

**Einfluss der Geometrie und der Betriebsbedingungen
auf die Graufleckigkeit von Großgetrieben**

Dissertation

zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur

der
Fakultät für Maschinenbau
der Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Khashayar Nazifi

aus Teheran / Iran

Bochum 2010

Herausgeber:

Institut für Konstruktionstechnik der Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Maschinenbau, 44780 Bochum

Dissertation:

Referent: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Predki
Korreferent: o. Prof. em. Dr.-Ing. Friedrich Jarchow

Tag der Einreichung: 7. April 2010

Tag der mündlichen Prüfung: 7. Mai 2010

© 2010 Institut für Konstruktionstechnik der
Ruhr-Universität Bochum
Alle Rechte vorbehalten

ISBN 3-89194-192-7

Meinem Vater.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Getriebe und Kraftfahrzeuge der Ruhr-Universität Bochum. Die Bearbeitung meines Forschungsthemas wäre ohne das Mitwirken vieler Personen nicht möglich gewesen, weshalb ich allen danke, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Predki meinen großen Dank aussprechen, da er es mir ermöglichte, zahlreiche Industrieaufträge zu bearbeiten und mir gleichzeitig eine große Freiheit gewährte, meinen wissenschaftlichen Interessen nachzugehen. Die Unterstützung, die ich erfahren durfte und das Wissen, welches ich erlernen konnte, waren nur an seinem Lehrstuhl und unter seiner Leitung möglich.

Herrn o. Prof. em. Dr.-Ing. Friedrich Jarchow danke ich für die Übernahme des Korreferates und die interessanten Gespräche über unseren „gemeinsamen Freund“.

Die vielen interessanten Aufgaben am Lehrstuhl konnte ich nur mit der Unterstützung meiner studentischen Hilfskräfte bewältigen. Besonders erwähnen möchte ich an dieser Stelle Herrn Christian Engelmann, der mir unermüdlich und voller Tatkraft zur Seite stand. Herrn Marco Dorigo danke ich für die kontroversen und förderlichen Diskussionen. Mein weiterer Dank gilt Herrn Henry Feller, der sehr gewissenhaft und mit eigenen Ideen seine Aufgaben erfüllte. Meinen Kollegen danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre. Mit Herrn Dr.-Ing. Simon Söndgen verbrachte ich viele unterhaltsame und gleichermaßen produktive Stunden bei gemeinsamen Prüfstandsarbeiten. Herr Dipl.-Ing. Marco Pech war nicht nur mein Bürokollege, er wurde im Laufe der Zeit zu einem sehr guten Freund. Die vielen fachlichen Gespräche und unsere unterschiedlichen Betrachtungsweisen von technischen Fragestellungen waren für mich immer eine Bereicherung.

Der Aufbau neuer und die Reparatur bestehender Prüfstände konnte nur mit der Hilfe und der Erfahrung der Institutswerkstatt gelingen. Herrn Günter Krizons gebührt mein besonderer Dank für die geduldige und aktive Unterstützung.

Meiner lieben Familie möchte ich für ihr Verständnis und den Beistand über die Jahre danken. Die größte Unterstützung habe ich jedoch von meiner geliebten Frau Silke erfahren. Durch ihre Rücksichtnahme und Geduld hatte ich trotz der vielen Stunden am Institut genügend Freiräume, diese Arbeit zu verwirklichen.

Kurzfassung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand von bisher noch nicht untersuchten Verzahnungsvarianten, ein besseres Verständnis für die Auswirkungen einzelner Geometrieparameter und Betriebsbedingungen auf die Graufleckigkeit zu gewinnen. Dabei gilt es weiterhin, bestehende Rechenverfahren abzusichern und an die Erkenntnisse aus dem Vergleich von Großgetriebeversuchen und Prüfläufen am Standardgetriebe anzupassen, um in Zukunft eine sichere Vorausberechnung von Verschleiß aufgrund von Graufleckigkeit zu ermöglichen. Die Schwerpunkte des Projektes liegen zum einen in der Untersuchung von Geometrievarianten, zum anderen auch in bisher nicht erforschten Betriebszuständen. Es erfolgen zwei Prüfstandsversuche mit Radsätzen mit einem Modul 16 mm und acht mit einem Modul 22 mm am Großgetriebeprüfstand (Achsabstand 447,33 mm) sowie vier Versuche an Verzahnungen mit einem Modul 3,27 mm und 17 mit einem Modul 4,5 mm am Standardprüfstand (Achsabstand 91,5 mm). Die Verzahnungsgeometrie beider Baugrößen ist bis auf das Modulverhältnis von ca. fünf weitgehend ähnlich. Der Versuchsablauf folgt dem Standardgraufleckentest nach FVA 54 I-IV. Der Schmierstoff mit der Schadenskraftstufe =8 ist, wie die Einspritztemperatur von $\vartheta = 90^\circ \text{C}$ und die Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis von $v_t = 8,3 \text{ m/s}$, für alle Versuche identisch. Am Großgetriebeprüfstand kommen Radsätze mit Ra–Werten von $0,1 \mu\text{m}$ bis zu $0,7 \mu\text{m}$ und Kopfrücknahmen von $\text{Ca} = 50 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ zum Einsatz. Das Versuchsprogramm am Standardgetriebeprüfstand beinhaltet neben Varianten, die eine der Baugröße angepasste, zum Großgetriebe analoge Flankenrauheit und Kopfrücknahme aufweisen, auch Versuche mit einer weiteren Variante.

Die Versuche zeigen, dass das Schaben der Kopfkante des getriebenen Rades auf der Zahnflanke des treibenden Rades, bedingt durch den vorzeitigen Eingriff, bei den Großgetriebeverzahnungen eine größere Auskolkungstiefe im Vergleich zur Graufleckigkeit erzeugt und zum Modul proportional ist. Durch einen ausreichend hohen Kopfrücknahmebetrag kann dieser Verschleiß minimiert werden. Steigende Flankenrauheiten führen bei allen Versuchen zu einer Erhöhung des graufleckigen Anteils der Zahnflanke. Zudem wächst die durch Grauflecken verursachte Auskolkungstiefe mit steigender Rauheit. Die graufleckenbedingte Auskolkung steigt nicht mit dem Modul, so dass die Anpassung der Berechnungsgleichung nach FVA 259 I um das Modulverhältnis der untersuchten Verzahnung zur Standardverzahnung zu einer guten Korrelation zwischen berechnetem und gemessenem Verschleiß führt. Versuchsräder ohne Graufleckenfläche haben gezeigt, dass Grübchenschäden nicht aus der Graufleckenfläche heraus wachsen. Vielmehr entstehen Grübchen am Rande der Graufleckenfläche aufgrund der ungünstigen Geometrie am Übergang der Graufleckenfläche zur unbeschädigten Zahnflanke. Ursachen für eine ungünstige Geometrie können auch Schabemarken aufgrund des vorzeitigen Eingriffes oder ungünstige Profilmodifikationen sein. Dauerversuche mit Ra–Werten von $0,1 \mu\text{m}$ bis zu $1,0 \mu\text{m}$ haben gezeigt, dass stagnierende Graufleckenflächen mit großer Auskolkungstiefe zu einer erhöhten Grübchengefahr führen als weiter anwachsende Graufleckenflächen.

Summary

The main objective of this thesis is to achieve a better understanding of the influence of particular geometric parameters and operation conditions on micropitting on the basis of none investigated gearing variations. Thereby it is essential to ensure existent calculation methods and match them to the results of the comparison between big gearbox tests and standard gearbox test runs to allow a save forecast of wear due to micropitting in the future. The main focus of the project lies on tests of geometric variants on the one hand and on so far none investigated operation conditions on the other hand. The experimental part of the examination consists of two bench tests with gear sets module 16 mm and eight with module 22 mm on the big gearbox (axial distance 447,33 mm) as well as four tests on gear sets with module 3,27 mm and 17 with module 4,5 mm on the standard test rig (axial distance 91,5 mm). The gearing geometry of both scales is, except of the module ratio of ca. 5, identical as far as possible. The test procedure follows the standard micropitting test according to FVA 54 I-IV. The lubricant with the damage load stage of $\sigma = 8$ is equal to all tests as well as the injection temperature of $\vartheta = 90^\circ \text{ C}$ and the circumferential velocity on the working pitch circle of $v_t = 8,3 \text{ m/s}$. The surface roughness of the big gear sets lie between $R_a 0,1 \mu\text{m}$ and $0,7 \mu\text{m}$ and the applied tip reliefs are $Ca = 50 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$. The testing schedule of the standard gearbox test rig includes additional to a scale matched surface roughness and tip relief another variant of each investigated parameter.

The tests show that the shaving of the tip of the driven gear on the tooth flank of the driving gear due to mesh interference causes deeper wear on big gearings than micropitting does. The wear depth caused by the shaving is proportional to the module. The effect of the shaving can be minimized by sufficient tip relief. Increasing tooth flank roughness leads to a higher percentage of the micropitting area on the tooth flank within all tests. Furthermore the depth of the wear caused by micropitting rises by rising surface roughness. The wear depth caused by micropitting is not proportional to the module. The adjustment of the calculation method according to FVA 259 I with the module ratio of the investigated module to the standard module leads to a good correlation between calculated and measured wear depth. Test gear sets without micropitting occurrence have shown that pitting damages do not grow out of the micropitting area. In fact pitting damages occur at the border of the micropitting area due to the disadvantaged geometry at the change-over from micropitting area to the undamaged gear tooth. Shaving marks to due mesh interference or profile modifications can also be the source for disadvantaged geometry. Endurance test runs with R_a between $0,1 \mu\text{m}$ and $1,0 \mu\text{m}$ have shown that a none growing micropitting area with high wear depth can lead to a higher pitting risk than a further growing micropitting area.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Formelzeichen	III
1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	7
2.1. Bisherige Forschungsergebnisse	10
2.2. Bisherige Arbeiten an der Forschungsstelle	12
2.3. Bestehende Berechnungsverfahren	14
2.3.1. FVA 54 I+II	14
2.3.2. FVA 54 III+IV	18
2.3.3. FVA 259 I	19
2.3.4. AGMA 06FTM06	20
3. Versuchsprogramm und untersuchte Parameter	23
3.1. Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	25
3.2. Kopfabrundung	26
3.3. Treibendes Rad	27
3.4. Profilverschiebung	27
3.5. Wasser im Öl	28
3.6. Modul Variation	29
4. Versuchsergebnisse	31
4.1. Qualität der gelieferten Verzahnungen	31
4.2. Ergebnisse der untersuchten Versuchsparameter	35
4.2.1. Versuchsergebnisse an der Standardverzahnung	35
4.2.2. Einfluss des chemisch–mechanischen Gleitschleifens	37
4.2.3. Dauerversuche mit chemisch–mechanisch gleitgeschliffenen Radsätzen	54
4.2.4. Einfluss der Kopfabrundung	59
4.2.5. Einfluss des treibenden Rades	68
4.2.6. Dauerversuch bei treibendem Rad	74
4.2.7. Einfluss der Profilverschiebung	77
4.2.8. Einfluss von Wasser im Öl	86
4.2.9. Einfluss des Moduls	92
4.2.10. Zusammenfassung der Stufentestergebnisse	102
4.2.11. Zusammenfassung der Dauertestergebnisse	104
4.3. Beschreibungen der Verschleißformen und ihrer Ursachen	105
4.3.1. Dreieckähnliche Auskolkung	107
4.3.2. Ellipsenähnliche Auskolkung	109

5. Theoretische Untersuchungen	111
5.1. Vergleichsrechnung nach FVA 259 I	111
5.1.1. Großgetriebe.....	111
5.1.2. Standardgetriebe.....	112
5.1.3. Neuauswertung der Versuchsergebnisse des Projektes FVA 286 II.....	114
5.1.4. Erweiterung des Berechnungsverfahrens nach FVA 259 I.....	116
5.2. Vergleich der verschiedenen Berechnungsverfahren	118
5.3. Berechnung der Verschleißtiefe aufgrund des vorzeitigen Eingriffes.....	122
5.4. Berechnung von Zahnpaarsteifigkeiten	125
5.4.1. Analytische Beschreibung der Zahnpaarsteifigkeit	125
5.4.2. Verifikation des analytischen Ansatzes zur Steifigkeitsberechnung	132
5.4.3. Berechnungsergebnisse	136
5.5. Hertzsche Flächenpressungen für unterschiedliche Kopfrücknahmebeträge und –formen.....	138
5.6. Modellvorstellung Grauflecken / Grübchen	140
6. Begleitende Untersuchungen	143
6.1. Profilmessung mit unterschiedlichen Messmethoden.....	143
6.1.1. Taktile Systeme.....	143
6.1.2. Optische Systeme.....	144
6.2. Riefenbildung an der Verzahnung	144
6.3. Werkstoffkundliche Untersuchungen	146
6.3.1. Härtemessung.....	146
6.3.2. Schliffbilder	148
6.3.3. Strukturuntersuchung der Grauflecken–/Schabemarkenfläche.....	150
6.3.4. Vorzeitiger Eingriff.....	154
7. Zusammenfassung	157
8. Literatur	163

Formelzeichen

Zeichen Einheit Benennung

Lateinische Großbuchstaben

A	mm ²	Zahnsehnenfläche
C	-	Schmierstofffaktor $C = 1,0$
C_a	μm	Ausgeführter Kopfrücknahmebetrag
C_{Last}	μm	Lastbedingte Verformung des Zahnes
C_y	-	Lastwechselzahl
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E'	N/mm ²	Ersatzelastizitätsmodul
E_{EGF}	J	Gesamtenergie im Fußbereich
F_N	N	Zahnnormalkraft
G'	N/mm ²	Schubmodul
I_z	mm ⁴	Axiales Flächenträgheitsmoment 2. Grades
M_{bz}	Nmm	Biegemoment um die z-Achse
M_p	μm	Formabweichung aufgrund von Grauflecken
MP_{rate}	μm/N _L	Verschleißrate pro Lastwechsel
N	-	Lastwechselzahl des zu berechnenden Getriebes
N_{St}	-	Lastwechselzahl des Standardgraufleckentests
Ra	μm	Mittlere arithmetische Mittenrauheit der Ritzel- und Radflanke
SKS	-	Schadenskraftstufe des Standardgraufleckentests nach FVA Arbeitsblatt 54 I-IV [F1]
U_e	mm/s	Wälzgeschwindigkeit
U_s	mm/s	Gleitgeschwindigkeit
W	ppm	Wassergehalt im Schmierstoff in parts per million
X	-	Schalter zum Ausschalten der Berechnung bei $\lambda > 3$ [B2]
X_{EA}	-	Faktor zur Berücksichtigung der Energieaufteilung
X_{EGF}	-	Faktor zur Berücksichtigung der Gesamtenergie
X_{EO}	-	Faktor zur Berücksichtigung des Energieflusses bezogen auf die Oberfläche
X_{RGF}	-	Faktor zur Berücksichtigung der Rauheit
Y	mm	Betrachteter Flankenpunkt

Lateinische Kleinbuchstaben

a	-	Schadenskraftstufenabhängige Koeffizienten nach FVA 54 I+II [S1, S2]
b	mm	Breite der Verzahnung
b	-	Schadenskraftstufenabhängige Koeffizienten nach FVA 54 I+II [S1, S2]
b_H	mm	Halbe Hertzsche Kontaktbreite
b_R	mm	Radkörperbreite
c	-	Schadenskraftstufenabhängige Koeffizienten nach FVA 54 I+II [S1, S2]
c'	N/(mm μm)	Einzelfedersteifigkeit nach DIN 3990 Teil 1 [D6]
f_{fm}	μm	Mittlere berechnete Profilformabweichung
$f_{fm}(Y)$	μm	Berechnete örtliche Auskolkungstiefe
$f_{fm,VE}$	μm	Berechneter Verschleiß durch vorzeitigen Eingriff
$f_{fm,GFT}$	μm	Kritische Auskolkungstiefe im Graufleckentest = 7,5 μm
h	mm	Tiefe der beeinflussten Zone
h_C	μm	Minimale Schmierfilmdicke im Wälzpunkt
h_ξ	μm	Schmierfilmdicke nach Ertel–Grubin
m_{GF}	mm	Modul der zu berechnenden Verzahnung
m_{GFT}	mm	Modul der Graufleckentest–Verzahnung nach FVA Arbeitsblatt 54 I-IV [F1]
m_t	mm	Stirnmodul
p_H	N/mm ²	Hertzsche Pressung
r_{b1}	mm	Grundkreisradius des Ritzels
r_{b2}	mm	Grundkreisradius des Rades
r_y	mm	Betrachteter Radius
u	-	Zähnezahlverhältnis nach DIN 3960 [D1]
v_{pn}	HV	Vickershärte der Zahnflankenoberfläche
w_{Bieg}	mm	Durchbiegung
w''_{Bieg}	mm ⁻¹	Zweite Ableitung der Biegelinie
w_{ges}	mm	Verschiebung der Zahnpaarung in Richtung der Eingriffslinie
w_{Hertz}	mm	Verformung eines Zahnes bedingt durch die Hertzsche Abplattung
w_{KM}	mm	Verschiebung des Kraftangriffspunktes
w_{KP}	mm	Parallelverschiebung des Zahnes in Kraftrichtung
w_{RK}	mm	Gesamtverformung des Radkörpers
$w_{RK,Zie}$	mm	Gesamtverformung des Radkörpers modifiziert nach Ziegler
w_{Schub}	mm	Verformung bedingt durch die Schubbeanspruchung
w_{Stauch}	mm	Verformung bedingt durch Stauchung

$x(r_y)$	mm	Halbe Zahndickensehne am betrachteten Radius r_y
$y(r_f)$	mm	y-Koordinate des Zahnfußradius r_f
$y(r_y)$	mm	y-Koordinate des betrachteten Radius r_y
$z_{1,2}$	-	Zähnezahl Ritzel, Rad

Griechische Großbuchstaben

Γ_B	-	Parameter für den charakteristischen Punkt B auf der Eingriffsstrecke nach DIN 3990 Teil 1 [D6]
Γ_i	-	Parameter für einen charakteristischen Punkt i auf der Eingriffsstrecke nach DIN 3990 Teil 1 [D6]

Griechische Kleinbuchstaben

α_{wt}	rad	Betriebseingriffswinkel
α_y	rad	Kraftangriffswinkel am betrachteten Radius r_y
ε_α	-	Profilüberdeckung
ζ	-	Spezifisches Gleiten
κ	-	Schubverteilungszahl, für rechteckige Flächen $\kappa = 1,2$
λ	-	Relative Schmierfilmdicke
λ_{GFP}	-	Mindestens erforderliche relative Schmierfilmdicke
ν	-	Querkontraktionszahl
ν_{40}	mm ² /s	Kinematische Viskosität des Schmierstoffes bei 40° C
φ_{RitBo}	rad	Verdrehwinkel
ρ	mm	Ersatzkrümmungsradius
$\rho_{1,2}$	mm	Ersatzkrümmungsradius Ritzel, Rad
ρ_y	mm	Ersatzkrümmungsradius des betrachteten Radius r_y
ρ_{Kopf}	µm	Kopfkantenabrundungsradius der getriebenen Zahnflanke
σ_H	N/mm ²	Flächenpressung der Zahnflanken
τ	N/mm ²	Auftretende Schubspannungen im Wälzpunkt
τ_{T8}	N/mm ²	Schubspannungen im Wälzpunkt des Standardgraufleckentests der Stufe 8

Indizes

GF	-	aktueller Wert des betrachteten Flankenpunktes
GFT	-	Wert des Graufleckentest für die entsprechende SKS
T	-	Index für die Daten des Standardgraufleckentests

1. Einleitung

Erste Beschreibungen der Graufleckenbildung sind bereits Anfang der 70er Jahre des 20sten Jahrhunderts zu finden [B1]. Die immer bessere Beherrschung des Einsatzhärteprozesses und der Hartfeinbearbeitung von Zahnflanken verschob im Laufe der Zeit die zulässigen Hertzchen Flächenpressungen gegen Grübchenbildung in sehr hohe Regionen. Bisherige Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass somit begünstigende Betriebsbedingungen für die Entstehung von Grauflecken gegeben waren. Durch die Verbreitung der Hartfeinbearbeitung erlangten die Grauflecken einen größeren Bekanntheitsgrad. Die Abschaffung der mit Blei additivierten Schmierstoffe in der Mitte der 1980er Jahre erwies sich als zusätzlich negativ auf die Graufleckentragfähigkeit. Schlussendlich hatte das Auftreten von aus der Graufleckenfläche herauswachsenden Grübchen einen alarmierenden Charakter für Getriebetreiber.

Die große Bedeutung von regenerativen Energiequellen und immer kostspieligeren fossilen Brennstoffen führen zu einer erhöhten Nachfrage von Windkraftanlagen. Hauptbestandteil der Windkraftanlagen ist, neben dem Generator, das Getriebe, welches das große vom Wind erzeugte Drehmoment in eine hohe Drehzahl für den Generator wandelt. Im Vergleich zu getriebelosen Konzepten steigt mit größeren Leistungen das Leistungsgewicht der Konzepte, in denen Getriebe verwendet werden, stärker an. Bedingt durch das einzusparende Gewicht der Getriebe, welche auf eine Höhe von bis zu 120 m befördert werden müssen, sind Windkraftanlagengetriebe näher an der Belastungsgrenze des Werkstoffes ausgelegt als konventionelle Getriebe, somit sind diese einer höheren Grübchengefahr ausgesetzt. Die Unberechenbarkeit der Auswirkungen, welche von Grauflecken auf die Grübchenbildung ausgeht, ist ein zu hohes Risiko. In Anbetracht der hohen Montagekosten die entstehen, welche ein Getriebe im Schadensfall erzeugt, ist dieses Risiko untragbar.

Bisher ist jedoch nicht geklärt, ob ein Getriebe beim Auftreten von Grauflecken als geschädigt anzusehen ist. Unterschiedliche Erfahrungen mit der Graufleckenbildung, die teilweise im Wachstum stagniert, sich kontinuierlich auf der gesamten Zahnflanke ausweitet ohne einen großen Schaden zu erzeugen oder auch zu Grübchenbildung führt, erzeugen eine große Verunsicherung. Graufleckenbildung ist jedoch nicht nur ein Problem von Windkraftanlagengetrieben, sondern z.B. auch von Schiffsgetriebenen und Getrieben zum Antrieb von großen Ventilatoren in Kühltürmen.

Trotz zahlreicher Untersuchungen zum Thema der Graufleckenbildung ist der Schadensmechanismus nicht hinreichend genau bekannt. In der industriellen Praxis haben sich bestehende Berechnungsmethoden zur Vorhersage des Verschleißes aufgrund von Graufleckigkeit für Großgetriebe nicht bewährt [S3]. Hierbei zeigt sich, dass der Verschleiß insgesamt viel zu hoch berechnet wird und somit eine rechnerisch sichere Auslegung von Getrieben mit größeren Modulen nicht möglich ist. Abgesehen von der Diskrepanz zwischen berechnetem

und auftretendem Verschleiß ist das Verhalten der Graufleckigkeit im Dauerversuch für größere Getriebe weitestgehend unerforscht.

Graufleckigkeit bezeichnet das veränderte und mattgraue Erscheinungsbild von Zahnflanken einsatzgehärteter Zahnräder. Bild 1.1 zeigt die Graufleckigkeit in verschiedenen Vergrößerungsstufen. Im Bild ist zu sehen, dass speziell der Bereich des negativen spezifischen Gleitens, vom Eingriffsbeginn bis zum Wälzpunkt, von der Graufleckigkeit betroffen ist. In der Vergrößerung ist zu erkennen, dass es im Bereich der graufleckigen Fläche viele kleinere Materialausbrüche gegeben hat. Die unregelmäßigen Ausbrüche sind überwältigt worden und haben nun abgebrochene verformte Kanten. Das Licht wird an der nicht geschädigten Zahnflanke fast ausschließlich gerichtet reflektiert. Durch die Ausbrüche auf der Flankenoberfläche wird das Licht gebrochen und diffus reflektiert. Hierdurch erscheint die Oberfläche mattgrau.

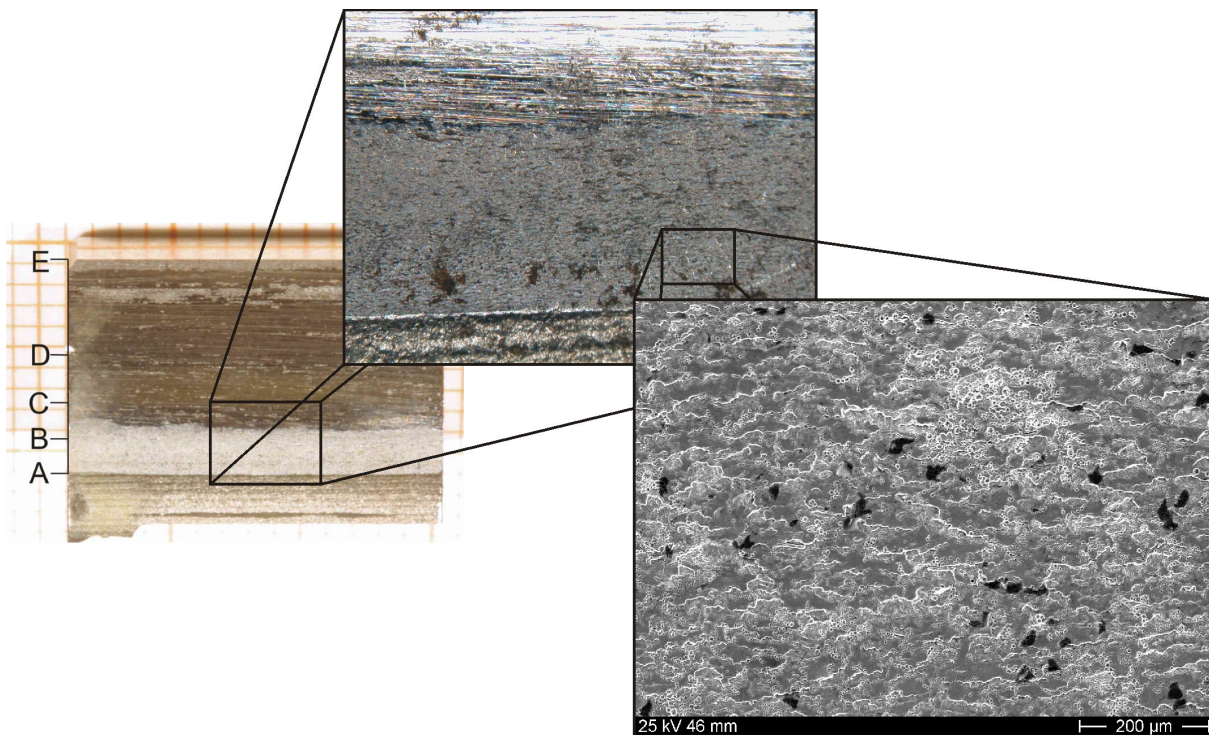


Bild 1.1: Graufleckigkeit im Zahnfuß einer einsatzgehärteten Zahnflanke

Durch diese Ausbrüche kommt es mit steigenden Lastwechselzahlen zu einer Zunahme der Profilformabweichung der Zahnflanke. Grundsätzlich führen im Versuch steigende Lasten zu höheren Profilformabweichungen. Wird jedoch die Lastverteilung längst der Eingriffsstrecke betrachtet zeigt sich, dass die Lasthöhe nicht allein entscheidend ist. Zwischen den Einzeleingriffsgebieten B und D, also dem Bereich des Einzeleingriffes mit seiner hohen Pressung, ist kaum Graufleckigkeit zu erkennen.

Lützig [L4, L5] untersucht die Auswirkungen von unterschiedlichen Kopfrücknahmebeträgen und somit von unterschiedlichen Pressungen im Bereich des Doppeleingriffes auf die Graufleckigkeit. Zwar verringert sich die Formabweichung mit steigenden Kopfrücknahmebeträ-

gen, die Graufleckenfläche bleibt aber in gleicher Größenordnung. Nur mit veränderter arithmetischer Mittenrauheit ist eine Veränderung der Graufleckenfläche erkennbar. Als entscheidend für die Graufleckenbildung zeichnen sich somit die arithmetische Mittenrauheit und der Betrag des spezifischen Gleitens aus.

Inacker u.a. [I1, I2] beschreiben, dass es zu einem Metall–Metall–Kontakt durch Abscheren der tribologischen Schicht an den Rauheitsspitzen kommen kann. Somit erfolgt durch die erhöhten Scherkräfte eine plastische Deformation der kristallinen Oberflächenrandzonen bis in 2000 nm Tiefe. Durch die Deformation entsteht ein feinkörniges Gefüge mit vielen Korngrenzen. Entlang dieser Grenzen können im weiteren Verlauf Risse entstehen. Viele nahe beieinander gelegene Risse treffen schnell aufeinander und können somit nicht weiter in die Tiefe wachsen. Diese Ausbrüche lassen die Oberfläche matt grau erscheinen und führen zu Auskolkungen.

Einen zusätzlichen Ansatz zur Entstehung von Grauflecken bietet Schrade [S3]. Hiernach führt die Rauheit der Oberfläche zu lokalen Hertzschen Pressungsüberhöhungen. Gleiten nun die beiden Arbeitsflächen übereinander, hat ein lokaler Punkt auf den Oberflächen mehrere verschiedene Kontaktpartner. Die ungleichen Erhebungen der Kontaktpartner führen zu unterschiedlich hohen lokalen Pressungen für den einzelnen Punkt. Diese Schwankungen der örtlichen Spannungen lassen den Werkstoff ermüden und es kommt wiederum zu Rissen und Materialausbrüchen.

Die Graufleckenuntersuchung von Schmierstoffen nach FVA 54 I-IV [F1] erlaubt eine Unterteilung von Schmierstoffen mit unterschiedlichen Tragfähigkeitsstufen. Als Beurteilungsgrundlage dient dabei die Profilformabweichung aus Versuchen. Hierbei ist eine Unterscheidung in sieben verschiedene Kategorien möglich. Die Schmierstoffe können dabei in Schadenskraftstufen von =5 bis =10 unterteilt werden. Bleibt die Formabweichung nach dem Lauf in der höchsten Schadenskraftstufe unterhalb des Grenzkriteriums, so wird der Schmierstoff mit >10 bewertet. Nach Niemann und Winter [N1] im Jahre 1983 ist eine Schadenskraftstufe von =8 als ausreichend gegen Graufleckigkeit anzusehen. In der Zwischenzeit haben sich vor allem in der Windkraftindustrie die Anforderungen an die Schmierstoffe stark erhöht. Teilweise werden Graufleckenschadenskraftstufen von ≥ 10 gefordert [F4].

Der Graufleckentest nach FVA 54 I-IV [F1] bildet die Grundlage für die im aktuellen Vorhaben durchgeführten Versuche. Der Test am Stirnrad–Verspannungs–Prüfstand lässt sich in zwei Abschnitte gliedern. Die Untersuchung beginnt mit dem Stufentest, in dem der Prüfradsatz in 6 Kraftstufen jeweils 16 Stunden lang mit einem konstanten Moment belastet wird. Am Standardgetriebe werden nach jeder Stufe die Profilformabweichung gemessen und die Massenverluste gewogen. Zusätzlich wird die Größe der Graufleckenfläche gemessen. Die Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis bleibt bei diesen Versuchen mit 8,3 m/s unverändert. Ist das Grenzkriterium der an drei Zähnen gemittelten Profilformabweichung von $f_{fm} = 7,5 \mu\text{m}$ erreicht, endet der Stufentest.

An den Stufentest anschließend wird ein Dauertest durchgeführt, dieser Test besteht aus einem Lauf von 80 Stunden mit der Kraftstufe 8 und bis zu fünf 80-stündigen Läufen in der Kraftstufe 10. Zwischen den Läufen finden die bereits beschriebenen Messungen statt. Der Test endet beim Erreichen einer mittleren Profilformabweichung von $f_{\text{fm}} = 20 \mu\text{m}$ oder einer Grübchenfläche von 4 % einer aktiven Zahnflankenfläche. Bild 1.2 stellt den Versuchsablauf des Graufleckentests dar. Bei den durchgeführten Untersuchungen sind trotz Erreichen des Grenzkriteriums die Versuche komplett in allen Stufen durchgeführt worden.

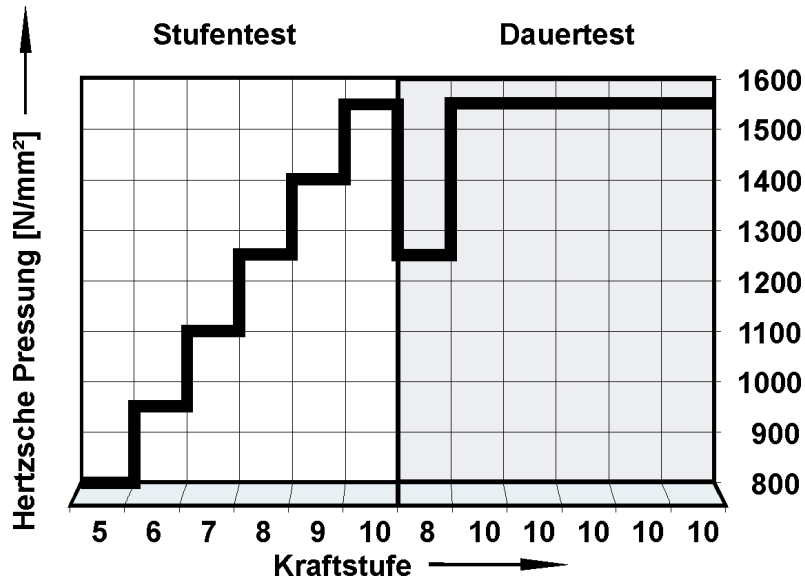


Bild 1.2: Versuchsablauf des Graufleckentests

Die Versuche am Großgetriebeprüfstand laufen prinzipiell in gleicher Weise ab. Aus der Vorgabe, dass die Umfangsgeschwindigkeiten und die Hertzischen Pressungen am Wälzpunkt an beiden Prüfständen übereinstimmen sollen, ergeben sich unterschiedliche Laufzeiten, Verspannmomente und Antriebsleistungen. Die Lastwechselzahlen zwischen den Laststufen sind beim Großgetriebeprüfstand und beim Standardgetriebeprüfstand gleich. Bei gleichbleibender Lastwechselzahl wächst die Laufzeit mit dem Verhältnis der Moduln. Somit beträgt die Laufzeit einer Kraftstufe des Stufentests 80 Stunden und die Laufzeit im Dauertest 400 Stunden. Ein kompletter Stufentest am Großgetriebe dauert somit $t_{\text{ST}} = 6 \cdot 80 \text{ h} = 480 \text{ h}$ und ein kompletter Dauertest $t_{\text{DT}} = 6 \cdot 400 \text{ h} = 2400 \text{ h}$. Somit entspricht ein kompletter Graufleckentest einer reinen Versuchsdauer von $t_{\text{GF}} = t_{\text{ST}} + t_{\text{DT}} = 2880 \text{ h}$. Neben den Kosten für die Fertigung der Prüfverzahnungen begrenzt also vor allem die Prüfstandslaufzeit von 120 Tagen die Anzahl der möglichen Versuche. Um eine möglichst große Anzahl verschiedener Parameterkombinationen auswählen zu können, ist für die meisten Varianten eine Beschränkung der Versuche auf den Stufentest vorgesehen.

Die Messungen zwischen den einzelnen Stufentests können am Großgetriebe aufgrund der Größe der Verzahnung und des Prüfgehäuses nicht mit vertretbarem Aufwand in gleicher Weise durchgeführt werden wie beim Standardgraufleckentest. Nach jedem Test wird die

Graufleckenfläche gemessen und ein Abdruck einer Zahnücke genommen. Die Vermessung des Abdruckes ist detailliert in [H1] dargestellt. Eine Wägung der Ritzel vor und am Ende der Versuche ist nicht durchgeführt worden, da keine differenzierte Aussage über den graufleckenbedingten Verschleiß auf den Zahnflanken und durch den Passungsrost erzeugten Verschleiß in der Bohrung des Ritzels getroffen werden kann.

Die Erfahrung aus vielen am Lehrstuhl durchgeführten Graufleckentests zeigt, dass in der Kraftstufe 8 des Dauertests sich die Formabweichung relativ gering verändert. Um schneller Ergebnisse zu erzielen, wird der Dauertest am Großgetriebe direkt in der Kraftstufe 10 begonnen.

2. Stand der Technik

Der Prüfstand, welcher beim Graufleckentest verwendet wird, ist der in der DIN 51354 [D7] genormter Verspannungs-Prüfstand. In Bild 2.1 ist der Prüfstand abgebildet. Es sind zwei Getriebegehäuse mit einem Achsabstand von $a = 91,5$ mm zu erkennen, welche jeweils die gleiche Übersetzung von $i = 1,5$ aufweisen. Die Getriebe sind über die Rad- und Ritzelwellen miteinander verbunden. Die Ritzelwellenverbindung ist getrennt und über eine Verspannkupplung aneinander gekoppelt. Die beiden Kupplungshälften sind stufenlos zueinander verdrehbar, so dass durch ein Verdrehen der Kupplungshälften zueinander ein Drehmoment in das System aufgebracht werden kann. Das entstandene Drehmoment kann über die Drehmomentmesswelle, welche die Verbindungswelle der Radwellen darstellt, gemessen werden. Zum Betrieb des Prüfstandes wird nun, abgesehen von Anfahrvorgängen, nur noch die Einspeisung der Verlustleistung über den an der Radwelle monierten Elektromotor benötigt. Während des Versuches kreist die Prüfleistung zwischen beiden Getrieben im Verspannkreis. Dieser Aufbau ermöglicht es mit einer geringen Leistungseinspeisung das Getriebe mit einer großen Prüflast zu untersuchen. Derartige Prüfstände arbeiten also bezüglich ihres Energieverbrauchs sehr wirtschaftlich.

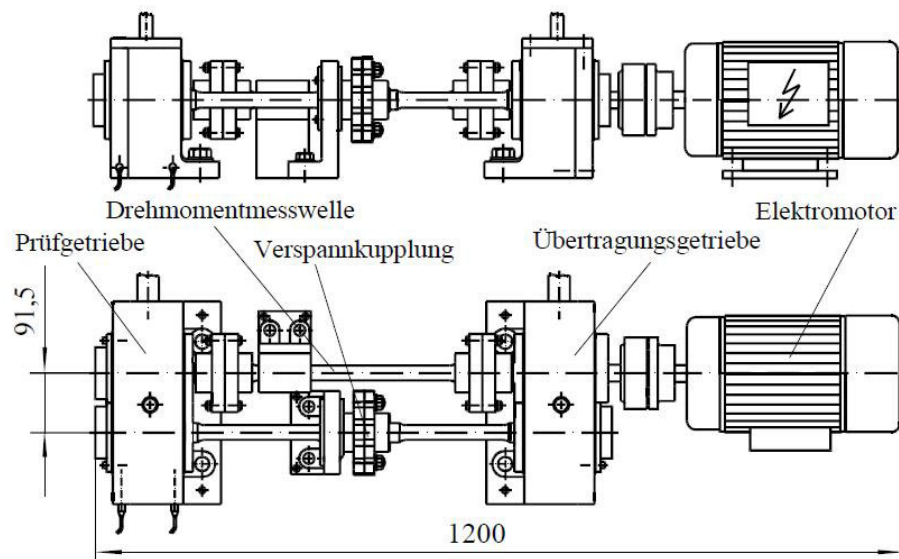


Bild 2.1: Schematischer Aufbau Stirnrad-Verspannungs-Prüfstand nach DIN 51354 [D7]

Die Verzahnung im Prüfgetriebe ist mindestens zweimal schmaler, als die Verzahnung im Übertragungsgetriebe, so dass die Verzahnung des Prüfgetriebes sehr viel höher belastet ist. Das Übertragungsgetriebe arbeitet mit einer Tauchschmierung, das Prüfgetriebe hingegen arbeitet mit einer Einspritzschmierung. Die Einspritztemperatur wird in der Einspritzleitung kurz vor der Einspritzung gemessen und kann mittels Tauchheizelementen im Schmierstofftank geregelt werden. Die erforderliche Schmierstoffmenge für einen Test beträgt $V_{01} = 25$ l

und wird mit einer Geschwindigkeit von $\dot{V}_{\text{Öl}} = 2 \text{ l/min}$ gefördert. In der Einspritzleitung wird der Schmierstoff mit einem Papierfilter der Feinheit $10 \text{ }\mu\text{m}$ gereinigt.

Beim Graufleckentest kommen Zahnräder mit einem Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ zum Einsatz. Die eingesetzte Verzahnung entspricht der C-Verzahnung nach Lechner [L6] und ist im Bezug auf das spezifische Gleiten in den Zahnfüßen sehr ausgeglichen. Die Verzahnungsdaten der C-Verzahnung sind der Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Tabelle 2.1: Daten der am Standardgetriebe untersuchten Verzahnungen

Verzahnungsdaten		Standardgetriebe									
		Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad
Normalmodul	m_n [mm]	4,5					3,27				
Achsabstand	a [mm]	91,5									
Breite	b [mm]	14									
Zähnezahl	z [-]	16	24	16	24	16	24	22	33	22	33
Profilverschiebung	x [-]	0,18	0,17	0,35	0,0	0,5	-0,15	0,09	0,4	0,25	0,24
<u>Winkel</u>											
Schrägung	β [°]	0									
Normaleingriff	α_n [°]	20									
Betriebseingriff	α_w [°]	22,4									
<u>Durchmesser</u>											
Kopfkreis	d_a [mm]	82,5	118,4	84,2	117,0	85,5	115,7	78,9	117,0	80,0	115,9
Wälzkreis	d_w [mm]	73,2	109,8	73,2	109,8	73,2	109,8	73,2	109,8	73,2	109,8
Fußnutzkreis	d_{Nf} [mm]	68,3	104,0	68,7	103,4	69,2	103,0	68,7	105,6	69,1	105,1
Grundkreis	d_b [mm]	67,7	101,5	67,7	101,5	67,7	101,5	67,7	101,5	67,7	101,5

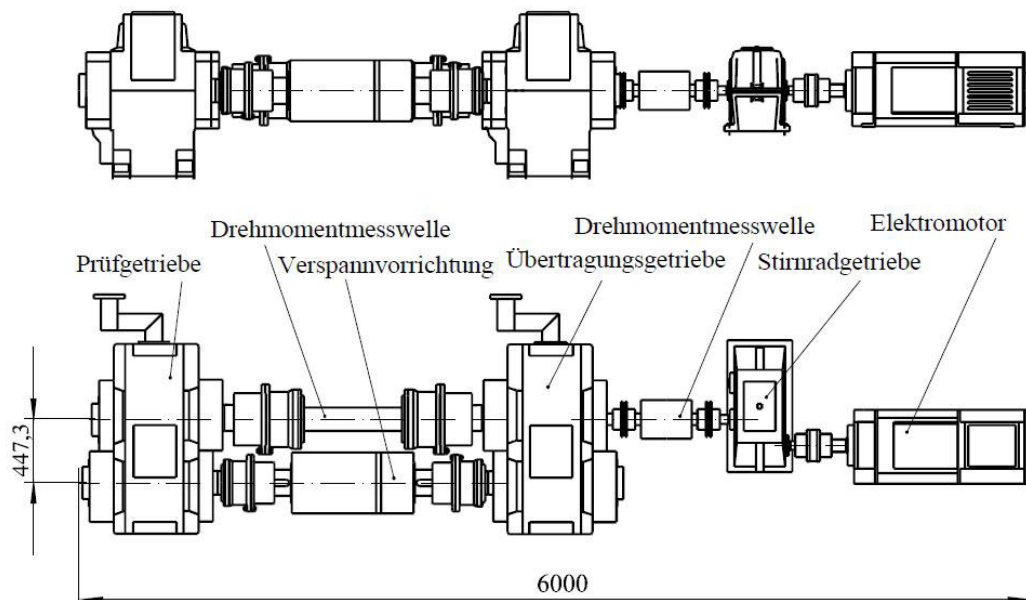
Für den Großgetriebeprüfstand werden Verzahnungen mit einem Modul von $m_n = 22 \text{ mm}$ verwendet. Das Verhältnis der Moduln entspricht 4,89, demzufolge muss das Verhältnis der Achsabstände identisch sein. Der Achsabstand des Großgetriebes misst somit $a = 447,3 \text{ mm}$. Die Verzahnungsdaten der Großgetriebeverzahnungen sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen.

Im Vergleich zum Standardgetriebe kann das hohe Verspanndrehmoment von bis zu 46 kN nicht manuell aufgebracht werden. Aus diesem Grund sitzt auf der Verbindungswelle der Ritzelwellen eine hydraulische Verspannvorrichtung. Mit Hilfe einer Drehdurchführung wird die Verspannvorrichtung mit Hochdrucköl versorgt. Der Druck von bis zu 120 bar erzeugt das benötigte Drehmoment. Die kreisende Leistung entspricht in der höchsten Kraftstufe des Graufleckentests $P_{\text{Prüf}} = 2 \text{ MW}$, am Standardgetriebe hingegen sind es nur $P_{\text{Prüf}} = 60 \text{ kW}$.

Tabelle 2.2: Daten der am Großgetriebe untersuchten Verzahnungen

Verzahnungsdaten		Großgetriebe					
		Ritzel	Rad	Ritzel	Rad	Ritzel	Rad
Normalmodul m_n [mm]		22				16	
Achsabstand a [mm]		447,3					
Breite b [mm]		100					
Zähnezahl z [-]		16	24	16	24	22	33
Profilverschiebung x [-]		0,18	0,17	0,5	-0,15	0,09	0,4
<u>Winkel</u>							
Schrägung β [°]		0					
Normaleingriff α_n [°]		20					
Betriebsingriff α_w [°]		22,4					
<u>Durchmesser</u>							
Kopfkreis d_a [mm]		402,7	570,2	417,1	564,7	385,8	571,9
Wälzkreis d_w [mm]		357,9	536,8	357,9	536,8	357,9	536,8
Fußnutzkreis d_{Nf} [mm]		336,1	508,6	338,5	503,8	335,6	516,3
Grundkreis d_b [mm]		330,8	496,2	330,8	496,2	330,8	496,2

Am Großgetriebeprüfstand sind sowohl das Prüf- als auch das Übertragungsgetriebe mit einer Einspritzschmierung versehen. Trotz des benötigten Schmiervolumens von $V_{\text{Öl}} = 600 \text{ l}$ beim Großgetriebe wird durch die Verzahnungs- und Lagerverluste in den höheren Kraftstufen die Solltemperatur überschritten. Um in diesen Fällen die Temperatur ebenfalls regeln zu können, ist der Großgetriebeprüfstand mit einer Wasserkühlung ausgestattet. Durch das Erhöhen der Prüfdrehzahl und des -drehmomentes kann am Großgetriebeprüfstand eine maximale kreisende Leistung von $P_{\text{Kreis}} = 6 \text{ MW}$ erreicht werden.

**Bild 2.2:** Schematischer Aufbau Großgetriebeprüfstand gemäß [H1]

2.1. Bisherige Forschungsergebnisse

Erste systematische Untersuchungen der Graufleckigkeit sind von Schönnenbeck [S1, S2] durchgeführt worden. Hierbei legt er die Betriebsbedingungen des Graufleckentests fest und unterteilt die Schmierstoffe in die drei Graufleckentragfähigkeitsklassen GFT–niedrig, GFT–mittel und GFT–hoch. Durch die Untersuchung von verschiedenen Betriebsbedingungen, Oberflächenbeschaffenheiten, Schmier- und Werkstoffen ist es ihm gelungen, grobe Erkenntnisse über die Einflussgrößen, die zur Graufleckenbildung führen, zu erlangen. Auf Basis der Versuchsergebnisse ist ein erstes Berechnungsverfahren entstanden, mit der für das Ritzel die maximale Profilformabweichung bestimmt werden kann. Das Verfahren beruht zunächst auf einer mehrparametrischen linearen Regression für die Versuchsergebnisse. Die Erweiterung für andere Getriebe erfolgt über einen energetischen Ansatz. Hierbei wird die Aufteilung der Energieflussdichte, die Energieflussdichte bezogen auf die Oberflächeneinheit und die Gesamtenergie während eines Eingriffes am Zahn des Standardgraufleckentests im Verhältnis zu einem zu berechnenden Getriebe gesetzt. Die durch Regression ermittelten Koeffizienten erlauben eine Berechnung für Schmierstoffe der GFT–Klassen niedrig und mittel.

Emmert [E1] führte Untersuchungen mit korrigierten Verzahnungen und höheren Drehzahlen durch. Dabei zeigt sich, dass Kopfrücknahmen die Auskolkung am Ritzel im Bereich des Zahnfußes deutlich reduzieren. Bei einzelnen Schmierstoffen wird bis zu der Laststufe, für welche die Korrektur ausgelegt ist, kein Werkstoffabtrag registriert. Die Berechnungsgleichung von Schönnenbeck ist um einen weiteren schadenskraftstufenabhängigen Koeffizienten erweitert worden. Zusätzlich lösten neu ermittelte Koeffizienten die bis dahin eingesetzten GFT–Klassen abhängigen Koeffizienten ab und ermöglichten nun eine differenziertere Betrachtung der Schmierstoffe bei der Berechnung der maximalen Formabweichung.

Schrade [S3] untersucht den Zusammenhang zwischen Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. Der untersuchte Parameterbereich deckt Baugrößen mit einem Achsabstand zwischen 70 und 200 mm bei Moduln von 3 bis 11 mm ab. Bei unkorrigierten Verzahnungen aus 16MnCr5 nimmt der Betrag der Auskolkung mit der Baugröße zu. Durch eine Profilkorrektur verringert sich die Auskolkung durch Graufleckigkeit in Bereichen mit verminderter Hertzscher Flächenpressung. Die Verkleinerung der relativen Schmierfilmdicke λ durch eine zunehmende Flankenrauheit führt zu verstärkter Graufleckigkeit. Schrade stellt ein weiterentwickeltes Rechenverfahren vor, das den Einfluss von Verzahnungsgeometrie, Schmierstoff und Betriebszustand auf die Entwicklung von Graufleckenschäden berücksichtigt und die lokal unterschiedlichen Verhältnisse an beliebigen Punkten entlang des Flankenprofils betrachtet. Die Definition der relativen Schmierfilmdicke λ ist der Formel (2.1) zu entnehmen.

$$\lambda = \frac{h_C}{Ra} \quad (2.1)$$

mit

λ	[-]	=	Relative Schmierfilmdicke
h_C	[μm]	=	Minimale Schmierfilmdicke im Wälzpunkt
Ra	[μm]	=	Mittlere arithmetische Mittenrauheit der Ritzel- und Radflanke

Liu [L3] betrachtet am Standardprüfstand den Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Graufleckigkeit an Radsätzen mit Modul 5 mm. Bei gleichen arithmetischen Mittenrauheiten konnte kein signifikanter Einfluss des Fertigungsverfahrens auf die durch Graufleckigkeit entstehende Profilformabweichung festgestellt werden. Die Graufleckentragfähigkeit konnte bei der Kombination von unterschiedlich gefertigten Zahnrädern gesteigert werden. Erneut wird die arithmetische Mittenrauheit Ra als die charakteristische Einflussgröße auf die Graufleckentragfähigkeit von einsatzgehärteten Stirnrädern bestätigt. Zusätzlich zeigen Versuche mit einem PD-additivierten Schmierstoff, dass dieser den Fortschritt der Graufleckigkeit verzögert (PD: Plastik Deformation). Schabemarken des Gegenrad-Zahnkopfes im Graufleckengebiet können eine Profilformabweichung hervorrufen, die nicht den mikroskopischen Ausbrüchen der Graufleckigkeit zuzuschreiben ist und mit dem Aufbringen von Kopfrücknahmen gemindert werden kann.

Antoine beschreibt ein Modell zur Graufleckenbildung [A1]. Snidle dokumentiert den positiven Einfluss von sehr niedrigen Rauheiten auf die Graufleckenentwicklung [S4]. Jao u.a. sehen bei Prüfstandsversuchen eine verlängerte Laufzeit bis zum Auftreten eines Grübchenschadens auf Prüfradflanken beim Vorhandensein von Graufleckigkeit. Sie zeigen, dass Verzahnungen mit einer höheren arithmetischen Mittenrauheit somit längere Lebensdauern aufweisen.

Hergesell [H2] bestimmte Einflussgrößen der Graufleckigkeit auf die Grübchenlebensdauer. Es zeigt sich, dass Grauflecken die Position der Grübchen maßgeblich verändern und die Grübchen am Übergang der graufleckigen zur unbeschädigten Zahnflanke auftreten.

Der Einfluss der Mikrostruktur von Zahnflanken auf die Graufleckigkeit ist von Volger [V3] untersucht worden. Hier kommen Radsätze mit einem Modul von 5 mm zum Einsatz. Volger geht bei seinen Versuchen mit einer geringen Rauheit mit $Rz = 1 \mu\text{m}$ von einem „Voll-Ehd-Kontakt“ aus. Rauere Oberflächen, insbesondere bei schlechtem Traganteilverhalten und positiver Schiefe der Rauheitsverteilung mit $Rz = 3 \mu\text{m}$, führen zu verminderter Graufleckentragfähigkeit. Nicht untersucht worden ist hingegen das Verhalten von Oberflächen mit geringerer Rauheit im Mischreibungsgebiet.

Föhl u.a. [F2, F3] haben die Bildung von oberflächennahen Reaktionsschichten untersucht. Dabei sind oberflächennahe Bereiche im Werkstoff mit einem sehr geringen Verschleiß iden-

tifiziert worden. Nähere Untersuchungen der Zusammensetzung des Werkstoffes mittels der Auger-Elektronenspektroskopie zeigen in diesen Schichten einen sehr hohen Sauerstoffgehalt. Die sauerstoffreichen Schichten können bis zu einer Tiefe von etwa 300 nm nachgewiesen werden und weisen auf eine Oxidierung des Materials hin. Es ist anzumerken, dass sich der größte Teil der Untersuchungen auf Zylinderrollenlager bezieht. Bei einigen wenigen Verzahnungsversuchen korreliert jedoch ebenfalls ein geringer Verschleiß mit einer sauerstoffreichen Randschicht.

Inacker u.a. haben eine genauere Untersuchung der Reaktionsschichten und der Reaktionsschichtbildung [I1, I2], in der auch eine erste Definition der tribologischen Schicht erfolgt, durchgeführt. Die Reaktionsschicht, welche sich von der Oberfläche bis in oberflächennahe Bereiche des Werkstoffes erstreckt, wird als tribologische Schicht bezeichnet. Die Tiefe dieser Schicht ist definiert als die Tiefe, in der erstmals eine Eisenkonzentration von 50 % des Eisengehaltes in 2 μm Tiefe gemessen wird. Triboschichtmessungen dieser Vorhaben ergaben eine Schichtdickenzunahme vom Wälzpunkt hin zu den Bereichen des Gleitens. Jedoch ist der Betrag der Schichtdickenzunahme abhängig vom verwendeten Additiv. Es ist zulässig, eine geringe Dicke der tribologischen Schicht mit der Graufleckenentstehung in Verbindung zu bringen.

Mittels FIB / SIM sind „Schliffbilder“ im Mikrometerbereich aufgenommen worden, um eine Aussage über das Gefüge in tieferen Regionen des Werkstoffes treffen zu können. Der Vergleich der „Schliffbilder“ von Bereichen mit und ohne Grauflecken an einer Zahnflanke zeigt deutliche Unterschiede im Aufbau. Graufleckenfreie Bereiche weisen eine nur 50 – 100 nm dicke veränderte feinkörnige Schicht über der unveränderten Schicht mit größeren Kristalliten auf. Graufleckengefährdete Bereiche hingegen haben eine etwa 1000 nm tiefe feinkörnige Schicht oberhalb der ursprünglichen Schicht.

2.2. Bisherige Arbeiten an der Forschungsstelle

Im Vorhaben AiF-Nr.: 10361N [H1] untersuchte Haske den Zusammenhang zwischen Graufleckenentstehung und der Getriebebaugröße. An Prüfständen mit Achsabständen von $a = 91,5 \text{ mm}$ und $447,3 \text{ mm}$ sind insbesondere die Parameter Umfangsgeschwindigkeit, Schmierstoffart und -temperatur untersucht worden. Mineralische Schmierstoffe mit geringer und hoher Grauflecken­tragfähigkeit sowie ein Polyglykol sind bei Einspritztemperaturen von $\vartheta = 60^\circ \text{ C}$ und 90° C verwendet worden. Zusätzlich ist eine Variation der Umfangsgeschwindigkeit von $v_t = 4,15 \text{ m/s}$ und $8,3 \text{ m/s}$ durchgeführt worden.

Die für die Graufleckigkeit entscheidende Größe der arithmetischen Mittenrauheit ist mit $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ für alle Großgetrieberadsätze nicht geändert worden. Bei den Betriebsbedingungen des Grauflecken­tests nach FVA 54 I-IV [F1] ist bei den Großgetriebeverzahnungen eine starke Fressneigung festgestellt worden. Aus diesem Grund sind die Ritzel des Großgetriebes mit einer kurzen linearen Kopf- und Fußrücknahme ausgeführt worden. Insgesamt erfolgten

zehn Versuchsläufe auf dem Großgetriebeprüfstand sowie weitere Versuche am Standardprüfstand.

Der direkte Größenvergleich der Auskolkungstiefen zeigt am Großgetriebe eine um die Faktoren 2,4 bis 3,6 größere Auskolkung als am Standardprüfstand. Das Verhältnis der Moduln beträgt jedoch fünf und ist entscheidend größer als das gemessene Verhältnis der Auskolkungstiefen. Eine niedrigere Einspritztemperatur von $\vartheta = 60^\circ \text{C}$ zeigt ein schlechteres Graufleckenverhalten als Läufe bei $\vartheta = 90^\circ \text{C}$. Dies bestätigt auch für großmodulige Radsätze die Beobachtung anderer Untersuchungen, dass nicht nur die Schmierfilmdicke, sondern auch die Aktivierung der verwendeten Additive wichtig für die Graufleckentragfähigkeit ist. Die Auskolkungen der Großgetriebeverzahnungen zeigen bei einem Schmierstoff hoher Graufleckentragfähigkeit eine große Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit. Die Ergebnisse der Versuche mit dem Schmierstoff niedriger Graufleckentragfähigkeit und die Versuche des Standardgetriebes weisen bei niedrigerer Umfangsgeschwindigkeit kaum einen Unterschied auf.

Die Versuchsergebnisse für die unkorrigierten kleinmoduligen Radsätze ließen sich im Mittel relativ gut mit dem Rechenverfahren nach FVA 259 I [S3] abbilden. Bei den korrigierten Radsätzen liefert das Berechnungsverfahren im Mittel kleinere Auskolkungstiefen als die Versuche. Die Ergebnisse für die Verzahnungen des Großgetriebes sind mit einem Schmierstoff hoher Graufleckentragfähigkeit im Mittel um den Faktor 0,5 zu niedrig und mit einem Schmierstoff geringer Graufleckentragfähigkeit im Mittel um den Faktor 1,7 zu hoch.

Lützig [L4, L5] veränderte im Vorhaben AiF-Nr.: 13002N gezielt den Korrekturbetrag und die arithmetische Mittenrauheit der Radsätze bei gleichen Betriebsbedingungen. Auch er führte Versuche an Verzahnungen mit dem Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und 22 mm an zwei verschiedenen Getriebe Größen durch. Bei einer Schmierstoffeinspritztemperatur von $\vartheta = 90^\circ \text{C}$ und einer Umfangsgeschwindigkeit von $v_t = 8,3 \text{ m/s}$ sind insgesamt 10 Versuche am Großgetriebe durchgeführt worden. Lange lineare Kopfrücknahmen mit Beträgen von $C_a = 50 \mu\text{m}$ bis $170 \mu\text{m}$ ermöglichten es, die Auswirkungen unterschiedlicher Lastverteilung entlang der Eingriffsstrecke zu untersuchen. Es zeigte sich, dass die Auswirkungen der Kopfrücknahmebeträge auf die Tiefe der Auskolkung an den Großgetrieberadsätzen sehr groß sind. Zunächst nimmt mit steigendem Kopfrücknahmebetrag die Auskolkungstiefe ab, um mit einer weiteren Erhöhung wieder anzusteigen. Die Verzahnungen mit einem Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ zeigen eine geringere Abhängigkeit. Mit der Zunahme des Kopfrücknahmebetrages wandert die maximale Auskolkung vom Eingriffsbeginn in Richtung des Wälzpunktes.

Zusätzlich ist die arithmetische Mittenrauheit zwischen $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ und $1,0 \mu\text{m}$ variiert worden. Diese Versuche zeigen, dass die Auskolkungen der kleinen Verzahnung sehr stark von der Oberflächenrauheit abhängen. Die Auskolkungen an den Großgetriebeverzahnungen veränderten sich erst bei sehr großen Kopfrücknahmebeträgen von $C_a = 170 \mu\text{m}$. Gemeinsam ist

beiden Verzahnungsgrößen, dass mit der steigenden arithmetischen Mittenrauheit auch die Graufleckenfläche anwächst.

Lützig entwickelt eine Methode zur Berechnung der Flankenkrümmungsradien im Übergangsbereich von der Evolvente zur Kopfrücknahme. Hierbei stellt sich heraus, dass im Bereich der Kopfrücknahme kein großer Unterschied zwischen den Krümmungsradien herrscht. Am Übergang von der korrigierten zur unkorrigierten Flanke werden jedoch sehr kleine Krümmungsradien berechnet. Vor allem die Korrekturform, linear oder parabolisch, zeigt große Unterschiede in den berechneten Krümmungsradien zu Korrekturbeginn. Somit werden an dieser Stelle der Zahnflanke höhere Pressungen berechnet, als bisher angenommen worden sind.

Um die Ergebnisse übersichtlich mit der Berechnungsgleichung nach FVA 259 I [S3] vergleichen zu können, ist die Berechnung der Graufleckigkeit in einem Programm realisiert worden. Das Programm verwendet als Eingangsgröße Pressungen entlang der Eingriffsstrecke die mit dem FVA Programm RIKOR [O1] berechnet werden. Zusätzlich wird eine Methode zur Berechnung von Lastkollektiven aufgezeigt.

Am Prüfstand mit einem Modul von 4,5 mm sind zusätzlich unterschiedliche Zahnradwerkstoffe untersucht worden. Die Versuche mit dem Werkstoff 16MnCr5 zeigen keinen signifikanten Unterschied zum Werkstoff 17CrNiMo6. Da beim Graufleckentest [F1] die eingesetzten Radsätze aus 16MnCr5 bestehen, können die aus diesem Test gewonnenen Ergebnisse der Grauflecken­tragfähigkeit auf Standardgetriebe angewendet werden.

Die bisherigen Arbeiten haben gezeigt, dass nicht nur der Schmierstoff eine Auswirkung auf die Bildung und das Wachstum von Grauflecken hat, sondern auch die verwendeten Verzahnungen. Durch eine geschickte Wahl der Verzahnungsdaten lässt sich die Gefahr der Graufleckenbildung reduzieren.

2.3. Bestehende Berechnungsverfahren

In den zahlreichen Forschungsvorhaben sind Berechnungsverfahren entstanden, mit denen die graufleckenbedingte Auskolkung berechnet werden soll. Sie basieren größtenteils auf mehrparametrischen linearen Regressionen. Teilweise spiegeln die Berechnungsgleichungen auch die in der Praxis gewonnenen Erfahrungen wider.

2.3.1. FVA 54 I+II

Das Rechenverfahren zur Bestimmung der Graufleckigkeit basiert auf Untersuchungen der Forschungsvorhaben 54 I+II [S1, S2]. Die während des Vorhabens erzielten maximalen Auskolkungen an Prüfverzahnungen sind hierzu statistisch ausgewertet worden. Die Übertragung auf Praxisgetriebe erfolgt durch den Vergleich der im Prüfgetriebe umgesetzten Energie mit der im zu berechnenden Praxisgetriebe umgesetzten Energie. Die Voraussetzung für die An-

wendbarkeit der Berechnungsvorschrift ist, dass eine Graufleckengefahr vorliegt. Diese Gefahr ist vorher anhand von Bild 2.3 zu ermitteln.

Um diesen Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und den Praxisgetrieben ziehen zu können, werden die Faktoren X_{EO} , X_{EA} und X_{EGF} verwendet. Die Faktoren stellen jeweils einen Vergleich zwischen dem Standardgetriebe und dem zu berechnenden Getriebe dar. Die Daten des Standardgetriebes sind in den Gleichungen mit einem Index T gekennzeichnet. Der Punkt B auf der Eingriffsstrecke wird als Ort höchster Schädigung angesehen, aus diesem Grunde erfolgt der Vergleich immer für diesen Punkt. Jedoch ist die Belastung im Punkt B unabhängig von Kopfrücknahmevariationen. Deshalb berücksichtigt diese Berechnungsgleichung den Kopfrücknahmebetrag nicht, und unterschiedliche Korrekturen führen bei dieser Berechnungsmethode nicht zu einer Veränderung der Auskolkungstiefe.

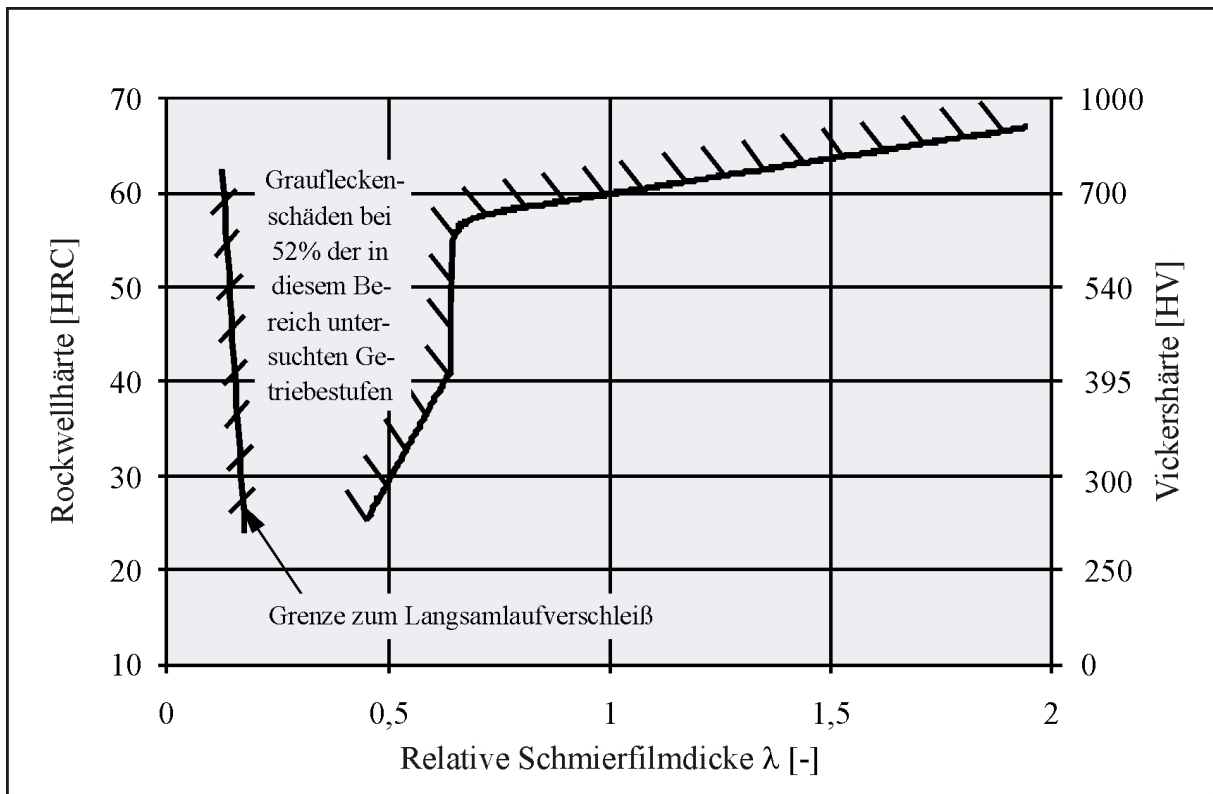


Bild 2.3: Graufleckengefährdeter Bereich in Abhängigkeit der relativen Schmierfilmdicke und Zahnflankenhärte

X_{RGF} berücksichtigt die Ausgangsrauheit der zu berechnenden Verzahnung. Für eine eingelaufene Verzahnung sind die Rauheitsspitzen bereits abgeflacht, und es ist eine arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ einzusetzen. Die Berechnung von X_{RGF} ist in Formel (2.2) dargestellt.

$$X_{\text{RGF}} = \frac{\text{Ra}}{0,3} \quad (2.2)$$

mit

X_{RGF}	[-]	=	Faktor zur Berücksichtigung der Rauheit
Ra	[μm]	=	Mittlere arithmetische Mittenrauheit der Ritzel- und Radflanke

Durch den negativen Schlupf muss eine kleinere Fläche dieselbe Energie abführen wie die Fläche am Wälzpunkt. Diese höhere Belastung des Punktes B auf der Eingriffsstrecke wird durch den Faktor X_{EO} in Formel (2.3) beschrieben.

$$X_{\text{EO}} = \frac{1}{1 + \Gamma_{\text{B}}} \cdot (1 + \Gamma_{\text{B}})_{\text{T}} \quad (2.3)$$

mit

X_{EO}	[-]	=	Faktor zur Berücksichtigung des Energieflusses bezogen auf die Oberfläche
Γ_{B}	[-]	=	Parameter für den charakteristischen Punkt B auf der Eingriffsstrecke nach [D6]
T	[-]	=	Index für die Daten des Standardgraufleckentests

Auch die Aufteilung der Energie zwischen den beiden Reibpartnern, Ritzel und Rad, wird berücksichtigt. Die auf das Ritzel entfallende Energiemenge wird über den Faktor X_{EA} , Formel (2.4) bestimmt.

$$X_{\text{EA}} = \frac{(1 + \Gamma_{\text{B}})^{0,5}}{(1 + \Gamma_{\text{B}})^{0,5} + \left(1 - \frac{\Gamma_{\text{B}}}{u}\right)^{0,5}} \cdot \left(\frac{(1 + \Gamma_{\text{B}})^{0,5} + \left(1 - \frac{\Gamma_{\text{B}}}{u}\right)^{0,5}}{(1 + \Gamma_{\text{B}})^{0,5}} \right)_{\text{T}} \quad (2.4)$$

mit

X_{EA}	[-]	=	Faktor zur Berücksichtigung der Energieaufteilung
u	[-]	=	Zähnezahlverhältnis z_2 / z_1

Die Gesamtenergie im Fußbereich während eines Eingriffes ist proportional zur mittleren Gleitgeschwindigkeit im Zahnfuß, zur Dauer, die der Zahnfuß im Eingriff ist, und zur Lastaufteilung im Zahnfußbereich. Diese Proportionalität von E_{EGF} wird in Formel (2.6) gezeigt. Der Faktor X_{EGF} stellt die zur Energie proportionalen Werte des Standardgetriebes und des zu berechnenden Getriebes in Formel (2.5) gegenüber.

$$X_{EGF} = E_{GF} \cdot \left(\frac{1}{E_{GF}} \right)_T \quad (2.5)$$

$$E_{EGF} \sim \sin \alpha_{wt} \left(1 + \frac{1}{u} \right) \cdot m_t \cdot \frac{\Gamma_A (\Gamma_A + \Gamma_B)}{\Gamma_D - \Gamma_A} \quad (2.6)$$

mit

X_{EGF}	[-]	Faktor zur Berücksichtigung der Gesamtenergie
E_{EGF}	[J]	Gesamtenergie im Fußbereich
α_{wt}	[rad]	Betriebseingriffswinkel
m_t	[mm]	Stirnmodul
Γ_i	[-]	Parameter für einen charakteristischen Punkt i auf der Eingriffsstrecke nach [D6]

Der Faktor X_{EGF} würde für große Verzahnungen aufgrund des in der Formel (2.6) enthaltenen Stirnmoduls sehr hohe Werte annehmen. Aus den Untersuchungen [S1, S2] ist bekannt, dass eine erweiterte Energiezufuhr im Vergleich zum Stirnrad–Verspannungs–Prüfstand nicht zu einer größeren Auskolkungstiefe führt, sondern nur zu einer Aufweitung des Auskolkungsgebietes auf der Eingriffsstrecke. Deshalb ist der Faktor zur Berücksichtigung der Gesamtenergie nach [S1, S2] auf $X_{EGF} \leq 1$ begrenzt worden.

Da die Faktoren immer einen Vergleich zwischen einem zu berechnenden Getriebe und dem Standardgetriebe darstellen, sind die zu berechnenden Faktoren für die Daten des Standardgraufleckentests demzufolge $X_{EO} = X_{EA} = X_{EGF} = 1$.

Die maximale Profil–Formabweichung eines durch Grauflecken geschädigten Stirnrades wird nach Gleichung (2.7) bestimmt:

$$f_{fm} = a \cdot (X_{RGF})^{0,33/c} \cdot X_{EO} \cdot X_{EA} \cdot X_{EGF}^{1/c} \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_{T8}} \right)^d \cdot \left(\frac{N}{N_{St}} \right)^{0,5} \quad (2.7)$$

mit

f_{fm}	[μm]	=	Mittlere berechnete Profilformabweichung
a, b, c	[-]	=	Schadenskraftstufen abhängige Koeffizienten
τ	[N/mm^2]	=	Auftretende Schubspannungen im Wälzpunkt
τ_{T8}	[N/mm^2]	=	Schubspannung des Standardgraufleckentests der Stufe 8
N	[-]	=	Lastwechselzahl des zu berechnenden Getriebes
N_{St}	[-]	=	Lastwechselzahl des Standardgraufleckentests

Die Exponenten a , c und d sind nur für Schmierstoffe niedriger und mittlerer Grauflecken-tragfähigkeit ermittelt worden und sind in Tabelle 2.3 dargestellt. Schmierstoffe hoher Grauflecken-tragfähigkeit gelten, wie auch in [N1] definiert, als nicht gefährdet. Somit kann keine Formabweichung für diese Schmierstoffe berechnet werden.

Tabelle 2.3: Koeffizienten zur Bestimmung der Formabweichung nach [S1, S2]

GFT-Klasse	a	c	d
niedrig	6,9	1,12	1,61
mittel	3,3	1,36	1,47

Die Schubspannung τ hängt von der Reibungszahl und den Hertzschen Flächenpressungen des zu berechnenden Getriebes ab. Die Formel (2.7) zeigt eine sehr geringe Abhängigkeit von der arithmetischen Mittenrauheit. Den größten Einfluss auf die Graufleckigkeit zeigt die Schubspannung.

2.3.2. FVA 54 III+IV

Mit der Verbesserung der Schmierstoffe im Hinblick auf die Graufleckentragfähigkeit und mit dem Auftauchen von Graufleckenschäden, trotz Einsatz von Schmierstoffen hoher Graufleckentragfähigkeit, ist die Erweiterung der Berechnungsgleichung, in Formel (2.7) dargestellt, notwendig. Hierfür sind die Koeffizienten der Gleichung modifiziert worden. Diese lassen sich nun in Abhängigkeit der Schadenskraftstufe des eingesetzten Schmierstoffes berechnen, siehe Formeln (2.9, 2.10, 2.11 und 2.12). Die nun entstandene Berechnungsgleichung nach [E1] ist in Formel (2.8) zu sehen.

$$f_{\text{fm}} = a_{\text{SK}} \cdot \left(\frac{Ra}{0,5} \right)^{b_{\text{SK}}} \cdot X_{\text{EO}} \cdot X_{\text{EA}} \cdot X_{\text{EGF}}^{1/c_{\text{SK}}} \cdot \left(\frac{\tau}{\tau_{\text{T8}}} \right)^{d_{\text{SK}}} \cdot \left(\frac{N}{N_{\text{St}}} \right)^{0,5} \quad (2.8)$$

Zu erkennen ist, dass der Koeffizient X_{RGF} nicht mehr vorhanden ist und durch den Ausdruck $Ra / 0,5$ ersetzt worden ist. Die Einschränkung, dass bei eingelaufenen Verzahnungen die arithmetische Mittenrauheit auf $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ gesetzt werden soll, ist ebenfalls entfallen.

$$a_{\text{SK}} = \frac{2300}{SKS^3} \quad (2.9)$$

$$b_{\text{SK}} = \frac{1400}{SKS^{3,66}} \cdot \frac{32}{\nu_{40}} \quad (2.10)$$

$$c_{\text{SK}} = 0,28 + 0,12 \cdot SKS \quad (2.11)$$

$$d_{\text{SK}} = 2,1 - 0,07 \cdot SKS \quad (2.12)$$

mit

SKS [-] = Schadenskraftstufe des Standardgraufleckentests nach [F1]

ν_{40} [mm^2/s] = Kinematische Viskosität des Schmierstoffes bei 40°C

Die Koeffizienten b_{SK} und c_{SK} ersetzen den alten Koeffizienten c und zeigen den ermittelten größeren Einfluss der arithmetischen Mittenrauheit auf die Graufleckigkeit. Mit sinkender

Schadenskraftstufe steigt die Auskolkungstiefe potenziell an. Der Gesamtenergie im Fußbereich während eines Eingriffes wird eine geringere Abhängigkeit zugeordnet, so dass c_{SK} nur einen linearen Ansatz erhält. Trotz des positiven Effektes der Kopfrücknahme auf die Auskolkungstiefe hat der Kopfrücknahmebetrag keine Berücksichtigung in der Berechnungsgleichung gefunden.

2.3.3. FVA 259 I

Im Vorhaben [S3] sind Modul- und Kopfrücknahmevariationen durchgeführt worden. Der bereits festgestellte positive Einfluss von Kopfrücknahmen [E1] wird erneut bestätigt und wird in einem neuen Berechnungsverfahren mit berücksichtigt.

Das neue Berechnungsverfahren wird in der Formel (2.13) gezeigt. Zur Berechnung der Formabweichung wird hier ebenfalls ein Vergleich zwischen dem zu berechnenden und den gemessenen Ergebnissen des Standard-Stirnrad-Verspannungs-Prüfstandes gezogen. Neu ist an dieser Gleichung nicht nur die Gewichtung der unterschiedlichen Quotienten, sondern auch die Anwendbarkeit der Berechnungsgleichung für die gesamte Eingriffsstrecke. Vom Eingriffsbeginn bis zum Wälzpunkt wird die Formabweichung für das Ritzel und ab dem Wälzpunkt für das Rad berechnet.

Die arithmetische Mittenrauheit R_a ist in dieser Gleichung über die relative Schmierfilmdicke enthalten. Die relative Schmierfilmdicke λ ist der Quotient aus der minimalen Schmierfilmdicke und der mittleren arithmetischen Mittenrauheit. Durch den Exponenten von $-1,25$ hat die Rauheit den größten Einfluss auf die Auskolkungstiefe.

$$f_{\text{fm}}(Y) = f_{\text{fm,GFT}} \cdot \left(\frac{\zeta_{\text{GF}}(Y)}{\zeta_{\text{GFT}}} \right) \cdot \left(\frac{b_{\text{H,GF}}(Y)}{b_{\text{H,GFT}}} \right) \cdot \left(\frac{p_{\text{H,GF}}(Y)}{p_{\text{H,GFT}}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{GF}}(Y)}{\lambda_{\text{GFP}}} \right)^{-1,25} \cdot \left(\frac{N}{N_{\text{GFT}}} \right)^{0,25} \cdot C \quad (2.13)$$

mit

$f_{\text{fm}}(Y)$	[μm]	=	Berechnete Auskolkungstiefe
$f_{\text{fm,GFT}}$	[μm]	=	Kritische Auskolkungstiefe im Graufleckentest = 7,5 μm
Y	[mm]	=	Betrachteter Flankenpunkt
GF	[-]	=	Index - aktueller Wert des Flankenpunktes
GFT	[-]	=	Index - Wert des Graufleckentest für die entsprechende SKS
ζ	[-]	=	Spezifisches Gleiten
b_{H}	[mm]	=	Halbe Hertzsche Kontaktbreite
p_{H}	[N/mm ²]	=	Hertzsche Pressung
λ_{GFP}	[-]	=	Mindestens erforderliche relative Schmierfilmdicke
N	[-]	=	Lastwechselzahl
C	[-]	=	Schmierstofffaktor $C = 1,0$

Bisher ist die relative Schmierfilmdicke nur als Gefährdungskriterium über das in Kapitel 2.3.1 dargestellte Bild 2.3 mit in die Berechnungsgleichungen [S1, S2, E1] eingegangen. Mit

der Berechnungsgleichung in Formel (2.13) ist eine differenziertere Betrachtungsweise bezüglich der Betriebstemperatur und der Viskosität des Schmierstoffes möglich.

Für die Berechnung der minimalen Schmierfilmdicke wird zunächst die isotherme Schmierfilmdicke $h_{\min,iso}$ nach Dowson und Higgingson [D8] bestimmt. Durch das Multiplizieren mit dem Gleitfaktor nach Elstorpff [E2] wird auch die Blitztemperaturabhängigkeit des Druck-Viskositäts-Koeffizienten und der dynamischen Viskosität mit berücksichtigt, siehe Gleichungen (2.14) and (2.15). Die Blitztemperaturberechnung erfolgt nach Blok [B3, T1].

$$h_{\min} = h_{\min,iso} \cdot S_{GF}^{0,22} \quad (2.14)$$

$$S_{GF} = 0,81 \cdot e^{-0,015 \cdot \vartheta_{BL}} \quad (2.15)$$

Über die gesamte Betrachtung der Eingriffsstrecke ist nun die Auswirkung einer Kopfrücknahme auf die Pressungsverteilung berücksichtigt worden. Die Verminderung der Auswirkung des vorzeitigen Eingriffes wird hierbei nicht beachtet.

2.3.4. AGMA 06FTM06

Barnett [B2] stellt aufgrund von Erfahrungswerten aus der industriellen Praxis eine einfache Berechnungsvorschrift auf, mit der die graufleckenbedingte Profilformabweichung für die gesamte Eingriffsstrecke berechnet werden kann. Die Berechnung erfolgt für Rad und Ritzel getrennt. Die Berechnung berücksichtigt den Einfluss des vorzeitigen Eingriffes und der Kopfabrundung auf die Formabweichung.

Als wichtigste Größen für den graufleckenbedingten „Verschleiß“ bestimmt er die Hertzsche Flächenpressung, die Gleitgeschwindigkeit, die Schmierfilmdicke, die Schmierstofftemperatur, das Gleit-Roll-Verhältnis, die Oberflächenbeschaffenheit, die Oberflächenhärte, die Anzahl der Lastwechsel, die Gleitrichtung und die Dauer des Kontaktes beider Kontaktpartner und die Schmierstoffadditive. Die Berechnung wird durchgeführt bei einer relativen Schmierfilmdicke von $\lambda < 3$. Oberhalb der kritischen Schmierfilmdicke von $\lambda_{lim} = 3$ besteht nach Erfahrung von Barnett keine Graufleckigkeit und somit auch kein Verschleiß. Die Berechnungsvorschrift ist in Gleichung (2.16) gezeigt.

$$M_p := X \cdot MP_{\text{rate}} \cdot \frac{C_y}{v_{\text{pn}}} \cdot \sigma_H \cdot U_s \cdot \left(\frac{Ra}{h_\xi} \right) \cdot \left(\frac{U_s}{U_e} \right)^2 \cdot \frac{\rho_2 \cdot z_1}{\rho_1 \cdot z_2} \quad (2.16)$$

mit

M_p	[μm]	=	Formabweichung aufgrund von Grauflecken
X	[-]	=	Schalter zum Ausschalten der Berechnung bei $\lambda > 3$
MP_{rate}	[$\mu\text{m}/\text{N}_L$]	=	Verschleißrate pro Lastwechsel ($MP_{\text{rate}} = 1 \cdot 10^{-12} \mu\text{m}/\text{N}_L$)
C_y	[-]	=	Lastwechselzahl
v_{pn}	[HV]	=	Vickershärte der Zahnflankenoberfläche
σ_H	[N/mm^2]	=	Flächenpressung der Zahnflanken
U_s	[mm/s]	=	Gleitgeschwindigkeit
Ra	[μm]	=	Arithmetische Mittenrauheit
h_ξ	[μm]	=	Schmierfilmdicke nach Ertel–Grubin
U_e	[mm/s]	=	Wälzgeschwindigkeit
$\rho_{1,2}$	[mm]	=	Ersatzkrümmungsradius Ritzel, Rad
$z_{1,2}$	[-]	=	Zähnezahl Ritzel, Rad

Es wird also von einer linearen Abhängigkeit aller Einflussfaktoren ausgegangen. Das quadratische Verhältnis der Geschwindigkeit spiegelt nur eine geometrische Beziehung wider, so dass die Geschwindigkeit in diesem Verhältnis herausgekürzt wird. Die Geschwindigkeit geht in der Berechnung somit nur linear über die Gleitgeschwindigkeit ein.

Die Besonderheiten dieser Berechnungsgleichung sind die konstante werkstoffabhängige Verschleißrate und die Schmierfilmdickenberechnung nach Ertel und Grubin [E3, G1], die nur die Wälzgeschwindigkeit, die Schmierstoffviskosität bei Betriebstemperatur, die Linienlast und die Krümmungsradien enthält. Bei dieser Berechnung gehen weder die Massen– noch die Blitztemperatur mit ein. Unterschiedliche Schmierstoffe und deren Additive können mit dieser Berechnungsgleichung noch nicht berücksichtigt werden. Jedoch könnte über den Schalter X eine Berücksichtigung unterschiedlicher additivbedingter Verschleißraten erfolgen.

Die Berechnungsgleichung ist in einem Programm hinterlegt, welches in einem ersten Schritt unter Berücksichtigung etwaiger Korrekturen, sowohl Höhen– als auch Breitenkorrekturen, die 3D–Lastaufteilung für die gesamte Eingriffsstrecke berechnet. Bei diesem auf der Feder–Theorie basierenden Modell wird der vorzeitige Eingriff mit berücksichtigt. Somit können erhöhte Belastungen der Zahnflanke durch lastbedingte Eingriffsstörungen erfasst werden. Den Kopfkanten wird ein Krümmungsradius zugeordnet, so dass beim vorzeitigen Eingriff auch von einem Hertzschen Kontakt ausgegangen wird. Jedoch ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Hertzsche Kontaktbreite in gewissen Belastungsfällen größer ist als der Kopfeckradius.

3. Versuchsprogramm und untersuchte Parameter

Die Prüfstandsuntersuchungen des aktuellen Vorhabens gliedern sich in zwei Bereiche. Es werden sowohl Versuche am Standardgetriebe- und auch am Großgetriebeprüfstand durchgeführt.

Um die Radsätze des Großgetriebes mit den Radsätzen des Standardgetriebes vergleichen zu können, wird die als entscheidend für die Graufleckentragfähigkeit identifizierte Größe, die relative Schmierfilmdicke λ , bei den verschiedenen Baugrößen konstant gehalten. Die relative Schmierfilmdicke liegt bei den Versuchsverzahnungen zwischen $\lambda = 0,3$ bis $0,6$. Bei der geforderten Oberflächenhärte von $58 +4$ HRC sind alle Verzahnungen nach dem in Kapitel 2.3.1 gezeigten Bild 2.3 graufleckengefährdet. Nur die gleitgeschliffenen Radsätze weisen eine relative Schmierfilmdicke von $\lambda = 1$ bis 3 auf und befinden sich somit an der Grenze zur Graufleckengefährdung und sind teilweise weit auf der sicheren Seite.

Aufgrund von unerwarteten Ergebnissen an den gleitgeschliffenen Radsätzen ist ein Wiederholungsversuch durchgeführt worden. Um den Rahmen des Versuchsprogrammes nicht zu sprengen, ist hierfür ein Versuch des mit Wasser verunreinigten Schmierstoffes ausgelassen worden. Das bereits modifizierte Versuchsprogramm des Großgetriebes ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Übersicht über das Versuchsprogramm am Großgetriebe

Versuchsparameter	$C_a = 50 \mu\text{m}$	$C_a = 100 \mu\text{m}$	$R_a = 0,1 \mu\text{m}$	$R_a = 0,3 \mu\text{m}$	$R_a = 0,5 \mu\text{m}$	$R_a = 0,6 \mu\text{m}$
Gleitschleifen 1	X		X			
Gleitschleifen 2	X			X		
Gleitschleifen 2-2	X			X		
Rad treibt	X				X	
Kopfabrundung	X				X	
Profilverschiebung 1	X				X	
Profilverschiebung 2		X			X	
Emulsion	X				X	
Modul 16 - 1	X					X
Modul 16 - 2		X				X

C_a = Kopfrücknahmebetrag, R_a = gemittelte arithmetische Mittenrauheit beider Zahnflanken

Immer bessere Fertigungsverfahren bei der Zahnradherstellung machen es unmöglich, die hohen arithmetischen Mittenrauheiten der vorangegangenen Projekte FVA 286 I [H1] und II [L5] zu erreichen. Die erreichten arithmetischen Mittenrauheiten sind zwar kleiner als die ursprünglich geforderte Referenzrauheit von $R_a = 0,8 \mu\text{m}$. Aber dank Versuche des Projektes FVA 286 II [L5], für die Radsätze mit einer ähnlichen Rauheit verwendeten worden sind, bleiben die Ergebnisse vergleichbar.

Da die Versuchsräder des Standardgetriebes mit einem Modul von $m_n = 4,5$ mm im Vergleich zu den Großgetrieberadsätzen mit einem Modul von $m_n = 22$ mm relativ kostengünstig sind, und die Laufzeiten der Versuche am Standardgetriebe um ein Fünffaches geringer sind, können hier mehr Versuche durchgeführt werden. So können am Standardprüfstand die Versuche des Großgetriebes in einer erweiterten Variante untersucht werden. Die Versuche am Standardgetriebe zeigt die Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2: Übersicht über das Versuchsprogramm am Standardgetriebe

Versuchsparameter	$C_a = 10 \mu\text{m}$	$C_a = 20 \mu\text{m}$	$Ra = 0,1 \mu\text{m}$	$Ra = 0,35 \mu\text{m}$	$Ra = 0,45 \mu\text{m}$	$Ra = 0,55 \mu\text{m}$
C-Verzahnung						X
Gleitschleifen 1	X		X			
Gleitschleifen 1	X		X			
Gleitschleifen 2	X		X			
Gleitschleifen 2	X		X			
Kopfabrundung	X				X	
Kopfabrundung	X				X	
Rad treibt	X			X		
Rad treibt	X			X		
Profilverschiebung 1	X				X	
Profilverschiebung 1		X			X	
Profilverschiebung 2	X				X	
Profilverschiebung 2		X			X	
Emulsion 1	X				X	
Emulsion 2	X				X	
Modul 3,27 - 1	X					X
Modul 3,27 - 2		X				X
Modul 3,27 - 1 PV	X					X
Modul 3,27 - 2 PV		X				X

Der Unterschied zwischen den einzelnen Varianten der gleitgeschliffenen Radsätze wird in Tabelle 3.2 nicht deutlich. Diese Radsätze haben nach unerwartet kurzer Zeit die arithmetische Mittenrauheit von $Ra = 0,1 \mu\text{m}$ erreicht. Um einen Unterschied zwischen den arithmetischen Mittenrauheiten zu erhalten, ist ein Radsatz deutlich länger gleitgeschliffen worden. Mit steigender Bearbeitungszeit hat sich jedoch keine größere Veränderung der arithmetischen Mittenrauheit gezeigt. Somit liegen die arithmetischen Mittenrauheiten in gleicher Größenordnung.

Bei den Versuchen von Lützig im Vorhaben FVA 286 II [L5] ist deutlich geworden, dass bei größeren Kopfrücknahmebeträgen keine hohen Auskolkungen zu erwarten sind. Um immer noch differenzierbare Ergebnisse zu erzielen, entsprechen die gewählten Kopfrücknahmebe-

träge von $C_a = 50 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ den Beträgen, bei denen die Radsätze des FVA 286 II noch hohe Auskolkungstiefen lieferten.

Das Versuchsprogramm des aktuellen Vorhabens sieht eine Reihe von sehr unterschiedlichen Versuchsparametern vor. So werden sowohl neue technologische Ansätze, wie das chemisch-mechanische Gleitschleifen [D9], als auch veränderte Geometrien und Betriebsbedingungen mit untersucht. Im Speziellen ist bei der Geometrie der Modul, die Profilverschiebung, die arithmetische Mittenrauheit und der Kopfrücknahmebetrag betrachtet worden. Das treibende Rad und der mit Wasser verunreinigte Schmierstoff stellen neue Betriebsbedingungen für den Graufleckentest dar.

3.1. Chemisch-mechanisches Gleitschleifen

Moderne Getriebe zum Einsatz in Großwindturbinen sind für eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren ausgelegt. Ziel von Unternehmen, die Getriebe für diese Branche liefern, ist es, das Auftreten von Graufleckigkeit zu unterbinden.



Bild 3.1: Verfahrensprinzip des chemisch-mechanischen Gleitschleifens

Die bisherigen Untersuchungen zeigen einen großen Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Entstehung der Graufleckigkeit. Das Ziel der chemisch-mechanischen Bearbeitung ist, die Oberflächenrauheiten zu minimieren, ohne die Profilform zu verändern und ohne die Oberflächenspannungen des Werkstückes zu verändern. Laut [D9] verbessert das Gleitschleifen das Funktionsverhalten beanspruchter Teile, ohne die ursprüngliche Profilform ungünstig zu ändern. Ebenfalls werden positive Einflüsse auf das Verschleiß-, Reibungs- und Gleitverhalten, die Schmierfähigkeit und die Korrosionsanfälligkeit beschrieben.

Das chemisch-mechanische Gleitschleifen ist eine Kombination zweier Wirkprinzipien, die getrennt keine Veränderung an der Oberfläche hervorrufen würden. Erst das Zusammenführen dieser Wirkprinzipien ermöglicht eine Verbesserung der Oberflächenrauheit mit geringen Auswirkungen auf die Makrogeometrie, wie es in Bild 3.1 zu sehen ist. Unter Bewegung verringert eine Chemikalie durch Oxidation zunächst die Werkstoffoberflächenfestigkeit. Speziell geformte Keramikpartikel tragen die Rauheitsspitzen dieser Schicht dann ab. Die in Bild

3.2 zu sehenden Partikel können nicht in die Rauheitstäler eindringen und tragen nur Spitzen und Plateaus ab. Der Vorgang wiederholt sich kontinuierlich, bis das gewünschte Resultat mit einer sehr feinen Oberfläche, die eine geringe Rauheit aufweist, erreicht ist.



Bild 3.2: Keramikpartikel mit einer Härte nach Mohs von neun

3.2. Kopfabrundung

Die im Vorhaben 286 II [L5] untersuchten Verzahnungen weisen am Großgetriebe Kopfrücknahmebeträge in der Größenordnung von $C_a = 50 \mu\text{m}$ bis $170 \mu\text{m}$ und am Standardgetriebe von $C_a = 10 \mu\text{m}$ bis $35 \mu\text{m}$ auf. Trotz dieser Kopfrücknahmebeträge verbleibt immer noch eine scharfe Kante am Ende der Evolvente im Übergang zur Kopffläche der Zähne.

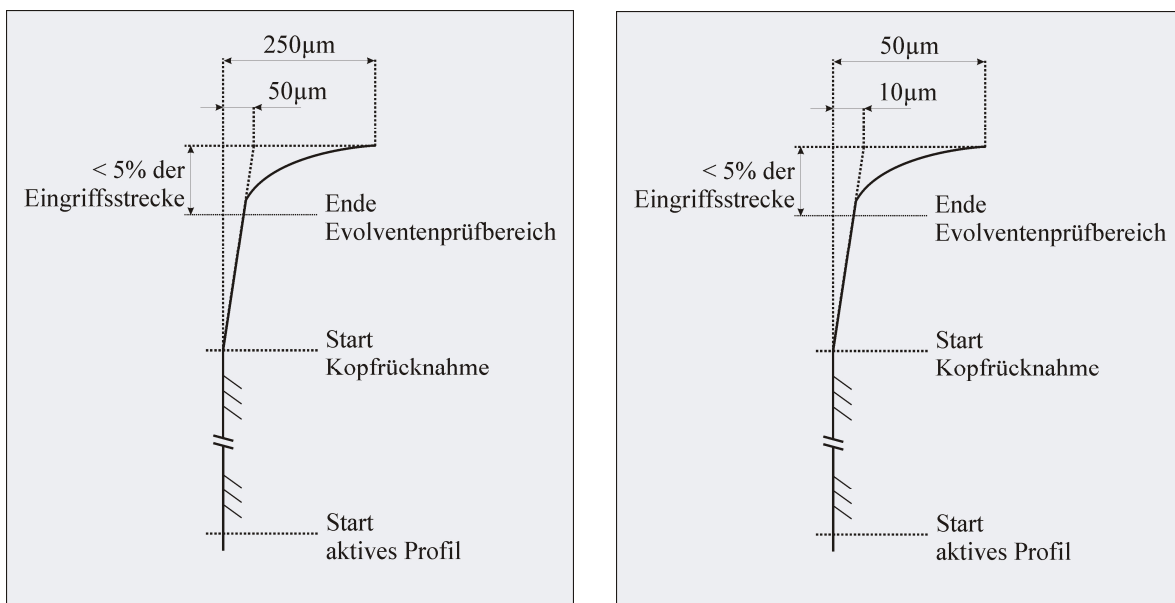


Bild 3.3: lineare Kopfrücknahme mit einer überlagerten Kopfabrundung, links: Großgetriebeverzahnung $m_n = 22 \text{ mm}$, rechts: Standardgetriebeverzahnung $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Durch das zu übertragende Drehmoment werden die im Eingriff befindlichen Zahnpaare elastisch verformt. Die elastische Verformung der belasteten Zähne einer Getriebestufe erzeugt eine Teilungsvergrößerung des getriebenen Rades und eine Teilungsverkleinerung des treibenden Rades. Die resultierende Gesamtteilungsänderung führt zu einem vorzeitigen Eingriff und somit zu einem kritischen Gleiten der scharfen Kopfkante des getriebenen Rades entlang der Fußflanke des treibenden Rades. Im Weiteren ist dieser Vorgang als Schaben bezeichnet.

Zur Entschärfung des vorzeitigen Eingriffes und des somit entstehenden scharfkantigen Schabens der Zahnkopfkanten an der Zahnflanke des Gegenrades sind Laufversuche mit Prüfradsätzen vorgesehen, die zusätzlich zur Kopfrücknahme eine überlagerte Kopfabrundung aufweisen. Diese Entschärfung der möglichen Schabekante ist mit einer zusätzlichen Kopfabrundung mit einem Radius von $r = 250 \mu\text{m}$ am Großgetriebe und $r = 50 \mu\text{m}$ am Standardgetriebe verwirklicht worden. In Bild 3.3 ist die abrundende Wirkung der zusätzlichen Kopfabrundung auf der Eingriffsstrecke deutlich zu erkennen.

Ein weiterer positiver Aspekt der Verhinderung des vorzeitigen Eingriffes ist, dass der durch das Schaben sonst entfernte Schmierfilm auf der Zahnflanke verbleibt und es beim regulären Eingriff nicht zu einem ungewollten Metall–Metall–Kontakt kommt.

Um zu gewährleisten, dass sich die zusätzliche Kopfabrundung nicht stark auf den Pressungsverlauf über den Eingriff auswirkt, sondern nur einen lokalen Einfluss auf das Schaben besitzt, ist die Länge der zusätzlichen Korrektur bewusst sehr kurz gewählt worden. Beginn der überlagerten Korrektur ist in einem Bereich vorgesehen, welcher kürzer ist als 5 % der Eingriffsstrecke. Die Variation der Kopfabrundung an der C–Verzahnung erfolgt durch die Veränderung des Beginns der additiven Kopfrücknahme auf der Eingriffsstrecke.

3.3. Treibendes Rad

Die Getriebe von Windkraftanlagen wandeln hohe Drehmomente in hohe Drehzahlen. In diesem Betriebsfall treibt das Großrad das Ritzel an. Nach dem örtlichen Berechnungsverfahren in FVA 259 I [S3] besteht kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Betriebszuständen. Dieser Betriebszustand tritt nicht nur für Windkraftanlagengetriebe auf, sondern auch in den höheren Gängen von Kraftfahrzeuggetrieben. Somit sind die Versuche mit dem kleineren Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ am Standardgetriebe nicht nur zur Untersuchung des Baugrößeneinflusses geeignet, sondern sind auch für die Kraftfahrzeugindustrie von Interesse.

3.4. Profilverschiebung

Die C–Verzahnung, wie sie für die Graufleckentests verwendet wird, hat sehr kleine Profilverschiebungen und neigt aufgrund der hohen Werte des negativen spezifischen Gleitens zur Graufleckenbildung. Ziel der Versuche mit der veränderten Profilverschiebung ist es, die Übertragbarkeit des Berechnungsverfahrens nach [S3] auf Praxisgetriebe mit einer nicht so stark graufleckengefährdeten Verzahnung zu überprüfen.

Die Profilverschiebung des Ritzels ist praxisnah gewählt. Sie beträgt $x_1 = 0,5$ und führt zu sehr spitzen Zähnen am Ritzel, wie in Bild 3.4 zu erkennen ist. Es ist jedoch auch zu sehen, dass die Zahnfüße dicker werden. Das spezifische Gleiten im Zahnfuß des Ritzels ist nun im Vergleich zu der C-Verzahnung fast halbiert und beträgt $\zeta_1 = -1,5$.

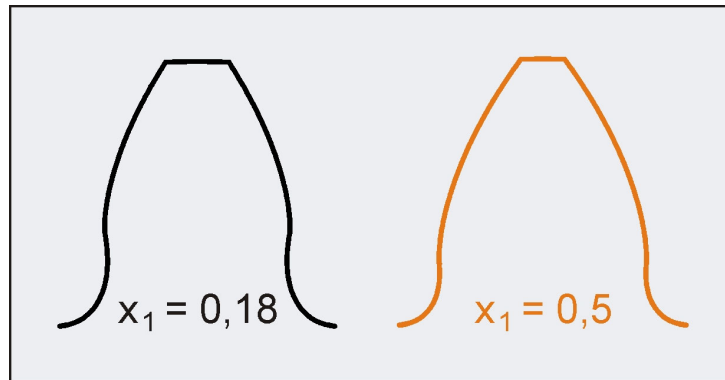


Bild 3.4: Auswirkung der Profilverschiebung auf die Zahnform

Der Achsabstand und die feste Profilverschiebungssumme erzwingen ein stark negativ profilverschobenes Gegenrad. Somit herrschen im Zahnfuß des Gegenrades schlechtere Bedingungen bezüglich der Graufleckentragfähigkeit als bei der Standardverzahnung. Am Standardgetriebe wird eine weitere Variante mit einer Profilverschiebung zwischen der Standard- und der praxisnahen Profilverschiebung ausgeführt.

3.5. Wasser im Öl

Getriebe sind offene atmende Systeme mit schleifenden Dichtungen. Im Betrieb erwärmt sich die im Getriebe enthaltene Luft und dehnt sich aus. Das Volumen im Getriebe wächst durch die Wärmedehnung nicht nennenswert mit. Dadurch wird Luft aus dem Getriebe heraus gedrückt. Kommt es zum Stillstand und zur Abkühlung des Getriebes, wird die ausgestoßene Luft wieder in das Getriebe eingezogen. Die durch das Ansaugen des Getriebes in das Getriebe eintretende Luft kann feucht sein und somit Wasser in das Getriebe einbringen. Diese Feuchtigkeit kondensiert im kalten Getriebe am Gehäuse und fließt in den im Getriebe enthaltenen Schmierstoff.

Wie hoch schädliche Wassergehalte in Schmierstoffen sind, ist sehr stark umstritten. Für Schmierstoffe auf Mineralölbasis schwanken die Erfahrungswerte von Getriebeherstellern für schädliche Wassergehalte zwischen $W = 250$ ppm und 2000 ppm. Diese großen Unterschiede zwischen den Angaben zeigen die große Unsicherheit, die in der Getriebebranche vorherrscht. Das FVA Projekt 488 [B4] beschäftigt sich ebenfalls mit dem Einfluss von Wasser auf die Tragfähigkeit von Wälzlagern und Zahnrädern. In diesem Projekt werden die Untersuchungen aber hauptsächlich mit Polyglykolen durchgeführt.

Die benötigte Ölmenge für jeden Stufentest des Großgetriebes beträgt $V_{\text{Öl}} = 600$ l. Diese hohe Schmierstoffmenge macht die Verwendung eines FVA-Referenzschmierstoffs aus Kosten-

gründen nicht möglich. Deshalb wird ein speziell für die Versuche bereitgestelltes Mineralöl eingesetzt. Das Mineralöl Tribol 1115 besitzt eine Graufleckentragfähigkeitskraftstufe von =8 nach [F1]. Der Schmierstoff hat eine kinematische Viskosität von $\nu_{40} = 220 \text{ mm}^2/\text{s}$ bei $\vartheta = 40^\circ \text{ C}$ und ist mit 4 % Anglamol 99 additiviert worden, um die Fresstragfähigkeit zu erhöhen. Er enthält jedoch keine PD-Additive (Plastic Deformation).

Für den verwendeten Schmierstoff liegt die Sättigungsgrenze für die Aufnahmefähigkeit von Wasser für eine Schmierstofftemperatur von $\vartheta = 90^\circ \text{ C}$ bei ca. $W = 750 \text{ ppm}$. Um den Schmierstoff mit einer hinreichenden Wassermenge verunreinigt zu haben, jedoch trotzdem Unterhalb der Sättigungsgrenze zu bleiben, und somit kein freies Wasser im Schmierstoff zu haben, ist ein Wassergehalt von $W = 500 \text{ ppm}$ gewählt worden.

3.6. Modul Variation

Zur Schließung der bestehenden Lücke zwischen den untersuchten Moduln $m_n = 11 \text{ mm}$ und 22 mm sind zwei Laufversuche mit einem Modul von 16 mm durchgeführt worden. Um den bestehenden Prüfstand nutzen zu können, müssen die Zähnezahlen der Radsätze bei konstanter Übersetzung von $i = 1,5$ auf $z_1 = 22$ und $z_2 = 33$ erhöht werden.

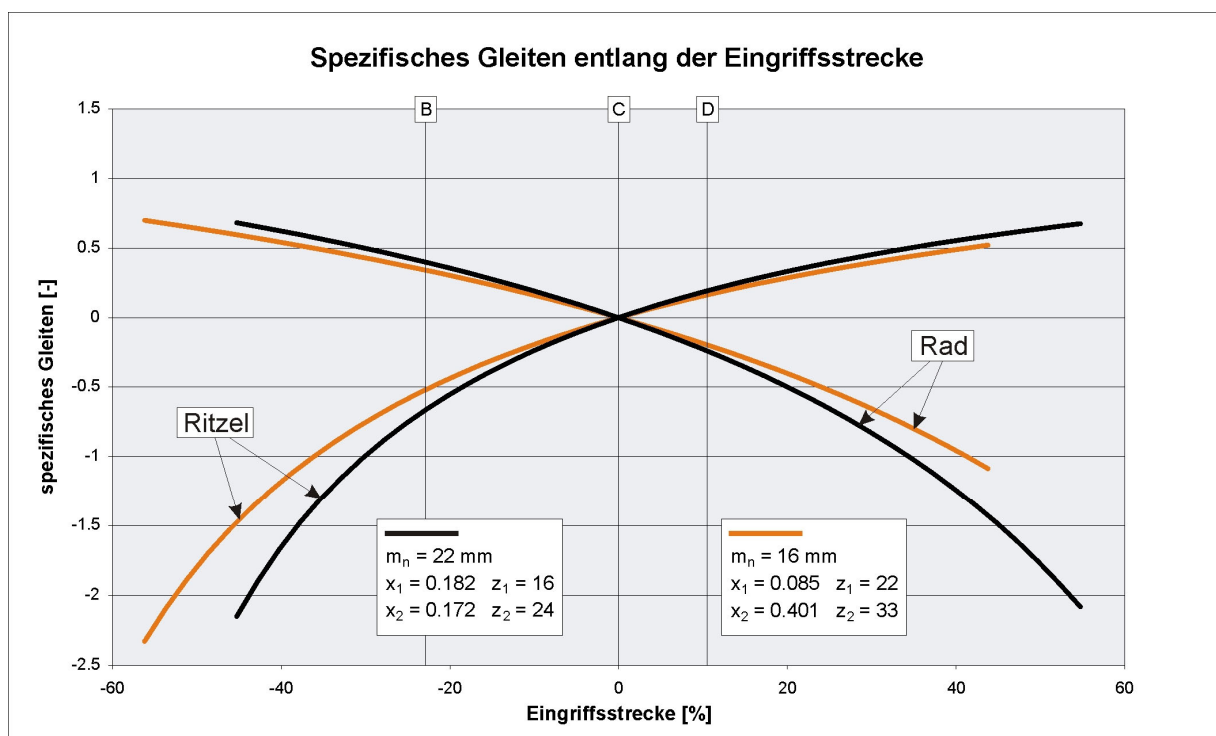


Bild 3.5: Vergleich des spezifischen Gleitens der Moduln $m_n = 16 \text{ mm}$ und 22 mm , prozentuale Auftragung der Eingriffsstrecke

Bei diesen neu gewählten Zähnezahlen ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Profilver-schiebung entsprechend der Gleitverhältnisse in den Zahnfüßen der Räder mit einem Modul von $m_n = 22 \text{ mm}$ anzupassen ist. Bild 3.5 zeigt das spezifische Gleiten entlang der Eingriffsstrecke für beide Verzahnungsvarianten.

Das spezifische Gleiten sieht zunächst stark unterschiedlich aus. Wird das spezifische Gleiten entlang einer Eingriffsstrecke, die zwischen den Punkten A bis E gleichmäßig aufgeteilt ist, aufgetragen, so kann in Bild 3.6 festgestellt werden, dass die Gleitverhältnisse im Zahnfuß des Ritzels in der gleichen Größenordnung liegen. Es zeigt sich jedoch ein starker Unterschied des spezifischen Gleitens im Zahnfuß des Rades.

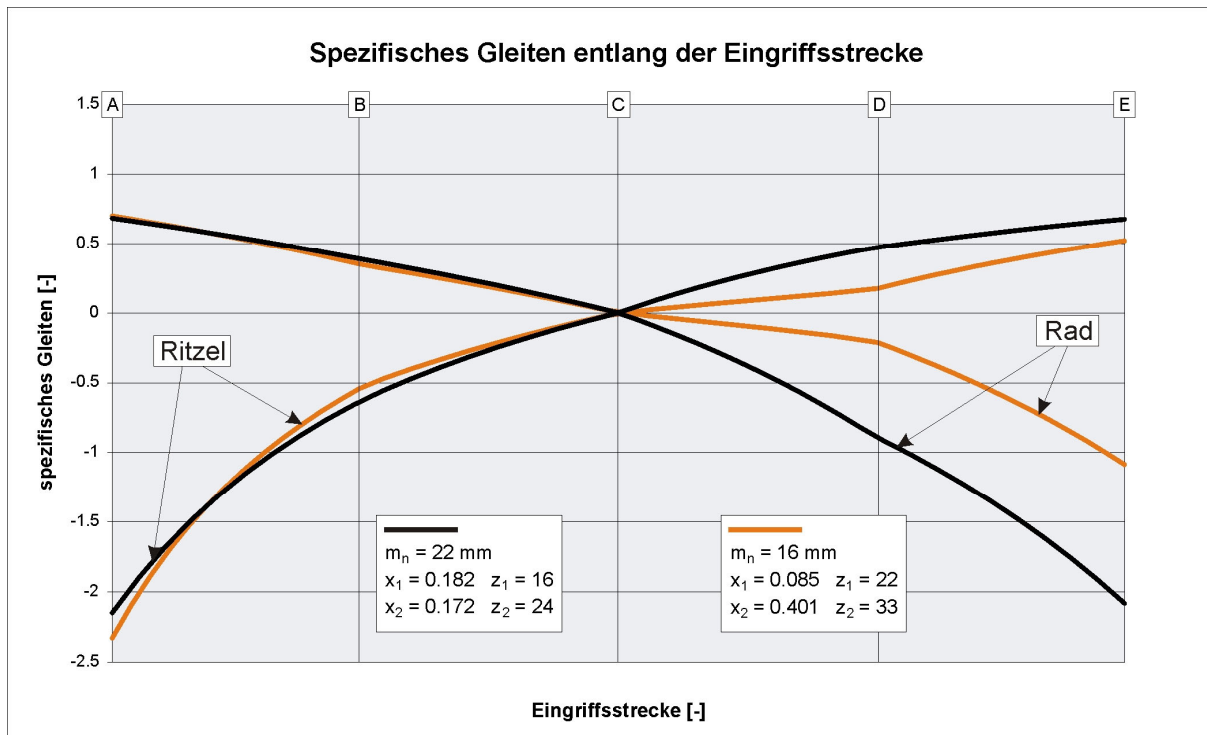


Bild 3.6: Vergleich des spezifischen Gleitens der Moduln $m_n = 16 \text{ mm}$ und 22 mm , gleichmäßige Aufteilung der Eingriffsstrecke

In einer weiteren Variante wird das Verhältnis der Profilverschiebungen der C-Verzahnung beibehalten. Die Verzahnung ist in diesem Fall bezüglich des spezifischen Gleitens ausgeglichener und weist mit $\zeta_1 = 1,7$ und $\zeta_2 = 1,4$ in beiden Zahnfüßen ähnlich niedrige Werte auf.

Das Modulverhältnis zwischen $m_n = 16 \text{ mm}$ und 22 mm setzt voraus, dass die dem Versuch entsprechenden Verzahnungen am Standardgetriebe mit einem Modul von $m_n = 3,27 \text{ mm}$ hergestellt werden. In der DIN 780 [D14] sind Modulreihen aufgeführt, die bei der Zahnradherstellung Anwendung finden sollten. Der gewünschte Modul ist jedoch in den Reihen nicht aufgeführt, so dass bei Zahnradherstellern auch kein Werkzeug für diesen Modul vorhanden ist. Aus diesem Grund sind die Zahnflanken beim Vorverzahn aus dem Vollen geschliffen worden.

4. Versuchsergebnisse

Zunächst sind die erreichten Qualitäten der Verzahnungen im Lieferzustand tabellarisch aufgeführt. Im Weiteren werden zunächst die Auswirkungen der einzelnen geprüften Parameter gezeigt und die entstandenen Verschleißformen möglichen Ursachen zugeordnet. In Anlehnung an die von Lützig [L4] gezeigte Berechnung des kritischen Krümmungsradius beim Übergang von der Evolvente zur Korrektur, werden Pressungsverläufe für unterschiedliche Kopfrücknahmeformen und -beträge verglichen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann eine neue Modellvorstellung der Entstehung der Grübchen, resultierend aus der Graufleckigkeit, abgeleitet werden.

4.1. Qualität der gelieferten Verzahnungen

Von Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.4 sind die Verzahnungsqualitäten der im Projekt eingesetzten Verzahnungen aufgeführt. Zusätzlich zu den geforderten und erzielten Qualitäten sind die gemessenen arithmetischen Mittenrauheiten der Zahnflanke und die Kopfrücknahmebeträge der Verzahnung aufgeführt. Farblich unterlegt sind alle Qualitätsüberschreitungen.

Bei genauerer Betrachtung der Abweichungen ist zu erkennen, dass die Großzahl der Verzahnungsabweichungen sich nur in einem geringen Maß von der geforderten Qualität entfernen.

Tabelle 4.1: Qualitäten der Seite 1 der Großgetriebeverzahnungen

			Seite 1								
			$f_{f\alpha \max}$	$f_{H\alpha \max}$	$f_{f\beta \max}$	$f_{H\beta \max}$	$f_{p \max}$	F_p	F_r	Ra	C_a
m_n	Bezeichnung	Grenzwert [μm]	8	5	4	8	12	36	14		
22mm	1211-1	Ritzel	4.3	-2.2	1.3	4.4	3.2	9.8	7.7	0.24	46.8
	1221-1	Rad	2.4	3.2	1.7	5.0	3.3	10.7	10.0	0.26	54.2
	1211-2	Ritzel	3.5	-3.9	1.6	7.1	3.1	11.9	12.3	0.10	51.1
	1221-2	Rad	4.2	-6.2	5.6	7.0	5.9	26.3	14.0	0.13	52.1
	1212	Ritzel	2.7	3.6	5.7		9.9	22.7	26.6	0.51	40.4
	1222	Rad	4.6	1.2	1.4	4.3	6.1	14.0	8.7	0.45	40.0
	1213	Ritzel	5.6	-4.2	0.8	7.8	8.2	32.5	26.8	0.61	49.5
	1223	Rad	4.0	-3.1	1.5	2.5	5.0	8.6	10.2	0.57	52.6
	1214	Ritzel	4.6	-3.2	0.7	7.0	9.1	28.9	25.4	0.66	48.2
	1224	Rad	2.5	-1.7	1.0	4.5	5.3	12.9	11.3	0.39	49.0
16mm	Bezeichnung	Grenzwert [μm]	6	3.5	4	8	10	32	25		
	1215	Ritzel	2.1	-2.8	0.9	-3.3	2.5	11.0	6.4	0.58	35.0
	1225	Rad	1.8	-0.9	1.0	9.5	3.6	10.5	8.8	0.54	45.0

Tabelle 4.2: Qualitäten der Seite 2 der Großgetriebeverzahnungen

			Seite 2								
m_n	Bezeichnung	Grenzwert [μm]	$f_{f\alpha \max}$	$f_{H\alpha \max}$	$f_{f\beta \max}$	$f_{H\beta \max}$	$f_{p \max}$	F_p	F_r	Ra	C_a
			8	5	4	8	12	36	14		
22mm	1211-1	Ritzel	5.2	-3.9	1.2	3.5	4.0	9.6	7.7	0.25	48.7
	1221-1	Rad	2.4	-3.0	1.8	2.8	2.4	8.3	10.0	0.26	49.4
	1211-2	Ritzel	5.0	-4.8	3.6	-4.6	4.5	11.9	12.3	0.11	51.1
	1221-2	Rad	3.3	-12.1	5.3	3.5	5.5	23.2	14.0	0.20	52.1
	1212	Ritzel	3.3	-9.7	1.3	7.2	12.5	28.9	26.6	0.63	51.0
	1222	Rad	3.1		3.4	4.4	3.9	13.8	8.7	0.37	49.1
	1213	Ritzel	9.9	12.3	1.0	-3.5	7.2	26.7	26.8	0.52	103.5
	1223	Rad	3.6	-9.1	4.1	-3.3	4.4	6.0	10.2	0.49	114.7
16mm	1214	Ritzel	6.1	-8.3	1.1	4.3	6.1	27.4	25.4	0.59	50.0
	1224	Rad	2.7	-3.5	2.0	5.8	4.1	11.2	11.3	0.49	50.0
	Bezeichnung	Grenzwert [μm]	6	3.5	4	8	10	32	25		
16mm	1215	Ritzel	1.5	-1.6	0.6	6.3	3.2	9.6	6.4	0.59	80.0
	1225	Rad	1.2	-4.4	3.2	-7.1	2.3	11.7	8.8	0.59	90.0

Tabelle 4.3: Qualitäten der Seite 1 der Standardgetriebeverzahnungen

			Seite 1								
m_n	Bezeichnung	Grenzwert [μm]	$f_{f\alpha \max}$	$f_{H\alpha \max}$	$f_{f\beta \max}$	$f_{H\beta \max}$	$f_{p \max}$	F_p	F_r	Ra	C_a
			5.0	5.5	4.5	6.0	6.0	20.0	16.0		
4,5mm	2211	Ritzel	3.9	1.9	1.7	0.9	2.7	9.1	9.5	0.53	0.0
	2221	Rad	1.9	-3.6	1.6	2.8	1.3	5.7	2.0	0.64	0.0
	2212-1	Ritzel	7.1	-13.2	1.0	1.7	1.7	6.8	6.2	0.12	12.0
	2222-1	Rad	5.7	-4.3	1.8	3.5	3.2	17.5	15.6	0.07	12.0
	2222-2	Ritzel	2.4	-2.8	1.6	1.9	1.8	8.6	4.4	0.14	12.0
	2212-2	Rad	8.6	-13.1	2.2	2.8	3.3	13.0	10.8	0.08	12.0
	2212	Ritzel	6.5	-14.2	0.7	-1.8	4.0	16.5	13.6	0.35	9.3
	2222	Rad	4.1	2.4	4.2	-2.2	3.9	20.0	17.3	0.38	9.0
	2213	Ritzel	2.3	1.3	1.2	1.7	2.3	8.2	7.8	0.56	23.0
	2223	Rad	1.9	2.2	2.8	3.0	2.0	10.8	7.2	0.44	18.0
	2215	Ritzel	4.4	5.4	0.8	0.5	1.9	8.6	9.3	0.49	11.0
	2225	Rad	1.4	2.0	1.8	2.9	4.0	14.4	14.8	0.51	11.3
	2216	Ritzel	2.5	-1.4	2.3	2.1	3.3	7.2	3.8	0.50	21.0
	2226	Rad	1.8	2.0	2.2	3.8	3.3	11.0	11.1	0.44	10.0
2217	Ritzel	2.4	4.6	2.5	2.0	3.7	18.6	17.5	0.30	10.0	
2227	Rad	2.1	-3.2	3.5	5.9	3.5	19.1	7.8	0.46	10.0	
3,27mm	Bezeichnung	Grenzwert [μm]	4.0	4.5	4.5	6.0	5.0	20.0	14.0		
	2218	Ritzel	1.7	4.5	3.2	3.6	6.3	39.4	26.8	0.69	6.0
	2228	Rad	2.6	3.2	4.3	2.9	2.9	8.7	11.2	0.51	11.0
	2219	Ritzel	2.0	2.3	1.8	3.1	4.0	22.6	16.8	0.70	10.0
	2229	Rad	1.2	-2.8	4.4	1.7	4.2	17.6	14.6	0.46	9.0

Auch bei der Standardverzahnung ist festzustellen, dass die Verzahnungsqualitäten teilweise geringfügig von den geforderten Werten abweichen.

Tabelle 4.4: Qualitäten der Seite 2 der Standardgetriebeverzahnungen

			Seite 2								
m_n	Bezeichnung	Grenzwert [μm]	$f_{f\alpha\max}$	$f_{H\alpha\max}$	$f_{f\beta\max}$	$f_{H\beta\max}$	$f_{p\max}$	F_p	F_r	Ra	C_a
			5.0	5.5	4.5	6.0	6.0	20.0	16.0		
4,5mm	2211	Ritzel	0.9	1.6	2.1	-3.6	3.2	10.9	9.5	0.44	0.0
	2221	Rad	2.2	-2.7	2.0	-3.7	1.8	5.8	2.0	0.50	0.0
	2212-1	Ritzel	7.2	-15.0	1.1	1.9	1.5	6.7	6.2	0.11	13.0
	2222-1	Rad	2.0	-4.1	2.1	-2.9	2.0	10.3	15.6	0.07	13.0
	2222-2	Ritzel	7.4	-11.7	2.8	-3.4	3.0	12.2	10.8	0.12	12.0
	2212-2	Rad	2.1	-2.1	1.6	-2.0	1.8	10.2	4.4	0.08	11.5
	2212	Ritzel	6.7	-8.5	1.1	-3.4	3.8	16.2	13.6	0.32	11.5
	2222	Rad	2.1	1.9	0.6	-1.8	3.2	21.3	17.3	0.29	12.0
	2213	Ritzel	0.9	0.9	2.6	-3.7	4.0	9.2	7.8	0.41	11.0
	2223	Rad	0.8	-1.2	5.9	-4.6	1.7	8.0	7.2	0.34	11.3
	2215	Ritzel	1.5	2.5	2.0	-1.9	1.7	8.5	9.3	0.35	23.0
	2225	Rad	1.5	-1.9	2.6	-5.6	2.6	11.5	14.8	0.47	18.0
	2216	Ritzel	1.2	-1.5	4.4	-3.9	1.7	5.8	3.8	0.39	20.0
	2226	Rad	1.1	-1.1	3.6	-5.7	4.2	11.2	11.1	0.39	17.0
2217	Ritzel	1.0	-3.8	4.7	-5.4	4.8	18.6	17.5	0.45	10.0	
2227	Rad	1.7	-2.3	3.6	-6.8	2.5	18.5	7.8	0.45	10.0	
3,27mm		Grenzwert [μm]	4.0	4.5	4.5	6.0	5.0	20.0	14.0		
	2218	Ritzel	4.8	-5.3	2.6	-5.5	4.8	30.7	26.8	0.62	20.0
	2228	Rad	1.5	-4.6	3.6	-2.3	1.5	12.0	11.2	0.39	22.0
	2219	Ritzel	2.1	-5.4	2.8	-6.1	3.4	17.2	16.8	0.48	19.0
	2229	Rad	2.6	-2.9	4.0	-3.9	4.1	14.1	14.6	0.44	21.0

Die Bilder der Ritzelzahnflanken des Graufleckentests sind im Folgenden dargestellt. Darunter sind die dazugehörigen Profildigramme des Ritzels und des Rades angeordnet. Anhand dieser Bilder sind die beiden Hauptbewertungskriterien für die Graufleckigkeit, das Ausmaß der Graufleckenfläche und das Ausmaß der Profilformabweichung, zu erkennen. Das Profildigramm zeigt einen repräsentativen Ritzelzahn nach dem Versuch und im Neuzustand. Ausgehend vom Neuzustand wird die maximale Auskolkung gemessen. Um die entstehenden Profilformabweichungen im Kontext zu am Rad vorhandenen Korrekturen und entstandenen Formabweichungen sehen zu können, ist die Profilformmessung eines Zahnes des Gegenrades im Neuzustand und nach dem Versuch gezeigt. Die angegebenen Auskolkungstiefen und Kopfabrundungsbeträge stellen gemittelte Werte aller Zähne dar und sind nicht explizit aus den gezeigten Diagrammen abgelesen worden. Die Messung des Profils ist entlang der Eingriffsstrecke dargestellt, so dass die Überlagerung der Eingriffsstrecken die miteinander kämmenden Flankenpunkte gegenüberstellen.

Um ein schnelles Nachschlagen der Versuchsergebnisse zu gewährleisten, sind die Ergebnisse mit den Bildnummern in der Tabelle 4.5 aufgelistet.

Tabelle 4.5: Übersicht der Ergebnisse der Standardgetriebeversuche

Ritzel	Seite	Ra [μm]	C_a [μm]	Versuchsparameter	
2211	1	0,59	0	Standard C–Verzahnung	Bild 4.1
2212-1	1	0,10	12	Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	Bild 4.12
2212-1	2	0,09	13	Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	Bild 4.14
2212-2	1	0,11	12	Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	Bild 4.15
2212-2	2	0,10	12	Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	Bild 4.16
2212	1	0,36	9	Treibendes Rad	Bild 4.37
2212	2	0,31	12	Treibendes Rad	Bild 4.39
2213	1	0,50	21	Kopfabrundung	Bild 4.31
2213	2	0,38	11	Kopfabrundung	Bild 4.33
2215	1	0,50	11	Profilverschiebung	Bild 4.48
2215	2	0,41	21	Profilverschiebung	Bild 4.50
2216	1	0,47	16	Profilverschiebung	Bild 4.51
2216	2	0,39	19	Profilverschiebung	Bild 4.52
2217	1	0,38	10	Wasser im Öl	Bild 4.56
2217	2	0,45	10	Wasser im Öl	Bild 4.58
2218	1	0,60	9	Modul Variation	Bild 4.64
2218	2	0,51	21	Modul Variation	Bild 4.66
2219	1	0,58	10	Modul Variation	Bild 4.67
2219	2	0,46	20	Modul Variation	Bild 4.69

Genau wie bei den Ergebnissen des Standardgetriebes sind die Ergebnisse des Großgetriebes mit den zugehörigen Bildnummern in der Tabelle 4.6 aufgelistet.

Tabelle 4.6: Übersicht der Ergebnisdarstellung der Großgetriebeversuche

Ritzel	Seite	Ra [μm]	C _a [μm]	Versuchsparameter	
1211-2	2	0,26	49	Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	Bild 4.3
1211-2	1	0,25	50	Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	Bild 4.6
1211-1	2	0,15	52	Chemisch–mechanisches Gleitschleifen	Bild 4.7
1212	1	0,50	50	Treibendes Rad	Bild 4.34
1212	2	0,48	40	Kopfabrundung	Bild 4.30
1213	1	0,50	51	Profilverschiebung	Bild 4.44
1213	2	0,59	109	Profilverschiebung	Bild 4.46
1214	2	0,54	49	Wasser im Öl	Bild 4.54
1215	1	0,56	40	Modul Variation	Bild 4.59
1215	2	0,59	85	Modul Variation	Bild 4.63

4.2. Ergebnisse der untersuchten Versuchsparameter

Die Ergebnisse der Versuche werden mittels der Abbildung einer Ritzelflanke und den Evolventendiagrammen des Rades und des Ritzels dargestellt. Die Evolventendiagramme zeigen die Verzahnung sowohl vor dem Versuch als auch am Versuchsende. Im Diagramm ist der Mittelwert der gemessenen Profilformabweichungen an der Messstelle eingezeichnet. Oben links sind die Verzahnungsdaten aufgeführt. Hierzu gehören die Radsatzbezeichnung, die Versuchsbezeichnung, der Kopfrücknahmebetrag und das spezifische Gleiten in den Zahnfüßen. Unten links sind die Mittelwerte der arithmetischen Mittenrauheiten der Rad und Ritzelverzahnung dargestellt.

4.2.1. Versuchsergebnisse an der Standardverzahnung

Um einen Referenzversuch zu den Versuchen der vorherigen Vorhaben [H1, L5] zu haben, wird am Standardgetriebe mit einem Achsabstand von $a = 91,5$ mm ein Radsatz mit einem Modul von $m_n = 4,5$ mm ohne Korrekturen untersucht.

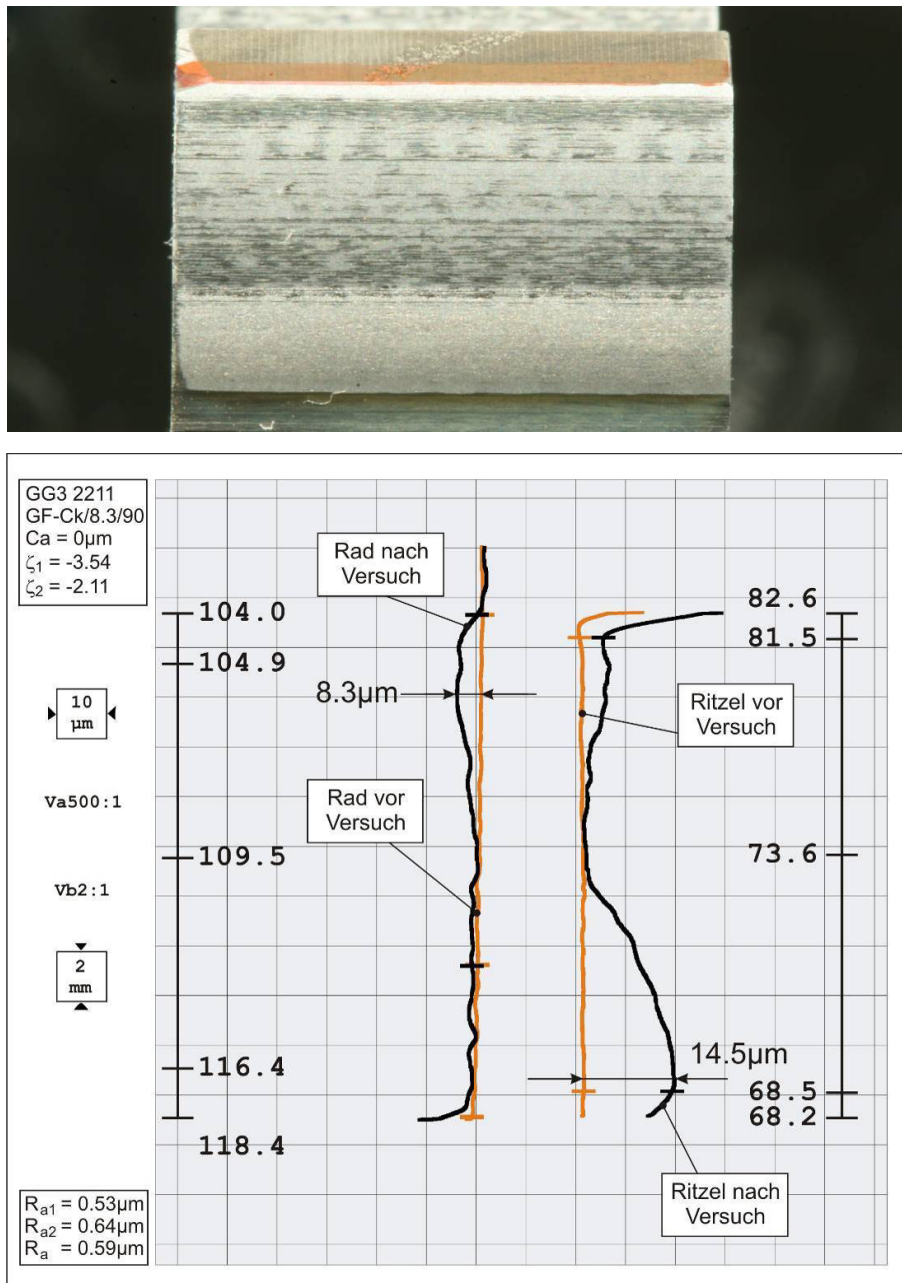


Bild 4.1: Ritzel GG3 2211: Seite 1 ohne Kopfrücknahme $C_a = 0 \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Die Flanke, die im Versuch zum Einsatz kommt, weist eine arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,59 \mu\text{m}$ auf. Die Verzahnungsgeometrie entspricht der C-Verzahnung, jedoch entspricht der verwendete Werkstoff nicht dem in der Vorschrift [F1] angegebenen 16MnCr5, sondern dem für Großgetriebeverzahnungen üblichen Werkstoff 18CrNiMo7-6.

Für die Versuche am Standard- und am Großgetriebe ist der Werkstoff 18CrNiMo7-6 nach DIN EN ISO 10084 [D12] verwendet worden. Der verwendete Werkstoff entspricht der Qualität MQ mit einigen erhöhten Anforderungen in Anlehnung an Qualität ME nach DIN 3990 [D6].

In Bild 4.1 ist im Zahnfuß des Ritzels ganz deutlich eine sehr große graufleckige Fläche zu sehen. Im Evolventendiagramm erstreckt sich eine dreieckige Auskolkung vom Eingriffsbeginn bis hin zum Wälzpunkt. Die Form der Auskolkung ist typisch für die Graufleckigkeit. Zusätzlich sind Auskolkungen oberhalb des Wälzpunktes in Richtung des Zahnkopfes festzustellen. Die Zahnköpfe sind im Evolventendiagramm abgerundet, wobei das Ritzel eine deutliche und das Rad eine sehr geringe Abrundung erfahren hat.

Die Auskolkungstiefe im Zahnfuß des Ritzels beträgt $f_{fm} = 14,5 \mu\text{m}$ und die Auskolkung im Zahnfuß des Rades beträgt $f_{fm} = 8,3 \mu\text{m}$. Die Unterschiede zwischen den Auskolkungstiefen sind auf die unterschiedlich hohen Beträge des spezifischen Gleitens und die unterschiedliche Auswirkung des vorzeitigen Eingriffes auf den Eingriffsbeginn und am Eingriffsende zurückzuführen.



Bild 4.2: Radflanke der Verzahnung GG3 2211, Seite 1 mit $Ca = 0 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Bild 4.2 zeigt die Radflanke der Standardverzahnung. Bis auf die Bereiche in der Nähe des Wälzkreises zeigt die gesamte Zahnflanke graufleckige Flächen. Oberhalb des Wälzpunktes ist eine geringere Graufleckenintensität zu beobachten. Verglichen mit dem Evolventendiagramm kann eine gute Übereinstimmung gefunden werden. Die Graufleckentragfähigkeitskraftstufe von ≈ 8 kann mit diesem Versuch bestätigt werden.

4.2.2. Einfluss des chemisch–mechanischen Gleitschleifens

Obwohl das chemisch–mechanische Gleitschleifen eine schonende Bearbeitungsmethode darstellt, führt sie zu einer leichten Veränderung der Makrogeometrie. Die Veränderung der Geometrie und der Oberflächenrauheit der Verzahnungen sind für die Großtriebeverzahnung am Institut vor, während und nach dem chemisch–mechanischen Gleitschleifen dokumentiert worden. Der Kopfrücknahmebetrag der Zahnflanke ist bei längerem Gleitschleifen um 8 % vergrößert worden.

Insgesamt sind zwei Verzahnungen mit einem Modul von $m_n = 22 \text{ mm}$ und drei Verzahnungen mit einem Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ untersucht worden. Die arithmetischen Mittenrauheiten der Zahnflankenoberfläche der Großtriebeverzahnungen haben zu Versuchsbeginn $Ra = 0,15$ und $0,25 \mu\text{m}$ betragen.

In Bild 4.3 ist das Foto der gelaufenen Ritzelflanke des Radsatzes GG3 1211-1 nach dem Stufentest zu sehen. Die Verzahnung weist zu Versuchsbeginn eine arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ auf. Im Zahnfuß des Ritzels ist deutlich eine Schabemarke, hervorgerufen durch den vorzeitigen Eingriff, zu erkennen. In Bild 4.5 ist die Schabemarke vergrößert dargestellt. Oberhalb der Schabemarke zeichnen sich kleinste Ausbrüche ab.

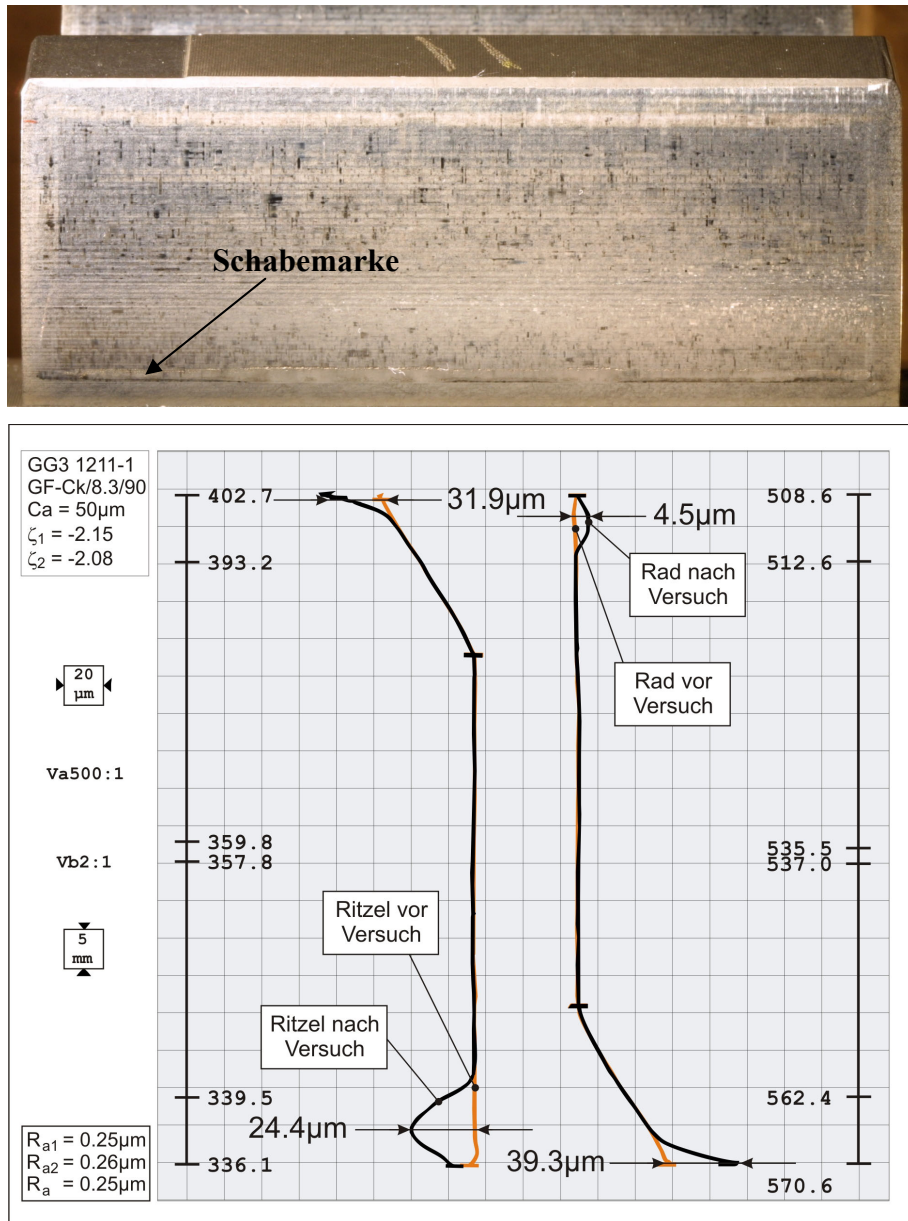


Bild 4.3: Ritzel GG3 1211-1: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 49 \mu\text{m}$, $m_n = 22 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Zusätzlich zu den Veränderungen im Zahnfußbereich ist im Zahnkopfbereich ebenfalls Auffälliges zu beobachten. Abgesehen von der deformierten Kopfkante ist eine etwas breitere Linie 10 mm vom Zahnkopf entfernt zu erkennen. Diese Linie ist im Evolventendiagramm des Ritzels nicht als Verschleiß zu erkennen. Wird die Radflanke auf der gleichen Position der

Eingriffsstrecke betrachtet, ist zu erkennen, dass sich diese Linie am Übergang der verschlissenen Flanke des Rades zum unverschlissenen Teil der Flanke befindet.

Vor Versuchsbeginn sind die Kopfkanten des Radsatzes als Resultat des Gleitschleifens fühlbar abgerundet worden. Nach dem Versuch ist eine scharfe Kante am Zahnkopf des Ritzels zu ertasten. Außer kleineren Flächen in der Schabemarke ist keine Graufleckigkeit auf der gesamten aktiven Zahnflanke zu erkennen. Die Graufleckigkeit ist als insgesamt unterdrückt anzusehen.

Das Evolventendiagramm zeigt, dass die Zahnköpfe des Ritzels und des Rades im Vergleich zum Neuzustand deutlich abgerundet worden sind. In beiden Zahnfüßen sind Auskolkungen zu erkennen. Insbesondere im Zahnfuß des Ritzels hat die Auskolkung eine dreieckähnliche Form angenommen. Die Tiefe der Auskolkung im Zahnfuß des Ritzels befindet sich mit $f_{\text{fm}} = 24,4 \mu\text{m}$ in der gleichen Größenordnung wie die Tiefen der Auskolkungen der Radsätze des Vorgängervorhabens [L5] mit einem ähnlichen Kopfrücknahmebetrag. Oberhalb der dreieckähnlichen Auskolkung im Zahnfuß schließt sich keine flach ansteigende Auskolkung an, wie sie bei Zahnrädern höherer Rauheit und mit sichtbaren Graufleckenflächen auftritt.

Trotz der positiven Ergebnisse bezüglich der Graufleckigkeit weist ein Zahn des Ritzels einen aus der Schabemarke herauswachsenden Grübchenschaden auf. Der Grübchenschaden ist in Bild 4.4 zu sehen. Der Bereich des Hauptgrübchens befindet sich zwischen Einzeleingriffsbeginn und dem Wälzpunkt. An weiteren Zähnen sind viele kleinere Ausbrüche im Bereich der Schabemarke zu erkennen.



Bild 4.4: Zahnrad GG3 1211-1: Grübchenschaden nach Laststufe 10, Seite 2, $m_n = 22 \text{ mm}$

In Bild 4.5 ist die Vergrößerung des Grübchenschadens dargestellt. Zusätzlich sind die Mantellinie des Wälzylinders, der Beginn des Einzeleingriffes und der Bereich der Schabemarke eingezeichnet. In beiden Bildern ist zu sehen, dass mehrere Anrisse im Zahnfuß oberhalb der Schabemarke über der gesamten Zahnbreite verteilt auftreten. Ausgehend von diesen kleinen Anrissen ist ein großer oberflächennaher Bereich der Zahnflanke ausgebrochen, welcher sich bis zum Beginn des Einzeleingriffes erstreckt. Hier sieht die Oberfläche sehr porös und zerklüftet aus. Vom Punkt B an bis hin zum halben Weg in Richtung des Wälzkreises wächst der

Ausbruch weiter in die Tiefe und bildet ein tiefes Grübchen. Zum Wälzkreis hin ist der Riss wieder in Richtung der Oberfläche gewachsen, bevor der Werkstoff in diesem Bereich ausgebrochen ist. Im Bereich des Einzeleingriffs sind muschelartige Strukturen im tiefen Grübchenbereich zu erkennen, welche auf einen Dauerbruch hindeuten.

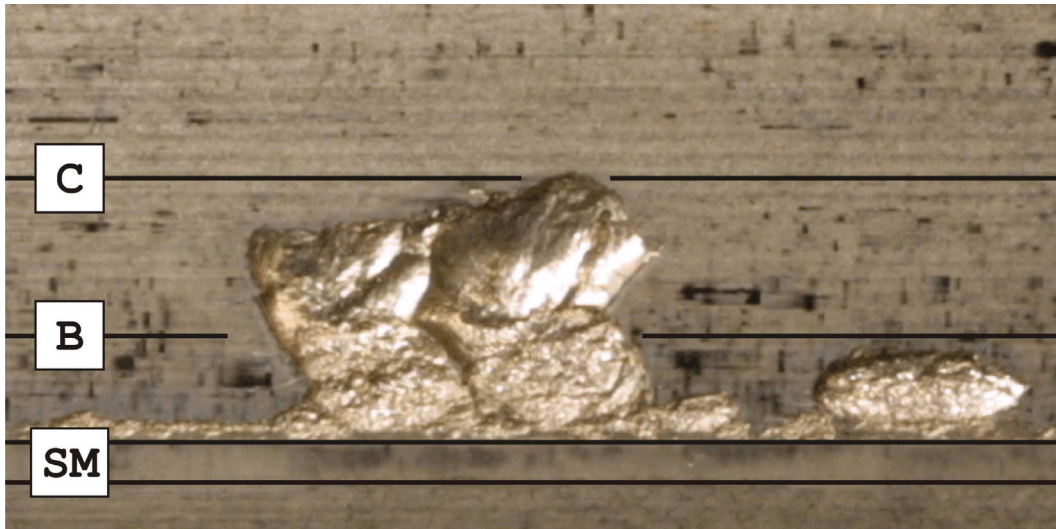


Bild 4.5: Verzahnung GG3 1211-1: Vergrößerung des Grübchenschadens, mit C = Wälzkreis, B = Einzeleingriffsbeginn und SM = Schabemarke

Die hervorragenden Eigenschaften der Oberfläche bezüglich der Graufleckenbildung lassen auf einen niedrigen Mischreibunganteil der sehr glatten Oberflächen schließen. Somit ist aufgrund des hohen hydrodynamischen Traganteiles eine geringere Reibungszahl als bei einer raueren Oberfläche zu erwarten. Diese Tatsache müsste zu geringeren Schubspannungen im Werkstoff führen und damit die Grübchentragfähigkeit erhöhen. Versuche mit höheren Rauheiten zeigten im Vorgängervorhaben im Stufentest keine Grübchenschäden.

Dieser dargestellte Grübchenschaden hat zwei sich überlagernde Ursachen. Zum einen die starke Beanspruchung der Zahnflankenoberfläche aufgrund des Schabens und der Deformation des Werkstoffes durch die Schubbewegung der Kopfkante des Rades im Fußbereich des Ritzels. Hierdurch wird die oberflächennahe Schicht stark auf Schub beansprucht und es kann zu Anrissen in dieser Schicht kommen. Zum anderen führt der scharfe Übergang der Schabemarke in die Evolvente wie [L4] zeigt, zu einem sehr kleinen Ersatzkrümmungsradius und somit zu sehr hohen örtlichen Pressungen. An der Stelle des kleinsten Ersatzkrümmungsradius sind auch die kleinen porenartigen Ausbrüche zu sehen, welche als Initialschaden für den Grübchenschaden angesehen werden.

Es ist ein Reproduktionsversuch auf der Rückflanke durchgeführt worden, um diese Theorien zu überprüfen und ausschließen zu können, dass der Grübchenschaden ein zufälliges Ereignis ist. Dieser Reproduktionsversuch ließ sich nur durchführen, da sich die Arbeitsgruppe entschlossen hat einen Versuch mit Wasser im Öl zu streichen.

In Bild 4.6 zeigt eine Ritzelflanke des Reproduktionsversuches nach dem Ende des Stufentests nach 12,6 Mio. Lastwechseln. Die Zahnflanke zeigt Riefen in Höhenrichtung, die weder im Evolventendiagramm noch bei der Messung der Flankenlinie zu erkennen sind. Die Kopfkante des Ritzels hat wie im ersten Versuch sichtbar gearbeitet und, wie im Evolventendiagramm zu erkennen ist, eine Abrundung erfahren. Im unteren Bereich der Zahnflanke ist auf der gesamten Breite eine deutliche Schabemarke zu sehen. Ferner sind am Übergang der Schabemarke ebenfalls kleinere Anrisse sichtbar. Das Schadensbild des ersten Versuches ist zum Ende des Stufentests sehr gut reproduziert worden. Am Versuchsende ist jedoch kein Grübchenschaden wie auf der Rückflanke zu erkennen und die Auskolkungstiefe im Zahnfuß des Ritzels ist geringer.

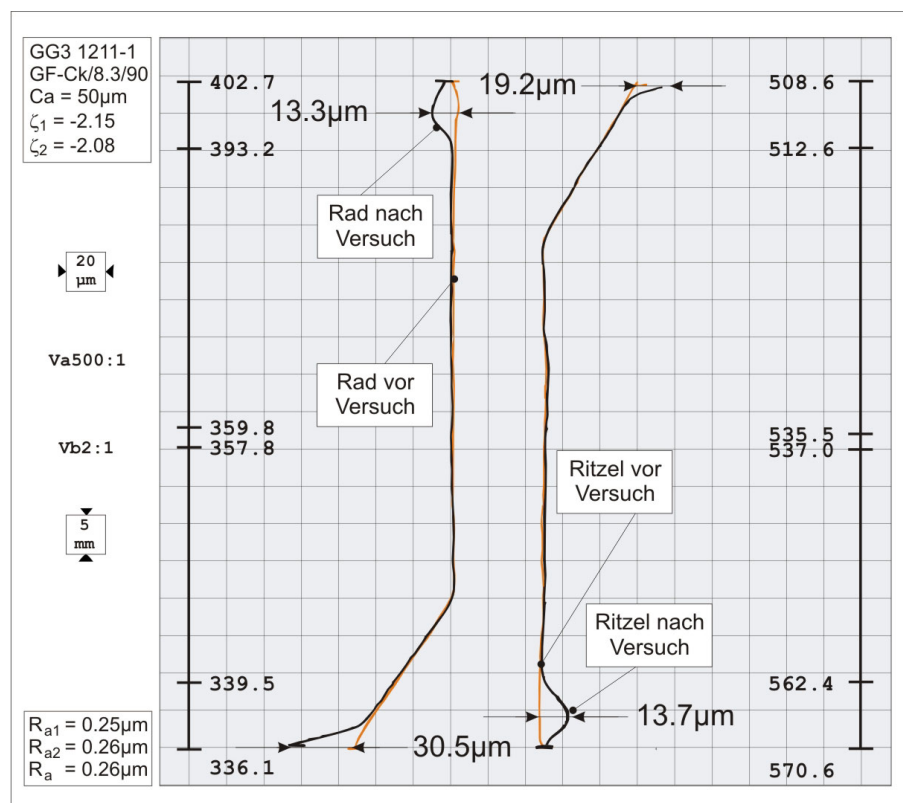
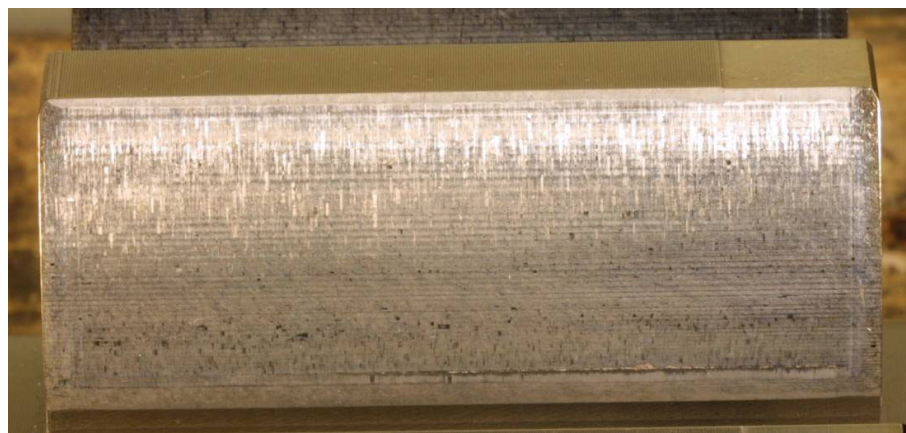


Bild 4.6: Ritzel GG3 1211-1: Seite 1 mit einer linearen Kopfrücknahme $C_a = 50 \mu\text{m}$, $m_n = 22 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Im Evolventendiagramm ist im Zahnfuß des Ritzels eine tiefe Auskolkung zu erkennen. Diese Auskolkung befindet sich auf demselben Durchmesser wie die Schabemarke und ist eindeutig dieser Marke zuzuordnen. Der Reproduktionsversuch hat den Zusammenhang zwischen der Schabemarke im Zahnfuß und der Auskolkung erneut bestätigt. Jedoch ist beim Reproduktionsversuch die Auskolkungstiefe mit $f_{fm} = 13,7 \mu\text{m}$ um etwa $10 \mu\text{m}$ geringer als beim ersten Versuch. Da sich die Oberflächenrauheiten beider Flanken auf gleichem Niveau befinden, kann der Einfluss der Rauheit auf die geringere Auskolkungstiefe ausgeschlossen werden. Die geringere Auskolkungstiefe ist, wie Messungen der Kopfkanten gezeigt haben, auf eine stärkere Abrundung der Zahnkopfkanten der Seite 1 im Vergleich zur Seite 2 zurückzuführen.

Dass im Vergleich zum ersten Versuch bei diesem Versuch kein Grübchenschaden aufgetreten ist, lässt sich auf die geringere Auskolkungstiefe zurückführen. Mit der geringeren Auskolkungstiefe ist auch die Steigung des Überganges von der ausgekolkten Zahnflanke zur unversehrten Zahnflanke niedriger. Der an der Stelle des Überganges entstehende Ersatzkrümmungsradius ist nicht so klein wie bei einer tieferen Auskolkung. Somit ist die Beanspruchung in diesem Bereich der Zahnflanke geringer als bei dem Versuch, der zu einem Grübchenschaden führte.

Auch der zweite gleitgeschliffene Radsatz GG3 1211-2 mit einer arithmetischen Rauheit von $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ zeigt keine Graufleckigkeit. In Bild 4.7 ist ein Zahn des Ritzels zu sehen. Im Fuß des Ritzels ist ebenfalls eine Schabemarke zu erkennen. Die aus der Schabemarke resultierende Auskolkung ist auch im Evolventendiagramm sichtbar und hat einen Betrag von $f_{fm} = 6,3 \mu\text{m}$. Zwar sind auch bei diesem Versuch kleine Ausbrüche im Bereich der Schabemarke erkennbar, diese Ausbrüche führen im Verlauf des Stufentests jedoch nicht zu einer Grübchenbildung.

Die sehr glatte Oberfläche des Zahnrades streut das Licht nicht so stark wie eine Standardverzahnung. Diese glatte, glänzende Oberfläche ermöglicht es, andere Schadensformen besser zu erkennen und zu differenzieren. Deutlich ist die verschlissene Zahnkopfkante des Ritzelzahnes zu sehen. Dieser Bereich schabt bei der Entlastung des Zahnes am Ende der Eingriffsstrecke am Fuß des Radzahnes. Die Auswirkungen sind sowohl im Evolventendiagramm des Ritzels als auch des Radzahnes sichtbar. Im Evolventendiagramm erscheint der Kopfbereich des Ritzels gebrochen und hat im Vergleich zu der Ausgangsflanke eine zusätzliche Kopfabrundung von $33 \mu\text{m}$ erfahren. Im Fuß des Rades ist aus dieser Belastung eine Auskolkung mit einem Betrag von $f_{fm} = 4,5 \mu\text{m}$ entstanden.

Beim Abwälzen des Ritzels über die geschädigte Position der Radflanke entstehen aufgrund der reduzierten Krümmungsradien erhöhte Hertzsche Flächenpressungen. Diese Pressungen äußern sich in einem matten Band einige Millimeter von der Zahnkopfkante entfernt. Hierbei handelt es sich nicht um einen durch Graufleckigkeit hervorgerufenen Verschleiß, denn weder ist an dieser Position im Evolventendiagramm eine Auskolkung zu erkennen, die auf einen Schaden hinweisen würde, noch erscheint die Oberfläche von Nahem betrachtet zerrüttet. Ein

ähnliches Bild ist auch in beiden Versuchen des Radsatzes GG3 1211-1 mit der leicht höheren Rauheit beobachtet worden.

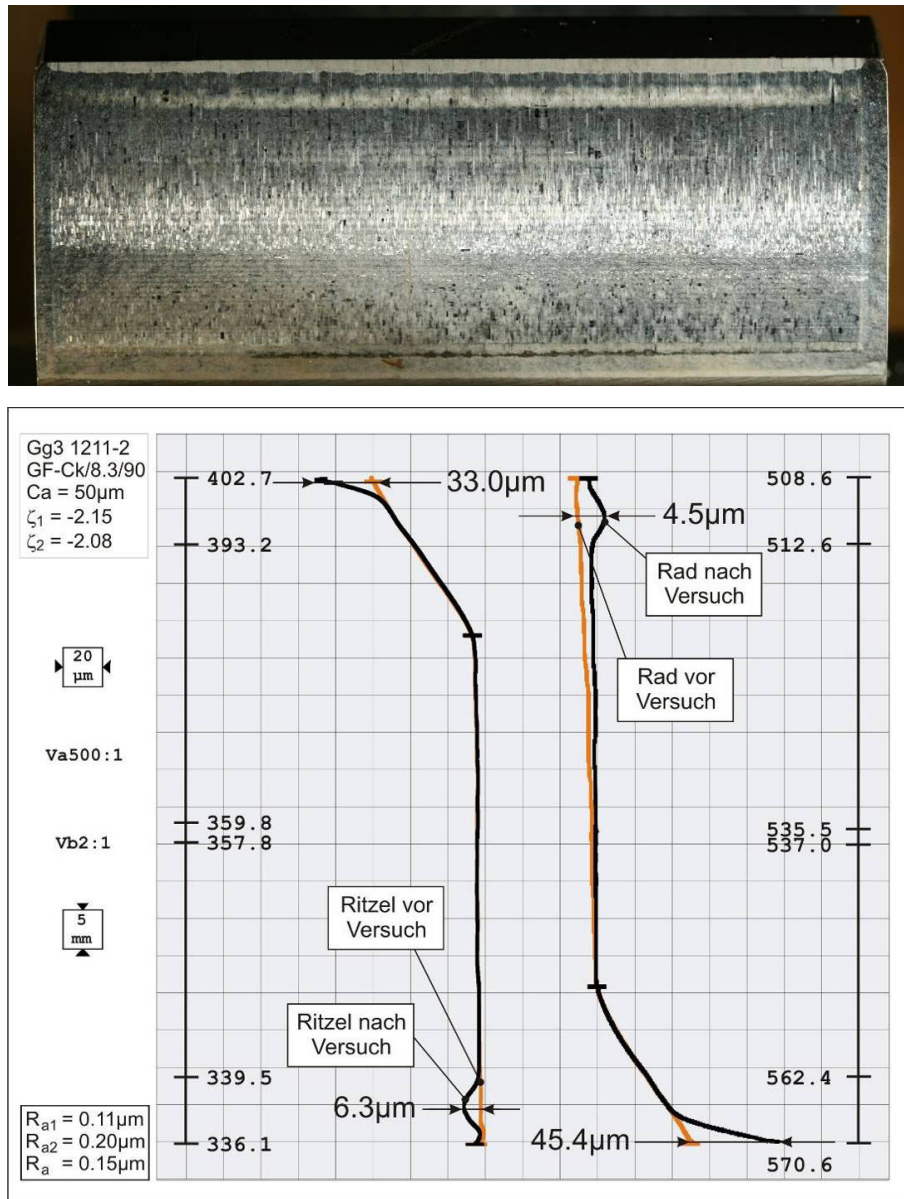


Bild 4.7: Ritzel GG3 1211-2: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 52 \mu\text{m}$, $m_n = 22 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Dass dieser Schaden bei den Versuchen mit höherer Rauheit nicht so stark oder gar nicht zu erkennen ist, hängt möglicherweise damit zusammen, dass sich die Kante des Übergangs von der Auskolkung zur Evolvente bei wachsender Graufleckenfläche immer weiter über die Ritzelflanke bewegt. Somit wirkt diese Kante immer auf Flankenlinien in unterschiedlichen Zahnhöhen des Ritzelzahnes. Somit ist die Intensität der Belastung für den Werkstoff bei der sich verschiebenden Kante wesentlich geringer als bei einer unveränderlichen Kante.

Weiterhin sind auf der gesamten Zahnflankenbreite Striche in Zahnhöhenrichtung zu erkennen. Die Striche sind unterschiedlich lang und treten ohne ein erkennbares Muster auf. Im Be-

reich des Wälzkreisdurchmessers sind diese Striche nicht mehr zu erkennen. Diese Abhängigkeit zur Eingriffsposition lässt auf einen Zusammenhang zwischen der Relativbewegung der Zahnflanken zueinander und der Entstehung der Striche schließen.

Die beschriebenen Schäden des Ritzels lassen sich auf dem Rad ebenfalls wiederfinden. Bild 4.8 zeigt eine Zahnflanke des Rades. Zwar ist hier keine deutliche Schabemarke im Zahnfuß zu sehen, aber es sind auf der gesamten Breite verteilt kleinste Ausbrüche zu erkennen.

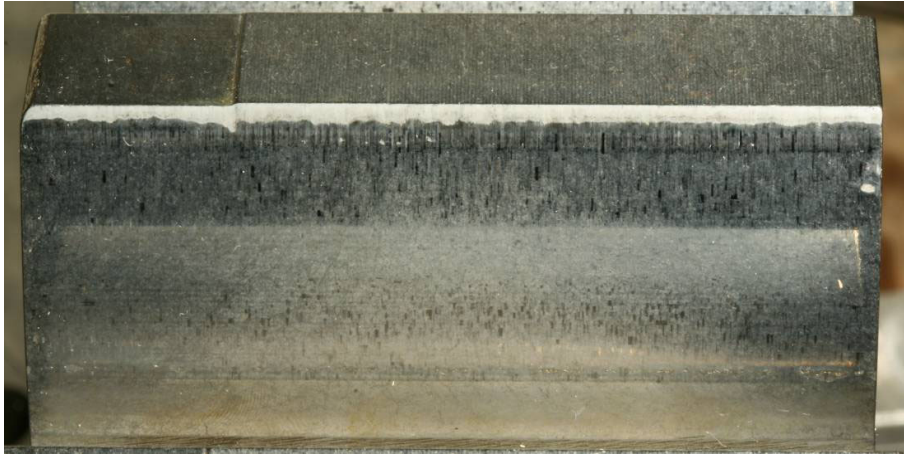


Bild 4.8: Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1211-2 mit einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,1 \mu\text{m}$, Seite 2, $m_n = 22 \text{ mm}$

Der Betrag der Auskolkung ist mit $f_{\text{fm}} = 6,3 \mu\text{m}$ sehr gering für eine Kopfrücknahme mit einem Betrag von $C_a = 52 \mu\text{m}$. In den Versuchen des Radsatzes GG3 1211-1 mit ähnlichem Kopfrücknahmebetrag und höherer arithmetischer Mittenrauheit ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Kopfrücknahmebetrag und der Auskolkungstiefe im Bereich der Schabemarke festzustellen. Dieser Zusammenhang ist bei diesem Versuch und beim Reproduktionsversuch der etwas raueren gleitgeschliffenen Verzahnung nun scheinbar nicht mehr gegeben, denn die erwartete Auskolkung von etwa $f_{\text{fm}} = 25 \mu\text{m}$ ist nicht annähernd erreicht worden.

Das erzielte Ergebnis lässt sich auf den chemisch–mechanischen Gleitschleifprozess zurückführen. Beim Gleitschleifen der Oberfläche mittels Keramikpartikeln werden nicht nur die Zahnflanken bearbeitet, sondern auch die Kanten der Zähne, da diese nicht abgedeckt werden können. Insbesondere von Interesse für Verzahnungen ist hierbei die Abrundung der Kopf-kante des Rades. Hierbei werden die Kanten der Zähne in Abhängigkeit zur Bearbeitungsdauer abgerundet. Zusätzlich besitzen die Räder der Großgetriebeverzahnung beim chemisch–mechanischem Gleitschleifen eine Drehrichtung in der Bearbeitungsmaschine. Messungen der Zahnköpfe der Zahnräder zeigen, dass sowohl die Drehrichtung der Räder als auch die Bearbeitungsdauer einen Einfluss auf die Abrundung der Zahnköpfe haben.

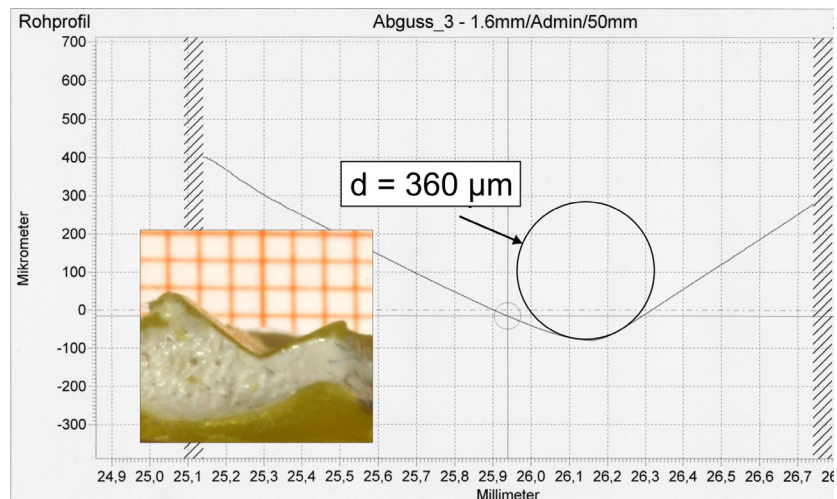


Bild 4.9: Radsatz GG3 1211-1: Abguss der Kopfkante mit Messprotokoll und Ersatzkreis zur Beschreibung der Kopfabrundung

Exemplarisch sind die Messungen der Kopfkanten der unterschiedlich lang bearbeiteten Zahnräder dargestellt. Der Radsatz GG3 1211-2 besitzt eine niedrigere arithmetische Mittenrauheit als der Radsatz GG3 1211-1, somit sind die Zahnräder länger behandelt worden und länger den Partikeln ausgesetzt gewesen.

Abgüsse der verschieden lang gleitgeschliffenen Kopfkanten der nicht gelaufenen Zahnflanke dokumentieren den Unterschied der Kantenradien. Die Radien der Abgüsse sind mit dem institutseigenen Rauheitsmessgerät der Firma Taylor Hobson vermessen worden. Die Ergebnisse der Messung für den Radsatz GG3 1211-1 sind in Bild 4.9 und für den Radsatz GG3 1211-2 in Bild 4.10 zusehen. In den Bildern ist unten links jeweils ein Foto der Abdrücke mit abgebildet.

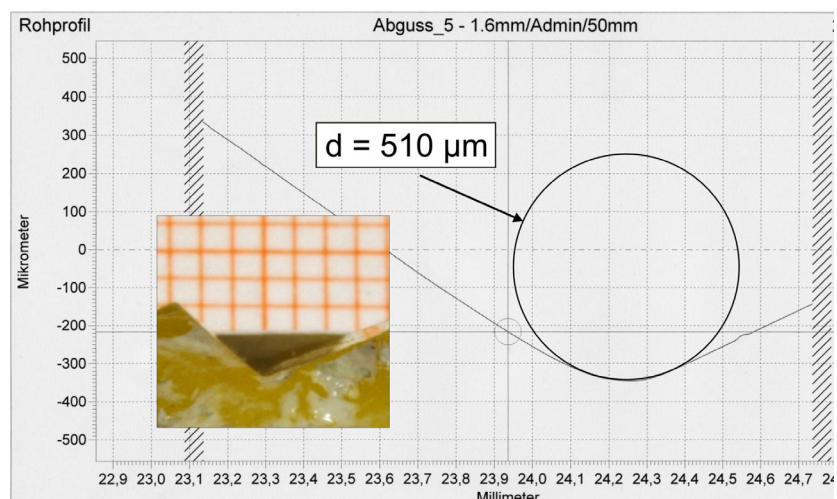


Bild 4.10: Radsatz GG3 1211-2: Abguss der Kopfkante mit Messprotokoll und Ersatzkreis zur Beschreibung der Kopfabrundung

Werden die gemessenen Profile der Kopfkanten übereinander gelegt, wird sichtbar, dass die Vergrößerung der Kopfkantenradien zusätzlich eine Vergrößerung des Kopfrücknahmebetrages zur Folge hat. Bild 4.11 zeigt, dass der Kopfrücknahmebetrag um ca. $30\ \mu\text{m}$ erhöht wird, was bedeutet, dass ein Kopfrücknahmebetrag von $C_a = 80\ \mu\text{m}$ an Stelle von $C_a = 50\ \mu\text{m}$ auf den letzten $100\ \mu\text{m}$ der Eingriffsstrecke vorliegt. Somit führt das Gleitschleifen zu einer Vergrößerung der Kopfkantenradien und auch zu niedrigeren Pressungen. Vorausgesetzt dass eine Berechnung der Pressung nach Hertz bei diesen kleinen Radien und gleichzeitigen hohen Kräften zulässig ist, führt ein Vergleich der Hertzischen Flächenpressung bei gleicher Normalkraft bei den ermittelten Radien zu einer Reduzierung der Pressung um 85 %.

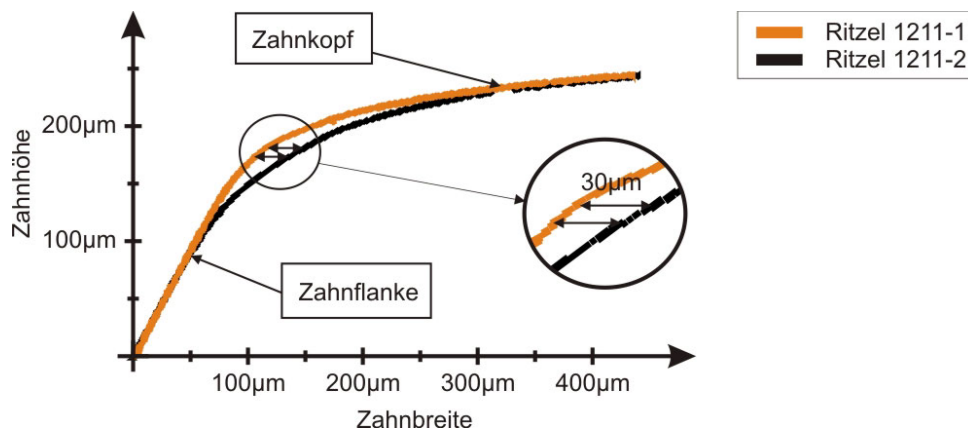


Bild 4.11: Überlagerung der gemessenen Kopfabrundungen der unterschiedlich lange gleitgeschliffenen Ritzelzahnköpfe

Bei allen Versuchen der chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Verzahnungen kann die Graufleckigkeit als unterdrückt angesehen werden, so dass bei den gegebenen Betriebsbedingungen am Großgetriebe eine arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,25\ \mu\text{m}$ als völlig ausreichend anzusehen ist, um die Graufleckigkeit zu verhindern.

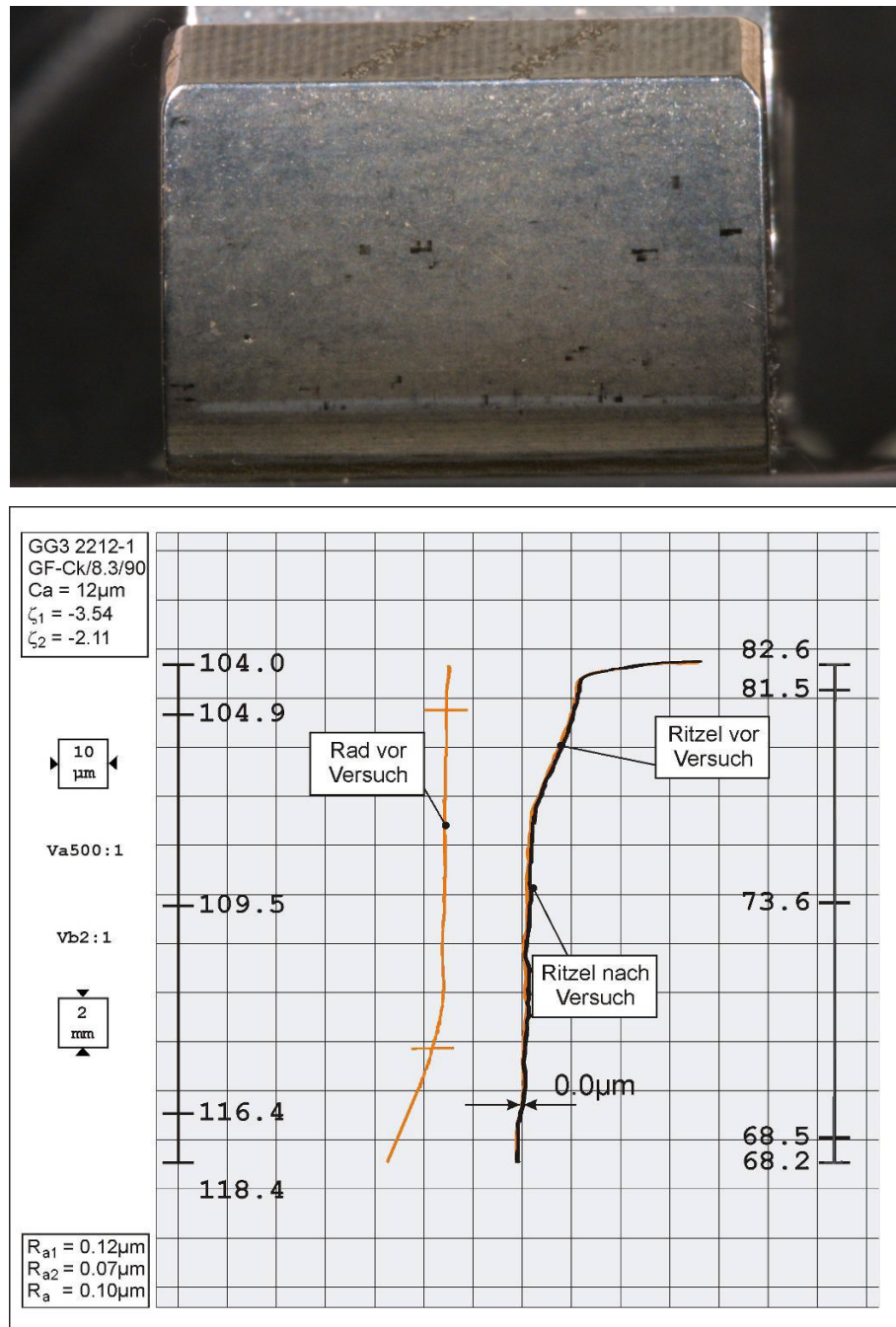


Bild 4.12: Ritzel GG3 2212-1: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 12\mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5\text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Zusätzlich zu den Versuchen am Großgetriebe sind am Standardgetriebe drei Verzahnungen mit einer chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Oberfläche untersucht worden. Ursprünglich sind zwei unterschiedliche arithmetische Mittenrauheiten zu untersuchen gewesen. Aus diesem Grund sind nach Vorschlag der bearbeitenden Firma die Verzahnung GG3 2212-1 für $t_{\text{Gleit}} = 240\text{ min}$ und die Verzahnung GG3 2212-2 für $t_{\text{Gleit}} = 60\text{ min}$ geschliffen worden.

Die Verzahnung mit $t_{\text{Gleit}} = 60\text{ min}$ erreichte unerwartet schnell eine sehr geringe arithmetische Mittenrauheit, so dass sich keine größeren Unterschiede in der arithmetischen Mittenrauheit der beiden Radsätze finden lassen und beide Radsätze Rauheiten auf demselben

Niveau aufweisen. Unterschiedlich hingegen dürfte die Abrundung der Kopfkanten sein, denn eine längere Laufzeit bedeutet, wie die Messungen der Großtriebekopfkanten gezeigt haben, auch eine größere Abrundung der Kopfkanten. Im Gegensatz zu den Großtrieberradsätzen besitzt die kleine Verzahnung beim chemisch-mechanischen Gleitschleifen keine prozessbedingte Drehrichtung, so dass kein großer Unterschied zwischen Vorder- und Rückflanke zu erwarten ist.

Bild 4.12 zeigt eine Ritzelflanke der mit $t_{\text{Gleit}} = 240$ min bearbeiteten Verzahnung. Die Zahnflanke weist keine Graufleckenfläche auf. Im Zahnfuß ist eine leichte farbliche Veränderung zu erkennen. Diese ist im Evolventendiagramm jedoch nicht festzustellen, und die Oberfläche erscheint verschleißfrei.

In Bild 4.13 links ist eine Radflanke desselben Versuches zu sehen. Auch hier ist keine Graufleckenfläche zu erkennen. Der Zahnkopf des Rades weist eine ähnliche Verfärbung auf wie der Zahnfuß des Ritzels. Diese Verfärbung ist das Resultat des vorzeitigen Eingriffes.

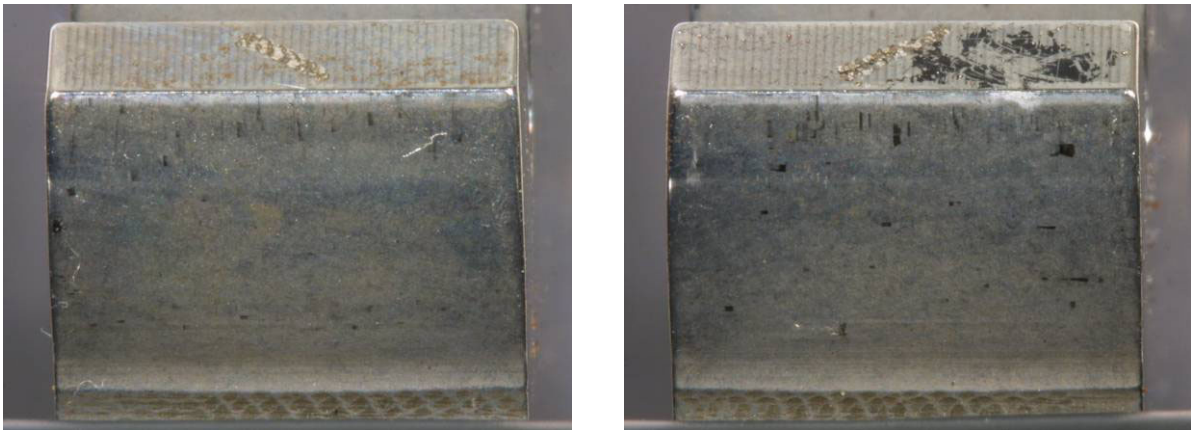


Bild 4.13: Radflanken der Verzahnung GG3 2212-1, links: Seite 1 mit $C_a = 12 \mu\text{m}$,
rechts: Seite 2 mit $C_a = 13 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Wird die in Bild 4.13 rechts dargestellte Zahnflanke betrachtet, ist eine ähnliche Verfärbung des Zahnkopfes zu sehen. Hierbei handelt es sich um die Radflanke eines Reproduktionsversuches.

Bei näherer Betrachtung der Verfärbung fällt auf, dass diese nicht bis zur Kopfkante reicht, sondern kurz vor dem Erreichen der Kante endet. An die Verfärbung schließt sich eine unveränderte Oberfläche bis zur Kopfkante an. Aufgrund der durch das Gleitschleifen aufgebraachten Kopfabrundung ist der vorzeitige Eingriff ein wenig von der Kopfkante entfernt worden und findet auf einem niedrigeren Durchmesser des Rades statt.

Das Ritzel des Reproduktionsversuches zeigt ebenfalls gleiches Verschleißverhalten. Wie in Bild 4.14 zu erkennen ist, hat sich die Oberfläche dieser Verzahnung auch kaum verändert, und im Evolventendiagramm, in Bild 4.14 unten, ist erneut kein Verschleiß auf der Zahnflanke messbar. Nur im Bereich des Zahnfußes ist wiederum eine farbliche Veränderung aufgetreten. Es ist der Bereich, in dem ein Schaben auftritt.

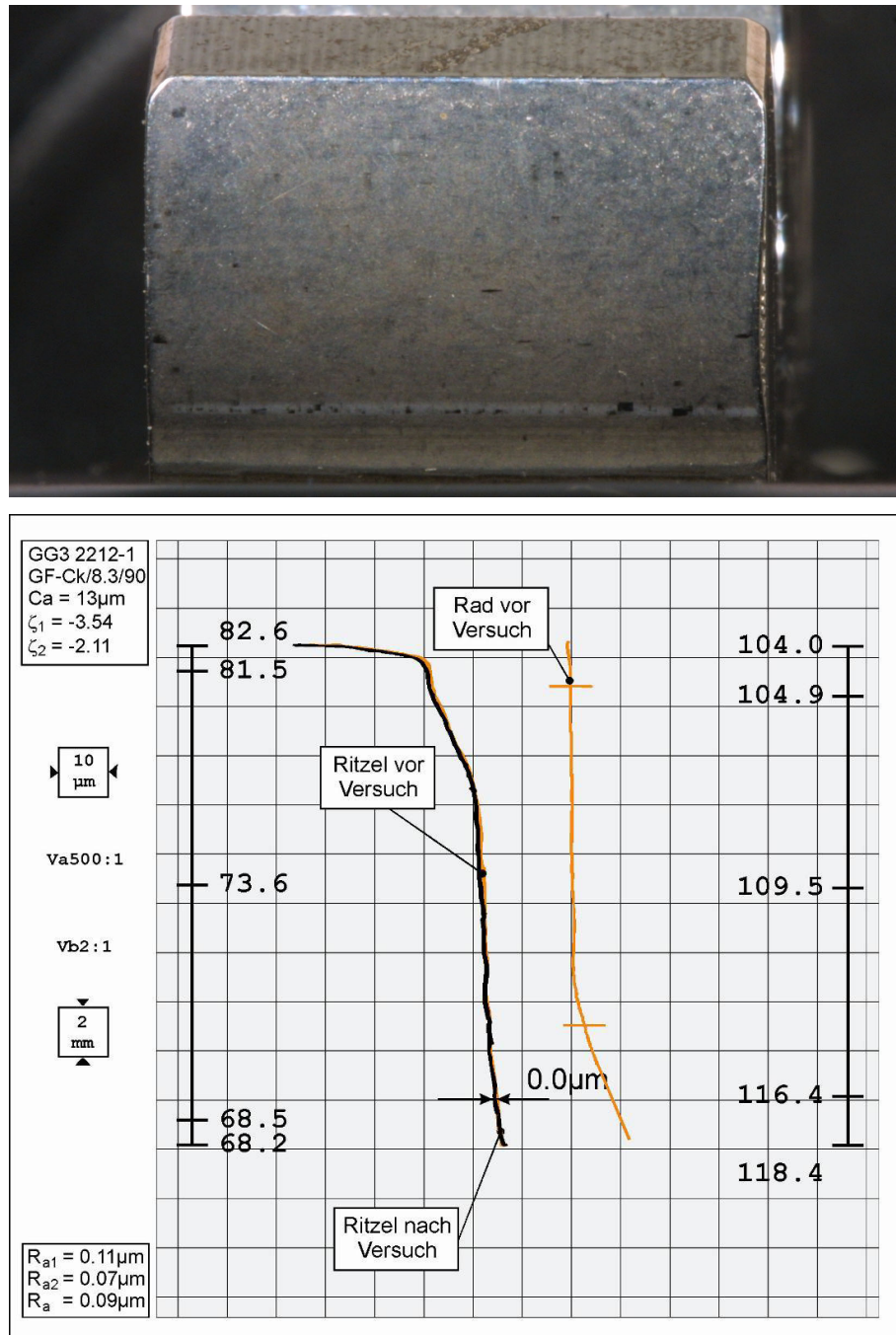


Bild 4.14: Ritzel GG3 2212-1: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 13 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Das Evolventendiagramm zeigt ebenfalls einen sehr leichten Verschleiß. Auf allen vermessenen Zahnflanken ist ein leichter Abtrag zu erkennen. Auch die Reproduktion des Versuches zeigt Verschleiß auf der Zahnflanke und eine Schabemarke im Zahnfuß des Ritzels, siehe Bild 4.16.

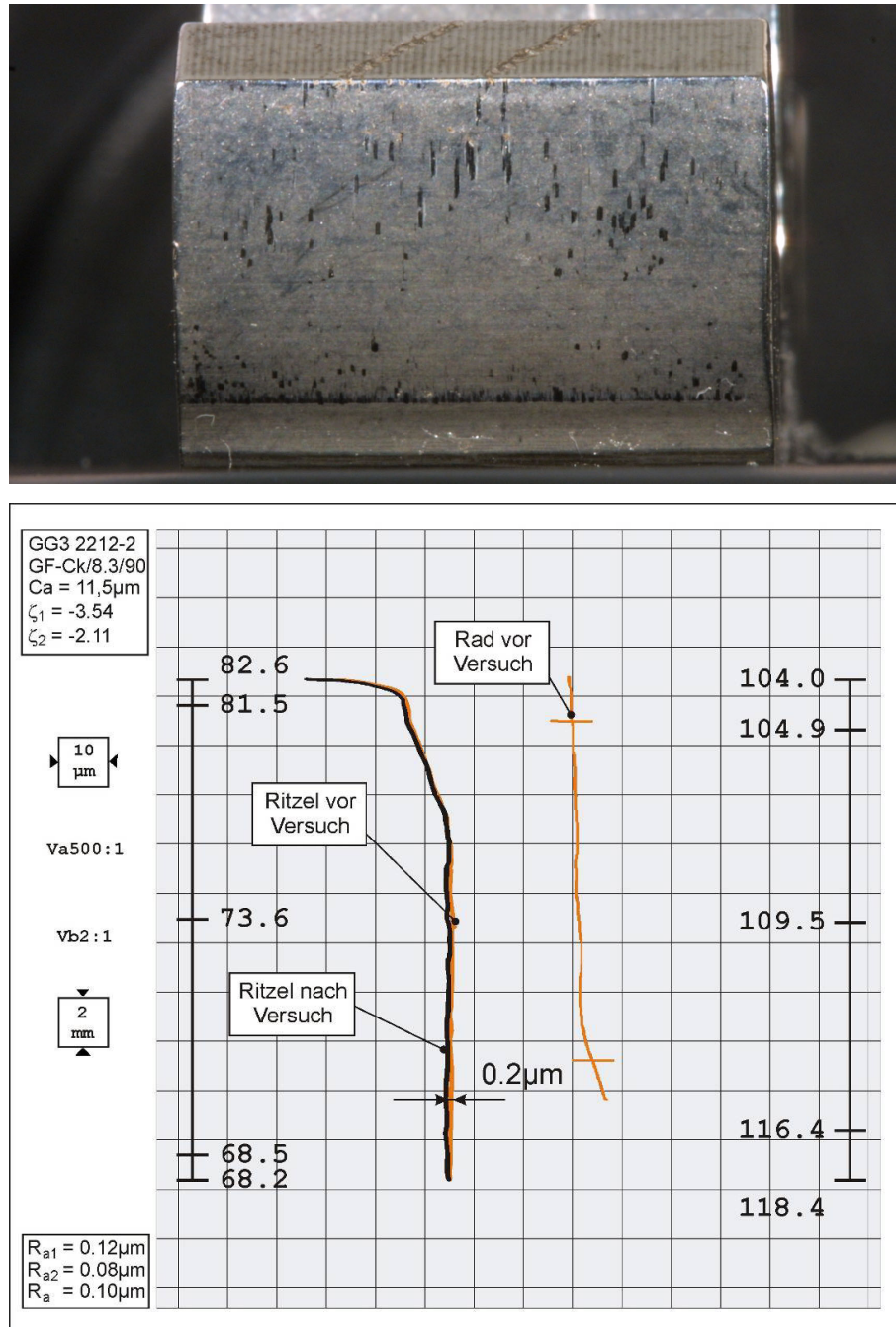


Bild 4.16: Ritzel GG3 2212-2: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 12 \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Bei der Verzahnung GG3 2212-1 mit der hohen Behandlungsdauer ist insgesamt kein Verschleiß zu erkennen. Die Grauflecken treten auch bei einer geringeren Behandlungsdauer von $t_{\text{Gleit}} = 60 \text{ min}$ im Vergleich zu $t_{\text{Gleit}} = 240 \text{ min}$ nicht mehr auf.

Die Wiederholungsversuche der Stufentests der chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Radsätze liefern erneut ein sehr gutes Ergebnis. Die Zahnflanken sehen am Ende des Stufentests kaum verändert aus.

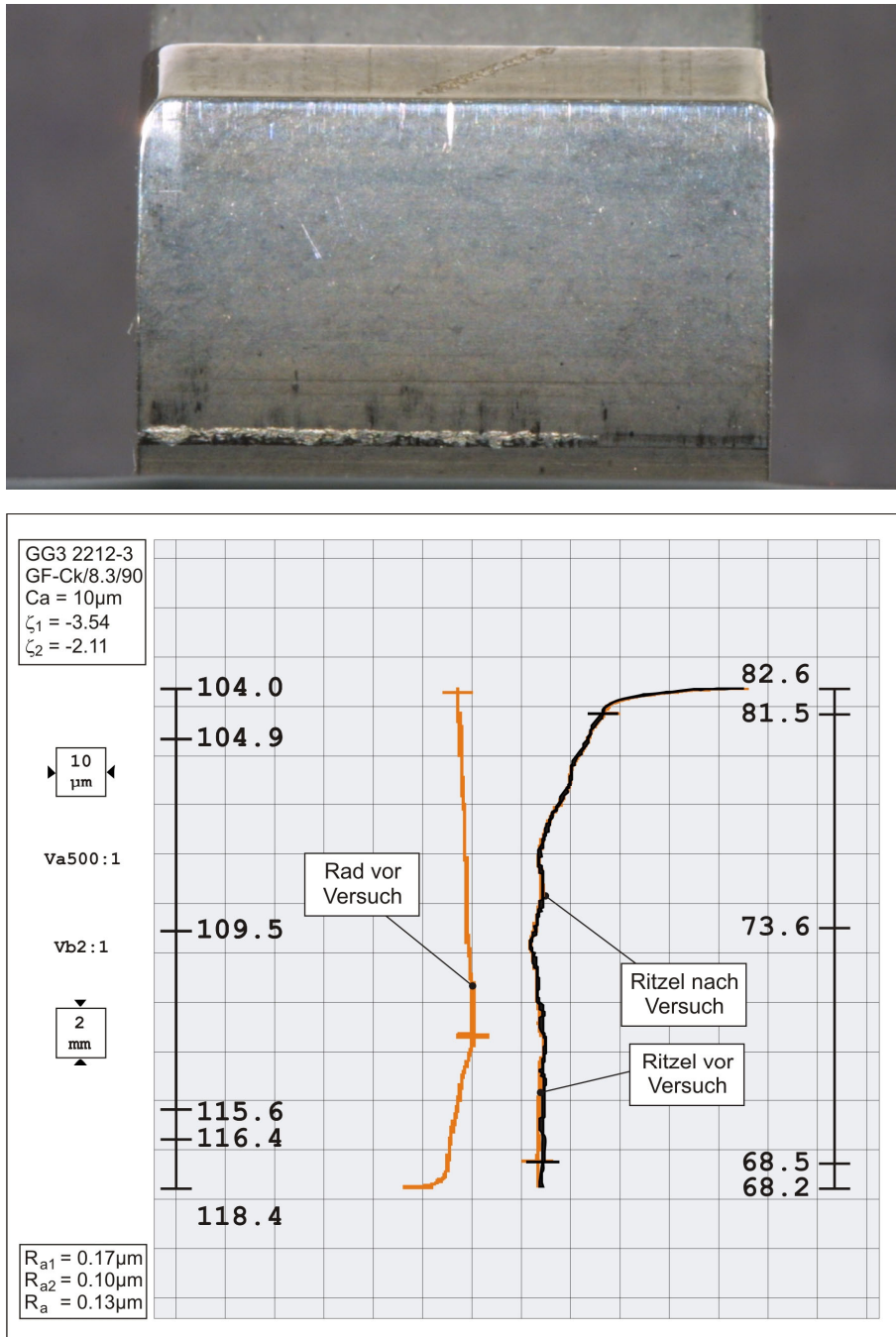


Bild 4.17: Verzahnung GG3 2212-3: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $Ca = 10\ \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5\ \text{mm}$, Profilverschiebung von $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

In Bild 4.17 wird das Foto einer Zahnflanke nach dem Versuch gezeigt. Im Zahnfuß ist eine kleine Schabemarke zu erkennen. Insgesamt sieht die Flanke im Vergleich zum Neuzustand farblich leicht verändert aus. Diese Verfärbungen zeigen sich jedoch auch auf allen Bereichen

des Zahnrades und nicht nur im Zahnkontakt. Das Evolventendiagramm zeigt eine sehr geringe Formabweichung an.

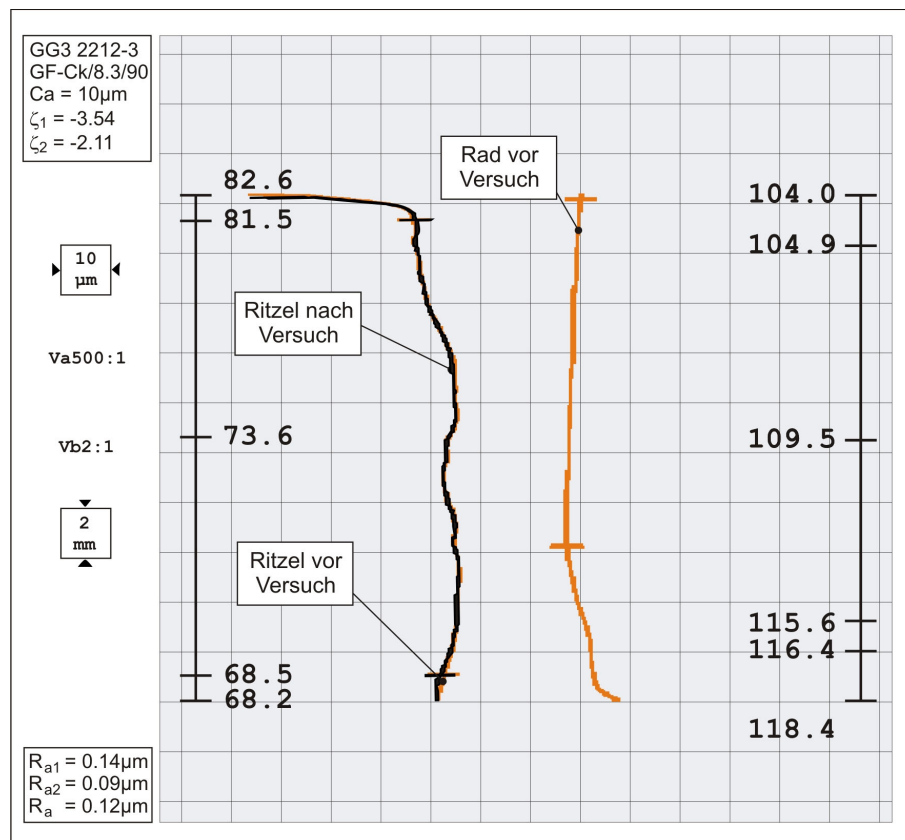
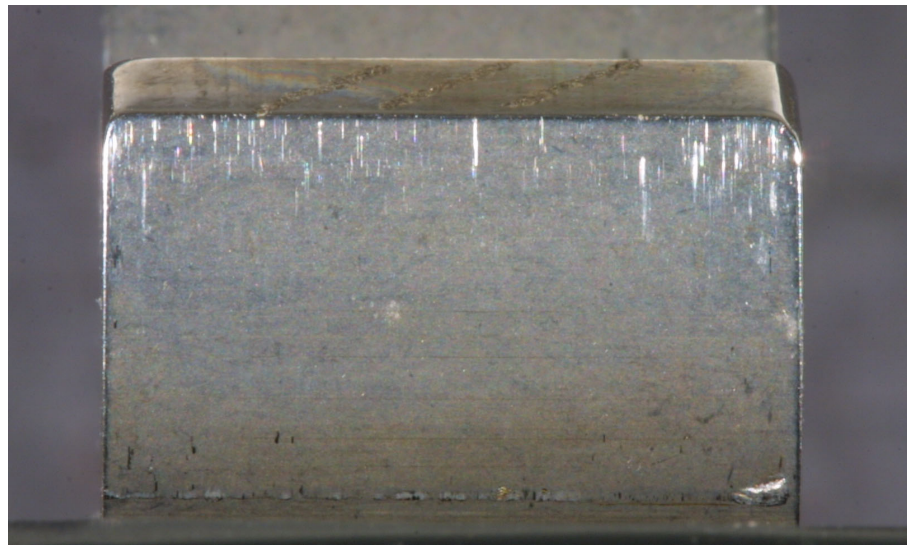


Bild 4.18: Verzahnung GG3 2212-3: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme Ca = 10 μm, m_n = 4,5 mm, Profilverschiebung von x₁ = 0,1817 und x₂ = 0,1715

Bild 4.18 zeigt die Rückflanke des chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Radsatzes. Auch hier ist die Schadensentwicklung sehr ähnlich. Es ist kaum Verschleiß auf der Zahnflanke zu erkennen, und die Formabweichung ist abermals sehr gering.

Zusammenfassung: Chemisch–mechanischer Gleitschliff

Der chemisch–mechanische Gleitschliff der Zahnflanken hat zu einem geringeren Verschleiß und einer geringeren Formabweichung geführt. Der zusätzliche Effekt der Verrundung der Zahnkopfkanten wirkt sich weiterhin positiv auf den Verschleiß aus und mildert den Einfluss des vorzeitigen Eingriffes. Es kann festgestellt werden, dass die Graufleckigkeit durch die Reduzierung der arithmetischen Mittenrauheit komplett unterdrückt werden kann.

4.2.3. Dauerversuche mit chemisch–mechanisch gleitgeschliffenen Radsätzen

Anschließend an den Stufentest ist auf der Seite 2 der Verzahnung GG3 1211-1, mit einem Kopfrücknahmebetrag von $C_a = 50 \mu\text{m}$ und einer gemittelten arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,25 \mu\text{m}$, ein Dauertest durchgeführt worden. Eine Stufe des Dauertests entspricht 10,35 Mio. Lastwechsel am Ritzel. Somit beträgt die Laufzeit einer Stufe des Dauertests 16 Tage.

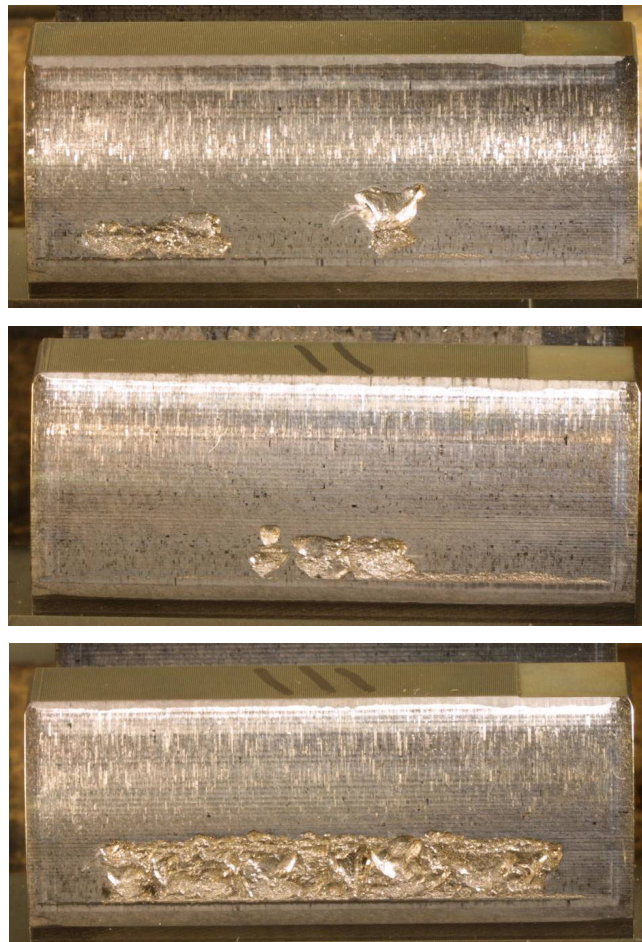


Bild 4.19: Grübenschäden der Verzahnung GG3 1211-1 Seite 2 im ersten Lauf des Dauertests, nach 20,4 Mio. Lastwechsel am Ritzel, $m_n = 22 \text{ mm}$

Nach zwölf Tagen stellte sich ein erhöhtes Geräuschverhalten am Großgetriebe ein, und die Schwingungsmessensoren nahmen ein erhöhtes Schwingensignal auf. Eine Sichtkontrolle der Verzahnung zeigte sehr starke Grübchenbildung auf den Zahnflanken. In Bild 4.19 sind drei grübchengeschädigte Zahnflanken des Ritzels dargestellt. Die Grübchen sind auf unterschiedlichen Breiten der Zahnflanke angeordnet, aber allen dreien ist gemein, dass der Schadensursprung eindeutig die Schabemarke im Zahnfuß des Ritzels ist und somit genau der Übergang von der Auskolkung zum verschleißarmen Bereich der Zahnflanke.

Wie in Bild 4.19 zu erkennen ist, ist der Schaden auf den Zahnflanken relativ weit fortgeschritten, da sich ein Grübchenschaden erst mit einer gewissen Breite bemerkbar macht und somit das korrekte Abwälzen der Zahnflanken nicht mehr gewährleistet wird.

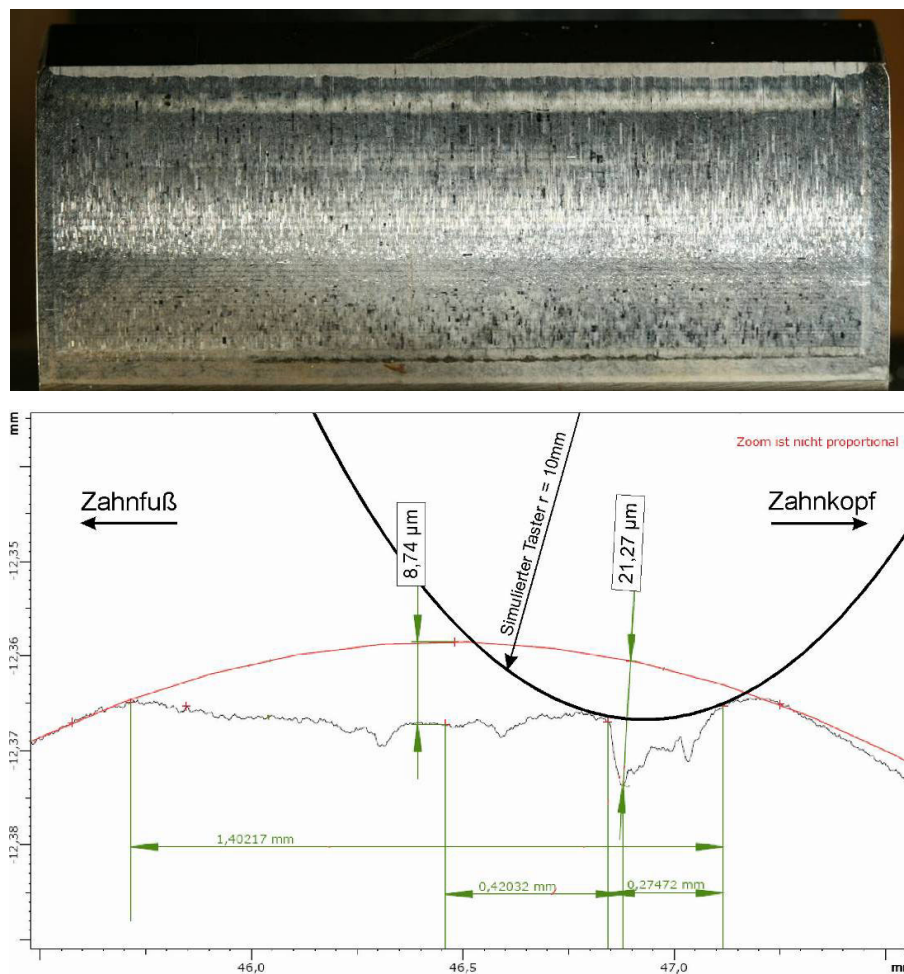


Bild 4.20: Oben: Ritzel der Verzahnung GG3 1211-2 Seite 1 nach dem Stufentest, unten: Konturmessung im Bereich der Schabemarke, $m_n = 22$ mm

Anschließend an diesen Versuch ist die Verzahnung GG3 1211-2 mit der kleineren arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,15$ µm im Dauerlauf untersucht worden. Diese Verzahnung zeigte ebenfalls am Ende der Stufentests eine ausgeprägte Schabemarke im Zahnfuß, siehe Bild 4.20 oben. In Bild 4.20 unten ist das Ergebnis einer Konturmessung an der Modul 22 mm Verzahnung mit einem Konturmessgerät zu erkennen. In das Messdiagramm ist ein

Taster eines Verzahnungsmesszentrums mit einem Tasterradius von $r = 10$ mm eingezeichnet. Der Tasterradius ist für die Modul 22 mm Verzahnung auf $r = 10$ mm gesetzt worden, um eine Schaft–Antastung des Tasters zu vermeiden. Hier wird der Nachteil eines Kugeltasters direkt sichtbar. Die Auskolkungstiefe von $21 \mu\text{m}$ wird vom Kugeltaster herausgefiltert, so dass nur die geringere Auskolkungstiefe von $9 \mu\text{m}$ gemessen wird. Anzumerken ist, dass die Auskolkungstiefe in diesem Fall gegen einen angenäherten Kreis gemessen wurde. Im Vergleich zur Konturmessung ist auf dem Verzahnungsmesszentrum eine durchschnittliche Auskolkungstiefe von $f_{\text{fm}} = 7 \mu\text{m}$ gemessen worden. Der Konturmessung ist zu entnehmen, dass die Steigung des Überganges von der ausgekolkten Zahnflanke zur unversehrten Zahnflanke ebenfalls in diesem Fall sehr groß ist. Der Ersatzkrümmungsradius ist an dieser Stelle relativ klein, somit ist die Pressung an dieser Stelle verhältnismäßig hoch.



Bild 4.21: Grübchenschäden der Verzahnung GG3 1211-2 Seite 1 im ersten Lauf des Dauertests nach 15,8 Mio. Lastwechsel am Ritzel, $m_n = 22$ mm

Nach fünf Tagen im Dauertest konnten bei diesem Versuch ebenfalls erhöhte Schwingungen festgestellt werden. Gewarnt durch den ersten Dauerversuch, wurde der Prüfstand umgehend angehalten und ebenfalls einer Sichtkontrolle unterzogen. Auch hier ist ein Grübchenschaden relativ früh in den Dauerversuchen aufgetreten.

In Bild 4.21 sind die geschädigten Zahnflanken zu erkennen. Auch hier ist sichtbar, dass die Grübchen an der Schabemarke beginnen.

Bei allen chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Radsätzen kam es im Laufe der Untersuchungen zu einem Grübchenschaden aus der Schabemarke. Demgegenüber hat eine Verzahnungen mit gleicher Geometrie, aber größerer Oberfläche im Vorgängervorhaben [L5] den Dauertest, bestehend aus sechs Versuchen mit einer Gesamtlaufzeit von 96 Tagen und 74,7 Mio Lastwechsel am Ritzel, erfolgreich absolviert. Diese Verzahnung wies jedoch eine große Graufleckenfläche und eine weite Auskolkung über der Eingriffsstrecke auf.

Analog zu den Großgetriebeversuchen werden die Verzahnungen mit demselben Untersuchungsmerkmal am Standardprüfstand im Dauertest untersucht. Zu Beginn des Dauertests haben auch diese Verzahnungen eine Lastwechselzahl von 12,6 Mio. erfahren.

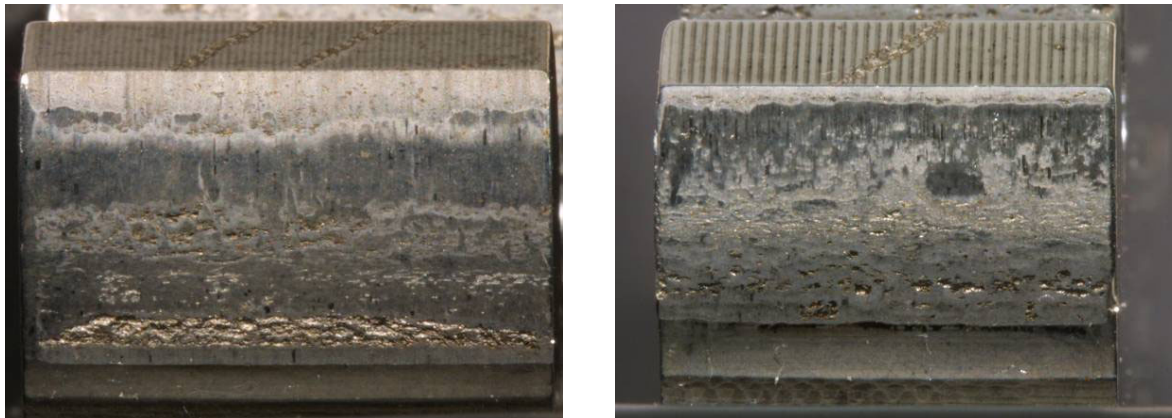


Bild 4.22: Verzahnung GG3 2212-2: Seite 2 mit $Ca = 12 \mu\text{m}$ nach 33,3 Mio. Lastwechsel am Ritzel, links: Zahn des Ritzel, rechts Zahn des Rades, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Nach dem 2. Lauf des Dauertests musste der Versuch aufgrund eines Grübchenschadens abgebrochen werden. Wie in Bild 4.22 zu erkennen ist, sind die Ergebnisse des Großgetriebes gut reproduziert worden. Auch bei diesem Dauerversuch ist ein deutlicher Grübchenschaden, der im Zahnfuß im Bereich der Schabemarke beginnt, entstanden.

Dieser Dauertest ist mit zwei weiteren Flanken mit ähnlicher Oberflächenbeschaffenheit erneut durchgeführt worden. In den Dauertests wiederholten sich die Grübchenschäden, die sowohl am Standardgetriebe als auch am Großgetriebe aufgetreten sind. Bild 4.23 zeigt die massiven Schäden auf den Zahnflanken der Ritzel und die entstandene Oberflächenzerrüttung. Das Besondere an diesen Schäden ist, dass bis zu Ihrem Auftreten kein Anzeichen eines Schadens auf der Zahnflanke zu erkennen war. Die Zahnflanke sah bis zu diesem Zeitpunkt völlig unversehrt aus. Bild 4.24 zeigt den grübchengeschädigten Zahn aus Bild 4.23 rechts vor dem dritten Lauf des Dauertests, der auch zum Schaden führte, bei 33,3 Mio. Lastwechselzahl am Ritzel. Auch nach dem Auftreten von erheblichen Grübchen auf fast dem gesamten Umfang sind immer noch scheinbar unversehrte Zähne zu erkennen.

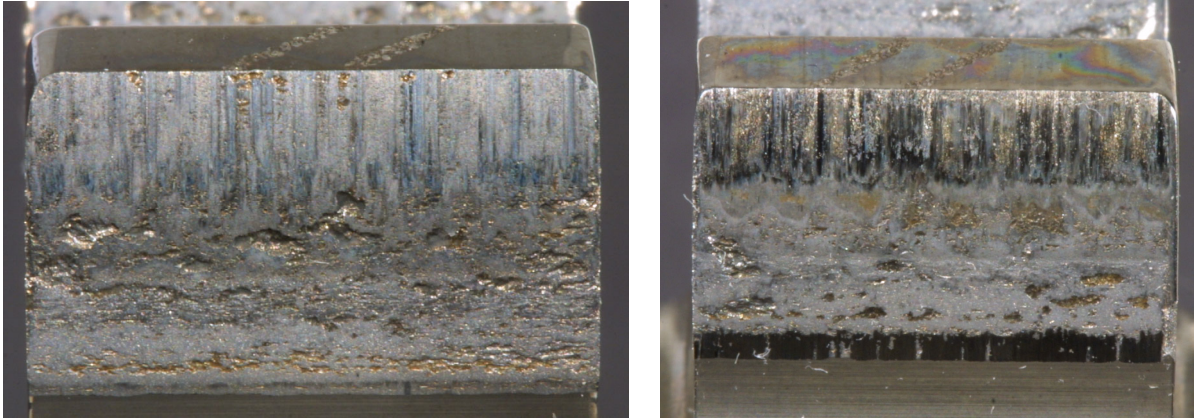


Bild 4.23: Verzahnung GG3 2212-3: mit linearer Kopfrücknahme von $10\ \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5\ \text{mm}$, Profilverschiebung von $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$
 links: Seite 1, Laufzeit $t_{\text{Dauer}} = 4 \times 80\ \text{h}$, 54 Mio. Lastwechsel am Ritzel
 rechts: Seite 2, Laufzeit $t_{\text{Dauer}} = 3 \times 80\ \text{h}$, 43,7 Mio. Lastwechsel am Ritzel

Das Maximum der Vergleichsspannung liegt bei der Hertzschen Flächenpressung unterhalb der Oberfläche, so dass Anrisse an diesen Stellen entstehen. Mit dem weiteren Verlauf des Versuches wächst dieser Anriss in Richtung der Oberfläche an. Sind mehrere Anrisse vorhanden, so kann die Zahnflanke auf der Breite in einem großen Bereich geschwächt werden. Das geschieht solange, bis ein sehr großer Bereich der Zahnflanke ermüdet ist und ausbricht. Das Risswachstum kann demnach nicht optisch erkannt werden. Im Vergleich hierzu befindet sich bei hohen Rauheiten das Maximum der Vergleichsspannung näher an der Oberfläche, so dass entstandene Risse sich früher begegnen, ausbrechen und nicht mehr in die Tiefe wachsen.

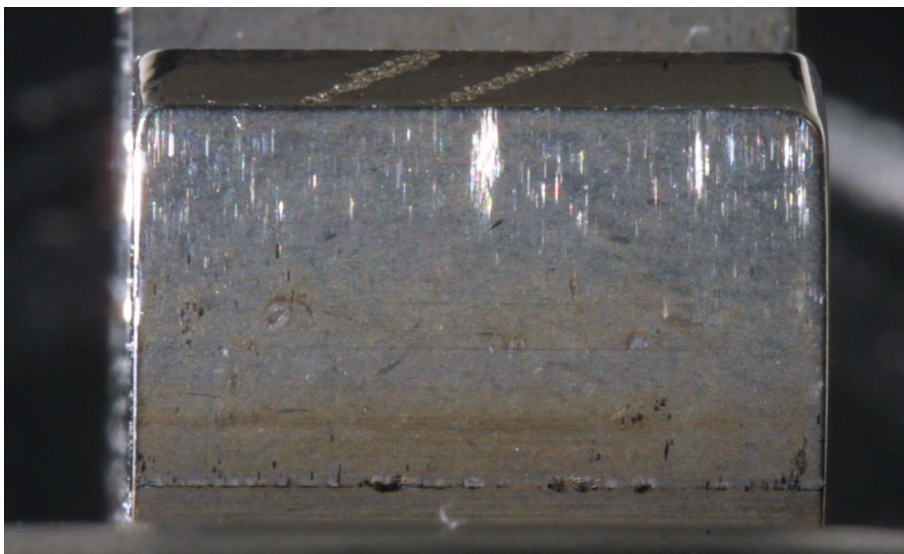


Bild 4.24: Verzahnung GG3 2212-3: Seite 2 mit linearen Kopfrücknahme von $10\ \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5\ \text{mm}$, einer Profilverschiebung von $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$,
 Laufzeit $t = 2 \times 80\ \text{h}$, 33,3 Mio. Lastwechsel am Ritzel

Das Schadensbild weist darauf hin, dass die gesamte Breite relativ zeitgleich ausgebrochen ist. Werden die Grübchenschäden mit Schäden aus der Literatur und anderen Versuchsergebnissen aus verschiedenen Projekten verglichen, ist festzustellen, dass bei einsatzgehärteten Rädern üblicherweise ein auf den Flanken entstandener Anriss im Laufe der Zeit langsam in die Tiefe wächst und es dann zum Ausbruch kommt. Das plötzliche Auftreten von vielen auf dem Umfang verteilten massiven Grübchen spricht für ein gleichmäßig auf dem Umfang verteiltes Wachsen von Rissen unterhalb der Oberfläche.

4.2.4. Einfluss der Kopfabrundung

Die Zahnköpfe aller bisherigen Versuchszahnräder weisen am Ende der Versuche eine deutliche Kopfabrundung auf und zwar sowohl am Ritzel als auch am Rad. Diese Abrundungen sind auf Eingriffsstörungen, bedingt durch die Verformung der im Eingriff befindlichen Verzahnung, zurückzuführen. Durch eine gezielte zusätzliche Kopfabrundung innerhalb der letzten 5 % der Eingriffsstrecke soll die sich durch Verschleiß einstellende Flankenform künstlich vor Beginn der Versuche erzeugt werden. Somit soll die Eingriffsstörung und das daraus resultierende Schaben der Kopfkante des getriebenen Rades auf der Flanke des treibenden Rades, welches zur Abrundung der Zahnköpfe führt, verringert werden.

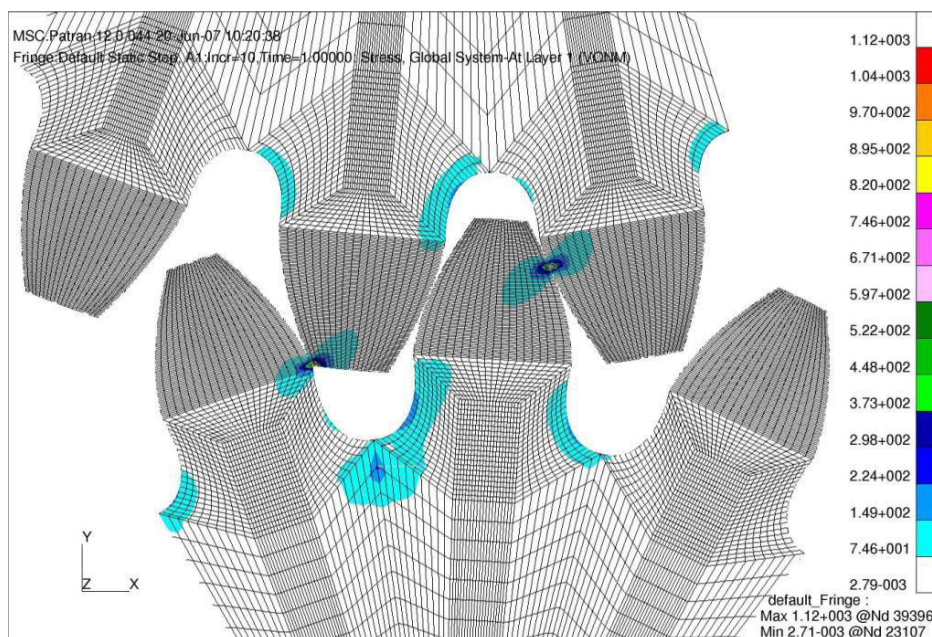


Bild 4.25: Eingriffsbeginn eines Großtrieberradsatzes ohne Korrektur

Die Abrundung der Kopfkante erfolgte durch das Übertragen der gewünschten Geometrie auf das Profil der Schleifscheibe. Somit ist die Abrundung gezielt während des Profilschleifprozesses auf die Zahnflanke aufgebracht worden. Diese zusätzlich aufgebrachte Kopfabrundung weist am Großgetriebe einen Radius von $r = 250 \mu\text{m}$ und an den Standardgetriebeverzahnungen Radien von $r = 50 \mu\text{m}$ und $60 \mu\text{m}$ auf.

Eine nähere Untersuchung des Schabens der Kopfkante des Rades während des vorzeitigen Eingriffes und des daraus resultierenden Eintrittsstoßes ist mittels Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente durchgeführt worden. Das FE-Modell in Bild 4.25 wird zur Veranschaulichung der Auswirkungen der unterschiedlichen Kopfrücknahmebeträge auf das Schaben verwendet. Zur Reduzierung der Berechnungszeit ist das Modell auf drei Zähne pro Zahnrad reduziert worden. Um die gewünschten Kopfrücknahmebeträge darstellen zu können, ist die Vernetzung der Zahnköpfe in Höhenrichtung sehr fein durchgeführt worden. Die Drehmomenteinleitung auf das Ritzel erfolgt über biegesteife Elemente zwischen dem Bohrungsmittelpunkt und der Bohrung des Ritzels. Die Drehmomentabstützung des Rades erfolgt über die Festsetzung der Schnittflächen des Radkörpers. Eine Deformation des Rad- und des Ritzelkörpers ist damit möglich.

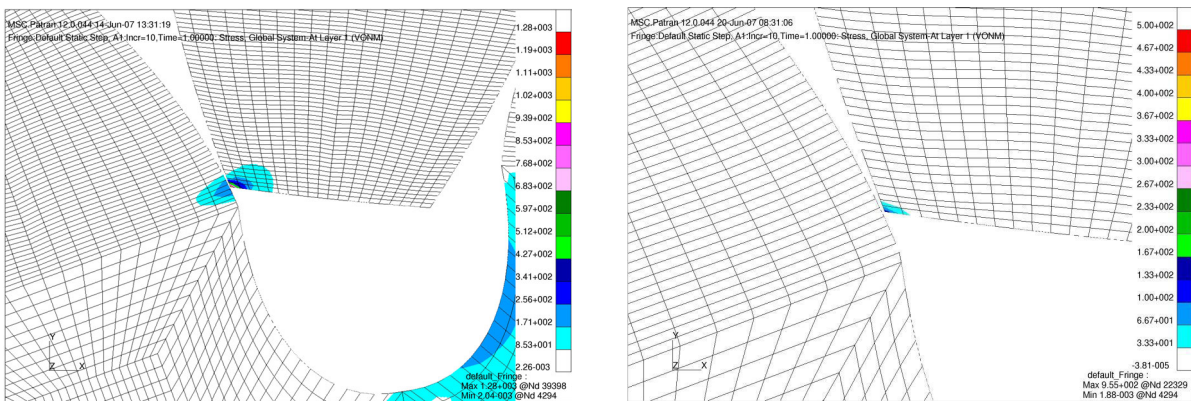


Bild 4.26: Kontakt $1,2^\circ$ außerhalb der Eingriffsstrecke in der Schadenskraftstufe 10,
links: ohne Korrektur, rechts: lineare Kopfrücknahme mit $C_a = 50 \mu\text{m}$

Um den Einfluss der Kopfrücknahme besser zu verdeutlichen, sind drei verschiedene Kopfgeometrien berechnet worden. Die erste Berechnung erfolgte mit einer Geometrie ohne Profilmodifikation, die zweite besitzt eine lineare Kopfrücknahme mit einem Betrag von $C_a = 50 \mu\text{m}$ und die dritte weist eine lineare Kopfrücknahme von $C_a = 50 \mu\text{m}$ mit einer zusätzlich überlagerten Kopfabrundung von $r = 250 \mu\text{m}$ beginnend auf den letzten 2 % der Eingriffsstrecke auf.

Um einen Zahn des Ritzels über die gesamte Eingriffsstrecke zu bewegen, wird eine Drehung des Zahnrades von $24,6^\circ$ benötigt. Bild 4.25 zeigt die Eingriffssituation der Verzahnung zu Eingriffsbeginn. Wie den resultierenden Pressungen auf den Zahnflanken zu entnehmen ist, treibt das Ritzel im Uhrzeigersinn an. Im Folgenden wird die Verzahnung des Ritzels um $1,2^\circ$ gegen den Uhrzeigersinn gedreht, so dass theoretisch kein Eingriff am linken Zahnpaar stattfindet.

Unter Last verformt sich allerdings das rechte Zahnpaar, und das linke Zahnpaar kommt bereits vorzeitig in den Eingriff. Die Eingriffssituation am linken Zahnpaar zeigt nun Bild 4.26. Hier kommt es zu einer Berührung der Kopfkante des Rades mit der Evolventenflanke

des Ritzels bereits vor dem theoretischen Eingriffsbeginn. Dieser Kontakt findet nun nicht mehr zwischen zwei Evolventen statt, sondern zwischen der Kopfkante des Rades und der Evolvente des Ritzels. Die scharfe Kopfkante des Rades schabt somit entlang der Zahnflanke des Ritzels.

In Bild 4.26 ist links eine Verzahnung mit einem Modul von $m_n = 22$ mm dargestellt. Das Ritzel wird mit dem Drehmoment der Schadenskraftstufe 10 belastet. In diesem Fall beträgt das Drehmoment des Ritzels $T_1 = 45,2$ kNm. Obwohl sich die Verzahnung $1,2^\circ$ vor dem Beginn der Eingriffsstrecke befindet, ist ein deutlicher Kontakt zu erkennen. Die rechte Abbildung in Bild 4.26 zeigt eine Verzahnung mit der gleichen Belastung, in der gleichen Eingriffsposition und mit gleicher Makrogeometrie. Aufgrund einer linearen Kopfrücknahme von $C_a = 50$ μm ist im Vergleich zur unkorrigierten Variante nur ein leichter Kontakt sichtbar.

Die Kinematik der Verzahnung zu Eingriffsbeginn wird in Bild 4.27 links gezeigt. Hier bewegt sich die Zahnkopfkante des Rades beim Weiterdrehen der Verzahnung in Richtung des Zahnfußes des Ritzels. Dabei kommt es also zum besagten Schaben der Zahnkopfkante am Zahnfuß der Ritzelflanke. Wie der Vergleich der FE-Berechnungen in Bild 4.26 verdeutlicht, beginnt der vorzeitige Eingriff bei einer mit Kopfrücknahme versehenen Verzahnung später und somit auch auf einem kleineren Durchmesser des Ritzels. Bedingt durch das spätere Auftreffen auf die Ritzelflanke schabt die Zahnkopfkante des Rades nicht mehr über einen so großen Bereich der Ritzelverzahnung. Es findet jedoch auch hier eindeutig ein Schaben mit einer scharfen Kante statt.

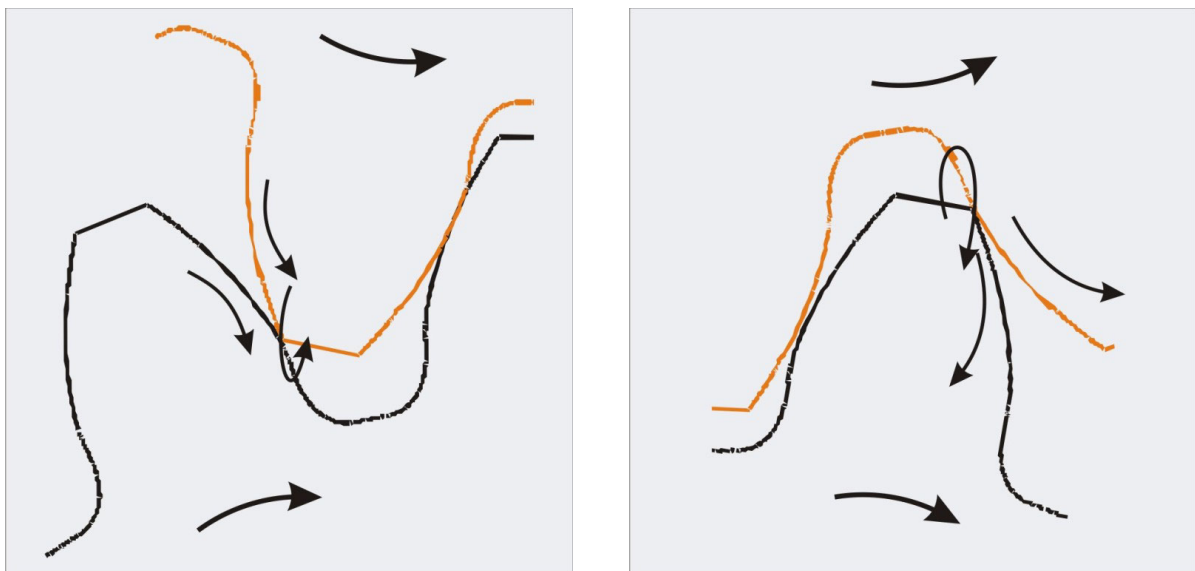


Bild 4.27: links: Kinematik einer Verzahnung zu Eingriffsbeginn, rechts: Kinematik einer Verzahnung am Eingriffsende

Das Ergebnis der FE-Berechnung der Verzahnung mit einer zusätzlichen Kopfabrundung zur Minimierung des Schabens ist in Bild 4.28 gezeigt. Das linke Bild zeigt, dass im Vergleich zu den anderen Berechnungsvarianten $1,2^\circ$ vor dem Eingriffsbeginn kein Kontakt erfolgt. Bei

0,9° vor dem Eingriff findet wiederum Kontakt statt. Zusätzlich schabt dieses Mal nicht eine scharfe Kante an der Oberfläche der Ritzelverzahnung, sondern eine abgerundete Ecke. Größerer Krümmungsradien führen zu geringeren Hertzischen Flächenpressungen und damit ist der Schabeeffekt der Kopfkante an der Gegenflanke mit einer zusätzlichen Kopfabrundung schwächer. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Korrektur die Auswirkungen des Eingriffstoßes reduzieren kann.

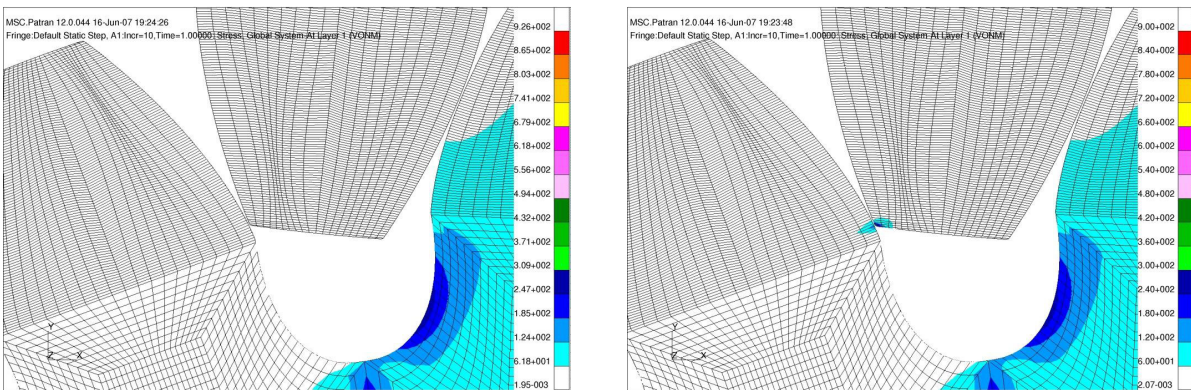


Bild 4.28: lineare Kopfrücknahme von 50 μm mit einer zusätzlichen Kopfabrundung von $r = 250 \mu\text{m}$ beginnend auf den letzten 2 % der Eingriffsstrecke, links: 1,2° vor dem Eingriffsbeginn, rechts: 0,9° vor dem Eingriffsbeginn

Nicht nur zu Eingriffsbeginn, sondern auch beim Austritt kommt es zu einem Schaben. In diesem Fall findet das Schaben im Zahnfuß des Rades statt. Es resultiert dieses Mal jedoch aus der Entlastung der beiden Zähne, welche aus dem Eingriff kommen. Diese biegen sich nun durch die Entlastung in ihre ursprüngliche Position zurück. Wie Bild 4.27 rechts zeigt, gleitet dabei die Kopfkante des Ritzels entlang der Evolvente des Rades.

Aus Bild 4.27 links wird ersichtlich, dass sich die Verzahnungen beim Eintritt in das Eingriffsgebiet einander annähern. Trifft die Kopfkante des Rades auf die Evolvente des Ritzels, möchte die Kante in die Oberfläche eindringen. Ist dies nicht möglich, schiebt sich die Kopf-ecke mit ihrer stumpfen Seite wie ein Pflug über das Ritzel. Hierbei wird der Werkstoff vor der Kante gestaucht und plastisch deformiert. Hinter der Kopfkante wird der Werkstoff der Ritzelflanke gezogen. Zusätzlich wird bei diesem Vorgang der auf der Ritzelfußflanke befindliche Schmierstoff abgeschabt. Beim regulären Eingriff unmittelbar nach der Eingriffsstörung ist der benötigte Schmierstoff nicht ausreichend vorhanden, und es kommt zum Metall–Metall–Kontakt.

Mehrmaliges Wiederholen dieses Vorganges führt zu einer Schädigung der Oberfläche, und es entstehen erste Anrisse. Der plastisch deformierte Bereich ist als Formabweichung im Profilogramm zu erkennen.

Beim Verlassen des Eingriffes ist dieser Effekt zwar immer noch vorhanden, jedoch zeigt in Bild 4.27 rechts der spitze Winkel zwischen den Zahnflanken nicht mehr wie ein Keil in die

Gleitrichtung, sondern verhält sich genau entgegengesetzt. Eine Schneidbewegung durch die Kopfecke des Ritzels ist hier nicht mehr so ausgeprägt wie am Eingriffsbeginn.

Es ist anzumerken, dass das Schaben der Kopfkante nicht nur eine Auskolkung der Ritzelflanke bedeutet, sondern auch ein Abtragen der Kopfkante des Rades. Dieser Effekt ist in den Profillinienprotokollen der bereits getesteten Radsätze zu erkennen.

In Bild 4.29 ist die Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1212 auf der Seite 2 abgebildet. Hier ist einer linearen Kopfrücknahme von $C_a = 50 \mu\text{m}$ eine zusätzliche Kopfabrundung mit dem Radius von $r = 250 \mu\text{m}$ überlagert worden. Am Zahnkopf ist zu erkennen, dass der abgerundete Bereich noch die ursprüngliche Oberfläche aufweist. Aber kurz unterhalb der Abrundung ist die Oberfläche wieder graufleckig.



Bild 4.29: Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1212 mit einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,48 \mu\text{m}$, Seite 2, $m_n = 22 \text{ mm}$

Diese starke Graufleckigkeit unterhalb der unveränderten Oberfläche ist auch am Zahnkopf des Ritzels in Bild 4.30 zu sehen. Unterhalb des Ritzelbildes ist das Profildiagramm beider Zahnräder dargestellt. In diesem Diagramm ist zu sehen, dass die Graufächenfläche nicht zu einer starken Auskolkung führt. Die Ursachen für die ungewöhnliche Position der Graufleckenfläche am Zahnkopf sind die stark verkleinerten Ersatzkrümmungsradien im Bereich des Abrundungsüberganges.

Trotz allem zeigt die kopfabgerundete Verzahnung während der Laufversuche ein besseres Verschleißverhalten und eine geringere Auskolkung als Verzahnungen mit ähnlicher Geometrie und besserer Oberflächenrauheit. Die Auskolkungstiefe beträgt im Zahnfuß des Ritzels $f_{fm} = 13,1 \mu\text{m}$ und im Zahnfuß des Rades $f_{fm} = 4 \mu\text{m}$. Die chemisch-mechanisch gleitgeschliffene Verzahnung GG3 1211-1 mit einer linearen Kopfrücknahme von $C_a = 50 \mu\text{m}$ weist bei einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,25 \mu\text{m}$ eine Auskolkungstiefe von $f_{fm} = 24,4 \mu\text{m}$ auf. Somit ist der positive Effekt der Kopfabrundung mit einer auf die Hälfte verringerten Auskolkungstiefe im Zahnfuß des Ritzels deutlich sichtbar.

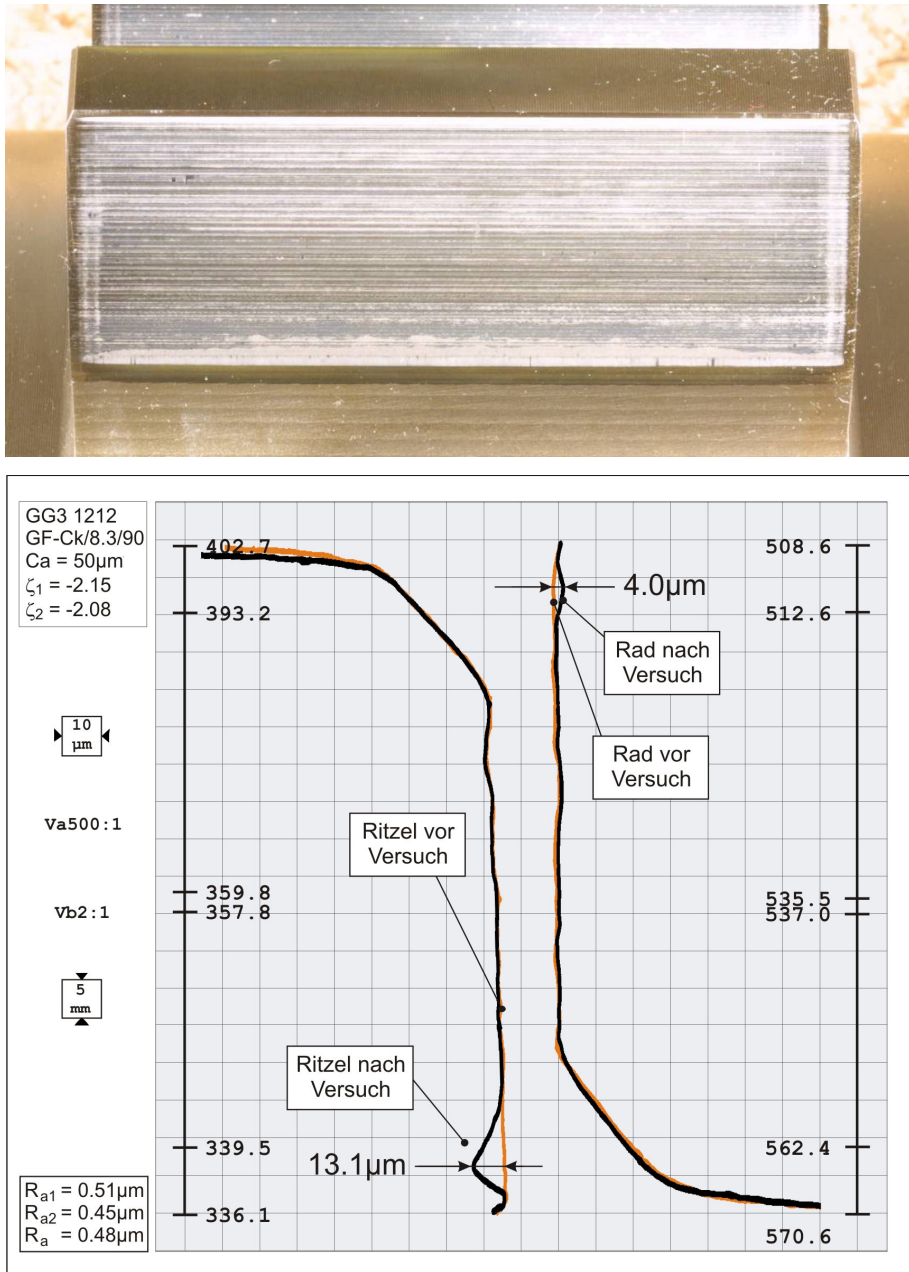


Bild 4.30: Ritzel GG3 1212: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 50\mu\text{m}$ und additiver Kopfabrundung $r = 250\mu\text{m}$, $m_n = 22\text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Durch diese Korrektur ist das Wachstum der Graufleckenfläche in Richtung des Einzeleingriffspunktes stark verlangsamt worden. Die geringere Auskolkungstiefe führt zu größeren Ersatzkrümmungsradien am Übergang der Auskolkung zur Evolvente, somit sind die Pressungen in diesem Bereich weitaus geringer als bei einer tieferen Auskolkung. Die Graufleckenfläche bedeckt am Ende der Versuche 14 % der aktiven Flanke.

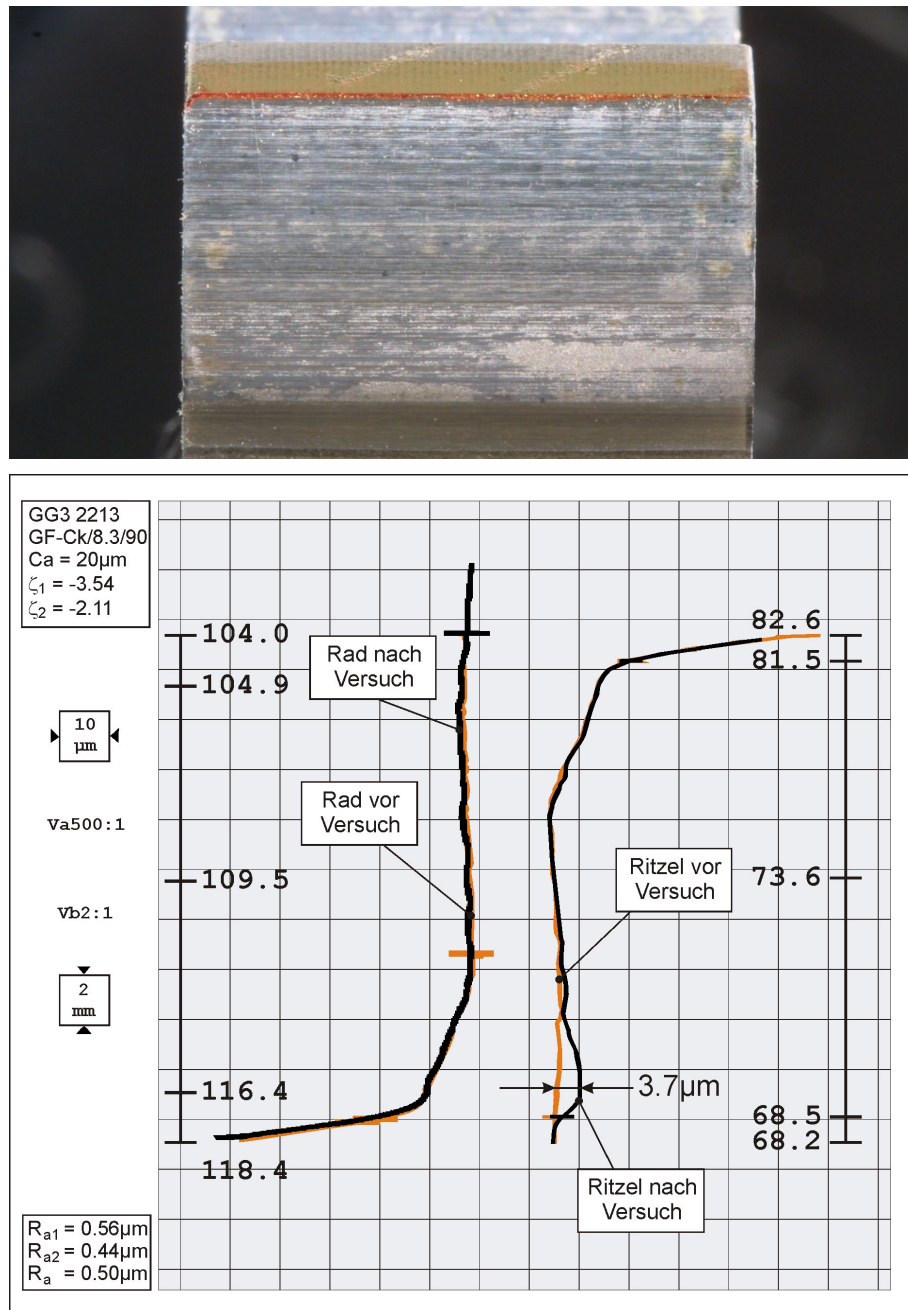


Bild 4.31: Ritzel GG3 2213: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 21 \mu\text{m}$ und additiver Kopfabrundung $r = 50 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Bild 4.31 zeigt oben das Foto einer gelaufenen Ritzelzahnflanke des Standardgetriebes. Unten ist das Evolventendiagramm des Radsatzes GG3 2213 vor und der Ritzels nach dem Versuch zu sehen. Die Graufleckenfläche des Ritzels beträgt 10 % der aktiven Flanke. Im Evolventendiagramm ist im Zahnfuß des Ritzels eine dreieckige Auskolkung von $f_{\text{fm}} = 3,7 \mu\text{m}$ zu entdecken. Im Bereich kurz vor dem Beginn des Einzeleingriffsbereiches ist im Diagramm eine leicht runde Auskolkung zu sehen. Dabei ist anzumerken, dass sich die resultierende Auskolkungsform und der Auskolkungsbetrag erst nach der Laststufe 10 einstellen. In den vorherigen Laststufen stellte sich eine runde Auskolkung in der Mitte des Doppel­eingriffsbereiches ein, jedoch mit einem sehr geringen Auskolkungsbetrag von $f_{\text{fm}} = 1,7 \mu\text{m}$.

Die Zahnköpfe von gelaufenen Zahnradern anderer Versuche ähneln den mit Abrundung gefertigten Zahnköpfen sehr. Im Evolventendiagramm ist es zu keiner erkennbaren Veränderung oder Abrundung der Zahnköpfe des Rades durch den Betrieb gekommen. Dementsprechend ist auch keine Schabemarke im Zahnfuß des Ritzels zu erkennen. Im Vergleich zu dieser Verzahnung erreichte eine Verzahnung des vorherigen Vorhabens 286 II mit einer ähnlichen linearen Kopfrücknahme von $C_a = 20 \mu\text{m}$, jedoch ohne Abrundung und mit einer ähnlichen arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,5 \mu\text{m}$, eine Auskolkungstiefe von $f_{\text{fm}} = 5,5 \mu\text{m}$. Somit kann ein positiver Effekt der zusätzlichen Kopfabrundung identifiziert werden.

Auf der Zahnflanke des Rades, in Bild 4.32 links dargestellt, ist zu sehen, dass der Zahnkopf nicht getragen hat und das Tragbild erst 0,5 mm vom Zahnkopf entfernt beginnt. Die Flanke ist insgesamt leicht graufleckig, jedoch ist keine ausgeprägte Fläche zu erkennen. Das rechte Bild zeigt die Radflanke der zweiten Variante. Hier ist im Zahnfuß eine leicht graufleckige Fläche zu erkennen. Auch in diesem Fall hat die Kopfkante der Flanke nicht getragen, jedoch ist ein starkes graufleckiges Band 0,5 mm vom Zahnkopf entfernt zu erkennen. Hier hat die Verzahnung mit der Flanke des Ritzels geschabt. Der Krümmungsradius dieser Schabekante ist im Vergleich zur Kopfkante des Rades jedoch wesentlich größer, und die daraus resultierenden Hertzschen Flächenpressungen sind dementsprechend geringer. Hierdurch ist auch ein geringerer Verschleiß im Zahnfuß des Ritzels zu erwarten.

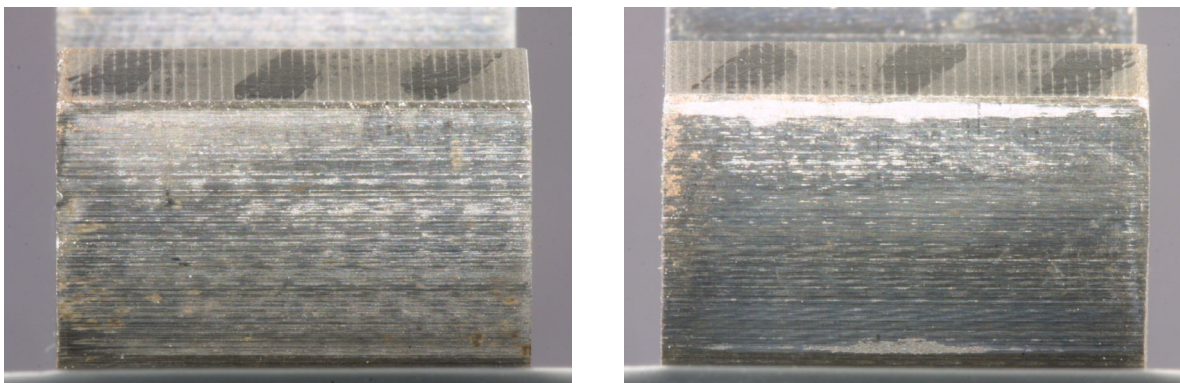


Bild 4.32: Radflanken der Verzahnung GG3 2213, links: Seite 1 mit $C_a = 18 \mu\text{m}$ und $r = 50 \mu\text{m}$, rechts: Seite 2 mit $C_a = 11 \mu\text{m}$ und $r = 60 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Die Ritzelflanke dieser weiteren Variante der Kopfabrundung ist in Bild 4.33 dargestellt. Der Radsatz GG3 2213 besitzt auf der Seite 2 bei einer linearen Kopfrücknahme von $C_a = 11 \mu\text{m}$ einen zusätzlichen Kopfabrundungsradius von $r = 60 \mu\text{m}$ und der Beginn der Kopfabrundung ist stärker in Richtung Eingriffsende gelegt worden, somit entsteht ein viel schärferer Übergang von der linearen Kopfrücknahme zur Kopfabrundung. Die arithmetische Mittenrauheit dieser Variante beträgt $R_a = 0,38 \mu\text{m}$.

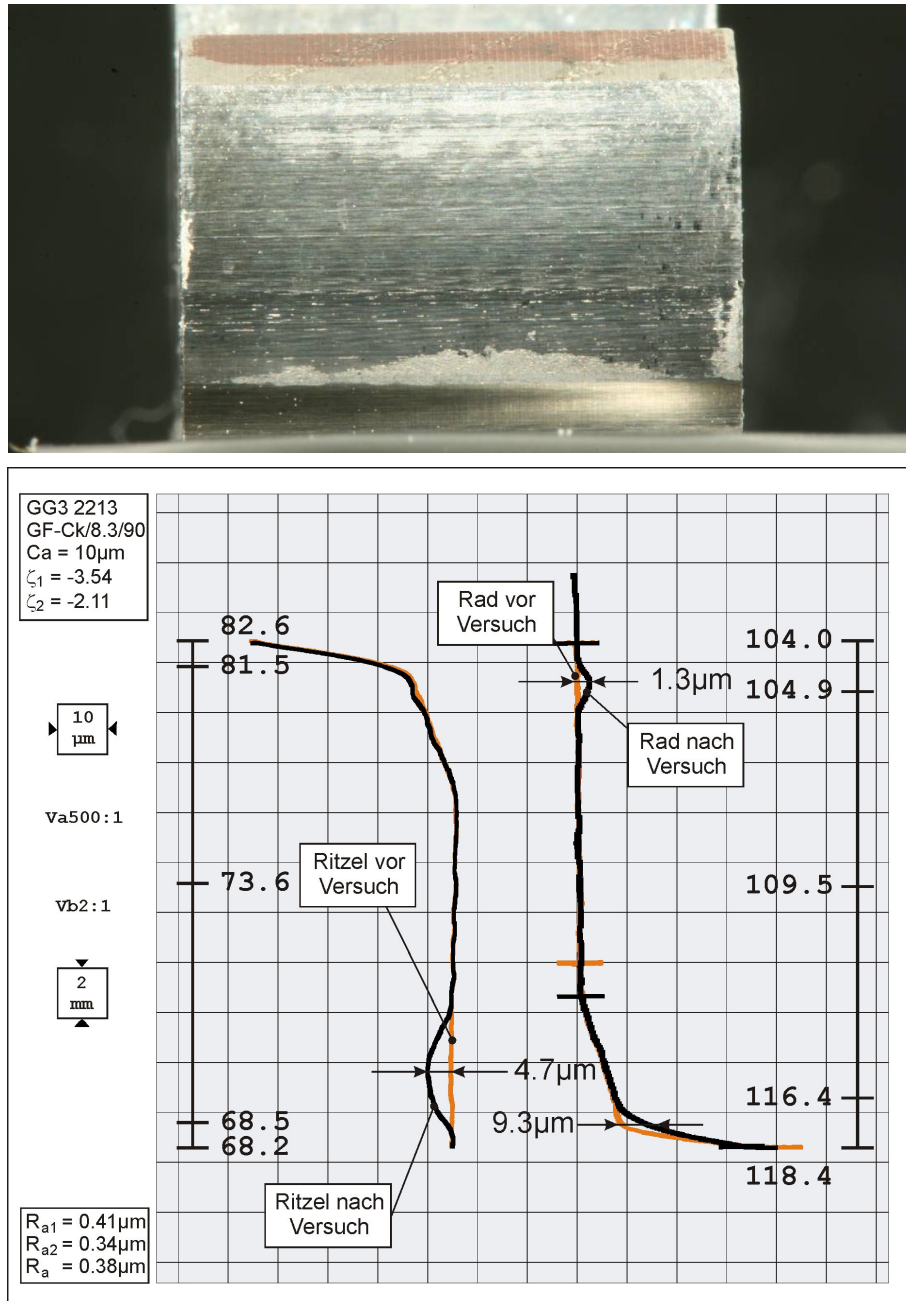


Bild 4.33: Ritzel GG3 2213: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 11 \mu\text{m}$ und additiver Kopfabrundung $r = 60 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Im Foto der Ritzelflanke sind am Zahnkopf zwei graufleckige Bänder zu erkennen. Beide Bänder befinden sich in unmittelbarer Nähe des Überganges der beiden Korrekturen. Diese sind auf die am Übergang der Korrektur auftretenden reduzierten Krümmungsradien zurückzuführen. Auch im Zahnfuß des Ritzels ist eine graufleckige Fläche zu sehen. Diese lässt sich im Evolventendiagramm als Auskolkung wiederfinden. Die Form der Auskolkung entspricht nicht der typischen spitzen dreieckähnlichen Auskolkung aufgrund des vorzeitigen Eingriffes. Hier befindet sich das Maximum der Auskolkung höher auf der Eingriffsstrecke. Dieses Ergebnis entspricht dem Verschleiß auf der Radflanke, wie das graufleckige Band in Bild

4.32 rechts bereits gezeigt hat. Die Radflanke selbst hat aufgrund des späteren Beginns der Kopfabrundung eine zusätzliche verschleißbedingte Abrundung der Kopfkante erfahren.

Deutlich sichtbar ist, dass die Bänder am Zahnkopf und die Fläche im Zahnfuß sich nicht über die gesamte Breite des Zahnes erstrecken. Diese Erscheinungsform der Graufleckigkeit liegt an einer ungewollten Breitenballigkeit des Rades. Hierdurch sind in der Mitte der Verzahnung Überlasten entstanden, die folglich zu höheren Auskolkungstiefen im Fuß des Ritzels führten. Somit entsteht scheinbar kaum ein Vorteil gegenüber den Varianten ohne zusätzliche Korrektur. Wird die Balligkeit mit berücksichtigt, sind mit einer Kopfabrundung bessere Ergebnisse zu erreichen.

Zusammenfassung: Kopfabrundung

Insgesamt ist die zusätzliche Kopfabrundung als erfolgreich getestet anzusehen. Der Einfluss des vorzeitigen Eingriffes wird sowohl am Großgetriebe als auch am Standardgetriebe sehr stark reduziert. Ein weiterer positiver Effekt ist der zu Eingriffsbeginn vorhandene Schmierfilm, der einen reinen Metall–Metall–Kontakt vermeidet. Der Beginn der zusätzlichen Abrundung auf dem Durchmesser und der Betrag der Abrundung sind mit Bedacht zu wählen, da die entstehenden Krümmungsradien neue Verschleißzonen, die beschriebenen graufleckigen Bänder, erzeugen können.

Zusätzliche Erkenntnisse zur Auswirkung des vorzeitigen Eingriffes auf die Auskolkungstiefe konnten am Großgetriebeprüfstand anhand der unterschiedlich stark abgerundeten Kopfkanten der chemisch–mechanisch gleitgeschliffenen Radsätze gewonnen werden. Hier zeigte sich ebenfalls ein besseres Verschleißverhalten bei einer größeren Kopfabrundung.

4.2.5. Einfluss des treibenden Rades

Der Betriebsfall des treibenden Rades tritt in Windkraftanlagen und in höheren Gängen von Kfz–Getrieben auf. Nach den Untersuchungen in FVA 259 I [S3] besteht kein signifikanter Unterschied im Verschleißbild zwischen dem treibendem und dem getriebenen Rad. Auch Liu [L3] sieht bei treibendem Rad die Schabemarke immer noch im Zahnfuß des Ritzels. Jedoch lässt die Analyse des vorzeitigen Eingriffes und des daraus resultierenden Schabens im Zahnfuß des treibenden Rades für das treibende Rad eine höhere Auskolkungstiefe vermuten als für das getriebene Ritzel.

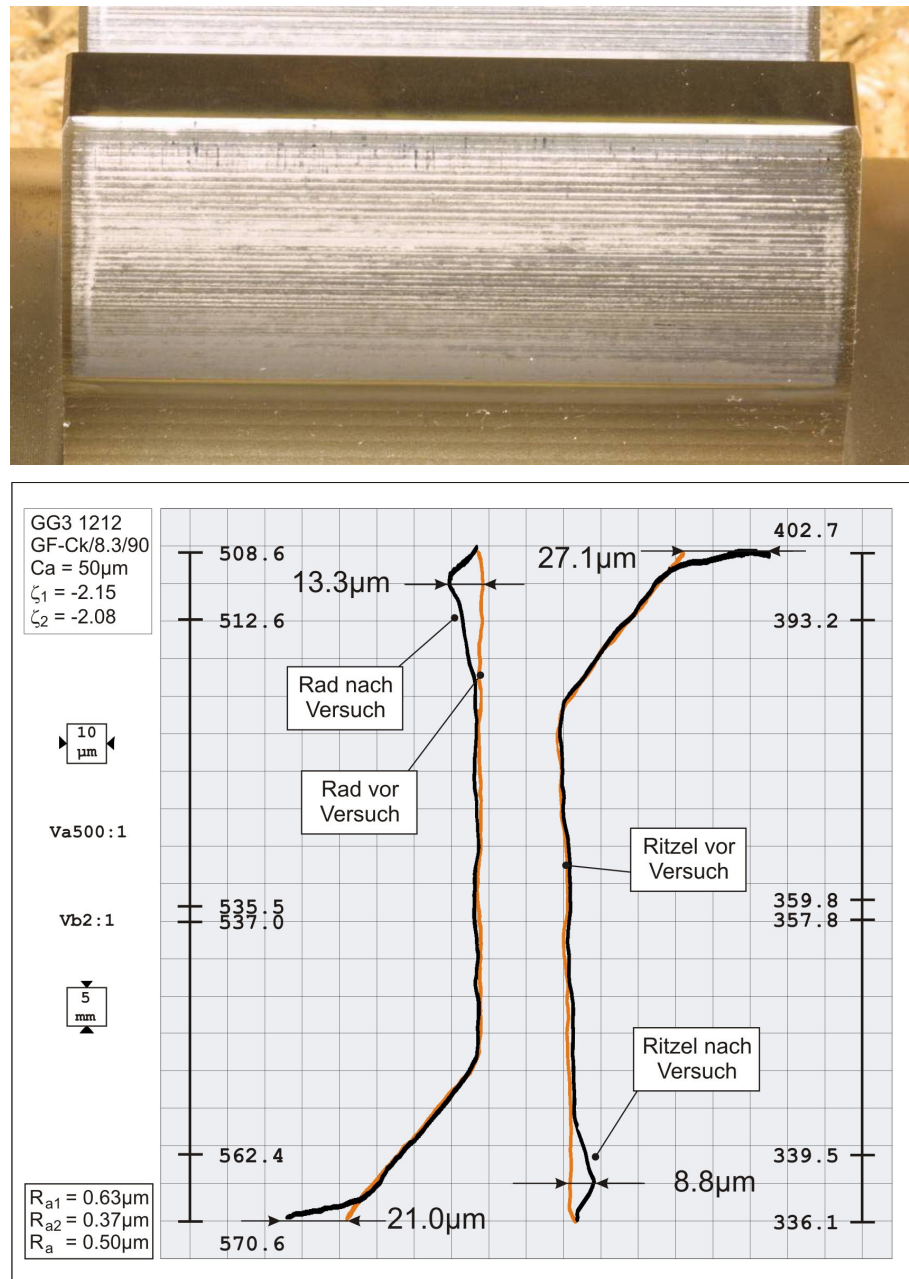


Bild 4.34: Ritzel GG3 1212: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 50 \mu\text{m}$,
 $m_n = 22 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Bild 4.34 zeigt die Ritzelflanke und die Profildiagramme des Radsatzes GG3 1212 Seite 1. Wie nach der Analyse bereits erwartet, ist im Zahnfuß des Rades die tiefere Auskolkung mit $f_{\text{fm}} = 13,3 \mu\text{m}$ zu sehen. Die Auskolkung im Zahnfuß des Ritzels ist mit $f_{\text{fm}} = 8,8 \mu\text{m}$ wesentlich geringer als bei den Versuchen mit treibendem Ritzel und einer resultierenden Auskolkung von $f_{\text{fm}} = 24,4 \mu\text{m}$. Ebenfalls zu erkennen ist, dass beide Zahnköpfe durch die Eingriffsstörungen abgerundet sind und im Zahnfuß des Ritzels eine leichte Schabemarke sichtbar ist. Die Graufleckenfläche beträgt 15 % der aktiven Zahnflanke. Eine zusätzliche Graufleckenfläche ist am Zahnkopf des Ritzels zu erkennen. Die Fläche lässt sich mit der Kopfabrundung im Evolventendiagramm in Verbindung setzen.

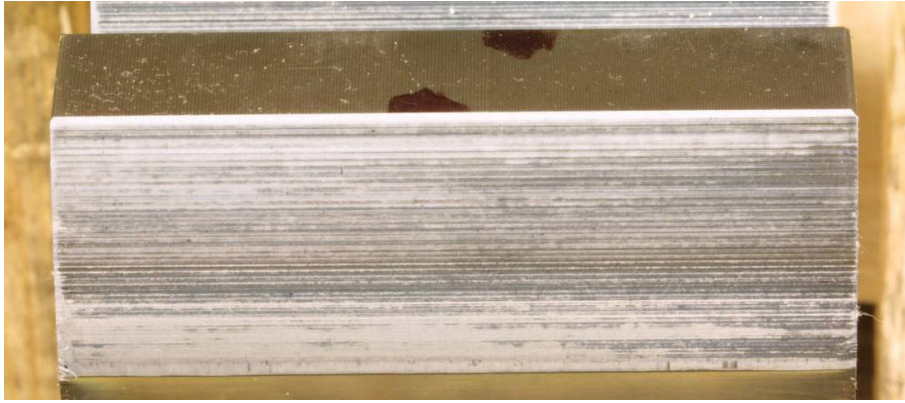


Bild 4.35: Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1212 mit einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,5 \mu\text{m}$, Seite 1, $m_n = 22 \text{ mm}$

Wird die Zahnflanke des Rades in Bild 4.35 betrachtet, fällt die im Vergleich zum Ritzel um 20 % größere Graufleckenfläche des Rades auf. Auch hier ist der Zahnkopf graufleckig im Bereich der Kopfabrundung. Deutlich ist im Zahnfuß die Schabemarke, resultierend aus dem vorzeitigen Eingriff, zu erkennen.

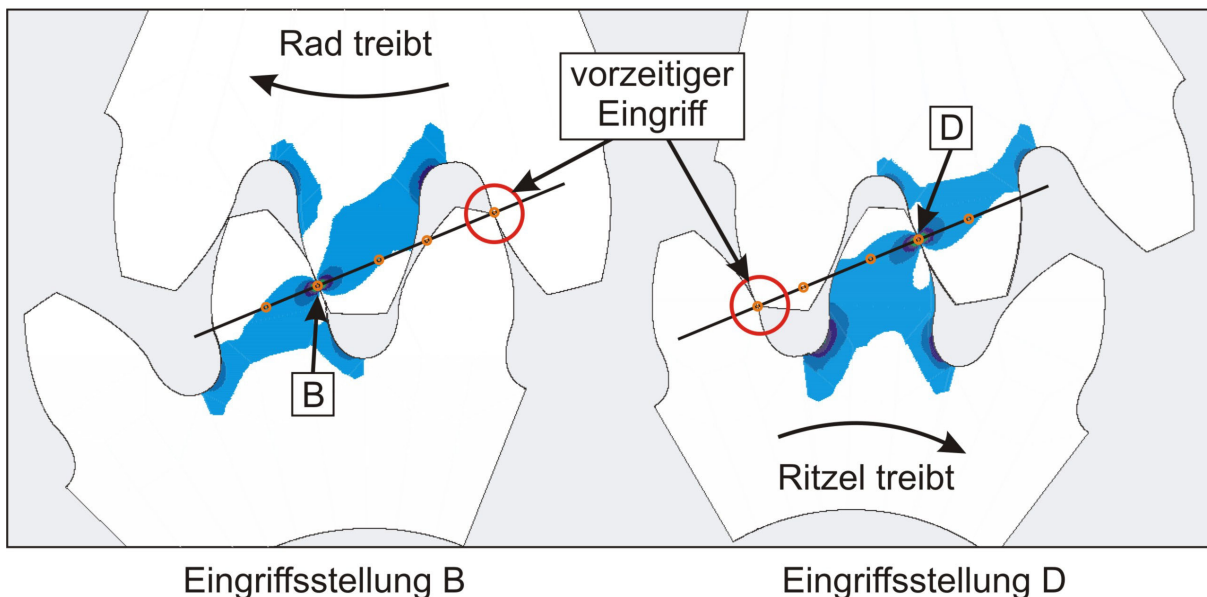


Bild 4.36: Spannungen nach von Mises in der Eingriffssituation beim vorzeitigen Eingriff, links: treibendes Rad im Punkte B, rechts: treibendes Ritzel im Punkte D

Entscheidend für die Auswirkung des vorzeitigen Eingriffes ist die Eingriffssteifigkeit des am äußeren Einzeleingriffspunkt befindlichen Zahnpaars, siehe Bild 4.36. Beim treibenden Rad befindet sich diese Position im Punkt B auf der Eingriffsstrecke. In dieser Eingriffsposition hat die Steifigkeit des Radfußes den größten Einfluss auf die Eingriffssteifigkeit des im Austritt befindlichen Zahnpaars.

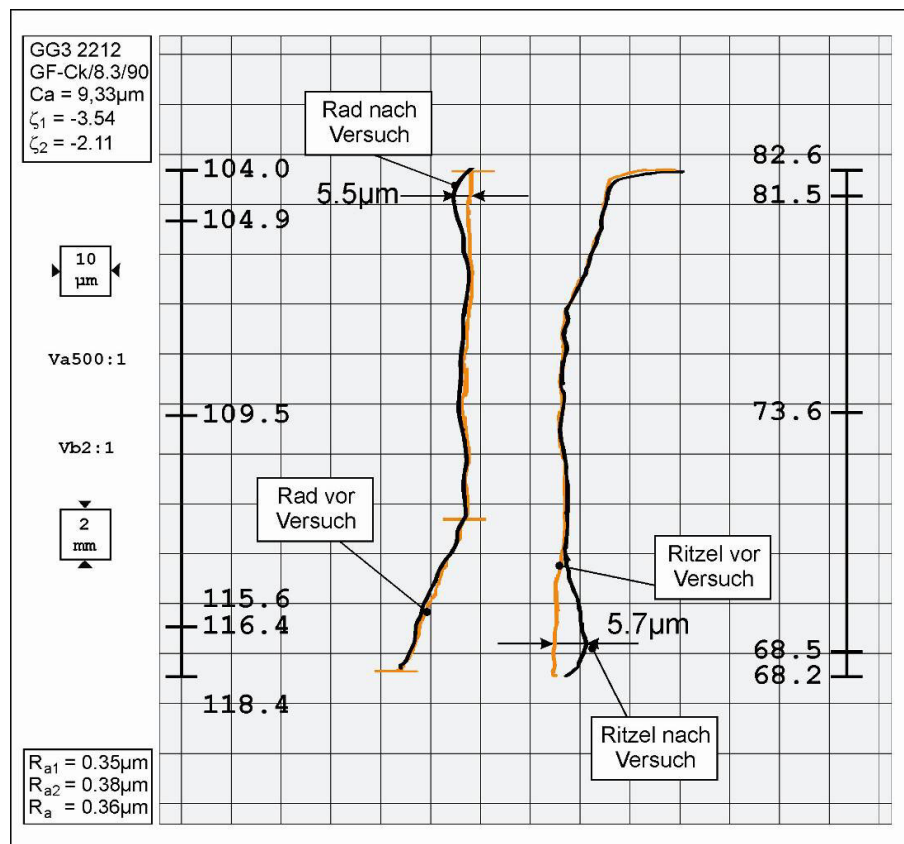
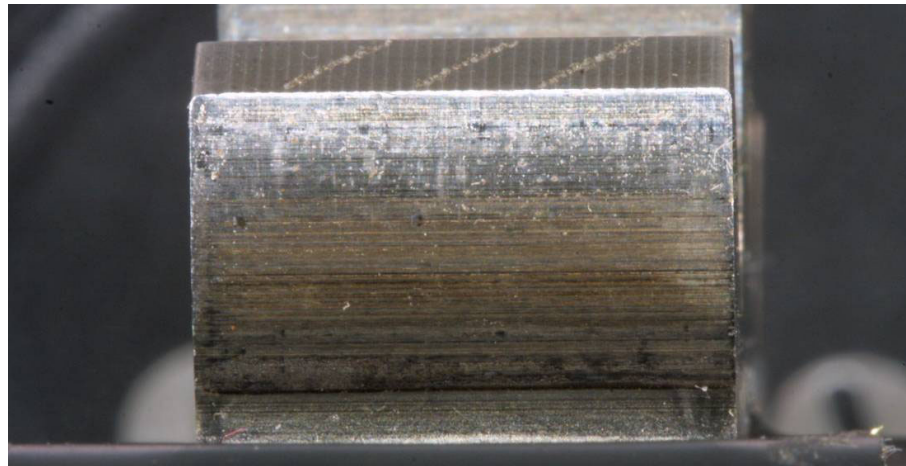


Bild 4.37: Ritzel GG3 2212: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 9 \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Die Steifigkeit des Radfußes hängt sowohl von der Zahnfußgeometrie als auch von der Zahnfußdicken ab. Je höher die Zähnezah des Zahnrades bei gleichbleibender Profilverschiebung, desto dicker und somit steifer sind die Zahnfüße. Bei den hier untersuchten Verzahnungen sind die Profilverschiebungen der Verzahnungen mit $x_1 = 0,18$ und $x_2 = 0,17$ nahe beieinander. Hieraus resultiert für das treibende Rad in der entscheidenden Eingriffsposition B eine höhere Steifigkeit als für das treibende Ritzel in der Eingriffsposition D. Berechnungen der Zahnpaarsteifigkeit für diese Eingriffsposition zeigen eine 11 % höhere Steifigkeit für diese Eingriffsposition als für den Eingriffspunkt B. Grundsätzlich ist die Tendenz zu erkennen,

dass die Auskolkungen im Zahnfuß des getriebenen Rades niedriger sind als im Zahnfuß des treibenden Rades.

Bild 4.37 zeigt eine Flanke des Ritzels der untersuchten Verzahnung am Standardgetriebe. Im Zahnfuß ist eine leicht graufleckige Fläche zu erkennen. Im Evolventendiagramm ist auf diesem Durchmesser eine Formabweichung zu messen. Die Tiefe der Formabweichung ist in der gleichen Größenordnung wie die Tiefe der Auskolkung im Zahnfuß des Rades. In Bild 4.38 links ist die Zahnflanke des mit dem Ritzel gepaarten und somit treibenden Rades zu sehen. Es ist auf dieser Zahnflanke nur eine sehr kleine Graufleckenfläche zu erkennen. Die Graufleckigkeit ist eine Funktion des spezifischen Gleitens. Bei der untersuchten Verzahnung ist das spezifische Gleiten in den Zahnfüßen des Ritzels betragsmäßig höher als im Zahnfuß des Rades. Die Auskolkungen im Zahnfuß des Rades resultieren demnach aus dem Eintrittsstoß, und die Auskolkungen des Ritzelfußes sind bedingt durch die Graufleckigkeit.

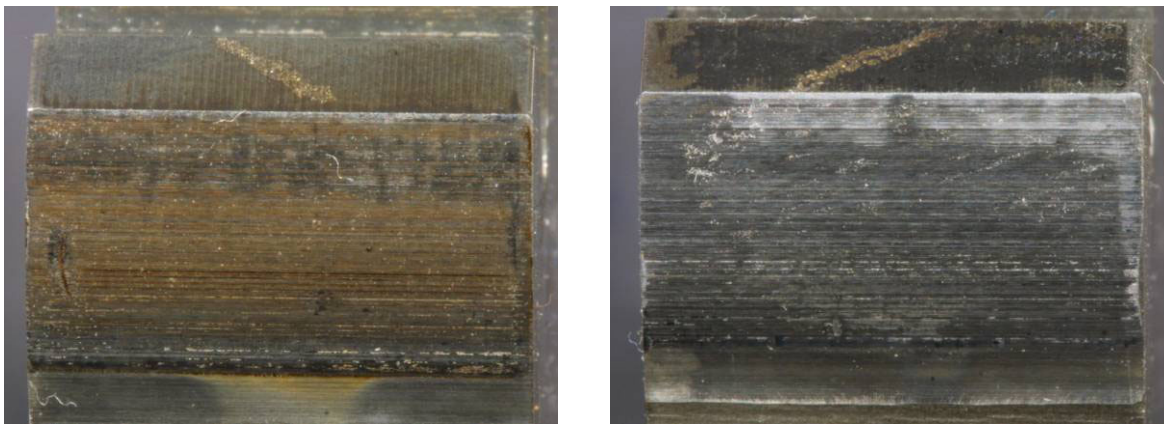


Bild 4.38: Radflanken der Verzahnung GG3 2212 links: Seite 1 mit $C_a = 9 \mu\text{m}$,
rechts: Seite 2 mit $C_a = 12 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Auf der Rückflanke der Verzahnung ist ein weiterer Versuch mit einem treibenden Rad durchgeführt worden. Bild 4.39 zeigt das Ergebnis dieses Versuches im Evolventendiagramm. Oberhalb des Diagramms ist das Foto der Zahnflanke zu erkennen. Die Graufleckenfläche dieser Verzahnung ist leicht geringer als die Fläche des ersten Versuches, somit sind die Auskolkungen im Zahnfuß des Ritzels, wie im Diagramm zu erkennen ist, auch geringer. Die arithmetische Mittenrauheit des ersten Versuches liegt mit $R_a = 0,36 \mu\text{m}$ auch etwas höher als die Rauheit des zweiten Versuches mit $R_a = 0,31 \mu\text{m}$. Wird der Gleitpartner des Ritzelfußes betrachtet, also das Rad, ist der Unterschied zwischen dem ersten und dem zweiten Versuch mit $R_a = 0,38 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,29 \mu\text{m}$ sehr viel größer.

Bild 4.38 rechts zeigt die Flanke des Rades des zweiten Versuches. Hier ist ebenfalls eine sehr kleine Graufleckenfläche zu erkennen. Die Auskolkung im Zahnfuß des Rades scheint in diesem Fall ebenfalls aus dem vorzeitigen Eingriff zu resultieren. Der Betrag der Kopfrücknahme ist auf dieser Flanke mit $C_a = 12 \mu\text{m}$ um $3 \mu\text{m}$ höher als beim ersten Versuch.

Dementsprechend ist auch die Auskolkungstiefe im Zahnfuß des Rades geringer als beim ersten Versuch.

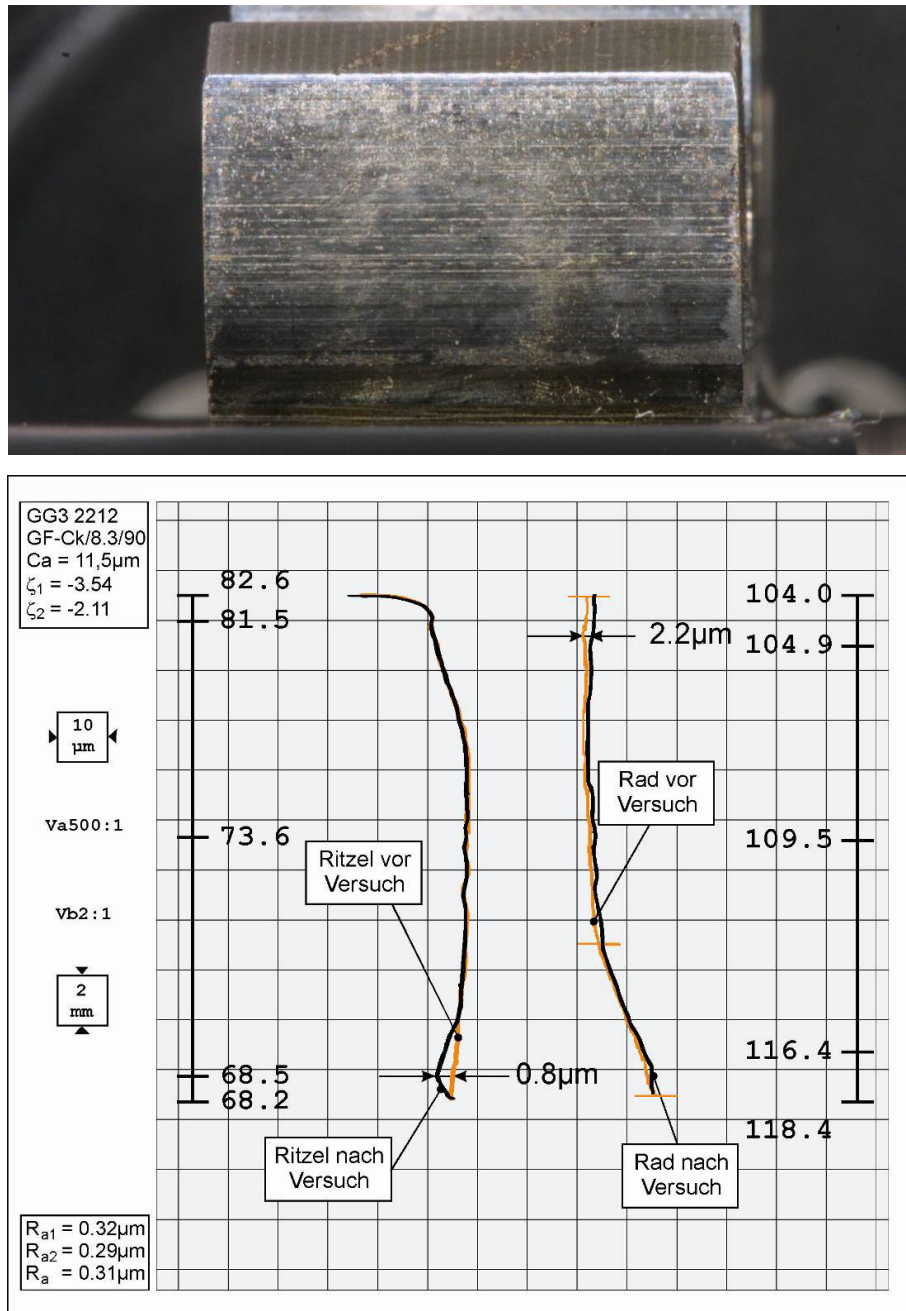


Bild 4.39: Ritzel GG3 2212: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 12 \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Zusammenfassung: Treibendes Rad

Die Ergebnisse der Versuche mit dem treibenden Rad haben gezeigt, dass der Einfluss des vorzeitigen Einflusses bei den kleineren Verzahnungen immer noch zu erkennen ist. Die starke Dominanz der Auskolkung aufgrund des vorzeitigen Eingriffes gegenüber der Auskolkung resultierend aus der Graufleckigkeit scheint beim Standardprüfstand geringer zu sein als beim Großgetriebe. Die Versuche am Großgetriebeprüfstand zeigen aufgrund des Eintritts-

stoßes einen deutlichen Einfluss der Treibrichtung auf die Auskolkungstiefe. Aber auch am Großgetriebe zeigt sich, dass die durch das Schaben entstandene Auskolkung im Zahnfuß des treibenden Rades eine geringere Auskolkung aufweist als in umgekehrter Treibrichtung. Insgesamt lassen sich die bereits getroffenen Aussagen in Bezug auf den vorzeitigen Eingriff und die hieraus entstehenden Auskolkungen bestätigen.

4.2.6. Dauerversuch bei treibendem Rad

Anschließend an den Stufentest ist der Versuch des treibenden Rades im Dauertest untersucht worden. Nach acht Tagen im ersten Lauf des Dauertests, und somit 23,3 Mio Lastwechsel am Ritzel, traten auch bei dieser Verzahnung erhöhte Schwingungen auf. Zunächst ist in diesem Fall ebenfalls ein Grübchenschaden vermutet worden. Die Untersuchung der Zahnflanken wies jedoch keine Schäden auf. Eine Frequenzanalyse der auftretenden Schwingungen zeigte, dass es sich um einen mit der Drehfrequenz wiederholenden Stoß handelte. Es lag die Vermutung nahe, dass durch den häufigen Einsatz die Welle so stark geschwächt wurde und wie im vorangegangenen Projekt FVA 286 II [L5] erneut durchgebrochen ist.

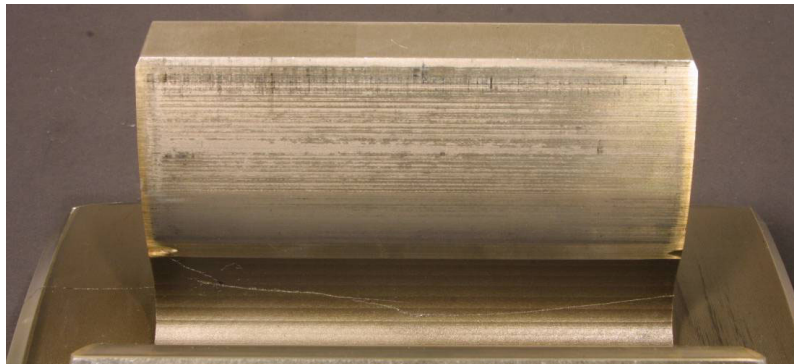


Bild 4.40: Riss im Zahnfuß des Ritzels der Verzahnung GG3 1212 Seite 2

Bei der Demontage stellte sich aber heraus, dass das Ritzel über der gesamten Zahnbreite einen Riss aufwies, siehe Bild 4.40. Eine Analyse des benachbarten Institutes für Werkstoffwissenschaften ergab, dass der Rissbeginn in der Passfedernut, wie in Bild 4.41 zu sehen, entstanden ist.



Bild 4.41: Passfedernut der Verzahnung GG3 1212

Ungeachtet des Versagens der Großtriebeverzahnung, ist der Dauerversuch mit treibendem Rad am Standardgetriebe durchgeführt worden. Der Betriebszustand des treibenden Rades ist für eine kleine Verzahnung im Industriegetriebesektor eher ungewöhnlich. In den höheren Gängen der Automobilgetriebe ist dieser Betriebszustand aber seit Jahrzehnten Stand der Technik.

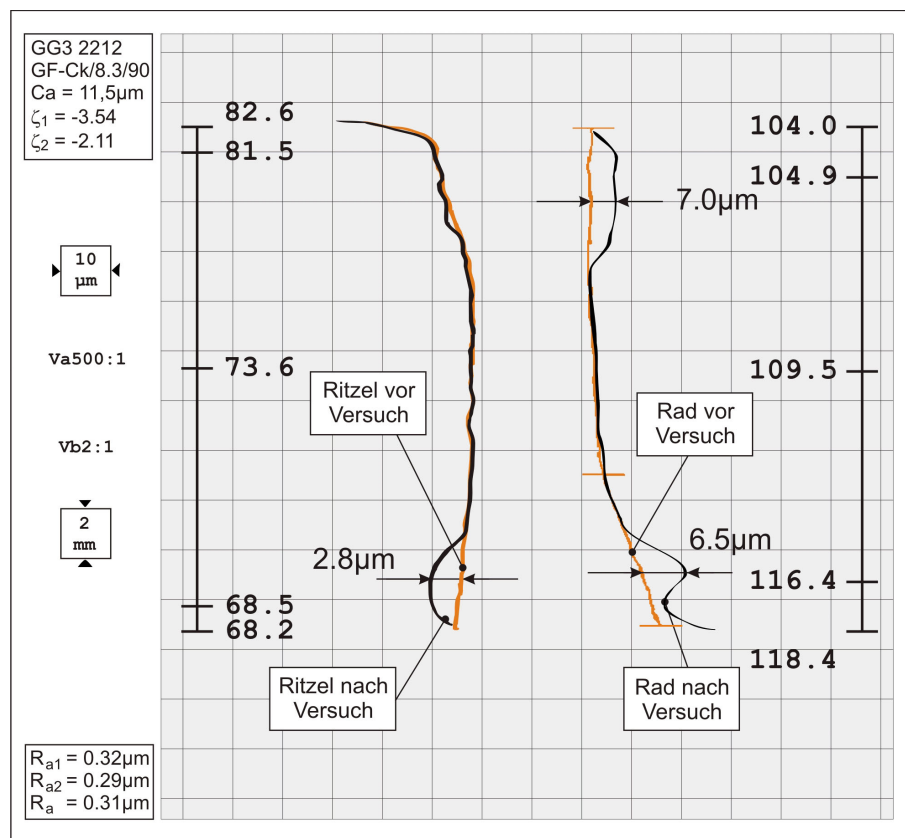
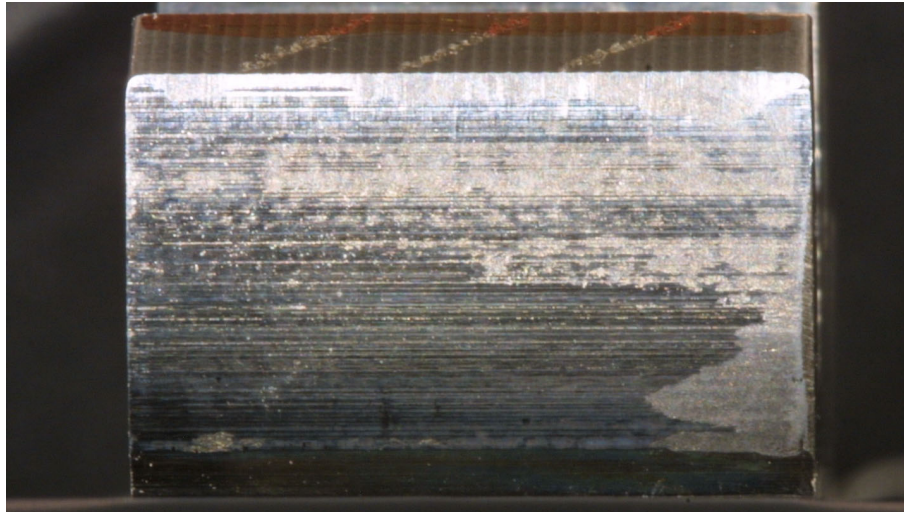


Bild 4.42: Verzahnung GG3 2212: Seite 2 mit einer linearen Kopfrücknahme $C_a = 12\mu\text{m}$, $m_n = 4,5\text{ mm}$ und einer Profilverschiebung von $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$, Laufzeit $t = 6 \times 80\text{ h}$, 74,7 Mio. Lastwechsel am Ritzel

Die Versuche am Großgetriebeprüfstand zeigten aufgrund des Eintrittsstoßes im Stufentest einen deutlichen Einfluss der Treibrichtung auf die Auskolkungstiefe. Vergleichswerte für die Großgetriebeverzahnung bestehen nicht, da die Großgetriebeverzahnung nach kurzer Laufzeit aufgrund eines Zahnfußbruchs im Dauerlauf ausgefallen ist.

Bild 4.42 zeigt eine Zahnflanke des getriebenen Ritzels. Darunter sind die Evolventendiagramme des Ritzels des Rades gegenübergestellt. Im Stufentest hat sich gezeigt, dass die maximalen Auskolkungen im Zahnfuß des treibenden Rades zu finden sind. Diese maximalen Auskolkungstiefen sind auf den vorzeitigen Eingriff zurück geführt worden.

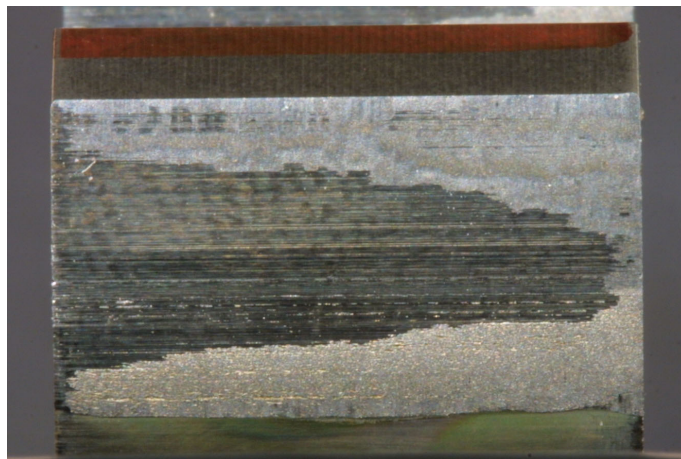


Bild 4.43: Radflanken der Verzahnung GG3 2212, Seite 2 mit $C_a = 12 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Nach dem Dauerlauf sind die maximalen Auskolkungen immer noch am Rad zu finden. Werden die Auskolkungen in den Zahnfüßen des Rades und des Ritzels miteinander verglichen, ist deutlich ein großer Unterschied zwischen den gemittelten Auskolkungstiefen sichtbar. Jedoch hat sich am Zahnkopf des Rades eine zusätzliche starke Auskolkung ausgebildet. In Bild 4.43 ist zu sehen, dass die Oberfläche sich auch am Zahnkopf verändert hat. Zwar ist die Oberfläche auch hier gräulich und matt, jedoch weist sie trotz kleiner Poren eine andere Beschaffenheit auf als die graufleckige Fläche. In Breitenrichtung ist mit bloßem Auge bereits ein wellenförmiger Abtrag erkennbar. Teilweise erscheint die Oberfläche plastisch deformiert. Am Gegenrad ist in den Zahnfüßen nichts Vergleichbares sichtbar.

Die Versuche mit treibendem Rad haben im Gegensatz zu den Ergebnissen in [S3] verdeutlicht, dass die Treibrichtung eine Auswirkung auf die resultierende Formabweichung hat. Die graufleckenbedingte Auskolkungstiefe ist eine Funktion der Gleitgeschwindigkeiten und der arithmetischen Mittenrauheit der Flanken, und beides ändert sich vom Wechsel des treibenden Ritzels zum treibenden Rad nicht. Die graufleckenbedingte Formabweichung wird im Großgetriebe durch die Formabweichung bedingt durch den vorzeitigen Eingriff überlagert. Entscheidend für den vorzeitigen Eingriff ist die Steifigkeit im äußeren Einzeleingriffspunkt. Wird die Treibrichtung geändert, so wechselt der äußere Einzeleingriffspunkt auf der Eingriffsstrecke von Punkt D zu Punkt B. Bei der C-Verzahnung ist Punkt B steifer als Punkt D.

Hieraus resultiert eine geringere Auskolkungstiefe als beim treibenden Ritzel. Zusätzlich wandert die maximale Auskolkungstiefe aus dem Zahnfuß des Ritzels in den Zahnfuß des Rades. Das Schaben der Kopfkante ist zu Eingriffsbeginn negativer zu bewerten als zu Eingriffsende, denn beim Verlassen des Eingriffes zeigt der spitze Winkel zwischen den Zahnflanken nicht mehr wie ein Keil in die Gleitrichtung, sondern verhält sich genau entgegengesetzt. Eine Schneidbewegung durch die Kopfcke des Ritzels ist hier nicht mehr so ausgeprägt wie am Eingriffsbeginn.

4.2.7. Einfluss der Profilverschiebung

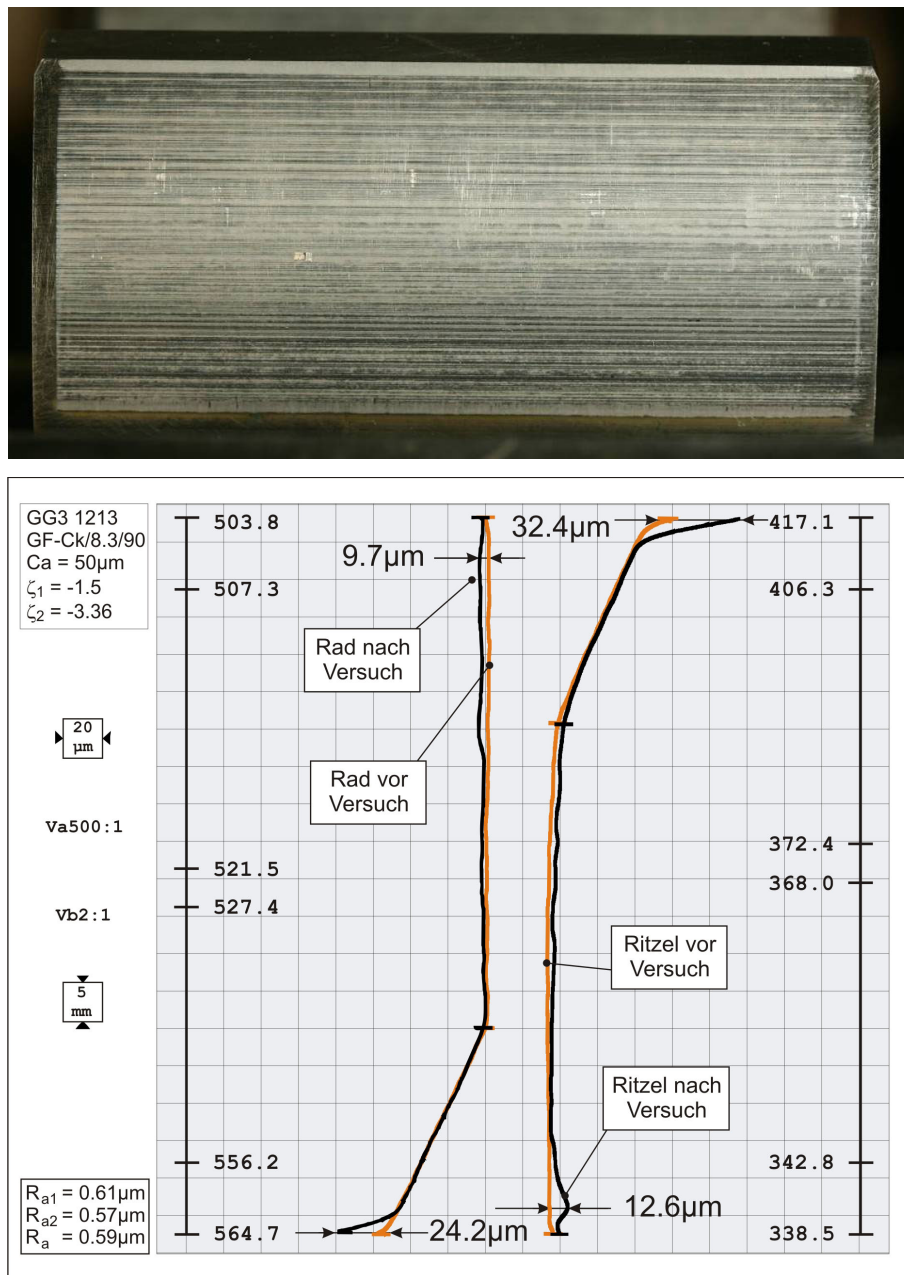


Bild 4.44: Ritzel GG3 1213: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 50\mu\text{m}$, $m_n = 22\text{ mm}$ und $x_1 = 0,5$ und $x_2 = -0,1468$

Die C–GF Verzahnungen, wie sie für die Graufleckentests verwendet werden, haben sehr geringe Profilverschiebungsbeträge und neigen aufgrund des hohen negativen spezifischen Gleitens zur Graufleckenbildung. Ziel der folgenden Versuche ist es, die Übertragbarkeit des Berechnungsverfahrens nach [S3] auf Praxisgetriebe mit einer nicht so stark graufleckengefährdeten Verzahnung zu prüfen. Die Profilverschiebung des Ritzels ist praxisnah gewählt und beträgt $x_1 = 0,5$. Das spezifische Gleiten im Zahnfuß ist nun fast halbiert und beträgt $\zeta_1 = -1,5$. Der Achsabstand und die feste Profilverschiebungssumme erzwingen ein stark negativ profilverschobenes Rad. Somit herrschen im Zahnfuß des Rades schlechtere Bedingungen bezüglich der Graufleckentragfähigkeit als bei der Standardverzahnung.

In Bild 4.44 ist die Seite 1 der Verzahnung GG3 1213 im Evolventendiagramm dargestellt. Über dem Diagramm ist ein Zahn des Ritzels abgebildet. Im Bild ist zu sehen, dass keine geschlossene graufleckige Fläche entstanden ist. Im Zahnfuß sind Schabemarken zu sichtbar. Oberhalb dieser Marke schließt sich eine leicht graufleckige Fläche an. Auf der gesamten Flankenfläche sind graufleckige Bänder entlang der Schleifriefen ausgebildet worden. Diese Flächen sind jedoch nicht so satt grau, wie herkömmliche Graufleckenflächen erscheinen. Diese graufleckigen Bänder sind im Evolventendiagramm nicht zu identifizieren.

Im Evolventendiagramm ist im Zahnfuß des Ritzels eine dreieckige Auskolkung aufgrund des Eintrittsstoßes und des anschließenden Schabens zu erkennen. An die Schabemarke schließt sich, wie auch schon im Foto zu sehen ist, eine graufleckige Fläche an, dieser lässt sich als flacher Anstieg in Richtung Wälzkreis identifizieren.

Auffällig ist im Evolventendiagramm, dass das Gegenrad Auskolkungen über die gesamte Flanke aufweist. Es ist ein kontinuierlicher flacher Verlauf. Somit ist diese Auskolkung aufgrund der Graufleckigkeit entstanden. Sollte es zu einem Schaben gekommen sein, wie der Zahnkopf des Ritzels es sowohl im Foto als auch im Evolventendiagramm vermuten lässt, sind die Spuren durch die Graufleckenfläche bereits abgetragen worden.

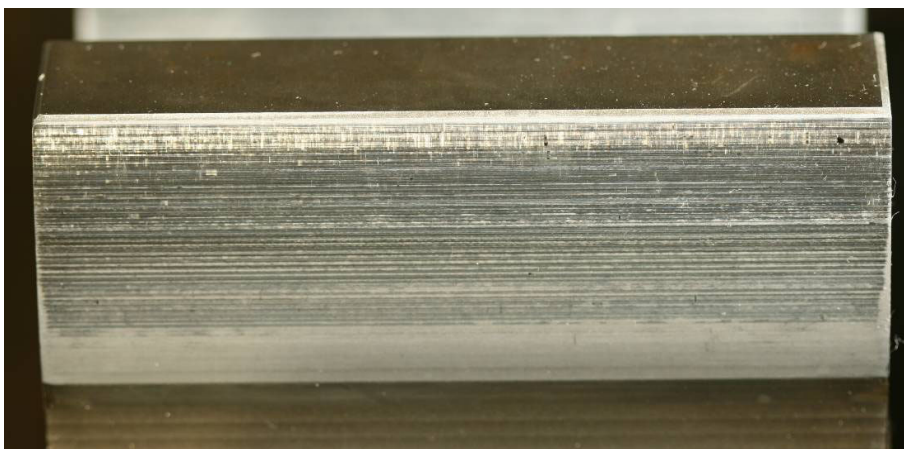


Bild 4.45: Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1213 mit einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,69 \mu\text{m}$, Seite 1, $m_n = 22 \text{ mm}$

Bild 4.45 zeigt eine Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1213 auf der Seite 1 mit einem Kopfrücknahmebetrag von $C_a = 50 \mu\text{m}$. Wie bereits im Evolventendiagramm zu erkennen ist, befindet sich im Zahnfuß des Rades eine größere graufleckige Fläche. Diese Graufleckenfläche resultiert aus der hohen Oberflächenrauheit und dem sehr hohen negativen spezifischen Gleiten. Eine Schabemarke ist im Zahnfuß nicht sichtbar.

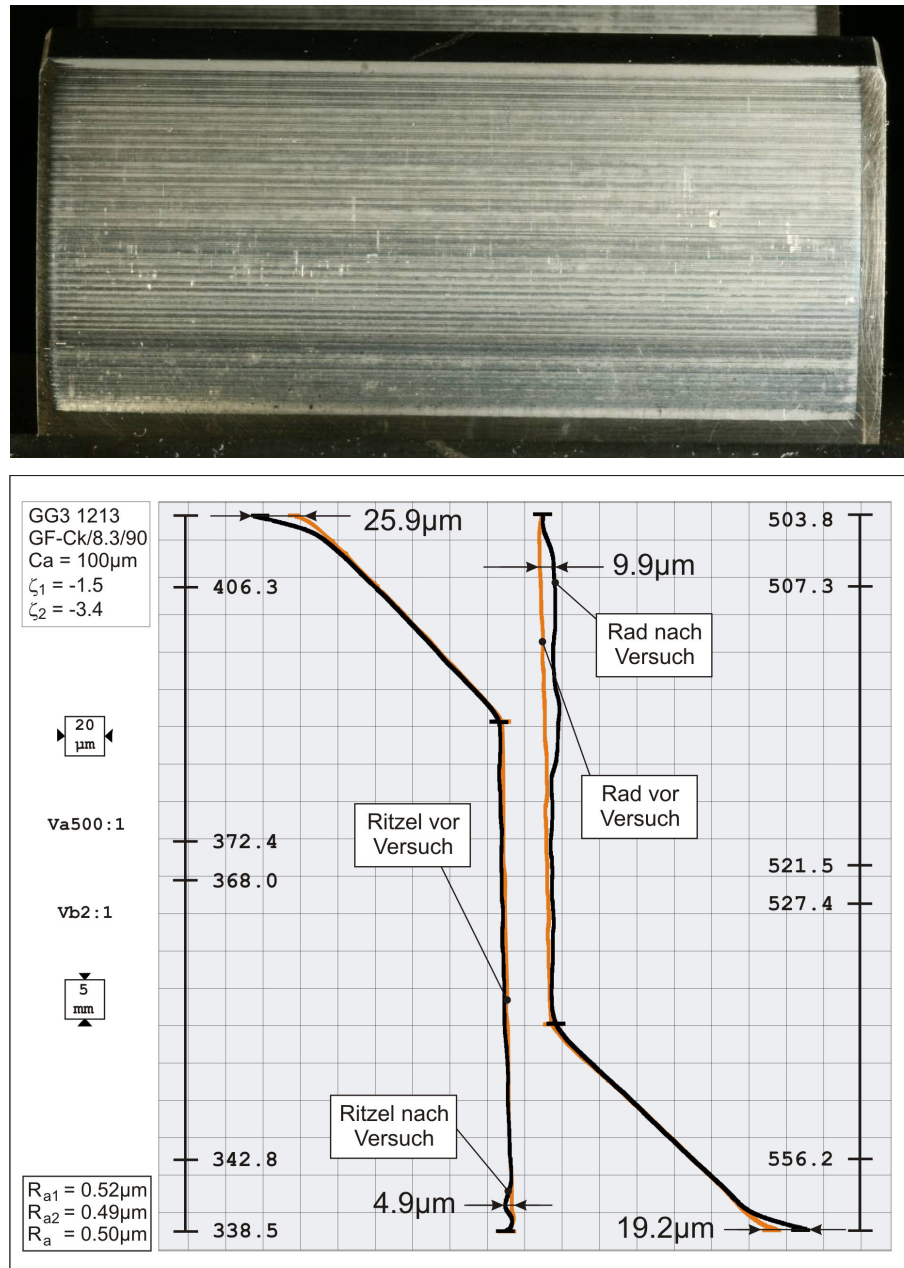


Bild 4.46: Ritzel GG3 1213: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 100 \mu\text{m}$, $m_n = 22 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,5$ und $x_2 = -0,1468$

Bild 4.46 zeigt das Evolventendiagramm der Seite 2 der Verzahnung GG3 1213 des Ritzels. Die Seite 2 besitzt einen stärkeren Kopfrücknahmebetrag von $C_a = 100 \mu\text{m}$. Die arithmetische Mittenrauheit der Oberfläche ist der Rauheit der Seite 1 ähnlich. Auch hier hat der Zahnkopf des Ritzels deutlich gearbeitet, und graufleckige Bänder verteilen sich auf der ganzen Zahn-

höhe. Der Unterschied zur Seite 1 ist die Schabemarke, die nicht so stark ausgeprägt ist. Im Evolventendiagramm ist ersichtlich, dass das Schaben eine sehr geringe Auskolkungstiefe verursacht hat.

Am Rad wiederum ist im Zahnfuß eine lange Auskolkung zu erkennen, die sich fast bis zum Wälzpunkt erstreckt. Am Beginn des Einzeleingriffsbeginns zeigt das Rad eine stärkere Auskolkung, die aufgrund der niedrigen Krümmungsradien, die im Bereich des Überganges der Korrektur zur Evolvente vorliegen und somit zu Pressungsüberhöhungen führen, entstanden ist.

Bild 4.47 zeigt eine zur Seite 2 gehörende Flanke des Rades. Der Zahnfuß des Rades weist eine deutlich sichtbare graufleckige Fläche auf.

Ein Vergleich der Flanken der Räder in Bild 4.45 und Bild 4.47 zeigt, dass die graufleckige Fläche ungefähr gleiche Ausmaße hat. Auch die graufleckigen Flächen der Ritzel in Bild 4.44 und Bild 4.46 zeigen kaum sichtbare Unterschiede bezüglich der Graufleckigkeit. Somit zeigt sich wiederum, dass die Graufleckigkeit entscheidend von der Rauheit beeinflusst wird, die Kopfrücknahme jedoch nur eine Rolle bezüglich der Vermeidung des Eintrittsstoßes und des Schabens spielt. Werden der Übergang zum Einzeleingriffsbereich und die örtlich vorherrschenden minimalen Krümmungsradien betrachtet, hat der aktuelle Kopfrücknahmebetrag in der linearen Ausführung sogar einen negativen Einfluss auf die Graufleckentragfähigkeit.

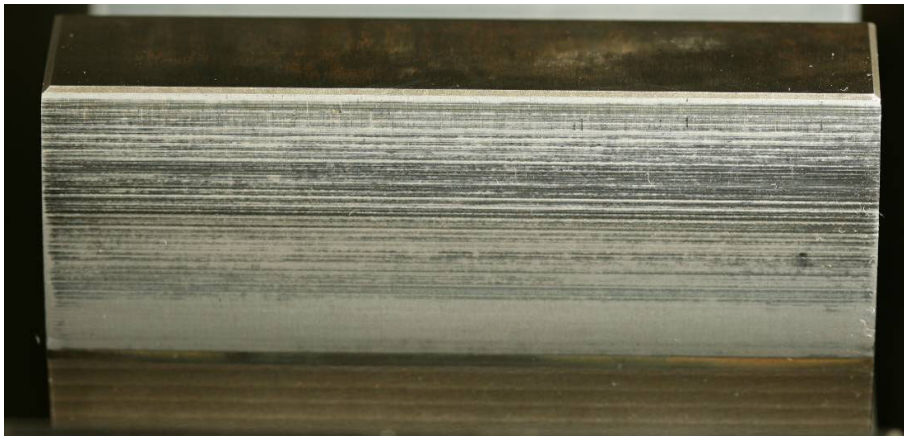


Bild 4.47: Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1213 mit einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,69 \mu\text{m}$, Seite 2, $m_n = 22 \text{ mm}$

Die am Standardgetriebe untersuchten Verzahnungen mit einer praxisnahen Profilverschiebung des Ritzels von $x_1 = 0,5$ sind in Bild 4.48 dargestellt. Die arithmetische Mittenrauheit des Radsatzes GG3 2215 beträgt $R_a = 0,5 \mu\text{m}$, der Kopfrücknahmebetrag ist $C_a = 10 \mu\text{m}$.

Zwar weist auch dieser Radsatz keine eindeutige Schabemarke auf, er besitzt jedoch zwei Graufleckenbänder im Zahnfuß. Das untere Graufleckenband weist eine Schabemarke als Initialschaden auf, denn diese Graufleckenfläche lässt sich im Evolventendiagramm mit einer spitzen dreieckigen Auskolkung in Verbindung setzen. Angrenzend an die dreieckige Auskol-

kung ist eine flache Auskolkung zu sehen. Auf dem Foto ist in diesem Bereich eine leichte Graufleckigkeit zu erkennen. Dieser Bereich geht dann in einen breiteren und deutlich sichtbaren graufleckigen Bereich über. An dieser Stelle schließt sich im Evolventendiagramm eine leicht runde Auskolkung mit einem sehr geringen Betrag an.

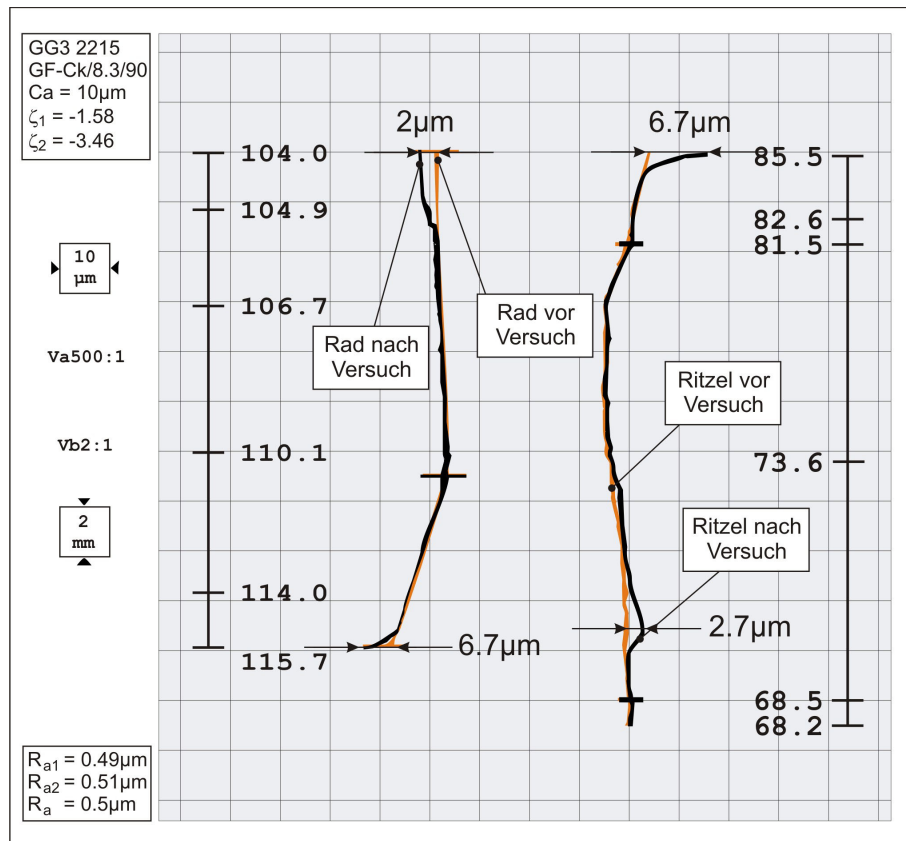


Bild 4.48: Ritzel GG3 2215: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 11 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,5$ und $x_2 = -0,1468$

Auch am Zahnkopf des Ritzels sind Graufleckenflächen zu erkennen. Diese Graufleckenfläche ist im Evolventendiagramm als Auskolkung im Bereich der Kopfrücknahme zu erahnen. Die Graufleckenfläche am Zahnkopf ergibt sich durch die veränderten Gleitverhältnisse auf der Zahnflanke. Aufgrund der Profilverchiebung herrscht nun am Zahnfuß des Rades ein

ähnliches spezifisches Gleiten wie am Zahnfuß des Ritzels der Standard–Graufleckenverzahnung. Im Zahnfuß des Rades sind deshalb auch geringfügige flache Auskolkungen zu erkennen.

Im Umkehrschluss ist zu sagen, dass das spezifische Gleiten am Zahnfuß des Ritzels mit $\zeta_1 = -1,58$ um den Faktor 2,24 geringer ist als vorher mit $\zeta_2 = -3,54$, dennoch treten Grauflecken auf. Diese Tatsache unterstreicht die Abhängigkeit der Graufleckenentstehung vom vorzeitigen Eingriff. Im Vergleich zu einem Radsatz des Vorhabens 286 II mit gleicher Kopfrücknahme und gleicher arithmetischer Mittenrauheit ist die Auskolkung von $f_{fm} = 2,7 \mu\text{m}$ sehr viel geringer als $f_{fm} = 6 \mu\text{m}$.

In Bild 4.49 links ist die Gegenradflanke dieser Radpaarung zu sehen. Hier zeigt die Kopfkante ebenfalls Spuren des vorzeitigen Eingriffes und des daraus resultierenden Schabens. Hierdurch hat die Kopfkante sichtbar gearbeitet und weist eine grau Farbe am Zahnkopf auf. Im Zahnfuß ist, korrespondierend zum Evolventendiagramm, eine graufleckige Fläche zu erkennen. Zusätzlich ist bei dieser Verzahnung am Übergang der Evolvente in die korrigierte Flanke ein graufleckiges Band zu sehen.

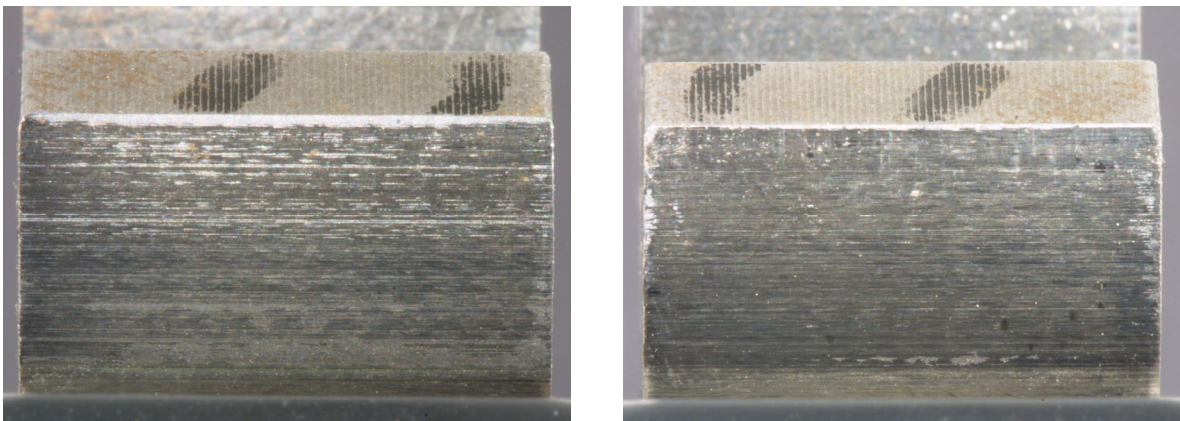


Bild 4.49: Radflanken der Verzahnung GG3 2215, links: Seite 1 mit $C_a = 11 \mu\text{m}$, rechts: Seite 2 mit $C_a = 18 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

In Bild 4.50 ist die Rückflanke des Radsatzes GG3 2215 zu sehen. Diese Prüfflanke weist eine Kopfrücknahme von $C_a = 21 \mu\text{m}$ und eine arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,41 \mu\text{m}$ auf.

Außer einer ganz leichten Graufleckenfläche am Zahnfuß des Ritzels ist auf dem Foto keine Graufleckenfläche zu erkennen. Genau in diesem Bereich ist auch im Evolventendiagramm eine kleine Auskolkung zu sehen. Hier ist ebenfalls der Vergleich mit dem Vorhaben 286 II möglich. Jedoch hatte die Verzahnung des Vorhabens 286 II mit einem ähnlichen Kopfrücknahmebetrag mit $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ eine feinere arithmetische Mittenrauheit. Trotz der geringeren Rauheit wies die alte Verzahnung eine Auskolkungstiefe von $f_{fm} = 5 \mu\text{m}$ im Vergleich zu $f_{fm} = 1,2 \mu\text{m}$ auf. Auch die Graufleckenfläche war mit 10 % deutlich ausgeprägter als die aktuelle Graufleckenfläche mit ca. 1 %.

Wird das Foto der gepaarten Radflanke in Bild 4.49 rechts betrachtet, zeigt diese Flanke, genau wie die Ritzelflanke, keine Graufleckigkeit. Nur zu Eingriffsende ist ein ganz feines Band zu sehen. Bei genauerer Betrachtung kann auch die geringfügige Abrundung der Kopfkante festgestellt werden. Im Evolventendiagramm ist dies der einzige zu erkennende Verschleiß auf der Zahnflanke.

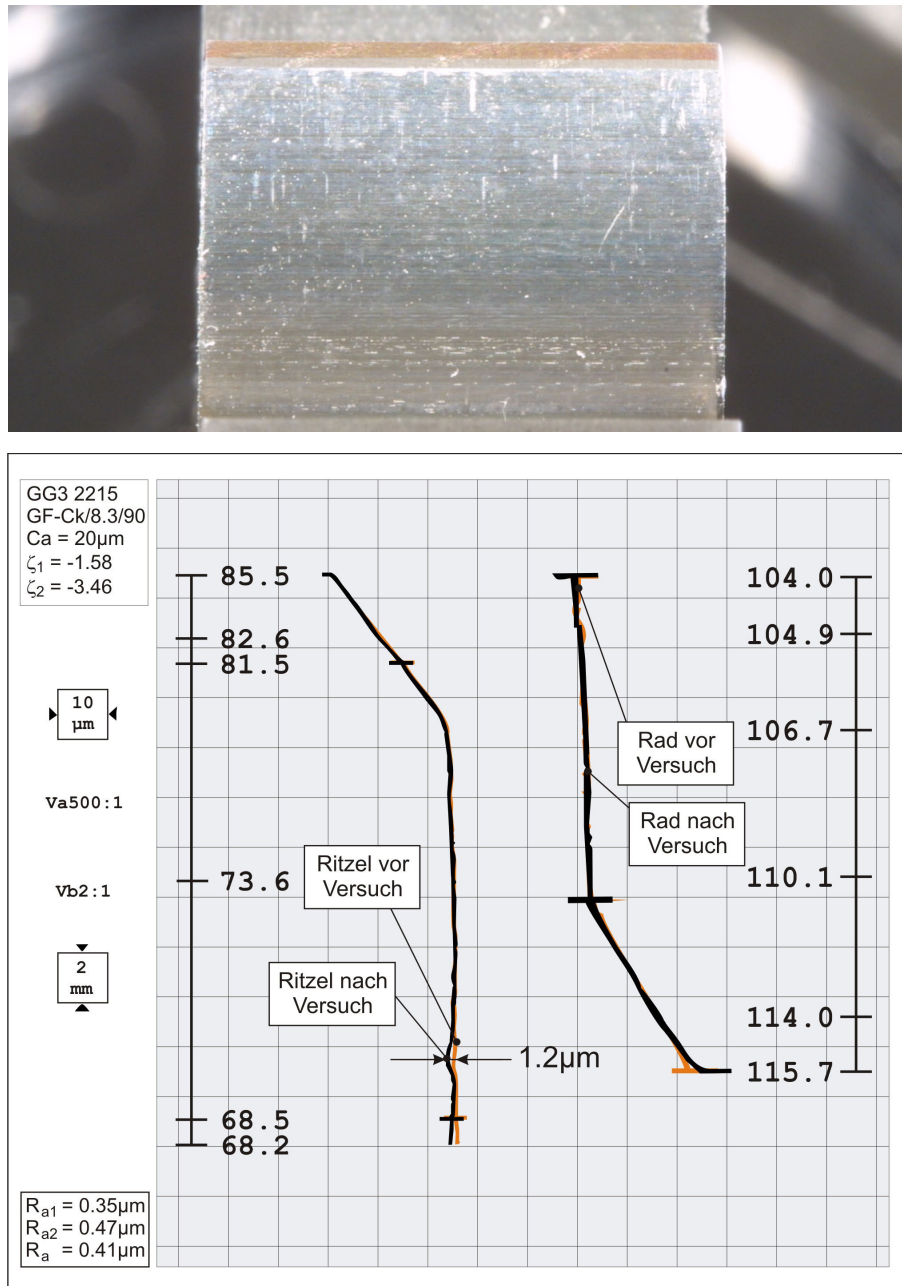


Bild 4.50: Ritzel GG3 2215: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 21 \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,5$ und $x_2 = -0,1468$

Zusätzlich zu der praxisnahen Profilverschiebung der Verzahnung GG3 2215 mit einer Profilverschiebung am Ritzel von $x_1 = 0,5$ ist eine Variante mit einer Profilverschiebung ausgewählt worden, die ein ausgeglichenes Gleitverhältnis zwischen den beiden Zahnfüßen auf-

weist. Die Profilverschiebung beträgt in diesem Fall $x_1 = 0,3532$, so dass das Ritzel die gesamte Profilverschiebungssumme als Profilverschiebung erhält und das Rad keine Profilverschiebung erfährt.

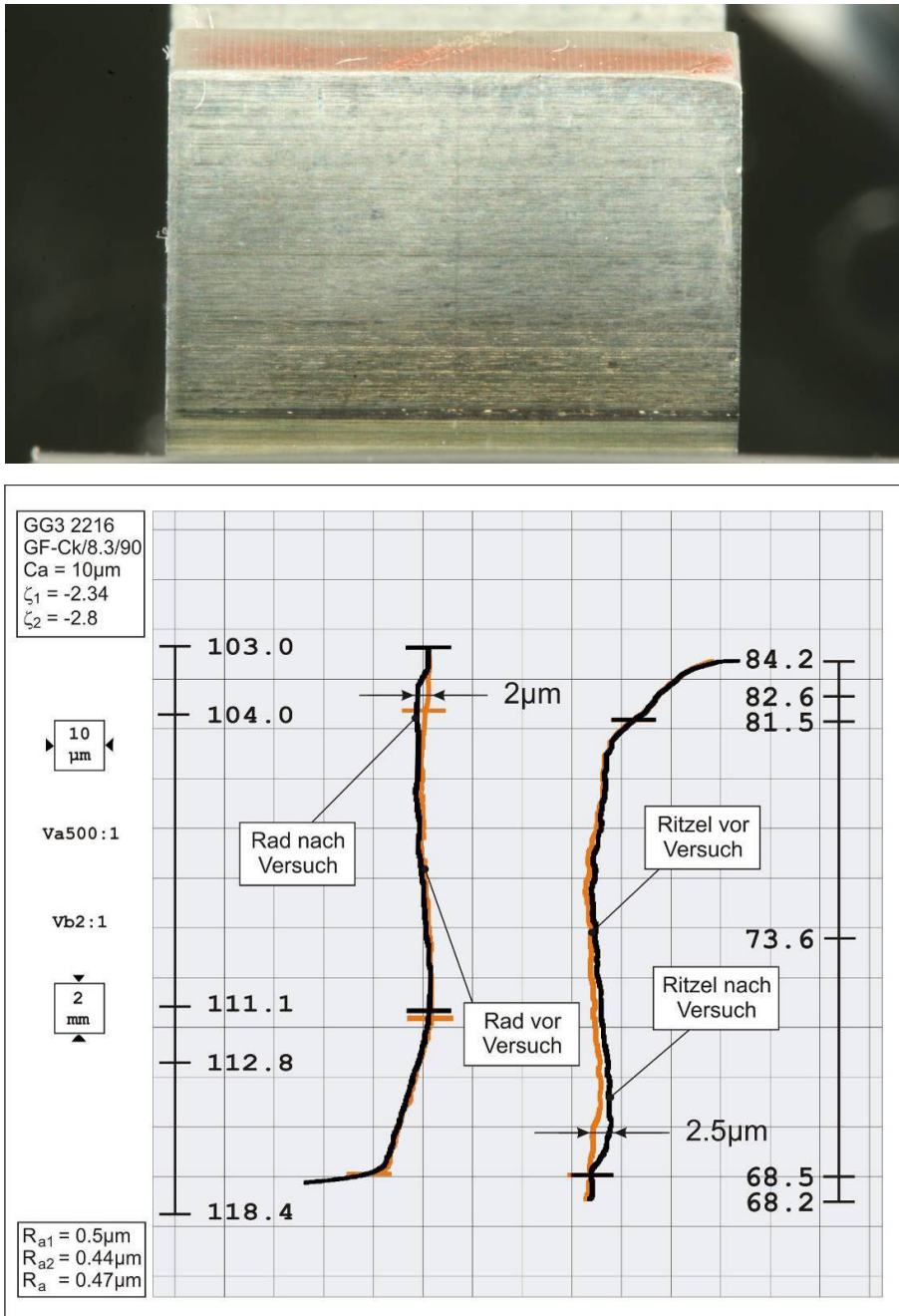


Bild 4.51: Ritzel GG3 2216: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 16 \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,3532$ und $x_2 = 0,0$

Bild 4.51 zeigt die Flanke eines Ritzelzahnes und das Evolventendiagramm der Seite 1 der Verzahnung GG3 2216. Auf der gesamten Flanke sind kaum Grauflecken zu erkennen. Im Zahnfuß des Ritzels erscheinen einige sehr dünne Bänder und es sind sehr leichte Schabemarken zu erkennen. Im Evolventendiagramm ist ein leichter Verschleiß in beiden Zahnfüßen

sichtbar. Die Beträge der Auskolkung stimmen fast überein. Dies ist auf die sehr ähnlichen Werte des spezifischen Gleitens zurückzuführen. Beide Zahnköpfe sehen kaum verändert aus, so dass kein ausgeprägter Eingriffsstoß stattgefunden hat.

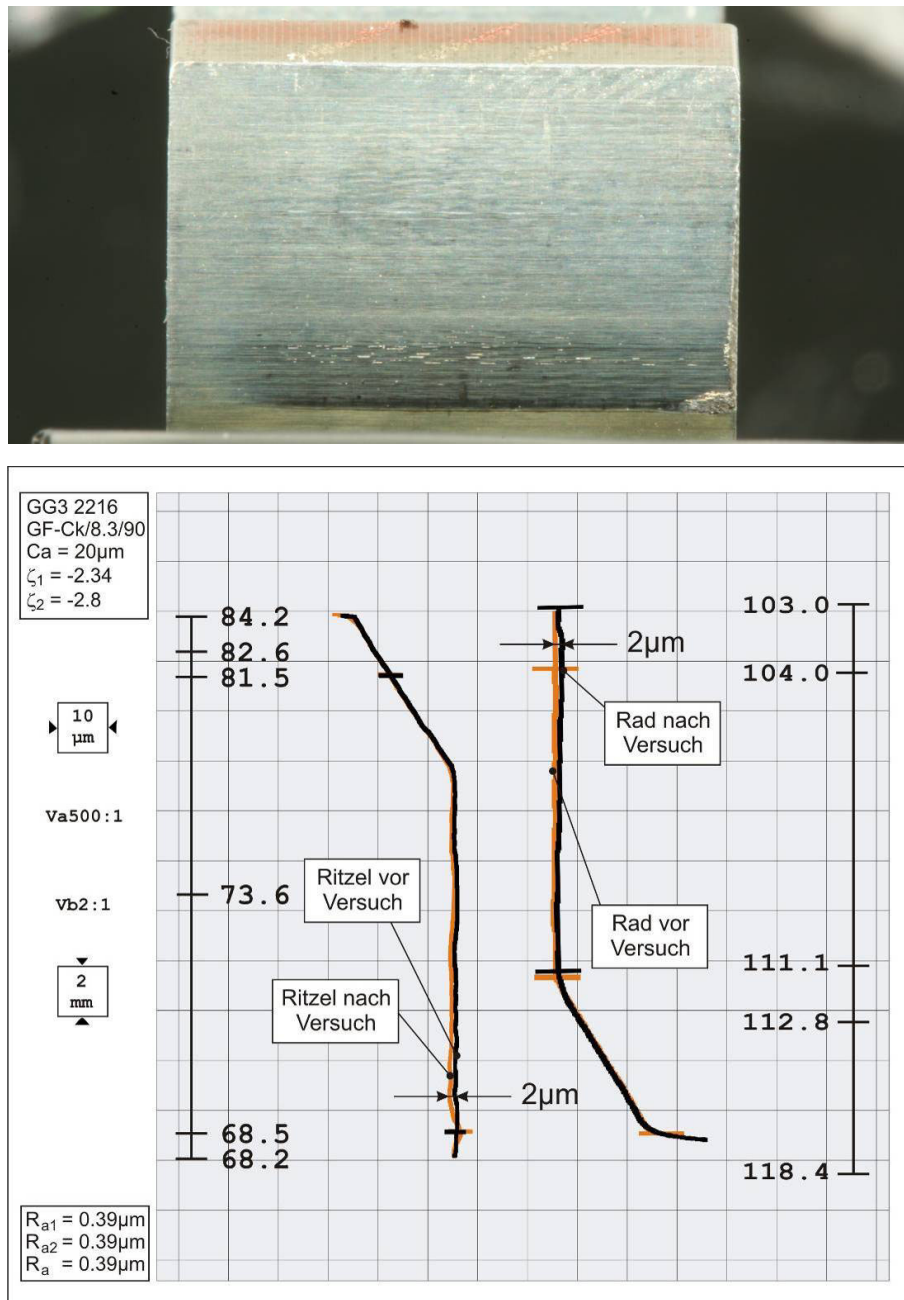


Bild 4.52: Ritzel GG3 2216: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 19\mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5\text{ mm}$ und $x_1 = 0,3532$ und $x_2 = 0,0$

Bild 4.52 zeigt die Seite 2 der Verzahnung GG3 2216 mit einem Kopfrücknahmebetrag von $C_a = 20\mu\text{m}$. Im Foto sind einige schmale graufleckige Bänder in der Entstehung, jedoch sind es tendenziell weniger Bänder als auf der Seite 1. Der größere Kopfrücknahmebetrag verhindert das Schaben des Radzahnkopfes auf der Ritzelflanke. Die Auskolkungstiefen haben die gleichen Beträge wie bei der geringeren Kopfrücknahme.

Zusammenfassung: Profilverschiebung

Grundsätzlich zeigt sich, dass eine positive Profilverschiebung und die daraus resultierende Verringerung des spezifischen Gleitens vorteilhaft für die Graufleckentragfähigkeit sind. Auch eine stärkere Kopfrücknahme zeichnet sich positiv auf die Reduktion der Graufleckenbildung aus. Hierfür verantwortlich sind sowohl die Veränderung der Pressung entlang der Eingriffsstrecke als auch das Reduzieren des Schabens im Zahnfuß des Ritzels.

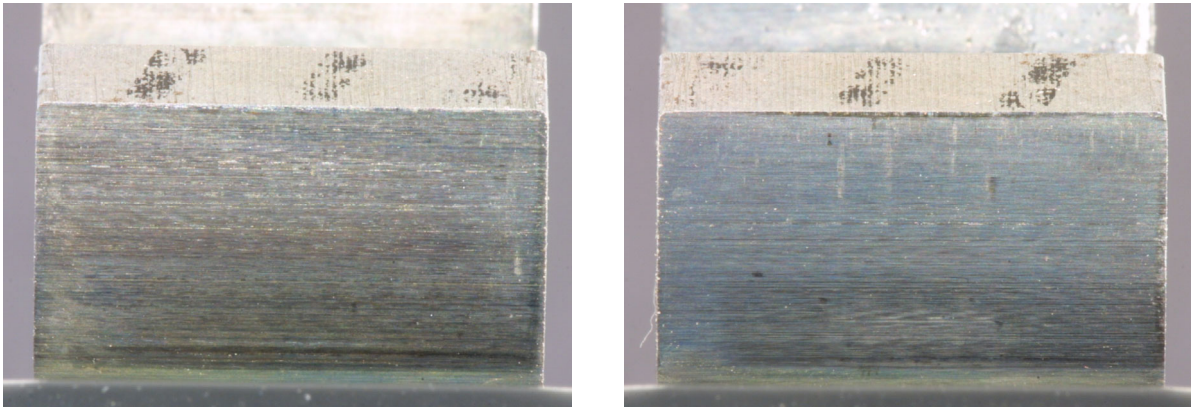


Bild 4.53: Radflanken der Verzahnung GG3 2216, links: Seite 1 mit $C_a = 10 \mu\text{m}$,
rechts: Seite 2 mit $C_a = 17 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Bild 4.53 zeigt die Radflanken der untersuchten Verzahnungen. Auf beiden Flanken ist kaum eine Auswirkung der Versuchsläufe zu erkennen. Auf diesen Bildern schwer zu sehen, ist im Zahnfuß beider Zahnflanken eine Schabemarke entstanden.

Ein Vergleich zwischen berechneten Profilformabweichungen nach FVA 259 I [S3] und den Versuchsergebnissen zeigt eine gute Übereinstimmung für die Auskolkungen im Zahnfuß der Ritzel. Im Zahnfuß des Rades sind hier jedoch sehr hohe Auskolkungstiefen zu erkennen. Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf detaillierter behandelt.

4.2.8. Einfluss von Wasser im Öl

In diesen Versuchen ist der Einfluss von gelöstem Wasser im Schmierstoff auf die Graufleckentragfähigkeit zu erforschen.

Vorversuche am Institut haben gezeigt, dass Schmierstoffe aufgrund ihrer Additivierungen unterschiedlich stark auf Wasser reagieren können. Die Erfahrungen der in der Arbeitsgruppe vertretenen Firmen gehen sehr stark auseinander. Die Vorschläge für eine geeignete Wahl des Wassergehaltes im Schmierstoff variierten von $W = 250 \text{ ppm}$ bis zu 2000 ppm .

Bei dem eingesetzten Schmierstoff handelt es sich um das Tribol 1115 additiviert mit 4 % Anglamol 99. Der Schmierstoff enthält keine PD-Additive. Das Grundöl ist mineralisch, somit liegt die Sättigungsgrenze des Schmierstoffs bei ca. $W = 700 \text{ ppm}$. Es ist das Ziel der Untersuchung, die Auswirkungen von im Schmierstoff gelöstem Wasser aufzuzeigen. Um eine hinreichende Menge Wasser im Schmierstoff zu lösen und trotzdem nicht die Sättigungs-

grenze zu überschreiten, ist ein Wassergehalt von $W = 500$ ppm in Absprache mit der Arbeitsgruppe festgelegt worden.

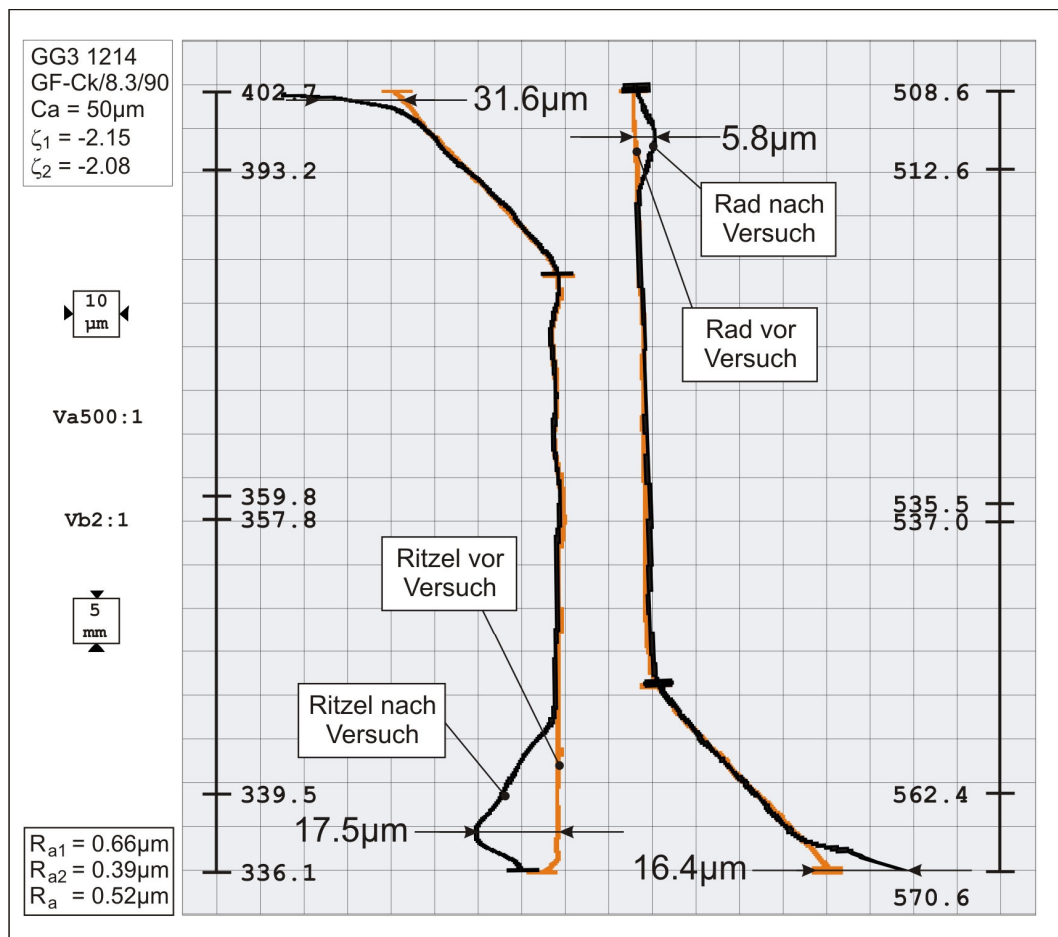
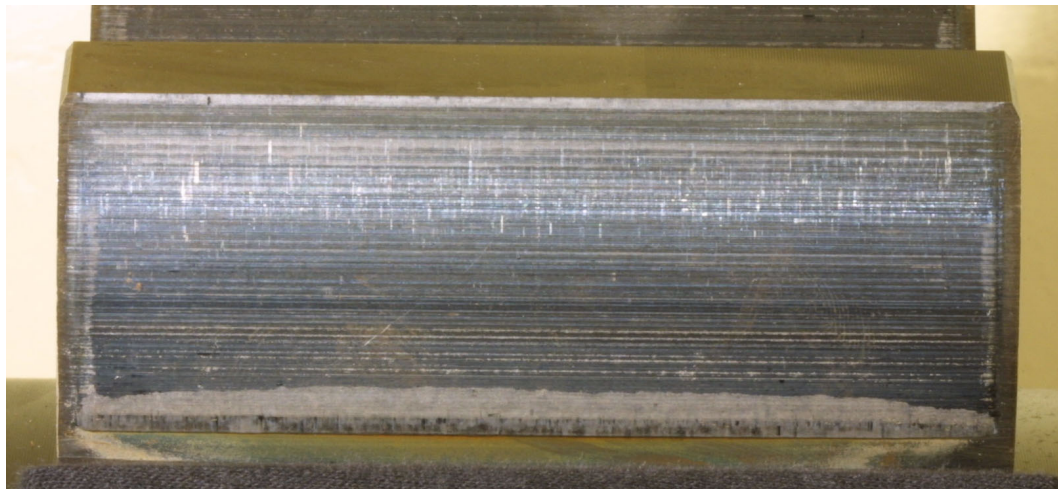


Bild 4.54: Verzahnung GG3 1214: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme von $C_a = 48,5 \mu\text{m}$, $m_n = 22$ mm und einer Profilverschiebung von $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$ am Ende des Stufentests, Laufzeit $t_{\text{Stuf}} = 6 \times 80$ h

Das Wasser wird mittels einer schrittmotorbetätigten Pumpe dem Schmierstoff hinzugefügt und die relative Feuchte wird unmittelbar in der Einspritzleitung gemessen. Die Pumpe lässt

sich auf wenige Milliliter pro Stunde einstellen. Erfahrungsgemäß ist die Wassergehaltsabnahme und somit die Wasserzufuhr lastabhängig und beträgt bei der niedrigsten Last 8 ml/h und bei der höchsten Last 18 ml/h. Für die Großtriebeversuche ist die Steuerung der Pumpe erweitert worden, so dass der Schrittmotor nach Bedarf zu- oder abgeschaltet werden kann. Die relative Feuchte wird online in der Einspritzleitung gemessen, so dass durch die Ansteuerung der Pumpe der Wassergehalt regelbar ist.

Bild 4.54 zeigt die Zahnflanke des Ritzels nach Versuchsende. Unterhalb des Bildes sind die Evolventendiagramme von Rad und Ritzel gegenübergestellt. Im Zahnfuß des dargestellten Ritzels ist eine Graufleckenfläche zu erkennen. Die Graufleckenfläche erstreckt sich über 13 % der aktiven Zahnflanke. Im Vergleich zu Versuchen mit ähnlicher arithmetischer Mittrauheit und Kopfrücknahmebeträgen liegt das Ergebnis genau in derselben Größenordnung der bisherigen Ergebnisse. Im Gegensatz zu den übrigen Versuchen ist die Graufleckenfläche nicht auf einen etwas größeren Bereich der Ritzelfußflanke verteilt, sondern örtlich sehr stark begrenzt. Bei allen bisherigen Versuchen sind auf der gesamten Zahnflanke unterschiedlich stark ausgeprägte graufleckige Bereiche zu erkennen. Zusätzlich zur Graufleckenfläche im Zahnfuß sind auch graufleckige Bereiche an der Zahnkopfkante zu erkennen.

Die Auskolkungstiefe im Zahnfuß ist jedoch mit $f_{fm} = 17,5 \mu\text{m}$ unerwartet gering. Bei dieser Kopfrücknahmevariante ist bisher aufgrund des vorzeitigen Eingriffes eine Auskolkungstiefe von mindestens $f_{fm} = 25 \mu\text{m}$ erreicht worden. Auch hier ist eine deutliche Schabemarke im Zahnfuß zu sehen. Nur Versuche mit einem abgerundeten Zahnkopf, sei es durch gezielte Korrektur oder ungewollt durch das chemisch-mechanische Gleitschleifen, erreichten ähnlich niedrige Werte.

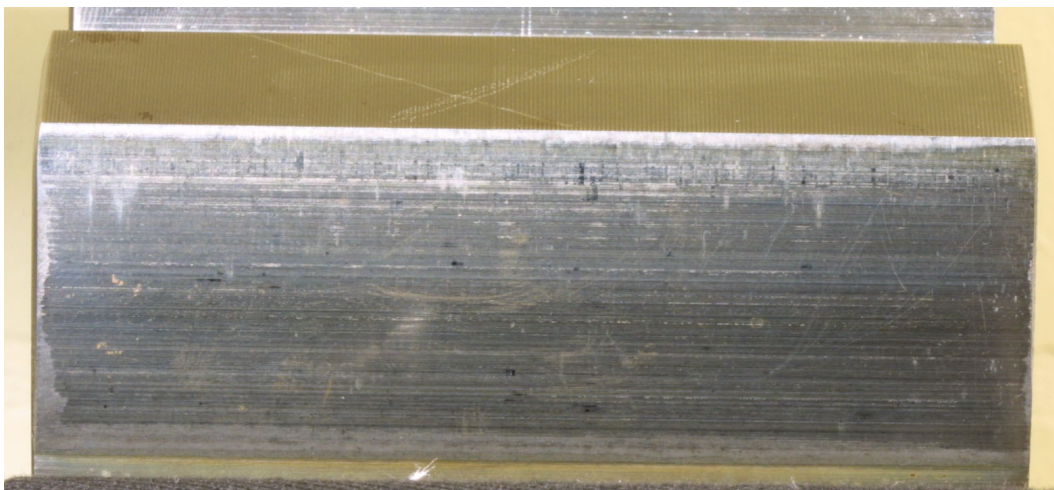


Bild 4.55: Radflanke der Verzahnung GG3 1214: Seite 1 nach Beendigung der Stufentests,
 $m_n = 22 \text{ mm}$, Laufzeit $t_{\text{Stuf}} = 6 \times 80 \text{ h}$

Auch die Ergebnisse im Zahnfuß des Rades entsprechen den Auskolkungstiefen der Versuche mit der Kopfabrundung. Bild 4.55 zeigt die Radflanke desselben Versuches. An der Rad-

flanke ist ebenfalls nur eine geringe Graufleckenfläche im Zahnfuß sichtbar. Die gesamte übrige Flanke scheint, abgesehen von der Zahnkopfkante, kaum verändert worden zu sein.

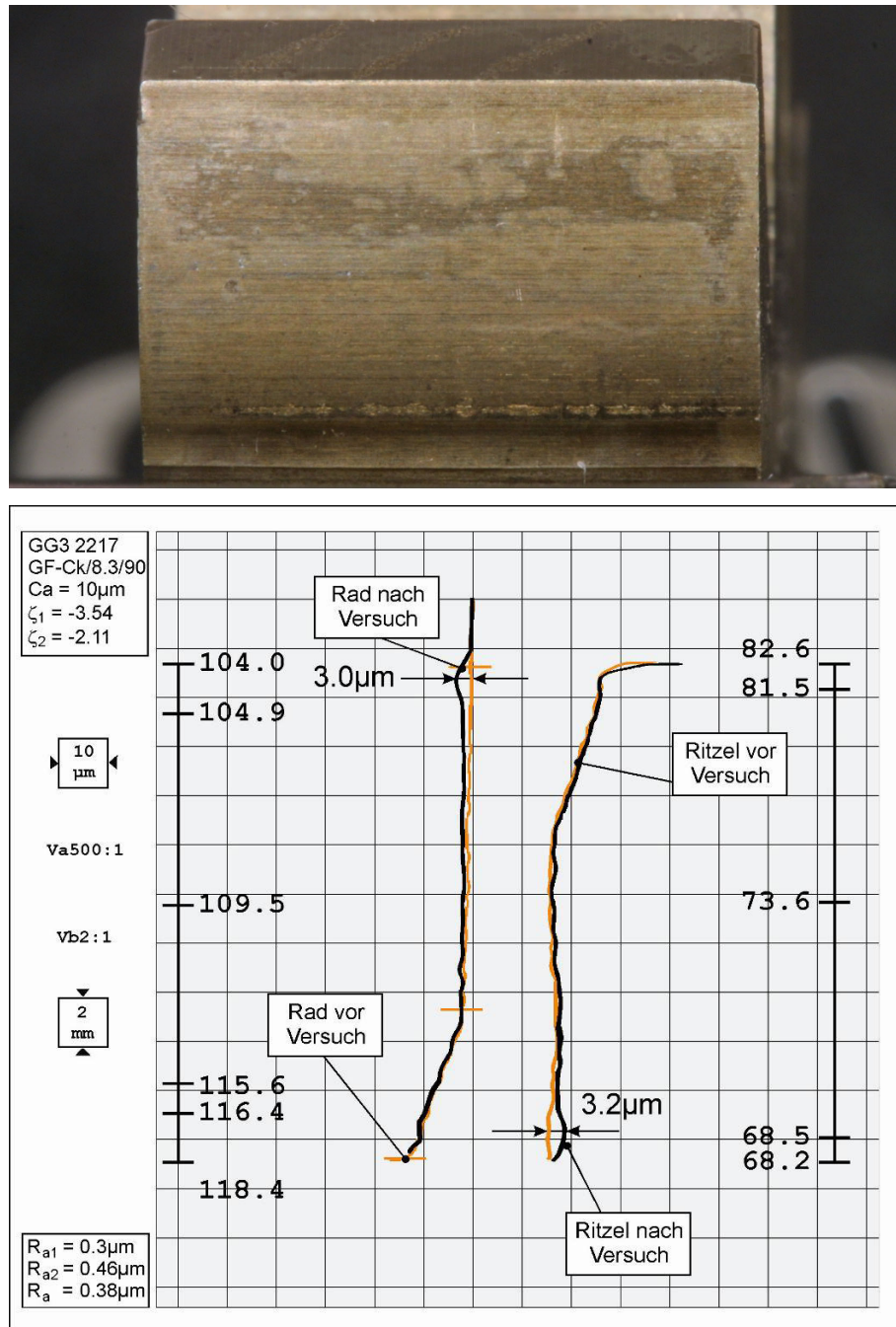


Bild 4.56: Ritzel GG3 2217: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 10 \mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Die Ritzelflanke des ersten Versuches am Standardprüfstand ist in Bild 4.56 dargestellt. Das Foto der ersten Flanke wurde erst nach dem Ende des Versuches auf der zweiten Flanke aufgenommen, so dass sich die Oberfläche der ersten Flanke während des Versuches leicht bräunlich verfärben konnte. Die Verfärbung ist eine Reaktion des Wassers mit den Additiven. Auch der Radkörper nimmt im Laufe der Versuche eine bräunliche Färbung an. Nur die abge-

deckten Bereiche der Stirnflächen des Radkörpers sind unverfärbt. Die Verfärbungen lassen sich auch durch intensive Säuberung nicht entfernen.

Im Zahnfuß ist eine dünne graufleckige Linie zu erkennen. Diese Linie ist im Evolventendiagramm als Auskolkung im Zahnfuß sichtbar. Es ist auffällig, dass sowohl Ritzel als auch Rad eine sehr niedrige Auskolkungstiefe aufweisen. Zwar ist die arithmetische Mittenrauheit mit $R_a = 0,38 \mu\text{m}$ relativ gering, aber es sollte ein nicht so großer Unterschied zwischen dem ersten und dem zweiten Versuch mit einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ vorhanden sein.

Bild 4.57 links zeigt die Zahnflanke des Rades. Auch hier hat sich die Farbe der Zahnflanke verändert. Abgesehen von der Farbe sieht die Zahnflanke insgesamt relativ unverändert und verschleißarm aus.

Das rechte Foto im Bild 4.57 zeigt die Zahnflanke des Reproduktionsversuches. Die zweite Flanke hat den Stufentest mit einer stark verfärbten Zahnflanke begonnen. Im Laufe der Versuche zeigt sich eine Veränderung der Oberfläche, und in Bereichen mit hohem spezifischem Gleiten der Zahnflanke beginnt die ursprüngliche Flankenfarbe durchzuschimmern.

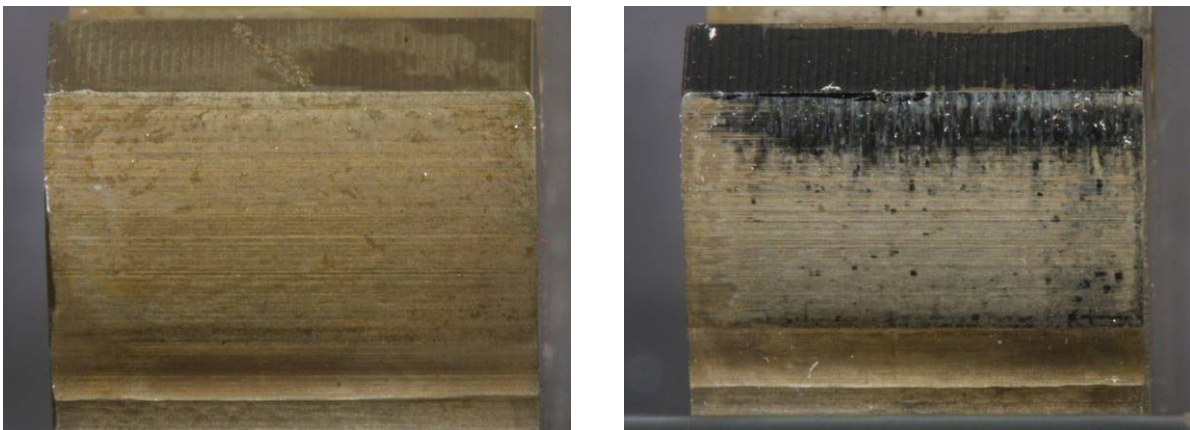


Bild 4.57: Radflanken der Verzahnung GG3 2217, links: Seite 1 mit $C_a = 10 \mu\text{m}$,
rechts: Seite 2 mit $C_a = 10 \mu\text{m}$, $m_n = 4,5 \text{ mm}$

Insbesondere der Zahnkopf des Rades und der Zahnfuß des Ritzels scheinen sehr stark beansprucht zu werden. In diesen Bereichen ist die ursprüngliche Zahnflanke wieder gut sichtbar. Die in Bild 4.58 gezeigte Zahnflanke des Ritzels verdeutlicht diese Beobachtung sehr gut.

Im Evolventendiagramm ist in den Bereichen, in denen die verfärbte Schicht abgetragen worden ist, auch ein im Vergleich zum ersten Versuch höherer Verschleiß zu erkennen. Vermutet wird eine Veränderung der oberflächennahen Schicht, die leichter abzutragen ist als die ursprüngliche Zahnflanke.

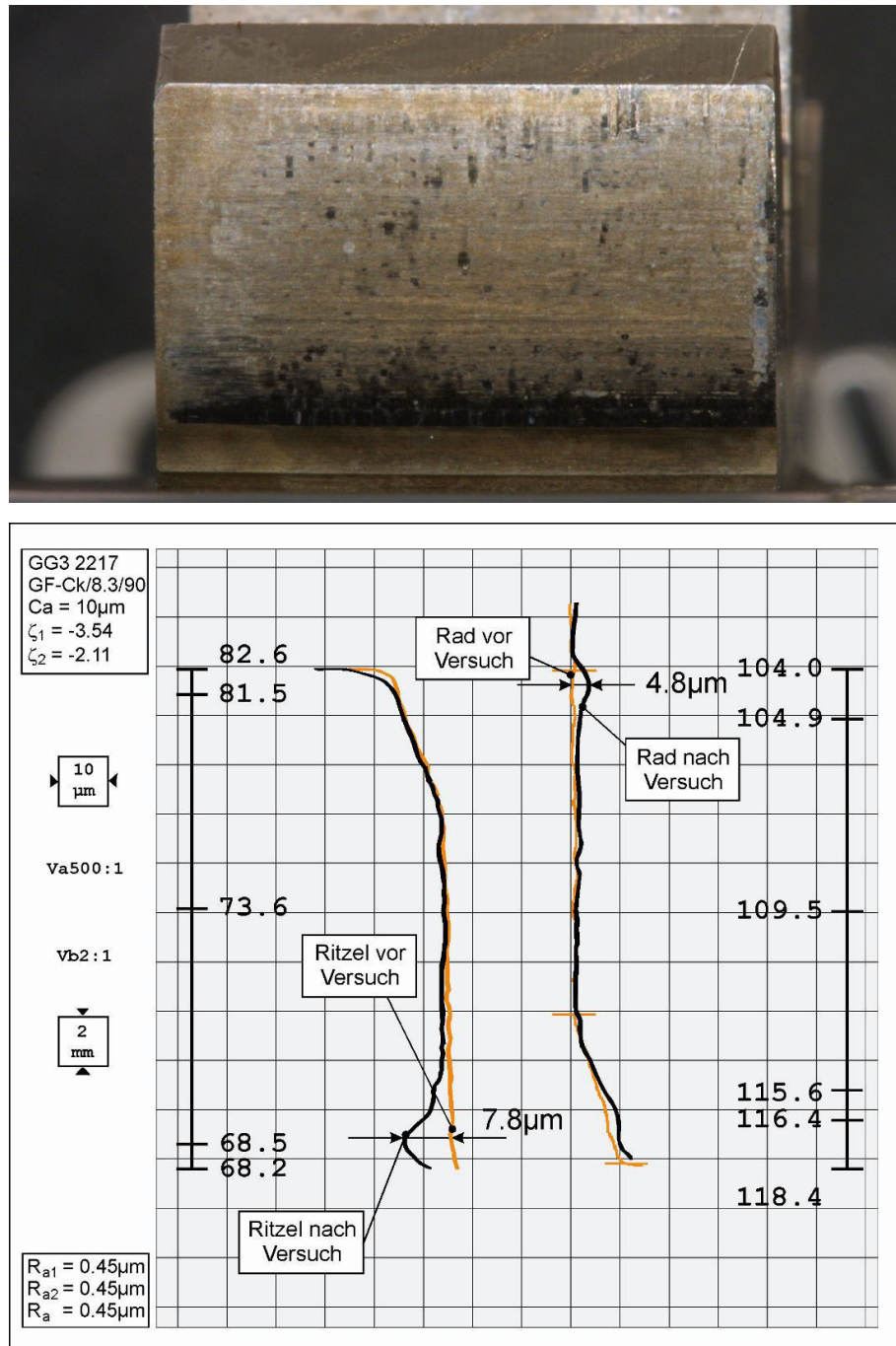


Bild 4.58: Ritzel GG3 2217: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 10\mu\text{m}$,
 $m_n = 4,5\text{ mm}$ und $x_1 = 0,1817$ und $x_2 = 0,1715$

Im Fuß des Ritzels ist im Bereich des Verschleißes auch eine Schabemarke zu erkennen. Hierzu passend ist der Zahnkopf des Rades sowohl im Evolventendiagramm als auch im Bild 4.57 stark verschlissen.

Zusammenfassung: Wasser im Öl

Zusammenfassend kann für die Versuche mit Wasser gesagt werden, dass der eingesetzte Schmierstoff sich gegenüber dem Wasser relativ unempfindlich gezeigt hat. Zwar ändert sich der Verschleiß mit zunehmender Kontaminationsdauer, jedoch nur auf der unbelasteten

Flanke. Auf der Lastflanke hat die Reaktion zwischen Additiv und Wasser keinen negativen Einfluss, da die Wirkdauer vermutlich nicht ausreichend ist.

Versuche mit in der Windkrafttechnik üblichen Schmierstoffen zeigten, je nach Additivierung, ein stark unterschiedliches Verhalten, und der Verschleiß der Zahnflanke stieg teilweise sehr stark an. Bei im Schmierstoff gelösten Wasser ist die Reaktion des Wassers mit den Additiven als kritisch anzusehen. Die Oxidation der Zahnflanke zeigt sich in den Vorversuchen bezüglich des Verschleißes als nicht besonders kritisch.

4.2.9. Einfluss des Moduls

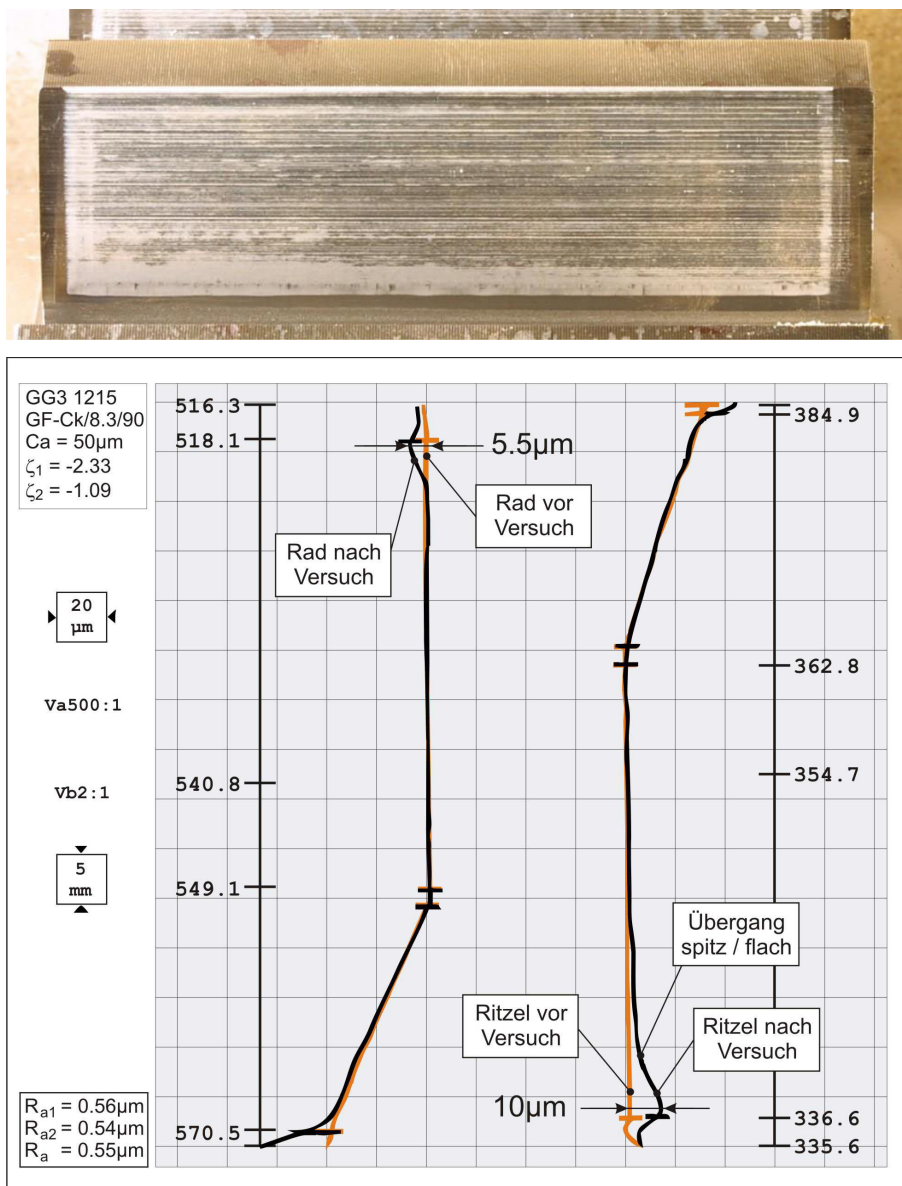


Bild 4.59: Ritzel GG3 1215: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 40 \mu\text{m}$, $m_n = 16 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,085$ und $x_2 = 0,4007$

Die Erfahrung zeigt, dass die Graufleckengefährdung am Ort des höchsten negativen spezifischen Gleitens, bei den Graufleckentests im Zahnfuß des Ritzels, am größten ist. Somit ist die Profilverchiebung des Radsatzes so gewählt worden, dass die Gleitgeschwindigkeit im Zahnfuß des Ritzels mit der der Standardverzahnungen vergleichbar bleibt. Die gemittelte arithmetische Mittenrauheit der Ritzel- und Radflanken beträgt $R_a = 0,55 \mu\text{m}$.

In Bild 4.59 ist die Seite 1 des Ritzels des Großgetrieberadsatzes GG3 1215 abgebildet. Unter dem Foto ist das Evolventendiagramm des Ritzels und des kämmenden Rades dargestellt. Das Diagramm zeigt jeweils einen Zahn vor Versuchsbeginn und einen Zahn nach Beendigung der Versuche. Die miteinander kämmenden Bereiche der Profillinien sind einander genau gegenübergestellt.

Die im Foto abgelichtete Zahnflanke hat eine lineare Kopfrücknahme von $C_a = 40 \mu\text{m}$. Im Zahnfuß des Ritzels ist deutlich eine graufleckige Fläche zu erkennen. Diese Fläche ist in zwei größere, im Laufe der Versuche wachsende, Bereiche und einen kleineren Bereich unterteilt. Die Grauflecken bedecken 21 % der aktiven Zahnflanke.

Der untere Bereich der Graufleckigkeit resultiert aus einem Schaben des Radkopfes am Zahnfuß des Ritzels. Charakteristisches Merkmal des Schabens ist eine spitze dreieckige Auskolkung [H2], wie es im Evolventendiagramm zu sehen ist.

Ein weiteres Indiz für ein Schaben der Radkopfkante ist im Profildiagramm des Rades zu entdecken. Der mit der spitzen Auskolkung des Ritzels kämmende Evolventenbereich des Rades weist eine starke Abrundung auf. Diese Fläche ist in Bild 4.60 am Kopf des Rades sichtbar und erscheint ebenfalls gräulich.

Auch am Ritzelkopf ist eine Abrundung der Kopfkante zu erkennen. Diese zusätzliche Abrundung resultiert, ebenso wie am Kopf des Rades, aus einem Schaben.

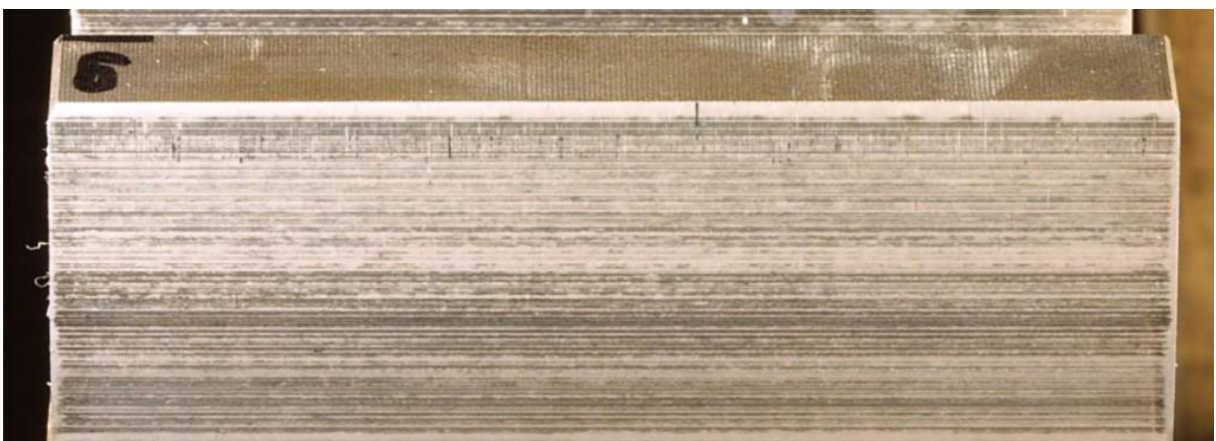


Bild 4.60: Zahnflanke des Rades der Verzahnung GG3 1215: Seite 1 lineare Kopfrücknahme $C_a = 40 \mu\text{m}$, arithmetische Mittenrauheit $R_a = 0,54 \mu\text{m}$, $m_n = 16 \text{ mm}$

Im Evolventendiagramm schließt sich an die spitze Auskolkung ein Bereich mit einer flachen Auskolkung an. Diese Auskolkungstiefe nimmt in Höhenrichtung ab, bis sie mit dem Beginn

des Einzeleingriffes minimal wird. Es ist ein Zusammenhang zwischen dem zweiten großen Bereich der Graufleckenfläche und dieser Auskolkung zu erkennen.

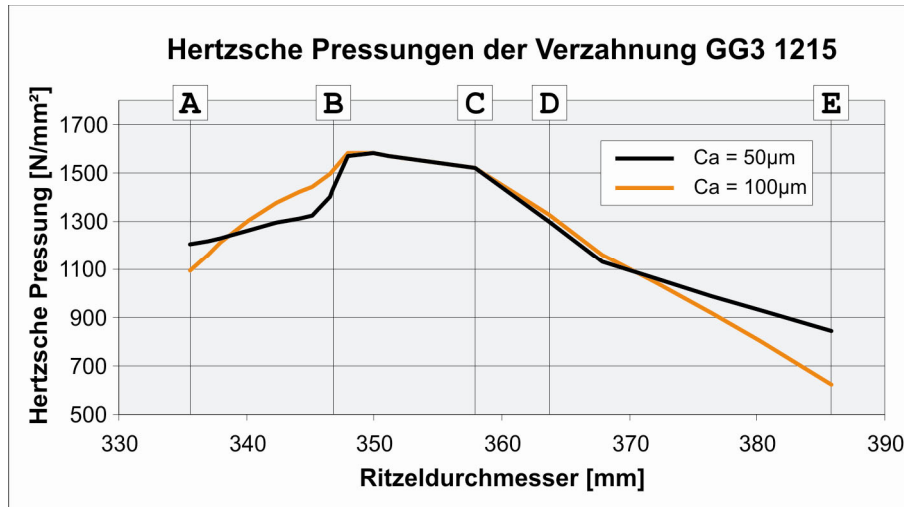


Bild 4.61: Hertzische Pressung der SKS 10 für zwei Kopfrücknahmevarianten

Die Ursache dieser Graufleckigkeit ist auf die negative Gleitgeschwindigkeit in diesem Teil der Evolvente zurückzuführen. Das spezifische Gleiten liegt kurz nach der dreieckähnlichen

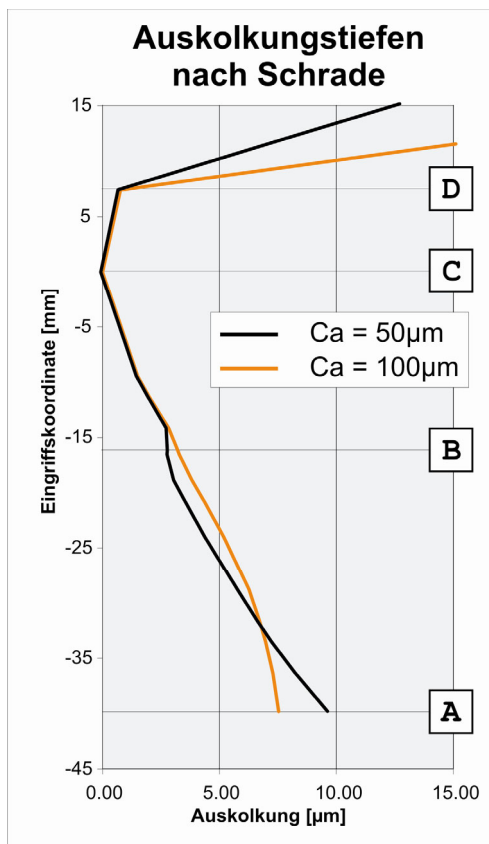


Bild 4.62: Auskolkungstiefe nach Schrade

Auskolkung bei -2 und nimmt bis zum Einzeleingriffspunkt auf $-0,5$ zu.

Der dritte Graufleckigkeitsbereich ist kurz nach dem Beginn des Einzeleingriffes zu sehen. An dieser Stelle befindet sich nach Berechnungen mit RIKOR H [O1] die höchste Pressung längst der Eingriffsstrecke. In Bild 4.61 ist der Pressungsverlauf der Schadenskraftstufe 10 eines Graufleckentests dargestellt. Zur Berechnungen des Verlaufes sind die resultierenden Auskolkungen der vorangegangenen Schadenskraftstufen als zusätzliche Korrektur berücksichtigt.

Es ist zu erkennen, dass bei der Variante mit einer Kopfrücknahme von $C_a = 50 \mu\text{m}$ noch ein sprunghafter Anstieg der Pressung stattfindet. Bei der um $C_a = 100 \mu\text{m}$ korrigierten Verzahnung erfolgt ein allmählicher Anstieg der Pressung.

Fraglich ist jedoch, ob diese Korrektur und der langsame Anstieg der Pressung die Graufleckengefährdung minimiert.

Der sprunghafte Anstieg der Pressung bei wenig korrigierten

Verzahnungen führt zu starken Spannungsgradienten im Werkstoff, die möglicherweise zu einem Initialschaden führen.

Der stetige Anstieg der Pressung bedeutet hingegen eine höhere Belastung der Zahnflanke über eine größere Strecke vor dem Einzeleingriffsgebiet. Eine höhere Pressung bedeutet nach [S3] eine höhere Auskolkungstiefe. In Bild 4.62 ist deutlich zu erkennen, dass bei einer höheren Kopfrücknahme der Absolutwert der Auskolkungstiefe zwar sinkt, jedoch über den gesamten Eingriff betrachtet, die Summe der Formabweichung steigt.

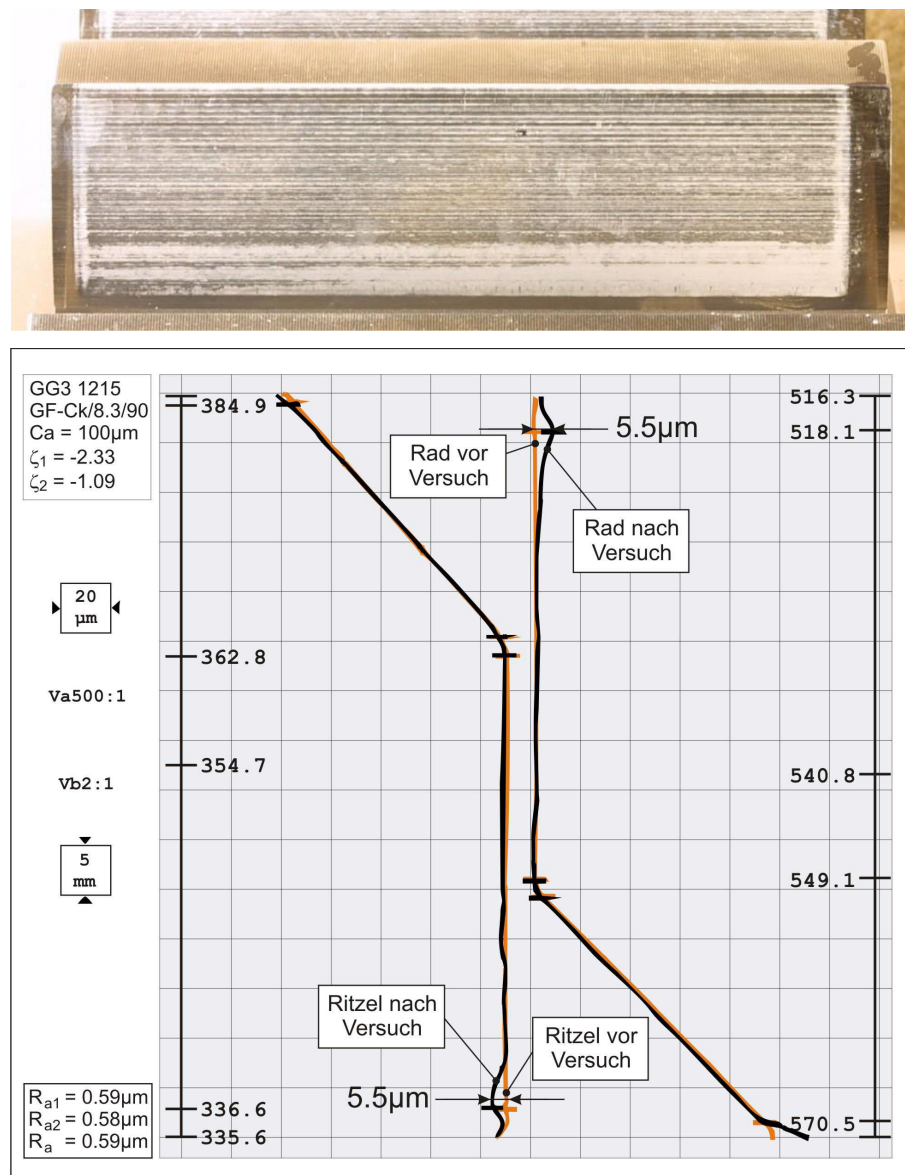


Bild 4.63: Ritzel GG3 1215: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 85 \mu\text{m}$,
 $m_n = 16 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,085$ und $x_2 = 0,4007$

Bild 4.63 zeigt das Evolventendiagramm einer Verzahnung mit einer Kopfrücknahme von $100 \mu\text{m}$ und einer Oberflächenrauheit von $R_a = 0,59 \mu\text{m}$. Trotz erhöhter Belastung im Gebiet

vor dem Einzeleingriff lässt sich eine höhere Auskolkungstiefe im Diagramm nicht feststellen. Es ist jedoch eine höhere Graufleckenbildung zu erkennen. Im Vergleich zu der Kopfrücknahme mit einem Betrag von $C_a = 40 \mu\text{m}$ ist die Graufleckenfläche stärker ausgebildet. In diesem Fall bedecken die Grauflecken 26 % der aktiven Fläche.

Auffällig ist, dass die Kopfkante des stärker korrigierten Rades keine so starke Formabweichung aufweist und die Tiefe der dreieckigen Auskolkung geringer ist. Somit kann von einem geringeren Schaben der Kopfkante ausgegangen werden. Dies bestätigen die vorangegangenen Ergebnisse der FE-Berechnungen.

Für die Versuche am Standardprüfstand ist der Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ auf $m_n = 3,27 \text{ mm}$ zu reduzieren. Anderenfalls wäre ein Einbau der Radsätze mit dem gegebenen Achsabstand des Standardprüfstandes von $a = 91,5 \text{ mm}$ und den Zähnezahlen $z_1 = 22$ und $z_2 = 33$ nicht möglich. Hierbei entspricht das Verhältnis der Moduln $22 / 16$ dem Verhältnis von $4,5 / 3,27$. Der zweite Radsatz mit dem kleinen Modul wird genutzt, um Untersuchungen mit einer anderen Profilverschiebung durchzuführen.

Die Profilverschiebung des ersten Radsatzes entspricht der der Verzahnung mit dem Modul von 16 mm . Beim zweiten Radsatz ist die prozentuale Profilverschiebungsaufteilung mit der der GF-Ck Verzahnung identisch, was zu niedrigen Gleitgeschwindigkeiten führt.

Für die Berechnung der Auskolkungstiefe nach [S3] ist die relative Schmierfilmdicke der am stärksten gewichtete Faktor. Die Schmierfilmdicke ergibt sich aus dem Quotienten der minimalen Schmierfilmdicke und der arithmetischen Mittenrauheit der Oberflächen. Zum Erreichen der relativen Schmierfilmdicke der GF-Ck Verzahnung ist eine Oberflächenrauheit von $R_a = 0,45 \mu\text{m}$ gewählt worden. In Tabelle 4.7 sind die erreichten Rauheiten aufgestellt. Es ist zu erkennen, dass die arithmetischen Mittenrauheiten nur in einem Fall innerhalb der zulässigen Abweichung von $\pm 0,05 \mu\text{m}$ liegen.

Tabelle 4.7: Arithmetische Mittenrauheiten der Prüfverzahnungen, Modul $3,27 \text{ mm}$

	SG3 2218		SG3 2219	
	Seite 1	Seite 2	Seite 1	Seite 2
Ritzel [μm]	0.69	0.62	0.70	0.48
Rad [μm]	0.51	0.39	0.46	0.44
Mittelwert [μm]	0.60	0.51	0.58	0.46

Die höheren Rauheiten bedeuten eine kleinere Schmierfilmdicke und somit eine höhere berechnete Auskolkungstiefe. Die einzelnen Seiten der jeweiligen Verzahnungen haben identische Kopfrücknahmen und, wie in Tabelle 4.7 zu sehen, auch Rauheiten auf ähnlichem Niveau. Das bedeutet, dass der Einfluss der Profilverschiebung weiterhin ohne eine Gewichtung der Rauheit für jede Seite erschließbar ist.

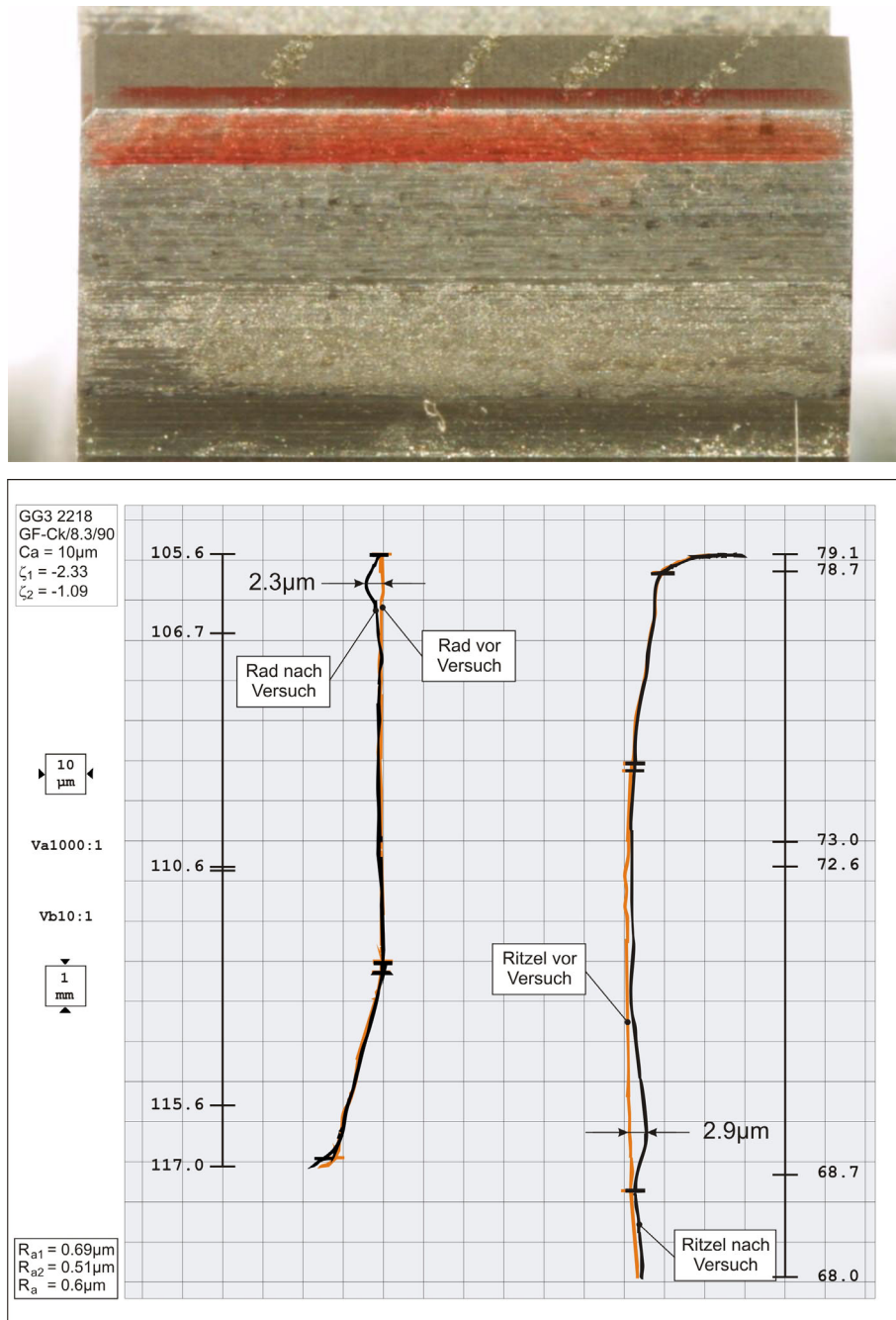


Bild 4.64: Ritzel GG3 2218: Seite 1 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 9 \mu\text{m}$

$$m_n = 3,27 \text{ mm und } x_1 = 0,085 \text{ und } x_2 = 0,4007$$

Bild 4.64 zeigt die Zahnflanke der Seite 1 des Radsatzes GG3 2218. Diese Flanke hat eine lineare Kopfrücknahme von $C_a = 10 \mu\text{m}$ und eine anfängliche arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,69 \mu\text{m}$. Wird die Rauheit der Ritzelflanke mit der Radflanke arithmetisch gemittelt, ergibt sich eine Rauheit von $R_a = 0,6 \mu\text{m}$ für beide Flanken zusammen.

Es ist zu erkennen, dass sich die Graufleckigkeit vom Zahnfuß bis zum Wälzkreis ausgebreitet hat. Nach Beendigung des Versuches beträgt die Graufleckigkeit 28 % der aktiven Flankenflächen. Im Evolventendiagramm erstreckt sich genau über dem Gebiet der Graufleckenfläche eine Auskolkung. Die Tiefe der Auskolkung hat im Zahnfuß ein Maximum und nimmt

in Wälzrichtung ab. Im Übergang zum Einzeleingriffsgebiet besteht zusätzlich ein Auskolkungsminimum. Das Minimum ist auch als schmaler Streifen innerhalb der Graufleckigkeit zu beobachten. Es kommt zu einem sehr leichten Schaben, denn der Zahnkopf des Rades ist nur minimal abgetragen worden. Das entspricht der nicht so spitz und tief ausgeprägten Auskolkung im Zahnfuß.

Die Gegenradflanke, in Bild 4.65 links dargestellt, zeigt im Zahnfuß ein dünnes Band aber keine deutliche Graufleckenfläche. Eher im mittleren Drittel der Zahnflanke ist Graufleckigkeit zu erkennen. Zu diesem Bereich auf der Zahnflanke ist im Evolventendiagramm kein Verschleiß zu sehen. Jedoch ist die leicht abgerundete Kopfkante sowohl im Evolventendiagramm als auch auf dem Foto sichtbar.

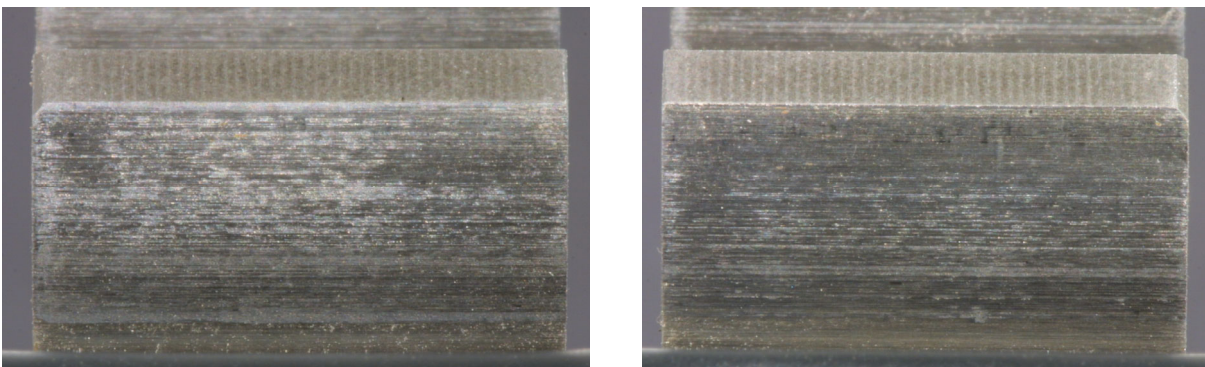


Bild 4.65: Radflanken der Verzahnung GG3 2218, links: Seite 1 mit $C_a = 11 \mu\text{m}$,
rechts: Seite 2 mit $C_a = 22 \mu\text{m}$, $m_n = 3,27 \text{ mm}$

Bild 4.66 zeigt die Seite 2 der Verzahnung GG3 2218. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit der Flanke beträgt $R_a = 0,62 \mu\text{m}$. Die lineare Kopfrücknahme dieser Flanke beträgt $C_a = 21 \mu\text{m}$. Die gemittelte Oberflächenrauheit der Rad- und Ritzelflanke beträgt $R_a = 0,51 \mu\text{m}$. Entsprechend der Rauheiten kommt es mit 7 % der aktiven Flanke zu einer kleinen Graufleckenflächenbildung. Mit den besseren Oberflächenrauheiten treten dementsprechend auch geringere gemessene Auskolkungstiefen auf. Die Auskolkungstiefe erstreckt sich bis zum Beginn des Einzeleingriffes. Zusätzlich ist anzumerken, dass kein Schaben im Fußbereich des Ritzels auftritt, und es folglich zu keiner Abrundung des Radkopfes kommt.

Bild 4.65 rechts zeigt die Gegenflanke der vorgestellten Verzahnung. Auf diesem Foto ist die Graufleckigkeit auch nur in dünnen Bändern zu erkennen. Am deutlichsten ist die Graufleckigkeit im Bereich des äußeren Einzeleingriffspunktes, also in Richtung des Zahnfußes, sichtbar. Im Zahnfuß des Rades ist keine Schabemarke bemerkbar.

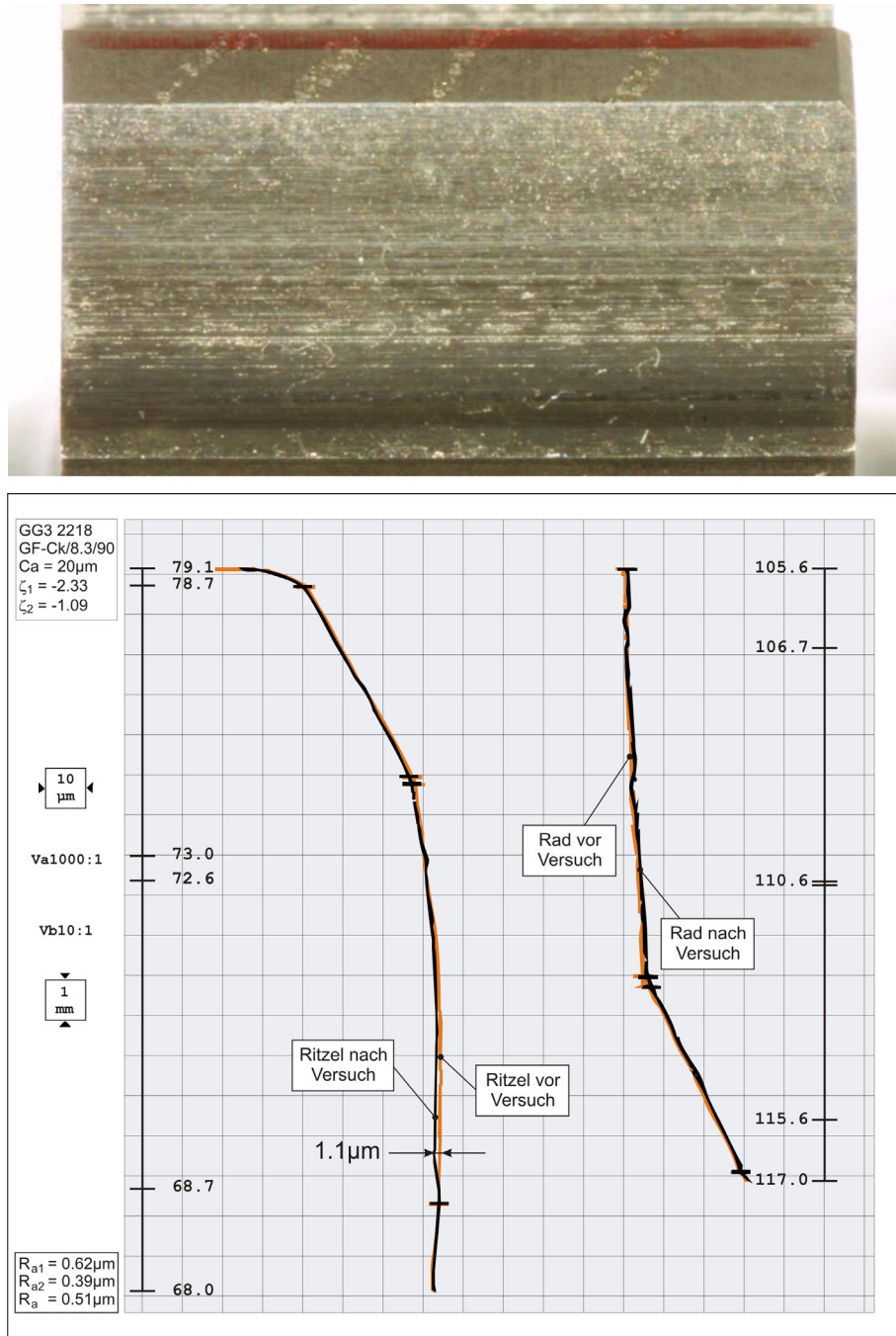


Bild 4.66: Ritzel GG3 2218: Seite 2 mit einer linearer Kopfrücknahme $C_a = 21 \mu\text{m}$
 $m_n = 3,27 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,085$ und $x_2 = 0,4007$

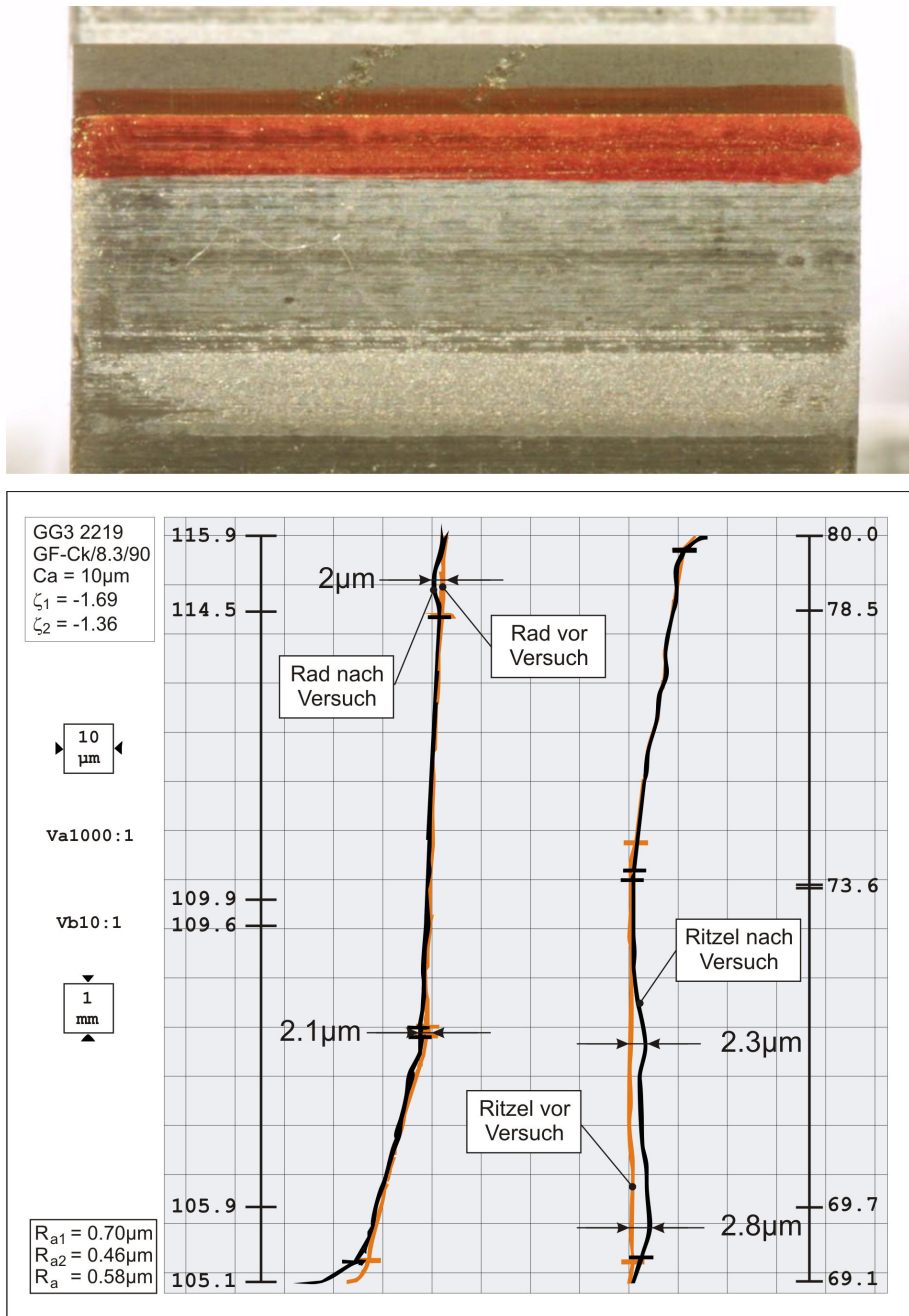


Bild 4.67: Ritzel GG3 2219: Seite 1 mit einer linearer Kopfrücknahme $C_a = 10 \mu\text{m}$
 $m_n = 3,27 \text{ mm}$ und $x_1 = 0,2498$ und $x_2 = 0,2358$

Im Profilliniendiagramm der Verzahnung GG3 2219 mit einer Kopfrücknahme von $C_a = 10 \mu\text{m}$ und einer arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,7 \mu\text{m}$, in Bild 4.67 dargestellt, ist eine Auskolkung vom Beginn der Eingriffsstrecke bis kurz nach dem Beginn des Einzelingriffes zu erkennen. Die Auskolkungsform kann als rechteckähnlich angesehen werden. Demgegenüber ist am Kopf des Rades eine Abrundung identifizierbar. Auch ist am Beginn der Kopfrücknahme eine Auskolkung zu sehen.

Die graufleckige Fläche erstreckt sich vom Zahnfuß des Ritzels bis zum Wälzpunkt und nimmt eine Fläche von 29 % der aktiven Zahnflanken ein.

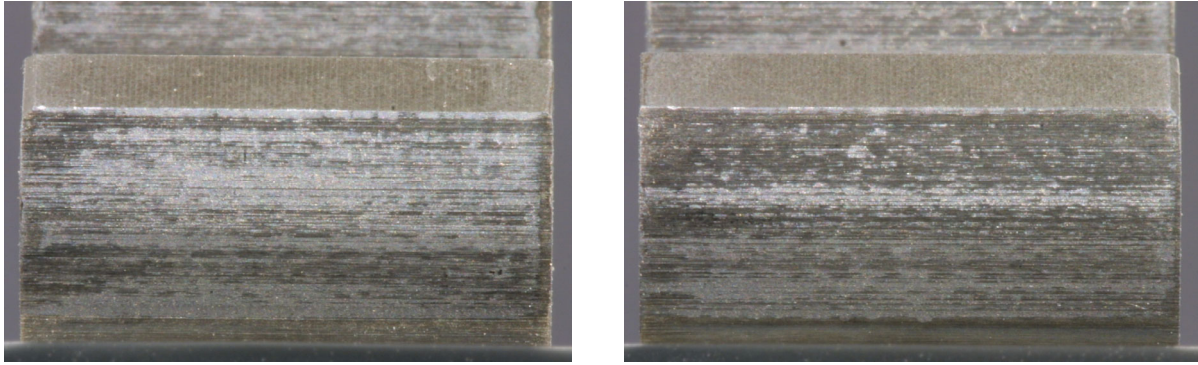


Bild 4.68: Radflanken der Verzahnung GG3 2219, links: Seite 1 mit $C_a = 9 \mu\text{m}$,
rechts: Seite 2 mit $C_a = 21 \mu\text{m}$, $m_n = 3,27 \text{ mm}$

Mit 9 % graufleckenbedeckter Zahnflanken beendet die Verzahnung GG3 2219 die Versuche auf der Seite 2. Die Kopfrücknahme dieser Flanke beträgt $C_a = 20 \mu\text{m}$, die arithmetische Mittenrauheit des Prüfradsatzes beträgt zu Versuchsbeginn $R_a = 0,46 \mu\text{m}$. Im Evolventendiagramm in Bild 4.69 ist nur eine Auskolkung im Bereich des Beginns des Einzeleingriffes zu erkennen, jedoch keine im Zahnfuß. Die Position der Graufleckenfläche entspricht der Position der Auskolkung.

Im Foto ist eine sehr leichte Graufleckigkeit im Zahnfuß zu erkennen. Demgegenüber ist die Kopfkante des Rades in Bild 4.68 rechts zu sehen. Die Kopfkante hat leicht gearbeitet und weist in der Mitte der Verzahnung eine leichte Abrundung auf. Im Vergleich zur Ritzelflanke ist die Radflanke stärker graufleckig.

Die stärkste Graufleckenbildung ist im Bereich des Korrekturbeginns zu sehen. Im Evolventendiagramm ist auf diesem Durchmesser auch Verschleiß zu erkennen. Insgesamt ist im inneren Einzeleingriffspunkt, sowohl auf der Ritzel- als auch auf der Radflanke, graufleckenbedingter Verschleiß zu erkennen.

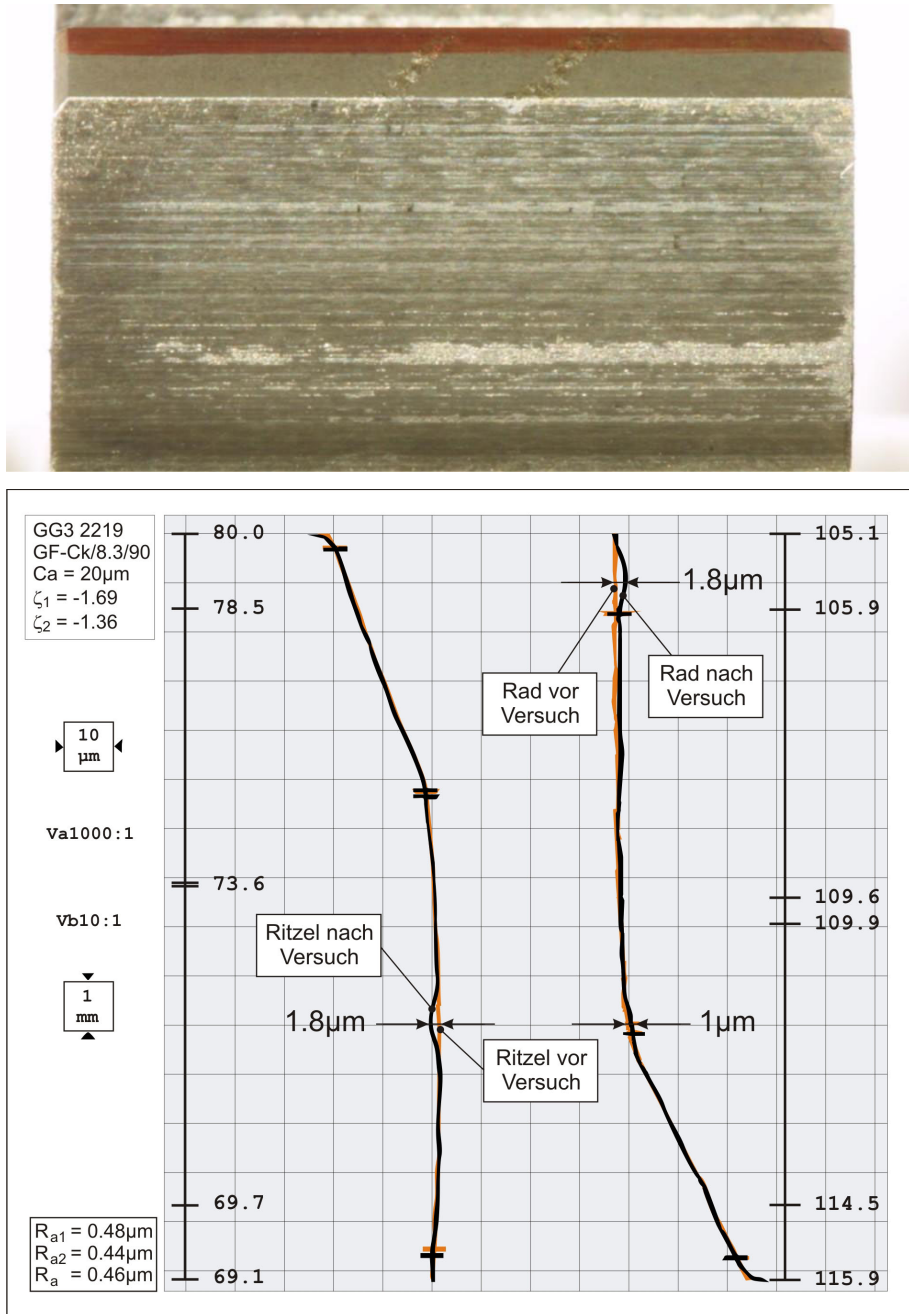


Bild 4.69: Ritzel GG3 2219: Seite 2 mit linearer Kopfrücknahme $C_a = 20\mu\text{m}$
 $m_n = 3,27\text{ mm}$ und $x_1 = 0,2498$ und $x_2 = 0,2358$

4.2.10. Zusammenfassung der Stufentestergebnisse

Das Säulendiagramm im Bild 4.70 zeigt die erzielten Ergebnisse aller untersuchten Verzahnungen. In grauer Farbe dargestellt ist die Auskolkungstiefe und in orangener Farbe die Graufleckenfläche.

Im Vergleich zur Standardverzahnung ohne Kopfrücknahme reduzieren alle untersuchten Versuchsgrößen die Graufleckenfläche. Erwartungsgemäß wirken sich eine niedrige Oberflächenrauheit, wie bei den gleitgeschliffenen Radsätzen, und ein geringer Absolutwert des spezifischen Gleitens, wie bei den profilverschobenen Radsätzen, positiv auf die Reduzierung der

Graufleckenfläche aus. Die Versuche mit durch Wasser kontaminiertem Schmierstoff lassen keine genaue Auswertung der Graufleckenfläche zu, da die Zahnflanken eine starke Verfärbung aufweisen. Die Verzahnungen mit einem Modul von $m_n = 3,27$ mm weist eine größere Graufleckenfläche auf als alle anderen korrigierten Verzahnungen. Die Größe der Graufleckenfläche ist mit der höchsten Rauheit der untersuchten Verzahnungen zu begründen.

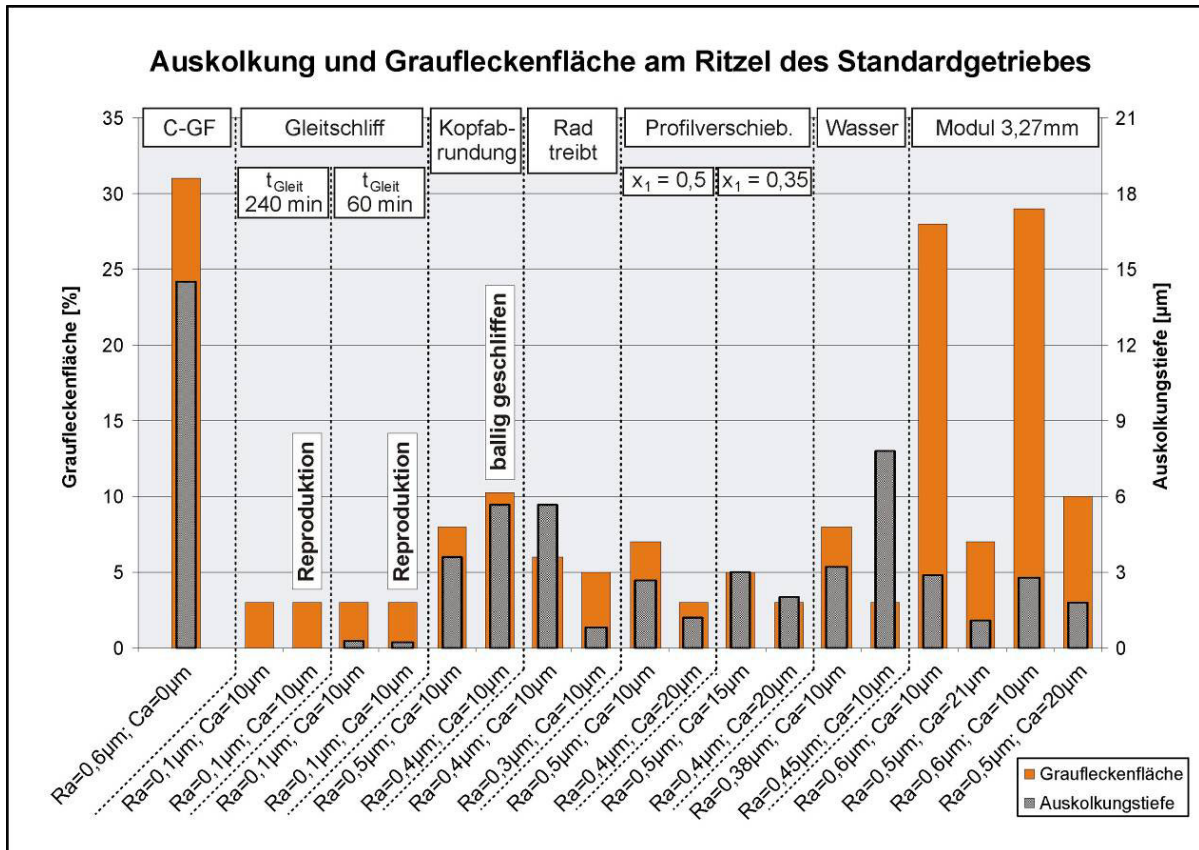


Bild 4.70: Auskolkung und Graufleckenfläche nach Versuchsende am Standardgetriebe

Kopfrücknahmen führen durch die Abschwächung des vorzeitigen Eingriffes zu einer Reduzierung der Auskolkungstiefe. Die additive Kopfabrundung reduziert bei ähnlichen arithmetischen Mittenrauheiten deutlich die Auskolkungstiefe im Vergleich zu einer einfachen linearen Kopfrücknahme. Da durch das chemisch-mechanische Gleitschleifen die Zahnköpfe ebenfalls abgerundet werden, ist hier auch ein sehr positiver Effekt auf die Auskolkungstiefe zu erkennen. Bei einem treibenden Rad verschiebt sich das Maximum der Auskolkung aufgrund des vorzeitigen Eingriffes in den Zahnfuß des Rades. Die Steifigkeit der Verzahnung ist bei der aus dem Eingriff herausdrehenden Verzahnung höher als bei einem treibenden Ritzel. Aus diesem Grund sind die absoluten Auskolkungstiefen niedriger als beim treibenden Ritzel.

Die Ergebnisse des Großgetriebes können am Standardgetriebe gut reproduziert werden. Die Zusammenfassung der Ergebnisse des Großgetriebes sind in Bild 4.71 zu sehen. Alle Ergebnisse bestätigen, dass durch die Verringerung des vorzeitigen Eingriffes die Auskolkungstiefe

reduziert. Jedoch zeigt sich, dass sich der vorzeitige Eingriff bezüglich der Auskolkungstiefe im Vergleich zur Rauheit mit zunehmendem Achsabstand stärker bemerkbar macht.

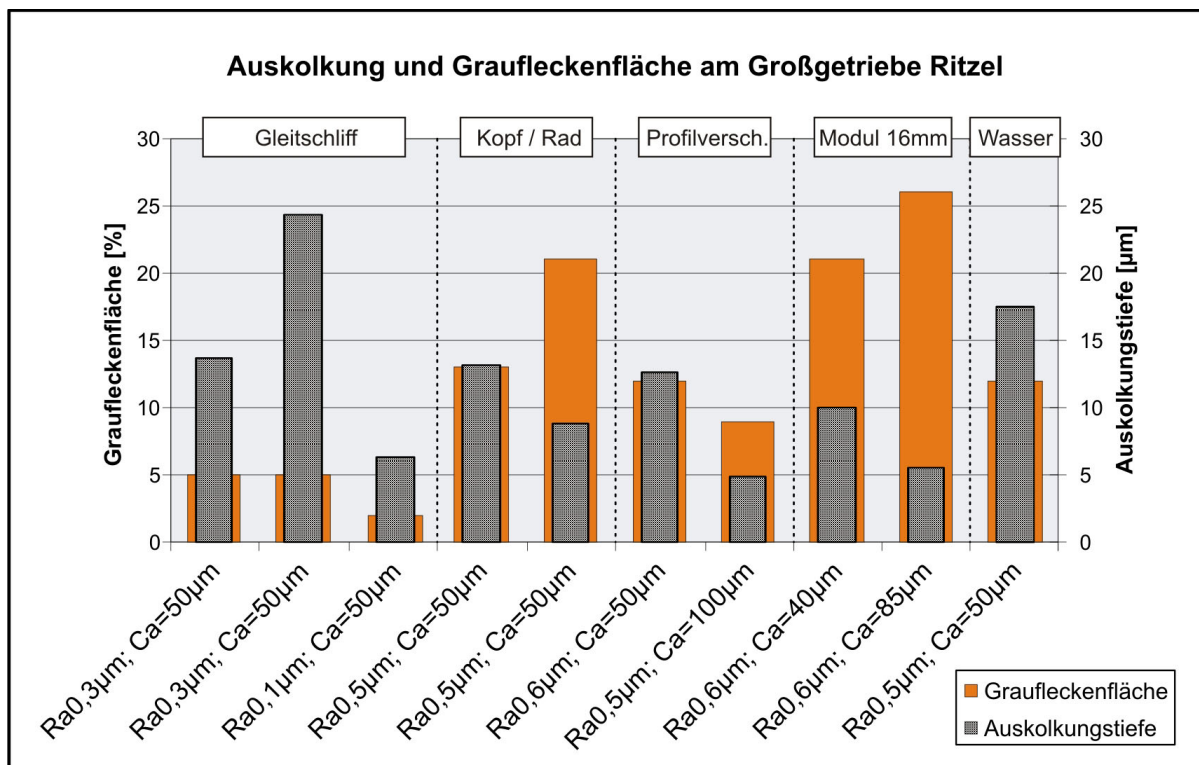


Bild 4.71: Auskolkung und Graufleckenfläche nach Versuchsende am Großgetriebe

4.2.11. Zusammenfassung der Dauertestergebnisse

Die in den Dauertests untersuchten Verzahnungen wiesen am Großgetriebe keine lange Lebensdauer auf. Die chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Radsätze vielen mit Grübchenschäden aus und die Verzahnung zur Untersuchung des treibenden Rades erlitt einen Zahnfußbruch ausgehend von der Passfedernut.

Die Versuche am Standardgetriebe korrelierten sehr gut mit den Ergebnissen des Großgetriebes. Hierbei vielen alle Versuche der chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Verzahnungen ebenfalls mit einem Grübchenschaden aus. In diesen Versuchen konnte gezeigt werden, dass Verzahnungen, welche keine Graufleckigkeit aufweisen und nicht ausreichend korrigiert sind sehr stark Grübchengefährdet sind.

Da die Verzahnungen aus einer Werkstoffcharge hergestellt worden sind, kann der Versuch des treibenden Rades am Standardgetriebe zeigen, dass es sich bei den Grübchenversagen nicht um einen Werkstofffehler handelte. Diese Variante beendete den Versuch ohne Grübchenschaden, jedoch mit einer großen Graufleckenfläche.

4.3. Beschreibungen der Verschleißformen und ihrer Ursachen

Die Ergebnisse der Laufversuche ermöglichen eine differenzierte Betrachtungsweise der Entstehungsmechanismen der Graufleckigkeit und der damit einhergehenden Auskolkung. Die auftretenden Auskolkungsformen, bedingt durch unterschiedliche Kopfrücknahmen und Gleitgeschwindigkeiten, lassen einen Versuch der Erklärung der Entstehung der Graufleckigkeit und der damit verbundenen Auskolkungen zu.

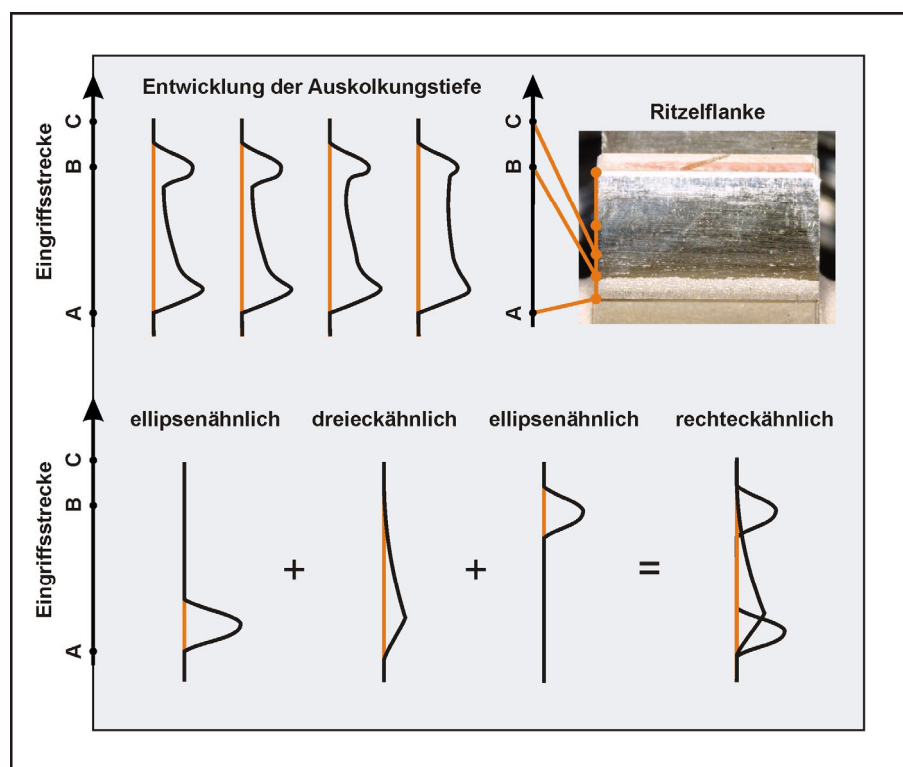


Bild 4.72: Mögliche Auskolkungsformen im Zahnfuß eines graufleckigen Zahnrades

Die im Vorhaben beobachteten Verschleißformen im Zahnfuß des treibenden Rades sind in Bild 4.72 dargestellt. Oben rechts im Bild ist eine Zahnflanke mit einer graufleckigen Fläche im Zahnfuß gezeigt. An der Seite des Zahnes ist die Eingriffsstrecke mit den Punkten A bis E angebracht worden. Links neben der Verzahnung ist eine typische Entwicklung einer Zahnfußauskolkung vom Eingriffsbeginn bis zum inneren Einzeleingriffspunkt dargestellt. Die Auskolkung entwickelt sich im Verlauf des Versuches zu einer rechteckähnlichen Mulde.

Unten im Bild 4.72 ist eine Unterteilung des Verschleißes in drei einzelne Bereiche durchgeführt worden. Die rechteckähnliche Auskolkung kann als eine Superposition von drei getrennten Verschleißformen angesehen werden. Diese Verschleißformen erinnern zum einen an eine Ellipse und zum anderen an ein Dreieck.

Die elliptische Auskolkung im Zahnfuß des treibenden Rades kann als Resultat des vorzeitigen Eingriffes angesehen werden. Die dreieckige Auskolkung vom Eingriffsbeginn in Richtung des Wälzpunktes ist eine Funktion des spezifischen Gleitens. Diese Auskolkungsform kann auf der Zahnflanke als graufleckige Fläche identifiziert werden. Die dritte Auskolkung

ist die ellipsenähnliche am Beginn des Einzeleingriffsgebietes. Auf diesen Durchmesser wird nach Empfehlung von Sigg der Beginn der langen Kopfrücknahme gelegt. Am Übergang von der korrigierten Zahnflanke zur unveränderten Evolvente können, je nach Korrekturform, sehr kleine Krümmungsradien und somit hohe Hertzsche Flächenpressungen entstehen. Dieser Effekt ist nicht nur an Korrekturen gebunden, sondern kann auch am Übergang einer graufleckengeschädigten Zahnflanke zur ungeschädigten Flanke auftreten. Bild 4.73 stellt die Auskolkungsformen und die möglichen Ursachen noch einmal gegenüber.

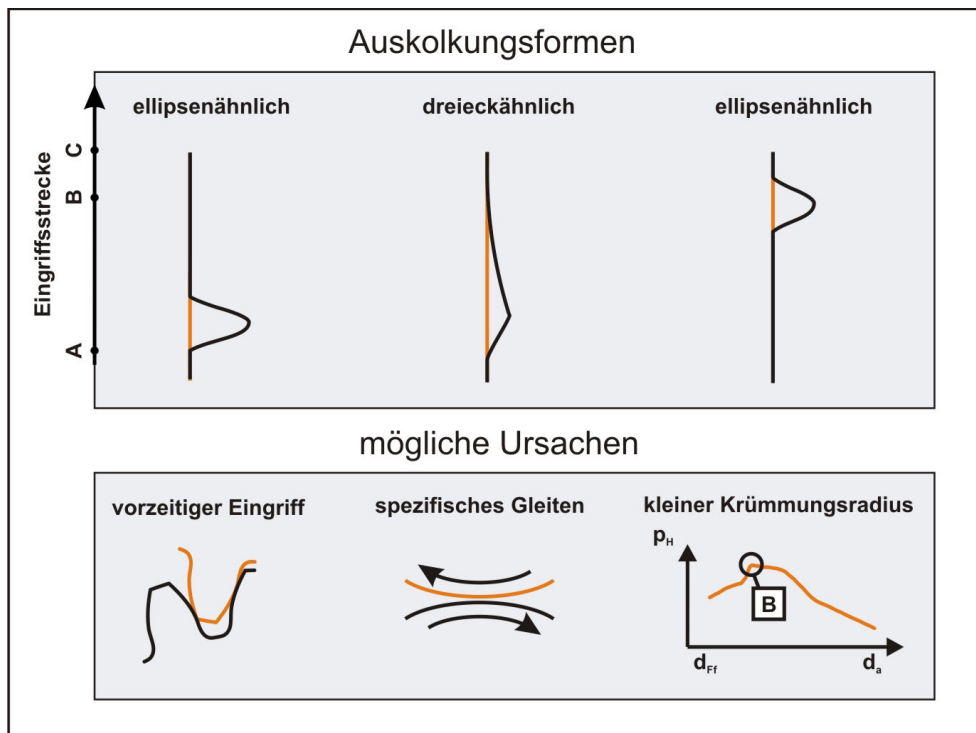


Bild 4.73: Auskolkungsformen und mögliche Ursachen

Bild 4.74 zeigt die Ursachen für die unterschiedlichen Auskolkungsformen und benennt deren Einflussgrößen. Für den am Großgetriebeprüfstand stark ausgeprägten Einfluss des vorzeitigen Eingriffes sind der Kopfrücknahmebetrag und die wirksame Kopfrücknahme entscheidend. Ist die wirksame Kopfrücknahme geringer als die ausgeführte Kopfrücknahme, dann besteht keine Gefahr des vorzeitigen Eingriffes durch die scharfe Kopfkante des Gegenrades. Die wirksame Kopfrücknahme und die zur Berechnung dieser Kopfrücknahme benötigte Eingriffssteifigkeit kann mit Hilfe der DIN 3990 [D6] berechnet werden.

Entscheidend für die Intensität der Schädigung der Zahnflanke durch das spezifische Gleiten ist sowohl die Oberflächenrauheit als auch die minimale Schmierfilmhöhe. Diese Einflüsse auf die Graufleckenbildung sind bereits in den Arbeiten von [E1], [H1], [L4], [S1], [S2] und [S3] beschrieben und bestätigt worden.

Der kleine Krümmungsradius am Übergang zwischen einem korrigierten oder ausgekolkten Bereich der Zahnflanke und der Evolvente und den daraus resultierenden hohen Hertz'schen

Flächenpressungen ist von [L4] ausgearbeitet worden. In den Versuchen mit chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Radsätzen sind wiederholt Grübchenschäden an diesem Übergang, mit dem sehr kleinen Krümmungsradius, entstanden. Diese Schäden sind sowohl an der Großgetriebeverzahnung als auch an der Standardgetriebeverzahnung aufgetreten.

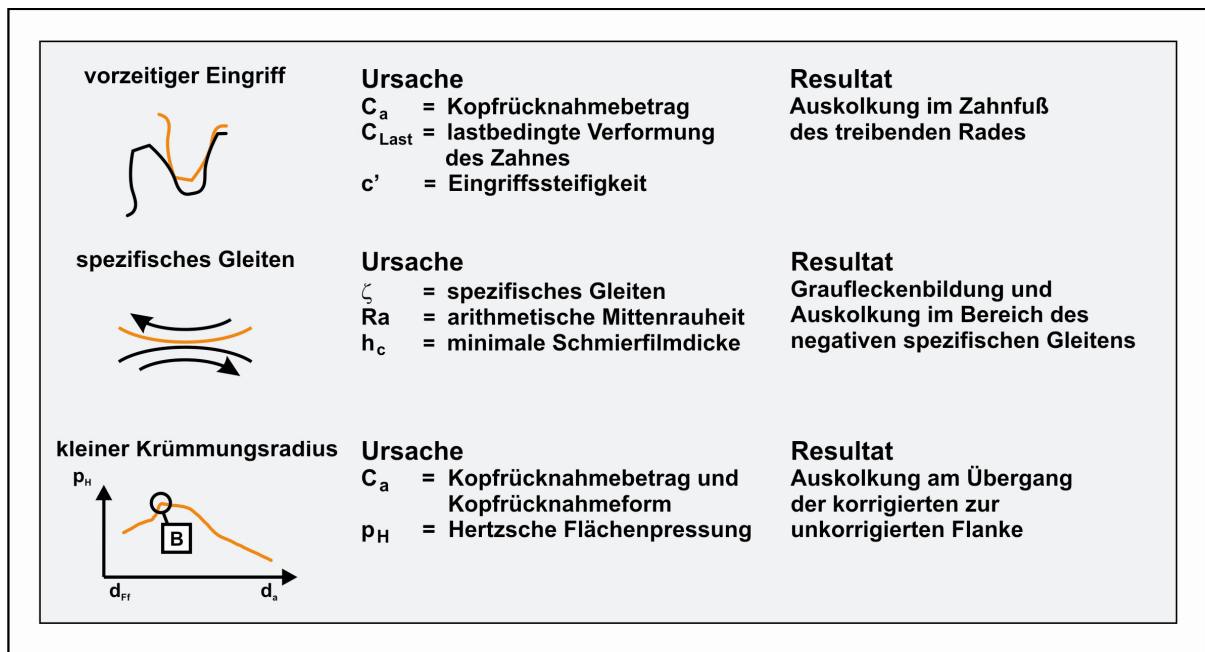


Bild 4.74: Auskolkungsformen und ihre Ursachen

4.3.1. Dreieckähnliche Auskolkung

Der dreieckähnliche Verschleiß ist im Bereich des negativen spezifischen Gleitens zu finden. Die kurze Seite des Dreiecks befindet sich immer im Fußbereich des Zahnes, die lange Seite wächst in Richtung der Eingriffslinie. Exemplarisch werden anhand einer Verzahnung, bei der kein vorzeitiger Eingriff festgestellt werden konnte, die Verschleißform und ihre Ursachen beleuchtet.

Beim Versuch des Radsatzes GG3 2219 Seite 2 ist kaum eine Schabemarke im Zahnfuß zu erkennen. Auch gibt es keine Ausbildung einer Auskolkung vom Eingriffsbeginn in Richtung des Wälzpunktes. Auch im Zahnfuß des Radsatzes GG3 2218 Seite 2 ist kein Schaben erkennbar, hier kann trotzdem eine Auskolkung gemessen werden. Eine Erklärung hierfür liefert Bild 4.75. Hier ist das spezifische Gleiten der Verzahnungen längst der Eingriffslinie dargestellt. Der Betrag des spezifischen Gleitens der Verzahnung GG3 2218 mit der leichten Auskolkung liegt vom Eingriffsbeginn bis zum Wälzpunkt höher als der der Verzahnung GG3 2219 ohne Auskolkung. Auch ist der Verlauf der Hertz'schen Pressung zu Beginn der Eingriffsstrecke für die Verzahnung GG3 2218 höher. In diesem Abschnitt der Eingriffsstrecke ist die Auskolkung auf der Zahnflanke zu erkennen. Im weiteren Verlauf verändern sich die

Hertzchen Pressungsverhältnisse, wie in Bild 4.76 zu sehen, und die Hertzsche Pressung der Verzahnung GG3 2219 liegt bis kurz nach dem Ende des Doppeleingriffes höher.

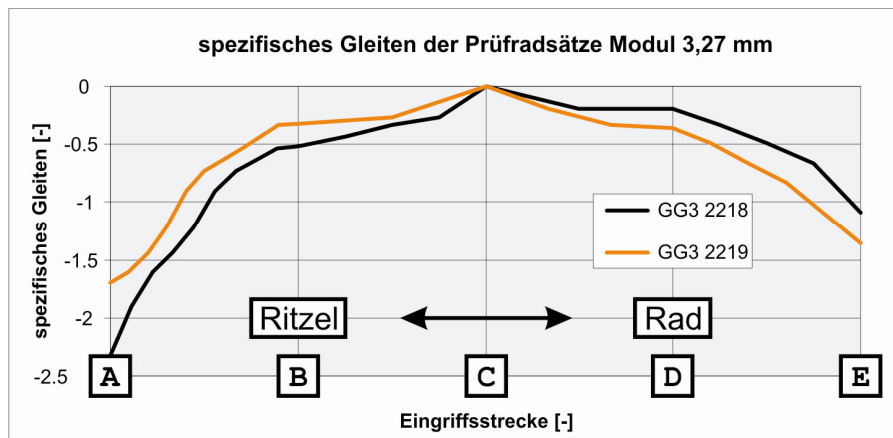


Bild 4.75: spezifisches Gleiten im Zahnfußbereich der Radsätze mit $m_n = 3,27$ mm

GG3 2218 mit $x_1 = 0,09$ und $x_2 = 0,4$ und GG3 2219 mit $x_1 = 0,25$ und $x_2 = 0,24$

Die in Bild 4.76 dargestellten Hertzchen Pressungsverläufe sind für die gegebene Geometrie ohne Berücksichtigung der Auskolkung berechnet. Dies gibt ein realistisches Bild über die wirklichen Pressungsverhältnisse, denn bei den Messungen nach den Versuchen wurde kaum eine Auskolkung festgestellt.

Im Gegensatz zur Seite 2 der Radsätze, sind auf der Seite 1 beider Verzahnungen, mit einem geringeren Kopfrücknahmebetrag, im Zahnfuß Schabemarken zu sehen und am Zahnkopf der Räder die dazugehörigen Abrundungen. An den Zahnfüßen des Ritzels beider Radsätze entwickelt sich eine dreieckähnliche Auskolkung. Aufgrund der Unterschiede in der Rauigkeit zwischen Seite 1 und 2 kann die Schabemarke nicht explizit als Initialschaden identifiziert werden. Jedoch ist auffällig, dass die Verzahnung GG3 2219 mit dem höheren Kopfrücknahmebetrag auf Seite 2 kaum eine messbare Auskolkung am Zahnfuß aufweist. Mit einer geringen Kopfrücknahme ist die Auskolkung aber in der gleichen Größenordnung wie die des Radsatzes GG3 2218.

Ein Vergleich zwischen der Seite 1 des Radsatzes GG3 1215 des Großgetriebes mit einem Modul von $m_n = 16$ mm und der Seite 1 des Radsatzes GG3 2218 mit $m_n = 3,27$ mm, welche die gleichen Geometrien aufweisen, zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Radsätze. Die Schabemarke am Großgetrieberadsatz ist entsprechend des Modulverhältnisses tiefer. Die modulbezogene Tiefe der Auskolkung in Richtung des Wälzkreises ist bei der Großgetriebeverzahnung jedoch geringer. Die Ursache hierfür liegt in der größeren relativen Schmierstalthöhe des großen Radsatzes. Obwohl der Radsatz GG3 2218 kleiner ist, was bei gleichen Betriebsbedingungen eine kleinere minimale Schmierstalthöhe ergibt, sind die Rauigkeiten auf ähnlich hohem Niveau. Die relative Schmierstalthöhe ergibt sich als Quotient der minimalen Schmierstalthöhe und der arithmetischen Mittenrauheit. Folglich

müsste für die gleiche relative Schmierstalthöhe die Rauigkeit im gleichen Verhältnis wie die minimale Schmierstalthöhe sinken.

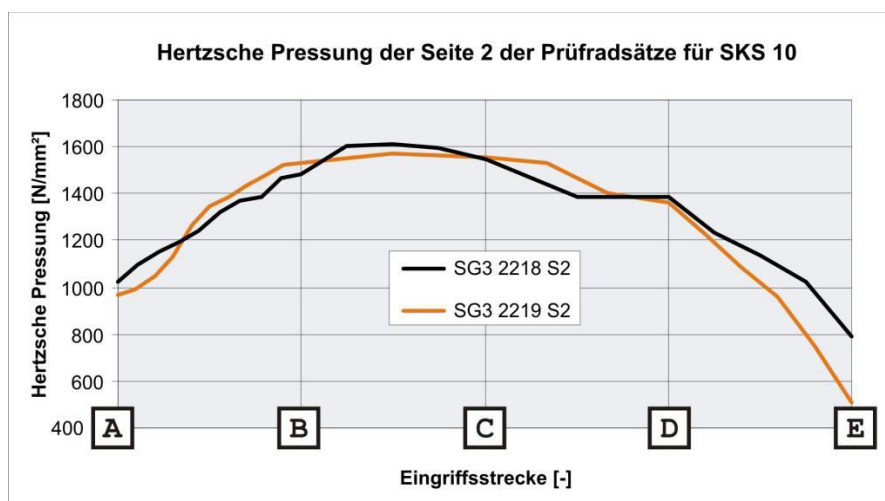


Bild 4.76: Hertzische Pressung der Seite 2 der Radsätze GG3 2218 mit $x_1 = 0,09$ und $x_2 = 0,4$ und GG3 2219 mit $x_1 = 0,25$ und $x_2 = 0,24$

Auffällig bei dem Vergleich der Seite 2 ist, dass im Zahnfuß des Großgetrieberadsatzes ein leichtes Schaben auftritt. Das Verhältnis der Tiefe der Auskolkung zum Modul des Radsatzes ist jedoch unwesentlich höher als beim Standardgetriebe. Grund für die Auskolkung kann eine im Profildiagramm des Rades erkennbare positive Abweichung am Zahnkopf sein.

Am Großgetriebe bildet sich aber, trotz der vorliegenden Tiefe der spitzen Auskolkung, die lange Seite der dreieckähnlichen Auskolkung in Richtung des Wälzkreises nicht aus.

4.3.2. Ellipsenähnliche Auskolkung

Die ellipsenähnlichen Auskolkungen sind beim Radsatz GG3 2219 sehr deutlich ausgebildet. In den Evolventendiagrammen ist zu sehen, dass sich diese Auskolkung von kurz vor dem Einzeleingriffsbeginn bis kurz danach ausbildet. An dem Radsatz GG3 2218 sind diese Auskolkungen nicht zu erkennen, ferner ist im selbigen Abschnitt der Eingriffsstrecke ein Auskolkungsminimum zu sehen.

Die Erklärung für die ellipsenähnliche Auskolkung des Radsatzes GG3 2219 ist in der in Bild 4.76 dargestellten höheren Pressung der Verzahnung GG3 2219 im Vergleich zu der Verzahnung GG3 2218 zu suchen. Die Hertzische Pressung der Verzahnung GG3 2219 hat bei beiden Kopfrücknahmevarianten ihr höchstes Lastniveau kurz vor Beginn des Einzeleingriffs erreicht.

Am Beginn des Einzeleingriffes hat die Verzahnung GG3 2218 sowohl eine niedrigere Hertzische Pressung als die Verzahnung GG3 2219 als auch ein langsamer ansteigendes spezifisches Gleiten als im Doppelengriffsgebiet. Hieraus kann das Minimum der Auskolkung resultieren.

Im weiteren Verlauf der Eingriffsstrecke steigt die Pressung der Verzahnung GG3 2218 hingegen stetig weiter, bis zwischen Eingriffsbeginn und Einzeleingriffspunkt ihr Maximum erreicht ist. In diesem Bereich weist diese Verzahnung wieder Auskolkungen auf.

5. Theoretische Untersuchungen

5.1. Vergleichsrechnung nach FVA 259 I

Das Berechnungsverfahren nach FVA 259 I [S3] ist, neben dem Verfahren nach AGMA 06FTM06 [B2], das einzige verbreitete Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Auskolkungstiefe von graufleckigen Zahnflanken. Bereits im Forschungsvorhaben FVA 286 II [L5] sind Vergleichsrechnungen durchgeführt worden, um die Übertragbarkeit der Berechnungsgleichung, welche an Prüfständen mit einem Achsabstand von $a = 91,5$ mm und 200 mm ermittelt worden ist, auf Großgetriebe mit einem Achsabstand von $a = 447,33$ mm zu untersuchen. Hierbei stellte sich heraus, dass das Rechenverfahren zur Graufleckenberechnung für die Mehrzahl der Versuche größere Auskolkungstiefen als die Messungen ergibt. Im Folgenden wird die Berechnung für die aktuelle Großgetriebeverzahnung und die Standardgetriebeverzahnung durchgeführt. Anschließend werden mit den gewonnenen Erkenntnissen des Projektes und der daraus resultierenden neuen Auswertung der Ergebnisse des vorangegangenen Projektes FVA 286 II neue Vergleichsrechnungen durchgeführt.

5.1.1. Großgetriebe

In Bild 5.1 sind die Ergebnisse der Auskolkungsberechnungen nach FVA 259 I den gemessenen Auskolkungstiefen im Zahnfuß des Großtrieberritzels am Ende der Versuche gegenübergestellt. Das Diagramm zeigt, dass die berechneten Auskolkungstiefen bei höheren Rauheiten und großen Kopfrücknahmebeträgen immer auf der sicheren Seite liegen und teilweise sehr stark von den Versuchsergebnissen abweichen. Diese Beobachtung ist auch schon im Vorgängervorhaben [L5] gemacht worden. Im aktuellen Vorhaben zeigt sich der Unterschied allerdings viel stärker, da immer feinere Oberflächenrauheiten erzielt werden können.

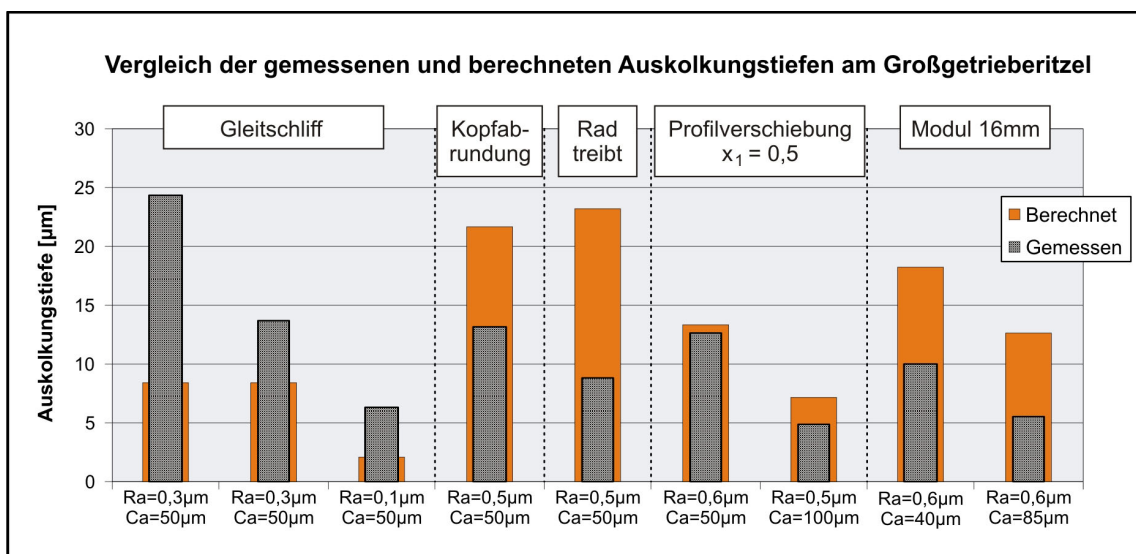


Bild 5.1: Vergleich der Ergebnisse der Auskolkungsberechnungen nach FVA 259 I und den gemessenen Auskolkungen am Großgetriebe Ritzel nach Versuchsende

Aufgrund der Unterschiede zwischen berechneten und gemessenen Auskolkungstiefen kann mit Hilfe der Berechnungsgleichung nur eine qualitative Aussage über den Graufleckenverschleiß getroffen werden, die maximale Auskolkungstiefe wird jedoch nicht korrekt bestimmt. Tiefe Auskolkungen im Zahnfuß ohne Graufleckigkeit können, wie bereits beschrieben, eine Zahnflanke stärker gefährden als eine graufleckige Oberfläche. Aus diesem Grund ist eine Näherungsgleichung entstanden, die eine Bestimmung der maximalen Auskolkung aufgrund des vorzeitigen Eingriffes zulässt.

Vor allem ist anzumerken, dass die Berechnungsgleichung die Treibrichtung nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass gerade der Verschleiß der Verzahnungen der Windkraftindustrie nicht korrekt beschrieben wird.

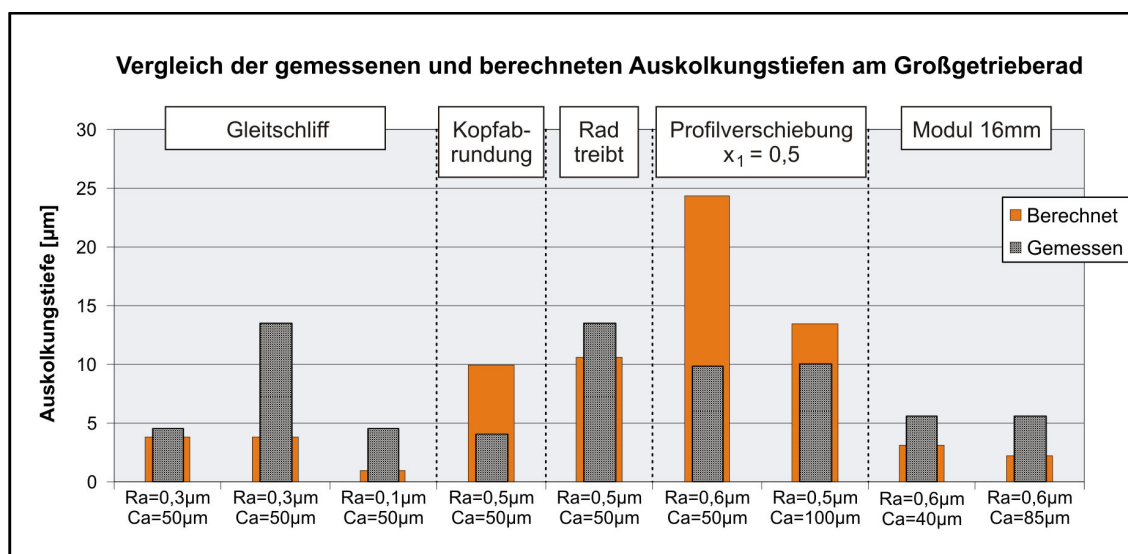


Bild 5.2: Vergleich der Ergebnisse der Auskolkungsberechnungen nach FVA 259 I und den gemessenen Auskolkungen am Großgetriebe Rad nach Versuchsende

So lange die Geometrien der Verzahnungen ähnlich der Standardverzahnung sind stimmen die Ergebnisse gut überein. Wird die profilverschobene Verzahnung betrachtet, ist zu erkennen, dass der Einfluss des spezifischen Gleitens aufgrund der Interpretation der kombinierten Auskolkung resultierend aus dem vorzeitigen Eingriff und der Graufleckigkeit viel zu hoch angesetzt ist. Somit liegen die Auskolkungstiefen bei dieser profilverschobenen Verzahnung um den Faktor zwei bis vier zu hoch.

5.1.2. Standardgetriebe

In Bild 5.3 sind die Ergebnisse der Auskolkungsberechnungen nach FVA 259 I den gemessenen Auskolkungstiefen im Zahnfuß des Standardgetrieberitzels am Ende der Versuche gegenübergestellt.

Auch am Standardgetriebe zeigt sich, dass die Ergebnisse des Ritzels relativ gut berechnet werden können. Wird an der Verzahnung oder den Betriebsbedingungen eine Größe verän-

dert, die den vorzeitigen Eingriff betrifft, so weicht das berechnete Ergebnis vom gemessenen Ergebnis stark ab. Deutlich wird dies an dem Versuch mit der Kopfabrundung und dem Versuch mit dem treibenden Rad.

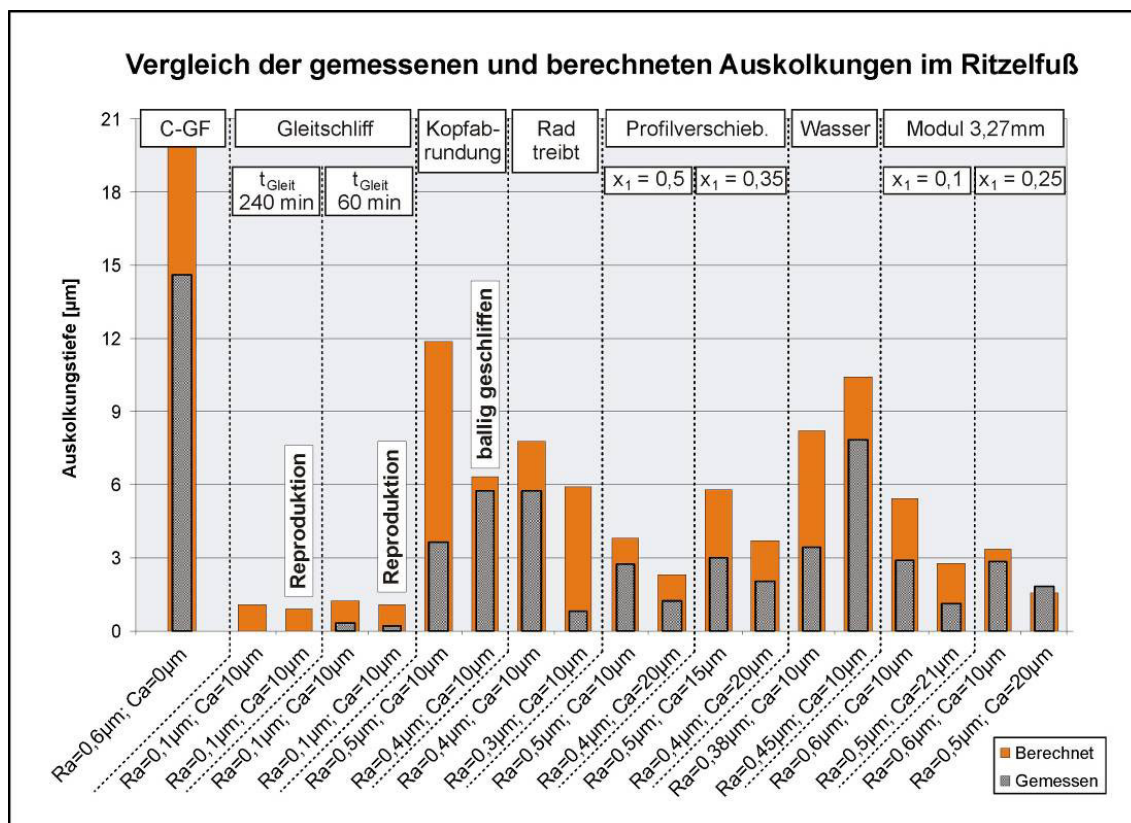


Bild 5.3: Ergebnisse der Auskolkungsberechnung nach FVA 259 I und Auskolkung nach Versuchsende am Ritzel des Standardgetriebes

Bild 5.4 zeigt die Ergebnisse der Auskolkungsberechnung für den Zahnfuß des Rades des Standardgetriebes. Auch hier passen die berechneten Ergebnisse gut mit den gemessenen überein. Analog zu den Ergebnissen der Großgetriebeverzahnungen ist zu erkennen, dass für die profilverschobene Verzahnung viel zu hohe Auskolkungstiefen berechnet wurden.

Insgesamt ist zu erkennen, dass sobald sich die Verzahnung von der Standardverzahnung entfernt, die Abweichungen immer größer werden.

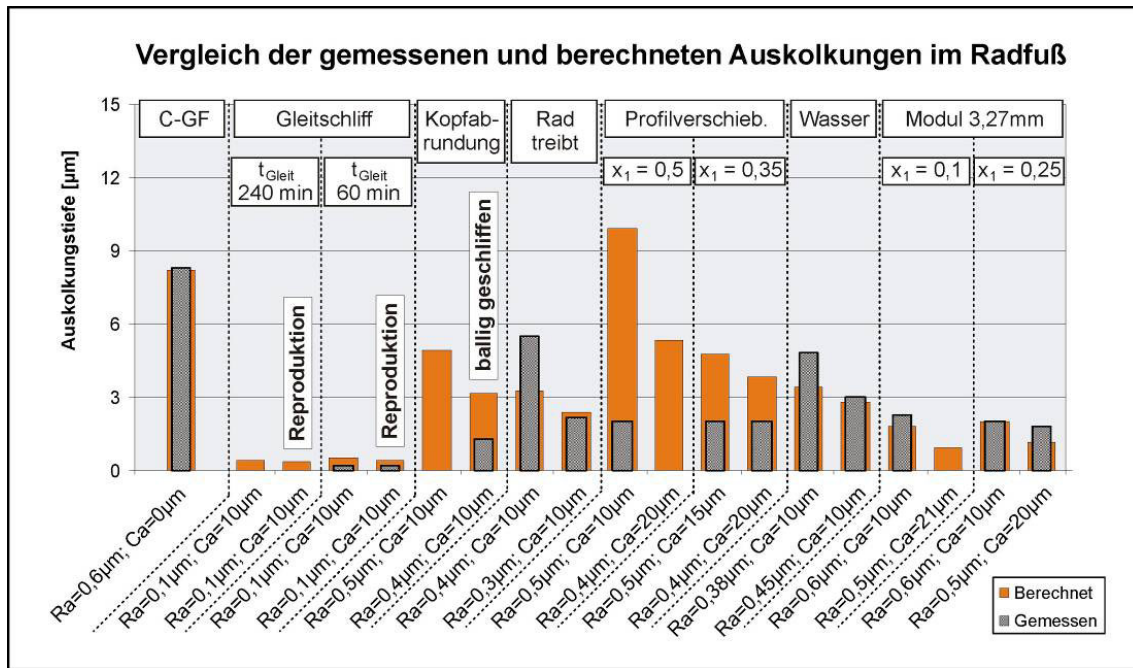


Bild 5.4: Ergebnisse der Auskolkungsberechnung nach FVA 259 I und Auskolkung nach Versuchsende am Rad des Standardgetriebes

5.1.3. Neuauswertung der Versuchsergebnisse des Projektes FVA 286 II

Die bereits dargestellte Differenzierung in grauflecken- und schabebedingten Verschleiß und die Neuauswertung der Ergebnisse der Versuche des Vorhabens FVA 286 II machen einen neuen Vergleich zwischen den Berechnungsergebnissen und der gemessenen graufleckenbedingten Auskolkung notwendig.

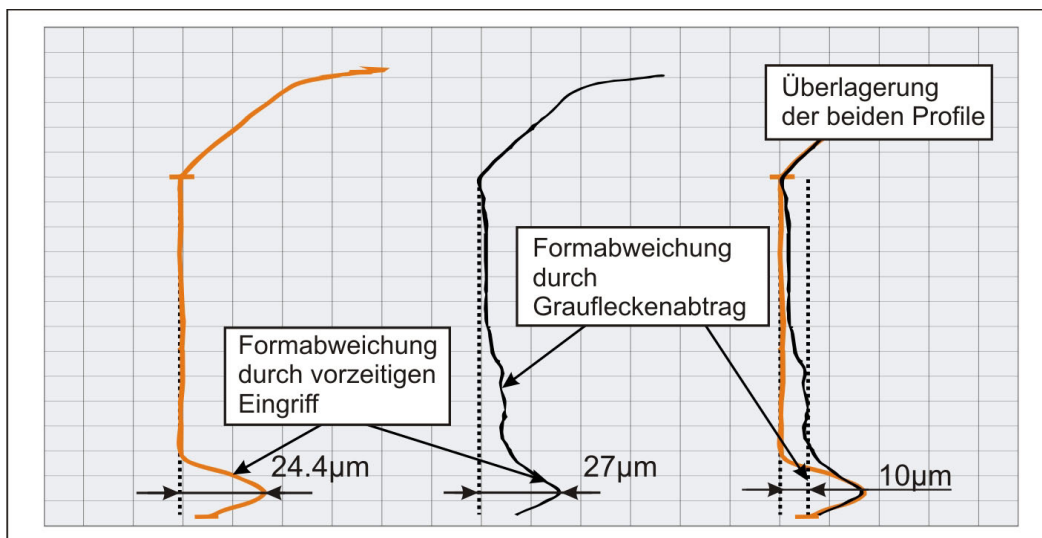


Bild 5.5: Prinzip der Neuauswertung der Versuche zur Ermittlung des Graufleckenverschleißes

Die Neuauswertung erfolgt über einen Vergleich der Evolventendiagramme einer Verzahnung ohne graufleckenbedingtem Verschleiß mit einer reinen schabebedingten Profilformabweichung und den Diagrammen der übrigen Verzahnungen. In Bild 5.5 ist eine solche Ermittlung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der ursprünglich Verschleiß von $27\ \mu\text{m}$, verursacht durch den vorzeitigen Eingriff, viel zu hoch ist im Vergleich zum neu ermittelten reinen graufleckenbedingten Wert von $10\ \mu\text{m}$.

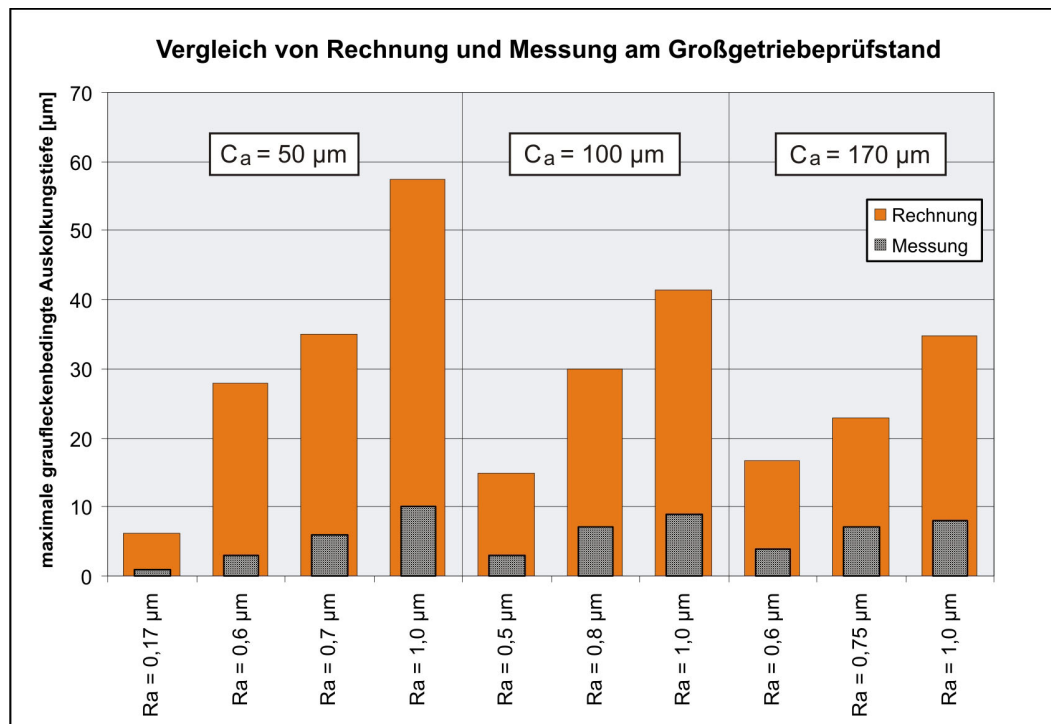


Bild 5.6: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse nach FVA 259 I mit Versuchsergebnissen des Großgetriebes gestaffelt nach Kopfrücknahmebeträgen [L5]

In Bild 5.6 ist dieser Vergleich mit der neuen Auswertung dargestellt. Die Ergebnisse in diesem Bild sind sortiert nach den Kopfrücknahmebeträgen. Es ist zu erkennen, dass mit steigender arithmetischer Mittenrauheit und konstantem Kopfrücknahmebetrag die Auskolkungstiefe linear zunimmt. Diese Beobachtung passt zu den gemessenen Graufleckenflächen dieser Versuche. Es konnte bei diesen Versuchen nur ein geringer Einfluss des Kopfrücknahmebetrages auf die Auskolkungstiefe erkannt werden. Die arithmetische Mittenrauheit der Zahnflanken hatte jedoch einen großen Einfluss auf die Graufleckenfläche.

Sortiert nach den arithmetischen Mittenrauheitswerten ist in Bild 5.7 genau dieser Trend zu erkennen. Während sich innerhalb einer Rauheitsgruppe die Auskolkungstiefen, trotz veränderter Kopfrücknahmebeträge, kaum verändern, sind zwischen den Rauheitsgruppen Unterschiede zu erkennen.

Sowohl in Bild 5.6 als auch in Bild 5.7 ist zu erkennen, dass die Berechnungen nach [S3] zu hohe Ergebnisse liefern. Es ist festzustellen, dass die Berechnungsergebnisse gemittelt für alle

Ergebnisse um den Faktor 5,2 zu hoch liegen. Die Verzahnungen mit einer geringen arithmetischen Mittenrauheit weisen geringe Auskolkungstiefen auf, so dass der Messfehler hier zu stärkeren Verzerrungen des Ergebnisses führt. Werden nur die Ergebnisse der Verzahnungen mit einer höheren arithmetischen Mittenrauheit von $R_a \geq 0,8 \mu\text{m}$ betrachtet, so ist ein gemittelter Faktor von 4,7 zu erkennen.

Für das Vorhaben FVA 286 II [L5] kann gesagt werden, dass zwischen den Ergebnissen der Berechnungsgleichung und den gemessenen Auskolkungen am Großgetriebe ein konstanter Faktor besteht. Dieser Faktor entspricht dem Quotient der beiden Moduln $m_n = 22 \text{ mm}$ und $4,5 \text{ mm}$ und beträgt 4,9.

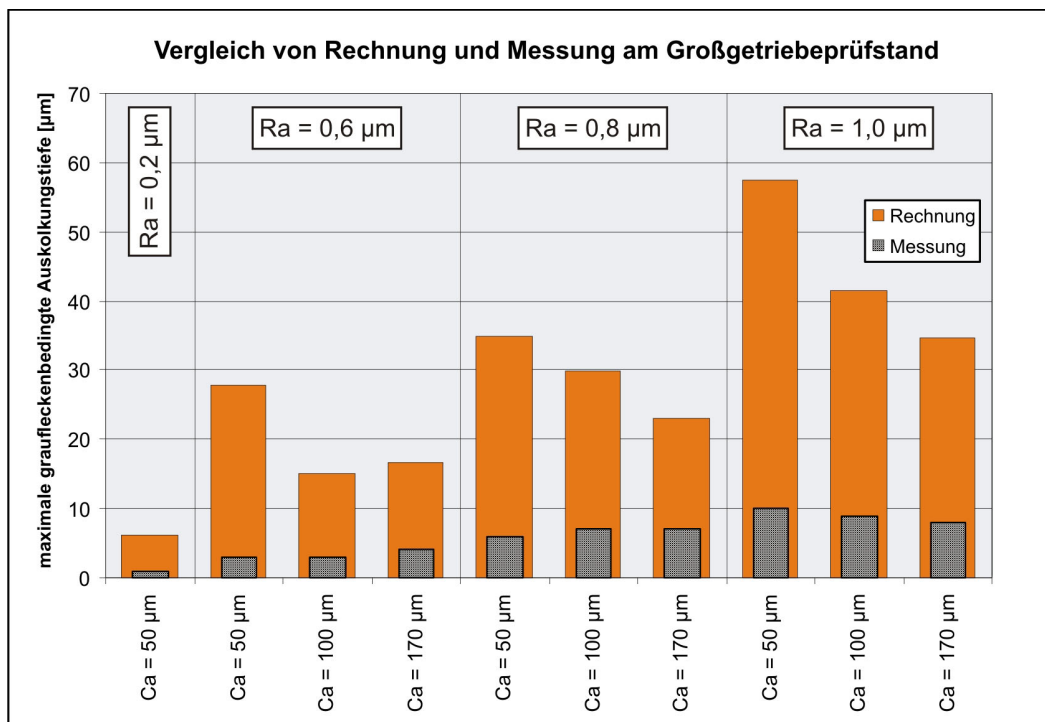


Bild 5.7: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse nach FVA 259 I mit Versuchsergebnissen des Großgetriebes gestaffelt nach der arithmetischer Mittenrauheit

5.1.4. Erweiterung des Berechnungsverfahrens nach FVA 259 I

Der empirische Rechenansatz von [S3] ermöglicht die Ermittlung der graufleckenbedingten Profilformabweichung von Zahnflanken. In der Formel 5.1 ist diese örtliche Berechnungsgleichung dargestellt.

$$f_{\text{fm}}(Y) = f_{\text{fm,GFT}} \cdot \left(\frac{\zeta_{\text{GF}}(Y)}{\zeta_{\text{GFT}}} \right) \cdot \left(\frac{b_{\text{H,GF}}(Y)}{b_{\text{H,GFT}}} \right) \cdot \left(\frac{p_{\text{H,GF}}(Y)}{p_{\text{H,GFT}}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{GF}}(Y)}{\lambda_{\text{GFP}}} \right)^{-1,25} \cdot \left(\frac{N}{N_{\text{GFT}}} \right)^{0,25} \cdot C \quad (5.1)$$

Dieses Berechnungsverfahren vergleicht Betriebsgrößen der Versuchsverzahnung, mit dem Index GFT, mit Größen der zu berechnenden Verzahnung, die den Index GF tragen. Im

aktuellen Vorhaben ist bei der Auslegung beider Getriebegrößen darauf geachtet worden, dass, so weit möglich, alle Betriebsgrößen in der gleichen Größenordnung liegen. Die einzig nicht konstante Größe ist die halbe Hertzsche Kontaktbreite.

Die Berechnung der Hertzschen Pressung ist der Formel 5.2 zu entnehmen und die der halben Hertzschen Kontaktbreite der Formel 5.3. Aus der Formel 5.2 kann abgeleitet werden, dass die auf die Zahnbreite bezogene Normalkraft F_N / b um denselben Faktor anwachsen muss wie der Ersatzkrümmungsradius ρ , um den Wert der Hertzschen Pressung über die Modulvergrößerung konstant zu halten. Der Ersatzkrümmungsradius ist dem Modul proportional. Für die berechnete Verzahnung bedeutet dies, dass sowohl die bezogene Normalkraft, als auch der Ersatzkrümmungsradius mit dem Modulverhältnis 22 / 4,5 zu multiplizieren sind. Werden beide Größen nun in Formel 5.3 eingesetzt, dann vergrößert sich die halbe Hertzsche Kontaktbreite um das Modulverhältnis.

$$p_H = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho} \cdot \frac{F_N}{b} \cdot \frac{E}{(1 - \nu^2)}} \quad (5.2)$$

$$b_H = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E} \cdot \frac{F_N}{b} \cdot \rho} \quad (5.3)$$

mit

p_H	[N/mm ²]	=	Hertzsche Pressung
b_H	[mm]	=	Halbe Hertzsche Kontaktbreite
F_N	[N]	=	Zahnnormalkraft
b	[mm]	=	Breite der Verzahnung
E	[N/mm ²]	=	Elastizitätsmodul
ν	[-]	=	Querkontraktionszahl
ρ	[mm]	=	Ersatzkrümmungsradius

Die in der Berechnung somit angenommene Modulabhängigkeit der Auskolkungstiefen lässt sich an den Großtriebeverzahnungen nicht feststellen. Beim Vergleich der berechneten zu gemessenen Auskolkungstiefen ist ein relativ konstanter Faktor von ca. 4,9 zwischen den beiden Auskolkungstiefen zu finden. Dieser Faktor entspricht dem Modulverhältnis der Großtriebe- zur Standardtriebeverzahnung.

$$f_{\text{fm}}(Y) = f_{\text{fm,GFT}} \cdot \left(\frac{\zeta_{\text{GF}}(Y)}{\zeta_{\text{GFT}}} \right) \cdot \left(\frac{b_{\text{H,GF}}(Y)}{b_{\text{H,GFT}}} \right) \cdot \left(\frac{m_{\text{GF}}}{m_{\text{GFT}}} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{p_{\text{H,GF}}(Y)}{p_{\text{H,GFT}}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\lambda_{\text{GF}}(Y)}{\lambda_{\text{GFT}}} \right)^{-1,25} \cdot \left(\frac{N}{N_{\text{GFT}}} \right)^{0,25} \cdot C \quad (5.4)$$

mit

$$\begin{aligned} m_{\text{GF}} \quad [\text{mm}] &= \text{Modul der zu berechnenden Verzahnung} \\ m_{\text{GFT}} \quad [\text{mm}] &= \text{Modul der Graufleckentest-Verzahnung nach [F1]} \end{aligned}$$

Zur Berücksichtigung der gezeigten Zusammenhänge und der Modulabhängigkeit der graufleckenbedingten Auskolkung wird vorgeschlagen, die Berechnungsgleichung in Formel 5.1 um einen Vergleichsfaktor zu ergänzen. Die um den Vergleichsfaktor ergänzte Berechnungsgleichung ist der Formel 5.4 zu entnehmen.

5.2. Vergleich der verschiedenen Berechnungsverfahren

Um die einzelnen vorgestellten Berechnungsverfahren miteinander vergleichen zu können, sind die maximalen Auskolkungstiefen für drei verschiedene Geometrievarianten gerechnet und in Diagrammen gegenübergestellt worden. Diese Geometrievarianten sind zwei verschiedene Rauheitsniveaus und Kopfrücknahmebeträge, welche auch tatsächlich in Versuchen untersucht worden sind. Bei möglichen Variationen der einzelnen Berechnungsmethoden sind diese im selben Diagramm mit dargestellt worden.

In Bild 5.8 ist die berechnete Auskolkungstiefe für eine Großtriebeverzahnung mit einem Modul von $m_n = 22 \text{ mm}$ aus dem Projekt FVA 286 II [L5] der gemessenen Auskolkungstiefe gegenüber gestellt worden. Die gemessene Auskolkungstiefe ist zunächst ohne die Auskolkung bedingt durch den vorzeitigen Eingriff dargestellt worden und weiterhin als Gesamtauskolkung. Die Rechnung ist nur für die Kraftstufe 10 des Graufleckentests nach FVA 54 I-IV [F1] durchgeführt worden. Die berechnete Verzahnung weist einen Kopfrücknahmebetrag von $C_a = 50 \text{ }\mu\text{m}$ und eine über beide Zahnflanken gemittelte arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,6 \text{ }\mu\text{m}$ auf.

Die Berechnungsmethoden nach Schönnenbeck [S1, S2] und Emmert [E1] liefern Ergebnisse in der gleichen Größenordnung und weichen nur gering von der graufleckenbedingten Auskolkungstiefe der Verzahnung ab.

Das Berechnungsverfahren nach FVA 259 I [S3] weist im Vergleich zu der graufleckenbedingten Auskolkung eine sehr starke Abweichung auf. Wird das Ergebnis der Berechnung nach FVA 259 I um das Modulverhältnis herunterskaliert, so zeigt es ebenfalls eine gute Übereinstimmung im Vergleich zu der gemessenen Auskolkung. Im unveränderten Zustand entspricht die Höhe der berechneten Auskolkung nach FVA 259 I [S3] der Gesamtauskolkung auf der Zahnflanke.

Das Berechnungsverfahren nach Barnett [B2] ermöglicht es den Einfluss des vorzeitigen Eingriffes mit abzubilden. Hierbei spielt die Zahnkopfabrundung eine entscheidende Rolle. Im Diagramm sind die Ergebnisse für drei verschiedenen Zahnkopfabrundungen dargestellt. Die Zahnkopfabrundung wurde auf die Radien $r = 5 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ und $250 \mu\text{m}$ eingestellt. Hierdurch konnte eine relativ hohe Auskolkungstiefe bis zu einer sehr niedrigen Auskolkungstiefe berechnet werden. So kann über den Radius der Zahnkopfabrundung eine beliebig hohe Auskolkungstiefe eingestellt werden. Im vorliegenden Fall zeigen Variationen des Kopfabrundungsradius eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen bei einem vorgegebenen Kopfabrundungsradius von $r = 2,5 \mu\text{m}$.

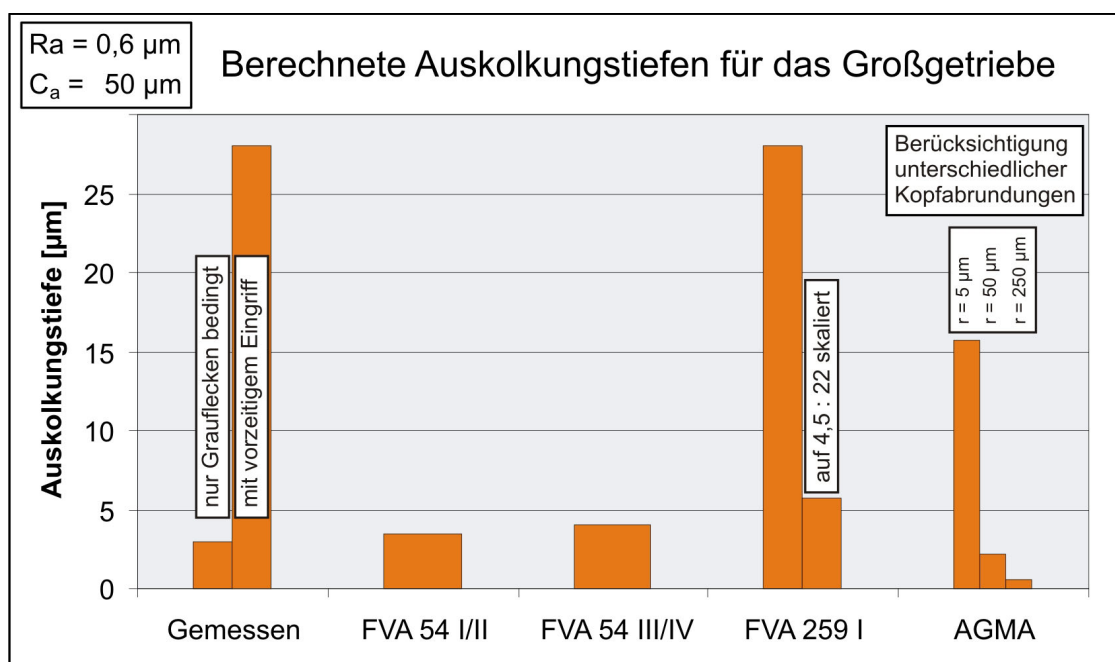


Bild 5.8: Berechnete Auskolkungstiefen nach verschiedenen Berechnungsverfahren
 $m_n = 22 \text{ mm}$, $C_a = 50 \mu\text{m}$ und $R_a = 0,6 \mu\text{m}$

Die im Bild 5.9 dargestellten Berechnungsergebnisse sind für eine Großtriebeverzahnung mit einer, der in Bild 5.8 dargestellten Verzahnung ähnlichen, arithmetischen Mittenrauheit von $R_a = 0,5 \mu\text{m}$ durchgeführt worden. Im Vergleich zu der ersten Verzahnung ist lediglich der Kopfrücknahmebetrag auf $C_a = 100 \mu\text{m}$ erhöht worden.

Die gemessene graufleckenbedingte Auskolkungstiefe verändert sich kaum. Die Auswirkungen des vorzeitigen Eingriffes reduzieren sich jedoch sehr stark. Die Ergebnisse nach Schönbeck und Emmert haben sich nur geringfügig geändert, da eine Kopfrücknahmeänderung zu keiner Veränderung des Ergebnisses führt. Als Lastgröße geht nur die Schubspannung im Wälzpunkt in die Berechnung ein. Durch die Veränderung der arithmetischen Mittenrauheit wird die Reibungszahl beeinflusst und hierdurch auch die Schubspannungen. Zusätzlich geht die arithmetische Mittenrauheit auch direkt in die Berechnungen ein. Beide Berechnungsverfahren zeigen wiederum eine gute Korrelation zu den gemessenen Ergebnissen.

Das Ergebnis der Berechnungsgleichung nach FVA 259 I zeigt in der unveränderten Variante zu hohe Ergebnisse. Jedoch zeigt sich auch für diesen Fall eine gute Übereinstimmung durch die Anpassung über das Verhältnis der Moduln.

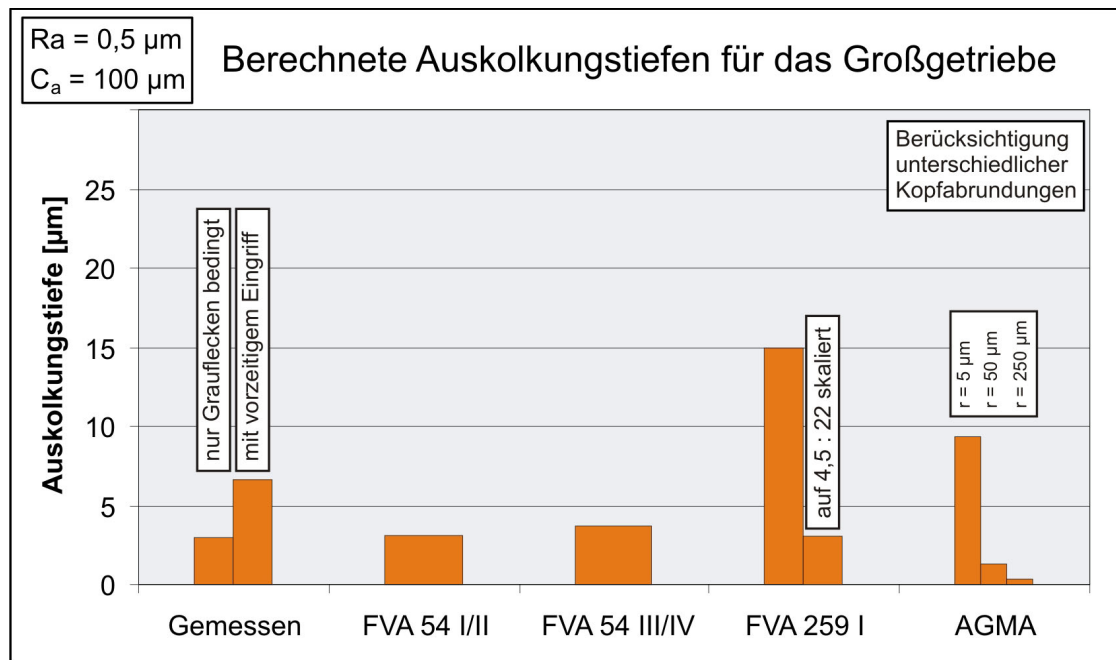


Bild 5.9: Berechnete Auskolkungstiefen nach verschiedenen Berechnungsverfahren
 $m_n = 22 \text{ mm}$, $C_a = 100 \text{ µm}$ und $R_a = 0,5 \text{ µm}$

Das Berechnungsverfahren nach Barnett zeigt erneut mehrere Möglichkeiten das gewünschte Ergebnis zu erreichen. In diesem Fall führt ein Kopfabrundungsradius von $r = 7,5 \text{ µm}$ zu einem richtigen Ergebnis, obwohl die Zahnkopfradien unverändert belassen worden sind. Es gilt zu beachten, dass eine sehr kleine Veränderung des Kopfkantenradius schon zu einem sehr großen Unterschied im Ergebnis führen kann.

Bei der dritten Berechnungsvariante ist gegenüber der in Bild 5.9 dargestellten Berechnung die arithmetische Mittenrauheit auf $R_a = 1 \text{ µm}$ erhöht worden. Bild 5.10 zeigt, dass keine Unterscheidung zwischen graufleckenbedingter und der durch den vorzeitigen Eingriff erzeugten Auskolkungstiefe möglich ist.

Die Ergebnisse der Berechnungsgleichung von Schönnenbeck und Emmert zeigten in den bisherigen Berechnungen eine tendenziell zu hohe Auskolkungstiefe an. In diesem Fall jedoch zeigen sie eine zu geringe Auskolkungstiefe an und bilden die Auswirkungen der arithmetischen Mittenrauheit nicht richtig ab.

Die Berechnungsgleichung nach FVA 259 I zeigt, in der unveränderten Variante, eine sehr hohe Auskolkungstiefe von über 40 µm an. Über das Modulverhältnis angepasst, befindet sich das Berechnungsergebnis auf gleicher Höhe mit der gemessenen Auskolkungstiefe und bildet diese Tiefe sehr gut ab.

Um hier auf die richtige Auskolkungstiefe zu gelangen benötigt das Berechnungsverfahren nach Barnett eine Kopfabrundung von $r = 11,5 \mu\text{m}$.

Der Vergleich der Berechnungsgleichungen hat gezeigt, dass die Ergebnisse der Berechnungsgleichungen nach Schönnebeck und Emmert sich sehr ähneln. Es ist zu erkennen, dass beide Berechnungsgleichungen die gemessenen Auskolkungstiefen der Varianten mit der niedrigen arithmetischen Mittenrauheit gut abgebildet haben. Trotz der Abweichungen bei der Variante mit der höheren arithmetischen Rauheit ist anzumerken, dass die Abweichungen absolut betrachtet nur $3 \mu\text{m}$ bzw. $4 \mu\text{m}$ betragen. Negativ an diesen Berechnungsgleichungen ist, dass sie den Einfluss von Kopfrücknahmen nicht abbilden können. Jedoch ist in Bild 5.7 schon gezeigt worden, dass der Einfluss des Kopfrücknahmebetrages sehr gering ist.

Die Gleichung nach FVA 259 I berechnet für die gezeigten Verzahnungen grundsätzlich zu hohe Auskolkungstiefen. Durch die Anpassung der Ergebnisse über das Modulverhältnis ist es jedoch möglich die Ergebnisse auf die gemessene Auskolkungstiefe umzurechnen. Mit diesem Verfahren kann die Auswirkung der Kopfrücknahme mit abgebildet werden.

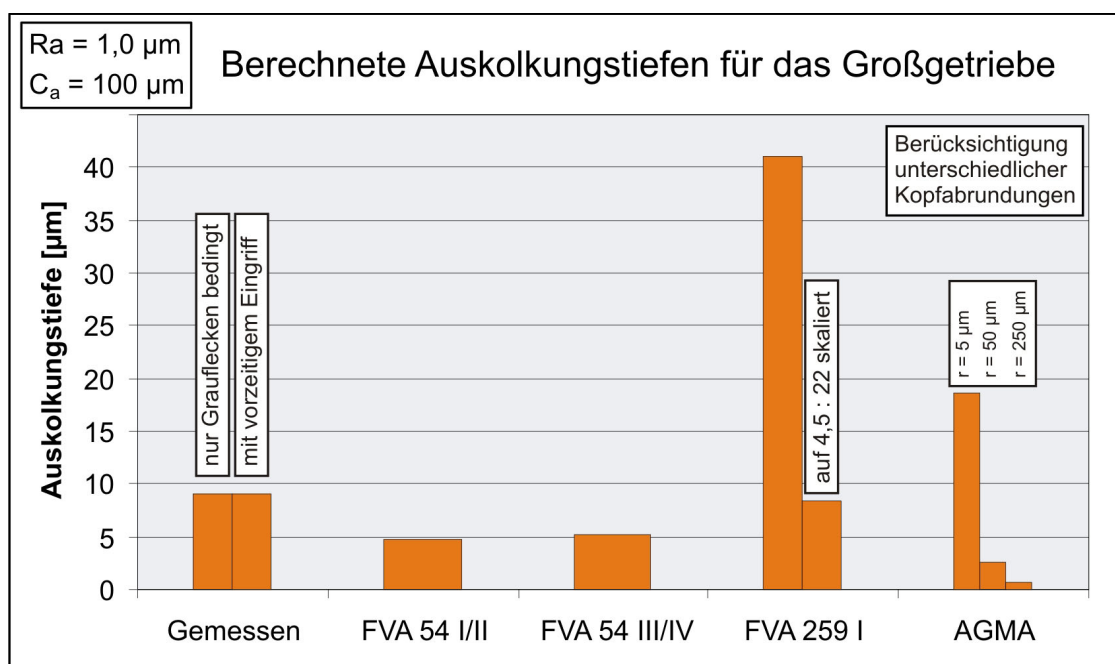


Bild 5.10: Berechnete Auskolkungstiefen nach verschiedenen Berechnungsverfahren
 $m_n = 22 \text{ mm}$, $C_a = 100 \mu\text{m}$ und $R_a = 1,0 \mu\text{m}$

Die Ergebnisse nach Barnett erreichen immer die gewünschte Auskolkungstiefe. Hierfür ist nur der richtige Kopfabrundungsradius notwendig. Dieser Radius muss nur wenige μ -Meter variiert werden und schon sind unterschiedlich große Auskolkungstiefen möglich. Teilweise sind die Änderungen der Kopfabrundungsradien, welche ein schlechtes Ergebnis in ein gutes Ergebnis überführen, so gering, dass es mit normaler Messtechnik schwer ist diesen Radiusunterschied zu messen.

5.3. Berechnung der Verschleißtiefe aufgrund des vorzeitigen Eingriffes

Die Versuchsergebnisse der Vorhaben FVA 286 haben gezeigt, dass an Getrieben mit großen Moduln der vorzeitige Eingriff einen sehr großen Einfluss auf die resultierende Auskolkungstiefe des im Großgetriebe getriebenen Zahnes aufweist. Um diesen Verschleiß abbilden zu können, ist durch eine nicht lineare Regression eine Berechnungsgleichung entstanden. Grundlage der Berechnungsgleichung sind die Versuchsergebnisse des Forschungsvorhabens FVA 286 II [L5] und des aktuellen Forschungsvorhabens. Formel 5.5 zeigt die Berechnungsgleichung.

$$f_{fm,VE} = 90 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{Kopf}^{-0,6} \cdot \left(\frac{C_{Last}}{\varepsilon_\alpha} - C_a \right)^{2,93} \quad (5.5)$$

mit

$f_{fm,VE}$	[μm]	=	Berechneter Verschleißtiefe durch vorzeitigen Eingriff
ρ_{Kopf}	[μm]	=	Kopfkantenabrundungsradius der getriebenen Zahnflanken zu Versuchsbeginn, keine gezielt erzeugte Abrundung
C_{Last}	[μm]	=	Lastbedingte Verformung des Zahnes
ε_α	[-]	=	Profilüberdeckung
C_a	[μm]	=	Ausgeführter Kopfrücknahmebetrag

In dieser Gleichung erfolgt ein Vergleich zwischen der lastbedingten Zahndurchbiegung C_{Last} , berechnet aus der in der DIN 3990 [D6] beschriebenen Einzelfedersteifigkeit, und des ausgeführten Kopfrücknahmebetrages C_a . Ist der ausgeführte Kopfrücknahmebetrag höher als die lastbedingte Zahndurchbiegung durch die Profilüberdeckung, so ist C_a gleich $C_{Last} / \varepsilon_\alpha$ zu setzen, denn es kommt nicht zum vorzeitigen Eingriff.

Die Einzelfedersteifigkeit entspricht einem Mittelwert für einen Zahn der das ganze Eingriffsgebiet durchläuft. Der Verlauf der Steifigkeit einer Verzahnung entlang der Eingriffslinie hat jedoch einen sinusförmigen Verlauf. Je größer die Überdeckung der Verzahnung ist, desto stärker nähert sich die Einzelfedersteifigkeit der maximalen Steifigkeit auf dem Scheitelpunkt des sinusförmigen Verlaufs. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird die lastbedingte Verformung des Zahnes durch die Überdeckung dividiert.

Die Berechnungsgleichung ist nur für ein positives Ergebnis der Klammer definiert.

$$C_{Last} = \frac{F_N}{c' \cdot b} \quad (5.6)$$

mit

c'	[N/(mm μm)]=	Einzelfedersteifigkeit nach [D6]
------	--------------------------	----------------------------------

Versuche mit gleichen Kopfrücknahmebeträgen und gleicher arithmetischer Mittenrauheit führten bei chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Radsätzen zu unterschiedlichen Auskol-

kungstiefen. Messung der Kopfabrundung der Rad und Ritzelköpfe zeigen je nach Bearbeitungsdauer und –richtung unterschiedliche Kopfabrundungsbeträge. Größere Kopfabrundungen konnten mit geringeren Auskolkungstiefen korreliert werden.

Aus diesem Grund ist zusätzlich in der Berechnungsgleichung der Einfluss der Kopfabrundung des getriebenen also des schabenden Rades mit berücksichtigt worden. Mit zunehmendem Radius der Kopfkantenabrundung nimmt der Verschleiß bedingt durch den vorzeitigen Eingriff ab. Für die Kopfabrundung darf minimal ein Wert von $\rho_{\text{Kopf}} = 5 \mu\text{m}$ angenommen werden. Kleinere Radien sind an den Kopfkanten der Versuchszahnräder nicht gemessen worden. Das Einsetzen von kleineren Radien erzeugt unrealistisch hohe Verschleißbeträge. Für die nur profilgeschliffenen Großgetriebeverzahnungen ist zur Erstellung der Berechnungsgleichung ein Kopfabrundungsradius von $\rho_{\text{Kopf}} = 25 \mu\text{m}$ angenommen worden. Da dieser Einfluss der Kopfabrundung erst nach den Versuchen identifiziert werden konnte, stützt sich die entstandene Berechnungsgleichung auf Messungen der Kopfkantenabrundung, welche nach dem Versuchslauf an der Radkopfkante und an nichttragenden Bereichen der Ritzelkopfkanten gemessen worden sind. In einem Folgevorhaben ist dieser Einfluss näher zu untersuchen und durch Messungen der Kopfkanten vor Versuchsbeginn zu verifizieren.

Für Verzahnungen, welche ohne Kopfrücknahme ausgeführt werden, stellt sich eine Verschleißtiefe von $f_{\text{fm,VE}} = 66 \mu\text{m}$ ein. Im Forschungsvorhaben FVA 286 I [H1] sind Verzahnungen untersucht worden, bei denen die getriebenen Räder unkorrigiert waren. Bei diesen Versuchen stellte sich eine ähnliche Auskolkungstiefe wie bei Versuchen mit Verzahnungen ohne Kopfrücknahme ein.

Mit den in Tabelle 5.1 gezeigten Verzahnungsdaten sind die Ergebnisse im Bild 5.11 berechnet worden.

Tabelle 5.1: Verwendete Verzahnungsdaten für die in Bild 5.11 dargestellten Ergebnisse

m_n [mm]	F_N [kN]	C_{Last} [μm]	C_a [μm]	ε_α [-]	ρ_{Kopf} [μm]	$f_{\text{fm,VE}}$ [μm]	f_{fm} [μm]
16	270,1	225,8	47	1,500	25	10,5	10
22	270,1	253,0	50	1,304	34	22,9	25
22	270,1	253,0	50	1,304	25	27,5	28
22	270,1	253,0	50	1,304	25	27,5	28
22	270,1	253,0	50	1,304	25	27,5	27
22	270,1	248,4	55	1,360	25	19,3	12,6
16	270,1	225,8	90	1,500	25	2,2	5,5
22	270,1	253,0	100	1,304	25	7,9	7,5
22	270,1	253,0	100	1,304	25	7,9	8
22	270,1	253,0	100	1,304	25	7,9	9
22	270,1	248,4	115	1,360	25	3,1	4,9
22	270,1	253,0	100	1,304	25	7,9	6
22	270,1	253,0	50	1,304	60	16,3	14
22	270,1	253,0	50	1,304	345	5,7	6

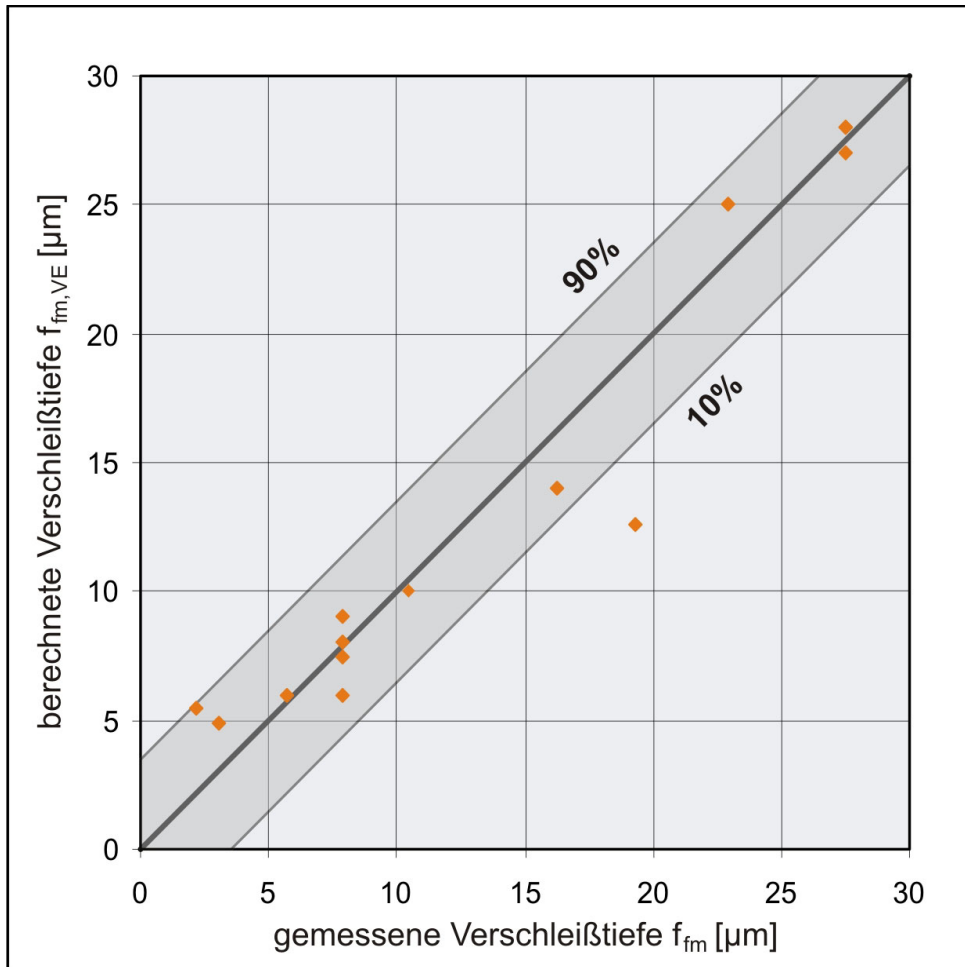


Bild 5.11: Vergleich zwischen berechnetem und gemessenen Verschleiß aufgrund des vorzeitigen Eingriffes

In Bild 5.11 sind der berechnete und der gemessene Verschleiß aufgrund des vorzeitigen Eingriffes gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse der Berechnung sehr gut mit den Messergebnissen korrelieren.

In dieser Berechnungsgleichung sind die Einflussgrößen Härte der Verzahnung, Schmierstoffviskosität und Umfangsgeschwindigkeit nicht mit eingegangen, da diese in den Versuchen nicht Variiert worden sind. Die arithmetische Mittenrauheit hat beim vorzeitigen Eingriff, wie bereits gezeigt worden ist, keinen Einfluss, da rauheitsunabhängig die gleichen Auskolkungstiefen bei gleichen Kopfrücknahmebeträgen erzielt worden sind.

Mit dem berechneten Verschleiß bedingt durch den vorzeitigen Eingriff und der Auskolkungstiefe berechnet nach FVA 259 I [S3] kann nun eine Abschätzung der Grübchengefährdung einer Zahnflanke gemacht werden. Ist die graufleckenbedingte Auskolkungstiefe gleich oder höher als die Auskolkungstiefe bedingt durch den vorzeitigen Eingriff, so ist keine Grübchengefahr ausgehend aus der Schabemarke zu erwarten. Ist der schabemarkenbedingte Verschleiß wesentlich Tiefer als die durch Graufleckigkeit, so ist von einer erhöhten Grübchengefahr

fahr auszugehen. Welches Verhältnis der Auskolkungstiefe als Grenze festgelegt werden muss ist in weiteren Versuchen noch zu ermitteln.

5.4. Berechnung von Zahnpaarsteifigkeiten

Für die Verhältnisse beim vorzeitigen Eingriff ist die Zahnpaarsteifigkeit des Nachbarzahn-paares entscheidend, dessen Berührungspunkt sich kurz vor dem äußeren Einzeleingriffspunkt D auf der Eingriffsstrecke befindet. In Bild 5.12 ist das ausschlaggebende Zahnpaar eingekreist.

Das treibende Ritzel ist in schwarzer Farbe dargestellt. Durch das Aufbringen von Last verformt sich das rechte Zahnpaar. Demzufolge dreht sich das Ritzel entsprechend der Verformung etwas weiter, als es sich im unverformten Zustand gedreht hätte. Diese Drehwegabweichung führt beim linken Zahnpaar zum vorzeitigen Eingriff.

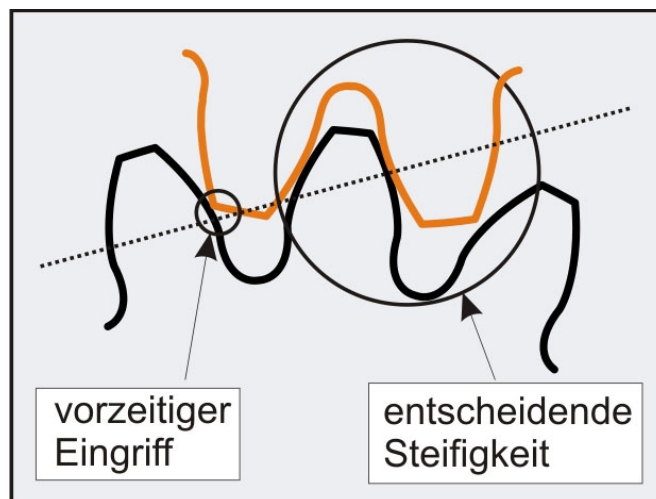


Bild 5.12: Eingriffssituation beim vorzeitigen Eingriff

Die Einzel-Zahnfedersteifigkeit eines Zahn-paares, im weiteren auch Zahn-paarsteifigkeit genannt, ist nach DIN 3990 [D6] definiert als die notwendige Zahnnormalkraft, bezogen auf die Zahnbreite, um ein oder mehrere im Eingriff befindliche Zahn-paare im Stirnschnitt um $1\ \mu\text{m}$ in Eingriffslinienrichtung zu verformen. Zur Bestimmung der Zahn-paarsteifigkeit kann zunächst die Verformung der im Eingriff befindlichen Zähne bestimmt werden.

5.4.1. Analytische Beschreibung der Zahn-paarsteifigkeit

Ziegler [Z1] beschreibt die Gesamtverformung eines Zahnes als die Summe von sechs Verformungsanteilen. Diese sechs Verformungsanteile werden durch Biegung, Schub, Stauchung, Hertzsche Abplattung, Torsion und Verformung des Radkörpers hervorgerufen. Zur Beschreibung des Zahnes als Platte geht Ziegler von vielen Vereinfachungen aus. Die Evolvente wird als Funktion zweiten Grades abgebildet, die Zahnfußausrundung verkürzt die Zahnhöhe um einen bestimmten Betrag. Zur Berechnung der Verformung muss die Funktion zur Beschreibung der Zahnflankenform mehrfach integriert werden. Die Vereinfachungen von Ziegler liefern Funktionen, die sich leicht integrieren lassen. Die heutige Rechnertechnik ermöglicht

$$w''_{Bieg}(r_y) = -\frac{M_{bz}(r_y)}{E' \cdot I_z(r_y)} \cdot \cos(\alpha_y) \Rightarrow w_{Bieg}(r_y) = -\frac{\cos(\alpha_y)}{E'} \cdot \int_{r_f}^{r_y} \int_{r_f}^{r_y} \frac{M_{bz}(r_y)}{I_z(r_y)} dr_y^2 \quad (5.7)$$

$$M_{bz}(r_y) = -F_N \cdot \cos(\alpha_y) \cdot (y(r_y) - y(r_f)) + F_N \cdot \sin(\alpha_y) \cdot x(r_y) \quad (5.8)$$

$$I_z(r_y) = \frac{b \cdot (2 \cdot x(r_y))^3}{12} \quad (5.9)$$

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (5.10)$$

mit

w''_{Bieg} [mm ⁻¹]	=	Zweite Ableitung der Biegelinie
w_{Bieg} [mm]	=	Durchbiegung
M_{bz} [Nmm]	=	Biegemoment um die z-Achse
I_z [mm ⁴]	=	Axiales Flächenträgheitsmoment 2. Grades
r_y [mm]	=	Betrachteter Radius
F_N [N]	=	Zahnnormalkraft
α_y [rad]	=	Kraftangriffswinkel am betrachteten Radius r_y
$y(r_f)$ [mm]	=	y-Koordinate des Zahnfußradius r_f
$y(r_y)$ [mm]	=	y-Koordinate des betrachteten Radius r_y
$x(r_y)$ [mm]	=	Halbe Zahndickensehne am betrachteten Radius r_y
E' [N/mm ²]	=	Ersatzelastizitätsmodul für Platten
ν [-]	=	Querkontraktionszahl

In Bild 5.13 links werden die Unterschiede zwischen dem aktuellen Berechnungsansatz und der Methode nach Ziegler deutlich. In der alten Methode wird der Zahn nur bis zum Fußformkreisradius abgebildet. Je nach Höhe des Werkzeugkopfes wird der Biegehebelarm hierdurch sehr stark verkürzt dargestellt.

Die Werkzeugkopfabrundung und die daraus resultierende Fußausrundung finden nur Berücksichtigung durch eine abermalige Verkürzung der Höhe der Platte um 20 % des mittleren Fußausrundungsradius. Durch Unterschnitt und kleine Werkzeugkopfabrundungen kommt es jedoch zu einer deutlichen Verjüngung des Zahnfußbereiches im Vergleich zur evolventischen Flanke des Zahnes, wie Bild 5.13 rechts verdeutlicht wird.

Beide Vereinfachungen führen zu einer Verkürzung des Biegehebelarmes und zu einer Versteifung des Zahnes. Durch die exakte Darstellung des Zahnes wird es ermöglicht, auch diese Einflussgrößen auf die Steifigkeit genauer abzubilden. Im Vergleich zu Ziegler verformen sich die Zähne bei niedrigen Zähnezahlen und hohen Werkzeugkopfhöhen stärker und sind somit weicher.

Die Zahnfußgeometrie hat, wie in Bild 5.14 links gezeigt wird, einen Einfluss auf die Verformung durch Schubbeanspruchung. Wird der Zahn erst ab dem Fußformradius betrachtet, fehlt der Anteil der Verformung des Zahnfußes. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Schubverformung bei kurz eingespannten Platten einen wesentlichen Teil der Verformung darstellt. Hierdurch wird die Verformung geringer berechnet, und der Zahn wird abermals steifer berechnet, als er tatsächlich ist.

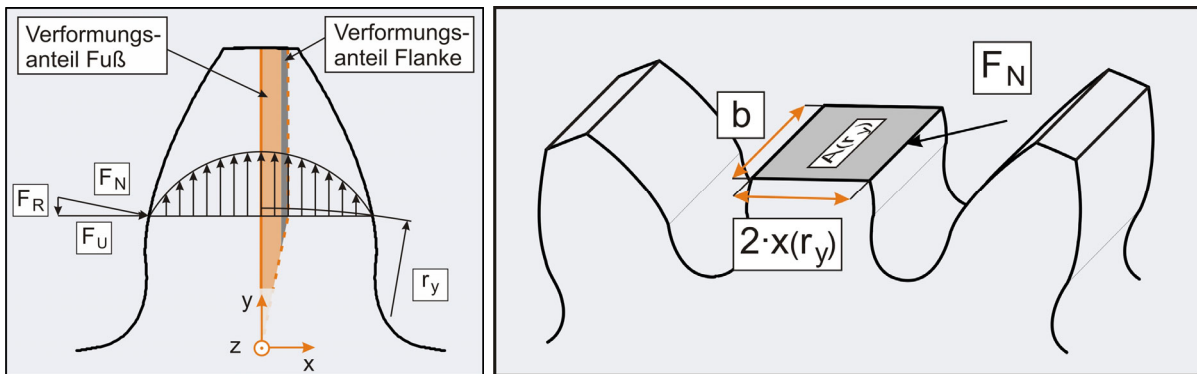


Bild 5.14: links: Schubbeanspruchung des Zahnes,
rechts: Schnitt durch einen Zahn in Umfangsrichtung

Bild 5.14 rechts zeigt einen Schnitt durch einen belasteten Zahn in Umfangsrichtung. Die sichtbare Zahnsehnenfläche ist eine Funktion der Zahnhöhe und wird für die Berechnung der Schubspannung benötigt. Die Gleichungen 5.11 bis 5.13 zeigen die Bestimmung der Verformung resultierend aus der Schubbeanspruchung.

$$w_{Schub}(r_y) = \cos(\alpha_y) \cdot \int_{r_f}^{r_y} \tan \left(\kappa \cdot \frac{F_N \cdot \cos(\alpha_y)}{G'} \cdot \frac{1}{A(r_y)} \right) \cdot dr_y \quad (5.11)$$

$$G' = \frac{E'}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5.12)$$

$$A(r_y) = 2 \cdot b \cdot x(r_y) \quad (5.13)$$

mit

w_{Schub} [mm] = Verformung bedingt durch die Schubbeanspruchung

κ [-] = Schubverteilungszahl, für rechteckige Flächen $\kappa = 1,2$

G' [N/mm²] = Schubmodul für Platten

A [mm²] = Zahnsehnenfläche im betrachteten Zahnradradius

Bei der Verformung durch Stauchung ist darauf zu achten, dass durch die Querdehnung auch eine Verformung entgegen der Gesamtverformung in Eingriffslinienrichtung entsteht. Vereinfachend wird angenommen, dass die Druckspannung aufgrund der Radialkraft auf der gesamten Zahnsehnenfläche gleichmäßig verteilt ist. Im Vergleich zur alten Methode wird die

Veränderung der Zahndicke in Höhenrichtung mit berücksichtigt. Wird dieser Einfluss vernachlässigt, so wird die Verformung kleiner berechnet und der Zahn wird abermals Steifer dargestellt als er tatsächlich ist.

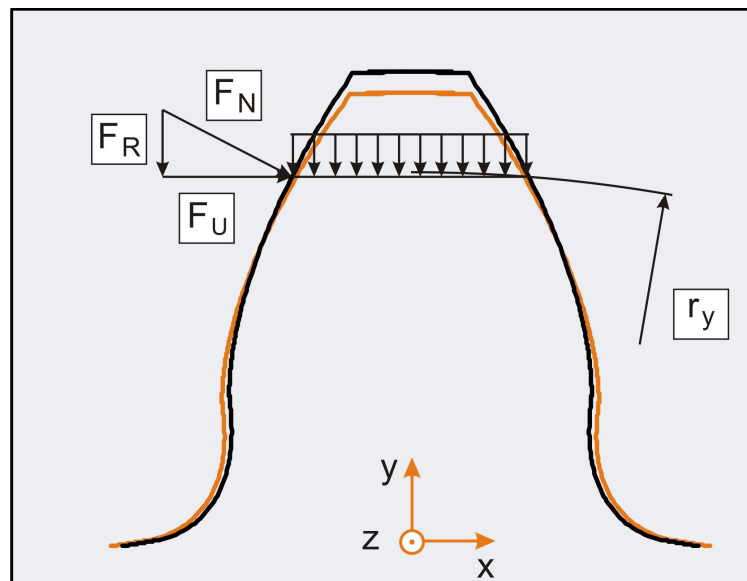


Bild 5.15: Verformung des Zahnes durch Stauchung

Die Gleichung 5.14 zeigt die Berechnung der Stauchungsverformung, erzeugt durch die Radialkraftkomponente der Normalkraft.

$$w_{\text{Stauch}}(r_y) = \cos(\alpha_y) \cdot (\tan(\alpha_y) - \nu) \cdot \int_{r_f}^{r_y} \frac{F_N \cdot \sin(\alpha_y)}{2 \cdot b \cdot E' \cdot x(r_y)} dr_y \quad (5.14)$$

mit

$$w_{\text{Stauch}} [\text{mm}] = \text{Verformung bedingt durch Stauchung}$$

Die Berechnung der Radkörperverformung wird aus der Arbeit von Weber und Banaschek [W1] übernommen. Die berechneten Radkörperverformungen, wie sie in Bild 5.16 dargestellt sind, konnten von Ziegler anhand von Versuchen zwar qualitativ, jedoch nicht quantitativ bestätigt werden. Die ursprüngliche Betrachtung geht von einem unendlichen Halbraum aus. Zahnräder sind in ihrer Breite jedoch begrenzt und sind somit, durch die fehlende Stützwirkung am Rand, bei Messungen weicher als berechnet. Sind Zahnbreite und Nabenbreite identisch, stellt Ziegler eine Erhöhung der Verformung um den Faktor 1,8 fest. Mit breiteren Radkörpern als Zahnbreiten nimmt die Steifigkeit jedoch wieder zu. Die durchgeführten Berechnungen werden in zwei Varianten durchgeführt. Die eine Variante berücksichtigt diese Methode und die andere Variante übernimmt die Radkörperverformungsberechnung nach [W1] ohne Modifikation.

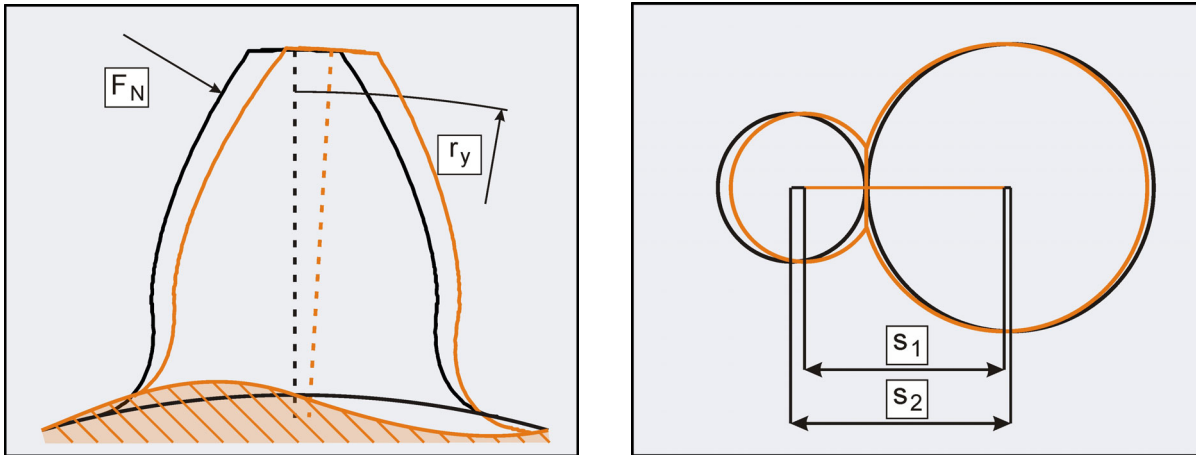


Bild 5.16: links: Radkörperverformung durch einen elastischen Radkörper,
rechts: Verformung bedingt durch die Hertzsche Abplattung

Die Berechnungsgleichungen nach Weber und Banaschek sind in den Gleichungen 5.15 bis 5.18 dargestellt.

$$w_{KP}(r_y) = \frac{4,8 \cdot F_N \cdot (1-\nu^2)}{b \cdot E \cdot \pi} \cdot \cos^2(\alpha_y) \cdot (1 + 0,294 \cdot \tan^2(\alpha_y)) \quad (5.15)$$

$$w_{KM}(r_y) = \frac{2 \cdot F_N}{b \cdot E} \cdot \cos^2(\alpha_y) \cdot \left(\frac{9 \cdot (1-\nu^2)}{\pi} \cdot \left(\frac{y(r_y)}{2 \cdot x(r_f)} \right)^2 + (1+\nu) \cdot (1-2\nu) \cdot \frac{y(r_y)}{2 \cdot x(r_f)} \right) \quad (5.16)$$

$$w_{RK}(r_y) = (w_{KP}(r_y) + w_{KM}(r_y)) \quad (5.17)$$

$$w_{RK,Zie}(r_y) = w_{RK}(r_y) \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{b}{b_R} \right) \quad (5.18)$$

mit

w_{KP}	[mm]	=	Parallelverschiebung des Zahnes in Krafrichtung
w_{KM}	[mm]	=	Verschiebung des Kraftangriffspunktes
w_{RK}	[mm]	=	Gesamtverformung des Radkörpers
$w_{RK,Zie}$	[mm]	=	Gesamtverformung des Radkörpers modifiziert nach Ziegler
b_R	[mm]	=	Radkörperbreite

Bedingt durch den Hertzschen Kontakt und die daraus resultierende Abplattung nähern sich Zahnflanken einander an. Auch für diese Annäherung beider Körper, wie Bild 5.16 rechts zeigt, liefern Weber und Banaschek eine Berechnungsgleichung. Die Gleichungen 5.19 bis 5.22 zeigen die Berechnung der Verformung, bedingt durch die Hertzsche Abplattung.

$$w_{Hertz}(r_y) = \frac{2 \cdot F_N \cdot (1 - \nu^2)}{b \cdot E \cdot \pi} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot h(r_y)}{b_H(r_y)} - \frac{\nu}{2 \cdot (1 - \nu)} \right) \quad (5.19)$$

$$b_H(r_y) = \sqrt{\frac{8 \cdot F_N \cdot \rho_y(r_y) \cdot (1 - \nu^2)}{b \cdot E \cdot \pi}} \quad (5.20)$$

$$\rho_y(r_y) = \frac{\rho_1(r_y) \cdot \rho_2(r_y)}{\rho_1(r_y) + \rho_2(r_y)} \quad (5.21)$$

$$h(r_y) = \frac{x(r_y)}{\cos(\arccos(r_b / r_y)) - \arcsin(x(r_y) / r_y)} \quad (5.22)$$

mit

w_{Hertz} [mm] = Verformung eines Zahnes bedingt durch die Hertzsche Abplattung

b_H [mm] = Halbe Hertzsche Kontaktbreite

h [mm] = Tiefe der beeinflussten Zone

ρ_y [mm] = Ersatzkrümmungsradius des betrachteten Radius r_y

Zur Ermittlung der Abplattungstiefe w_{Hertz} wird festgelegt, dass die durch die Pressung erzeugte Kraft in Eingriffslinienrichtung bis zur Zahnmitte wirkt und dann als Querkraft weitergeleitet wird. Die Strecke h stellt die Tiefe dar, in der die durch die Pressung eingeleitete Kraft wirkt.

Um eine Vorstellung der Relation der einzelnen Verformungsgrößen zu einander zu erhalten, sind die Einzelverformungsanteile für die C-Verzahnung im Bild 5.17 dargestellt.

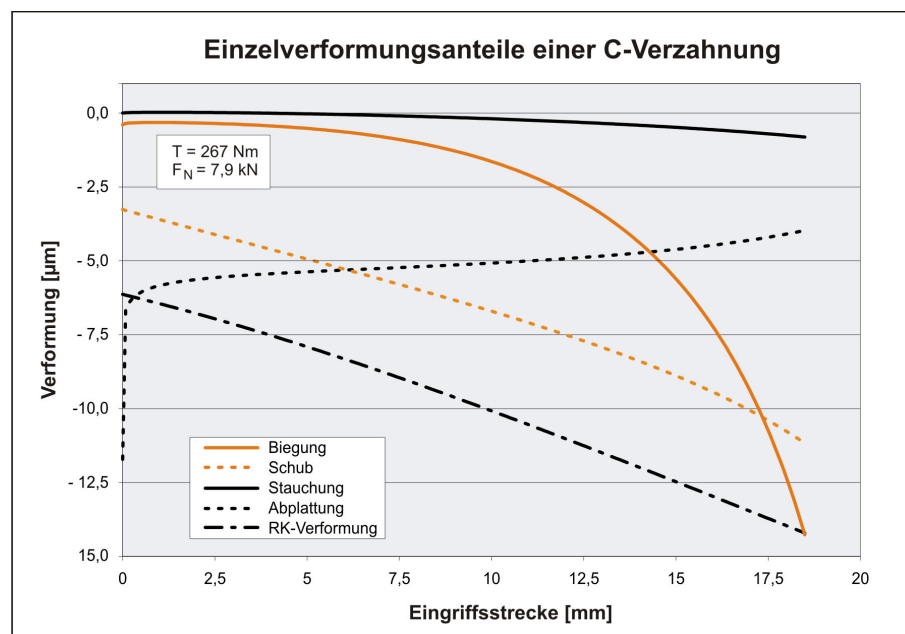


Bild 5.17: Einzelverformungsanteile einer C-Verzahnung für die höchste Schadenskraftstufe des Graufleckentests bei einem Drehmoment von $T = 267 \text{ Nm}$

Um die Zahnpaarsteifigkeit zu erhalten, wird die Gesamtverformung beider miteinander kämmenden Zähne benötigt. Hierfür werden die Verformungen der Zähne miteinander addiert. Es ist hierbei darauf zu achten, dass die addierten Werte für dieselbe Stelle auf der Eingriffsstrecke berechnet worden sind.

Auf die Berechnung der Torsionsverformung, bedingt durch unterschiedlich hohe Biegehebelarme, wie sie bei Schrägverzahnungen auftreten, wird verzichtet.

5.4.2. Verifikation des analytischen Ansatzes zur Steifigkeitsberechnung

Die Verifikation des analytischen Ansatzes zur Berechnung der Zahnpaarsteifigkeiten erfolgt mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente und mittels RIKOR [O1]. Hierzu werden Steifigkeiten von Zahnpaaren über der Eingriffsstrecke dargestellt und die Verläufe miteinander verglichen.

Zur rationellen und schnellen Durchführung der Modellbildung der Finiten Elemente Berechnungen ist ein Netzgenerator für Stirnräder [S5] angewendet worden. Nach der Modellbildung sind die Berechnungen mit dem Marc-Solver durchgeführt worden. Um die Zahnpaarsteifigkeiten über die gesamte Eingriffsstrecke zu bestimmen sind Berechnungen für zwanzig Eingriffsstellungen durchgeführt worden. Aufgrund der feinen Vernetzung der Verzahnung dauert die Berechnung einer Eingriffsstellung bis zu sechs Stunden.

Die im Eingriff befindlichen Zahnpaare sind in diesem Modell feiner vernetzt worden als die übrigen Zähne, um die Elementanzahl des Modells so gering wie möglich zu halten. In Zahnhöhenrichtung besitzt die Verzahnung 100 Elemente und in Zahnbreitenrichtung sind es 28 Elemente. Die hohe Anzahl der Elemente in Höhenrichtung ist erforderlich, um die Verformung aufgrund der Hertzschen Abplattung abbilden zu können. Berechnungen mit einer geringeren Anzahl von Elementen zeigten starke Sprünge im Verlauf der Zahnpaarsteifigkeiten.

Im Folgenden werden die Randbedingungen für die Steifigkeitsberechnungen beschrieben. In der Mitte der beiden Zahnradbohrungen ist jeweils ein Knotenpunkt festgelegt worden. Von diesem Punkt gehen ideal starre RBE2 Elementen aus und legen so Punkte auf den Zylinderflächen der Bohrungen fest. Die RBE2 Elemente übertragen alle Bewegungen, welche auf den Knoten in der Mitte der Bohrung aufgebracht werden, auf die einzelnen Punkte der Zylinderfläche. Die Steifigkeiten der Wellen werden dadurch nicht mehr mit berücksichtigt. Der Knoten in der Mitte des Rades ist sowohl in axialer als auch in radialer Richtung fest. Der Knoten in der Mitte des Ritzels liegt ebenfalls in axialer und radialer Richtung fest, kann allerdings Drehungen ausführen, so dass an dieser Stelle ein Drehmoment eingeleitet werden kann.

Das am Ritzel eingeleitete Drehmoment stützt sich über die Verzahnung und das Rad an dem festgelegten Knoten in der Radmitte ab. Das Einleiten eines Drehmomentes in der Ritzelmitte führt zu Verformungen der Verzahnungen und Radkörper und damit auch zu einer Drehung

des Knotens in der Ritzelmitte. Wird dieser Drehwinkel mit dem Grundkreisradius des Ritzels multipliziert, so ergibt sich die Verschiebung auf der Eingriffslinie.

$$w_{ges} = \varphi_{RitBo} \cdot r_{bl} \quad (5.23)$$

mit

w_{ges}	[mm]	Verschiebung der Zahnpaarung in Eingriffsrichtung
φ_{RitBo}	[rad]	Verdrehwinkel
r_{bl}	[mm]	Grundkreisradius des Ritzels

Die Division der Normalkraft durch die Verschiebung der Zahnpaarung ergibt die Zahnpaarsteifigkeit der untersuchten Verzahnung. Um einen Doppeleingriff zu vermeiden und nur die Zahnpaarsteifigkeit eines Zahnpaars über die gesamte Eingriffsstrecke zu bestimmen, werden die beiden angrenzenden Zähne des Rades gelöscht. Das Modell mit den gelöschten Nachbarzähnen zu ist in Bild 5.18 zu sehen.



Bild 5.18: Modell mit gelöschten Nachbarzähnen zur Bestimmung der Zahnpaarsteifigkeit

Im ersten Schritt sind die zwei analytischen Ansätze zur Berechnung der Zahnpaarsteifigkeit miteinander verglichen worden. Bild 5.19 zeigt die berechneten Zahnpaarsteifigkeiten eines Zahnpaars des Standardgetriebes mit einem Modul von $m_n = 4,5$ mm über die Eingriffsstrecke. Hierin sind Zahnpaarsteifigkeiten einmal mit dem analytischen Ansatz unter Berücksichtigung der Radkörperverformung nach Ziegler [Z1] und einmal mit RIKOR ermittelt worden. Der Vergleich zeigt eine Abweichung der maximalen Steifigkeit der Berechnungen zueinander von 13 %.

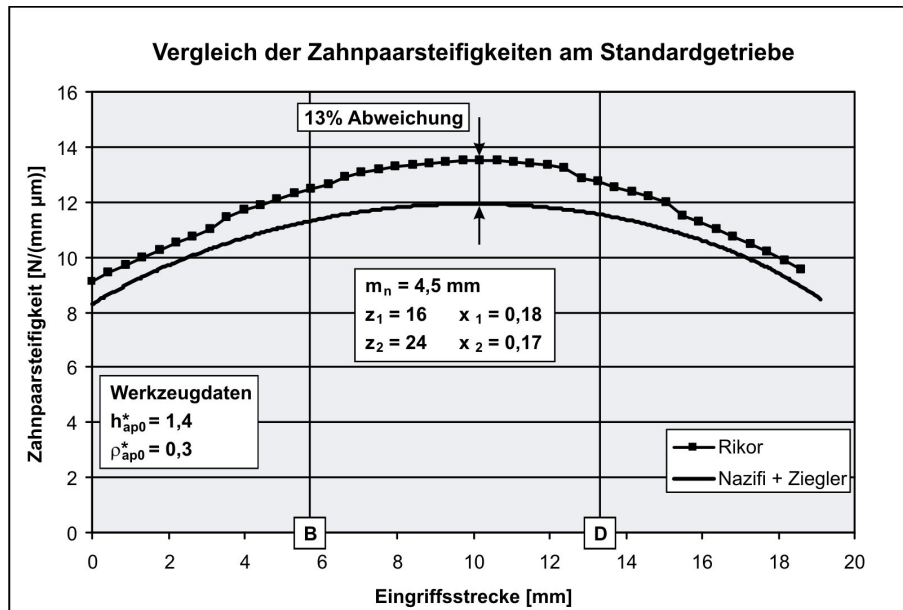


Bild 5.19: Zahnpaarsteifigkeiten am Standardgetriebe ermittelt mit dem analytischen Ansatz unter Berücksichtigung der Radkörperverformung nach Ziegler und mit RIKOR

Wird der von Ziegler beschriebene Einfluss des Radkörpers vernachlässigt, so ist in Bild 5.20 zu erkennen, dass der analytische Ansatz und der Steifigkeitsverlauf nach RIKOR in der gleichen Größenordnung liegen und die maximalen Steifigkeiten nur noch 2,5 % auseinander liegen.

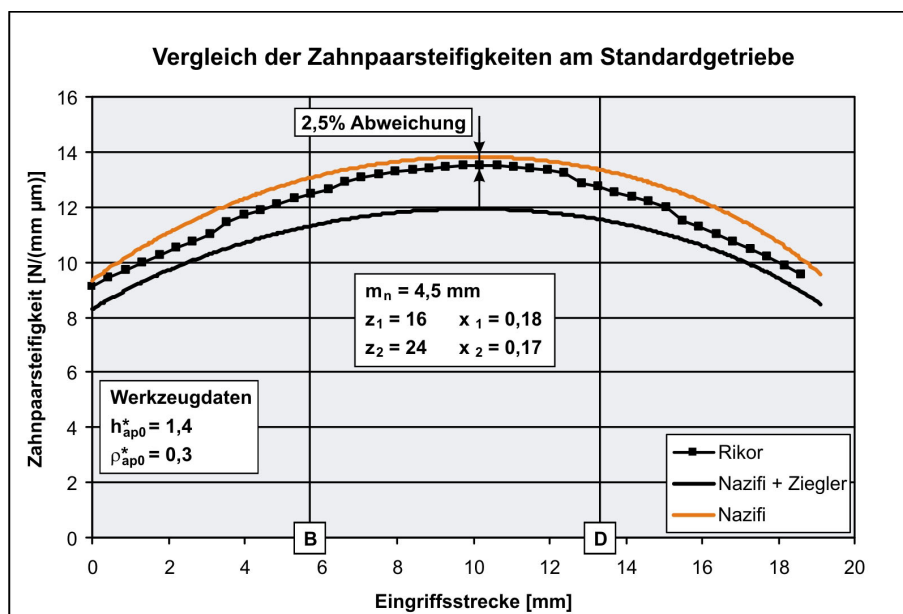


Bild 5.20: Zahnpaarsteifigkeiten ermittelt mit dem analytischen Ansatz ohne und mit Berücksichtigung der Radkörperverformung nach Ziegler und mit RIKOR

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der FE-Berechnungen zeigt in Bild 5.21, dass die Variante ohne die Berücksichtigung der Radkörperbreite die Ergebnisse besser wiedergibt. Es ist zwar

eine Abweichung von 5,4 % an der maximalen Stelle zu messen, jedoch ist anzumerken, dass das FE-Modell die Radkörperbreite richtig abbildet und die analytischen Ansätze dieses nicht berücksichtigen.

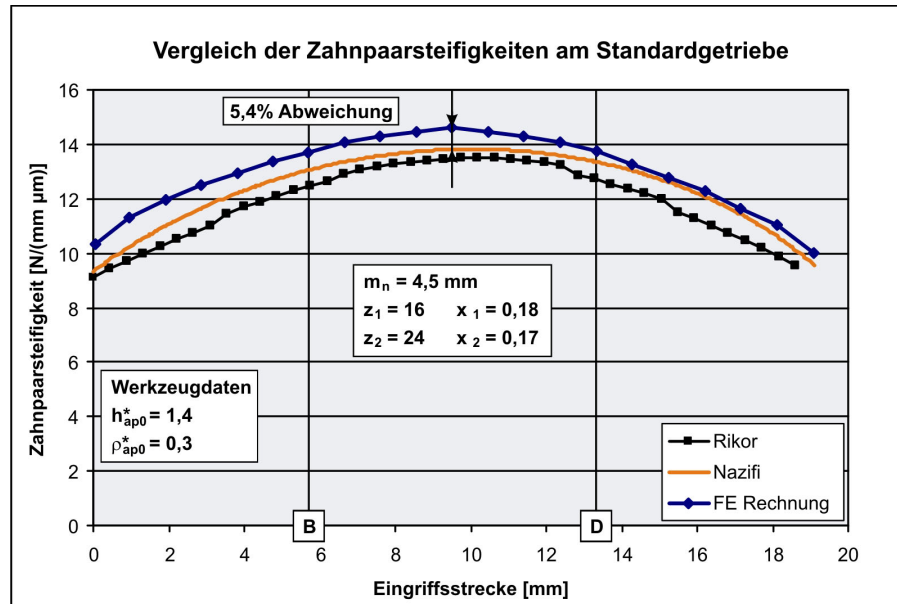


Bild 5.21: Zahnpaarsteifigkeiten mit dem analytischen Ansatz ohne Berücksichtigung der Radkörperverformung nach Ziegler, mit FE und mit RIKOR

Wird die Steifigkeit um 5 % erhöht, zeigt Bild 5.22, dass der Verlauf der Zahnpaarsteifigkeit sehr gut abgebildet wird.

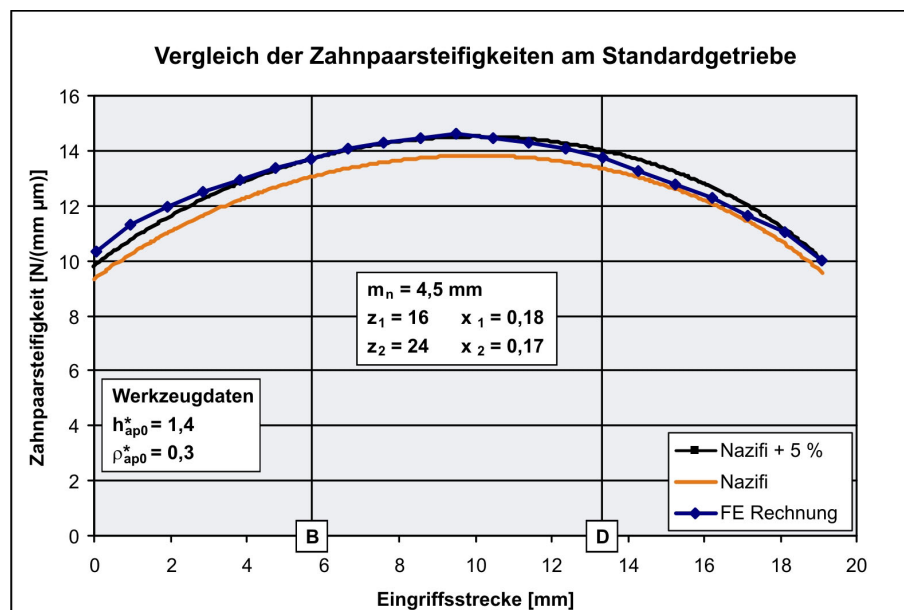


Bild 5.22: Zahnpaarsteifigkeiten mit dem analytischen Ansatz und mit FE

Auch eine Variation der Geometrie durch die Änderung der Profilverschiebungen zeigt eine gute Übereinstimmung der Steifigkeiten. In Bild 5.23 beträgt die Abweichung der maximal

berechneten Steifigkeiten 4,5 %. In diesem Diagramm ist erneut die analytisch berechnete Zahnpaarsteifigkeit um 5 % erhöht worden. Es zeigt sich auch bei diesem Vergleich ein fast identischer Verlauf der Steifigkeit.

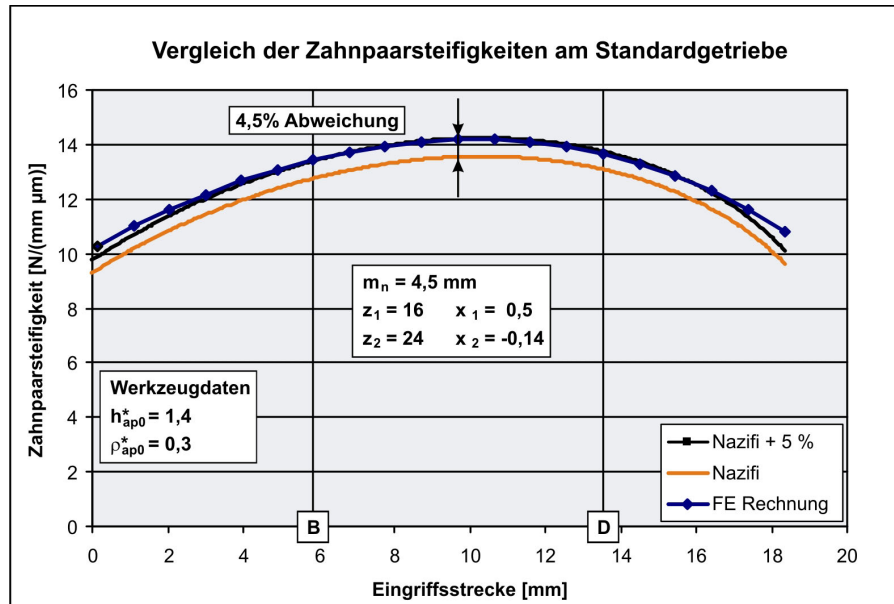


Bild 5.23: Zahnpaarsteifigkeiten mit dem analytischen Ansatz und mit FE für eine geänderte Profilverschiebung von $x_1 = 0,5$

Die Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass das analytisch hergeleitete Modell zur Berechnung der Zahnpaarsteifigkeiten eine sehr geringe Abweichung zu FE-Berechnungen aufweist. Im Vergleich zur FE-Berechnung, welche bei einer feinen Vernetzung für ein hinreichend genaues Ergebnis bis zu 120 Stunden für die gesamte Eingriffsstrecke benötigt, ist die Zahnpaarsteifigkeit analytisch innerhalb von wenigen Sekunden berechnet.

5.4.3. Berechnungsergebnisse

Auf Basis der beschriebenen Funktionen ist ein Programm zur Berechnung der Zahnpaarsteifigkeit erstellt worden. Die unterschiedlichen geometrischen Einflussgrößen auf die Steifigkeit können nun dargestellt werden. Die Veränderung der Zahnsteifigkeit durch den Werkzeugkopfhöhenfaktor kann nun getrennt analysiert werden.

Das Bild 5.24 zeigt die Ergebnisse der Steifigkeitsänderung aufgrund einer geänderten Werkzeugkopfhöhe. Es ist zu sehen, dass der Maximalwert der Steifigkeit im untersuchten Bereich um 20 % variiert. Die Steifigkeiten im Bereich der für den vorzeitigen Eingriff ausschlaggebenden Eingriffsposition, dem äußeren Einzeleingriffspunktes D, verändern sich in ähnlicher Größenordnung. Die Verformung des Zahnes und somit das Kriterium für die Auslegung der optimalen Kopfrücknahme ist demnach eine Funktion der Werkzeugkopfhöhe.

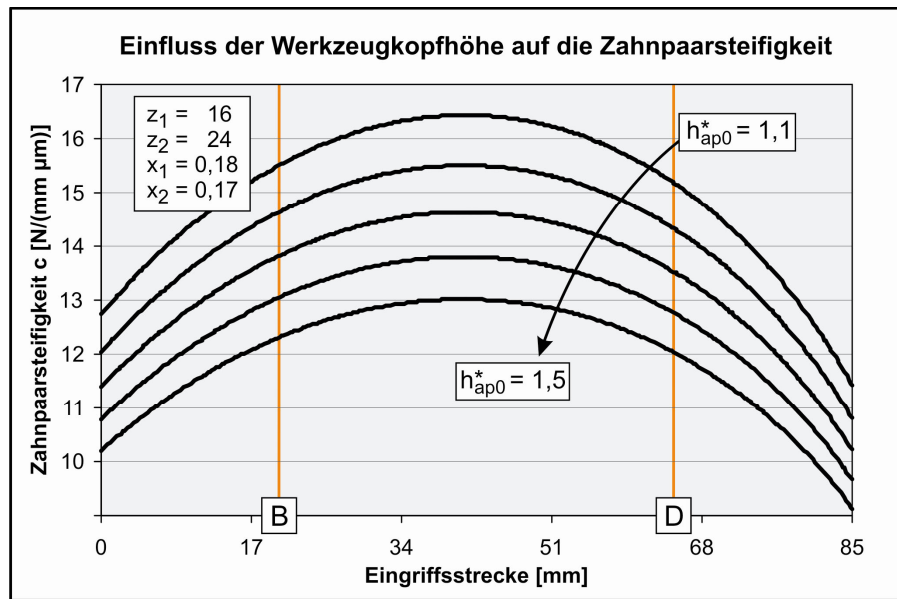


Bild 5.24: Einfluss der Werkzeugkopfhöhe auf die Zahnpaarsteifigkeit, $\Delta h_{ap0}^* = 0,1$

Die Werkzeugkopfhöhe zur Herstellung der Verzahnung des Standardgetriebes hat $h_{ap0}^* = 1,4$ betragen, die Werkzeugkopfhöhe der Großgetriebeverzahnung jedoch $h_{ap0}^* = 1,5$. Dieser Unterschied lässt sich auch in den bisherigen Versuchsergebnissen wiederfinden. Es hat sich bisher wiederholt deutlich gezeigt, dass der vorzeitige Eingriff am Großgetriebe viel stärker in Erscheinung tritt, da infolge der geringeren Steifigkeiten die größeren Zahnverformungen auch zu einem ersten Kontakt der Nachbarzähne führen.

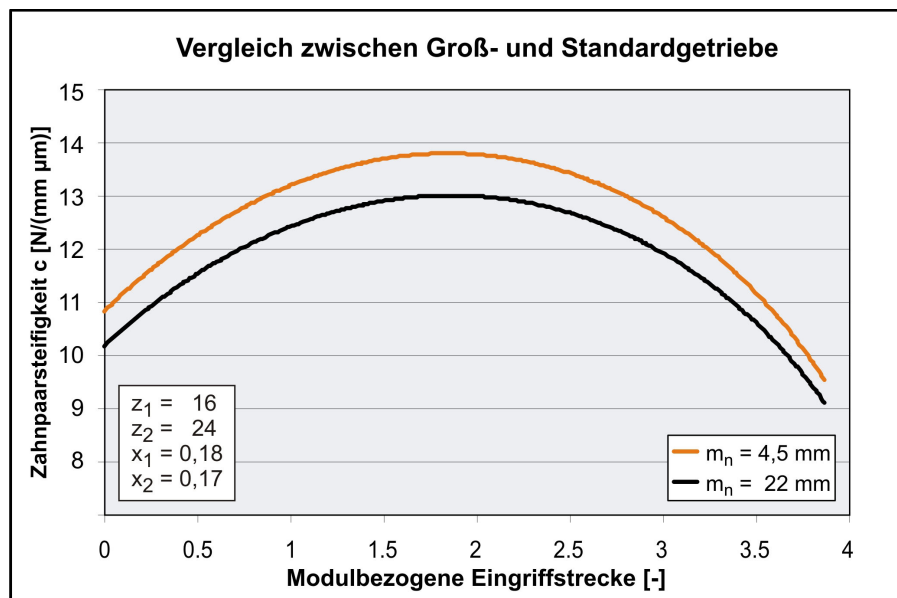


Bild 5.25: Zahnpaarsteifigkeitsverlauf für Groß- und Standardgetriebe

Das Ergebnis der Zahnpaarsteifigkeitsberechnung für beide Getriebegrößen ist in Bild 5.25 dargestellt. Die Verzahnung am Standardgetriebe ist um 6 % steifer als die des Großgetriebes.

5.5. Hertzische Flächenpressungen für unterschiedliche Kopfrücknahmebeträge und –formen

Untersuchungen im Vorhaben 286 II [L5] stellten eine starke Verringerung des Ersatzkrümmungsradius im Übergangsbereich zwischen Evolvente und Kopf- bzw. Fußrücknahme fest. Diese Verringerung führt zu einer Erhöhung der Hertzischen Pressungen in diesem Bereich der Zahnflanke. Die halbe Breite der Hertzischen Abplattung und die Hertzische Pressung gehen direkt in die Berechnung der Auskolkungstiefe nach [S3] ein und erhöhen somit die Gefährdung der Zahnflanke im Hinblick auf die Graufleckentragfähigkeit.

Nicht nur eine gewollte Rücknahme kann die oben beschriebene Verringerung des Ersatzkrümmungsradius bewirken, sondern auch Auskolkungen aufgrund von Graufleckenbildung und Schabemarken am Zahnfuß. Laut [H2] haben diese Schabemarken eine hohe Tiefe und somit einen sehr scharfkantigen Übergang zur Evolvente. Somit ist anzunehmen, dass dieser Übergang wiederum zu einer Verringerung des Ersatzkrümmungsradius führt.

Die bisher betrachteten Pressungen längst der Eingriffslinie sind mittels Ersatzkrümmungsradien berechnet worden, die von einer idealen Evolvente ausgehen. Berechnungen von [L4] haben gezeigt, dass die Ersatzkrümmungsradien jedoch sehr stark reduziert werden können. Je nach Korrekturform führen diese zu einer lokalen Überhöhung oder zu einer ständig höheren Last als bei einer idealen Evolvente.

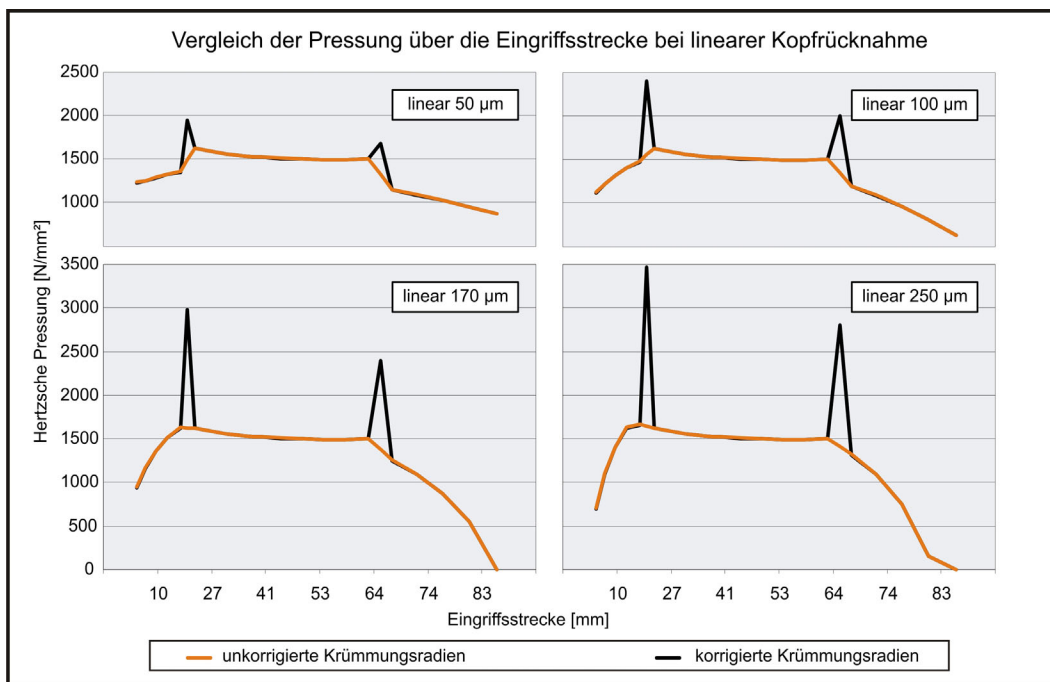


Bild 5.26: Vergleich der Pressungsverläufe einer C Verzahnung am Großgetriebe mit linearen Korrekturen und Beträgen von 50 µm bis 250 µm in der Laststufe 10 des GF-Tests

Wie an der Verzahnung mit der zusätzlichen Kopfabrundung deutlich geworden ist, können die sehr stark verkleinerten Krümmungsradien zu lokalen Lastüberhöhungen führen und diese Bereiche schädigen. Exemplarisch sind in Bild 5.26 und in Bild 5.27 die Pressung für unterschiedliche Korrekturformen mit einer idealen und mit einer korrigierten Evolvente berechnet worden.

Deutlich wird, dass bei einer linearen Kopfrücknahme die Auswirkung auf die Pressung im korrigierten Bereich sehr gering ist und unter einem Prozent liegt. Jedoch zeigt sich am Übergang von der Evolvente zur Kopfrücknahme eine sehr starke Reduzierung des Ersatzkrümmungsradius, die sich mit steigendem Korrekturbetrag immer stärker auswirkt und lokal zu sehr hohen Pressungen führen kann. Bei einem Kopfrücknahmebetrag von 250 μm führt dies zu einer Erhöhung von bis zu 110 %.

Wird nun die parabolische Korrektur betrachtet, ist im Vergleich zur linearen Korrektur ein größerer Unterschied zwischen der idealen und der korrigierten Evolvente im Bereich der Korrektur sichtbar. Bild 5.27 zeigt diese Unterschiede deutlich. Kurz nach Beginn der Kopfrücknahme steigt die Pressung im Vergleich zur idealen Evolvente um 8 %. In diesem Fall entspricht diese Erhöhung einer Lasterhöhung um 135 N/mm^2 . Auch im Bereich der korrigierten Flanke bleibt die Pressung mit ca. 5 % höher als bei der idealen Flanke.

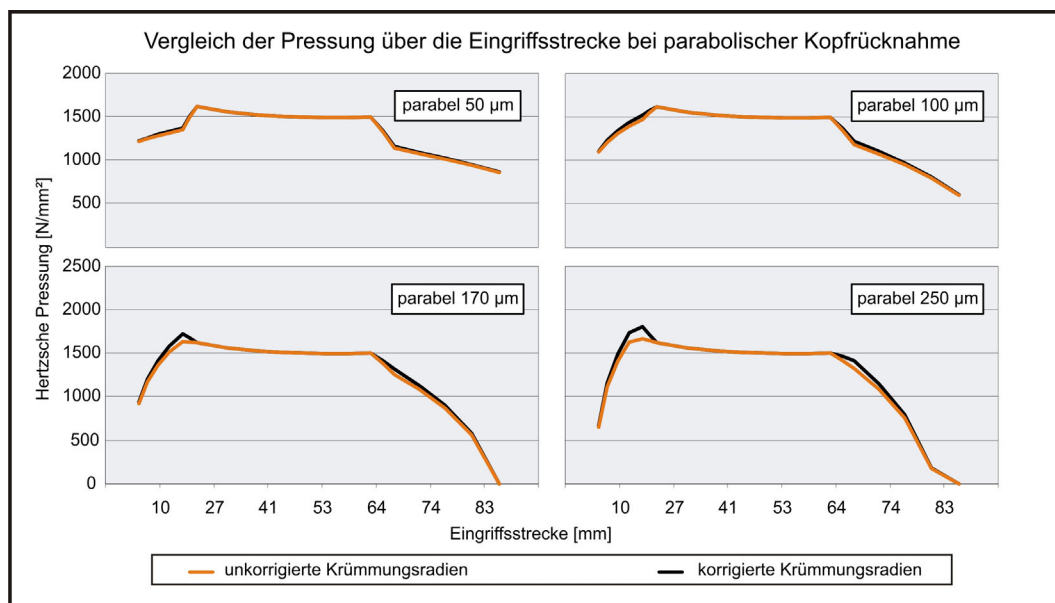


Bild 5.27: Vergleich der Pressungsverläufe einer C Verzahnung am Großgetriebe mit parabolischen Korrekturen und Beträgen von 50 μm bis 250 μm in der Laststufe 10 des GF-Tests

In Bild 5.28 sind die Hertzische Flächenpressungen beider Kopfrücknahmevarianten für einen Betrag von $C_a = 250 \mu\text{m}$ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beide Varianten Vor- und Nachteile aufweisen. Insgesamt ist die parabolische Kopfrücknahme der linearen, im Bezug auf die

Pressungsverteilung entlang der Eingriffslinie und insbesondere im Bereich des Überganges der korrigierten zur unkorrigierten Evolvente, vorzuziehen.

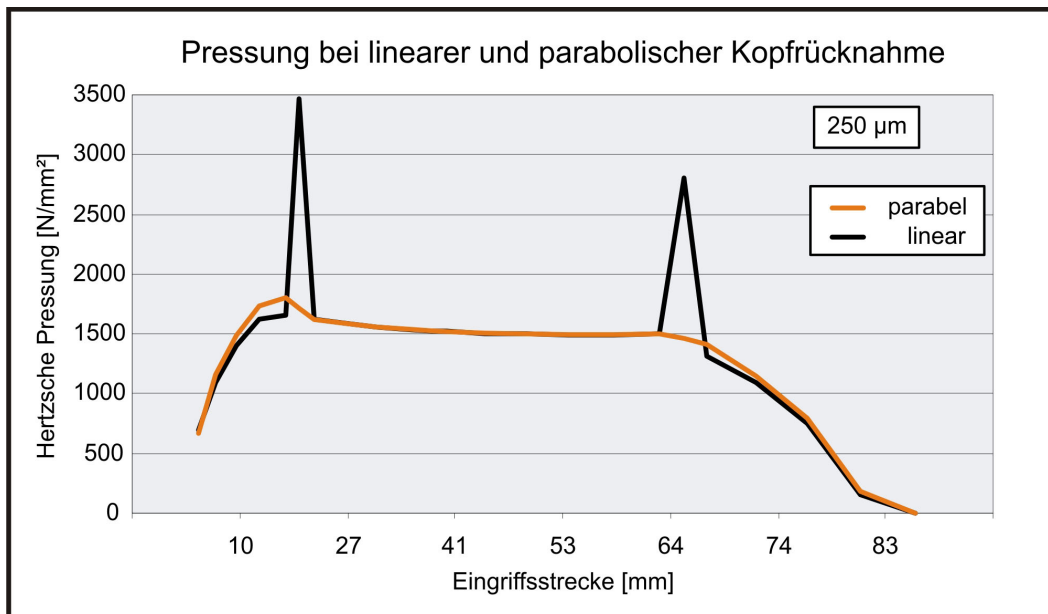


Bild 5.28: Vergleich der Druckverläufe einer C Verzahnung am Großgetriebe mit linearer und parabolischer Korrekturen und einem Betrag von $250\ \mu\text{m}$ in der Laststufe 10 des GF-Tests

Denkbar ist auch eine Kombination zwischen der parabolischen und der linearen Kopfrücknahme. Beginnend mit einer parabolischen Kopfrücknahme, um am Übergang zwischen der Evolvente und dem korrigierten Bereich der Flanke den Ersatzkrümmungsradius nicht so stark zu reduzieren, sollte schnell in eine lineare Kopfrücknahme übergegangen werden.

5.6. Modellvorstellung Grauflecken / Grübchen

In Bild 5.29 ist die neue Modellvorstellung zur Grübchenentstehung aufgrund der Entwicklung der Profilformabweichung am Übergang der verschlissenen bzw. korrigierten Zahnflanke zur Evolvente dargestellt. Die helle Kurve stellt die ausgekolkte Zahnflanke einer Verzahnung mit einer sehr niedrigen arithmetischen Mittenrauheit dar. Die dunkel dargestellte Kurve zeigt die ausgekolkte Flanke mit einer sehr hohen arithmetischen Mittenrauheit. Zu Beginn entwickelt sich in beiden Zahnfüßen eine Auskolkung aufgrund des vorzeitigen Eingriffes. Im Laufe des Versuches tritt bei der Verzahnung mit der niedrigen Rauheit keine Graufleckigkeit auf, somit entsteht entlang der Eingriffsstrecke kein Verschleiß und der minimale Krümmungsradius am Übergang zur verschleißarmen Flanke verändert die Position auf der Eingriffsstrecke nicht. Die Flanke mit der höheren Rauheit verschleißt aufgrund der Graufleckigkeit entlang der Eingriffsstrecke. Somit wandert in diesem Fall der minimale Krümmungsradius entlang der Eingriffsstrecke in Richtung Wälzpunkt und der Krümmungsradius

vergrößert sich stetig. Es erfährt also immer eine andere Position auf der Zahnflanke die maximale Pressung. Werden die hell dargestellten Kurven betrachtet tritt die maximale Pressung stets an der gleichen Position der Zahnflanke auf. Da der Ersatzkrümmungsradius an dieser Stelle sehr klein ist, ermüdet der Werkstoff entsprechend schneller und es kommt zu einem Grübchenschaden.

Bei einem zu geringen Kopfrücknahmebetrag kann sich die Graufleckigkeit positiv auswirken, da sie die Position der maximalen Pressung längst der Zahnflanke verlagert und außerdem noch zu einer Vergrößerung des minimalen Krümmungsradiuses führt.

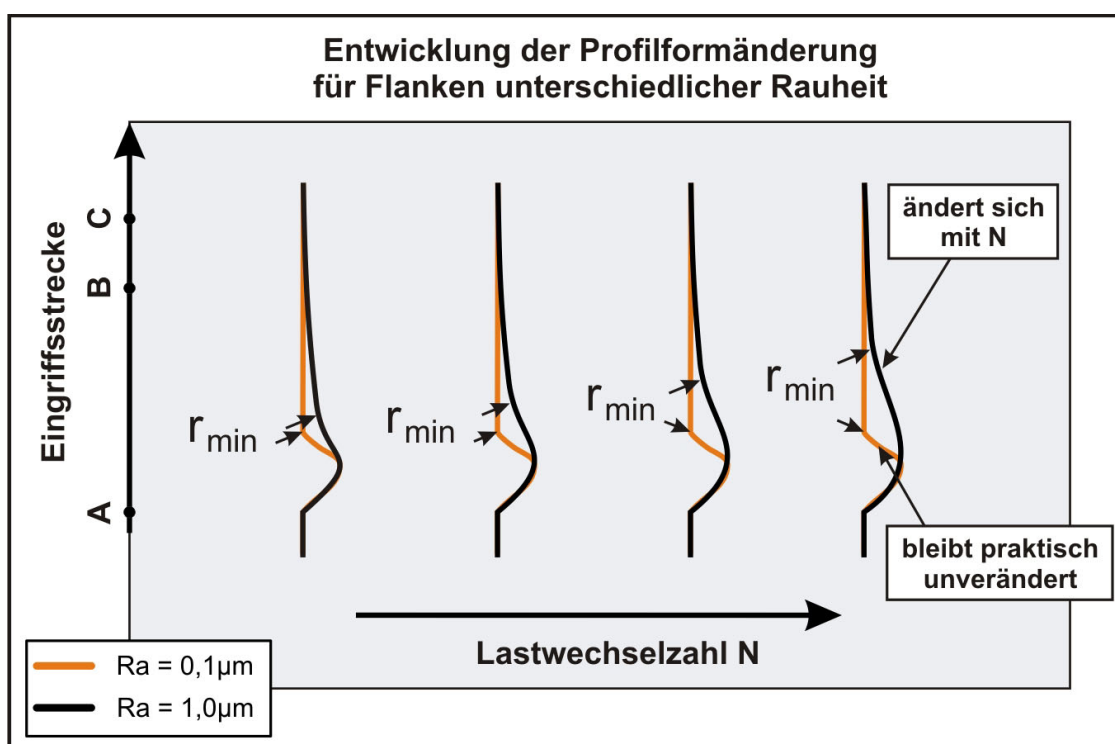


Bild 5.29: Entwicklung der Profilformänderung für Flanken unterschiedlicher Rauheit

Verzahnungen, die mit einer optimalen Kopfrücknahme versehen sind, sollten eine sehr geringe arithmetische Mittenrauheit aufweisen, um die Graufleckigkeit zu unterdrücken. Denn tritt eine Graufleckigkeit auf, so kommt es zu einem Übergang zwischen der verschlissenen und der verschleißarmen Flanke und somit wiederum zu einem minimalen Krümmungsradius und hohen Pressungen an diesem Übergang. Zusätzlich besteht bei einer graufleckigen Zahnflanke, mit vielen Anrissen an der Oberfläche, eine größere Grübchengefahr als bei einer glatten Zahnflanke.

Wie bereits beim Vergleich zwischen den Berechnungen der Auskolkung bedingt durch den vorzeitigen Eingriff und bedingt durch die Graufleckigkeit erwähnt worden ist, besteht hinsichtlich der Entwicklung der Grübchen aus der Schabemarke heraus noch Forschungsbedarf. Es kann zusammenfassend nur auf die hohe Grübchengefahr hingewiesen werden, welche aus den kleinen Krümmungsradien entstehen können. Es ist möglich Hertzsche Pressungen an

dieser Position der Zahnflanke anhand des Ansatzes von Lützig [L5] zu ermitteln, so wie es bereits an den Übergängen der korrigierten zur unkorrigierten Verzahnung durchgeführt worden ist. An den Übergängen der Korrekturen sind Hertzische Flächenpressungen bis zu $p_{HC} = 3500 \text{ N/mm}^2$ berechnet worden. Für den verwendeten Werkstoff bedeutet es eine Belastung in der Zeitfestigkeit, so dass der frühe Ausfall der Verzahnungen durch Grübchenschäden auch hierdurch gut erklärt werden kann.

6. Begleitende Untersuchungen

6.1. Profilmessung mit unterschiedlichen Messmethoden

Im Rahmen des aktuellen Vorhabens sind neue Methoden der mobilen Profilmessung untersucht worden. Eine Marktanalyse [N2] zeigte zwei grundlegend unterschiedliche Arten von Systemen, die eine Vermessung der Profilform in einem Getriebe zulassen würden. Zum einen sind die berührungslosen optischen Systeme zu nennen, und zum anderen gibt es Konturmesssysteme die auf das bewährte Tastsystem der Rauheitsmessung zurückgreifen.

Zum Vergleich der unterschiedlichen Messsysteme sind die Messergebnisse denen auf einem Verzahnungsmesszentrum der Firma Klingelnberg gegenübergestellt worden.

6.1.1. Taktile Systeme

Die Tastsysteme werden von allen Firmen angeboten, die ein Rauheitsmesssystem anbieten. An der Verzahnung des Großgetriebes sind Messungen von der Firma Hommel Etamic und der Firma Mahr durchgeführt worden. Beide Ergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung und zeigen, aufgrund der kleineren Tastspitze, eine größere Auflösung als mit der Messmaschine von Klingelnberg zu messen ist. Bild 6.1 zeigt die Ergebnisse der Konturmessung. Ein Nebenprodukt dieser Messungen ist die Vermessung der Oberflächenstruktur.

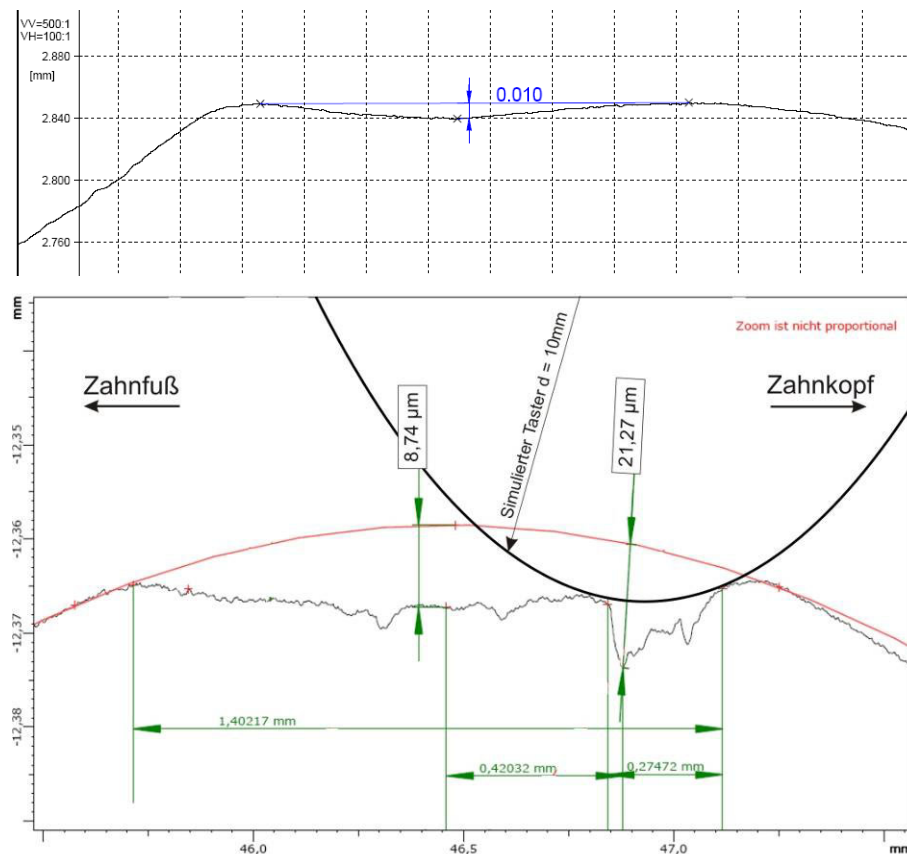


Bild 6.1: Messergebnisse der Konturmessung, oben: Hommel Etamic, unten: Mahr

Die Nachteile dieser Systeme sind die schwere Ausrichtung an der Verzahnung und die Tatsache, dass die Software nicht für eine Profilmessung ausgelegt worden ist. Über Umwege kann umständlich das Konturprofil in eine CAD Software geladen und in dieser Software mit einem erstellten Verzahnungsprofil verglichen werden. Bei größerer Nachfrage durch Getriebefirmen lässt sich dieses Problem durch die Erweiterung der Software lösen.

6.1.2. Optische Systeme

Das optische System ist von der Firma FRT aus Bergisch Gladbach zur Verfügung gestellt worden. FRT arbeitet mit der konoskopischen Holographie zur Vermessung von stark gekrümmten Flächen.

Bei der konoskopischen Holographie wird ein Laserstrahl auf das Messobjekt gerichtet. Das im Messfleck gestreute Licht wird vom Messkopf erfasst. Mit zwei Polarisatoren und einem anisotropen Kristall werden Teilstrahlen erzeugt, die den Kristall mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit durchlaufen und sich auf dem Detektor überlagern. Aus dem Interferenzbild wird der Abstand zum Messobjekt bestimmt.

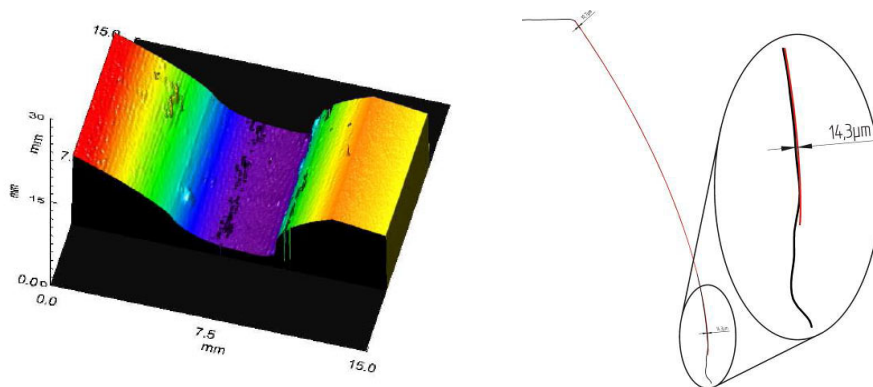


Bild 6.2: Oberflächenvermessung mittels konoskopischer Holographie

In Bild 6.2 rechts ist das Ergebnis der Vermessung zu erkennen. Der Vorteil dieses Messsystems besteht in der berührungslosen Messung und in der Aufnahme eines größeren Teils der Zahnflanke. Somit wird das Ausrichten der Verzahnung erheblich erleichtert.

Zu beiden Messmethoden kann gesagt werden, dass beide nicht für diese Anwendung konzipiert sind und viele Anpassungen erforderlich sind. Jedoch zeigen beide Wege der Oberflächenmessung eine mögliche Lösung zur Messung des Evolventenprofils auf.

6.2. Riefenbildung an der Verzahnung

In den Versuchen konnte eine Riefenbildung an den Zahnköpfen der getriebenen Zahnräder festgestellt werden. Deutlich wurde dieser Effekt bei dem Versuch mit geänderter Treibrichtung. Hierbei traten erstmals Riefen am Zahnkopf des Ritzels auf. In Bild 6.3 sind die Riefen dargestellt. Diese Riefen sind nicht als Profilformabweichung messbar.

Erste Bilder der Schabemarke in den Zahnfüßen der Radsätze aus dem Vorhaben 286 II, siehe Bild 6.4, weisen in diesem Bereich auch eine Riefenbildung auf. Eine mögliche Erklärung für diese Riefen ist im vorzeitigen Eingriff zu suchen. Beim vorzeitigen Eingriff kommt der Zahnkopf des getriebenen Rades mit der Zahnflanke des treibenden Rades in Kontakt, hierdurch trifft die Zahnkopfkante des getriebenen Rades auf die Flanke des treibenden Rades und verursacht eine Schabemarke. Die Rohlinge der Zahnräder werden vor dem Fräsen auf das Sollmaß gedreht. Diese Verarbeitung verursacht ein Muster auf dem Kopfkreisdurchmesser. Dieses Muster wird beim vorzeitigen Eingriff auf die Schabemarke übertragen. Nach dem vorzeitigen Eingriff kommen die Zahnflanken in den regulären Gleitwälzkontakt, und die Riefen aus dem Schabebereich des treibenden Rades übertragen sich auf die Zahnflanke des getriebenen Rades.

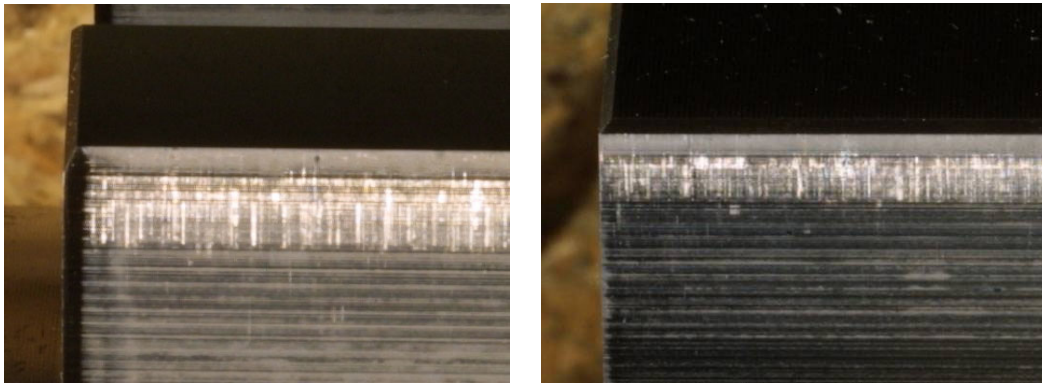


Bild 6.3: Riefen am Zahnkopf, links: Ritzel der Verzahnung GG3 1212 Seite 2, rechts: Rad der Verzahnung GG3 1212 Seite 1

Durch das Übertragen des Musters vom Zahnkopf auf die Schabemarke und von der Schabemarke auf die Zahnflanke ist ein Beleg für den Metall–Metall–Kontakt beim vorzeitigen Eingriff erbracht worden. Zusätzlich führen diese Riefen zu einer Aufrauung der Oberfläche, jedoch orthogonal zur Wälzrichtung.

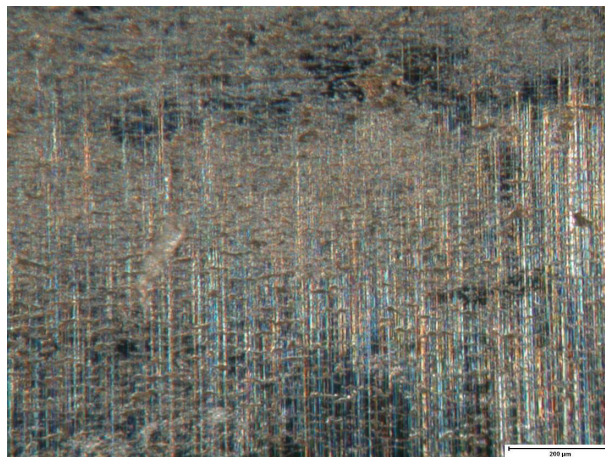


Bild 6.4: Schabemarke mit Riefen im Zahnfuß eines Ritzels aus dem Vorhaben 286 II

6.3. Werkstoffkundliche Untersuchungen

An den Verzahnungen des Standardgetriebes sind im Anschluss an die Versuche werkstoffkundliche Untersuchungen durchgeführt worden. Bei diesen Untersuchungen sind Schliffbilder der Zahnflanken entstanden, anhand derer Aussagen zum Schadensverlauf und zur Werkstoffgüte getroffen werden können. Ebenfalls sind die Härteverläufe der Zahnflanken nach den Versuchen an drei Radsätzen gemessen worden.

6.3.1. Härtemessung

Im Bild 6.5 sind die Härteprofile dreier Versuchszähne dargestellt. Alle untersuchten Zahnflanken weisen eine oberflächennahe Härte von 710 - 720 HV auf. Nach [S1, S2] entspricht diese Härte bei den gegebenen relativen Schmierfilmdicken von $\lambda = 0,1 - 0,3$ der Standardverzahnungen und $\lambda = 1,1$ bei den gleitgeschliffenen Radsätzen einer grauflackengefährdeten Verzahnung.

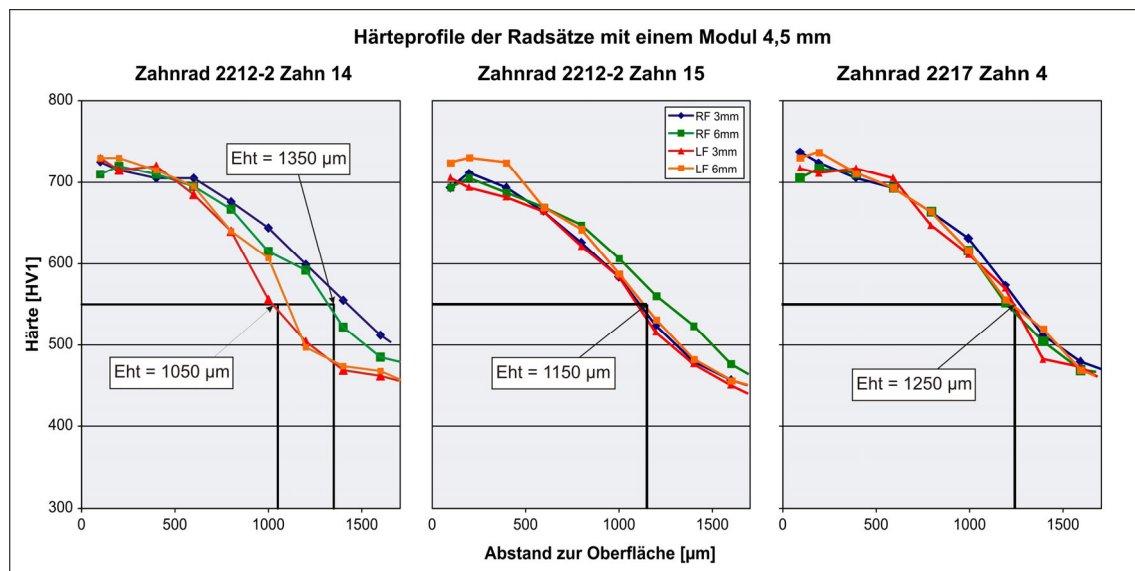


Bild 6.5: Härteprofile von drei Versuchszähnen nach dem Versuch

Die Einsatzhärte tiefen liegen zwischen $Eht = 1050 \mu\text{m}$ und $1350 \mu\text{m}$. Die geforderte Einsatzhärte tiefen beträgt jedoch $Eht = 900 \mu\text{m} + 150 \mu\text{m}$. Dies bedeutet nach [T2] eine Absenkung der Grübchentragsfähigkeit auf 95 % von σ_{Hlim} . Die Verzahnung GG3 2212-2 ist im Dauerlauf aufgrund eines Grübchenschadens ausgefallen. Die Reproduktionsversuche mit anderen Zahnradern, welche von anderen Herstellern bezogen worden sind, zeigten ein ähnliches Schadensbild, so dass der Schaden nicht nur der Einhärtetiefe zugeschrieben wird, sondern dem geringen Verschleiß aufgrund der fehlenden Grauflackigkeit.

Zusätzlich sind Härtemessungen an Proben des vorangegangenen Projektes FVA 286 II durchgeführt worden. Insbesondere ist hierbei die Schabemarke untersucht worden. Anhand der Härtemessung gilt es zu klären, ob im Bereich der Schabemarke der Werkstoff plastisch deformiert wird oder die Flanke adhäsiv bzw. abrasiv verschleißt.

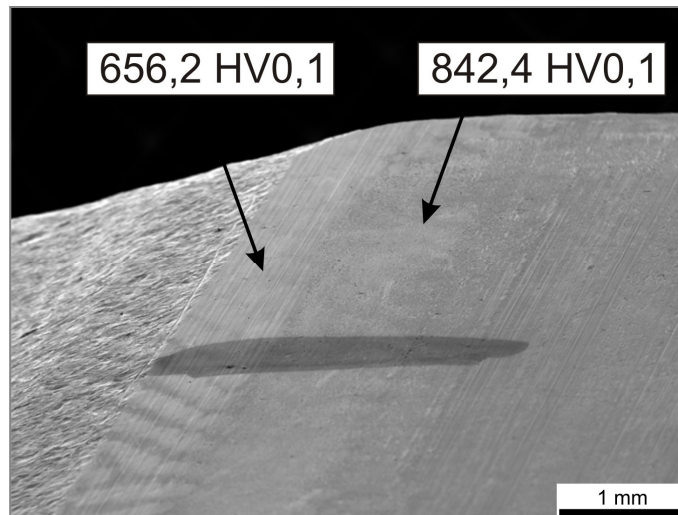


Bild 6.6: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Zahnfußes im Bereich der Schabemarke

Bild 6.6 zeigt das gemittelte Ergebnis aus jeweils sieben Messungen. Die Messungen zeigen, dass die Zahnflanke im Ursprungszustand, unterhalb der Schabemarke, wesentlich weicher ist als in der Schabemarke.

Weitere Messungen mit der doppelten Prüfkraft an zwei weiteren Zahnflanken zeigen ein ähnliches Bild. Die Ergebnisse der Messungen mit der Streubreite sind in Bild 6.7 zu sehen.

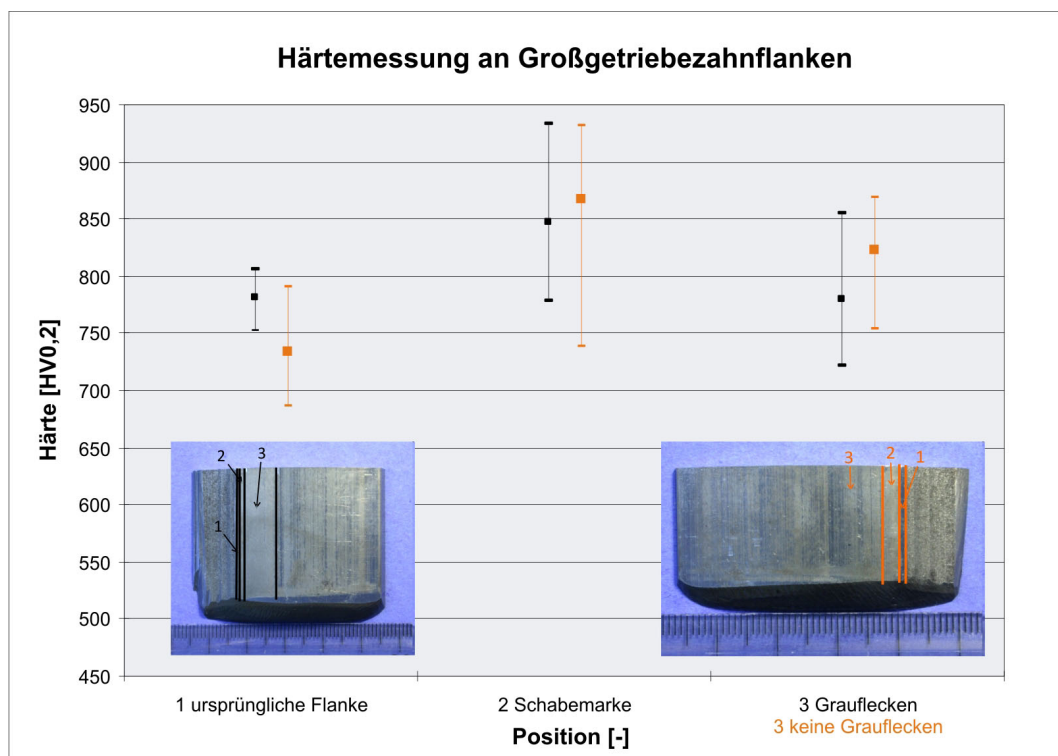


Bild 6.7: Härtemessung mit Streubreite an zwei Großgetriebezahnflanken, schwarz: Zahnflanke mit Grauflecken, orange: Zahnflanke ohne Grauflecken

Im Bereich der unbenutzten Zahnflanke und oberhalb der Schabemarke ist die Härte geringer als in der Schabemarke. Diese Ergebnisse zeigen, dass beim vorzeitigen Eingriff der Werkstoff im Zahnfuß trotz der gegebenen Härte plastisch deformiert wird.

6.3.2. Schliffbilder

In Bild 6.8 sind die Kopfkanten zweier Verzahnungen im Schliff abgebildet. Das linke Bild ist die Kopfkante einer unkorrigierten Verzahnung. Die Kopfkante weist einen sehr geringen Kopfabrundungsradius von $r = 6 \mu\text{m}$ auf.

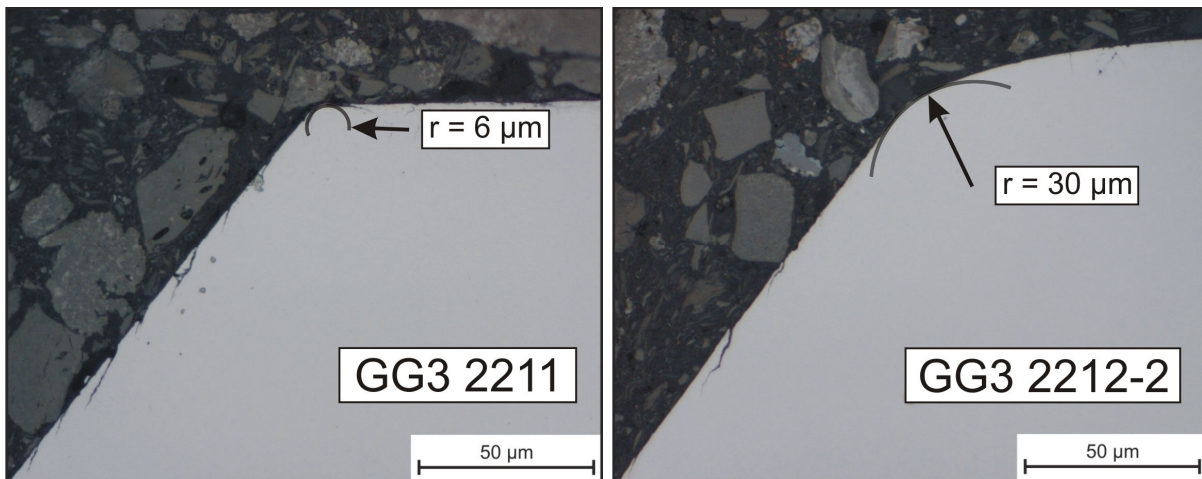


Bild 6.8: Schliffbilder der Kopfkanten mit eingetragenem Kopfabrundungsradius, $m_n = 4,5 \text{ mm}$, links: $Ca = 0 \mu\text{m}$, rechts: gleitgeschliffen mit $Ca = 10 \mu\text{m}$

Im Vergleich hierzu ist die korrigierte, chemisch-mechanisch gleitgeschliffene Verzahnung GG3 2212-2 zu sehen. Bei dieser Verzahnung beträgt die Kopfabrundung $r = 30 \mu\text{m}$. Es zeigt sich erneut, dass das Gleitschleifen die Kopfkanten sehr stark abrundet und somit den vorzeitigen Eingriff mildert.

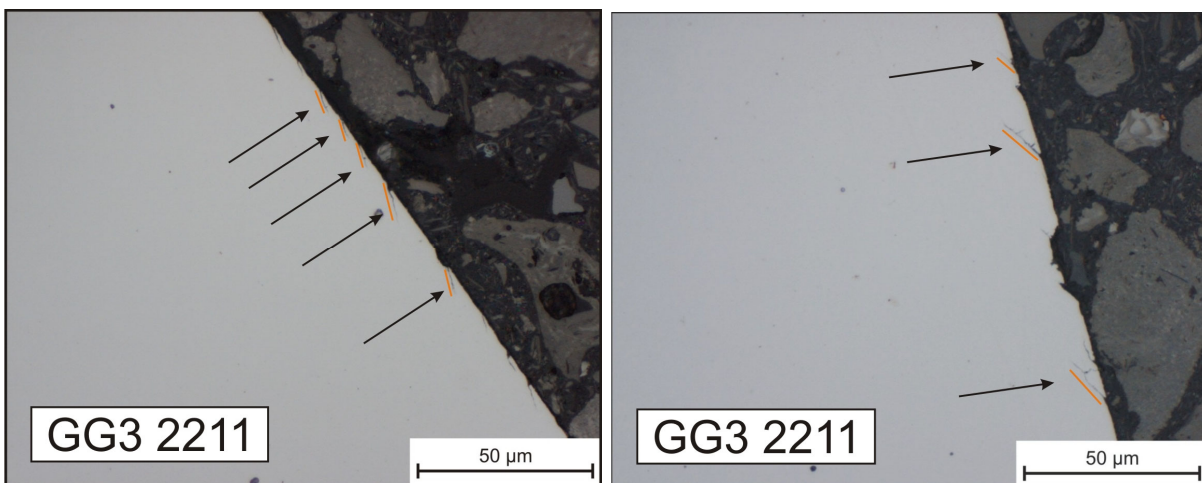


Bild 6.9: Schliffbilder der Verzahnung GG3 2211: links oberhalb des Wälzpunktes, rechts: unterhalb des Wälzpunktes

Die Schlibfbilder im Bild 6.9 zeigen die Flanke der unkorrigierten Verzahnung GG 2211. Im linken Bild ist ein Bereich oberhalb des Wälzpunktes abgebildet. Die Risse, zur Verdeutlichung orange hervorgehoben, zeigen erwartungsgemäß in Richtung des Wälzpunktes. Ebenso verhalten sich die Risse unterhalb des Wälzpunktes, wie rechts im Bild zu erkennen ist.

Wie in Bild 6.8 und Bild 6.9 zu erkennen ist, besitzt der Werkstoff kaum Einschlüsse. Die Qualität des Werkstoffes ist als sehr gut anzusehen.

An dem Radsatz GG 1212 des Großgetriebes ist im ersten Lauf des Dauertests ein Zahnfußbruch entstanden. Die folgenden Untersuchungen haben gezeigt, dass der Bruch in der Passfedernut entstanden ist und sich als Dauerbruch über die gesamte Zahnbreite ausgebreitet hat. Bild 6.10 zeigt die Bruchfläche des Zahnes, und rot eingekreist ist der Rissbeginn markiert.

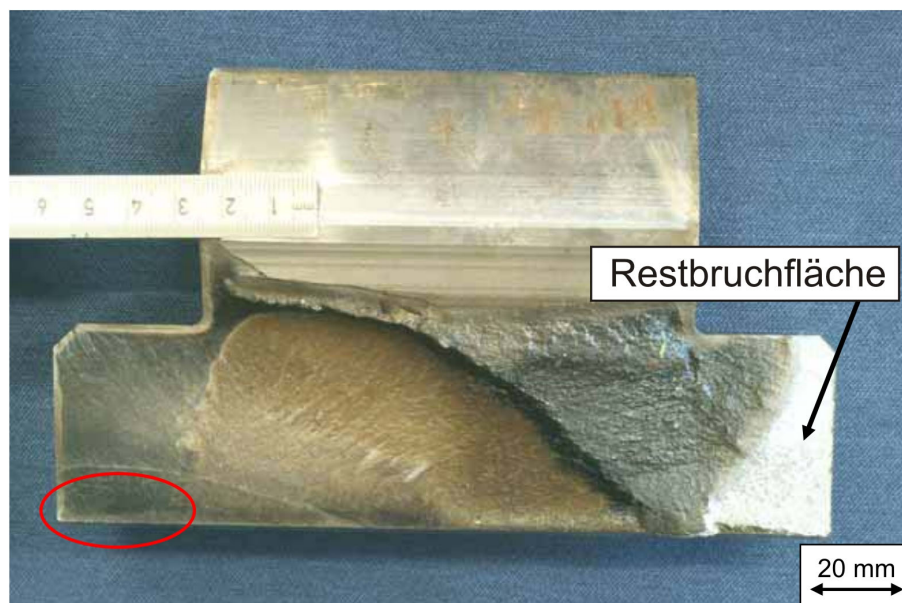


Bild 6.10: GG3 1212: Zahnfußbruchfläche nach $t_{\text{versuch}} = 864 \text{ h}$

Der Rissfortschritt lässt sich aufgrund der teilweise noch vorhandenen Rastlinien gut verfolgen. Obwohl die Bruchfläche eine starke Zerschämmerung aufweist, kann in Bild 6.11 links die Rissausbreitung makroskopisch gut nachvollzogen werden. Der Riss führte trotz Trennung von ca. 90 % der Querschnittfläche nicht zum vollständigen Bruch, was darauf schließen lässt, dass die Lastspannungen niedrig, die Kerbwirkung aber groß war. Zudem dürfte sich die hohe Zähigkeit des bainitischen Kerngefüges positiv ausgewirkt haben. Ein Beginn des Risses im Zahnfuß kann ausgeschlossen werden.

Am polierten Längsschliff, der in der Nähe des Innendurchmessers des Ritzels entnommen worden ist, ist eine visuelle Beurteilung des Reinheitsgrades bei 100facher Vergrößerung durchgeführt worden. Vornehmlich sind oxidische nichtmetallische Einschlüsse geringer Größe zu identifizieren. Ein Beispiel für einen der größeren Einschlüsse ist in Bild 6.11 rechts gezeigt. Nach der vergleichenden Auswertung gemäß DIN 50602, Verfahren M, entspricht der maximale Einschluss der Größenkennziffer 2. In Übereinstimmung mit dem gemessenen

geringen Schwefelgehalt finden sich keine im Lichtmikroskop bei der angegebenen Vergrößerung detektierbaren sulfidischen Einschlüsse. Verglichen mit den üblichen Anforderungen an den Reinheitsgrad solcher Stähle kann dieser Wert so interpretiert werden, dass nur eine geringe Einschlussgröße vorliegt. Die mengenmäßige Anzahl der nichtmetallischen Einschlüsse ist nach visueller Beurteilung ebenfalls als gering eingestuft worden.

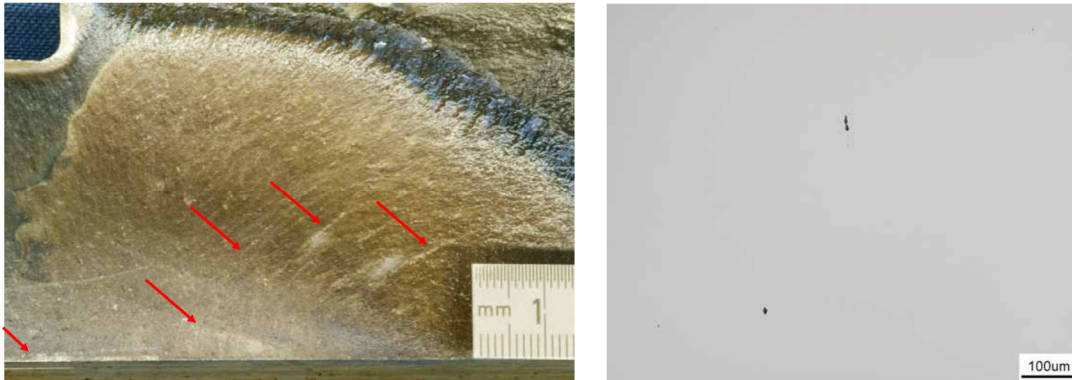


Bild 6.11: links: Bruchfläche vergrößert, rechts: Einschlüsse im Schliffbild

Die werkstoffkundliche Untersuchung kann keinen Mangel am verwendeten Werkstoff feststellen, weder im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung noch in der Gefügeausbildung.

6.3.3. Strukturuntersuchung der Grauflecken-/Schabemarkenfläche

Um die Schädigungen im Zahnfuß der Großgetriebezahnräder besser beurteilen zu können, sind Zähne aus den Zahnrädern des Vorgängervorhabens entnommen und in Segmente gesägt worden. Bild 6.12 zeigt die resultierenden Segmente.

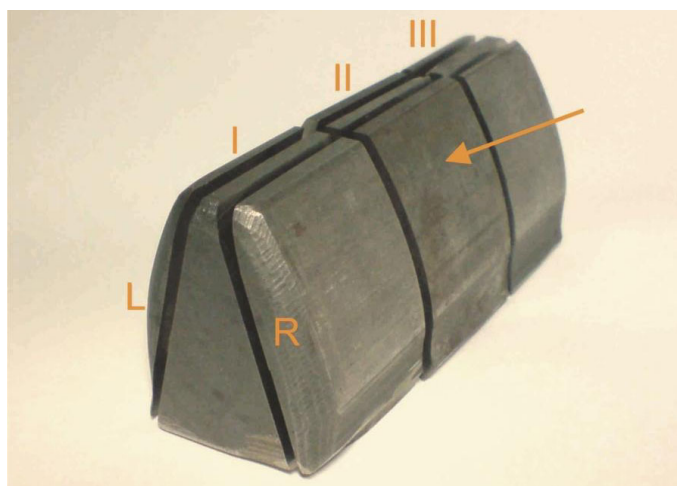


Bild 6.12: Aufteilung der Proben entlang der Zahnbreite

Diese Segmente sind sowohl im Schliff als auch in der Draufsicht untersucht worden. Für die Schliffuntersuchungen ist ein Rasterelektronenmikroskop verwendet worden. Die Ansichten

der Aufsicht der Zahnflanken sind sowohl mit dem Rasterelektronenmikroskop als auch mit einem Stereomikroskop durchgeführt worden [M1].

Exemplarisch ist in Bild 6.13 die Flanke einer Verzahnung in der Draufsicht gezeigt. Rechts oben im Bild ist ein Übersichtsbild, und links ist das Evolventendiagramm dieser Verzahnung gezeigt. Die Schabemarke kann deutlich in drei Bereiche differenziert werden. Beginnend im Zahnfuß ist der erste Bereich durch das sehr dichte Rissnetz und die plastisch deformierte Oberfläche gekennzeichnet. Dieser Bereich entspricht der dreieckähnlichen Auskolkung im Evolventendiagramm. Die Schabemarke wird in Richtung Wälzpunkt von einem schmalen Bereich begrenzt. In diesem Bereich 2 sind die Risse nicht mehr so dicht beisammen und etwas größere Ausbrüche sind zu erkennen. Dieser Bereich entspricht dem Übergang zwischen der Schabemarke und der Graufleckenfläche. Hier liegt ein sehr kleiner Krümmungsradius vor und somit auch sehr hohe örtliche Pressungen. Der anschließende Bereich 3 hat wieder ein dichteres Rissnetzwerk, jedoch nicht so dicht wie der erste Bereich. Bereich 3 entspricht der Graufleckenschädigung.

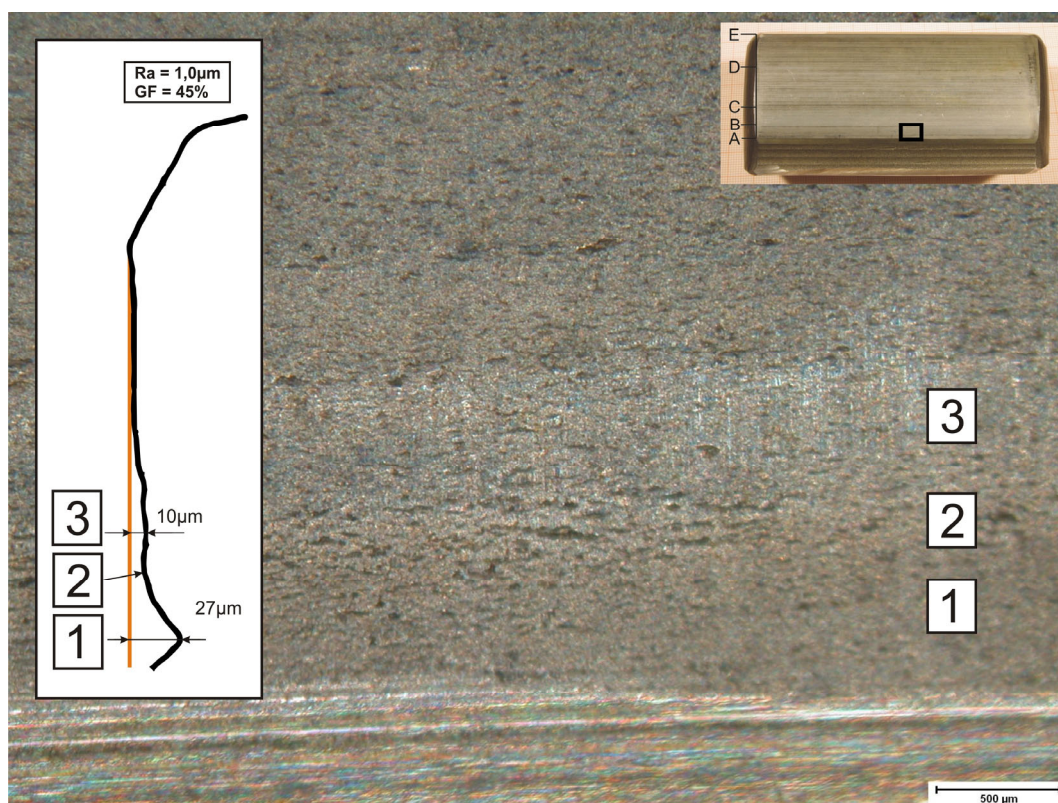


Bild 6.13: Stereomikroskopische Aufnahme der Schabemarke RUB 3 Seite 1, lineare Kopfrücknahme $C_a = 50 \mu\text{m}$, arithmetische Mittenrauheit $R_a = 1,0 \mu\text{m}$

Bild 6.14 zeigt die Vergrößerungen der Bereiche 1 und 3. In diesen Bildern wird der Unterschied in der Rissstruktur deutlich erkennbar. Bereich 1 zeigt ein sehr feines Netz mit ganz schmalen Anrissen. Die Risse laufen parallel zu den Schleifriefen. In Bereich 3 sind breitere Anrisse zu sehen. Es hat sich eine dreieckige Form ausgebildet und die Risse scheinen nicht

direkt parallel zu den Schleifriefen zu verlaufen. Der Abstand zwischen den Rissen ist hier deutlich größer und die Anzahl der Risse auch geringer.

Eine Auswertung von vielen Bildern ermöglicht es, eine Aussage über die Verteilung der Risse auf der Oberfläche zu treffen. Betrachtet werden hierbei der Abstand der Risse zueinander und die Breite der Risse auf der Oberfläche. Anhand von Schliffbildern können die Längen der Risse in die Tiefe und der Winkel zur Oberfläche bestimmt werden. Verglichen werden diese Ergebnisse mit Verzahnung mit einem Modul von $m_n = 4,5$ mm aus Standardgraufleckenuntersuchungen nach FVA 54 I-IV.

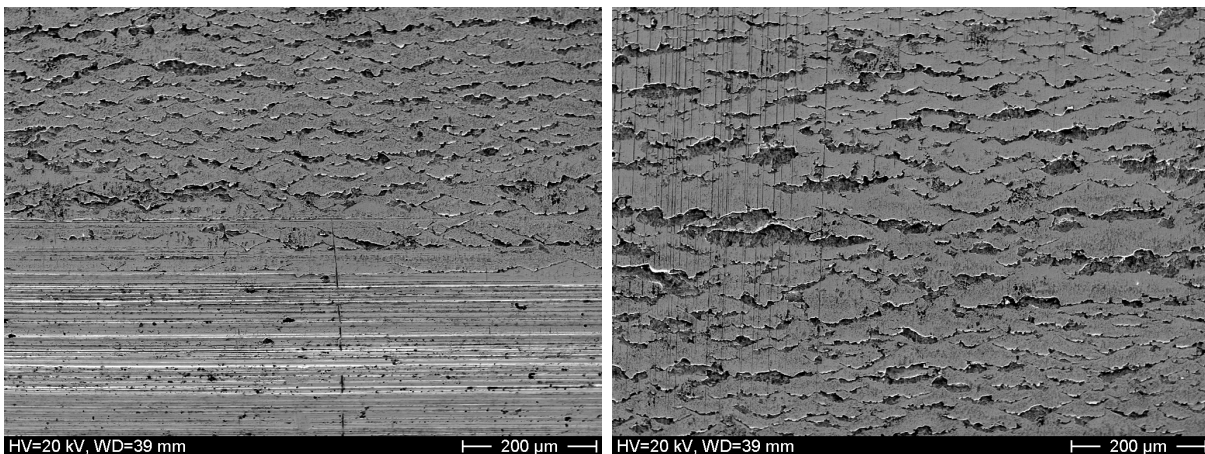


Bild 6.14: Vergrößerung der Zahnfußaufnahme, links: Bereich 1, rechts: Bereich 3

Bild 6.15 links zeigt den Vergleich der Risstiefen zwischen Radsätzen mit einem Modul von $m_n = 4,5$ mm und $m_n = 22$ mm. In den untersuchten Bereichen ist zu erkennen, dass sich die Werte in einer ähnlichen Größenordnung befinden und dass keine Modulabhängigkeit zu erkennen ist. Nur im Bereich der Schabemarke ist die Risstiefe bei der Verzahnung mit $m_n = 22$ mm wesentlich größer als bei der Standardverzahnung mit $m_n = 4,5$ mm.

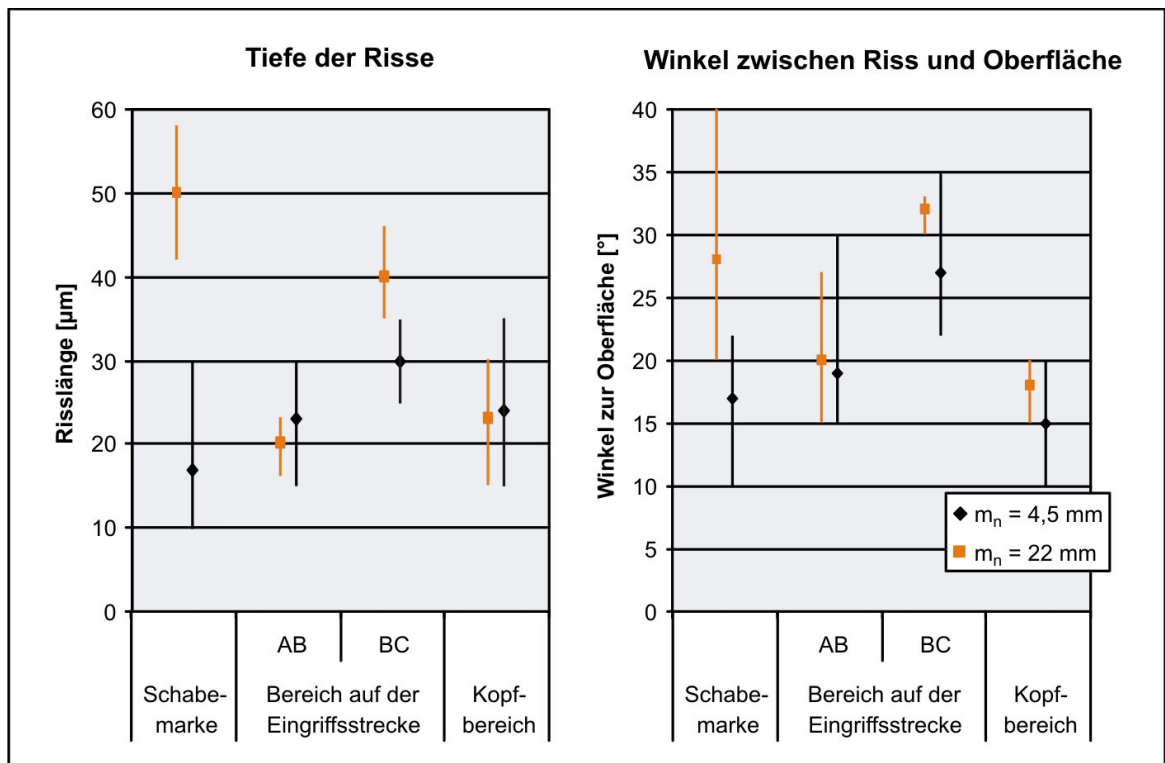


Bild 6.15: Vergleich der Risslängen in die Tiefe und Winkel zur Oberfläche zwischen Radsätzen mit einem Modul von $m_n = 4,5$ mm und $m_n = 22$ mm

Im rechten Teil des Bildes ist der Winkel zwischen dem Riss und der Oberfläche aufgetragen. Hier ist ebenfalls ein ähnlicher Verlauf für beide Getriebe Größen zu erkennen. Der Unterschied ist wieder an der Schabemarke zu finden. Hier ist der Winkel des Risses der Großgetriebeverzahnung in gleicher Größenordnung wie im Einzeleingriffsgebiet. Dies spricht für eine höhere Belastung der Schabemarke als bei der Standardgetriebeverzahnung. Es ist auch in diesem Fall keine Modulabhängigkeit zu erkennen.

In Bild 6.16 links wird der Abstand der Risse in Zahnhöhenrichtung verglichen. Der Abstand der Risse nimmt linear in Zahnhöhenrichtung ab. Nur in der Schabemarke der Großgetriebeverzahnung gibt es eine Abweichung. Hier gibt es eine Verdichtung der Rissabstände, wie bereits in der stereomikroskopischen Aufnahme in Bild 6.13 gezeigt worden ist. Die Größen auf den Modul zu beziehen erscheint nicht sinnvoll, da es auch hierbei keine Abhängigkeit vom Modul zu geben scheint.

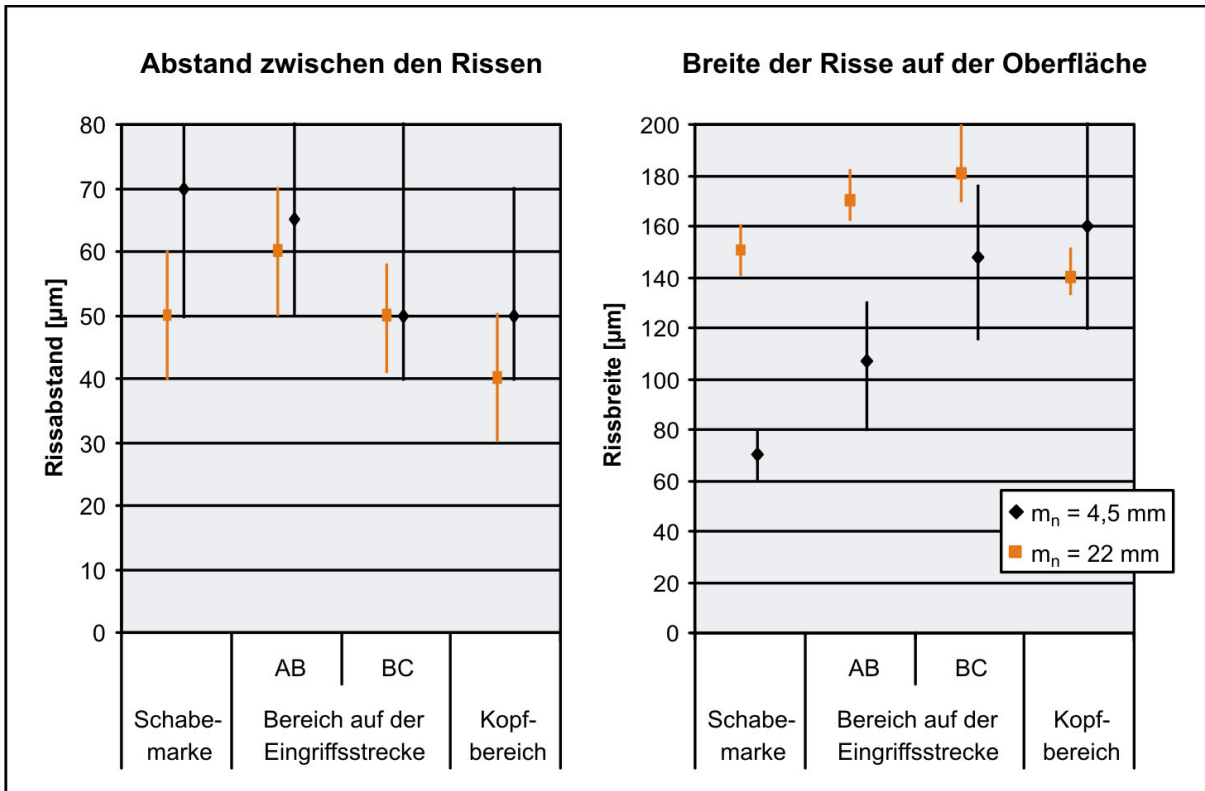


Bild 6.16: Vergleich der Rissabstände in Höhenrichtung und Breite auf der Oberfläche zwischen Radsätzen mit einem Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und $m_n = 22 \text{ mm}$

Rechts im Bild 6.16 ist die Breite der Risse auf der Oberfläche aufgetragen. Hier gibt es zum ersten Mal große Unterschiede zwischen den beiden Moduln. Die Breite der Risse auf der Oberfläche wächst in den untersuchten Bereichen der Zahnflanke mit dem Modul an. Es ist jedoch keine direkte Proportionalität mit dem Modul gegeben. Die Rissbreite der Großgetriebeverzahnung verändert sich im Vergleich zu der kleinen Verzahnung in Zahnhöhenrichtung nur sehr gering. Die Breite der Risse verdoppelt sich zwischen dem Zahnkopf und dem Zahnfuß.

Diese offensichtliche Unabhängigkeit der Risse der Graufleckenschäden vom Modul deckt sich mit den Ergebnissen der Berechnungsgleichung nach [S3] und den Versuchsergebnissen.

6.3.4. Vorzeitiger Eingriff

Bei näherer Betrachtung der Radkopfabrundung und der Auskolkungen im Ritzelfuß ist qualitativ ein ähnlicher Verlauf zwischen dem Betrag der Abrundung und der Auskolkung zu erkennen. Im Bild 6.17 sind die Auskolkungen und die Kopfabrundungen der miteinander kämmenden Zähne dargestellt. Aufgrund der Übersetzung von $i = 1,5$ kämmt eine Ritzelzahnflanke mit drei Gegenradflanken. Aus diesem Grund sind die Zähne des Ritzels dreimal und die des Rades zweimal dargestellt. Wie das Bild 6.17 zeigt, ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Auskolkungstiefe und dem vorzeitigen Eintritt des Radkopfes zu sehen.

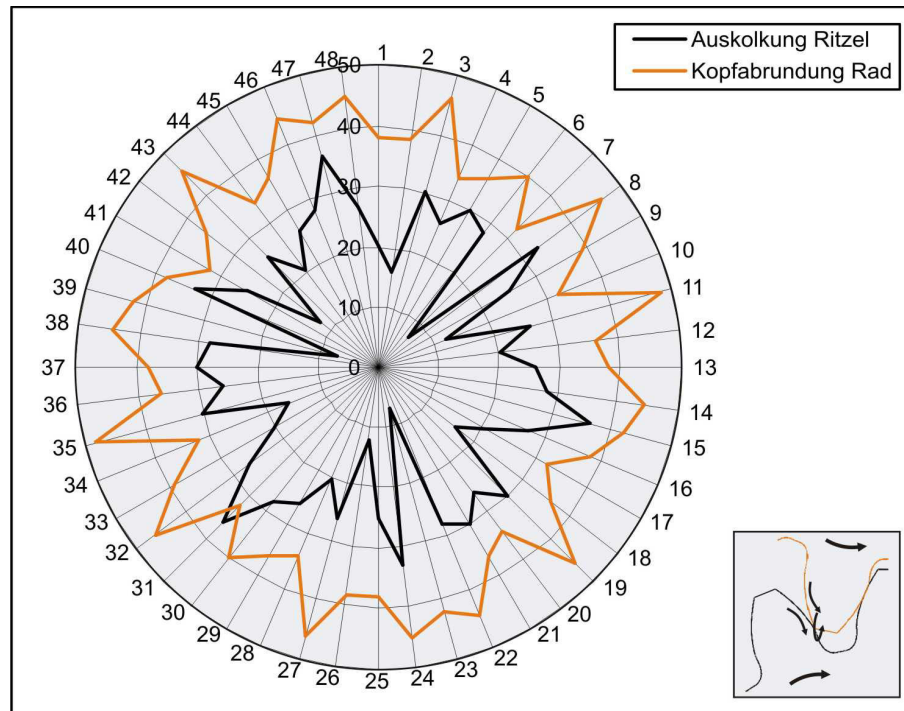


Bild 6.17: Auskolkung Ritzelfuß im Vergleich zur Kopfabrundung des Radkopfes für die Verzahnung GG3 1211-1

Aufgrund dieser Erkenntnis sind die erzielten Ergebnisse des Vorgängervorhabens neu zu bewerten. Die im Vorhaben 286 II erkannte Abhängigkeit der Auskolkungstiefe vom Kopfrücknahmebetrag ist nun anders zu beurteilen. Sie resultiert nicht nur aus der Veränderung der Pressung, sondern ist begründet durch die Reduktion des vorzeitigen Eingriffes durch höhere Kopfrücknahmebeträge. Die Auskolkungstiefen sind ohne Berücksichtigung des Schabeeinflusses ermittelt worden. Aus diesem Grund sind für die Radsätze des Vorhabens 286 II die Auskolkungstiefen unter Berücksichtigung des vorzeitigen Eingriffes neu ermittelt worden.

Tabelle 6.1: Auswertung des Vorhabens 286 II

Kopfrücknahme [µm]	50				100			170			
Mittenrauwert [µm]	0,17	0,6	0,7	1,0	0,5	0,8	1,0	0,6	0,75	0,7	1,0
GF Auskolkung [µm]	1	3	6	10	3	7	9	4	7	7	10
Graufleckenfläche [%]	5	15	27,5	45	10	25,5	40	8	22	24	40

In Tabelle 6.1 ist die neue Auswertung des Vorhabens FVA 286 II dargestellt. In dieser Tabelle sind nun die graufleckenbedingten Auskolkungstiefen aufgeführt. Das Ergebnis des gleitgeschliffenen Radsatzes ist in diese Tabelle mit übernommen worden und grau unterlegt. Es ist zu erkennen, dass die Graufleckenfläche in direktem Zusammenhang zu der resultierenden Auskolkungstiefe steht.

Ein Vergleich der hieraus resultierenden Auskolkungstiefe bedingt durch die Graufleckigkeit zwischen Großgetriebe und Standardgetriebe zeigt das Diagramm in Bild 6.18. Verglichen

werden immer Verzahnungen mit der gleichen relativen Schmierfilmdicke und gleichem modulbezogenem Kopfrücknahmebetrag.

Wie bereits die Untersuchungen der Rissverteilung auf der Oberfläche vermuten ließen, liegen die Werte der graufleckenbedingten Auskolkung bis auf die zwei im Bild 6.18 eingekreisten Ausnahmen in der gleichen Größenordnung und sind somit modulunabhängig.

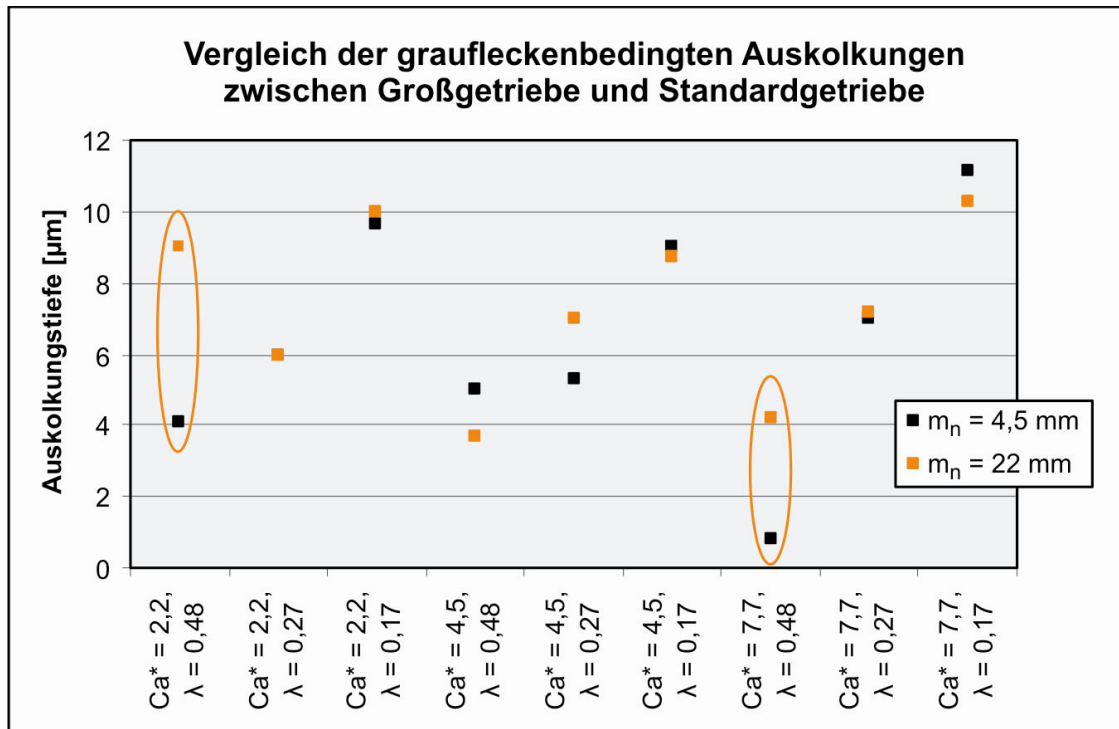


Bild 6.18: Vergleich der graufleckenbedingten Auskolkungstiefen zwischen Großgetriebe und Standardgetriebe

7. Zusammenfassung

Ein Hauptziel des Forschungsvorhabens ist es, anhand von bisher noch nicht untersuchten Verzahnungsvarianten ein besseres Verständnis über die Auswirkungen einzelner Geometrie- und Oberflächenparameter auf die Graufleckigkeit zu gewinnen. Dabei gilt es weiterhin, das Rechenverfahren nach FVA 259 I [S3] abzusichern und an die Erkenntnisse aus dem Vergleich von Großgetriebeversuchen und Prüfläufen am Standardgetriebe anzupassen, um in Zukunft eine sichere Vorausberechnung von Verschleiß aufgrund von Graufleckigkeit zu ermöglichen. Die Schwerpunkte des Projektes liegen zum einen in der Untersuchung von Geometrievarianten, zum anderen auch in der Untersuchung von bisher nicht erforschten Betriebszuständen.

Als geometrische Varianten sind Zahnräder mit sehr niedrigen arithmetischen Mittenrauheiten zum Einsatz gekommen. Hierzu ist das innovative Oberflächenbearbeitungsverfahren des chemisch-mechanischen Gleitschleifens eingesetzt worden. Zusätzlich sind Zahnräder mit Abrundungen der Zahnkopfkante zur Verbesserung des Eingriffsbeginns, mit einer praxisnahen Profilverschiebung von $x_1 = 0,5$ und einem bisher nicht untersuchten Modul von $m_n = 16$ mm geprüft worden. Die neu untersuchten Betriebszustände sind das „treibende Rad“ und Versuche mit Verunreinigung des Schmierstoffes durch Wasser.

In drei Dauerversuchen ist die Entwicklung von Graufleckenschäden während langer Laufzeiten untersucht worden. Stichprobenartig sollte die Erprobung von Verfahren zur Dokumentation des Schadensfortschritts am eingebauten Getriebe durchgeführt werden. Experimentelle Erprobungen von verschiedenen neuen Messmethoden zeigten Zukunftspotentiale auf. Begleitende Vermessungen der Oberflächenstruktur und werkstoffkundliche Untersuchungen ermöglichen es, neue Erkenntnisse über die Schadensmechanismen zu gewinnen bzw. bestehende Theorien zu überprüfen.

Zur Ermittlung des Baugrößeneinflusses sind Prüfstandsversuche mit Radsätzen unterschiedlicher Baugröße an zwei Prüfständen durchgeführt worden. Hierzu ist der Stirnrad-Verspannungs-Prüfstand nach DIN 51354 mit einem Achsabstand von $a = 91,5$ mm und Verzahnungen mit Moduln $m_n = 3,27$ mm und 4,5 mm eingesetzt worden. Für die großmoduligen Verzahnungen mit einem Modul von $m_n = 16$ mm und 22 mm ist der Großgetriebeprüfstand mit einem Achsabstand von $a = 447,33$ mm verwendet worden. Beide Prüfstände arbeiten als Verspannungs-Prüfstände mit kreisender Leistung. Bis auf das Modulverhältnis von ca. fünf sind die Verzahnungen so ausgelegt, dass sich eine weitgehend ähnliche Geometrie sowie ähnliche Hertzsche Flächenpressungen über der Eingriffsstrecke ergeben.

Eigens für die Untersuchung der Graufleckigkeit an großmoduligen Verzahnungen ist am Lehrstuhl ein Großgetriebeprüfstand aufgebaut worden. Weltweit ist dies der größte Prüfstand für systematische Untersuchungen an Stirnradverzahnungen. Der Verspannmotor des Großgetriebeprüfstandes erlaubt ein maximales Verspannmoment an der langsam laufenden Welle

von $T_2 = 100.000 \text{ Nm}$. Theoretisch lässt sich bei einer Antriebsdrehzahl von 1500 min^{-1} eine maximale kreisende Leistung von $P_{\text{Kreis}} = 6 \text{ MW}$ im Verspannkreis einstellen. Zur Deckung der Verlustleistung stehen hierfür $P_{\text{an}} = 240 \text{ kW}$ am Antrieb zur Verfügung. Die Kühlwasseranschlüsse und Kühlanlagen sind für diese hohe Leistung ausgelegt. Außerdem erfolgten Versuche an einem Prüfstand mit einem Achsabstand von $a = 91,5 \text{ mm}$, der insbesondere für den Standard-Graufleckentest nach FVA 54 I-IV [F1] geeignet ist, der auch bei der Ermittlung der Graufleckentragfähigkeit von Schmierstoffen am Institut zum Einsatz kommt.

Die Versuche gliedern sich in Stufentests und Dauertests. Der Stufentest ist in sechs Schadenskraftstufen mit ansteigender Last gestaffelt. Die Lastwechselzahl beträgt in jeder Stufe $2,1 \cdot 10^6$ Lastwechsel am Ritzel. Die maximale Belastung entspricht einer Hertzschen Flächenpressung am Wälzkreis von ca. 1550 N/mm^2 . In einem anschließenden Dauertest beträgt die Laufzeit bei dieser Belastung über $50 \cdot 10^6$ Lastwechsel am Ritzel.

Anhand der Messung der Profilformabweichung erfolgt die Bewertung der Graufleckigkeit. Aus der Profilformabweichung lässt sich der durch Graufleckigkeit hervorgerufene Verschleiß ablesen. Weitere Informationen zur Intensität der Graufleckigkeit geben der Anteil der von Grauflecken bedeckten Flankenfläche und an den kleinmoduligen Verzahnungen auch der Gewichtsverlust.

Insgesamt zehn Versuche zur Graufleckentragfähigkeit sind am Großgetriebeprüfstand durchgeführt worden. Es erfolgte eine Variation der arithmetischen Mittenrauheit der Zahnflanken bei diesen Versuchen von $R_a = 0,1 \text{ }\mu\text{m}$ bis $0,7 \text{ }\mu\text{m}$. Die Grundvariante der Profilkorrektur war die lange lineare Kopfrücknahme am Kopf von Rad und Ritzel mit einem Korrekturbetrag von $C_a = 50 \text{ }\mu\text{m}$. Zwei Varianten mit einem Kopfrücknahmebetrag von $C_a = 100 \text{ }\mu\text{m}$ stellen den Bezug zum vorherigen Forschungsvorhaben [L5] mit variierten Kopfrücknahmebeträgen her.

Mit 21 Versuchen am Standardgetriebeprüfstand ist der Baugrößeneinfluss untersucht worden. Zusätzlich zu den Varianten, die eine der Baugröße angepasste, zum Großgetriebe analoge Flankenrauheit und Kopfrücknahme aufweisen, wurden Varianten mit leicht abgewandelten Geometrien und unkorrigierten Verzahnungen geprüft. Sowohl die Großgetrieberadsätze als auch die Standardgetriebe-Radsätze sind aus dem Werkstoff 18CrNiMo7-6 gefertigt worden. Dieser Werkstoff entspricht dem Standardwerkstoff für Verzahnungen größerer Baugröße. Im Graufleckentest nach FVA 54 I-IV [F1] wird der Werkstoff 16MnCr5 zugrunde gelegt. Im Projekt FVA 286 II [L5] konnte jedoch kein Unterschied zwischen den beiden Werkstoffen in den Versuchsergebnissen gefunden werden. Alle Versuche finden bei Umlaufschmierung mit einer Öleinspritztemperatur von $\vartheta = 90^\circ \text{ C}$ statt. Der Schmierstoff weist im Standardgraufleckentest die Schadenskraftstufe =8 auf. Die Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis beträgt konstant $v_t = 8,3 \text{ m/s}$.

Die Ergebnisse der Laufversuche zeigen, dass bei Verzahnungen mit einem großen Modul der Einfluss auf den Verschleiß durch den vorzeitigen Eingriff und dem resultierenden Schaben

der Kopfkante des getriebenen Rades auf der Zahnflanke des treibenden Rades von größerer Bedeutung ist als der Einfluss der Graufleckigkeit. Kann der vorzeitige Eingriff durch geeignete Maßnahmen minimiert werden, so tritt der Verschleiß bedingt durch die Graufleckigkeit wieder in den Vordergrund. Härtemessungen auf Zahnflanken haben eine Verhärtung der Oberfläche im Bereich der Schabemarke gezeigt. Somit ist die durch den vorzeitigen Eingriff hervorgerufene messbare Formabweichung nicht nur verschleißbedingt, sondern auch ein Resultat plastischer Deformation.

Als geeignete Maßnahmen zur Reduzierung des vorzeitigen Eingriffes haben sich für die Last ausreichende Kopfrücknahmebeträge und Kopfkantenabrundungen erwiesen. Kopfkantenabrundungen können gezielt mit der Evolvente geschliffen werden oder als Nebeneffekt weiterer Endbearbeitungsverfahren auftreten. Im Projekt konnte ein Zusammenhang zwischen der Dauer des chemisch–mechanischen Gleitschleifens und der Zahnkopfabrundung gefunden werden. Anzumerken ist, dass das chemisch–mechanische Gleitschleifen in Richtung immer höherer Formtreue der Zahnflanke optimiert wird, so dass sehr feine Oberflächen mit einer geringeren Bearbeitungsdauer erzielt werden können. Durch die verkürzte Bearbeitungsdauer nehmen die resultierende Kopfabrundung und der positive Nebeneffekt auf das Schaben jedoch ab.

Für die Entwicklung von Grübchen auf der Zahnflanke ist die Flankenform von entscheidender Bedeutung. Wie in [L5] herausgearbeitet, ist der Krümmungsradius am Übergang der korrigierten zur unkorrigierten Zahnflanke sehr klein. Ein ähnlicher Übergang mit kleinen Ersatzkrümmungsradien befindet sich zwischen verschlissener und unverschlissener Zahnflanke. Der Verschleiß kann hierbei durch die Graufleckigkeit als auch durch den vorzeitigen Eingriff hervorgerufen werden. Dieser kleine Ersatzkrümmungsradius ist in vielen Fällen Auslöser für die Grübchenbildung. Je steiler der Übergang an diesen Flankenpositionen ist, desto geringer ist der Krümmungsradius. Vergleichsrechnungen haben sehr hohe örtliche Hertzsche Flächenpressungen in den Bereichen sehr kleiner Krümmungsradien aufgezeigt. Resultierend aus den hohen Pressungen erfolgt eine den Werkstoff stark beanspruchende Last, welche den Werkstoff mit längerer Beanspruchungsdauer ermüden lässt.

Wird der kleine Krümmungsradius am Übergang der verschlissenen zur unverschlissenen Flanke durch eine wachsende Graufleckenfläche immer wieder abgetragen und auf der Eingriffslinie weiter verschoben, wandert der Bereich mit der sehr hohen Beanspruchung und kann örtlich keine nennenswerte Teilschädigung erzeugen.

Kommt die Graufleckigkeit nun zum Stillstand, sei es durch den Wechsel auf einen tragfähigeren Schmierstoff oder durch die im Betrieb kontinuierliche Beanspruchung der Oberfläche und der daraus resultierende Einebnung der Rauheitsberge, entsteht eine erhöhte Grübchengefahr für die Zahnflanke. Nun wird der Werkstoff sehr stark örtlich beansprucht und es entstehen Risse unterhalb der Oberfläche, dem Ort der maximalen Spannungen aufgrund der

Hertzschen Flächenpressungsbelastung. Diese Risse wachsen ungehindert in die Tiefe des Werkstoffes und führen zu einem Grübchenschaden.

Äußerlich betrachtet hat es den Anschein, als ob der Grübchenschaden aus der Graufleckenfläche herauswächst. Für den Grübchenschaden ist jedoch nur die erhöhte örtliche Beanspruchung ausschlaggebend. Diese Beanspruchung ist nur geometrisch bedingt und kann auch durch andere Ursachen, wie z.B. durch den vorzeitigen Eingriff oder ungünstige Profilmodifikationen, verursacht werden. Versuche an Verzahnungen mit arithmetischen Mittenrauheiten von $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ bis $1,0 \mu\text{m}$ haben gezeigt, dass mit wachsender Graufleckenfläche die Laufzeiten der Verzahnung verlängert werden konnten.

Ist Verschleiß auf Zahnflanken eines Getriebes nicht auszuschließen, so ist mit geeigneten Profilmodifikationen der Verlauf des Verschleißes so einzustellen, dass es nicht zu einem Grübchenschaden kommen kann. Die geeigneten Korrekturformen zur Verringerung der Grübchengefahr sind noch in weiteren Versuchen am Großgetriebe zu erforschen.

Der Einfluss der arithmetischen Mittenrauheit auf die Graufleckenbildung ist mittels Versuchen mit sehr feinen arithmetischen Mittenrauheiten von bis zu $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ auch bei Großgetriebeverzahnungen dargelegt worden. Aufgrund der niedrigen Oberflächenrauheit zeigen die chemisch-mechanisch gleitgeschliffenen Verzahnungen eine sehr geringe Graufleckigkeit. Es hat sich in den Laufversuchen mit einem Modul von $m_n = 22 \text{ mm}$ gezeigt, dass eine arithmetische Mittenrauheit von $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ zur Unterdrückung der Graufleckigkeit vollkommen ausreichend ist.

Die Radsätze mit den praxisnahen Profilverschiebungen zeigen, korrespondierend zu den Ergebnissen welche am Standardgetriebe erzielt worden sind, den Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf die Graufleckenbildung. Durch das positive Profilverschieben am Ritzel, ist der Betrag des negativen spezifischen Gleitens im Zahnfuß des Ritzels reduziert worden. Die Zahnfüße der Ritzel weisen am Ende der Versuche eine im Vergleich zur C-Verzahnung geringe Graufleckenfläche auf. Bedingt durch den festen Achsabstand muss die Profilverschiebungssumme konstant bleiben. Durch diese Randbedingung entstehen sehr stark negativ profilverschobene Räder mit großen Beträgen des negativen spezifischen Gleitens in den Zahnfüßen der Räder. Hier lassen sich nun auch die großen Graufleckenflächen finden.

Neben der Reduzierung des Schabens kann mit der Kopfabrundung eine bessere Schmierung der Zahnflanke zu Eingriffsbeginn erreicht werden. Zu erkennen ist dies an Versuchen mit Radsätzen mit einem Modul von $m_n = 4,5 \text{ mm}$ und einer Kopfabrundung. Die Versuchsergebnisse zeigen eine verbesserte Grauflecken­tragfähigkeit und eine geringere Profilformabweichung, obwohl bei diesen Radsätzen der Einfluss des vorzeitigen Eingriffes im Vergleich zu den Großgetrieberadsätzen nicht so stark ausgeprägt ist.

Die Versuche mit treibendem Rad haben im Gegensatz zu den Ergebnissen in [S3] verdeutlicht, dass die Treibrichtung eine Auswirkung auf die resultierende Formabweichung hat. Die graufleckenbedingte Auskolkungstiefe ist eine Funktion der Gleitgeschwindigkeiten und der

arithmetischen Mittenrauheit der Flanken, und beides ändert sich vom Wechsel des treibenden Ritzels zum treibenden Rad nicht. Die graufleckenbedingte Formabweichung wird im Großgetriebe durch den vorzeitigen Eingriff und die zugehörige Auskolkung überlagert. Entscheidend für den vorzeitigen Eingriff ist die Zahnpaarsteifigkeit im äußeren Einzeleingriffspunkt. Wird die Treibrichtung geändert, so wechselt der äußere Einzeleingriffspunkt auf der Eingriffsstrecke von Punkt D zu Punkt B. Bei der C-Verzahnung ist die Zahnpaarsteifigkeit im Punkt B größer als im Punkt D. Hieraus resultiert eine geringere Auskolkungstiefe beim treibenden Rad als beim treibenden Ritzel. Zusätzlich wandert die maximale Auskolkungstiefe aus dem Zahnfuß des Ritzels in den Zahnfuß des Rades. Das Schaben der Kopfkante ist zu Eingriffsbeginn negativer zu bewerten als zu Eingriffsende. Beim Verlassen des Eingriffes zeigt die spitze Kopfkante nicht mehr wie ein Keil in die Gleitrichtung, sondern wird genau entgegengesetzt, mit der stumpfen Seite, über die Gegenzahnflanke gezogen. Eine Schneidbewegung durch die Kopfecke des Ritzels ist hier nicht mehr so ausgeprägt, wie durch die Kopfecke des Rades am Eingriffsbeginn.

Ohne Berücksichtigung des vorzeitigen Eingriffes bei der Bewertung der resultierenden Auskolkungstiefe war im Vorgängerprojekt FVA 286 II [L5] der Zusammenhang zwischen arithmetischer Mittenrauheit und Auskolkungstiefe bei niedrigen Kopfrücknahmebeträgen verlorengegangen. Durch die in diesem Projekt gewonnen Erkenntnisse über die Auswirkung des vorzeitigen Eingriffes ist eine Neubewertung der Ergebnisse des Vorgängerprojektes möglich. Mit der Neubewertung kann der Zusammenhang wieder hergestellt werden und es folgt, dass mit steigender Flankenrauheit, sowohl bei kleinmoduligen Radsätzen als auch am Großgetriebe, größere Auskolkungstiefen bedingt durch die Graufleckigkeit entstehen. Dieses Ergebnis passt zur beobachteten Beziehung zwischen größerer Flankenrauheiten und größeren Graufleckenflächen. Wie zu erwarten war, verringern höhere Kopfrücknahmebeträge die absolute Auskolkungstiefe bedingt durch die Verringerung des vorzeitigen Eingriffes.

Der verwendete Schmierstoff zeigt sich relativ unempfindlich gegenüber der Wasserkontamination und verändert die Grauflecken­tragfähigkeit nicht. Die eingesetzte Wassermenge beträgt $W = 500$ ppm. Es ist eine Beziehung zwischen dem Verschleißbetrag und zunehmender Kontaminationsdauer zu erkennen. Auf der zuerst gefahrenen Flanke hat die negative Reaktion zwischen Additiv und Wasser keinen negativen Einfluss, da die Wirkdauer vermutlich nicht ausreichend ist. Beim zweiten Versuch auf der Rückflanke ist ein höherer Verschleiß erkennbar. Diese Flanke ist sowohl als Rückflanke ohne Last und anschließend als Lastflanke dem kontaminierten Schmierstoff ausgesetzt worden. In Vorversuchen mit in der Windkrafttechnik üblichen Schmierstoffen ist ein stark unterschiedliches Verhalten der Schmierstoffe zu sehen. Abhängig von der verwendeten Additivierung steigt der Verschleiß der Zahnflanke teilweise sehr stark an. Bei mit Wasser kontaminierten Schmierstoffen sind zwei unterschiedliche Fälle zu berücksichtigen. Zum einen das im Schmierstoff gelöste Wasser und zum anderen der übersättigte Schmierstoff mit freien Wassermolekülen. Im Bereich des im Schmierstoff gelösten Wassers ist die Reaktion des Wassers mit den Additiven

als kritisch anzusehen. Die Oxidation der Zahnflanke hat sich in den Vorversuchen bezüglich des Verschleißes als nicht besonders kritisch erwiesen.

Ein Vergleich verschiedener Verschleißberechnungsverfahren hat gezeigt, dass mit den bestehenden Berechnungsverfahren der Verschleiß von Großgetriebeverzahnungen nicht exakt bestimmt werden kann. Die Differenzierung der Ergebnisse in graufleckenabhängigen Verschleiß und in Verschleiß infolge des vorzeitigen Eingriffes ermöglicht es, einen annähernd konstanten Faktor zwischen dem Verfahren nach FVA 259 I [S3] und den Ergebnissen der Großgetriebeversuche herzuleiten. Dieser Faktor ist in die entsprechenden Formeln des entsprechenden FVA Projektes 259 I einzufügen, um die Rechenergebnisse damit in Übereinstimmung zu den Versuchsergebnissen des Großgetriebeversuches zu bringen.

Die Modulunabhängigkeit der Graufleckenentwicklung ist auch an werkstoffkundlichen Untersuchungen der Zahnflanken des Großgetriebes und des Standardgetriebes gezeigt worden. Bei diesen Untersuchungen sind die Risslängen, –tiefen, –winkel und der Abstand der Risse in Zahnhöhenrichtung miteinander verglichen worden. Zahnflanken beider Größen weisen ähnliche Rissstrukturen im graufleckenbehafteten Bereich der Zahnflanke auf, so dass auch hier kein Größeneinfluss zu identifizieren ist.

Im aktuellen Forschungsvorhaben sind verschiedene Methoden zur Messung der Profilabweichung der Zahnflanken im eingebauten Zustand erprobt worden. In den Versuchen lieferten sowohl taktile als auch optische Messverfahren geeignete Ergebnisse. Die Kosten der taktilen Messmethoden sind jedoch wesentlich geringer und die Anwendbarkeit auf unterschiedliche Zahnflankenformen ist bei den taktilen Systemen eher gegeben. Im Folgevorhaben sind die gewonnenen Erkenntnisse mit den taktilen Systemen zu vertiefen.

Zentrale Erkenntnisse des abgeschlossenen Projektes sind:

Die Auskolkung bedingt durch den vorzeitigen Eingriff ist bei größeren Moduln stärker ausgeprägt als bei kleinen Moduln. Um die gleiche Hertzsche Flächenpressung im Wälzpunkt zu erhalten, muss die Linienlast proportional zum Modul ansteigen. Das bedeutet, dass die Verformung des Zahnes ebenfalls proportional zum Modul ansteigt und somit eine tiefere Auskolkung verursacht. Die Auskolkung infolge der Graufleckigkeit wächst jedoch nicht mit dem Modul an. Die nach [S3] berechneten Auskolkungstiefen multipliziert mit dem Verhältnis der Moduln der aktuellen Verzahnung zum Modul der C-Verzahnung, führt zu gut korrelierenden Ergebnissen zwischen Messung und Rechnung.

Grübchenschäden wachsen nicht aus der Graufleckenfläche heraus. Vielmehr entstehen Grübchen am Ende der Graufleckenfläche aufgrund der ungünstigen Geometrie am Übergang der Graufleckenfläche zur unbeschädigten Zahnflanke. Ursachen für eine ungünstige Geometrie können auch Schabemarken aufgrund des vorzeitigen Eingriffes oder unzureichende Profilmodifikationen sein.

8. Literatur

- [A1] Antoine, F.: Simplified modellization of gear micropitting. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Journal of Aerospace Engineering. Vol 216 No. 6. S. 291-302.
- [B1] Bartz, W. J.; Käser, W.: Untersuchungen des Einflusses moderner Schmierstoffe auf die Pittingbildung bei Wälz- und Gleitbeanspruchung, Literaturrecherche und Auswertung. FVA Projekt 2, Heft 2, Frankfurt, 1971.
- [B2] Barnett, D.; Elderkin, J.P., Bennett, W.: An Analytical Approach to the Prediction of Micropitting on Case Carburised Gears, American Gear Manufacturers Association, Technical Paper 06FTM06. Virginia, 2006.
- [B3] Blok, H.-P.: Die Blitztemperatur-Theorie. Deutsche Shell AG, Hamburg, 1962.
- [B4] Brenner, D.; Witzig, J.: Wassergehalt in Ölen, Zulässiger Wassergehalt in Getriebeschmierölen, insbesondere Polyglykol-Ölen und der Einfluss auf die Wälzlagerlebensdauer und die Zahnflankentragfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder. FVA-Abschlussberichte zu den Projekten 488 I, Heft 884, Frankfurt, 2009.
- [D1] N.N.: DIN 3960, Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung. Beuth Verlag, Berlin, 1987.
- [D2] N.N.: DIN 3961, Toleranzen für Stirnradverzahnungen, Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin, 1978.
- [D3] N.N.: DIN 3962 Teil 1-3, Toleranzen für Stirnradverzahnungen, Grundlagen. Beuth Verlag, Berlin, 1978.
- [D4] N.N.: DIN 3969, Oberflächenrauheit von Zahnflanken. Beuth Verlag, Berlin, 1991.
- [D5] N.N.: DIN 3979, Zahnschäden an Zahnradgetrieben, Bezeichnung, Merkmale, Ursachen. Beuth Verlag, Berlin, 1979.
- [D6] N.N.: DIN 3990 Teil 1-5, Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern. Beuth Verlag, Berlin, 1987.
- [D7] N.N.: DIN 51354 Teil 1, FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [D8] Dowson, D.; Higginson, G. R.: Elasto-Hydrodynamic Lubrication - The Fundamentals of Roller Gear Lubrication. Pergamon International Library, Oxford, 1966.

- [D9] Dinter, R.: Verzahnungen von Windturbinen - Getrieben: Optimierung durch „Superfinishing“. Konstruktion, S2 special Antriebstechnik, Düsseldorf, November 2006.
- [D10] N.N.: DIN 17210, Einsatzstähle; Technische Lieferbedingungen. Beuth Verlag, Berlin, 1986.
- [D11] N.N.: DIN 50602, Metallographische Prüfverfahren, Mikroskopische Prüfung von Edelstählen auf nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen. Beuth Verlag, Berlin, 1985.
- [D12] N.N.: DIN EN ISO 10084, Einsatzstähle - Technische Lieferbedingungen. Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [D13] N.N.: DIN EN ISO 18265, Metallische Werkstoffe - Umwertung von Härtewerten. Beuth Verlag, Berlin, 2004.
- [D14] N.N.: DIN 780, Moduln für Stirnräder, Modulreihe für Zahnräder. Beuth Verlag, Berlin, 1997.
- [D15] N.N.: DIN 50602, Metallographische Prüfverfahren – Mikroskopische Prüfung von Edelstählen auf nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen. Beuth Verlag, Berlin, 1985.
- [E1] Emmert, S.: Turbograufleckigkeit, Zahnflankenermüdung bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten - Graufleckigkeit und weitere Schadensfolgen, Einfluß von Flankenrauigkeit und hoher Umfangsgeschwindigkeit auf die Graufleckentragfähigkeit. FVA–Abschlussberichte zu den Projekten 54 III+IV, Heft 396, Frankfurt, 1993.
- [E2] Elstorpff, M.-G.: Zahnflankenüberlastbarkeit, Einflüsse auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder bis in das höchste Zeitfestigkeitsgebiet. FVA–Abschlussbericht zum Projekt 149, Heft 440, Frankfurt, 1994.
- [E3] Ertel: Die Berechnung der hydrodynamischen Schmierung gekrümmter Oberflächen unter hoher Belastung und Relativbewegung. Fortschrittsbericht VDI-Z Reihe 1, Nr. 115, VDI-Verlag-GmbH, Düsseldorf, 1984.
- [F1] FVA–Informationsblatt Nr. 54 I-IV: Graufleckigkeit. Forschungsvereinigung Antriebstechnik, Frankfurt, 1993.
- [F2] Föhl, J.; Sommer, K.: Reaktionsschichtbildung. FVA–Abschlussbericht zum Projekt 126 I, Heft 281, Frankfurt, 1988.
- [F3] Föhl, J.; Sommer, K., Gerber, A.: Reaktionsschichtbildung. FVA–Abschlussbericht zum Projekt 126 II, Heft 330, Frankfurt, 1991.

-
- [F4] N.N.: Flender, Eignungsnachweise für Öle, die in Flender-Getrieben eingesetzt werden - Informationsblatt für den Schmierstoffhersteller. Flender, Bocholt, 2003.
- [G1] Grubin, A. N.; Vinogradova, J. E.: Investigations of the Contact Machine Components. Central Scientific Research Institute for Technology and Mechanical Engineering, Book No. 30, Moscow, 1949.
- [H1] Haske, D.: Graufleckentragfähigkeit von Großgetrieben. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 286 I, Heft Nr. 633, Frankfurt, 2001.
- [H2] Hergesell, M.: Einfluss der Graufleckigkeit auf die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 459, Heft Nr. 844, Frankfurt, 2007.
- [I1] Inacker, O.; Beckmann, P.; Oster, P.: Triboschutzschichtcharakterisierung, Untersuchungen zur Bildung, Charakterisierung und Wirkung von Triboschutzschichten. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 289 I+II, Heft 595, Frankfurt, 2000.
- [I2] Inacker, O.; Beckmann, P.; Oster, P., Radev, T.: Triboschutzschichten II, Zusammenhänge zwischen Zahnrad- und Wälzlagerschäden und tribologischen Veränderungen des oberflächennahen Werkstoffbereichs. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 289 Ib+IIb, Heft 733, Frankfurt, 2004.
- [L1] Lamparski, C.: Einfache Berechnungsgleichungen für Lastüberhöhungen in Leichtbauplanetengetrieben. Diss. Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1995.
- [L2] Lamparski, C.: Leichtbauplanetengetriebe, Einfache Berechnungsgleichungen für Lastüberhöhungen in Leichtbauplanetengetrieben. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 51 IV, Heft Nr. 486, Frankfurt, 1996.
- [L3] Liu, W.: Einfluß von Fertigungsverfahren auf die Graufleckigkeit von Zahnradgetrieben - Vertiefung und Anwendung des Graufleckentests. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 259 II, Frankfurt, 2002.
- [L4] Lützig, G.: Großgetriebe-Graufleckigkeit: Einfluss von Flankenmodifikation und Oberflächenrauheit. Diss. Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2006.
- [L5] Lützig, G.: Graufleckentragfähigkeit von Großgetrieben II. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 286 II, Heft Nr. 780, Frankfurt, 2006.
- [L6] Lechner, G.: Die Freßlastgrenze bei Stirnrädern aus Stahl. Diss. TU München, München, 1966.
- [M1] Malerwein, A.: Untersuchungen von Grauflecken- / Grübchenschäden auf Stirnradflanken. Unveröffentlichte Studienarbeit Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2009.

- [N1] Niemann, G.; Winter, H.: Maschinenelemente Band II, Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe - Grundlagen, Stirnradgetriebe. 2. völlig neubearbeitete Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1983.
- [N2] Niebecker, Moritz: Eine Analyse der am Markt erhältlichen mobilen Oberflächennessgeräte und deren experimenteller Einsatz an einem Getriebeprüfstand. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2008.
- [O1] Otto, M.; Thoma, F.; Weitl, R.: Ritzelkorrektur (RIKOR H 2.0 mit LAGER2 2.0), Einfluss der Lastverteilung auf die Methoden der Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 30 V, Frankfurt, 2007.
- [S1] Schönnenbeck, Gert: Einfluß der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung hauptsächlich im Umfangsgeschwindigkeitsbereich 1...9 m/s. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 54 I, Heft 106, Frankfurt, 1981.
- [S2] Schönnenbeck, Gert: Einfluß der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung (Graufleckigkeit und Grübchenbildung) hauptsächlich im Umfangsgeschwindigkeitsbereich 1...9 m/s. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 54 II, Heft 152, Frankfurt, 1983.
- [S3] Schrade, U.: Graufleckentragfähigkeit, Einfluß von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. FVA-Abschlussbericht zum Projekt 259 I, Heft Nr. 583, Frankfurt, 1999.
- [S4] Snidle, R.W.; Evans, H.P.; Alanou, M.P.: Gearing Tribology. Tribological Research and Design for Engineering Systems: Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology. Band 31, S. 575-588. Amsterdam, Elsevier, 2003.
- [S5] Schwarz, D.: Entwicklung eines Netzgenerators zur Erzeugung geeigneter Modelle zur Analyse von Stirnrad- und Planetengetriebestufen. Unveröffentlichte Studienarbeit Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2009.
- [T1] Theyse, F.H.: Die Blitztemperaturmethode nach Blok und ihre praktische Anwendung bei Zahnrädern. Schmiertechnik 1, Düsseldorf, 1967.
- [T2] Tobie, T.: Einfluß der Einsatzhärtungstiefe auf die Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit großer Zahnräder, FVA-Abschlussbericht zum Projekt 271, Heft Nr. 622, Frankfurt, 2001.
- [V1] Vriesen, J.: Berechnung der Verzahnungskorrekturen von Planetenradgetrieben unter Berücksichtigung der Steg- und Hohlradsverformung. Diss. Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2001.

-
- [V2] Vriesen, J.: PLANKORR, Berechnung der Verzahnungskorrekturen von Planetenradgetrieben unter Berücksichtigung der Steg- und Hohlradverformungen. FVA–Abschlussbericht zum Projekt 328 I, Heft 643, Frankfurt, 2002.
- [V3] Volger, J. G.: Einfluss der Mikrostruktur auf die Ausbildung von Graufleckigkeit. FVA–Abschlussbericht zum Projekt 158, Heft Nr. 337, Frankfurt, 1990.
- [V4] Volk, Dr. R.: Rauheitsmessung - Theorie und Praxis, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [W1] Weber, C.; Banaschek, K.: Formänderung und Profilrücknahme bei gerad- und schrägverzahnten Rädern. 2. Aufl. Vieweg, Braunschweig, 1955.
- [Z1] Ziegler, H.: Verzahnungssteifigkeit und Lastverteilung schrägverzahnter Stirnräder. Diss. RWTH Aachen, Aachen, 1971.

Lebenslauf

Persönliches

Name: Khashayar Nazifi
Geburtsdatum / -ort: 22.05.1980 in Teheran / Iran
Eltern: Dariush Nazifi, Oberst, † 6.11.2004
Mehroo Lahooti, Lehrerin
Familienstand: verheiratet mit Silke Nazifi geb. von Borzestowski

Ausbildung

01 / 1987 – 12 / 1989 Knapp Grundschule, Hagen
12 / 1989 – 06 / 1990 Schraberg Grundschule, Herdecke
07 / 1990 – 06 / 1999 Helene-Lange-Gymnasium, Dortmund
Abschluss: Abitur
11 / 1999 – 08 / 2000 8. Sanitätsregiment 1. Kompanie, Instandhaltung, Obergefreiter
10 / 2000 – 09 / 2003 Grundstudium Maschinenbau, Technische Universität Dortmund
10 / 2003 – 10 / 2005 Wechsel zur Ruhr-Universität Bochum, Hauptstudium
Vertiefungsrichtung: Kraftfahrzeug-Antriebstechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieur

Berufstätigkeit

12 / 2000 – 10 / 2002 Stellvertretender Betriebsleiter
THREE SIXTY Gastronomie Verwaltungsgesellschaft mbH
11 / 2002 – 05 / 2003 Betriebsleiter
Sportsbar Gastronomie GmbH
06 / 2003 – 06 / 2006 Geschäftsführer des familiären Transportunternehmens
01 / 2006 – 12 / 2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Lehrstuhl für Maschinenelemente, Getriebe und Kraftfahrzeuge
Ruhr-Universität Bochum
Leitung: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Predki
01 / 2010 bis heute Verifikations- und Validierungs-Ingenieur
Vestas Nacelles Deutschland GmbH

Schriftenreihe des Institutes für Konstruktionstechnik

- Nr. 80.1 G. Kraft: Das Phänomen des elastischen Schlupfes und dessen Einfluß auf das Verhalten drehzahlgekoppelter Laufräder
(ISBN 3-89194-000-9)
- Nr. 80.2 H. Stracke: Methodische Grundlagen für die rechnerunterstützte Bearbeitung von Anpassungskonstruktionen
(ISBN 3-89194-001-7)
- Nr. 80.3 U. Witzel: Untersuchungen über die temperaturabhängige dynamische Tragfähigkeit von Seilendverbindungen mit Aluminium-Preßklemmen
(ISBN 3-89194-002-5)
- Nr. 80.4 D. Harenbrock: Die Kopplung von rechnerunterstützter Konstruktion und Fertigung mit dem Programmbaustein PROREN1/NC
(ISBN 3-89194-003-3)
- Nr. 80.5 H. Seifert: Grundlagen des methodischen Vorgehens bei Neukonstruktionen des Maschinen- und Gerätebaus
(ISBN 3-89194-004-1)
- Nr. 80.6 K. Okulicz: Methodische Grundlagen der Lösung von Anpassungsproblemen in der Konstruktion und ihre Anwendung auf ein ausgewähltes Problem der Motorenentwicklung
(ISBN 3-89194-005-X)
- Nr. 80.7 B. Klein: Ein Beitrag zur rechnerunterstützten Analyse und Synthese ebener Gelenkgetriebe unter besonderer Berücksichtigung mathematischer Optimierungsstrategien und der Finite-Element-Methode
(ISBN 3-89194-006-8)
- Nr. 80.8 W. Röbig: Ein Beitrag zur Entwicklung von Finite-Element-Prozessoren für das rechnerunterstützte Entwickeln und Konstruieren
(ISBN 3-89194-007-6)
- Nr. 80.9 W. Müller: Entwicklung eines Finite-Element-Programmsystems zur Lösung von nicht selbstadjungierten Problemen am Beispiel der Navier-Stokes-Gleichung
(ISBN 3-89194-008-4)
- Nr. 80.10 O. Röper: Ein Geometrieprozessor für die rechnerunterstützte Auslegung von Maschinenbauteilen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente
(ISBN 3-89194-009-2)
- Nr. 81.1 J. Wozniak: Lastverteilung in Wälzdrehverbindungen; ein Beitrag zur theoretischen und experimentellen Bestimmung von Wälzkörper-Kraftvektoren
(ISBN 3-89194-010-6)

- Nr. 81.2 H. Schulze Hobbeling: Ein Beitrag zur rechnerunterstützten Analyse und Synthese von Schalldämpfersystemen unter Anwendung der Finite-Element-Methode und mathematischer Optimierungsverfahren (ISBN 3-89194-011-4)
- Nr. 81.3 G.D. Go: Beitrag zur rechnerunterstützten Auslegung und Dimensionierung von Schraubendruckfedern mit beliebigen Kennlinien (ISBN 3-89194-012-2)
- Nr. 81.4 A. Sadek: Anwendung der eindimensionalen Stromfadentheorie zur Auslegung und Synthese von Schalldämpfern in Auspuffleitungen von Verbrennungsmotoren (ISBN 3-89194-013-0)
- Nr. 81.5 A. Shaker: Stufenlose hydrostatische Koppelgetriebe für Kraftfahrzeuge. Auslegung, Gestaltung, Regelung, Vergleiche mit hydrostatischen Standgetrieben, Handschalt- und hydrodynamischen Lastschaltgetrieben (ISBN 3-89194-014-9)
- Nr. 81.6 M. Koch: Ein Beitrag zur rechnerunterstützten Auslegung und Optimierung von Strukturen in der Entwurfsphase (ISBN 3-89194-015-7)
- Nr. 81.7 Ch. Balbach: Das Programmsystem ISAN - Ein Beitrag zum rechnerunterstützten Konstruieren durch Einsatz der Finite-Element-Methode und adaptiver Netztechnik (ISBN 3-89194-016-5)
- Nr. 81.8 V.D. Jayaram: Experimenteller Nachweis der thermodynamischen Schmiertheorie für Gleitlager (ISBN 3-89194-017-3)
- Nr. 82.1 G.H. Riechelmann: Quasianaloger Materialflußsimulator - Ein Instrument zur Untersuchung von Betriebsabläufen in komplexen fördertechnischen Systemen (ISBN 3-89194-018-1)
- Nr. 82.2 H.-P. Prüfer: Parameteroptimierung - Ein Werkzeug des rechnerunterstützten Konstruierens (ISBN 3-89194-019-X)
- Nr. 82.3 B. Fritsche: Verfahren zur dreidimensionalen Geometrieerfassung und -darstellung bei der rechnerunterstützten Konstruktion von komplexen Bauteilen (ISBN 3-89194-020-3)
- Nr. 82.4 W. Predki: Hertzsche Drücke, Schmier-spalthöhen und Wirkungsgrade von Schneckenrieben (ISBN 3-89194-021-1)

-
- Nr. 82.5 R.W. Vonderschmidt: Zahnkräfte in geradverzahnten Planetengetrieben. Lastüberhöhungen infolge ungleichmäßiger Lastverteilung auf die Planetenräder und innerer dynamischer Zusatzkräfte (ISBN 3-89194-022-X)
- Nr. 82.6 H. Röper: Tragfähigkeitserhöhung von Gleitlagern durch verformungsangepaßte Gestaltung von Zapfen, Bolzen oder Bohrung - erläutert am Anwendungsbeispiel "Planetenradlagerung" (ISBN 3-89194-023-8)
- Nr. 82.7 R.E. Römer: Untersuchung der Wirkmechanismen und des Betriebsverhaltens teilbeaufschlagter Industriescheibenbremsen (ISBN 3-89194-024-6)
- Nr. 82.8 K.A. Görg: Berechnung instationärer Strömungsvorgänge in Rohrleitungen an Verbrennungsmotoren unter besonderer Berücksichtigung von Mehrfachverzweigungen (ISBN 3-89194-025-4)
- Nr. 82.9 R.T. Zulauf: Rechnerunterstützte Synthese von Radialgleitlagern unter besonderer Berücksichtigung der statischen und dynamischen Eigenschaften (ISBN 3-89194-026-2)
- Nr. 82.10 E. Düser: Tragfähigkeit von Blech- und Massivkäfigen in Zylinderrollenlagern für Planetenräder (ISBN 3-89194-027-0)
- Nr. 82.11 J.R. Jacubzig: Ein Beitrag zur Kenntnis von Durchfluß - Verlustbeiwerten unter besonderer Berücksichtigung des Verzweigungsproblems bei instationären Ladungswechselberechnungen (ISBN 3-89194-028-9)
- Nr. 83.1 O. Oldewurtel: Kinetik des Pufferstoßes - Ein Beitrag zur Minimierung der dynamischen Beanspruchung fördertechnischer Systeme (ISBN 3-89194-029-7)
- Nr. 83.2 V. Jevtic: Theoretische und experimentelle Analyse des dynamischen Verhaltens von fördertechnischen Antriebssystemen unter dem Einfluß von Nichtlinearitäten (ISBN 3-89194-030-0)
- Nr. 83.3 B. Lagemann: Ein Beitrag zur Konzeption problemorientierter Programmbausteine für die rechnerunterstützte Konstruktion unter besonderer Berücksichtigung des Formwerkzeugbaus (CAD) (ISBN 3-89194-031-9)
- Nr. 83.4 J.-F. Grätz: Modellalgorithmen zur dreidimensionalen Geometriefestlegung komplexer Bauteile mit beliebiger Flächenbegrenzung in der rechnerunterstützten Konstruktion (ISBN 3-89194-032-7)

- Nr. 83.5 F. Brune: Herstellkostenminimierte Radsätze für geradzahnte Planetengetriebe
(ISBN 3-89194-033-5)
- Nr. 83.6 C. Weber: Systematik der hydrostatischen und der Riemen-Stellkoppelgetriebe nach Kriterien des methodischen Konstruierens
(ISBN 3-89194-034-3)
- Nr. 83.7 A. Kandil: Methodische Betrachtung der Konstruktion von Tiefziehwerkzeugen und Bereitstellung von Algorithmen für ihre rechnerunterstützte Bearbeitung
(ISBN 3-89194-035-1)
- Nr. 83.8 Th. Wegener: Ein Beitrag zur Integration rechnerunterstützter Bauteildarstellung und Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente
(ISBN 3-89194-036-X)
- Nr. 83.9 J. Effertz: Die Entwicklung eines Finite-Element-Programmsystemes für die Analyse von Gleitlagern unter Berücksichtigung thermischer und elastischer Effekte
(ISBN 3-89194-037-8)
- Nr. 83.10 W. Hesse: Verschleißverhalten des Laufrad-Schiene-Systems fördertechnischer Anlagen
(ISBN 3-89194-038-6)
- Nr. 83.11 R.T. Heyer: Rückstellkräfte und -momente nachgiebiger Kupplungen bei Wellenverlagerungen
(ISBN 3-89194-039-4)
- Nr. 83.12 E. Kitschke: Wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden zur Ermittlung der Zuverlässigkeitskenngrößen mechanischer Systeme auf der Grundlage der statistischen Beschreibung des Ausfallverhaltens von Komponenten
(ISBN 3-89194-040-8)
- Nr. 83.13 P.G. Hoch: Tragfähigkeit von Käfigen in Rollenlagern für Planetenräder
(ISBN 3-89194-041-6)
- Nr. 84.1 H. Diedenhoven: Anwendung von Algorithmen der rechnerunterstützten Konstruktion bei der Ermittlung kollisionsfreier Werkzeugwege für NC-Maschinen mit fünf Bewegungsachsen
(ISBN 3-89194-042-4)
- Nr. 84.2 M. Dümeland: Weiterentwicklung störungsbehafteter technischer Produkte nach konstruktionsmethodischen Kriterien
(ISBN 3-89194-043-2)
- Nr. 84.3 Th. Koch: Rechnerunterstützter Vergleich der Mischbettverfahren mit Simulation der Probenahme
(ISBN 3-89194-044-0)

-
- Nr. 84.4 M. Werdenberg: Gestaltung von CAD-Systemen nach konstruktionsmethodischen Gesichtspunkten (ISBN 3-89194-045-9)
- Nr. 84.5 H.Th. Wagner: Versuche zur Lastaufteilung und zum Breitentragen in geradverzahnten Planetenradgetrieben (ISBN 3-89194-046-7)
- Nr. 85.1 P. Kaufmann: Regelung des Bremsmomentes eines Scheibenbremssystems bei kurzen Bremszeiten (ISBN 3-89194-047-5)
- Nr. 85.2 A. Westerholz: Die Erfassung der Bauteilschädigung betriebsfester Systeme, ein Mikrorechner geführtes On-Line Verfahren (ISBN 3-89194-048-3)
- Nr. 85.3 J. Matke: Simulation der dynamischen Beanspruchungen und rechnerische Betriebsfestigkeit von Bauteilen eines neuartigen Planetenhubwerkes (ISBN 3-89194-049-1)
- Nr. 85.4 U. Breucker: Experimentelle und theoretische Bestimmung der Lastverteilung in Wälzdrehverbindungen bei Stützung durch ungleichförmig elastische Anschlußkonstruktionen (ISBN 3-89194-050-5)
- Nr. 85.5 W. Schulte: Berührungslose radiale Gleitringdichtungen mit Öl als Sperrmedium. Entwicklung eines Rechenprogrammes auf der Basis der dreidimensionalen thermoelasto-hydrodynamischen Theorie (ISBN 3-89194-051-3)
- Nr. 85.6 A. Schoo: Verzahnungsverlustleistungen in Planetenradgetrieben (ISBN 3-89194-052-1)
- Nr. 85.7 H.-J. Linnhoff: Die Berechnung des Ladungswechsels und Ansprechverhaltens von Verbrennungsmotoren mit Abgasturboaufladung (ISBN 3-89194-053-X)
- Nr. 86.1 K. Brinkmann: Materialfluß in der Flüssigphase der Stahlerzeugung - Eine Untersuchung hinsichtlich der Automatisierbarkeit von Förder- und Chargiervorgängen (ISBN 3-89194-054-8)
- Nr. 86.2 H. Seifert: Rechnerunterstütztes Konstruieren mit PROREN (ISBN 3-89194-055-6)
- Nr. 86.3 H. Potthoff: Anwendungsgrenzen vollrolliger Planetenrad-Wälzlager (ISBN 3-89194-056-4)
- Nr. 86.4 H.J. Scheurlen: Verformungen und Spannungen von Planetenradträgern (ISBN 3-89194-057-2)

- Nr. 86.5 B. Döring: Anwendung der Konstruktionsmethodik bei der Bearbeitung von Forschungsvorhaben - erläutert am Beispiel "Untersuchung von Radialgleitlagern großer Turbomaschinen" (ISBN 3-89194-058-0)
- Nr. 86.6 G. Berger: Automatisch stufenlos wirkendes hydrostatisches Lastschaltgetriebe für Kraftfahrzeuge. Theorie, Konstruktion, Versuche. Vergleiche mit serienmäßigen Kraftfahrzeuggetrieben (ISBN 3-89194-059-9)
- Nr. 86.7 J. Weiland: Analytische und experimentelle Untersuchung des thermischen Verhaltens von Industriebremsscheiben (ISBN 3-89194-062-9)
- Nr. 86.8 J. Müller: Statistische und werkstoffkundliche Analyse des Ausfallverhaltens dynamisch beanspruchter Bauteile zur Ermittlung der Zuverlässigkeitskenngrößen mechanischer Systeme (ISBN 3-89194-063-7)
- Nr. 86.9 M.V. Kaci: Einfluß von Wärmeströmen auf die Tragfähigkeit von Planetenrad-Gleitlagern (ISBN 3-89194-064-5)
- Nr. 86.10 P.J. Tenberge: Wirkungsgrade von Zug- und Schubgliederketten in einstellbaren Keilumschlingungsgetrieben (ISBN 3-89194-060-2)
- Nr. 87.1 M. Patz: Nichtlineare Berechnung der Lastverteilung in Wälzdrehverbindungen unter Beachtung von Tragwerksverformungen (ISBN 3-89194-065-3)
- Nr. 87.2 G. Truszkewitz: Entwicklung eines integralen Transportsystems zur Optimierung des Materialflusses in der Stahlerzeugung (ISBN 3-89194-066-1)
- Nr. 87.3 L. Winkelmann: Lastverteilung in Planetenradgetrieben (ISBN 3-89194-067-X)
- Nr. 87.4 Th. Siepmann: Reibmomente in Zylinderrollenlagern für Planetenräder (ISBN 3-89194-068-8)
- Nr. 87.5 W. Barth: Verformungen und Zahnfußspannungen von ringförmigen Rädern in Planetenradgetrieben (ISBN 3-89194-069-6)
- Nr. 87.6 W. Stenmanns: Kranhubwerk hoher Leistungsdichte; Steuerung des Systemverhaltens zur Unterdrückung dynamischer Zusatzbeanspruchungen (ISBN 3-89194-070-X)

-
- Nr. 88.1 F. Abel: Lasergestützte Untersuchungen der Spurführungsdynamik von Brückenkränen zur Bestimmung von praxismgerechten Schräglaufkollektiven (ISBN 3-89194-071-8)
- Nr. 88.2 Z. Yang: Theoretische und experimentelle Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines Kranfahrwerks mit Umrichterantrieb und leistungsverzweigtem Getriebe (ISBN 3-89194-072-6)
- Nr. 88.3 S. Martini: Stufenlos wirkendes hydrostatisches Lastschaltgetriebe im Vergleich zu bekannten Getrieben im Stadtbuseinsatz unter Berücksichtigung von Bremsenergieerückgewinnung (ISBN 3-89194-073-4)
- Nr. 88.4 A. Moissiadis: Experimentelle, analytische und werkstoffkundliche Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens des Systems Laufrad-Schiene-Unterlage-Träger von förder-technischen Anlagen (ISBN 3-89194-074-2)
- Nr. 89.1 Q. Yang: Zuverlässigkeit von Zahnradgetrieben (ISBN 3-89194-075-0)
- Nr. 89.2 W. Weick: Die Problematik des Datenaustausches zwischen 3D-CAD-Systemen über eine neutrale Datenschnittstelle (ISBN 3-89194-076-9)
- Nr. 89.3 H. Beumler: Geräuschverhalten von einstufigen Planetenzahnradgetrieben mit gehäusefestem Hohlrad (ISBN 3-89194-077-7)
- Nr. 89.4 M. Theissen: Untersuchung zum Restgaseinfluß auf den Teillastbetrieb des Ottomotors (ISBN 3-89194-078-5)
- Nr. 89.5 G. Hopf: Experimentelle Untersuchungen an großen Radialgleitlagern für Turbomaschinen (ISBN 3-89194-079-3)
- Nr. 89.6 U. Blumenthal: Beurteilungskenngrößen für stufenlos wirkende hydrostatisch-mechanische Lastschaltgetriebe in Personenkraftwagen (ISBN 3-89194-080-7)
- Nr. 89.7 D. Vill: Schneckengetriebe zur Leistungsübertragung mit der Laufpaarung Stahl und Grauguß (ISBN 3-89194-081-5)
- Nr. 89.8 H. Dierich: Weiterentwicklung der Theorie zur Ermittlung von Hertzschen Drücken und Reibungszahlen in Verzahnungen von Schneckenrieben (ISBN 3-89194-082-3)

- Nr. 89.9 M. Karademir: Zahnsteifigkeiten in Planetenradgetrieben
(ISBN 3-89194-083-1)
- Nr. 89.10 E. Raphael: Kritische Betriebszustände von Planetenrad-Nadellagern
(ISBN 3-89194-084-X)
- Nr. 89.11 B. Baumann: Regelung hydraulisch lüftender Scheibenbremsen zur
Minimierung der dynamischen Beanspruchung von Antriebssystemen
(ISBN 3-89194-085-8)
- Nr. 89.12 J. Baumeister: Phänomenologische Untersuchungen zu kunstharzvergossenen
Seilendverbindungen
(ISBN 3-89194-086-6)
- Nr. 90.1 W. Möllers: Analytische und experimentelle Untersuchung des dynamischen
Rückstellkraftverhaltens nachgiebiger Wellenkupplungen
(ISBN 3-89194-087-4)
- Nr. 90.2 X. Guo: Experimentelle Untersuchung der Wärmeübertragung zwischen
rauhem Rohren und Fluiden mit hoher Prandtlzahl bei turbulenter Strömung
(ISBN 3-89194-088-2)
- Nr. 90.3 A. Becker: Numerische Berechnung des Kontaktes beliebig gekrümmter
Körper unter besonderer Berücksichtigung der Einflußgrößen des
Rad-Schiene-Systems
(ISBN 3-89194-089-0)
- Nr 91.1 Th. Böhmer: Entwicklung eines Standardtestes zur Erprobung von Schmier-
und Werkstoffen
(ISBN 3-89194-090-4)
- Nr. 91.2 J. Deiwiks: Schalleistungspegel von Planetenradtriebbestufen mit
gehäusefestem Hohlrad
(ISBN 3-89194-091-2)
- Nr. 91.3 A. Lintner: Berechnung des Verformungsverhaltens von
Punktschweißverbindungen mittels der FE-Methode
(ISBN 3-89194-092-0)
- Nr. 91.4 G. Hansberg: Freßtragfähigkeit vollrolliger Planetenrad-Wälzlager
(ISBN 3-89194-093-9)
- Nr. 91.5 W. Radisch: Laufwerkskräfte und Kettenschlupf von Gleiskettenfahrzeugen
(ISBN 3-89194-094-7)
- Nr. 91.6 B. Bouché: Reibungszahlen von Schneckengetriebeverzahnungen im
Mischreibungsgebiet
(ISBN 3-89194-095-5)

-
- Nr. 91.7 P. Haag: Anlaufwirkungsgrade und Selbsthemmungsfähigkeit von ruhenden Schneckengetrieben
(ISBN 3-89194-096-3)
- Nr. 91.8 U. Reidegeld: Der Einfluß der konstruktiven Gestaltung der Schmierstoffzuführung auf den Ölaustausch und die übrigen statischen Eigenschaften schnell laufender hydrodynamischer Gleitlager
(ISBN 3-89194-097-1)
- Nr. 91.9 P. Schindler: Berechnungsmodelle für instationäre Strömungsvorgänge durch Mehrfachverzweigungen im Rohrleitungssystem von Verbrennungsmotoren
(ISBN 3-89194-098-X)
- Nr. 91.10 B. Leicht: Betriebssicherheit und Einsatzzuverlässigkeit von Hubwerkskonzepten mit redundanten Komponenten
(ISBN 3-89194-099-8)
- Nr. 91.11 R. Jakob: Experimentelle Ermittlung der Lebensdauer mehrachsiger schwingbeanspruchter Wellen und Welle-Nabe-Verbindungen
(ISBN 3-89194-100-5)
- Nr. 92.1 R. Schenk: Die Kopplung eines CAD- und CAP/NC-Systems zur Erzeugung von Plandaten für Werkstücke mit Freiformflächen
(ISBN 3-89194-101-3)
- Nr. 92.2 B. Naendorf: Näherungsgleichungen für Tragfähigkeitsnachweise von Industrieplanetengetrieben
(ISBN 3-89194-102-1)
- Nr. 92.3 B. Liang: Berechnungsgleichungen für Reibmomente in Planetenradwälzlagern
(ISBN 3-89194-103-X)
- Nr. 93.1 R. Zabłowski: Beanspruchungserfassung zur lebensdauerorientierten Überwachung von Antriebssystemen
(ISBN 3-89194-104-8)
- Nr. 93.2 U. Lüning: Simuliertes und wirkliches Verhalten von hydrostatisch-mechanischen Lastschaltgetrieben und konventionellen Getrieben in Personenkraftwagen
(ISBN 3-89194-105-6)
- Nr. 93.3 N. Emamdjomeh: Vergleich von stufenlos wirkenden hydrostatisch-mechanischen und marktverfügbaren Lastschaltgetrieben für Traktoren
(ISBN 3-89194-106-4)
- Nr. 93.4 S. Verstege: Umlaufende Verformungen an Gleitringdichtungen - eine thermoelastische Instabilität
(ISBN 3-89194-107-2)

- Nr. 93.5 H. Seifert: Festschrift zur akademischen Feier aus Anlaß des 65. Geburtstages und der Emeritierung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Seifert (ISBN: 3-89194-108-0)
- Nr. 93.6 M. Fister: Experimentelle Untersuchungen an hydrodynamischen Kupplungen mit verstellbaren Kanälen (ISBN 3-89194-109-9)
- Nr. 93.7 T. Benda: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an hochbelastbaren Zahnriemen unter instationärer Betriebsweise (ISBN 3-89194-110-2)
- Nr. 94.1 A. Böcker: Zahnflankenkorrekturen bei größeren Ritzel - als Radbreiten (ISBN 3-89194-111-0)
- Nr. 95.1 F. Tintrup: Ermittlung von Auslegungsdaten für Antriebssysteme fördertechnischer Anlagen durch starrkörperkinetische Simulation (ISBN 3-89194-112-9)
- Nr. 95.2 P. Fladung: Beitrag zur Reduzierung der Kennlinienstreuung bei Einrohrgasdruckstoßdämpfern (ISBN 3-89194-113-7)
- Nr. 95.3 C. Lamparski: Einfache Berechnungsgleichungen für Lastüberhöhungen in Leichtbauplanetengetrieben (ISBN 3-89194-114-5)
- Nr. 95.4 S. Chehade: Wissensbasierte Rekonstruktion von 3D-CAD-Modellen aus 2D-CAD-Modellen auf der Basis von PROLOG (ISBN 3-89194-115-3)
- Nr. 95.5 D. Kulesa: Relationales Entwurfsmodell als Ergebnis der rechnerunterstützten Variantenkonstruktion (ISBN 3-89194-116-3)
- Nr. 95.6 K. Kiene: Zulässige Verlustleistungen von Planetenzahnrad-Wälzlagern an Temperaturgrenzen (ISBN 3-89194-117-X)
- Nr. 95.7 A. Wahle: Alternatives Serienhubwerkskonzept mit speziellem Umlaufgetriebe (ISBN 3-89194-118-8)
- Nr. 95.8 S. Vöth: Überwachung fördertechnischer Anlagen hinsichtlich des Beanspruchungs- und Schädigungsverhaltens (ISBN 3-89194-119-6)
- Nr. 95.9 U. Nass: Tragfähigkeitssteigerung von Schneckengetrieben durch Optimierung der Schneckenradbronze (ISBN 3-89194-120-X)

-
- Nr. 95.10 G. Loos: Effiziente Produktgestaltung durch kontextsensitive Gesteninterpretation
(ISBN 3-89194-121-8)
- Nr. 96.1 B. Schwarze: Losradkreischen in Zahnradgetrieben
(ISBN 3-89194-122-6)
- Nr. 96.2 R. Obretinow: Elastische Biegung nach Theorie 3. und 4. Ordnung
(ISBN 3-89194-123-4)
- Nr. 96.3 R. G. Wittor: Näherungsgleichungen für den Schalleistungspegel von Planetenzahnradgetrieben
(ISBN 3-89194-124-2)
- Nr. 96.4 I. Steinberg: Hydrodynamische Schaltkupplungen mit schwenkbaren Schaufeln
(ISBN 3-89194-125-0)
- Nr. 96.5 X. Zhou: Zuverlässigkeitsanalyse menschlicher und mechanischer Einflußfaktoren
(ISBN 3-89194-126-9)
- Nr. 96.6 U. Duhr: Betriebsgerechte Auslegung hochbeanspruchter Ringscheibenkupplungen
(ISBN 3-89194-127-7)
- Nr. 97.1 B. Reckmann: Ein Beitrag zur Migration vorhandener Systemkomponenten in eine modulare Systemarchitektur
(ISBN 3-89194-128-5)
- Nr. 97.2 T. Bartels: Instationäres Gleitwälzkontaktmodell zur Simulation der Reibung und Kinematik von Rollenlagern
(ISBN 3-89194-129-3)
- Nr. 97.3 R.M. Dinter: Riefen und Risse auf Schneckenflanken von Zylinder-Schneckengetrieben
(ISBN 3-89194-130-7)
- Nr. 97.4 M. Jürging: Selbstbremsung von dynamisch belasteten Schneckengetrieben
(ISBN 3-89194-131-5)
- Nr. 97.5 J. Hartleb: Dynamische Radlasten an ungefederten Gleiskettenfahrzeugen unter Berücksichtigung strukturspezifischer Eigenschaften
(ISBN 3-89194-132-3)
- Nr. 97.6 G. Polifke: Dynamisches Verhalten von mehrstufigen Planetenradgetrieben
(ISBN 3-89194-133-1)
- Nr. 97.7 A. Putzmann: Strukturen und Strukturierungsmethoden in der Produktentwicklung
(ISBN 3-89194-134-X)

- Nr. 98.1 *Kolloquium Intertractor*: Neuere Beiträge zur Entwicklung der Laufwerkstechnik
(ISBN 3-89194-135-8)
- Nr. 98.2 K. Qian: Simulation des dynamischen Verhaltens von Umlaufgetrieben mit Stufenplaneten
(ISBN: 3-89194-136-6)
- Nr. 98.3 C. Hübner: Geräuschemission von Schneckengetrieben
(ISBN 3-89194-137-4)
- Nr. 98.4 *Kolloquium Intertractor*: siehe Nr. 98.1 in englischer Version
(ISBN 3-89194-138-2)
- Nr. 98.5 Y. Qian: Untersuchungen zum Mündungsgeräusch des Verbrennungsmotors
(ISBN 3-89194-139-0)
- Nr. 99.1 M. Christ: Rechnersoftware für die integrierte Gestaltung und Berechnung von Planetengetrieben
(ISBN 3-89194-140-4)
- Nr. 99.2 P. Braun: Objektorientierte Wissensarchivierung und –verarbeitung in modellassozierten Gestaltungs- und Berechnungssystemen
(ISBN 3-89194-141-2); (Shaker-Verlag: ISBN: 3-8265-7768-X)
- Nr. 00.1 D. Rother: Das Verfahren der zweistufigen Verzögerung als Steuerstrategie für fördertechnische Geräte zur Unterdrückung von Lastpendelungen im Zielpunkt
(ISBN 3-89194-142-0)
- Nr. 00.2 B. Guldenberg: Einfluss der nipinduzierten Effekte auf den Wickelprozess von Papier
(ISBN 3-89194-143-9); (Shaker-Verlag: ISBN: 3-8265-8026-5)
- Nr. 00.3 P. Barton: Tragfähigkeit von Schraubrad- und Schneckengetrieben der Werkstoffpaarung Stahl-Kunststoff
(ISBN 3-89194-144-7)
- Nr. 00.4 K. Endebrock: Ein Kosteninformationsmodell für die frühzeitige Kostenbeurteilung in der Produktentwicklung
(ISBN 3-89194-145-5); (Shaker-Verlag: ISBN: 3-8265-7960-7)
- Nr. 00.5 M. Meissner: Methoden zur qualitätsgerechten CAD-Modellerzeugung für die virtuelle Produktentwicklung am Beispiel der Automobilindustrie
(ISBN 3-89194-146-3)
- Nr. 00.6 C. Leszinski: Ein Visualisierungs- und Navigationsassistent für Produktstrukturen in der Produktentwicklung
(ISBN 3-89194-147-1)

-
- Nr. 00.7 D. Gerhard: Erweiterung der PDM-Technologie zur Unterstützung verteilter kooperativer Produktentwicklungsprozesse
(ISBN 3-89194-148-X)
- Nr. 00.8 L. Langenberg: Firmenspezifische Wissensportale für Produktentwicklung
(ISBN 3-89194-149-8)
- Nr. 00.9 C. Lippold: Eine domänenübergreifende Konzeptionsumgebung für die Entwicklung mechatronischer Systeme
(ISBN 3-89194-150-1)
- Nr. 01.1 M. Liu: Dynamisches Verhalten hydrostatischer Axialkolbengetriebe
(ISBN 3-89194-151-X)
- Nr. 01.2 H. Butz: Überwachung von Tragwerken förder technischer Geräte mit dem Konzept der modalen Reduktion unter Berücksichtigung finiter Turmelemente
(ISBN 3-89194-152-8)
- Nr. 01.3 F.-D. Krull: Steifigkeit, Dämpfung und Reibung an Kontaktstellen der Kolben von hydrostatischen Axialkolbenmaschinen
(ISBN 3-89194-153-6)
- Nr. 01.4 J. Kettler: Ölsumpftemperatur von Planetengetrieben
(ISBN 3-89194-154-4)
- Nr. 01.5 J. Vriesen: Berechnung der Verzahnungskorrekturen von Planetenradgetrieben unter Berücksichtigung der Steg- und Hohlradverformung
(ISBN 3-89194-155-2)
- Nr. 01.6 P. Kisters: Theoretische und experimentelle Untersuchungen an reibschlüssigen Verbindungen mit NiTi-Formgedächtniselementen
(ISBN 3-89194-156-0)
- Nr. 01.7 J. Scholten: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Beanspruchungsermittlung wartungsfreier Gelenklager
(ISBN 3-89194-157-9)
- Nr. 01.8 A. Jacek: Werkstoff- und Fertigungsoptimierung für Schneckenräder
(ISBN 3-89194-158-7)
- Nr. 02.1 G. Schneider: Selbstarretierende und rückführend wirkende Gesperrebauforn basierend auf dem Verkantungseffekt
(ISBN 3-89194-159-5)
- Nr. 02.2 K. Lubenow: Axialtragfähigkeit und Bordreibung von Zylinderrollenlagern
(ISBN 3-89194-160-9)
- Nr. 02.3 M. Schwekutsch: Automatisierungselemente in Schaltgetrieben
(ISBN 3-89194-161-7)

- Nr. 03.1 T. Nosper: Untersuchungen zur Schaltzeitoptimierung an automatisierten Schaltgetrieben
(ISBN 3-89194-162-5)
- Nr. 04.2 C. Schulte: Entwicklung und Erprobung eines neuen großserientauglichen Messverfahrens zur Qualitätsprüfung von Stirnrädern
(ISBN 3-89194-165-X)
- Nr. 04.3 M. Klönne: Drehschwingungsdämpfung mit NiTi-Formgedächtnislegierungen – Grundlagen und Anwendung
(ISBN 3-89194-166-8)
- Nr. 04.4 Tagungsband Kranfachtagung, Mai 2004
(ISBN 3-89194-167-6)
- Nr. 04.5 R. Rüschoff: Analyse der Wechselwirkungen von Mehrfacheingriffen am Beispiel Planetengetriebe
(ISBN 3-89194-168-4)
- Nr. 05.1 G. Elfert: Langsamlaufverschleiß von vollrolligen Radialzylinderrollenlagern
(ISBN 3-89194-169-2)
- Nr. 05.2 H. Haensel: Systemanalytische Betrachtung sphärischer tribomechanischer Systeme
(ISBN 3-89194-170-6)
- Nr. 05.3 J. Wassermann: Einflussgrößen auf die Tragfähigkeit von Schraubradgetrieben der Werkstoffpaarung Stahl/Kunststoff
(ISBN: 3-89194-171-4)
- Nr. 05.4 A. Blümm: Simplex V – Erweiterung eines Programms zur dynamischen Analyse von Planetengetrieben
(ISBN: 3-89194-172-2)
- Nr. 05.5 E. Wolf: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Scherschneiden von Papier
(Shaker-Verlag, ISBN 3-8322-5036-0)
- Nr. 05.6 D. Strasser: Einfluss des Zahnflanken- und Zahnkopfspeies auf die Leerlaufverlustleistung von Zahnradgetrieben
(ISBN: 3-89194-174-9)
- Nr. 06.1 M. Ziegler: Die Beanspruchung mechanischer Komponenten endloser Kettentriebe in der Kohlegewinnung durch eigen- und fremderregte Schwingungen
(ISBN: 3-89194-175-7)
- Nr. 06.2 D. Giannoulis: Modellgestützte Montagekostenprognose für die Einzel- und Kleinserienfertigung im Maschinenbau
(Shaker-Verlag, ISBN 3-8322-4412-3)

-
- Nr. 06.3 C. Chasiotis: Prozessbegleitende Wissensdokumentation und integrierte Wissensvisualisierung in der Digitalen Produktentwicklung (Shaker-Verlag, ISBN 3-8322-5375-0)
- Nr. 06.4 S. Schulte: Integration von Kundenfeedback in die Produktentwicklung zur Optimierung der Kundenzufriedenheit (Shaker-Verlag, ISBN 978-3-8322-6029-3)
- Nr. 06.5 G. Lützig: Großgetriebe-Graufleckigkeit: Einfluss von Flankenmodifikation und Oberflächenrauheit (ISBN: 3-89194-176-5)
- Nr. 06.6 U. Bräckelmann: Reibung, Steifigkeit und Dämpfung in Schrägscheiben-Axialkolbenpumpen und –motoren (ISBN: 3-89194-177-3)
- Nr. 07.1 J. Koryciak: Einfluss der Ölmenge auf das Reibmoment von Wälzlagern mit Linienberührung (ISBN: 3-89194-178-1)
- Nr. 07.2 LMF/BMT der RUB: 15. Internationale Kranfachtagung 2007: „Der Lebenszyklus von Kranen – Entwicklung – Betrieb – Instandhaltung“ (ISBN: 3-89194-179-X)
- Nr. 07.3 S. Jansen: Eine Methodik zur modellbasierten Partitionierung mechatronischer Systeme (Shaker-Verlag, ISBN: 978-3-8322-6252-5)
- Nr. 07.4 J. Breidert: Schnittstellengestaltung für die Baukastensynthese mit Beispielen aus der Formgedächtnisaktorik (Shaker-Verlag, ISBN: 978-3-8322-6298-3)
- Nr. 07.5 O. C. Sieg: Ein Beitrag zur integrativen Unterstützung des Produktentwicklungs-controllings (Shaker-Verlag, ISBN: 978-3-8322-6446-8)
- Nr. 07.6 J. Hermes: Tragfähigkeit von Schneckengetrieben bei Anfahrvorgängen sowie Last- und Drehzahlkollektiven (ISBN: 3-89194-180-3)
- Nr. 07.7 N. Lehnert: Entwicklung einer tribomechanischen Bauteilsimulation am Beispiel eines sphärischen Gelenklagers (ISBN: 3-89194-181-1)
- Nr. 08.1 O. Koch: Dreidimensionale Simulation von kombiniert belasteten Radialzylinderrollenlagern (ISBN: 3-89194-182-X)
- Nr. 08.2 A. M. Knopik : NiTi in der Antriebstechnik: Kerbwirkung, Simulation des dynamischen Verhaltens und der Temperatur (ISBN: 3-89194-183-8)

- Nr. 08.3 O. Kempkes: Technisch-wirtschaftliche Bewertung und Optimierung förder technischer Produkte
(ISBN: 3-89194-184-6)
- Nr. 08.4 T. Wendt: Tragfähigkeit von Schraubradgetrieben mit Schraubrädern aus Sintermetall
(ISBN: 3-89194-185-4)
- Nr. 08.5 A. Kleinert: Analyse des Spaltdrosseffektes für den Bahntransport mit umschlungenen Walzen
(Veröffentlichung elektronisch)
- Nr. 09.1 T. Wiedemann: Systemanalytische Betrachtung von Rotoren von Mehrphasen-Schraubenspindelpumpen
(ISBN: 3-89194-186-2)
- Nr. 09.2 F. Baranski: Vibroakustische Analyse von Kettenfahrwerken
(ISBN: 3-89194-187-0)
- Nr. 09.3 L. Hohaus: Entwicklung einer Verzweigungsvorrichtung für das System CargoCap, simulationsgestützte Ermittlung von Betriebslasten
(ISBN: 3-89194-188-9)
- Nr. 09.4 P. Knüpfer: CargoCap – Optimale Fahrbewegungen autonomer Fahrzeuge
(ISBN: 3-89194-189-7)
- Nr. 09.5 S. Söndgen: Verlustleistung und Tragfähigkeit belasteter Borde von Zylinderrollenlagern
(ISBN: 3-89194-190-0)
- Nr. 09.6 J. Camphausen: Parametrischer Ermüdungsfestigkeitsnachweis auf Basis lokaler Kerbspannungen am Beispiel von Förderschrauben von Mehrphasen-Schraubenspindelpumpen
(ISBN: 3-89194-191-9)
- Nr. 09.7 T. Sadek: Ein modellorientierter Ansatz zur Konzeptentwicklung industrieller Produkt-Service-Systeme
(Shaker-Verlag, ISBN: 978-3-8322-8025-3)
- Nr. 09.8 S. Langbein: Lokale Konfiguration und partielle Aktivierung des Formgedächtniseffektes zur Erzeugung smarter Bauteilstrukturen
(Veröffentlichung elektronisch)
- Nr. 10.1 N. Sverdlova: Biomechanical analysis of the integration behaviour of cementless stems in total joint replacement
(Shaker-Verlag, ISBN: 978-3-8322-9174-7)
- Nr. 10.2 J. Withöft: Planen und Konzipieren hybrider Leistungsbündel für den Konsumgütermarkt
(Shaker-Verlag, ISBN 978-3-8322-9190-7)

Nr. 10.3 K. Nazifi: Einfluss der Geometrie und der Betriebsbedingungen auf die
Graufleckigkeit von Großgetrieben
(ISBN: 3-89194-192-7)

Stand: Juni 2010