 [DIN20] wird, in einem informativen Anhang, eine neue GF-Klasse „GFT-sehr hoch“ eingeführt. Die Einteilung nach DIN 3990-16 sowie weitere Informationen können dem Anhang (s. Tabelle A.10-4) entnommen werden.

Tabelle 2-2: Zuordnung der GF-Klassen im Graufleckentest nach FVA 54/7

GF-Klasse	Schadenskraftstufe SKS im Stufentest	Schadensverhalten im Dauertest
GFT-niedrig	SKS ≤ 7 , große Graufleckenfläche, GF z. T. über 50 %	1 x 80 h Laufzeit bei Stufe 10 ²⁾ , GF, f_{fm} deutlich über $20 \mu\text{m}$
GFT-mittel	SKS 8 - 9, mittlere Graufleckenfläche GF ca. 30 %	1 - 2 x 80 h Stufe 10, GF, f_{fm} 10 - $20 \mu\text{m}$ und / oder Grübchenbildung
GFT-hoch	SKS ≥ 10 , wenig bis keine Graufleckigkeit GF < 20 %	1 - 5 x 80 h Stufe 10, evtl. GF, f_{fm} < $20 \mu\text{m}$, Grübchenbildung

²⁾ Bei einem Schmierstoff, der zur Tragfähigkeitsgruppe „GFT-niedrig“ gehört, kann auf die Durchführung des Dauertestprogramms verzichtet werden.

Ergänzend zu dem vorgestellten Testverfahren wurde ein Graufleckenkurztest nach DGMK 575 [Ste02b] entwickelt. Im Rahmen dieses verkürzten Testverfahrens wird der Schmierstoff nach dem Einlauf lediglich in Kraftstufe 7 und 9 getestet. Die Verwendung der Kraftstufen und der Verzahnung erfolgt analog zu FVA 54/7. Im Gegensatz zum Graufleckentest nach FVA 54/7 wird der Graufleckenkurztest nach DGMK 575 [Ste02b] mit Tauchschmierung durchgeführt. Diese Methode dient als erste Einordnung der Graufleckentragfähigkeit von

Schmierölen in die GF-Klassen bzw. als Screening-Verfahren zur Graufleckentragfähigkeit verschiedener Schmierstoffe. Zudem wurde im Rahmen von nationaler und internationaler Forschung die Testmethode nach FVA 54/7 z. B. unter Abwandlungen der Baugröße der Verzahnungen verwendet. [Loh16a, Lüt07, Naz10a, Pic12]

2.3.2 Gegenüberstellung weiterer Graufleckentestverfahren

In Tabelle 2-3 ist eine Übersicht verschiedener Testverfahren zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierstoffen dargestellt. Es sind die üblichen Prüfbedingungen der einzelnen Testverfahren sowie gängige Modifikationen in Klammern dargestellt. Alle betrachteten Testverfahren mit Ausnahme des ZF-N-Pittingtests werden auf FZG-Zahnradverspannungsprüfständen mit $a = 91,5$ mm durchgeführt. Der ZF-N-Pittingtest erfolgt auf einem ZF-Verspannungsprüfstand mit $a = 140$ mm.

Der PAE/FZG-Graufleckentest C-GF/8,3/90-20 [Rot02] wird mit Tauchschmierung anstelle der in FVA 54/7 verwendeten Einspritzschmierung durchgeführt. Dieser Test unterscheidet sich von dem Testverfahren nach FVA 54/7 [Sch93] zusätzlich im Ablauf. Die Laufzeit im Stufen- und Dauertest beträgt pro Stufe beziehungsweise Kontrollintervall 20 statt 16 bzw. 80 Stunden. Der Einlauf im Stufen- und Dauertest sowie die Kraftstufe 5 im Stufentest entfallen. Es wird lediglich ein Warmlauf bei geringer Belastung ($T_1 \approx 8$ Nm) durchgeführt bis die geforderte Prüftemperatur erreicht wird.

Für den Flender-Graufleckentest [Fle97] wird eine C-GF ähnliche Verzahnung aus dem Werkstoff 17CrNiMo6 mit einer Stirnprofilballigkeit C_α verwendet, welche mit dem Reishauerverfahren geschliffen wird. Mit einer Laufzeit von 100 Stunden im Kurztest und anschließend 300 Stunden im Dauertest weicht dieses Testverfahren ebenfalls im Ablauf von dem Verfahren nach FVA 54/7 ab. Der Test wird als Einstufentest mit Tauchschmierung auf der Kraftstufe 10 im Kurz- und Dauertest durchgeführt. Ein Einlauf erfolgt mit einer Dauer von einer Stunde in Kraftstufe 4.

Tabelle 2-3: Übersicht ausgewählter Graufleckentestverfahren

Testverfahren	FVA 54/7	PAE/FZG	Flender	ZFWP-pGFT	ZF-N-PT
Schmierung	Einspritzschmierung	Tauchschmierung	Tauchschmierung	Einspritzschmierung	Tauchschmierung
Öltemperatur	90 °C (60/40 °C)	90 °C (100/120 °C)	90 °C	60/90 °C	110 °C
Ritzeldrehzahl	2250 min ⁻¹ (4500 min ⁻¹)	2250 min ⁻¹	2250 min ⁻¹	375 min ⁻¹	1450 min ⁻¹
Verzahnungstyp	C-GF	C-GF	C	C	NKW-typisch
Werkstoff	16MnCr5	16MnCr5	17CrNiMo6	18CrNiMo7-6	20MnCr5
Korrektur	keine	keine	C_α	C_a, C_b	$C_{H\alpha}, C_a, C_b$
Schliff	MAAG-0°	MAAG-0°	Reishauer	Profilschleifen	Wälzschleifen
Durchführung Stufentest					
Kraftstufen	5,6,7,8,9,10	6,7,8,9,10	10	5,6,7,8,9,10	-
Laufzeit / Stufe	16 h	20 h	100 h	93 h	-
Durchführung Dauertest					
Kraftstufe(n)	8,10	10	10	-	12*)
Max. Laufzeit	400 h	100 h	300 h	-	460 h

*) Entspricht in etwa der Kraftstufe 12 im Fressstest nach DIN 14635 [DIN06b] ($\sigma_H = 1813$ N/mm²)

Bei ZF Wind Power Antwerpen NV (ZFWP-pGFT) [Lit12] wird eine C-Verzahnung aus 18CrNiMo7-6 mit einer aufgetragenen Kopfrücknahme C_a sowie Breitenballigkeit C_b verwendet. Das Profilschleifen findet hier anstelle des MAAG-0° Glattschliffs Anwendung. Die Versuche werden mit einer verringerten Ritzeldrehzahl gegenüber dem Graufleckentest nach

FVA 54/7 und einer Öltemperatur von 60 °C bzw. 90 °C durchgeführt. Das Verfahren besteht aus einem Stufentest ohne Dauertest. Die Laufzeit pro Kraftstufe beträgt 93 Stunden.

Im ZF-N-Pittingtest (ZF-N-PT) [Joa04], mit welchem auch die Graufleckenbildung beurteilt werden kann, kommt eine wälzgeschliffene Schrägverzahnung aus 20MnCr5 zum Einsatz. Es wird neben einer Profilwinkelkorrektur $C_{H\alpha}$ eine Kopfrücknahme C_a und eine Breitenballigkeit C_b aufgebracht. Die Durchführung des Tests erfolgt unter Tauchschmierung, einer Öltemperatur von $\vartheta_{\text{Öl}} = 110$ °C und einer Ritzeldrehzahl von $n_1 = 1450$ min⁻¹. Der Versuch wird auf einer abweichenden Kraftstufe mit einer maximalen Laufzeit von 460 Stunden gefahren.

Es ist festzuhalten, dass in den hier betrachteten Prüfverfahren zum Teil anwendungsnahe Prüfbedingungen sowie praxisnähere Prüfverzahnungen durch den Einsatz von Profilkorrekturen und einer Schrägverzahnung als im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] verwendet werden. Durch die teilweise stark abweichenden Prüfabläufe gibt es keine einheitliche Bewertung hinsichtlich Graufleckigkeit unter Berücksichtigung praxisnaher Prüfbedingungen.

2.4 Berechnungsverfahren zur Graufleckentragfähigkeit

Im Folgenden wird das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Berechnungsverfahren zur Graufleckentragfähigkeit nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] beschrieben. Zudem wird auf weitere Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit eingegangen. In allen betrachteten Berechnungsverfahren sind die Schmierfilmdicke und die Oberflächenbeschaffenheit wichtige Größen zur Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit.

2.4.1 Berechnungsverfahren nach ISO/TS 6336-22

Das Berechnungsverfahren nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] ermöglicht die Berechnung der Graufleckentragfähigkeit eines beliebigen Systems bestehend aus Schmierstoff und Zahnradpaar. Die Berechnungsmethode basiert auf der Ermittlung eines Sicherheitswerts gegen Graufleckigkeit S_λ . Dieser Sicherheitswert ist gemäß Formel (2-4) der Quotient aus der berechneten minimalen spezifischen Schmierfilmdicke $\lambda_{GF,min}$ in der Kontaktfläche und der zulässigen spezifischen Schmierfilmdicke λ_{GFP} . Um Graufleckigkeit zu vermeiden, sollte S_λ gleich oder größer als die erforderliche Mindestsicherheit gegen Graufleckigkeit $S_{\lambda,min}$ sein.

$$S_\lambda = \frac{\lambda_{GF,min}}{\lambda_{GFP}} \quad (2-4)$$

Graufleckigkeit tritt hauptsächlich in Bereichen mit negativem spezifischen Gleiten auf. Diese Bereiche befinden sich entlang der Eingriffsstrecke zwischen den Punkten A und C auf dem treibenden Zahnrad und zwischen den Punkten C und E auf dem getriebenen Zahnrad (s. Bild 2-3 und Bild 2-4). Die spezifischen Schmierfilmdicke $\lambda_{GF,Y}$ kann für jeden Punkt auf der Eingriffsstrecke bzw. im Eingriffsfeld unter Berücksichtigung der Einflüsse der Schmierstoffviskosität, der Oberflächenrauheit, der Geometrie der Zahnräder und der Betriebsbedingungen berechnet werden. Der Index Y gibt den betrachteten Berechnungspunkt auf der Eingriffsstrecke an. In der ISO/TS 6336-22 werden für die Berechnung der spezifischen Schmierfilmdicke die zwei Methoden A und B vorgeschlagen. Methode A ist genauer und benötigt die Eingabe der Pressungsverteilung im Eingriffsfeld durch ein Berechnungsprogramm wie z. B. RIKOR [Neu15] oder KISSsoft [KIS21]. Anhand der Methode B wird die Berechnung der Hertz'schen Pressung durch eine Näherungsformel an 7 Punkten entlang der Eingriffsstrecke durchgeführt. Diese Punkte sind die charakteristischen Punkte A, B, C, D und E auf der Eingriffsstrecke sowie AB und DE, welche in der Mitte zwischen den Punkten A und B beziehungsweise D und E liegen.

Sind Kopfrücknahmen auf der betrachteten Verzahnung aufgebracht, werden diese durch die Methode B nach ISO/TS 6336-22 ebenfalls vereinfacht berücksichtigt. Sind genauere Werte notwendig und es soll dennoch die Methode B verwendet werden, können ergänzende Berechnungen beispielsweise wie von Kissling [Kis11, Kis12] entwickelt, verwendet werden.

Die minimale spezifische Schmierfilmdicke $\lambda_{GF,min}$ ist das Minimum aller berechneten Werte von $\lambda_{GF,Y}$ in der Kontaktfläche.

Die örtliche spezifische Schmierfilmdicke $\lambda_{GF,Y}$ ist, wie in Formel (2-5) dargestellt, der Quotient aus der Schmierfilmdicke h_Y und dem arithmetischen Mittel der Rauheit Ra der Oberflächen der Kontaktpartner. Dieser wird, wie in Formel (2-6) gezeigt, aus der mittleren Oberflächenrauheit der beiden Kontaktpartner Ra_1 und Ra_2 berechnet.

$$\lambda_{GF,Y} = \frac{h_Y}{Ra} \quad (2-5)$$

$$Ra = 0,5 \cdot (Ra_1 + Ra_2) \quad (2-6)$$

Die Schmierfilmdicke h_Y wird auf Grundlage von Dowson/Higginson [Dow66] berechnet. Wie in Formel (2-7) dargestellt, ist die Schmierfilmdicke h_Y von dem örtlichen Belastungsparameter W_Y , dem örtlichen Geschwindigkeitsparameter U_Y , dem Materialparameter G_M und dem örtlichen Krümmungsradius im Normschnitt $\rho_{n,Y}$ abhängig. Zusätzlich zu der Berechnung nach Dowson/Higginson [Dow66] wird der örtliche Gleitparameter $S_{GF,Y}$ für die Berechnung der Schmierfilmdicke nach ISO/TS 6336-22 berücksichtigt.

$$h_Y = 1600 \cdot \rho_{n,Y} \cdot G_M^{0,6} \cdot U_Y^{0,7} \cdot W_Y^{-0,13} \cdot S_{GF,Y}^{0,22} \quad (2-7)$$

Der Gleitparameter $S_{GF,Y}$ berücksichtigt die experimentellen Erfahrungen zum Einfluss von lokalem Gleiten auf die Graufleckenbildung und wird als ein zusätzlicher Faktor zur Berechnung von h_Y hinzugefügt. Mit $S_{GF,Y}$ wird die isotherme Berechnung nach Dowson/Higginson [Dow66] temperaturabhängig. Die Berechnung folgt der Hypothese, dass das Gleiten für eine zusätzliche lokale Erwärmung des Schmierstoffs verantwortlich ist. Eine höhere Temperatur in der Kontaktzone führt zu veränderten Eigenschaften des Schmierstoffs. Dies bedeutet beispielsweise, dass die Viskosität des Schmierstoffs mit steigender Temperatur sinkt, was zu einer geringeren Schmierfilmdicke führt. Dies steht in Korrelation zu den Beobachtungen, dass die Graufleckenbildung bevorzugt in Flankenbereichen mit hohen spezifischen (negativen) Gleitanteilen auftritt.

Die zulässige spezifische Schmierfilmdicke λ_{GFP} kann nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] auf zwei verschiedene Arten ermittelt werden. Sie kann durch experimentelle Untersuchungen an realen Zahnrädern bestimmt werden. Hierfür müssen die Testzahnräder die gleiche Geometrie wie das tatsächliche Zahnradpaar aufweisen. Zusätzlich müssen die Zahnradfertigung, die Zahnradqualität, die Betriebsbedingungen, der Schmierstoff und die Betriebstemperatur repräsentativ für das tatsächliche Getriebe sein. Dieses Verfahren ist sehr aufwändig und verursacht hohe Kosten. Daher wird im Allgemeinen empfohlen, diese Methode nur für die Entwicklung neuer Produkte oder für Getriebe anzuwenden, bei welchen Ausfälle schwerwiegende Folgen hätten.

Alternativ kann anhand standardisierter Graufleckentestverfahren, z.B. auf Basis der im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] ermittelten Schadenskraftstufe die zulässige spezifische Schmierfilmdicke durch eine Vergleichsrechnung nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] bestimmt werden. Der Graufleckentest muss hierzu unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen in der realen Anwendung, insbesondere der Schmierstofftemperatur, durchgeführt werden.

Das Ergebnis des Graufleckentests kann somit in Form der Schadenskraftstufe als eine Art „Festigkeitskennwert“ eines Schmierstoffs für das Berechnungsverfahren nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] genutzt und für die Berechnung der Graufleckentragfähigkeit von unterschiedlichen Getriebeanwendungen verwendet werden. Dieser „Festigkeitskennwert“ kann für additivierte Schmierstoffe nur experimentell bestimmt werden, da die Graufleckentragfähigkeit von der Wirkung der Leistungsadditive stark beeinflusst wird. Die Wirkung der Additive ist stark von der Betriebstemperatur abhängig und kann nicht berechnet werden. Berechnungsbeispiele und weitere Informationen sind in der ISO/TS 6336-31 [ISO18b] sowie in weiteren Veröffentlichungen [Pin14, Sag17] zu finden.

Die Berechnungsmethode nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] wurde von Schrade [Sch99b] auf Basis von Zahnraduntersuchungen im Rahmen der Arbeiten FVA 259/I [Sch99a] sowie der Vorhabens-Reihe FVA 54/I-IV [Sch93, Emm93, Sch81, Sch83] entwickelt und mit Prüfverzahnungen der Baugröße $m_n = 3$ mm bis $m_n = 11$ mm und Umfangsgeschwindigkeiten von $v_t = 8$ m/s bis $v_t = 60$ m/s validiert. [Höh05, Höh04, Sch99b]

Das Verfahren kann jedoch für jedes Zahnradpaar angewendet werden, für das geeignete Referenzdaten zur Verfügung stehen, sofern die in ISO/TS 6336-22 [ISO18a] genannten Kriterien erfüllt sind. Bei Anwendungen mit Umfangsgeschwindigkeiten $v_t > 80$ m/s ist zu beachten, dass die zusätzliche Erwärmung durch das Umwälzen des Öls im Eingriff und die Strömungsverluste einen entscheidenden Einfluss auf die Betriebstemperatur haben kann. Daher sollte dieser zusätzliche Wärmeeintrag bei der Berechnung der Massetemperatur berücksichtigt werden. Das Verfahren kann zur Berechnung der Graufleckentragfähigkeit für Umfangsgeschwindigkeiten $v_t > 2$ m/s verwendet werden. Für Anwendungen mit sehr kleinen Umfangsgeschwindigkeiten wurde im Forschungsvorhaben FVA 482 III [Fel15] eine detailliertere Methode entwickelt, da in diesem Bereich eine Überlappung der Graufleckigkeit mit dem Schaden Verschleiß auftreten kann. Die Schmierfilmdicke ist hier ebenfalls die maßgebende Größe. Es konnte festgestellt werden, dass Graufleckigkeit nur auftritt, wenn Verschleiß nicht der dominierende Schaden ist. [Koe18]

2.4.2 Berechnungsverfahren nach AGMA 06FTM06

Die Berechnungsvorschrift nach Barnett et al. [Bar06] basiert auf Erfahrungswerten aus der industriellen Praxis und beschreibt die graufleckenbedingte Profilformabweichung über der Eingriffsstrecke. Die Berechnung wird für Rad und Ritzel getrennt durchgeführt und berücksichtigt den Einfluss des vorzeitigen Eingriffs sowie den Einfluss der Kopfabrundung auf die Formabweichung.

Nach Formel (2-8) wird die Formabweichung M_p durch Grauflecken durch den Zusammenhang der Haupteinflussgrößen, bestehend aus der Anzahl der Lastwechsel C_y , der Vickershärte v_{pn} der Zahnflankenoberfläche, der Hertz'schen Pressung p_H , der Gleitgeschwindigkeit U_s , der arithmetischen Mittenrauheit R_a der Oberfläche, der Schmierfilmdicke h_ξ , der Wälzgeschwindigkeit U_e , den Ersatzkrümmungsradien $\rho_{1,2}$ und Zähnezahlen $z_{1,2}$ von Ritzel und Rad, beschrieben. Die Berechnung kann bei einer spezifischen Schmierfilmdicke von $\lambda < 3$ angewendet werden, da nach Erfahrung von Barnett oberhalb der kritischen Schmierfilmdicke von $\lambda_{lim} = 3$ kein Risiko für Graufleckigkeit besteht. Der Faktor X wird als Schalter verwendet, um die Berechnung bei $\lambda > 3$ auszuschalten.

$$M_p = X \cdot MP_{rate} \cdot \frac{C_y}{v_{pn}} \cdot p_H \cdot U_S \cdot \left(\frac{Ra}{h_\xi}\right) \cdot \left(\frac{U_s}{U_e}\right)^2 \cdot \frac{\rho_2 \cdot z_1}{\rho_1 \cdot z_2} \quad (2-8)$$

Nach dieser Formel wird die Formabweichung M_p mit Hilfe einer konstanten werkstoffabhängigen Verschleißrate MP_{rate} berechnet, welche in Formel (2-9) dargestellt ist.

$$MP_{rate} = 1 \cdot 10^{-12} \mu\text{m}/N_L \quad (2-9)$$

Die Schmierfilmdicke h_ξ wird nach Ertel [Ert84] und Grubin [Gru49] berechnet und berücksichtigt nur die Wälzgeschwindigkeit, die Schmierstoffviskosität bei Betriebstemperatur, die Linienlast und die Krümmungsradien. Bei der Berechnung der Schmierfilmdicke nach Ertel und Grubin gehen weder die Massen- noch die Blitztemperatur mit ein. Zudem können nach diesem Ansatz keine unterschiedlichen Schmierstoffe und deren Additive berücksichtigt werden.

2.4.3 Berechnungsmethode nach Walkowiak

Die Berechnungsmethode nach Walkowiak [Wal13] (auch Verschleißgleichung nach Walkowiak) berücksichtigt schadensrelevante Verschleißmechanismen, die zur Entstehung von graufleckenbedingter Auskolkung im Gleit-Roll-Kontakt von Zahnrädern führen. Walkowiak implementierte dieses Verschleißmodell in ein Simulationsprogramm und stellte eine Verschleißrate auf, bei der sich die örtlichen Parameter während der Laufzeit verändern. Dies steht im Gegensatz zu anderen Berechnungsverfahren, welche zur Bestimmung der Auskolkungstiefe ausschließlich einen absoluten Verschleiß bei stationären Bedingungen ermitteln. Die Vorgehensweise nach Walkowiak [Wal13] berücksichtigt über das iterative Berechnungsverfahren die Auswirkungen des Verschleißes auf die Last- und Pressungsverteilung.

Mit dem Berechnungsansatz, welcher in Formel (2-10) dargestellt ist, wird die örtliche Verschleißrate dW pro 10^6 Zyklen ermittelt. Es wird der Schmierstoffkennwert k_S sowie der Werkstoffkennwert k_W herangezogen. Zudem findet das Verhältnis der mittleren Oberflächenrauheit Ra_Σ und der Schmierfilmdicke h Anwendung. Das spezifische Gleiten ζ wird durch das Verhältnis der Gleitgeschwindigkeit v_g und der Summengeschwindigkeit v_Σ miteinbezogen.

$$\left(\frac{dW}{dN}\right)_{1,2} = k_S \cdot k_W \cdot \left(\frac{p_H}{p_{H,L}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{|v_g|}{|v_{g,L}|}\right)^\beta \cdot \left[1 - \left(\frac{Ra_\Sigma}{Ra_{\Sigma,L}}\right)^\kappa \cdot \frac{v_g}{v_\Sigma}\right]^\chi \cdot \left(\frac{Ra_\Sigma}{h}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{H}{H_L}\right)^\delta \cdot \frac{1}{N_L} \quad (2-10)$$

Die Berechnung erfolgt zudem durch den Vergleich der lokalen Hertz'schen Pressung p_H , der lokalen Gleitgeschwindigkeit v_g , der mittleren arithmetischen Mittenrauheit Ra_Σ und der Vickershärte H mit Bezugsgrößen. Diese Bezugsgrößen sind die in Formel (2-10) mit L indizierten Parameter und in Tabelle 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-4: Bezugsgrößen der Formel (2-10) nach Walkowiak

$p_{H,L}$	$v_{g,L}$	$Ra_{\Sigma,L}$	H_L	N_L
2000 MPa	2 m/s	0,5 μm	700 HV	10^6

In Tabelle 2-5 sind die Exponenten der Formel (2-10) aufgeführt. Diese wurden durch eine Parametervariation von Lützig ermittelt und anhand von Prüfstandsversuchen validiert. In diesen Versuchen wurde ein Mineralöl der ISO VG 220, welches mit Anglamol 99 (A99) additiviert war, verwendet.

Tabelle 2-5: Exponenten der Formel (2-10) nach Walkowiak

α	β	κ	χ	γ	δ
1,5	0,1	2	3	1,5	2,5

2.4.4 Weitere Berechnungsverfahren

Neben den bereits vorgestellten Berechnungsverfahren sind weitere Berechnungsmodelle zur Graufleckentragfähigkeit sowie Berechnungsansätze zur Bestimmung der Schmierfilmdicke als charakteristische Größe zur Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit verfügbar.

In der Berechnungsmethode nach AGMA 925-A03 [AGM03] werden die Auswirkungen von Zahnflankenschäden, wie Fressen, Verschleiß, Grübchen und auch Grauflecken berücksichtigt. Die Berechnung der Schmierfilmdicke erfolgt nach Dowson/Higginson [Dow66] und ist somit ähnlich zu der Methode nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a]. Der in der ISO/TS 6336-22 [ISO18a] verwendete Gleitparameter $S_{GF,Y}$ wird nach AGMA 925-A03 [AGM03] nicht berücksichtigt. Zudem wird die zentrale Schmierfilmdicke h_0 und nicht die minimale Schmierfilmdicke h_{min} betrachtet. Nach dieser Methode wird im Gegensatz zur Methode nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] kein Sicherheitswert gegen Graufleckigkeit berechnet.

Brandao et al. [Bra10a] entwickelten ein numerisches Modell zur Vorhersage der Entstehung von Graufleckigkeit an Zahnrädern. In diesem Modell wird der Masseverlust und das Rauheitsprofil simuliert. Die spezifische Schmierfilmdicke Λ wird in diesem Modell mit der zentralen Schmierfilmdicke h_0 und der quadratischen Mittenrauheit R_q nach Formel (2-11) berechnet. Die quadratische Mittenrauheit R_q ist ein aus den Kontaktflächen R_{q1} und R_{q2} ermittelter Wert nach Formel (2-12).

$$\Lambda = \frac{h_0}{R_q} \quad (2-11)$$

$$R_q \approx \sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2} \quad (2-12)$$

Die simulierten Ergebnisse wurden von Brandao et al. [Bra10b] mit experimentellen Ergebnissen aus modifizierten Graufleckenkurztests basierend auf DGMK 575 [Ste02b] validiert. Durch eine Erweiterung des Modells von Brandao et al. [Bra15] wird zusätzlich der Einfluss durch Verschleiß miteinbezogen.

Morales et al. [Mor11] entwickelten ein Modell, aus welchem eine sich kontinuierlich entwickelnde Schadenskarte, welche die Lage von Grauflecken auf den Kontaktflächen zeigt, resultiert. In diesem Modell wird auch der Einfluss von leichtem Verschleiß auf die Graufleckenbildung berücksichtigt. Das Vorgehen wurde anhand von Bedingungen, welche typisch für Wälzlager sind, validiert. In einer weiteren Studie von Morales et al. [Mor17] erfolgte der Abgleich mit Bedingungen, welche für einsatzgehärtete Zahnräder typisch sind. Die experimentellen Untersuchungen zur Validierung wurden auf einem Drei-Scheiben Prüfstand durchgeführt.

Das Berechnungsmodell nach Li und Kahraman [Li15, Li13, Li14] zeigt die Verteilung von Ausbrüchen durch Graufleckigkeit über der Kontaktfläche in Abhängigkeit der Lastwechsel. Zudem wird der prozentuale Anteil der Graufleckenfläche des Kontaktgebiets ausgegeben. Die Schmierfilmdicke h wird in Abhängigkeit des Weges x und der Zeit t nach Formel (2-13) nach dem Prinzip der TEHD Kontaktmechanik und wie nach Lohner [Loh16b] beschrieben berechnet. Es werden der konstante Parameter h_0' , welcher den Abstand der Achsen der beiden Kontaktpartner beschreibt, die unverformte Geometrie g_0 , die elastische Deformation V und die 3D-Rauheitsprofile der beiden Oberflächen S_1 und S_2 berücksichtigt. Die Formel (2-14) zeigt die Berechnung von g_0 in Abhängigkeit des Weges x und des effektiven Ersatzkrümmungsradius R . Die unverformte Geometrie g_0 beschreibt den geometrischen Abstand zwischen den Kontaktpartnern.

$$h(x, t) = h'_0(t) + g_0(x, t) + V(x, t) - S_1(x, t) - S_2(x, t) \quad (2-13)$$

$$g_0 = \frac{x^2}{2R} \quad (2-14)$$

Jia et al. [Jia19] entwickelten ein Modell zur Simulation der graufleckenbedingten Ausbrüche im EHD-Kontakt bei Mischschmierung. Das Simulationsmodell besteht aus fünf Schritten. Im ersten Schritt wird der Kontaktdruck der Oberflächen p_c , die mittlere Schmierfilmdicke h_m und der Reibungskoeffizient μ in einem EHL(elastohydrodynamic lubrication)-Modells nach Patir und Cheng [Pat78] ermittelt. Die Schmierfilmdicke nach Formel (2-15) bildet hier den Mittelwert über alle berechneten Schmierfilmdicken im Kontakt. M stellt hier die Gesamtanzahl aller berechneten Schmierfilmdicken dar.

$$h_m = \frac{\sum h_i}{M} \quad (2-15)$$

Mit der berechneten mittleren Schmierfilmdicke wird in einem nächsten Schritt die Oberflächenbeanspruchung nach Sackfield und Hills [Sac83] bestimmt. Auf der Grundlage dieser Simulationsergebnisse werden die dreidimensionalen Spannungsfelder unterhalb der Oberfläche mit Hilfe eines Modells für rollende und gleitende Hertz'sche Kontakte berechnet. Im Anschluss wird ein Modell zur Rissausbreitung verwendet, um das Auftreten von Graufleckigkeit anhand des Spannungsverlaufs der Kontaktflächen zu ermitteln. Im letzten Schritt wird eine Verschleißformel abgeleitet, indem die Lastwechselzahl sowie die Oberflächenbeanspruchung mit dem Modell zur Vorhersage des Auftretens von Graufleckigkeit kombiniert werden. Diese Berechnungsmethode wurde anhand eines Stift-auf-Scheibe-Kontakts validiert und zeigt eine gute Übereinstimmung mit der experimentellen Erprobung im Bereich von Reibungszahlen $\mu = 0,10 - 0,15$.

Evans et al. [Eva13] verwenden ein Mischschmierungsmodell zur Vorhersage des Wachstums von Graufleckigkeit während eines Eingriffszyklus in einem Zahnradpaar. Die Berechnung wird unter Verwendung der dreidimensionalen Oberflächenstruktur durchgeführt. Die Berechnung der Schmierfilmdicke erfolgt nach der Mikro-EHL-Simulationstechnik, welche in [Elc01, Hol05, Hug00] beschrieben ist. Die erzielten Ergebnisse sind mit experimentellen Untersuchungen an einem Zahnradprüfstand mit schrägverzahnten Prüfrädern gestützt.

Der Mikro-EHL-Bereich beschreibt das Gebiet zwischen Mischschmierung und Vollschrmerung (EHL). Tabelle 2-6 zeigt die Bereiche in Abhängigkeit von der spezifischen Schmierfilmdicke nach Formel (2-11). [Han21]

Tabelle 2-6: Schmierungszustände nach Hansen [Han21]

Bereich	Bezeichnung
$\Lambda \leq 1$	Grenzschrmerung
$1 < \Lambda < 3$	Mischschmrerung
$\Lambda \geq 3$	Vollschrmerung (EHL)

Hansen [Han21] entwickelte einen Parameter zur Beschreibung der Schmierfilmdicke Λ^* , welche die Veränderungen von rauen Oberflächen durch beispielsweise einen Einlaufprozess berücksichtigt. Nach Formel (2-16) wird für die Berechnung der Schmierfilmdicke rauer Oberflächen im Mikro-EHL-Gebiet die minimale Schmierfilmdicke h_{\min} und zentrale Schmierfilmdicke h_0 berücksichtigt. Zudem finden der 3-D Rauheitsparameter Sp_k , welcher die reduzierte Spitzenhöhe beschreibt, sowie ein dimensionsloser Parameter f_q , welcher von den Unebenheiten und Geometrie der Oberfläche abhängt, Anwendung.

$$\Lambda^* = \frac{h_{min} + [h_0 \cdot f_q]}{Spk} \quad (2-16)$$

Der Parameter Λ^* stellt ein Maß für Schmierfilmbildung da, liefert aber keine vollständige Aussage zur Tragfähigkeit.

Allen in diesem Kapitel beschriebenen Ansätzen ist gemeinsam, dass diese Berechnungen der (spezifischen) Schmierfilmdicke beschreiben, aber keine Möglichkeit bieten die chemischen Wechselwirkungen von Getriebeöl, Additive und Werkstoff zu erfassen.

Die Mehrzahl der bestehenden Berechnungsverfahren sind für die Anwendung von Stirnrädern ausgelegt. Aus diesem Grund wurden einige Berechnungsverfahren für die Berechnung der Graufleckentragfähigkeit von Kegelrädern beispielsweise nach Pellkofer et al. [Pel19] oder Innenverzahnungen beispielsweise nach Höhn et al. [Höh11] angepasst.

2.5 Fazit zum Stand des Wissens

Die Analyse zum Stand des Wissens ergab, dass bereits ein relatives umfassendes Wissen zur Zahnradgraufleckigkeit im Hinblick auf das Schadensbild und -mechanismus sowie zu maßgebenden Einflussgrößen auf die Graufleckigkeit vorhanden ist. Allerdings wird kontinuierlich an dieser Thematik geforscht und es werden neue, aktuelle Erkenntnisse gewonnen. Dies zeigt die große Relevanz dieser Thematik.

Zudem sind Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierstoff-Getriebe-Systemen verfügbar. Allerdings ist der physikalisch-chemische Einfluss der Additive im Getriebeschmierstoff bisher nicht rein rechnerisch abschätzbar. Daher ist es weiterhin notwendig die Graufleckentragfähigkeit von Getriebeschmierstoffe experimentell zu ermitteln. Zur Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen wird häufig der Grauflecken-test nach FVA 54/7 [Sch93] verwendet. Dieser wird als Freigabetest für die industrielle Anwendung verwendet und erlaubt zudem eine weitreichende Differenzierung der Schmierstoffe. Die Versuchsdurchführung des Grauflecken-testes ist in einen Stufen- und einen Dauertest aufgeteilt. Die im Stufentest erreichte Schadenskraftstufe wird in der Regel als entscheidendes Ergebnis aus dem Grauflecken-test zur Klassifizierung der Schmierstoffe verwendet. Mit der Rechenmethode nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] kann dieses Ergebnis als eine Art „Festigkeitskennwert“ eines Schmierstoffs genutzt und für die Berechnung der Graufleckentragfähigkeit von unterschiedlichen Getriebeanwendungen verwendet werden. Mit Hilfe des Dauertests kann eine Aussage zur Schadensentwicklung bei höheren Lastspielzahlen getroffen werden.

Die Prüfbedingungen, -verzahnung und -durchführung des Prüfverfahrens wurden vor ca. 30 Jahren festgelegt. Das Prüfverfahren wird heute für die Freigabe von Getriebeschmierstoffen, welche in unterschiedlichen Anwendungsbereichen wie z. B. Turbo-, Schiffs-, Industrie-, Windkraft- und Fahrzeuggetriebe Anwendung finden, verwendet. Für die Betrachtung von unterschiedlichen, modernen Getriebeanwendungen können spezielle Prüfbedingungen nötig sein. Da die Testmethode bei weitestgehend fest definierten Prüfbedingungen erfolgt und bislang noch nicht umfassend untersucht wurde, wie sich spezielle Prüfbedingungen auf das Testergebnis im Grauflecken-test auswirken, werden oftmals zusätzliche hausinterne Tests durchgeführt. Dies führt zu einem erhöhten Prüfaufwand, welcher durch integrierte Prüfbedingungen oder einem erweiterten Kenntnisstand zum Einfluss der speziellen Prüfbedingungen auf das Testergebnis ggf. vermeidbar ist.

Die eingeschränkte Praxisnähe der Verzahnung (Geradverzahnung mit MAAG-0° Glattschliff, ohne Zahnflankenkorrekturen) gibt seit längerem Anlass zu Diskussionen verbunden mit der

Frage der Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf Praxisgetriebe. Der MAAG-0° Glattschliff ist in der heutigen industriellen Praxis nicht mehr verbreitet und annähernd vollständig durch moderne Schleifverfahren, wie beispielsweise das Profilschleifverfahren, ersetzt worden [Bau86]. In der Praxis verwendete Verzahnungen sind meist schrägverzahnt und bei Verwendung von Geradverzahnungen sind diese in der Regel korrigiert. Es fehlen bislang systematische Untersuchungen zum Einfluss auf das Ergebnis des Graufleckentests durch Verwendung von verschiedenen praxisnahen Prüfverzahnungen im Hinblick auf eine vorteilhafte Verwendung im Graufleckentest.

Zudem erschwert die Ausbildung einer Schabemarke insbesondere bei hochtragfähigen Getriebeschmierstoffen aufgrund des vorzeitigen Eingriffs der unkorrigierten Prüfverzahnung (C-GF-Verzahnung) die zuverlässige Bewertung der graufleckenbedingten Profilformabweichungen. In der Folge kann es zu Fehlbewertungen des Testergebnisses kommen. Das Auftreten einer Schabemarke im Dauertest kann zusätzlich zu frühzeitiger Grübchenbildung führen, welche eine einheitliche Testauswertung erschwert. Zur Weiterentwicklung des Testverfahrens ist es vorteilhaft Maßnahmen aufzuzeigen, welche das Auftreten einer Schabemarke, ohne das Testergebnis durch die entsprechende Maßnahme zu beeinflussen, reduzieren. Hierzu sind systematische Untersuchungen zur Definition zielführender Maßnahmen sowie Untersuchungen zum Einfluss auf das Testergebnis durch diese Maßnahmen notwendig.

Zur Durchführung der Testmethode nach FVA 54/7 wird ein hoher Zeit- und Dokumentationsaufwand benötigt. Ursächlich für den hohen Zeitaufwand sind hauptsächlich die langen Laufzeiten im Dauertest. Der Ausbau, das Vermessen, die Begutachtung und der Wiedereinbau der Prüfräder nach jeder Kraftstufe im Stufentest und nach jedem Intervall im Dauertest führt zu dem hohen Dokumentationsaufwand. Entsprechende Untersuchungen zur Reduzierung des Aufwandes bei vertretbarem Informationsverlust können ggf. helfen die Testmethode zu optimieren.

Auf Basis des Stands des Wissens werden die Zielsetzung und der Lösungsweg dieser Arbeit definiert, welche viele in der Literatur nicht behandelte Inhalte und ungeklärte Fragestellungen diskutiert und somit deren Erforschung zu einer zuverlässigen Beurteilung der Zahnrad-Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen beiträgt.

3 Zielsetzung und Lösungsweg

Die Analyse zum Stand des Wissens zeigt die große Relevanz einer zuverlässigen und einheitlichen Prüfmethode zur Bewertung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen. Der weit verbreitete Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] soll daher auf moderne Anforderungen hin geprüft und ggf. weiterentwickelt werden. Im Folgenden wird auf die Zielsetzung und den Lösungsweg der Arbeit eingegangen.

3.1 Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist, eine zuverlässige Bewertung von Getriebeölen für die Zahnrad-Graufleckentragfähigkeit sicher zu stellen. Hierfür wird der Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] auf dessen Praxistauglichkeit für verschiedene, moderne Getriebeanwendungen untersucht. Wird dabei eine zuverlässige Übertragbarkeit der Ergebnisse des bestehenden Graufleckentests auf moderne Zahnradgetriebeanwendungen festgestellt, kann die Eignung des Testverfahrens auch unter heutigen Anforderungen nachgewiesen werden. Stellt sich dagegen nur eine begrenzte Übertragbarkeit der Ergebnisse des bestehenden Graufleckentests auf moderne Zahnradgetriebeanwendungen heraus, so werden auf Basis der Forschungsergebnisse Modifizierungen für den Graufleckentest für spezielle Anwendungsbereiche abgeleitet.

Aufgrund der eingeschränkten Praxisnähe der Verzahnung (Geradverzahnung mit MAAG-0° Glattschliff, ohne Zahnflankenkorrekturen) und die im Wesentlichen festgelegten Prüfbedingungen, werden verschiedene praxisnahe Prüfverzahnungen und Prüfbedingungen im Hinblick auf eine vorteilhafte Verwendung im Graufleckentest untersucht.

Da die Ausbildung einer Schabemarke die zuverlässige Bewertung der graufleckenbedingten Profilformabweichungen erschwert, kann es in der Folge zu Fehlbewertungen kommen. Deshalb werden verschiedene Möglichkeiten wie beispielsweise eine Änderung der Treibrichtung oder Verwendung einer korrigierten Verzahnung untersucht, um das Auftreten der Schabemarke zu vermeiden.

Des Weiteren können Schmierstoffe, die im Stufentest das festgelegte Schadenskriterium nicht überschreiten, bisher nicht mehr weiter differenziert werden. Ziel ist es, die Erweiterung um zusätzliche Kraftstufen im Stufentest zu untersuchen.

Da der Prüf-, Dokumentations- und Auswerteaufwand der Prüfmethode nach FVA 54/7 sehr hoch ist, sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden den Aufwand der Prüfmethode bei vergleichbarem Informationsgehalt zu reduzieren.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind ein wichtiger Schritt zur Vereinheitlichung der Prüfmethode unter Berücksichtigung unterschiedlicher industrieller Anwendungsbereiche. Dies führt zur Ablösung von zusätzlichen hausinternen Testverfahren und somit zur Reduzierung von Kosten- und Zeitaufwand in der Schmierstoffentwicklung bzw. -freigabe. Die Aussagekraft des Tests wird insgesamt erhöht und die Anbindung an die bestehende Testmethode bleibt bestehen. Die Anbindung an die bestehende Testmethode ist von erhöhter Relevanz, da diese weit verbreitet ist und somit eine weitergehende Differenzierung der Schmierstoffe über einen langen Zeitraum erlaubt. Zudem können erweiterte Kenntnisse zum Einfluss von Schmierstoff und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit gewonnen werden.

3.2 Überblick über den Lösungsweg

Um die genannten Ziele zu erreichen, wurden zunächst theoretische Untersuchungen zur Begrenzung des Zeit- und Dokumentationsaufwands der Testmethode, zur vergleichenden Analyse unterschiedlicher Testverfahren sowie zur Auslegung der Prüfverzahnung und Festlegung der Prüfbedingungen durchgeführt. Anschließend erfolgten experimentelle Arbeiten in welchen untersucht wurde, inwieweit Änderungen hinsichtlich Prüfverzahnung, Prüfbedingungen und Prüfprozedur zu einer Beeinflussung der Ergebnisse im Vergleich zur bestehenden Prüfmethode nach FVA 54/7 [Sch93] führen. Zudem wurden experimentelle Untersuchungen zur Modifikation der Testmethode durchgeführt. Der grundlegende Ablauf des Graufleckentests nach FVA 54/7 [Sch93], bestehend aus einem Stufentest und einem Einstufen-Dauertest, sollte dabei prinzipiell beibehalten werden. Zudem wurde die mögliche Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest experimentell untersucht. Des Weiteren wurde überprüft, ob ein zusätzlicher Anwendungsdauertest als eine Art Einstufentest mit alternativen Prüfbedingungen Vorteile bringt. Für neu definierte Prüfabschnitte wie z. B. Anwendungsdauertests für unterschiedliche industrielle Anwendungen wurden entsprechende Schadenskriterien bzw. Beurteilungsverfahren auf Basis der durchgeführten experimentellen Untersuchungen vorgeschlagen. Für eine mögliche Weiterentwicklung des Graufleckentests wurden dabei neben der Güte der Testergebnisse auch weitergehende Anforderungen an eine standardisierte Prüfprozedur, wie z. B. Fertigungsmöglichkeiten für die Prüfräder und Randbedingungen bestehender Prüfeinrichtungen bewertet. Abschließend wurden die neuen Erkenntnisse in den Stand des Wissens eingeordnet. Das experimentelle Versuchsprogramm ist in Abschnitt 3.3 ausführlich dargestellt. Auf die theoretischen Untersuchungen wird im Folgenden detailliert eingegangen.

Reduzierung von Zeit- und Dokumentationsaufwand im Dauertest

Im Dauertest nach FVA 54/7 [Sch93] wird zunächst ein Prüfintervall von 80 h in Kraftstufe 8 durchgeführt und anschließend folgen bis zu fünf Prüfintervalle mit jeweils 80 h Laufzeit in Kraftstufe 10. Zudem werden die Prüfräder im Anschluss an jedes Prüfintervall ausgebaut, gewogen, vermessen und lichtmikroskopisch dokumentiert. Hieraus ergibt sich ein hoher Zeit- und Dokumentationsaufwand. Deshalb wurde untersucht, ob bei einem Wegfallen der letzten beiden Prüfintervalle im Dauertest und gleichzeitigem Durchführen einer mathematischen Abschätzung der Graufleckentwicklung für diese beiden Intervalle aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können. Zu diesem Zweck wurden die zahlreichen an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnisse mit dem Standard-Graufleckentest [Sch93] statistisch ausgewertet. Betrachtet wurde zunächst die Art des Verlaufs (degressiv/progressiv) der typischen Schadenskenngößen graufleckenbedingte Profilformabweichung, Graufleckenfläche und Masseverlust. Zudem wurde eine Methode zur Extrapolation der Graufleckenentwicklung entwickelt und validiert.

Reduzierung von Dokumentationsaufwand im Stufentest

Bisher erfolgt die Prüfung und Dokumentation der Zustände der Zahnflanken nach jeder Kraftstufe im Stufentest. Die Prüfverzahnungen müssen dabei ausgebaut, gereinigt und wieder eingebaut werden. Zudem erfolgt die Bestimmung der Profilformabweichung, des Masseverlusts und der Graufleckenfläche. Es wurde überprüft, ob Messungen und Auswertungen erst nach Kraftstufe 7 im Stufentest in Abhängigkeit der Entwicklung der Graufleckigkeit erfolgen können und somit die Anzahl der Messungen reduziert werden kann.

Gegenüberstellung unterschiedlicher Graufleckentestverfahren

Es wurden für verschiedene Testverfahren unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Prüfbedingungen und –verzahnungen die charakteristischen Kennwerte Hertz'sche Pressung, Blitztemperatur, minimale Schmierfilmdicke und Sicherheit gegen Graufleckenbildung berechnet und gegenübergestellt. Zudem wurden die in diesen unterschiedlichen Testverfahren verwendeten Prüfverzahnungen und Prüfbedingungen isoliert betrachtet. Diese theoretischen Untersuchungen dienen auch als Grundlage für die Auslegung der in dieser Arbeit untersuchten Prüfverzahnungen. Daher wurden ausgewählte, anwendungsnahe Prüfverzahnungen hinsichtlich ihrer Eignung zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierstoffen im FZG-Zahnradverspannungsprüfstand bewertet.

Auslegung der Prüfverzahnungen und Festlegung der Prüfbedingungen

Für die verwendeten Prüfverzahnungen wurden Einflüsse aus dem Zahnflankenschleifverfahren, der Feingeometrie (Zahnflankenkorrekturen) und der Verzahnungshauptgeometrie berücksichtigt. Für das Zahnflankenschleifverfahren wurde das Profilformschleifverfahren verwendet, da dieses in der Praxis weit verbreitet ist und das Verfahren mit dem MAAG-0° Glattschliff des bestehenden Graufleckentests nach FVA 54/7 [Sch93] weitestgehend ersetzt hat. Für die Auslegung der Prüfverzahnungen wurden verschiedene Zahnflankenkorrekturen betrachtet und hinsichtlich ihrer Eignung im Graufleckentest bewertet. Zur anwendungsnäheren Gestaltung des Prüfverfahrens wurde ergänzend eine Schrägverzahnung eingesetzt, welche ebenfalls anhand von theoretischen Studien definiert wurde.

Es wurden die Prüfbedingungen der durchzuführenden experimentellen Untersuchungen festgelegt. Hierzu wurden nach einer umfassenden Recherche praxisnahe Betriebsbedingungen (u. a. Drehzahl, Temperatur, Änderung der Treibrichtung) je nach Anwendungsgebiet betrachtet. Anwendungsgebiete sind Fahrzeug- und Windkraftgetriebe.

Die Prüfung der Eignung dieser Betriebsbedingungen sowie der ausgelegten Prüfverzahnungen für einen Graufleckentest erfolgt anschließend in experimentellen Untersuchungen.

3.3 Detaillierte Darstellung der experimentellen Arbeiten

Im Folgenden wird das Versuchsprogramm der experimentellen Arbeiten dargestellt. Es erfolgt eine Beschreibung der einzelnen Versuchspakete.

Versuchspaket „Untersuchungen zum Werkstoffeinfluss“

Der Werkstoff 16MnCr5 wird standardmäßig zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] eingesetzt. Da der Werkstoff 18CrNiMo7-6 insbesondere im Bereich von Windkraft- und Industriegetrieben häufig Anwendung findet, wurde dieser im Vergleich zu dem Werkstoff 16MnCr5 anhand von jeweils drei Stufentests unter Verwendung von FVA 3A untersucht. Betrachtet wurden die erzielten Schadenskraftstufen, die Entwicklung der typischen Schadenskenngößen sowie das Schadensbild der beiden Werkstoffe.

Versuchspaket „Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest“

Da hochtragfähige Schmierstoffe im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] den Stufentest durchlaufen, ohne das Schadenskriterium zu überschreiten, wurde untersucht, ob der Stufentest um zusätzliche Kraftstufen erweitert werden kann. Die Erweiterung im Stufentest wurde mit dem Ziel untersucht, hochtragfähige Schmierstoffe weiter differenzieren zu können. Die

Erweiterung der Kraftstufen um die Kraftstufen 11 und 12 wurde anhand von zwei unterschiedlichen hochtragfähigen Praxisschmierstoffen geprüft. Jeder Stufentest wird durch einen Wiederholungsversuch abgesichert.

Versuchspaket „Variation der Prüfverzahnung“

Die C-GF-Verzahnung, welche im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] verwendet wird, wird mit dem MAAG-0° Glattschliff geschliffen und als Geradverzahnung ohne Korrektur ausgeführt. Es wurde der Einfluss praxisnäherer Prüfverzahnungen auf das Ergebnis im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] untersucht. Anhand von verschiedenen Prüfverzahnungsvarianten wurden die Feingeometrie (Zahnflankenkorrekturen) und das Zahnflankenschleifverfahren (Profilschleifverfahren) berücksichtigt sowie eine praxisnah korrigierte Schrägverzahnung untersucht. Im Versuchspaket „Variation der Prüfverzahnung“ wurde für alle Verzahnungsvarianten ein Stufen- und ein Dauertest unter Verwendung des Referenzschmierstoffs FVA 3A durchgeführt. Es wurden das erzielte Testergebnis, die Entwicklung der typischen Schadenskenngößen sowie das Schadensbild der verschiedenen Prüfradvarianten vergleichend betrachtet.

Versuchspaket „Variation der Prüfbedingungen“

Die Prüfbedingungen im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] wurden vor circa 30 Jahren festgelegt und werden seitdem unverändert angewandt. Im Versuchspaket „Variation der Prüfbedingungen“ wurden Auswirkungen auf das Ergebnis im Graufleckentest durch Änderung der Prüfbedingungen untersucht. Bei Durchführung von Dauertests wurde die Laufzeit für alle Versuche auf 240 Stunden begrenzt.

Im Versuchspaket „Variation der Prüfbedingungen“ wurde untersucht, ob der Einlauf im Dauertest verkürzt werden kann. Hierfür wurden experimentelle Untersuchungen mit dem Dauertest bei verkürztem Einlauf in Kraftstufe 8 mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A und dem Praxisschmierstoff A (s. Tabelle 5-4) durchgeführt. Als Prüfverzahnung wurden die C-GF-Verzahnung sowie die Verzahnungsvarianten II und III (s. Tabelle 5-1) verwendet. Für die experimentellen Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest wurden Dauertests ohne vorher durchgeführten Stufentest durchgeführt. Hierbei wurde neben dem Einlaufverhalten die Auswirkung auf die Graufleckenentwicklung im Dauertest durch Verkürzung der Laufzeit in Kraftstufe 8 und Wegfallen des Stufentests untersucht.

Ergänzend wurden im Versuchspaket „Variation der Prüfbedingungen“ durch Variation der Prüftemperatur und der Ritzeldrehzahl zwei Anwendungsfälle nachgebildet. Zum einen wurden die Prüfbedingungen an die Bedingungen in Automobilgetrieben und zum anderen an die Bedingungen in Windkraftgetrieben angelehnt. Die Untersuchungen wurden mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A und der Verzahnungsvariante III (s. Tabelle 5-1) durchgeführt. Bei im Vergleich zum Standardtest erhöhter Schmierstofftemperatur von 120 °C wurde ein Stufen- und ein anschließender Dauertest sowie ein Dauertest ohne Stufentest durchgeführt. Bei den an die Windkraftgetriebe angepassten Prüfbedingungen wurde eine verringerte Einspritztemperatur von 60 °C und eine verringerte Drehzahl von $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$ eingestellt und unter diesen Prüfbedingungen ein Stufen- und ein anschließender Dauertest sowie ein Dauertest ohne Stufentest durchgeführt. Zudem wurde ein Dauertest bei reduzierter Einspritztemperatur von 60 °C durchgeführt.

Im Rahmen des Versuchspakets „Variation der Prüfbedingungen“ wurde zusätzlich untersucht, ob das Entstehen einer Schabemarke am Ritzel durch Umkehr der Treibrichtung unter Verwendung der C-GF-Verzahnung vermieden werden kann. Zudem wurde der Einfluss durch

Änderung der Treibrichtung auf das Ergebnis im Graufleckentest untersucht. Neben dem Referenzschmierstoff FVA 3A wurde der Praxisschmierstoff A (s. Tabelle 5-4) verwendet, da bei dem Praxisschmierstoff A typischerweise eine Schabemarke im Test auftritt.

Versuchspakete „Überprüfung der Praxis-Eignung“ und „Ergänzende Referenzversuche“

Zur Überprüfung der Eignung der erzielten Ergebnisse muss die Differenzierbarkeit von unterschiedlichen Schmierstoffen bestätigt werden. Deshalb wurden experimentelle Untersuchungen zur Absicherung anhand von drei Praxisschmierstoffen sowie notwendige ergänzende Referenzversuche durchgeführt.

Auf Basis von Erkenntnissen aus dem Versuchspaket „Variation Prüfverzahnung“, wurden ergänzende Untersuchungen mit den Varianten I und III und dem Praxisschmierstoff A im Stufen- und Dauertest durchgeführt. Die Laufzeit im Dauertest wurde für alle Versuche auf 240 Stunden begrenzt. Zur Absicherung der Ergebnisse aus dem Versuchspaket „Variation der Prüfbedingung“ wurde ein Stufentest mit treibenden Rad und dem Praxisschmierstoff B (s. Tabelle 5-4) durchgeführt.

Aufbauend auf den Ergebnissen im Versuchspaket „Variation der Prüfbedingungen“ wurde mit dem Praxisschmierstoff C (s. Tabelle 5-4) ein Stufentest bei 120 °C durchgeführt. Zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit bei Standardbedingungen wurde ein Referenzversuch bei 90 °C mit dem Praxisschmierstoff C durchgeführt.

Aufgrund der Ergebnisse in dem Versuchspaket „Erweiterung Kraftstufen Stufentest“ wurde untersucht, wie sich die Erweiterung der Kraftstufen auf das Langzeitverhalten im Dauertest auswirkt. Hierzu wurde ein Dauertest, welcher nach FVA 54/7 [Sch93] aus 80 Stunden in Kraftstufe 8 und bis zu 400 Stunden in Kraftstufe 10 besteht, an den mit den Kraftstufen 11 und 12 erweiterten Stufentest mit dem Praxisschmierstoff B angeschlossen. Der Dauertest wurde in der Kraftstufe 10 und nicht in Kraftstufe 11 oder 12 durchgeführt, da in höheren Kraftstufen hohe Pressungen entstehen und damit die Gefahr von Grübchenbildung erhöht wird. Um eine Referenz zu erhalten, wurde ein weiterer Versuch unter Verwendung des Praxisschmierstoffs B mit standardmäßigen Stufen- und Dauertest nach FVA 54/7 [Sch93] durchgeführt.

Die Tabelle 3-1 zeigt das vollständige experimentelle Versuchsprogramm.

Tabelle 3-1: Vollständiges experimentelles Versuchsprogramm

Versuchspaket	Testabschnitt	Prüfbedingung	Verzahnung	Öl	Werkstoff
Werkstoffeinfluss	ST	Standard	C-GF	FVA 3A	16MnCr5
					18CrNiMo7-6
Erweiterung Kraftstufen ST	ST	Standard	C-GF	Praxis A	16MnCr5
				Praxis B	
Variation Prüfverzahnung	ST + DT	Standard	C-GF	FVA 3A	16MnCr5
			I		
			II		
			III		
			IV		
Variation Prüfbedingung	ST + DT, DT	Erhöhung $\vartheta_{\text{Öl}}$	III	FVA 3A	16MnCr5
	ST + DT, DT	Verringerung $\vartheta_{\text{Öl}}$ und n_1	III		
	DT	Verringerung $\vartheta_{\text{Öl}}$	III		
	DT	Kürzung Einlauf DT	C-GF/ III /II	FVA 3A + Praxis A	
	ST + DT	Rad treibt	C-GF		
Überprüfung der Praxis-Eignung	ST + DT	Standard	I / III	Praxis A	16MnCr5
	ST	Rad treibt	C-GF	Praxis B	
	ST	Erhöhung $\vartheta_{\text{Öl}}$	III	Praxis C	
	DT	Erweiterung Stufentest	C-GF	Praxis B	
Ergänzende Referenzversuche	ST + DT	Standard	C-GF	Praxis B	16MnCr5
	ST	Standard	III	Praxis C	
Legende: ST: Stufentest DT: Dauertest Definition Verzahnung: s. Abschnitt 5.2 Definition Schmierstoff: s. Abschnitt 5.4					

4 Theoretische Untersuchungen

Es wurde anhand von statistischen Auswertungen der an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnisse mit dem Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] untersucht, ob der hohe Zeit- und Dokumentationsaufwand im Dauertest sowie der hohe Dokumentationsaufwand im Stufentests bei vertretbarem Informationsverlust reduziert werden kann. Zudem wurden theoretische Studien zur Gegenüberstellung unterschiedlicher Graufleckentestverfahren durchgeführt und die für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Prüfverzahnungen ausgelegt sowie die verwendeten Prüfbedingungen festgelegt.

4.1 Reduzierung von Zeit- und Dokumentationsaufwand im Dauertest

Durch eine statistische Auswertung der zahlreichen an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnisse mit dem Standard-Graufleckentest wurde abgeschätzt, inwieweit eine Verkürzung des Dauertests aussagekräftige Ergebnisse erzielen kann und eine rechnerische Extrapolation der in frühen Laufzeiten experimentell ermittelten Werte mit ausreichender Genauigkeit möglich ist. Hierzu wurden Verläufe typischer Schadenskenngößen (Profilformabweichung, Graufleckenfläche und Masseverlust) betrachtet.

Die hierfür betrachteten 64 zufällig ausgewählten Graufleckentests wurden mit der C-GF-Verzahnung, einer Umfangsgeschwindigkeit am Wälzpunkt von 8,3 m/s und einer Einspritztemperatur von 90 °C oder 60 °C durchgeführt.

Zunächst wurden die ausgewählten Verläufe der Graufleckentests hinsichtlich ihrer Gesamtlaufzeit sowie dem Auftreten ihrer charakteristischen mathematischen Funktionen analysiert. Die Entwicklung der betrachteten Schadenskenngößen wurde anschließend mathematisch abgeschätzt und mit den experimentell ermittelten Werten verglichen und verifiziert. Zudem wurde eine Empfehlung bzgl. der Abschätzung bei verkürzter Laufzeit ausgesprochen. Abschließend wurde überprüft, ob eine Auswertung nach DIN 3990-16 [DIN20] anhand der extrapolierten Werte erfolgen kann.

4.1.1 Analyse der Graufleckenentwicklung ausgewählter Testergebnisse

Bild 4-1 zeigt die mittlere Profilformabweichung der ausgewählten Testergebnisse bei einer Einspritztemperatur von 90 °C. Es ist zu erkennen, dass ungefähr die Hälfte der betrachteten Tests nach 240 h Laufzeit in Kraftstufe 10 beendet wurde. Die statistische Auswertung der betrachteten Verläufe bestätigt, dass 54 % der betrachteten Test spätestens nach 240 h in KS 10 beendet wurden. Zur Verdeutlichung sind die letzten beiden Intervalle in der Kraftstufe 10 in Bild 4-1 blau hinterlegt. Als Grund für das Beenden des Dauertests wurde entweder das Schadenskriterium für die mittlere Profilformabweichung von 20 µm überschritten oder es traten Grübchen auf. Auf Basis dieser Analyse wurde die Verkürzung des Dauertests auf 240 h in Kraftstufe 10 betrachtet und überprüft, ob eine rechnerische Extrapolation der Werte nach 320 h und 400 h in Kraftstufe 10 mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

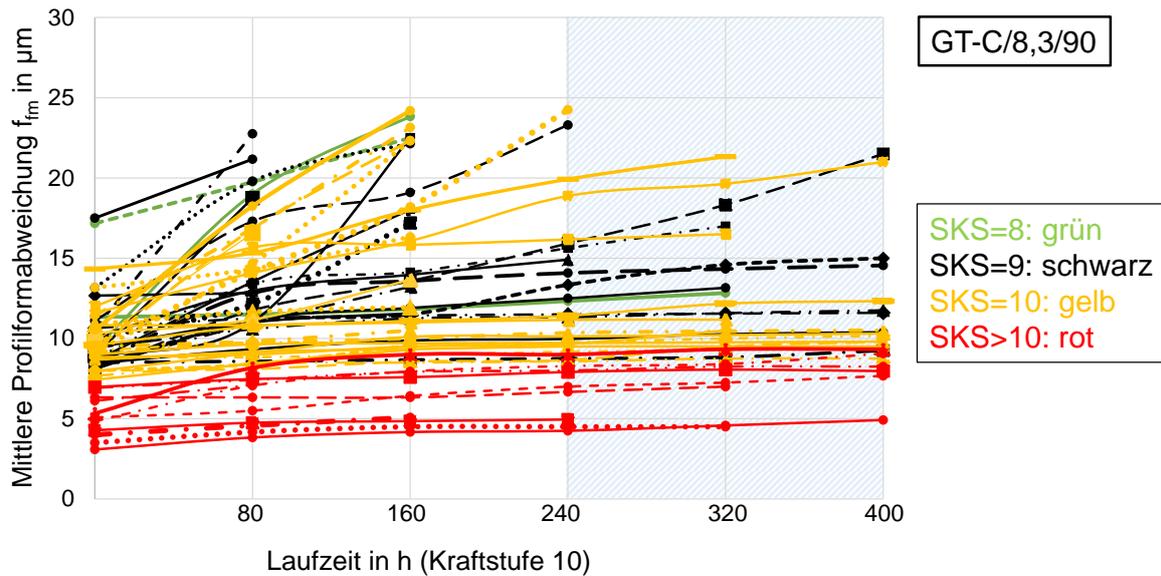


Bild 4-1: Mittlere Profilformabweichung der betrachteten Graufleckentests im Dauertest

Bei Betrachtung der Verläufe fällt auf, dass die Mehrzahl der Verläufe näherungsweise einer linearen Funktion folgen. Eine degressive Charakteristik tritt vereinzelt und eine progressive Entwicklung kaum auf. Tabelle 4-1 zeigt die prozentuale Aufteilung in degressive, progressive und lineare Charakteristik der vorliegenden mittleren Profilformabweichungen aus Bild 4-1.

Tabelle 4-1: Prozentuale Aufteilung der Art der charakteristischen Verläufe der mittleren Profilformabweichungen der betrachteten Graufleckentests im Dauertest (KS 10)

Art des Verlaufs	degressiv	progressiv	linear
Prozentualer Anteil	8 %	5 %	87 %

Solange keine Grübchenbildung auftritt, konnte diese Verlaufscharakteristik ebenfalls für die hier betrachteten Werte der Graufleckenfläche und des Masseverlusts festgestellt werden. Die zu Bild 4-1 dazugehörigen Verläufe der Graufleckenfläche und des Masseverlusts sind im Anhang (s. Bild A.10-10 und Bild A.10-11) dargestellt.

4.1.2 Entwicklung der Methode zur Extrapolation der Graufleckenentwicklung

Für die mathematische Abschätzung des weiteren Verlaufs der typischen Schadenskenngößen wurden auf Basis der Ergebnisse bis 240 h Laufzeit in Kraftstufe 10 die Werte nach 320 h und 400 h Laufzeit in Kraftstufe 10 extrapoliert. Die Berechnungen erfolgten mit Hilfe eines Matlab-Skripts. Matlab ist eine Software der Firma Mathworks zur Lösung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung von Ergebnissen. Der Algorithmus des Matlab-Skripts kann wie folgt beschrieben werden:

- 1) Ermittlung von Funktionen für die experimentell ermittelten Werte nach 80 h in Kraftstufe 8 bis 240 h in Kraftstufe 10 eines jeden Verlaufs mit verschiedenen mathematischen Methoden
- 2) Extrapolation der Werte nach 320 h und 400 h Laufzeit in Kraftstufe 10 für jeden Verlauf mit jeder mathematischen Methode (z. B. linear/nearest/pchip)
- 3) Ermittlung der Abweichung zu den experimentell ermittelten Werten für jede Methode
- 4) Bildung des Mittelwerts der Abweichungen für Werte nach 320 h und 400 h Laufzeit in KS 10 für jede Methode für jeden Verlauf einzeln
- 5) Wahl der Methode mit der geringsten mittleren Abweichung für jeden Verlauf

6) Ausgabe der extrapolierten Werte und zugehörigen Abweichungen der gewählten Methode

Diese Art der mathematischen Berechnung wird im nächsten Kapitel als Methode „kleinsten Abweichung“ bezeichnet.

Im Folgenden werden die häufigsten Methoden („linear“, „nearest“ und „pchip“), mit welchen die Verläufe mit kleinster Abweichung berechnet wurden, kurz und anhand von Beispielen vorgestellt.

Abschätzung mittels der Matlabfunktion „linear“

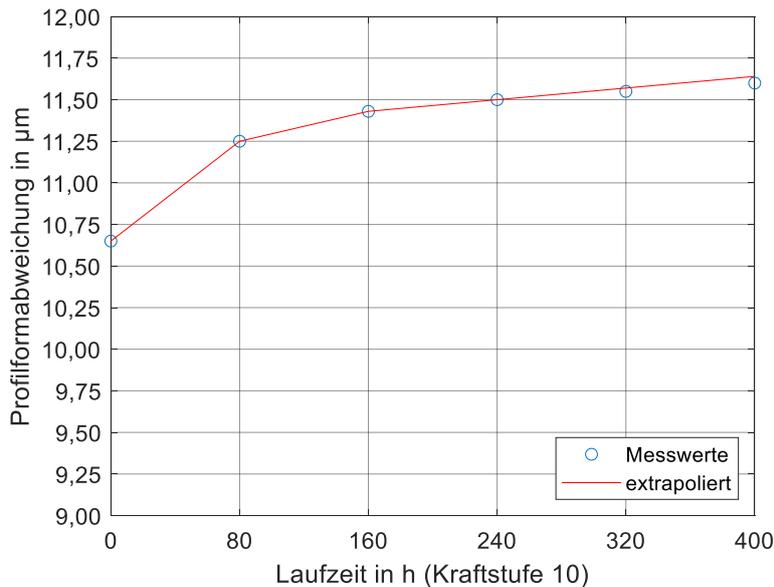


Bild 4-2: Beispiel zur Berechnung mit Methode „linear“

mittelte Fehler der Methode „linear“ gegenüber den tatsächlichen Werten nach 320 und 400 Stunden 0,26 %.

Abschätzung mittels der Matlabfunktion „nearest“

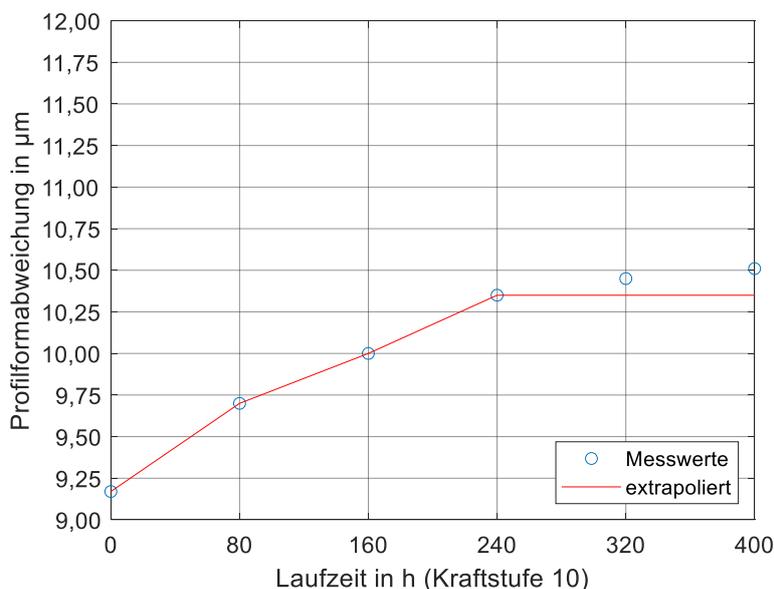


Bild 4-3: Beispiel zur Berechnung mit Methode „nearest“

In Bild 4-2 ist ein Beispiel für die Extrapolation mit der Methode „linear“ dargestellt. Durch Verwendung dieser Methode wird eine lineare Interpolation zwischen zwei Werten durchgeführt. Die letzte Funktion, welche hier zwischen den Werten 160 h und 240 h in KS 10 gebildet wird, wird für die zu extrapolierenden Werte fortgesetzt. In diesem Beispiel beträgt der ge-

In Bild 4-3 ist die Extrapolation mit Hilfe der Methode „nearest“ dargestellt. Bei Inter-/Extrapolation mit dieser Methode wird der Wert des extrapolierten Punktes von dem Punkt übernommen, welcher dem extrapolierten Punkt am nächsten liegt. Dies entspricht im vorliegenden Fall immer dem letzten Wert, welcher nach 240 h in KS 10 auftritt. Die Werte nach

320 h und 400 h in KS 10 entsprechen nach der Methode „nearest“ dem Wert nach 240 h in KS 10. In diesem Beispiel beträgt der gemittelte Fehler der Methode „nearest“ gegenüber den tatsächlichen Werten nach 320 und 400 Stunden 1,24 %.

Abschätzung mittels der Matlabfunktion „pchip“

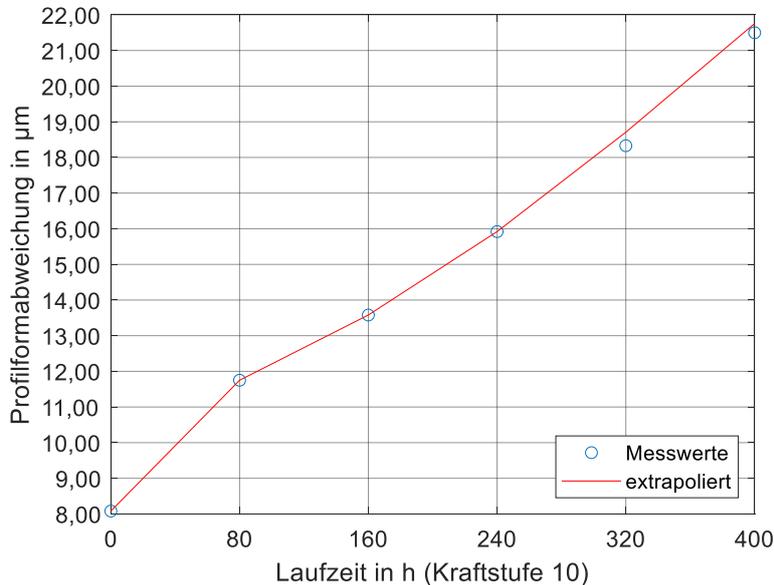


Bild 4-4: Beispiel zur Berechnung mit Methode „pchip“

achten, dass in Bild 4-4 die Skala im Vergleich zu den Beispielen der Methoden „linear“ und „nearest“ fast doppelt so groß gewählt wurde.

Durch Anwendung der Methode „pchip“ wird anhand von vier Werten stückweise kubisch interpoliert. Die zu extrapolierenden Werte nach 320 h und 400 h in KS 10 sind für diese Methode von allen vier Werten abhängig. Bild 4-4 zeigt ein Beispiel für diese Methode. In diesem Beispiel beträgt der gemittelte Fehler der Methode „pchip“ gegenüber den tatsächlichen Werten nach 320 und 400 Stunden 1,62 %. Es ist zu be-

4.1.3 Validierung der Methode zur Extrapolation der Graufleckenentwicklung

Für alle ausgewählten Tests wurden extrapolierte Werte nach 320 und 400 Stunden Laufzeit in Kraftstufe 10 sowie deren mittlere Abweichungen im Vergleich zu den entsprechenden Messwerten mathematisch, wie unter 4.1.2 beschrieben, abgeschätzt.

In Tabelle 4-2 sind die Mittelwerte, Standardabweichungen, Minimum- und Maximumwerte der mittleren Abweichungen der prognostizierten Werte nach der Methode „kleinsten Abweichung“ im Vergleich zu den experimentell ermittelten Werten der typischen Schadens Kenngrößen für Prüfläufe mit 90 °C und in Tabelle 4-3 für 60 °C dargestellt.

Tabelle 4-2: Mittlere Abweichung der Abschätzung mit Methode „kleinsten Abweichung“ (90 °C)

Größe	Mittelwert	Standardabweichung	Minimumwert	Maximumwert
Profilformabweichung	2,07 %	2,63 %	0,00 %	8,69 %
Graufleckenfläche	2,66 %	3,75 %	0,00 %	15,12 %
Masseverlust	6,09 %	5,29 %	0,00 %	25,00 %

Tabelle 4-3: Mittlere Abweichung der Abschätzung mit Methode „kleinsten Abweichung“ (60 °C)

Größe	Mittelwert	Standardabweichung	Minimumwert	Maximumwert
Profilformabweichung	2,19 %	2,42 %	0,00 %	9,05 %
Graufleckenfläche	2,58 %	1,86 %	0,00 %	5,83 %
Masseverlust	4,62%	5,38%	0,00%	19,05%

Es zeigt sich, dass der Trend für die Profilformabweichung und Graufleckenfläche auf mindestens 3 % genau und unabhängig von der Prüftemperatur abgeschätzt werden kann. Der Masseverlust kann stärker abweichen, da das Auftreten von Grübchen durch diese Methode nicht

berücksichtigt wird. Die Laufzeit in Abhängigkeit vom Schadenskriterium (mittlere Profilformabweichung $f_{\text{fm}} > 20 \mu\text{m}$) konnte für alle betrachteten Prüfläufe korrekt abgeschätzt werden. Für die Mehrzahl der Verläufe hat die Methode „linear“ die geringste mittlere Abweichung gezeigt. Bild 4-5 zeigt die Anzahl der gewählten Methode „kleinste Abweichung“ zwischen extrapolierten Werten und Messwerten.

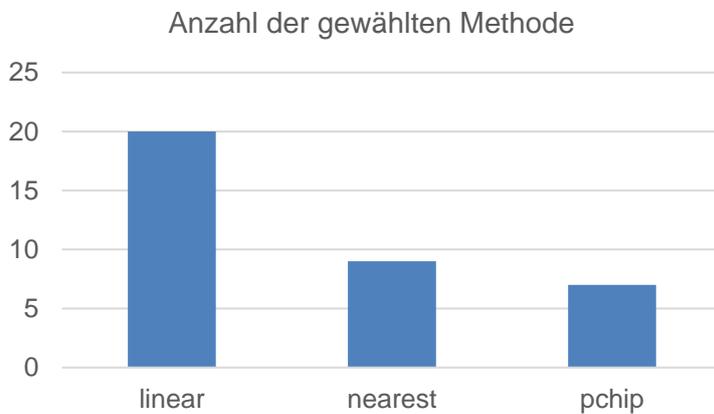


Bild 4-5: Anzahl der gewählten Methode „kleinsten Abweichung“ zwischen extrapolierten Werten und Messwerten

In einem weiteren Schritt wurden die Profilformabweichungen zusätzlich für alle betrachteten Prüfläufe mit der Methode „linear“ abgeschätzt. Die Laufzeit in Abhängigkeit vom Schadenskriterium im Dauertest konnte mit der Methode „linear“ korrekt eingeschätzt werden. Tabelle 4-4 zeigt die ermittelten Abweichungen der Methode „linear“ im Vergleich zur Berechnung mit den verschiedenen Methoden, welche in Ta-

belle 4-4 mit der Methode „kleinste Abweichung“ benannt ist. Es ist zu sehen, dass die Abschätzung mit der Methode „linear“ für alle Verläufe bei Betrachtung der mittleren Abweichung etwas ungenauer ist als mit der Methode „kleinste Abweichung“, wobei der Anstieg $< 1\%$ ist.

Tabelle 4-4: Abschätzung mit der Methode "linear" für alle Versuchspunkte sowie „linear / nearest“ im Vergleich zur Methode „kleinste Abweichung“

Größe	Methode	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Profilformabweichung	kleinste Abweichung	2,07 %	2,63 %	0,00 %	8,69 %
Profilformabweichung	linear	2,76 %	3,34 %	0,00 %	13,48 %
Profilformabweichung	linear / nearest	2,40 %	3,38 %	0,00 %	16,08 %

Die größere Abweichung der Methode „linear“ zu den experimentell ermittelten Werten im Vergleich zur Methode „kleinste Abweichung“ liegt hauptsächlich an den Versuchsläufen, bei welchen sich die Profilformabweichung degressiv entwickelt. Bei der Methode „kleinste Abweichung“ wurden die Werte der degressiven Versuchsläufe nach einer Laufzeit von 320 h und 400 h in Kraftstufe 10 mit „nearest“ abgeschätzt. Dies bedeutet, dass die berechneten Werte den Werten nach einer Laufzeit von 240 h entsprechen und näher an den gemessenen Werten liegen. Die berechneten Werte nach Methode „pchip“ konnten ausreichend genau mit der Methode „linear“ abgeschätzt werden. Es wird daher empfohlen, Werte für 320 h und 400 h Laufzeit in Kraftstufe 10 mit Methode „linear“ anzunähern, wenn die Verläufe bis zu einer Laufzeit von 240 h nicht degressiv erscheinen. Im Fall von degressiven Verläufen ist der Wert nach einer Laufzeit von 240 h in Kraftstufe 10 weiter zu führen. Dies entspricht der Methode „nearest“.

Auf Basis dieser Erkenntnis wurden alle Verläufe erneut mit der Methode „kleinste Abweichung“ abgeschätzt, wobei hier nur die mathematischen Methoden „linear“ und „nearest“ (Methode „linear / nearest“) verwendet wurden. Die hierfür ermittelten Abweichungen sind in Tabelle 4-4 dargestellt. Der Mittelwert der Abweichung der Methode „linear / nearest“ liegt zwischen den Werten, welche mit der Methode „linear“ und mit der Methode „kleinste Abweichung“ (s. Abschnitt 4.1.2) berechnet wurden. Der Wert der maximalen Abweichung der Methode „nearest / linear“ fällt mit 16,08 % im Vergleich zu den anderen Methoden am höchsten

aus. Die maximale Abweichung von 16,08 % entspricht einer absoluten Abweichung von nur 1,5 μm .

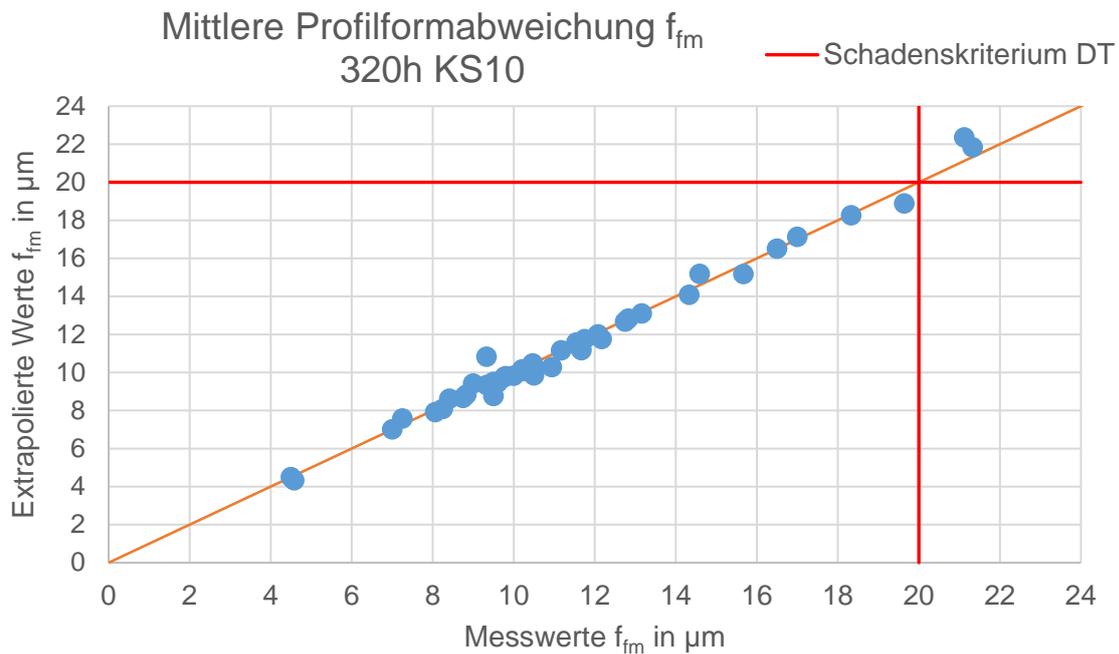


Bild 4-6: Vergleich der extrapolierten Werte mit den Messwerten für 320 h in KS 10

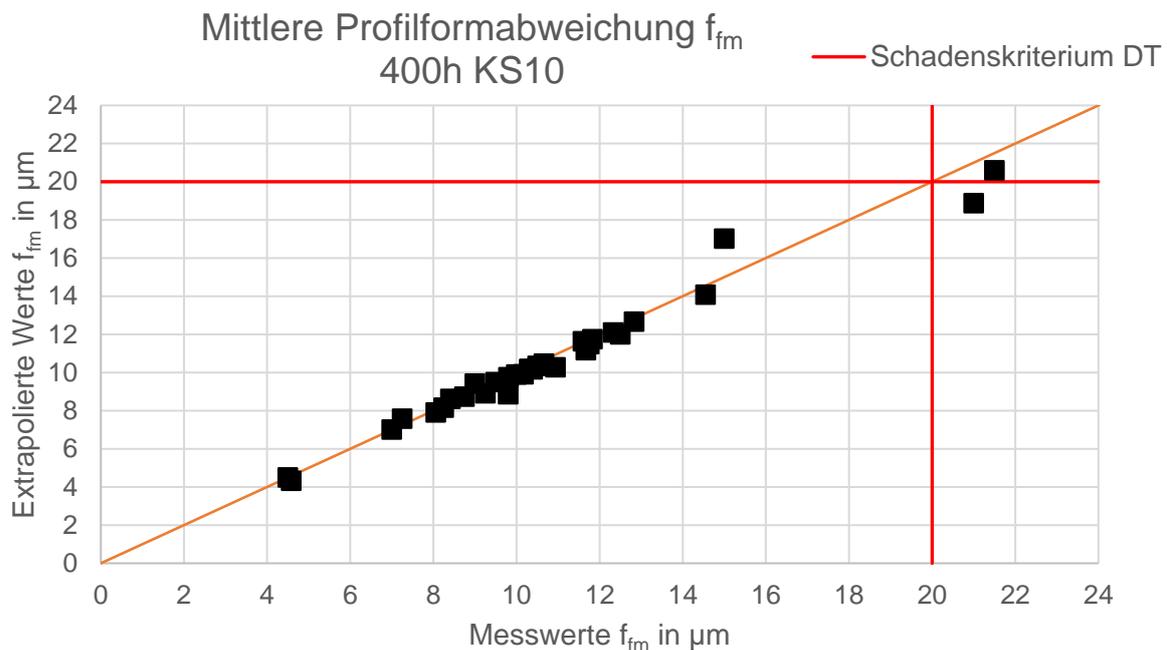


Bild 4-7: Vergleich der extrapolierten Werte mit den Messwerten für 400 h in KS 10

Die extrapolierten Werte mit der Methode „linear / nearest“ gegenüber den Messwerten sind für 320 h in KS 10 in Bild 4-6 und für 400 h in KS 10 in Bild 4-7 zur Veranschaulichung aufgetragen. Die roten Linien kennzeichnen das jeweilige Schadenskriterium von 20 μm für extrapolierte und gemessene Werte im Dauertest. Es ist zu sehen, dass die extrapolierten Werte für 320 h Laufzeit in Kraftstufe 10 sehr nah an den Messwerten liegen. Dies konnte für eine Laufzeit von 400 h in Kraftstufe 10 ebenfalls bestätigt werden.

Wird der Dauertest nach 240 h in Kraftstufe 10 abgebrochen, kann bereits eine aussagekräftige Bewertung bzgl. der Graufleckentragfähigkeit erfolgen und der Trend der Profilformabweichung und Graufleckenfläche mit geringen Abweichungen < 3 % bestimmt werden.

4.1.4 Gegenüberstellung der Einteilung in die GF-Klassen nach DIN 3990-16

Die resultierende Profilformabweichung als Ergebnis aus dem Graufleckentest unterliegt Streuung. Aus diesem Grund werden die getesteten Schmierstoffe in GF-Klassen eingeteilt. Die Einteilung in GF-Klassen sichert eine zuverlässige und einfache Beurteilung der Schmierstoffe und ist insbesondere für den Anwender von großem Interesse. Die Einteilung der getesteten Schmierstoffe in die GF-Klassen dient daher als wesentliches Ergebnis aus dem Graufleckentest. Im Rahmen der DIN 3990-16 [DIN20] wurde eine neue GF-Klasse „GFT-sehr hoch“ eingeführt sowie die Grenzen der GF-Klassen einheitlicher definiert. Im Folgenden werden die extrapolierten Messwerte auf ihre korrekte Einteilung in die GF-Klassen nach DIN 3990-16 überprüft.

Für eine korrekte Einteilung in die GF-Klasse auf Grundlage von extrapolierten Werten, ist die Profilformabweichung nach Ende des Dauertests bei einer Laufzeit von 320 h ($z_{10} = 4$) oder 400 h ($z_{10} = 5$) in Kraftstufe 10 von Interesse. Es ist zu prüfen, ob die GF-Klasse auf Grundlage der extrapolierten Werte mit der GF-Klasse auf Grundlage der gemessenen Werte übereinstimmt. Die Kriterien für die Einteilung in die GF-Klassen nach DIN 3990-16 sind im Anhang (s. Tabelle A.10-4) zu finden.

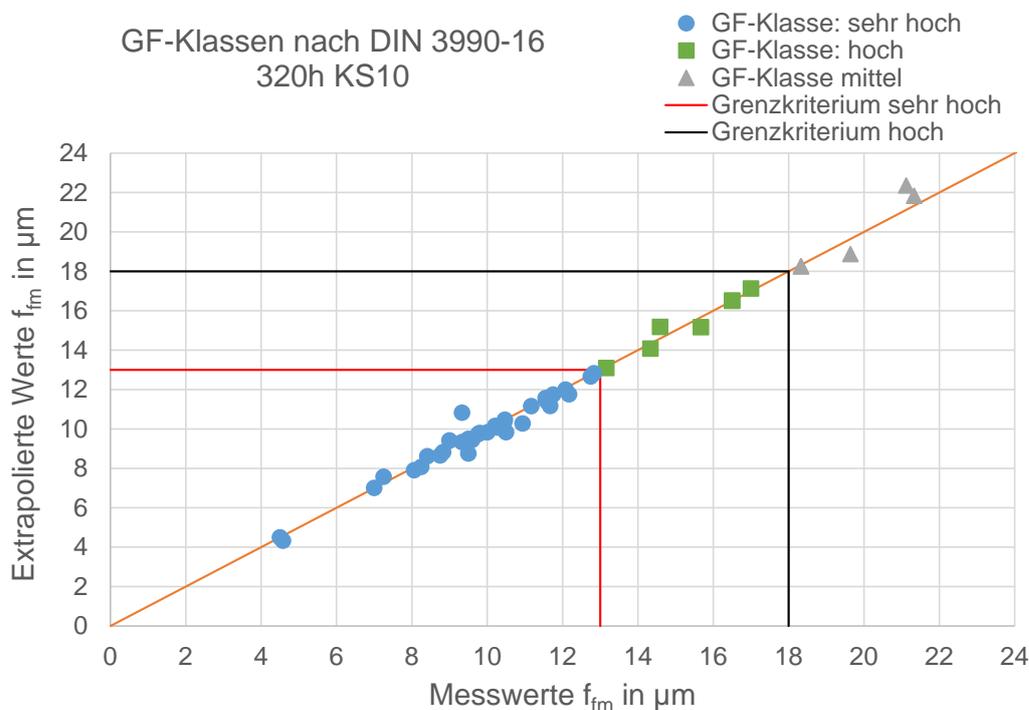


Bild 4-8: Vergleich der ermittelten GF-Klassen nach DIN 3990-16 aus extrapolierten Werten und Messwerten - nach einer Laufzeit von 320 h in Kraftstufe 10

In Bild 4-8 sind die extrapolierten Werte über den Messwerten für eine Laufzeit von 320 h in Kraftstufe 10 aufgetragen (Anzahl extrapolierter Werte > 30). Die roten Linien kennzeichnen den Bereich für das Kriterium GF-Klasse „sehr hoch“ ($f_{fm} \leq 13 \mu\text{m}$) im Dauertest. Alle Werte, welche auf und unterhalb der roten Linien liegen, konnten der GF-Klasse „sehr hoch“ zugeordnet werden. Das Kriterium für die GF-Klasse „hoch“ im Dauertest wird von den roten und schwarzen Linien begrenzt ($13 \mu\text{m} < f_{fm} \leq 18 \mu\text{m}$). Werte die der GF-Klasse „mittel“ zugeordnet werden, sind oberhalb der schwarzen Linie ($f_{fm} > 18 \mu\text{m}$) angeordnet. Die Einteilung der GF-Klasse nach DIN 3990-16 auf Grundlage der extrapolierten Werte nach 320 h Laufzeit in Kraftstufe 10 stimmt mit der Einteilung der GF-Klasse auf Grundlage der gemessenen Werte zu 100 % überein.

Die extrapolierten Werte über den Messwerten für eine Laufzeit von 400 h in Kraftstufe 10 sind in Bild 4-9 aufgetragen. Die roten Linien kennzeichnen den Bereich für das Kriterium GF-Klasse „sehr hoch“ ($f_{fm} \leq 14 \mu\text{m}$) im Dauertest. Alle Werte, welche auf und unterhalb der roten Linien liegen konnten der GF-Klasse sehr hoch zugeordnet werden. Das Kriterium für die GF-Klasse hoch im Dauertest wird von der roten und den schwarzen Linien begrenzt ($14 \mu\text{m} < f_{fm} \leq 20 \mu\text{m}$). Werte die der GF-Klasse mittel zugeordnet werden, sind oberhalb der schwarzen Linie ($f_{fm} > 20 \mu\text{m}$) angeordnet. Allen extrapolierten Werten konnte die gleiche GF-Klasse nach DIN 3990-16 wie den zugehörigen Messwerten zugeordnet werden. Für zwei der betrachteten Verläufe hat sich der Gradient im Dauertest ($(f_{fmz10} - f_{fm} \text{ nach KS 8}) / z10$) etwas stärker geändert als bei den anderen Verläufen. Diese sind in Bild 4-9 mit schwarzen Kreisen markiert. Für den Wert in der GF-Klasse „mittel“ wurde der Gradient zu 1,5 berechnet und experimentell zu 1,9 ermittelt. Für den Wert in der GF-Klasse „hoch“ ergab sich der Gradient rechnerisch zu 1,7 und experimentell zu 1,3. Die Änderung des Gradienten hatte jedoch in beiden Fällen keine Auswirkung auf die Einteilung in die GF-Klassen. Die Einteilung der GF-Klasse nach DIN 3990-16 auf Grundlage der extrapolierten Werte nach 400 h Laufzeit in Kraftstufe 10 stimmt mit der Einteilung der GF-Klasse auf Grundlage der gemessenen Werte zu 100 % überein.

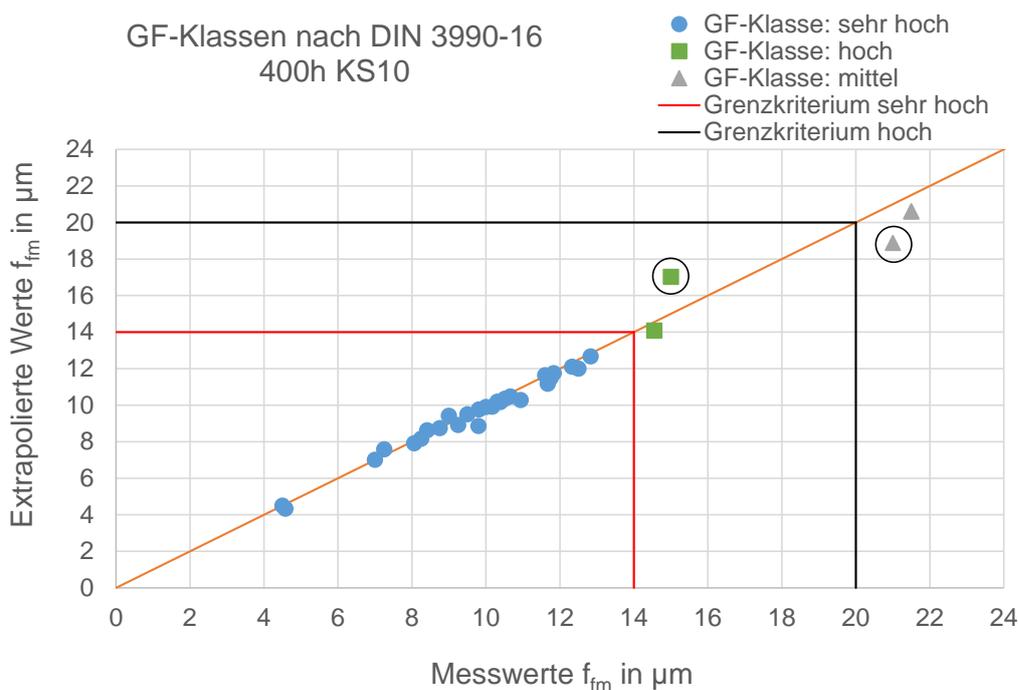


Bild 4-9: Vergleich der ermittelten GF-Klassen nach DIN 3990-16 aus extrapolierten Werten und Messwerten - nach einer Laufzeit von 400 h in Kraftstufe 10

4.2 Reduzierung von Dokumentationsaufwand im Stufentest

Durch eine statistische Auswertung der an der Forschungsstelle zahlreich vorliegenden Versuchsergebnisse des Standard-Graufleckentests wurde abgeschätzt, ob es möglich ist, auf das Ausbauen der Prüfräder in den ersten zwei Kraftstufen 5 und 6 zu verzichten. Zu diesem Zweck wurden die Werte der mittleren Profilformabweichungen f_{fm} nach der Kraftstufe 7 betrachtet. Die 154 zufällig ausgewählten Graufleckentests wurden mit der C-GF-Verzahnung, einer Umfangsgeschwindigkeit am Wälzpunkt von 8,3 m/s und einer Einspritztemperatur von 90 °C oder 60 °C durchgeführt.

Es wurde zunächst der Mittel-, der Minimal- und der Maximalwert der mittleren Profilformabweichung nach der Kraftstufe 7 für jede GF-Klasse bestimmt. Für die GF-Klasse „hoch“ standen 101 Testergebnisse zur Verfügung und für die GF-Klasse „mittel“ 53 Testergebnisse. Diese Aufteilung unterstreicht die Tendenz, dass die an der Forschungsstelle getesteten Schmierstoffe öfters der GF-Klasse „hoch“ als „mittel“ zugeordnet werden. Tabelle 4-5 zeigt die berechneten Mittel-, Minimal- und Maximalwerte der mittleren Profilformabweichung nach der Kraftstufe 7. Die Mittelwerte liegen für beide GF-Klassen deutlich unterhalb des Schadenskriteriums von $7,5 \mu\text{m}$.

Tabelle 4-5: Statistische Auswertung der Profilformabweichung f_{fm} nach der KS 7

GF-Klasse	Anzahl	Mittelwert	Minimalwert	Maximalwert
Hoch	101	3,2 μm	1,5 μm	6,1 μm
Mittel	53	4,4 μm	2,2 μm	7,1 μm

In einem weiteren Schritt wurden die Werte der mittleren Profilformabweichungen in Klassen mit der Klassenweite 0,5 eingeteilt und die absolute Häufigkeit der auftretenden Werte innerhalb der Klassen ermittelt. Die Tabelle 4-6 zeigt die gewählten Klassen und die ermittelten absoluten Häufigkeiten, welche nach den GF-Klassen „hoch“ und „mittel“ aufgeteilt sind. In der Klasse „X“ sind alle Werte zwischen dem nächst niedrigerem Klassenwert und dem Klassenwert „X“ sowie der Wert „X“ enthalten. So sind z. B. in der Klasse „1,5“ alle ermittelten Werte der mittleren Profilformabweichung f_{fm} enthalten, welche dem Kriterium $1,0 < f_{fm} \leq 1,5$ entsprechen.

Tabelle 4-6: Absolute Häufigkeit der mittleren Profilformabweichung nach der KS 7

Klasse	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
Hoch	1	5	18	19	26	15	10	2	4	-	1	-	-
Mittel	-	-	2	5	5	7	10	12	3	6	1	1	1

Für die GF-Klassen „hoch“ und „mittel“ liegen alle ermittelten Profilformabweichungen f_{fm} unterhalb des Schadenskriteriums von $7,5 \mu\text{m}$. Der einzelne Wert, welcher der Klasse 7,5 zugeordnet wird, liegt bei 7,1 (s. Tabelle 4-5). In Bild 4-10 und Bild 4-11 sind die absoluten Häufigkeiten aus Tabelle 4-6 visualisiert. Bild 4-10 zeigt, dass der Großteil (87 %) der mittleren Profilformabweichungen nach der Kraftstufe 7 für die GF-Klasse „hoch“ zwischen $2,5 \mu\text{m}$ und $4,5 \mu\text{m}$ liegt. Für die GF-Klasse „mittel“ sind die Werte zu etwas größeren Werten der mittleren Profilformabweichung f_{fm} verschoben. In Bild 4-11 ist zu sehen, dass der Großteil (91 %) der mittleren Profilformabweichungen nach der Kraftstufe 7 für die GF-Klasse „mittel“ zwischen $3 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$ liegt.

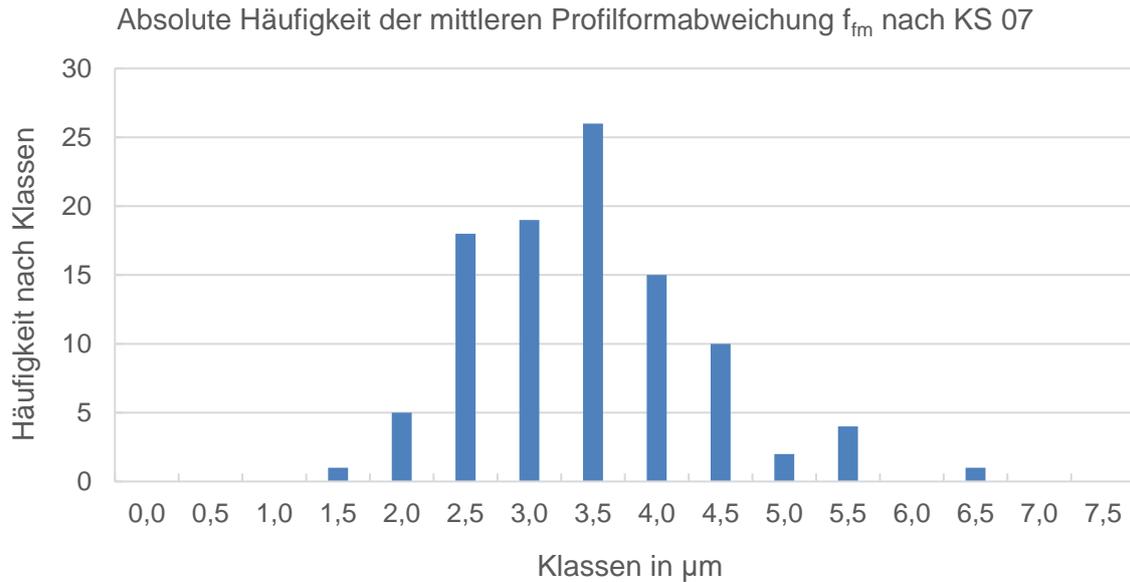


Bild 4-10: Absolute Häufigkeit der mittleren Profilformabweichung nach der KS 7 (GF-Klasse „hoch“)

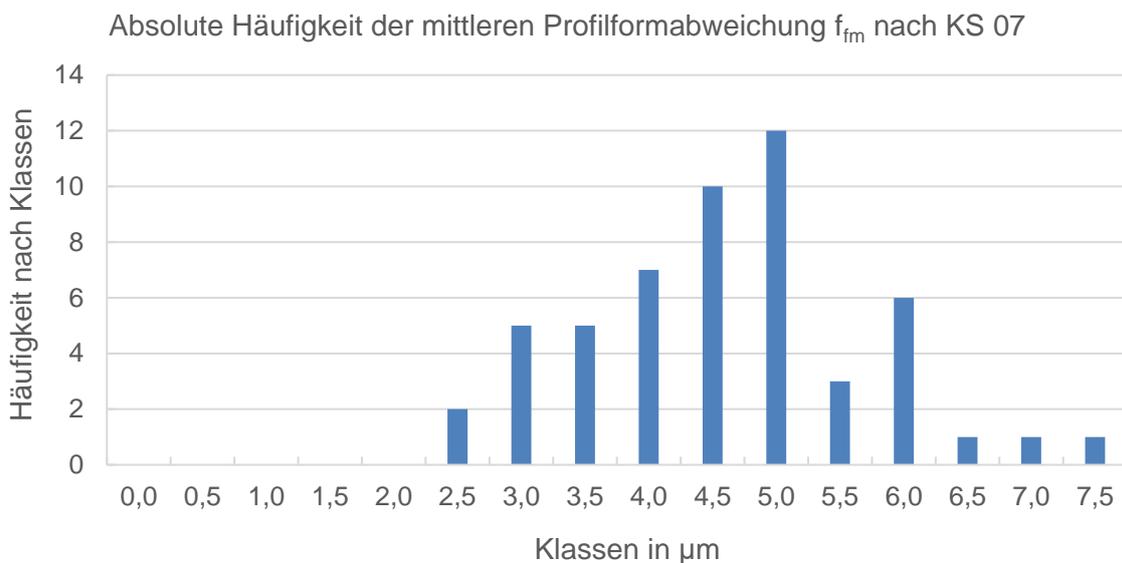


Bild 4-11: Absolute Häufigkeit der mittleren Profilformabweichung nach der KS 7 (GF-Klasse mittel)

Die Ergebnisse dieser theoretischen Untersuchungen zeigen, dass auf Basis der vorliegenden Versuchsergebnisse nach der Kraftstufe 7 eine kleine Profilformabweichung, welche deutlich unterhalb dem Schadenskriterium von $7,5 \mu\text{m}$ für den Stufentest liegt, auftritt. In allen hier betrachteten Fällen hätte ein erstmaliger Ausbau der Prüfräder nach der Kraftstufe 7 keinen Einfluss auf die Bestimmung der SKS gehabt.

4.3 Berechnungsstudie zur vergleichender Bewertung von Graufleckentestverfahren

In Abschnitt 2.3.2 wird ein Überblick über einige bestehende Testverfahren gegeben. Für diese Testverfahren wurden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Prüfbedingungen und Prüfverzahnungen die charakteristischen Kennwerte Blitztemperatur, minimale Schmierfilmdi-

cke und Sicherheit gegen Graufleckenbildung berechnet und gegenübergestellt. Mögliche Einflüsse durch Verwendung eines abweichenden Werkstoffs oder eines alternativen Schleifverfahrens im Vergleich zur Prüfmethode nach FVA 54/7 [Sch93] wurden nicht betrachtet.

Anschließend wurden die in diesen Testverfahren verwendeten Prüfverzahnungen mit weiteren möglichen, praxisnahen Prüfverzahnungen verglichen. Für alle betrachteten Verzahnungen wurden daher zunächst unter den Referenzbedingungen des Graufleckentests nach FVA 54/7 [Sch93] die Kennwerte für Hertz'sche Pressung, Blitztemperatur, spezifisches Gleiten, minimale Schmierfilmdicke und Sicherheit gegen Graufleckenbildung berechnet. Anschließend wurden Einflüsse ausgewählter Betriebsbedingungen anhand der graphischen Darstellung von Blitztemperatur und minimaler Schmierfilmdicke analysiert.

4.3.1 Durchführung der Berechnungen

Für alle Berechnungen wurde das Welle-Lager-System, welches dem Prüfgetriebe nach dem Graufleckentest FVA 54/7 [Sch93] entspricht, vereinfacht in RIKOR (Ritzel-Korrektur Programm) [Neu15] modelliert. Das Ritzeldrehmoment wurde zu 265,1 Nm angenommen, welches der Kraftstufe 10 des Graufleckentests nach FVA 54/7 entspricht. Das Referenzöl FVA 3A wurde als Mineralöl mit einer kinematischen Viskosität von 100 mm²/s bei 40 °C, einer Dichte von 880 kg/m³ bei 15 °C und der Schadenskraftstufe 9 im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] für die Berechnung verwendet. Um die verschiedenen Verzahnungen zu berechnen, wurden nur die entsprechenden Korrekturen beziehungsweise Geometrien geändert und die restlichen Parameter gemäß den Standardbedingungen nach FVA 54/7 unverändert gelassen. Bei der Betrachtung der Betriebsbedingungen erfolgte lediglich eine Änderung der relevanten Parameter.

Die Hertz'sche Pressung wurde mit dem Programm RIKOR für die Zahnflanke ohne Berücksichtigung des vor- bzw. nachzeitigen Eingriffs berechnet. Anschließend wurde der jeweils entsprechende Maximalwert für 13 Punkte auf der Eingriffsstrecke ausgegeben. Zur Verdeutlichung sind in Tabelle 4-7 für die betrachteten Punkte der C-Verzahnung die Positionen auf der Eingriffsstrecke zugeordnet.

Tabelle 4-7: Position der Punkte auf der Eingriffsstrecke

Punkt	A	AB	AB-B	B	BB-C	BC	C	CD	CD-D	D	DD-E	DE	E
Strecke in mm	0,0	2,9	4,3	5,8	6,7	7,6	9,5	11,4	12,3	13,3	14,7	16,2	19,1

Mit den Werten für die Hertz'sche Pressung wurde die Berechnung nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] mit Methode A durchgeführt. Hieraus werden die Blitztemperaturen und die Schmierfilmdicken an den Punkten der Eingriffsstrecke berechnet. Die minimale Schmierfilmdicke ist die kleinste der berechneten Schmierfilmdicken über der Eingriffsstrecke (s. Kapitel 2.4.1).

4.3.2 Vergleichende Analyse verschiedener Testverfahren

Die Daten der zu berechnenden Testverfahren sind in Tabelle 4-8 zusammengefasst. Die Geometrien der Verzahnungen der Testverfahren nach PAE/FZG [Rot02], Flender [Fle97] und ZFWP-pGFT [Lit12] unterscheiden sich im Vergleich zur C-GF-Verzahnung und untereinander nur in der Korrektur. Die NKW-typische Verzahnung des ZF-N-Pittingtests hingegen weicht in ihrer Geometrie stark von der C-GF-Verzahnung ab. Der PAE/FZG-, der Flender- und der ZF-N-Pittingtest werden im Gegensatz zum Test nach FVA 54/7 bei Tauchschmierung durchgeführt. Im Graufleckentest nach ZFWP-pGFT wird eine verminderte Umfangsgeschwindigkeit verwendet und die Einspritztemperatur auf 60 °C reduziert. Zusätzlich wird der Test nach

ZFWP-pGFT mit einer Einspritztemperatur von 90 °C berechnet. Im ZF-N-Pittingtest wird sowohl die Öltemperatur als auch die Umfangsgeschwindigkeit im Vergleich zum Standardgrau-
fleckentest nach FVA 54/7 erhöht.

Tabelle 4-8: Daten zur Berechnung der verschiedenen Testverfahren

Testverfahren	FVA 54/7	PAE/FZG	Flender	ZFWP-pGFT (90)	ZFWP-pGFT (60)	ZF-N-Pittingtest
Geometrie	C-GF	C-GF	C	C	C	Schräg
Kopfrücknahme Ritzel	keine	keine	keine	30 µm	30 µm	30 µm
Kopfrücknahme Rad	keine	keine	keine	35 µm	35 µm	30 µm
Breitenballigkeit	keine	keine	keine	5 µm	5 µm	10 µm
Höhenballigkeit	keine	keine	8 µm	keine	keine	keine
Normalmodul m_n	4,5 mm	4,5 mm	4,5 mm	4,5 mm	4,5 mm	3 mm
Zahnbreite b	14 mm	14 mm	14 mm	14 mm	14 mm	30 mm
Schrägungswinkel β	0°	0°	0°	0°	0°	20°
Temperatur $\vartheta_{\text{Öl}}$	90 °C	90 °C	90 °C	90 °C	60 °C	110 °C
Schmierung	Einspritz-	Tauch-	Tauch-	Einspritz-	Einspritz-	Tauch-
Drehzahl n_1	2250 min ⁻¹	2250 min ⁻¹	2250 min ⁻¹	375 min ⁻¹	375 min ⁻¹	1450 min ⁻¹

Die Blitztemperaturen in den betrachteten Punkten auf der Eingriffsstrecke sind für die verschiedenen Testverfahren in Bild 4-12 angetragen.

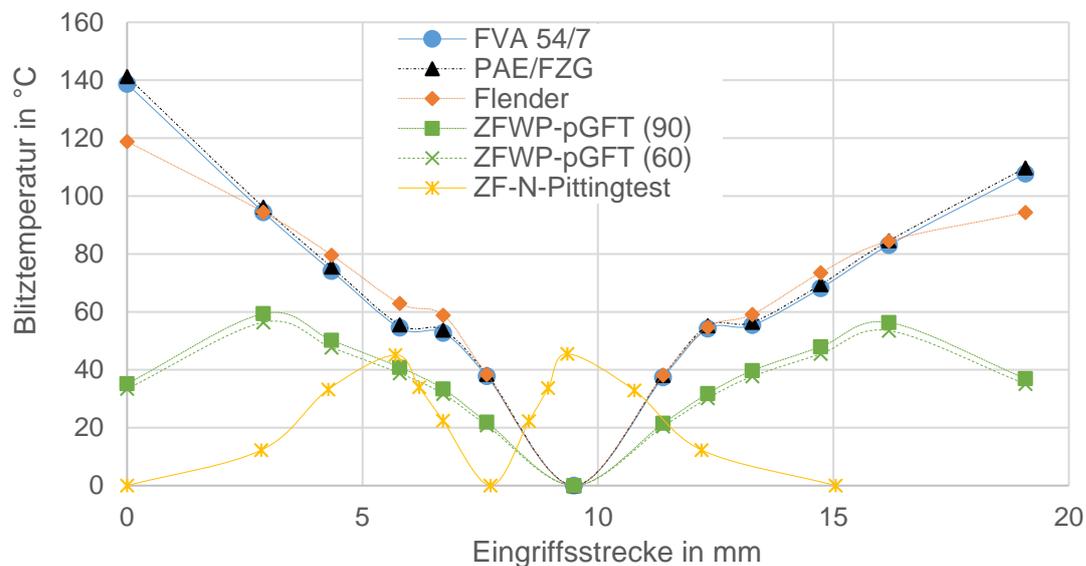


Bild 4-12: Blitztemperatur über der Eingriffsstrecke der verschiedenen Testverfahren bei $T_1 = 265,1 \text{ Nm}$

Die Werte von FVA 54/7 und PAE/FZG sind nahezu gleich. Hier unterscheiden sich die Testverfahren lediglich in der Art der Schmierung. Die Werte der Blitztemperatur fallen bei der Testvariante nach Flender im Vergleich zu FVA 54/7 am Eingriffsbeginn und –ende ab. Dies ist auf die Korrektur in Form einer Höhenballigkeit zurückzuführen. Die Korrekturen der verwendeten Verzahnung im Verfahren ZFWP-pGFT beeinflussen auch hier den Verlauf der Blitztemperatur über die Eingriffsstrecke. Die Werte der Blitztemperatur fallen im Test ZFWP-pGFT im Vergleich zum Testverfahren nach FVA 54/7 deutlich ab. Durch die Verringerung der Drehzahl im Vergleich zu FVA 54/7 liegen die Werte hier noch etwas tiefer. Die praxisnahe Verzahnung des ZF-N-Pittingtest weist aufgrund ihrer Geometrie die kleinsten Werte auf.

In Tabelle 4-9 sind die Werte für die minimalen Schmierfilmdicken der Testvarianten eingetragen. Für die Testvarianten nach PAE/FZG und Flender wurden ebenfalls die Sicherheiten gegen Graufleckigkeit berechnet. Die Sicherheiten der restlichen Testvarianten sind nicht dargestellt, da für die hier vorliegenden Betriebsbedingungen keine Schadenskraftstufen ermittelt wurden. Die Werte für das Verfahren nach PAE/FZG sind vergleichbar mit den Werten für den Test nach FVA 54/7. Das Testverfahren nach Flender weist aufgrund der Korrektur an der Verzahnung eine leicht erhöhte minimale Schmierfilmdicke und Sicherheit auf. Der Test nach ZFWP-pGFT bei 60 °C weist gegenüber dem Test nach FVA 54/7 eine erhöhte minimale Schmierfilmdicke auf. Bei der Erhöhung auf 90 °C beim Testverfahren ZFWP-pGFT sinkt die minimale Schmierfilmdicke. Die minimale Schmierfilmdicke der Verzahnung für den ZF-N-Pittingtest ist aufgrund der Geometrie deutlich höher und fällt durch die Betriebsbedingungen des Testverfahrens ab. Es liegt ein Faktor von ungefähr 3 zwischen ZF-N-Pittingtest und FVA 54/7. Es ist zu sehen, dass die Prüfverfahren FVA 54/7, PAE/FZG und Flender bei den vorliegenden Prüfbedingungen hinsichtlich Prüftemperatur, Ritzeldrehzahl, Schmierungsart und Prüfverzahnung vergleichbare Sicherheiten hinsichtlich Graufleckentragfähigkeit aufweisen. Allerdings liegen bei diesen Prüfmethoden Unterschiede im Ablauf vor, welche in der verwendeten Berechnungsmethode nicht berücksichtigt werden. Außerdem zeigt sich, dass durch eine optimierte Mikro- oder Makrogeometrie die Schmierfilmdicke deutlich erhöht werden kann. Anhand von angepassten Prüfbedingungen, wird ebenfalls die Schmierfilmdicke und somit die Sicherheit gegen Grauflecken beeinflusst. Um geeignete Bedingungen in einem modifizierten Prüfverfahren sicherzustellen, erfolgt eine weitergehende, separate Analyse von Prüfverzahnungen und Prüfbedingungen.

Tabelle 4-9: Minimale Schmierfilmdicke und Graufleckensicherheit der Testverfahren

Testverfahren	FVA 54/7	PAE/FZG	Flender	ZFWP-pGFT (90)	ZFWP-pGFT (60)	ZF-N-Pittingtest
h_{\min} in μm	0,033	0,035	0,047	0,023	0,046	0,092
S_{λ}	0,56	0,61	0,81	-	-	-

4.3.3 Vergleichende Analyse verschiedener Prüfverzahnungen

Es wurden Prüfverzahnungen aus den Testverfahren nach FVA 54/7 [Sch93], Flender [Fle97], ZFWP-pGFT [Lit12] und ZF-N-Pittingtest [Joa04] betrachtet und mit weiteren möglichen praxisnahen Prüfverzahnungen verglichen. Die Berechnung mit den unterschiedlichen Verzahnungen erfolgte, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben. Die in der Berechnung verwendeten Verzahnungsdaten sind für die Verzahnungen, welche der C-GF-Verzahnung geometrisch ähnlich sind, in Tabelle 4-10 dargestellt.

Eine C-Verzahnung mit Höhenballigkeit wurde entsprechend dem Flendertest berechnet. Zudem wurde eine C-Verzahnung mit Kopfrücknahme an Ritzel und Rad betrachtet. In Anlehnung an ZFWP-pGFT [Lit12] wurde zudem eine C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und Breitenballigkeit betrachtet. Da die Beträge der Korrekturen der Verzahnung aus ZFWP-pGFT [Lit12] nicht bekannt waren, wurden die Korrekturbeträge so gewählt, dass vergleichbare Ergebnisse zu den anderen Prüfverzahnungen vorlagen. Zudem erfolgte die Berechnung einer Schrägverzahnung, welche im Stirnschnitt geometrisch ähnlich zur C-GF-Verzahnung ausgelegt wurde. Die Schrägverzahnung wurde ohne und mit Korrektur vergleichend betrachtet. Die Korrekturen wurden mit RIKOR [Neu15] ausgelegt.

Tabelle 4-10: Verzahnungsdaten für die Berechnung geometrisch ähnlicher Verzahnungen

Größe	Bez.	C-GF		C nach Flender		C mit Kopfrücknahme		C ähnlich [Lit12]		C mit $\beta \neq 0$	
		Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad
Normalmodul	m_n	4,5 mm		4,5 mm		4,5 mm		4,5 mm		4 mm	
Zähnezahl	z	16	24	16	24	16	24	16	24	16	24
Zahnbreite	b	14 mm		14 mm		14 mm		14 mm		14 mm	
Schrägungswinkel	β	0°		0°		0°		0°		27,44°	
Eingriffswinkel	α_n	20,0°		20,0°		20,0°		20,0°		20,0°	
Profilverschiebungsfaktor	x	0,18	0,17	0,18	0,17	0,18	0,17	0,18	0,17	0,18	0,17
Achsabstand	a	91,5 mm		91,5 mm		91,5 mm		91,5 mm		91,5 mm	
Rauheit	R_a	0,5 μm		0,5 μm		0,5 μm		0,5 μm		0,5 μm	
Höhenballigkeit	C_a	-		8 μm	8 μm	-		-		-	
Breitenballigkeit	C_b	-		-		-		5 μm	-	5 μm	-
Kopfrücknahme	C_a	-		-		30 μm	35 μm	30 μm	35 μm	40 μm	

Da die Geometrie der Verzahnung des ZF-N-Pittingtests deutlich von der C-GF-Verzahnung abweicht, sind die Geometriedaten der Verzahnung des ZF-N-Pittingtests gesondert in Tabelle 4-11 dargestellt.

Tabelle 4-11: Verzahnungsdaten der Verzahnung des ZF-N-Pittingtest

Größe	Bez.	Einheit	Ritzel/Rad
Normalmodul	m_n	mm	3
Zähnezahl	z	-	39/49
Zahnbreite	b	mm	30
Schrägungswinkel	β	°	20
Eingriffswinkel	α_n	°	20
Profilverschiebungsfaktor	x	-	-0,08/-0,08
Achsabstand	a	mm	140
Rauheit	R_a	μm	0,5
Kopfrücknahme	C_a	μm	30
Breitenballigkeit	C_b	μm	10

Im Folgenden wird auf die C-Verzahnung mit verschiedenen Korrekturen eingegangen. Anschließend wird die geometrisch ähnliche Schrägverzahnung im Vergleich zur C-GF-Verzahnung betrachtet. Abschließend erfolgt ein Vergleich der Verzahnung des ZF-N-Pittingtests mit der C-GF-Verzahnung.

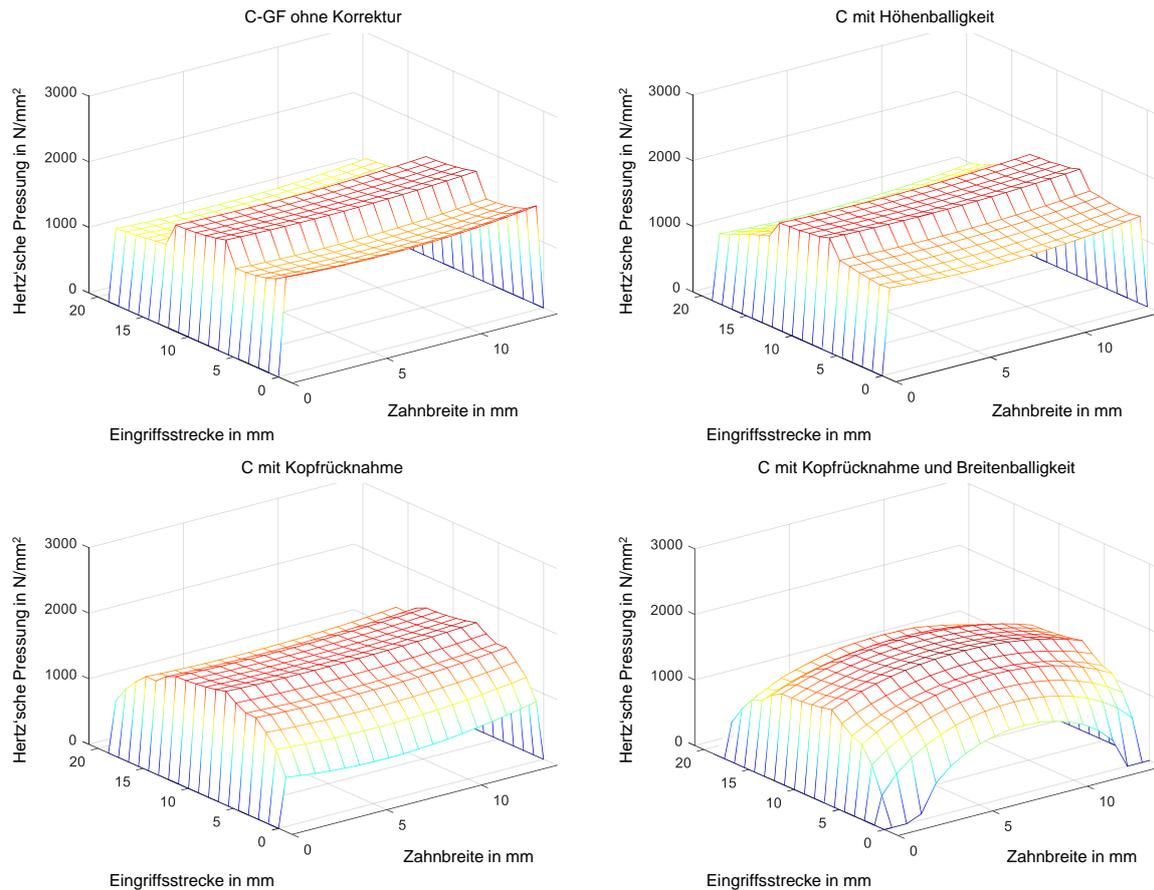


Bild 4-13: Hertz'sche Pressung der Verzahnungen C-GF, Flender (C-Verzahnung mit Höhenballigkeit), C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und C nach [Lit12] (C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und Breitenballigkeit) über die Eingriffsstrecke und Zahnbreite ($T_1 = 265,1 \text{ Nm}$)

In Bild 4-13 ist die Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und der C-Verzahnung mit verschiedenen Korrekturen nach Tabelle 4-10 über die Eingriffsstrecke und Zahnbreite dargestellt. Durch die Höhenballigkeit nach [Fle97] kann die Pressung am Anfang und Ende der Eingriffsstrecke geringfügig reduziert werden. Der Einfluss durch die betragshöhere Kopfrücknahme (C mit Kopfrücknahme) ist deutlich zu erkennen. Die Pressung am Eingriffsbeginn und -ende nimmt im Vergleich zur nicht korrigierten C-GF-Verzahnung ab. Ein gleichmäßiger Anstieg vom Eingriffsbeginn zum Einzeleingriffsgebiet ist sichtbar. Es ist zu sehen, dass durch die Breitenkorrektur (C nach [Lit12]) die Pressung an den Seiten der Verzahnung reduziert wird und die Pressung zur Mitte hin größer wird. Der Einfluss der Breitenkorrektur auf die Pressung im Eingriffsbeginn und -ende ist dabei eher gering.

In Bild 4-14 ist die maximale Hertz'sche Pressung an den betrachteten Punkten auf der Eingriffsstrecke für die C-GF-Verzahnung im Vergleich zu den verschiedenen korrigierten C-Verzahnungen aufgetragen. Die korrigierten Verzahnungen zeigen im Eingriffsbeginn und -ende eine geringere Pressung als die C-GF-Verzahnung. Es ist zudem die Erhöhung der Hertz'schen Pressung im Einzeleingriffsgebiet durch die Korrekturen und insbesondere durch die Breitenballigkeit zu erkennen.

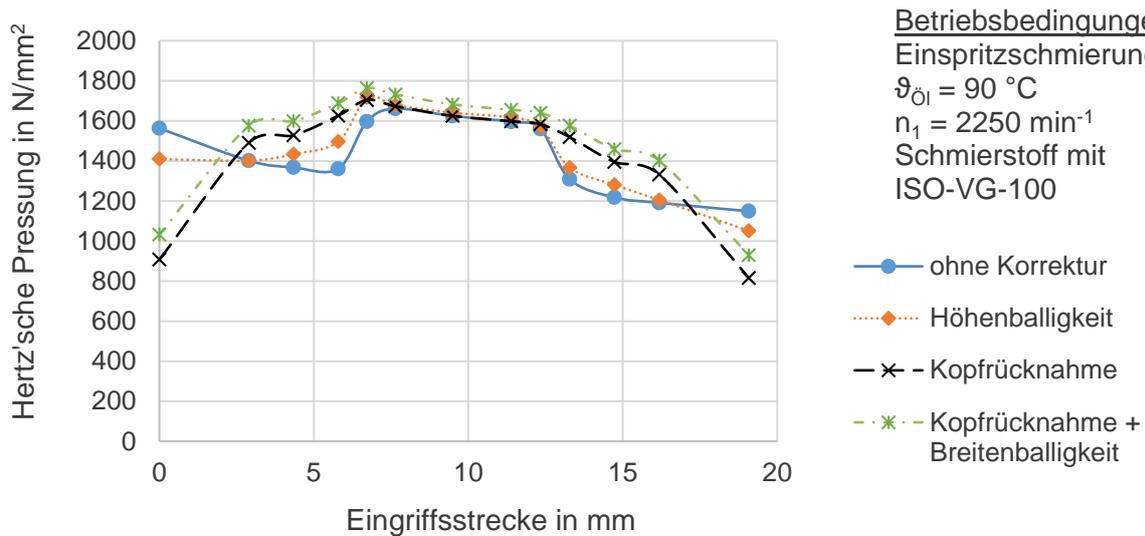


Bild 4-14: Hertz'sche Pressung der Verzahnungen C-GF, Flender (C-Verzahnung mit Höhenballigkeit), C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und C nach [Lit12] (C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und Breitenballigkeit) ($T_1 = 265,1 \text{ Nm}$)

Die in Bild 4-15 aufgetragenen Werte der Blitztemperatur an den betrachteten Punkten auf der Eingriffsstrecke zeigen, dass die Blitztemperatur am Eingriffsbeginn und –ende durch geeignete Korrekturen abnimmt. Zwischen den Punkten B und D unterscheiden sich die Blitztemperaturen nur geringfügig.

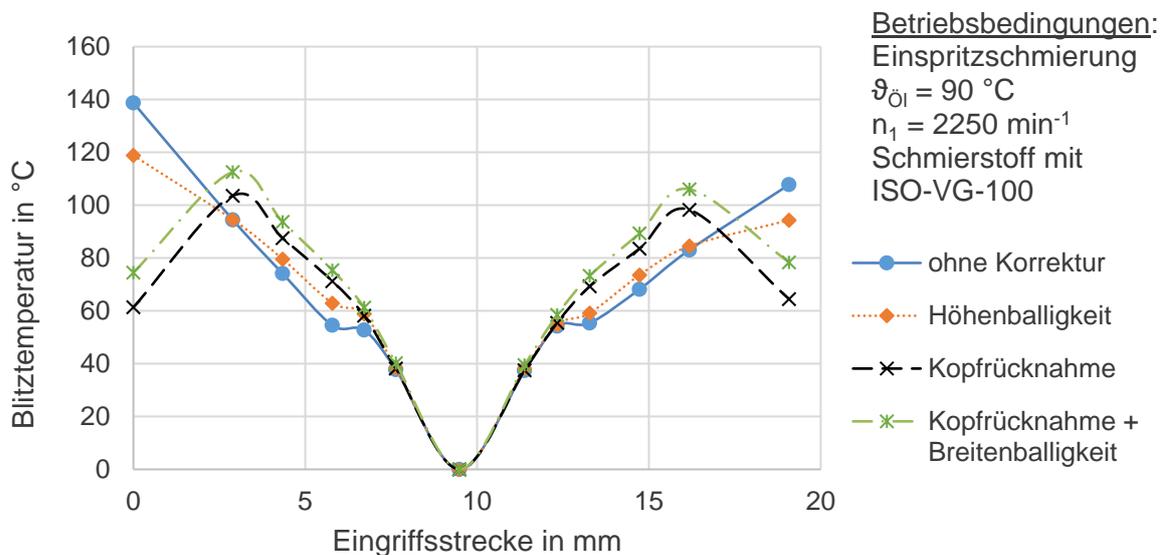


Bild 4-15: Blitztemperatur der Verzahnungen C-GF, Flender (C-Verzahnung mit Höhenballigkeit), C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und C nach [Lit12] (C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und Breitenballigkeit) ($T_1 = 265,1 \text{ Nm}$)

Bild 4-16 zeigt die maximale Hertz'sche Pressung an den betrachteten Punkten auf der Eingriffsstrecke für die C-GF-Verzahnung sowie die Schrägverzahnung ohne und mit praxisnaher Korrektur. Für beide Verzahnungen wurde das Ritzeldrehmoment zu $T_1 = 265,1 \text{ Nm}$ angenommen. Die Schrägverzahnung besitzt den gleichen Stirnschnitt wie die C-GF-Verzahnung, um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die unkorrigierte Schrägverzahnung weist am Eingriffsbeginn und –ende eine höhere Pressung als die C-GF-Verzahnung auf. Die Hertz'sche Pressung im Eingriffsbeginn und –ende kann durch die Korrektur deutlich reduziert werden. Durch die Korrektur wird die Pressung insbesondere im Bereich AB bzw. DE erhöht.

Die maximale Pressung der korrigierten Verzahnung wird somit in Richtung des Wälzpunktes verschoben. Das spezifische Gleiten an der Ritzel-Zahnfußflanke ζ_f ergibt sich für die C-GF-Verzahnung zu -3,5 und für die Schrägverzahnung zu -2,5.

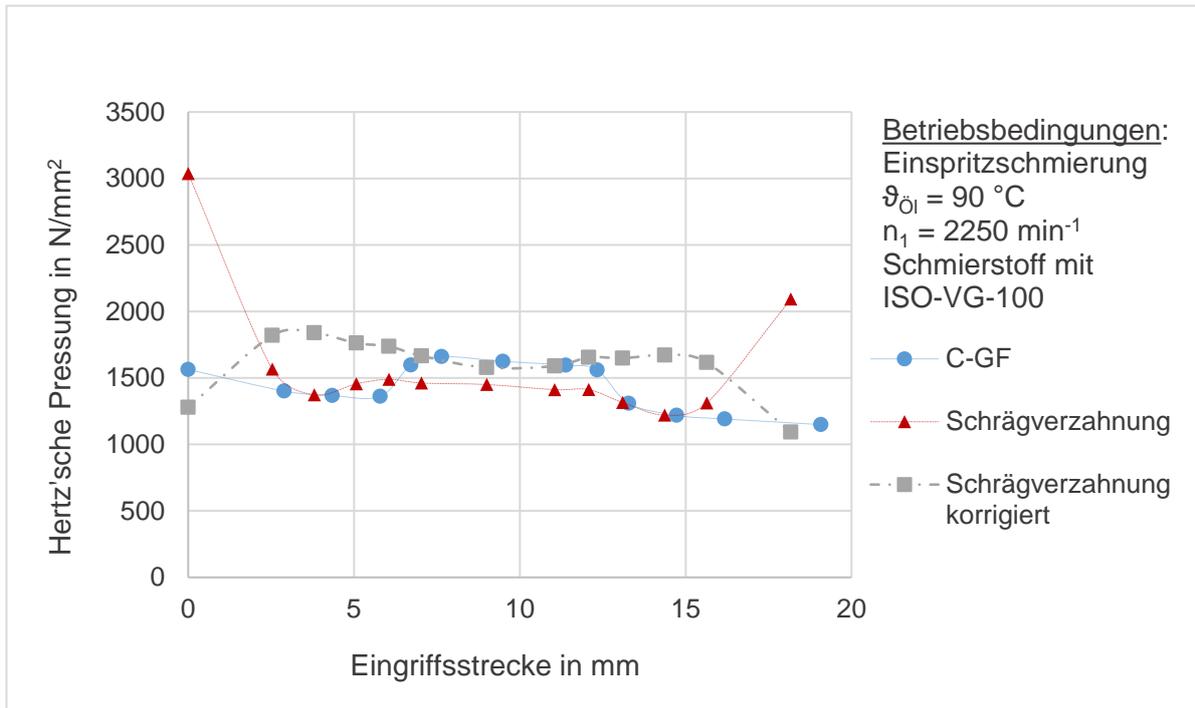


Bild 4-16: Hertz'sche Pressung der Verzahnungen C-GF und „C mit $\beta \neq 0^\circ$ “ ($T_1 = 265,1 \text{ Nm}$)

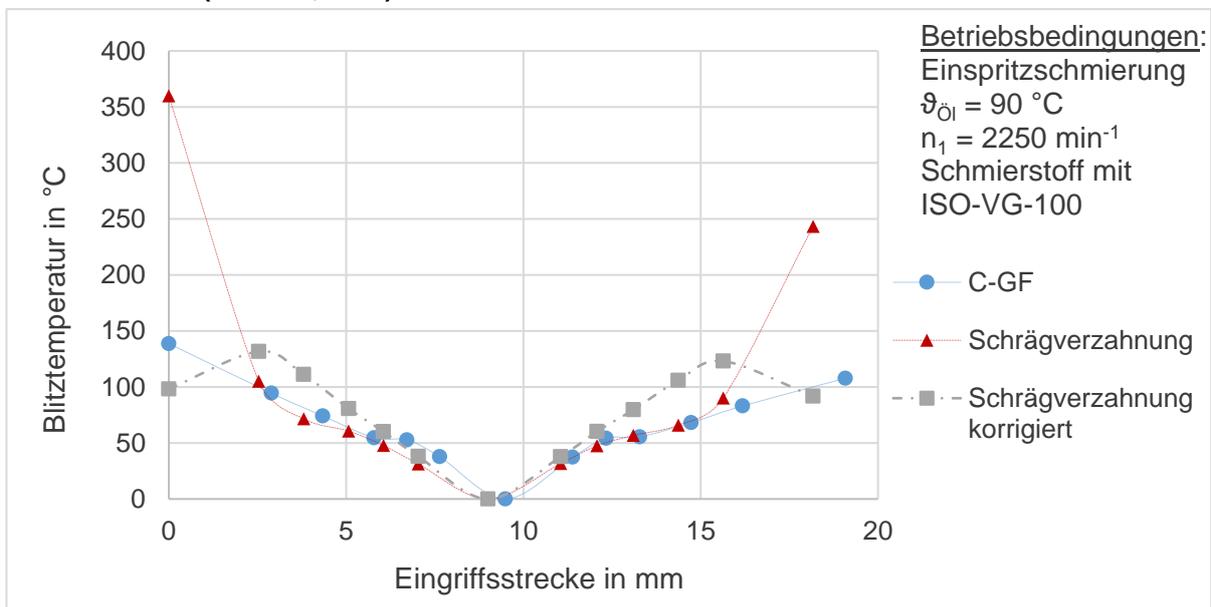


Bild 4-17: Blitztemperatur der Verzahnungen C-GF und „C mit $\beta \neq 0^\circ$ “ ($T_1 = 265,1 \text{ Nm}$)

Die Blitztemperaturen an den Punkten der Eingriffsstrecke sind in Bild 4-17 angetragen. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der Blitztemperatur im Eingriffsbeginn und -ende für die Schrägverzahnung mit Korrektur. Die Blitztemperatur für die Schrägverzahnung mit Korrektur ist im Bereich AB bzw. DE im Vergleich zur C-GF-Verzahnung erhöht. Die höchsten Werte der Blitztemperatur haben sich somit vom Eingriffsbeginn bzw. -ende in Richtung Wälzpunkt verschoben.

In Bild 4-18 ist die maximale Hertz'sche Pressung der Verzahnung, welche im ZF-N-Pittingtest verwendet wird, sowie der C-GF-Verzahnung über 13 Punkte auf der Eingriffsstrecke aufgetragen. Aufgrund der stark abweichenden Geometriedaten der Verzahnung des ZF-N-Pittingtests im Vergleich zur C-GF-Verzahnung, ist die Eingriffsstrecke deutlich kürzer.

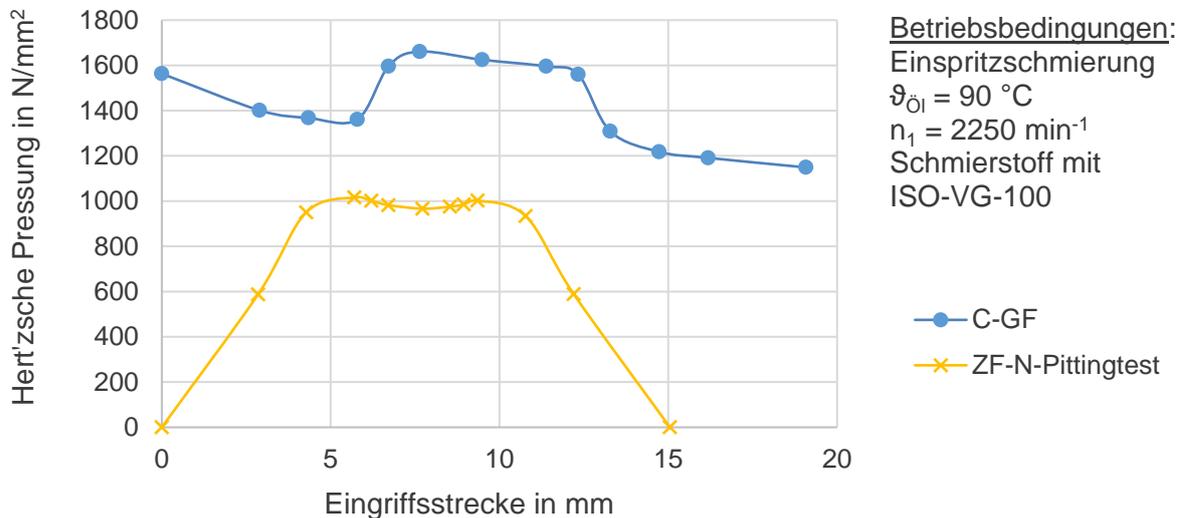


Bild 4-18: Hertz'sche Pressung der Verzahnung aus dem ZF-N-Pittingtest und der C-GF-Verzahnung ($T_1 = 265,1 \text{ Nm}$)

Im Vergleich zur C-GF-Verzahnung zeigt sich für die Schrägverzahnung aus dem ZF-N-Pittingtest eine deutlich geringere Pressung über den gesamten Verlauf der Eingriffsstrecke und insbesondere am Eingriffsbeginn und -ende. Für die Blitztemperaturen an den Punkten der Eingriffsstrecke zeigen sich ebenfalls deutlich geringere Werte der ZF-N-Pittingtest Verzahnung.

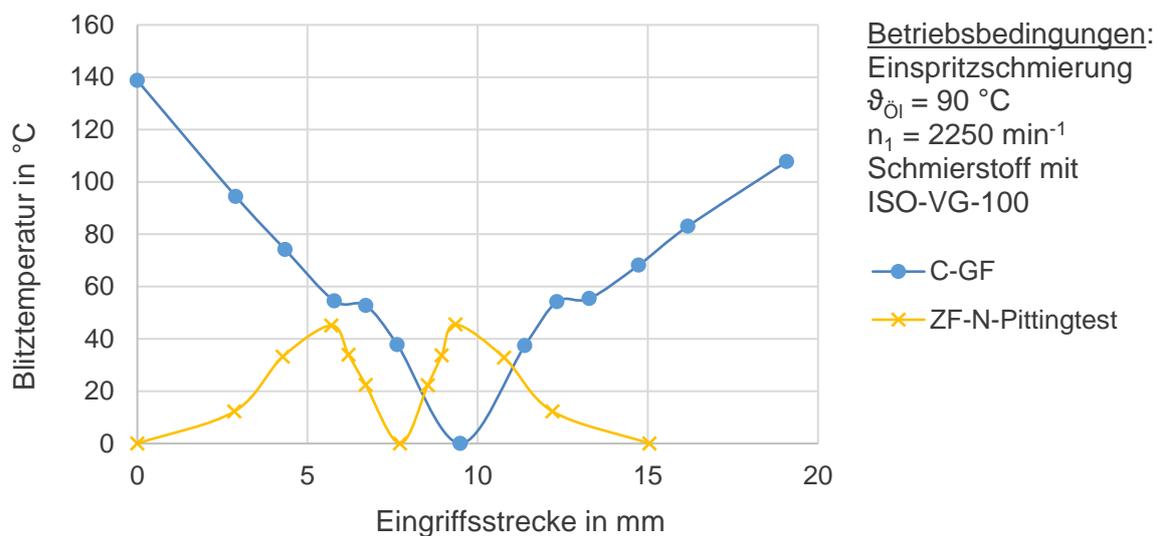


Bild 4-19: Blitztemperatur der Verzahnung aus dem ZF-N-Pittingtest und der C-GF-Verzahnung ($T_1 = 265,1 \text{ Nm}$)

Das spezifische Gleiten an der Ritzel-Zahnfußflanke ζ_f ergibt sich für die C-GF-Verzahnung zu $\zeta_f = -3,5$ und für die Verzahnung aus dem ZF-N-Pittingtest zu $\zeta_f = -1$. Aufgrund der günstigeren Verhältnisse insbesondere bzgl. des negativen spezifischen Gleitens der Verzahnung des ZF-N-Pittingtests ergibt sich die minimale Schmierfilmdicke zu $h_{\min} = 0,13 \text{ } \mu\text{m}$ und die Grau-

fleckensicherheit zu $S_\lambda = 2,2$. Dies liegt weit über den Werten der C-GF-Verzahnung mit einer minimalen Schmierfilmdicke von $h_{\min} = 0,033 \mu\text{m}$ und einer Graufleckensicherheit von $S_\lambda = 0,57$.

In Tabelle 4-12 sind für alle analysierten Verzahnungen das spezifische Gleiten an der Ritzel-Zahnfußflanke ζ_f , die minimale Schmierfilmdicke h_{\min} , die minimale Schmierfilmdicke im Verhältnis zur minimalen Schmierfilmdicke der C-GF-Verzahnung h^* und die Sicherheiten gegen Graufleckigkeit S_λ dargestellt.

Tabelle 4-12: Überblick der berechneten Werte der verschiedenen Prüfverzahnungen

Verzahnungstyp	C-GF	C nach Flender	C mit Kopfrücknahme	C nach [Lit12]	C mit $\beta \neq 0$	C mit $\beta \neq 0$	ZF-N-Pitting
Modul m_n	4,5	4,5	4,5	4,5	4,0	4,0	3,0
Schrägungswinkel β in °	0	0	0	0	27	27	20
Korrektur	keine	C_α	C_a	$C_a + C_b$	keine	$C_a + C_b$	$C_a + C_b$
Spezifisches Gleiten (Fuß) ζ_f	-3,5	-3,5	-3,5	-3,5	-2,5	-2,5	-1
Minimale Schmierfilmdicke h_{\min} in μm	0,033	0,036	0,043	0,041	0,019	0,053	0,13
$h^* = h_{\min}/h_{\min,C-GF}$	1	1,09	1,30	1,24	0,58	1,61	3,94
Sicherheit gegen Grauflecken S_λ	0,57	0,62	0,74	0,71	0,32	0,90	2,2

Es zeigt sich, dass durch die Kopfrücknahme die minimale Schmierfilmdicke um ca. 30 % ansteigt. Durch die Höhenballigkeit steigt die minimale Schmierfilmdicke um fast 10 % an. Bei steigender minimaler Schmierfilmdicke nimmt die Sicherheit gegen Grauflecken ebenfalls zu. Die Schmierfilmdicke der unkorrigierten Schrägverzahnung ist deutlich kleiner im Vergleich zur C-GF-Verzahnung. Die Sicherheit gegen Grauflecken wird ebenfalls reduziert. Durch die Korrekturen auf der Schrägverzahnung steigen minimale Schmierfilmdicke und Sicherheit merklich an. Die Korrekturen haben im vorliegenden Fall einen Einfluss auf die minimale Schmierfilmdicke und die Graufleckentragfähigkeit. Dennoch liegen alle korrigierten Varianten der C-Verzahnung sowie die Schrägverzahnung mit einem Sicherheitswert von $S_\lambda < 1$ in einem graufleckengefährdenden Bereich.

4.3.4 Vergleichende Analyse verschiedener Prüfbedingungen

Für die Berechnung der verschiedenen Prüfbedingungen wurde, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, vorgegangen und die C-GF-Verzahnung sowie der Referenzschmierstoff FVA 3A bei einer Belastung von $T_1 = 265,1 \text{ Nm}$ zugrunde gelegt.

Die Testverfahren nach Tabelle 2-3 werden bei Temperaturen von 40 °C bis 120 °C betrieben. Aus diesem Grund erfolgten Berechnungen bei Öltemperaturen von 40 °C, 60 °C, 90 °C und 120 °C. In Bild 4-20 ist zu sehen, dass sich die Blitztemperatur für verschiedene Öltemperaturen in den betrachteten Punkten mit Ausnahme des Wälzpunktes C leicht ändert. Der größte Unterschied tritt an den Punkten A und E auf.

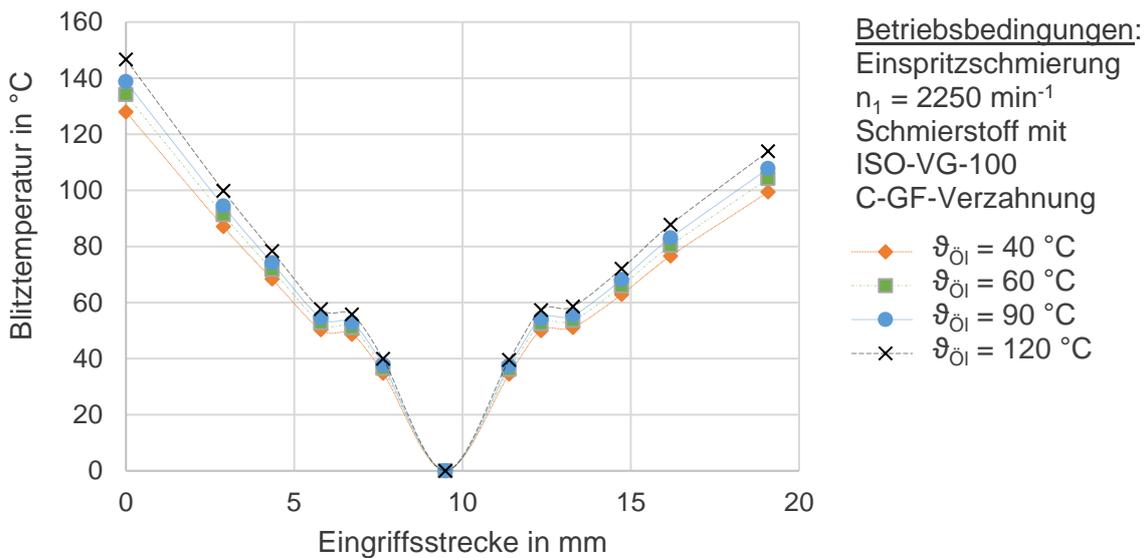


Bild 4-20: Blitztemperatur für verschiedene Öltemperaturen

Bild 4-21 zeigt die berechnete minimale Schmierfilmdicke in Abhängigkeit der Öltemperatur. Es ist zu erkennen, dass die Schmierfilmdicke mit zunehmender Temperatur deutlich abfällt. In diesem Bereich lässt sich der Verlauf als regressiv beschreiben.

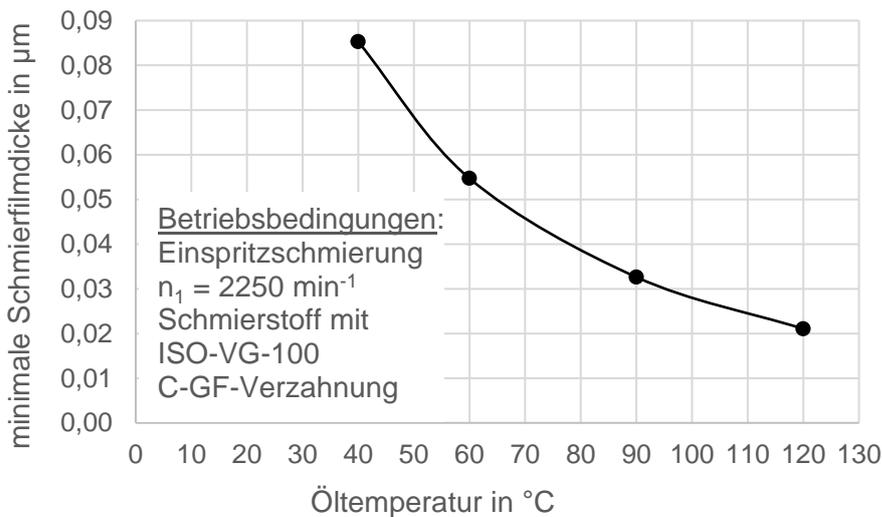


Bild 4-21: minimale Schmierfilmdicke für verschiedene Öltemperaturen

Die Einstellung der Drehzahl am Ritzel variiert für die verschiedenen Testverfahren nach Tabelle 2-3 zwischen 375 min^{-1} und 4500 min^{-1} . Nach FVA 54/7 [Sch93] wird eine Ritzeldrehzahl von 2250 min^{-1} eingestellt. Um den Einfluss verschiedener Drehzahlen aufzuzeigen, wurden Berechnungen mit den Drehzahlen 375 min^{-1} , 2250 min^{-1} und 4500 min^{-1} durchgeführt. Die Blitztemperaturen über der Eingriffsstrecke für verschiedene Drehzahlen am Ritzel sind in Bild 4-22 aufgezeigt. Der Dynamikfaktor wurde hierbei als nahezu konstant angenommen. Ein Einfluss der Drehzahl auf die Blitztemperatur ist deutlich zu erkennen. Ein besonders großer Abfall der Blitztemperatur ist für eine Drehzahl von 375 min^{-1} zu erkennen. Die Blitztemperatur steigt bei Verdoppelung der Drehzahl auf 4500 min^{-1} deutlich an. Die Größe der Differenz wächst vom Wälzpunkt zum Eingriffsbeginn und Eingriffsende jeweils an. Der größte Unterschied tritt jeweils im Eingriffsbeginn und -ende auf.

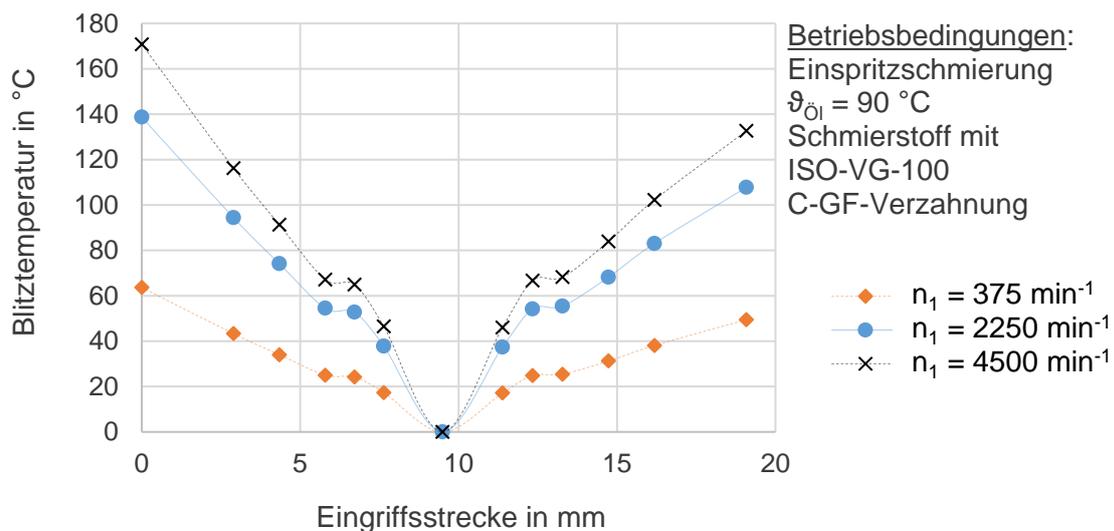


Bild 4-22: Blitztemperatur für verschiedene Drehzahlen n_1

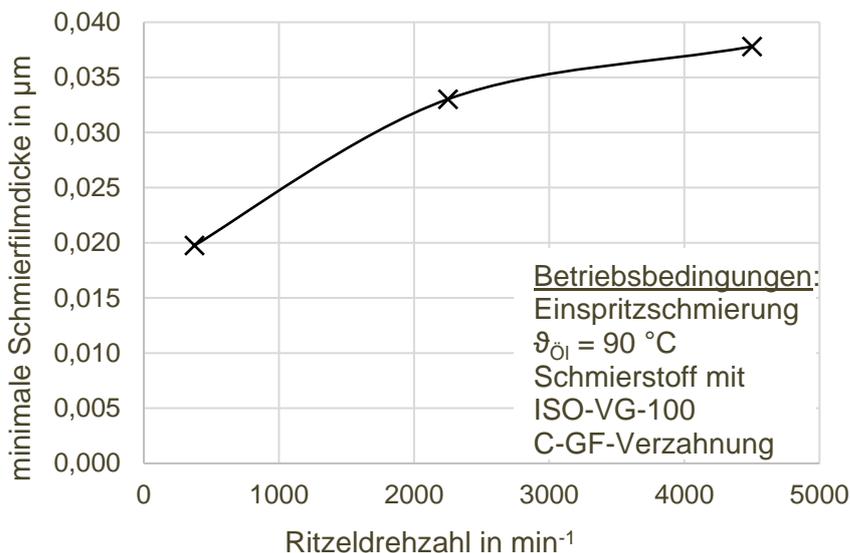


Bild 4-23: minimale Schmierfilmdicke für verschiedene Drehzahlen am Ritzel

Bild 4-23 zeigt die minimale Schmierfilmdicke für verschiedene Drehzahlen am Ritzel. Hier wurde trotz der starken Abnahme der Blitztemperatur bei der Drehzahl von 375 min^{-1} die geringste Schmierfilmdicke berechnet. Bei Berechnungen mit einer Drehzahl von 4500 min^{-1} wird die minimale Schmierfilmdicke geringfügig erhöht,

obwohl die Blitztemperatur deutlich ansteigt. Für die Berechnung der minimalen Schmierfilmdicke überwiegt der Einfluss der Drehzahl im vorliegenden Fall den Einfluss der Blitztemperatur. Die minimale Schmierfilmdicke variiert in diesen Berechnungen deutlich und dies hat zusammen mit der Schadenskraftstufe des Schmierstoffs einen Einfluss auf die Sicherheit gegen Grauflecken.

Anstelle der nach FVA 54/7 [Sch93] verwendeten Einspritzschmierung wird in einigen Testverfahren eine Tauchschmierung verwendet. Durch die Tauchschmierung wird rechnerisch eine minimal erhöhte Schmierfilmdicke erreicht, da hier von einer besseren Kühlung ausgegangen wird. Die Berücksichtigung der Schmierungsart erfolgt hierbei nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] durch einen Faktor X_S . Der Wert der minimalen Schmierfilmdicke steigt für die C-GF-Verzahnung von $0,033 \mu\text{m}$ auf $0,035 \mu\text{m}$.

In den Berechnungen der unterschiedlichen Betriebsbedingungen wird deutlich, dass bei Verwendung der C-GF-Verzahnung die rechnerisch ermittelte minimale Schmierfilmdicke für eine Öltemperatur von 120 °C und $n_1 = 2250 \text{ min}^{-1}$ einen nahezu identischen Wert annimmt wie die minimale Schmierfilmdicke für eine Drehzahl von 375 min^{-1} bei 90 °C. Diese Werte liegen deutlich unterhalb der minimalen Schmierfilmdicke bei Standardbedingungen. Durch Verwendung beispielsweise einer korrigierten Verzahnung mit einer im Vergleich zur C-GF-Verzahnung größeren minimalen Schmierfilmdicke können, die im Vergleich zum Standardtest, verschärften Betriebsbedingungen kompensiert werden.

4.3.5 Fazit der Studie zu Testverfahren, Prüfverzahnungen und Prüfbedingungen

Es wurden anhand einer Berechnungsstudie Kennwerte für übliche Testverfahren zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit (s. Abschnitt 2.3.2) unter den spezifischen Betriebsbedingungen vergleichend gegenübergestellt. Zudem wurden verschiedene Prüfverzahnungen hinsichtlich der Hertz'schen Pressung, der Blitztemperatur, des spezifischen Gleitens, der minimalen Schmierfilmdicke und der Sicherheit gegen Graufleckenbildung verglichen. Anschließend wurden Einflüsse verschiedener Betriebsbedingungen dargestellt. Das Ziel dieser theoretischen Untersuchungen war es, den rechnerischen Einfluss auf die Graufleckentragfähigkeit der verschiedenen Prüfverzahnungen, Prüfbedingungen und Testverfahren herauszuarbeiten.

Gegenüberstellung verschiedener Testverfahren

Für das Testverfahren nach PAE/FZG wurde eine vergleichbare minimale Schmierfilmdicke im Vergleich zum Testverfahren nach FVA 54/7 berechnet. Dies ist plausibel, da für das Testverfahren nach PAE/FZG die gleichen Prüfräder und ähnliche Prüfbedingungen verwendet werden wie für das Testverfahren nach FVA 54/7. Für die Berechnung des Testverfahrens nach PAE/FZG wurden die Prüfbedingungen im Vergleich zum Testverfahren nach FVA 54/7 nur in der Art der Schmierung variiert. Für die Testverfahren nach Flender und ZFWP-pGFT variiert die minimale Schmierfilmdicke dagegen um 40 % bzw. 30 %, wobei die absolute Abweichung relativ klein ausfällt. Diese Testverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Prüfverzahnungen hauptsächlich in der Korrektur. Als Prüfverzahnung werden in diesen Testverfahren Verzahnungen mit einer Makrogeometrie entsprechend der C-GF-Verzahnung verwendet. Im Testverfahren nach ZFWP-pGFT bei 90 °C Schmierstofftemperatur fällt die minimale Schmierfilmdicke durch die verringerte Drehzahl $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$ um etwa 30 % im Vergleich zum Testverfahren nach FVA 54/7. Durch die Reduzierung der Schmierstofftemperatur auf $\vartheta_{01} = 60 \text{ °C}$ und Beibehaltung der Drehzahl $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$ wird die minimale Schmierfilmdicke auf einen Wert 40 % größer als im Prüfverfahren nach FVA 54/7 angehoben. Die Abweichung von 40 % bezieht sich auf die Standardbedingungen des Prüfverfahrens nach FVA 54/7 bei einer Schmierstofftemperatur von 90 °C. Das Prüfverfahren nach FVA 54/7 kann ebenfalls bei 60 °C durchgeführt werden. Die Prüfbedingungen des ZFWP-pGFT sind an die Betriebsbedingungen in Windkraftgetrieben angepasst. Der maximale Unterschied in der berechneten minimalen Schmierfilmdicke konnte beim Vergleich mit dem ZF-N-Pittingtest festgestellt werden, da in diesem Testverfahren eine andere Verzahnung verwendet wird. Die berechnete minimale Schmierfilmdicke war ca. 3 x größer als im Prüfverfahren nach FVA 54/7.

Es ist zu beachten, dass die minimalen Schmierfilmdicken der Testverfahren, welche bei unterschiedlichen Schmierstofftemperaturen durchgeführt werden, betrachtet wurden. Die Sicherheit gegen Grauflecken ist jedoch abhängig von dem Vergleich der minimalen mit der zulässigen spezifischen Schmierfilmdicke, welche eine Funktion der Temperatur aufgrund der

unterschiedlichen chemischen Reaktivität der Additive darstellt. Die zulässige spezifische Schmierfilmdicke kann für additivierte Schmierstoffe daher nicht berechnet werden und muss experimentell bei entsprechender Schmierstofftemperatur ermittelt werden.

Betrachtung verschiedener Prüfverzahnungen

Die C-Verzahnung wurde ohne Korrektur (C-GF-Verzahnung) und mit unterschiedlichen Korrekturen betrachtet. Durch Korrekturen ändert sich die Pressungsverteilung über die Eingriffsstrecke. Die Verwendung von Kopfrücknahme und Höhenballigkeit reduziert die Hertz'sche Pressung im Eingriffsbeginn und -ende. Der für die Graufleckigkeit kritische Bereich liegt für die C-GF-Verzahnung nahe dem Eingriffsbeginn. Eine Kopfrücknahme oder Höhenballigkeit führt zu einer Entlastung des kritischen Bereichs. Die Graufleckigkeit kann nur reduziert werden, wenn es gelingt, die Pressung in weniger kritische Bereiche zu verlagern. Rein rechnerisch steigt die minimale Schmierfilmdicke und somit die Graufleckentragfähigkeit der C-Verzahnung durch Maßnahmen wie eine Kopfrücknahme oder eine Höhenballigkeit geringfügig an. Da sich durch die geänderte Geometrie von Gerad- auf Schrägverzahnung die Pressungsverteilung ändert, wurden für die Schmierfilmdicke und damit für die Sicherheit gegen Grauflecken im Vergleich zur C-GF-Verzahnung deutlich kleinere Werte (Reduzierung um ca. 40 %) berechnet. Durch die Korrektur an der Schrägverzahnung steigen minimale Schmierfilmdicke und Sicherheit um ca. 60 % im Vergleich zur C-GF-Verzahnung an.

Durch die theoretischen Untersuchungen wird deutlich, dass der Einfluss der Verzahnung beim Flendertest im Hinblick auf die Pressungsverteilung und minimale Schmierfilmdicke deutlich geringer ausfällt als für die Verzahnung nach [Lit12] und C-Verzahnung mit Kopfrücknahme. Dies ist mit den deutlich höheren Korrekturbeiträgen zu begründen. Diese Beträge führen zu einer deutlichen Entlastung im Eingriffsbeginn- und -ende und sind daher für eine praxisnähere Prüfverzahnung relevant. Das Aufbringen einer Breitenballigkeit auf die C-GF-Verzahnung bringt bezüglich der Pressungsverteilung keinen weiteren Vorteil mit sich und ist zudem fertigungstechnisch aufwändiger. Aus diesem Grund wird dieser Form der Korrektur für eine geradverzahnte Prüfverzahnung nicht berücksichtigt.

Alle korrigierten Varianten der C-Verzahnung und die korrigierte Schrägverzahnung, welche im Stirnschnitt ähnlich zur C-GF-Verzahnung ist, liegen mit einem Sicherheitswert von < 1 in einem graufleckengefährdeten Bereich. Die hier durchgeführten theoretischen Untersuchungen bilden die Ausgangsbasis für die Auslegung der Prüfverzahnungen für die experimentellen Untersuchungen. Um festzustellen, wie sich die Korrekturen und Schrägverzahnungen auf das Ergebnis im Graufleckentest auswirken, wurde eine C-Verzahnung mit Kopfrücknahme und die praxisnah korrigierte Schrägverzahnung im Rahmen dieser Arbeit experimentell untersucht. Durch die Korrekturen ist der vor- und nachzeitige Eingriff reduziert und es wird ein Bezug zur Praxis hergestellt.

Anhand der durchgeführten Berechnungen wird verdeutlicht, dass der Einfluss der Korrekturen auf die Grauflecken-Gefährdung begrenzt ist. Ein deutlicherer Einfluss der Korrekturen zeigt sich hinsichtlich des vorzeitigen Eingriffs. Die Wirkung des vorzeitigen Eingriffs ist stark abhängig von dem anliegenden Drehmoment. Zudem weisen verschiedene Schmierstoffe unterschiedliche Graufleckentragfähigkeiten auf. Somit führt die Überlagerung von Graufleckigkeit und Korrekturen zu unterschiedlichen Auswirkungen im Testergebnis. Zudem ist zu beachten, dass Korrekturen immer mit Toleranzen behaftet sind. Dies führt zu einer zusätzlichen Variablen für das Testergebnis.

Betrachtung verschiedener Prüfbedingungen

Es wurden verschiedene Prüfbedingungen durch Variation der Ritzeldrehzahl sowie der Schmierstofftemperatur einzeln anhand der C-GF-Verzahnung betrachtet. Im Bereich negativen spezifischen Gleitens, in welchem bevorzugt Graufleckigkeit auftritt, war der deutlichste Einfluss in Form eines starken Abfalls der Blitztemperatur (max. 55 %) und der minimalen Schmierfilmdicke (ca. 40 %) bei Reduzierung der Ritzeldrehzahl auf $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$ zu erkennen. Durch Erhöhen der Schmierstofftemperatur auf $\vartheta_{\text{Öl}} = 120 \text{ °C}$ zeigte sich ein Anstieg der Blitztemperatur und ein Abfall der minimalen Schmierfilmdicke. Die minimale Schmierfilmdicke bei einer Schmierstofftemperatur von $\vartheta_{\text{Öl}} = 120 \text{ °C}$ entsprach in etwa der minimalen Schmierfilmdicke bei reduzierter Ritzeldrehzahl von $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$. Grundsätzlich ist zu beachten, dass bei sinkender Drehzahl und steigender Schmierstofftemperatur die Schmierfilmdicke kleiner wird. Durch eine absinkende Schmierfilmdicke steigt die Gefahr von Verschleiß. Nach FVA 482 III [Fel15] kann die Graufleckenbildung durch auftretenden Verschleiß deutlich beeinflusst werden. Die hier ermittelten Werte der minimalen Schmierfilmdicke liegen deutlich unterhalb der minimalen Schmierfilmdicke bei Standardbedingungen. Die zuvor betrachteten korrigierten Prüfverzahnungen zeigen aufgrund ihrer Korrekturen höhere Werte der minimalen Schmierfilmdicke als die C-GF-Verzahnung. Durch Verwendung einer C-Verzahnung mit Kopfrücknahme oder einer praxisnah korrigierten Schrägverzahnung in Kombination mit geeigneten angepassten Prüfbedingungen können somit ggf. vergleichbare Bedingungen wie im Standardtest hinsichtlich der minimalen Schmierfilmdicke generiert werden.

Es ist allerdings zu beachten, dass die Temperatur durch die unterschiedliche chemische Reaktivität der Additive eine eigenständige Einflussgröße auf die Graufleckentragfähigkeit darstellt. Somit kann ggf. trotz einer geringen Schmierfilmdicke eine hohe Graufleckentragfähigkeit vorliegen.

Der Einfluss von Tauchschmierung anstelle von Einspritzschmierung ist rechnerisch sehr gering, da dies nur in Form des Faktors X_S berücksichtigt wird. Für experimentelle Untersuchungen insbesondere bei hohen Schmierstofftemperaturen ist zu berücksichtigen, dass das Schmierstoffvolumen bei Tauchschmierung am Zahnradverspannungsprüfstand deutlich kleiner ausfällt. Eine ausreichende Verschleißtragfähigkeit ist sicher zu stellen.

4.4 Auslegung der Prüfverzahnungen und Festlegung der Prüfbedingungen

Zur Untersuchung des Einflusses von praxisnahen Prüfverzahnungen auf das Testergebnis wurden vier alternative Prüfverzahnungen (Variante I, II, III und IV) unter der Berücksichtigung von praxisnahen Modifikationen im Vergleich zur im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] verwendeten C-GF-Verzahnung ausgelegt. Die Hauptverzahnungsdaten der Varianten und der C-GF-Verzahnung sind in Tabelle 5-1 unter Abschnitt 5.2 dargestellt.

Die C-GF-Verzahnung besitzt keine Korrektur. Dies kann zum vorzeitigen Eingriff bei hohen Laststufen führen. Durch die hierbei möglicherweise entstehende Schabemarke besteht die Gefahr eines frühzeitigen Ausfalls durch Grübchen. Zudem ist wegen des Auftretens einer Schabemarke ein erhöhter Aufwand für die Auswertung der Profilformabweichung notwendig. In vorherigen Studien von Nazifi et al. [Naz10b] hat sich die Verwendung einer Kopfkantenabrundung in Verbindung mit einer Kopfrücknahme zur Reduktion des vorzeitigen Eingriffs insbesondere bei großen Baugrößen bewährt. Um zu untersuchen, ob das Aufbringen einer Kopfkantenabrundung ausreichend ist, um den Bereich des vorzeitigen Eingriffs so zu entlasten, dass keine Schabemarke auftritt, wurde die Variante I mit einer Kopfkantenabrundung ausgelegt. Die genaue Auslegung der Kopfkantenabrundung wird in Abschnitt 4.4.2 thematisiert. Die

Variante I hat die gleiche Makrogeometrie wie die C-GF-Verzahnung. Da diese Variante mit dem MAAG-0° Glattschliff nicht herstellbar war, wurde das Profilschleifverfahren für die Hartfeinbearbeitung verwendet.

Der MAAG-0° Glattschliff ist als bewährte Methode für die Zahnflankenbearbeitung der Prüfräder für die Testmethode nach FVA 54/7 [Sch93] festgelegt. Da dieses Verfahren in der Praxis nicht mehr üblich ist, wurden auch bei den Varianten II, III und IV die Zahnflanken mit dem Profilschleifverfahren hartfeinbearbeitet. Hierbei wurde mit Hilfe der Variante II getestet, ob ein praxisnäheres Schleifverfahren die Ergebnisse des Graufleckentests beeinflusst. Variante II wird daher als unkorrigierte Verzahnung mit den Makrogeometriedaten der C-GF-Verzahnung ausgeführt.

In der Praxis verwendete Geradverzahnungen sind in der Regel korrigiert. Aus diesem Grund und um den Eingriffsbeginn zu entlasten, ist die Variante III mit einer Kopfrücknahme ausgelegt. Die Auslegung der Korrektur ist in Abschnitt 4.4.2 dargestellt. Die Makrogeometrie der Variante III entspricht die der C-GF-Verzahnung.

Um die Übertragbarkeit der Testergebnisse von Geradverzahnungen auf die in der Praxis üblicheren Schrägverzahnungen zu untersuchen, wurde die Variante IV als Schrägverzahnung ausgeführt. In Abschnitt 4.4.1 wird auf die Auslegung dieser Makrogeometrie eingegangen. Die Auslegung der praxisnah ausgeführten Korrektur der Variante IV ist unter Abschnitt 4.4.2 zu finden.

Im Folgenden werden neben den theoretischen Studien zur Auswahl der Makro- und Mikrogeometrie die theoretischen Studien zur Auswahl der Prüfbedingungen dargelegt.

4.4.1 Theoretische Studie zur Auswahl der Makrogeometrie

Anhand der Varianten I, II und III wurden Änderungen der Prüfverzahnung hinsichtlich Schleifverfahren und Mikrogeometrie untersucht. Aus diesem Grund weisen die Varianten I, II und III die gleiche Makrogeometrie, wie die C-GF-Verzahnung, auf. Da sich für die Varianten I, II und III keine Änderungen im Vergleich zur C-GF-Verzahnung hinsichtlich der Makrogeometrie ergeben, wird in diesem Kapitel lediglich die Variante IV thematisiert.

Die Variante IV wurde als Schrägverzahnung ausgelegt. Um eine Vergleichbarkeit zur C-GF-Verzahnung zu gewährleisten, wurde die Variante IV mit dem gleichen Stirnschnitt wie die C-GF-Verzahnung gefertigt. Die Auslegung orientiert sich damit an der Empfehlung nach Stahl [Sta00] und Steinberger et al. [Ste02a]. Um den Stirnschnitt einer Geradverzahnung auf eine Schrägverzahnung zu übertragen, sind der Achsabstand a , der Stirnmodul m_t , der Stirneingriffswinkel α_t , die Zähnezah $z_{1,2}$ und der Kopfkreisdurchmesser d_a der Schrägverzahnung äquivalent zur Geradverzahnung zu halten. Bei Beibehaltung des Stirnschnitts ändern sich Ersatzkrümmungsradien ρ_V und Profilüberdeckung ε_α nicht. [Ste02a]

Tabelle 4-13: Variation der Verzahnungsbreite b und des Schrägungswinkels β bei $\varepsilon_\beta = 1$ für die Auslegung de Verzahnungsvariante IV

Größe	Einheit	Variante A	Variante B	Variante C	Variante D
Normalmodul m_n	mm	4,35	4,23	4,08	3,90
Stirnmodul m_t	mm	4,50	4,50	4,50	4,50
Zahnbreite b	mm	53	39	30	24
Schrägungswinkel β	°	15	20	25	30
Sprungüberdeckung ε_β	-	1	1	1	1

Ziel der Auslegung war eine möglichst große Sprungüberdeckung ε_β bei einer vergleichbaren Graufleckentragfähigkeit. Hierzu wurde in einem ersten Schritt die Sprungüberdeckung $\varepsilon_\beta = 1$

gewählt und die Zahnbreite b sowie der Schrägungswinkel β variiert. Tabelle 4-13 zeigt verschiedene Variationen der Zahnweite b und des Schrägungswinkels β bei $\varepsilon_\beta = 1$. Als maximaler Schrägungswinkel wurde $\beta_{\max} = 30^\circ$ gewählt, da sich dies an der üblichen Fertigungsgrenze durch Wälzfräsen nach Niemann et al. [Nie83] orientiert.

Es ist zu sehen, dass bei den gewählten Grenzen die Zahnbreite b mindestens 24 mm betragen müsste. Dies würde die Zahnbreite b um über 70 % im Vergleich zur C-GF-Verzahnung ($b = 14$ mm) vergrößern. Eine stark vergrößerte Zahnbreite führt bei gleichem anliegenden Drehmoment durch die verringerte Pressung im Eingriff zu einer höheren Graufleckentragfähigkeit. Um die Schrägverzahnung vergleichbar zur C-GF-Verzahnung zu halten, darf die Graufleckentragfähigkeit nicht zu hoch ausfallen. Es wurden daher Variationen des Schrägungswinkels β und der Zahnbreite $b = 14 - 20$ mm mit $\varepsilon_\beta < 1$ analysiert. Tabelle 4-14 zeigt die resultierende Sprungüberdeckung und das spezifische Gleiten am Zahnfuß des Ritzels der Varianten. Es ist zu sehen, dass der Schrägungswinkel $\beta \geq 20^\circ$ betragen muss, damit eine Sprungüberdeckung $\varepsilon_\beta \approx 0,5$ resultiert. Die Varianten G und I erreichen dies mit einer Zahnbreite $b = 20$ mm. Die Varianten H und J erlauben eine Sprungüberdeckung $\varepsilon_\beta \approx 0,5$ bei äquivalenter Verzahnungsbreite $b = 14$ mm zur C-GF-Verzahnung. Die Verzahnungsvariante J hat die gleiche Makrogeometrie, wie die im Rahmen von „Praxisnaher Pittingtest“ von Radev [Rad04] verwendete Schrägverzahnung. Da diese Verzahnung bereits im Rahmen einer früheren Arbeit gefertigt wurde und hierdurch Erfahrungen mit dieser Verzahnung an der Forschungsstelle vorhanden sind, wurde diese als Variante IV gewählt.

Tabelle 4-14: Variation der Verzahnungsbreite b und des Schrägungswinkels β bei $\varepsilon_\beta < 1$ für die Auslegung de Verzahnungsvariante IV

Größe	Einheit	Variante					
		E	F	G	H	I	J
Normalmodul m_n	mm	4,4	4,2	4,2	4,1	4,1	4,0
Stirnmodul m_t	mm	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Zahnbreite b	mm	14	14	20	14	20	14
Schrägungswinkel β	°	15	20	20	25	25	27,44
Sprungüberdeckung ε_β	-	0,27	0,36	0,51	0,46	0,66	0,51
Spez Gleiten am Zahnfuß Ritzel ζ_f	-	-3,193	-2,880	-2,880	-2,576	-2,576	-2,479

4.4.2 Theoretische Studie zur Auswahl der Mikrogeometrie

Ziel der Auslegung aller Verzahnungsvarianten ist eine ausreichend hohe Zahnfußtragfähigkeit nach ISO 6336-3 [ISO19c] bzw. DIN 3990-3 [DIN87b] in allen Kraftstufen sowie eine entsprechend hohe Grübchentragfähigkeit nach ISO 6336-2 [ISO19b] bzw. DIN 3990-2 [DIN87a] bei gleichzeitig begrenzter Graufleckentragfähigkeit nach ISO-6336-22 [ISO18a]. Tabelle 4-15 zeigt die entsprechenden, berechneten Sicherheiten mit dem Programm STplus [Ste10] nach ISO 6336 [ISO18a, ISO19a, ISO19b, ISO19c] für die Bedingungen im Graufleckentest nach FVA 54/7 bei Kraftstufe 10.

Tabelle 4-15: Berechnete Sicherheiten der C-GF-Verzahnung und Verzahnungsvarianten I, II, III und IV mit $\vartheta_{01} = 90^\circ\text{C}$, $T_1 = 265$ Nm und $n_1 = 2250$ min⁻¹

Sicherheit gegen	C-GF Ritzel / Rad	Variante I Ritzel / Rad	Variante II Ritzel / Rad	Variante III Ritzel / Rad	Variante IV Ritzel / Rad
Grauflecken	0,57	0,71	0,57	0,74	0,90
Grübchen	0,84 / 0,91	0,85 / 0,91	0,84 / 0,91	0,85 / 0,91	1,08 / 1,12
Zahnfußbruch	1,80 / 1,92	1,83 / 1,95	1,80 / 1,92	1,84 / 1,95	2,16 / 2,21

Zur Auslegung der Korrekturen wurde RIKOR [Neu15] unter Berücksichtigung des vor- und nachzeitigen Eingriffs sowie unter Berücksichtigung der Krümmungsradien im Bereich des

Korrekturübergangs verwendet. Für alle Varianten wurde die Hertz'sche Pressung und die Linienlast über das Eingriffsfeld für die Kraftstufen 8 und 10 nach FVA 54/7 sowie für die Kraftstufe 12 entsprechend der Erweiterung (s. Abschnitt 5.3.1) berechnet. Das Ziel der Auslegung war es die Variante zu wählen, welche den Einfluss des vor- und nachzeitigen Eingriffes in Kraftstufe 10 bei einem günstigen Pressungsverlauf ohne Spannungsspitzen reduziert. Die Betrachtung der Kraftstufen 8 und 12 dienen als Kontrolle der Lastverteilung bei einer niedrigeren und einer höheren Belastung.

Verzahnungsvariante I

Die Verzahnungsvariante I wurde mit einer Kopfkantenabrundung $\rho_K = 60 \mu\text{m}$ am Ritzel und Rad in Anlehnung an FVA 286 III [Naz10b] ausgelegt. Da in RIKOR keine Kopfkantenabrundung berücksichtigt werden kann, wurde diese durch eine Stirnprofilballigkeit angenähert. Bild 4-24 zeigt die resultierenden Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und Variante I im Vergleich für die Kraftstufe 10. Es ist zu sehen, dass für die Verzahnungsvariante I der vorzeitige Eingriff vermieden wird. Aufgrund der kurzen Ausführung der Korrektur wird die Pressungsverteilung lediglich am Eingriffsbeginn und -ende beeinflusst. Somit ändert sich die Profilüberdeckung unter Last durch die Korrektur nicht signifikant. Dies kann auch für weitere Belastungen bestätigt werden. Bild 4-25 zeigt die Hertz'sche Pressung für die Kraftstufe 8 und Bild 4-26 für die Kraftstufe 12. Die Linienlasten für verschiedene Belastungen sind dem Anhang (s. Bild A.10-3) zu entnehmen.

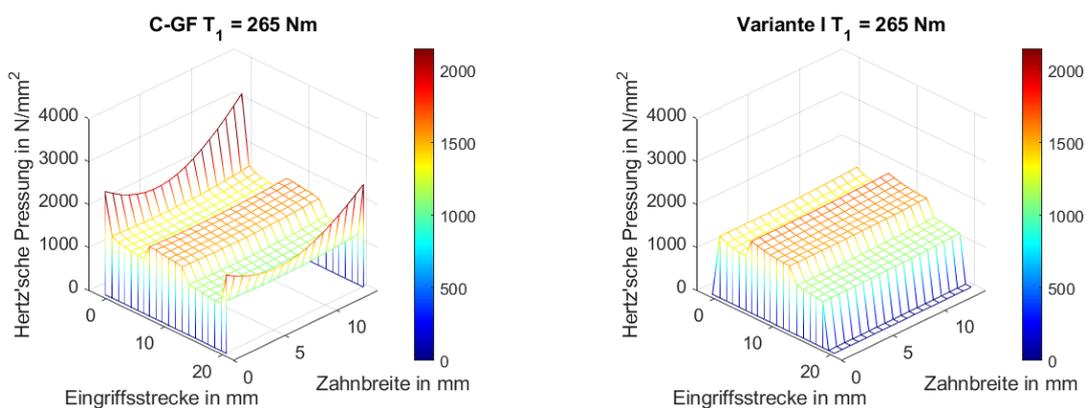


Bild 4-24: Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und der Variante I mit $T_1 = 265 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 10 des Graufleckentests nach FVA 54/7

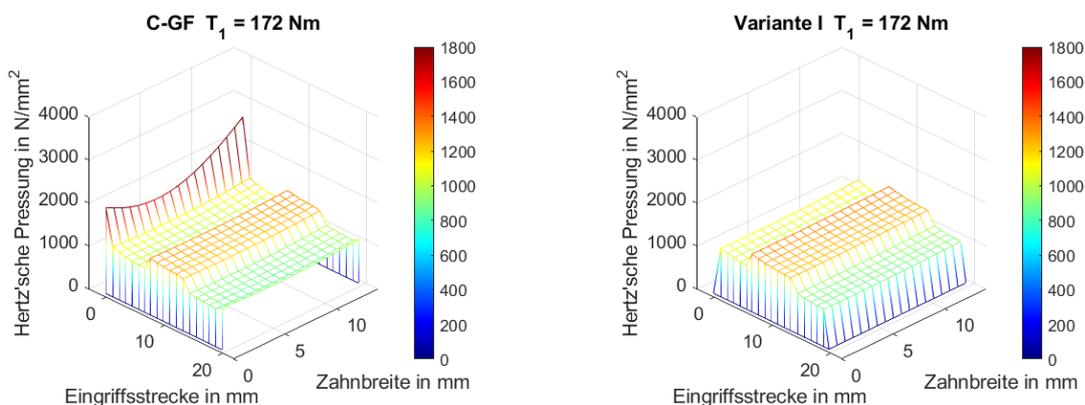


Bild 4-25: Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und der Variante I mit $T_1 = 172 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 8 des Graufleckentests nach FVA 54/7

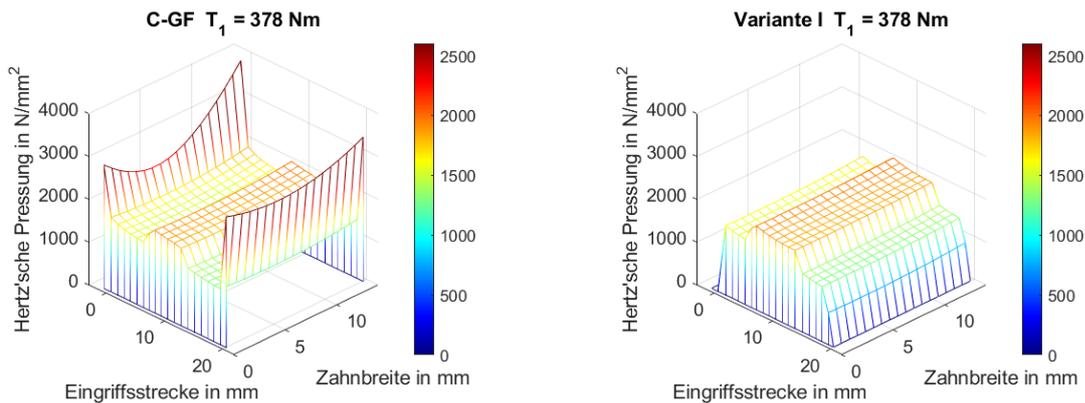


Bild 4-26: Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und der Variante I mit $T_1 = 378 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 12 der Erweiterung des Graufleckentests nach FVA 54/7 (s. Abschnitt 5.3.1)

Verzahnungsvariante III

Die gewählten Korrekturbeträge der Variante III wurden mit Hilfe von RIKOR [Neu15] zu $C_{a1} = 30 \mu\text{m}$ am Ritzel und $C_{a2} = 35 \mu\text{m}$ am Rad bestimmt, um eine vollständige Entlastung des Eingriffsbeginns bei der Kraftstufe 10 zu erreichen. Bezüglich der Ausführung der Korrekturen wurden drei Variationen III-1, III-2 und III-3 betrachtet. Die Variationen bestehen aus einer kurzen linearen Kopfrücknahme (Variante III-1), einer kreisförmigen Kopfrücknahme mit Beginn bei $\frac{3}{4}$ der Strecke von AB (Variante III-2) und einer langen kreisförmigen Kopfrücknahme (Variante III-3). Bild 4-27 zeigt die Profillinien der unterschiedlichen Ausführungen der Varianten am Prüfrad. Zusätzlich sind die Punkte (A, B, C, D, E) der Eingriffsstrecke eingezeichnet.

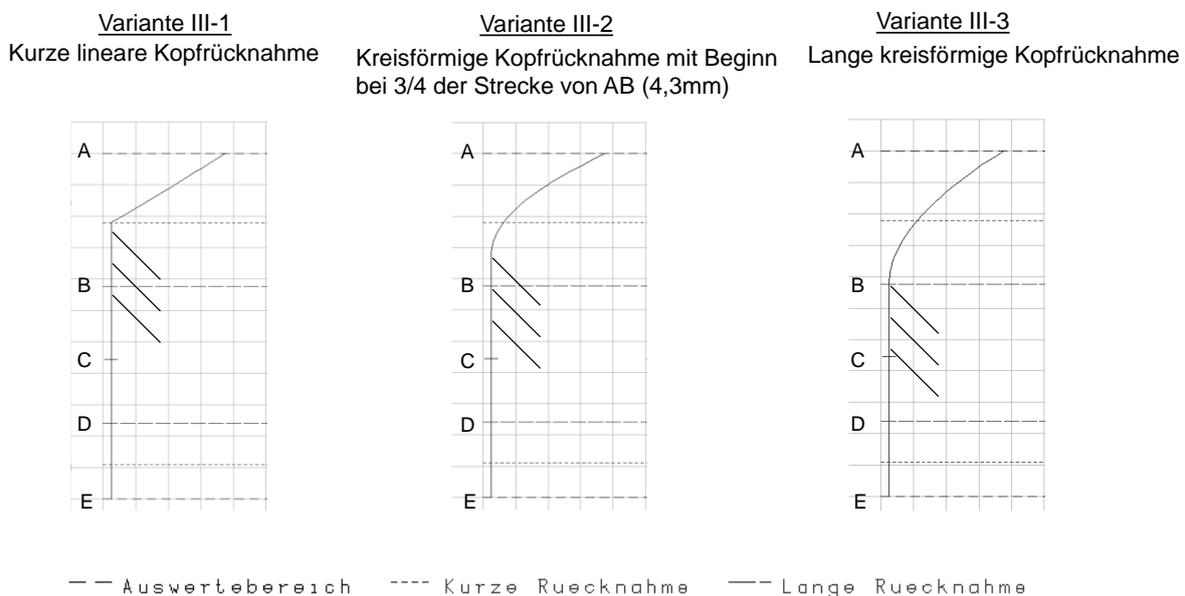


Bild 4-27: Schematische Darstellung der zur Auslegung der Variante III betrachteten Variationen

Für diese drei Variationen III-1, III-2 und III-3 wurde die Hertz'sche Pressung und die Linienlast über das Eingriffsfeld für die Kraftstufen 8 und 10 nach FVA 54/7 sowie für die Kraftstufe 12 entsprechend der Erweiterung (s. Abschnitt 5.3.1) berechnet. Tabelle 4-16 fasst die Maximalwerte der Hertz'schen Pressung und die Werte der Profilüberdeckung unter Last für alle betrachteten Kraftstufen zusammen. Der Maximalwert der Hertz'schen Pressung unter Berücksich-

tigung des vorzeitigen Eingriffs nach Thoma [Tho11] liegt bei der Kraftstufe 10 für alle Varianten der Variante III bei $p_{H,max} = 1700 \text{ N/mm}^2$ und bei der C-GF-Verzahnung bei $p_{H,max} = 3135 \text{ N/mm}^2$. Die Maximalwerte der Hertz'schen Pressung sind theoretisch ermittelte Berechnungswerte und dienen lediglich zur Orientierung. Die ermittelten Werte sind stark abhängig von der Vorgabe der Kopfkante [Tho11]. Die Geometrie der Kopfkante ändert sich im Betrieb. Die Profilüberdeckung unter Last wird bei der Kraftstufe 10 für alle Varianten im Vergleich zur C-GF-Verzahnung von $\epsilon_{\alpha,Last} = 1,58$ auf $\epsilon_{\alpha,Last} = 1,44$ reduziert.

Tabelle 4-16: Maximalwerte der Hertz'schen Pressung und Profilüberdeckung unter Last der Varianten III-1, III-2 und III-3 sowie der C-GF-Verzahnung

Größe	C-GF-Verzahnung			Varianten III-1, III-2, III-3		
	Kraftstufe			Kraftstufe		
	8	10	12	8	10	12
Hertz'schen Pressung $p_{H,max}$ in N/mm^2	2565	3135	3775	1399	1700	2028
Profilüberdeckung $\epsilon_{\alpha,Last}$	1,51	1,58	1,59	1,32	1,44	1,5

Bild 4-28, Bild 4-29 und Bild 4-30 zeigen die Hertz'schen Pressungen der C-GF-Verzahnung und der Varianten III-1, III-2 sowie III-3 für Kraftstufen 8, 10 und 12. Die Linienlasten sind dem Anhang (s. Bild A.10-4, Bild A.10-5 und Bild A.10-6) zu entnehmen.

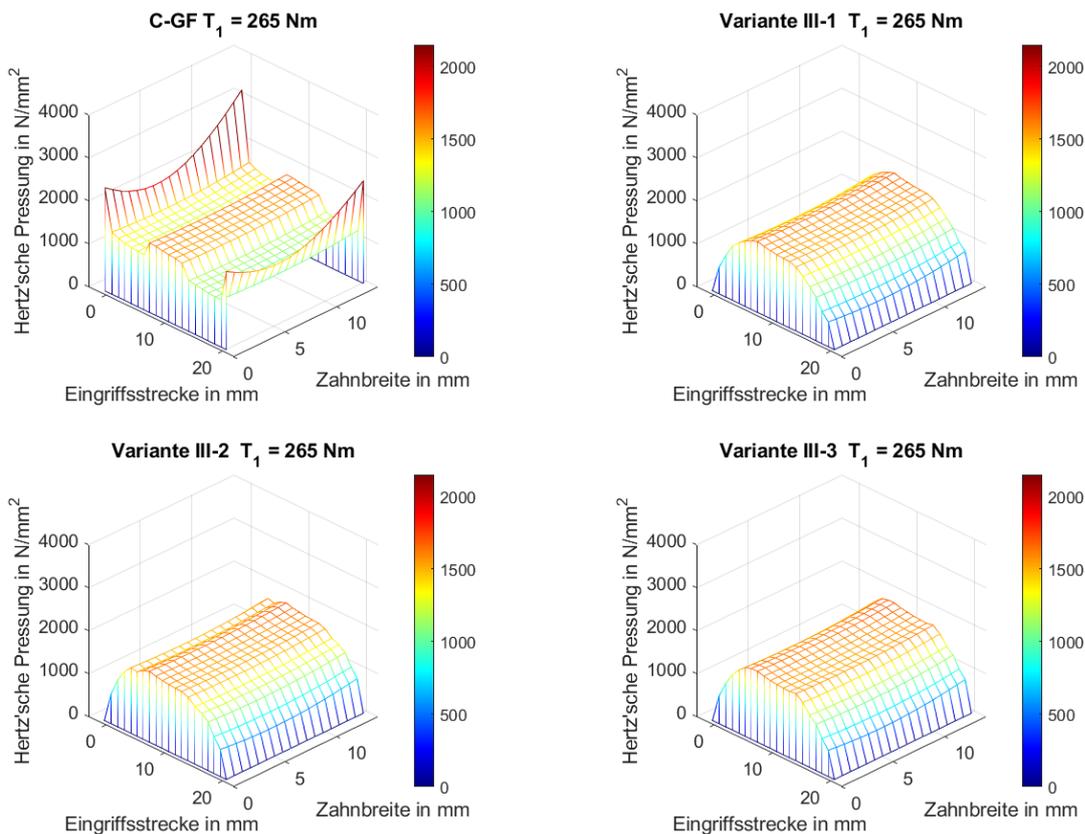


Bild 4-28: Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und der Varianten III-1, III-2 sowie III-3 mit $T_1 = 265 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 10 des Graufleckentests nach FVA 54/7

In Bild 4-28 ist zu sehen, dass bei Kraftstufe 10 durch alle Varianten eine vollständige Entlastung des Eingriffsbeginns und –ende gegeben ist. Zudem wird deutlich, dass für die Variante III-3 durch die Länge der Korrektur der Bereich der höchsten Pressung etwas verbreitert wird und eine leichte Erhöhung der Pressung im Bereich der Einzeleingriffspunkte B und D zu sehen ist. Durch das vollständige Reduzieren des vor- und nachzeitigen Eingriffes in Kraftstufe 10 wird in Kraftstufe 8 die Eingriffsstrecke minimal verkürzt. Dies ist in Bild 4-29 zu sehen.

Auch hier ist bei der Variante III-3 eine leichte Erhöhung der Pressung im Bereich der Einzeleingriffspunkte B und D zu sehen ist.

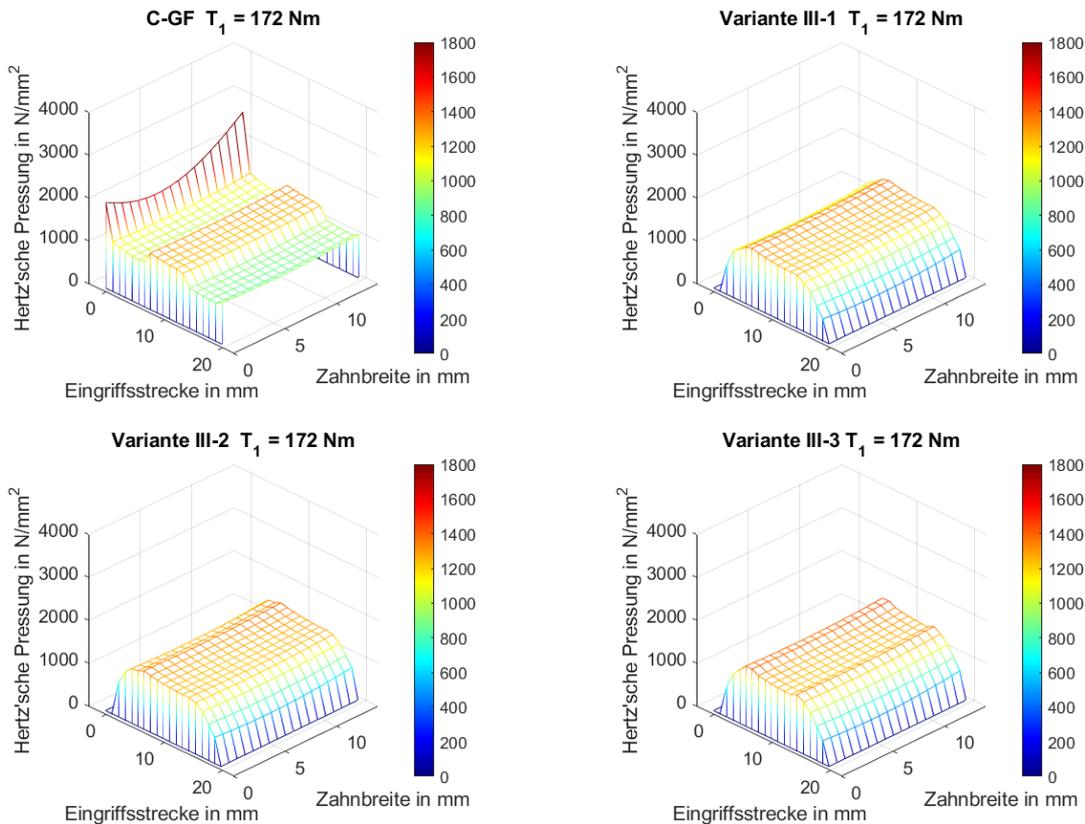


Bild 4-29: Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und der Varianten III-1, III-2 sowie III-3 mit $T_1 = 172 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 8 des Graufleckentests nach FVA 54/7

Bild 4-30 zeigt die Hertz'sche Pressung der Varianten III-1, III-2 und III-3 und der C-GF-Verzahnung in Kraftstufe 12. In Kraftstufe 12 liegt keine vollständige Entlastung des Eingriffsbeginns mehr vor. Die Kopfrücknahme führt dennoch zu einer deutlichen Entlastung des Eingriffsbeginns und –ende in Kraftstufe 12.

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen belegen für alle drei Korrekturvorschläge weitgehend vergleichbare Verläufe der Hertz'schen Pressung sowie der Linienlast im Eingriffsfeld. Es wurde die Variante III-2 (kreisförmige Kopfrücknahme und Beginn bei ca. $\frac{3}{4}$ der Strecke zwischen den Eingriffspunkten A und B am Rad bzw. zwischen D und E am Ritzel) verwendet. Die Variante III-2 besitzt im Gegensatz zur Variante III-1 einen sanften Beginn der Korrektur anstatt einer Kante. Im Vergleich zur Variante III-3 ist die Korrektur der Variante III-2 kürzer ausgeführt und beeinflusst somit die Belastung im Bereich der Einzeleingriffspunkte B und D nicht zu stark.

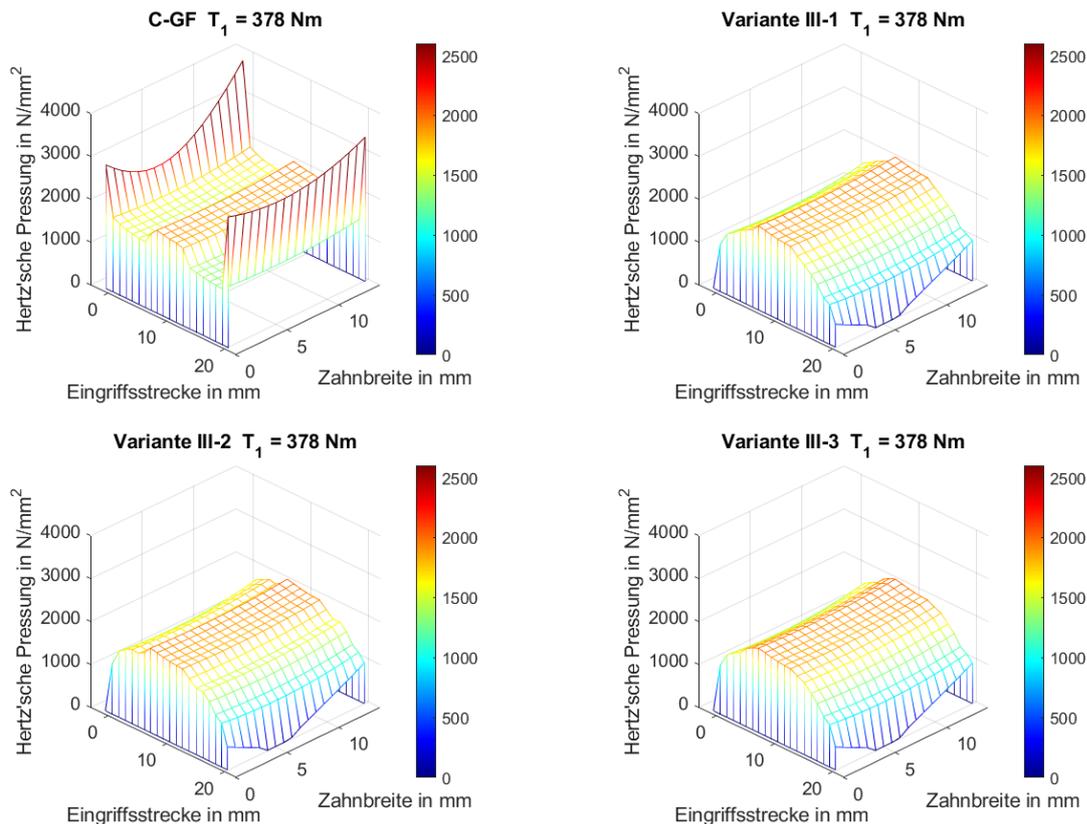


Bild 4-30: Hertz'sche Pressung der C-GF-Verzahnung und der Varianten III-1, III-2 sowie III-3 mit $T_1 = 378 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 12 der Erweiterung des Graufleckentests nach FVA 54/7 (s. Abschnitt 5.3.1)

Verzahnungsvariante IV

Es wurden drei Korrekturvarianten für die Verzahnungsvariante IV auf Kraftstufe 10 bezogen ausgelegt. Die Korrekturvariante IV-1 weist eine lange, kreisförmige gewälzte Korrektur mit einem Endbetrag von $20 \mu\text{m}$ auf. Zusätzlich wird eine kreisförmige Kopfrücknahme mit einem Betrag von $20 \mu\text{m}$ aufgebracht. Diese beginnt am Rad bei ca. $\frac{3}{4}$ der Eingriffsstrecke zwischen A und B. Die Variante IV-2 besteht aus einer langen, kreisförmigen Kopfrücknahme mit einem Betrag von $40 \mu\text{m}$. Die Variante IV-3 weist eine Kopfrücknahme mit Betrag von $40 \mu\text{m}$ und Beginn bei $\frac{3}{4}$ der Eingriffsstrecke zwischen A und B auf. Alle Varianten sind mit einer Breitenballigkeit $C_b = 5 \mu\text{m}$ am Ritzel ausgeführt. Der Gesamtbetrag der Korrektur im Bereich der maximal belasteten Flankenpunkte ist für alle Korrekturvarianten ähnlich. Die optimalen Korrekturbeiträge der Verzahnung IV wurden anhand von RIKOR [Neu15] bestimmt, mit dem Ziel eine vollständige Entlastung des Eingriffsbeginns bei Kraftstufe 10 zu erreichen. Zur Veranschaulichung ist die Topographie der Varianten über der Eingriffsstrecke und Zahnbreite in Bild 4-31 aufgetragen.

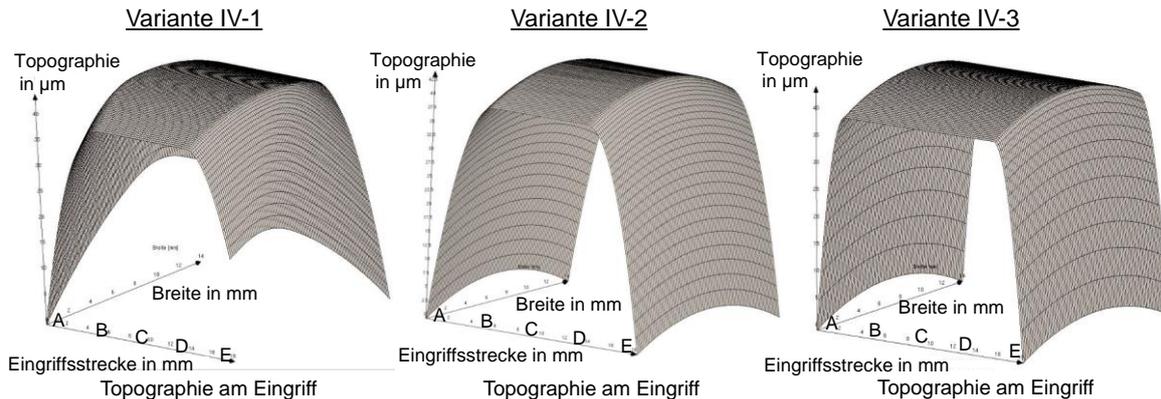


Bild 4-31: Topographie im Eingriff der Korrekturvarianten IV-1, IV-2 und IV-3

Tabelle 4-17 zeigt die Maximalwerte der Hertz'schen Pressung und die Werte der Profilüberdeckung unter Last für alle betrachteten Kraftstufen. Es ist zu beachten, dass die Maximalwerte der Hertz'schen Pressung theoretisch ermittelte Berechnungswerte darstellen und lediglich zur Orientierung dienen. Die ermittelten Werte sind stark abhängig von der Vorgabe der Kopfkante, welche sich im Betrieb ändert.

Tabelle 4-17: Maximalwerte der Hertz'schen Pressung und Profilüberdeckung unter Last der Varianten IV-1, IV-2 und IV-3 sowie der Schrägverzahnung ohne Korrektur

Größe	IV ohne Korrektur			Variante IV-1			Variante IV-2			Variante IV-3		
	Kraftstufe			Kraftstufe			Kraftstufe			Kraftstufe		
	8	10	12	8	10	12	8	10	12	8	10	12
$p_{H,max}$ in N/mm^2	3976	3459	3503	1476	1761	2142	1542	1949	2365	1681	2118	2651
$\epsilon_{\alpha,Last}$	1,46	1,49	1,49	1,30	1,39	1,46	1,29	1,39	1,43	1,29	1,39	1,43

Der Maximalwert der Hertz'schen Pressung liegt bei der Kraftstufe 10 für alle Variationen der Variante IV deutlich unterhalb der maximalen Hertz'schen Pressung bei der unkorrigierten Schrägverzahnung mit $p_{H,max} = 3459 N/mm^2$. Die Variante IV-1 weist dabei den kleinsten und die Variante IV-3 den größten Wert der maximalen Hertz'schen Pressung der Variationen IV-1, IV-2 und IV-3 auf. Die Profilüberdeckung unter Last bei der Kraftstufe 10 wird für alle Varianten im Vergleich zur C-GF-Verzahnung von $\epsilon_{\alpha,Last} = 1,49$ auf $\epsilon_{\alpha,Last} = 1,39$ reduziert.

In Bild 4-32, Bild 4-33 und Bild 4-34 sind die berechneten Hertz'schen Pressungen der Kraftstufe 8, der Kraftstufe 10 und der Kraftstufe 12 für alle Varianten im Vergleich zur nicht korrigierten Schrägverzahnung dargestellt. Die entsprechenden Linienlasten sind dem Anhang (s. Bild A.10-7, Bild A.10-8 und Bild A.10-9) zu entnehmen.

Bild 4-32 zeigt die Hertz'sche Pressung der Varianten IV-1, IV-2 und IV-3 im Vergleich zur nicht korrigierten Schrägverzahnung für die Kraftstufe 10. Es ist zu sehen, dass für alle korrigierten Varianten der vor- und nachzeitige Eingriff vollständig entlastet wird. Es sind dennoch Spannungsspitzen im Bereich des Eingriffsbeginns und -endes erkennbar. Diese Spannungsspitzen sind bei der Variante IV-3 am stärksten ausgeprägt. Wird nur eine Kopfrücknahme und keine gewälzte Korrektur (Variante IV-2 und Variante IV-3) aufgebracht, ist die Variante IV-2 aufgrund der länger ausgeführten Kopfrücknahme bezüglich der Pressungsverteilung vorteilhafter. Durch das vollständige Reduzieren des vor- und nachzeitigen Eingriffes in Kraftstufe 10 wird in Kraftstufe 8 die Eingriffsstrecke minimal verkürzt. Dies ist in Bild 4-33 zu sehen.

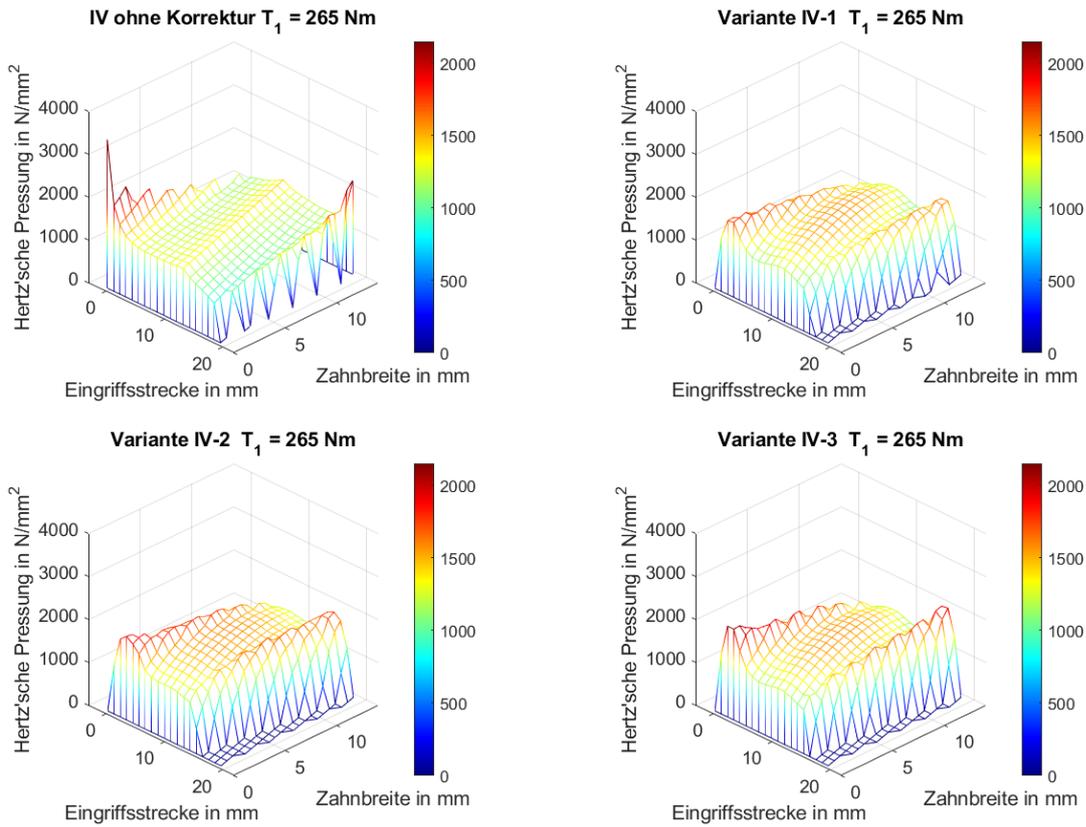


Bild 4-32: Hertz'sche Pressung der unkorrigierten Schrägverzahnung und der Varianten IV-1, IV-2 sowie IV-3 mit $T_1 = 265 \text{ Nm}$, Belastung entsprechend der Kraftstufe 10 des Graufleckentests nach FVA 54/7

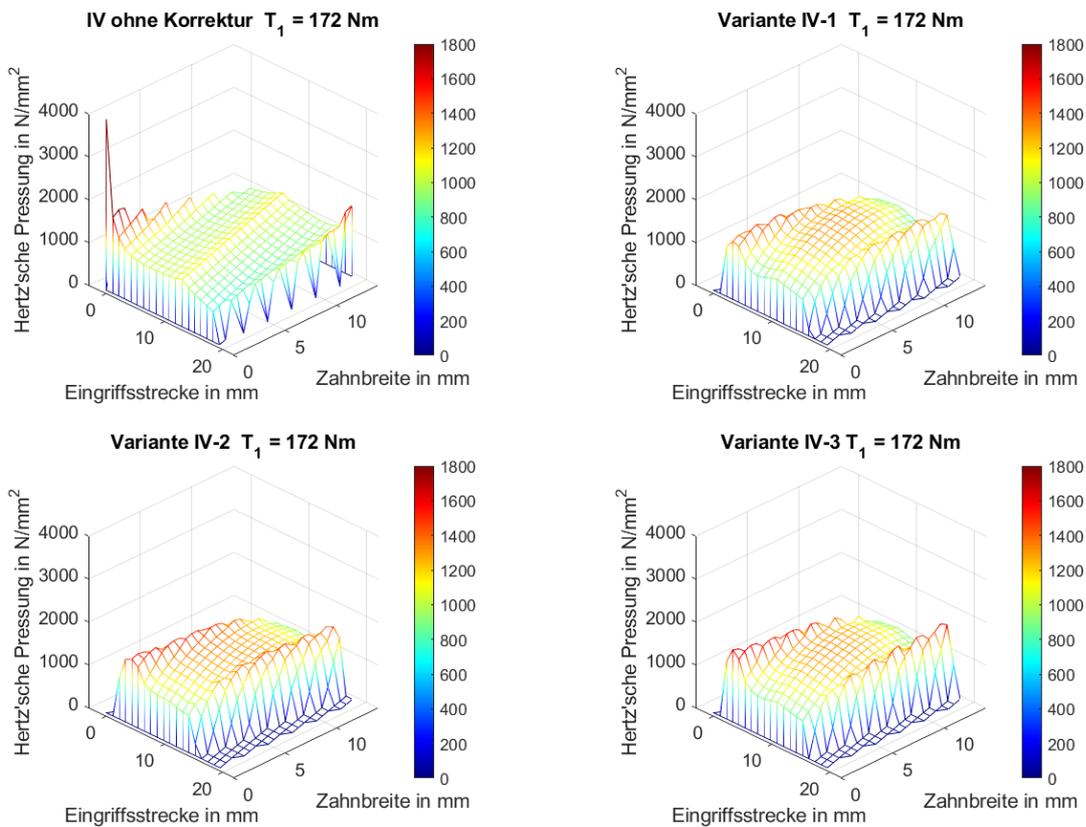


Bild 4-33: Hertz'sche Pressung der unkorrigierten Schrägverzahnung und der Varianten IV-1, IV-2 sowie IV-3 mit $T_1 = 172 \text{ Nm}$, Belastung entsprechend der Kraftstufe 8 des Graufleckentests nach FVA 54/7

Bild 4-34 zeigt die Hertz'sche Pressung der Varianten IV-1, IV-2 und IV-3 und nicht korrigierten Schrägverzahnung in Kraftstufe 12. In Kraftstufe 12 liegt keine vollständige Entlastung des Eingriffsbeginns mehr vor. Die Kopfrücknahme führt dennoch zu einer deutlichen Entlastung des Eingriffsbeginns und –ende in Kraftstufe 12.

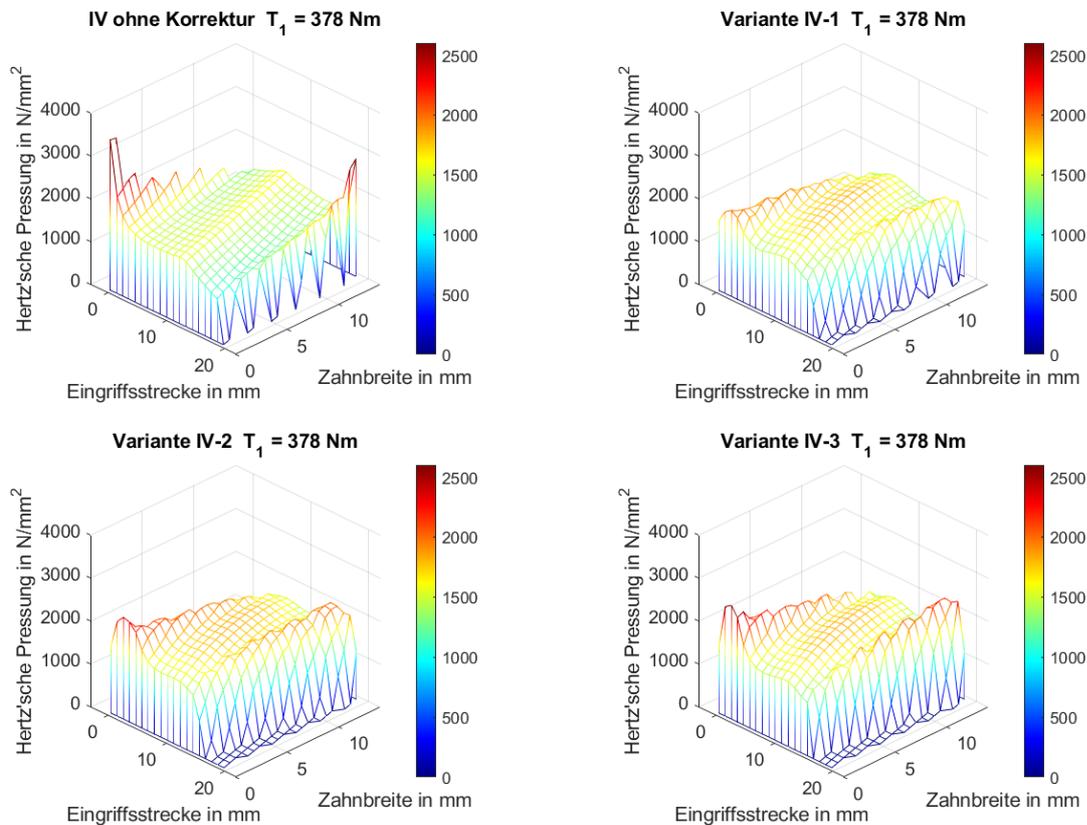


Bild 4-34: Hertz'sche Pressung der unkorrigierten Schrägverzahnung und der Varianten IV-1, IV-2 sowie IV-3 mit $T_1 = 378 \text{ Nm}$, Belastung entsprechend der Kraftstufe 12 der Erweiterung des Graufleckentests nach FVA 54/7 (s. Abschnitt 5.3.1)

Alle vorgeschlagenen Korrekturen führen für die betrachteten Kraftstufen zu einer deutlichen Reduktion des vor- und nachzeitigen Eingriffs bzw. sogar zu einem vollständig entlasteten Eingriffsbeginn und -ende. Gleichmäßige Pressungs- und Linienlastverteilungen werden durch die Varianten IV-1 und IV-2 erreicht. Da die Verläufe auch sehr ähnlich sind, sind zwischen den beiden Varianten keine signifikanten Unterschiede zu nennen. Die Varianten IV-2 und IV-3 sind einfacher in der Herstellung, robuster gegenüber Toleranzen und ggf. auch praxisnäher als die Variante IV-1. Es wurde daher die Korrekturvariante IV-2 verwendet.

4.4.3 Theoretische Studie zur Auswahl der Prüfbedingungen

In den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4 wurden die Einflüsse der Geometrie und Betriebsbedingungen getrennt voneinander betrachtet. Es hat sich gezeigt, dass bei Verwendung korrigierter Verzahnungen die Schmierfilmdicke und damit die Graufleckensicherheit steigt. Diese Verzahnungen sind durch ihre Korrekturen und Geometrie praxisnäher als die C-GF-Verzahnung. Für die Variante III wurde die C-Verzahnung mit einer geeigneten Kopfrücknahme (s. Abschnitt 4.4.2) festgelegt. Eine praxisnah korrigierte Schrägverzahnung, welche eine geometrische Ähnlichkeit zur C-GF-Verzahnung besitzt, wurde als Variante IV definiert. Durch Änderung der Betriebsbedingungen im Graufleckentest kann die Graufleckentragfähigkeit beeinflusst werden. Dies wird in Abschnitt 4.3.2 bei Betrachtung von verschiedenen Testverfahren

mit Variation von Prüfverzahnung und Prüfbedingungen deutlich. Um die Vergleichbarkeit zu dem Standardtest nach FVA 54/7 zu gewährleisten, wurden die Varianten III und IV mit unterschiedlichen Betriebsbedingungen berechnet. Das Ziel dieser Berechnungen war es durch geeignete anwendungsnahe Prüfbedingungen die erhöhte Graufleckentragfähigkeit der Varianten III und IV so zu reduzieren, dass hinsichtlich der Schmierfilmdicke im Vergleich zum Standardtest vergleichbare Verhältnisse vorliegen.

Der Graufleckentest nach FVA 54/7 wird standardmäßig bei 90 °C Öltemperatur und einer Drehzahl am Ritzel von 2250 min⁻¹ betrieben. Es sind die Blitztemperaturen für die C-GF-Verzahnung und die Variante III für die Standardbedingungen in Bild 4-35 angetragen. Zudem wurde die Variante III bei einer erhöhten Öltemperatur von 120 °C, bei einer reduzierten Drehzahl von 375 min⁻¹ sowie einer reduzierten Drehzahl von 375 min⁻¹ in Verbindung mit einer auf 60 °C reduzierten Öltemperatur berechnet. Durch die Kopfrücknahme nehmen die Werte am Eingriffsbeginn und -ende ab. Durch die verringerte Drehzahl und die verringerte Öltemperatur nehmen die Werte der Blitztemperatur weiter ab. Bei Erhöhung der Schmierstofftemperatur erhöht sich die Blitztemperatur geringfügig.

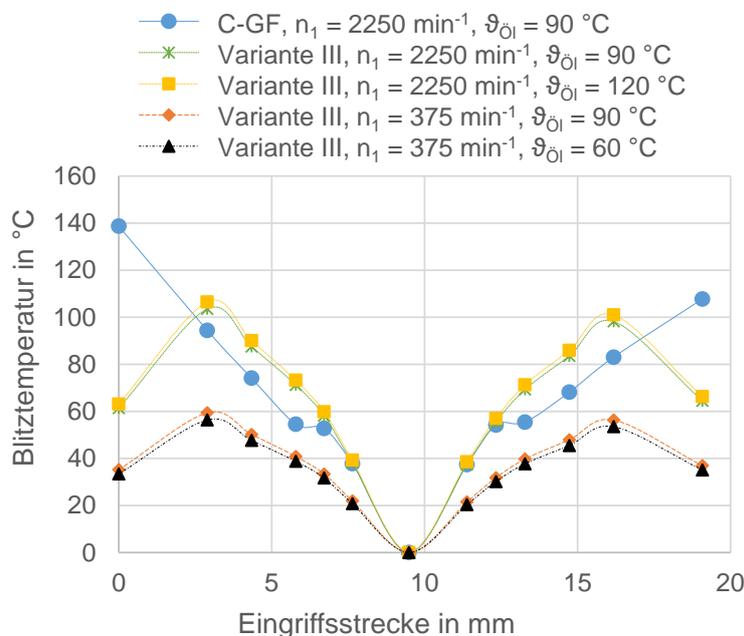


Bild 4-35: Blitztemperatur an den betrachteten Punkten auf der Eingriffsstrecke bei $T_1 = 265,1 \text{ Nm}$ für die Variante III mit verschiedenen Betriebsbedingungen

nehmen die Werte der Blitztemperatur weiter ab. Eine Erhöhung der Öltemperatur führt zu geringfügig höheren Werten der Blitztemperatur.

In Bild 4-36 sind die Werte der Blitztemperatur für die C-GF-Verzahnung und Variante IV bei Standardbedingungen angetragen. Es ist ebenfalls die Variante IV bei einer erhöhten Öltemperatur von 110 °C, bei einer reduzierten Drehzahl von 1450 min⁻¹ sowie einer reduzierten Drehzahl von 1450 min⁻¹ in Verbindung mit einer erhöhten Öltemperatur von 110 °C dargestellt. Der Verlauf wird durch die Geometrie und aufgetragenen Korrekturen beeinflusst. Die Werte nehmen am Eingriffsbeginn und -ende ab und dafür an den Punkten AB und DE zu. Durch die verringerte Drehzahl nehmen die Werte der Blitztemperatur weiter ab. Eine Erhöhung der Öltemperatur führt zu geringfügig höheren Werten der Blitztemperatur.

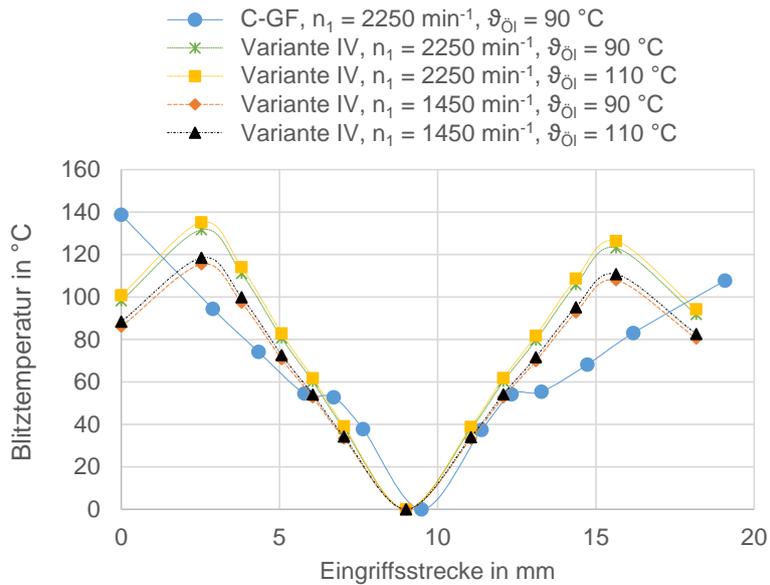


Bild 4-36: Blitztemperatur an den betrachteten Punkten auf der Eingriffsstrecke bei $T_1 = 265,1 \text{ Nm}$ für die Variante IV mit verschiedenen Betriebsbedingungen

gleichbare minimale Schmierfilmdicke wie bei der C-GF-Verzahnung unter Standardbedingungen eingestellt werden. Diese Berechnungen dienen als Grundlage um die Prüfbedingungen für anwendungsnahe Testabschnitte festzulegen. Die Erhöhung der Öltemperatur auf $\vartheta_{\text{Öl}} = 120 \text{ °C}$ soll den Anwendungsfall Automobil abbilden. Die Verringerung der Drehzahl auf $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$ bei gleichzeitiger Verringerung der Öltemperatur auf $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ °C}$ ist an die Betriebsbedingungen in Windkraftgetrieben angelehnt. Diese beiden Anwendungsfälle wurden unter Verwendung der Verzahnungsvariante III und den entsprechenden Prüfbedingungen in experimentellen Untersuchungen nachgebildet und sind in Abschnitt 7.4.2 dargestellt.

Zu beachten ist, dass die Öltemperatur aufgrund der temperaturbedingten chemischen Reaktivität von Additivkomponenten eine zusätzliche Einflussgröße hinsichtlich der Grauflecken-tragfähigkeit darstellt. Es kann daher nicht allein aufgrund der minimalen Schmierfilmdicke auf eine Sicherheit gegen Graufleckigkeit geschlossen werden. Zudem können ggf. veränderte Betriebsbedingungen andere Schadenmechanismen wie beispielsweise Verschleiß hervorrufen.

Tabelle 4-18: Minimale Schmierfilmdicke der Verzahnungsvarianten C-GF, III und IV bei unterschiedlichen Testbedingungen

Verzahnung	C-GF	III	III	III	III	IV	IV	IV	IV
n_1 in min^{-1}	2250	2250	2250	375	375	2250	2250	1450	1450
$\vartheta_{\text{Öl}}$ in $^{\circ}\text{C}$	90	90	120	90	60	90	110	90	110
h_{min} in μm	0,033	0,043	0,034	0,024	0,047	0,053	0,038	0,045	0,032

Die minimalen Schmierfilmdicken der Verzahnungsvarianten III und IV sind für unterschiedliche Betriebsbedingungen im Vergleich zu den Standardbedingungen nach FVA 54/7 und dem Standardtest mit der C-GF-Verzahnung in Tabelle 4-18 dargestellt. Es ist zu sehen, dass die minimale Schmierfilmdicke der Verzahnungsvarianten III und IV durch eine Erhöhung der Temperatur oder Verringerung der Drehzahl gesenkt werden kann. Insbesondere für die Verzahnungsvariante III kann durch Erhöhung der Öltemperatur auf 120 °C eine ver-

5 Versuchseinrichtungen und Versuchsdurchführung

Die experimentellen Untersuchungen zur zuverlässigen Beurteilung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen wurden anhand von Laufversuchen an FZG-Zahnradverspannungsprüfständen mit Achsabstand $a = 91,5$ mm durchgeführt. Die Versuchseinrichtung, die Prüfverzahnungen, die Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung, die Versuchsschmierstoffe und die Genauigkeit der Untersuchungen werden im Folgenden erläutert.

5.1 FZG-Zahnradverspannungsprüfstand

Die experimentellen Untersuchungen wurden auf FZG-Zahnradverspannungsprüfständen nach DIN ISO 14635-1 [DIN06b] durchgeführt. Der prinzipielle Aufbau des Prüfstands ist in Bild 5-1 zu sehen. Für die Untersuchungen wurden Prüfstände herkömmlicher Bauart mit mechanischer Verspanneinrichtung und ein Prüfstand mit hydrostatischer Verspannung eingesetzt.

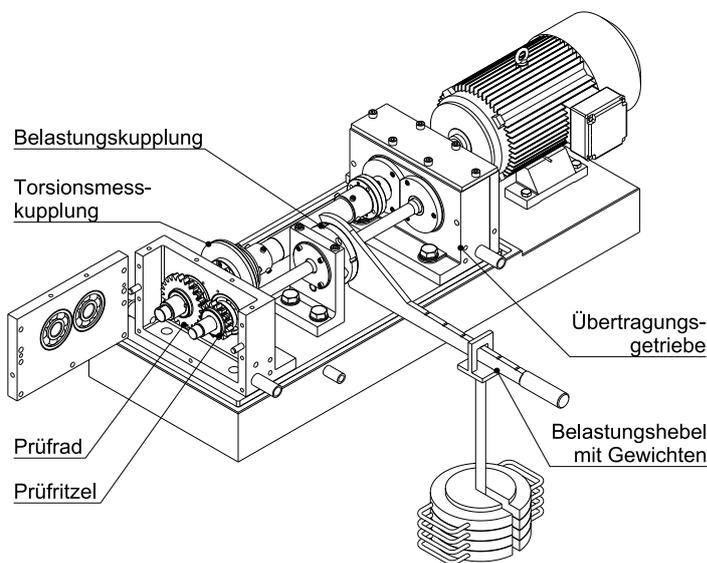


Bild 5-1: FZG-Zahnradverspannungsprüfstand mit Achsabstand $a = 91,5$ mm [DIN 06a]

Die mechanisch verspannten Prüfstände werden mit Drehstrom-Asynchron-Motoren angetrieben. Der Antrieb des hydrostatisch verspannten Prüfstands erfolgt mit einem drehzahlregelbaren Gleichstrommotor.

Bei den mechanisch verspannten Prüfständen wird die Prüflast durch Verdrehen und Verspannen der beiden Hälften der Belastungskupplung aufgebracht. Hierdurch stellt sich ein definiertes statisches Moment zwischen den Zahnradstufen im Prüf- und Übertragungsgetriebe ein, welches proportional zum Verdrehweg ist. Der Leistungsfluss erfolgt als mechanischer Kreislauf über das Prüfgetriebe und das Übertragungsgetriebe gleicher Übersetzung, während der Elektromotor lediglich die Verlustleistung des Systems ausgleicht. Die Verspannung des hydrostatisch verspannten Prüfstands erfolgt mittels eines hydrostatischen Verspannmotors anstelle der Belastungskupplung. Die Ölversorgung des Prüf- und Übertragungsgetriebes wird bei allen Prüfständen durch ein ca. 30 Liter fassendes Ölaggregat mit Temperaturregelung und Drucküberwachung sichergestellt.

In den hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde das Prüfritzel jeweils auf der Torsionswelle montiert. Die Verspannrichtung wurde in den Untersuchungen grundsätzlich so festgelegt, dass sich im Prüfgetriebe der Betriebszustand „Ritzel treibt Rad“ ergab. Für einzelne Versuche wurde im hydrostatisch verspannten Prüfstand der Betriebszustand „Rad treibt Ritzel“ eingestellt. Die Drehzahl des Ritzels wurde in der Regel mit $n_1 = 2250 \text{ min}^{-1}$ vorgegeben. Für einzelne Untersuchungen wurde eine Drehzahl von $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$ eingestellt. Die Versuche mit Öleinspritztemperatur $\vartheta_E = 60 \text{ °C}$ und 90 °C wurden bei Einspritzschmierung durchgeführt. Die Öleinspritztemperatur wurde auf $\pm 2 \text{ °C}$ genau geregelt. Bei Verwendung der bei Einspritzschmierung wurde der Schmierstoff während der Versuche mit ca. 2 l/min in den Zahneingriff eingespritzt. Bei den Versuchen mit Öleinspritztemperatur $\vartheta_E = 120 \pm 2 \text{ °C}$ wurde

eine Tauchschröpfung verwendet. Bei Verwendung der Tauchschröpfung wurde der Schmierstoff im der Prüfgetriebekasten vor dem Versuch bis zur Achsmittle aufgeföüllt und es erfolgt keine Schmierstoffversorgung über das Ölaggregat.

5.2 Prüfverzahnungen

In den durchgeführten Untersuchungen wurde die C-GF-Verzahnung verwendet, welche im Graufleckentest Anwendung findet. Zudem wurden unterschiedliche Modifikationen der C-GF-Verzahnung hinsichtlich der Makro- und Mikrogeometrie, welche mit den Varianten I, II, III und IV bezeichnet sind, untersucht. Die Auslegung der Varianten I, II, III und IV ist in Kapitel 4.4 zu finden. Die Tabelle 5-1 zeigt die maßgeblichen Verzahnungsdaten der Prüfverzahnungen. Anzumerken ist, dass die Verzahnungsvariante I mit einer Kopfkantenabrundung $\rho_K = 60 \mu\text{m}$ am Ritzel und Rad ausgelegt wurde. Für das Ritzel ergaben sich aufgrund des großen Betrages der Kopfkantenabrundung Einschränkungen in der Fertigung. Aus diesem Grund wurde die Kopfkantenabrundung am Ritzel mit $\rho_{K1} = 30 \mu\text{m}$ deutlich geringer ausgeführt.

Tabelle 5-1: Hauptverzahnungsdaten der verwendeten Prüfverzahnungen

Größe	Einheit	C-GF	I	II	III	IV
		Ritzel / Rad	Ritzel / Rad	Ritzel / Rad	Ritzel / Rad	Ritzel / Rad
Modul m_n	mm	4,5				4
Zähnezahl z	-	16 / 24				
Außendurchmesser d_a	mm	82,45 / 118,35				
Zahnbreite b	mm	14				
Schrägungswinkel β	°	0				27,44
Eingriffswinkel α_n	°	20				
Profilverschiebungsfaktor x	-	0,18 / 0,17				
Achsabstand a	mm	91,5				
Profilüberdeckung ϵ_α	-	1,436				1,387
Sprungüberdeckung ϵ_β	-	-				0,513
Werkstoff	-	16MnCr5				
Zahnflankenrauheit R_a	μm	0,5 ± 0,1				
Zahnflankenbearbeitung	-	MAAG-0° Glattschliff	Profilschleifen			
Zahnflankenkorrekturen	μm	keine	$\rho_{K2} = 30 / \rho_{K2} = 60$	keine	$C_{a1} = 30 / C_{a2} = 35$	$C_a = 40 / C_{b1} = 5$

5.3 Versuchsdurchführung

Es wurden einzelne Stufen- und Dauertests sowie Stufentests mit anschließenden Dauertests durchgeführt. Die Versuchsdurchführung der Stufen- und Dauertests erfolgte analog zu der Vorgehensweise im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] bzw. DIN 3990-16 [DIN20], welche in 2.3.1 dargestellt ist. Der Prüfradsatz wurde nach jedem Prüfintervall im Stufen- und Dauertest ausgebaut, gewogen und auf einem Evolventenmessgerät dreidimensional vermessen. Die Vermessung im Neuzustand inklusive der Verzahnungs-Ist-Geometrie sowie nach den einzelnen Prüfintervallen erfolgte auf einer 3D-Koordinatenmessmaschine vom Typ Klingenberg P40 wie in Abschnitt 6.3 dargestellt. Die Prüfräder wurden vor dem ersten Einbau ebenfalls gewogen. Die Bestimmung der Profilformabweichung f_f erfolgte, wie in DIN 3990-16 [DIN20] beschrieben, durch den Vergleich des Neuzustands mit dem gelaufenen Zustand einer Zahnflanke nach jedem Prüfintervall. Das Vorgehen ist schematisch in Bild 5-2 dargestellt.

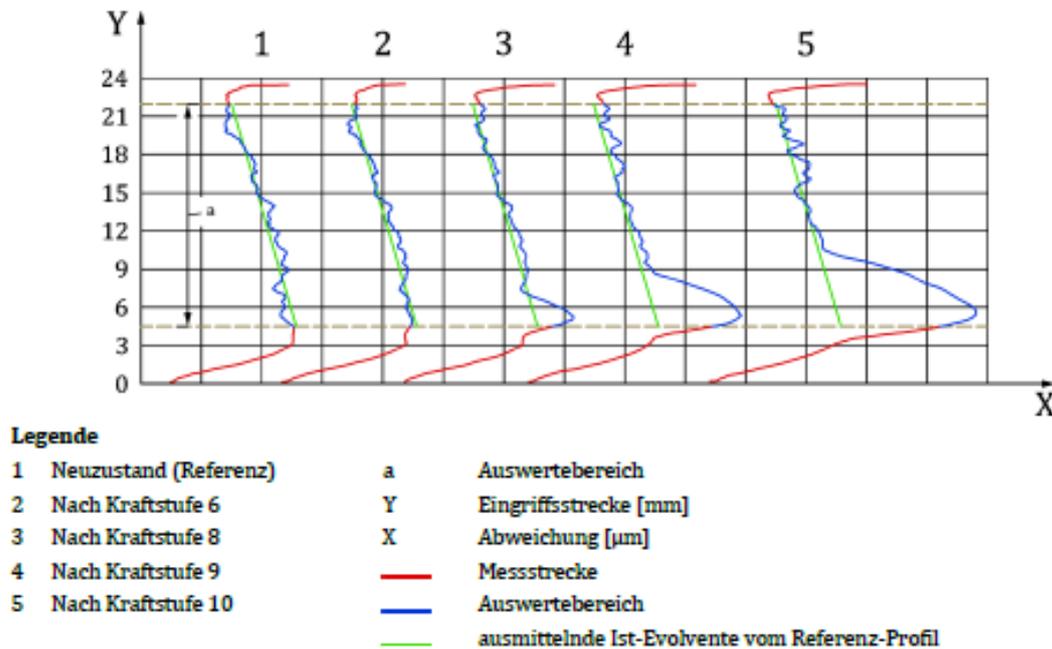


Bild 5-2: Exemplarische Profilmessschriebe nach den einzelnen Versuchsabschnitten im Graufleckentest nach DIN 3990-16 [DIN20]

Die mittlere Profilformabweichung f_{fm} wurde anhand von mindestens drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Zahnflanken des Ritzels bestimmt und anschließend gemittelt.

Zusätzlich wurden die Zahnflanken lichtmikroskopisch dokumentiert und gleichzeitig geprüft, ob die Abweichung der Profilform und des Masseverlusts durch Graufleckigkeit bedingt ist. Zudem wurden die prozentualen Anteile der Graufleckenflächen GF an ausgewählten Zähnen ermittelt und ein Durchschnittswert berechnet. Anhand der Entwicklung der mittleren Profilformabweichung f_{fm} , der mittleren prozentualen Graufleckenfläche GF und des Masseverlusts W des Ritzels über die Versuchszeit wird der Schadensfortschritt gekennzeichnet.

Wurden Änderungen bezüglich der Prüfbedingungen, der Prüfverzahnungen oder im Prüfablauf im Vergleich zum Prüfverfahren nach FVA 54/7 [Sch93] vorgenommen, so ist dies in Tabelle 3-1 aufgelistet und für die einzelnen Versuche in Kapitel 7 dokumentiert. Es wurden nur die dokumentierten Änderungen vorgenommen, die restlichen Prüfbedingungen erfolgten, wie nach DIN 3990-16. Folgende Änderungen im Vergleich zum Graufleckentest nach FVA 54/7 bzw. DIN 3990-16 wurden für ausgewählte Untersuchungen durchgeführt:

- Verwendung des Werkstoff 18CrNiMo7-6 für die Prüfverzahnungen
- Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest
- Verwendung der Verzahnungsvarianten I, II, III und IV
- Verwendung von angepassten Drehmomenten bei der Verzahnungsvariante IV
- Laufzeit der Kraftstufe 8 im Dauertest
- Schmierstofftemperatur $\vartheta_E = 60 \text{ °C}$ oder $\vartheta_E = 120 \text{ °C}$
- Drehzahl am Ritzel $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$
- Treibendes Rad

Die Drehmomente am Ritzel und die daraus resultierende Hertz'sche Pressung am Wälzpunkt können der Tabelle 2-1 in Abschnitt 2.3.1 für die einzelnen Kraftstufen des Graufleckentests nach FVA 54/7 entnommen werden. Bei Verwendung der C-GF-Verzahnung wurden die Drehmomente des Einlaufs und der Kraftstufen 5 bis 10 wie in FVA 54/7 [Sch93] definiert vorgege-

ben. Da der Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] spätestens nach der Kraftstufe 10 beendet wird, wurden für die Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest zwei weitere Kraftstufen (Kraftstufen 11 und 12) definiert. Die Drehmomente und Hertz'schen Pressungen am Wälzpunkt der Kraftstufen 11 und 12 sind in 5.3.1 dargestellt.

Da die verwendeten Verzahnungsvarianten I, II und III die gleiche Makrogeometrie aufweisen wie die C-GF-Verzahnung, wurden die Drehmomente nach FVA 54/7 [Sch93] bei Verwendung der Varianten I, II und III beibehalten. Die Verzahnungsvariante IV weicht aufgrund des Schrägungswinkels in ihrer Makrogeometrie von der C-GF-Verzahnung ab. Um bei der experimentellen Durchführung mit der Variante IV vergleichbare Verhältnisse zu den anderen Prüfverzahnungen zu generieren, wurden die Drehmomente der einzelnen Kraftstufen am Ritzel so angepasst, dass vergleichbare Verhältnisse für die Hertz'sche Pressung und minimale spezifische Schmierfilmdicke vorlagen. Dies ist in 5.3.2 dargestellt.

5.3.1 Verwendete Drehmomente der erweiterten Kraftstufen im Stufentest

Die Drehmomente der Kraftstufen im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] wurden so definiert, dass die Hertz'schen Pressungen im Wälzpunkt der C-GF-Verzahnung in etwa der Hertz'schen Pressung im Wälzpunkt der A-Verzahnung, welche im Fresstest nach DIN 14635 [DIN06b] verwendet wird, entsprechen. Somit ergeben sich die in Tabelle 5-2 angegebenen Drehmomente und Hertz'sche Pressungen für die Kraftstufen 11 und 12. [Sch98]

Tabelle 5-2: Drehmomente und Hertz'sche Pressungen für den erweiterten Stufentest

Kraftstufe	T_1 in Nm	p_c in N/mm ²
11	319,3	1698
12	378,3	1848

5.3.2 Verwendete Drehmomente der Prüfverzahnung IV ($\beta \neq 0$)

Um bei der experimentellen Durchführung mit der Variante IV vergleichbare Verhältnisse sicher zu stellen, wurden die Drehmomente der einzelnen Kraftstufen am Ritzel so angepasst, dass hinsichtlich Pressung und minimaler Schmierfilmdicke ähnliche Werte im Vergleich zur C-GF-Verzahnung vorlagen. Hierzu wurden die Hertz'schen Pressungen und minimalen Schmierfilmdicken für die C-GF-Verzahnung mit den im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] definierten Drehmomenten nachgerechnet. Die einzelnen Kraftstufen für die Variante IV wurden ebenfalls hinsichtlich Pressung und minimaler Schmierfilmdicke mit angepassten Drehmomenten berechnet.

Für alle Berechnungen wurde das Welle-Lager-System, welches dem Prüfstand nach dem Graufleckentest FVA 54/7 entspricht, vereinfacht in RIKOR modelliert. Ein Mineralöl mit einer kinematischen Viskosität von 100 mm²/s bei 40 °C, einer Dichte von 880 kg/m³ bei 15 °C und der Schadenskraftstufe 9 im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] wurde für die vergleichenden Berechnungen zugrunde gelegt.

Es wurde die Hertz'sche Pressung mit dem Programm RIKOR für die Zahnflanke ohne Berücksichtigung des vor- bzw. nachzeitigen Eingriffs berechnet. Anschließend wurde der jeweils entsprechende Maximalwert für die charakteristischen Punkte der Eingriffsstrecke A, AB, B, C, D, DE und E ausgegeben. Die verwendeten Drehmomente sowie die berechneten Werte der Hertz'schen Pressung im Wälzpunkt der C-GF-Verzahnung und der Variante IV sind in Tabelle 5-3 dargestellt. Mit den Werten für die Hertz'sche Pressung wurde die Berechnung der Graufleckentragfähigkeit nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] durchgeführt. Hieraus wurde die Schmierfilmdicke an den Punkten der Eingriffsstrecke berechnet. Die minimale Schmierfilmdicke

cke ist das örtliche Minimum der berechneten Schmierfilmdicken in den betrachteten Eingriffspunkten. In Tabelle 5-3 sind die berechneten Werte der minimalen Schmierfilmdicke der C-GF-Verzahnung und der Variante IV für alle Kraftstufen aufgetragen.

Tabelle 5-3: Drehmomente, Hertz'sche Pressung und minimale Schmierfilmdicken für die Versuche mit Variante IV

Kraftstufe	C-GF-Verzahnung			Variante IV		
	Drehmoment T_1	Hertz'sche Pressung im Wälzpunkt $p_{H,C}$	Minimale Schmierfilmdicke h_{min}	Drehmoment T_1	Hertz'sche Pressung im Wälzpunkt $p_{H,C}$	Minimale Schmierfilmdicke h_{min}
3	28,8 Nm	510 N/mm ²	0,1318 μ m	33,7 Nm	509 N/mm ²	0,1542 μ m
5	70,0 Nm	795 N/mm ²	0,0889 μ m	82,1 Nm	795 N/mm ²	0,1139 μ m
6	98,9 Nm	945 N/mm ²	0,0732 μ m	116,0 Nm	945 N/mm ²	0,0967 μ m
7	132,5 Nm	1094 N/mm ²	0,0604 μ m	155,2 Nm	1093 N/mm ²	0,0696 μ m
8	171,6 Nm	1245 N/mm ²	0,0496 μ m	201,5 Nm	1245 N/mm ²	0,0537 μ m
9	215,6 Nm	1395 N/mm ²	0,0409 μ m	253,0 Nm	1396 N/mm ²	0,0427 μ m
10	265,1 Nm	1547 N/mm ²	0,0336 μ m	311,1 Nm	1547 N/mm ²	0,0319 μ m

5.4 Versuchsschmierstoffe

Für die hier durchgeführten Untersuchungen kamen der Referenzschmierstoff FVA 3A und drei Praxisschmierstoffe zum Einsatz. Die Schmierstoffdaten stammen aus dem FVA-Referenzölkatalog [Lau07] bzw. den Datenblättern der Schmierstoffhersteller.

Es wurden für die Praxisschmierstoffe A und B Schmierstoffe der ISO-VG-320 auf PAO-Basis und SKS > 10 ausgewählt. Beide Schmierstoffe finden Anwendung in der Windkraftindustrie. Der Praxisschmierstoff A (Praxis A) enthält ein PD-Additiv und der Praxisschmierstoff B (Praxis B) EP / AW-Additive. Der Praxisschmierstoff C (Praxis C) wird in der Lebensmittelindustrie verwendet und der ISO-VG-220 zugeordnet. Der Schmierstoff basiert ebenfalls auf PAO-Basis und enthält eine EP / AW-Additivierung in Form von S-P-Additiven. Aufgrund eines Graufleckenkurztests [Ste02b] wird er der „GFT-mittel“ zugeordnet. In Tabelle 5-4 sind die Daten der verwendeten Schmierstoffe zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Verwendete Schmierstoffe

Bezeichnung	Zeichen	Einheit	FVA 3A	Praxis A	Praxis B	Praxis C
Grundölbasis	-	-	MIN	PAO	PAO	PAO
Additivierung	-	-	EP (Anglamol99)	PD	EP / AW	EP / AW
Viskositätsklasse	ISO VG	-	100	320	320	220
kin. Viskosität bei 40 °C	ν_{40}	mm ² /s	90 – 100	325	312	211
kin. Viskosität bei 100 °C	ν_{100}	mm ² /s	10,2 – 11,2	34,9	37,1	26,6
Viskositätsindex	VI	-	94	152	168	161
Dichte bei 15 °C	ρ_{15}	kg/m ³	875 – 885	852	860	~860
Kraftstufe im GF-Test [Sch93]	SKS	-	9	> 10	> 10	k. A.

5.5 Genauigkeit der Untersuchungen

Die an Prüfständen durchgeführten experimentellen Untersuchungen unterliegen gewissen Messunsicherheiten, welche aus systematischen oder zufälligen Abweichungen resultieren. Nach DIN 1319-3 [DIN96] kann der maximale Fehler Δy_{max} einer Prüfgröße mittels maximaler Messabweichung Δx_i der einzelnen Messgrößen x_i nach Formel (5-1) bestimmt werden.

$$\Delta y_{max} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\delta y}{\delta x_i} \cdot \Delta x_i \right] \quad (5-1)$$

Da das gleichzeitige Zusammentreffen der maximalen Einzelfehler unwahrscheinlich ist, kann bei mehreren Messgrößen der wahrscheinliche Gesamtfehler nach dem Prinzip der quadratischen Fehlerfortpflanzung bestimmt werden [Tob01]. Dies ist in Formel (5-2) dargestellt.

$$\overline{\Delta y} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\delta y}{\delta x_i} \cdot x_i \right]^2} \quad (5-2)$$

Nach dieser Methode wurden bereits umfangreiche Fehlerbetrachtungen zu den im Laufversuch ermittelten Flankentragfähigkeitswerten in früheren Arbeiten beispielsweise durch Käser [Käs77], Knauer [Kna88], Weiß [Wei94], Tobie [Tob01], Schurer [Sch16] und Koller [Kol13] durchgeführt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen erfolgten auf gleichen Prüfständen wie diese früheren Arbeiten und wurden unter nahezu gleichen Prüfbedingungen wie beispielsweise in Untersuchungen von Felbermaier [Fel18], Koller [Kol13], Weiß [Wei94], Lombardo [Lom14] und Käser [Käs77] durchgeführt. Die folgenden Ausführungen orientieren sich aus diesem Grund an diesen vorangegangenen Arbeiten.

Der resultierende Gesamtfehler der Flankentragfähigkeitswerte aus den Versuchen am FZG-Zahnradverspannungsprüfstand ergibt sich im Wesentlichen aus der Kalibriergenauigkeit der Prüfstandsmesswellen, der Ablesegenauigkeit für das eingestellte Drehmoment sowie aus Abweichungen des Dynamik- und Breitenfaktors aufgrund geometrischer Abweichungen und Streuungen der Prüfverzahnungen. [Sch16, Tob01]

In Tabelle 5-5 sind die Beträge der relativen Fehler der Einzelmessgrößen angelehnt an Käser [Käs77] und Knauer [Kna88] dargestellt.

Tabelle 5-5: Abschätzung relativer Einzelfehler in den Laufversuchen nach Käser [Käs77] und Knauer [Kna88]

Einflussgröße	Abweichung	Ursache
Drehmomentmessung	$\Delta T / T \approx \pm 5 \%$	Eichungsgenauigkeit
Drehmomentabweichung	$\Delta T_1 / T_1 \approx \pm 2 \%$	Setzerscheinungen
Dynamikfaktor	$\Delta K_v / K_v \approx \pm 5 \%$	Drehzahlschwankungen, Fertigungstoleranzen
Breitenfaktor	$\Delta K_{H\beta} / K_{H\beta} \approx \pm 5 \%$	Drehzahlschwankungen, Fertigungstoleranzen

Mit den Angaben von Käser [Käs77] und Knauer [Kna88] ergibt sich somit für die wirksame Zahnnormalkraft ein maximaler Fehler von $\pm 15 \%$ und ein wahrscheinlicher Fehler von $\pm 9 \%$. Hieraus resultiert ein wahrscheinlicher Fehler für die Flankenpressung p_c von $\pm 5 \%$ [Wei94].

Die Bewertung der Schmierstoffe im Graufleckentest erfolgt anhand der bestimmten Schadenskraftstufe im Stufentest und der Entwicklung der Graufleckigkeit im Dauertest. Es sind zudem im Hinblick auf die Genauigkeit der durchgeführten Untersuchungen die Wiederholbarkeit r und die Vergleichbarkeit R dieser Bewertung von Interesse. Im Rahmen der Überführung des Graufleckentests nach FVA 54/7 [Sch93] in die DIN 3990-16 [DIN20] wurden Ringversuche mit 9 Testlaboren durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse wurden anhand statistischer Kennwerte nach ISO 5725-2 [ISO83] in Bezug auf die ermittelte Schadenskraftstufe der durchgeführten Graufleckentests ausgewertet. Bei Standardbedingungen nach DIN 3990-16 [DIN20] ergaben sich folgende Präzisionswerte im Stufentest nach DIN EN ISO 4259-2 [DIN18]:

Wiederholbarkeit r	1 Kraftstufe
Vergleichbarkeit R	2 Kraftstufen

Weitere Informationen sind in [DIN20, Eng16] zu finden.

Dieses Ergebnis fügt sich in frühere Untersuchungen ein. Nach Schönnenbeck [Sch84] und Emmert [Emm94] liegt die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses eines Graufleckentests im Bereich einer Kraftstufe im Stufentest und eines Kontrollintervalls im Dauertest.

6 Herstellung und Dokumentation der Prüfverzahnungen

Im Folgenden wird auf die Herstellung und die Dokumentation der verwendeten Prüfverzahnungen sowie die Messverfahren zur Dokumentation der Prüfräder eingegangen.

6.1 Werkzeugdaten und Fertigungsablauf

Die Prüfverzahnungen wurden bei der Fa. ZF Friedrichshafen AG weichbearbeitet und ein-satzgehärtet. Die Haupt-Geometriedaten der Fräser sind in Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 dokumentiert.

Tabelle 6-1: Geometriedaten des Fräswerkzeugs der C-GF-Verzahnung und der Varianten I, II und III

Bezeichnung	Zeichen		Größe
Werkzeugnummer	-	-	F12R1-4,5/20°-SP13-139/25
Kopfhöhe	h_{aP0}	mm	6,26
Fußformhöhe	h_{FP0}	mm	5,85
Kopfabrundung	ρ_{aP0}	mm	1,13
Protuberanzbetrag	pr	mm	0,13
Protuberanzwinkel	α_{pr}	°	12,0

Tabelle 6-2: Geometriedaten des Fräswerkzeugs der Variante IV

Bezeichnung	Zeichen		Größe
Werkzeugnummer	-	-	1Z21-172111
Kopfhöhe	h_{aP0}	mm	5,88
Fußformhöhe	h_{FP0}	mm	5,20
Kopfabrundung	ρ_{aP0}	mm	1,32
Protuberanzbetrag	pr	mm	0,16
Protuberanzwinkel	α_{pr}	°	12,0

Die abschließende Hartfeinbearbeitung erfolgte teilweise bei der Fa. ZF Friedrichshafen AG und größtenteils an der Forschungsstelle. An der Forschungsstelle erfolgte das Schleifen als Profilmformschleifverfahren auf einer Schleifmaschine vom Typ LCC 280 der Firma Liebherr. Die Aufteilung der Hartfeinbearbeitung begründet sich mit dem zeitlichen Ablauf der experimentellen Arbeiten sowie mit fertigungstechnischen Gründen. Die Fa. ZF Friedrichshafen AG ist eines der wenigen Unternehmen, welches noch Zahnräder mit den MAAG-0° Glattschliff schleifen kann, während mit der Schleifmaschine an der Forschungsstelle auf Sonderanfertigungen eingegangen werden kann. Zudem wurde auf Grundlage der Ergebnisse des Versuchspakets „Variation der Prüfverzahnungen“ die Hartfeinbearbeitung der Prüfverzahnungen für die weiteren experimentellen Untersuchungen festgelegt.

Alle C-GF-Verzahnungen wurden mit dem MAAG-0° Glattschliff bei der Fa. ZF Friedrichshafen AG geschliffen. Zudem erfolgte die Hartfeinbearbeitung der Prüfräder der Verzahnungsvarianten II, III und IV des Versuchspakets „Variation der Prüfverzahnungen“ und teilweise der Prüfräder der Verzahnungsvarianten II und III des Versuchspakets „Variation der Prüfbedingungen“ bei der Fa. ZF Friedrichshafen AG. Die Prüfräder der Verzahnungsvariante I sowie die restlichen Prüfräder der Verzahnungsvarianten II und III des Versuchspakets „Variation der Prüfbedingungen“ und „Überprüfung der Eignung“ wurden an der Forschungsstelle bearbeitet. Angaben zu den an der Forschungsstelle verwendeten Schleifscheiben der Varianten I, II und III befinden sich im Anhang (s. Tabelle A.10-3). Für alle Prüfräder wurde eine Oberflächenrauheit von $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ vorgegeben.

6.2 Werkstoffe und Wärmebehandlungsvorgaben

Für die Untersuchungen zum Einfluss des Werkstoffs wurden drei Radsätze aus dem Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 durch die Fa. ZF Friedrichshafen AG bereitgestellt. Alle Prüfverzahnungen

aus 18CrNiMo7-6 wurden aus einer Werkstoffcharge gefertigt. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffcharge wurde an der Forschungsstelle im Rahmen der Eingangsdokumentation bezüglich der Vorgaben gemäß Stahlschlüssel [Weg16] überprüft. Die Ergebnisse der chemischen Analyse sowie die Vorgaben der Norm sind in Tabelle 6-3 für den hier verwendeten Werkstoff 18CrNiMo7-6 dargestellt. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 18CrNiMo7-6 liegt innerhalb des durch den Stahlschlüssel [Weg16] vorgegebenen Bereichs.

Tabelle 6-3: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 18CrNiMo7-6 laut chemischer Analyse der Forschungsstelle, Vorgaben Sollwerte nach Stahlschlüssel [Weg16]

18CrNiMo7-6 (1.6587)	chemische Zusammensetzung, Massenanteil in %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
Ist-Werte	0,180	0,152	0,554	0,010	0,011	1,589	0,250	1,468	0,024	0,108
Sollwerte nach [Weg16]	0,15 – 0,21	max. 0,40	0,50 – 0,90	max. 0,025	max. 0,035	1,50 – 1,80	0,25 – 0,35	1,40 – 1,70	-	-

Tabelle 6-4: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 16MnCr5 laut chemischer Analyse der Forschungsstelle, Vorgaben Sollwerte nach Stahlschlüssel [Weg16]

16MnCr5 (1.7131)	chemische Zusammensetzung, Massenanteil in %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu
Ist-Werte	0,150	0,226	1,068	0,009	0,023	1,029	0,051	0,205	0,028	0,254
Sollwerte nach [Weg16]	0,14 – 0,19	max. 0,40	1,00 – 1,30	max. 0,025	max. 0,035	0,8 – 1,1	-	-	-	-

Für den Großteil der experimentellen Untersuchungen (s. Tabelle 3-1) wurde der Einsatzstahl 16MnCr5 verwendet. Die Prüfräder aus 16MnCr5 konnten aufgrund des zeitlichen Ablaufs der experimentellen Arbeiten sowie fertigungstechnischen Gründen nicht aus einer Werkstoffcharge gefertigt werden. Die Untersuchungen der Versuchspakete „Untersuchung zum Werkstoffeinfluss“ und „Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest“ wurden vor der Bestellung der Prüfräder für die weiteren Untersuchungen durchgeführt, da auf Grundlage der Ergebnisse des Versuchspakets „Untersuchung zum Werkstoffeinfluss“ der Werkstoff für die weiteren experimentellen Untersuchungen festgelegt wurde. Alle Prüfverzahnungen aus 16MnCr5 für die Stichversuche zum Einfluss des Werkstoffs wurden aus einer Werkstoffcharge gefertigt. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffcharge wurde an der Forschungsstelle im Rahmen der Eingangsdokumentation nach den Vorgaben des Stahlschlüssels [Weg16] überprüft. Die Ergebnisse der chemischen Analyse sowie die Vorgaben der Norm sind in Tabelle 6-4 für den hier verwendeten Werkstoff 16MnCr5 dargestellt.

Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs 16MnCr5 liegt innerhalb des durch den Stahlschlüssel [Weg16] vorgegebenen Bereichs. Auf eine chemische Analyse der restlichen

Tabelle 6-5: Vorgaben für die Wärmebehandlung

Bezeichnung	Wert
Härteverfahren	Einsatzhärten
Randkohlenstoffgehalt	0,65 – 0,85 %
Einsatzhärtetiefe CHD _{soll} (mit Schleifaufmaß)	0,8 – 1,0 mm
Randhärte	60 – 63 HRC
Restaustenitgehalt 16MnCr5 (lichtoptisch)	≤ 30 %
Restaustenitgehalt 18CrNiMo7-6 (lichtoptisch)	≤ 20 %

Werkstoffchargen wurde aufgrund der großen Erfahrungswerte mit dieser Prüfverzahnung verzichtet.

Die Prüfräder wurden nach der Weichbearbeitung durch die Fa. ZF Friedrichsha-

fen AG nach aktuellem Stand der Technik einsatzgehärtet. In Tabelle 6-5 sind die Vorgaben für die Wärmebehandlung zusammengefasst.

6.3 Messverfahren zur Dokumentation der Prüfverzahnungen

Es erfolgte eine umfassende Dokumentation der einzelnen Prüfverzahnungen im Neuzustand. Die Dokumentation wurde an Ritzel und Rad durch Ermittlung der Verzahnungsqualität sowie

der Zahnflankenrauheit durchgeführt. Zudem wurden die Verzahnungen nach dem Zahnflankenschleifen einer Prüfung auf Schleifbrand mittels einer Barkhausenrausch-Analyse mit einem von Schwienbacher [Sch07] beschriebenen Rollscan-Gerät der Fa. Stresstech unterzogen. Die metallographischen Untersuchungen an den Prüfrädern erfolgten im fertig bearbeiteten Zustand.

6.3.1 Messung der Verzahnungsqualität

Zur Messung der Verzahnungsqualität wurden die Profilform- und Zahnflankenlinienabweichungen sowie Rundlauf und Teilungsabweichungen aller Prüfräder ermittelt. Die Messungen erfolgten nach dem Zahnflankenschleifen an jeweils allen Zähnen der Ritzel und an drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Zähnen der Räder auf einer 3D-Koordinatenmessmaschine vom Typ Klingenberg P40. Die Verzahnungsqualität nach DIN 3962 [DIN78a, DIN78b, DIN78c] wurde durch die gemessenen Abweichungen hinsichtlich Profilform, Zahnflankenlinie und Teilung bestimmt.

6.3.2 Messung der Oberflächentopographie

Die Oberflächentopographie aller verwendeten Verzahnungen wurde im Rahmen der Standarddokumentation nach dem zweidimensionalen, taktilen Tastschnittverfahren ermittelt.

Tabelle 6-6: Messbedingungen und -parameter (Oberflächenrauheit)

Parameter	Einstellung
Taster	TK 100
Tastergeometrie	$\gamma = 90^\circ$
Messstrecke Lt	4,8 mm
Grenzwellenlänge Lc	0,8 mm
Geschwindigkeit	0,5 mm/s
Punktichte	2000 P/mm
Vertikaler Messbereich	80 μm
Bezugsnorm	DIN EN ISO 11562
Software	TURBO WAVE V7.8

Die Vermessung der Oberflächentopographie wurde auf einem elektrischen Tastschnittgerät des Typs Hommel T8000 unter Einsatz eines phasenkorrekten Hochpassfilters nach DIN EN ISO 11562 [DIN97] durchgeführt. Es wurde an jedem Zahnrad an drei gleichmäßig über den Umfang verteilten Zähnen an der Links- und Rechtsflanke gemessen. Die Oberflächenrauheit wurde in Profilrichtung mittels

eines speziellen Kufentasters erfasst. Die Gleitkufe des Kufentasters befindet sich neben der Tastspitze. In Tabelle 6-6 sind die Messbedingungen und verwendeten Messparameter aufgeführt. Es erfolgte eine einheitliche Filterung des Messsignals mit einem Hochpassfilter der Grenzwellenlänge $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ zur Trennung der Oberflächenrauheit von längerwelligen Anteilen.

6.3.3 Metallographische Untersuchungen

Es wurden Querschliffe nach metallographischen Standardmethoden an einzelnen Zähnen der Prüfverzahnungen des Versuchspakets „Untersuchungen zum Werkstoffeinfluss“ angefertigt. Die angefertigten Querschliffe wurden mit alkoholischer Salpetersäure angeätzt, um die jeweiligen Randgefüge zur ermitteln. Zudem wurden an den Querschliffen Vickers-Härtemessungen im Kleinkraftbereich (HV1) nach DIN EN ISO 6507-1 [DIN06a] durchgeführt. Im Bereich des Wälzkreises sowie in der Zahnfußrundung im Bereich der 30° -Tangente wurden die Härtetiefenverläufe ermittelt.

6.4 Dokumentation der Verzahnungsqualität

Im Rahmen der Eingangsdokumentation wurden alle Prüfräder zur Kontrolle der Verzahnungsqualität, wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben, hinsichtlich ihrer Zahnflankenform und Teilung

vermessen. Die geforderte Verzahnungsqualität lag bei $Q \leq 5$ nach DIN 3962 [DIN78a, DIN78b, DIN78c]. In Bild 6-1 ist jeweils ein exemplarischer Messschrieb in Profilrichtung der Zahnflankenform der C-GF-Verzahnung und der Verzahnungsvariante I dargestellt. Der Betrag der Kopfkantenabrundung für die Verzahnungsvariante I am Ritzel lag zwischen 29 und 36 μm und beim Rad zwischen 58 und 66 μm . Für ein Rad der Variante I lag der Betrag der Kopfkantenabrundung bei 73 bzw. 77 μm .

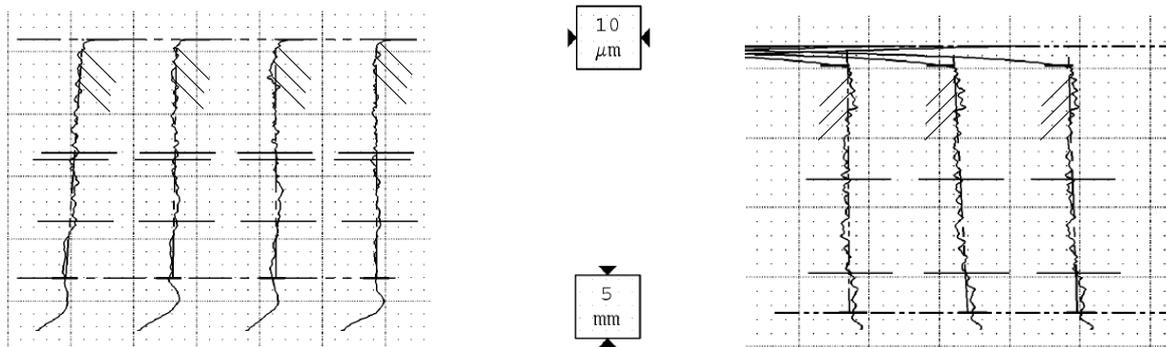


Bild 6-1: Exemplarischer Ausschnitt eines Messschriebs Messung in Profilrichtung eines Prüfritzels der C-GF-Verzahnung (links) und eines Prüfrades der Variante I (rechts)

In Bild 6-2 ist jeweils ein exemplarischer Messschrieb in Profilrichtung der Zahnflankenform der Verzahnungsvariante II und der Verzahnungsvariante III dargestellt. Exemplarische Messschriebe in Flankenrichtung der Zahnflankenform der C-GF-Verzahnung sowie der Verzahnungsvarianten I, II und III sind dem Anhang zu entnehmen. Die Beträge der Kopfrücknahme der Variante III lagen bei $30 \pm 2 \mu\text{m}$ für das Ritzel und bei $35 \pm 7 \mu\text{m}$ für das Rad.

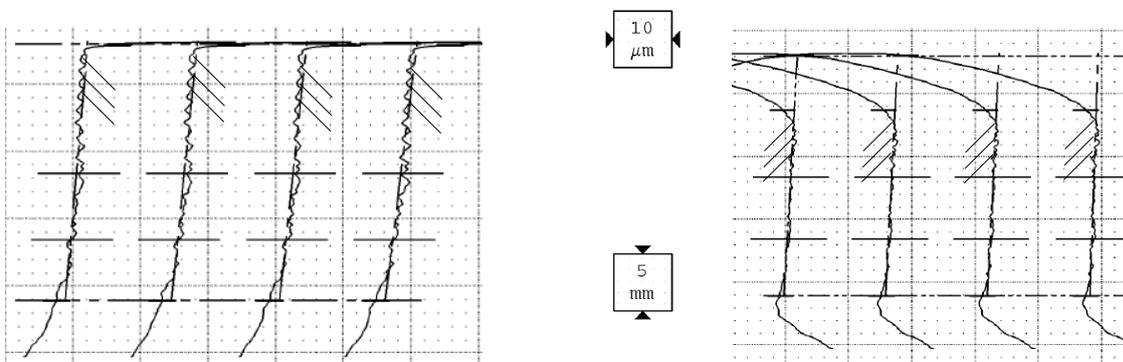


Bild 6-2: Exemplarischer Ausschnitt eines Messschriebs Messung in Profilrichtung eines Prüfrades der Variante II (links) und Prüfritzels der Variante III (rechts)

In Bild 6-3 sind exemplarische Messschriebe der Zahnflankenform eines Prüfritzels der Verzahnungsvariante IV dargestellt. Bei der Variante IV lagen die Beträge der Kopfrücknahme bei $40 \pm 3 \mu\text{m}$ für Ritzel und Rad. Die Verzahnungsqualitäten der Messungen bewegen sich für alle Prüfräder mit wenigen Ausnahmen im geforderten Qualitätsbereich $Q \leq 5$. Die Prüfräder, welche nicht im geforderten Qualitätsbereich lagen, wurden für Sonderuntersuchungen, wie z.B. zerstörende Werkstoffanalyse verwendet.

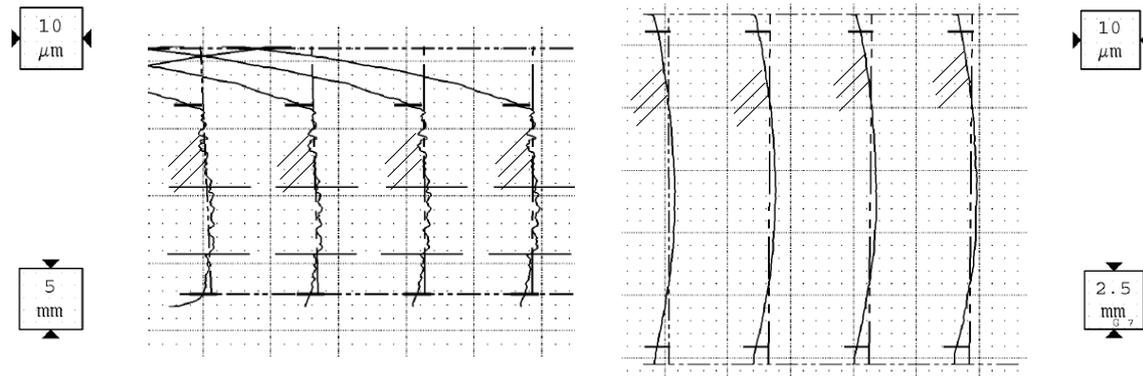


Bild 6-3: Exemplarischer Ausschnitt eines Messschriebs eines Prüfritzels der Variante IV (Links: Messung in Profilrichtung, Rechts: Messung in Zahnflankenrichtung)

6.5 Dokumentation der Oberflächentopographie

An allen Verzahnungen wurde die Zahnflankenrauheit im Neuzustand gemessen. Die Vermessung für alle Verzahnungen erfolgte unter Verwendung des in Abschnitt 6.3.2 beschriebenen Messsystems Hommel T8000. Über den Umfang verteilt wurden jeweils drei Zähne vermessen und der Mittelwert dokumentiert. Die Tabelle 6-7 zeigt die minimalen Werte, maximalen Werte und Mittelwerte der typischen Rauheitskenngrößen Arithmetischer Mittenrauhwert Ra, Gemittelte Rautiefe Rz und Reduzierte Spitzenhöhe Rpk der profilgeschliffenen Varianten im Vergleich zu den Varianten, welche mit dem MAAG-0° Glattschliff hartfein bearbeitet wurden. Es ist zu sehen, dass bei gleichen Ra-Werten, die Rz-Werte nur geringfügig abweichen und die Rpk-Werte im Mittel bei den Varianten mit MAAG-0° Glattschliff tendenziell etwas höher liegen.

Tabelle 6-7: Vergleich der Rauheitswerte für MAAG-0° Glattschliff und Profilschleifverfahren

	Ra in µm		Rz in µm		Rpk in µm	
	MAAG-0° Glattschliff	Profilschleifen	MAAG-0° Glattschliff	Profilschleifen	MAAG-0° Glattschliff	Profilschleifen
Mittelwert	0,52	0,51	3,65	3,48	0,64	0,53
Minimum	0,48	0,45	3,34	2,94	0,52	0,39
Maximum	0,53	0,55	3,93	4,13	0,85	0,82

Für die Prüfverzahnungen lag die Vorgabe hinsichtlich der Zahnflankenrauheit bei $Ra = 0,50 \pm 0,10 \mu\text{m}$. Die Ra-Werte der einzelnen Prüfverzahnungen sind bei den Versuchsergebnissen (s. Abschnitt 7) angegeben.

In Bild 6-4 ist exemplarisch der Zahnflankenschrieb eines Prüfritzels, in Bild 6-5 der eines Prüfrades dargestellt. Wie aus den dokumentierten Zahnflankenschrieben zu erkennen ist, konnte die Zahnflankenrauheit innerhalb der Toleranz erfolgreich eingestellt werden und in Messungen reproduzierbar dokumentiert werden. Insgesamt entsprachen die gemessenen Oberflächenrauheiten den Erwartungen und zeigten nur geringe Abweichungen von den Sollvorgaben.

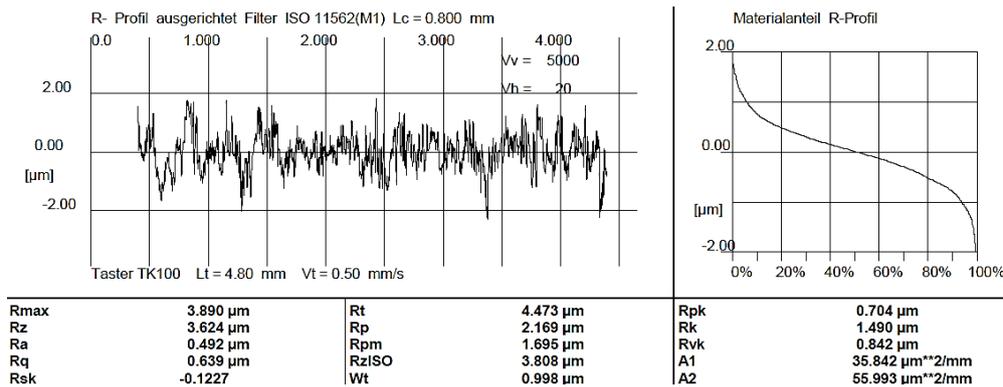


Bild 6-4: Exemplarischer Rauheitsmessschrieb eines Prüfritzels

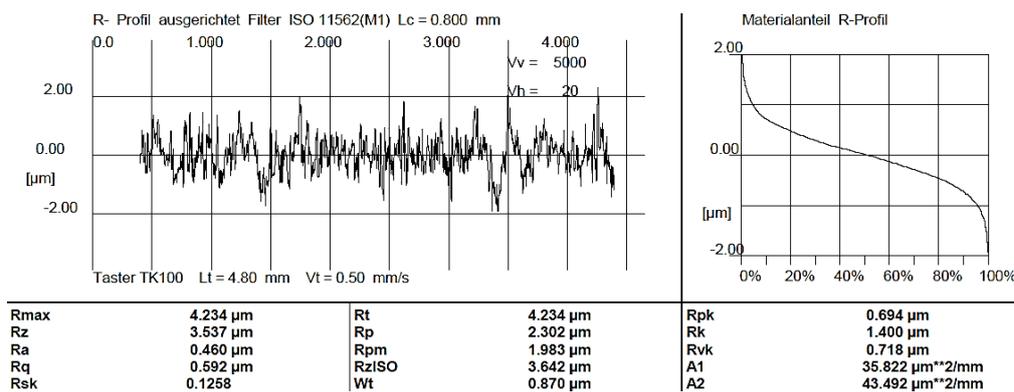


Bild 6-5: Exemplarischer Rauheitsmessschrieb eines Prüfrads

6.6 Dokumentation des metallographischen Gefügestands

Die Dokumentation des metallographischen Gefügestands wurde exemplarisch an einer nicht gelaufenen Zahnflanke und im Kern für jeweils eines Zahnrades für die Werkstoffe 18CrNiMo7-6 und 16MnCr5 ermittelt.

In Bild 6-6 ist ein nitalgeätztes Schlibfbild einer ungelauten Zahnflanke in der Übersicht für den Werkstoff 18CrNiMo7-6 dargestellt. Eine Detailaufnahme des Randbereichs zeigt Bild 6-7. Im Randbereich zeigt sich martensitisches Gefüge mit sichtbarem Restaustenit.



Bild 6-6: Schlibfbild des Randgefüges, Übersicht (18CrNiMo7-6), Maßstab = 500 µm

Bild 6-7: Schlibfbild des Randgefüges, Detail (18CrNiMo7-6), Maßstab = 50 µm

Bild 6-8 und Bild 6-9 zeigen nitalgeätzte Schlibfbilder des Kerngefüges in einer Übersichts- und einer Detailaufnahme des Werkstoffs 18CrNiMo7-6. Im Kern ist ein martensitisches Gefüge erkennbar, zusätzlich zeigt sich Bainit. Das Gefüge ist insgesamt sehr feinkörnig ausgeprägt. Auf Basis der metallographischen Untersuchungen lässt sich feststellen, dass das Gefüge dem Stand der Technik für einsatzgehärtete Verzahnungen entspricht.



Bild 6-8: Schliffbild des Kerngefüges, Übersicht (18CrNiMo7-6), Maßstab = 200 µm



Bild 6-9: Schliffbild des Kerngefüges, Detail (18CrNiMo7-6), Maßstab = 50 µm

In Bild 6-10 ist ein nitalgeätztes Schliffbild einer ungelauften Zahnflanke für den Werkstoff 16MnCr5 in der Übersicht dargestellt. Eine Detailaufnahme des Randbereichs zeigt Bild 6-11. Im Randbereich zeigt sich martensitisches Gefüge mit sichtbarem Restaustenit. Das Gefüge ist gleichmäßig mit leichten Seigerungen.

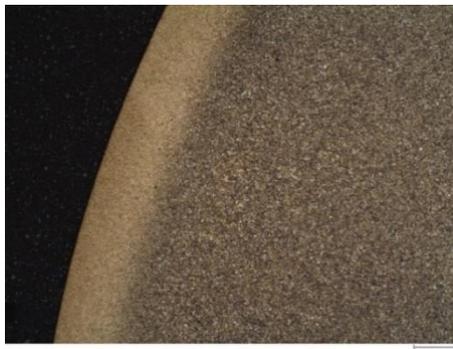


Bild 6-10: Schliffbild des Randgefüges, Übersicht (16MnCr5), Maßstab = 500 µm



Bild 6-11: Schliffbild des Randgefüges, Detail (16MnCr5), Maßstab = 50 µm

Bild 6-12 und Bild 6-13 zeigen nitalgeätzte Schliffbilder des Kerngefüges in der Übersichts- bzw. Detailaufnahme. Das Kerngefüge besteht aus einem martensitisch-bainitischen Gefüge. Auf Basis der metallographischen Untersuchungen lässt sich feststellen, dass das Gefüge dem Stand der Technik für einsatzgehärtete Verzahnungen entspricht.



Bild 6-12: Schliffbild des Kerngefüges, Übersicht (16MnCr5), Maßstab = 200 µm



Bild 6-13: Schliffbild des Kerngefüges, Detail (16MnCr5), Maßstab = 50 µm

An den angefertigten Querschliffen wurden, wie in Abschnitt 6.3.3 beschrieben, Vickers-Härtetemessungen durchgeführt. Bild 6-14 zeigt exemplarisch die gemessenen Härtetiefenverläufe an der Zahnflanke sowie im Zahnfuß eines exemplarisch ausgewählten Zahnrads jeweils für den Werkstoff 18CrNiMo7-6 und 16MnCr5.

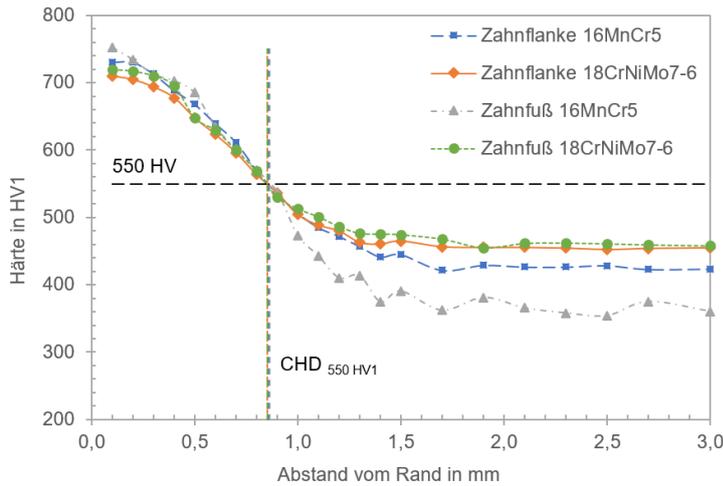


Bild 6-14: Messung der Härtetiefe an jeweils einem exemplarischen Zahnrad für 18CrNiMo7-6 und 16MnCr5

Tabelle 6-8 zeigt exemplarisch die Einsatzhärte-tiefen, Randhärten und Kernhärten für die Werkstoffe 18CrNiMo7-6 und 16MnCr5. Im Bereich der Zahnflanke liegen die metallographisch ermittelten Einsatzhärte-tiefen mit $CHD_{550HV1} \approx 0,85$ mm bzw. $CHD_{550HV1} \approx 0,86$ mm innerhalb der Zeichnungsvorgabe. Im Bereich des Zahnfußes wurde eine Einsatzhärte-tiefe von $CHD_{550HV1} \approx 0,85$ mm bzw. $0,86$ mm ermittelt. Die Zeichnungsvorgabe wurde damit sowohl an der Zahnflanke als auch

im Zahnfuß eingehalten. Die Härtetiefenverläufe entsprechen dem Stand der Technik für ein-satzgehärtete Verzahnungen aus den Werkstoffen 18CrNiMo7-6 und 16MnCr5.

Tabelle 6-8: Exemplarische Einsatzhärte-tiefen, Rand- und Kernhärten der Werkstoffe

Werkstoff	CHD _{550HV1} (Flanke)	CHD _{550HV1} (Fuß)	Randhärte (Flanke)	Kernhärte
18CrNiMo7-6	0,85 mm	0,85 mm	710 HV1	457 HV1
16MnCr5	0,86 mm	0,86 mm	731 HV1	354 HV1

6.7 Dokumentation der Schleifbrandprüfung

Neben der Vermessung hinsichtlich Rauheit und Zahnflankenform wurden die Prüfräder stichprobenartig hinsichtlich einer möglichen unerwünschten randnahen Gefügeveränderung durch die Schleifbearbeitung geprüft. Zu diesem Zweck wurden die Prüfräder nach dem Barkhausen-Verfahren auf einen möglichen negativen Einfluss durch Schleifbrand untersucht. In Bild 6-15

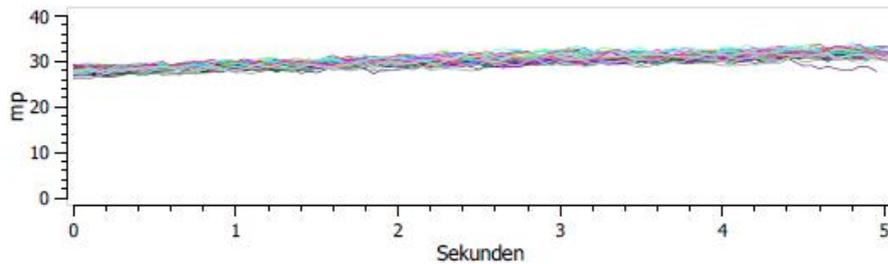


Bild 6-15: Exemplarischer Ausschnitt einer Messung des Barkhausenrauschens

ist exemplarisch das Barkhausenrausch-Signal der Zahnflan-ken eines Zahn-rads dargestellt. Eine Schädigung ist nach der hier vorliegen-den Kalibrierung ab einer Messamplitude von 50 MP (magneti-

scher Parameter) zu erwarten. Die Dokumentation wurde an allen Prüfrädern der Verzahnungsvarianten I, II, III und IV durchgeführt. An keinem Zahnrad zeigte sich eine Indikation für eine Beeinträchtigung durch Schleifbrand.

7 Versuchsergebnisse

Im Folgenden sind die experimentell ermittelten Versuchsergebnisse dargestellt. Die Versuchsdurchführung und Auswertung der dokumentierten Versuchsergebnisse entspricht den in Abschnitt 5 beschriebenen Prüfbedingungen und Auswertemethoden.

7.1 Untersuchungen zum Werkstoffeinfluss

Im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss des Werkstoffs wurden jeweils drei Graufleckentests (Stufentests) mit den Werkstoffen 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6 durchgeführt. Die Rauheitswerte der Prüfräder sind im Wesentlichen vergleichbar und der Tabelle 7-1 zu entnehmen.

Tabelle 7-1: Rauheitswerte der Prüfräder - Werkstoffeinfluss

Versuch	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
Werkstoff	18CrNiMo7-6	18CrNiMo7-6	18CrNiMo7-6	16MnCr5	16MnCr5	16MnCr5
Ra Ritzel in μm	0,48	0,50	0,52	0,51	0,53	0,55
Ra Rad in μm	0,50	0,44	0,56	0,53	0,51	0,57
Ra Paarung in μm	0,49	0,47	0,54	0,52	0,52	0,56

Die Verläufe der Profilformabweichungen sind für alle Versuche in Bild 7-1 aufgetragen.

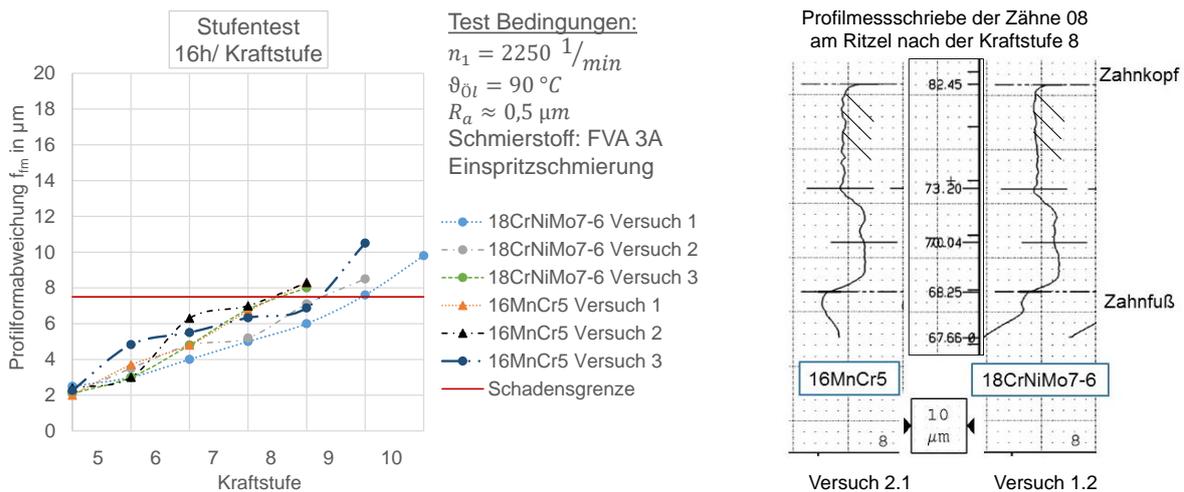


Bild 7-1: Profilformabweichungen für alle Versuche zum Werkstoffeinfluss (links) und exemplarische Profilmessschriebe (rechts) nach der Kraftstufe 8

Im nicht gelaufenem Zustand sind die üblichen fertigungsbedingten Abweichungen zu erkennen. Es zeigt sich nach der Kraftstufe 5 für alle Versuche eine beginnende Graufleckigkeit mit resultierenden Profilformabweichungen von ca. 3 bis 5 μm . Eine kontinuierliche Zunahme der Profilformabweichung über die restlichen Kraftstufen aller Varianten wird festgestellt. Nach der Kraftstufe 8 betragen die Profilformabweichungen zwischen 6 und ca. 8 μm . Die Abweichungen einzelner Versuchspunkte sind der experimentellen versuchsbedingten Streuung zuzuordnen. Alle Verläufe der Profilformabweichung zeigen eine vergleichbare Charakteristik. Bei der Betrachtung der Profilmessschriebe konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Versuchen festgestellt werden. In Bild 7-1 sind exemplarisch die Profilmessschriebe an einem Zahn für jeweils einen Versuch mit 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6 nach Durchlaufen der Kraftstufe 8 dargestellt. Die Auskolkung beginnt jeweils im Bereich des Eingriffsbeginns und wächst bis zum Wälzkreis. Die Graufleckenfläche und der Masseverlust sind in Bild 7-2 über die fortschreitende Kraftstufe aufgetragen. Die Werte sind für alle Verläufe weitgehend

vergleichbar. Nach der Kraftstufe 5 ist eine Graufleckenfläche von ungefähr 15 % für alle Versuche zu erkennen. Die Verläufe steigen für die folgenden Kraftstufen degressiv an und erreichen Endwerte zwischen 25 % und 50 %. Eine Ausnahme bildet der Versuch 3 mit 16MnCr5, bei welchem ab der Kraftstufe 8 ein Anstieg der Graufleckenfläche zu sehen ist. Dies lässt sich mit Versuchsstreuung begründen. Die Entwicklung der Graufleckenfläche ist dennoch für alle Verläufe sehr ähnlich. Der Masseverlust beträgt nach der ersten Kraftstufe 4 – 9 mg und steigt kontinuierlich auf 30 – 40 mg an. Die Verläufe zum Masseverlust zeigen eine vergleichbare Charakteristik. Nach der Kraftstufe 8 wurde eine ausgeprägte Graufleckigkeit mit einer geschlossenen Graufleckenfläche vom Zahnfuß bis zum Wälzkreis auf den Zahnflanken sichtbar. Dies ist exemplarisch für einen Zahn aus dem Versuch 1 mit 16MnCr5 sowie dem Versuch 1 mit 18CrNiMo7-6 in Bild 7-3 dargestellt.

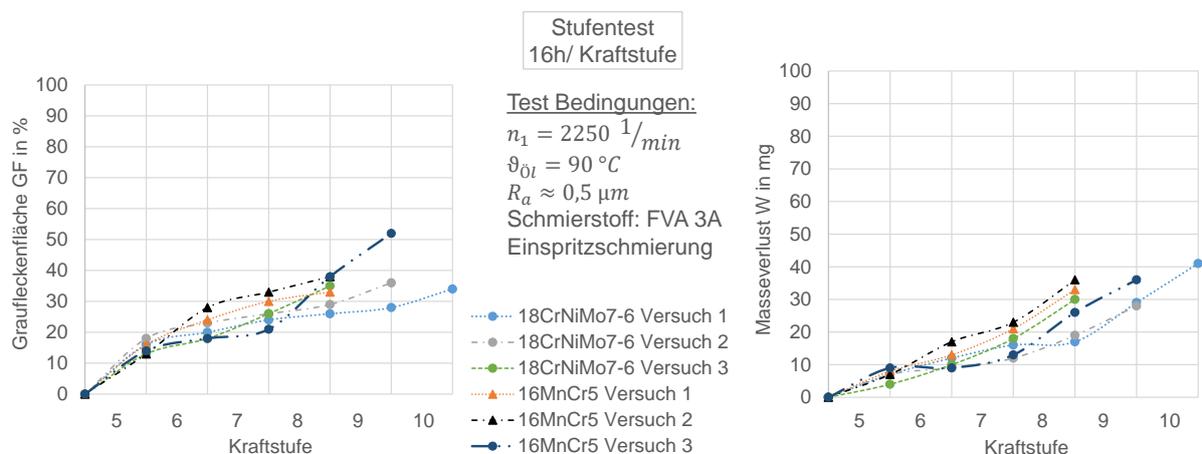


Bild 7-2: Graufleckenfläche und Masseverlust für alle Versuche zum Werkstoffeinfluss

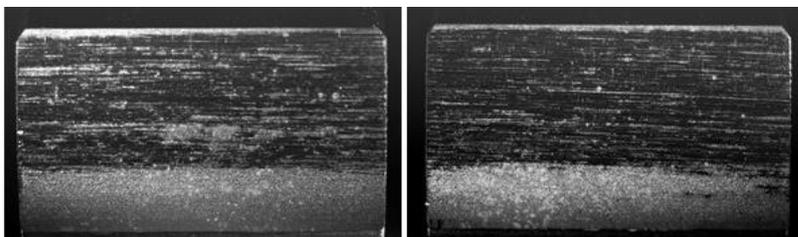


Bild 7-3: Zahnflankenfotos an exemplarischen Zähnen der Ritzel aus 16MnCr5 (links) und 18CrNiMo7-6 (rechts) nach der Kraftstufe 8

Für die Läufe mit dem Werkstoff 16MnCr5 ergaben sich vergleichbare Werte für die Profilformabweichung, die Graufleckenfläche und den Masseverlust. Das Ende des Stufentests wurde in zwei Fällen (2.1 und 2.2)

nach der Kraftstufe 8 und in einem Fall (2.3) nach der Kraftstufe 9 erreicht. Zusammen mit der Graufleckenfläche kann allen Versuchen mit 16MnCr5 die Graufleckenklasse „mittel“ zugeordnet werden.

Für die Stufentests mit dem Werkstoff 18CrNiMo7-6 wurden ähnliche Verläufe für die Profilformabweichung, die Graufleckenfläche und den Masseverlust ermittelt. In zwei der Prüfläufe mit dem Werkstoff 18CrNiMo7-6 (1.1 und 1.2) wurde die Schadenskraftstufe 9 erreicht. Der zweite Prüflauf mit dem gleichen Werkstoff zeigte nach der Kraftstufe 9 eine Profilformabweichung im Grenzbereich des Schadenskriteriums. Um weitere Informationen zu erhalten, wurde der Stufentest weitergeführt. Zusätzlich wurde die Auswertung der Profilformabweichung für alle Zähne durchgeführt. Die mittlere Profilformabweichung ergab einen Wert knapp über dem Schadenskriterium von $7,5 \mu\text{m}$. Bei der Durchführung des Versuches 1.3 wurde das Schadenskriterium nach Kraftstufe 8 erreicht. Bei Betrachtung der Graufleckenfläche und des Mas-

severluster wurde deutlich, dass alle Versuche der Graufleckenklasse "mittel" zugeordnet werden können. In Tabelle 7-2 ist die Einordnung aller Versuche in die Tragfähigkeitsklassen sowie die erreichten Schadenskraftstufen zusammengefasst.

Tabelle 7-2: Einordnung in die GF-Klassen - Werkstoffeinfluss

Versuch	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3
Werkstoff	18CrNiMo7-6	18CrNiMo7-6	18CrNiMo7-6	16MnCr5	16MnCr5	16MnCr5
SKS	9	9	8	8	8	9
GF-Klasse	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel

7.2 Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest

Für die experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest auf das Testergebnis wurden jeweils zwei Stufentests mit zwei Praxisschmierstoffen durchgeführt. Die Grunddaten der verwendeten Praxisschmierstoffe A und B sind in Tabelle 5-4 aufgetragen. Es wurden für alle Versuche unabhängig vom Erreichen des Schadenskriteriums die Kraftstufen 5 bis 12 durchlaufen. Die Drehmomente der erweiterten Kraftstufen 11 und 12 können dem Abschnitt 5.3.1 entnommen werden. Die Rauheitswerte der Prüfräder im Neuzustand sind grundsätzlich vergleichbar und der Tabelle 7-3 zu entnehmen.

Tabelle 7-3: Rauheitswerte der Prüfräder - Erweiterung Kraftstufen Stufentest

Versuch	3.1	3.2	4.1	4.2
Schmierstoff	Praxis B	Praxis B	Praxis A	Praxis A
Rauheit Ra Ritzel in μm	0,55	0,52	0,52	0,53
Rauheit Ra Rad in μm	0,53	0,48	0,49	0,53
Rauheit Ra Paarung in μm	0,54	0,50	0,51	0,53

Bild 7-4 zeigt die Verläufe der mittleren Profilformabweichungen für alle Versuche.

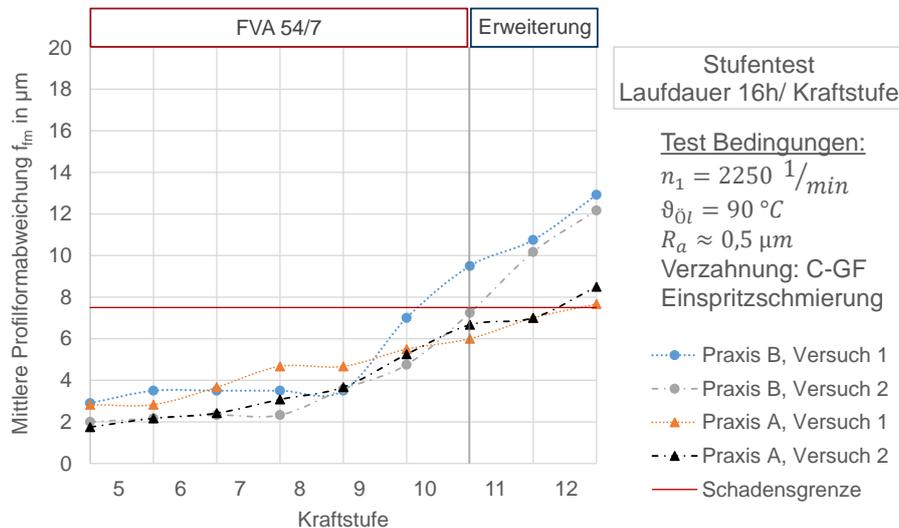


Bild 7-4: Profilformabweichung der Versuche zur Erweiterung Kraftstufen Stufentest

Im nicht gelaufenem Zustand sind die üblichen fertigungsbedingten Abweichungen zu erkennen. Es zeigt sich nach den Kraftstufen 5 bis 8 für alle Versuche eine sehr geringe Zunahme der Auskolkung. Die Profilformabweichungen nach der Kraftstufe 8 betragen für alle Versuche zwischen 3,5 und 5 μm . Ab der Kraftstufe 9 macht sich ein Unterschied zwischen den beiden Schmierstoffen bemerkbar. Während die Profilformabweichungen unter Verwendung des Praxisschmierstoffs A nur sehr gering ansteigen, ist ein deutliches Wachsen der Auskolkung bei Nutzung des Praxisschmierstoffs B zu erkennen. Nach der Kraftstufe 10 weist der Schmierstoff B im Versuch 1 eine Profilformabweichung von 9,5 μm und im Versuch 2 eine Profilfor-

mabweichung von 7,3 μm auf. Diese Werte liegen über bzw. knapp unter dem Schadenskriterium von 7,5 μm für den Stufentest. Nach der Kraftstufe 11 wird das Schadenskriterium für den Versuch 2 überschritten. Der Schmierstoff B erreicht somit im Rahmen dieser Versuche einmal Schadenskraftstufe 10 und einmal Schadenskraftstufe 11. Die etwas höhere Zahnflankenrauheit zu Versuchsbeginn in Versuchslauf 3.1 ist hierbei zu beachten.

Unter Verwendung des Schmierstoff A liegen nach der Kraftstufe 10 die Werte der mittleren Profilformabweichung bei 6,0 und 6,7 μm . Es zeigt sich nach den Kraftstufen 11 und 12 ein sehr geringer Anstieg der Profilformabweichungen. Das Schadenskriterium wird für beide Versuche nach der Kraftstufe 12 überschritten. Die Werte liegen hierbei bei 7,7 und 8,5 μm . Somit kann dem Praxisschmierstoff A die Schadenskraftstufe 12 für beide Versuchsläufe in diesem Versuchspaket zugeordnet werden.

Der Anstieg der Graufleckenfläche über die Kraftstufen ist für beide Schmierstoffe innerhalb dieser Untersuchungen gering und die Schmierstoffe lassen sich daher in die „GFT-hoch“ einordnen. Beide Versuche mit diesem Schmierstoff A weisen nach der Kraftstufe 12 eine Graufleckenfläche von ungefähr 12 % auf. Die Versuche mit dem Schmierstoff B zeigen nach der Kraftstufe 12 eine Graufleckenfläche von 14-15 %. Die Entwicklung der Graufleckenfläche auf den Zahnflanken über den Versuchslauf ist im Anhang (s. Bild A.10-12) dargestellt.

Bei der Betrachtung der Zahnflanken wird bestätigt, dass die Graufleckenflächen für beide Schmierstoffe relativ gering sind. Bei den Untersuchungen mit dem Schmierstoff B ist eine zusammenhängende Fläche im Eingriffsbeginn zu erkennen. Unter Verwendung des Schmierstoffs A wird für beide Versuche eine Schabemarke sichtbar. Es zeigt sich zudem Graufleckigkeit, welche nicht in einem zusammenhängenden Bereich angeordnet ist. Dies ist exemplarisch für die Zahnflanken der Ritzel an jeweils einem exemplarischen Zahn nach der Kraftstufe 9 aus den Versuchen 3.2 und 4.2 in Bild 7-5 dargestellt.

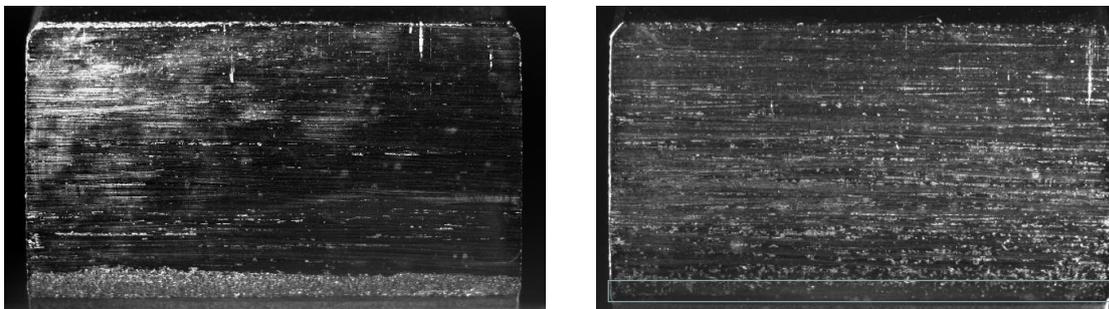


Bild 7-5: Exemplarische Zahnflanken der Ritzel nach KS 9 im Versuch mit Schmierstoff B (links) und Schmierstoff A (rechts)

Das Auftreten der Schabemarke kann exemplarisch für einen Zahn aus dem Versuch 4.2 in Bild 7-6 betrachtet werden. Diese ist durch den Vergleich des Zahnflankenfotos und des Profilmessschriebs erkennbar. Das exemplarische Flankenfoto zeigt die Zahnflanke nach Kraftstufe 9, wobei die Schabemarke bereits vollständig ausgeprägt ist. Im Profilmessschrieb ist die Schabemarke als spitz zulaufende Auskolkung messbar. In diesem Bereich zeigt sich auf der Zahnflanke kaum Graufleckigkeit.

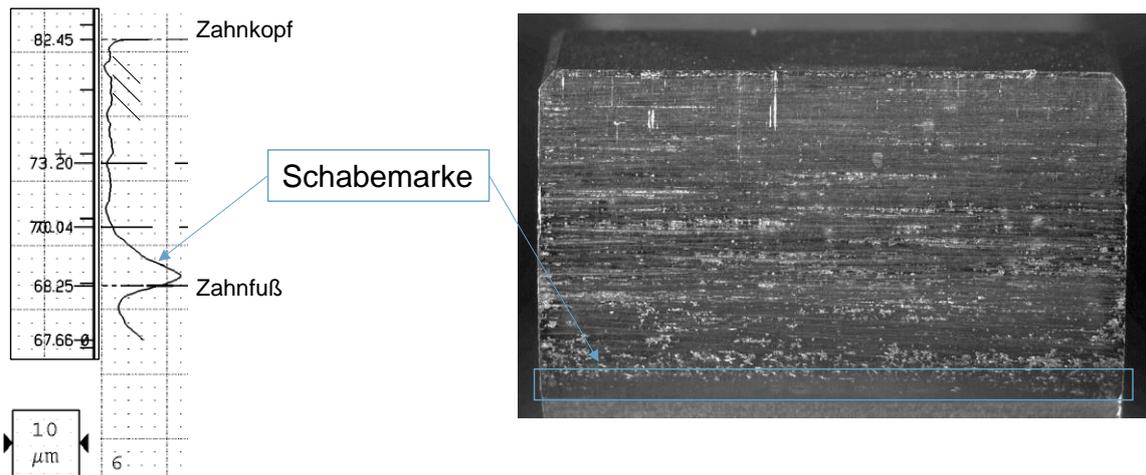


Bild 7-6: Darstellung der Schabemarke an einem exemplarischen Zahnflankenfoto nach einem Versuch mit dem Praxisschmierstoff A

Die für die Schabemarke typischen vertikalen Linien sind durch eine Vergrößerung im markierten Bereich in Bild 7-7 zu erkennen.

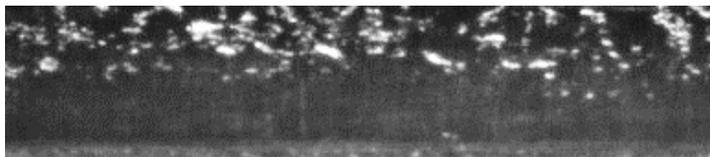


Bild 7-7: Vergrößerung der Schabemarke aus einem Versuch mit dem Praxisschmierstoff A

Die im Profilmessschrieb durch die Schabemarke auftretende erhöhte Abweichung wurde für die Bestimmung der Profilformabweichung durch Graufleckigkeit nicht berücksichtigt. Es

wurde lediglich die Profilformabweichung berücksichtigt, welche durch die Graufleckigkeit hervorgerufen wurde.

Der Masseverlust wurde über die Versuchsverläufe dokumentiert und ist im Anhang (s. Bild A.10-13) dargestellt. Dieser ist für die mit dem Schmierstoff A durchgeführten Versuche aufgrund der auftretenden Schabemarke etwas höher.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich für die durchgeführten Versuche zur Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest die „GFT-hoch“ ergibt. Die Streuung der Ergebnisse kann als gering betrachtet werden. Eine gegenüber dem Stufentest nach FVA 54/7 weitergehende Differenzierung der hochtragfähigen Schmierstoffe war in den durchgeführten Untersuchungen anhand der Kraftstufen 11 und 12 möglich. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 7-4 zusammengefasst.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse - Erweiterung Kraftstufen im Stufentest

Versuch	3.1	3.2	4.1	4.2
Schmierstoff	Praxis B	Praxis B	Praxis A	Praxis A
SKS (FVA 54/7)	10	> 10	> 10	> 10
GF-Klasse	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch
SKS (Erweiterung)	10	11	12	12

7.3 Variation der Prüfverzahnung

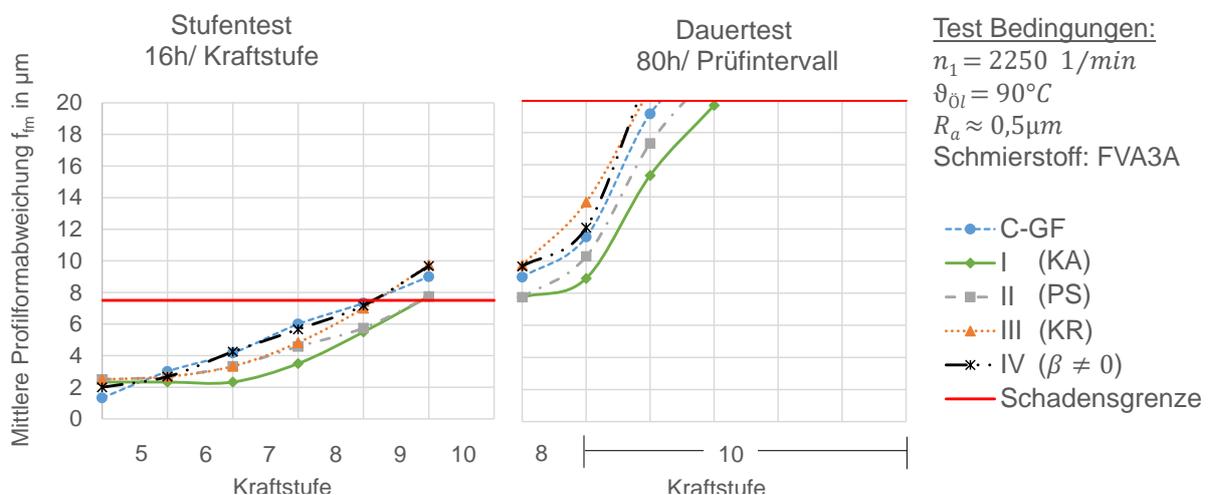
Es wurden jeweils ein Stufen- und ein Dauertest mit der C-GF-Verzahnung sowie den Prüfverzahnungen der Varianten I, II, III und IV durchgeführt. Die Geometriedaten der Verzahnungsvarianten sind in Tabelle 5-1 aufgetragen. Die Rauheitswerte der Prüfräder im Neuzustand sind weitgehend vergleichbar und der Tabelle 7-5 zu entnehmen.

Tabelle 7-5: Rauheitswerte der Prüfräder C-GF, Varianten I, II, III und IV

Versuch	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
Variante	C-GF	I	II	III	IV
Rauheit Ra Ritzel in μm	0,52	0,57	0,54	0,49	0,53
Rauheit Ra Rad in μm	0,53	0,58	0,51	0,49	0,47
Rauheit Ra Paarung in μm	0,53	0,58	0,53	0,49	0,50

Um bei der experimentellen Durchführung mit der Variante IV vergleichbare Verhältnisse zu generieren, wurden die Drehmomente der einzelnen Kraftstufen am Ritzel so angepasst, dass hinsichtlich Hertz'scher Pressung im Wälzpunkt und minimaler Schmierfilmdicke ähnliche Werte im Vergleich zur C-GF-Verzahnung vorlagen. Die verwendeten Drehmomente, resultierenden Hertz'schen Pressungen am Wälzpunkt und minimalen Schmierfilmdicken sind in Abschnitt 5.3.2 dargestellt.

Bild 7-4 zeigt die Verläufe der mittleren Profilformabweichungen für alle Versuche.

**Bild 7-8: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Versuch für die Varianten I, II, III und IV im Vergleich zur C-GF-Verzahnung**

Im nicht gelaufenem Zustand sind die üblichen fertigungsbedingten Abweichungen zu erkennen. Die Profilformabweichungen aller Varianten steigen über der Versuchsdauer kontinuierlich an und erreichen nach der Kraftstufe 9 im Stufentest jeweils Werte oberhalb des Schadenskriteriums von $7,5 \mu\text{m}$. Die mittleren Auskolkungen der Variante III, der Variante IV und der C-GF-Verzahnung liegen hierbei mit $9,8 \mu\text{m}$, $9,7 \mu\text{m}$ und $9,0 \mu\text{m}$ deutlich oberhalb der Schadensgrenze. Die Werte der Varianten I und II liegen mit jeweils $7,8 \mu\text{m}$ nahe am Schadenskriterium. Dennoch konnte für alle 4 Varianten die Schadenskraftstufe 9, welche dem Referenzschmierstoff FVA 3A zugeordnet wird, bestätigt werden. Im Dauertest wurde für alle Verläufe ebenfalls eine ähnliche Charakteristik festgestellt. Die C-GF-Verzahnung und die Variante II erreichten nach 160 Stunden Laufzeit in der Kraftstufe 10 mittlere Profilformabweichungen von $22,7 \mu\text{m}$ und $21,9 \mu\text{m}$. Da diese Werte oberhalb der Schadensgrenze von $20 \mu\text{m}$ liegen, wurden die Prüfläufe beendet. Die Variante I wies nach 160 Stunden Laufzeit in Kraftstufe 10 eine mittlere Profilformabweichung von $19,7 \mu\text{m}$ auf und lag damit sehr knapp unterhalb des Schadenskriteriums. Um den Test abzuschließen, wurde der Test mit 80 Stunden in KS 10 weitergeführt. Die Variante III fiel bereits nach 80 Stunden Laufzeit in Kraftstufe 10 aus. Hier lag die mittlere Profilformabweichung mit $20,8 \mu\text{m}$ sehr knapp über der Schadensgrenze. Die Variante IV fiel mit $21,8 \mu\text{m}$ ebenfalls nach einer Laufzeit von 80 Stunden in Kraftstufe 10 aus. Die mittlere Profilformabweichung lag hier ebenfalls nahe am Schadenskriterium. Obwohl nicht für alle Varianten die gleiche Laufzeit im Dauertest erreicht wurde, sind die Ergebnisse im Rahmen der üblichen Versuchsstreuung als vergleichbar zu bewerten. Um die

Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu verdeutlichen, sind die mittleren Profilformabweichungen der Varianten nach der Laufzeit im Dauertest in Tabelle 7-6 aufgetragen. Die leicht abweichenden Werte nach 80 und 160 Stunden in Kraftstufe 10 können der Versuchsstreuung zugeordnet werden.

Tabelle 7-6: Laufzeit und mittlere Profilformabweichungen im Dauertest (Variation der Prüfverzahnung)

Verzahnungsvariante	C-GF	Variante I	Variante II	Variante III	Variante IV
f _{fm} nach 80 h, KS 10	19,2 µm	15,3 µm	17,3 µm	20,8 µm	21,8 µm
f _{fm} nach 160 h, KS 10	22,7 µm	19,7 µm	21,9 µm	-	-
f _{fm} nach 240 h, KS 10	-	23,3 µm	-	-	-

In Bild 7-9 sind die Profilmessschriebe eines exemplarischen Zahns je Variante nach Ende des Dauertests dargestellt. An allen Varianten befinden sich die graufleckenbedingten Auskolkungen hauptsächlich unterhalb des Wälzkreises. Für die Varianten III und IV verschiebt sich das Maximum der Auskolkung aufgrund der Korrekturen etwas weiter weg vom Eingriffsbeginn in Richtung Wälzkreis. Besonders im Dauertest zeigen die Varianten III und IV sehr ähnliche Profilmessschriebe. Der Betrag der maximalen Auskolkung ist für alle Varianten vergleichbar. Im Dauertest war ab der Kraftstufe 10 die Ausbildung einer Schabemarke bei der Variante II zu sehen. Diese sowie die Profilmessschriebe der Varianten nach Ende des Stufentests sind im Anhang (s. Bild A.10-30 und Bild A.10-31) dokumentiert.

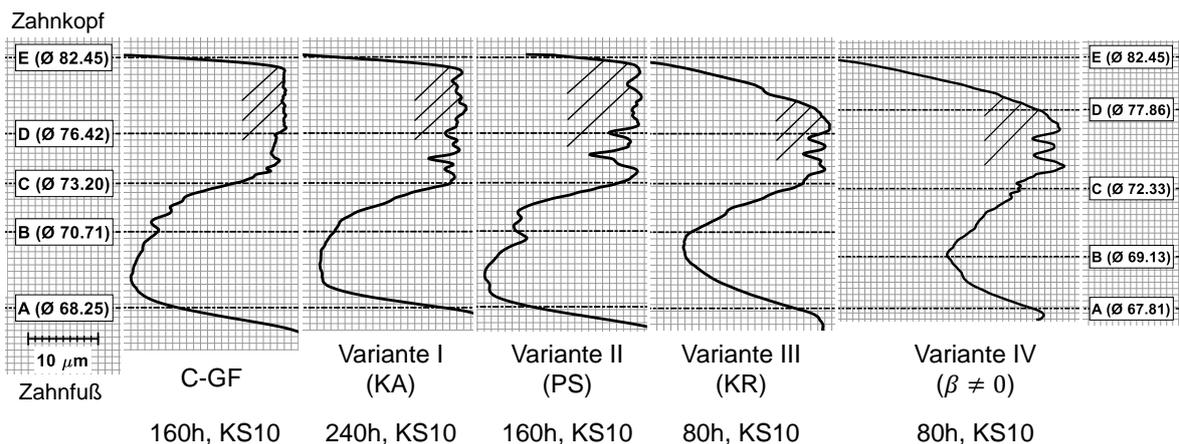


Bild 7-9: Exemplarische Profilmessschriebe der Varianten nach Testende

In Bild 7-10 ist der Anteil der mittleren Graufleckenfläche auf den Zahnflanken über dem Versuch zu sehen. Die Werte sind für alle Verläufe in Stufen- und Dauertest weitgehend vergleichbar. Ein etwas höherer Anteil der Graufleckenfläche ist bei der C-GF-Verzahnung im Stufentest zu erkennen. Hier liegt der mittlere Wert nach der Kraftstufe 9 bei 32 %. Im Vergleich dazu liegen die Werte der Varianten I, II, III und IV bei ca. 20 %. Die von Graufleckigkeit betroffene Fläche der Zahnflanken weist nach 160 Stunden in Kraftstufe 10 für alle geprüften Verzahnungen ca. 50 % auf. Die gemittelten Werte der Variante III liegen insbesondere im Dauertest sehr nah an den Werten der C-GF-Verzahnung. Die Variante IV ordnet sich in die Verläufe der restlichen Varianten ein und erreicht nach 80 Stunden in der Kraftstufe 10 eine mittlere Graufleckenfläche von fast 40 %.

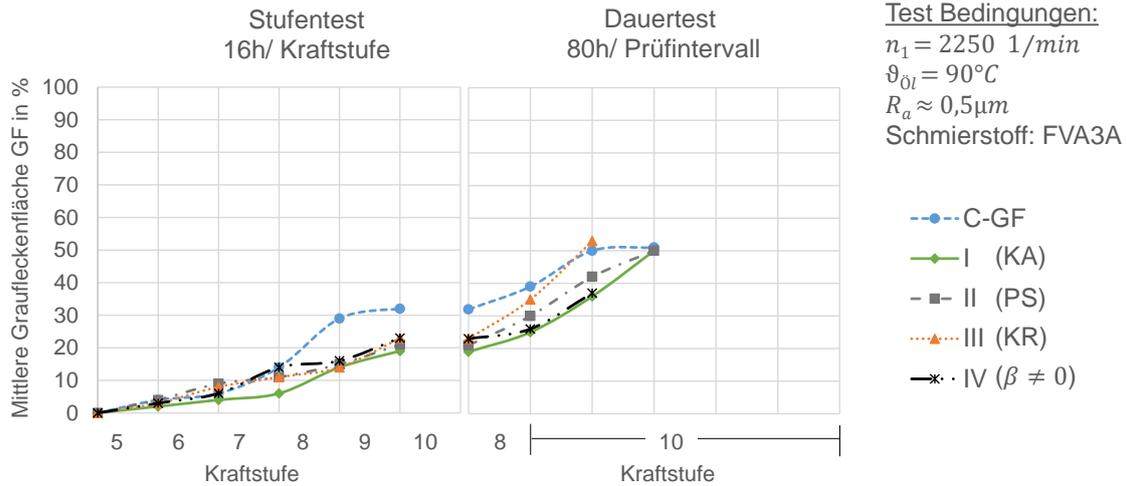


Bild 7-10: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche der Varianten I, II, III und IV im Vergleich zur C-GF-Verzahnung

Die Zahnflankenbilder der Prüfverzahnungen sind nach der Kraftstufe 9 (Ende des Stufentests) in Bild 7-11 und nach dem Versuchsende in Bild 7-12 dargestellt. Es ist zu sehen, dass der optische Eindruck der Zahnflanken weitgehend vergleichbar ausfällt.

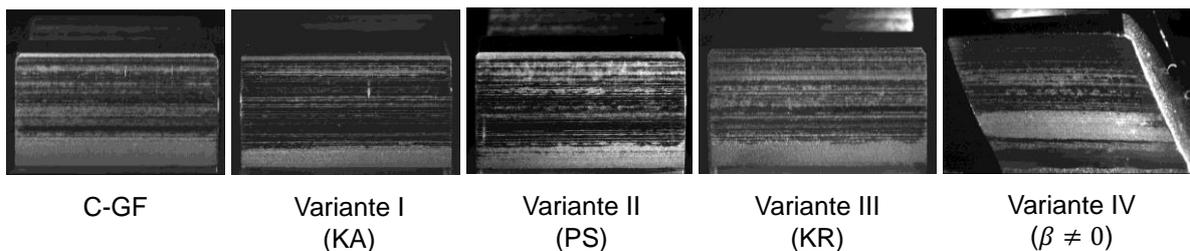


Bild 7-11: Exemplarische Zahnflanken der Ritzel nach Ende des Stufentests

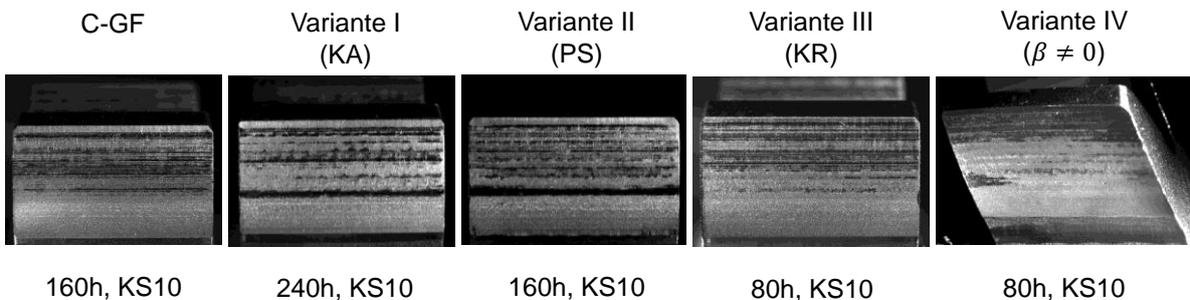


Bild 7-12: Exemplarische Zahnflanken der Ritzel nach Ende des Dauertests

Der Verlust der Masse am Ritzel ist für alle Varianten in Bild 7-13 dargestellt. Der charakteristische Verlauf im Stufentest ist für alle Verzahnungen vergleichbar, der Masseverlust liegt nach der Kraftstufe 9 bei ungefähr 20 mg. Die Werte für die Variante IV liegen etwas über den Werten im Stufen- und Dauertest der restlichen Varianten, da hier durch die Montage Abplatzungen entstanden sind. Eine durch die Montage bedingte Abplatzung ist in Bild 7-14 dargestellt. Auch der Anstieg des Masseverlusts im Dauertest ist für die Varianten II und III mit der C-GF-Verzahnung vergleichbar. Für die Variante I ist der Masseverlust nach 160 Stunden Laufzeit in Kraftstufe 10 mit 75 mg etwas geringer. Es zeigt sich auch im Dauertest ein vergleichbarer charakteristischer Verlauf für alle Versuche.

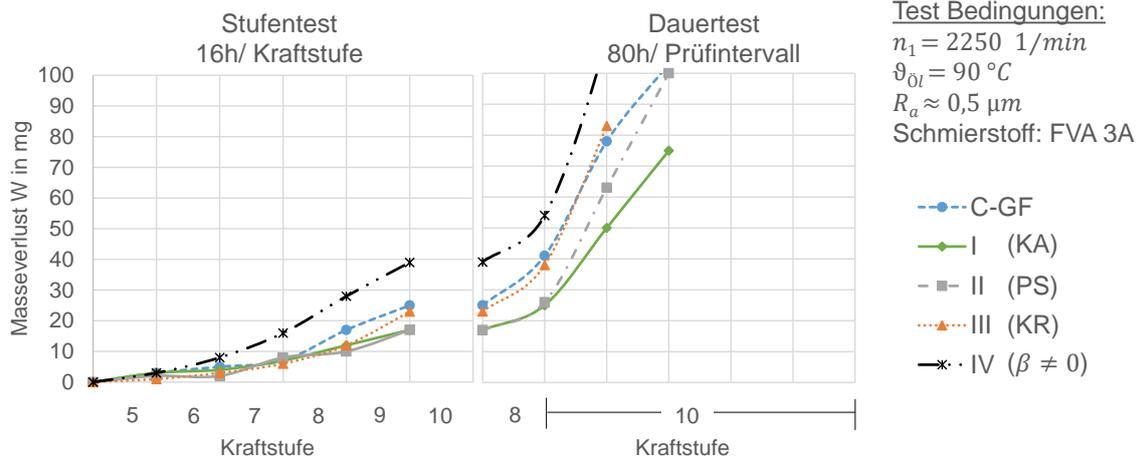


Bild 7-13: Verläufe des Masseverlusts der Varianten I, II, III und IV im Vergleich zur C-GF-Verzahnung

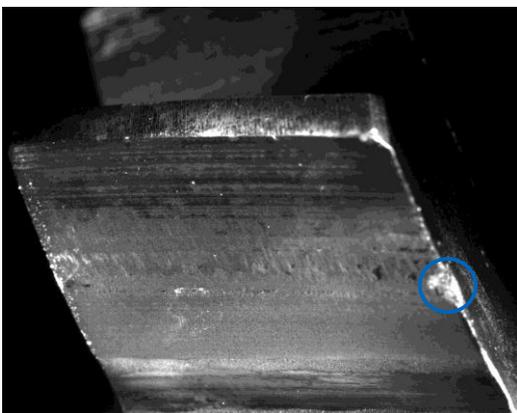


Bild 7-14: Ablatzung der Variante IV

Unter Verwendung der praxisnahen Varianten I, II, III und IV konnte dem Referenzschmierstoff FVA 3A die Schadenskraftstufe 9 zugeordnet werden. Die Werte der mittleren Profilformabweichung, der mittleren Graufleckenfläche und des Masseverlusts liegen für alle Verzahnungen im Stufentest im üblichen Wertebereich der „GFT mittel“. Es wurden Laufzeiten im Dauertest von 80 h bis 240 h von den möglichen 400 h in Kraftstufe 10 erreicht. Die Verläufe der Profilformabweichung, Graufleckenfläche und Masseverlust zeigten für alle Vari-

anten eine ähnliche Charakteristik. Anhand der Schadensentwicklung und Laufzeit im Dauertest kann die Einteilung in die „GFT-mittel“ bestätigt werden. Die mit unterschiedlichen Prüfverzahnungen ermittelten Testergebnisse sind in Tabelle 7-7 zusammengefasst.

Tabelle 7-7: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse - Variation der Prüfverzahnung

Versuch	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
Variante	C-GF	I	II	III	IV
SKS	9	9	9	9	9
GFT-Klasse	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel

7.4 Variation der Prüfbedingungen

Im Rahmen des Versuchspakets „Variation der Prüfbedingungen“ wurde untersucht, ob der Einlauf im Dauertest, welcher nach FVA 54/7 aus 80 Stunden in Kraftstufe 8 besteht, insbesondere im Hinblick auf einen alleinstehenden Dauertest verkürzt werden kann. Zudem wurden in diesem Versuchspaket durch Variation der Prüftemperatur und der Ritzeldrehzahl zwei Anwendungsfälle abgebildet. Es wurde zusätzlich untersucht, ob das Entstehen einer Schabemarke am Ritzel durch Umkehr der Treibrichtung unter Verwendung der C-GF-Verzahnung vermieden werden kann. Anhand dieser Untersuchungen wurde auch ein möglicher Einfluss durch Änderung der Treibrichtung auf das Ergebnis im Graufleckentest analysiert. Der Einfluss der Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest auf das Ergebnis im Dauertest wurde ebenfalls in diesem Versuchspaket betrachtet.

7.4.1 Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest

In diesem Versuchspaket wurden Dauertests mit unterschiedlich langen Laufzeiten in der Kraftstufe 8 durchgeführt. Es wurde die Schadensentwicklung in der Kraftstufe 8 in kurzen Abschnitten betrachtet mit dem Ziel, eine Laufzeit in der Kraftstufe 8 zu definieren, ab welcher sich die Schadenskenngößen und gemittelten Rauheitswerte nicht mehr verändern. Zusätzlich wurde der Einlaufgrad ε_R betrachtet. Die Zielgröße für den Einlaufgrad wurde mit $\varepsilon_R < 0,8$ nach den Untersuchungen von Emmert [Emm93] festgelegt.

Zudem wurde der Einfluss der Laufzeit im Einlauf auf die Schadensentwicklung in der Kraftstufe 10 betrachtet. Für alle durchgeführten Tests wurden Verzahnungen im Neuzustand verwendet.

In einem ersten Schritt wurde ein Einstufentest (Test B) mit dem Schmierstoff FVA 3A in der Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen mit Prüfrädern im Neuzustand durchgeführt. Die erste Messung der Rauheit und Schadenskenngößen erfolgte nach einer Laufzeit von 16 Stunden. Es zeigte sich, dass nach dieser Laufzeit schon deutlich Graufleckenbildung ($GF = 30\%$) vorlag und die Zahnflankenrauheit durch den Einlauf gesunken war. Der Einlaufgrad lag in diesem Versuch bei $\varepsilon_R = 0,61$. Die Messungen nach weiteren 16 Stunden in Kraftstufe 8 ergaben, dass sich weder die Rauheit noch die Schadenskenngößen signifikant verändert hatten. Bild 7-15 zeigt die gemessenen Schadenskenngößen und Rauheit nach 16 und 32 Stunden Laufzeit in Kraftstufe 8. Auf Grundlage der Versuchsergebnisse ist davon auszugehen, dass eine Laufzeit von unter 16 Stunden für einen Einlauf ausreichend ist.

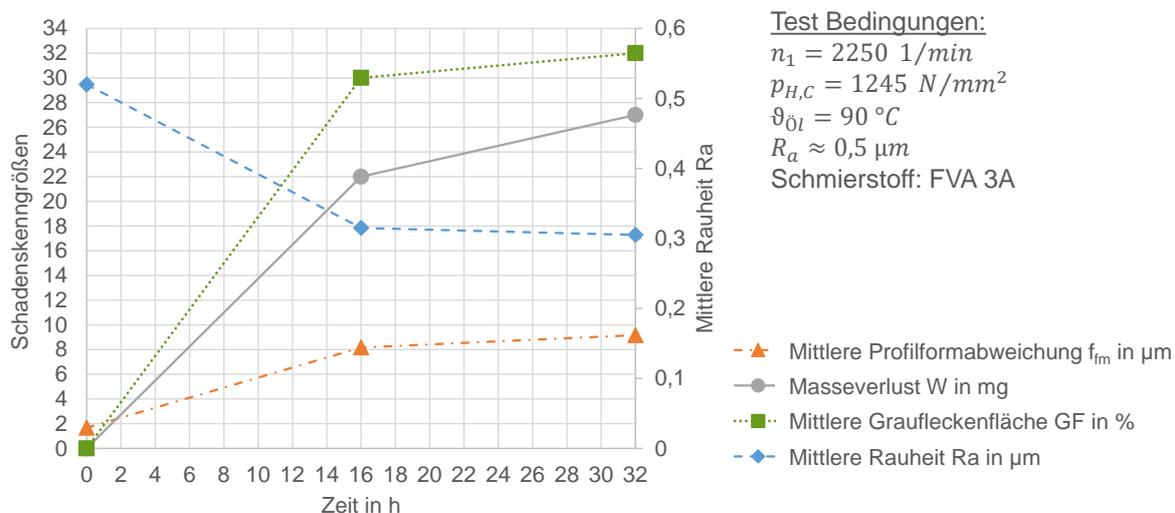


Bild 7-15: Messung der Schadenskenngößen und Rauheit nach 16 und 32 Stunden in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen (Test B)

Um die beobachteten Versuchsergebnisse zu bestätigen und zu untersuchen, wie sich die Rauheit und Schadenskenngößen während den ersten 16 Stunden in der Kraftstufe 8 verhalten, wurden weitere experimentelle Untersuchungen durchgeführt. In einem weiteren Versuch (Test D) wurden die Mittelwerte der Rauheit, der Profilformabweichung, der Graufleckenfläche und des Masseverlusts am Ritzel bei Verwendung des hochtragfähigen Praxischmierstoffs A nach jeweils einer Stunde Laufzeit in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen gemessen (s. Bild 7-16). Es zeigte sich, dass die Rauheit nach einer Stunde deutlich abnimmt und über die restliche Laufzeit auf dem gleichen Niveau bleibt. Nach einer Stunde zeigt sich eine leichte Graufleckenbildung. Der Einlaufgrad nach einer Stunde betrug $\varepsilon_R = 0,74$. Im weiteren Verlauf wurde deutlich, dass sich für einzelne Kenngößen bereits ab 2 h und für alle Kenngößen spätestens ab 9 h eine Stabilisierung der Schadenskenngößen einstellt.

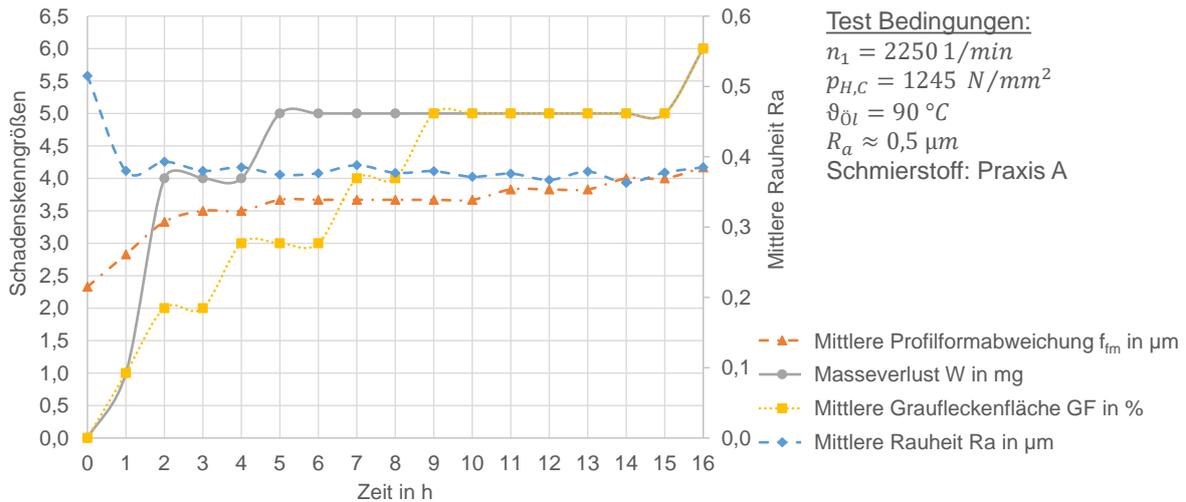


Bild 7-16: Messung der Schadenskenngößen und Rauheit nach jeweils einer Stunde in Kraftstufe 8 mit Gesamtlaufzeit 16 Stunden (Test D)

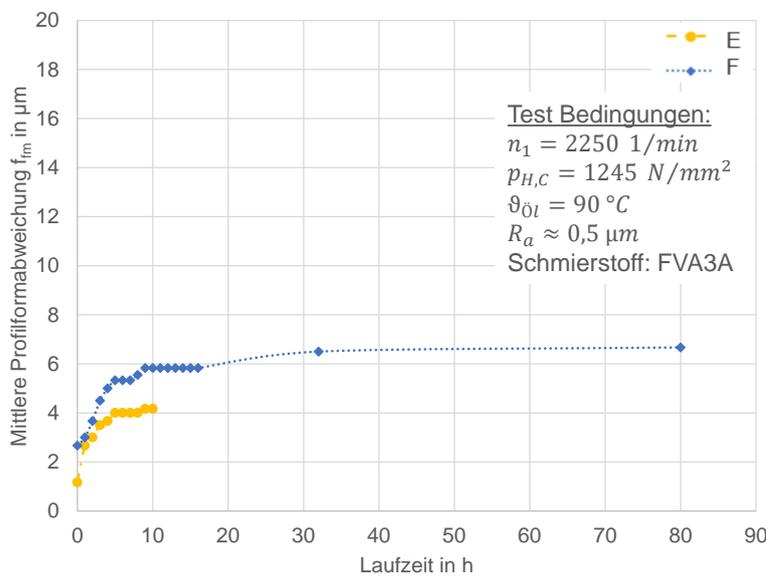


Bild 7-17: Verläufe der mittleren Profilformabweichung in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen (Test E und Test F)

Es wurden zwei weitere Versuche (E und F) mit dem Schmierstoff FVA 3A in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen durchgeführt. Bild 7-17 zeigt die mittlere Profilformabweichung über der Laufzeit. Es ist zu sehen, dass sich nach einer Stunde Laufzeit in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen geringe Graufleckigkeit ausbildet. Die Graufleckigkeit steigt über die Versuchszeit kaum an und führt zu sehr geringen Auskolkungen. Eine derartig geringe

Graufleckigkeit wurde bei Emmert [Emm93] als Einlaufgraufleckigkeit bezeichnet. Nach einer Laufzeit zwischen 10 – 16 Stunden stabilisieren sich die mittlere Profilformabweichung. Der Anstieg während der restlichen 64 Stunden Laufzeit ist für die mittlere Profilformabweichung sehr gering. Die Entwicklung der Verläufe der mittlere Graufleckenfläche und des Masseverlusts über der Laufzeit erfolgen äquivalente zur mittleren Profilformabweichung und sind im Anhang (Bild A.10-14 und Bild A.10-15) dargestellt.

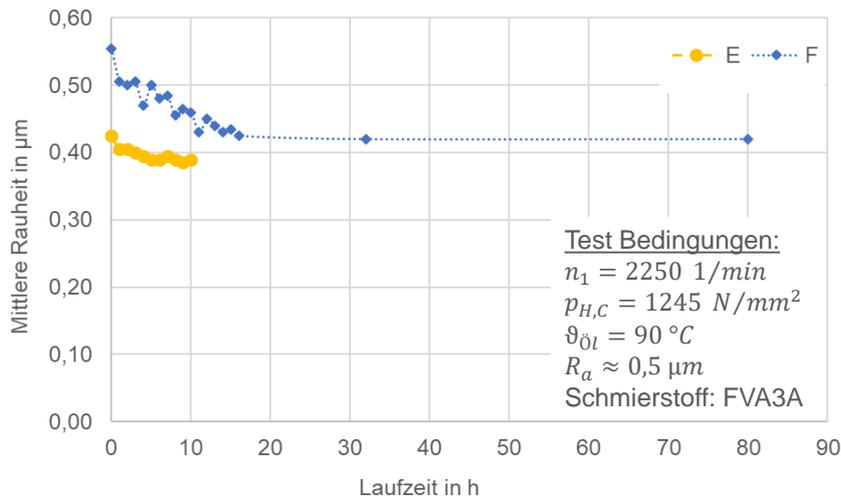


Bild 7-18: Verlauf der gemittelten Rauheit in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen (Prüflauf E und Prüflauf F)

Die Zahnflankenrauheit ist für die Versuche E und F in Bild 7-18 aufgetragen. Der Einlaufgrad nach einer Stunde Laufzeit lag für den Versuch E bei $\epsilon_R = 0,95$ und für den Versuch F bei $\epsilon_R = 0,91$. Im Prüflauf E ändert sich die Rauheit nur geringfügig nach einer Stunde in Kraftstufe 8 und bleibt für die restliche Laufzeit auf einem Niveau. Die

geringe Änderung der Rauheit ist mit der bereits geringen Zahnflankenrauheit im Neuzustand zu begründen. Über den ganzen Versuch vergleichend betrachtet, ändert sich die Rauheit im Prüflauf F deutlicher nach einer Stunde Laufzeit in Kraftstufe 8, geringfügig bei einer Laufzeit von 10 – 16 Stunden und bleibt für die restliche Laufzeit auf dem gleichen Niveau. Der gewünschte Einlaufgrad von $\epsilon_R < 0,8$ wird nach einer Laufzeit von 11 Stunden erreicht. Nach den hier vorliegenden Versuchen ist analog zu den vorherigen Prüfläufen festzuhalten, dass sich ab einer Laufzeit von 10 – 16 Stunden in der Kraftstufe 8 die Rauheit und die Schadens Kenngrößen kaum mehr verändern.

Tabelle 7-8 zeigt den Einlaufgrad der gezeigten Prüfläufe sowie für einen weiteren Prüflauf C. Es ist zu sehen, dass für die Prüfläufe B, C, D und F ein Einlaufgrad $\epsilon_R < 0,8$ innerhalb einer Laufzeit < 16 h in der Kraftstufe 8 erreicht wurde. Der Prüflauf E wurde nach 10 Stunden Laufzeit abgebrochen, obwohl der gewünschte Einlaufgrad noch nicht erreicht wurde. Allerdings ist bei diesem Prüflauf E die vergleichsweise kleine Oberflächenrauheit im Neuzustand zu erwähnen. Für die Prüfläufe C und D wurde der gewünschte Einlaufgrad bereits nach einer Stunde und bei dem Prüflauf F erst nach 11 h erreicht. Die Prüfräder des Prüflaufs E und F wurden mit dem Profilschliff und die Prüfräder der Prüfläufe B, C und D mit dem MAAG-0° Glattschliff bearbeitet.

Tabelle 7-8: Einlaufgrad und mittlere Rauheit der Prüfräder aus den Versuchen B - F

Test	B	C	D	E	F
Schliff Prüfräder	MAAG-0°	MAAG-0°	MAAG-0°	Profilschliff	Profilschliff
Schmierstoff	FVA 3A	FVA 3A	Praxis A	FVA 3A	FVA 3A
Anfangsrauheit Ra	0,52 µm	0,55 µm	0,52 µm	0,43 µm	0,56 µm
Rauheit Ra nach 1 h	-	0,40 µm	0,38 µm	0,41 µm	0,51 µm
Einlaufgrad nach 1 h	-	0,72	0,74	0,95	0,91
Laufzeit bis Einlaufgrad $< 0,8$	< 16 h	1 h	1 h	-	11 h
Gesamtlaufzeit	16 h	2 h	16 h	10 h	80 h
Einlaufgrad nach Gesamtlaufzeit	0,61	0,72	0,74	0,92	0,76

Um zu untersuchen, wie sich die Schadensausprägung im Dauertest ohne vorher durchgeführten Stufentest entwickelt, wurden drei Versuche im Dauertest ohne vorherigen Stufentest mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A durchgeführt. Die Laufzeit in der Kraftstufe 8 betrug

hier, wie auch im Standardtest, jeweils 80 Stunden. Als Referenzlauf dient ein Versuch mit Stufen- und Dauertest bei Standardbedingungen mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A. Die Ergebnisse der mittleren Profilformabweichung sind in Bild 7-19 dargestellt. Die Werte aus dem Versuch 2 fielen deutlich kleiner aus und sind für ein Mineralöl mit einer mittleren Graufleckentragfähigkeit als ungewöhnlich niedrig einzustufen. Eine Ölanalyse hat gezeigt, dass der Phosphor-Anteil der Ölprobe aus Versuch 2 um ca. die Hälfte im Vergleich zum Neuöl gesunken ist. In Untersuchungen von Weiß [Wei94] wurde ebenfalls bei stark sinkenden Phosphor-Anteil eine erhöhte Graufleckentragfähigkeit im Test beobachtet. Aufgrund dieser Beobachtung und den Erfahrungswerten, wird dieser Versuch von der Bewertung ausgeschlossen. Die ermittelten Profilformabweichungen zeigen für die Versuche 1 und 3 eine vergleichbare Charakteristik wie die der Referenz. In den ersten 80 Stunden in der Kraftstufe 10 steigen die Profilformabweichungen für alle Versuche stark an. In den zweiten 80 h in der Kraftstufe 10 ist der Anstieg für alle drei Versuche kleiner als in den ersten 80 Stunden der Kraftstufe 10. Die Werte nach 80 und 160 Stunden in der Kraftstufe 10 liegen für die Versuche 1 und 3 nahe an der Referenz. Die Graufleckenfläche entwickelt sich in Versuch 1 und Versuch 3 ähnlich wie bei der Referenz. Die ermittelten Werte liegen allerdings nach 160 Stunden in Kraftstufe 10 ca. 10 % höher als bei der Referenz. Der Masseverlust am Ritzel ist für die Versuche 1 und 3 hinsichtlich der Charakteristik und der ermittelten Werte sehr ähnlich im Vergleich zur Referenz. Da sich die Verläufe der mittleren Graufleckenfläche und des Masseverlusts am Ritzel weitgehend entsprechend der mittleren Profilformabweichung entwickeln, sind diese im Anhang (s. Bild A.10-16 und Bild A.10-17) dargestellt.

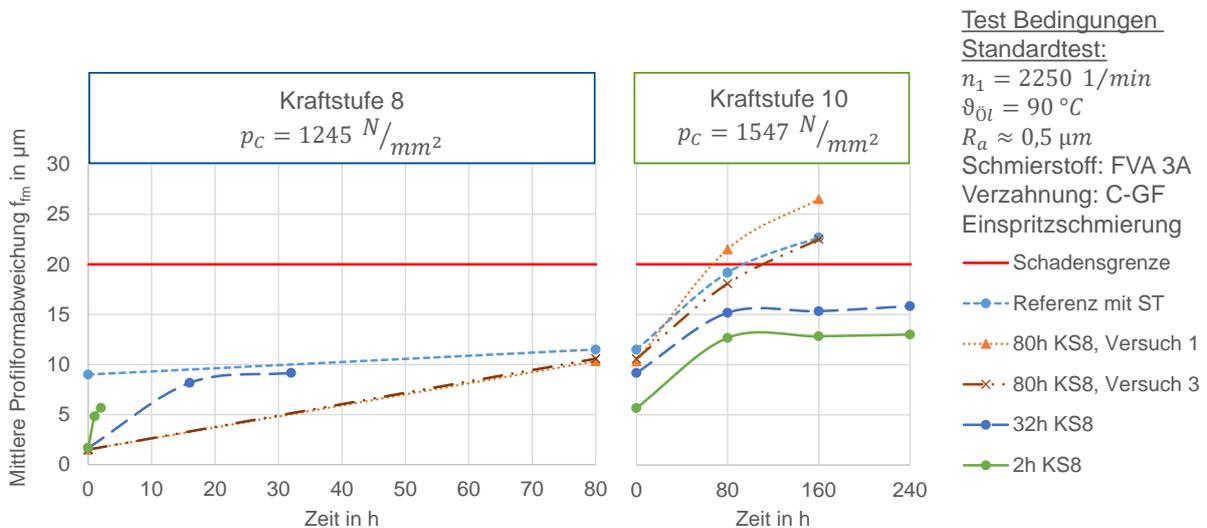


Bild 7-19: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Dauertest ohne vorherigen Stufentest bei unterschiedlichen Laufzeiten in Kraftstufe 8

Anhand von zwei weiteren Prüfläufen mit unterschiedlichen Laufzeiten in Kraftstufe 8 (ohne vorherigen Stufentest) wurde untersucht, wie sich eine verkürzte Laufzeit in der Kraftstufe 8 auf die Schadensentwicklung in der Kraftstufe 10 auswirkt. Hierzu wurde ein Versuch mit einer Laufzeit von 2 Stunden in der Kraftstufe 8 und ein Versuch mit einer Laufzeit von 32 Stunden in der Kraftstufe 8 durchgeführt. Die Verläufe der mittleren Profilformabweichung sind in Bild 7-19 dargestellt. Der Versuch, welcher 32 Stunden in der Kraftstufe 8 gelaufen ist, zeigt zu Beginn der Laufzeit in Kraftstufe 10 eine etwas höhere Graufleckigkeit als der Versuch, welcher zwei Stunden in Kraftstufe 8 gelaufen ist. Beide Verläufe entwickeln sich im Weiteren nahezu identisch. Die Werte der mittleren Profilformabweichung sind entsprechend der Anfangsschädigung um 2-3 µm verschoben. Die Graufleckenfläche und der Masseverlust sind

im Anhang (s. Bild A.10-16 und Bild A.10-17) dargestellt und für die beiden Prüfläufe nahezu identisch.

Im Vergleich zu den Versuchsläufen mit einer Laufzeit von 80 Stunden in Kraftstufe 8 sind die Verläufe der mittleren Profilformabweichung, der mittleren Graufleckenfläche und des Masseverlusts am Ritzel entsprechend der Anfangsschädigung aus der Kraftstufe 8 zu geringeren Werten verschoben. Im ersten Intervall der Kraftstufe 10 zeigte sich für alle Versuche ein deutlicher Anstieg vergleichbarer Steigung. Im zweiten Intervall der Kraftstufe 10 stiegen die mittleren Profilformabweichungen der Versuche mit einer Laufzeit von 80 Stunden in der Kraftstufe 8 etwas geringer und für die Versuche mit verkürzter Laufzeit im Dauertest deutlich geringer an als im ersten Intervall. Tabelle 7-9 zeigt die Anfangsrauheiten und mittleren Profilformabweichungen nach den Testabschnitten der Versuche mit verkürzter Laufzeit in Kraftstufe 8 und der Referenz sowie Versuch 3.

Tabelle 7-9: Werte der mittleren Profilformabweichung f_{fm} im Dauertest mit verkürzter Laufzeit in KS 8 und der Referenz

Testabschnitt	Referenz mit ST	2 h KS 8	32 h KS 8	80 h KS 8 (Versuch 3)
Anfangsrauheit Ra	0,53 μm	0,55 μm	0,52 μm	0,57 μm
KS 8	11,5 μm	5,7 μm	9,2 μm	10,6 μm
KS 10 / 80 h	19,2 μm	12,7 μm	15,2 μm	18,1 μm
KS 10 / 160 h	22,7 μm	12,8 μm	15,3 μm	22,5 μm
KS 10 / 240 h	-	13,0 μm	15,3 μm	-

Es ist zu sehen, dass die Profilformabweichungen bei den Versuchen mit verkürzter Laufzeit in Kraftstufe 8 im Dauertest im zweiten Intervall der Kraftstufe 10 deutlich weniger ansteigen als bei den Versuchen mit voller Laufzeit in Kraftstufe 8. Die Graufleckenfläche (s. Bild A.10-16) nimmt über die gesamte Laufzeit für die Versuche mit verkürzter Laufzeit in Kraftstufe 8 sehr wenig zu. Die Verläufe der Referenz und Versuch 3 entwickeln sich ähnlich wie die Versuche mit verkürzter Laufzeit in Kraftstufe 8. Der Masseverlust der Versuche mit verkürzter Laufzeit in Kraftstufe 8 entwickelt sich entsprechend der mittleren Profilformabweichung und Graufleckenfläche und verläuft daher auch deutlich flacher als bei den Versuchen mit einer Laufzeit von 80 Stunden in der Kraftstufe 8 (s. Bild A.10-17).

7.4.2 Betrachtung ausgewählter industrieller Anwendungsfälle

Durch Variation der Prüftemperatur und Ritzeldrehzahl im Graufleckentest wurden zwei Anwendungsfälle abgebildet. Zum einen wurden die Prüfbedingungen an die Bedingungen in Automobilgetrieben und zum anderen an die Bedingungen in Windkraftgetrieben angelehnt.

Prüfbedingung Automobil

Die Tabelle 7-10 zeigt einen Überblick zu den Prüfbedingungen der experimentellen Untersuchungen im Anwendungsfall „Automobil“.

Tabelle 7-10: Überblick über die experimentellen Untersuchungen des Versuchspakets „Prüfbedingung Automobil“

Benennung	Referenz	„120°C, ST & DT“	„120°C, DT“	„90°C, DT“
Verzahnung	C-GF	Variante III	Variante III	Variante III
Anfangsrauheit Ra	0,53 μm	0,58 μm	0,58 μm	0,55 μm
Öltemperatur	90 °C	120 °C	120 °C	90 °C
Stufentest	ja	ja	nein	nein
Schmierungsart	ES	TS	TS	ES
Laufzeit in KS 8	80 h	80 h	1 h	2 h

Es wurde zunächst ein Stufen- und Dauertest bei 120 °C („120 °C, ST & DT“) mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A und unter Verwendung der Verzahnungsvariante III durchgeführt. Um diese hohen Schmierstofftemperaturen zu erreichen, wurden die Untersuchungen bei

120 °C mit Tauchschmierung (TS) durchgeführt. Die mittlere Profilformabweichung, mittlere Graufleckenfläche und der Masseverlust sind in Bild 7-20, Bild 7-21 und Bild 7-22 dargestellt.

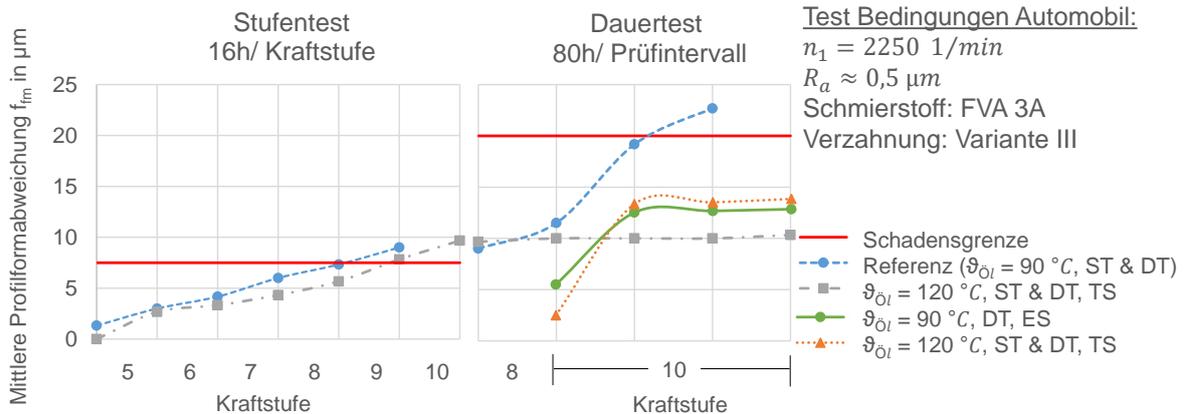


Bild 7-20: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Versuch bei 120°C und bei Standardbedingungen mit FVA 3A

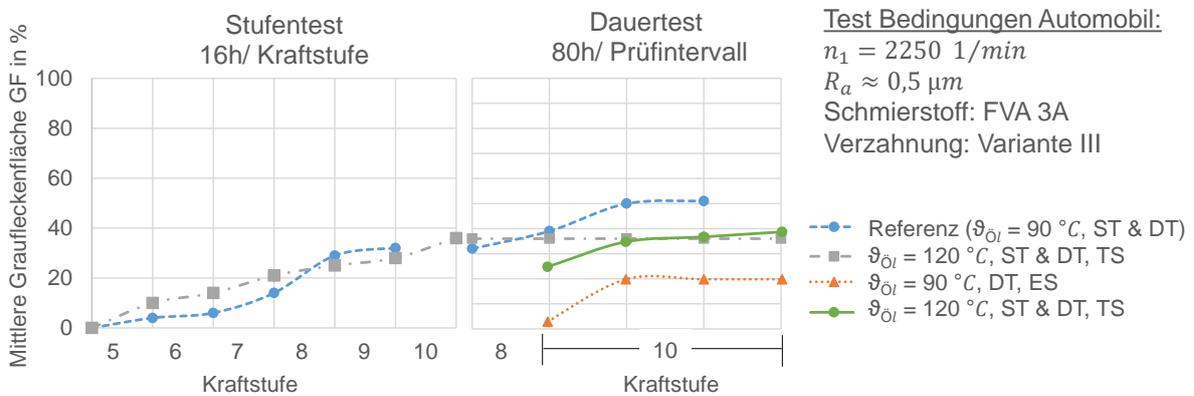


Bild 7-21: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche im Versuch bei 120°C und bei Standardbedingungen mit FVA 3A

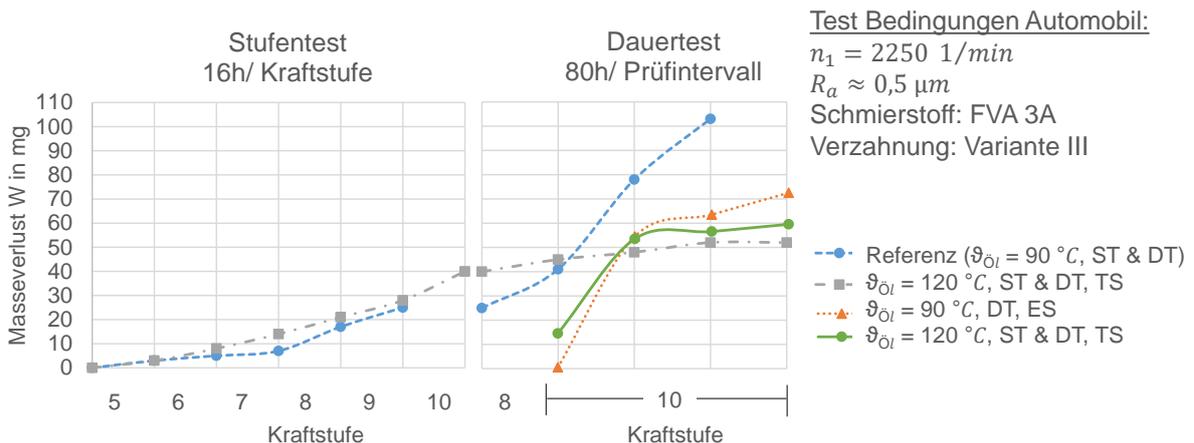


Bild 7-22: Verläufe des Masseverlusts im Versuch bei 120°C und bei Standardbedingungen mit FVA 3A

Im Stufentest war eine ähnliche Entwicklung der mittleren Profilformabweichung der mittleren Graufleckenfläche und des Masseverlusts im Test „120 °C, ST & DT“ gegenüber der Referenz, welche in Abschnitt 7.3 bei Standardbedingungen durchgeführt wurde, zu sehen. In der Kraftstufe 10 im Dauertest fielen die Werte der typischen Schadenskenngößen kleiner aus als bei der Referenz und stiegen für die Profilformabweichung und Graufleckenfläche nicht an. Es ist zu beachten, dass die Referenz im Stufentest nicht die Kraftstufe 10 durchlaufen hat.

Dies beeinflusst den Verlauf im Dauertest insbesondere in den ersten 80 Stunden der Kraftstufe 10. Der Masseverlust stieg im Dauertest des Tests „120 °C, ST & DT“ mäßig an, da Verschleiß auftrat.

Anschließend wurde ein Dauertest ohne vorherigen Stufentest bei 120 °C („120 °C, DT“) mit der Verzahnungsvariante III und einem verkürzten Einlauf von einer Stunde in Kraftstufe 8 durchgeführt. Aufgrund der geringen Vorschädigung stiegen die mittlere Profilformabweichung, mittlere Graufleckenfläche und der Masseverlust in den ersten 80 Stunden Laufzeit in Kraftstufe 10 deutlich an. Für die restliche Laufzeit in Kraftstufe 10 nahm die mittlere Profilformabweichung durch Graufleckigkeit kaum zu und zeigte somit eine ähnliche Charakteristik wie der in Abschnitt 7.4.1 durchgeführte Versuch bei 90 °C (90 °C, DT). Die Graufleckenfläche von „120 °C, DT“ fiel deutlich geringer aus als bei dem durchgeführten Versuch bei 90 °C (90 °C, DT). Der Masseverlust von „120 °C, DT“ stieg an und erreichte höhere Werte als bei dem durchgeführten Versuch bei 90 °C (90 °C, DT). An den Zahnflanken im Versuch bei 120 °C (120 °C, DT) trat ebenfalls Verschleiß auf. Die Zahnflanken der beiden Versuche bei 120 °C sind in Bild 7-23 exemplarisch nach Ende des Dauertests dargestellt und zeigen den Verschleiß und die dadurch kaum vorhandene Graufleckenfläche.

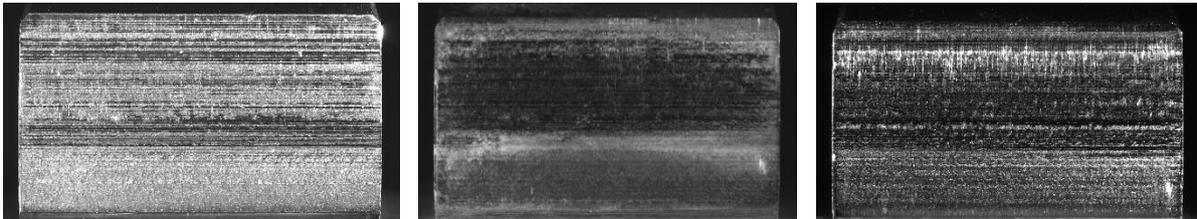


Bild 7-23: Exemplarische Zahnflankenfotos nach Ende des Stufentestes (links) und nach Ende des Dauertests (mittig) bei 120 °C Prüftemperatur Versuch mit Stufen- und Dauertest und Versuch mit nur Dauertest (rechts) bei 120 °C

Die Zunahme des Masseverlusts bei gering ausgeprägter Graufleckigkeit ist mit dem Auftreten des Verschleißes zu begründen. Der Verschleiß war in dem Versuch mit Dauertest bei 120 °C bei visueller Begutachtung weniger stark ausgeprägt als bei dem Versuch mit Stufen- und Dauertest bei 120 °C. Passend dazu sind für den Versuch mit Dauertest bei 120 °C höhere Werte für die mittlere Profilformabweichung als bei dem Versuch mit Stufen- und Dauertest bei 120 °C zu erkennen. Da der Masseverlust ein überlagerter Wert aus Verschleiß und Graufleckigkeit darstellt, fällt der Masseverlust bei dem Versuch mit Dauertest bei 120 °C größer aus als bei dem Versuch mit Stufen- und Dauertest bei 120 °C. Die ermittelte Graufleckenfläche liegt mit ca. 20 % für den Versuch mit Dauertest bei 120 °C deutlich unterhalb des ermittelten Wertes von fast 40 % bei dem Versuch mit Stufen- und Dauertest bei 120 °C. Hier ist zu beachten, dass diese Werte der mittleren Graufleckenfläche zwar zu Beginn des Dauertests bzw. nach Ende des Stufentests vorlagen, sich aber im Lauf des Dauertests aufgrund des auftretenden Verschleißes rückläufig verhalten haben. Da die Bestimmung der mittleren Graufleckigkeit durch den auftreten Verschleiß erschwert wurde, wurden die Werte für die Graufleckenfläche weitergeführt.

Da die Verschleißtragfähigkeit von FVA 3A zu gering war, um bei den vorgegeben Prüftemperaturen von 120 °C eine eindeutige Aussage bzgl. des Graufleckenverhaltens zu erhalten, wurde mit dem Praxisschmierstoff C jeweils ein Stufentest bei 90 °C und 120 °C durchgeführt.

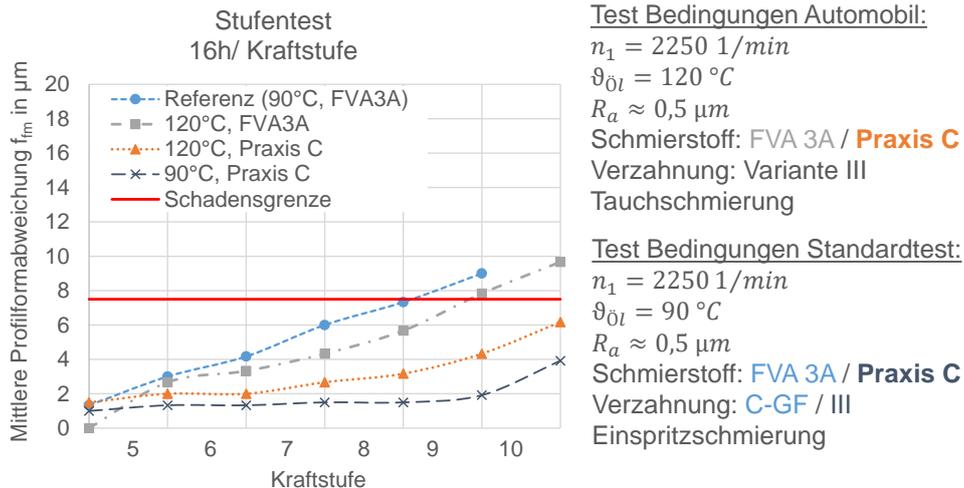


Bild 7-24: Verläufe der mittleren Profilformabweichung bei 120 °C und bei Standardbedingungen mit FVA 3A und Praxisschmierstoff C

Der Praxisschmierstoff C zeigt bei 90 °C ein deutlich günstigeres Verhalten bzgl. Grauflecken-tragfähigkeit als der Referenzschmierstoff FVA 3A. Bei 120 °C mit dem Praxisschmierstoff C tritt eine leicht stärkere Graufleckenbildung auf als bei 90 °C. Die ermittelten mittleren Profilformabweichungen der Versuchsläufe mit dem Praxisschmierstoff C sind in Bild 7-24 dargestellt und liegen nach der Kraftstufe 10 unterhalb des Schadenskriteriums von 7,5 µm. Die Graufleckenfläche und der Masseverlust fallen ebenfalls sehr gering aus. Die Verläufe der Graufleckenfläche und des Masseverlusts können dem Anhang (s. Bild A.10-20 und Bild A.10-21) entnommen werden.

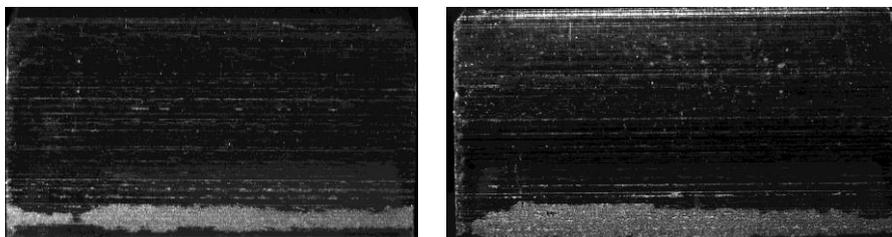


Bild 7-25: Exemplarische Zahnflankenfotos nach Ende des Stufentests bei 90 °C Prüftemperatur (links) und 120 °C Prüftemperatur (rechts) mit Praxis C

In den Versuchen mit dem Praxisschmierstoff C bei 90 °C und 120 °C trat kein erkennbarer Verschleiß auf den Zahnflanken auf. In Bild 7-25 sind jeweils exemplarische Zahnflanken-

fotos der Ritzel nach Versuchsende dargestellt.

Nach Angabe des Herstellers weist der Schmierstoff C eine GF-Klasse „mittel“ auf. Es kann allerdings nicht abschließend beurteilt werden, ob ein abgesichertes Testergebnis vorliegt. In diesem Versuchslauf wurde die Verzahnungsvariante III verwendet. Für eine eindeutige, abgesicherte Aussage sind weitere Versuche notwendig. Die Ergebnisse belegen dennoch, dass Schmierstoffe ausreichender Verschleißtragfähigkeit auch bei einer erhöhten Prüftemperatur von 120 °C im Graufleckentest zuverlässig hinsichtlich ihrer Graufleckentragfähigkeit charakterisiert werden können.

Prüfbedingung Windkraft

In Tabelle 7-11 ist ein Überblick über die unter „Prüfbedingung Windkraft“ betrachteten experimentellen Untersuchungen zu sehen.

Tabelle 7-11: Überblick über die experimentellen Untersuchungen des Versuchspakets „Prüfbedingung Windkraft“

Benennung	Referenz	„60°C, 375 min ⁻¹ , ST & DT“	„60°C, 375 min ⁻¹ , DT, Versuch 1“	„60°C, 375 min ⁻¹ , DT, Versuch 2“	„60°C, 2250 min ⁻¹ , DT“
Verzahnung	C-GF	Variante III	Variante III	Variante III	Variante III
Anfangsrauheit Ra	0,53 µm	0,55 µm	0,55 µm	0,52 µm	0,53 µm
Öltemperatur	90°C	60°C	60°C	60°C	60°C
Ritzeldrehzahl	2250 min ⁻¹	375 min ⁻¹	375 min ⁻¹	375 min ⁻¹	2250 min ⁻¹
Stufentest	ja	ja	nein	nein	nein
Laufzeit in KS 8	80 h	80 h	1 h	93 h	16 h

Im Rahmen des Versuchspakets „Prüfbedingung Windkraft“ wurde zunächst ein Stufen- und ein Dauertest bei einer Öltemperatur von 60 °C und einer reduzierten Drehzahl von 375 min⁻¹ am Ritzel durchgeführt. Es wurde die Verzahnungsvariante III verwendet. Die Zeitintervalle von 16 Stunden pro Kraftstufe in Stufentest und 80 Stunden im Dauertest wurden trotz der daraus resultierenden verkürzten Lastwechselzahl beibehalten. In Bild 7-26 ist der Verlauf der mittleren Profilformabweichung im Vergleich zur Referenz bei Standardbedingungen, welche in Abschnitt 7.3 durchgeführt wurde, zu sehen. Es zeigt sich ein sehr geringer Anstieg der mittleren Profilformabweichung über den gesamten Versuch.

Test Bedingungen Windkraft:

- Schadensgrenze
- Referenz ($\vartheta_{\text{Öl}} = 90 \text{ °C}$, $n_1 = 2250 \text{ 1/min}$, ST & DT)
- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ °C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, ST & DT,
- ▲— $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ °C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, DT, Versuch 1
- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ °C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, DT, Versuch 2
- ×— $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ °C}$, $n_1 = 2250 \text{ 1/min}$, DT

$R_a \approx 0,5 \text{ µm}$
Schmierstoff: FVA 3A
Verzahnung: Variante III

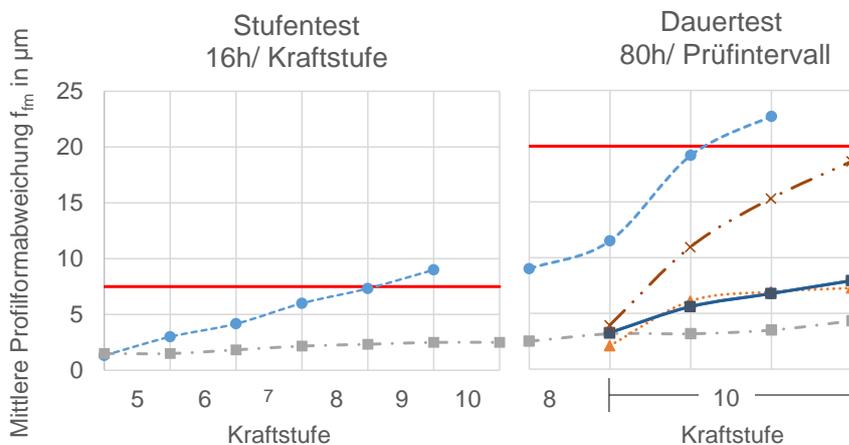


Bild 7-26: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Versuch bei 60 °C und verringerter Drehzahl sowie bei Standardbedingungen mit FVA 3A

Anschließend wurden zwei Prüfläufe bei 60 °C und einer reduzierten Drehzahl von 375 min⁻¹ am Ritzel im Dauertest ohne Stufentest unter Verwendung der Verzahnungsvariante III durchgeführt. Für den Versuch 1 wurde ein Einlauf von einer Stunde in Kraftstufe 8 gefahren und für den Versuch 2 wurde der Einlauf in Kraftstufe 8 auf 93 Stunden erhöht. Die 93 Stunden entsprechen bei einer Ritzeldrehzahl von 375 min⁻¹ der Lastwechselzahl von 16 Stunden bei einer Drehzahl von 2250 min⁻¹ am Ritzel. Es ist zu sehen, dass die Werte für die Profilformabweichung der Versuche 1 und 2 geringfügig über den Werten des Versuchs mit Stufen und Dauertest bei 60 °C und reduzierter Drehzahl und deutlich unterhalb der Referenz liegen. Die verlängerte Laufzeit in Kraftstufe 8 hat sich nicht auf die Entwicklung der Profilformabweichung in Kraftstufe 10 ausgewirkt. Die Graufleckenfläche und der Masseverlust für Versuch 1 liegen leicht höher als für den Dauertest bei „60 °C, 375 min⁻¹, ST & DT“. Die Graufleckenfläche liegt

für den Versuch 2 etwas höher als für den Versuch 1. Der Masseverlust für Versuch 2 liegt aufgrund eines Messfehlers nicht vor. Die Verläufe der mittleren Graufleckenfläche und des Masseverlusts sind im Anhang (s. Bild A.10-18 und Bild A.10-19) dargestellt.

Es wurde ein weiterer Dauertest mit einer Prüftemperatur von 60 °C und Verzahnungsvariante III durchgeführt. Die Drehzahl wurde wie beim Standardtest auf 2250 min⁻¹ am Ritzel eingestellt. Die Verläufe der Profilformabweichung, der Graufleckenfläche und des Masseverlusts zeigen die gleiche Charakteristik wie die Referenz und sind nur um ihren Startwert verschoben.

7.4.3 Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke

Im Rahmen des Versuchspakets „Variation Prüfbedingungen“ wurde untersucht, ob das Entstehen einer Schabemarke am Ritzel durch Umkehr der Treibrichtung unter Verwendung der C-GF-Verzahnung vermieden werden kann. Zudem wurde der Einfluss durch Umkehr der Treibrichtung auf das Ergebnis im Graufleckentest untersucht. Neben dem Referenzschmierstoff FVA 3A wurde der Praxisschmierstoff A verwendet, da bei dem Praxisschmierstoff A in vorherigen Untersuchungen eine Schabemarke im Test auftrat. Da die Verzahnungsvarianten I und III aufgrund ihrer Mikrogeometrie dem Auftreten einer Schabemarke entgegenwirken, wurden zusätzlich experimentelle Untersuchungen mit den Verzahnungsvarianten I und III mit dem Praxisschmierstoff A durchgeführt. Die Testergebnisse aus den Untersuchungen mit den Verzahnungsvarianten I und III wurden den Testergebnissen aus den Untersuchungen mit der C-GF-Verzahnung sowie den Ergebnissen aus den Untersuchungen mit Umkehr der Treibrichtung vergleichend gegenübergestellt. Zusätzlich wurde ein Versuch mit Umkehr der Treibrichtung und dem Praxisschmierstoff B durchgeführt und mit dem Standardbetrieb verglichen.

Untersuchungen mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A

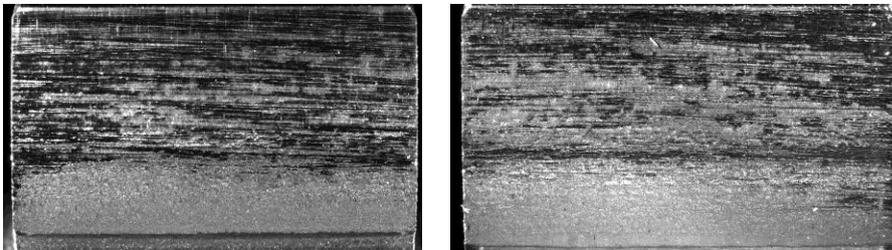


Bild 7-27: Exemplarische Zahnflanken des Ritzels (links) und des Rades (rechts) nach dem Ende des Stufentests mit geänderter Treibrichtung, Schmierstoff FVA 3A

Es wurden ein Stufen- und ein Dauertest mit treibendem Rad einer C-GF-Verzahnung unter Verwendung von FVA 3A durchgeführt. In Bild 7-27 ist jeweils ein exemplarisches Zahnflan-

kenfoto des Ritzels und des Rades nach dem Stufentest des Prüflaufs mit FVA 3A zu sehen. Nach Ende des Stufentests ist weder auf dem Ritzel noch auf dem Rad eine Schabemarke zu erkennen. Bild 7-28 zeigt jeweils eine exemplarische Zahnflanke des Ritzels und des Rades nach Ende des Dauertests. Hier zeigt sich ab der Kraftstufe 10 im Dauertest eine deutliche Schabemarke am Rad. Das Ritzel weist auch am Ende des Dauertests keine Schabemarke auf.

Die Werte der mittleren Profilformabweichung über den Versuch mit treibendem Rad und

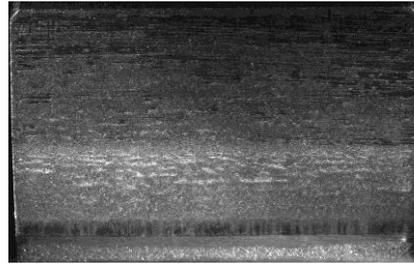
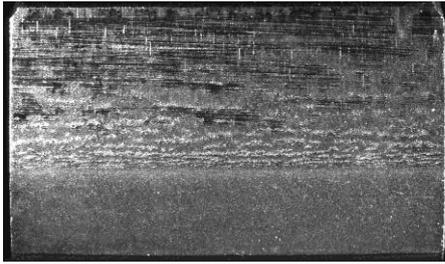


Bild 7-28: Exemplarische Zahnflanken des Ritzels (links) und des Rades (rechts) nach dem Ende des Dauertests mit geänderter Treibrichtung, Schmierstoff FVA 3A

FVA 3A sind in Bild 7-29 zusammen mit den Varianten I, III und der C-GF-Verzahnung, welche mit treibenden Ritzel durchgeführt (vgl. Abschnitt 7.3) wurden, aufgetragen.

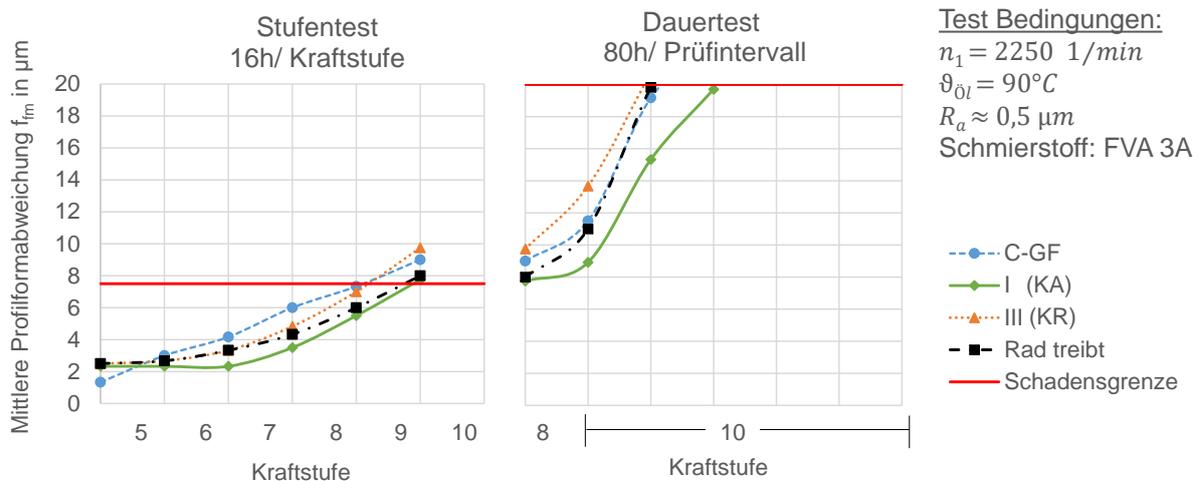


Bild 7-29: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Versuch für die Varianten I, III und C-GF mit treibenden Ritzel im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Rad

Es ist zu sehen, dass sich die Werte der mittleren Profilformabweichungen des Versuchs mit treibendem Rad sehr gut im Vergleich zu den Verläufen der restlichen Varianten einordnen lassen. Im nicht gelaufenen Zustand sind die üblichen fertigungsbedingten Abweichungen der Profilform zu erkennen. Die Profilformabweichungen des Versuchs mit treibendem Rad stiegen über der Versuchsdauer kontinuierlich an und erreichten nach der Kraftstufe 9 im Stufentest einen Wert von $8,0 \mu\text{m}$ und somit oberhalb des Schadenskriteriums von $7,5 \mu\text{m}$. Der Dauertest war nach 160 Stunden in Kraftstufe 10 aufgrund des Überschreitens des Schadenskriteriums von $20 \mu\text{m}$ beendet. Im Stufen- und insbesondere im Dauertest ist im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel kein signifikanter Einfluss auf die mittlere Profilformabweichung durch die geänderte Treibrichtung zu erkennen.

Die Verläufe der Variante mit treibendem Rad für Graufleckenfläche und Masseverlust am Ritzel zeigte eine ähnliche Charakteristik wie für die Varianten I, II und C-GF mit treibenden Ritzel und sind im Anhang (s. Bild A.10-22 und Bild A.10-23) dargestellt. Im Stufentest liegen die Werte der Variante mit treibendem Rad etwas höher als die restlichen Varianten im Bereich der üblichen Versuchsstreuung.

Die mittleren Werte der Profilformabweichung, der Graufleckenfläche und des Masseverlusts liegen für den Versuch mit treibendem Rad im Stufen- und Dauertest im üblichen Wertebereich der „GFT-mittel“. Tabelle 7-12 zeigt einen Überblick, bei welchem Versuch eine Schabemarke aufgetreten ist. Das Auftreten einer Schabemarke im Versuch ist mit „+“ und das Fehlen einer Schabemarke mit „-“ dargestellt.

Tabelle 7-12: Überblick Auftreten der Schabemarke - Vermeidung der Schabemarke (FVA 3A)

Versuch	C-GF	Variante I	Variante III	Rad treibt
Schabemarke am Ritzel	-	-	-	-
Schabemarke am Rad	-	-	-	+
Schabemarke aufgetreten ab	-	-	-	KS 10, 80 h

Tabelle 7-13 zeigt die Rauheitswerte der Prüfräder im Neuzustand und fasst die Ergebnisse der Prüfläufe zusammen. Die hier durchgeführten Versuche zeigen, dass durch eine Änderung der Treibrichtung kein signifikanter Einfluss auf die Versuchsergebnisse zu erwarten ist.

Tabelle 7-13: Rauheitswerte der Prüfräder und Ergebnisse der Prüfläufe - Vermeidung der Schabemarke (FVA 3A)

Versuch	4.1	5.1	7.1	10.1
Variante	C-GF	I	III	Rad treibt
Rauheit Ra Ritzel in μm	0,52	0,57	0,49	0,50
Rauheit Ra Rad in μm	0,53	0,58	0,49	0,47
Rauheit Ra Paarung in μm	0,53	0,58	0,49	0,49
Schadenskraftstufe	9	9	9	9
GF-Klasse	mittel	mittel	mittel	mittel

Untersuchungen mit dem Praxisschmierstoff A

Es wurde unter Verwendung des Praxisschmierstoffs A jeweils ein Stufen- und ein Dauertest mit treibenden Rad einer C-GF-Verzahnung sowie mit der Verzahnungsvariante I und III mit treibendem Ritzel durchgeführt.

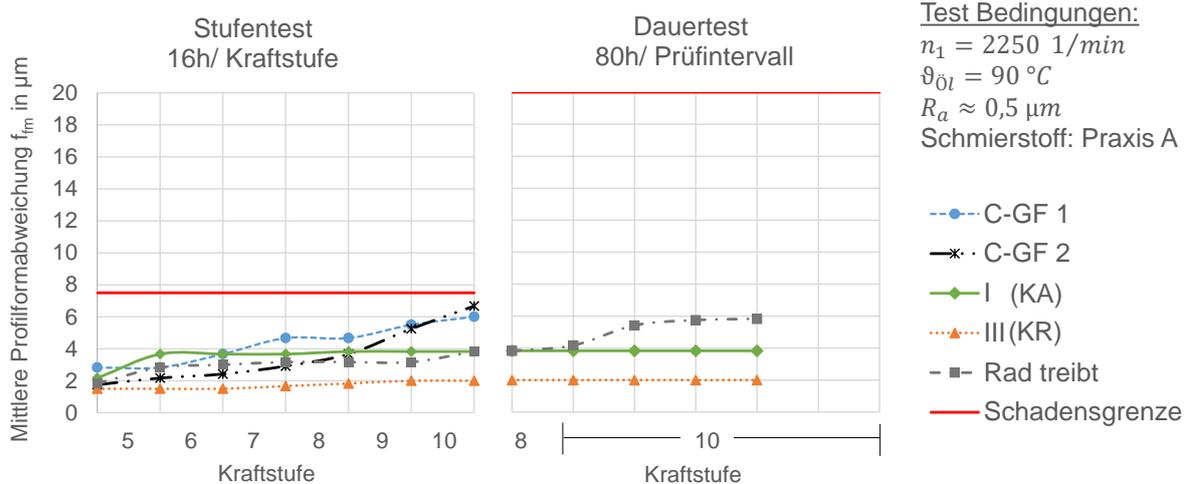


Bild 7-30: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Versuch mit dem Praxisschmierstoff A für die Varianten I, III und C-GF mit treibenden Rad im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel

Die beiden Referenzläufe mit der C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel wurden mit dem Praxisschmierstoff A mittels Stufentests im Rahmen des Versuchspakets „Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest“ ermittelt. Bild 7-30 zeigt die Verläufe der mittleren Profilformabweichungen für die Prüfläufe zur Vermeidung der Schabemarke (Variante I, Variante III und treibendes Rad) sowie der Referenz mit dem Praxisschmierstoff A. Im nicht gelaufenen Zustand sind die üblichen fertigungsbedingten Profilformabweichungen zu erkennen. Die Profilformabweichungen aller Varianten steigen über der Versuchsdauer kaum an und liegen nach der Kraftstufe 10 im Stufentest jeweils unterhalb des Schadenskriteriums von $7,5 \mu\text{m}$. Die mittleren Auskolkungen der Variante III, der Variante I und der Variante „Rad treibt“ liegen hierbei mit unter $4 \mu\text{m}$ deutlich unterhalb der Schadensgrenze. Die Werte der C-GF-Verzahnungen liegen mit ca. $5,5 \mu\text{m}$ näher am Schadenskriterium. Für alle 4 Varianten kann die Schadenskraft-

stufe > 10 zugeordnet werden. Im Dauertest wurde für alle Verläufe eine ähnliche Charakteristik festgestellt. Die Auskolkungen blieben für alle Varianten aufgrund des hochtragfähigen Schmierstoffs gering. Nach einer Laufzeit von 240 Stunden in Kraftstufe 10 wurden Werte weit unterhalb des Schadenskriteriums von 20 μm erreicht. Die Ergebnisse der verschiedenen Varianten im Stufen- und Dauertest sind im Rahmen der üblichen Versuchsstreuung weitgehend gleichwertig.

Die Verläufe der mittleren Graufleckenfläche und des Masseverlusts korrelieren mit dem Verlauf der mittleren Profilformabweichung und sind im Anhang (s. Bild A.10-24 und Bild A.10-25) dargestellt. Die von Graufleckigkeit betroffene Fläche der Zahnflanken weist nach 240 Stunden in Kraftstufe 10 für alle geprüften Verzahnungen Werte unter 10 % auf. Der Masseverlust fiel für die Versuche mit C-GF-Verzahnungen bei treibenden Ritzel aufgrund der Schabemarke höher aus als bei den restlichen Varianten.

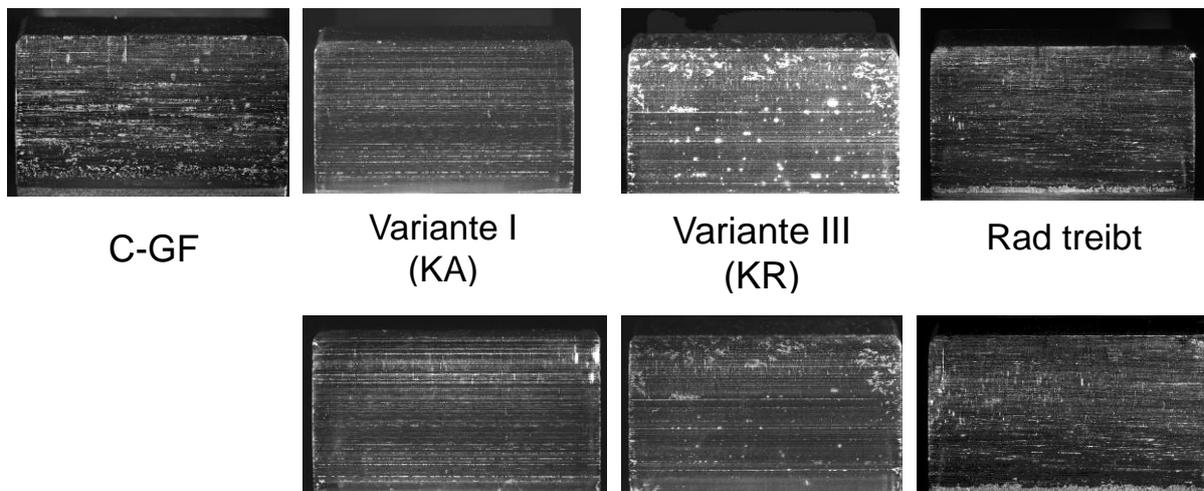


Bild 7-31: Zahnflankenfotos nach dem Stufentest (oben) und nach dem Dauertest (unten) mit dem Praxisschmierstoff A für die Varianten I, III und C-GF-Verzahnung mit treibenden Rad im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel

Bild 7-31 oben zeigt Zahnflankenfotos der C-GF-Verzahnung mit treibendem Ritzel, der Variante I, der Variante III und der Variante C-GF „Rad treibt“ nach Ende des Stufentests (Kraftstufe 10). Es trat bei den Referenz-Versuchen mit der C-GF-Verzahnung jeweils eine Schabemarke am Ritzel auf. Bei der Auswertung der Profilformabweichung wurde die Auskolkung durch die Schabemarke nicht berücksichtigt. Diese wird in Bild 7-6 in Abschnitt 7.2 exemplarisch für einen Ritzel-Zahn nach der Kraftstufe 10 durch den Vergleich des Zahnflankenfotos und des

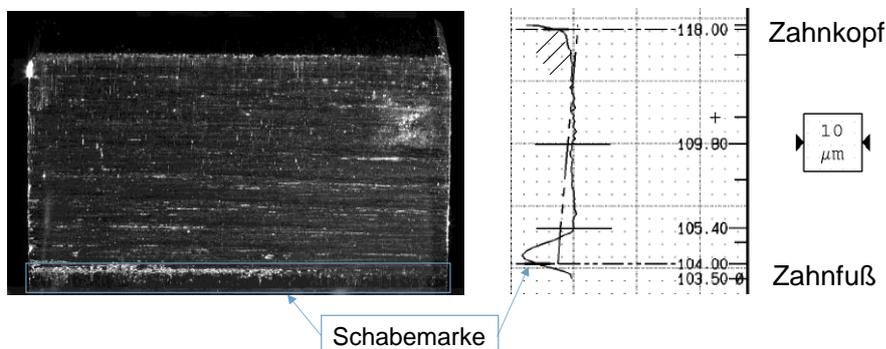


Bild 7-32: Schabemarke am Rad nach Versuchsende mit Praxisschmierstoff A – Rad treibend

Profilmessschriebs dargestellt. Bei den Varianten I und III sowie „Rad treibt“ trat während des Stufentests keine Schabemarke am Ritzel auf. Bild 7-31 unten zeigt die Zahnflankenfotos der Variante I, der Variante III und der

Varianten I und III sowie „Rad treibt“ trat während des Stufentests keine Schabemarke am Ritzel auf. Bild 7-31 unten zeigt die Zahnflankenfotos der Variante I, der Variante III und der

Variante C-GF „Rad treibt“ nach Ende des Dauertests. Für die Varianten I und III sowie „Rad treibt“ trat auch während des Dauertests keine Schabemarke am Ritzel auf. Für die durchgeführten Versuche ist eine ähnliche Schadensausprägung auf den Zahnflanken des Ritzels für Stufen- und Dauertest erkennbar. Bei dem Prüflauf mit dem treibenden Rad trat am Rad eine Schabemarke auf. Bild 7-32 zeigt exemplarisch die Schabemarke am Rad.

Tabelle 7-14 zeigt einen Überblick, bei welchem Versuch eine Schabemarke aufgetreten ist. Das Auftreten einer Schabemarke im Versuch ist mit „+“ und das Fehlen einer Schabemarke mit „-“ dargestellt.

Tabelle 7-14: Überblick Auftreten der Schabemarke - Vermeidung der Schabemarke (Praxis A)

Versuch	C-GF 1	C-GF 2	Variante I	Variante III	Rad treibt
Schabemarke am Ritzel	+	+	-	-	-
Schabemarke am Rad	-	-	-	-	+
Schabemarke aufgetreten ab	KS 7, 16 h	KS 6, 16 h	-	-	KS 5, 16 h

Die Tabelle 7-15 zeigt die Rauheitswerte der Prüfräder und die Ergebnisse der Prüfläufe zur Vermeidung der Schabemarke mit Praxisschmierstoff A. Das Auftreten einer Schabemarke am Ritzel im Versuch ist mit „+“ und das Fehlen einer Schabemarke mit „-“ dargestellt.

Tabelle 7-15: Rauheitswerte der Prüfräder und Ergebnisse der Prüfläufe - Vermeidung der Schabemarke (Praxis A)

Versuch	ST1	ST2	10.4	10.3	10.2
Variante	C-GF 1	C-GF 2	I	III	Rad treibt
Rauheit Ra Ritzel in μm	0,52	0,53	0,52	0,50	0,49
Rauheit Ra Rad in μm	0,49	0,53	0,49	0,50	0,45
Rauheit Ra Paarung in μm	0,51	0,53	0,51	0,50	0,47
Schadenskraftstufe	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10
GF-Klasse	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Schabemarke am Ritzel	+	+	-	-	-

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass dem Praxisschmierstoff A für alle Prüfläufe eine Schadenskraftstufe > 10 und eine „GFT-hoch“ zugeordnet werden kann. An den Varianten I und III trat keine Schabemarke auf. Im Prüflauf mit dem treibenden Rad konnte die Schabemarke vom Ritzel auf das Rad verlagert werden. Es zeigten sich etwas höhere Absolutwerte der Profilformabweichung an der Referenz (C-GF 1 und C-GF 2). Ein möglicher Grund hierfür ist, dass durch den vorzeitigen Eingriff in dem Bereich der Schabemarke Pressungsüberhöhungen auftreten, welche zu verstärkter Graufleckigkeit führen können. Zudem wird auf Grund der Überlagerung von Schabemarke und Graufleckigkeit die Auswertung der Profilformabweichung erschwert. Die Ergebnisse aller Prüfläufe sind hinsichtlich der Graufleckigkeit und im Rahmen der üblichen Versuchsstreuung gleichwertig unter der Voraussetzung, dass Profilformabweichungen durch Schabemarken bei der Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

Untersuchungen mit dem Praxisschmierstoff B

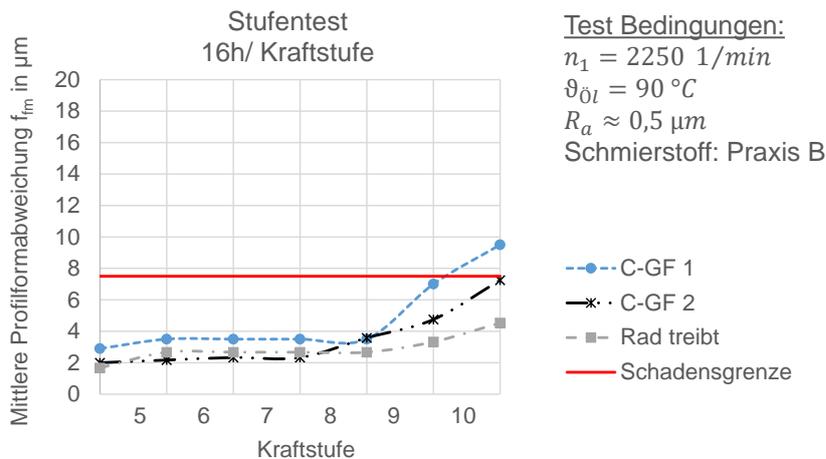


Bild 7-33: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Versuch mit dem Praxisschmierstoff B mit treibendem Rad im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel

Es wurde ein Stufentest mit treibendem Rad und dem Praxisschmierstoff B durchgeführt. Die Versuche C-GF 1 und C-GF 2 mit treibenden Ritzel wurden im Rahmen des Versuchspakets „Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest“ mit dem Praxisschmierstoff B durchgeführt und dienen als Referenz. Bild 7-33 zeigt die Verläufe der mittleren Profilformabweichungen für alle Versuche mit dem Praxisschmierstoff B im Stufentest. Im nicht gelaufenen Zustand sind die üblichen fertigungsbedingten Abweichungen für alle Prüfläufe zu erkennen. Die Profilformabweichungen aller Varianten steigen von Kraftstufe 5 bis Kraftstufe 8 kaum an und zeigen einen leichten Anstieg in den Kraftstufen 9 und 10. Der Prüflauf C-GF 1 überschreitet das

Schadenskriterium in der Kraftstufe 10. Für die Prüfläufe C-GF 2 und „Rad treibt“ wurden jeweils auch nach der Kraftstufe 10 Profilformabweichungen unterhalb des Schadenskriteriums von $7,5 \mu m$ ermittelt. Die Verläufe der Graufleckenfläche und des Masseverlusts der Varianten C-GF 1, C-GF 2 und „Rad treibt“ zeigen eine vergleichbare Charakteristik und können dem Anhang (s. Bild A.10-26 und Bild A.10-27) entnommen werden. Im Prüflauf „Rad treibt“ trat weder am Ritzel noch am Rad eine Schabemarke auf.

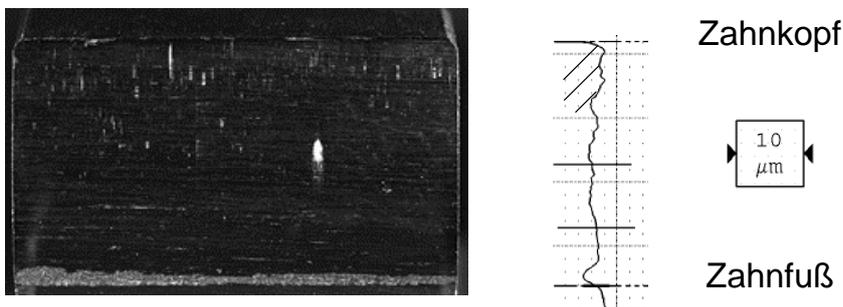


Bild 7-34: Exemplarische Zahnflankenfotos und Profilmessschriebe des Ritzels nach Ende des Stufentests mit geänderter Treibrichtung und Praxisschmierstoff B

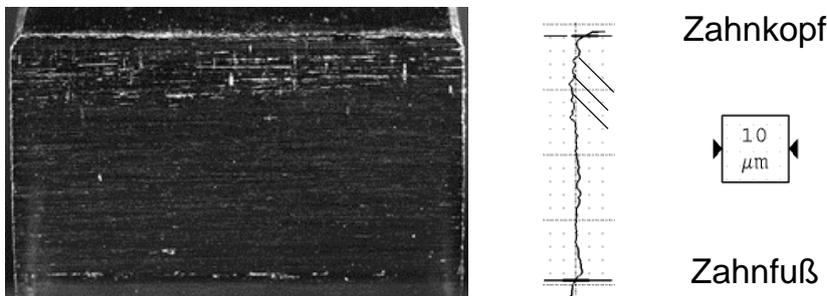


Bild 7-35: Exemplarische Zahnflankenfotos und Profilmessschriebe des Rads nach Ende des Stufentests mit geänderter Treibrichtung und Praxisschmierstoff B

In Bild 7-34 und Bild 7-35 sind exemplarisch die Zahnflankenbilder und Profilformabweichungen dargestellt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass dem Praxisschmierstoff B unter Änderung der Treibrichtung eine Schadenskraftstufe > 10 und eine „GFT-hoch“ zugeordnet werden kann. Dies entspricht grundsätzlich dem Ergebnis in den beiden Referenzläufen C-GF 1 und C-GF 2. Es zeigten sich etwas höhere Absolutwerte der Profilformabweichung an der Referenz (C-GF 1 und C-GF 2). In einem weiteren Versuchsabschnitt wurde der Stufentest C-GF 2 um einen Dauertest erweitert. Hier zeigte sich im Dauertest eine Schabemarke am Ritzel. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die leicht erhöhten Werte der Profilformabweichung im Stufentest mit treibenden Ritzel auf eine Pressungsüberhöhung aufgrund des vorzeitigen Eingriffsstoß zurückzuführen sind. Die Ergebnisse aller Prüfläufe sind hinsichtlich der Graufleckigkeit und im Rahmen der üblichen Versuchsstreuung vergleichbar und in Tabelle 7-16 dargestellt.

Tabelle 7-16: Rauheitswerte der Prüfräder und Ergebnisse der Prüfläufe - Vermeidung der Schabemarke (Praxis B)

Versuch	ST1	ST2	14.2
Variante	C-GF 1	C-GF 2	Rad treibt
Rauheit Ra Ritzel in μm	0,55	0,52	0,54
Rauheit Ra Rad in μm	0,53	0,48	0,57
Rauheit Ra Paarung in μm	0,54	0,50	0,56
Schadenskraftstufe	=10	>10	>10
GF-Klasse	hoch	hoch	hoch

7.4.4 Einfluss der Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest auf den Dauertest

Aufgrund der Ergebnisse in den vorherigen Versuchspaketen wurde untersucht, wie sich die Erweiterung der Kraftstufen auf das Langzeitverhalten im Dauertest auswirkt. Hierzu wurde ein Dauertest, welcher nach FVA 54/7 aus 80 Stunden in Kraftstufe 8 und bis zu 400 Stunden in Kraftstufe 10 besteht, an den mit den Kraftstufen 11 und 12 erweiterten Versuch (C-GF 2) mit dem Praxisschmierstoff B angeschlossen. Um eine Referenz zu erhalten, wurde ein weiterer Versuch unter Verwendung des gleichen Praxisschmierstoffs B mit Stufen- und Dauertest nach FVA 54/7 durchgeführt. Die Laufzeit der Dauertests wurde auf Grund der langen Laufzeiten auf 240 Stunden begrenzt.

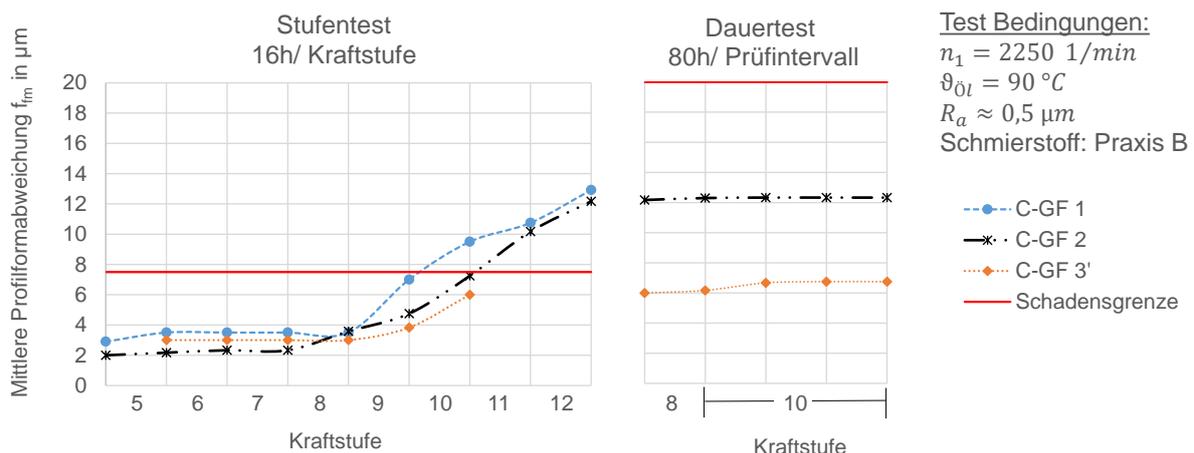


Bild 7-36: Verläufe der mittleren Profilformabweichung im Dauertest nach Erweiterung des Stufentests mit dem Praxisschmierstoff B

Es zeigte sich, dass der Verlauf der mittleren Profilformabweichungen im Dauertest nach der Erweiterung im Stufentest (C-GF 2) im Vergleich zur Referenz (C-GF 3') um ca. 6 μm zu höheren Werten verschoben ist und ansonsten eine vergleichbare Charakteristik aufweist. Die Erhöhung der Profilformabweichung von 6,2 auf 6,8 μm im ersten Intervall der Kraftstufe 10 im Dauertest kann als gering betrachtet werden. Die Verläufe der Graufleckenfläche und des Masseverlusts bestätigen dies und können dem Anhang (s. Bild A.10-28 und Bild A.10-29)

entnommen werden. Es trat kein vorzeitiger Ausfall durch Grübchen oder andere Zahnradschäden auf. Im Dauertest zeigte sich im Prüflauf mit C-GF 2 eine Schabemarke. Bild 7-37 zeigt exemplarische Zahnflankenfotos der Prüfläufe C-GF 2 und C-GF 3' nach Ende des Dauertests. Im Dauertest des Prüflaufs C-GF 2 trat eine Schabemarke am Ritzel auf (s. Bild 7-37 bzw. Bild A.10-32). Die im Profilmessschrieb durch die Schabemarke auftretende erhöhte Abweichung wurde für die Bestimmung der Profilformabweichung durch Graufleckigkeit nicht berücksichtigt. Es wurde lediglich die Profilformabweichung berücksichtigt, welche durch die Graufleckigkeit hervorgerufen wurde.



Bild 7-37: Exemplarische Zahnflankenfotos der Ritzel C-GF 2 (links) und C-GF 3' (rechts) nach Ende des Dauertests mit Praxisschmierstoff B

Auf Basis der hier durchgeführten Versuche ist nach einer Erweiterung des Stufentests um die Kraftstufen 11 und 12 im Dauertest eine gleiche Entwicklung der Schadenskenngößen wie unter Standardprüfbedingungen zu erwarten. Die Werte der charakteristischen Schadenskenngößen sind um den Anfangswert im Dauertest verschoben.

8 Auswertung und Diskussion

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Auswertung und Diskussion der theoretischen und experimentellen Untersuchungen. Dabei sind konsequent Verweise zu bisherigen Abschnitten, Bildern und Tabellen eingefügt, die für das Gesamtverständnis meist nicht benötigt werden, das Nachvollziehen von Einzelzusammenhängen aber deutlich erleichtert.

Die Untersuchungen sind in die Untersuchungen zur Praxisauglichkeit und Weiterentwicklung der Testmethode nach FVA 54/7 [Sch93] aufgeteilt. Zudem erfolgen in diesem Abschnitt die Ableitung von Empfehlungen für eine zuverlässige Beurteilung von Getriebeölen im Graufleckentest.

8.1 Bewertung der Praxis-Übertragbarkeit der Ergebnisse des Graufleckentests

In diesem Kapitel sind die Auswertung und die Diskussion der experimentellen Untersuchungen zur Bewertung der Übertragbarkeit der Ergebnisse des Graufleckentests nach FVA 54/7 [Sch93] auf Praxisgetriebe zusammengefasst. Um den Einfluss des Werkstoffs auf die Ergebnisse im Graufleckentest zu untersuchen, erfolgten Stichversuche mit den Werkstoffen 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6 (s. Kapitel 7.1). Zur Untersuchung des Einflusses von praxisnahen Verzahnungen auf das Testergebnis wurden mittels unterschiedlicher Verzahnungsvarianten insbesondere die Feingeometrie (Zahnflankenkorrekturen) und das Zahnflankenschleifverfahren (Profilschleifverfahren) berücksichtigt sowie eine praxisnah korrigierte Schrägverzahnung untersucht (s. Kapitel 7.3). Zudem wurde im Rahmen von Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke die Treibrichtung von treibendem Ritzel auf treibendes Rad geändert (s. Kapitel 7.4.3). Da der Betrieb mit treibendem Rad in der Praxis beispielsweise häufig in Windkraftgetrieben Anwendung findet, wird in diesem Kapitel auf die erzielten Ergebnisse im Hinblick auf die Übertragbarkeit in die industrielle Praxis eingegangen.

8.1.1 Einfluss des Werkstoffs

Es wurden vergleichende Untersuchungen im Rahmen von Stufentests angelehnt an FVA 54/7 [Sch93] mit einsatzgehärteten Prüfzahnradern aus den Werkstoffen 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6 durchgeführt. Insgesamt kann festgehalten werden, dass für alle durchgeführten Versuche die Verläufe der Profilformabweichung, der Graufleckenfläche und des Masseverlusts im Mittel gleichwertig sind. Die Betrachtung der Profilmessschriebe und Zahnflanken zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Werkstoffen 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6.

Es wurde für den Werkstoff 18CrNiMo7-6 zweimal $SKS = 9$ und einmal $SKS = 8$ ermittelt. Die Untersuchungen mit dem Werkstoff 16MnCr5 ergaben zweimal $SKS = 8$ und einmal $SKS = 9$ (s. Tabelle 7-2). Nach DIN 3990-16 [DIN20] liegt die Wiederholbarkeit r des Ergebnisses aus dem Stufentest des Testverfahrens innerhalb einer Kraftstufe. Somit ist die Abweichung der Ergebnisse als klein und nicht ausschlaggebend für die Bewertung von Schmierstoffen zu betrachten. Zudem ergab sich anhand der ermittelten SKS sowie der Graufleckenentwicklung über die Versuchslaufzeit für alle Versuche mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A eine Graufleckentragfähigkeitsklasse „mittel“.

Es zeigt sich somit für die Versuche zum Werkstoffeinfluss kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Werkstoffen 16MnCr5 und 18CrNiMo7-6. Diese Ergebnisse bestätigen die

Ergebnisse von Schönnenbeck [Sch84] und Lützig [Lüt07]. Zudem entspricht dies dem aktuellen Stand des Wissens zur Grübchentragfähigkeit. Der Grundwerkstoff ist von untergeordneter Bedeutung, solange nach der Wärmebehandlung vergleichbare Werkstoffeigenschaften vorliegen. Für eine vergleichbare Graufleckentragfähigkeit müssen insbesondere vergleichbare Oberflächeneigenschaften (Härte, Gefügebestandteile und –struktur etc.) vorliegen. Insbesondere der Einfluss von Gefügebestandteilen und –struktur auf die Graufleckentragfähigkeit wird in neueren Studien z.B. von Oila et al. [Oil03, Oil05b] thematisiert. Die Voraussetzung zur Übertragbarkeit der Testergebnisse auf die industrielle Anwendung ist somit ein vergleichbarer Werkstoffzustand bei einer Wärmebehandlung nach Stand der Technik.

Die im Graufleckentest nach FVA 54/7 ermittelten Schmierstoffkennwerte lassen sich unter Beachtung obiger Hinweise auf Schmierstoff-Getriebekonzepte mit Zahnrädern aus 18CrNiMo7-6 übertragen. Dennoch ist zu beachten, dass die Möglichkeit besteht auf eine Vielzahl von Daten insbesondere im Hinblick auf Graufleckentests mit Zahnrädern aus dem Werkstoff 16MnCr5 zurückzugreifen. Zudem liegt ein großer Erfahrungswert für die Wärmebehandlung der C-GF-Verzahnungen aus 16MnCr5 vor. Da die Anpassung des Werkstoffs keine wesentlichen Vorteile bietet, wird weiterhin die Nutzung der Werkstoffs 16MnCr5 für die standardisierten Prüfverzahnungen im Graufleckentest empfohlen.

8.1.2 Einfluss der Geometrie und des Herstellverfahrens

Für die experimentellen Untersuchungen im Versuchspaket „Variation Prüfverzahnung“ wurde jeweils ein Stufen- und ein Dauertest mit der C-GF-Verzahnung sowie den Prüfverzahnungen der Varianten I, II, III und IV durchgeführt. Die Geometriedaten der Verzahnungsvarianten sind in Kapitel 5.2 zu finden. Um bei der experimentellen Durchführung mit der Variante IV vergleichbare Verhältnisse zu sicher zu stellen, wurden die Drehmomente der einzelnen Kraftstufen am Ritzel so angepasst, dass hinsichtlich Hertz'scher Pressung im Wälzpunkt und minimaler Schmierfilmdicke ähnliche Werte im Vergleich zur C-GF-Verzahnung vorlagen. Die verwendeten Drehmomente, resultierenden Hertz'schen Pressungen am Wälzpunkt und minimalen Schmierfilmdicken sind in Abschnitt 5.3.2 dokumentiert.

Die Verläufe der Profilformabweichung, der Graufleckenfläche und des Masseverlusts zeigen für alle Varianten eine ähnliche Charakteristik. An allen Varianten befinden sich die graufleckenbedingten Auskolkungen hauptsächlich unterhalb des Wälzkreises. Für die Varianten III und IV verschiebt sich das Maximum der Auskolkung aufgrund der Korrekturen etwas weiter weg vom Eingriffsbeginn. Besonders im Dauertest zeigen die Varianten III und IV sehr ähnliche Profilmessschriebe. Der Betrag der maximalen Auskolkung ist für alle Varianten vergleichbar. Die mit unterschiedlichen Prüfverzahnungen unter Verwendung des Schmierstoffs FVA 3A ermittelten Testergebnisse sind in Tabelle 8-1 zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse „Variation der Prüfverzahnung“

Variante	C-GF	I	II	III	IV
SKS	9	9	9	9	9
GFT-Klasse	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
Laufzeit im Dauertest (KS 10)	160 h	240 h	160 h	80 h	80 h

Unter Verwendung der praxishen Varianten I, II, III und IV konnte dem Referenzschmierstoff FVA 3A einheitlich die Schadenskraftstufe 9 zugeordnet werden. Dies entspricht dem Testergebnis des Standard-Graufleckentests nach FVA 54/7 unter Verwendung der C-GF-Verzahnung. Es wurden Laufzeiten im Dauertest von 80 h bis 240 h von den möglichen 400 h in Kraftstufe 10 erreicht. Der Dauertest wurde nach dem Intervall beendet, in welchem das Schadenskriterium überschritten wurde. Hierbei betrug die Laufzeit im Dauertest im Versuch mit

der C-GF-Verzahnung und der Variante II jeweils 160 h in Kraftstufe 10. Unter Verwendung der Variante I wurden 240 h in der Kraftstufe 10 erreicht. In den Versuchen, in welchen die Verzahnungsvarianten III und IV verwendet wurden, wurde jeweils nach einer Laufzeit von 80 h in Kraftstufe 10 das Schadenskriterium überschritten. Die Laufzeiten der Untersuchungen mit den Varianten I, II, III und IV weichen somit maximal ein Intervall von der Laufzeit mit der C-GF-Verzahnung ab. Dies entspricht den Beobachtungen von Schönnenbeck und Emmert, in welchen die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses eines Graufleckentests im Bereich eines Kontrollintervalls im Dauertest festgestellt wird [Emm94, Sch84].

Unter Einbezug aller schadenstypischen Kenngrößen sind die Ergebnisse somit als gleichwertig einzustufen. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen grundsätzlich die Übertragbarkeit des Graufleckentests auf praxisnahe Verzahnungen mit Korrekturen der Mikrogeometrie, Fertigung im Profilformschleifverfahren und Schrägungswinkeln $\beta \neq 0$.

Die durchgeführten Versuche lassen darauf schließen, dass bei Änderung des Schleifverfahrens von MAAG-0° Glattschliff auf Profilschleifen keine signifikante Auswirkung auf das Testergebnis zu erwarten ist. Dies bestätigt die Ergebnisse des Forschungsvorhabens FVA 259/II-III [Liu01]. Die unterschiedlich gefertigten Prüfräder wurden anhand vergleichbarer Ra-Werte der Zahnflanken im Neuzustand ausgewählt. Weitere Rauheitsmesswerte wurden begleitend ausgewertet und insbesondere der Rpk-Wert zeigte größere Abweichungen zwischen den Schleifverfahren. Da das Auftreten von Graufleckigkeit stark von der Zahnflankenrauheit abhängt, konnte bestätigt werden, dass der Ra-Wert im Neuzustand eine geeignete Größe für den Vergleich von Rauheitswerten sowie die Beurteilung der Graufleckentragfähigkeit geschliffener Verzahnungen darstellt.

Eine Modifikation der C-GF-Verzahnung in Form einer Kopfkantenabrundung oder Kopfrücknahme lässt anhand der hier durchgeführten Versuche keinen signifikanten Einfluss auf das Testergebnis erkennen. Die Prüfverzahnungen I, III und die C-GF-Verzahnung wiesen bei den in den durchgeführten Untersuchungen vorliegenden Testbedingungen unterschiedliche Sicherheiten gegen Graufleckenbildung auf, wobei alle berechneten Sicherheitswerte $S_\lambda < 1$ nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] waren. Es konnte durch die experimentellen Untersuchungen bestätigt werden, dass bei Sicherheiten gegen Graufleckenbildung zwischen 0,5 und 1 stets eine deutliche Graufleckenbildung zu erwarten ist. Auch die Position der maximalen Auskolkung auf der Eingriffstrecke im Versuch stimmt mit dem Ort der berechneten Schmierfilmdicke für alle Varianten überein. Somit kann die gute Übereinstimmung der Berechnungsmethode mit der Praxis gezeigt werden. Obwohl die berechneten Sicherheiten der Varianten I, III und C-GF leicht abweichend waren, trat eine vergleichbare Graufleckigkeit über die Versuchslaufzeit auf. Dieses Ergebnis kann dazu genutzt werden die Ergebnisse aus der Berechnung nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a], welche die Geometrie und wesentliche Einflussgrößen erfasst, einfacher zu bewerten. Durch die Verwendung der Schrägverzahnung konnte bei gleichen Bedingungen in Bezug auf Hertz'sche Pressung und minimale Schmierfilmdicke ebenfalls kein Einfluss auf das Testergebnis im Graufleckentest nach FVA 54/7 festgestellt werden. Dies zeigt die gute Anwendbarkeit des Rechenverfahrens nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a].

Zusammenfassend im Hinblick auf den Vergleich der experimentellen Ergebnisse und der durchgeführten Berechnungen wird verdeutlicht, dass der Einfluss der Korrekturen auf die Grauflecken-Gefährdung begrenzt ist. Ein deutlicherer Einfluss der Korrekturen zeigt sich hinsichtlich des vorzeitigen Eingriffs. Zu beachten ist allerdings, dass bei Ölen mit einer höheren Graufleckentragfähigkeit ggf. ein Einfluss auf die Testergebnisse durch die Minderung des

vorzeitigen Eingriffs und die Reduktion der Ausbildung der Schabemarke nicht auszuschließen ist.

Auf Grundlage der hier erzielten Ergebnisse kann somit davon ausgegangen werden, dass die Testergebnisse aus dem Graufleckentest nach FVA 54/7 mit der C-GF-Verzahnung grundsätzlich auf praxisnahe Verzahnungen übertragbar sind. Der MAAG-0° Glattschliff findet zwar in der Praxis nur noch selten Anwendung, dennoch hat sich das Schleifverfahren durch die hohe Konstanz in der Fertigung bewährt. Die Umstellung auf das Profilschleifverfahren scheint ggf. möglich, wobei zumindest mit Blick auf das Testergebnis durch eine Umstellung des Schleifverfahrens kein Vorteil zu erwarten ist. Eine Schrägverzahnung ist aufwändiger in der Fertigung und zeigte keine Vorteile gegenüber einer Geradverzahnung in Bezug auf das Testergebnis. Aus diesen Gründen wird die Verwendung einer Schrägverzahnung im Prüfverfahren nicht empfohlen. Die Verwendung der Korrekturen wie Kopfrücknahme und Kopfkantenabrundung ist im Hinblick auf die Vermeidung der Schabemarke vorteilhaft für eine erleichterte Auswertung. Allerdings sind Korrekturen mit Toleranzen behaftet und deren Auswirkungen sind lastabhängig. Zudem existieren Untersuchungen insbesondere an Getrieben großer Baugrößen, welche einen positiven Einfluss von Kopfrücknahmen auf die Graufleckentragfähigkeit dokumentieren [Lüt07]. Schrade [Sch99b] beobachtet, dass durch die Korrekturen die unvermeidliche Pressungserhöhung in einem wenig graufleckengefährdeten Bereich gelegt werden muss, wenn die Graufleckentragfähigkeit gesteigert werden soll. Die Auswirkung auf die Tragfähigkeit ist somit stark abhängig von der resultierenden Lastverteilung. Daher sind vor einer möglichen Umsetzung ggf. weitere Untersuchungen notwendig.

8.1.3 Einfluss der Treibrichtung

Im Rahmen der Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke wurden experimentelle Untersuchungen bei geänderter Treibrichtung durchgeführt. Im Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] treibt das Ritzel. Dies kann eine Abweichung zu bestimmten Praxisgetrieben wie beispielsweise Windkraftgetrieben darstellen. In Windenergieanlagen wird die Eingangsstufe in der Regel als Planetenstufe ausgelegt. Der Planetenträger der Planetenstufe im Eingang ist funktionell mit dem Rotor verbunden. Somit treibt das Rad anstelle des Ritzels. Aus diesem Grund können die vorliegenden Untersuchungen auch genutzt werden, um eine Aussage zum Einfluss der Treibrichtung auf die Ergebnisse im Graufleckentest abzuleiten. Die Untersuchungen erfolgten anhand des Referenzschmierstoffs FVA 3A und zwei Praxis-schmierstoffen. Es konnte in den durchgeführten Untersuchungen gezeigt werden, dass kein signifikanter Einfluss auf die Testergebnisse bei Änderung der Treibrichtung zu erwarten ist. Tabelle 8-2 fasst die ermittelten Ergebnisse zusammen.

Tabelle 8-2: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse „Einfluss der Treibrichtung“

Schmierstoff	FVA 3A		Praxis A		Praxis B	
	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad
Treiber	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad
Schadenskraftstufe	9	9	> 10	> 10	> 10	> 10
GF-Klasse	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch

Für den Referenzschmierstoff FVA 3A konnte unabhängig von der Treibrichtung die SKS = 9 und die „GFT-mittel“ ermittelt werden. Für die Untersuchungen mit den Praxis-schmierstoffen wurden jeweils zwei Versuche mit treibenden Ritzel und jeweils ein Versuch mit treibenden Rad durchgeführt. Für den Praxis-schmierstoff A ergab sich jeweils die SKS > 10 und die „GFT-hoch“ nach FVA 54/7 [Sch93] in allen drei Versuchen unabhängig von der Treibrichtung. In den Versuchen ST1 und ST2 mit den Praxis-schmierstoff B und treibenden Rad wurde ein-

mal die $SKS = 10$ (ST1) und einmal die $SKS > 10$ (ST2) ermittelt. Da die gemittelte Zahnflankenrauheit des Prüfradpaares für den Versuch ST2 näher an dem geforderten Wert $Ra = 0,5 \mu\text{m}$ lag, wurde die Schadenskraftstufe analog zu DIN 3990-16 [DIN20] zu $SKS > 10$ bestimmt. Diese Abweichung der ermittelten Schadenskraftstufen der beiden Versuche bei gleichen Prüfbedingungen liegt nach DIN 3990-16 innerhalb der Wiederholgenauigkeit des Testverfahrens. Im Versuch mit dem Praxisschmierstoff B und treibenden Rad wurde ebenfalls die $SKS > 10$ ermittelt. Es erfolgte zudem eine Einteilung in die „GFT-hoch“ für alle drei Versuche mit dem Praxisschmierstoff B unabhängig von der Treibrichtung.

Zudem wurde deutlich, dass bei den Untersuchungen mit FVA 3A die Profilformabweichungen und die Graufleckenfläche unabhängig von der Treibrichtung nahezu gleiche Werte aufwiesen. Für die Untersuchungen mit den Praxisschmierstoffen A und B wurden leicht höhere Werte der Profilformabweichungen und Graufleckenfläche mit treibenden Ritzel festgestellt. Unter Verwendung der Praxisschmierstoffe zeigte sich die Tendenz eine Schabemarke am Ritzel auszubilden (s. Kapitel 7.2 und Kapitel 7.4.4). Somit ist davon auszugehen, dass durch das Auftreten der Schabemarke entweder mehr Graufleckigkeit auftritt oder die Auskolkung der Schabemarke nicht vollständig herausgerechnet werden kann. Das vollständige Herausrechnen der Schabemarke gestaltet sich schwierig und führt zu einer ungenaueren Bewertung der Schmierstoffe.

Wird die Schabemarke vom Ritzel auf das Rad verlagert, könnte dies in der Folge zu mehr Graufleckigkeit am Rad führen. In den hier durchgeführten Untersuchungen wurde an den Rädern, welche eine Schabemarke aufwiesen, keine erhöhte Graufleckigkeit festgestellt. Da die Auswertung des Graufleckentests ausschließlich am Ritzel erfolgt, wäre eine erhöhte Graufleckengefährdung am Rad durch das Auftreten einer Schabemarke nach aktuellem Kenntnisstand vertretbar. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass bei dem Betrieb mit treibenden Rad die Ergebnisse des Graufleckentests nach FVA 54/7 übertragbar sind.

8.2 Weiterentwicklung des Testverfahrens

In diesem Kapitel sind die Untersuchungen zur Weiterentwicklung des Testverfahrens zusammengefasst. Um Möglichkeiten aufzuzeigen, das sehr aufwändige Testverfahren zu kürzen, erfolgten theoretische Studien zur Begrenzung des Stufen- und Dauertests (s. Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2). Zudem wurden experimentelle Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest durchgeführt (s. Kapitel 7.4.1). Zur Untersuchung von unterschiedlichen Anwendungsfällen erfolgten experimentelle Erprobungen mit Prüfbedingungen, welche an die Bedingungen in Automobilgetrieben und Windkraftgetrieben angelehnt sind (s. Kapitel 7.4.2). Zur Überprüfung einer weitergehenden Differenzierbarkeit von hochtragfähigen Schmierstoffen im Graufleckentest wurde die Erweiterung des Stufentests um die Kraftstufen 11 und 12 untersucht (s. Kapitel 7.2 und Kapitel 7.4.4). Zudem wurden zur Vermeidung der Schabemarke experimentelle Untersuchungen mit zwei Verzahnungsvarianten sowie mit Änderung der Treibrichtung durchgeführt (s. Kapitel 7.4.3). Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse ausgewertet und diskutiert.

8.2.1 Begrenzung von Zeit- und Dokumentationsaufwand im Testverfahren

Der Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] ist mit einer maximalen Laufzeit von ca. 8 Wochen sehr zeitintensiv. Der Hauptgrund für die Zeitintensität des Testverfahrens sind die langen Laufzeiten im Dauertest. Zudem ist ein hoher Dokumentationsaufwand mit der Durchführung des Graufleckentests verbunden. Der hohe Dokumentationsaufwand begründet sich dadurch,

dass die Prüfräder nach jeder Kraftstufe im Stufentest und nach jedem Intervall im Dauertest ausgebaut, vermessen, hinsichtlich ihrer Graufleckigkeit bewertet und wieder eingebaut werden müssen. Die hier durchgeführten Studien helfen den hohen Zeit- und Dokumentationsaufwand des Testverfahrens zu reduzieren.

Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest

Im Dauertest nach FVA 54/7 [Sch93] wird vor dem Einstufenversuch in der Kraftstufe 10 ein Einlauf in der Kraftstufe 8 durchgeführt. Die Laufzeit in der Kraftstufe 8 beträgt ebenfalls 80 Stunden. Basierend auf den Erkenntnissen der letzten Jahre entwickelt sich die Graufleckigkeit insbesondere für hochtragfähige Schmierstoffe in diesen 80 Stunden in der Kraftstufe 8 kaum. Im Hinblick auf eine Kürzung des Testverfahrens wurde untersucht, ob die lange Laufzeit im Einlauf des Dauertests notwendig ist. Dies kann für die Kürzung des Testverfahrens und zusätzlich für die Definition eines alleinstehenden Dauertests genutzt werden.

Zu diesem Zweck wurde die Schadensentwicklung in der Kraftstufe 8 in kurzen Abschnitten betrachtet mit dem Ziel, eine Laufzeit in der Kraftstufe 8 zu definieren, ab welcher sich die Schadenskenngößen und gemittelten Rauheitswerte nicht mehr verändern. Für alle durchgeführten Tests wurden Verzahnungen im Neuzustand verwendet. Es wurden anschließend Dauertests mit unterschiedlich langen Laufzeiten in der Kraftstufe 8 durchgeführt, um den Einfluss der Laufzeit im Einlauf auf die Schadensentwicklung in der Kraftstufe 10 abzuschätzen.

Es konnte gezeigt werden, dass in den ersten 16 Stunden in Kraftstufe 8 für den Referenzschmierstoff FVA 3A mit einer Graufleckentragfähigkeit „mittel“ der Großteil der Schädigung zu erwarten ist. Da für hochtragfähige Schmierstoffe in den 80 Stunden in Kraftstufe 8 erfahrungsmäßig kaum eine Entwicklung der Graufleckenbildung stattfindet, können die Ergebnisse mit großer Wahrscheinlichkeit auf hochtragfähige Schmierstoffe übertragen werden. Eine Reduzierung der Laufzeit in Kraftstufe 8 des Dauertests erscheint somit auf Basis dieser Untersuchungen prinzipiell möglich. Allerdings zeigen nicht alle Schmierstoffe, welche eine Schadenskraftstufe = 10 oder > 10 im Stufentest erreichen, auch eine geringe Entwicklung der Graufleckigkeit in der Kraftstufe 8 des Dauertests. Mit der Kürzung der Laufzeit in der Kraftstufe 8 kann die Anbindung an bestehende Graufleckentests und somit die Vergleichbarkeit der Schmierstoffe entfallen. Außerdem ist zu beachten, dass bei Variation der Prüfbedingungen die Laufzeiten für den benötigten Einlauf variieren können.

Bei den vorliegenden Standardbedingungen wurde für fünf verschiedene Prüfverzahnungen in unterschiedlichen Abschnitten über der Laufzeit in der Kraftstufe 8 der Einlaufgrad ϵ_R in Abhängigkeit der Rauheit bestimmt. In den durchgeführten Versuchen war zu erkennen, dass der gewünschte Einlaufgrad $\epsilon_R < 0,8$ für vier der betrachteten Prüfverzahnungen nach einer Laufzeit < 16 h in der Kraftstufe 8 erreicht wurde. Für einen Versuch würde der Einlauf in Kraftstufe 8 nach 10 Stunden mit $\epsilon_R > 0,8$ abgebrochen. Die hier verwendeten Prüfräder waren profilgeschliffen und wiesen im Gegensatz zu den restlichen Prüfrädern eine kleinere mittlere Zahnflankenrauheit auf. Für die restlichen Prüfräder war die mittlere Zahnflankenrauheit nahe der Referenz mit $R_a \approx 0,5 \mu\text{m}$. Für vier der Prüfradsätze wurde der Einlaufgrad nach einer Stunde Laufzeit in Kraftstufe 8 bestimmt. Zwei der betrachteten Prüfradsätze wurden profilgeschliffen und zwei weitere waren mit dem MAAG-0° Glattschliff hart-fein bearbeitet. Es wurde beobachtet, dass der Einlaufgrad der profilgeschliffenen Prüfradsätze nach einer Stunde bei $\epsilon_R > 0,9$ lag. Bei den mit dem MAAG-0° Glattschliff bearbeiteten Prüfradsätzen wurde der Einlaufgrad nach einer Stunde in der Kraftstufe 8 zu $\epsilon_R \approx 0,70 - 0,75$ bestimmt. Es ist allerdings zu beachten, dass einer der profilgeschliffenen Radsätze eine sehr kleine Anfangsrauheit $R_a = 0,43 \mu\text{m}$ auswies und ein Versuch mit dem MAAG-0° Glattschliff bearbeiteten Prüfradsatz

mit einem zu den restlichen Untersuchungen abweichenden Schmierstoff erfolgte. Aufgrund der kleinen Anzahl der Untersuchungen und leicht abweichenden Versuchsbedingungen, kann keine abschließende Aussage getroffen werden. Es ist allerdings naheliegend, dass diese Unterschiede nicht durch das Schleifverfahren selbst, sondern durch unterschiedliche Fertigungschargen hervorgerufen werden, da beide Verfahren diskontinuierliche Verfahren unter Verwendung von Schleifscheiben und gleicher Schleifrichtung darstellen (s. Brecher und Klocke [Bre17]).

Bei Verwendung von profilgeschliffen Prüfrädern im Testverfahren ist daher auf vergleichbare Oberflächeneigenschaften zu achten. Insbesondere für die Umsetzung eines gekürzten Einlaufs unter Verwendung von profilgeschliffen Prüfrädern sind weitere Untersuchungen sinnvoll. Hierfür sollten auch weitere Oberflächenkennwerte miteinbezogen werden. Im Rahmen der Eingangsdokumentation konnten beispielsweise abweichende Rpk-Werte der unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungsverfahren festgestellt werden (s. Abschnitt 6.5). Dies gilt es weiter zu untersuchen.

Reduzierung von Zeit- und Dokumentationsaufwand im Dauertest

Der Dauertest besteht aus einem Intervall in der Kraftstufe 8 und bis zu fünf Intervallen in der Kraftstufe 10, wobei die Laufzeit für ein Intervall 80 Stunden beträgt. Durch eine statistische Auswertung von an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnissen mit dem Standard-Graufleckentest, sollte abgeschätzt werden, ob es möglich ist die Anzahl der Intervalle im Dauertest ohne wesentlichen Erkenntnisverlust zu reduzieren (s. Abschnitt 4.1)

Durch die Auswertung wurde deutlich, dass fast 90 % der betrachteten Verläufe näherungsweise einer linearen Funktion folgen. Eine degressive Charakteristik zeigen nahezu 10 % der Verläufe. Vereinzelt waren auch progressive Entwicklungen erkennbar. Progressive Entwicklungen führten in der Regel in den ersten Intervallen zum Ausfall durch Erreichen von Profilformabweichungen $f_{im} > 20 \mu\text{m}$. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass ca. 50 % der betrachteten Tests spätestens nach 240 h in KS 10 durch Erreichen der Schadensgrenze oder Grübchenbildung beendet waren. Für die verbleibenden Testergebnisse, welche eine Laufzeit $> 240 \text{ h}$ in Kraftstufe 10 zeigten, wurde daher untersucht, ob die Werte der typischen Schadenskenngößen der ggf. wegfallenden Intervalle im Dauertest mathematisch ausreichend genau abgeschätzt werden können.

Bild 8-1 zeigt exemplarisch die möglichen Entwicklungen typischer Verläufe für die Profilformabweichung durch Graufleckigkeit im Dauertest sowie eine mögliche Reduzierung des Testverfahrens mittels Laufzeitkürzung und mathematischer Abschätzung. Es konnte gezeigt werden, dass auf Basis der in den ersten 240 h in Kraftstufe 10 ermittelten Profilformabweichungen und Graufleckenflächen der Trend für die letzten beiden Intervalle ausreichend genau abgeschätzt werden kann. Die mathematisch ermittelten Werte der Profilformabweichung und Graufleckenfläche nach 320 h und 400 h in Kraftstufe 10 entsprachen mit einer mittleren Abweichung $< 3 \%$ den experimentell ermittelten Werten. Der Masseverlust kann jedoch mit einer mittleren Abweichung von ca. 6 % nicht ausreichend zuverlässig mathematisch abgeschätzt werden, da das Auftreten von Grübchen durch diese Methode nicht vorhergesagt werden kann. Das Auftreten von Grübchen beeinflusst zwar den Masseverlust und führt zum Abbruch des Graufleckentests, findet jedoch keine direkte Anwendung in die Bewertung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen. Nach DIN 3990-16 [DIN20] wird zudem die Graufleckentragfähigkeit der Getriebeöle vorrangig auf Basis der ermittelten Profilformabweichung bestimmt. Die Ermittlung der Graufleckenfläche und des Masseverlusts dienen hauptsächlich zur Dokumentation und Kontrolle, um sicherzustellen, dass die Profilformabweichung durch

Grau-fleckigkeit bedingt ist. Aus diesen Gründen ist die ungenauere Abschätzung des Masseverlusts vertretbar.

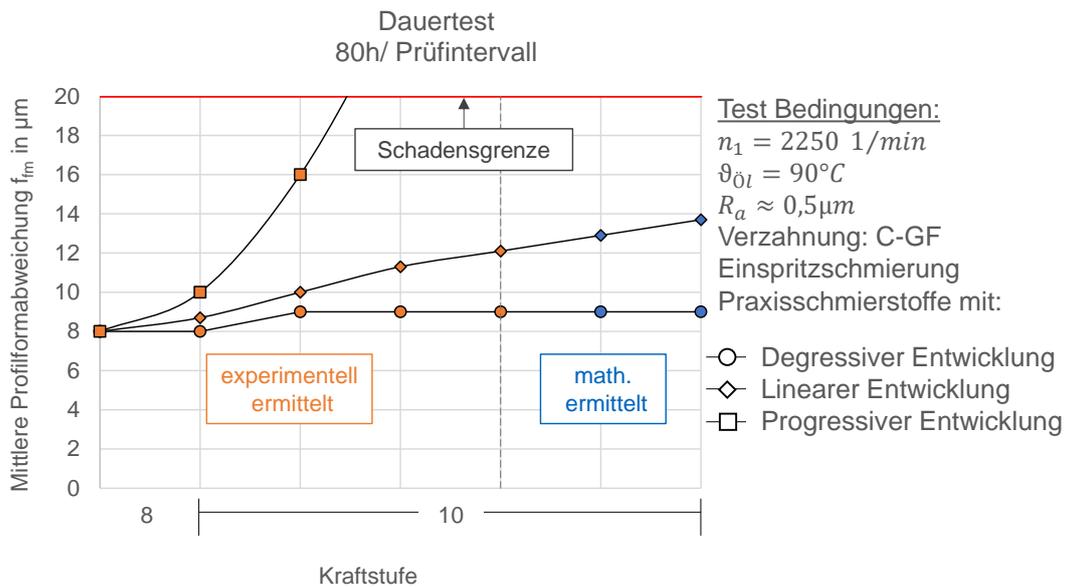


Bild 8-1: Typische Entwicklungsmöglichkeiten im Dauertest nach FVA 54/7 und Kürzung des Dauertests durch mathematische Abschätzung

Anhand der mathematisch ermittelten Werte konnte darüber hinaus die jeweils gleiche Graufleckentragfähigkeitsklasse wie bei den experimentell ermittelten Ergebnissen zugeordnet werden. Die Einteilung der GF-Klasse nach DIN 3990-16 auf Grundlage der extrapolierten Werte stimmte mit der Einteilung der GF-Klasse auf Grundlage der gemessenen Werte überein. Somit kann bei Beendigung des Dauertests nach 240 h in Kraftstufe 10 bereits eine aussagekräftige Bewertung bzgl. der Graufleckentragfähigkeit erfolgen und die weitere Entwicklung der Profilformabweichung und Graufleckenfläche mit geringen Abweichungen bestimmt werden.

Durch das Weglassen und das Extrapolieren der letzten beiden Intervalle im Dauertest besteht die Möglichkeit den Zeit- und Auswerteaufwand des Prüfverfahrens zu reduzieren und dennoch weiterhin die Anbindung an Erkenntnisse und Erfahrungen der letzten Jahre zu gewährleisten. Es wird daher empfohlen, zukünftig weitere Tests in verschiedenen Laboren und für unterschiedliche industrielle Anwendungsbereiche entsprechend zu analysieren. Bei erfolgreicher Bestätigung der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wird empfohlen, die Umsetzung dieser Maßnahme im Rahmen der DIN 3990-16 zu prüfen.

Reduzierung von Dokumentationsaufwand im Stufentest

Im Stufentest werden die Prüfräder nach jeder Kraftstufe ausgebaut, gewaschen und hinsichtlich ihrer Feingestalt vermessen. Zusätzlich erfolgt eine lichtmikroskopische Dokumentation der Zahnflanken und eine Auswertung hinsichtlich Profilformabweichung, Graufleckenfläche und Masseverlust. Ist das Schadenskriterium nicht erreicht, werden die Prüfräder wieder eingebaut und das Vorgehen wird nach der nächsten Kraftstufe wiederholt. Dies stellt einen hohen Aufwand dar und ist zudem zeitintensiv.

Durch die Schmierstoffentwicklung in den letzten Jahren zeigt sich, dass kaum Schmierstoffe mit $SKS < 8$ in der Industrie verwendet werden. Daher wurde untersucht, ob es möglich ist den Auswerteaufwand in den ersten drei Kraftstufen (5, 6 und 7) des Stufentests zu reduzieren. Das Ziel war es zu überprüfen, welche Informationen verloren gehen, wenn das Ausbauen der Prüfräder in den ersten zwei Kraftstufen 5 und 6 wegfällt.

Zu diesem Zweck wurden die Werte der mittleren Profilformabweichungen f_{fm} nach der Kraftstufe 7 anhand von 154 zufällig ausgewählten Graufleckentests mit der C-GF-Verzahnung, einer Umfangsgeschwindigkeit am Wälzpunkt von 8,3 m/s und Einspritztemperaturen von 90 °C oder 60 °C betrachtet (s. Abschnitt 4.2)

Die Bestimmung der Mittelwerte der mittleren Profilformabweichung ergab sehr kleine Werte von 3,2 μm für die „GFT-hoch“ und 4,4 μm für die „GFT-mittel“. Die Mittelwerte lagen somit deutlich unterhalb des Schadenskriteriums von 7,5 μm . Die Maximalwerte der mittleren Profilformabweichung lagen bei 6,1 μm für die „GFT-hoch“ und 7,1 μm für die „GFT-mittel“.

Da nicht nur die Mittelwerte und Maximalwerte ausschlaggebend sind, sondern wie häufig bestimmte Werte der mittleren Profilformabweichung auftreten, wurden die Werte der mittleren Profilformabweichungen in Klassen mit der Klassenweite von 0,5 μm eingeteilt und die absolute Häufigkeit der auftretenden Werte innerhalb der Klassen ermittelt.

Für die GF-Klassen „hoch“ und „mittel“ liegen alle ermittelten mittleren Profilformabweichungen f_{fm} unterhalb des Schadenskriteriums von 7,5 μm . Der Großteil (87 %) der mittleren Profilformabweichungen nach der Kraftstufe 7 liegt für die „GFT-hoch“ zwischen 2,5 μm und 4,5 μm . Für die „GFT-mittel“ sind die Werte zu etwas größeren Werten der mittleren Profilformabweichung f_{fm} verschoben und obliegen einer größeren Streuung. Der Großteil (91 %) der mittleren Profilformabweichungen liegt nach der Kraftstufe 7 für die „GFT-mittel“ zwischen 3 μm und 6 μm .

Von den 154 vorliegenden Testergebnissen wurden 101 Testergebnisse der GF-Klasse „hoch“ und 53 Testergebnisse der GF Klasse „mittel“ zugeordnet. Da diese Testergebnisse zufällig ausgewählt wurden, unterstreicht diese Aufteilung die Tendenz, dass moderne Schmierstoffe vermehrt den Anforderungen „GFT-hoch“ mit $\text{SKS} \geq 10$ entsprechen und marktübliche Schmierstoffe sehr selten mit „GFT-niedrig“ und somit $\text{SKS} \leq 7$ klassifiziert sind.

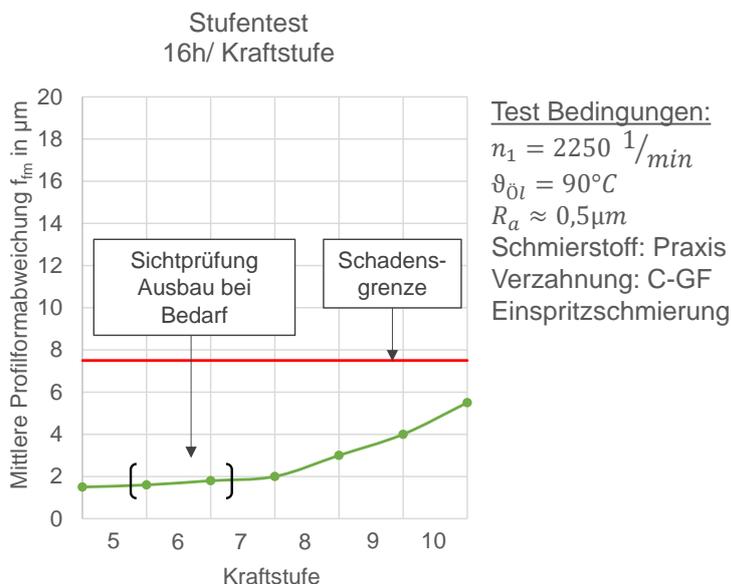


Bild 8-2: Mögliches Vorgehen zur Kürzung des Stufentests

Auf Basis dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei erstmaligem Ausbau der Prüfräder nach der Kraftstufe 7 meist eine kleine Profilformabweichung zu erwarten ist. Die zu erwartenden Werte der mittleren Profilformabweichungen liegen dabei in der Regel deutlich unter dem Schadenskriterium von 7,5 μm für den Stufentest. Es besteht daher die Möglichkeit, den Mess- und Auswerteaufwand in den ersten zwei Kraftstufen zu reduzieren. Hierdurch ergeben sich zwar Einschränkungen durch einen gewissen Informationsverlust

hinsichtlich des Beginns und der Entwicklung der Graufleckigkeit bei niedrigen Lasten. Allerdings ist kein Einfluss auf das finale Testergebnis durch Bestimmung der SKS und GF-Klasse im Vergleich zum Standardtest zu erwarten. Es ist somit eine vollständige Vergleichbarkeit hinsichtlich der Bewertung der Graufleckentragfähigkeit gegeben. Die Umsetzung

sollte daher insbesondere für Anwendungen, bei welchen $SKS \geq 9$ gefordert wird, geprüft werden. Auch eine allg. Umsetzung für höher-viskose Schmierstoffe, z.B. mit $ISO-VG \geq 220$, wird empfohlen. Für besondere Anwendungsfälle im Rahmen der Schmierstoffentwicklung, bei welchen der Verlauf bei niedrigen Lasten von Interesse ist, ist optional eine volle Dokumentation möglich. Zudem kann durch Sichtprüfung nach den Kraftstufen 5 und 6 sichergestellt werden, dass die auftretende Graufleckigkeit klein (z.B. $GF < 10\%$) ist und der Ausbau erst nach der Kraftstufe 7 notwendig ist. Wird bei der Sichtprüfung festgestellt, dass die Graufleckigkeit unerwartet hoch ausfällt, können die Prüfräder auch weiterhin nach Kraftstufe 5 und Kraftstufe 6 ausgebaut und vermessen werden. Bild 8-2 zeigt das mögliche Vorgehen.

8.2.2 Berücksichtigung von Anwendungsfällen durch modifizierte Prüfbedingungen

Es wurden durch Variation der Prüftemperatur und Ritzeldrehzahl im Graufleckentest zwei Anwendungsfälle weitergehend abgebildet. Zum einen wurden die Prüfbedingungen an die Betriebsbedingungen in Automobilgetrieben und zum anderen an die Betriebsbedingungen in Windkraftgetrieben angelehnt. Ziel war es den Einfluss der Nachbildung von unterschiedlichen Anwendungsfällen auf das Testergebnis im Graufleckentest zu untersuchen. Nach Möglichkeit sollten modifizierte Testkonzepte entwickelt werden, welche an die Betriebsbedingungen in den Anwendungsfällen enger angelehnt sind.

Prüfbedingung Automobil

Unter Verwendung des Referenzschmierstoffs FVA 3A und der Verzahnungsvariante III wurde eine Prüftemperatur von $\vartheta_{\text{öl}} = 120\text{ °C}$ in Anlehnung an die Bedingungen in Automobilgetrieben eingestellt. Es wurde anhand eines Stufen- und Dauertests sowie eines Dauertests ohne Stufentest der Einfluss auf das Versuchsergebnis im Graufleckentest untersucht. Zudem wurde ein Stufentest bei 120 °C und ein Stufentest bei 90 °C mit dem Praxischmierstoff C und der Verzahnungsvariante III durchgeführt. Der Praxischmierstoff C wurde zwar nicht speziell für eine Anwendung bei 120 °C entwickelt, wies jedoch laut Datenblatt und Hersteller bei diesen Temperaturen eine ausreichende Beständigkeit hinsichtlich Temperatur und Verschleiß auf.

Aufgrund der hohen Temperaturen und den daraus resultierenden kleinen Schmierfilmdicken kann insbesondere im Dauertest bei dieser Variation der Prüfbedingungen Verschleiß auftreten. Die erzielten Ergebnisse im Dauertest sind dann unter Beachtung des aufgetretenen Verschleißes zu interpretieren (s.a. Abschnitt 7.4.2). Zudem bleibt zu klären, ob unter diesen Testbedingungen für die Mehrzahl der Schmierstoffe eine Ölalterung zu erwarten ist. Eine auftretende Ölalterung erschwert die zuverlässige Beurteilung hinsichtlich Graufleckigkeit von Schmierstoffen. Aufgrund der langen Laufzeiten in Kombination mit einer hohen Temperatur wird das Risiko einer Ölalterung erhöht. Deshalb erscheint ein modifizierter Dauertest mit einer Prüftemperatur von 120 °C nur für die entsprechende Anwendung und geeignete Schmierstoffe mit ausreichend hoher Verschleißtragfähigkeit und Temperaturstabilität sinnvoll. Zudem ergeben sich Einschränkungen in der Prüftechnik bei einer Reihe von Prüfständen durch die begrenzte Heizleistung bei Verwendung der Einspritzschmierung. Die Prüfung der Schmierstoffe bei 120 °C ist alternativ unter Verwendung einer Tauchschmierung möglich. Die Anwendung der Tauchschmierung stellt allerdings eine Abweichung zu den Vorgaben des Prüfverfahrens nach FVA 54/7 [Sch93] bzw. DIN 3990-16 [DIN20] dar. Durch die notwendige Abweichung zum Graufleckentest nach FVA 54/7 kann daher eine Prüfung bei 120 °C lediglich als Sondertest durchgeführt werden, wobei die Ergebnisse nur untereinander direkt vergleichbar sind. Eine Anwendung im Graufleckenkurztest oder Stufentest stellt Möglichkeiten dar,

Schmierstoffe mit ausreichend hoher Verschleißtragfähigkeit bei hohen Temperaturen zu testen. Insbesondere der Graufleckenkurztest in Anlehnung an DGMK 575 [Ste02b] bei 120 °C hat sich in der Vergangenheit bereits bewährt. Die Prüfung von Schmierstoffen hinsichtlich Graufleckentragfähigkeit bei 120 °C als Sondertest ist somit grundsätzlich möglich.

Prüfbedingung Windkraft

Unter Verwendung des Referenzschmierstoffs FVA 3A und der Verzahnungsvariante III wurde eine Prüftemperatur von $\vartheta_{01} = 60 \text{ °C}$ und eine Ritzeldrehzahl von $n_1 = 375 \text{ min}^{-1}$ in Anlehnung an die Bedingungen in Windkraftgetrieben eingestellt. Es wurde anhand eines Stufen- und Dauertests sowie eines Dauertests ohne Stufentest der Einfluss der Prüfbedingungen „Windkraft“ auf das Versuchsergebnis im Graufleckentest untersucht. Die Zeitintervalle im Stufentest und im Dauertest wurden trotz der daraus resultierenden stark verkürzten Lastwechselzahl analog zum Graufleckentest nach FVA 54/7 beibehalten.

In beiden Versuchen war die auftretende Graufleckigkeit sehr gering. Eine Ursache der sehr geringen Ausprägung der Graufleckigkeit kann die geringe Lastwechselzahl sein. Da eine Erhöhung der Lastwechselzahl das Testverfahren deutlich zeitintensiver gestalten würde, ist eine Erhöhung der Lastwechselzahl für einen modifizierten Dauertest nicht zu empfehlen. Zudem treten aufgrund der geringen Drehzahlen kleinere Schmierfilmdicken im Zahnkontakt auf. Durch die kleinere Schmierfilmdicke ist von einer stärkeren Einglättung der Zahnflanken zu Testbeginn auszugehen. Zudem kann (Einlauf-)Verschleiß auftreten. Die Ergebnisse von Felbermaier [Fel15] haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass mit Absinken der spezifischen Schmierfilmdicke zunächst mit einer Überlagerung von Graufleckigkeit und Verschleiß zu rechnen ist. Verschleiß wirkt der Ausbildung von Grauflecken entgegen [Fel15, Lai08, Vrc19a]. Aufgrund der kleinen Drehzahlen und damit verbundenen kleinen Schmierfilmdicke ist davon auszugehen, dass sich die Schmierfilmdicke in diesem Übergangsbereich befindet und somit die Ausbildung der Graufleckigkeit durch Verschleiß beeinträchtigt wird. Die auftretende Graufleckigkeit in den hier durchgeführten Untersuchungen ist zu gering, um eine an diese Bedingungen angepasste Testmethode zu entwickeln. Für die Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit bei niedrigen Drehzahlen wird daher die Berechnung z.B. nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] anstelle der experimentellen Prüfung empfohlen.

Die Durchführung des vollständigen Graufleckentestes bei 60 °C ist bereits für einige Anwendungen etabliert. Da für diese Untersuchungen oftmals der vollständige Graufleckentest einmal bei 60 °C für die Entwicklung bei der Einsatztemperatur und zusätzlich ein vollständiger Graufleckentest bei 90 °C für die Einteilung nach FVA 54/7 [Sch93] bzw. DIN 3990-16 [DIN20] durchlaufen wird, ist hier ein großer zeitlicher und finanzieller Aufwand notwendig. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit geprüft, ob die Durchführung eines modifizierten Dauertests bei 60 °C ergänzend zum Graufleckentest nach FVA 54/7 zielführend ist. Die Durchführung eines Dauertests mit einer Prüftemperatur von $\vartheta_{01} = 60 \text{ °C}$ und einer Ritzeldrehzahl analog zum Standardtest von $n_1 = 2250 \text{ min}^{-1}$ sowie der Verzahnungsvariante III zeigte für die Verläufe der mittleren Profilformabweichung, der Graufleckenfläche und des Masseverlusts jeweils einen deutlichen Anstieg und eine ähnliche Entwicklung wie die Referenz bei $\vartheta_{01} = 90 \text{ °C}$. Die Werte der mittleren Profilformabweichung sind nur um ihren Startwert verschoben. Allgemein kann von keiner direkten Übertragbarkeit der Ergebnisse von der Prüftemperatur bei 60 °C auf 90 °C ausgegangen werden, da die Temperatur eine eigenständige Einflussgröße darstellt und die Wirkung der im Schmierstoff enthaltenen Additive temperaturabhängig sind. Untersuchungen von Felbermaier [Fel18] und König [Kön20] haben jedoch speziell für den Schmierstoff FVA 3A, welcher in diesen Untersuchungen verwendet wurde, eine vergleichbare Grau-

fleckentragfähigkeit bei 60 °C und 90 °C gezeigt. Daher kann von diesen Untersuchungen abgeleitet werden, dass im Falle eines modifizierten Dauertests das Schadenskriterium für eine Einteilung in die gleiche Graufleckentragfähigkeitsklasse herabgesetzt werden muss. Wird das Schadenskriterium um ca. 5 µm für einen modifizierten Dauertest herabgesetzt, wäre in diesem Fall die gleiche Laufzeit ermittelt worden. Bild 8-3 zeigt dies beispielhaft. Da dieses Ergebnis bisher nur auf einem Versuch basiert, wird zunächst eine vergleichende Bewertung der Schmierstoffe bei gleicher Prüftemperatur und keine direkte Einordnung nach FVA 54/7 bzw. DIN 3990-16 empfohlen.

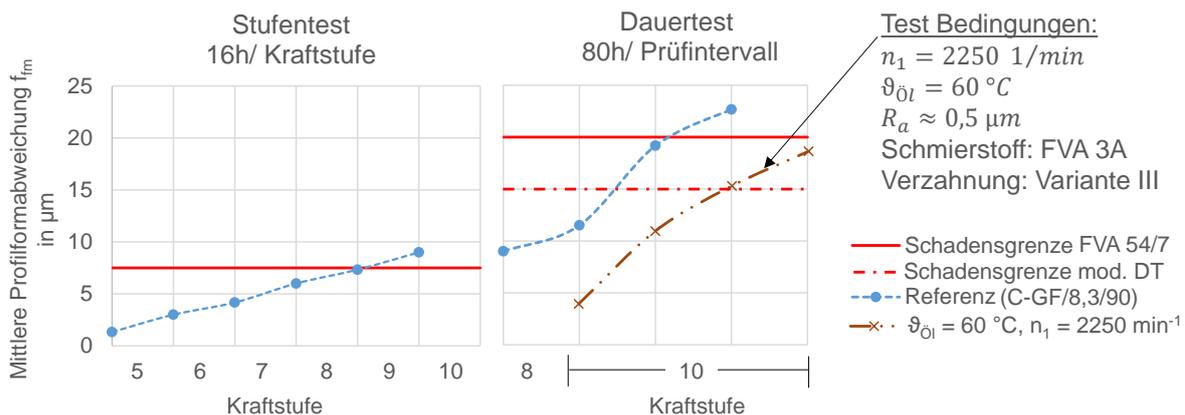


Bild 8-3: Verläufe der mittleren Profilformabweichung bei Standardbedingungen und im Dauertest bei 60 °C mit FVA 3A

Zudem können die Schmierstoffe analog zu DIN 3990-16 anhand ihrer Entwicklung im Dauertest durch Bestimmung des Gradienten der Profilformabweichungen über der Laufzeit bewertet werden. Tabelle 8-3 zeigt einen Überblick über die Gradienten, bestimmt über die Entwicklung im Dauertest. Es ist zu sehen, dass der Gradient für den Versuch „60 °C, 2250 min⁻¹, DT“ deutlich näher am Gradienten der Referenz liegt, als die restlichen Versuche. Die Gradienten wurde analog zu den Gradienten in DIN 3990-16 im Dauertest ermittelt.

Tabelle 8-3: Gradienten zur Entwicklung der Profilformabweichungen im Dauertest der Versuche „Prüfbedingung Windkraft“

Benennung	Referenz	„60 °C, 375 min ⁻¹ , ST & DT“	„60 °C, 375 min ⁻¹ , DT, Versuch 1“	„60 °C, 375 min ⁻¹ , DT, Versuch 2“	„60 °C, 2250 min ⁻¹ , DT“
Verzahnung	C-GF	Variante III	Variante III	Variante III	Variante III
Öltemperatur	90 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C
Ritzeldrehzahl	2250 min ⁻¹	375 min ⁻¹	375 min ⁻¹	375 min ⁻¹	2250 min ⁻¹
Stufentest	ja	ja	nein	nein	nein
Laufzeit in KS 8	80 h	80 h	1 h	93 h	16 h
Gradient DT	5,6	0,4	1,2	1,6	4,9

Eine Differenzierung von Schmierstoffen im modifizierten Dauertest bei $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ °C}$, $n_1 = 2250 \text{ min}^{-1}$, mit einer Laufzeit von 16 Stunden in der Kraftstufe 8 und unter Verwendung einer Prüfverzahnung der Variante III im Neuzustand als Ergänzung zum Graufleckentest nach FVA 54/7 ist grundsätzlich möglich und für Schmierstoffe, welche beispielsweise in Windkraftgetrieben Anwendung finden, zu prüfen. Alternativ kann zudem die Verwendung der C-GF-Verzahnung in diesem modifizierten Dauertest geprüft werden.

8.2.3 Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest

Es wurden anhand von zwei hochtragfähigen Praxischmierstoffen (Praxis A und Praxis B) jeweils zwei Stufentests mit der Erweiterung in Kraftstufe 11 und 12 durchgeführt.

Es konnte für den Praxisschmierstoff A in beiden Versuchen eine Schadenskraftstufe 12 ermittelt werden. Für den Praxisschmierstoff B wurde einmal die Schadenskraftstufe 10 und einmal die Schadenskraftstufe 11 ermittelt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 7-4 zusammengefasst. Da die Wiederholgenauigkeit dieses Testverfahrens nach DIN 3990-16 innerhalb einer Kraftstufe liegt, kann die Streuung der Ergebnisse als gering betrachtet werden. Es kann zudem festgehalten werden, dass sich für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zur Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest für beide Praxisschmierstoffe „GFT-hoch“ ergibt. Eine gegenüber dem Stufentest nach FVA 54/7 weitergehende Differenzierung der hochtragfähigen Schmierstoffe ist in den durchgeführten Untersuchungen anhand

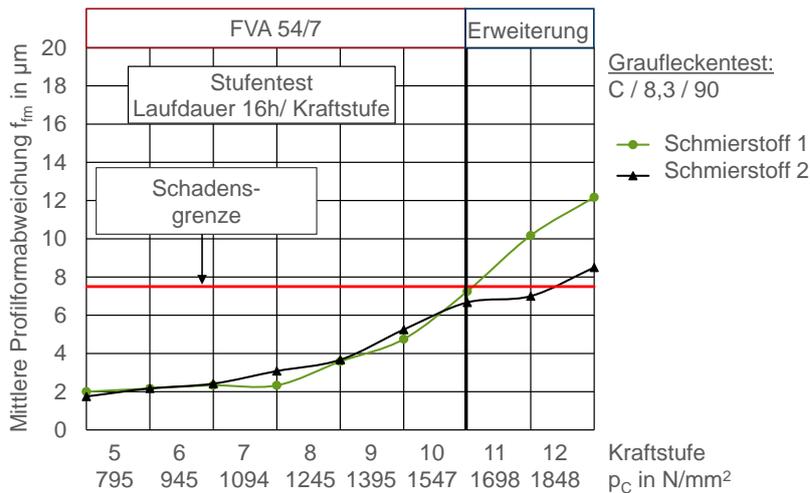


Bild 8-4: Erweiterung Kraftstufen Stufentest und Zuordnung der Kraftstufen zur auftreten Hertz'schen Pressung p_c

zur auftretenden Hertz'schen Pressung p_c der Kraftstufen 5 bis 12. Es ist zu beachten, dass durch Aufbringung eines höheren Drehmoments grundsätzlich eine größere elastische Verformung der Zähne entsteht. Die größere elastische Verformung der Zähne erhöht das Risiko für das Ausbilden einer Schabemarke.

Zudem wurde untersucht, wie sich die Erweiterung der Kraftstufen auf das Langzeitverhalten im Dauertest auswirkt. Bild 8-5 zeigt den durchgeführten Dauertest nach dem erweiterten Stufentest (C-GF 2) mit dem Praxisschmierstoff B und der Referenz (C-GF 3').

Auf Basis der hier durchgeführten Versuche ist nach Durchführung eines erweiterten Stufentests in Kraftstufe 11 und 12 im anschließenden Dauertest eine vergleichbare Entwicklung der Schadenskenngößen wie unter Standard-Bedingungen zu erwarten. Die Werte der charakteristischen Schadenskenngößen verschoben sich lediglich um den Anfangswert im Dauertest. Die Untersuchungen erfolgten allerdings bisher nur in jeweils einem Versuch und für die statistische Absicherung der Aussagen sind weitere experimentelle Untersuchungen nötig. Auf Grundlage der hier durchgeführten Untersuchungen ist zudem ein erhöhtes Auftreten von Grübchenschäden im Dauertest durch die mögliche Vorschädigung in den höheren Kraftstufen nicht auszuschließen. Es erscheint die Möglichkeit den erweiterten Stufentest im Wiederholungslauf des Stufentests anzuschließen, als eine geeignete und einfach umzusetzende Alternative um eine weitere Differenzierung hochtragfähiger Schmierstoffe zu realisieren sowie gleichzeitig die Korrelation zu den Ergebnissen des Graufleckentests nach FVA 54/7 beizubehalten.

der Kraftstufen 11 und 12 möglich. Es liegen keine Einschränkungen aus der Verzahnungsgeometrie und der Prüfstandsbelastbarkeit für die Erweiterung des Stufentests auf die Kraftstufen 11 und 12 vor. Bild 8-4 zeigt das mögliche Vorgehen zur Erweiterung der Kraftstufen 11 und 12, sowie die Zuordnung der Kraftstufen

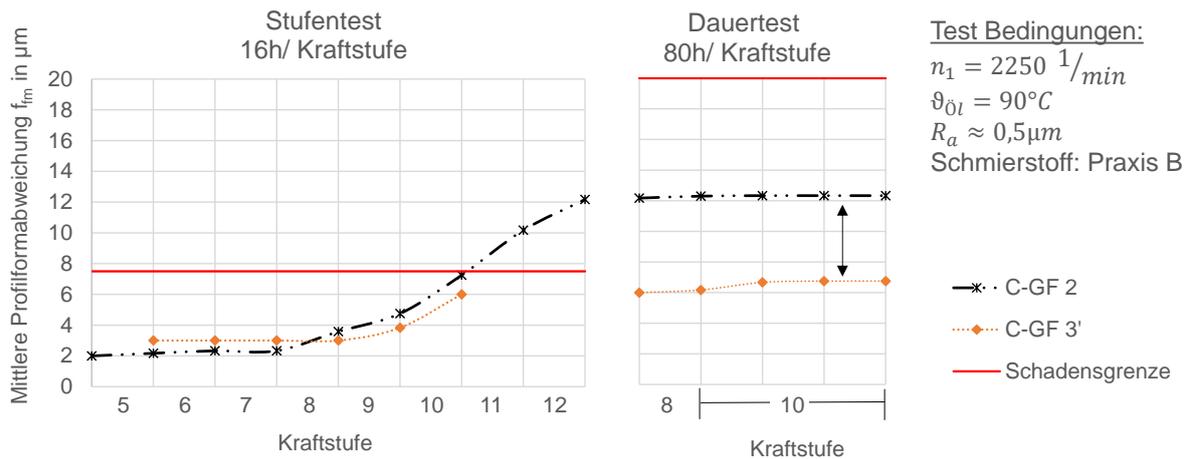


Bild 8-5: Profilverformung im Stufentest nach FVA 54/7 und erweiterten Stufentest mit Dauertest

Eine weitere mögliche Alternative wäre es, die Kraftstufen 11 und 12 nach dem Dauertest anzuschließen. Hierfür könnten beispielsweise die Delta-Werte für die Bewertung herangezogen oder ein Gradient bestimmt werden. Vor Umsetzung dieser Alternative müssen in diesem Fall aber zunächst Erfahrungswerte hinsichtlich des Einflusses des vor den Kraftstufen 11 und 12 durchgeführten Dauertests ermittelt werden.

8.2.4 Auswirkung der Anfangszustände auf die Entwicklung im Einstufenversuch

In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden in verschiedenen Versuchspaketen Einstufenversuche in der Kraftstufe 10 durchgeführt. Für diese Einstufenversuche wurden Prüfräder mit unterschiedlichen Zahnflankenzuständen hinsichtlich Graufleckigkeit vor Versuchsbeginn verwendet. Diese unterschiedlichen Zahnflankenzustände der Prüfräder resultieren aus unterschiedlichen Vorbelastungen. Folgende Untersuchungen sollen zusammengeführt werden und hinsichtlich der Auswirkung der Anfangszustände auf die Entwicklung im Einstufenversuch bewertet werden:

- Untersuchung zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest (s. Abschnitt 7.4.1)
- Betrachtung ausgewählter industrieller Anwendungsfälle (s. Abschnitt 7.4.2)
- Dauertest nach Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest (s. Abschnitt 7.4.4)

Die Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest zeigen hinsichtlich der Graufleckenentwicklung keinen Unterschied, ob ein Stufentest vor dem Dauertest durchgeführt wurde oder ob der Dauertest ohne vorherigen Stufentest erfolgte (s. z. B. Bild 7-19). Der Dauertest wurde für beide Fälle mit einer Laufzeit von 80 h in KS 8 und bis zu drei Intervallen je 80 h in KS 10 durchgeführt. Bei einer stark verkürzten Laufzeit der Kraftstufe 8 des Dauertests trat insgesamt weniger Graufleckigkeit auf. In den Verläufen der typischen Kenngrößen zeigte sich aber größtenteils und insbesondere für die ersten 80 h in der KS 10 eine vergleichbare Charakteristik wie bei den restlichen Versuchen. Es wurde für die durchgeführten Versuche die Gradienten im Dauertest nach DIN 3990-16 für die ermittelte mittlere Profilformabweichung ermittelt. Diese sind in Tabelle 8-4 dargestellt. Es ist zu sehen, dass der Versuch 1 (80 h KS 8) aufgrund von Versuchsstreuung höher ausfällt als die restlichen Versuche und insbesondere als der Versuch 3 (80 h KS 8), welcher die gleichen Versuchsbedingungen aufweist wie der Versuch 1. Zudem ist zu sehen, dass die ermittelten Gradienten nach dem ersten Intervall in der Kraftstufe 10 für alle Versuche vergleichbar ausfallen. Wird der Gradient über die jeweils ermittelte Gesamtlaufzeit berechnet, fällt dieser für die Versuche mit verkürzter Laufzeit in der

Kraftstufe 8 tendenziell geringer aus. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer stark verkürzten Laufzeit in Kraftstufe 8 eine geringere Entwicklung der Graufleckigkeit im zweiten Intervall der Kraftstufe 10 als bei der Referenz zu erwarten ist. Dieses Ergebnis ist unerwartet, da im zweiten Intervall der Kraftstufe 10 mit einem stärkeren Anstieg der mittleren Profilformabweichung zu rechnen war. Auf Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist nicht von einem Einfluss durch die Kürzung in der Kraftstufe 8 auszugehen, da zwischen den beiden verkürzten Verläufen mit sehr unterschiedlichen Laufzeiten von 2 und 32 Stunden in Kraftstufe 8 kein Unterschied zu beobachten ist. Zudem wurden die Prüfläufe mit verkürzter Laufzeit nach 240 h abgebrochen, obwohl das Schadenskriterium nicht erreicht war. Die Versuche mit einer Laufzeit von 80 Stunden in der Kraftstufe 8 waren nach 160 h durch Erreichen des Schadenskriteriums beendet. Die abklingende Steigung im zweiten Intervall der Versuche mit einer Laufzeit von 80 Stunden in der Kraftstufe 8 könnte auf eine Stagnierung der Werte im weiteren Verlauf hindeuten. Für eine abschließende und statistisch abgesicherte Bewertung müssen weitere Versuche durchgeführt werden. Dies war aufgrund des bereits sehr umfassenden Versuchsprogramms nicht möglich. Dennoch wird für alle Versuche der Gradient im Dauertest zu $> 2 \mu\text{m}$ bestimmt. Somit kann die Einteilung des verwendeten Schmierstoffs FVA 3A in die Graufleckentragfähigkeitsklasse „mittel“ für alle Versuche bestätigt werden.

Tabelle 8-4: Gradienten der Profilformabweichung im Dauertest (Kürzung Einlauf)

Bezeichnung	Laufzeit in der KS 8	Gradient DT (80 h KS 10)	Gradient DT (alle Intervalle)
Referenz mit ST	80 h	7,7 μm	5,6 μm
80h KS 8, Versuch 1	80 h	11,2 μm	8,1 μm
80h KS 8, Versuch 3	80 h	7,5 μm	6,0 μm
32 h KS 8	32 h	6,0 μm	2,2 μm
2 h KS 8	2 h	7,0 μm	2,4 μm

Es wurde jedoch deutlich, dass bei einer stark verkürzten Laufzeit in Kraftstufe 8 die Grenze im Dauertest von $20 \mu\text{m}$ nicht mehr aussagekräftig ist. Die Schadensgrenze im Dauertest muss ggf. zu geringeren Werten verschoben werden. Für einen Dauertest ohne vorher durchgeführten Stufentest und 80 Stunden Laufzeit in Kraftstufe 8 kann die Grenze von $20 \mu\text{m}$ bestehen bleiben, da hier eine ähnliche Ausprägung der Graufleckigkeit wie beim Graufleckentest nach FVA 54/7 zu erwarten ist.

Die Auswertung eines weiteren Dauertests („60°C, 2250 min⁻¹, DT“) mit einer Laufzeit von 16 h in der Kraftstufe 8 im Rahmen des Versuchspakets „Prüfbedingungen Windkraft“ zeigte ebenfalls eine Verschiebung der Werte der mittleren Profilformabweichung um ihren Startwert sowie eine vergleichbare Charakteristik zur Referenz (s. Bild 8-3). Der ermittelte Gradient im Dauertest für den Versuch („60°C, 2250 min⁻¹, DT“) über die ersten zwei Intervalle in der Kraftstufe 10 liegt bei $5,7 \mu\text{m}$ und ist somit gleichwertig zur Referenz.

In den Untersuchungen zur Erweiterung der Kraftstufen zeigte sich ebenfalls, dass die Werte der charakteristischen Schadenskenngößen lediglich um die Differenz der Anfangswerte (ca. $5 \mu\text{m}$) im Dauertest verschoben sind (s. Bild 8-5).

Tabelle 8-5 fasst die Ergebnisse zur Auswirkung der Anfangszustände auf die Entwicklung im Dauertest zusammen und zeigt, dass eine Einteilung in die GFT-Klassen anhand der Bestimmung eines Gradienten analog zu DIN 3990-16 unabhängig von der Anfangsschädigung erfolgen kann. Für eine sinnvolle Laufzeitbegrenzung kann jedoch eine neu definierte Schadensgrenze, welche an den Anfangszustand angepasst wird, notwendig sein.

Tabelle 8-5: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Auswirkung der Anfangszustände auf die Entwicklung im Dauertest

Test	Referenz	32 h KS8	„60 °C, 2250 min ⁻¹ , DT“	C-GF 2	C-GF 3'
Schmierstoff	FVA 3A			Praxis B	
Stufentest	KS 5 - 10	-	-	KS 5 - 12	KS 5 - 10
Laufzeit in KS 8	80 h	32 h	16 h	80 h	80 h
Gradient DT	5,6	2,2	4,9	0,0	0,2
GF-Klasse (DIN 3990-16)	mittel	mittel	mittel	sehr hoch	sehr hoch

8.2.5 Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke

Es wurde untersucht, ob das Entstehen einer Schabemarke am Ritzel durch Umkehr der Treibrichtung unter Verwendung der C-GF-Verzahnung vermieden werden kann. Da die Verzahnungsvarianten I und III aufgrund ihrer Mikrogeometrie dem Auftreten einer Schabemarke entgegenwirken, wurden die Verzahnungsvarianten I und III ebenfalls im Hinblick auf das Vermeiden der Schabemarke weitergehend betrachtet. Zudem wurde der Einfluss durch Umkehr der Treibrichtung sowie die Verwendung der Verzahnungsvarianten I und III auf das Ergebnis im Graufleckentest untersucht. Es wurde pro Variante jeweils ein Stufen- und ein Dauertest mit dem Referenzschmierstoff FVA 3A und dem Praxisschmierstoff A durchgeführt. Bei Verwendung des Praxisschmierstoffs A tritt in den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen eine Schabemarke im Test auf. Zur Absicherung der Ergebnisse wurde ein Stufentest mit Umkehr der Treibrichtung und dem Praxisschmierstoff B durchgeführt.

Die Tabelle 8-6 zeigt die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke unter Verwendung des Referenzschmierstoffs FVA 3A. Das Auftreten einer Schabemarke im Versuch ist mit „+“ und das Fehlen einer Schabemarke mit „-“ dargestellt. Es zeigt sich, dass bei Verwendung der Varianten I und III sowie bei Änderung der Treibrichtung keine Schabemarke am Ritzel auftrat. Dies gilt allerdings für FVA 3A und für die C-Verzahnung. Bei Änderung der Treibrichtung zeigte sich eine Schabemarke am Rad. Die Versuchsergebnisse unter Verwendung der Varianten I und III sowie bei Änderung der Treibrichtung sind hinsichtlich der Graufleckentragfähigkeit analog zur Referenz. Es lässt sich eine Schadenskraftstufe = 9 und die „GFT-mittel“ für den Referenzschmierstoff FVA 3A bestätigen.

Tabelle 8-6: Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke mit Referenzschmierstoff FVA 3A

Versuch	4.1	5.1	7.1	10.1
Variante	C-GF	I	III	Rad treibt
Schadenskraftstufe	9	9	9	9
GF-Klasse	mittel	mittel	mittel	mittel
Schabemarke am Ritzel	-	-	-	-
Schabemarke am Rad	-	-	-	+

In Tabelle 8-7 sind die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke unter Verwendung des Praxisschmierstoffs A dargestellt.

Tabelle 8-7: Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke mit Praxisschmierstoff A

Versuch	ST1	ST2	10.4	10.3	10.2
Variante	C-GF 1	C-GF 2	I	III	Rad treibt
Schadenskraftstufe	> 10	> 10	> 10	> 10	> 10
GF-Klasse	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Schabemarke am Ritzel	+	+	-	-	-
Schabemarke am Rad	-	-	-	-	+

Es konnte gezeigt werden, dass bei den Untersuchungen mit dem Praxisschmierstoff A durch Verwendung der Verzahnungsvarianten I und III sowie durch Änderung der Treibrichtung das Auftreten einer Schabemarke am Ritzel vermieden werden kann. Es trat unter Änderung der Treibrichtung eine Schabemarke am Rad auf. Die Schabemarke konnte somit im Prüflauf mit dem treibenden Rad vom Ritzel auf das Rad verlagert werden. Für alle Prüfläufe konnte dem Praxisschmierstoff A eine Schadenskraftstufe > 10 und eine hohe Graufleckentragfähigkeit zugeordnet werden. Es zeigten sich leicht höhere Absolutwerte der mittleren Profilformabweichung an der Referenz (C-GF 1 und C-GF 2). Ein möglicher Grund hierfür ist, dass durch den vorzeitigen Eingriff in dem Bereich der Schabemarke Pressungsüberhöhungen auftreten, welche zu Graufleckigkeit führen können. Zudem wird auf Grund der Überlagerung von Schabemarke und Graufleckigkeit die Auswertung der mittleren Profilformabweichung erschwert. Die Ergebnisse aller Prüfläufe sind jedoch hinsichtlich der Graufleckigkeit und im Rahmen der üblichen Versuchsstreuung gleichwertig unter der Voraussetzung, dass die Profilformabweichung im Bereich der Schabemarke im Standard-Test bei der Auswertung nicht berücksichtigt wird.

Die Tabelle 8-8 zeigt die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke mit dem Praxisschmierstoff B. Es konnte dem Praxisschmierstoff B unter Änderung der Treibrichtung eine Schadenskraftstufe > 10 und eine „GFT-hoch“ zugeordnet werden. Dies entspricht grundsätzlich dem Ergebnis in den beiden Referenzläufen C-GF 1 und C-GF 2. Es zeigten sich leicht höhere Absolutwerte der Profilformabweichung an der Referenz (C-GF 1 und C-GF 2). In einem weiteren Versuchsabschnitt (s. Kapitel 7.4.4) wurde der Stufentest C-GF 2 um einen Dauertest erweitert. Während dieser Erweiterung zeigte sich im Dauertest eine Schabemarke am Ritzel. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die leicht erhöhten Werte der mittleren Profilformabweichung im Stufentest mit treibendem Ritzel auf eine Pressungsüberhöhung aufgrund des vorzeitigen Eingriffs zurückzuführen sind. Die Ergebnisse aller Prüfläufe sind hinsichtlich der Graufleckigkeit und im Rahmen der üblichen Versuchsstreuung gleichwertig.

Tabelle 8-8: Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke mit Praxisschmierstoff B

Versuch	ST1	ST2	14.2
Variante	C-GF 1	C-GF 2	Rad treibt
Schadenskraftstufe	= 10	> 10	> 10
GF-Klasse	hoch	hoch	hoch
Schabemarke am Ritzel	-	-	-
Schabemarke am Rad	-	-	-

Die Ergebnisse insbesondere mit Praxisschmierstoff A zeigen deutlich, dass durch Verwendung der Verzahnungsvarianten I und III sowie durch Änderung der Treibrichtung das Auftreten einer Schabemarke am Ritzel vermieden werden kann. Die beschriebenen Beobachtungen zum positiven Einfluss auf das Reduzieren der Schabemarke durch Änderung der Treibrichtung und Verwendung von Verzahnungen mit Kopfkantenabrundung oder Kopfrücknahme entsprechen den Ergebnissen aus früheren Studien von Liu, Nazifi und Schrade [Liu03, Naz10a, Sch99b] und fügen sich somit gut in frühere Ergebnisse ein. Die Verwendung der Verzahnungsvarianten I und III sowie die Änderung der Treibrichtung bei der C-GF-Verzahnung zeigt hinsichtlich der Graufleckentragfähigkeit im Rahmen der üblichen Versuchsstreuung im Vergleich zum Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] gleichwertige Ergebnisse. Bei Verwendung von Schmierstoffen, bei welchen mit dem Auftreten einer Schabemarke zu rechnen ist, kann bei der C-GF-Verzahnung durch Änderung der Treibrichtung vom treibenden Ritzel auf treibendes Rad, die Schabemarke vom Ritzel auf das Rad verlagert werden. Anhand von drei verschiedenen Schmierstoffen konnte gezeigt werden, dass kein signifikanter Einfluss

auf die Versuchsergebnisse bei Änderung der Treibrichtung zu erwarten ist. Durch Änderung der Treibrichtung ist eine Schabemarke am Ritzel ohne zusätzliche Kosten durch eine zusätzliche Schleifbearbeitung vermeidbar. Das Vermeiden der Schabemarke erleichtert und vereinheitlicht die Auswertung des Graufleckentests.

8.3 Ableitung von Empfehlungen für die zuverlässige Beurteilung von Getriebeölen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse aus dem Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] grundsätzlich auf Praxisgetriebe übertragbar sind. Hierfür wurde die Verwendung des Werkstoffs 18CrNiMo7-6 für die Prüfräder, die Verwendung von praxisnahen Prüfverzahnungen sowie die Änderung der Treibrichtung untersucht. Da durch diese praxisnahen Änderungen im Testverfahren kein Einfluss auf das Ergebnis im Testverfahren festgestellt werden konnte, keine wesentlichen Vorteile durch diese praxisnahen Änderungen im Graufleckentest zu erwarten sind und mit dem bisher verwendeten Werkstoff, Prüfrädern und Treibrichtung eine große Erfahrungsbasis besteht, wird eine Anpassung dieser praxisnahen Änderungen nicht empfohlen. Es wird dennoch empfohlen die Verwendung einer Kopfkantenabrundung oder Kopfrücknahme zu prüfen, wenn zukünftig eine Umstellung des Schleifverfahrens aus anderweitigen Gründen notwendig werden sollte.

Es wurden experimentelle Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, die lange Laufzeit im Einlauf des Dauertests zu kürzen. In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Kürzung des Einlaufs in der Kraftstufe 8 im Dauertest von 80 auf 16 Stunden unter Verwendung des Referenzschmierstoffs FVA 3A möglich ist. Dies entspricht den Erfahrungen der Forschungsstelle, da sich für eine Vielzahl von – insbesondere hinsichtlich Grauflecken hochtragfähigen – Schmierstoffen die Graufleckigkeit in den 80 Stunden in der Kraftstufe 8 kaum entwickelt. Da diese Entwicklung hinsichtlich der Graufleckigkeit in der Kraftstufe 8 jedoch nicht auf jeden Schmierstoff zutrifft, müssen zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit bereits freigegebener Schmierstoffe weitere Untersuchungen zur Absicherung der Ergebnisse durchgeführt werden, bevor eine Kürzung des Einlaufs umgesetzt werden kann.

Durch eine statistische Auswertung von an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnissen mit dem Standard-Graufleckentest wurde untersucht, ob es möglich ist die Laufzeit im Dauertest zu reduzieren. Es konnte gezeigt werden, dass trotz Reduzierung des Dauertests von 480 Stunden auf 320 Stunden aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können. Die Entwicklung der Graufleckigkeit in der wegfallenden Laufzeit im Dauertest kann mittels mathematischer Methoden mit einer mittleren Abweichung $< 3\%$ ausreichend genau abgeschätzt werden. Die Kürzung des Dauertests führt zu einem reduzierten Zeitaufwand des Graufleckentests. Bei Kürzung des Dauertests und geeigneter Extrapolation der Schadensentwicklung kann dennoch weiterhin die Anbindung an Erkenntnisse und Erfahrungen der letzten Jahre gewährleistet werden. Es wird daher empfohlen, zukünftig weitere Tests in verschiedenen Laboren und Anwendungen entsprechend zu analysieren. Bei erfolgreicher Bestätigung der erzielten Ergebnisse, wird empfohlen die Umsetzung dieser Maßnahme im Rahmen der DIN 3990-16 zu prüfen.

Durch eine statistische Auswertung von an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnissen mit dem Standard-Graufleckentest wurde gezeigt, dass es mit vertretbarem Informationsverlust möglich ist, auf den Ausbau der Prüfräder und deren Dokumentation in den ersten Kraftstufen zu verzichten. Eine Umsetzung des reduzierten Prüfaufwands sollte insbesondere für Anwendungen, bei welchen $SKS \geq 9$ gefordert wird, geprüft werden. Auch eine

Umsetzung allg. für höher-viskose Schmierstoffe, z.B. mit ISO-VG ≥ 220 , wird empfohlen. Zudem kann durch Sichtprüfung nach den Kraftstufen 5 und 6 sichergestellt werden, dass die auftretende Graufleckigkeit gering und ein Ausbau der Prüfräder erst nach der Kraftstufe 7 notwendig ist. Wird bei der Sichtprüfung festgestellt, dass die Graufleckigkeit unerwartet hoch ausfällt oder andere Auffälligkeiten im Zahnflankenzustand erkennbar sind, können die Prüfräder auch weiterhin nach Kraftstufe 5 und 6 ausgebaut und vermessen werden. Eine plausible Grenze für eine hohe Graufleckigkeit ist beispielsweise $GF > 10 \%$.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche praxisnahe Prüfbedingungen untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Prüftemperatur im Prüfverfahren anwendungsbezogen wählbar ist. Bei geänderten Prüfbedingungen ist nur ein Vergleich untereinander und nicht mit Standardbedingungen nach FVA 54/7 [Sch93] bzw. DIN 3990-16 [DIN20] möglich. Zusätzliche Einflüsse wie beispielsweise eine geänderte Drehzahl können durch das Rechenverfahren nach ISO/TS 6336-22 [ISO18a] abgedeckt werden. Es wird empfohlen, die Prüfung von Schmierstoffen hinsichtlich Graufleckentragfähigkeit bei $120 \text{ }^\circ\text{C}$ weiterhin als Sondertest zu deklarieren. Die Prüfung bei hohen Temperaturen darf nur mit Schmierstoffen mit ausreichend hoher Verschleißtragfähigkeit erfolgen. Die Anwendung von Prüftemperaturen bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ oder $120 \text{ }^\circ\text{C}$ in einen alleinstehenden Dauertest unter Verwendung der Verzahnungsvariante III sollte zukünftig weitergehend geprüft werden.

Durch die Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest konnte eine weitergehende Differenzierung von hochtragfähigen Schmierstoffen im Graufleckentest gezeigt werden. Diese Ergebnisse können dazu genutzt werden, die Auswertung des Graufleckentests zu vereinheitlichen und hochtragfähige Schmierstoffe weiter zu differenzieren. Durch eine Anwendung dieser Maßnahmen bei Bedarf im Wiederholungslauf ist die Anbindung an die bisherige Methode sichergestellt.

Bei notwendigen Änderungen im Ablauf der Prüfmethode durch beispielsweise einen erweiterten Stufentest, verkürzten oder alleinstehenden Dauertest wird empfohlen die Entwicklung im Dauertest anhand eines Gradienten der mittleren Profilformabweichung analog zu DIN 3990-16 zu bestimmen.

Durch Änderung der Treibrichtung ist eine Schabemarke am Ritzel ohne zusätzlichen Aufwand und Kosten durch eine zusätzliche Schleifbearbeitung unter Beibehaltung der Übertragbarkeit der Testergebnisse aus dem Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] vermeidbar. Das Vermeiden der Schabemarke erleichtert und vereinheitlicht die Auswertung des Graufleckentests und ist daher für eine mögliche Modifikation im Graufleckentest zu berücksichtigen. Es wird deshalb empfohlen bei grenzwertigen Ergebnissen durch das Auftreten einer Schabemarke den Wiederholungslauf oder einen dritten Stufentest mit geänderter Treibrichtung durchzuführen. Bild 8-6 zeigt einen Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten möglichen Modifikationen im Graufleckentest.

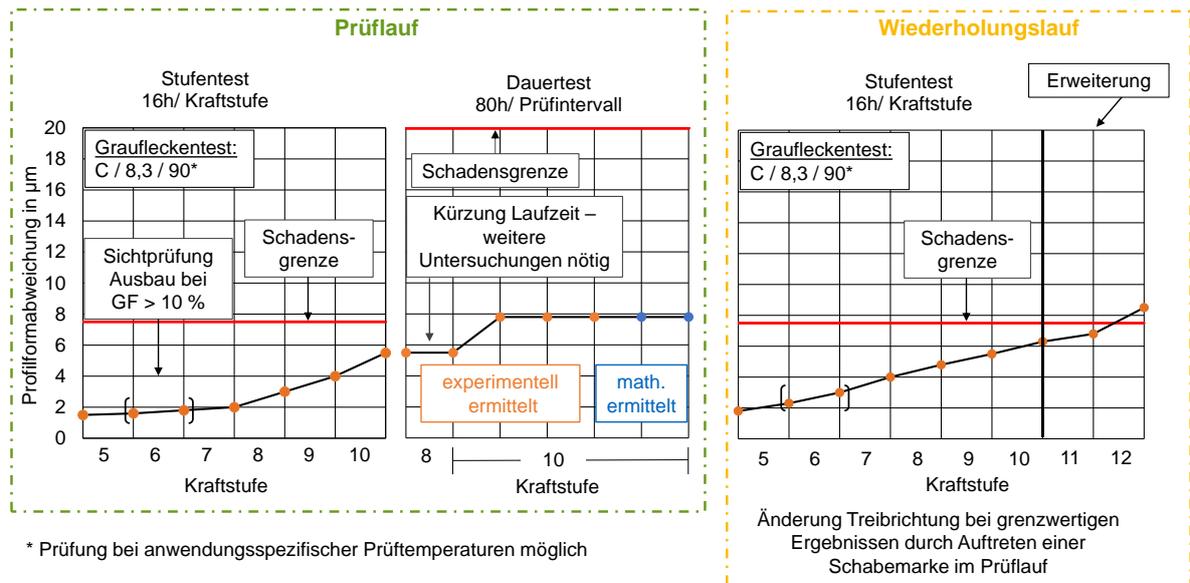


Bild 8-6: Überblick über mögliche Modifikationen des Graufleckentests

9 Zusammenfassung und Ausblick

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit war es, den weit verbreiteten Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] auf moderne Anforderungen zu prüfen und weiterzuentwickeln. Als Resultat wurde eine zuverlässige und einheitliche Prüfmethode zur Bewertung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen erwartet.

9.1 Zusammenfassung

Insbesondere in Industriegetrieben und Windenergieanlagen führt auftretende Graufleckigkeit zu hohen Kosten durch den notwendigen Tausch von betroffenen Zahnrädern. Graufleckigkeit kann maßgebend durch den Einsatz eines Schmierstoffs mit entsprechend hoher Graufleckentragfähigkeit reduziert bzw. vermieden werden. Zu diesem Zweck müssen Schmierstoffe hinsichtlich ihrer Graufleckentragfähigkeit charakterisiert und freigegeben werden.

Die allgemein anerkannte Prüfmethode zur Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit nach FVA 54/7 [Sch93] findet häufig Anwendung als Freigabetest für Getriebeöle. Da diese Testmethode vor ca. 30 Jahren entwickelt wurde, sind die damals festgelegten Prüfbedingungen und –verzahnungen zu aktuellen industriellen Anwendungen zum Teil abweichend. Da die Prüfmethode dennoch für unterschiedliche und vielfältige, moderne Anwendungen wie z. B. Turbo-, Schiffs-, Industrie-, Windkraft- und Fahrzeuggetriebe verwendet wird, stellt sich die Frage nach der Praxistauglichkeit der Testmethode.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] zunächst auf dessen Praxistauglichkeit untersucht. Zudem wurden Optimierungspotentiale aufgezeigt mit welchen die bestehende Prüfmethode weiterentwickelt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierzu umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse aus dem Graufleckentest auf unterschiedliche Anwendungen in der industriellen Praxis übertragen werden können. Betrachtet wurden verschiedene praxisnahe Änderungen, z.B. angelehnt an die Fahrzeug- und Windkraftindustrie. In Windenergieanlagen wird die Eingangsstufe in der Regel als Planetenstufe ausgelegt. Der Planetenträger der Planetenstufe im Eingang ist funktionell mit dem Rotor verbunden, wodurch das Rad im Eingriff Sonne-Planet treibt. Im Graufleckentest nach FVA 54/7 treibt das Ritzel. Der in der Windkraftindustrie typischerweise verwendete Werkstoff ist 18CrNiMo7-6. Die in Industriegetrieben verwendeten Verzahnungen sind in der Regel korrigiert und anstelle mit dem früher häufig verwendeten MAAG-0° Glattschliff mit dem praxisüblichen Profilschleifverfahren geschliffen. Zudem werden in Praxisgetrieben, wie beispielsweise in der Fahrzeugindustrie, Schrägverzahnungen eingesetzt. Im Graufleckentest wird eine Geradverzahnung ohne Korrektur mit MAAG-0° Glattschliff aus dem Werkstoff 16MnCr5 verwendet. Die Aussagekraft der Prüfmethode konnte abgesichert werden, indem durch experimentelle Untersuchungen gezeigt wurde, dass folgende praxisnahe Änderungen im Graufleckentest keinen signifikanten Einfluss auf das Testergebnis haben:

- Verwendung des Werkstoffs 18CrNiMo7-6
- Änderung der Treibrichtung
- Verwendung von praxisnah korrigierten Prüfverzahnungen
- Verwendung von profilgeschliffenen Prüfrädern
- Verwendung einer Schrägverzahnung bei gleichen Bedingungen hinsichtlich Pressung und minimaler Schmierfilmdicke

Damit wurde bestätigt, dass der Graufleckentest nach FVA 54/7 eine zuverlässige Methode zur Beurteilung der Graufleckentragfähigkeit moderner Getriebschmierstoffe aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen darstellt.

Zudem konnten Optimierungspotenziale und Möglichkeiten für Ergänzungen aufgezeigt werden. So wurde dargelegt, dass die Kürzung des Einlaufs in der Kraftstufe 8 im Dauertest von 80 auf 16 Stunden prinzipiell möglich ist. Dennoch müssen weitere Untersuchungen zur Absicherung der Ergebnisse durchgeführt werden, bevor eine Kürzung des Einlaufs umgesetzt werden kann.

Durch eine statistische Auswertung von an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnissen mit dem Standard-Graufleckentest wurde nachgewiesen, dass es möglich ist, die Laufzeit im Dauertest zu reduzieren und die Entwicklung der Graufleckigkeit ausreichend genau mathematisch abzuschätzen. Es konnte ebenfalls durch eine statistische Auswertung von an der Forschungsstelle vorliegenden Versuchsergebnissen mit dem Standard-Graufleckentest belegt werden, dass die Möglichkeit besteht bei der Prüfung von modernen Schmierstoffen von einem Ausbau der Prüfverzahnungen in den ersten zwei Kraftstufen im Stufentest abzuweichen. Dies wird insbesondere für Schmierstoffe, bei welchen eine $SKS \geq 9$ gefordert wird, bzw. bei höher-viskosen Schmierstoffen, z.B. mit $ISO\ VG \geq 220$, empfohlen. Diese Ergebnisse können dazu genutzt werden, den hohen Prüf-, Dokumentations- und Auswerteaufwand des Graufleckentests nach FVA 54/7 zu reduzieren. Eine Umsetzung sollte ggf. innerhalb des Normungsausschusses geprüft werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Basis hierfür gelegt. Zudem wurde die Möglichkeit aufgezeigt einen Sondertest bei $120\ ^\circ C$ für Schmierstoffe, welche in der Anwendung hohen Temperaturen ausgesetzt sind, durchzuführen sowie Schmierstoffe ergänzend in einem separaten Dauertest bei beispielweise $60\ ^\circ C$ zu prüfen. Zusätzlich wurde eine weitergehende Differenzierung von hochtragfähigen Schmierstoffen durch Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest um die Kraftstufen 11 und 12 nachgewiesen. Des Weiteren konnten Maßnahmen herausgearbeitet werden, welche das Auftreten von Schabemarken am Ritzel vermeiden. Zur Vermeidung der Schabemarke wurde zum einen die Treibrichtung geändert und zum anderen wurden profilkorrigierte Prüfräder verwendet. Durch Änderung der Treibrichtung ist eine Schabemarke am Ritzel ohne zusätzlichen Aufwand unter Beibehaltung der Übertragbarkeit der Testergebnisse aus dem Graufleckentest nach FVA 54/7 [Sch93] vermeidbar. Das Auftreten von Schabemarken erschwert die Auswertung. Durch Umsetzung einer Maßnahme zur Vermeidung der Schabemarke ist eine einheitlichere Auswertung möglich. Die erzielten Ergebnisse können zum einen zum Nachweis der Praxistauglichkeit des Graufleckentests nach FVA 54/7 und zum anderen zur Weiterentwicklung der Testmethode für eine zuverlässige Beurteilung der Zahnrad-Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen genutzt werden. Durch die Weiterentwicklung des Graufleckentests und durch Nachweis der Übertragbarkeit der Ergebnisse des Graufleckentests nach FVA 54/7 [Sch93] auf unterschiedliche industrielle Anwendungsbereiche wird die Aussagekraft des Graufleckentests gestärkt.

9.2 Ausblick

Im Rahmen der Arbeit konnten viele Fragestellungen geklärt werden. Basierend auf den Ergebnissen wurden jedoch auch neue Fragestellungen formuliert, welche im Rahmen der Arbeit nicht mehr behandelt werden konnten.

Es konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von Korrekturen wie Kopfrücknahme und Kopfkantenabrundung an der C-Verzahnung eine erleichterte Auswertung durch Vermeidung der Schabemarke bei vergleichbaren Ergebnissen im Vergleich zur C-GF-Verzahnung erreicht wurde. Korrekturen sind durch die Fertigung mit Toleranzen behaftet. In der Literatur sind unterschiedliche Auswirkungen beispielsweise einer Kopfrücknahme auf die Graufleckigkeit dokumentiert [Lüt07, Sch99b]. Als Ursache erklärt Schrade [Sch99b], dass die Auswirkung auf die Tragfähigkeit stark abhängig von der resultierenden Lastverteilung ist. Zudem sind die Auswirkungen der Korrekturen auf die Pressungsverteilung lastabhängig. Vor einer möglichen Umsetzung sind daher ggf. weitere Untersuchungen notwendig. Es ist in mehreren Versuchen zu prüfen, ob die in dieser Arbeit definierten Korrekturen ausreichend genau gefertigt werden können, damit kein Einfluss auf das Testergebnis entsteht.

Die Ergebnisse belegen, dass bei Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit von Anwendungsfällen mit speziellen Betriebsbedingungen der Einfluss der Drehzahl auf die Graufleckentragfähigkeit berechnet werden kann und der Einfluss der Öltemperatur getestet werden muss. Bei Anwendungen im höheren Drehzahlbereich mit $v_t > 60$ m/s sollten allerdings weitergehende experimentelle Untersuchungen zum Einfluss auf die Graufleckentragfähigkeit erfolgen. Die Prüfung mit $\vartheta_{\text{Öl}} = 120$ °C im GFKT soll validiert werden. Zudem bleibt zu klären, ob unter diesen Testbedingungen für die Mehrzahl der Schmierstoffe bei längeren Prüflaufzeiten eine Ölalterung zu erwarten ist.

Im Rahmen der Arbeit wurde deutlich, dass eine Differenzierung von Schmierstoffen im modifizierten Dauertest bei $\vartheta_{\text{Öl}} = 60$ °C, $n_1 = 2250$ min⁻¹, mit einer Laufzeit von 16 Stunden in der Kraftstufe 8 und unter Verwendung einer Prüfverzahnung der Variante III im Neuzustand als Ergänzung zum Graufleckentest nach FVA 54/7 grundsätzlich möglich ist. Da dies insbesondere für Schmierstoffe, welche beispielsweise in Windkraftgetrieben Anwendung finden, vorteilhaft wäre, sind diese Ergebnisse weitergehend experimentell abzusichern. Alternativ kann zudem die Verwendung der C-GF-Verzahnung in diesem modifizierten Dauertest geprüft werden. Zudem wurden Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs in der Kraftstufe 8 im Dauertest durchgeführt. Auf Basis dieser ersten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine Reduzierung der Laufzeit in Kraftstufe 8 des Dauertests auf 16 h prinzipiell möglich ist. Allerdings erfolgten diese Untersuchungen nur anhand eines Referenzschmierstoffs. Vor einer möglichen Umsetzung müssen daher Untersuchungen mit verschiedenen Praxisschmierstoffen durchgeführt werden. Zudem ist für einen verkürzten oder alleinstehenden Dauertest die Begrenzung der Laufzeit zum Beispiel durch eine angepasste Schadensgrenze ggf. neu zu definieren.

Es konnte ein Unterschied im Einlaufverhalten anhand der Verwendung von profilgeschliffenen Prüfrädern in einer geringen Anzahl an Versuchspunkten festgestellt werden. In den hier durchgeführten Untersuchungen konnte kein Einfluss auf die Versuchsergebnisse festgestellt werden. Dennoch könnte dies Untersuchungsgegenstand für zukünftige Forschung sein. Insbesondere für eine Reduzierung der Laufzeit im Einlauf in einem modifizierten Dauertest wäre dies von Interesse.

Es konnte gezeigt werden, dass die Graufleckenentwicklung für die letzten beiden Intervalle im Dauertest durch Extrapolation ausreichend genau abgeschätzt werden kann. Eine Umsetzung in der Testmethode nach FVA 54/7 [Sch93] bzw. DIN 3990-16 [DIN20] ist unter erneuten Abgleich von Stichversuchen zu prüfen.

10 Literaturverzeichnis

10.1 Normen, Richtlinien und Patente

- [DIN78a] DIN 3962-1: Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Teil 1: Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen (1978).
- [DIN78b] DIN 3962-2: Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Teil 2: Toleranzen für Flankenlinienabweichungen (1978).
- [DIN78c] DIN 3962-3: Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Teil 3: Toleranzen für Teilungs-Spannenabweichungen (1978).
- [DIN87a] DIN 3990-2: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern: Berechnung der Grübchentragfähigkeit (1987).
- [DIN87b] DIN 3990-3: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern: Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit (1987).
- [DIN87c] DIN 3990-1: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern: Einführung und allgemeine Einflussfaktoren (1987).
- [DIN96] DIN 1319-3: Grundlagen der Meßtechnik Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße Meßunsicherheit (1996).
- [DIN97] DIN 11562: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern (1997).
- [DIN06a] DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren (2006).
- [DIN06b] DIN ISO 14635-1: Zahnräder - FZG-Prüfverfahren Teil 1: FZG-Prüfverfahren A/8,3/90 zur Bestimmung der relativen Fresstragfähigkeit von Schmierölen (2006).
- [DIN18] DIN EN ISO 4259-2: Mineralölerzeugnisse- Präzision von Messverfahren und Ergebnissen-Teil 2: Anwendung der Präzisionsdaten von Prüfverfahren (2018).
- [DIN20] DIN 3990-16: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern - Teil 16: Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierstoffen im FZG-Prüfverfahren GT-C/8,3/90 (2020).
- [Fle97] Flender FBV-VST: Bestimmung der Graufleckentragfähigkeit von Getriebeölen im Einstufentest - Prüfmethode und Bewertung, Bericht GG-V 378, Rev.-Nr. 1 (1997).
- [ISO83] ISO 5725-2: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen (1983).
- [ISO18a] ISO/TS 6336-22: Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 22: Calculation of micropitting load capacity (2018).
- [ISO18b] ISO/TS 6336-31: Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 31: Calculation examples of micropitting load capacity (2018).
- [ISO19a] ISO 6336-1: Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors (2019).

- [ISO19b] ISO 6336-2: Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 2: Calculation of surface durability (pitting) (2019).
- [ISO19c] ISO 6336-3: Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 3: Calculation of tooth bending strength (2019).
- [Rot02] Rother; Kurz; Bick: PAE-/FZG-Graufleckentest C-GF/8,3/90-20 (2002).
- [Sch93] Schönnenbeck, G.; Emmert, S.; Oster, P.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 54/I - IV - Heft 54/7 - Testverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Entstehung von Grauflecken bei Zahnrädern. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main (1993).

10.2 Bücher, Zeitschriftenaufsätze, Dissertationen, Studienarbeiten

- [AGM03] AGMA: AGMA 925-A03, Effect of Lubrication on Gear Surface Distress (2003).
- [Bar06] Barnett, D.; Elderkin, J. P.; Bennett, W.: An Analytical Approach to the Prediction of Micro-pitting on Case Carburised Gears. American Gear Manufacturers Association. Heft: Technical Paper 06FTM06 (2006).
- [Bau86] Bausch, T.: Innovative Zahnradfertigung – Verfahren, Maschinen und Werkzeuge zur kostengünstigen Herstellung von Stirnrädern mit hoher Qualität., Renningen, 3. Auflage (1986).
- [Bee10] Beermann, S.: KISSsoft Calculates Micropitting for the Wind Energy Sector. Wind Energy System Magazine (2010).
- [Bel13] Bell, M.; Sroka, G.; Benson, R.: The effect of the roughness profile on micropitting. Gear Solutions 2013. Heft: 11, S. 47–53 (2013).
- [Ber18] Berninger, S.; Stratmann, A.; Jacobs, G.; Beilicke, R.; Schadow, C.; Bartel, D.; Lutz, T.; Dreher, W.F.; Hämmerle, H.: FVA 627 II - Wälzlagergraufleckigkeit II - Bauart- und Schmierstoffeinfluss auf die Graufleckenbildung im Wälzlager (2018).
- [Bon13] Bongardt, C.; Beilicke, R.; Hentschke, C.; Bartel, D.; Jacobs, G.; Deters, L.: FVA 627/I -Heft 1065 - Wälzlagergraufleckigkeit Einfluss von instationären Betriebszuständen zur Graufleckenbildung in Wälzlagern und Klärung von Mechanismen, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V, Frankfurt/Main (2013).
- [Bra15] Brandão, J. A.; Martins, R.; Castro, M. J. D.; Seabra, J. H. O.: An Approach to the Simulation of Concurrent Gear Micropitting and Mild Wear. Wear. Heft: 324-325, S. 64–73 (2015).
- [Bra10a] Brandão, J. A.; Seabra, J. H. O.; Castro, M. J. D.: Surface Initiated Tooth Flank Damage Part I: Numerical Model. Wear. Heft: 268, S. 1–12 (2010).
- [Bra10b] Brandão, J. A.; Seabra, J. H. O.; Castro, M. J. D.: Surface Initiated Tooth Flank Damage Part II: Prediction of Micropitting Initiation and Mass Loss. Wear. Heft: 268, S. 13–22 (2010).
- [Bre17] Brecher, C.; Klocke, F.: Zahnrad- und Getriebetechnik. Auslegung, Herstellung, Untersuchung, Simulation. Hanser Verlag, München (2017).

- [Cla16] Clarke, A.; Evans, H. P.; Snidle, R. W.: Understanding micropitting in gears. *Journal of mechanical Engineering Science* 230. Heft: 7-8, S. 1276–1289 (2016).
- [DIN09] DIN Deutsches Institut für Normung: Anleitung zum Ringversuch Graufleckentest nach FVA 54/I - IV. - Dokumentennummer NA 060-34-19 AA N 40 (2009).
- [Din11] Dinner, H.: Micropitting in Wind Turbine Gearboxes: Calculation of the Safety Factor and Optimization of the Gear Geometry. *Applied Mechanics and Materials*. Heft: 86, S. 898–903 (2011).
- [Dow66] Dowson, D.; Higginson, G. R.: *Elastohydrodynamic Lubrication*. Pergamon Press, Oxford, edition 1977 (1966).
- [Elc01] Elcoate, C. D.; Evans, H. P.; Hughes, T. G.; Snidle, R. W.: Transient Elastohydrodynamic Analysis of Rough Surfaces Using a Novel Coupled Differential Deflection Method. *Journal of Engineering Tribology*. Heft: 215, S. 319–337 (2001).
- [Els93] Elstorff, M.-G.: Einflüsse auf die Grübchentragsfähigkeit - einsatzgehärteter Zahnräder bis in das höchste Zeitfestigkeitsgebiet, Dissertation, Technische Universität München (1993).
- [Emm94] Emmert, S.: Untersuchung zur Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit, Grübchenbildung) schnelllaufender Stirnradgetriebe, Dissertation, Technische Universität München (1994).
- [Emm93] Emmert, S.; Oster, P.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 54/III-IV - Heft 396 - Turbograufleckigkeit - Abschlussberichte, Frankfurt/Main (1993).
- [Eng16] Engelhardt, C.; Tobie, T.; Stahl, K.: Normung des Graufleckentests nach FVA 54/7 - Ergebnisse und Stand der Arbeiten (2016).
- [Err12] Errichello, R. L.: Morphology of Micropitting. *Gear Technology* (2012).
- [Ert84] Ertel: Die Berechnung der hydrodynamischen Schmierung gekrümmter Oberflächen unter hoher Belastung und Relativbewegung. Fortschrittsbericht. VDI-Z Reihe 1, Nr. 115, VDI-Verlag-GmbH (1984).
- [Eva13] Evans, H. P.; Snidle, R. W.; Sharif, K. J.; Shaw, B. A.; Zhang, J.: Analysis of Micro- Elastohydrodynamic Lubrication and Prediction of Surface Fatigue Damage in Micropitting Tests on Helical Gears, ASME. *Journal of Tribology*. Heft: 135, S. 1–9 (2013).
- [Fel18] Felbermaier, M.: Untersuchungen zur Graufleckenbildung und deren Einfluss auf die Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder, Dissertation, Technische Universität München (2018).
- [Fel15] Felbermaier, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: FVA-Nr. 482 III - Heft 1122 - Langsamlauf-Graufleckigkeit - Abschlussbericht, Frankfurt/Main (2015).
- [Gru49] Grubin, A. N.; Vinogradova, J. E.: Investigations of the Contact Machine Components. Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering, Book No. 30 (1949).
- [Han21] Hansen, J.: Elasto-hydrodynamic film formation in heavily loaded rolling-sliding contacts - Influence of surface topography on the transition between lubrication regimes, Dissertation, Luleå University of Technology (2021).

- [Has00] Haske: FVA-Nr. 286 I - Heft 633 - Großgetrieben Abschlussbericht (2000).
- [Her12] Hergesell, M.: Grauflecken- und Grübchenbildung an einsatzgehärteten Zahnradern mittlerer und kleiner Baugröße, Dissertation, Technische Universität München (2012).
- [Höh11] Höhn, B.-R.; Stahl, K.; Schudy, J.; Tobie, T.; Zornek, B.: Investigations on the flank load carrying capacity in the newly developed FZG back-to-back test rig for internal gears. AGMA Technical Paper Fall Meeting, S. 202–217 (2011).
- [Höh05] Höhn, B.-R.; Michaelis, K.; Oster, P.; Schrade, U.; Tobie, T.: Calculation of the Micropitting Load Capacity of Case Carburized Gears. COST 532 Conference: Triboscience and Tribotechnology, Porto/Portugal (2005).
- [Höh04] Höhn, B.-R.; Oster, P.; Schrade, U.; Tobie, T.: Investigations on the Micropitting Load Capacity of Case Carburized Gears. AGMA Technical Paper 04FTM5 2004.
- [Hol05] Holmes, M. J. A.; Evans, H. P.; Snidle, R. W.: Analysis of Mixed Lubrication Effects in Simulated Gear Tooth Contacts - ASME. Journal of Tribology. Heft: 127, S. 61–69 (2005).
- [Hug00] Hughes, T. G.; Elcoate, C. D.; Evans, H. P.: Coupled Solution of the Elastohydrodynamic Line Contact Problem Using a Differential Deflection Method. Journal of mechanical Engineering Science. Heft: 214, S. 585–598 (2000).
- [Jia19] Jia, H.; Li, J.; Wang, J.; Xiang, G.; Xiao, K.; Han, Y.: Micro-Pitting Fatigue Wear Simulation in Conformal-Contact under Mixed Elastohydrodynamic Lubrication. Journal of Tribology. Heft: Volume 141, Issue 61, Article number 061501 (2019).
- [Joa04] Joachim, F. J.; Kessler, A.; Kurz, N.; Rother, F.: Praxisnahe Verzahnungstests zur Schmierstoffprüfung - Tribology and Lubrication Engineering, International Colloquium Tribology, 14, ZF Friedrichshafen AG, Friedrichshafen (2004).
- [Kad16] Kadiric, A.; Rycerz, P.: Influence of Contact Conditions on the Onset of Micropitting in Rolling-Sliding Contacts Pertinent to Gear Applications. AGMA Technical Paper 16FTM21 (2016).
- [Käs77] Käser, W.: Beitrag zur Grübchenbildung an gehärteten Zahnradern. Einfluß von Härtetiefe und Schmierstoff auf die Flankentragfähigkeit., Dissertation, Technische Universität München (1977).
- [Kis11] Kissling, U.: The application of the first international calculation method for micropitting. American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting 2011, S. 187–201 (2011).
- [Kis12] Kissling, U.: International Calculation Method for Micropitting. Gear Solutions, S. 47–54 (2012).
- [Kna88] Knauer, G.: Zur Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder - Einfluß von Werkstoff, Schmierstoff und Betriebstemperatur., Dissertation (1988).
- [Koc18] Kock, S.; Jacobs, G.; Hirt, A.; Oberdörfer, S.; Neumann, S.; Bosse, D.: Robustness Test for Wind Turbine Gearbox Bearings. Journal of Physics Conf. Series 1037 052012 (2018).

- [Koe18] Koenig, J.; Felbermaier, M.; Tobie, T.; Stahl, K.: Influence of Low Circumferential Speeds on the Lubrication Conditions and the Damage Characteristics of case-hardened Gears - STLE Annual Meeting & Exhibition, Minneapolis - Convention Center 20-24 Mai (2018).
- [Kol13] Koller, P.: Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Optimierung von Eigenspannungs- und Oberflächenzustand., Dissertation, Technische Universität München (2013).
- [Kön20] König, J.: Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch optimierte Fertigung und Schmierung, Dissertation, Technische Universität München (2020).
- [Lai07] Lainé, E.; Olver, A. V.: The Effect of anti-wear additives on fatigue damage, Extended Abstract - Proceedings of the 62nd STLE Annual Meeting (2007).
- [Lai08] Lainé, E.; Olver, A. V.; Beveridge, T. A.: Effect of lubricants on micropitting and wear. Tribology International. Heft: 41, S. 1049–1055 (2008).
- [Lai09] Lainé, E.; Olver, A. V.; Lekstrom, M. F.; Shollock, a.; Beveridge, T. A.; Hua, D. Y.: The effect of a friction modifier additive on micropitting. Tribology Transactions. Heft: 52, S. 526–533 (2009).
- [Lau07] Laukotka, E.; Arnold, D.: FVA - Heft 660 - Referenzölkatalog - Abschlussbericht, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2007).
- [Li15] Li, S.: An Investigation on the Influence of Misalignment on Micropitting of a Spur Gear Pair. Tribology Letters. Heft: 60:35 (2015).
- [Li13] Li, S.; Kahraman, A.: Proceedings VDI International Conference on Gears 2013 - Themenschwerpunkt Tribologie/Schmierung. International Journal of Fatigue. Heft: 7-9, S. 12–19 (2013).
- [Li14] Li, S.; Kahraman, A.: A Micro-pitting Model for Spur Gear Contacts. International Journal of Fatigue. Heft: 59, S. 224–233 (2014).
- [Lin10] Linke, H.: Stirnradverzahnungen - Berechnungen - Werkstoffe - Fertigung. Hanser, München, 2. vollständig überarbeitete Auflage (2010).
- [Lit12] Litzba, J.; Boeye, J.: Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit von Ölen für Windkraftgetriebe bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten, GETLUB, Würzburg (2012).
- [Liu03] Liu, W.: Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben, Dissertation, Technische Universität München (2003).
- [Liu01] Liu, W.; Oster, P.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 259/II-III - Graufleckentragfähigkeit II - Abschlussbericht - Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben, Frankfurt/Main (2001).
- [Loh16a] Lohmann, C.: Zusammenhang von Ermüdung, Rissbildung, Verschleiß und Graufleckentragfähigkeit an Stirnrädern, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (2016).
- [Loh16b] Lohner, T.: Berechnung von TEHD Kontakten und Einlaufverhalten von Verzahnungen, Dissertation, Technische Universität München (2016).

- [Lom14] Lombardo, S.: Einfluss von verschiedenen Carbonitrierverfahren auf die Zahnfuß- sowie Zahnflankentragfähigkeit von Stirnrädern, Dissertation (2014).
- [Lüt07] Lützig, G.: Großgetriebe-Graufleckigkeit: Einfluss von Flankenmodifikation und Oberflächenrauheit, Dissertation (2007).
- [May13] Mayer, J.: Einfluss der Oberfläche und des Schmierstoffs auf das Reibungsverhalten im EHD-Kontakt, Dissertation, Technische Universität München (2013).
- [McG19] McGuire, N.: Lubrication challenges in the wind turbine industry. *Tribology and Lubrication Technology* 2019. Heft: Volume 75, Issue 9, S. 34–43 (2019).
- [Mic11] Michaud, M.; Sroka, G.; Benson, E.: Refurbishing Wind Turbine Gears - Isotropic superfinishing represents a value adding, low cost option for refurbishing both case carburized and nitrided gears. (2011).
- [Mor11] Morales-Espejel, G. E.; Brizmer, V.: Micropitting Modelling in Rolling–Sliding Contacts: Application to Rolling Bearings. *Tribology Transactions*. Heft: 54(4), S. 625–643 (2011).
- [Mor17] Morales-Espejel, G. E.; Rycerz, P.; Kadiric, A.: Prediction of Micropitting Damage in Gear Teeth Contacts Considering the Concurrent Effects of Surface Fatigue and Mild Wear. *Wear*, S. 1–52 (2017).
- [Mül21] Müller, D.; Sagraloff, N.; Sendlbeck, S.; Winkler, K.-J.; Tobie, T.; Stahl, K.: Chapter 12 - Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture. - 4th edition (2021).
- [Naz10a] Nazifi, K.: Einfluss der Geometrie und der Betriebsbedingungen auf die Graufleckigkeit von Großgetrieben, Dissertation, Ruhr Universität Bochum (2010).
- [Naz10b] Nazifi, K.; Predki, W.: FVA-Nr. 286 III - Heft 947 - Graufleckigkeit von Großgetrieben III - Abschlussbericht (2010).
- [Neu15] Neubauer, B.; Weinberger, U.; Otto, M.; Stahl, K.: FVA-Nr. 571/II - Heft - LA-PLASn - Abschlussbericht, Frankfurt/Main, Germany (2015).
- [Nie83] Niemann, G.; Winter, H.: *Maschinenelemente Band 2 - Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe*. Springer, Berlin, 2. völlig neu bearbeitete Auflage (1983).
- [O´C03] O´Connor, B. M.: The Influence of Additive Chemistry on Micropitting. 9th International Power Transmission and Gearing Conference, Parts A and B., S. 35–41 (Mai/2003).
- [Oil03] Oila, A.: Micropitting and related phenomena in case carburised gears., PhD thesis, University of Newcastle (2003).
- [Oil05a] Oila, A.; Bull, S. J.: Assessment of the factors influencing micropitting in rolling/sliding contacts. *Wear*. Heft: 258(10), S. 1510–1524 (2005).
- [Oil05b] Oila, A.; Shaw, B. A.; Aylott, C. J.; Bull, S. J.: Martensite decay in micropitted gears. - Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Journal of Engineering Tribology*. Heft: 219, S. 77–83 (2005).

- [Pat78] Patir, N.; Cheng, H. S.: An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication, ASME J. Lubr. Technol. Heft: 100(1), S. 12–17 (1978).
- [Pel19] Pellkofer, J.; Hein, M.; Reimann, T.; Hornbauer, M.; Stahl, K.: New calculation method of the micropitting load carrying capacity of bevel and hypoid gears. Forschung im Ingenieurwesen/Engineering Research 2019. Heft: 83 (3), S. 603–609 (2019).
- [Pic12] Pickens, D.: Experimental assessment of the dynamic factors of FZG gear tests as well as an evaluation of a micropitting load capacity formula,, Masterarbeit, The Ohio State University (2012).
- [Pin14] Pinnekamp, B.; Heider, M.: Calculating the Risk of Micropitting Using ISO Technical Report 15144-1:2014 – Validation with Practical Applications - AGMA Technical Paper (2014).
- [Pra20] Prajapati, D. K.; Tiwari, M.: Experimental investigation on evolution of surface damage and topography parameters during rolling contact fatigue tests. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 2020. Heft: Volume 43, Issue 2, S. 355–370 (2020).
- [Pre10] Predki, W.; Nazifi, K.; Luetzig, G.: Micropitting of Big Gearboxes: Influence of Flank Modification and Surface Roughness. VDI International Conference on Gears (2010).
- [Rad04] Radev, T.: Einfluss des Schmierstoffes auf die Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder; Entwicklung des Praxisnahen Pittingtests, Dissertation, Technische Universität München (2004).
- [Raj21] Rajinikanth, V.; Soni, M.K.; Mahato, B.; Rao, M.A.: Microstructural investigation of rolling contact fatigue (RCF) on a failed planetary gear of a windmill gearbox. Engineering Failure Analysis. Heft: Volume 121, Article number 105167 (2021).
- [Sac83] Sackfield, A.; Hills, D.: A Note on the Hertz Contact Problem: a Correlation of Standard Formulae," J. StrainAnaL Eng.,. Heft: 18(3), S. 195–197 (1983).
- [Sag17] Sagraloff, N.; Hein, M.; Tobie, T.; Stahl, K., Gear Research Centre (FZG), Technical University of Munich: Practical use of micropitting test results according to FVA 54/7 for calculation of micropitting load capacity acc. to ISO/TR 15144-1 - In Proceedings of the ICG International Conference on Gears 13.09.2017, Garching, Germany.
- [Sch98] Schedl, U.: Einfluss des Schmierstoffs auf die Grübchenlebensdauer einsatzgehärteter Zahnräder, Dissertation, Technische Universität München (1998).
- [Sch81] Schönnenbeck, G.; Rettig, H.; Winter, H.: FVA Nr. 54/I - Heft 0106 - Einfluss der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung - Abschlussbericht (1981).
- [Sch83] Schönnenbeck, G.; Winter, H.: FVA-Nr. 54/II - Heft 152 - Graufleckigkeit - Abschlussbericht, Frankfurt/Main (1983).
- [Sch84] Schönnenbeck, G.: Einfluß der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit und Grübchenbildung) hauptsächlich im Umfangsgeschwindigkeitsbereich 1...9 m/s, Dissertation, Technische Universität München (1984).

- [Sch99a] Schrade, U.; Oster, P.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 259/I - Heft583 - Einfluß von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben - Abschlussbericht, Frankfurt/Main (1999).
- [Sch99b] Schrade, U.: Einfluß von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben, Dissertation, Technische Universität München (1999).
- [Sch10] Schudy, J.: Untersuchungen zur Flankentragfähigkeit von Außen- und Innenverzahnungen - Einflüsse auf das Grübchen-, Grauflecken- und Verschleißverhalten, insbesondere bei langsam laufenden Getriebestufen, Dissertation, Technische Universität München (2010).
- [Sch16] Schurer, S.: Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse in hochreinen Werkstoffen auf die Zahnfußtragfähigkeit, Dissertation, Technische Universität München (2016).
- [Sch07] Schwienbacher, S.: Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit ein-satzgehärteter Zahnräder, Dissertation, Technische Universität München (2007).
- [Sol19] Soltanahmadi, S.; Charpentier, T.; Nedelcu, I.; Khetan, V.; Morina, A.; Freeman, H.; Brown, A.; Brydson, R.; van Eijk, M. C. P.; Neville, A.: Surface Fatigue Behavior of a WC/aC:H Thin-Film and the Tribochemical Impact of Zinc Dialkyldithio-phosphate. ACS Appl. Materials & Interfaces. Heft: 11, S. 41676–41687 (2019).
- [Sta00] Stahl, K.: Grübchentragfähigkeit ein-satzgehärteter Gerad- und Schrägverzahnungen unter besonderer Berücksichtigung der Pressungsverteilung, Dissertation, Technische Universität München (2000).
- [Ste02a] Steinberger, G.; Oster, P.; Höhn, B.-R.: FVA-Nr. 284 II - Schrägverzahnung Abschlussbericht - DIN-Vergleichstest zur Grübchentragfähigkeit gerad- und schrägverzahnter Stirnräder, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (2002).
- [Ste02b] Steinberger, G.; Oster, P.; Höhn, B.-R.: DGMK 575 - Untersuchungen zum Einfluss von Lastspielzahl und Schmierungsart auf die Graufleckentragfähigkeit bei der Prüfung von Schmierstoffen, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V., Hamburg (2002).
- [Ste10] Steingröver, K.: FVA-Nr. 241 - Heft 477 - FVA-Stirnradprogramm STplus – Benutzeranleitung, Frankfurt/Main, Germany (2010).
- [Tho11] Thoma, F. A.: Lastübertragung im verformten System Lager-Welle-Zahnrad, Dissertation, Technische Universität München (2011).
- [Tob01] Tobie, T.: Zur Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit ein-satzgehärteter Zahnräder - Einflüsse aus Einsatzhärtungstiefe, Wärmebehandlung und Fertigung bei unterschiedlicher Baugröße, Dissertation, Technische Universität München (2001).
- [Tou21] Touret, T.; Changenet, C.; Ville, F.; cavoret, J.: Experimental investigations on the effect of micropitting on friction – Part 2: Analysis of power losses evolution on a geared system. Tribology International. Heft: Volume 153, Article number 106551 (2021).
- [Tou20] Touret, T.; Changenet, C.; Ville, F.; cavoret, J.; Abousleiman, V.: Experimental investigations on the effect of micropitting on friction – Part 1. Tribology International. Heft: Volume 149, Article number 105678 (2020).

- [Vol91] Volger: FVA-Nr. 158 - Heft 337 - Einfluß der Mikrostruktur auf die Ausbildung von Graufleckigkeit - Abschlußbericht, Frankfurt/Main (1991).
- [Vrc19a] Vrcek, A.; Hultqvist, T.; Baubet, Y.; Björling, M.; Marklund, P.; Larsson, R.: Micro-Pitting and Wear Assessment of PAO vs Mineral-Based Engine Oil Operating under Mixed Lubrication Conditions: Effects of Lambda, Roughness Lay and Sliding Direction. *lubricants*. Heft: Issue 5, Article number 42 (2019).
- [Vrc19b] Vrcek, A.; Hultqvist, T.; Baubet, Y.; Marklund, P.; Larsson, R.: Micro-pitting Damage of Bearing Steel Surfaces under Mixed Lubrication Conditions: Effects of Roughness, Hardness and ZDDP Additive. *Tribology International*. Heft: Volume 138, S. 239–249 (2019).
- [Wal13] Walkowiak, M.: Örtliche Belastungen und Verschleißsimulation in den Zahneingriffen profilkorrigierter gerad- und schrägverzahnter Stirnradgetriebe zwischen Einfederungsbeginn und Ausfederungsende, Dissertation, Ruhr Universität Bochum (2013).
- [Weg16] Wegst, M.; Wegst, C.W.: *Stahlschlüssel - Key to Steel*. Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Marbach, 24. Auflage (2016).
- [Wei94] Weiß, R.: Einfluß der Ölalterung auf die Zahnflankentragfähigkeit, Dissertation, Technische Universität München (1994).
- [Zor17] Zornek, B.; Tobie, T.; Stahl, K.: FVA-Nr. 482 IV, Heft 1206, Nitrierte Innen- /Außenverzahnung - Abschlussbericht, Frankfurt/Main (2017).

10.3 Internetseiten und Benutzerhandbücher

- [FAG06] FAG: Produktkatalog (2006).
- [KIS21] KISSsoft: KISSsoft. URL: <http://www.kisssoft.com>. Abrufdatum 08.09.2021.

Betreute und für diese Arbeit relevante Studienarbeiten

Folgende Studienarbeiten, deren Bearbeitung, Auswertung, Interpretation und Darstellung von Ergebnissen unter wesentlicher wissenschaftlicher Anleitung des Autors entstanden sind, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau angefertigt. Ergebnisse flossen zum Teil in die Arbeit ein.

Wang, L.: Theoretische Untersuchungen von verschiedenen Praxis- und Prüfverzahnungen im Hinblick auf die Verwendung einer modifizierten, praxisnäheren Prüfverzahnung in einem Standard-Graufleckentest, Technische Universität München (2018)

Yankacar, C.: Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Verzahnungsgeometrie und Oberflächenbeschaffenheit auf die Graufleckentragfähigkeit im Hinblick auf die Verwendung in einem standardisierten Testverfahren. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität München (2019).

Zhou, H.: Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der Testbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit insbesondere im Hinblick auf ein Testverfahren. Semesterarbeit, Lehrstuhl für Maschinenelemente, Technische Universität München (2019).

Sonstige nicht veröffentlichte Arbeiten

Folgende Arbeiten, die in den Jahren 2017 bis 2021 am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau entstanden sind, sind zum Teil mit in diese Arbeit eingeflossen:

Sagraloff, N.; Tobie, T.; Stahl, K.: FVA 779 „Graufleckentragfähigkeit praxisnaher Verzahnungen – Anwendbarkeit des FVA Graufleckentests als praxisnaher Anwendungstest“ Abschlussbericht (2020).

A Anhang

A.1 Werkzeugdaten

Tabelle A.10-1 und Tabelle A.10-2 zeigen die Geometriedaten der Fräserwerkzeuge, welche für die Erstellung der Prüfverzahnungen verwendet wurden. Tabelle A.10-3 zeigt die Daten der Schleifscheibe, welche an der Forschungsstelle verwendet wurde.

Tabelle A.10-1: Geometriedaten des Fräswerkzeugs der C-GF-Verzahnung und der Verzahnungsvarianten I, II und III

Bezeichnung	Zeichen		Größe
Werkzeugnummer	-	-	F12R1-4,5/20°-SP13-139/25
Kopfhöhe	h_{aP0}	mm	6,26
Fußformhöhe	h_{FfP0}	mm	5,85
Kopfabrundung	ρ_{aP0}	mm	1,13
Protuberanzbetrag	p_r	mm	0,13
Protuberanzwinkel	α_{pr}	°	12,0

Tabelle A.10-2: Geometriedaten des Fräswerkzeugs der Verzahnungsvariante IV

Bezeichnung	Zeichen		Größe
Werkzeugnummer	-	-	1Z21-172111
Kopfhöhe	h_{aP0}	mm	5,88
Fußformhöhe	h_{FfP0}	mm	5,20
Kopfabrundung	ρ_{aP0}	mm	1,32
Protuberanzbetrag	p_r	mm	0,16
Protuberanzwinkel	α_{pr}	°	12,0

Tabelle A.10-3: Daten der Schleifscheiben

	Abmaße	Bezeichnung
Schruppscheibe	Ø320 x 32 x 160	93A60F15VPH801W
Schlichtscheibe	Ø320 x 32 x 160	55NA80F15VPH802W

A.2 Flankenlinien der Prüfverzahnungen C-GF, Variante I, Variante II und Variante III

Bild A.10-1 und Bild A.10-2 zeigen exemplarische Messschriebe in Zahnflankenrichtung der Verzahnungsvarianten I, II, III und der C-GF-Verzahnung.

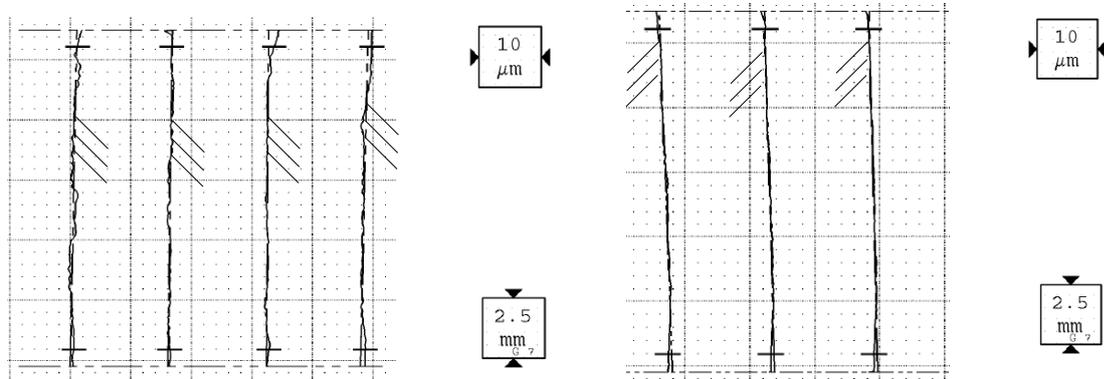


Bild A.10-1: Exemplarischer Ausschnitt eines Messschriebs mit Messung in Zahnflankenrichtung eines Prüfritzels der C-GF-Verzahnung (links) und eines Prüfrades der Variante I (rechts)

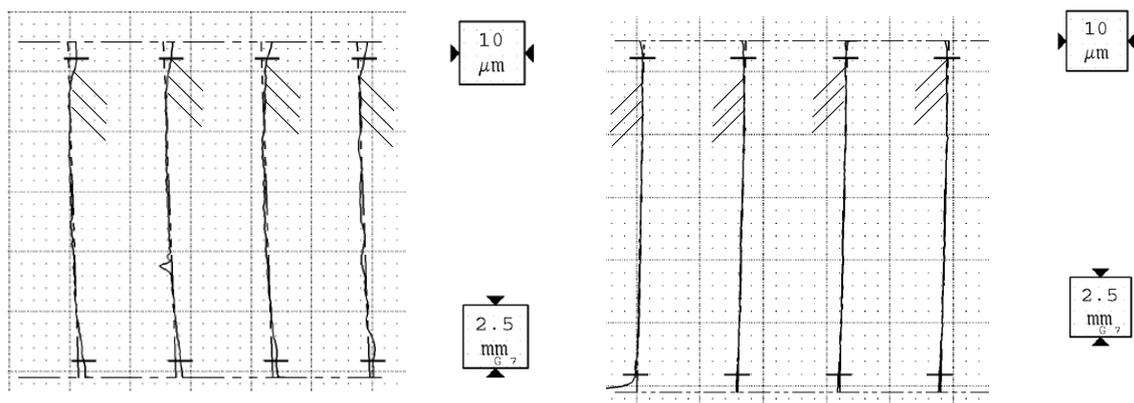


Bild A.10-2: Exemplarischer Ausschnitt eines Messschriebs mit Messung in Zahnflankenrichtung eines Prüfrades der Variante II (links) und eines Prüfritzels der Variante III (rechts)

A.3 Linienlasten der Varianten für die Auslegung der Prüfverzahnungen

Ergänzend zur Auslegung der Prüfverzahnungen in Kapitel 4.4 sind die in RIKOR berechneten Linienlasten in Bild A.10-3, Bild A.10-4, Bild A.10-5, Bild A.10-6, Bild A.10-7, Bild A.10-8 und Bild A.10-9 dargestellt.

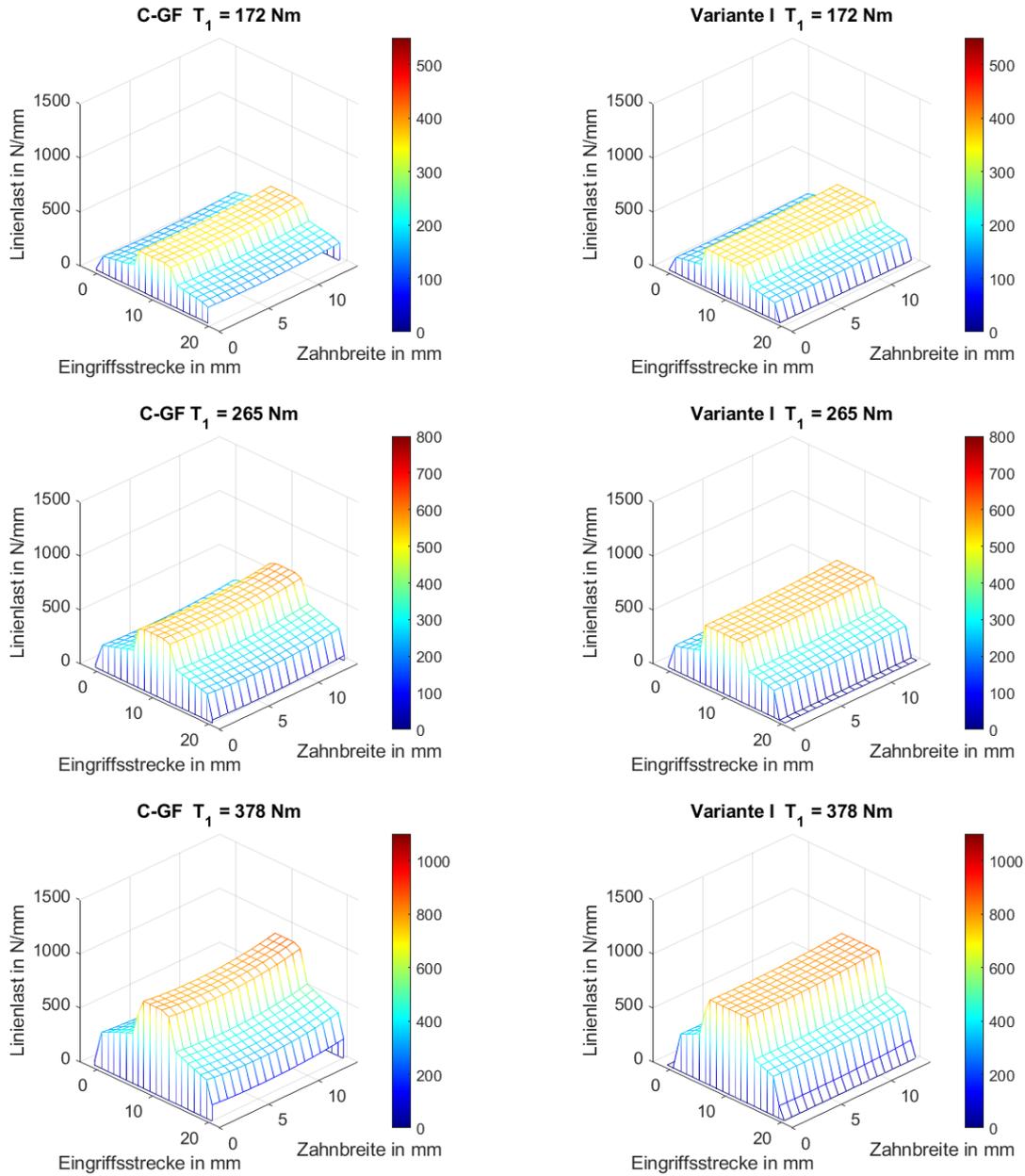


Bild A.10-3: Linienlast der C-GF-Verzahnung und Verzahnungsvariante I mit Belastung entsprechend der Kraftstufen 8, 10 und 12 des Graufleckentests nach FVA 54/7 bzw. der Erweiterung der Kraftstufen (s. Abschnitt 5.3.1)

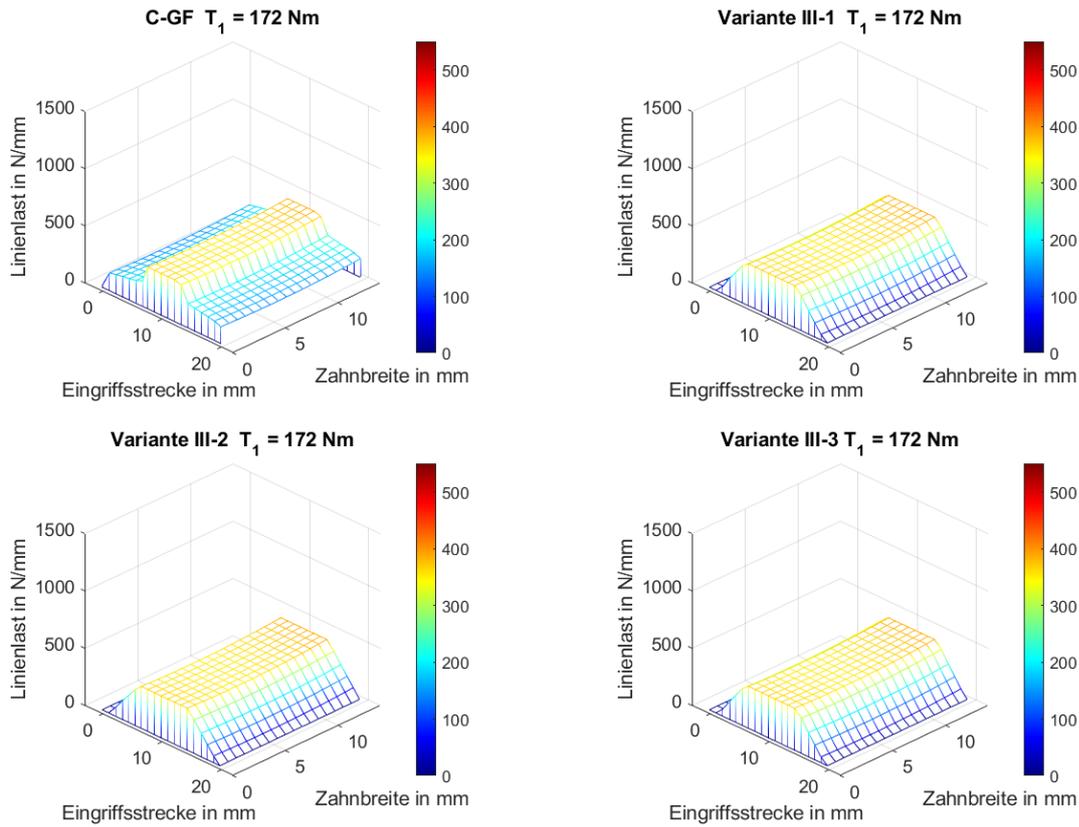


Bild A.10-4: Linienlast der C-GF-Verzahnung und der Variationen III-1, III-2 und III-3 mit $T_1 = 172 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 8 des Graufleckentests nach FVA 54/7

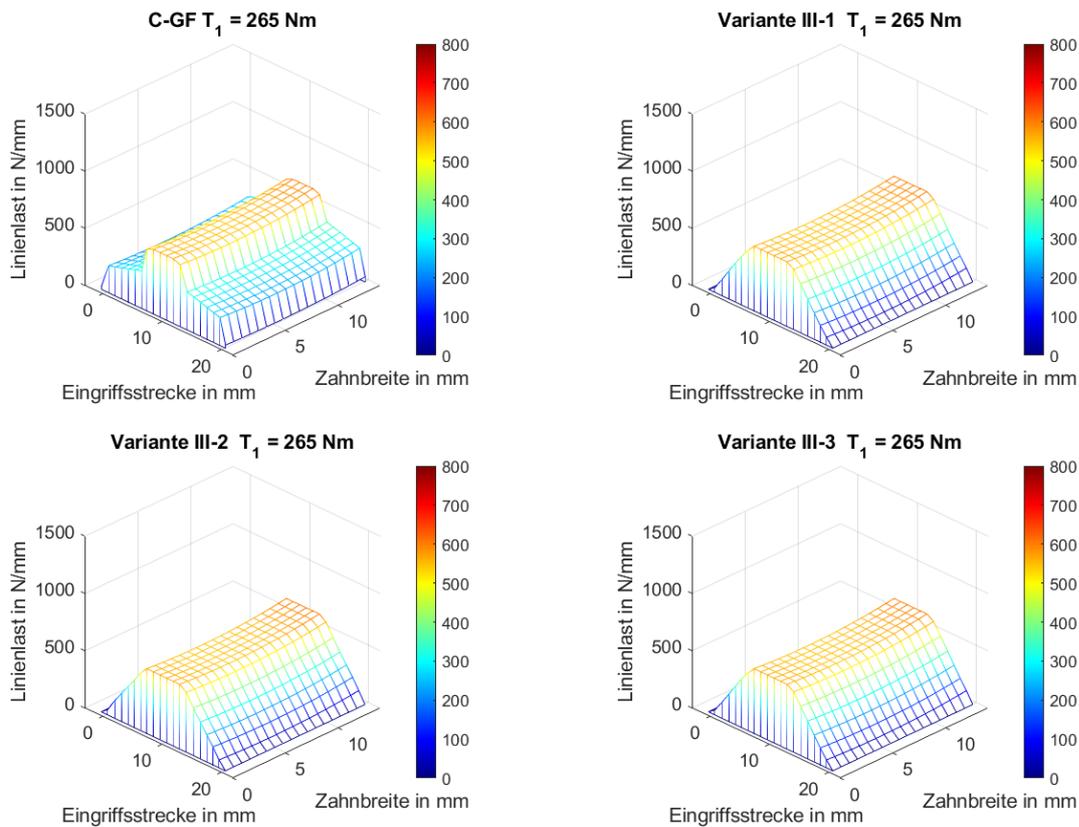


Bild A.10-5: Linienlast der C-GF-Verzahnung und der Variationen III-1, III-2 und III-3 mit $T_1 = 265 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 10 des Graufleckentests nach FVA 54/7

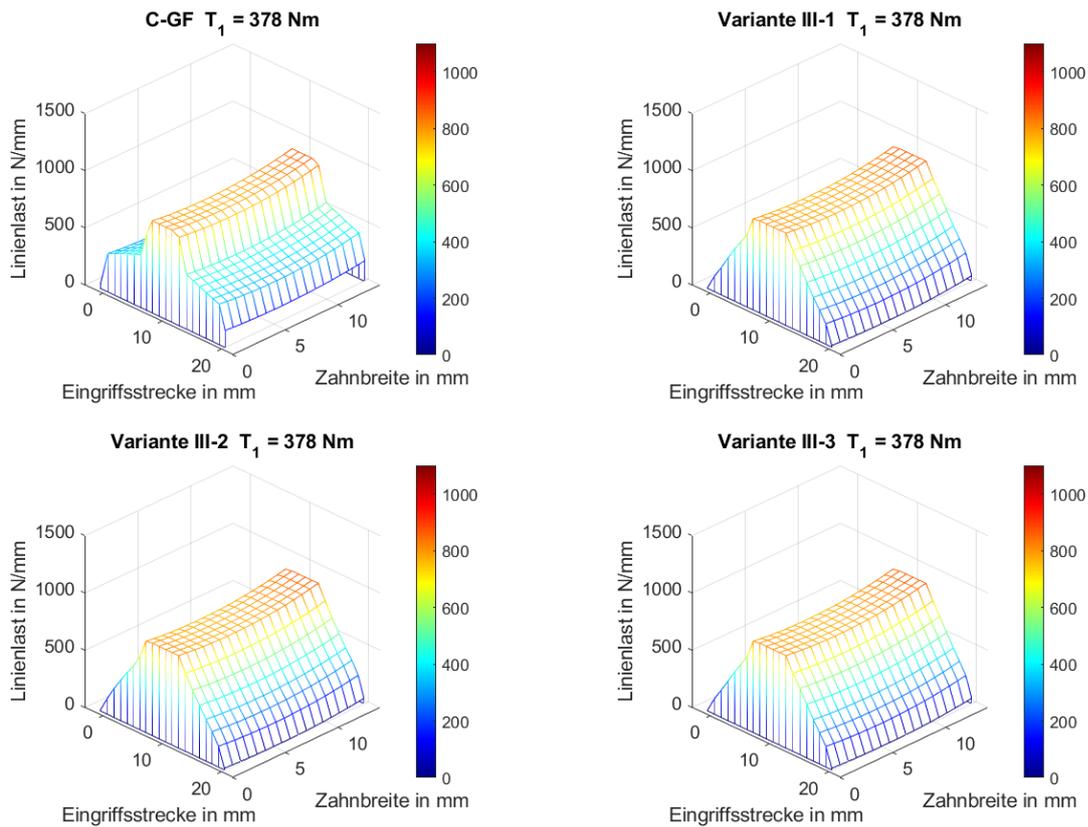


Bild A.10-6: Linienlast der C-GF-Verzahnung und der Variationen III-1, III-2 und III-3 mit $T_1 = 378 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 12 der Erweiterung des Graufleckentests nach FVA 54/7 (s. Abschnitt 5.3.1)

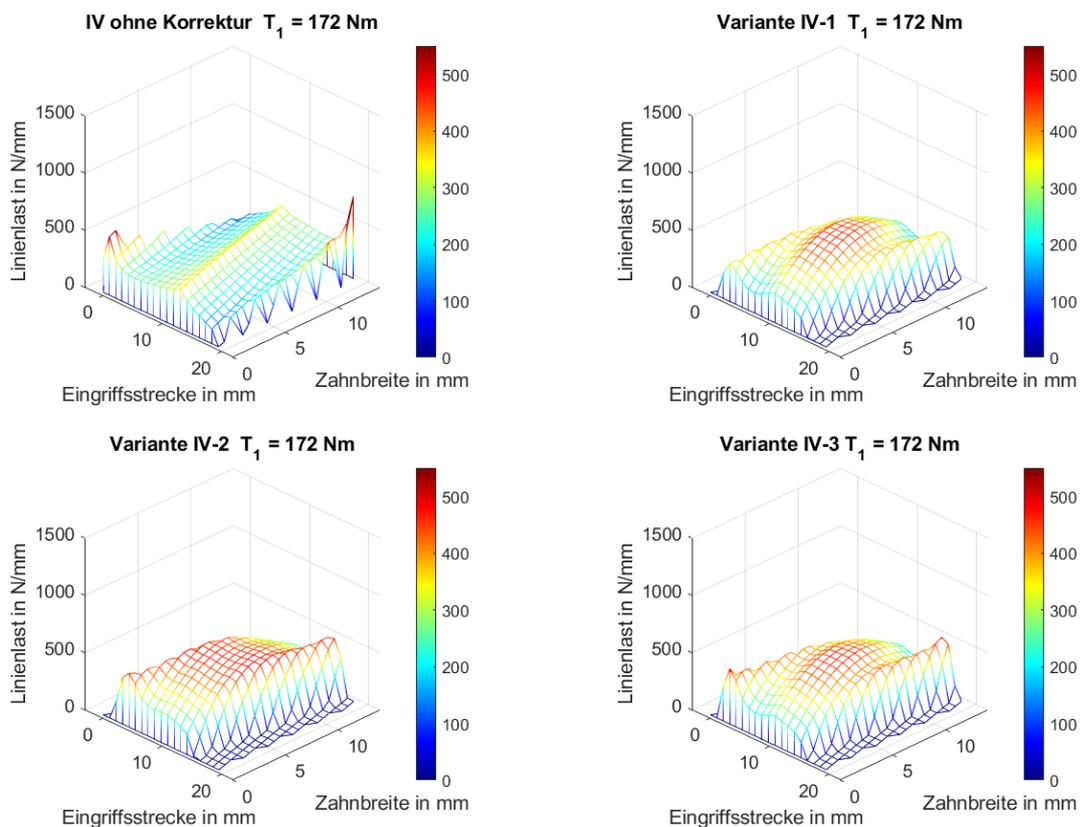


Bild A.10-7: Linienlast der Variante IV ohne Korrektur und der Variationen IV-1, IV-2 und IV-3 mit $T_1 = 172 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 8 des Graufleckentests nach FVA 54/7

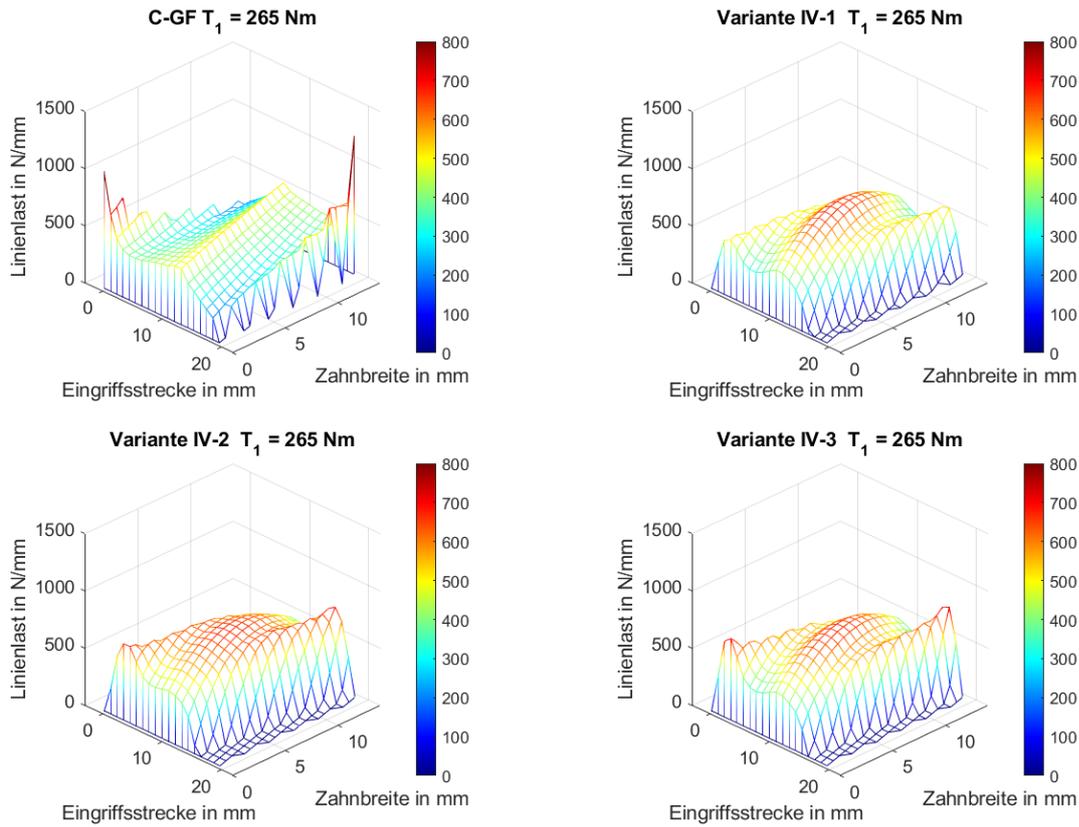


Bild A.10-8: Linienlast der Variante IV ohne Korrektur und der Variationen IV-1, IV-2 und IV-3 mit $T_1 = 265 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 10 des Graufleckentests nach FVA 54/7

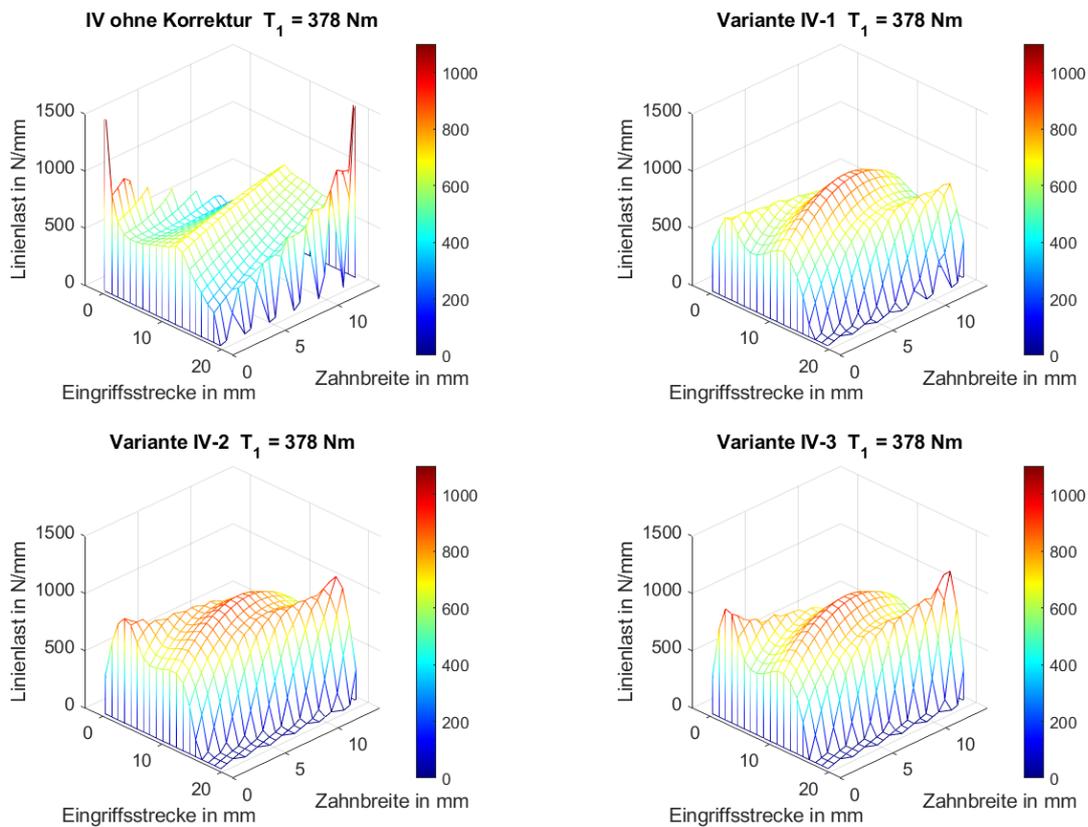


Bild A.10-9: Linienlast der Variante IV ohne Korrektur und der Variationen IV-1, IV-2 und IV-3 mit $T_1 = 378 \text{ Nm}$ Belastung entsprechend der Kraftstufe 12 der Erweiterung des Graufleckentests nach FVA 54/7 (s. Abschnitt 5.3.1)

A.4 Verläufe der Graufleckenfläche und des Masseverlusts

A.4.1 Theoretische Untersuchungen

Es sind die Verläufe der mittleren Graufleckenfläche in Bild A.10-10 und die Verläufe des Masseverlusts in Bild A.10-11 zufällig ausgewählten an der Forschungsstelle vorliegenden Graufleckentests zur Analyse der Graufleckenentwicklung im Dauertest. (s. Abschnitt 4.1.1) dargestellt.

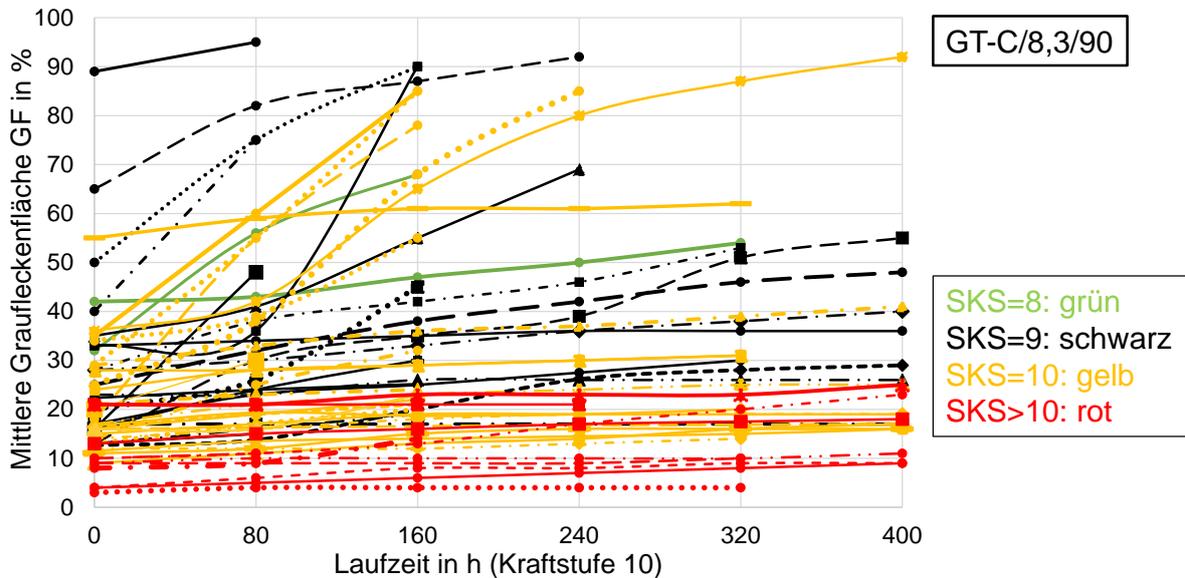


Bild A.10-10: Mittlere Graufleckenfläche der betrachteten Graufleckentests im Dauertest

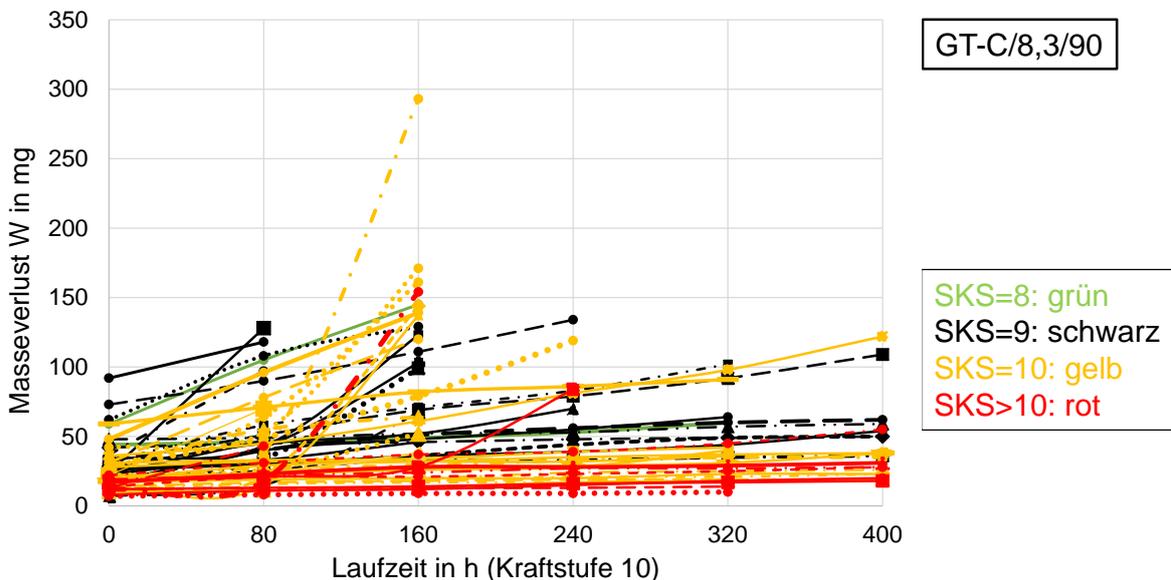


Bild A.10-11: Masseverlust der betrachteten Graufleckentests im Dauertest

A.4.2 Experimentelle Untersuchungen

Es sind die Verläufe der mittleren prozentualen Graufleckenfläche GF und des Masseverlusts W ergänzend zu den Untersuchungen in Kapitel 7.2 Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest in Bild A.10-12 und Bild A.10-13 dargestellt.

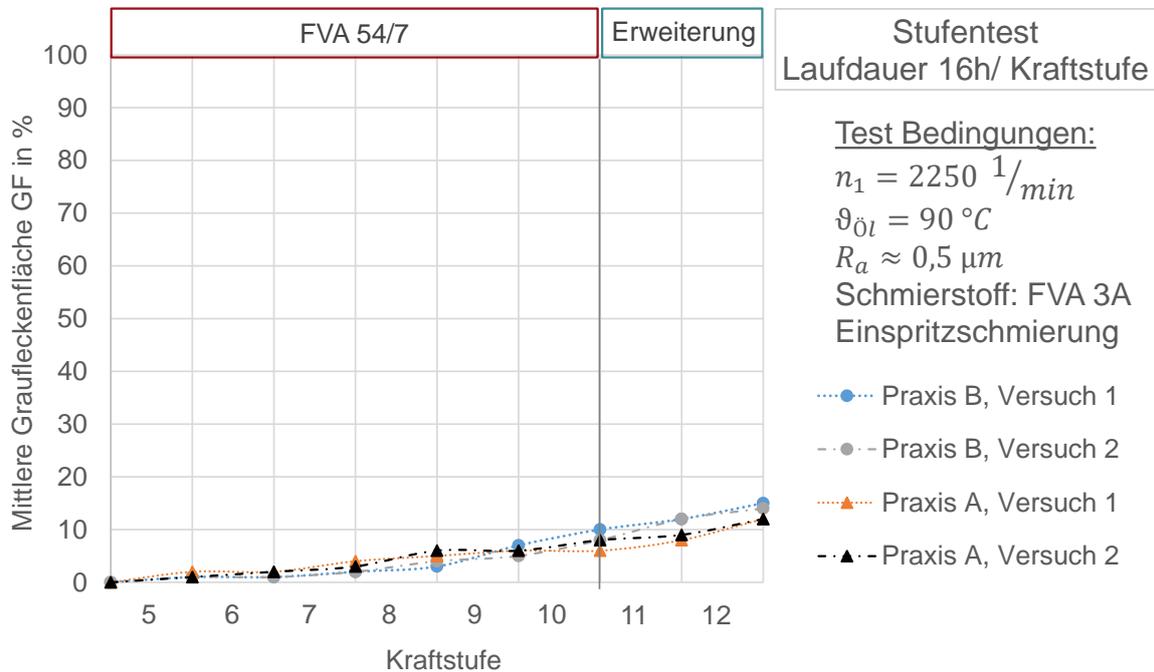


Bild A.10-12: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche - Erweiterung Kraftstufen Stufentest

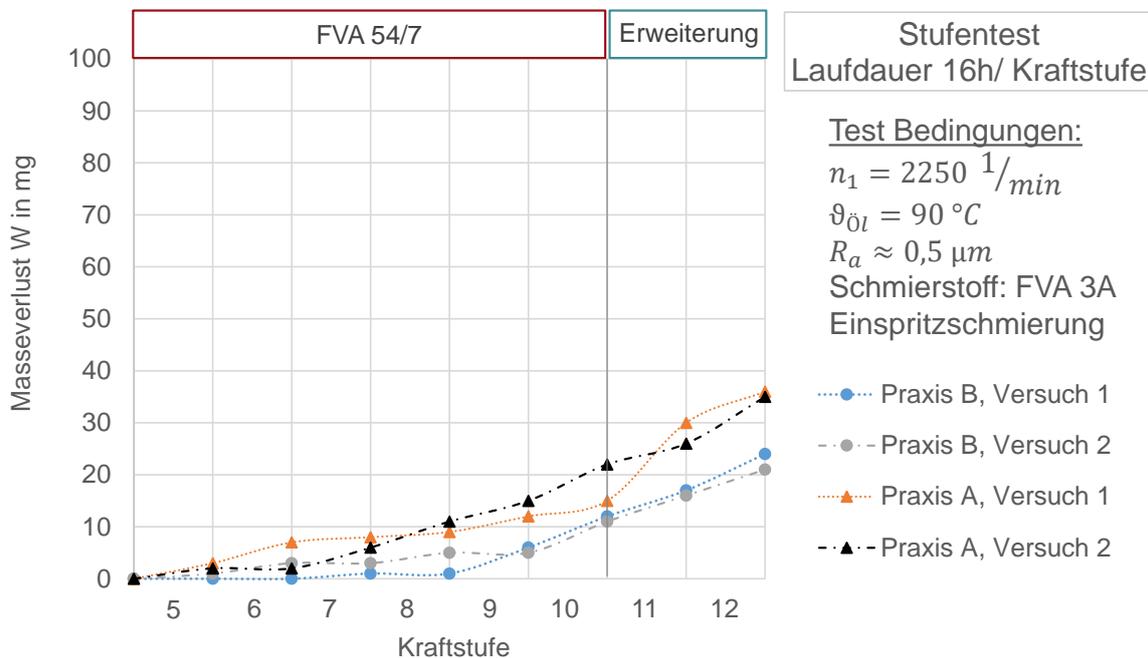


Bild A.10-13: Verläufe des Masseverlusts - Erweiterung Kraftstufen Stufentest

Es sind die Verläufe der mittleren prozentualen Graufleckenfläche GF und des Masseverlusts W ergänzend zu den dargestellten Inhalten in Kapitel 7.4.1 Untersuchungen zur Kürzung des Einlaufs im Dauertest in Bild A.10-14, Bild A.10-15, Bild A.10-16 und Bild A.10-17 dargestellt.

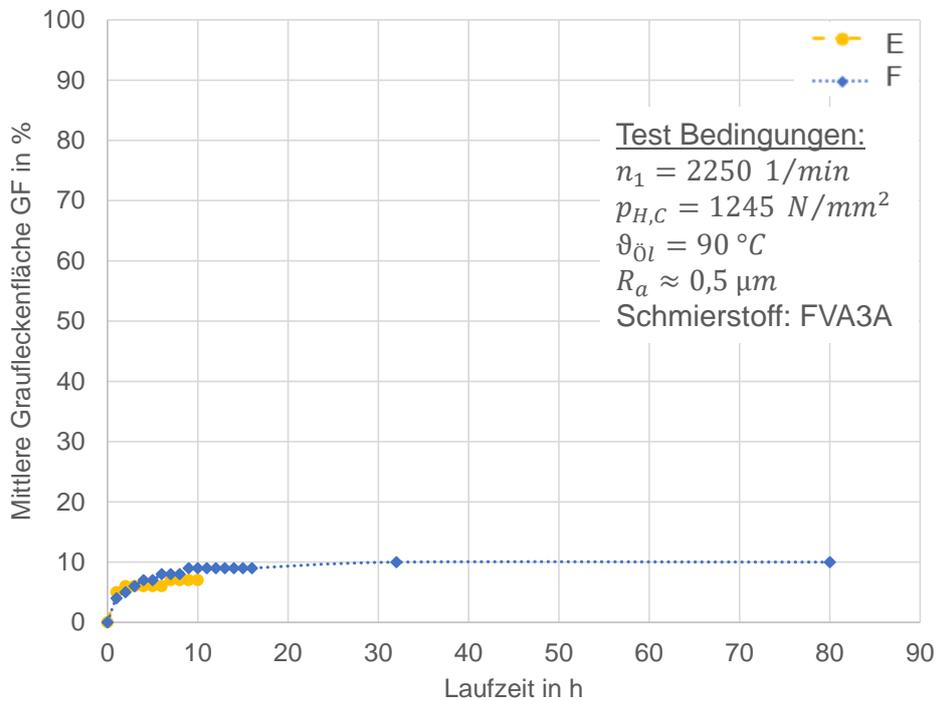


Bild A.10-14: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen (Test E und Test F)

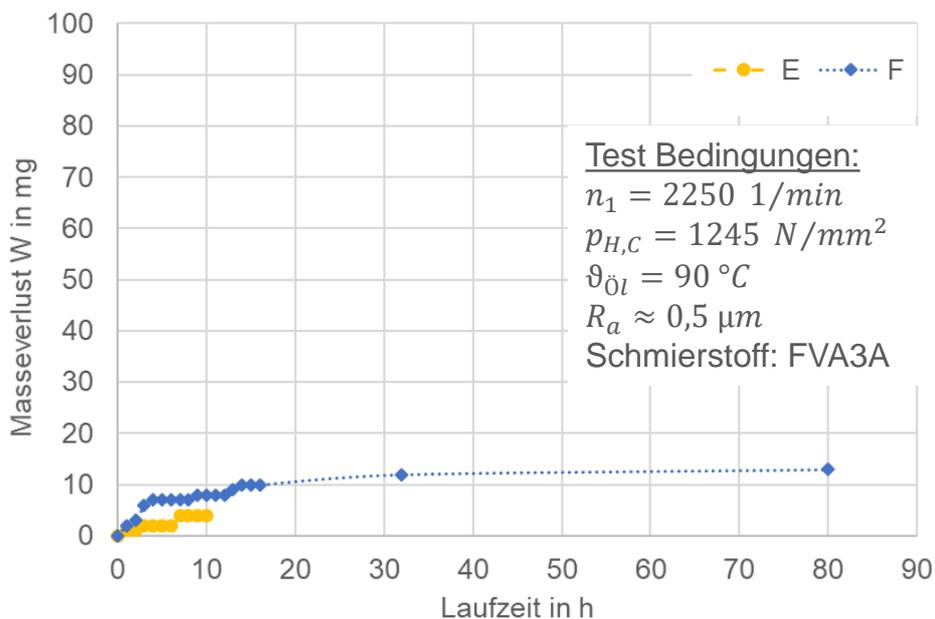


Bild A.10-15: Verlauf des Masseverlusts am Ritzel in Kraftstufe 8 bei Standardbedingungen (Test E und Test F)

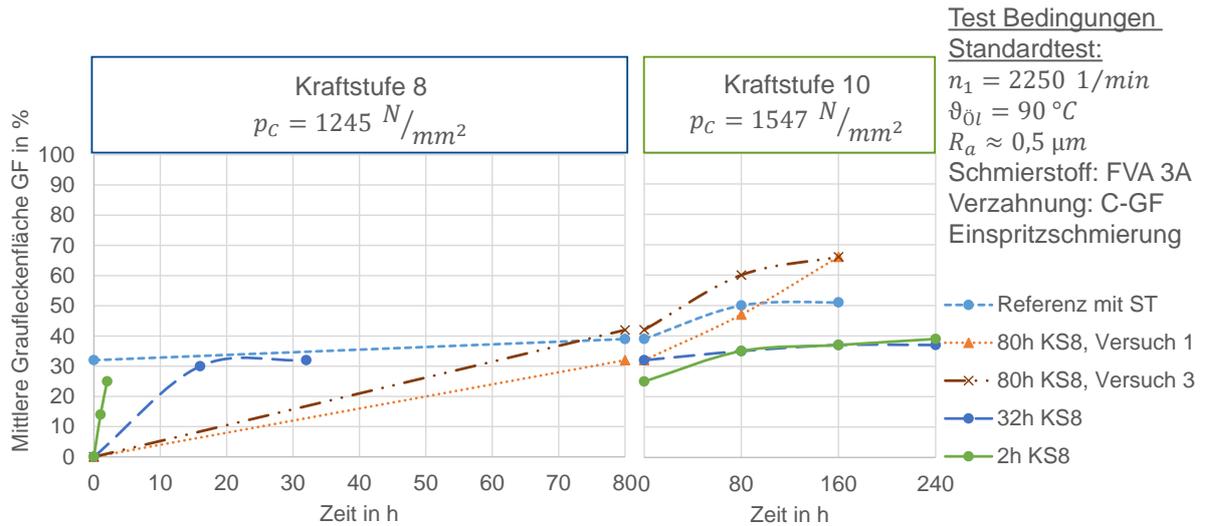


Bild A.10-16: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche im Dauertest ohne vorherigen Stufentest bei unterschiedlichen Laufzeiten in Kraftstufe 8

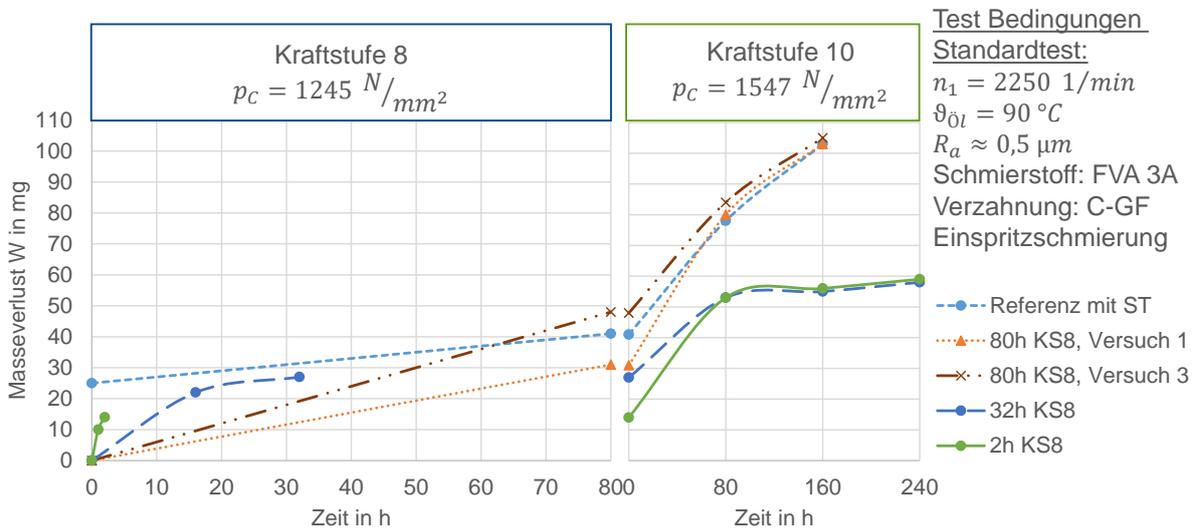


Bild A.10-17: Verläufe des Masseverlusts im Dauertest ohne vorherigen Stufentest bei unterschiedlichen Laufzeiten in Kraftstufe 8

Es sind ergänzende Verläufe der mittleren prozentualen Graufleckenfläche GF und des Masseverlusts W ergänzend zu den Untersuchungen in Kapitel 7.4.2 Betrachtung ausgewählter industrieller Anwendungsfälle in Bild A.10-20, Bild A.10-21, Bild A.10-18 und Bild A.10-19 dargestellt.

Test Bedingungen Windkraft:

$n_1 = 375 \text{ 1/min}$

$\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

$R_a \approx 0,5 \text{ }\mu\text{m}$

Schmierstoff: FVA 3A

Verzahnung: Variante III

- Referenz ($\vartheta_{\text{Öl}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 2250 \text{ 1/min}$, ST & DT)
- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, ST & DT,
- ▲--- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, DT, Versuch 1
- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, DT, Versuch 2
- ×--- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 2250 \text{ 1/min}$, DT

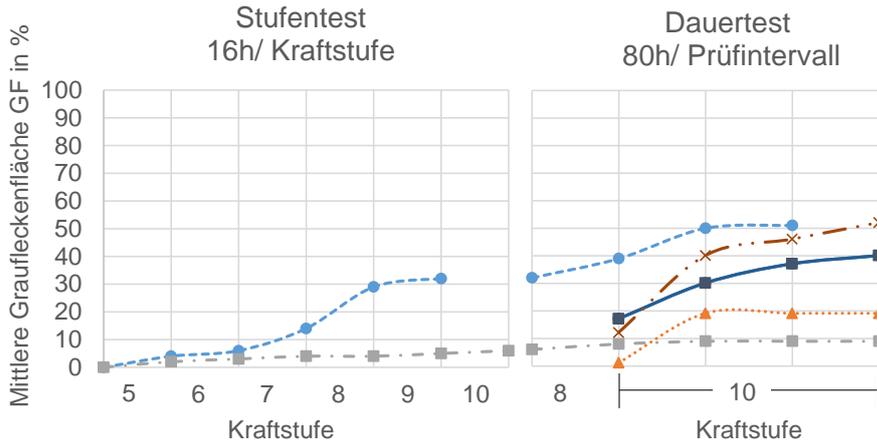


Bild A.10-18: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche im Versuch bei 60 °C und verringerter Drehzahl sowie bei Standardbedingungen mit FVA 3A

Test Bedingungen Windkraft:

$n_1 = 375 \text{ 1/min}$

$\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$

$R_a \approx 0,5 \text{ }\mu\text{m}$

Schmierstoff: FVA 3A

Verzahnung: Variante III

- Referenz ($\vartheta_{\text{Öl}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 2250 \text{ 1/min}$, ST & DT)
- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, ST & DT,
- ▲--- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 375 \text{ 1/min}$, DT, Versuch 1
- ×--- $\vartheta_{\text{Öl}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $n_1 = 2250 \text{ 1/min}$, DT

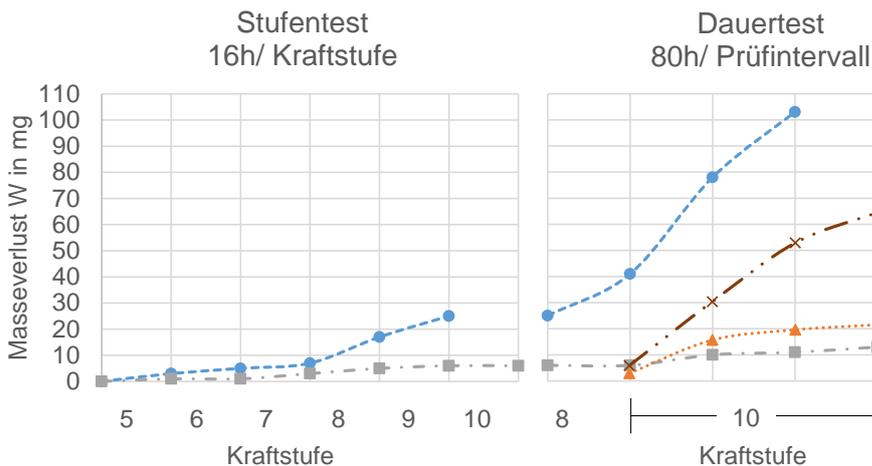


Bild A.10-19: Verläufe des Masseverlusts im Versuch bei 60 °C und verringerter Drehzahl sowie bei Standardbedingungen mit FVA 3A

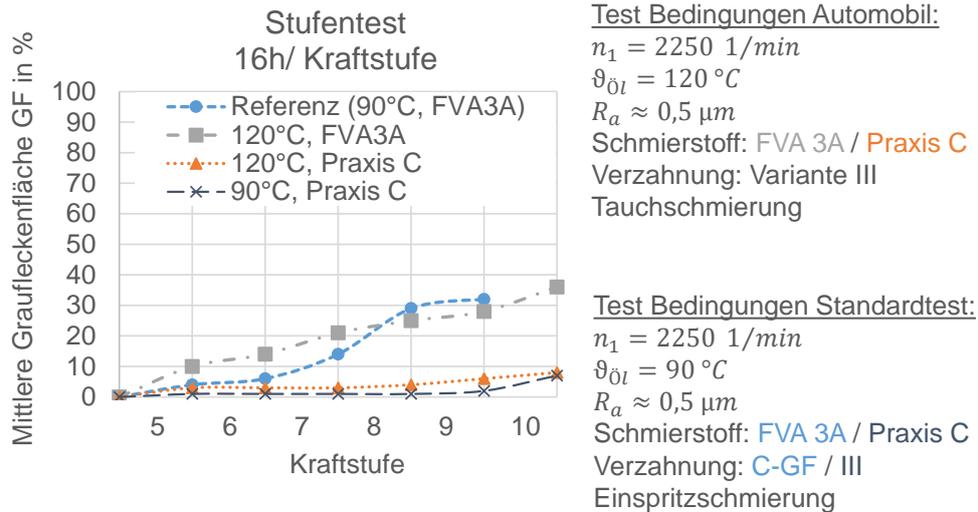


Bild A.10-20: Verläufe der Graufleckenfläche bei 120 °C und bei Standardbedingungen mit FVA 3A und Praxisschmierstoff C

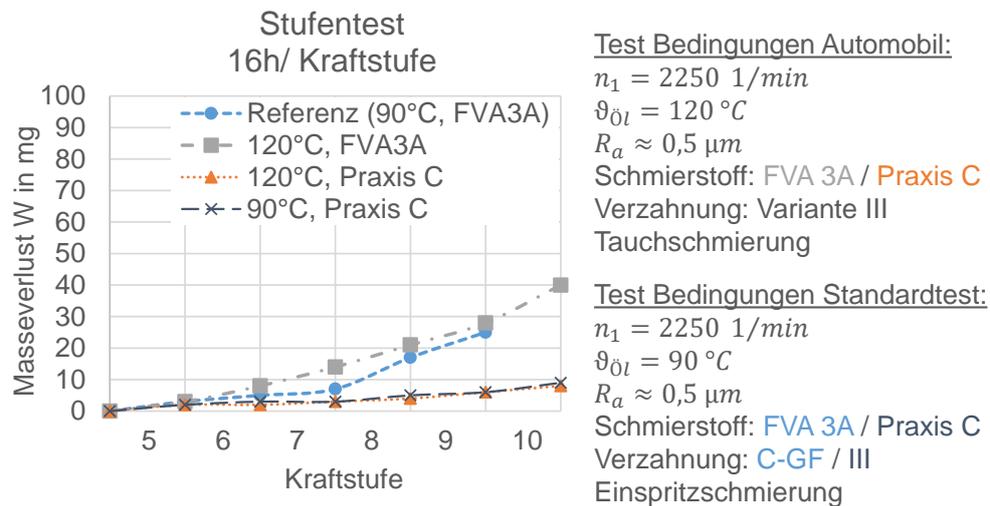


Bild A.10-21: Verläufe des Masseverlusts bei 120 °C und bei Standardbedingungen mit FVA 3A und Praxisschmierstoff C

Es sind die Verläufe der mittleren prozentualen Graufleckenfläche GF und des Masseverlusts W ergänzend zu den dargestellten Inhalten in Kapitel 7.4.3 Untersuchungen zur Vermeidung der Schabemarke Bild A.10-22, Bild A.10-23, Bild A.10-24, Bild A.10-25, Bild A.10-26 und Bild A.10-27 dargestellt.

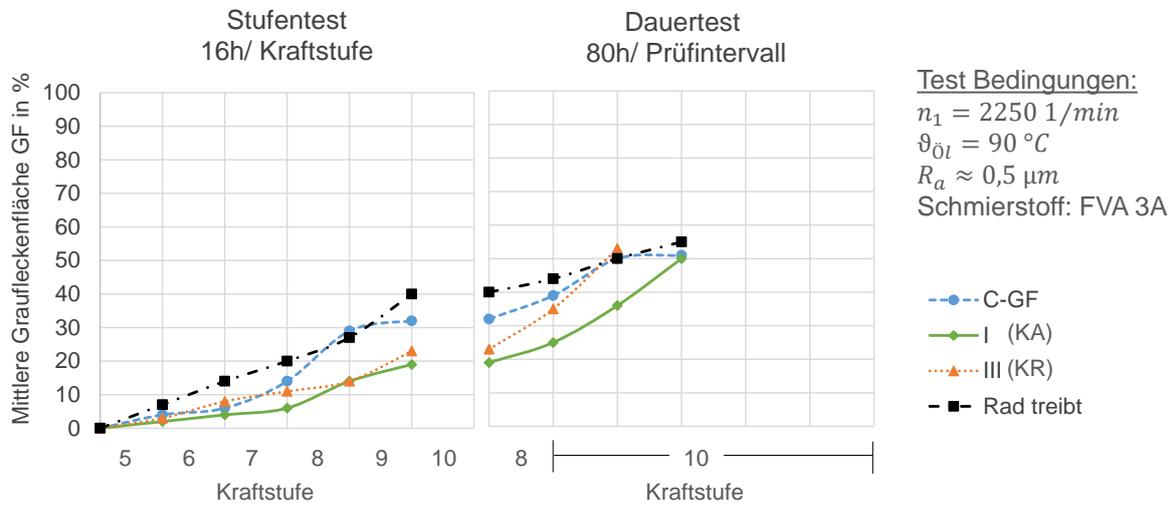


Bild A.10-22: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche im Versuch für die Varianten I, III und C-GF mit treibenden Ritzel im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Rad

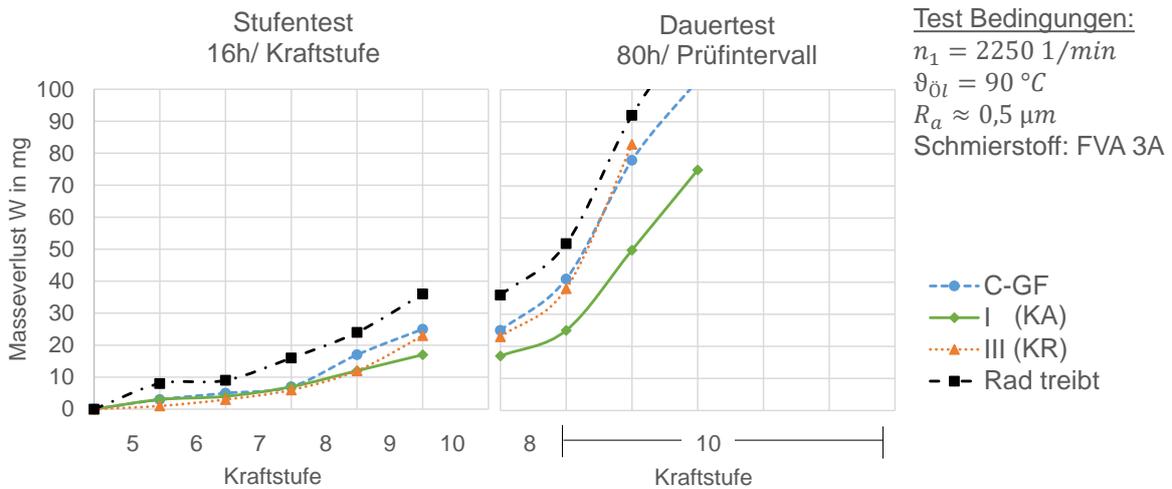


Bild A.10-23: Verläufe des Masseverlusts im Versuch für die Varianten I, III und C-GF mit treibenden Ritzel im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Rad

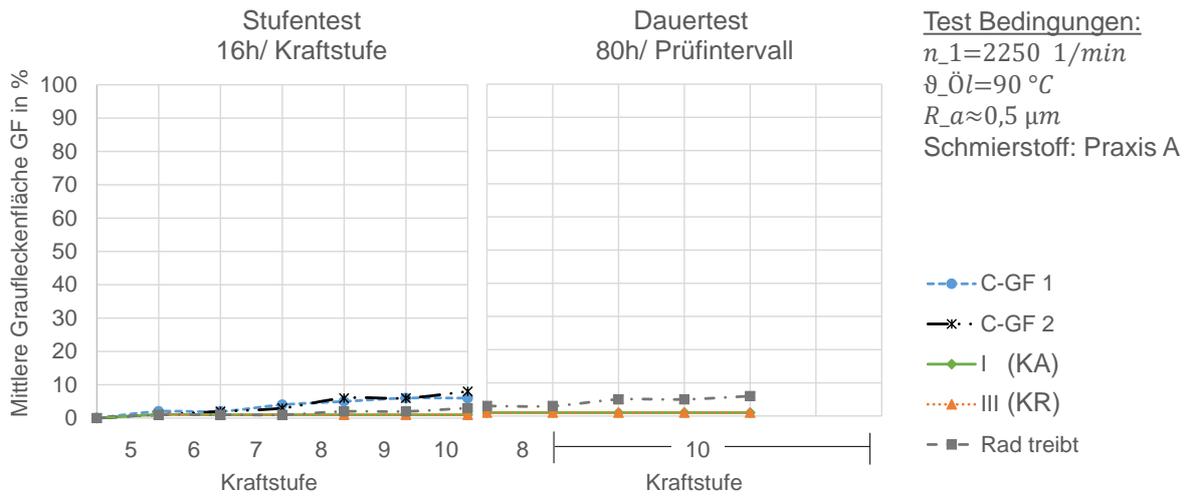


Bild A.10-24: Verläufe der mittleren Graufleckenfläche im Versuch mit dem Praxisschmierstoff A für die Varianten I, III und C-GF mit treibenden Rad im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel

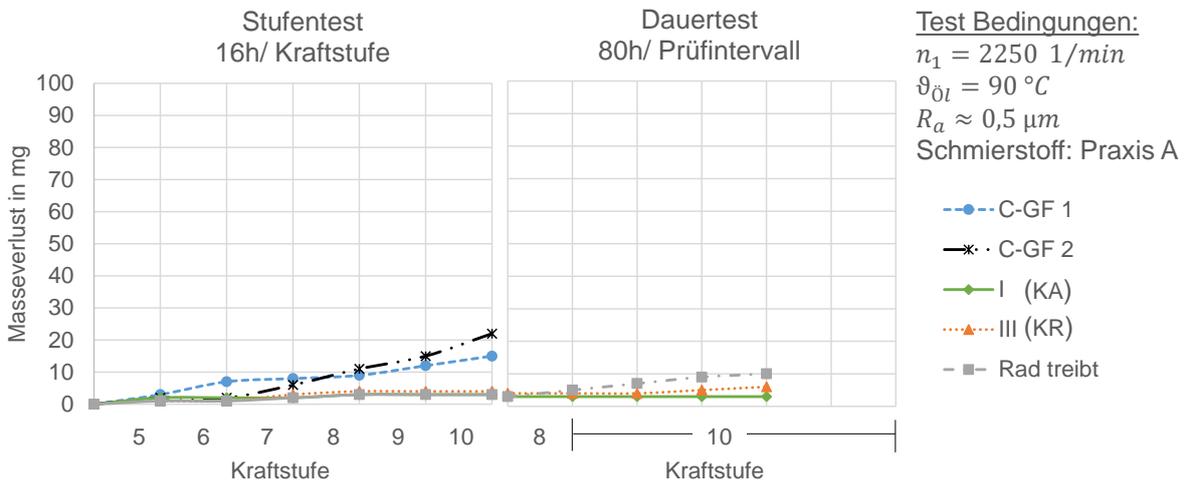


Bild A.10-25: Verläufe des Masseverlusts im Versuch mit dem Praxisschmierstoff A für die Varianten I, III und C-GF mit treibenden Rad im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel

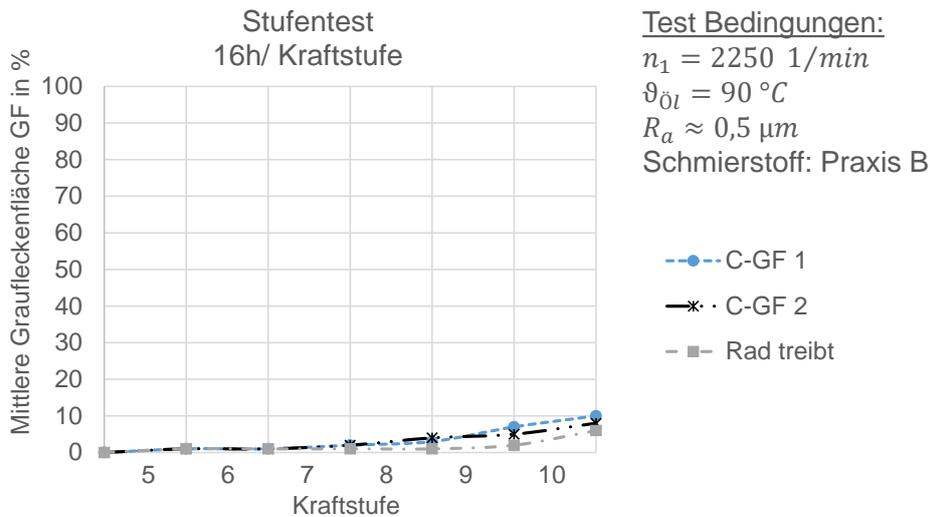


Bild A.10-26: Verläufe der Graufleckenfläche im Versuch mit dem Praxisschmierstoff B mit treibenden Rad im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel

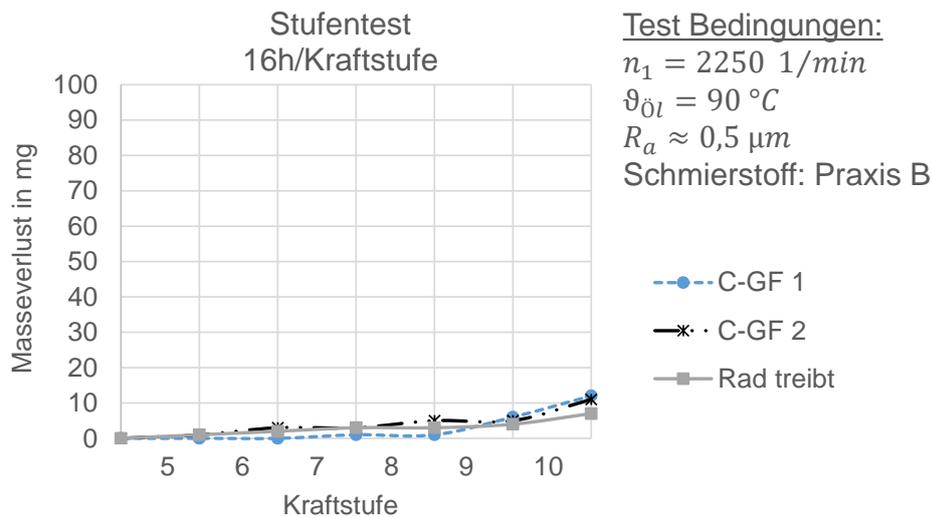


Bild A.10-27: Verläufe des Masseverlusts im Versuch mit dem Praxisschmierstoff B mit treibenden Rad im Vergleich zur C-GF-Verzahnung mit treibenden Ritzel

Es sind die Verläufe der mittleren prozentualen Graufleckenfläche GF und des Masseverlusts W ergänzend zu den Untersuchungen in Kapitel 7.4.4 Einfluss der Erweiterung der Kraftstufen im Stufentest auf den Dauertest in Bild A.10-28 und Bild A.10-29 dargestellt.

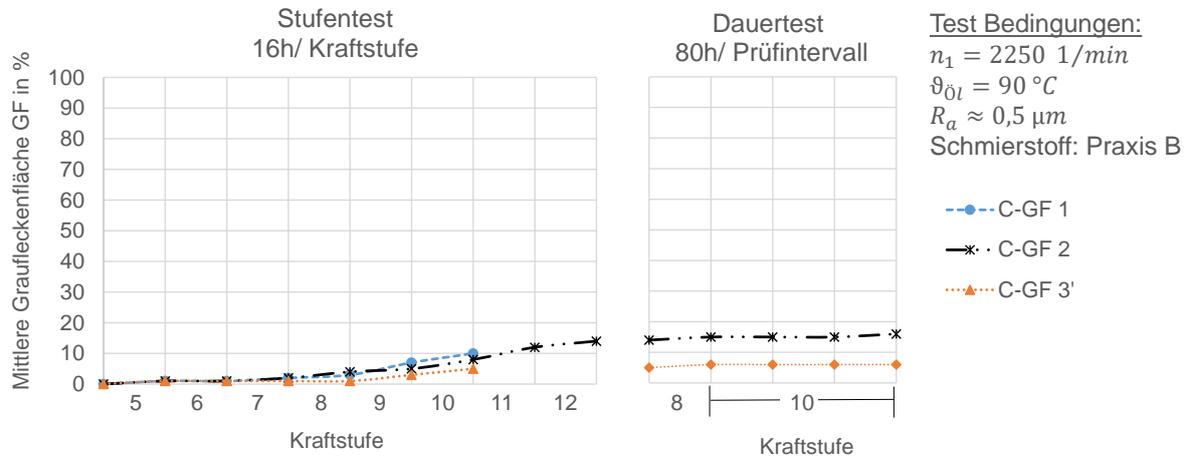


Bild A.10-28: Verläufe der Graufleckenfläche im Dauertest nach Erweiterung des Stufentests mit dem Praxisschmierstoff B

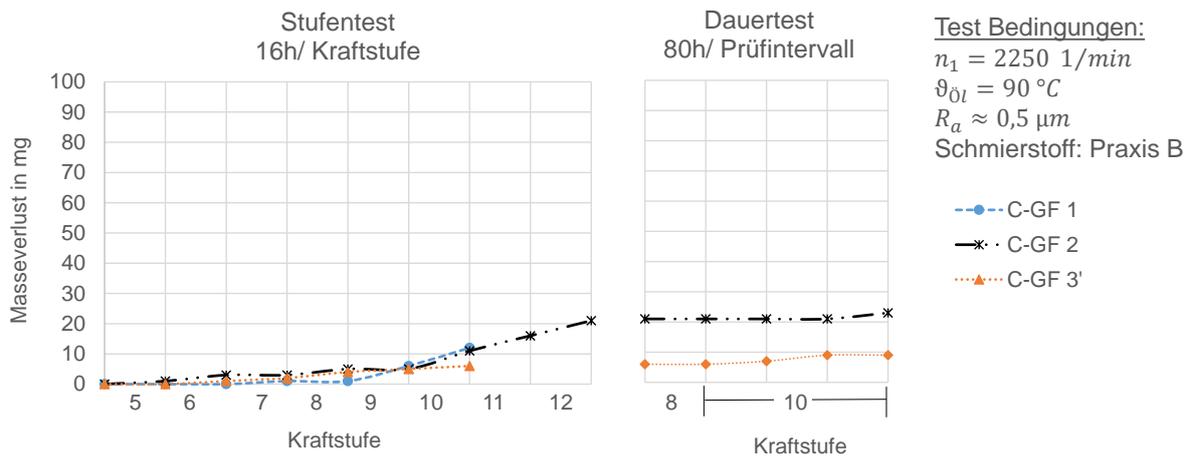


Bild A.10-29: Verläufe des Masseverlusts im Dauertest nach Erweiterung des Stufentests mit dem Praxisschmierstoff B

A.5 Ergänzende Profilmessschriebe und Zahnflankenfotos

Es sind die Profilmessschriebe der verschiedenen Prüfverzahnungen nach der Kraftstufe 9 aus den Versuchen aus Abschnitt 7.3 in Bild A.10-30 dargestellt.

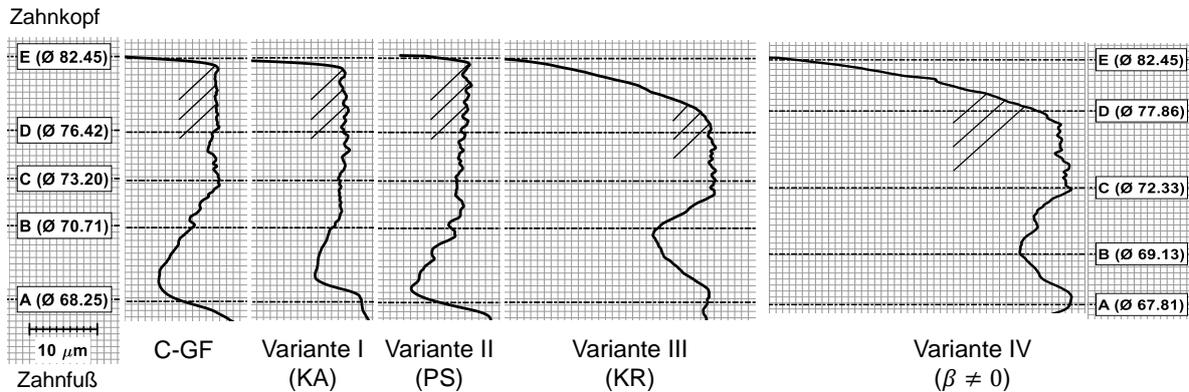


Bild A.10-30: Exemplarische Profilmessschriebe der Varianten nach Ende des Stufentests

Es ist ein ergänzendes exemplarisches Zahnflankenfoto aus Abschnitt 7.3 Variation der Prüfverzahnungen dargestellt. Die Ausbildung einer Schabemarke im Zahnfußbereich der Variante II ist in Bild A.10-31 zu sehen.

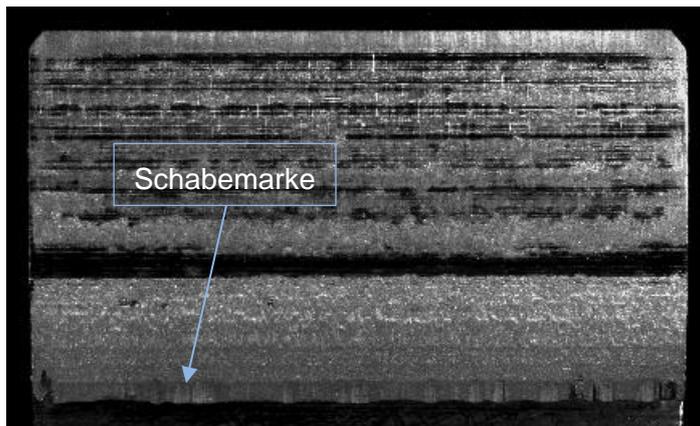


Bild A.10-31: Exemplarisches Zahnflankenfoto der Variante II nach 160 h in Kraftstufe 10

Es ist in Bild A.10-32 die exemplarische Ausbildung einer Schabemarke im Zahnfußbereich des Ritzels aus dem Versuch C-GF 2 aus Abschnitt 7.4.4 zu sehen.

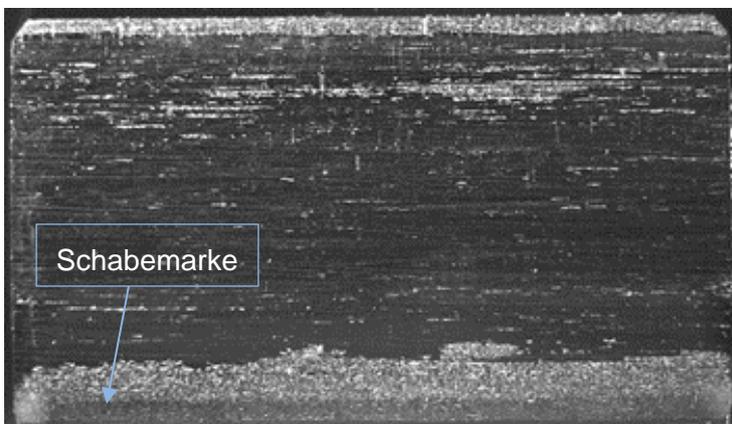


Bild A.10-32: Exemplarisches Zahnflankenfoto des Ritzels mit Schabemarke aus dem Versuch C-GF 2

A.6 Zuordnung der GF-Klassen im Graufleckentest nach DIN 3990-16

Es ist die Zuordnung der GF-Klassen im Graufleckentest nach DIN 3990-16 ergänzend zu der Beschreibung in Abschnitt 2.3.1 in Tabelle A.10-4 dargestellt.

Tabelle A.10-4: Zuordnung zu GF-Klassen im Graufleckentest nach DIN 3990-16

GF-Klasse	Stufentest Prüflauf	Stufentest Wdh-lauf	Dauertest					
			Anforderungen/ Merkmale	Kriterien				
GFT-niedrig	$SKS_p \leq 7$	$SKS_W \leq 8$	$z_{10} \leq 1$ und $f_{im} > 20 \mu m$	nach 80 h KS 8: $f_{im} > 20 \mu m$, kein Fressen oder Verschleiß oder nach 80 h KS 10: $f_{im} > 20 \mu m$, kein Fressen oder Verschleiß				
GFT-mittel	$SKS_p = 8, 9$	$SKS_W = 8, 9$	$z_{10} \geq 2$: $f_{im} > 20 \mu m$ und/oder Ausfall durch Grübchenbildung	nach 80 h KS 10: $f_{im} < 20 \mu m$ und:				
				z_{10}	2	3	4	5
				f_{imz10}	$> 14 \mu m$	$> 16 \mu m$	$> 18 \mu m$	$> 20 \mu m$
GFT-hoch	$SKS_p = 10$ oder $SKS_p > 10$ und f_{im} nach KS 9 $> 5,5 \mu m$	$SKS_W = 10$ oder $SKS_W > 10$	$z_{10} \geq 2$: Ausfall durch Grübchenbildung oder Erreichen der maximalen Laufzeit	z_{10}	2	3	4	5
				f_{imz10}	$\leq 14 \mu m$ $> 9 \mu m$	$\leq 16 \mu m$ $> 11 \mu m$	$\leq 18 \mu m$ $> 13 \mu m$	$\leq 20 \mu m$ $> 14 \mu m$
				und: $(f_{imz10} - f_{im} \text{ nach KS 8}) / z_{10} \leq 2 \mu m$				
GFT-sehr hoch	$SKS_p > 10$ und f_{im} nach KS 9 $\leq 5,5 \mu m$	$SKS_W > 10$	$z_{10} \geq 2$: Ausfall durch Grübchenbildung oder Erreichen der maximalen Laufzeit	z_{10}	2	3	4	5
				f_{imz10}	$\leq 9 \mu m$	$\leq 11 \mu m$	$\leq 13 \mu m$	$\leq 14 \mu m$
				und: $(f_{imz10} - f_{im} \text{ nach KS 8}) / z_{10} \leq 1,5 \mu m$				
nicht auswertbar	Bei einem Ausfall - durch Grübchen, Fressen und/oder Verschleiß im Stufentest, - durch Fressen und/oder Verschleiß im Dauertest mit $z_{10} \leq 1$ oder - durch Grübchen im Dauertest mit $z_{10} \leq 1$ und $f_{im} \leq 20 \mu m$ ist eine zuverlässige Bewertung der GF-Klasse nicht gegeben. In diesem Fall sind die Ergebnisse und die Ausfallsursache zu dokumentieren, es erfolgt keine abschließende Einordnung in eine GF-Klasse.							

Tabelle B.1 (fortgesetzt)

GF-Klasse	Stufentest Prüflauf	Stufentest Wdh-lauf	Dauertest	
			Anforderungen/ Merkmale	Kriterien
Legende: z_{10} : Anzahl der durchgeführten Dauertestabschnitte in KS 10 bis Ende des Dauertests ohne Auftreten von Fressen oder Verschleiß Ende des Dauertests: Das Ende im Dauertest ist allgemein erreicht, wenn: <ul style="list-style-type: none"> das Schadenskriterium hinsichtlich Graufleckigkeit ($f_{im} > 20 \mu m$) erreicht wird oder Grübchenbildung, Fressen und/oder Verschleiß auftritt oder die maximale Laufzeit von 80 h in KS 8 und 400 h in KS 10 erreicht ist. f_{im} : Absolutwert der durch Graufleckigkeit bedingten mittleren Profilformabweichung f_{im} nach KS 8: f_{im} nach 80 h Laufzeit in KS 8 im Dauertest f_{imz10} : f_{im} nach z_{10} (entspricht dem letzten durchgeführten Dauertestabschnitt in KS 10 ohne Auftreten von Fressen oder Verschleiß) SKS: Schadenskraftstufe GFT: Graufleckentragfähigkeit				
ANMERKUNG 1	Für die Bewertung der GF-Klasse aus den Ergebnissen im Dauertest ist stets der Wert f_{im} am Ende des letzten hinsichtlich Graufleckigkeit auswertbaren Dauertestabschnitts zu verwenden. Tritt im letzten Dauertestabschnitt Fressen oder Verschleiß auf, so wird dieser Abschnitt für die Bewertung der GF-Klasse nicht berücksichtigt.			
ANMERKUNG 2	Beispielhaft sind in Anhang F in den Tabellen F.1 und F.2 charakteristische Flankenmerkmale für die unterschiedlichen GF-Klassen nach unterschiedlichen Kraftstufen bzw. Laufzeiten belegt. Die angegebenen Flankenmerkmale gelten allein zur Orientierung. Zusätzlich kann eine beispielhafte Einordnung in eine GF-Klasse der Tabelle D1 und der Tabelle D2 in Anhang D entnommen werden.			
ANMERKUNG 3	Anhang D kann eine beispielhafte Einordnung in eine GF-Klasse entnommen werden.			
ANMERKUNG 4	Es ist zu beachten, dass in Abschnitt 13 die Ermittlung der im Prüfzeugnis anzugebenden Schadenskraftstufe SKS beschrieben wird. In Tabelle B.1 wird im Zuge der Ermittlung der GF-Klasse dagegen auf die Einzelergebnisse SKS_p und SKS_W zurückgegriffen. Hier gilt immer die tatsächlich erreichte Schadenskraftstufe.			

Dissertationen der FZG

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
1	PERRET, H.	Übertragung konstanter Leistung durch stufenlos mechanische Regeltriebe. TH Braunschweig 1935.
2	BELLMANN, H.	Beiträge zur Prüfung von Bremsbelägen. TH Braunschweig 1939.
3	HIERSIG, H.M.	Der Zusammenhang von Gestaltung und Beanspruchung bei Schneckengetrieben mit Evolventenverzahnung. TH Braunschweig 1943.
4	HELBIG, F.	Walzenfestigkeit und Grübchenbildung von Zahnrad- und Wälzlagerwerkstoffen. TH Braunschweig 1943.
5	ARF, D.	Pendelrollenlager mit symmetrischen und unsymmetrischen Rollen. TH Braunschweig 1944.
6	OESMANN, W.	Entwicklung einer Stahlsand-Schalt- und Regelkupplung. TH Braunschweig 1945.
7	RUBO, E.	Ermittlung der Achsfehler-Empfindlichkeit verschiedener Zylinder-Schneckengetriebe mit Hilfe des Einlauf-Abschliffvolumens. TH Braunschweig 1948.
8	GLAUBITZ, H.	Drehmomentmessungen zum Wendevorgang bei Raupenfahrwerken. TH Braunschweig 1948.
9	TALKE, H.	Beiträge zur hydrodynamischen Schmiertheorie des ebenen Gleitschuhes auf ebener Fläche. TH Braunschweig 1948.
10	CRAMER, H.	Über die Reibung und Schmierung feinmechanischer Geräte. TH Braunschweig 1949.
11	THOMAS, W.	Reibscheiben-Regelgetriebe mit Linienberührung. TH Braunschweig 1949.
12	MAUSHAKE, W.	Theoretische Untersuchung von Schneckengetrieben mit Globoidschnecke und Stirnrad. TH Braunschweig 1950.
13	KRAUPNER, K.W.	Das plastische Verhalten umlaufender Stahlrollen bei Punktberührung. TH Braunschweig 1951.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
14	BANASCHEK, K.	Die Gleitreibung geschmierter Flächen kleiner Schmiegun. Einfluß von Werkstoffpaarung, Krümmung, Oberfläche und Schmierstoff. TH Braunschweig 1951.
15	HEYER, E.	Versuche mit Zylinderschneckenrieben. Einfluß von Zahnform, Modul, Durchmesser und Schmierstoff auf Verlustleistung und Tragfähigkeit. TH München 1952.
16	HENTSCHEL, G.	Der Hochleistungswälztrieb. Entwicklungsstand und Entwicklungsmöglichkeiten. TH München 1952.
17	WINTER, H.	Tragfähigste Evolventengeradverzahnung. TH München 1954.
18	ROY, A.K.	Spannungsoptische Untersuchung eines schrägverzahnten Stirnrades. TH München 1957.
19	RETTIG, H.	Dynamische Zahnkraft. TH München 1957.
20	OHLENDORF, H.	Verlustleistung und Erwärmung von Stirnrädern. TH München 1958.
21	UNTERBERGER, M.	Geräuschuntersuchungen an geradverzahnten Zahnrädern. TH München 1958.
22	LOOMAN, J.	Das Abrichten von profilierten Schleifscheiben zum Schleifen von schrägverzahnten Stirnrädern. TH München 1959.
23	JARCHOW, F.	Versuche an Stirnrad-Globoidschneckenrieben. TH München 1960.
24	POPOVIC, L.	Einfluß von Zahnform und Bearbeitung auf die Zahnfußfestigkeit. TH München 1960.
25	EHRENSPIEL, K.	Die Festkörperreibung von geschmierten und ungeschmierten Metallpaarungen mit Linienberührung. TH München 1962.
26	PITTROFF, H.	Riffelbildung infolge Stillstandserschütterungen bei Wälzlagern. TH München 1962.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
27	SCHREIBER, H.	Zur Auswertung von Lebensdauerversuchen an Wälzlagern. TH München 1962.
28	ROTH, K.	Untersuchungen über die Eignung der Evolventenzahnform für eine allgemein verwendbare feinwerktechnische Normverzahnung. TH München 1963.
29	NARUSE, Ch.	Verschleiß, Tragfähigkeit und Verlustleistung bei Schraubengradgetrieben. TH München 1964.
30	GARTNER, F.	Die Mischreibung bei Linienberührung. TH München 1964.
31	ASSMANN, H.	Vergleichende Untersuchung von Getriebeölen im FZG-Stirnrad- und Esso-Hypoidprüfstand. TH München 1965.
32	REISTER, D.	Einseitiges Breitentragen bei Stirnrädern. TH München 1965.
33	KORRENN, H.	Gleitreibung in den Kontaktstellen zwischen den Wälzkörpern und den Laufbahnen der Ringe von Wälzlagern. TH München 1965.
34	HÖSEL, Th.	Geräuschuntersuchungen an schrägverzahnten Stirnrädern mit Evolventenverzahnung. TH München 1965.
35	LANGENBECK, K.	Die Verschleiß- und Freßgrenzlast der Hypoidgetriebe. TH München 1966.
36	MEMMEL, M.	Untersuchungen über die Tragfähigkeit und Gebrauchsdauer von Gelenklagern. TH München 1966.
37	BÖTSCH, H.	Der Einfluß der Oberflächenbearbeitung und -behandlung auf die Flankenfestigkeit von Stirnrädern aus Vergütungsstahl. TH München 1966.
38	LECHNER, G.	Die Freßlastgrenze bei Stirnrädern aus Stahl. TH München 1966.
39	LANGE, S.	Untersuchungen von Helicon- und Spiroidgetrieben mit abwickelbaren Schneckenflanken nach der hydrodynamischen und nach der Hertzschen Theorie. TH München 1967.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
40	SCHWÄGERL, D.	Untersuchung von Helicon- und Spiroidgetrieben mit trapezförmigem Schneckenprofil nach der Hertzschen und nach der hydrodynamischen Theorie. TH München 1967.
41	MICHELS, K.	Schneckengetriebe mit Werkstoffpaarung Stahl/Grauguß. TH München 1968.
42	GACKSTETTER, G.	Verlustarme Verzahnung. TH München 1968.
43	GEUPEL, H.	Flüssigkeitsreibung bei Punktberührung. TH München 1969.
44	GREKOUSSIS, R.	Vergleichende Untersuchungen zur Freßtragfähigkeit von Hypoid- und Stirnrädern. TH München 1969.
45	BAETHGE, J.	Zahnfederhärte, Drehwegfehler und Geräusch bei Stirnrädern. TH München 1969.
46	SCHULZ, H.D.	Untersuchung über Tragfähigkeiten und Verlustleistung von Schneckengetrieben mit trapezförmigem Schneckenprofil und kegeliger Schnecke. TH München 1969.
47	STÖLZLE, K.	Leistungsübertragung in Planetengetrieben bei statischem und dynamischem Betrieb. Berechnung, Optimierung und Versuchsergebnisse. TH München 1970.
48	SEITZINGER, K.	Die Erwärmung einsatzgehärteter Zahnräder als Kennwert für ihre Freßtragfähigkeit. TU München 1971.
49	STÖSSEL, K.	Reibungszahlen unter elasto-hydrodynamischen Bedingungen. TU München 1971.
50	SCHMIDT, G.	Berechnung der Wälzpressung schrägverzahnter Stirnräder unter Berücksichtigung der Lastverteilung. TU München 1972.
51	HIRT, M.	Einfluß der Zahnfußausrundung auf Spannung und Festigkeit von Geradstirnrädern. TU München 1974.
52	WILKESMANN, H.	Berechnung von Schneckengetrieben mit unterschiedlichen Zahnprofilformen (Tragfähigkeits- und Verlustleistung für Hohlkreis-, Evolventen- und Geradlinienprofil). TU München 1974.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
53	RICHTER, M.	Der Verzahnungswirkungsgrad und die Freßtragfähigkeit von Hypoid- und Schraubenradgetrieben - Versuchsergebnisse und Berechnungsmethoden. TU München 1976.
54	RÖSCH, H.	Untersuchungen zur Wälzfestigkeit von Rollen - Einfluß von Werkstoff, Wärmebehandlung und Schlupf. TU München 1976.
55	GAGGERMEIER, H.	Untersuchungen zur Reibkraftübertragung in Regel-Reibradgetrieben im Bereich elasto-hydrodynamischer Schmierung. TU München 1977.
56	KÄSER, W.	Beitrag zur Grübchenbildung an gehärteten Zahnrädern. Einfluß von Härtetiefe und Schmierstoff auf die Flankentragfähigkeit. TU München 1977.
57	KNABEL, W.	Geräusche und Schwingungen an Stirnradgetrieben. Untersuchungen geometrischer Einflüsse bei hohen Drehzahlen und Belastungen. TU München 1977.
58	WIRTH, X.	Über den Einfluß von Schleifkerben auf die Zahnfußtragfähigkeit und das Schädigungsverhalten oberflächengehärteter Zahnräder. TU München 1977.
59	HUBER, G.	Zylinderschneckengetriebe, ein Beitrag zur Berechnung von Grübchen- und Gleitverschleiß und Angaben zum Wirkungsgradverhalten aus Versuchen. TU München 1978.
60	BROSSMANN, U.	Über den Einfluß der Zahnfußausrundung und des Schrägungswinkels auf Beanspruchung und Festigkeit schrägverzahnter Stirnräder. TU München 1979.
61	PLEWE, H.-J.	Untersuchungen über den Abriebverschleiß von geschmierten, langsam laufenden Zahnrädern. TU München 1980.
62	FRESEN, G.	Untersuchungen über die Tragfähigkeit von Hypoid- und Kegelradgetrieben (Grübchen, Ridging, Rippling, Graufleckigkeit und Zahnbruch). TU München 1981.
63	OSTER, P.	Beanspruchung der Zahnflanken unter Bedingungen der Elastohydrodynamik. TU München 1982.
64	HORNUNG, K.	Zahnräder aus Bainitischem Gusseisen mit Kugelgraphit. TU München 1983.
65	WEISS, T.	Zum Festigkeits- und Verzugsverhalten von randschichtgehärteten Zahnrädern. TU München 1983.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
66	VOJACEK, H.	Das Reibungsverhalten von Fluiden unter elasto-hydrodynamischen Bedingungen. Einfluß der chem. Struktur des Fluides, der Werkstoffe und der Makro- und Mikrogeometrie der Gleit/Wälz- TU München 1984.
67	SCHÖNNENBECK, G.	Einfluß der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit und Grübchenbildung) hauptsächlich im Umfangsgeschwindigkeitsbereich 1...9 m/s. TU München 1984.
68	WIENER, H.	Untersuchung der Rollenkinematik im Axial-Pendelrollenlager. TU München 1984.
69	MATHIAK, D.	Untersuchungen über Flankentragfähigkeit, Zahnfußtragfähigkeit und Wirkungsgrad von Zylinderschneckengetrieben. TU München 1984.
70	STRASSER, H.	Einflüsse von Verzahnungsgeometrie, Werkstoff und Wärmebehandlung auf die Zahnfußtragfähigkeit. TU München 1984.
71	JOACHIM, F.-J.	Untersuchungen zur Grübchenbildung an vergüteten und normalisierten Zahnrädern (Einfluß von Werkstoffpaarung, Oberflächen- und Eigenspannungszustand). TU München 1984.
72	GERBER, H.	Innere dynamische Zusatzkräfte bei Stirnradgetrieben - Modellbildung, innere Anregung und Dämpfung. TU München 1984.
73	SIMON, M.	Messung von elasto-hydrodynamischen Parametern und ihre Auswirkung auf die Grübchentragfähigkeit vergüteter Scheiben und Zahnräder. TU München 1984.
74	SCHMIDT, W.	Untersuchungen zur Grübchen- und zur Zahnfußtragfähigkeit geradverzahnter evolventischer Innenstirnräder. TU München 1984.
75	FUNCK, G.	Wärmeabführung bei Getrieben unter quasistationären Betriebsbedingungen. TU München 1985.
76	PAUL, M.	Einfluß von Balligkeit und Lageabweichungen auf die Zahnfußbeanspruchung spiralverzahnter Kegelräder. TU München 1986.
77	HOPPE, F.	Das Abschalt- und Betriebsverhalten von mechanischen Sicherheitskupplungen. TU München 1986.
78	MICHAELIS, K.	Die Integraltemperatur zur Beurteilung der Freßtragfähigkeit von Stirnradgetrieben. TU München 1987.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
79	WECH, L.	Untersuchungen zum Wirkungsgrad von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. TU München 1987.
80	KNAUER, G.	Zur Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder - Einfluß von Werkstoff, Schmierstoff und Betriebstemperatur. TU München 1988.
81	PLACZEK, T.	Lastverteilung und Flankenkorrektur in gerad- und schrägverzahnten Stirnradstufen. TU München 1988.
82	PFLAUM, H.	Das Reibungsverhalten ölgeschmierter Kegelreibkupplungen in Synchronisationseinrichtungen von Kraftfahrzeug-Schaltgetrieben. TU München 1988.
83	BRINCK, P.	Zahnfußtragfähigkeit oberflächengehärteter Stirnräder bei Lastrichtungsumkehr. TU München 1989.
84		entfallen
85	NEUPERT, K.	Verschleißtragfähigkeit und Wirkungsgrad von Zylinder-Schneckengetrieben. TU München 1990.
86	PREXLER, F.	Einfluß der Wälzflächenrauheit auf die Grübchenbildung vergüteter Scheiben im EHD-Kontakt. TU München 1990.
87	SCHALLER, K.-V.	Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Stirnradflanken. TU München 1990.
88	COLLENBERG, H.-F.	Untersuchungen zur Freßtragfähigkeit schnelllaufender Stirnradgetriebe. TU München 1991.
89	MÜLLER, R.	Schwingungs- und Geräuschanregung bei Stirnradgetrieben. TU München 1991.
90	ANZINGER, M.	Werkstoff- und Fertigungseinflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit, insbesondere im hohen Zeitfestigkeitsgebiet. TU München 1991.
91	KAGERER, E.	Messung von elasto-hydrodynamischen Parametern im hochbelasteten Scheiben- und Zahnkontakt. TU München 1991.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
92	HASLINGER, K.	Untersuchungen zur Grübchentragfähigkeit profilkorrigierter Zahnräder. TU München 1991.
93	VOLLHÜTER, F.	Einfluß der Achsversetzung auf die Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit von spiralverzahnten Kegelrädern. TU München 1992.
94	PINNEKAMP, B.	Das Schaltverhalten von PKW-Getriebesynchronisierungen. TU München 1992.
95	SCHUBERT, M.	Einfluß der Befestigungsart und Radkranzdicke auf die Zahntragfähigkeit von Innenstirnrädern. TU München 1993.
96	STEINGRÖVER, K.	Untersuchung zu Verschleiß, Verlustgrad und Fressen bei Zylinder-Schneckengetrieben. TU München 1993.
97	ELSTORPFF, M.-G.	Einflüsse auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder bis in das höchste Zeitfestigkeitsgebiet. TU München 1993.
98	EMMERT, S.	Untersuchungen zur Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit, Grübchenbildung) schnellaufender Stirnradgetriebe. TU München 1994.
99	SUCHANDT, Th.	Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder und zur Bruchfestigkeit vergüteter Laschenkettens. TU München 1994.
100	HÄMMERL, B.	Lebensdauer- und Temperaturverhalten ölgekühlter Lamellenkupplungen bei Lastkollektivbeanspruchung. TU München 1994.
101	WEISS, R.	Einfluß der Ölalterung auf die Zahnflankentragfähigkeit. TU München 1994.
102	SCHLENK, L.	Untersuchungen zur Freßtragfähigkeit von Großzahnradern. TU München 1995.
103	MANN, U.	Schmierfilmbildung in elasto-hydrodynamischen Kontakten, Einfluß verschiedener Grundöle und Viskositäts-Index-Verbesserer. TU München 1995.
104	RUDZEWSKI, S.	Systemtechnische Verknüpfung eingeführter Getriebeberechnungsprogramme. TU München 1995.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
105	RANK, R.	Untersuchungen zur Lebensdauerprüfung von Synchronisierungen. TU München 1995.
106	EBERSPÄCHER, C.	Reihenfolgeeffekte bei der Grübchen-Betriebsfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München 1995.
107	RANK, B.	Untersuchungen zur Grübchenbildung bei Zylinder-Schneckengetrieben. TU München 1996.
108	SATTELBERGER, K.	Schwingungs- und Geräuschanregung bei ein- und mehrstufigen Stirnradgetrieben. TU München 1997.
109	HIRSCHMANN, V.	Tragfähigkeitsuntersuchungen an stufenlosen Umschlingungsgetrieben. TU München 1997.
110	THOMAS, J.	Flankentragfähigkeit und Laufverhalten von hartfeinbearbeiteten Kegelrädern. TU München 1998.
111	WIKIDAL, F.	Berechnung der Flankenpressung gerad- und schrägverzahnter Stirnräder für last- und fertigungsbedingte Abweichungen. TU München 1998.
112	PERPONCHER, V., CH.	Einflüsse von Reibflächentopographie und Beanspruchungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. TU München 1998.
113	SCHEDL, U.	Einfluß des Schmierstoffs auf die Grübchenlebensdauer einsatzgehärteter Zahnräder. TU München 1998.
114	VOLLMER, T.	Methodik zur Entwicklung einer Fahrstrategie für Fahrzeuge, ausgeführt am Beispiel des Autarken Hybrids. TU München 1998.
115	HEITMANN, A.	Entwicklung des i ² -Getriebes für den Autarken Hybrid-Antriebsstrang. TU München 1998.
116	PFLEGER, F.	Schalt- und Lebensdauerverhalten von Lamellenkupplungen. TU München 1998.
117	KERSCHL, S.	Der Autarke Hybrid - Optimierung des Antriebsstrangs hinsichtlich Energieverbrauch und Bestimmung des Einsparpotentials. TU München 1998.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
118	DÖBEREINER, R.	Tragfähigkeit von Hochverzahnungen geringer Schwingungsanregung. TU München 1998.
119	WEIGAND, U.	Werkstoff- und Wärmebehandlungseinflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit. TU München 1999.
120	SCHRADE, U.	Einfluß von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. TU München 2000.
121	KÖLL, J.	Konstruktion des Getriebes für ein Pkw-Hybridantriebssystem. TU München 2000.
122	FÖRSTER, W.	Der Lastschaltvorgang beim stufenlosen i ² -Getriebe des Autarken Hybrid-Antriebsstrangs. TU München 1999.
123	LANGE, N.	Hoch fresstragfähige Schneckengetriebe mit Rädern aus Sphaeroguß. TU München 2000.
124	LUTZ, M.	Methoden zur rechnerischen Ermittlung und Optimierung von Tragbildern an Schneckengetrieben. TU München 2000.
125	KOPATSCH, F.	Wirksamkeit von Viskositätsindex-Verbesserern im EHD-Zahnradkontakt. TU München 2000.
126	BAYERDÖRFER, I.	Einfluß von betriebsbedingten Schmierstoffveränderungen auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München 2000.
126e	DOMIAN, H.-J.	Systematische Synthese von Getriebestrukturen der Vorgelegebauart. TU München 2001.
127	TOBIE, T.	Zur Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München 2001.
128	STAHL, K.	Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Gerad- und Schrägverzahnungen unter besonderer Berücksichtigung der Presungsverteilung. TU München 2001.
129	NEUMÜLLER, M.	Einfluß der Ölalterung auf Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. TU München 2001.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
130	MOSBACH, C.	Das Reibungs- und Reibschwing-Verhalten nasslaufender Lamellenkupplungen. TU München 2002.
131	DYLA, A.	Modell einer durchgängig rechnerbasierten Produktentwicklung. TU München 2002.
132	GRASWALD, C.	Reibung im elastohydrodynamischen Kontakt von Reibradgetrieben. TU München 2002.
133	GEISER, H..	Grundlagen zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens von Stirnrädern. TU München 2002.
134	SCHINAGL, S.	Zahnfußtragfähigkeit schrägverzahnter Stirnräder unter Berücksichtigung der Lastverteilung. TU München 2002.
135	DOLESCHEL, A.	Wirkungsgradberechnung von Zahnradgetrieben in Abhängigkeit vom Schmierstoff. TU München 2003.
136	ANNAST, R.	Kegelrad-Flankenbruch. TU München 2003
137	SÜSSMUTH, J.-F.	Eignungsbeurteilung von Schmierstoffen für stufenlose Umschlingungsgetriebe. TU München 2003.
138	MATTEN, D.	Methode zur Entwicklung ingenieurwissenschaftlicher Berechnungsprogramme. TU München 2003.
139	GEIER, N.	Untersuchung des Reibungs- und Verschleißverhaltens nasslaufender Kupplungen in Abhängigkeit ihrer Reibflächentopographie. TU München 2003
140	HERTTER, T.	Rechnerischer Festigkeitsnachweis der Ermüdungstragfähigkeit vergüteter und einsatzgehärteter Stirnräder. TU München 2003.
141	KRIEGER, H.	Alterung von Schmierstoffen im Zahnradprüfstand und in Praxisgetrieben. TU München 2004.
142	STEUTZGER, M.	Einfluß der Baugröße auf die Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München 2004.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
143	SCHMIDBAUER, T.	Aufbau und Erprobung des Autarken Hybrid-Antriebsstrangs im Versuchsfahrzeug. TU München 2004.
144	LIU, W.	Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. TU München 2004.
145	FEHLING, R.	Höhere Tragfähigkeit bei Zahnradflanken durch eine nichtevolventische Profilmodifikation. TU München 2004.
146	GUTTENBERG, P.	Der autarke Hybrid am Prüfstand - Funktion, Kraftstoffverbrauch und energetische Analyse. TU München 2004.
147	WIMMER, T.	Einflüsse auf das Lastübernahmeverhalten von nasslaufenden Lamellenkupplungen. TU München 2004.
148	RADEV, T.	Einfluss des Schmierstoffes auf die Grübchentragfähigkeit ein-satzgehärteter Zahnräder - Entwicklung des Praxisnahen Pittingtests. TU München 2005.
149	KRASTEV, I.	Optimierung des Lastschaltvorgangs im i^2 -Getriebe. TU München 2005.
150	HEILEMANN, J.	Tragfähigkeit und Wirkungsgrad bei unterschiedlichen Schnecken-Zahnflankenformen unter Berücksichtigung der Oberflächenhärte und Härtetiefe. TU München 2005.
151	HEIZENRÖTHER, M.	Das Stirnraddifferenzial mit Innenverzahnung im Vergleich zum Kegelraddifferenzial inklusive einer Sperrwertanalyse. TU München 2005.
152	WIMMER, A.	Lastverluste von Stirnradverzahnungen - Konstruktive Einflüsse, Wirkungsgradmaximierung, Tribologie. TU München 2006.
153	BRUCKMEIER, S.	Flankenbruch bei Stirnradgetrieben. TU München 2006.
154	HAUSER, C.	Einfluss der Ölalterung auf Reibcharakteristik und Reibschwingverhalten von Lamellenkupplungen. TU München 2007.
155	GROSSL, A.	Einfluss von PVD-Beschichtungen auf die Flanken- und Fußtragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München 2007.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
156	STEINBERGER, G.	Optimale Grübchentragfähigkeit von Schrägverzahnungen. TU München 2007.
157	JAROS, M.	Integration des STEP-Produktmodells in den Getriebeentwicklungsprozess. TU München 2007.
158	RADEV, S.	Einfluss von Flankenkorrekturen auf das Anregungsverhalten gerad- und schrägverzahnter Stirnradpaarungen. TU München 2007.
159	BRAYKOFF, C.	Tragfähigkeit kleinmoduliger Zahnräder. TU München 2007.
160	STANGL, M.	Methodik zur kinematischen und kinetischen Berechnung mehrwelliger Planeten-Koppelgetriebe. TU München 2007.
161	STENICO, A.	Werkstoffmechanische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München 2007.
162	SCHWIENBACHER, S.	Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. TU München 2008.
163	WINKLER, J.	Tribologischer Schichtaufbau bei Synchronisierungen und sein Einfluss auf Reibung und Verschleiß. TU München 2008.
164	WIRTH, C.	Zur Tragfähigkeit von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. TU München 2008.
165	KREIL, O.	Einfluss der Oberflächenstruktur auf Druckverteilung und Schmierfilmdicke im EHD-Kontakt. TU München 2009.
166	OTTO, H.-P.	Flank load carrying capacity and power loss reduction by minimised lubrication. TU München 2009.
167	OTTO, M.	Lastverteilung und Zahnradtragfähigkeit von schrägverzahnten Stirnrädern. TU München 2009.
168	TOMIC, D.	Zum Verschleiß von Kegelreibkupplungen - Einflüsse von Belastung und Schmierstoff auf Reibschichteigenschaften. TU München 2009.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
169	WEISEL, C.	Schneckengetriebe mit lokal begrenztem Tragbild. TU München 2009.
170	WEITL, R.	Zur Tragfähigkeitsberechnung von Wälzlagern und Stirnrädern. TU München 2010.
171	MULZER, F.	Systematik hochübersetzender koaxialer Getriebe. TU München 2010.
172	SCHUDY, J.	Untersuchungen zur Flankentragfähigkeit von Außen- und Innenverzahnungen. TU München 2010.
173	BRETL, N.	Einflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder im Bereich hoher Lastspielzahlen. TU München 2010.
174	GRIGGEL, T.	Einfluss der Fertigungsqualität auf die Schwingungsanregung von Stirnrädern. TU München 2010.
175	LAYHER, M.	Einfluss der Schmierstoffadditivierung auf das Reibungsverhalten nasslaufender Reibschaltelemente. TU München 2011.
176	HOCHMANN, M.	Zahnradtragfähigkeit bei Schmierung mit Getriebefließfetten. TU München 2011.
177e	DETZEL, J.	Tribologische Untersuchungen an Achsgetrieben zur Verbesserung des Wirkungsgrads. TU München 2011.
178	ZIEGLER, A.	Zur verkürzten Systemlebensdauerprüfung von Zahnradgetrieben. TU München 2011.
179	THOMA, F.	Lastübertragung im verformten System Lager-Welle-Zahnrad. TU München 2012.
180	FRÜHE, T.	Berechnung und Minimierung der Zahnfußspannung von Standard- und LowLos-Verzahnungen. TU München 2012.
181	WITZIG, J.	Flankenbruch - Eine Grenze der Zahnradtragfähigkeit in der Werkstofftiefe. TU München 2012.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
182	KLEIN, M.	Zur Fresstragfähigkeit von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. TU München 2012.
183	KURTH, F.	Efficiency Determination and Synthesis of Complex-Compound Planetary Gear Transmissions. TU München 2012.
184	WOHLLEBER, F.	Thermischer Haushalt nasslaufender Lamellenkupplungen. TU München 2012.
185	HEIDER, M.	Schwingungsverhalten von Zahnradgetrieben. TU München 2012.
186	MONZ, A.	Tragfähigkeit und Wirkungsgrad von Schneckengetrieben bei Schmierung mit konsistenten Getriebefetten. TU München 2012.
187	WIRTH, M.	Schleppmomente in Synchronisierungen von Fahrzeuggetrieben. TU München 2012.
188	BANSEMIR, G.	Konstruktionsleitsystem für den durchgängig rechnerbasierten Zahnradgetriebeentwurf. TU München 2012.
189	HERGESELL, M.	Grauflecken- und Grübchenbildung an einsatzgehärteten Zahnradern mittlerer und kleiner Baugröße. TU München 2013.
190	KOLLER, P.	Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Optimierung von Eigenspannungs- und Oberflächenzustand. TU München 2013.
191	SCHLEICH, T.	Temperatur- und Verlustleistungsverhalten von Wälzlagern in Getrieben. TU München 2013.
192	STEMPLINGER, J.-P.	Tragfähigkeit und Wirkungsgrad von Stirnradgetrieben bei Schmierung mit hochviskosen Fluiden und Fetten NLGI 0,1 und 2. TU München 2013.
193	FÜRSTENBERGER, M.	Betriebsverhalten verlustoptimierter Kunststoffzahnradern. TU München 2013.
194	HOMBAUER, M.	Grauflecken an Kegelrad- und Hypoidverzahnungen und deren Einfluss auf die Grübchentragfähigkeit. TU München 2013.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
195	MAYER, J.	Einfluss der Oberfläche und des Schmierstoffs auf das Reibungsverhalten im EHD-Kontakt. TU München 2013.
196	BAUHOFFER, H.	Kontakt- und Laufverhalten von Kronenrädern unter Montageabweichungen. TU München 2014.
197	LECHNER, C.	Energiebilanzierung des CVT-Hybrid. TU München 2014.
198	HINTERSTOISSER, M.	Zur Optimierung des Wirkungsgrades von Stirnradgetrieben TU München 2014.
199	LOMBARDO, S.	Einfluss von verschiedenen Carbonitrierverfahren auf die Zahnfuß- sowie Zahnflankentragfähigkeit von Stirnrädern. TU München 2014.
200	IDLER, S.	Die Fresstragfähigkeit stufenloser Umschlingungsgetriebe. TU München 2014.
201	LANGHEINRICH, A.	Geometrie, Beanspruchung und Verformung asymmetrischer Stirnradverzahnungen. TU München 2014.
202	MATT, P.	Einfluss der Stirnkanten auf die Tragfähigkeit von Verzahnungen. TU München 2014.
203	HENSEL, M.	Thermische Beanspruchbarkeit und Lebensdauerverhalten von nasslaufenden Lamellenkupplungen. TU München 2014.
204	GEIGER, J.	Wirkungsgrad und Wärmehaushalt von Zahnradgetrieben bei instationären Betriebszuständen. TU München 2014.
205	SIGMUND, W.	Untersuchung und Simulation des Verschleißverhaltens von Schneckengetrieben mit unvollständigem Tragbild. TU München 2015.
206	PARLOW, J.	Erweiterter Verzahnungsentwurf im Anforderungs- und Gesamtsystemkontext. TU München 2016.
207	NEUBAUER, B.	Lastverteilung und Anregungsverhalten in Planetengetriebesystemen. TU München 2016.

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
208	NITSCH, C.	Dynamisches Betriebsverhalten von Werkstoffverbundzahnradern. TU München 2016.
209	BIHR, J.	Untersuchung des Schwingungsverhaltens von mehrstufigen Stirnradgetrieben unter besonderer Berücksichtigung des Welle-Lager-Systems. TU München 2016.
210	SCHURER, S.	Einfluss nichtmetallischer Einschlüsse in hochreinen Werkstoffen auf die Zahnfußtragfähigkeit. TU München 2016.
211	KADACH, D.	Stillstandsmarkierungen an Zahnrädern und deren Auswirkungen auf die Flankentragfähigkeit. TU München 2016.
212	FELBERMAIER, M.	Untersuchungen zur Graufleckenbildung und deren Einfluss auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München 2016.
213	ACUNER, R.	Synchronisierungen mit Carbon-Reibwerkstoffen unter hohen und extremen Beanspruchungen. TU München 2016.
214	LOHNER, Th.	Berechnung von TEHD Kontakten und Einlaufverhalten von Verzahnungen. TU München 2016.
215	ZIMMER, M.	Berechnung und Optimierung von Geometrie und Eingriffsverhalten von Verzahnungen beliebiger Achslage. TU München 2017.
216	GWINNER, Ph.	Auslegung schwingungsarmer Stirnradverzahnungen für den automobilen Einsatz in hochdrehenden, elektrisch angetriebenen Achsgetrieben. TU München 2017.
217	SCHULTHEISS, H.	Zum Verschleißverhalten einsatzgehärteter Zahnradpaarungen in Abhängigkeit des Schmierungsmechanismus bei Fettschmierung. TU München 2017.
218	MOSER, K.	Methode zur Untersuchung des Betriebsverhaltens stufenloser Umschlingungsgetriebe. TU München 2017
219	STREBEL, M.	Spontanschäden an nasslaufenden Lamellenklupplungen. TU München 2017
220	BAAR, M.	Kennwerte zur Tragfähigkeit kleinmoduliger Kronenradverzahnungen unterschiedlicher Werkstoffpaarung. TU München 2017

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
221	WICKBORN, C.	Erweiterung der Flankentragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern in der Werkstofftiefe. TU München 2017
222	MEINGASSNER, G.	Methodik zur Untersuchung des Reibungsverhaltens nasslauender Lamellenkupplungen bei Langsamlauf- und Mikroschlupf. TU München 2017
223	ZORNEK, B.	Untersuchungen zur Flankentragfähigkeit vergüteter und nitrierter Innen- und Außenverzahnungen. TU München 2018
224	DOBLER, F.	Einflüsse auf die Tragfähigkeit induktiv umlaufgehärteter Stirnräder. TU München 2018
225	DAFFNER, M.	Validierung von Verformungsberechnungen im System Zahnrad-Welle-Lager-Gehäuse. TU München 2018
226	HEIN, M.	Zur ganzheitlichen betriebsfesten Auslegung und Prüfung von Getriebezahnradern. TU München 2018
227	HASL, C.	Zur Zahnfußtragfähigkeit von Kunststoffstirnrädern. TU München 2018
228	KOHN, B.	Topologische Flankenkorrektur zur Anregungsoptimierung von Stirnradgetrieben. TU München 2019
229	BOIADJIEV, I.	Schadensentwicklung und Tragfähigkeit carbonitrierter Kegeleradverzahnungen. TU München 2019
230	MAUTNER, E.	Grübchentragfähigkeit von Schneckengetrieben großer Baugröße mit unvollständigem Tragbild. TU München 2019
231	ENGELHARDT, C.	Einfluss von Wasser in Getriebeölen auf die Zahnflankentragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. TU München 2019
232	VÖLKEL, K.	Charakterisierung des Einlaufverhaltens nasslauender Lamellenkupplungen. TU München 2020
233	BANSEMIR, S.	Bewertung von Berechnungstiefe und Aussagegüte bei der Stirnradgetriebeberechnung. TU München 2020

Lfd. Nr.	Autor	Titel/Thema
234	UTAKAPAN, T.	Schwingungsverhalten mehrstufiger Getriebe. TU München 2020
235	KÖNIG, J.	Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch optimierte Fertigung und Schmierung. TU München 2020
236	JURKSCHAT, T.	Erweiterte Bestimmung lastabhängiger Verluste von Stirnradgetrieben. TU München 2020
237	EBNER, M.	Selbstschmierung hochbelasteter Zahnradkontakte mit schmierstoffgetränkten porösen Eisenwerkstoffen. TU München 2021
238	REIMANN, T.	Einfluss der Treibrichtung auf die Flankentragfähigkeit von Stirnrad-, Kegelrad- und Hypoidgetrieben. TU München 2021
239	DOBLER, A.	Verschleiß als Lebensdauergrenze für Zahnräder. TU München 2021
240	DAI, R.	Change-Management-fokussierte Einführung eines "Ganzheitlichen Produktionssystems" in Klein- und Kleinstunternehmen. TU München 2021
241	NORGAUER, P.	Verschleißverhalten von modernen Schneckenverzahnungen. TU München 2021
242	GÜNTNER, C.	Zum Einfluss der Härtebarkeit auf die Zahnfußtragfähigkeit ein-satzgehärteter Stirnräder größerer Baugröße. TU München 2022
243	WEIGL, A.	Reibreduzierung durch DLC-Beschichtungen. TU München 2022
244	ILLENBERGER, C.	Zahnflankentragfähigkeit ölgeschmierter Kunststoffverzahnungen. TU München 2022
245	FROMBERGER, M.	Using Acceleration and Transmission Error for Pitting Detection. TU München 2022
246	PELLKOFER, J.	Zum Verzahnungswirkungsgrad von Kegelradgetrieben. TU München 2022