

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik - Lehrstuhl für Maschinenelemente
Technische Universität München

Alterung von Schmierstoffen im Zahnradprüfstand und in Praxisgetrieben

Helmut Krieger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des
akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. G. Knoll,
Universität Gesamthochschule Kassel

Die Dissertation wurde am 22.09.2003 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät Maschinenwesen am 06.02.2004 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Maschinenelemente, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG), der Technischen Universität München. Grundlage der Arbeit bilden zwei Forschungsvorhaben, die im Auftrag der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) bzw. der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK) an der FZG durchgeführt wurden.

Mein Dank gilt allen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. B.-R. Höhn, meinem Doktorvater, für die wohlwollende Begleitung und Unterstützung der Arbeit, Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Knoll für die Übernahme des Koreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Dr.-Ing. K. Michaelis, meinem Forschungsgruppenleiter, der mir mit seiner Erfahrung und fachlichen Kompetenz stets hilfreich zur Seite stand. Das sehr angenehme persönliche Verhältnis möchte ich dabei dankend hervorheben.

allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für ihre Unterstützung und Hilfsbereitschaft. Besonders erwähnen darf ich dabei die Mitarbeiter des Prüffeldes für die Durchführung der zahlreichen Versuche.

den Assistentenkollegen für das freundschaftliche Arbeitsklima und ihre wertvolle Hilfestellung bei Detailproblemen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Christine für den Rückhalt und ihre stete Unterstützung.

In liebevoller Erinnerung danke ich meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht haben.

Langenau, im März 2004

0	Zeichen, Einheiten und Benennungen.....	III
1	Einführung.....	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung	2
2	Stand des Wissens	3
2.1	Betriebsbedingte Schmierstoffveränderungen	3
2.2	Tribologische Auswirkungen der Schmierstoffveränderungen	7
3	Versuchseinrichtungen	12
3.1	FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfstand.....	12
3.2	Hypoidgetriebeprüfstand.....	13
3.3	Standard-Synchronisationsprüfstand.....	14
3.4	Ölalterungsaggregat.....	15
3.5	Labormessgeräte.....	17
3.6	Prüfkörper.....	21
4	Versuchsprogramm und Testverfahren.....	23
4.1	Versuchsschmierstoffe	24
4.2	Alterung der Schmierstoffe	26
4.3	Komponententests	32
5	Versuchsergebnisse	36
5.1	Schmierstoffveränderungen infolge der Alterung.....	36
5.2	Ergebnisse der Fresstests.....	56
5.3	Ergebnisse der Pittingtests.....	60
5.4	Ergebnisse der Graufleckentests	62
5.5	Ergebnisse der Synchronisationstests.....	63
5.6	Ergebnisse der Wandler-Kupplungs-Tests.....	67
5.7	Übersichtsdarstellung der Ergebnisse	68
5.8	Ergänzende Schmierstoffuntersuchungen	73
5.9	Ergebnisse der Verschleißtests.....	80
6	Diskussion der Ergebnisse.....	85
6.1	Auswertung der Schmierstoffkennwerte.....	85
6.2	Bewertung der Alterungsmethode.....	93
6.3	Anwendung der Alterungsmethode.....	98

7	Einfluss der Ölalterung auf die Grübchentragsfähigkeit	102
7.1	Berechnung der Grübchentragsfähigkeit nach DIN 3990.....	102
7.2	Wöhlerlinien unter Berücksichtigung der Ölalterung	104
7.3	Anwendung der Erkenntnisse für Praxisgetriebe	112
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
8.1	Zusammenfassung	113
8.2	Ausblick.....	115
9	Literatur	116
10	Anhang	122
10.1	Daten der Testverzahnungen	122
10.2	Daten der Testsynchronisierungen	128
10.3	Versuchsschmierstoffe für die Verschleißuntersuchungen	129

0 Zeichen, Einheiten und Benennungen

a	mm	Achsabstand
AC	-	Anticorrosion (-Additive)
AF	-	Antifoam (-Additive)
Al	-	Aluminium
AO	-	Antioxidans (-Additive)
ATF	-	Versuchsschmierstoff: Automatikgetriebeöl
AW	-	Antiwear (-Additive)
AXLE	-	Versuchsschmierstoff: Achsöl
b	mm	Zahnbreite
B	-	Bor
c	mol/l	Konzentration
CLP-PG	-	Versuchsschmierstoff: Industriegetriebeöl Polyglykol
Cu	-	Kupfer
d	mm	Schichtdicke
d	mm	Teilkreisdurchmesser
d _a	mm	Kopfkreisdurchmesser
d _b	mm	Grundkreisdurchmesser
d _w	mm	Wälzkreisdurchmesser
D	mm	Durchmesser
D	%	Durchlässigkeit im IR-Spektrum in Transmittance Darstellung
D	-	Verlustfaktor
DI	-	Dispersant (-Additive)
DE	-	Detergent (-Additive)
E	-	Extinktion
E	-	Ester
EP	-	Extreme Pressure (-Additive)
f _{fm}	µm	mittlere Profilformabweichung
F _a	N	Axialkraft

Fe	-	Eisen
FM	-	Friction Modifier
F_t	N	Umfangskraft
h	mm	Zahnhöhe
h_c	μm	minimale Schmierfilmdicke am Wälzkreis
HC	-	Hydrocrack
ICP	-	Inductively Coupled Plasma
IR	-	Infrarot (-Spektroskopie)
K_A	-	Anwendungsfaktor
$K_{H\alpha}$	-	Stirnfaktor
$K_{H\beta}$	-	Breitenfaktor
K_V	-	Dynamikfaktor
LAV	-	Luftabscheidevermögen
LW_{50}	-	Lastspielzahl für 50% Ausfallwahrscheinlichkeit im Pittingtest
m_{et}	mm	Stirnmodul außen
m_n	mm	Normalmodul
MTF	-	Versuchsschmierstoff: Schaltgetriebeöl
n_1	min^{-1}	Drehzahl am Ritzel
n_2	min^{-1}	Drehzahl am Rad
NZ	mg KOH/g	Neutralisationszahl
p_c	N/mm^2	Hertzsche Pressung am Wälzkreis
P	-	Phosphor
PAI	abs/cm	Peak Area Increase
PAO	-	Polyalphaolefin
PG	-	Polyglykol
PMA	-	Polyalkylmethacrylat
PPD	-	Pourpoint Decreaser
r_c	mm	Messerkopfradius
R_{a1}	μm	arithmetische Mittenrauheit am Ritzel
R_{a2}	μm	arithmetische Mittenrauheit am Rad

RFA	-	Röntgenfluoreszenzanalyse
S	-	Schwefel
S_{Hmin}	-	geforderter Mindest-Sicherheitsfaktor für Flankenpressung
t	h	Laufzeit
T_1	Nm	Drehmoment am Ritzel
T_2	Nm	Drehmoment am Rad
T_R	Nm	Reibmoment
u	-	Zähnezahlverhältnis
v	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
v	%	Volumenanteil
VI	-	Viskositätsindex
x	-	Profilverschiebungsfaktor
z	-	Zähnezahl
Z_B	-	Ritzel-Eingriffsfaktor
Z_E	-	Elastizitätsfaktor
Z_H	-	Zonenfaktor
Z_L	-	Schmierstofffaktor
Z_{NT}	-	Lebensdauerfaktor
Z_R	-	Rauheitsfaktor
Z_V	-	Geschwindigkeitsfaktor
Z_W	-	Werkstoffpaarungsfaktor
Z_X	-	Größenfaktor
Z_V	-	Geschwindigkeitsfaktor
Z_β	-	Schrägenfaktor
Z_ϵ	-	Überdeckungsfaktor
Z_λ	-	Schmierfilmfaktor
Z_ϑ	-	Temperatureinflussfaktor
ZDTP	-	Zinkdithiophosphat

α	m^2/N	Druck-Viskositäts-Koeffizient
α	$^\circ$	Eingriffswinkel
α_{wt}	$^\circ$	Betriebseingriffswinkel
β	$^\circ$	Schrägungswinkel
β_{m}	$^\circ$	Spiralwinkel Mitte
δ	$^\circ$	Teilkegelwinkel
ε	-	Dielektrizitätszahl
ε	m^2/mol	Extinktionskoeffizient
ε_{α}	-	Profilüberdeckung
λ	μm	Wellenlänge
λ		spezifische Schmierfilmdicke
μ	-	Reibungszahl
μ_{m}	-	mittlere Zahnreibungszahl
ν	cm^{-1}	Wellenzahl
ν	mm^2/s	kinematische Viskosität
ν_{40}	mm^2/s	kinematische Viskosität bei 40°C Öltemperatur
ν_{100}	mm^2/s	kinematische Viskosität bei 100°C Öltemperatur
ρ_{redC}	mm	Ersatzkrümmungsradius im Wälzpunkt
σ_{H}	N/mm^2	auf tretende Flankenpressung
σ_{HG}	N/mm^2	Grübchen-Grenzfestigkeit
σ_{Hlim}	N/mm^2	Dauerfestigkeit für Flankenpressung
σ_{HP}	N/mm^2	zulässige Flankenpressung
σ_{H0}	N/mm^2	nominelle Flankenpressung
Σ	$^\circ$	Achsenwinkel
ϑ_{E}	$^\circ\text{C}$	Einspritztemperatur
ϑ_{M}	$^\circ\text{C}$	Massentemperatur
ϑ_{oil}	$^\circ\text{C}$	Öltemperatur

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Der Schmierstoff als integraler Bestandteil eines Getriebes hat einen wesentlichen Einfluss auf das Funktions- und Schadensverhalten der Getriebekomponenten. Dabei bleiben die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Schmierstoffs im Laufe seiner Gebrauchsdauer nicht konstant, sondern verändern sich infolge der verschiedenen Beanspruchungen im Getriebe. Neben Verunreinigungen sind vor allem thermische, mechanische und oxidative Beanspruchungen als wesentliche Einflussparameter für Schmierstoffveränderungen zu nennen.

Durch die hohe Leistungsdichte heutiger Getriebe ergeben sich hohe Beanspruchungen der Getriebeöle. Die Verkleinerung der Bauräume, die Steigerung der Pressungen in tribologischen Kontakten sowie die Verminderung der Befüllungsmengen führen zu einer Erhöhung der Betriebstemperatur und damit zu einer Beschleunigung der Schmierstoffalterung.

Damit erforderliche häufige Ölwechsel stellen einen nicht zu unterschätzenden Kostenfaktor dar. Sie bedingen abgestimmte Wartungspläne, verursachen Stillstandszeiten und führen bei Durchführung und Entsorgung zu einer erheblichen Umweltbelastung. Die Verlängerung von Ölwechselintervallen mit dem Ziel der Lebensdauer-schmierung von Getrieben ist somit eine wichtige Entwicklungsaufgabe.

Ölwechselintervalle werden häufig aus der Veränderung einzelner chemisch-physikalischer Schmierstoffkennwerte festgelegt, ohne dass deren genaue Einflüsse auf das Schadensverhalten ausreichend bekannt sind. Die Frage nach den Auswirkungen verlängerter Ölwechselintervalle kann derzeit nur im Rahmen von kostenintensiven Langzeituntersuchungen beantwortet werden.

Bei der Entwicklung und Prüfung von alterungsstabilen Hochleistungsschmierstoffen müssen die Auswirkungen der Alterung auf das Funktions- und Schadensverhalten von Getriebekomponenten abgesichert werden. Dazu müssen die Eigenschaften der Öle im gealterten Zustand anhand von Komponententests beurteilt werden. Bis heute fehlt dem Schmierstoffentwickler jedoch eine einheitliche Methode zur kostengünstigen und praxisnahen Alterung von Ölen. Auch der Vergleich von Untersuchungsergebnissen an gealterten Schmierstoffen wird dadurch erschwert.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Alterung von Getriebschmierstoffen im Zahnradprüfstand und in Praxisgetrieben zu vergleichen und die verwendete Alterungsmethode im Zahnradprüfstand hinsichtlich der Übereinstimmung mit der Praxis zu bewerten.

Die Alterung im Prüfstand soll in einem FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfstand erfolgen und muss im Gegensatz zu den zahlreichen bekannten Laboralterungsmethoden eine ausreichende Menge gealtertes Öl zur weiteren Prüfung in Komponententests zur Verfügung stellen.

Die Korrelation zwischen der Alterung im Prüfstand sowie der Alterung in der Praxisanwendung soll anhand geeigneter chemisch-physikalischer Schmierstoffkennwerte sowie insbesondere anhand des mechanisch-technologischen Schadensverhaltens in Komponenten nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse sollen dazu dienen, durch zeitnahe Alterung von Schmierstoffen im Prüfstand die alterungsbedingten Leistungsgrenzen ohne kostenintensive Langzeiterprobung ermitteln zu können.

Darüber hinaus soll der Einfluss der Ölalterung auf den Langsamlaufverschleiß von Zahnradern ermittelt werden sowie eine rechnerische Abschätzung des Einflusses der Alterung von Mineralölen auf die Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Stirnräder erfolgen.

2 Stand des Wissens

2.1 Betriebsbedingte Schmierstoffveränderungen

Während der Gebrauchsdauer von Getriebschmierstoffen können diese vielfältigen Veränderungen unterliegen. Sie resultieren aus der Beanspruchung der Öle in Form von Temperatur, Druck, Scherung, Verschmutzung, Luft und Feuchtigkeit. In **Bild 2.1** sind die maßgeblichen Beanspruchungsfaktoren eines Schmierstoffs dargestellt.

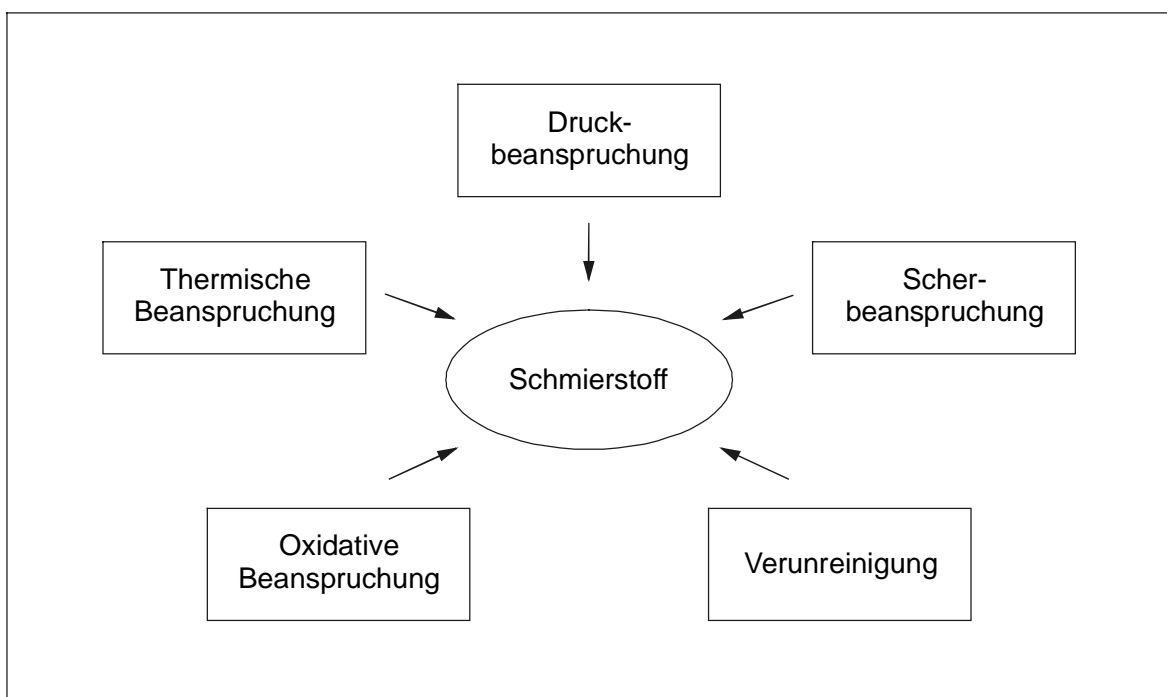


Bild 2.1: Maßgebliche Beanspruchungsfaktoren von Schmierstoffen

Die verschiedenen chemisch-physikalischen Prozesse, die infolge thermisch-oxidativer Beanspruchung sowie unter dem Einfluss von Scherbelastung zu Veränderungen der Viskosität und dem Säure- und Additivgehalt eines Schmierstoffs führen, werden als Ölalterung bezeichnet. Betriebsbedingte Verunreinigungen werden nicht als Alterung bezeichnet. Jedoch können Metalle, insbesondere Kupfer, aufgrund ihrer katalytischen Wirkung die Oxidation eines Schmierstoffs beschleunigen.

2.1.1 Oxidation

Der wichtigste Alterungseffekt ist die chemische Reaktion zwischen Sauerstoff und dem Öl. Bei der Oxidation von Kohlenwasserstoffen handelt es sich um eine Kettenreaktion. Den Ablauf des Reaktionsprozesses zeigt **Bild 2.2**.

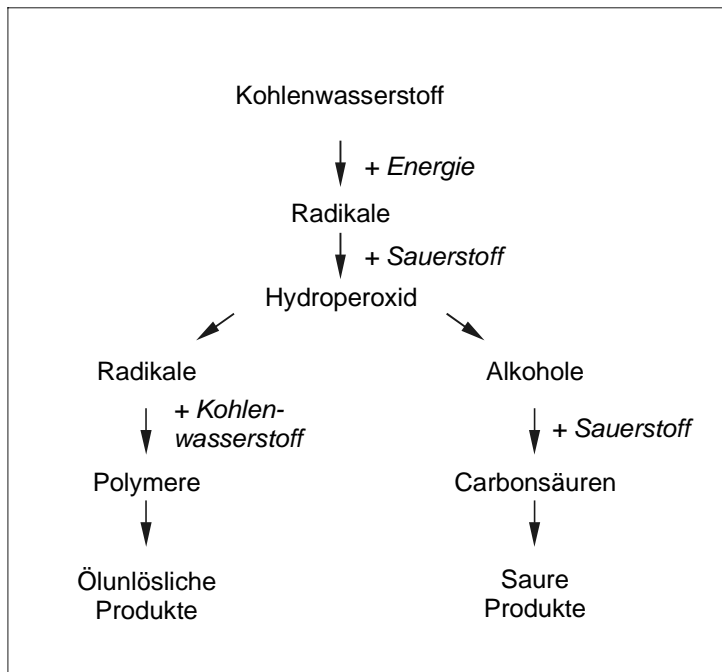


Bild 2.2: Autooxidation von Kohlenwasserstoffen
(schematisch) nach [3]

Durch thermisch und katalytisch beeinflusste Prozesse werden Radikale gebildet, die leicht oxidieren. Nach verschiedenen Mechanismen kann anschließend die Zersetzung der Hydroperoxide erfolgen, wobei Temperatur, Druck, Anwesenheit von Katalysatoren und Inhibitoren sowie das Sauerstoffangebot die wichtigsten Einflussfaktoren darstellen.

Als Endprodukte können ölunlösliche Stoffe in Form von harz- und lackähnlichen Produkten entstehen, die sich ablagern, sowie saure, flüssige Produkte, z.B. organische Säuren.

Die Wirksamkeit von Antioxidantien beruht darauf, dass sie auf verschiedene Weise in den geschilderten Prozess eingreifen können. Man unterscheidet zwischen kettenabbrechenden oder primären Antioxidantien (Radikalfänger) und Hydroperoxidzersetzer oder sekundären Antioxidantien (Synergisten).

2.1.2 Verringerung des Additivgehalts

Schmierstoffe werden zur Einstellung gewünschter Eigenschaften mit anwendungsspezifischen Additiven versehen. Der anfängliche Gehalt an Additiven reduziert sich im Lauf der Gebrauchsdauer des Schmierstoffs. Dabei können nach [48] unterschiedliche Mechanismen getrennt oder gemeinsam ablaufen:

- Gewünschte chemische Reaktionen zur Erfüllung der Additivfunktionen, z.B. Reaktionen von EP-Additiven mit Metalloberflächen
- Gewünschte physikalische Vorgänge zur Erfüllung der Additivfunktionen, z.B. Haften von Korrosionsschutz-Additiven auf Metalloberflächen
- Unerwünschte physikalische Vorgänge,

- z.B. Auswaschung der Additive durch Wasser, Ausfall beim Abkühlen, Austragung mit Oberflächenschaum
- Zersetzung durch äußere Einflüsse,
z.B. oxidative Veränderung, thermische Spaltung, hydrolytische Zersetzung, Reaktion mit Spaltprodukten
- Weitere Mechanismen,
z.B. Reaktionen von Additiven miteinander

2.1.3 Einwirkung von Scherbeanspruchungen

Bei polymerhaltigen Getriebeölen ist die Instabilität des Viskositäts-Index-Verbesserers gegenüber mechanischer Scherbeanspruchung zu berücksichtigen. Die langkettigen Polymere werden bei entsprechend hohem Schergefälle mechanisch zu kurzkettigen Bestandteilen abgebaut. Dadurch verringert sich die Schmierstoffviskosität, im Extremfall bis auf die des Grundöls.

2.1.4 Wechselwirkungen mit Wasser

Eine Verunreinigung von Schmierstoffen durch Wasser kann unterschiedliche Prozesse zur Folge haben. Bei Aufspaltung des Wassers kann der Sauerstoff die Öloxidation beschleunigen. Viele organische Stoffe werden durch chemische Umsetzung mit Wasser bei erhöhten Temperaturen gespalten. Zu solchen hydrolyseempfindlichen Stoffe gehören auch manche Additive in Getriebeölen. Dabei können ö unlösliche, teilweise korrosive Spalt- oder Folgeprodukte entstehen.

Wasser beschleunigt damit den Ölalterungsprozess [51]. Zudem verschlechtert sich mit zunehmender Alterung und Verunreinigung das Wasserabscheidungsvermögen eines Schmierstoffs [41].

2.1.5 Verschmutzung durch feste Fremdstoffe

Als feste Fremdstoffe treten bei Getriebeölen vor allem metallische Abriebteilchen infolge von Verschleiß auf sowie Rost und von außen eingebrachte Staub- und Schmutzpartikel. Bei einer Teilchengröße von unter 3 μm sind bei ausreichendem Dispergiervermögen des Schmierstoffs keine Probleme zu erwarten [3]. Allerdings können die Abriebpartikel die Öloxidation katalytisch begünstigen. Maßgeblich hierfür ist die wirksame Partikeloberfläche, weshalb sich auch kleine Partikel bei entsprechend hohem Anteil schädigend auswirken [33].

2.1.6 Schmierstoffkennwerte zur Beschreibung des Alterungszustands

Die wichtigsten chemisch-physikalischen Schmierstoffkennwerte, die heute üblicherweise zur Beurteilung des Gebrauchtölzustandes ermittelt werden, sowie deren typische Veränderungen mit der Gebrauchsdauer sind nachfolgend beschrieben.

- Viskosität

Unter thermisch-oxidativer Beanspruchung führt die Reaktion mit Sauerstoff zur Vernetzung von Ölmolekülen und damit zu einer Viskositätserhöhung. Eine Erhöhung der Temperatur bewirkt das Verdampfen dünner Komponenten mit niedrigem Siedepunkt und damit eine Viskositätszunahme sowie eine Beschleunigung der Oxidationsprozesse. Bei polymerhaltigen Ölen kann durch Scherung ein Viskositätsverlust auftreten.

- Neutralisationszahl

Mittels der Neutralisationszahl NZ lassen sich Hinweise über die bei der Alterung eines Schmierstoffs eingetretene Versäuerung gewinnen. Mit zunehmender Gebrauchsdauer ist ein Anstieg der NZ zu erwarten. Häufig liegt jedoch auch ein U-förmiger Verlauf über der Alterungsdauer vor, d.h. zunächst ein Absinken der Werte und später ein Wiederanstieg über den Ausgangswert hinaus. Dies kann die Interpretation einzelner Werte erschweren. Problematisch ist auch die bei Gebrauchtölen schwierige Ermittlung der Neutralisationszahl und die sich daraus ergebende schlechte Wiederhol- und Vergleichbarkeit. Zudem ist die NZ stark von Additiveinflüssen überlagert, so dass sie zur Beschreibung des Alterungszustandes nicht generell geeignet ist.

- Oxidation

Die Ermittlung der Oxidation eines Schmierstoffs erfolgt mit Hilfe der Infrarot-Spektroskopie. Dies ist jedoch nur bei Ölen möglich, bei denen die charakteristische Oxidationsbande nicht durch Banden anderer Schmierstoffkomponenten, z.B. Ester, überlagert ist. Mit steigender Gebrauchsdauer nimmt der Anteil an Oxidationsprodukten zu und damit auch die Peakfläche der entsprechenden Bande im IR-Spektrum. Für die Auswertung der Bande existieren unterschiedliche Verfahren, die entweder auf der Bestimmung der Peakhöhe (Extinktion) oder der Peakfläche beruhen. Nach der CEC Oxidationstestmethode L48-A00 [7] wird die Flächenzunahme PAI (peak area increase) der Alterungsbände im Wellenzahlbereich $1650 - 1820 \text{ cm}^{-1}$ angegeben.

- Veränderungen charakteristischer Additivbanden

Mit zunehmender Gebrauchsdauer verändert sich der Additivgehalt im Schmierstoff (siehe Kapitel 2.1.2). Als Kennzeichen hierfür lassen sich die Veränderungen der charakteristischen Additivbanden im IR-Spektrum ermitteln. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Veränderung einer bestimmten Bande lediglich die Veränderung einer bestimmten Molekülgruppe bedeutet. Es bedeutet nicht zwangsläufig den Abbau oder die Unwirksamkeit eines Additivs. Dieses kann auch in geringfügig veränderter Struktur vorhanden und wirksam sein.

- Elementgehalt

Für eine detaillierte Untersuchung von Schmierstoffveränderungen wird eine Elementanalyse durchgeführt. Von besonderem Interesse sind hier einerseits die Elemente, die in Additiven enthalten sind, z.B. Schwefel und Phosphor, und andererseits die Elemente, die aufgrund von Verschleiß im Öl zu finden sind, z.B. Eisen und Kupfer. Hinsichtlich des Schwefelgehalts ist bei Mineralölen zu berücksichtigen, dass im Grundöl ein Schwefelanteil enthalten ist. Eine Verringerung im Schwefelgehalt gegenüber dem Neuöl ist dementsprechend nicht ausschließlich auf einen Abbau des Additivs zurückzuführen.

- Fremdstoffgehalt

Der Anteil an magnetischen Partikeln kann mit Hilfe des PQ-Index (Particle Quantifier Index) erfasst werden. Er stellt einen Zahlenwert dar, der oft für eine Trenduntersuchung zur Beurteilung des Gebrauchtlölzustands verwendet wird. Detailliertere Kenntnisse über den Fremdstoffgehalt lassen sich beispielsweise durch spektroskopische Verfahren oder Elementgehaltbestimmung gewinnen. Die Größe von Fremdstoffpartikeln kann durch optische Verfahren bestimmt werden.

2.2 Tribologische Auswirkungen der Schmierstoffveränderungen

Die betriebsbedingten Veränderungen der Schmierstoffe können zu verschiedenen Veränderungen des tribologischen Verhaltens führen. Die Auswirkungen der Ölveränderungen hängen dabei stark von dem jeweiligen tribologischen System ab.

2.2.1 Einfluss auf die Zahnflankentragfähigkeit

Der grundsätzliche Einfluss des Schmierstoffs auf die Zahnradtragfähigkeit ist seit langem bekannt. Hierzu existieren zahlreiche Untersuchungsergebnisse. Sowohl für die Grübchentragfähigkeit [4, 53, 60], die Graufleckenbildung [60, 61], das Fress-

verhalten [47] als auch den Verschleiß [6] von Zahnrädern lässt sich ein maßgeblicher Einfluss des Schmierstoffs nachweisen.

Weiß [64] ermittelte für Mineralöle den Einfluss der Ölalterung auf die Zahnflankentragfähigkeit. Die Ergebnisse zeigten, dass ein Zusammenhang zwischen dem Grad der Alterung und der Tragfähigkeit von Zahnrädern besteht. Von fünf Mineralölen wurden im FZG-Prüfstand jeweils zwei unterschiedlich stark gealterte Ölvolumina erzeugt. Ein Schmierstoff lag zudem aus einer Feldalterung vor. Mit diesen Ölvolumina wurde der Einfluss auf Fressen, Grauflecken und Grübchenbildung untersucht.

Die Versuche zur Fresstragfähigkeit zeigten, dass mit zunehmender Alterung und dadurch verringertem Additivgehalt die Fresstragfähigkeit abnahm. Allerdings lag die Fresstragfähigkeit auch für die gealterten Öle noch auf hohem Niveau, dass in der Praxis damit kaum mit Störungen zu rechnen gewesen wäre.

Die Graufleckenversuche zeigten, dass eine leichte Alterung eine Verschlechterung der Graufleckentragfähigkeit gegenüber dem Neuöl bewirkt. Dies bestätigte frühere Untersuchungen von Schönbeck [60] zu dieser Thematik. Bei starker Alterung verbesserte sich dagegen die Graufleckentragfähigkeit im Vergleich zum Neuöl. In einem Versuch war niedrige Graufleckentragfähigkeit mit schlechtem Luftabscheidungsvermögen verbunden. Im wesentlichen muss jedoch davon ausgegangen werden, dass eine veränderte Chemie des Öls auch eine unterschiedliche Oberflächenwirkung zur Folge hat.

In den Versuchen zur Grübchentragfähigkeit wurde für drei von vier untersuchten Ölen ein Absinken der Grübchenlebensdauer mit zunehmender Alterung beobachtet. Ein Öl, das im Neuzustand eine niedrige Grübchenlebensdauer aufwies, erreichte im gealterten Zustand verlängerte Grübchenlebensdauer.

Die Ergebnisse der Grübchenlebensdauerversuche wurden mit den chemisch-physikalischen Schmierstoffkennwerten korreliert. Für ein Absinken der Grübchenlebensdauer um 20% wurde für die untersuchten Öle eine Viskositätszunahme um 10 - 15 %, ein Anstieg der Neutralisationszahl um 0,5 - 1 mg KOH/g und eine Abnahme im Additivgehalt um 20 - 30 % festgestellt.

Bayerdörfer [5] untersuchte für synthetische Schmierstoffe den Zusammenhang zwischen Ölalterung und Ermüdungsverhalten von Zahnrädern. Die Alterung der Schmierstoffe erfolgte analog zu den Arbeiten von Weiß [64].

Für eine schwache Alterung wurde ein Graufleckentragfähigkeitsverlust von einer Kraftstufe beobachtet. Eine starke Alterung ergab einen Verlust von bis zu drei Kraftstufen gegenüber dem Neuöl. Ein Motorenöl zeigte in beiden Alterungsstufen eine um eine Kraftstufe höhere Graufleckentragfähigkeit als im Neuzustand.

Die Grübchenlebensdauer der leicht gealterten Getriebeöle entsprach mindestens der Grübchenlebensdauer des Neuöls, im Maximalfall betrug sie das Doppelte der Grübchenlebensdauer des Neuöls. Für stark gealterte Getriebeöle war eine gegenüber dem Neuöl deutlich verringerte Grübchenlebensdauer zu verzeichnen.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Ergebnisse, war es nicht möglich, eine Auswertung in Form von Öllebensdauerkurven vorzunehmen. Lediglich ein Schmierstoff ließ sich für die starke Alterung in ein Temperatur-Zeit-Diagramm einordnen. Im Vergleich zu den Mineralölen zeigten die entsprechenden synthetischen Schmierstoffe vielfach höhere Lebensdauer bezüglich Grübchenbildung.

Für zwei verschiedene Partikelwerkstoffe und zwei verschiedene Größenbereiche wurden Grübchenlebensdauerexperimente bei unterschiedlichen Partikelkonzentrationen durchgeführt. Bereits geringste Partikelkonzentrationen im Bereich von 10 mg/kg bewirkten eine erhebliche Reduzierung der Grübchenlebensdauer. Dabei zeigten weder die Partikelgröße noch eine zunehmende Partikelkonzentration einen Einfluss.

Untersuchungen zum Einfluss des Wassergehalts auf die Grübchenlebensdauer ergaben eine deutliche Reduzierung der Grübchenlebensdauer infolge der Schmierstoffverunreinigung mit Wasser. Bei einer Öltemperatur von 90°C wurde für einen Wassergehalt von 0,5% ein Absinken der Grübchenlebensdauer auf ca. 40% des Neuöls ermittelt. Bei 40°C Öltemperatur erreichte der Schmierstoff bei einem Wassergehalt von 0,2% eine Grübchenlebensdauer von 60% des Neuöls.

Stoew [63] untersuchte den Einfluss von Partikeln auf den Verschleiß ungehärteter Zahnräder im Bereich von 0,5 bis 2 Gewichtsprozent Ölverunreinigung. Mit steigendem Grad der Verunreinigung ließ sich ein deutlicher Anstieg des Verschleißes feststellen.

Durch in den Schmierstoff eingebrachtes Wasser kann sich Wasserstoff am Werkstoff anlagern. Henzel [35] untersuchte den Einfluss von Wasserstoff auf die Wälzfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. Die Ergebnisse zeigten, dass die Lebensdauer von Zahnflanken durch die Wasserstoffanlagerung deutlich sinkt. Es können Wasserstoffverbindungen wie z.B. H₂S entstehen, die unter Wasserstoffabsorption mit dem Werkstoff reagieren. Dies führt zu einer Werkstoffschädigung und großflächigen Ausbrüchen.

Den Einfluss von Wasser auf den Langsamlaufverschleiß in Zahnrädern untersuchten Winter und O'Connor [67]. Als mögliche Erklärung für den Verschleißanstieg der Zahnräder unter Einfluss von 1% Wasser im Öl wurde eine Werkstoffschädigung infolge des Wasserstoffs angesehen.

Krzysztof [44] untersuchte in einem Vierkugelapparat den Einfluss der Ölalterung auf die Grübchenlebensdauer eines mild legierten Industriegetriebeöls mit VI-Verbesserer. Bei rein mechanischer Beanspruchung durch eine enge Düse sank die Grübchenlebensdauer im Vergleich zum Neuöl. Eine zusätzliche thermisch-oxidative Beanspruchung führte bei leichter Alterung zu einer Steigerung der Grübchenlebensdauer, bei starker Alterung zu einer deutlichen Reduzierung.

Joachim [39, 38] führte Untersuchungen zum Einfluss der Ölalterung auf die Gebrauchsdauer von Zahnradgetrieben durch. Selbst bei kaum nachweisbarem Restadditivgehalt der gealterten Öle war die Fresstragfähigkeit noch hoch. Der Grund liegt in den Alterungsprodukten selbst, die einen Gewinn an Fresstragfähigkeit bewirken können. Durch den Einlauf der Zahnflanken erhöht sich die relative Fresstragfähigkeit, durch den parallel dazu ablaufenden Alterungsprozess nimmt sie ab. Die verbleibende Tragfähigkeit kann unterhalb der Ausgangstragfähigkeit liegen.

In Langzeituntersuchungen an Industriegetrieben im Kohleabbau bestätigte Spilker [62] tendenziell die Regel, dass eine Temperaturerhöhung um 10 Kelvin eine Halbierung der Öllebensdauer zur Folge hat. In den Getrieben wurden Sumpftemperaturen zwischen 60° und 100°C gemessen. Durch den Einsatz eines Schmierstoffs niedrigerer Viskosität mit zusätzlichen reibungsmindernden Eigenschaften konnten die Öltemperatur um bis zu 30 Kelvin gesenkt und damit die Ölbetriebszeiten erheblich verlängert werden.

2.2.2 Einfluss auf das Verhalten von Synchronisierungen

Rank [55] erarbeitete ein standardisiertes Prüfverfahren zur Lebensdauerprüfung von Synchronisierungen, in dem neben der Prüfmethodik insbesondere auch Referenz-Versuchsbedingungen für Serien-Synchronisierungen und Schmierstoffe festgelegt sind.

Der Einfluss der Ölalterung auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen wurde von Neumüller [49] untersucht. Die Versuche wurden an Schmierstoffen im Neuzustand, nach Alterung im Fahrzeug sowie nach Alterung im FZG-Prüfstand durchgeführt. Der Vergleich von im Fahrzeugeinsatz und im FZG-Prüfstand gealterten Ölen zeigte, dass die in Abhängigkeit des Reibbelags charakte-

ristischen Veränderungen des tribologischen Verhaltens analog sind. Zusammenhänge zwischen den chemisch-physikalischen Kennwerten des Schmierstoffs zur Beschreibung des Alterungszustands und dem Reibungs- und Lebensdauerverhalten von Synchronisierungen konnten nicht herausgearbeitet werden.

Nach Joachim [38] lässt sich durch den Einsatz geeigneter synthetischer Schmierstoffe bei PKW-Schaltgetrieben Lebensdauerschmierung erreichen. Anforderungen an den Schmierstoff sind eine ausreichende Fress- und Grübchentrugfähigkeit, geeignete Reibungscharakteristik, thermische Stabilität und günstiges Verschleißverhalten.

Für den Bereich der Lamellenkupplungen wurde der Einfluss der Ölalterung auf das Reibungsverhalten von Schmierstoffen von Federn [28] untersucht. Die Alterung erfolgte in Dauerschaltversuchen in einem Lamellenkupplungsprüfstand. Bereits nach geringer Ölbeanspruchung wurden deutliche Veränderungen des Reibungsverhaltens festgestellt. Die Analyse der Schmierstoffkennwerte Viskosität, Neutralisationszahl und Fremdstoffanteil zeigte dagegen nur wenig Veränderungen. Ein Zusammenhang zwischen den veränderten Schmierstoffkennwerten mit den Veränderungen im untersuchten tribologischen Verhalten war nicht erkennbar.

2.2.3 Einfluss auf das Verhalten weiterer Antriebskomponenten

Bei Wälzlagern ist der schädigende Einfluss von Partikelverschmutzung bekannt. Zinecker [69] stellte bei Partikelverschmutzung des Schmierstoffs nach einem Geräuschanstieg eine schnell fortschreitende Oberflächenschädigung der Wälzlager fest. Lorösch [46] untersuchte den Einfluss der Betriebsbedingungen auf die Lebensdauer von Wälzlagern. Bei sehr reinen Schmierstoffen konnte Dauerfestigkeit erreicht werden. Der Einfluss der Schmierstofffilterung auf die Lebensdauer von Wälzlagern wurde von Loewenthal [45] ermittelt. Trotz Feinstfilterung mit einem 3 µm Filter erreichten Wälzlager, die mit einem partikelverschmutzten Öl geschmiert wurden, nur geringere Lebensdauern als bei Schmierung mit unverschmutztem Öl.

Renius [56] führt Schmutzpartikel als häufigste Mängelursache im Bereich der Traktorhydraulik an. Hier ist eine wirksame Filterung der Partikel im Größenbereich von etwa 10 bis 50 µm erforderlich. Weiß und Winkenbach [65, 66] ermittelten für einen Schmierstoff den Einfluss der Alterung auf Dichtungen. Während für einige Dichtungswerkstoffe kaum ein Einfluss feststellbar war, ließ sich für andere Werkstoffe ein deutlicher Anstieg der Shore-Härte sowie eine Verringerung der Bruchdehnung nachweisen.

3 Versuchseinrichtungen

3.1 FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfstand

Die Alterungssimulation und die Komponententests zur Zahnradtragfähigkeit wurden in einem FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand mit Achsabstand $a = 91,5$ mm nach DIN 51354 [15] durchgeführt. Für die Verschleißversuche wurde der Prüfstand aufgrund der erforderlichen sehr niedrigen Drehzahlen mit einem zusätzlichen Zwischengetriebe versehen. **Bild 3.1** zeigt eine Prinzipskizze des FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstands.

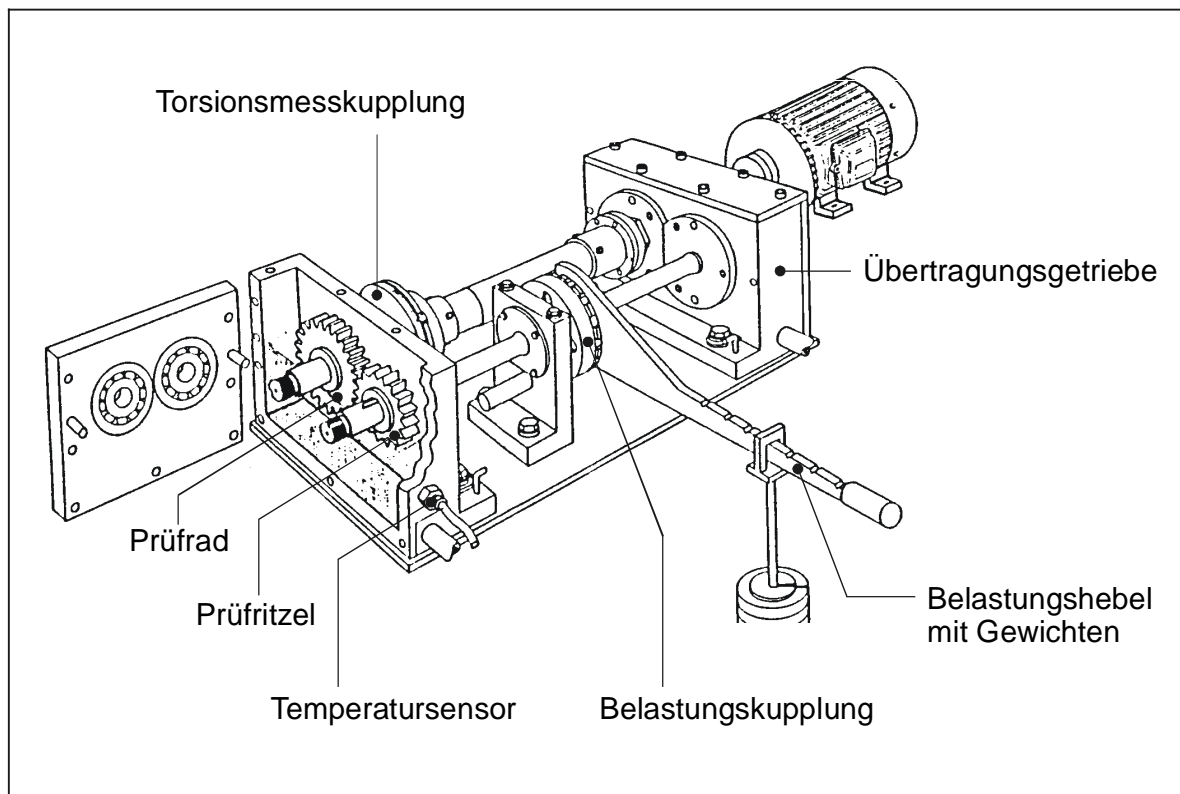


Bild 3.1 FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand (Prinzipskizze)

Es handelt sich um einen Prüfstand mit geschlossenem Momentenkreislauf, in den der Antriebsmotor nur die auftretende Verlustleistung einzuspeisen hat. Die Verspannung in dem Kreislauf und damit das gewünschte Drehmoment an der Prüfver-zahnung wird durch Verdrehen der Belastungskupplung mittels Hebel und Gewichten aufgebracht.

Die Versuche zur Grübchen-, Verschleiß- und Fresstragfähigkeit wurden bei Tauchschmierung durchgeführt. Zum Erreichen der entsprechenden Öltemperatur ist der Prüftriebekasten mit einer Heizung und einem Temperatursensor versehen. Die

Tests zur Graufleckentragfähigkeit sowie die Ölalterungssimulation wurden bei Einspritzschmierung durchgeführt. Dabei wird die Öltemperatur mit Hilfe des jeweiligen Ölgregats erreicht.

3.2 Hypoidgetriebeprüfstand

Die Versuche zur Ermittlung der Hypoid-Fresstragfähigkeit wurden in einem Kegelrad-Verspannungsprüfstand durchgeführt, der nach dem Prinzip des geschlossenen Leistungskreislaufes arbeitet. Den prinzipiellen Aufbau zeigt **Bild 3.2**.

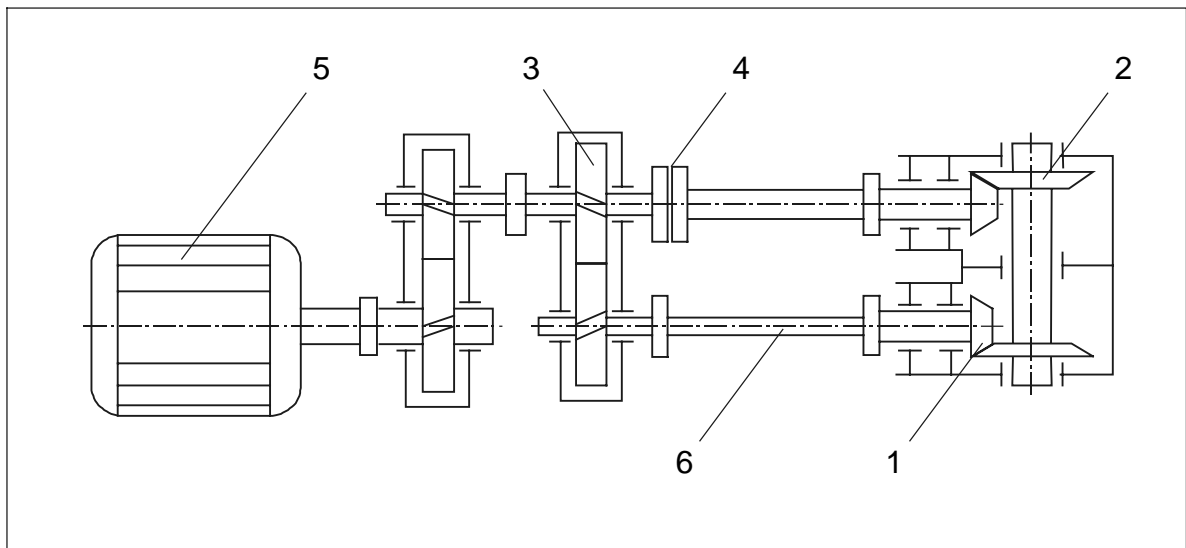


Bild 3.2: Hypoidgetriebeprüfstand (Prinzipiskizze)

Zwei Hypoidgetriebe, das Prüfgetriebe 1 und das Übertragungsgetriebe 2, deren Achsen jeweils einen Winkel von 90° einschließen, werden über zwei parallele Wellenzüge mittels einer Kupplung 4 gegen ein Stirnradgetriebe 3 verspannt. Der Elektromotor 5 speist nur die Verlustleistung ein. Der Verspannkreis wird durch gegenseitiges Verdrehen der beiden Kupplungsscheiben 4 belastet. Die Torsionswelle 6 ist mit DMS beklebt und dient als Drehmomentmesswelle.

Das Prüfgetriebe wird durch eine kombinierte Tauch-/Einspritzschmierung mit Öl versorgt. Der Ölstand wird im Prüfgetriebekasten etwa auf die Mittelachse des Ritzels eingestellt. Zur Kühlung wird das Öl unten am Kastenboden abgesaugt und über einen Öl-/Wasser-Wärmetauscher wieder in den Kasten direkt in den Zahneingriff gespritzt.

3.3 Standard-Synchronisationsprüfstand

Der Prüfstand SSP 180 [36] dient zur Durchführung von Dauerschaltversuchen an Synchronisationseinrichtungen von Kfz-Schaltgetrieben. **Bild 3.3** zeigt den Aufbau des Prüfstandes.

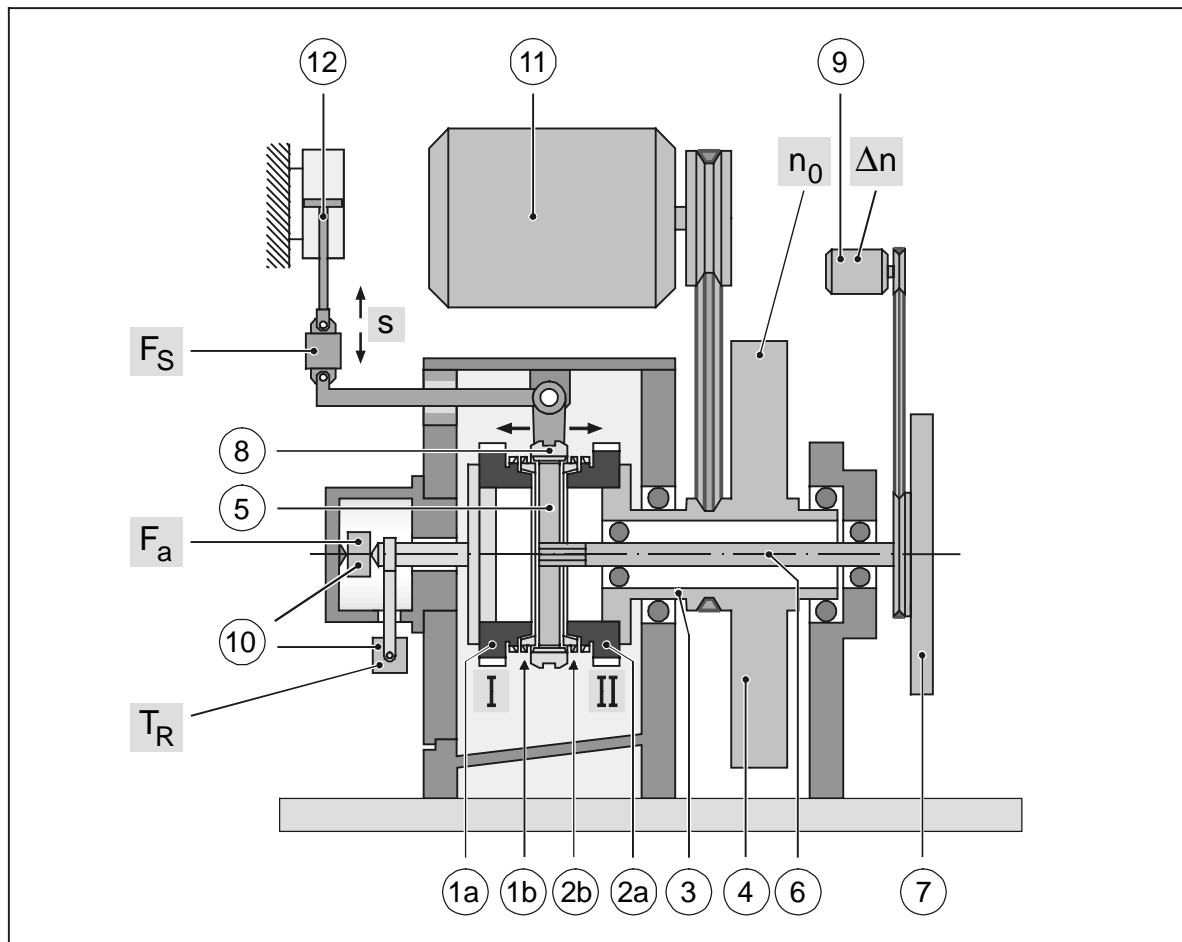


Bild 3.3: Standard-Synchronisationsprüfstand SSP 180 (Prinzipische Skizze)

Im Prüfstand ist ein komplettes Synchronpaket, bestehend aus Synchronisierung I mit Schaltrad 1a und Synchronring 1b und Synchronisierung II mit Schaltrad 2a und Synchronring 2b sowie deren gemeinsamer Schiebemuffe 8 und Synchronkörper 5 eingebaut.

Das Schaltrad 1a ist stillstehend im Gehäuse angeordnet. Das Schaltrad 2a der Synchronisierung II ist über die Hohlwelle 3 mit der Schwungscheibe 4 fest verbunden und rotiert mit konstanter Drehzahl n_0 . Der Antrieb des Prüfstandes erfolgt von einem drehzahlgeregelten Gleichstrommotor 11 über einen Keilriemen auf die Schwungscheibe 4, die die Drehzahl während des Synchronisationsvorgangs stabilisiert (Simulation der Fahrzeugmasse).

Der Synchronkörper 5 ist über die Welle 6 mit der Schwungmasse 7 verbunden, die die kupplungsseitigen Getriebeteile simuliert. Die Synchronisierungen I und II werden durch alternierendes Betätigen der Schiebemuffe geschaltet, wobei Schwungscheibe 7 im vorgegebenen Zeittakt jeweils auf Drehzahl n_0 beschleunigt und wieder auf Stillstand verzögert wird. Die Schaltkraft hierzu wird von dem Hydraulikzylinder 12 über eine Schaltstange mit Schwenkarm auf die Schiebemuffe 8 aufgebracht. Kraftanstieg und Kraftmaximum sind einstellbar.

Die Schaltkraft F_S wird mittels einer Kraftmessdose am Hydraulikzylinder gemessen. Der Drehzahlverlauf der Welle 6 wird mit dem Gleichstrom-Tachometer 9 bestimmt. Zur Berechnung der Reibungszahl werden an der stillstehenden Synchronisierung I die Axialkraft F_a und das Reibmoment T_R mit den Kraftmessdosen 10 ermittelt. Die Stellung der Schiebemuffe s wird berührungsfrei am Prüfstandseingang erfasst.

3.4 Ölalterungsaggregat

Die Versuche zur Alterungssimulation wurden mit Hilfe von vorhandenen Ölaggregaten aus den FVA Forschungsvorhaben 171 durchgeführt. Für zukünftige Versuche wurde ein kommerziell reproduzierbares Aggregat entwickelt und gebaut und steht zur industriellen Anwendung zur Verfügung. In **Bild 3.4** ist der prinzipielle Aufbau des Ölaggregats dargestellt. **Bild 3.5** zeigt das Ölaggregat mit den wichtigsten technischen Daten.

Der Behälter ist im Gegensatz zu den Standard-Ölaggregaten zwecks besserer Isolation doppelwandig ausgeführt. Die Heizleistung wird mittels eines Reglers in Abhängigkeit der Soll- und Ist-Temperatur im Ölbehälter gesteuert. Die Maximaltemperatur wird durch einen separaten Temperaturschalter begrenzt. Zusätzlich wird die Temperatur an der Oberfläche der Heizspirale durch einen Aufnehmer begrenzt. Damit wird verhindert, dass Öl an der Heizoberfläche verbrennt. Zur Absicherung des Getriebes ist ein Druckschalter mit Minimum- und Maximum-Schaltwert vorgesehen, der bei Unter- oder Überschreiten eines Grenzwertes den Prüfstandsmotor sowie das Ölaggregat abschaltet. Ein Niveauschalter dient zur Abschaltung der Anlage bei zu niedrigem und zu hohem Ölstand. Damit ist im Vergleich zu den Standard-Ölaggregaten eine zusätzliche Sicherheitsvorkehrung bei Störungen im Ölumlauf und Undichtheiten vorhanden sowie bei starker Schaumbildung, die sonst zu einem Überlauf des Ölbehälters führten. Der Filter wurde von dem Standard-Ölaggregat der FZG übernommen. Es handelt sich um einen Metallfilter mit Maschenweite $60\ \mu\text{m}$.

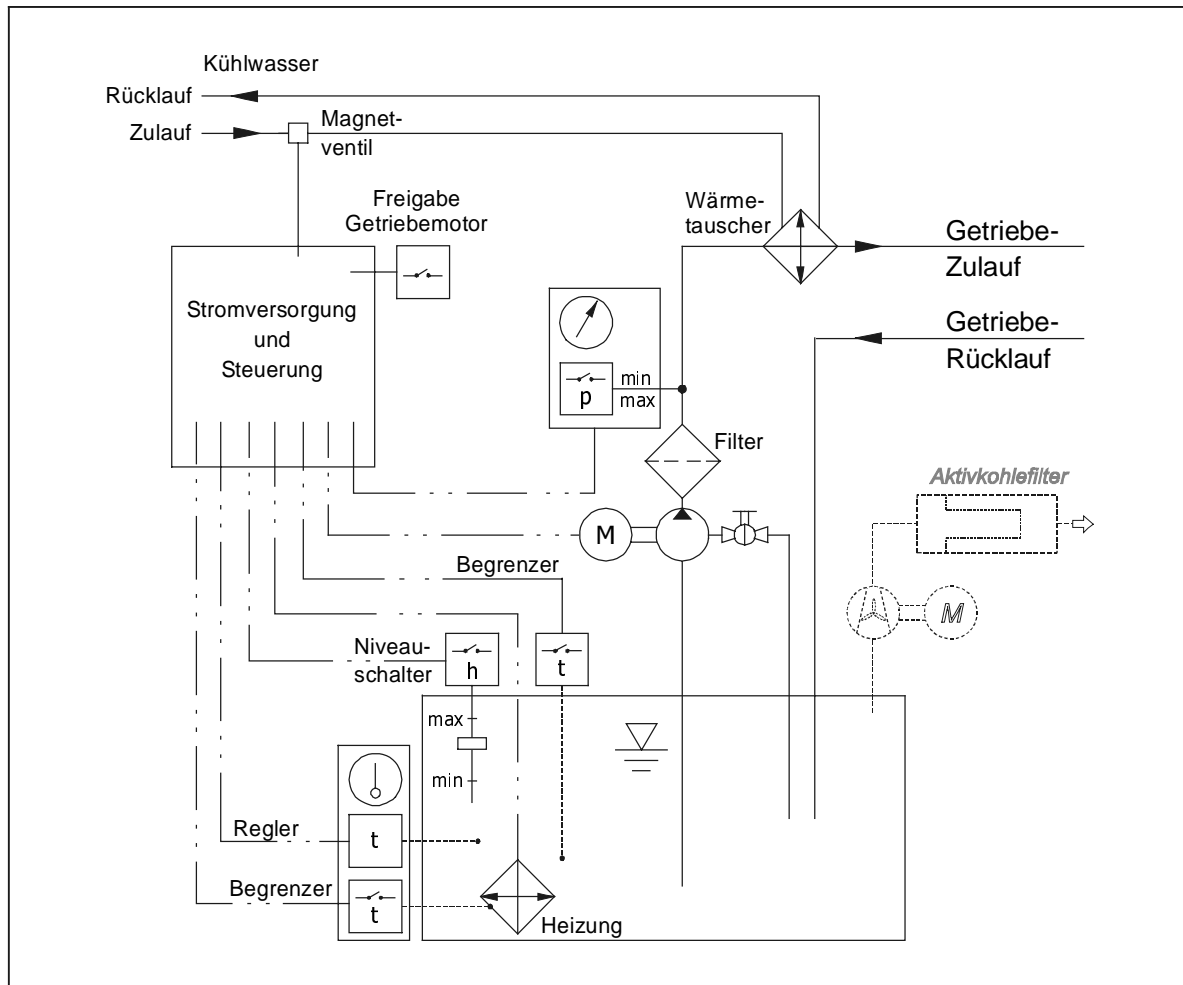
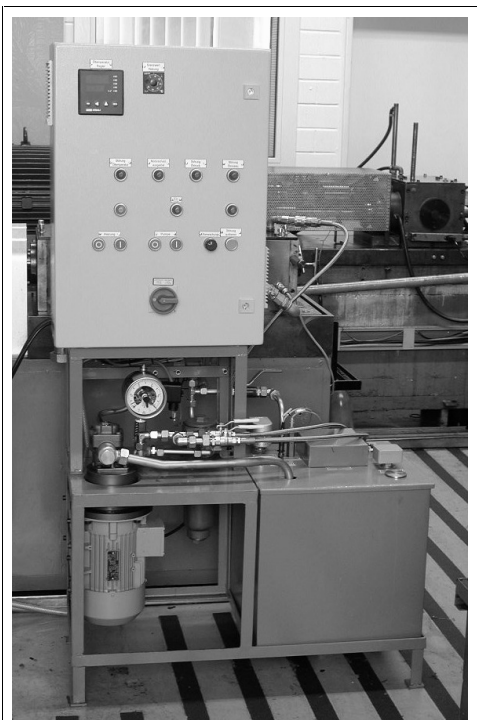


Bild 3.4: Ölaggerat zur Alterungssimulation (Prinzipiskizze)



Technische Daten:

Behältervolumen:	30 l
Motornennleistung:	1,1 kW
Motornendrehzahl:	1500 min ⁻¹
Pumpenförderstrom:	max. 11 l/min
(manuelle Bypassregelung)	
Heizleistung:	3 x 850 W
Oberflächenbelastung:	0,7 W/cm ²
Maximale Öltemperatur:	150°C
Metallfilter Maschenweite:	60 µm

Bild 3.5: Ölaggerat zur Alterungssimulation

Als Anzeigegeräte sind ein Manometer in der Druckleitung sowie eine Temperaturanzeige der Öltemperatur im Behälter vorhanden. Die Aggregate verfügen wie die Standard-Ölaggregate über einen Wärmetauscher. Die Temperaturregelung erfolgt durch Regelung der Wassermenge mit Hilfe von Magnetventilen. Somit sind die Aggregate nicht auf die Verwendung für die Alterungssimulation begrenzt, sondern können die Standard-Ölaggregate in den Komponententests zur Ermittlung der Zahnradtragfähigkeit ersetzen.

Da es bei den hohen Temperaturen, denen die Schmierstoffe bei der Alterung ausgesetzt werden, zu starker Geruchsentwicklung kommen kann, ist die Möglichkeit einer Luftfilterung mit Aktivkohlefiltern vorgesehen. Mittels Radiallüftern wird die Luft über dem Ölstand im Behälter abgesaugt und einer Filtervorrichtung zugeführt. Das Ölaggregate ist unabhängig von der Absaug- und Filtervorrichtung, die somit je nach Bedarf eingesetzt werden kann.

3.5 Labormessgeräte

Die chemisch-physikalischen Schmierstoffkennwerte Viskosität, Neutralisationszahl, Wassergehalt sowie die IR-Spektren der Schmierstoffe wurden an der FZG ermittelt. Einzelne Proben wurden am WIWEB (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk-, Explosiv- und Betriebsstoffe) sowie bei Fa. Klüber Lubrication und Fa. ZF Friedrichshafen untersucht. Die Bestimmung der Elementgehalte erfolgte bei Fa. Shell und Fa. ZF Friedrichshafen. Die Messungen des Luftabscheidevermögens LAV wurden am Lehrstuhl für Physikalische Chemie II der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt.

3.5.1 Viskositätsmessung

Die Viskositäten der Schmierstoffe wurden mit dem Viskositätsmessgerät Viscosystem AVS 500 der Firma Schott-Geräte bestimmt. Verwendet wurde ein Mikro-Ubbelohde-Viskosimeter nach DIN 51562 [22]. Der eigentliche Messvorgang der Kapillarviskosimetrie ist eine Zeitmessung. Gemessen wird die Zeit, die eine definierte Flüssigkeitsmenge benötigt, eine Kapillare mit definierter Weite und Länge zu durchfließen. Bei der verwendeten Anlage befindet sich die Kapillare in einem Tauchbad, dessen Temperatur mittels Thermostaten auf den gewünschten Sollwert geregelt wird. Das Durchschreiten des Flüssigkeitsmeniskus durch die Messebene wird mittels optoelektronischer Lichtschranken erfasst. Es kamen zwei Kapillaren für Messungen bei 40°C und 100°C zum Einsatz.

3.5.2 Messung der Neutralisationszahl

Die Neutralisationszahl NZ nach DIN 51558 [21] gibt die Menge Kaliumhydroxid KOH in mg an, die erforderlich ist, um die in 1 g eines Öles enthaltenen freien Säuren zu neutralisieren. Da im Schmierstoff enthaltene Wirkstoffe ebenfalls Alkali verbrauchen können, kann die Neutralisationszahl nur bei unlegierten Ölen als absolute Kennzahl verwendet werden. Zur Messung werden 10 g Öl mit 50 ml Lösungsmittel, einem Gemisch aus Toluol und Propanol-(2), vermischt. Die sauren Bestandteile des Öles werden durch Titration mit 0,1-molarer Kalilauge KOH bis zum neutralen Endpunkt titriert. Da auch die sauren Bestandteile des Lösungsmittels neutralisiert werden, muss dafür der sogenannte Blindwert in einem Vorversuch ermittelt und bei der Auswertung entsprechend berücksichtigt werden. Der Verlauf der Reaktion wird durch Messen der Leitfähigkeit verfolgt. Durch den Titroprozessor werden Äquivalenzpunkte ermittelt, an denen die gleichen Mengen saurer und basischer Bestandteile vorhanden sind. Die Messung der Neutralisationszahl erfolgte potentiometrisch mit dem Titriergerät 702 SM Titrino bzw. dem Titroprozessor E 636 der Fa. Metrohm.

3.5.3 Messung des Wassergehalts

Die Bestimmung des Wassergehaltes nach Karl-Fischer umfasst ein direktes und indirektes Verfahren, wobei das direkte Verfahren nur auf Proben anwendbar ist, die im Titriermedium löslich oder dispergierbar sind und nicht mit der Karl-Fischer-Lösung reagieren. Bei additivierten und gebrauchten Ölen wird der Wassergehalt nach der indirekten Methode entsprechend DIN 51777 [23] bestimmt. Hierbei wird das Wasser bei Atmosphärendruck und einer Temperatur von 120°C mit Reinstickstoff aus der Probe ausgetrieben, bei Raumtemperatur in getrocknetem Methanol kondensiert und anschließend mit Karl-Fischer-Lösung nach dem Endpunkt-Verfahren titriert. Aus dem zur Titration verbrauchten Volumen an Karl-Fischer-Lösung und deren Titer wird der Wassergehalt der Probe als Massenanteil berechnet.

Als Titriergeräte wurden der Karl-Fischer-Titrator 701 KF Titrino der Fa. Metrohm verwendet, als Karl-Fischer-Ofen der Glasofen B-580 KF der Fa. Büchi.

3.5.4 Infrarot-Spektroskopie

Die IR-Spektroskopie nach DIN 51451 [20] ist eine Schwingungsspektroskopie. Durch infrarotes Licht werden in Molekülen Schwingungen angeregt. Die nach dem Durchgang durch die Probe ankommende Reststrahlung wird in einem Detektor erfasst und elektronisch in ein Spektrum umgewandelt. Die Molekülschwingungen

sind weitgehend auf die funktionelle Gruppe eines Moleküls lokalisiert und erfassen nicht dessen Rest. Damit können solche funktionelle Gruppen durch die Wellenlängen der absorbierten Strahlung identifiziert werden.

Die Lage einer Absorptionsbande im IR-Spektrum wird in Einheiten der Wellenlänge λ (in μm) oder deren Reziprokwert, der sogenannten Wellenzahl ν (in cm^{-1}), angegeben. Zur Umrechnung von Wellenlängen in Wellenzahlen gilt:

$$\text{Wellenzahl } \nu \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \frac{10^4}{\text{Wellenlänge } \lambda \text{ (\mu m)}} \quad (1)$$

Zur Auswertung der IR-Spektren wurde für die Oxidationsbande bei ca. 1725 cm^{-1} Wellenzahl das in der CEC Oxidationstestmethode L48-A00 [7] beschriebene Verfahren verwendet, in dem als Kenngröße die Zunahme der Bandenfläche PAI (Peak Area Increase) zwischen Wellenzahl 1650 cm^{-1} und 1820 cm^{-1} ermittelt wird.

Zur Beschreibung der Veränderungen von Additivbanden wurde deren Extinktion E ermittelt. Die Definition der Extinktion E beruht auf dem Lambert-Beer-Bouguer'schen Gesetz [20]. Aus dem IR-Spektrum wird E wie folgt bestimmt:

$$E = \log \frac{D_1}{D_2} = \varepsilon \cdot c \cdot d \quad (2)$$

mit	D_1	[%]	obere Durchlässigkeit
	D_2	[%]	untere Durchlässigkeit
	ε	[m^2/mol]	Extinktionskoeffizient
	c	[mol/l]	Konzentration
	d	[mm]	Schichtdicke

Zur Ermittlung von D_1 und D_2 wird das Grundlinienverfahren angewendet, siehe **Bild 3.6**. Dabei werden die der Absorptionsbande benachbarten Durchlässigkeitsmaxima durch eine gemeinsame Tangente verbunden. Der Schnittpunkt mit der Normalen ergibt dann die neue Durchlässigkeit 100%. Sofern die Extinktion als substanzspezifische Größe nicht durch zwischenmolekulare Wechselwirkungen konzentrationsunabhängig ist und die zur Analyse gewählte Schlüsselbande nicht durch Banden anderer Komponenten überlagert wird, ist ihre Extinktion am Bandenmaximum ein direktes Maß für die vorhandene Substanzmenge. Damit lässt sich aus einer Veränderung des Extinktionskoeffizienten auf eine Zu- oder Abnahme des jeweiligen Bindungstyps, z.B. eines Additivs, schließen.

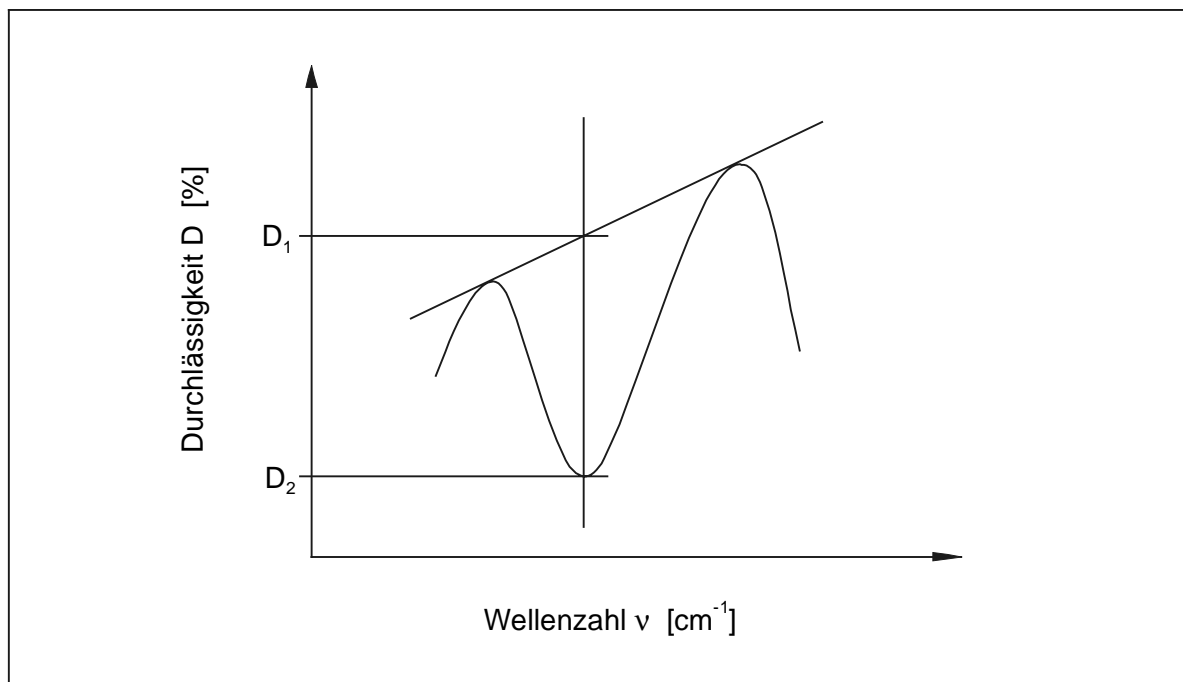


Bild 3.6: Grundlinienverfahren zur Bestimmung des Extinktionskoeffizienten

3.5.5 Elementanalyse

Die Bestimmung der Elementgehalte erfolgte mittels Röntgenfluoreszenzanalyse RFA nach DIN 51418 [18] und durch optische Emissionsspektalanalyse mit induktiv gekoppeltem Plasma ICP nach DIN 51391 Teil 3 [17] bzw. DIN 51443 Teil 2 [19].

Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse wird die Ölprobe mit polychromatischer Strahlung einer Röntgenröhre bestrahlt. Dadurch werden die Elemente der Probe zur Emission einer Eigenstrahlung angeregt. Die dabei abgegebene Energie ist charakteristisch für die Ordnungszahl des angeregten Elements, womit durch Messung dieser Energie das Element eindeutig identifiziert werden kann. Je größer die relative Intensität einer Strahlung ist, desto größer ist der Gehalt des betreffenden Elements in der Probe. Zur genauen quantitativen Bestimmung werden Vergleichsproben bekannter Zusammensetzung, sogenannte Eichproben, verwendet, die den Zusammenhang zwischen Konzentration und Intensität der emittierten Strahlung des zu untersuchenden Elements liefern.

Bei der Elementgehaltbestimmung mittels ICP (Inductively Coupled Plasma) handelt es sich ebenfalls um ein Verfahren der Emissionsspektroskopie, also um ein Verfahren, bei dem Atome zur Emission charakteristischer Strahlung angeregt werden. Als Atomisierungs- und Anregungsmedium dient ein in einem Hochfrequenzfeld ionisiertes Gas, in der Regel Argon.

3.5.6 Luftabscheidevermögen

Das Luftabscheidevermögen LAV wurde an der Ruhr-Universität Bochum nach dem dort entwickelten Verfahren untersucht [68].

Die zu untersuchende Probe von ca. 800 cm³ wird zunächst bei niedrigem Druck entgast, so dass leichtflüchtige Komponenten, die bei Luftzufuhr schnell ausgetragen würden, entfernt werden. Anschließend wird die Probe in ein temperiertes Messgefäß eingefüllt. In das Messgefäß wird Luft eingeblasen und mittels eines Rührwerks in der Probe dispergiert. Nach Abschaltung des Rührers beginnt der eigentliche Messvorgang. Über zwei Kapillarrohre, die seitlich am Messgefäß angebracht sind, werden die hydrostatischen Drücke der Probe am Gefäßboden und in 75 mm Höhe einem Differenzdruckmessumformer zugeführt. Der Volumenanteil, den die Luftblasen in der Dispersion einnehmen, wird aus dem Differenzdruck über die Fluidichte errechnet und kontinuierlich als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Die vorliegenden Untersuchungen wurden bei 60°C, 90°C und 120°C durchgeführt.

3.6 Prüfkörper

3.6.1 Prüfverzahnungen

Für die Grübchen- und Verschleißversuche wurde die bezüglich der Gleitgeschwindigkeiten ausgeglichene FZG-Standardverzahnung vom Typ C-PT (Pitting) verwendet. Die Versuche zur Graufleckentragfähigkeit wurden mit der Verzahnung Typ C-GF (Grauflecken) durchgeführt, die sich lediglich durch eine höhere Flankenrauheit vom Typ C-PT unterscheidet.

Für die Versuche zur Fresstragfähigkeit bei Stirnrädern wurde die FZG-Standardverzahnung vom Typ A verwendet bzw. A10 mit halber Zahnbreite des Ritzels. Die Verzahnung ist durch sehr einseitige Profilverschiebung und damit hohe Fressempfindlichkeit gekennzeichnet.

Für die Versuche zur Fresstragfähigkeit bei Hypoidrädern wurde die Testverzahnung des Hypoidöltests A verwendet. Es handelt sich um eine Gleason Verzahnung mit einem Achsversatz von 44 mm.

Die maßgeblichen Geometriedaten sowie Werkstoff- und Fertigungsdaten der verwendeten Prüfverzahnungen sind im Anhang aufgeführt.

3.6.2 Synchronisierungen

Die Versuche wurden mit zwei unterschiedlichen Synchronisierungssystemen durchgeführt. Es handelte sich jeweils um Synchronisierungen, die in Nutzkraftfahrzeugen eingesetzt werden. Ein geschliffener Stahlkonus wurde mit einem Streusinter HS45-Ring bzw. einem Karbon-Reibbelag gepaart, der in einen Stahlring eingeklebt war. Während der Stahlkonus eine glatte Oberfläche aufwies, war in den Reibpartner eine Rillierung bzw. Nutung eingebracht.

Die maßgeblichen Geometriedaten der Testsynchronisierungen sind im Anhang aufgeführt.

4 Versuchsprogramm und Testverfahren

Ziel der Untersuchungen ist der Vergleich der Alterung von Schmierstoffen im Zahnradprüfstand und in der Praxisanwendung. Vier unterschiedliche Getriebeschmierstoffe werden in der jeweiligen Anwendung sowie parallel dazu im FZG-Prüfstand gealtert. Anschließend wird überprüft, inwieweit sich das Verhalten der im FZG-Prüfstand und in den Praxisgetrieben gealterten Schmierstoffe deckt. Hierzu werden die Veränderungen der chemisch-physikalischen Kennwerte und insbesondere das tribologische Verhalten in Komponententests untersucht. Anhand der Ergebnisse lässt sich die Alterungsmethode bewerten bzw. können die Alterungsparameter gegebenenfalls modifiziert werden. Eine Übersicht über das Versuchsprogramm zum Vergleich von prüfstands- und praxisgealterten Ölen zeigt **Bild 4.1**.

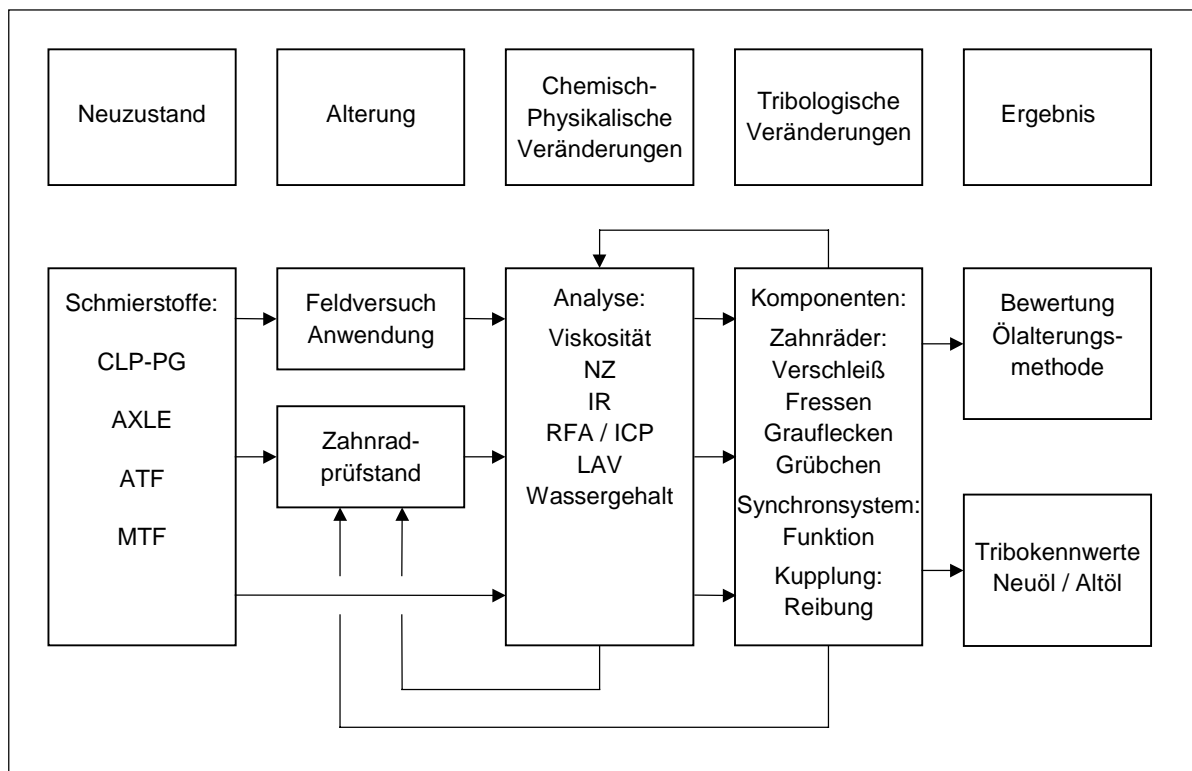


Bild 4.1: Übersicht über das Versuchsprogramm zum Vergleich von prüfstands- und praxisgealterten Ölen

Zur Ermittlung des Einflusses der Ölalterung auf den Langsamlaufverschleiß von Zahnradern sollen zehn Schmierstoffe jeweils im Neuzustand sowie in zwei unterschiedlichen Alterungsstufen im FZG-Verschleißtest C/0,05/90:120/12 untersucht werden. Die Öle waren im Rahmen der FVA Forschungsvorhaben 171/I-III [6, 65] im FZG-Prüfstand gealtert worden und lagen zu Beginn der Untersuchungen vor.

4.1 Versuchsschmierstoffe

Für den Vergleich von prüfstands- und praxisgealterten Ölen wurden die vier in **Tabelle 4.1** aufgeführten Schmierstoffe ausgewählt. Es handelte sich um Getriebeöle, die im Kraftfahrzeug zur Anwendung kommen, sowie ein Industriegetriebeöl nach CLP-Spezifikation. Zudem wurde darauf geachtet, dass sowohl Mineralöle als auch Syntheseöle untersucht werden.

Bezeichnung	Anwendung	Grundöl	Additive	Viskosität
CLP-PG	Industriegetriebe	Polyglykol	AW (P) AO, AF, AC	ISO VG 220
AXLE	Achsgetriebe	PAO + E	EP (S-P), AW FM, AF, AC, DI	SAE 75W90
ATF	Automatikgetriebe	Min. + PAO	EP (S-P), AW, VI, FM, AO, AF, AC , DI, DE, PPD,	SAE 75W
MTF	Schaltgetriebe	Min.	EP (S-P), AW FM, AF	SAE 80W

Tabelle 4.1: Versuchsschmierstoffe für den Vergleich von prüfstands- und praxisgealterten Ölen

Bei dem CLP-PG handelt es sich um einen synthetischen Schmierstoff auf Basis eines wasserlöslichen Polyalkylenglykols. Es sind AW-Additive auf Phosphorbasis, Oxidationsinhibitoren (AO) sowie Schaum- und Korrosionsinhibitoren (AF, AC) enthalten.

Das AXLE ist ein vollsynthetischer Schmierstoff bestehend aus Polyalphaolefin und Ester. Der Schmierstoff enthält AW- und EP-Additive vom Typ S-P. Es sind ein Friction-Modifier (FM), Schaum- und Korrosionsinhibitoren (AF, AC) sowie Spuren von Dispersant-Additiven (DI) enthalten.

Bei dem ATF handelt es sich um einen teilsynthetischen Schmierstoff. Die Grundölmischung besteht aus 65% Mineralöl und 35% Polyalphaolefin. Der Schmierstoff enthält AW-, EP-Additive vom Typ S-P, Dispersant- und Detergent-Additive (DI, DE) sowie Oxidationsinhibitoren (AO). Es sind ein Viskositäts-Index-Verbesserer auf Basis PMA (VI), ein Friction-Modifier (FM) und ein Pourpoint-Erniedriger (PPD) sowie Schaum- und Korrosionsinhibitoren (AF, AC) enthalten.

Das MTF ist ein Mineralöl mit AW- und EP-Additiven vom Typ S-P. Es sind ein Friction-Modifizier (FM) sowie Schauminhibitoren (AF) enthalten.

Gegenstand der Untersuchung hinsichtlich des Einflusses der Ölalterung auf den Langsamlaufverschleiß von Zahnrädern waren insgesamt zehn Schmierstoffe unterschiedlicher Grundölbasis und Viskosität aus den Anwendungsbereichen Fahrzeuggetriebe, Industriegetriebe und Hydraulik. Jedes dieser zehn Öle wurde im Neuzustand sowie in zwei verschiedenen Alterungsstufen untersucht. Es handelte sich um fünf Mineralöle, die im Rahmen des FVA Forschungsvorhabens Nr. 171/I-II gealtert worden waren sowie um fünf synthetische Öle aus dem FVA Forschungsvorhaben Nr. 171/III. Eine Übersicht über die verwendeten Versuchsschmierstoffe ist in **Tabelle 4.2** dargestellt.

Bezeichnung	Anwendung	Grundöl	Additiv	Viskosität
M1-GL4	Schaltgetriebe	Min	S-P	SAE 80 W
M2-GL4	Schaltgetriebe	Min	S-P	SAE 90
M3-CLP	Industriegetriebe	Min	S-P	ISO VG 220
M4-DEO	Dieselmotoren	Min	ZnDTP	SAE 20W20
M5-HLP	Hydraulik	Min	ZnDTP	ISO VG 32
S1-UDL	Antriebsstrang	PAO + HC	S-P	SAE 75W90
S2-MTF	Schaltgetriebe	PAO + E	S-P	SAE 75W90
S3-PAG	Schneckengetriebe	PG	P	ISO VG 100
S4-DEO	Dieselmotoren	PAO	ZnDTP	SAE 5W40
S5-ATF	Automatikgetriebe	PAO + HC	S-P	ISO VG 32

Tabelle 4.2: Versuchsschmierstoffe für Untersuchungen zum Einfluss der Ölalterung auf den Langsamlaufverschleiß von Zahnrädern

4.2 Alterung der Schmierstoffe

4.2.1 Alterung in der Anwendung

Die Alterung der Schmierstoffe in der Anwendung erfolgte im Rahmen von Feldversuchen bzw. im Falle des ATF in Prüfstandsversuchen unter Betriebsbedingungen zur Simulation von realen Fahrzuständen. Zur Differenzierung zwischen Alterung in Feld- und in Prüfstandsversuchen sind die Schmierstoffe aus der Anwendung in den grafischen Darstellungen mit der Kennung "-AF" und "-AP" bezeichnet. Eine Übersicht über die Nomenklatur der Probenkennungen zeigt **Tabelle 4.3**.

Kennung	Erläuterung
-N	Neuöl
-AF -AP	Alterung in der Anwendung im Feld Alterung in der Anwendung im Prüfstand
-S	Alterungs-Simulation im FZG-Prüfstand
-AF x / y -AP x / y -S x / y	Alterung bei Öltemperatur x °C und Laufzeit y Stunden Bsp.: S130/300 Alterung im FZG-Prüfstand bei 130°C und Laufzeit 300 h

Tabelle 4.3: Nomenklatur der Probenkennungen

Das Öl CLP-PG-AF aus der Anwendung wurde in einem dreistufigen Stirnradgetriebe eines Rührwerks bei einer Temperatur von ca. 50 bis 60°C über einen Zeitraum von ca. 7000 Betriebsstunden eingesetzt.

Das Öl AXLE-AF wurde in Hinterachsgetrieben von Nutzfahrzeugen eingesetzt. Die Laufleistung betrug ca. 260 Tkm bzw. 500 Tkm. Da die Einzelmengen der Ölbefüllungen nicht für die vorgesehenen Komponententests ausgereicht hätten, wurden diese zu gleichen Teilen gemischt. In dem Ölvolumen ist eine Restölmenge eines Schmieröls auf Mineralölbasis aus früheren Ölfüllungen der Getriebe enthalten. Im Fahrbetrieb lag die Durchschnittstemperatur im Ölsumpf bei ca. 70°C. Die Durchschnittsgeschwindigkeit im Fernverkehrsbetrieb kann mit ca. 70 km/h angenommen werden. Damit beträgt die Dauer der Feldtest Alterung ca. 3700 bzw. 7100 Betriebsstunden und im Mittel für das AXLE-AF 5400 h.

Das Öl ATF-AP wurde in einem 5-Gang PKW-Getriebe-Prüfstand unter Einhaltung eines Lastkollektivs eingesetzt. Die Ölsumpftemperatur lag bei ca. 100 – 110 °C. Das maximale Drehmoment betrug 300 Nm bei einer Gesamtlaufzeit von ca. 3 Monaten bzw. ca. 2000 Betriebsstunden. Das Beanspruchungskollektiv entsprach einer Fahrleistung von etwa 150 Tkm, d.h. einem Lebensdauertest.

Das Öl MTF-AF wurde in Schaltgetrieben von Nutzfahrzeugen gealtert. Die Laufleistung betrug ca. 200 Tkm bzw. 400 Tkm. Da die Einzelmengen der Ölbefüllungen nicht für die vorgesehenen Komponententests ausgereicht hätten, wurden diese zu gleichen Teilen gemischt. Im Fahrbetrieb lag die Durchschnittstemperatur im Ölsumpf jeweils bei ca. 80°C. Die Durchschnittsgeschwindigkeit im Fernverkehrsbetrieb kann mit ca. 70 km/h angenommen werden. Damit beträgt die Dauer der Feldtest Alterung ca. 2850 bzw. 5700 Betriebsstunden und im Mittel für das MTF-AF 4300 h.

Keines der Getriebe, aus denen die Öle der Feldalterung entnommen wurden, zeigte Schäden.

4.2.2 Alterung im FZG-Prüfstand

Die Versuche zur Ölalterungssimulation wurden in einem FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand nach DIN 51354 [15] durchgeführt. Die Alterung besteht im wesentlichen darin, das Öl bei hohen Einspritztemperaturen thermisch-oxidativ zu belasten. Im Gegensatz zu den zahlreichen Verfahren Schmierstoffe durch rein thermisch-oxidative Belastung im Labor zu altern, wird das Öl im FZG-Prüfstand auch auf Druck und Scherung beansprucht, wie es in Praxisgetrieben der Fall ist. Es kamen je ein Ölaggregat mit 30 Liter Füllvolumen am Übertragungsgetriebe und am Prüfgetriebe zur Anwendung. Darin unterscheidet sich die Alterungsmethode auch wesentlich von den Labormethoden zur Schmierstoffalterung, da nur bei Alterung eines ausreichend großen Ölvolumens die anschließende Durchführung von Komponententests möglich ist. Die Temperaturmessung erfolgte in der Druckleitung am Ausgang des Ölaggregats. Aufgrund der sehr kurzen Distanz ist zwischen dieser Temperatur und der Ölsumpftemperatur im Ölbehälter kein Unterschied zu erwarten. Die Heizleistung war auf 0,75 W/cm² begrenzt.

In **Tabelle 4.4** sind die Verhältnisse der Ölvolumina und Getriebekomponenten für die jeweilige Alterung in der Anwendung und im FZG-Prüfstand gegenübergestellt.

	Anwendung	FZG-Prüfstand
CLP-PG	110 l Ölvolumen ca. 55°C Öltemperatur 3 Zahneingriffe 8 Wälzlager	30 l Ölvolumen 1 Zahneingriff 4 Wälzlager
AXLE	14,5 l Ölvolumen ca. 70°C Öltemperatur 5 Zahneingriffe 5 Wälzlager, 10 Gleitlager	
ATF	10 l Ölvolumen ca. 105°C Öltemperatur 18 Zahneingriffe (teilw. temporär) 4 Wälzlager, 9 Gleitlager, 3 Freiläufe 9 Kupplungen / Bremsen	
MTF	13 l Ölvolumen ca. 80°C Öltemperatur 13 Zahneingriffe 8 Wälzlager	

Tabelle 4.4: Ölvolumina und Komponenten in der Anwendung und im Zahnradprüfstand

Als Referenzbedingungen für die Alterungsmethode im FZG-Prüfstand wurden die folgenden Betriebsbedingungen aus den FVA Forschungsvorhaben Nr. 171 und Nr. 296 [5, 50, 65] übernommen:

$$\begin{aligned} \text{Hertzsche Pressung} \quad p_c &= 1000 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Drehzahl Ritzel} \quad n_1 &= 2250 \text{ U/min} \\ \text{Öleinspritztemperatur} \quad \vartheta &= 130^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Ausgehend von diesen Referenzbedingungen wurden Temperatur und Laufzeit so variiert, dass sich unter Zugrundelegung einer Lebensdauerlinie für Mineral- bzw. Syntheseöle vergleichbare Alterungszustände wie für die in der Anwendung gealterten Öle ergeben sollten. Im Vergleich zur Alterung in der Anwendung liegen höhere Öltemperaturen vor und dementsprechend deutlich geringere Laufzeiten. In den **Bildern 4.2 - 4.5** sind für jeden Versuchsschmierstoff die Bedingungen der im Vorhaben erzeugten Alterungsstufen in entsprechenden Lebensdauerdiagrammen für synthetische [5, 27] bzw. mineralölbasische [27, 64] Getriebeöle veranschaulicht. Die in den Bildern dargestellten Lebensdauergeraden zeigen die Temperaturabhängigkeit der Ölwechselfristen von Zahnradgetrieben nach Mobil [27].

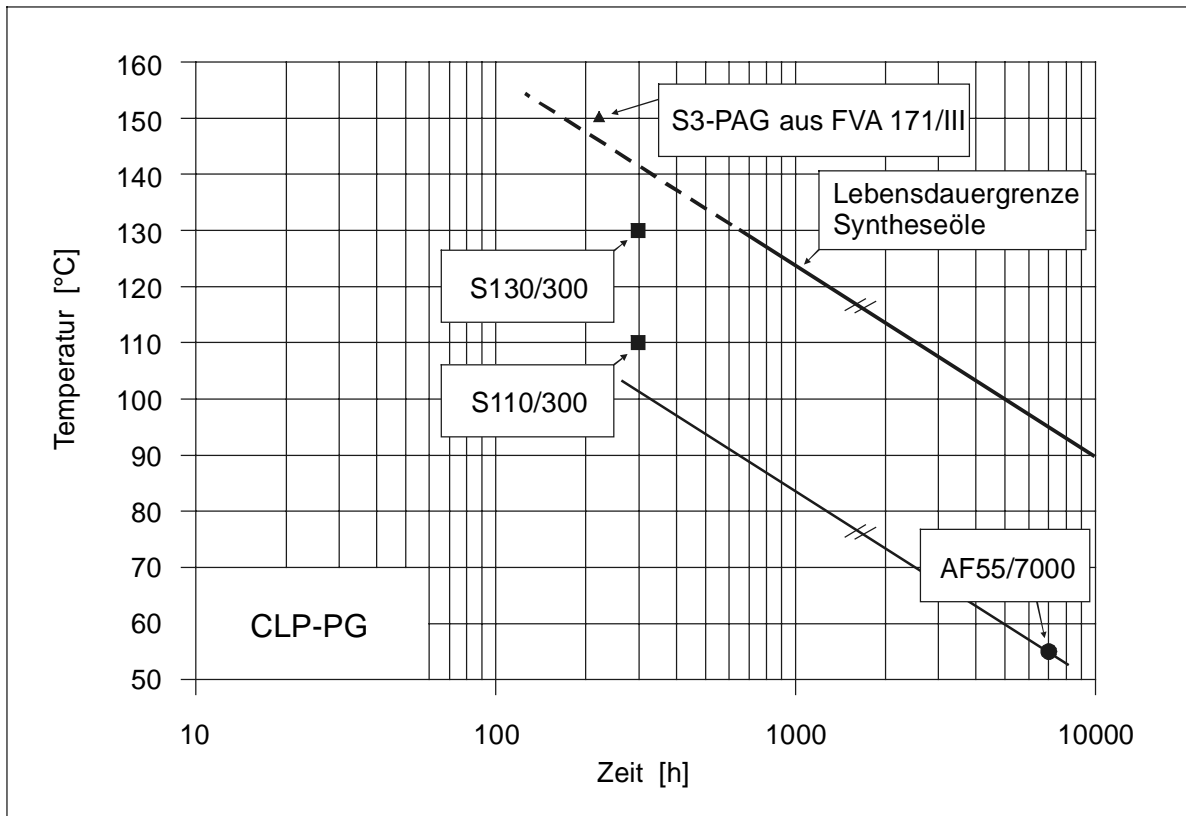


Bild 4.2: Veranschaulichung der Versuchspunkte für CLP-PG in einem Lebensdauerdiagramm für Getriebeöle

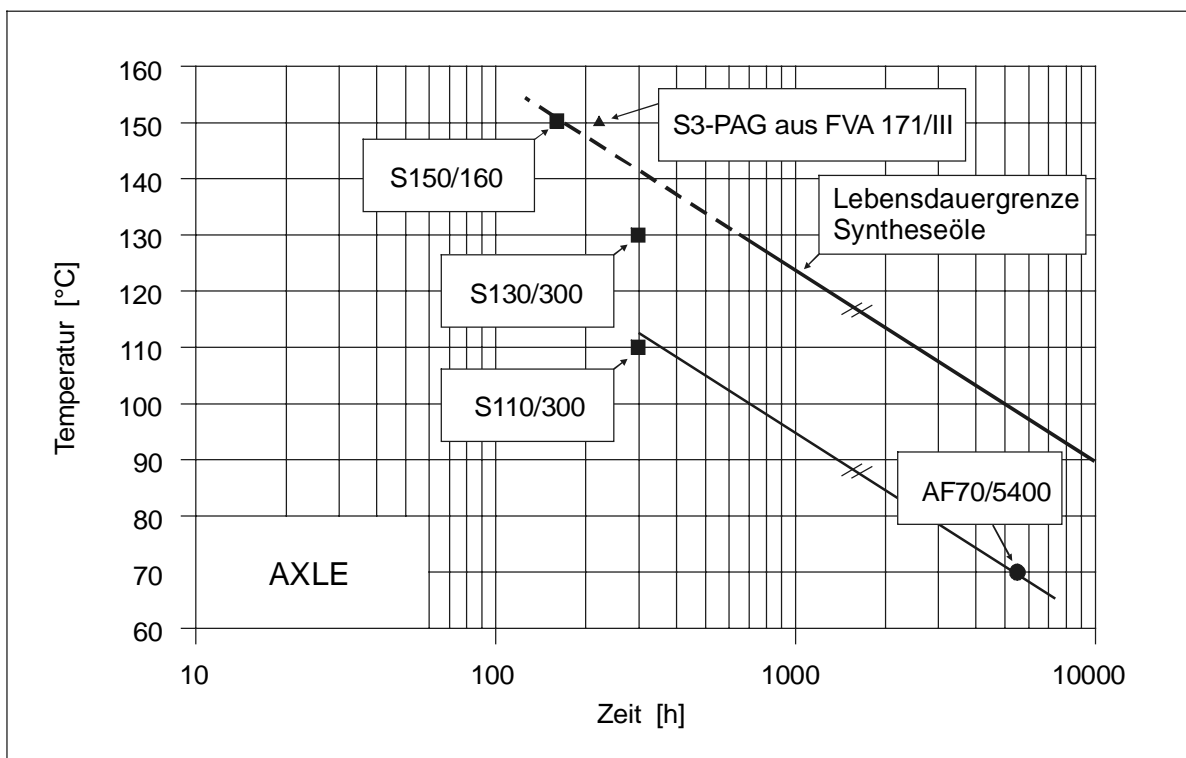


Bild 4.3: Veranschaulichung der Versuchspunkte für AXLE in einem Lebensdauerdiagramm für Getriebeöle

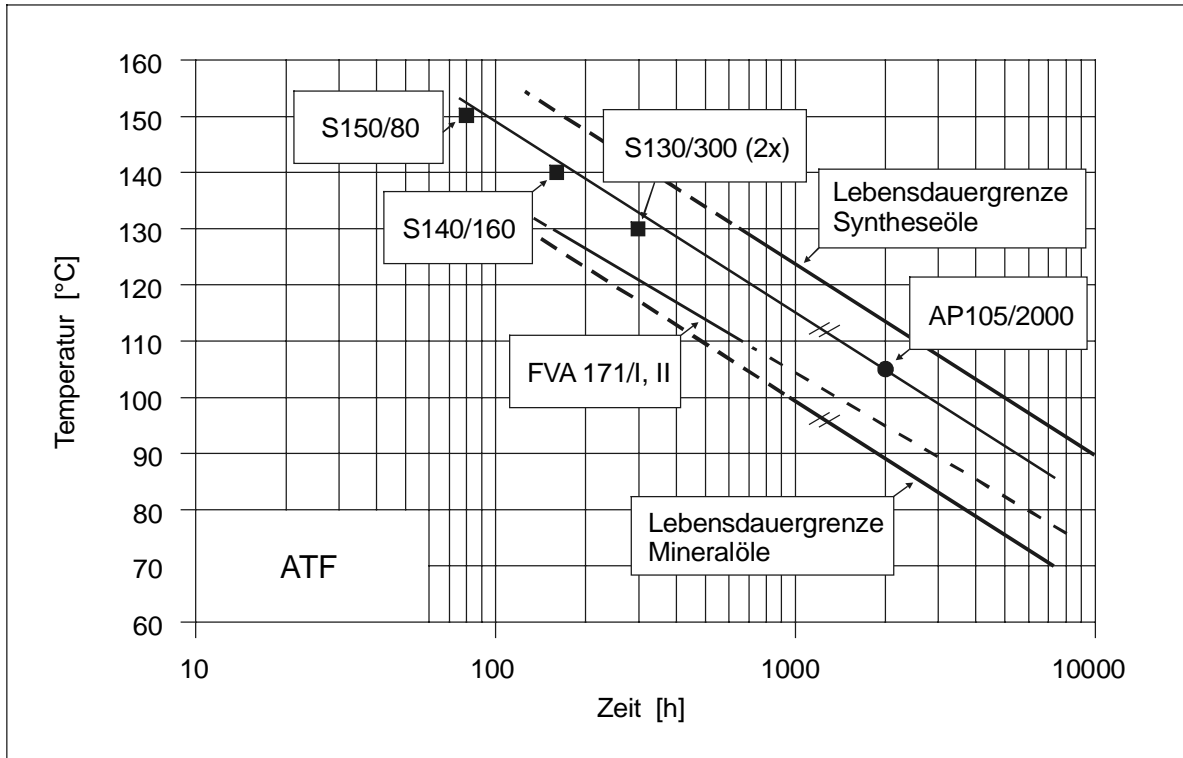


Bild 4.4: Veranschaulichung der Versuchspunkte für ATF in einem Lebensdauerdiagramm für Getriebeöle

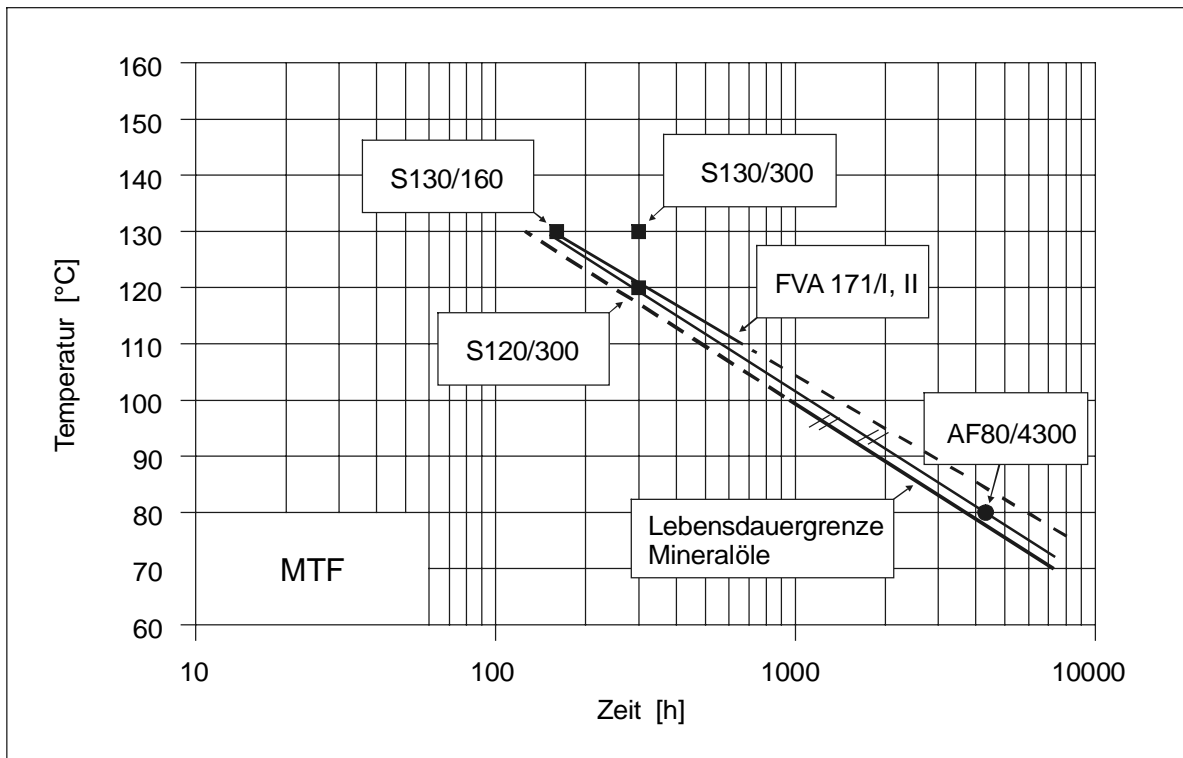


Bild 4.5: Veranschaulichung der Versuchspunkte für MTF in einem Lebensdauerdiagramm für Getriebeöle

Die Steigungen der Geraden bestätigen die bekannte Regel der Halbierung der Lebensdauer pro 10 K Temperaturerhöhung. Das lebensdauerbegrenzende Kriterium und damit die tatsächliche Lebensdauergerade ist stark anwendungs- und schmierstoffbezogen und muss für jeden Schmierstoff und jede Anwendung separat ermittelt werden. Die in den Diagrammen dargestellten Grenzlinien stellen lediglich Anhaltswerte aus allgemeinen Erfahrungen dar. Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben FVA 171 [5, 65], in denen als Lebensdauergerade ein Absinken der Grübchenlebensdauer auf 80% des Neuöls definiert wurde, bestätigen im wesentlichen die Lebensdauergeraden.

In die Diagramme wurden für jeden Versuchsschmierstoff die Punkte für die Bedingungen der Alterung in der Anwendung (AF, AP) eingetragen. Durch diese Punkte wurde nun jeweils eine Parallele zu den Lebensdauergeraden nach [27] eingetragen. In erster Näherung ist davon auszugehen, dass alle Punkte auf dieser Parallelen etwa gleichen thermischen Alterungszustand des Schmierstoffs charakterisieren. Punkte oberhalb der Gerade kennzeichnen stärkere Alterung, Punkte unterhalb der Gerade geringeren Alterungszustand.

Ein Vergleich der Beanspruchungen aus der Feldalterung und den Lebensdauergeraden nach [27] und [5, 64] zeigt, dass die Syntheseöle CLP-PG und AXLE aus der Feldalterung weit von ihrer Beanspruchungsgrenze entfernt sein sollten, während das teilsynthetische ATF und das Mineralöl MTF gerade ihre Leistungsgrenze erreicht haben sollten.

Zur Untersuchung des Schmierstoffzustandes und der Veränderungen während der Alterung wurden in unterschiedlichen Zeitabständen Ölproben aus dem Ölbehälter entnommen und bezüglich Viskosität, Neutralisationszahl und Veränderungen im IR-Spektrum untersucht.

4.2.3 Alterung der Versuchsschmierstoffe für die Verschleißtests

Die Versuchsschmierstoffe für die Verschleißtests waren im Rahmen der FVA Forschungsvorhaben 171/I-III [5, 65] im FZG-Prüfstand unter den oben genannten Referenzbedingungen gealtert worden. Die Temperatur und Laufzeit wurde so variiert, dass sich eine nachhaltige Veränderung der chemisch-physikalischen Kennwerte zwischen Neuöl, schwacher und starker Alterungsstufe feststellen ließ. Die jeweiligen Alterungstemperaturen und Laufzeiten sowie die Schmierstoffkennwerte sind im Anhang aufgeführt.

4.3 Komponententests

Die Neuöle sowie die gealterten Ölvolumina aus der Anwendung und dem FZG-Prüfstand wurden in Komponententests bezüglich ihrer tribologischen Eigenschaften und deren Änderungen untersucht. Die durchgeführten Komponententests sind für die einzelnen Schmierstoffe in **Tabelle 4.5** dargestellt.

Schmierstoff	CLP-PG	AXLE	ATF	MTF
Zahnräder				
Fresstest A/8,3/90			X	
Fresstest A10/16,6R/90	X			X
Fresstest S-A10/16,6R/90		X		
Pittingtest			X	X
Hypoidtest		X		
Graufleckentest	X			
Synchronsystem				
Funktion				X
Wandler-Kupplung (Fa. ZF)				
Reibungsverhalten			X	

Tabelle 4.5: Übersicht über die Komponententests für den Vergleich von prüfstands- und praxisgealterten Ölen

4.3.1 Fresstest

Für das ATF wurde der FZG Standardtest A/8,3/90 nach DIN 51354 [16] angewandt. Hierbei wird die fresskritische Verzahnung vom Typ A im Tauchschmierverfahren bei einer Umfangsgeschwindigkeit von $v = 8,3$ m/s und einer Ölanfangstemperatur von $\vartheta_{oil} = 90^\circ\text{C}$ stufenweise belastet bis Fressen eintritt. Die Laufzeit je Kraftstufe liegt bei 15 Min. Es wird treibendes Ritzel gefahren, also Übersetzung ins Langsame.

Die übrigen Versuchsöle liegen außerhalb des Definitionsbereichs dieser Methode, so dass modifizierte Methoden anzuwenden waren. Für die Öle CLP-PG und MTF wurde der modifizierte Stufentest A10/16,6R/90 [32] angewandt, der bei gleichem Drehmoment, aber nur halber Ritzelbreite $b = 10$ mm und doppelter Umfangsge-

schwindigkeit $v = 16,6$ m/s bei halber Laufzeit gefahren wird. Eine weitere Verschärfung stellt das gegenüber dem Normaltest treibende Rad dar.

Für das Achsöl wurde der modifizierte Sprungtest S-A10/16,6R/90 [32] angewandt, mit Belastung direkt mit dem zu erwartenden Schadensmoment ohne stufenweise Steigerung der Last.

4.3.2 Graufleckentest

Im Graufleckentest GF-C/8,3/90 [31] wird die Graufleckentragfähigkeit überwiegend von Industriegetriebeölen ermittelt. Die praxisnah ausgelegte Verzahnung vom Typ C-GF wird bei Umfangsgeschwindigkeit $v = 8,3$ m/s und Einspritzschmierung bei konstanter Öltemperatur $\vartheta_{oil} = 90^{\circ}\text{C}$ stufenweise belastet, bis maßgebliche Auskolkungen durch Grauflecken entstanden sind. Im Stufentest beträgt die Laufzeit 16 h pro Laststufe, im anschließenden Dauertest 80 h.

4.3.3 Hypoidtest

Für das Achsöl wurde das Verschleiß- und Fressverhalten zusätzlich im Hypoidöltest A [57] bestimmt. Hierbei wird die praxisnah ausgelegte Hypoidverzahnung mit Achsversetzung $a = 44$ mm im Tauchschmierverfahren bei einer Ritzeldrehzahl $n_1 = 4500$ min^{-1} und einer Ölanfangstemperatur von $\vartheta_{oil} = 90^{\circ}\text{C}$ zu Beginn jeder Laststufe stufenweise belastet bis Fressen eintritt. Die Laufzeit je Laststufe beträgt 10 Min. Es wird treibendes Rad auf der Schubflanke gefahren, also "bremsender Motor bei Vorwärtsfahrt". Der Verschleiß des Tellerrades sowie mögliche Fresserscheinungen werden ausgewertet.

4.3.4 Pittingtest

Im Pittingtest PT-C/8,3/90 [30] wird die Pittinglebensdauer überwiegend von Fahrzeuggetriebeölen bestimmt. Die praxisnah ausgelegte Verzahnung vom Typ C-PT wird bei Umfangsgeschwindigkeit $v = 8,3$ m/s und Einspritzschmierung bei konstanter Öltemperatur $\vartheta_{oil} = 90^{\circ}\text{C}$ in einer Momentenstufe solange belastet, bis maßgebliche Grübchenausbrüche festgestellt werden. Zur statistischen Absicherung sind mehrere Läufe erforderlich.

Sowohl das ATF als auch das MTF wurden jeweils bei Momentenstufe 9 getestet. Mit dem Schmierstoff ATF trat jedoch in mehreren Versuchen bereits für das Neuöl Fressen auf. Daher wurde das ATF abweichend von den Standardtestbedingungen

bei nur halber Umfangsgeschwindigkeit $v = 4,15$ m/s entsprechend einer Raddrehzahl $n_2 = 750$ min⁻¹ gefahren.

4.3.5 Synchronisationstest

Das MTF wurde im Synchronisierungs-Prüfverfahren SPV auf dem Standard-Synchronisations-Prüfstand SSP-180 [36] untersucht. In Einstufen-Dauerschaltversuchen wird die ausgewählte Synchronisierung bis zum reproduzierbaren Ratschen gefahren. Die Versuchsbedingungen sind in **Tabelle 4.6** zusammengefasst. Die Versuche wurden jeweils mit den Reibbelägen Streusinter HS und Karbon durchgeführt. Im Test wird die Reibungscharakteristik aller Schaltungen und das Verschleißverhalten bewertet. Zur statistischen Absicherung wurden jeweils zwei Läufe gefahren.

Größe	Zeichen	HS	Karbon	Einheit
Differenzdrehzahl	Δn	1600		min ⁻¹
Gleitgeschwindigkeit	v_g	9,8	10,0	m/s
Axialkraft	F_a	2015	1985	N
mittlere Flächenpressung	p_m	4,5		N/mm ²
Massenträgheitsmoment	Θ_{red}	0,12		kgm ²
spezifische Reibarbeit	q	0,48		J/mm ²
Taktzeit	T	6		s
mittlere Reibleistung	$q p_m$	80		mW/mm ²
Ölvolumenstrom	Q_{oil}	5		l/min
Öltemperatur	ϑ_{oil}	80		°C

Tabelle 4.6: Versuchsbedingungen der Synchronisierungstests

4.3.6 Wandler-Kupplungs-Test

Das ATF wurde bei Fa. ZF Friedrichshafen AG in einem Tribometertest zur Ermittlung des Verhaltens in einer geregelten Wandlerkupplung GWK untersucht. Es handelt sich um eine Reibkupplung mit Reibpaarung Papier/Stahl, die mit konstanter Pressung beaufschlagt wird. Gemessen wird die Reibungszahl μ über der Gleitgeschwindigkeit bei konstanter Öltemperatur. Die Versuchsbedingungen sind in **Tabelle 4.7** zusammengefasst.

Größe	Zeichen	Wert	Einheit
Reibpaarung	-	Stahl/Papier	-
Gleitgeschwindigkeit	v_g	1,3 - 0	m/s
Flächenpressung	p	1,75	MPa
Öltemperatur	ϑ_{oil}	110	°C

Tabelle 4.7: Versuchsbedingungen der Wandler-Kupplungs-Tests

4.3.7 Verschleißtests

Für die Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Ölalterung auf den Zahnradverschleiß wurde das Testverfahren C/0,05/90:120/12 [6] angewandt. Es dient dazu, das Verschleißverhalten von Schmierstoffen bei zwei verschiedenen Temperaturen unter Misch- und Grenzreibungsbedingungen zu bestimmen. Die Verzahnung vom Typ C-PT wird im Tauchschmierverfahren bei einer Beanspruchung entsprechend Kraftstufe 12 betrieben. Bei der konstanten Umfangsgeschwindigkeit von $v = 0,05$ m/s beträgt die Öltemperatur im ersten Abschnitt von 2 x 20 h Laufzeit $\vartheta_{oil} = 90^\circ\text{C}$, im zweiten Abschnitt von gleicher Dauer $\vartheta_{oil} = 120^\circ\text{C}$. Der Gewichtsverlust von Ritzel und Rad wird nach den einzelnen Testabschnitten jeweils getrennt durch Wiegen bestimmt.

5 Versuchsergebnisse

5.1 Schmierstoffveränderungen infolge der Alterung

In den folgenden Bildern sind die Verläufe der chemisch-physikalischen Schmierstoffkennwerte Viskosität und Neutralisationszahl sowie ggf. der Veränderungen von charakteristischen Banden im IR-Spektrum über der Alterungszeit im FZG-Prüfstand aufgezeichnet. Zum Vergleich sind die Werte der in den jeweiligen Anwendungen gealterten Proben in die Diagramme mit eingetragen.

5.1.1 Schmierstoff CLP-PG

Bild 5.1 zeigt den Verlauf der NZ. Der Unterschied in der Neutralisationszahl zwischen dem Neuöl und dem gealterten Öl aus der Anwendung im Feldversuch AF ist sehr gering. Die Öle aus der Alterungssimulation zeigen ebenso kaum Veränderungen gegenüber dem Neuöl. Weder die Alterung bei 110°C noch bei 130°C bewirkt nach 300 h Laufzeit eine nennenswerte Veränderung der NZ.

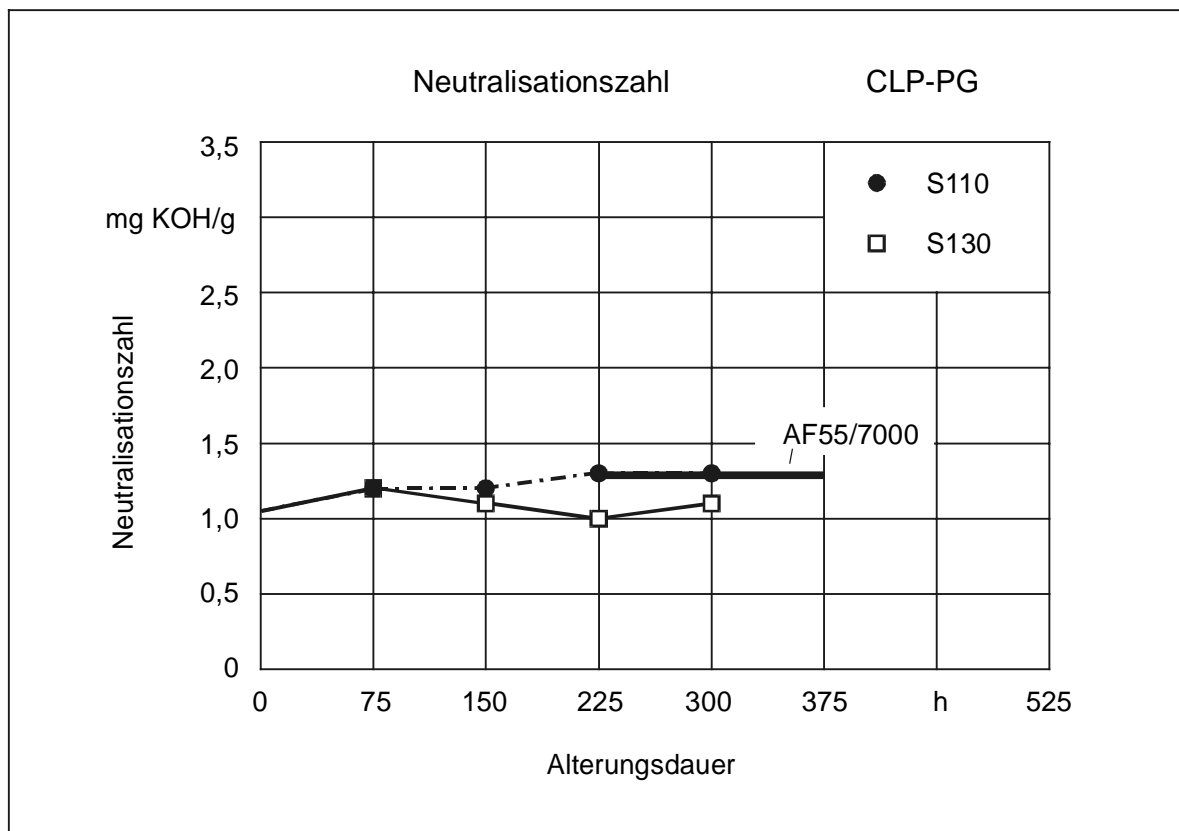
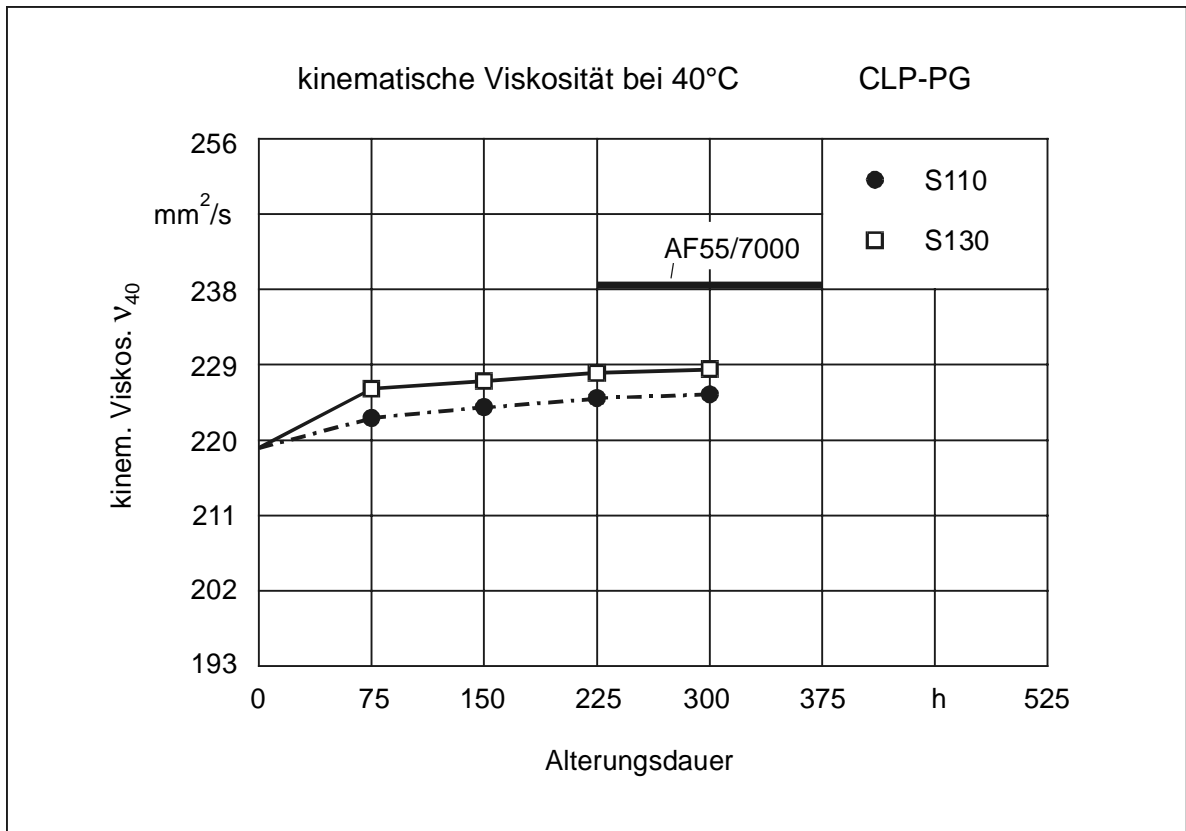
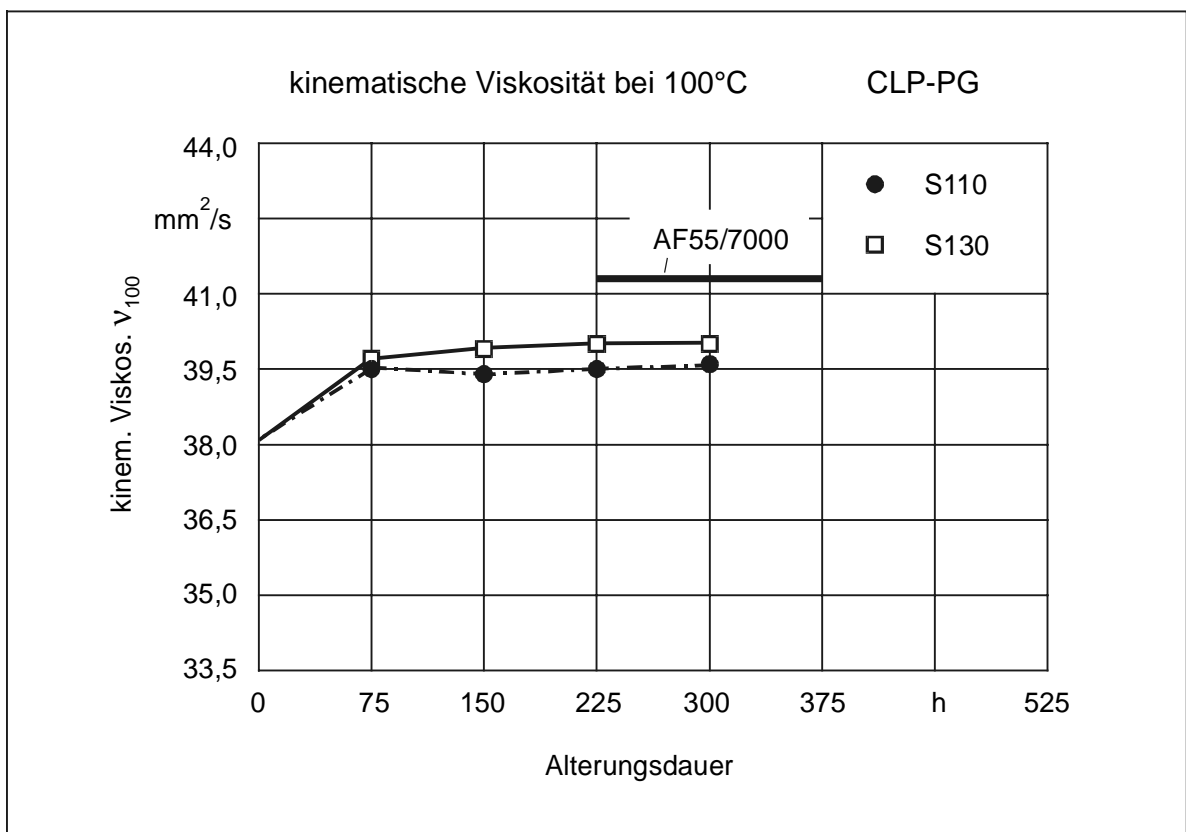


Bild 5.1: Verlauf der NZ, CLP-PG

**Bild 5.2:** Verlauf der kinematischen Viskosität v_{40} , CLP-PG**Bild 5.3:** Verlauf der kinematischen Viskosität v_{100} , CLP-PG

Die **Bilder 5.2** und **5.3** zeigen den Verlauf der kinematischen Viskosität ν sowie die Werte des in der Anwendung gealterten Öls AF. Letzteres weist gegenüber dem Neuöl eine ca. 9 % höhere Viskosität auf bei nahezu unverändertem VI. Die ursprüngliche Viskosität der in der Anwendung gealterten Frischölcharge ist jedoch nicht bekannt. Die im FZG-Prüfstand gealterten Öle weisen eine um 3 - 5 % höhere Viskosität als das Frischöl auf. Der Viskositätsindex dieser Proben ist identisch und ebenfalls nur sehr gering gegenüber dem Frischöl verändert.

Der Wassergehalt des Schmierstoffs lag bei dem Neuöl sowie dem in der Anwendung im Feld gealterten Öl bei ca. 0,13 Gewichts-%. Das im FZG-Prüfstand gealterte Öl zeigte bei beiden Alterungstemperaturen bereits nach 75 Stunden Laufzeit eine Abnahme des Wassergehalts auf 0,04 Gewichts-%. Dabei ist anzumerken, dass es sich bei dem vorliegenden Schmierstoff um ein wasserlösliches Polyglykol handelt. Bei den im FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand gealterten Proben wurde nach längerer Öffnung der Probe ein Wiederanstieg des Wassergehaltes von 0,04 auf 0,19 Gewichts-% gemessen.

Für das im Feld gealterte Öl sowie das im FZG-Prüfstand bei 110°C gealterte Öl ließ sich im IR-Spektrum bei Wellenlänge 1725 μm nur ein sehr geringer Oxidationsgrad nachweisen. Für das bei 130°C gealterte Öl der Alterungssimulation wurde nach 225 bzw. 300 Stunden Laufzeit eine etwas stärkere Oxidation ermittelt, die jedoch nach Angabe des Herstellers noch immer als unbedenklich bezeichnet werden kann.

5.1.2 Schmierstoff AXLE

Der Schmierstoff AXLE wurde bei 110°C, 130°C und 150°C im FZG-Prüfstand gealtert. Der Alterungsversuch bei 150°C sollte zeigen, ob bei geringem Zeitaufwand für die Alterungssimulation die Grenze der Öllebensdauer erreicht werden kann. Nach der Alterung bei dieser Temperatur hatte sich am Boden des Ölbehälters eine ca. 10 mm starke harzähnliche Ablagerungsschicht gebildet. Damit kommt diese Temperaturbedingung für die Alterung des Schmierstoffs nicht in Frage, da offensichtlich unter diesen Bedingungen das Öl thermisch überfordert ist. Die Probe wurde dennoch auf Veränderungen der Viskosität, NZ und IR-Spektrum untersucht.

Die **Bilder 5.4** und **5.5** zeigen die Veränderungen der kinematischen Viskosität ν während der Alterung im FZG-Prüfstand sowie die Werte des in der Anwendung gealterten Öls AF.

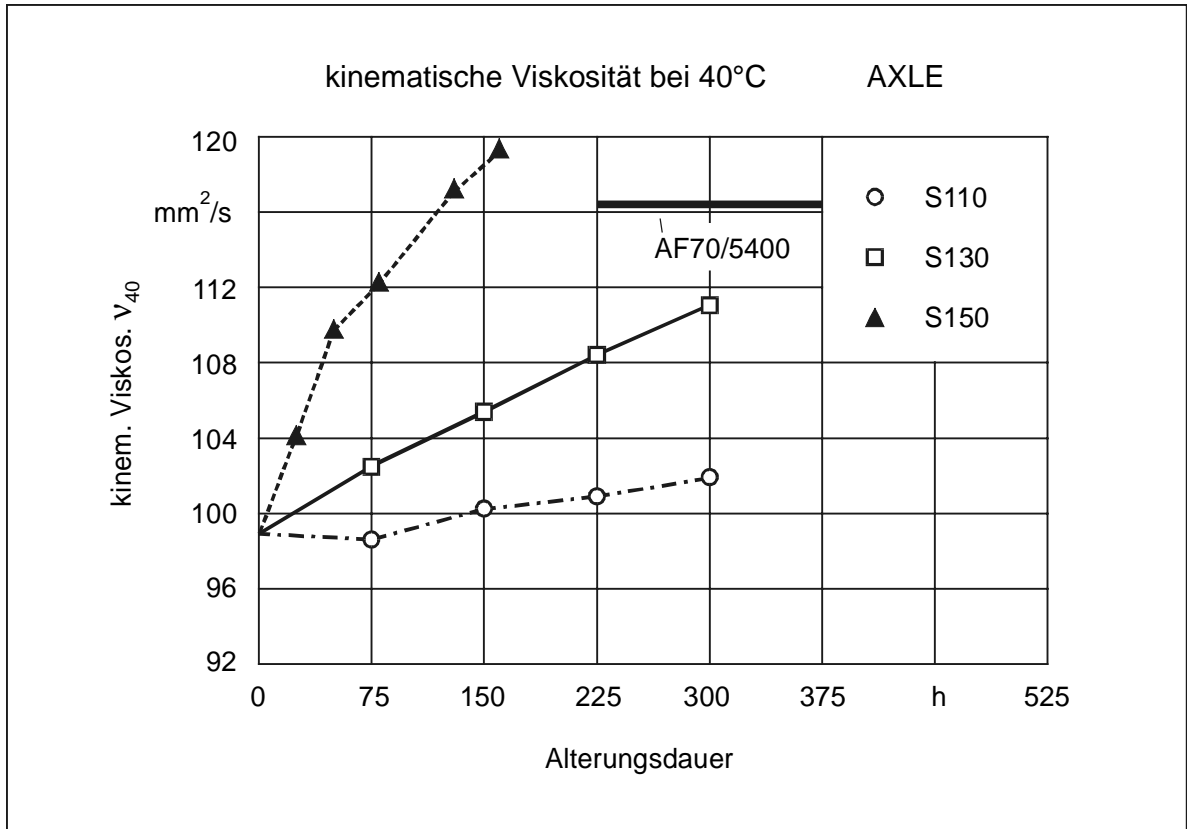


Bild 5.4: Verlauf der kinematischen Viskosität v_{40} , AXLE

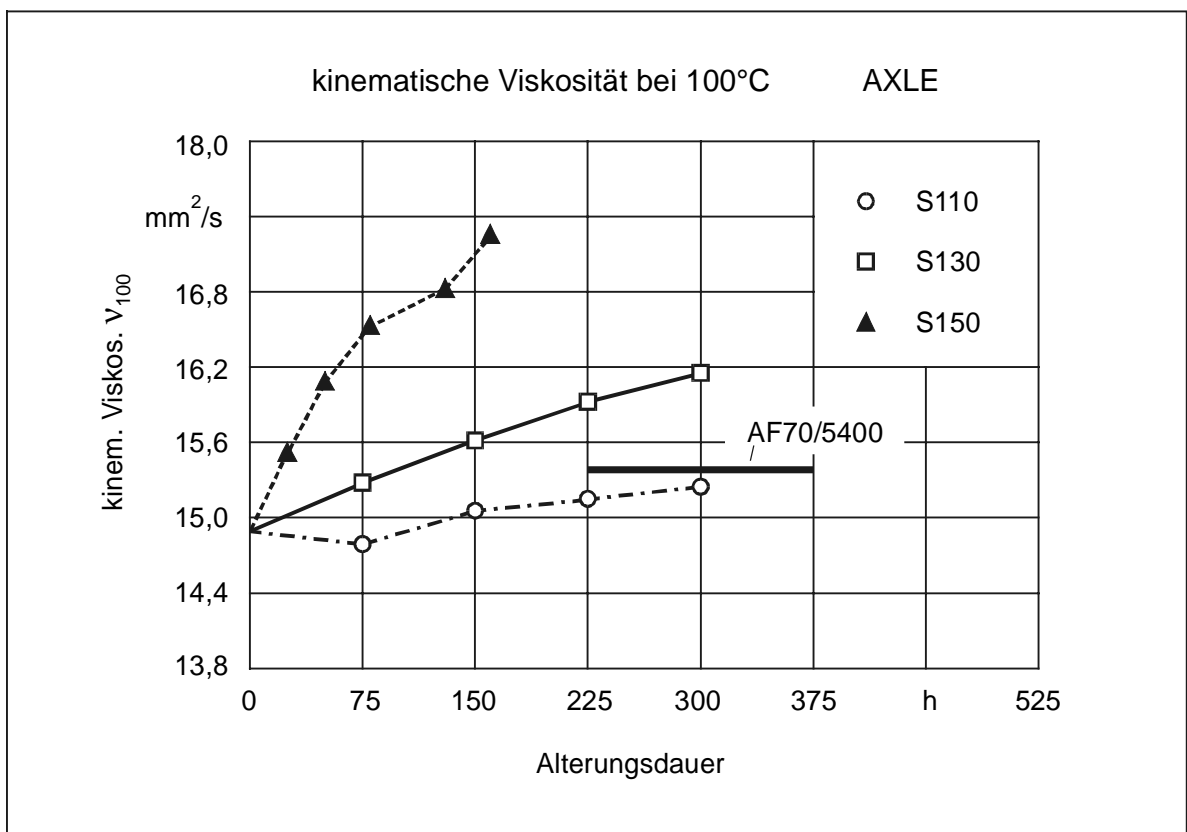


Bild 5.5: Verlauf der kinematischen Viskosität v_{100} , AXLE

Letztere kann aufgrund der genannten Restmenge von Fremdschmierstoff auf Mineralölbasis nicht unmittelbar mit der Frischölviskosität verglichen werden. Während die Viskosität bei 40°C um ca. 18 % höher liegt als für das Frischöl beträgt die Differenz der Viskosität bei 100°C nur ca. 3,5 %, was sich dementsprechend in einem niedrigeren VI widerspiegelt. Das im FZG-Prüfstand gealterte Öl weist mit steigender Alterungstemperatur deutlich steigende Viskosität auf. Der Viskositätsindex der im FZG-Prüfstand gealterten Öle ist nahezu unverändert gegenüber dem Frischöl.

Bild 5.6 zeigt den Verlauf der NZ. Die bei 110°C im FZG-Prüfstand gealterte Probe zeigt keine Veränderungen der Neutralisationszahl gegenüber dem Frischöl. Die Neutralisationszahl der bei 130°C im FZG-Prüfstand gealterten Probe weist auf stärkere Schmierstoffveränderungen als nach der Alterung in der Anwendung hin. Die Neutralisationszahl der bei 150°C im FZG-Prüfstand gealterten Probe lässt auf eine nachhaltige Veränderung im Öl schließen.

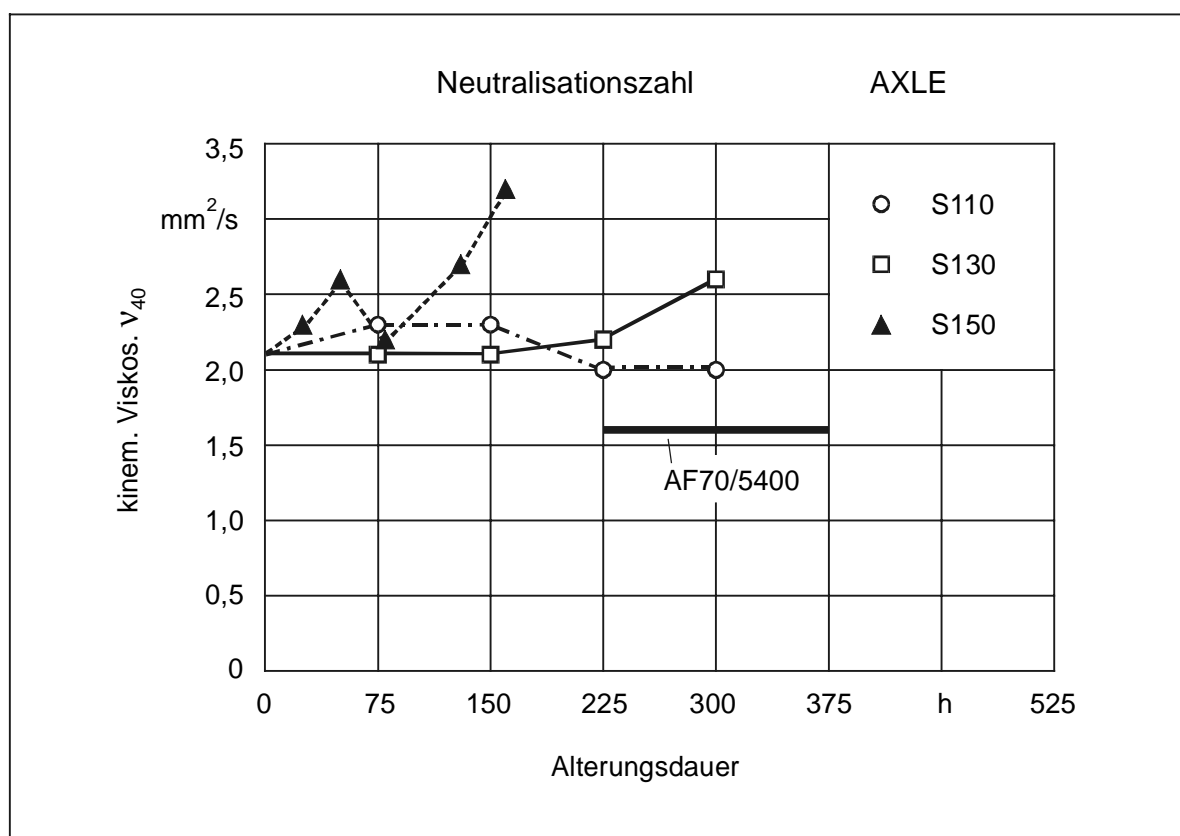


Bild 5.6: Verlauf der NZ, AXLE

Der Wassergehalt des Schmierstoffs lag bei allen Proben (Neuöl, Alterung in der Anwendung und Alterungssimulation) unter 0,04 %.

Die Oxidation des Schmierstoffs im IR-Spektrum lässt sich aufgrund der Überlagerung der Alterungs- und Esterbanden nicht ermitteln. Für die Additivbanden sind im Vergleich zum Neuöl keine signifikanten Unterschiede zwischen der in der Anwendung gealterten Probe sowie der bei 110° und 130°C im FZG-Prüfstand gealterten Proben feststellbar. Das bei 150°C gealterte Öl zeigt deutliche Veränderungen in den Banden der P-O-C Schwingung bei Wellenzahl 970 cm^{-1} sowie der P=S Schwingung bei Wellenzahl 670 cm^{-1} . Offensichtlich wurde bei dieser hohen Temperatur das Additivsystem nachhaltig verändert, worauf auch bereits aus der harzähnlichen Ablagerungsschicht im Ölbehälter geschlossen wurde.

5.1.3 Schmierstoff ATF

Der Schmierstoff ATF wurde bei 130°, 140° und 150°C im FZG-Prüfstand gealtert. Die Alterung bei 130°C erfolgte unter Verwendung von Prüfstandslagern mit Messingkäfigen (1. Alterung) und Blechkäfigen (2. Alterung). **Bild 5.7** zeigt den Verlauf der NZ. Der Unterschied in der Neutralisationszahl zwischen dem Neuöl und dem gealterten Öl aus der Anwendung AP ist als gering zu bewerten. Die Öle aus der Alterungssimulation zeigen mit steigender Alterungsdauer steigende NZ. Am Ende der Laufzeit sind deutliche Veränderungen der NZ gegenüber dem Neuöl festzustellen.

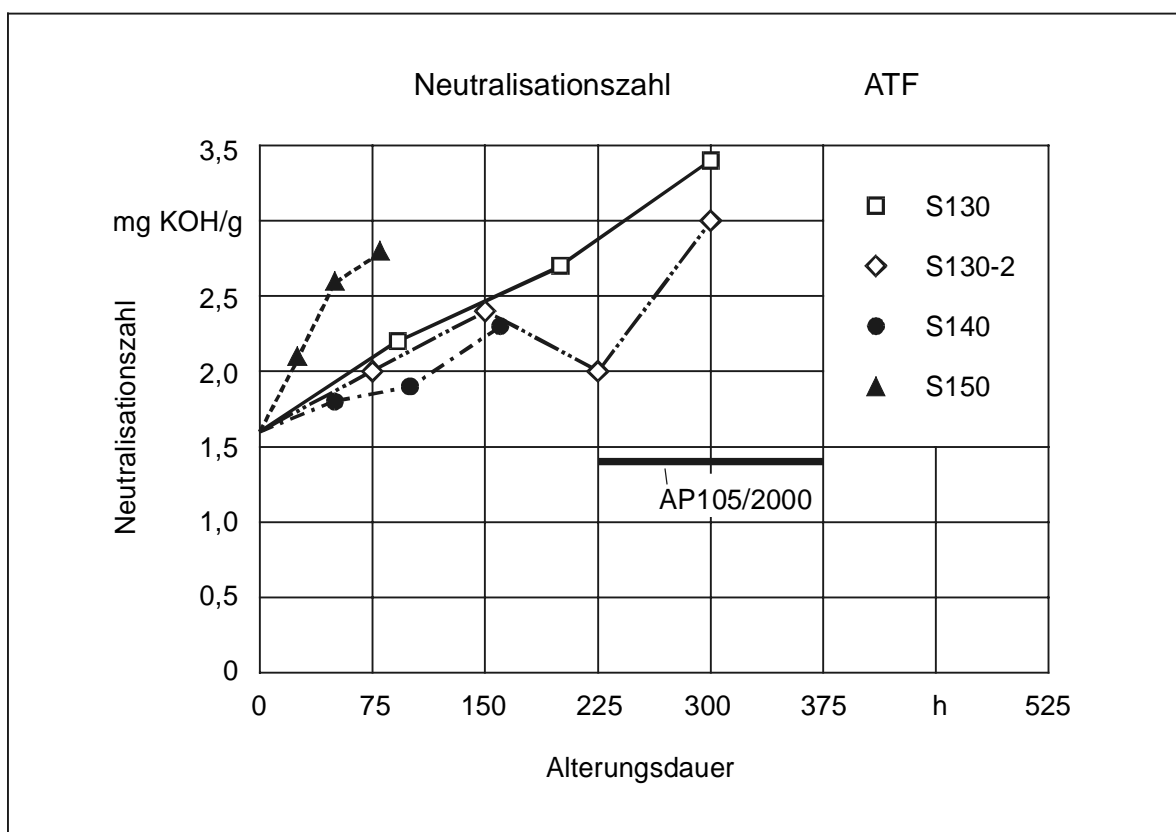


Bild 5.7: Verlauf der NZ, ATF

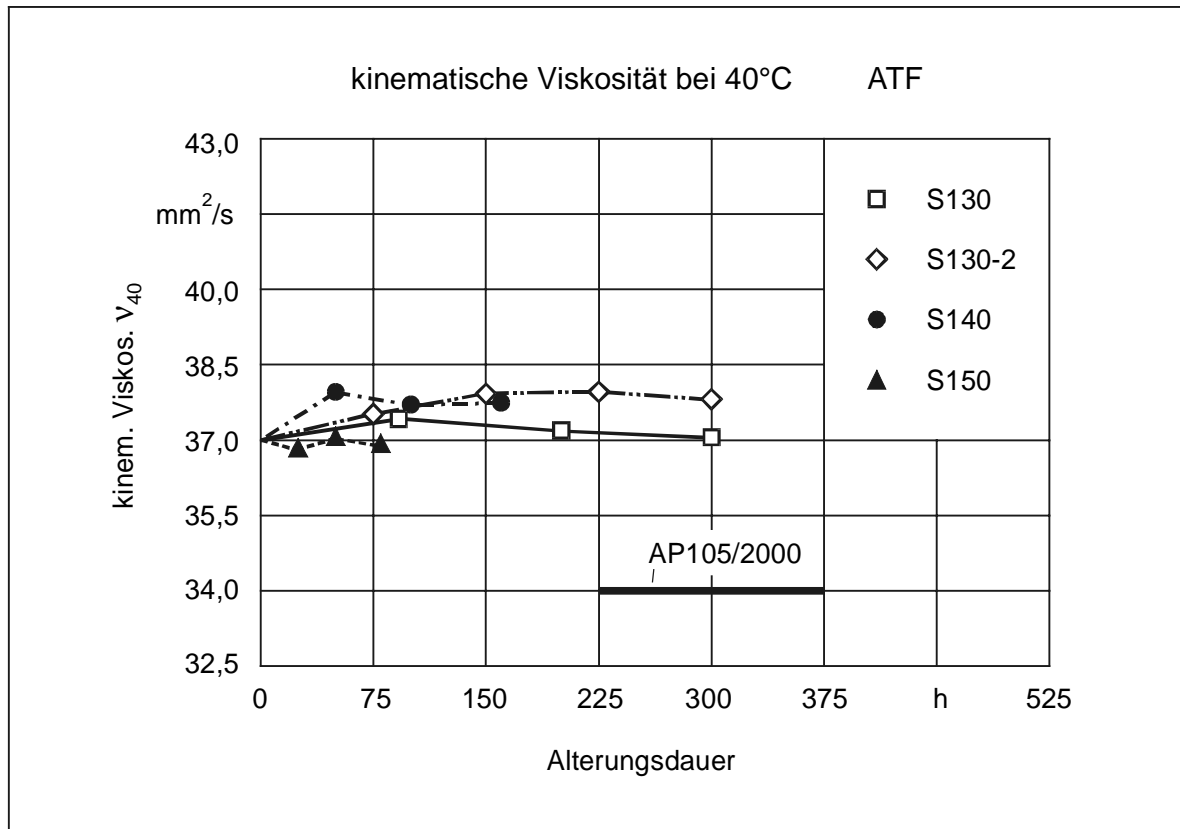


Bild 5.8: Verlauf der kinematischen Viskosität v_{40} , ATF

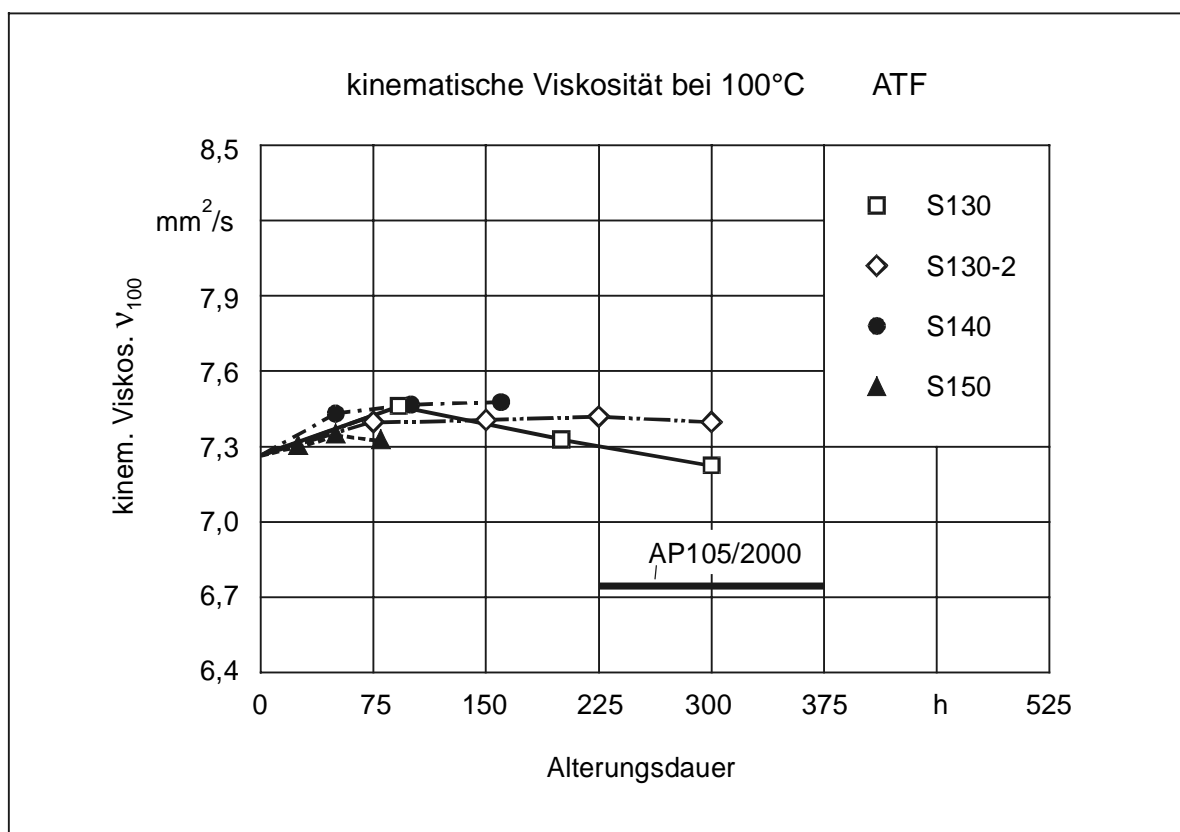


Bild 5.9: Verlauf der kinematischen Viskosität v_{100} , ATF

Insbesondere für die Alterungsversuche bei 130°C fallen die gemessenen Werte sehr hoch aus. Die Alterung bei 150°C ergibt im Vergleich zur Alterung bei 130°C wie erwartet einen steileren Anstieg der NZ. Die Veränderungen infolge der Alterung bei 140°C liegen nach gleicher Laufzeit etwa auf dem Niveau der Alterung bei 130°C.

Die **Bilder 5.8** und **5.9** zeigen die Veränderungen der kinematischen Viskosität ν während der Alterung. Die Viskosität des Schmierstoffs ist nach allen Alterungsversuchen im FZG-Prüfstand kaum verändert. Selbst bei der Temperatur von 150°C ergibt sich keine nennenswerte Änderung der Viskosität. Auch der Viskositätsindex ist nahezu unverändert. Nach der Alterung in der Anwendung ist die Viskosität um ca. 8% gefallen. Der Viskositätsindex des Schmierstoffs ist dabei nur um 2% verringert. Offensichtlich ist in der Anwendung die Scherrate höher als im FZG-Prüfstand, was auch der Vergleich der Getriebekomponenten nach Tabelle 4.4 nahe legt.

Der Wassergehalt des Öls lag bei allen Proben (Neuöl, Alterung in der Anwendung und Alterungssimulation) unter 0,04 %.

Der Verlauf der nach dem CEC-Verfahren L48-A00 [7] im IR-Spektrum ermittelten Oxidation des Schmierstoffs ist zusammen mit dem Wert der in der Anwendung gealterten Probe AP in **Bild 5.10** dargestellt.

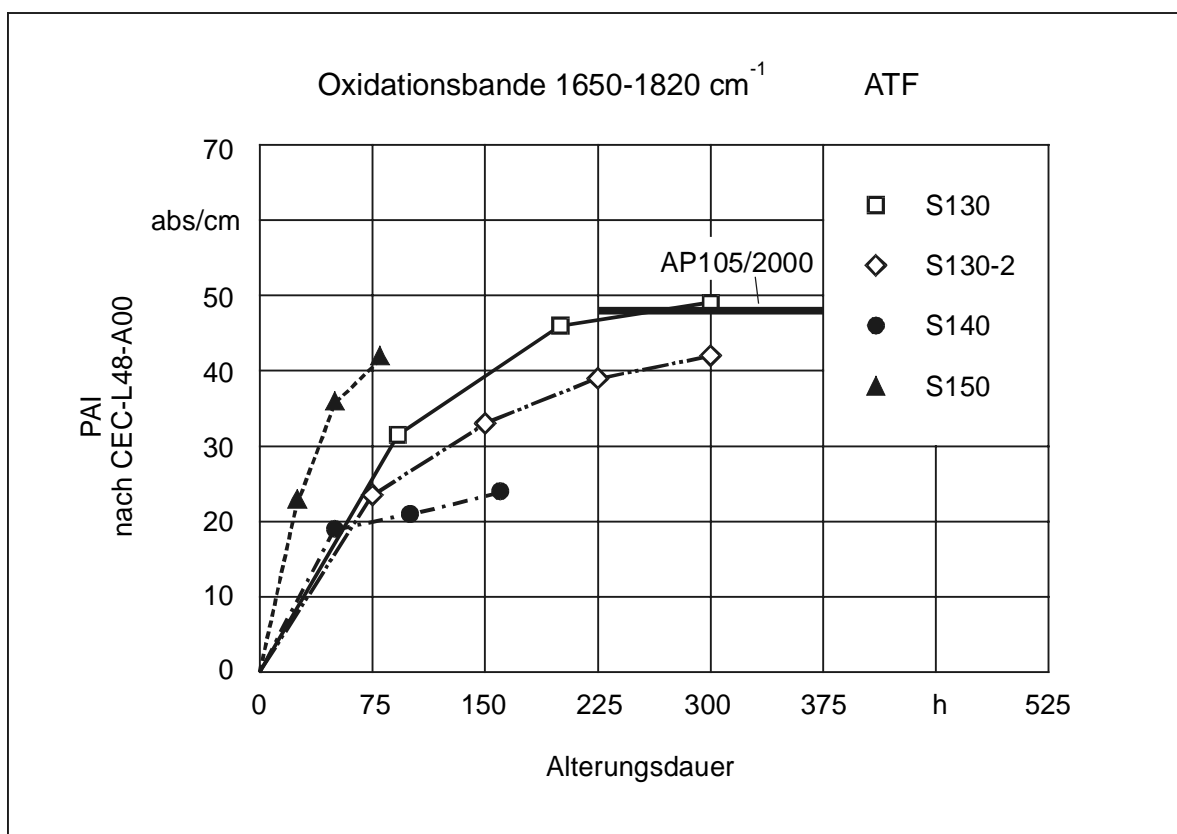


Bild 5.10: Verlauf der Oxidation, ATF

Die Veränderungen der C=O-Bande im IR-Spektrum im Verlauf der 1. und 2. Alterung bei 130°C sind sehr ähnlich und liegen am Ende der Alterung im Bereich der in der Anwendung gealterten Probe AP. Die Oxidation bei 150°C verläuft erwartungsgemäß schneller. Nach 80 h Laufzeit ist im Hinblick auf die Oxidation ein nahezu gleicher Alterungsgrad erreicht wie nach 300 h Dauer bei 130°C. Dagegen zeigt die bei 140°C gealterte Probe in der zweiten Hälfte der Alterungsdauer einen flacheren Verlauf und dementsprechend am Ende einen insgesamt geringeren Oxidationsgrad. Möglicherweise fiel während der Alterung dieser Probe unbemerkt die Heizung des Ölaggregats aus und die Solltemperatur wurde nicht konstant eingehalten.

5.1.4 Schmierstoff MTF

Der Schmierstoff MTF wurde zunächst bei 130°C über 300 h Laufzeit im FZG-Prüfstand gealtert. Nach 80 h trat starke Schaumbildung auf, die durch Zugabe von ca. 100 ppm Silikonöl für den weiteren Verlauf des Tests unterbunden wurde. Bei einem neuen Alterungsversuch bei 130°C trat erneut Schaumbildung nach ca. 60 h Laufzeit auf. Auch hierbei wurden ca. 100 ppm Silikonöl zugegeben, wodurch die Schaumbildung unterblieb. Aufgrund der Ergebnisse im Synchronisationstest, die einen Einfluss des Silikonöls vermuten ließen, wurde das Öl bei 120°C gealtert. Schaum bildete sich dabei nur temporär und in deutlich geringerem Umfang, Silikonöl zur Schaumdämpfung wurde nicht zugegeben.

In den **Bildern 5.11** und **5.12** sind die Veränderungen der kinematischen Viskosität ν während der Alterung dargestellt. Für die im FZG-Prüfstand gealterten Proben lässt sich ein leichter Anstieg mit der Dauer der Alterung feststellen. Am Ende der Alterung beträgt die Viskositätszunahme etwa 2 bis 5 % gegenüber dem Neuöl. Die Viskosität des in der Anwendung gealterten Öls ist um ca. 2,5 % geringer als die des Neuöls. Insgesamt fallen die Viskositätsveränderungen infolge der Alterung damit sehr gering aus.

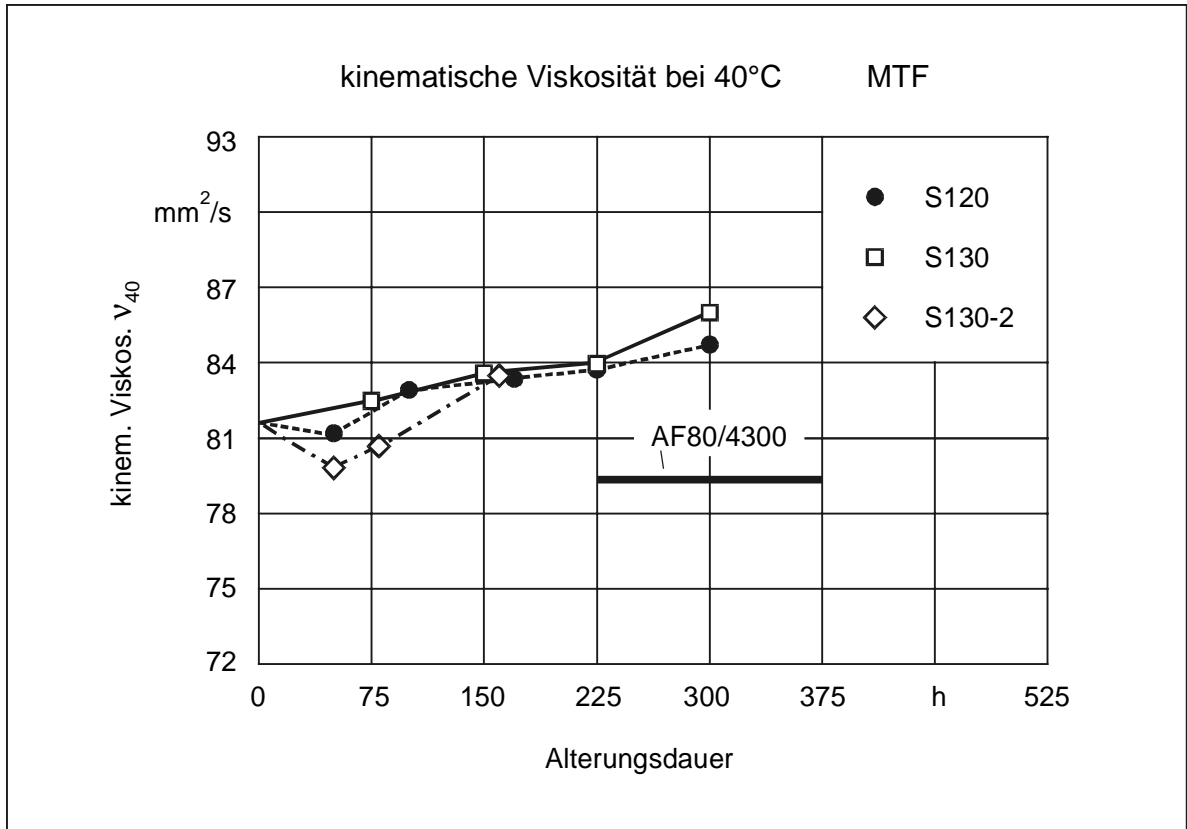


Bild 5.11: Verlauf der kinematischen Viskosität v_{40} , MTF

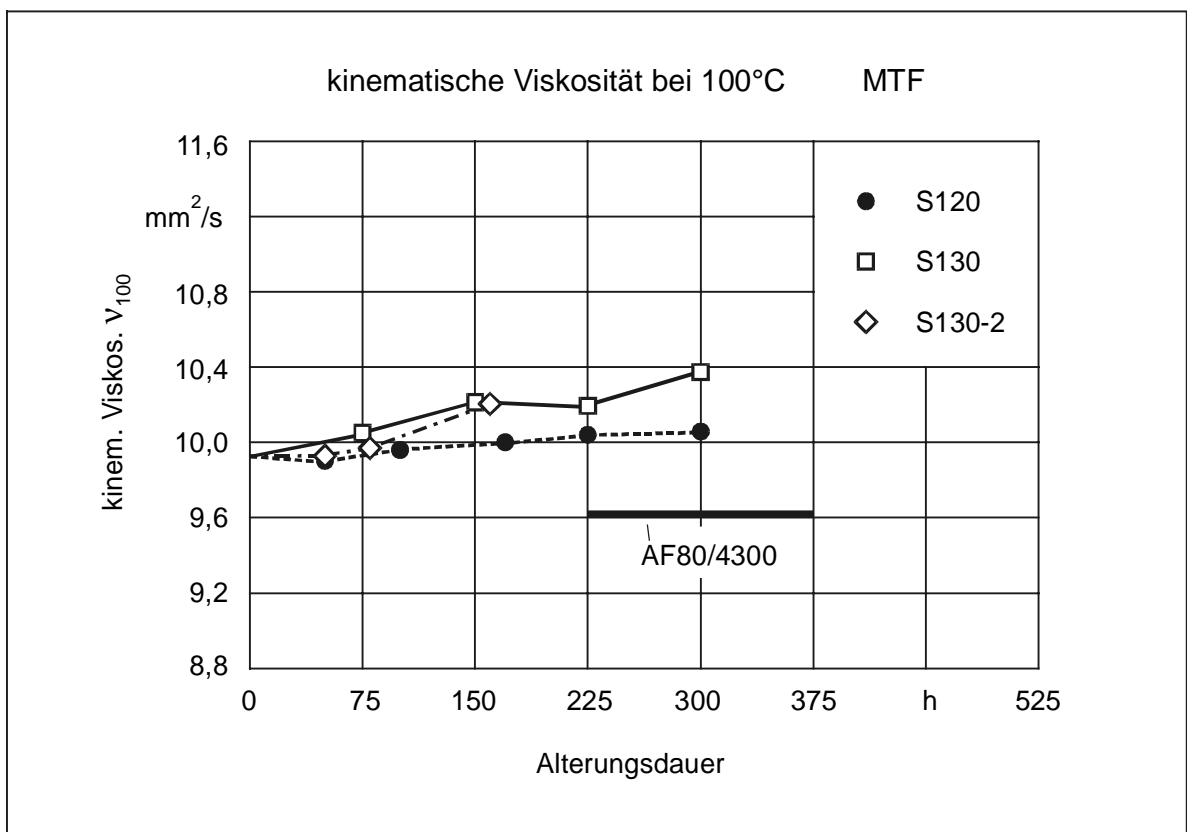


Bild 5.12: Verlauf der kinematischen Viskosität v_{100} , MTF

Bild 5.13 zeigt den Verlauf der NZ. Die im FZG-Prüfstand gealterten Proben zeigen einen in etwa kontinuierlichen Anstieg der Neutralisationszahl um ca. 0,5 bis 1 mg KOH/g gegenüber dem Neuöl, während das in der Anwendung gealterte Öl kaum eine Veränderung der Neutralisationszahl aufweist.

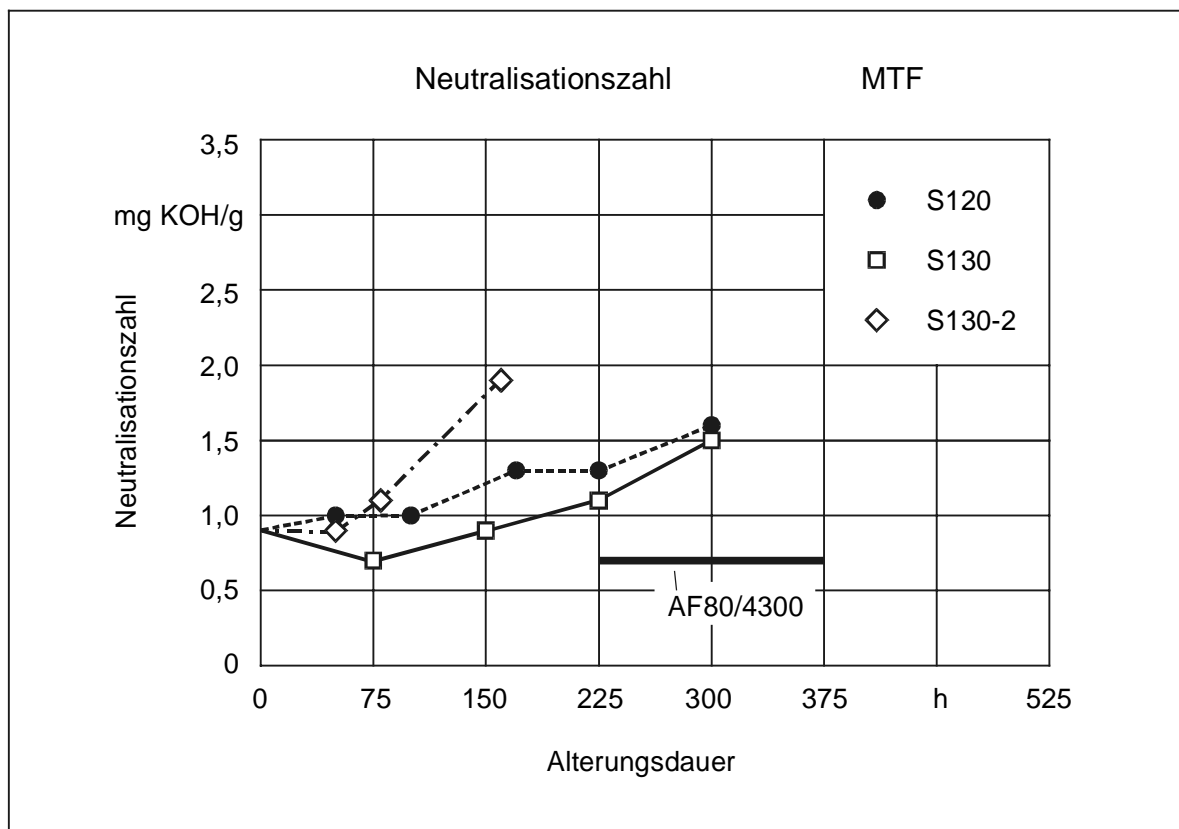


Bild 5.13: Verlauf der NZ, MTF

Der Wassergehalt des Öls lag bei allen Proben (Neuöl, Alterung in der Anwendung und Alterungssimulation) unter 0,04 %.

Bild 5.14 zeigt den Verlauf der nach dem CEC-Verfahren L48-A00 im IR-Spektrum ermittelten Oxidation des Schmierstoffs.

In den **Bildern 5.15** und **5.16** sind die Veränderungen charakteristischer Additivbanden des Schmierstoffs dargestellt.

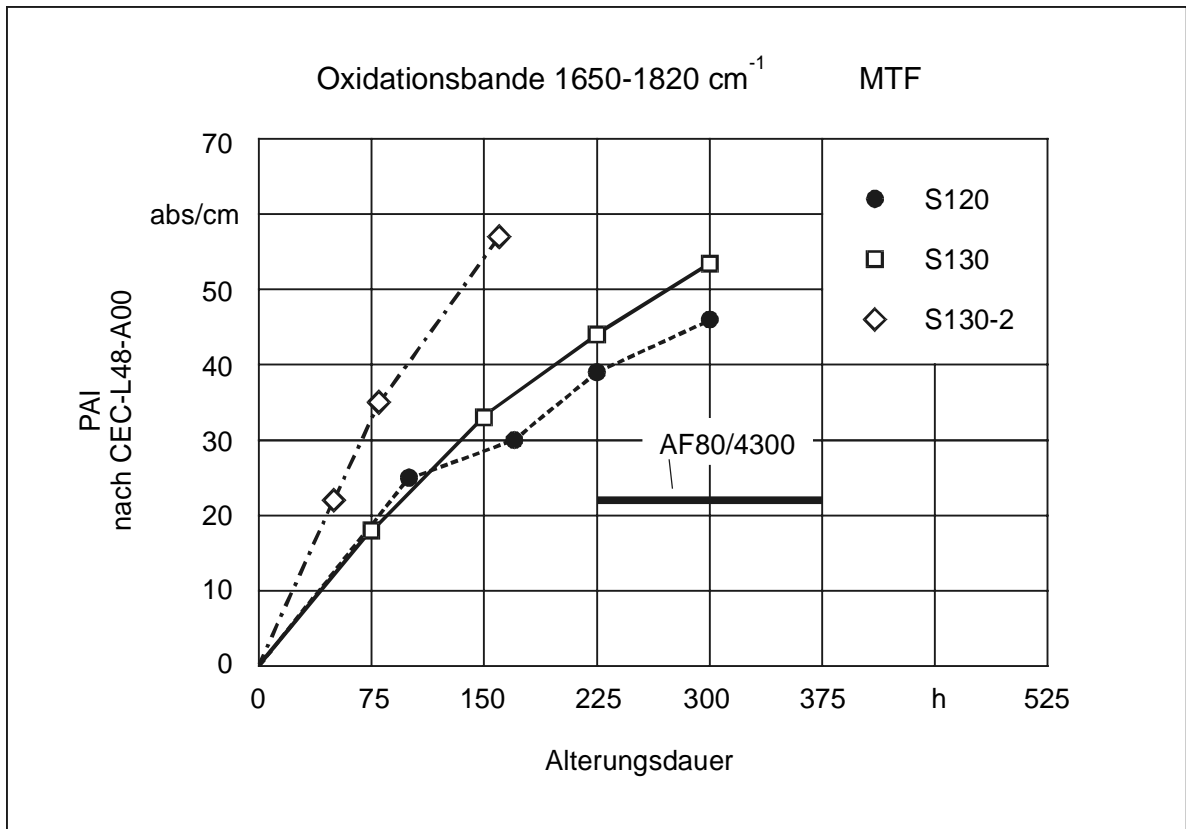


Bild 5.14: Verlauf der Oxidation, MTF

Die im IR-Spektrum bestimmte Flächenveränderung der C=O-Bande zeigt für die im FZG-Prüfstand gealterten Proben deutliche Oxidation. Dabei ergibt sich für die Kurve der 2. Alterung bei 130°C (S130-2) in etwa die doppelte Steigung wie für die Kurve der bei 120°C gealterten Probe. Dies wäre auch nach der Regel einer Halbierung der Öllebensdauer bei Temperaturerhöhung um 10°C zu erwarten gewesen. Die Oxidation der 1. Alterung bei 130°C (S130) fällt dagegen geringer aus und liegt nur leicht über dem Niveau der Alterung bei 120°C. Dies zeigt sich durchgängig bei allen chemisch-physikalischen Kennwerten. Die in der Anwendung bei 80°C gealterte Probe AF zeigt erheblich geringeren Oxidationsgrad und liegt damit deutlich unterhalb der im FZG-Prüfstand gealterten Proben.

Auch die im IR-Spektrum ermittelten Veränderungen der charakteristischen Additivbanden weisen auf stärkere Alterung im FZG-Prüfstand als in der Anwendung hin. Für die Extinktion der Bande bei Wellenzahl 1110 cm⁻¹ liegt noch verhältnismäßig gute Korrelation zwischen Alterungssimulation und Feldalterung vor. Für die Extinktion der Bande bei Wellenzahl 890 cm⁻¹ sind dagegen deutliche Differenzen feststellbar. Die am Ende der FZG-Alterung vorliegenden Werte lassen auf stärkere Veränderungen der Additive im Vergleich zur Feldalterung schließen, deren Niveau bereits nach einer Alterungsdauer von 50 bis 150 h im FZG-Prüfstand erreicht wurde.

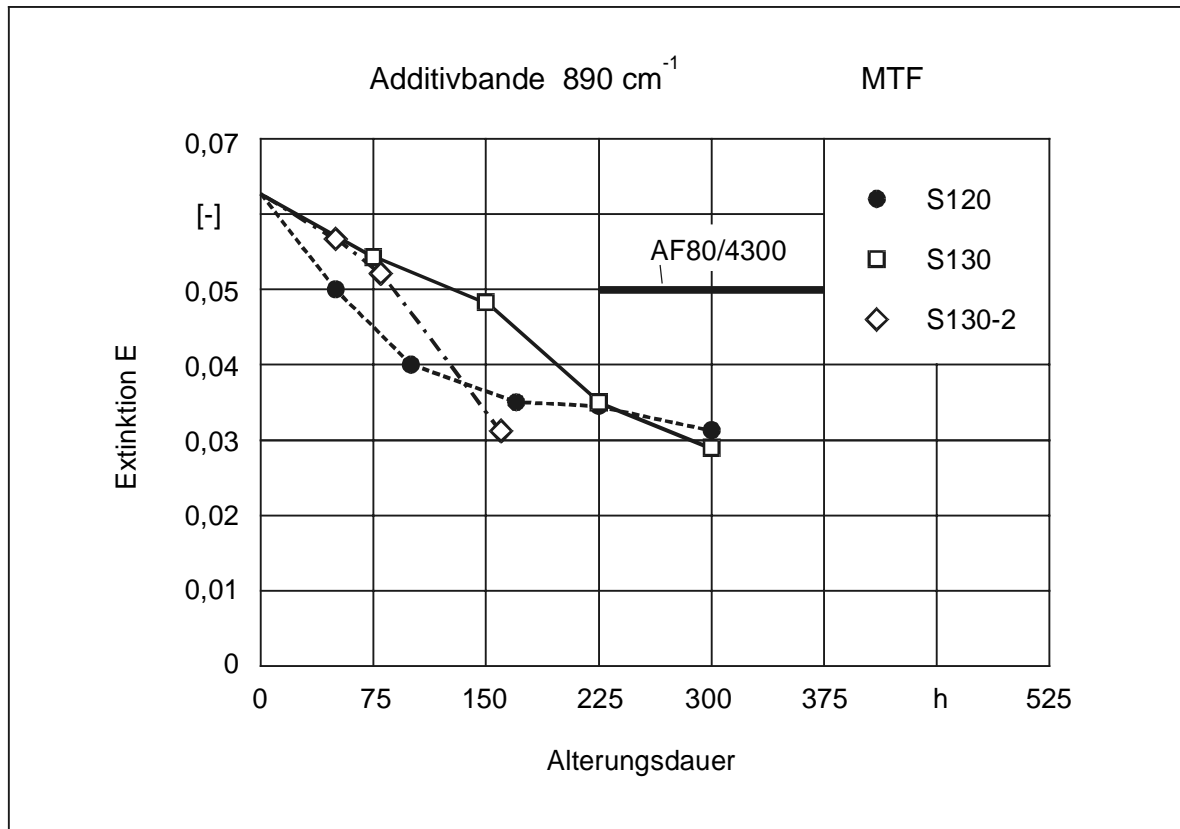


Bild 5.15: Extinktion der Additivbande bei Wellenzahl 890 cm^{-1} über der Zeit, MTF

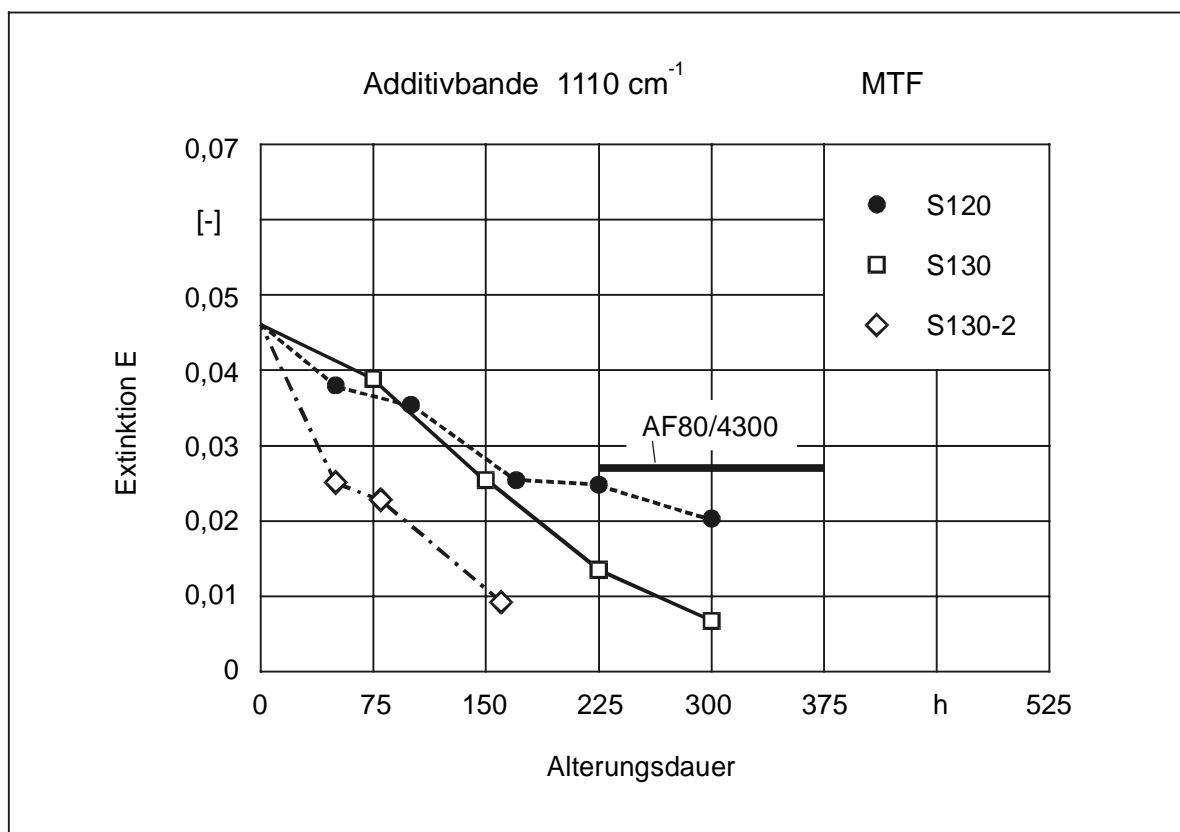


Bild 5.16: Extinktion der Additivbande bei Wellenzahl 1110 cm^{-1} über der Zeit, MTF

5.1.5 Schmierstoffkennwerte nach der Alterung

Nachfolgend sind die Veränderungen der Schmierstoffkennwerte aller Versuchsschmierstoffe jeweils nach der Alterung vergleichend gegenübergestellt. Auch die Ergebnisse der mittels RFA bzw. ICP durchgeführten Elementgehaltbestimmungen sind für die maßgeblichen Additiv- und Abriebelemente angegeben.

In **Bild 5.17** sind die relativen Veränderungen der kinematischen Viskosität ν dargestellt. Die Alterung im FZG-Prüfstand ergibt tendenziell eine Erhöhung der Viskosität infolge thermisch bedingter Polymerisation und geringerer Scherraten. Die Intensität der Erhöhung fällt dabei für die unterschiedlichen Schmierstoffe sehr unterschiedlich aus. Während das AXLE bei 130°C und 300 h Laufzeit eine Viskositätszunahme von mehr als 10% zeigt, weist das ATF bei derselben Alterungsbedingung keine Veränderung der Viskosität auf. Auch der Einfluss der Temperatur auf die Viskositätsveränderung ist sehr unterschiedlich. Lässt sich für das AXLE eine sehr deutliche Abhängigkeit der Viskositätsveränderung von der Alterungstemperatur feststellen, so ist für die übrigen Schmierstoffe dieser Einfluss im untersuchten Temperaturbereich deutlich geringer. Die in der Anwendung gealterten Proben der Schmierstoffe CLP und AXLE können aufgrund der genannten Einschränkungen kaum zu einem Vergleich herangezogen werden. Die Werte der Öle MTF und ATF deuten auf einen gegensätzlichen Alterungsmechanismus hin. Während im FZG-Prüfstand die thermische Alterung im Vordergrund steht, findet in der Anwendung verstärkt Scherung statt.

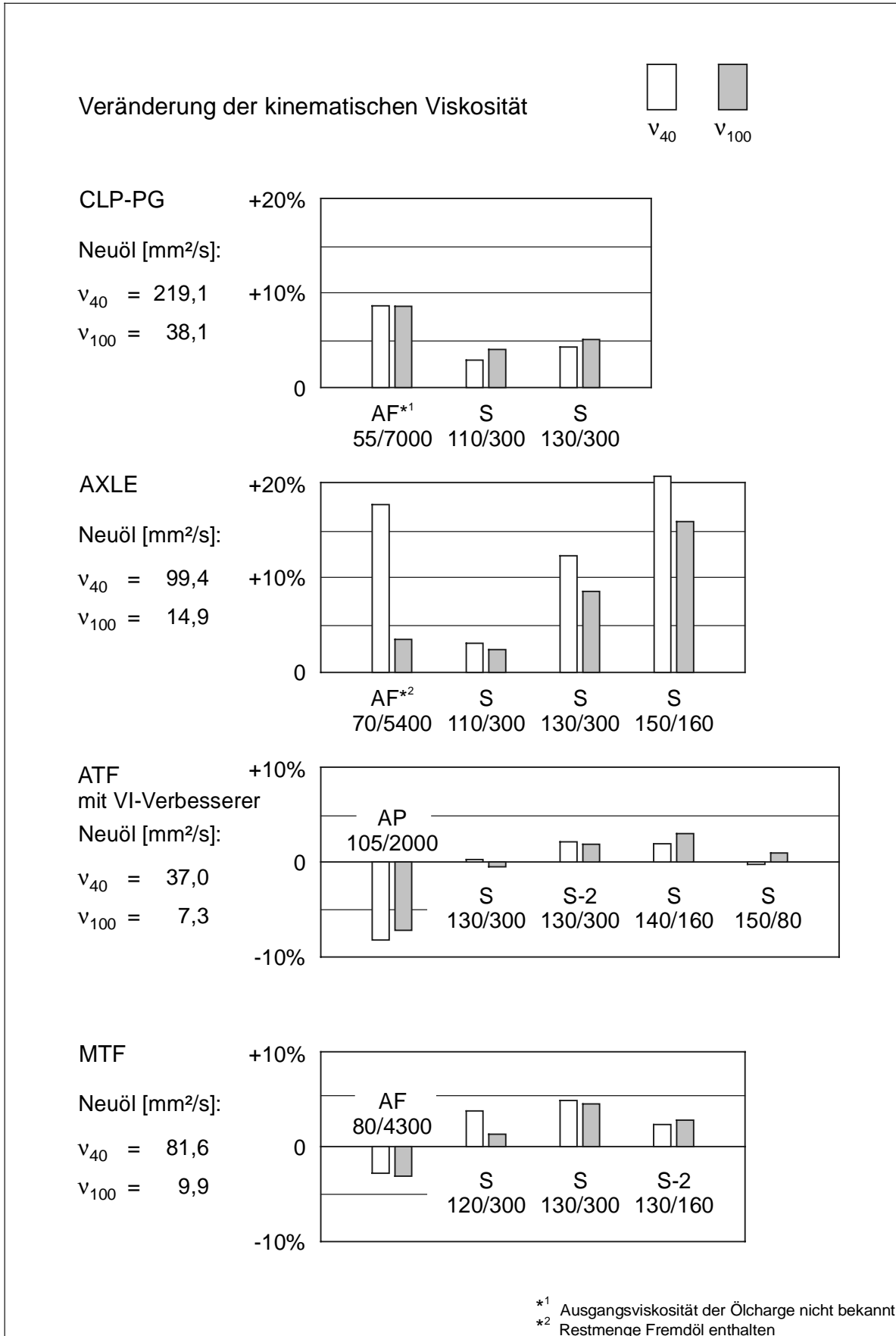


Bild 5.17: Veränderung der kinematischen Viskosität v

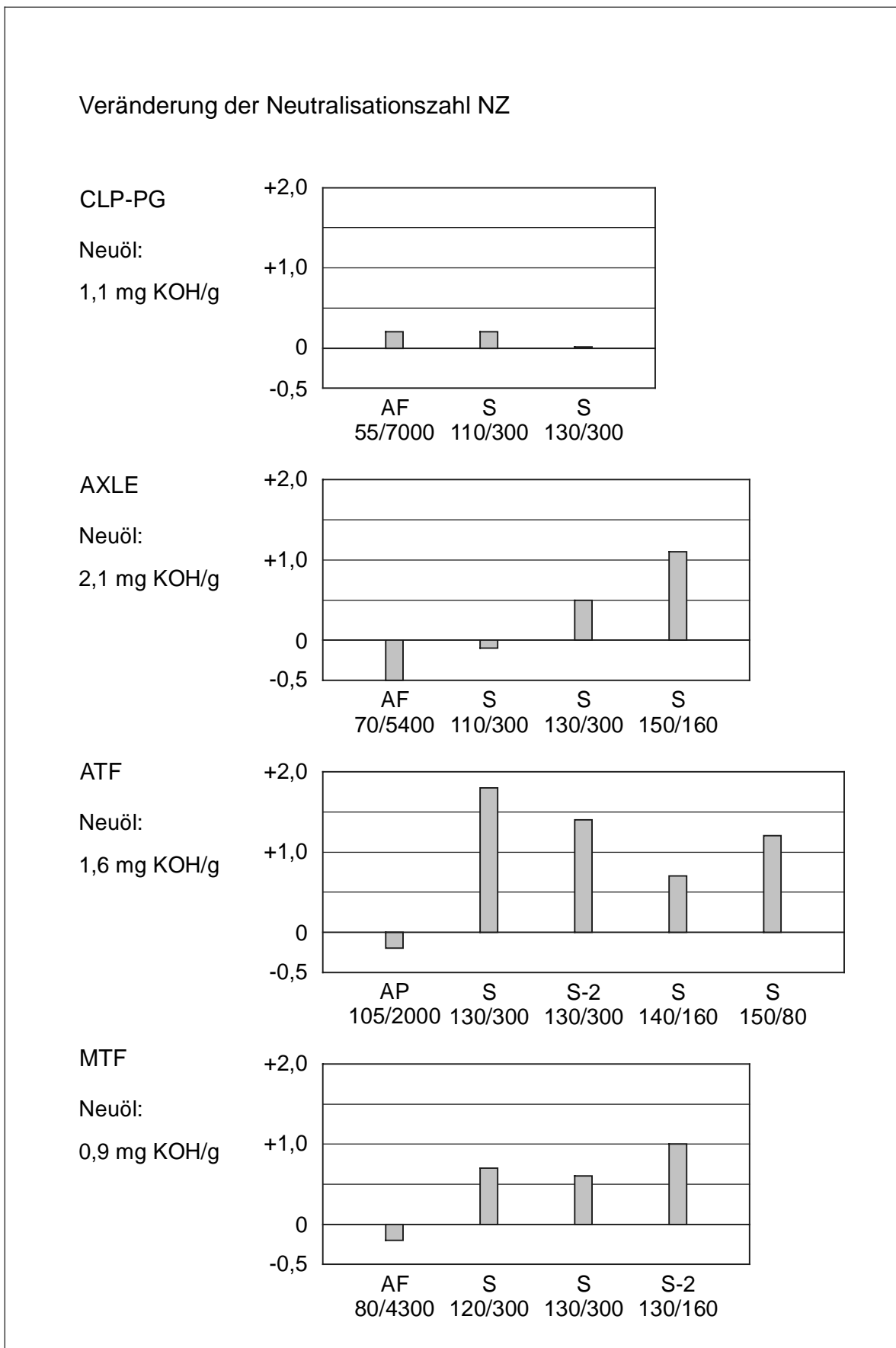


Bild 5.18: Veränderung der NZ

Bild 5.18 zeigt die Veränderungen der NZ. Die in der Anwendung gealterten Proben weisen keine signifikanten Veränderungen der NZ auf. Nach der Alterung im FZG-Prüfstand bestehen in Abhängigkeit vom Schmierstoff dagegen teilweise erhebliche Differenzen zur NZ des jeweiligen Neuöls. Das CLP-PG erweist sich im Hinblick auf die NZ als sehr stabil. Die NZ ist nach der Alterung nahezu unverändert. Für das AXLE lässt sich ähnlich wie bei den Viskositätsveränderungen eine deutliche Abhängigkeit der NZ von der Alterungstemperatur feststellen. Für das ATF ergeben sich die größten Veränderungen, die jedoch im Hinblick auf die Alterungstemperatur sehr uneinheitlich ausfallen. Im Mittel ergibt sich für diesen Schmierstoff eine NZ-Erhöhung um ca. 1,0 mg KOH/g nach der FZG-Alterung. Das MTF weist im Mittel nach der Alterung im FZG-Prüfstand eine Zunahme der NZ um ca. 0,6 mg KOH/g auf.

In **Bild 5.19** ist die Oxidation der Schmierstoffe ATF und MTF zusammengefasst. Die Werte wurden nach der CEC Oxidationstestmethode L48-A00 ermittelt. Für die Syntheseöle AXLE und CLP-PG sind die Oxidationsbanden aufgrund der Überlagerung durch Esterbanden keiner Auswertung zugänglich.

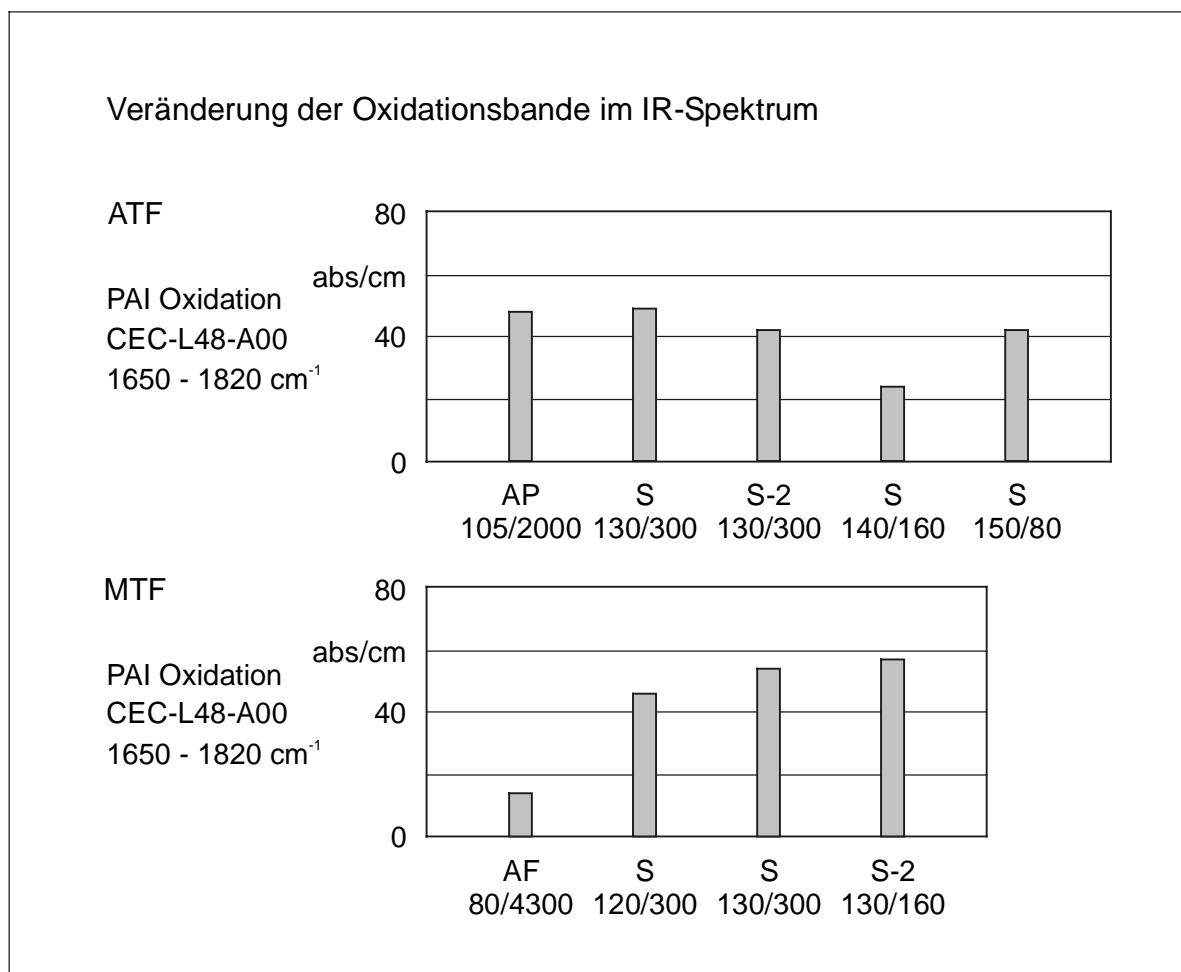


Bild 5.19: Oxidation, ATF und MTF

Für das ATF liegen die Werte der Oxidation nach der Alterung in der Anwendung und im FZG-Prüfstand im selben Bereich, mit Ausnahme der bei 140°C gealterten Probe. Für das MTF liegt im Hinblick auf die Oxidation stärkere Alterung im FZG-Prüfstand als in der Anwendung vor.

Bild 5.20 zeigt die Veränderungen der charakteristischen Additivbanden für das MTF. Analog zur Oxidation resultieren auch hier durch die Alterung im FZG-Prüfstand stärkere Veränderungen als durch die Alterung in der Anwendung, wobei die Übereinstimmung für die Extinktion der Bande bei Wellenzahl 1110 cm^{-1} besser ausfällt als für die Bande bei Wellenzahl 890 cm^{-1} .

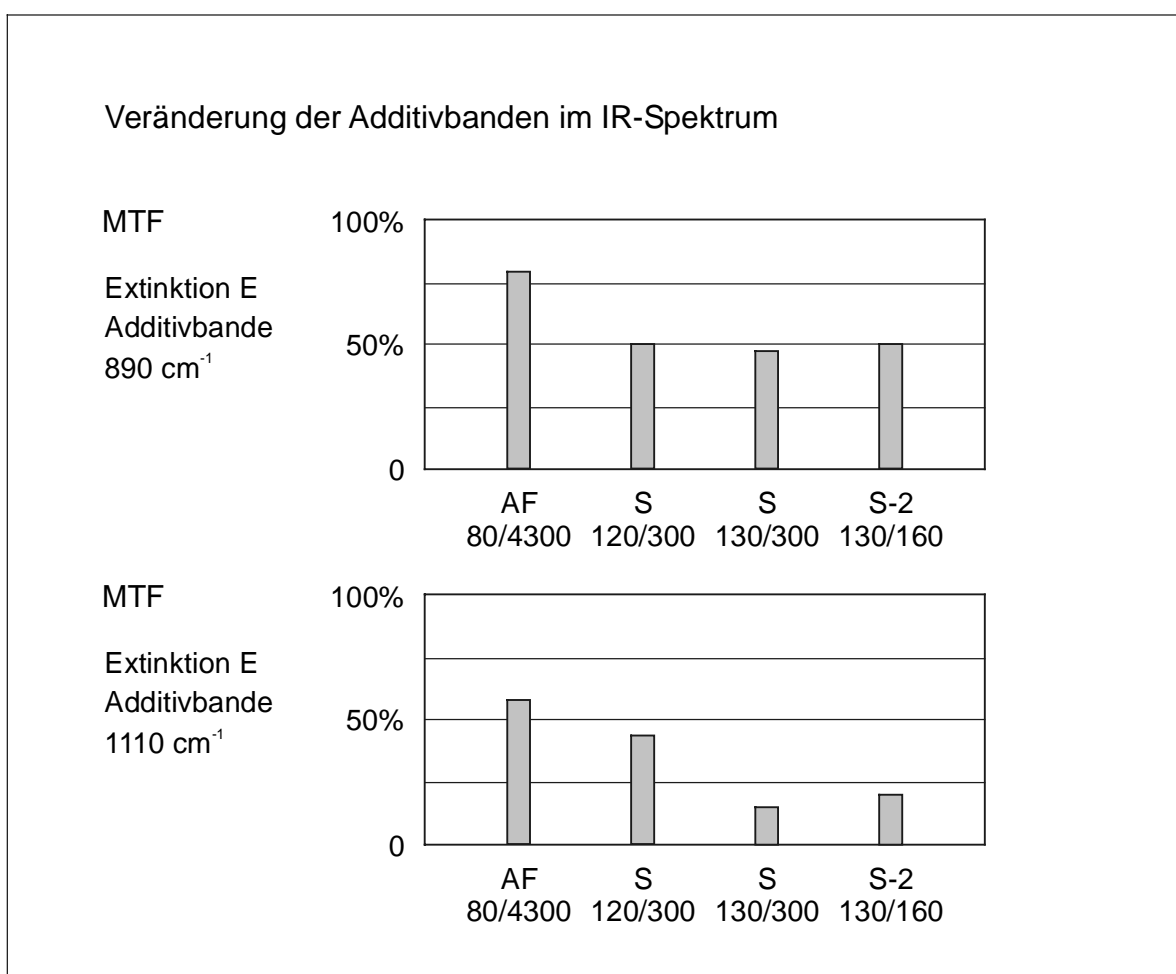


Bild 5.20: Veränderung der Additivbanden des MTF

Für die übrigen Schmierstoffe ergaben sich keine signifikanten Änderungen im Additivbereich der Differenzspektren zwischen Neuöl und gealterten Proben.

In **Bild 5.21** sind die mittels RFA ermittelten Veränderungen der Additiv-Elementgehalte Schwefel, Phosphor und Bor aller Versuchsschmierstoffe zusammengefasst, wobei die Öle ATF und MTF Schwefel auch im Grundöl enthalten.

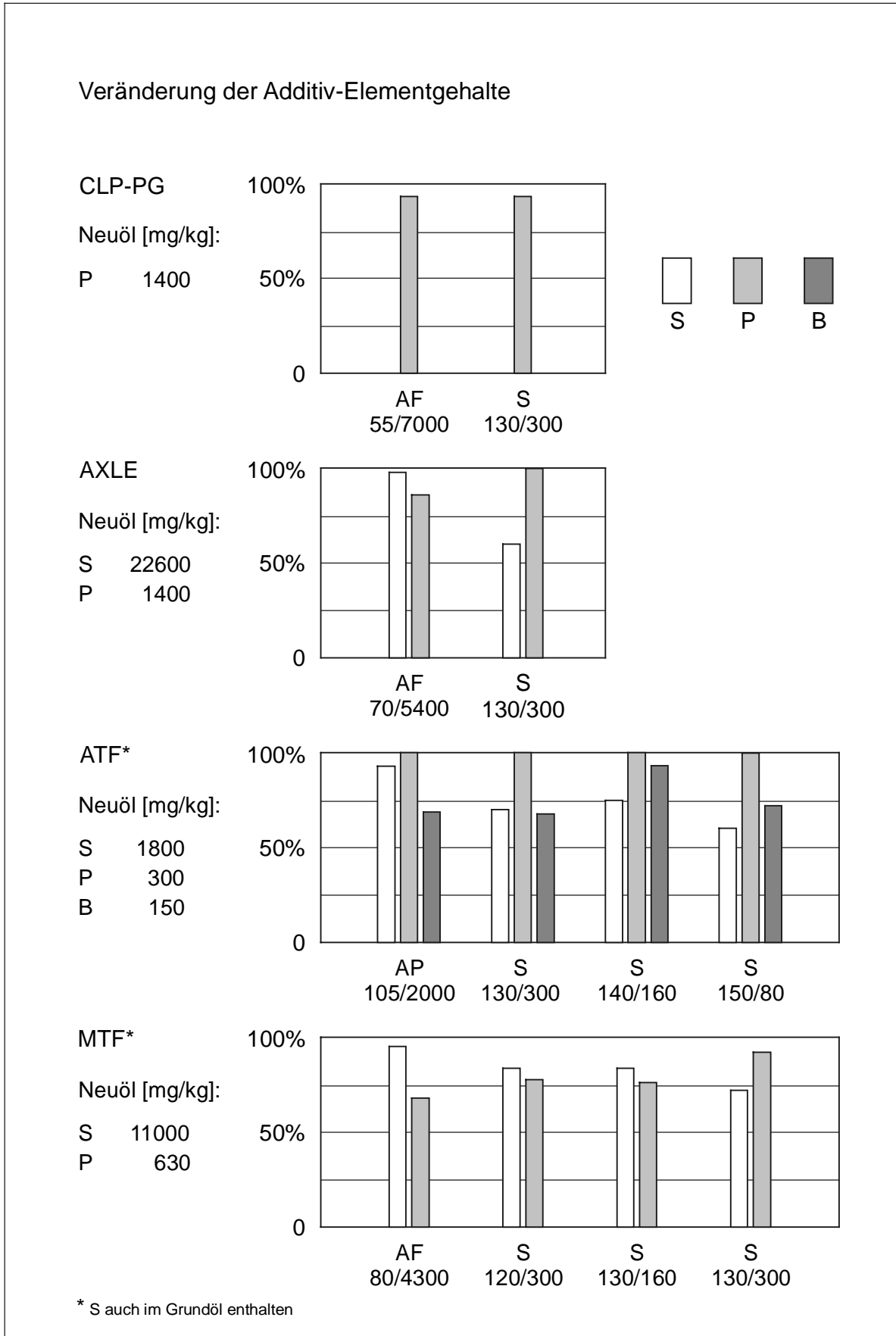


Bild 5.21: Veränderung der Elementgehalte

Das CLP-PG weist weder nach der Alterung in der Anwendung noch im FZG-Prüfstand eine wesentliche Veränderung im Gehalt des Phosphors auf, der für diesen Schmierstoff den maßgeblichen Additivbestandteil darstellt.

Bei dem Hypoidöl AXLE mit Additivierung auf Schwefel-Phosphor-Basis ist nach der Alterung im Fahrzeugachsgetriebe lediglich der Phosphorgehalt um 14% reduziert während der Schwefelgehalt nahezu unverändert zum Neuöl ist. Die im FZG-Prüfstand gealterte Probe zeigt hierzu umgekehrtes Verhalten in Form von deutlicher Reduzierung des Schwefelgehalts um 40% und unverändertem Phosphorgehalt.

Für das ATF liegt nach der Alterung in der Anwendung ein um 7% reduzierter Schwefelgehalt, ein unveränderter Phosphorgehalt sowie ein um 31% reduzierter Borgehalt vor. Die Alterung im FZG-Prüfstand bewirkt einen Schwefelabbau um 25% bis 40%, keine Veränderung des Phosphorgehalts sowie einen Abbau des Bors um ca. 30%, wobei der Borgehalt der bei 140°C gealterten Probe nur um 7% vermindert ist.

Die in der Anwendung im Feld gealterte Probe des MTF zeigt einen um 5% reduzierten Schwefelgehalt und einen um 32% reduzierten Phosphorgehalt. Die Alterung im FZG-Prüfstand ergibt einen Abbau des Schwefel um ca. 16% und des Phosphors um ca. 23%, wobei die 300 h bei 130°C gealterte Probe höheren Phosphor- und geringeren Schwefelgehalt aufweist.

Die Ergebnisse des AXLE, ATF und MTF deuten darauf hin, dass der Schwefel eher durch thermische Beanspruchung im FZG-Prüfstand abgebaut wird, der Phosphor eher in der Anwendung durch den Zahneingriff.

In **Bild 5.22** sind die Ergebnisse der RFA-Untersuchungen bezüglich der typischen Abriebelemente für alle Versuchsschmierstoffe zusammengefasst. Die in der jeweiligen Anwendung gealterten Proben weisen unterschiedliche Anteile an Abriebelementen auf. Das AXLE zeigt hierbei mit annähernd 400 mg/kg Fe-Anteil den höchsten Partikelgehalt, was auf den in einem Achsgetriebe auftretenden Verschleiß zurückzuführen ist. Das ATF ist im Vergleich dazu geringer verunreinigt, wobei der erhöhte Cu-Anteil vermutlich auf den Verschleiß der Anlaufscheiben im Automatikgetriebe zurückzuführen ist. Das MTF zeigt nur geringe Partikelanteile, das CLP-PG ist quasi frei von Abrieb.

Für keine der im FZG-Prüfstand gealterten Proben, die mittels RFA untersucht wurden (vgl. Bild 5.21), wurde ein Anteil der typischen Abriebelemente von mehr als 10 mg/kg festgestellt.

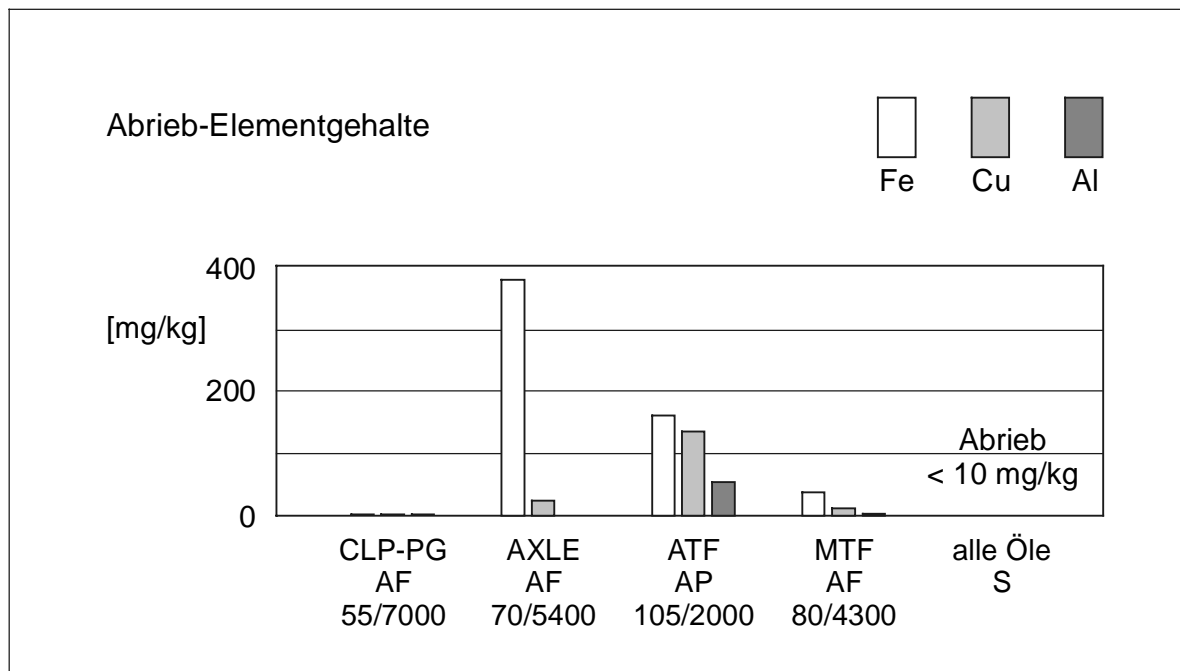


Bild 5.22: Abriebgehalt nach der Alterung

5.2 Ergebnisse der Fresstests

In **Bild 5.23** sind die Ergebnisse der mit dem Schmierstoff CLP-PG durchgeführten Fresstests A10/16,6R/90 dargestellt. Das Neuöl fiel in Kraftstufe 13 aus, wobei 10 Zähne des Ritzels geschädigt waren. Die in der Anwendung im Feld gealterte Probe fiel ebenso wie das Öl nach der Alterung im FZG-Prüfstand in Kraftstufe 12 aus bei Schädigung aller Ritzelzähne. Der Unterschied zwischen Neuöl und Gebrauchtölen im Hinblick auf die Fresstragfähigkeit ist als gering zu bewerten.

Bild 5.24 zeigt die Ergebnisse der mit dem Schmierstoff AXLE durchgeführten Sprungtests S-A10/16,6R/90. Im Neuzustand zeigte das Öl nach schadensfreien Tests in Kraftstufe 10 und 11 auch in Kraftstufe 12 keinen Fressschaden. Das in der Anwendung gealterte Öl ergab in Kraftstufe 12 einen Schaden an zwei Zähnen des Ritzels, der nach dem Kriterium Gesamtschadensbreite > 10 mm eindeutig als Fresser zu werten ist. Das im Rahmen von ISO diskutierte, möglicherweise zukünftig anzuwendende Kriterium Gesamtschadensfläche > 100 mm² wurde mit ca. 80 mm² noch nicht erreicht. Das im FZG-Prüfstand bei 130°C über 300 h gealterte Öl zeigte in Kraftstufe 12 an allen Zähnen des Ritzels Fressschäden. Der Test in Kraftstufe 11 verlief nach beiden o.g. Kriterien schadensfrei.

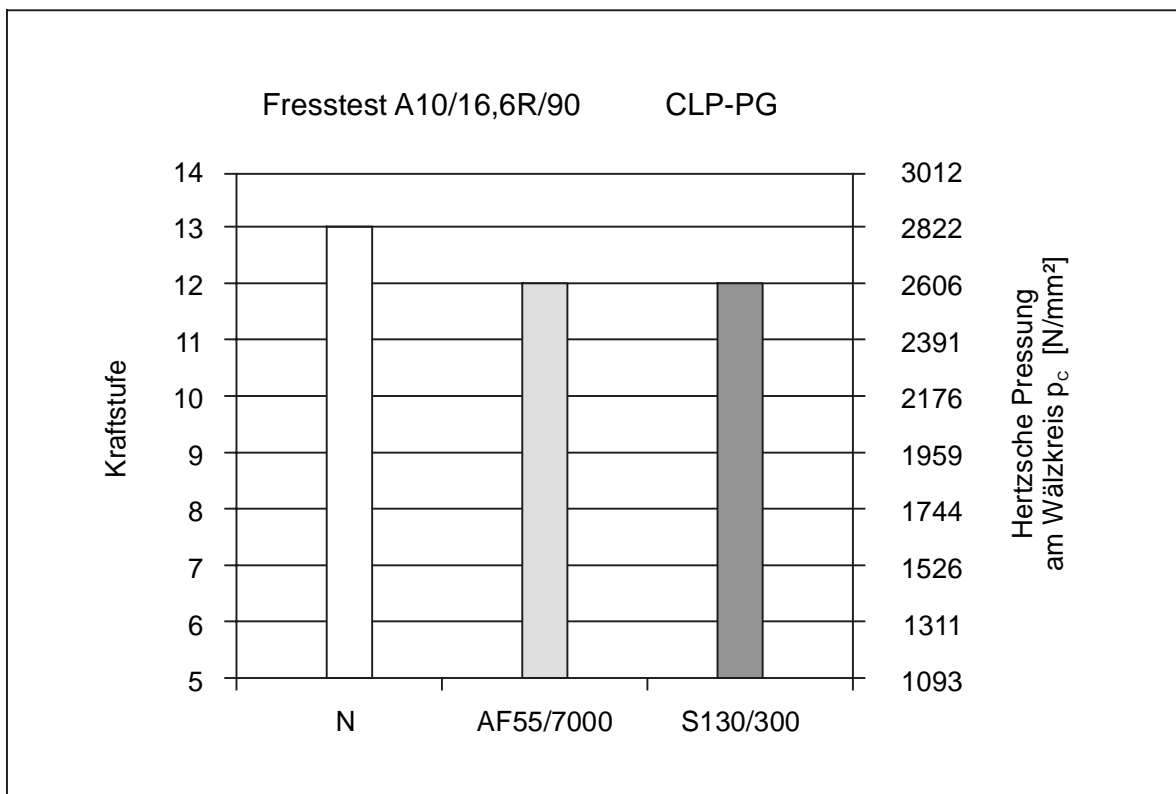


Bild 5.23: Fressstestergebnisse, CLP-PG

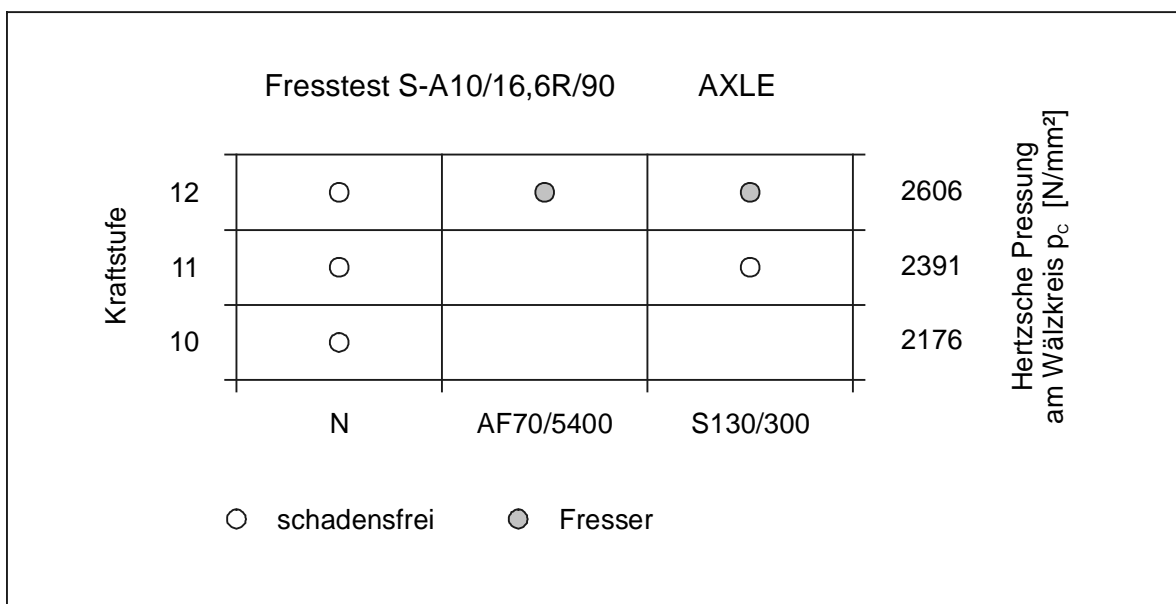


Bild 5.24: Fressstestergebnisse, AXLE

Der Schmierstoff AXLE wurde zusätzlich im Hypoidölttest A untersucht. Die Ergebnisse sind in **Bild 5.25** dargestellt. Mit dem Neuöl wurde die 11. Laststufe schadensfrei durchlaufen. Das in der Anwendung gealterte Öl AF zeigte einen leichten Fressschaden nach Laststufe 11. Bei dem im FZG-Prüfstand bei 130°C gealterten Öl trat bereits in Laststufe 10 ein leichter Fressschaden auf. In Laststufe 11 fand ein Wie-

derinlaufen der Verzahnung statt. Das Öl wäre im Gegensatz zu der in der Anwendung gealterten Probe gerade nicht mehr in API-Klasse GL5 einzuordnen. Hinsichtlich des Verschleißverlaufs unterscheiden sich die drei Öle bis zur 8. Laststufe nur unwesentlich. Danach weisen die im FZG-Prüfstand gealterte Probe und das Öl aus der Anwendung einen steileren Anstieg im Verschleiß als das Neuöl auf. In den Temperaturkurven fällt der Fresser des im FZG-Prüfstand gealterten Öls in der 10. Laststufe auf sowie der Abfall der Öltemperatur in der 10. Laststufe für das Öl aus der Anwendung.

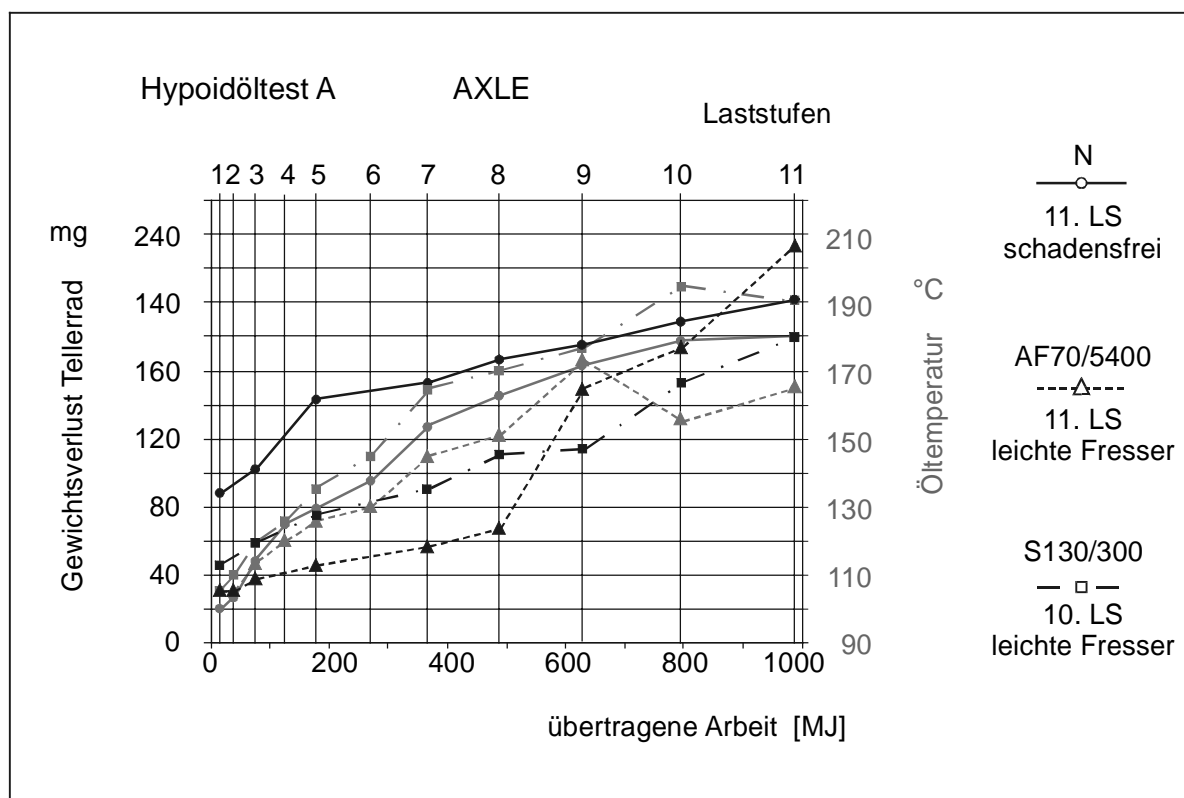


Bild 5.25: Hypoidöltestergebnisse, AXLE

In **Bild 5.26** sind die Ergebnisse der mit dem Schmierstoff ATF durchgeführten Fressstests A8,3/90 dargestellt. Das Neuöl erreichte im Erstversuch die Schadenskraftstufe 10. Bei Wiederholungsversuchen trat der Fressschaden in den Schadenskraftstufen 12 bzw. 13 ein. Eine Streuung von 3 Kraftstufen ist für dieses Testverfahren ungewöhnlich. In der Regel tritt bei Wiederholungsversuchen eine Abweichung von maximal einer Kraftstufe auf. Die Ergebnisse von Schadenskraftstufe 12 bzw. 13 entsprechen den Erfahrungen bei Fa. ZF, womit der Versuch mit Kraftstufe 10 als Ausreißer anzusehen ist. Das Öl, das in der Anwendung gealtert wurde, fiel bereits bei Kraftstufe 8 bei einer Hertzschen Pressung im Wälzpunkt von 1232 N/mm^2 aus. Das im FZG-Prüfstand 300 h bei 130°C gealterte Öl erreichte ebenso wie die bei

140°C gealterte Probe Schadenskraftstufe 9 entsprechend einer Hertzschen Pressung im Wälzpunkt von 1386 N/mm².

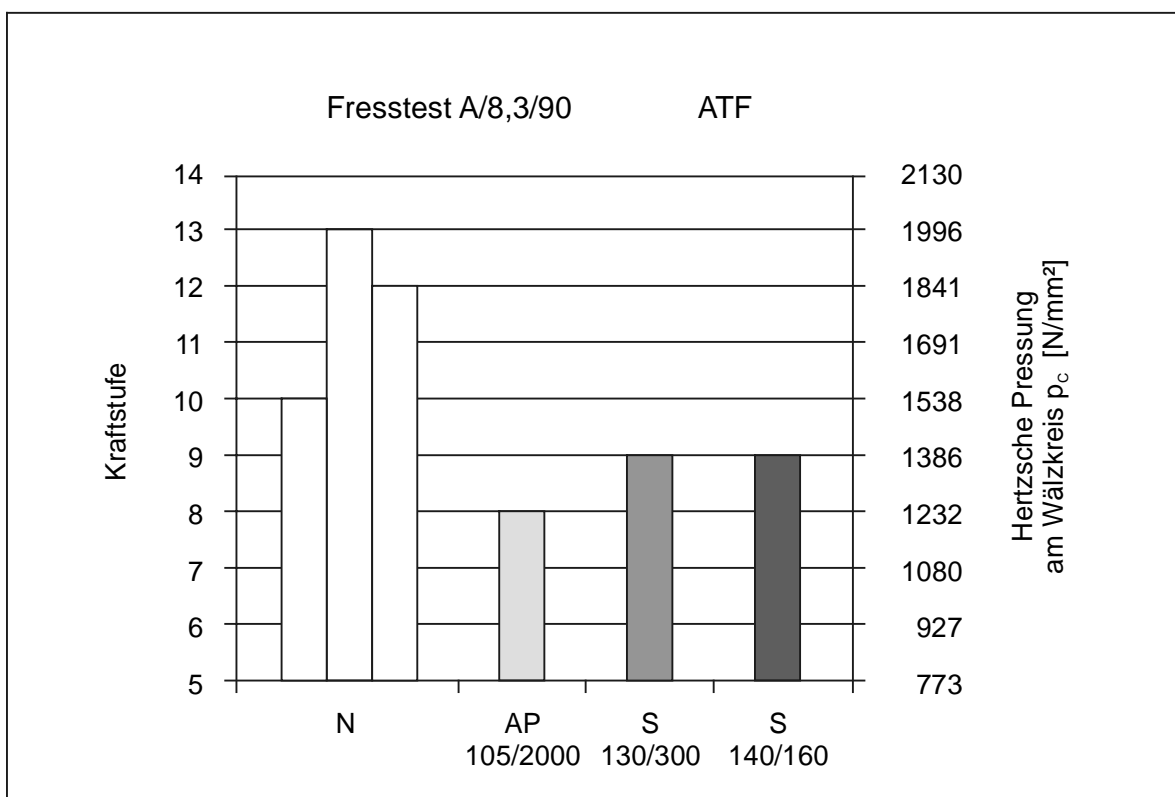


Bild 5.26: Fresstestergebnisse, ATF

Bild 5.27 zeigt die Ergebnisse der mit dem Schmierstoff MTF durchgeführten Fresstests A10/16,6R/90. Im Neuzustand fiel das Öl in Kraftstufe 12 bei einer Hertzschen Pressung im Wälzpunkt von 2606 N/mm² aus. Das in der Anwendung gealterte Öl fiel ebenso wie das im FZG-Prüfstand bei 130°C über 160 h gealterte Öl in Kraftstufe 8 aus entsprechend einer Hertzschen Pressung im Wälzpunkt von 1744 N/mm². Die bei 120°C im FZG-Prüfstand gealterte Probe erreicht Kraftstufe 11 und weist damit eine nur wenig verringerte Fresstragfähigkeit im Vergleich zum Neuöl auf.

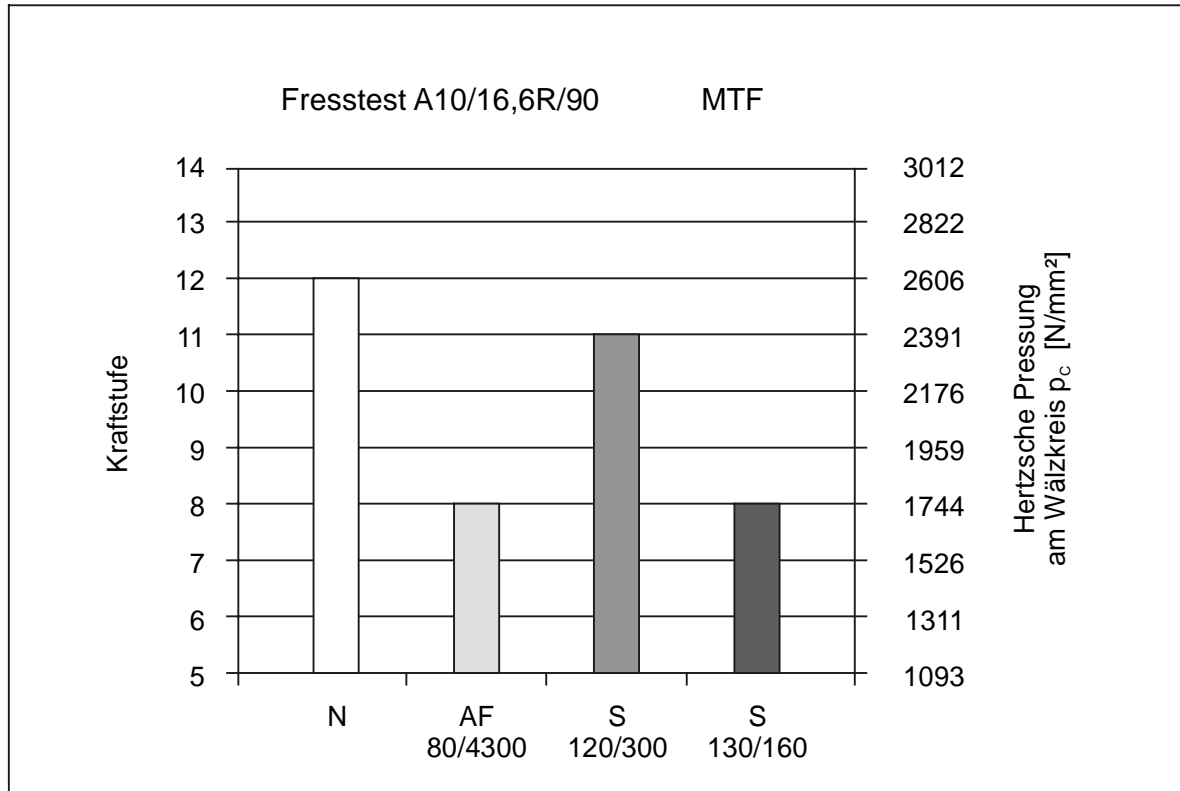


Bild 5.27: Frettestergebnisse, MTF

5.3 Ergebnisse der Pittingtests

In den **Bildern 5.28** und **5.29** sind die Ergebnisse der Pittingtests mit den Schmierstoffen ATF und MTF dargestellt. Voraussetzung für die Durchführung eines Pittingtests nach dem Standardtestverfahren C/9/90 ist eine Fresstragfähigkeit von Fresslaststufe > 9 im FZG-Fresstest. Diese Voraussetzung war für den Schmierstoff ATF im Neuzustand erfüllt. Dennoch traten mit dem ATF in mehreren Versuchen Fresser auf. Daher wurde das ATF abweichend von den Standardtestbedingungen C/9/90 bei nur halber Umfangsgeschwindigkeit $v = 4,15 \text{ m/s}$ entsprechend einer Raddrehzahl $n_2 = 750 \text{ min}^{-1}$ geprüft.

Das in der Anwendung gealterte ATF-AP erreicht mit annähernd 11 Mio. Lastspielen am Ritzel nahezu dieselbe Lastwechselzahl für 50% Ausfallwahrscheinlichkeit LW_{50} wie das Neuöl. Die Streuung der Ergebnisse des Neuöls sowie der in der Anwendung gealterten Probe ist relativ hoch. Das im FZG-Prüfstand 300 h bei 130°C gealterte Öl erreichte eine Lastwechselzahl für 50% Ausfallwahrscheinlichkeit LW_{50} von 10,4 Mio. Lastspielen bei sehr hoher Streuung der Ergebnisse. Die Graufleckigkeit der Ritzel und Räder lag bei allen Proben unter 20% der aktiven Flankenflächen. Insgesamt ist die Grübchentragfähigkeit des ATF durch die Alterung nicht beeinträchtigt.

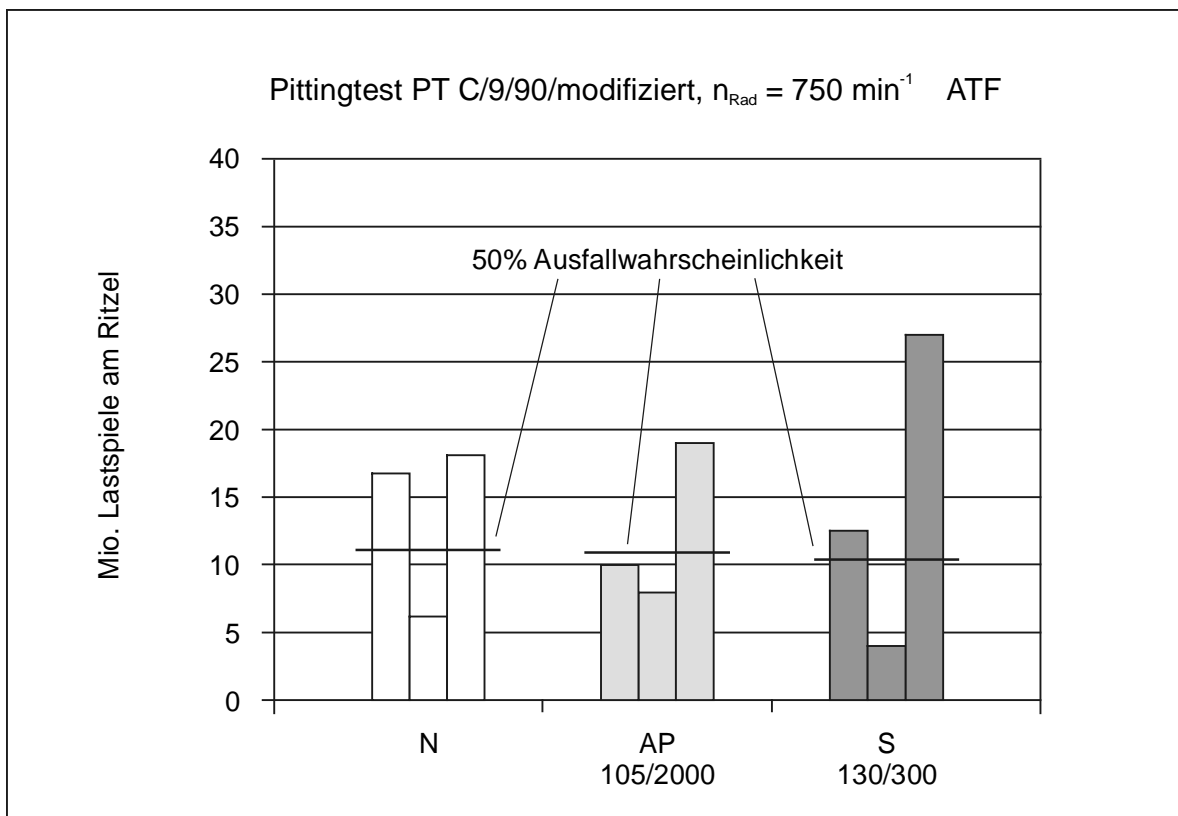


Bild 5.28: Pittingtestergebnisse, ATF

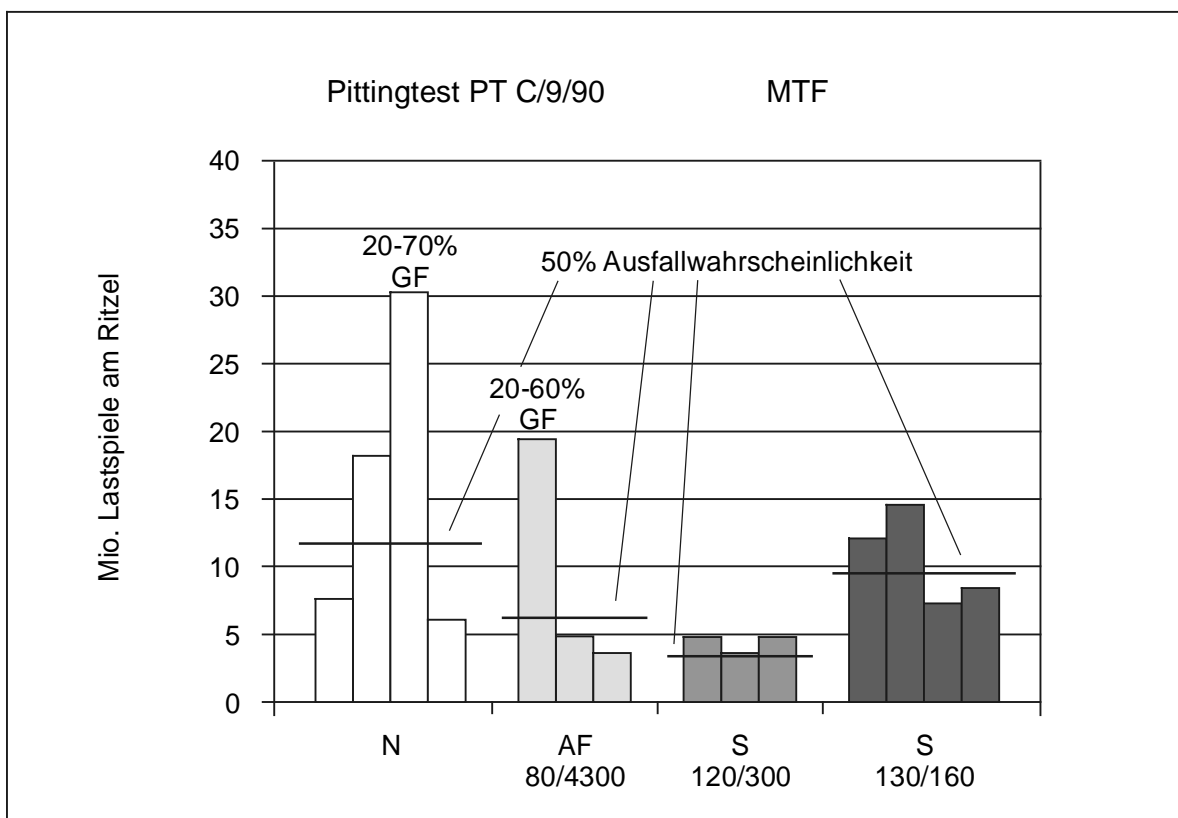


Bild 5.29: Pittingtestergebnisse, MTF

Das MTF erreicht im Neuzustand eine Lastwechselzahl für 50% Ausfallwahrscheinlichkeit LW_{50} von 11,7 Mio. Lastspielen am Ritzel und liegt damit im Bereich des Neuöls des ATF. Die Streuung der Versuchsergebnisse ist allerdings sehr hoch. Im dritten Versuchslauf trat starke Graufleckenbildung des Ritzels und des Rades ein, wodurch die Grübchenlebensdauer im Vergleich zu den übrigen Versuchen deutlich anstieg. Das in der Anwendung gealterte MTF erreicht mit 6,2 Mio. Lastspielen am Ritzel nur etwa die halbe Grübchenlebensdauer des Neuöls. Auch hierbei wurde bei einem Versuch starke Graufleckenbildung beobachtet, was zu einer Verlängerung der Grübchenlebensdauer im Vergleich zu den übrigen Versuchen führte. Die im FZG-Prüfstand gealterten Proben sind durch geringere Streuungen gekennzeichnet. Die Lebensdauer liegt nach der Alterung bei 120°C nochmals niedriger als nach der Alterung in der Anwendung. Die Alterung bei 130°C erreicht mit knapp 9,5 Mio. Lastspielen am Ritzel eine Grübchenlebensdauer, die zwischen der des Neuöls und der des Öls aus der Feldalterung liegt.

5.4 Ergebnisse der Graufleckentests

Die Ergebnisse der mit dem Schmierstoff CLP-PG durchgeführten Graufleckentests GF-C/8,3/90 sind in **Bild 5.30** dargestellt. Im Stufentest zeigen das Neuöl und die gealterten Öle keinerlei Unterschiede in ihrer Graufleckentragfähigkeit. Der Ausfall erfolgt in Kraftstufe 9. Im anschließenden Dauertest steigt die mittlere Profilformabweichung f_{fm} in der Kraftstufe 8 für alle Öle nur geringfügig an. In Kraftstufe 10 nehmen die Auskolkungen am Ritzelfuß für das Neuöl und die in der Anwendung gealterte Probe AF nach 80 h stark zu. Das im FZG-Prüfstand bei 130°C gealterte Öl zeigt im Dauertest nach der Erhöhung der Last von Kraftstufe 8 auf 10 einen geringeren Anstieg der Auskolkungen. Im weiteren Testverlauf nimmt die mittlere Profilformabweichung f_{fm} nur mäßig zu. Ein Ausfall im Dauertest infolge einer mittleren Profilformabweichung f_{fm} von mehr als 20 μm wurde nicht erreicht.

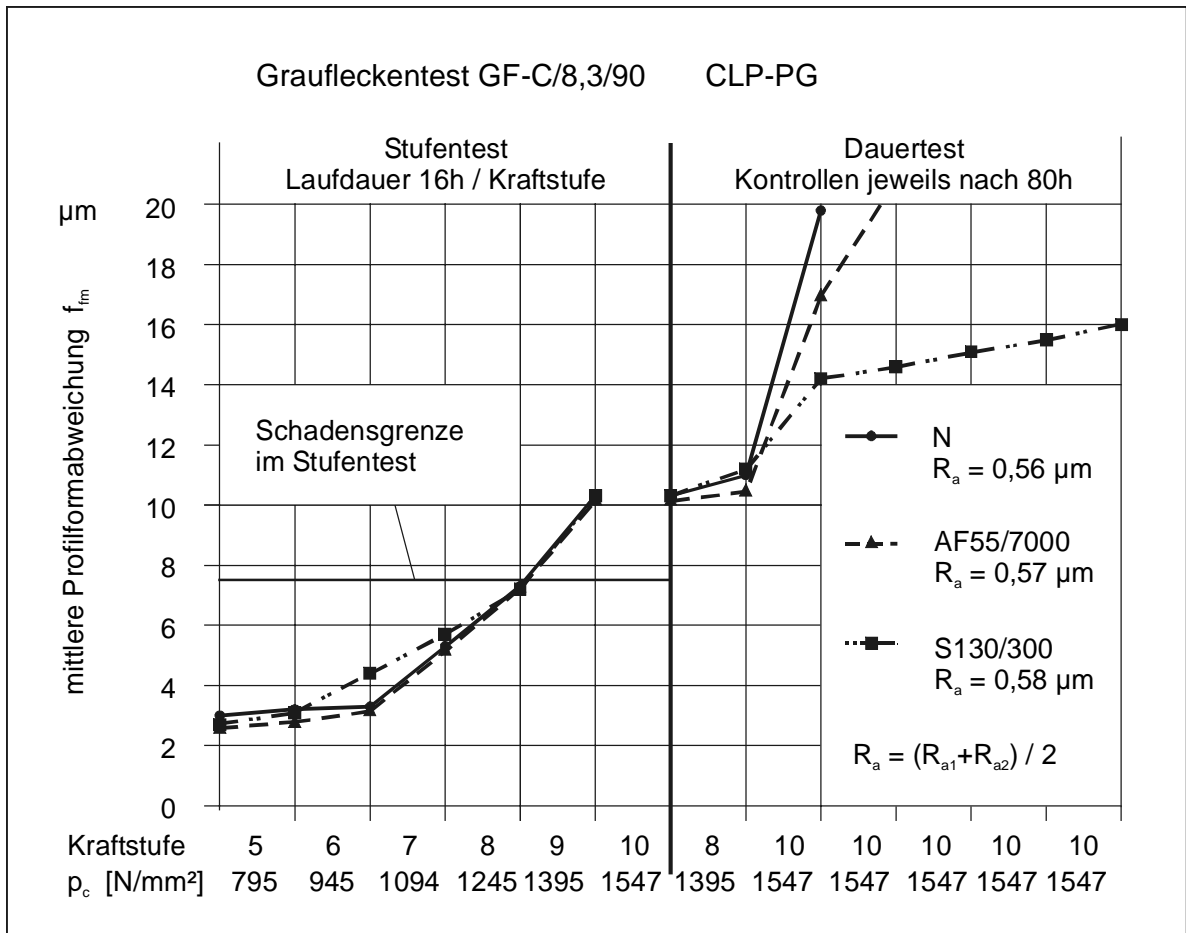


Bild 5.30: Graufleckentestergebnisse, CLP-PG

5.5 Ergebnisse der Synchronisationstests

Das MTF wurde im Synchronisierungs-Prüfverfahren SPV auf dem Standard-Synchronisationsprüfstand SSP-180 untersucht. In Einstufen-Dauerschaltversuchen wurde die ausgewählte Synchronisierung bei Öleinspritztemperatur von 80°C bis zum reproduzierbaren Ratschen gefahren. Es kamen zwei Synchronisierungen nach System Borg-Warner mit den Ring-Werkstoffen Streusinter und Karbon zum Einsatz. Die Ergebnisse der Versuche mit Streusinter sind in **Bild 5.31** zusammengefasst.

Mit dem Reibwerkstoff Streusinter (Bild 7.31) fallen die Synchronisierungen mit Neuöl nach 70.500 Schaltungen durch Axialverschleiß und nach 56.200 Schaltungen durch Reibungszahlabfall aus. Mit dem in der Anwendung gealterten Öl sinken die Lebensdauern auf 13.600 bzw. 15.900 Schaltungen. Die Ausfallsursache ist jeweils Reibungszahlabfall. Das im FZG-Prüfstand bei 120°C über 300 h Laufzeit gealterte Öl erreicht 8200 bzw. 30700 Schaltungen, das bei 130°C über 300 h Laufzeit geal-

terte Öl erreicht 7200 bzw. 9800 Schaltungen, wobei jeweils Reibungszahlabfall die Ausfallursache darstellt.

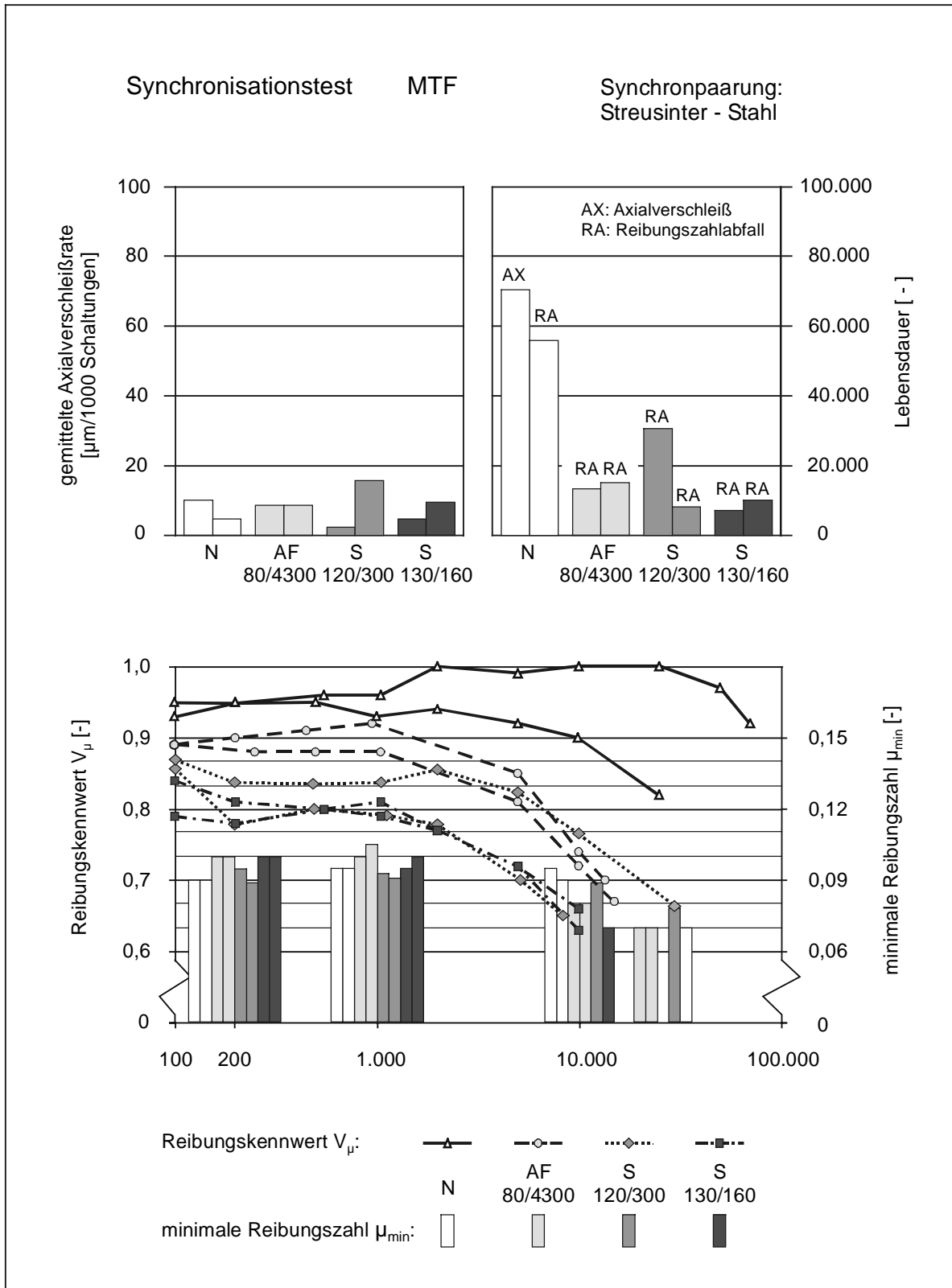


Bild 5.31: Synchronisationstestergebnisse Streusinter/Stahl, MTF

Die gemittelten Axialverschleißraten liegen sowohl bei dem Neuöl als auch bei den gealterten Proben mit ca. 5...10 $\mu\text{m}/1000$ Schaltungen auf demselben Niveau. Das Reibungszahnniveau ist mit dem feldgealterten Öl AF sowie dem bei 130°C im FZG-Prüfstand gealterten Öl S130/160 gegenüber dem Neuöl bis Schaltung 1000 tendenziell erhöht. Danach fallen die minimalen Reibungszahlen jeweils deutlich unter das Niveau des Neuöls. Das bei 120°C gealterte Öl gleicht im Reibungszahlverlauf dem Neuöl.

Bereits bei niedrigen Schaltungszahlen ist ein deutlicher Unterschied zwischen Neu- und gealterten Ölen im Reibungskennwert V_μ nach [54] zu verzeichnen. V_μ wird als Quotient der minimalen Reibungszahl μ_{\min} und der Reibungszahl $\mu_{0,5}$ bei Gleitgeschwindigkeit 0,5 m/s gebildet. Die bei Gleitgeschwindigkeit $v_g = 0,5$ m/s ermittelte Reibungszahl $\mu_{0,5}$ charakterisiert das Verhalten der Synchronpaarung im Grenzreibungsgebiet. Ein Reibungskennwert $V_\mu \approx 1$ kennzeichnet ein günstiges, von der Reibungszahl unabhängiges Reibungsverhalten. Ein Reibungskennwert $V_\mu < 1$ kennzeichnet ein ungünstiges, von der Reibungszahl abhängiges Reibungsverhalten.

Der Unterschied im Reibungskennwert V_μ zwischen Neu- und gealterten Ölen deutet auf einen veränderten Grenzschichtaufbau im Reibkontakt hin. Dieser beeinflusst die Reibungszahl für $v_g \rightarrow 0$, nicht aber die minimalen Reibungszahlen. Insgesamt ist das Verhalten der gealterten Öle in den Streusinter-Synchrontests sehr ähnlich und unterscheidet sich deutlich vom Neuöl.

Die Ergebnisse der Versuche mit Karbon sind in **Bild 5.32** zusammengefasst. Mit dem Reibwerkstoff Karbon fallen die Synchronisierungen mit Neuöl nach 29.900 und 43.700 Schaltungen durch Reibungszahlabfall aus. Für das in der Anwendung gealterte Öl sinken die Lebensdauern auf 15.100 bzw. 29.700 Schaltungen mit Ausfallursache Reibungszahlabfall. Die im FZG-Prüfstand bei 120°C und 130°C gealterten Proben fallen dagegen nicht aus, sondern erreichen jeweils 100.000 Schaltungen. Nach den zunächst durchgeführten Versuchen mit dem S130/160 wurde ein Einfluss des bei der Alterung aufgrund der Schaumbildung hinzugefügten Silikonöls vermutet. Der Stichversuch mit dem S120/300, das ohne Zugabe von Silikonöl gealtert werden konnte, zeigt, dass das Silikonöl nicht ursächlich für das Erreichen der 100.000 Schaltungen sein kann.

Das Reibungszahnniveau des Neuöls ist zu Beginn des Tests gegenüber den gealterten Ölen geringfügig erhöht. Bei 10.000 Schaltungen zeigen das Neuöl und das in der Anwendung gealterte Öl annähernd gleiches Reibungszahnniveau. Im weiteren Verlauf des Tests fallen die Reibungszahlen für diese Öle weiter ab, wonach schließlich der Ausfall der Synchronisierung folgt.

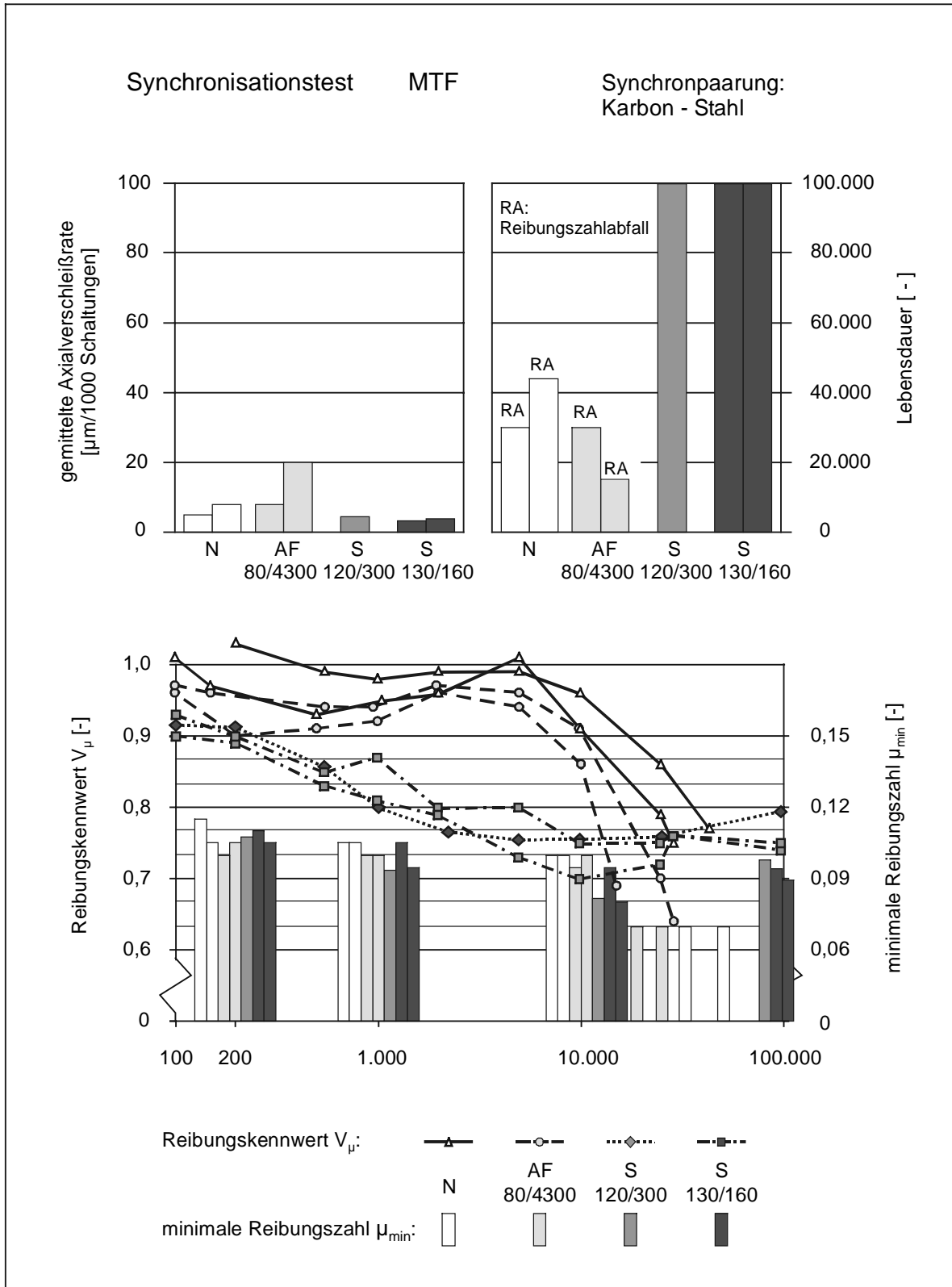


Bild 5.32: Synchronisationstestergebnisse Karbon/Stahl, MTF

Die im FZG-Prüfstand gealterten Öle weisen bereits bei 10.000 Schaltungen ein vergleichsweise geringes Reibungszahlniveau auf. Dieses Niveau fällt im weiteren Testverlauf jedoch nicht weiter ab, so dass die Funktion der Synchronisierung bis zum Testende nach 100.000 Schaltungen erhalten bleibt.

Im Reibungskennwert V_{μ} findet sich eine analoge Korrelation zwischen Neuöl und dem in der Anwendung gealterten Öl. Die Verläufe mit einem charakteristischen Abfall nahe 10.000 Schaltungen sind sehr ähnlich. Demgegenüber ist für die im FZG-Prüfstand gealterten Öle bis 10.000 Schaltungen ein Abfall auf ein Niveau feststellbar, welches dann bis zum Testende annähernd konstant bleibt.

Offensichtlich liegt das im FZG-Prüfstand gealterte Öl knapp oberhalb der Sperrgrenze der Testsynchronisierungen, das Öl aus der Feldalterung zum Zeitpunkt des Ausfalls knapp darunter. Nur so lässt sich das Erreichen der hohen Schaltungszahl für das im FZG-Prüfstand gealterte Öl bei den vorliegenden Werten der minimalen Reibungszahl μ_{\min} und insbesondere der Kennwerte V_{μ} erklären.

5.6 Ergebnisse der Wandler-Kupplungs-Tests

Bei Fa. ZF Friedrichshafen wurde der Schmierstoff ATF in einem GWK-Tribometertest untersucht. Dieser dient zur Ermittlung der Reibverhaltens eines Schmierstoffs in einer geregelten Wandlerkupplung. Die Ergebnisse sind in **Bild 5.33** dargestellt.

Das Neuöl als Referenzöl zeigt einen leicht ansteigenden Verlauf der Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit. Für das in der Anwendung gealterte Öl wurde ein leicht erhöhtes Reibungszahlniveau festgestellt bei geringer Veränderung der Reibungscharakteristik. Das im FZG-Prüfstand bei 130°C gealterte Öl weist ein erhöhtes Reibungszahlniveau auf bei deutlich abfallendem Verlauf der Reibungszahl. Eine abfallende Reibungscharakteristik kann im Praxisbetrieb zu Reibschwingungen führen. Das im FZG-Prüfstand bei 140°C gealterte Öl zeigt im Gegensatz zu den anderen gealterten Proben einen ansteigenden Verlauf der Reibungszahl über der Gleitgeschwindigkeit.

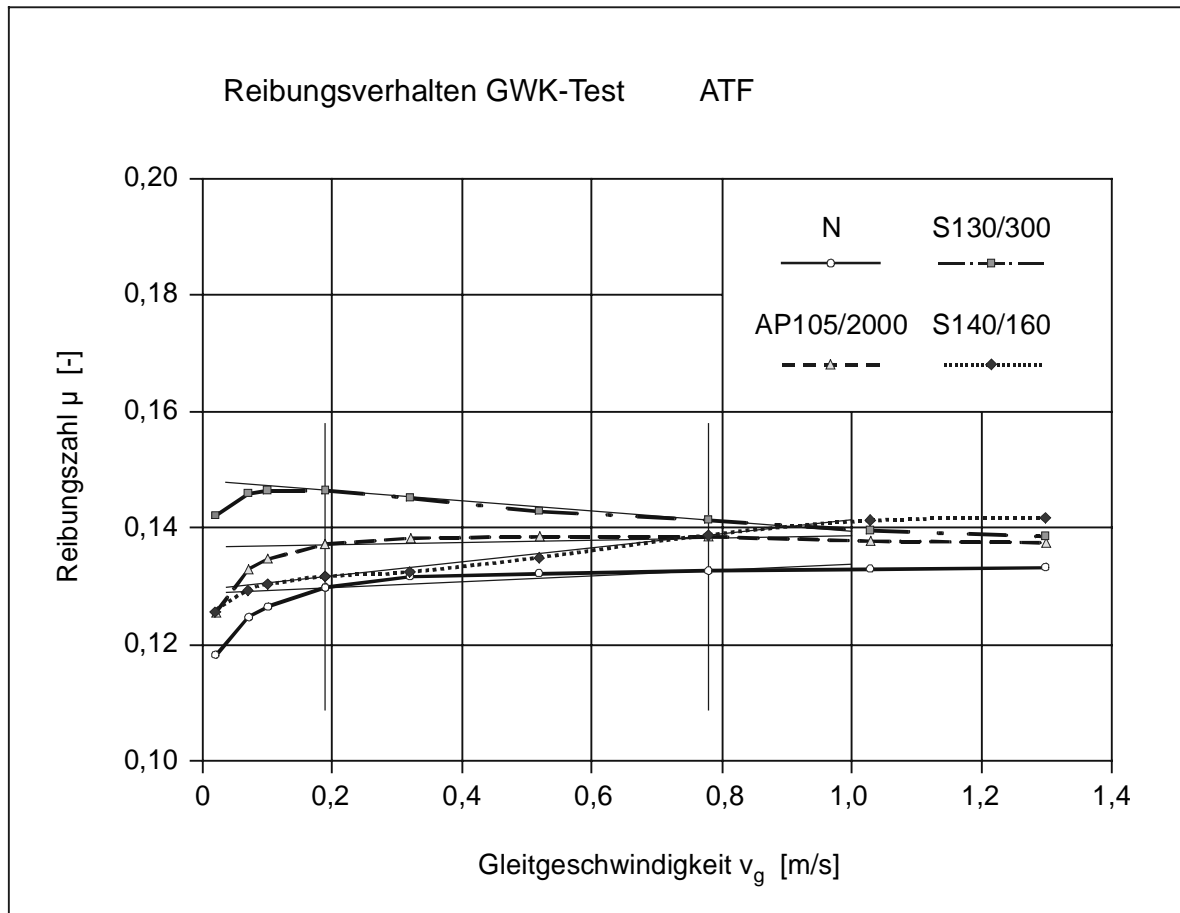


Bild 5.33: Ergebnisse Wandler-Kupplungs-Test, ATF

5.7 Übersichtsdarstellung der Ergebnisse

In den **Bildern 5.34 bis 5.37** sind die Ergebnisse jedes Schmierstoffs zusammengefasst als Übersicht dargestellt.

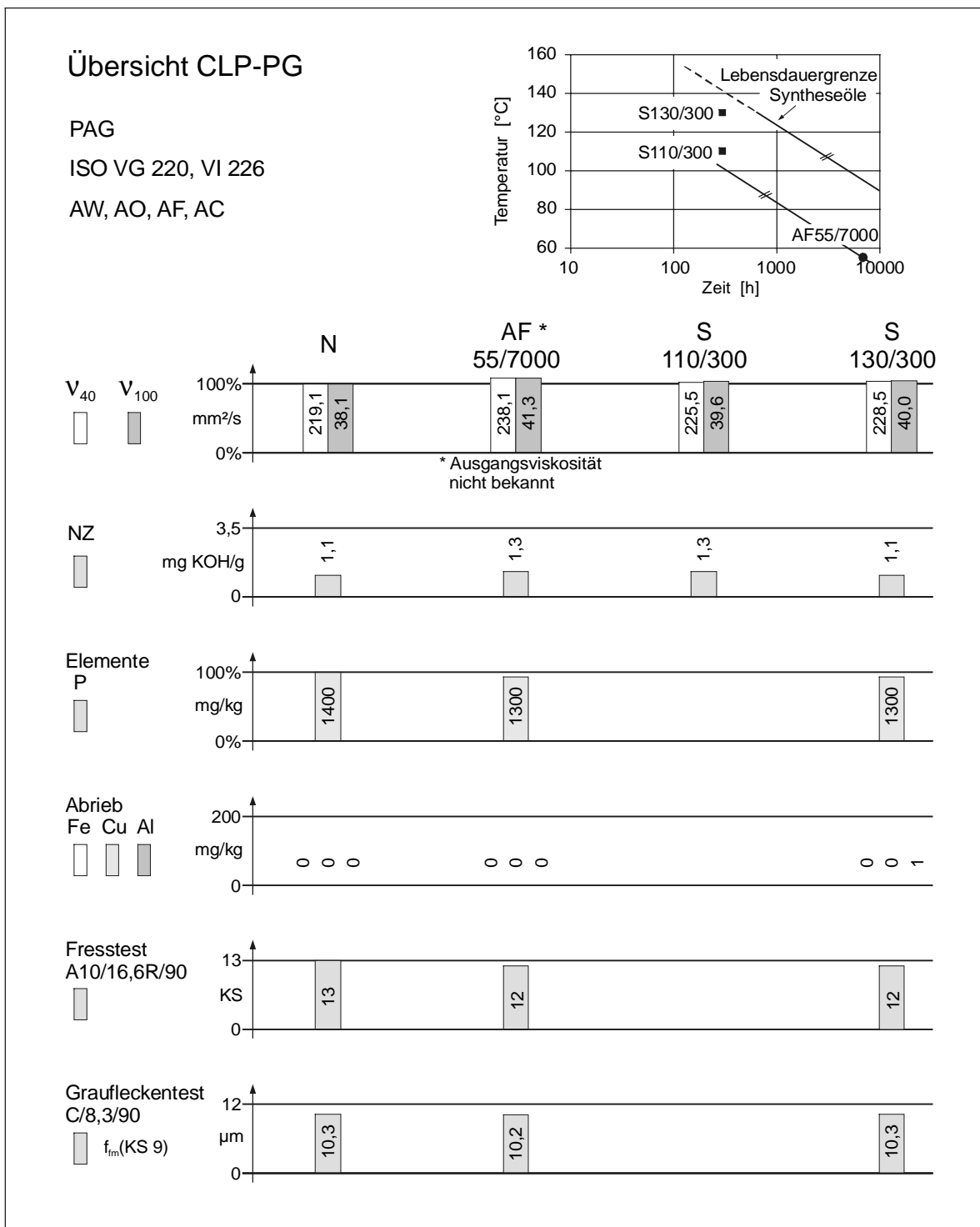


Bild 5.34: Ergebnisse CLP-PG

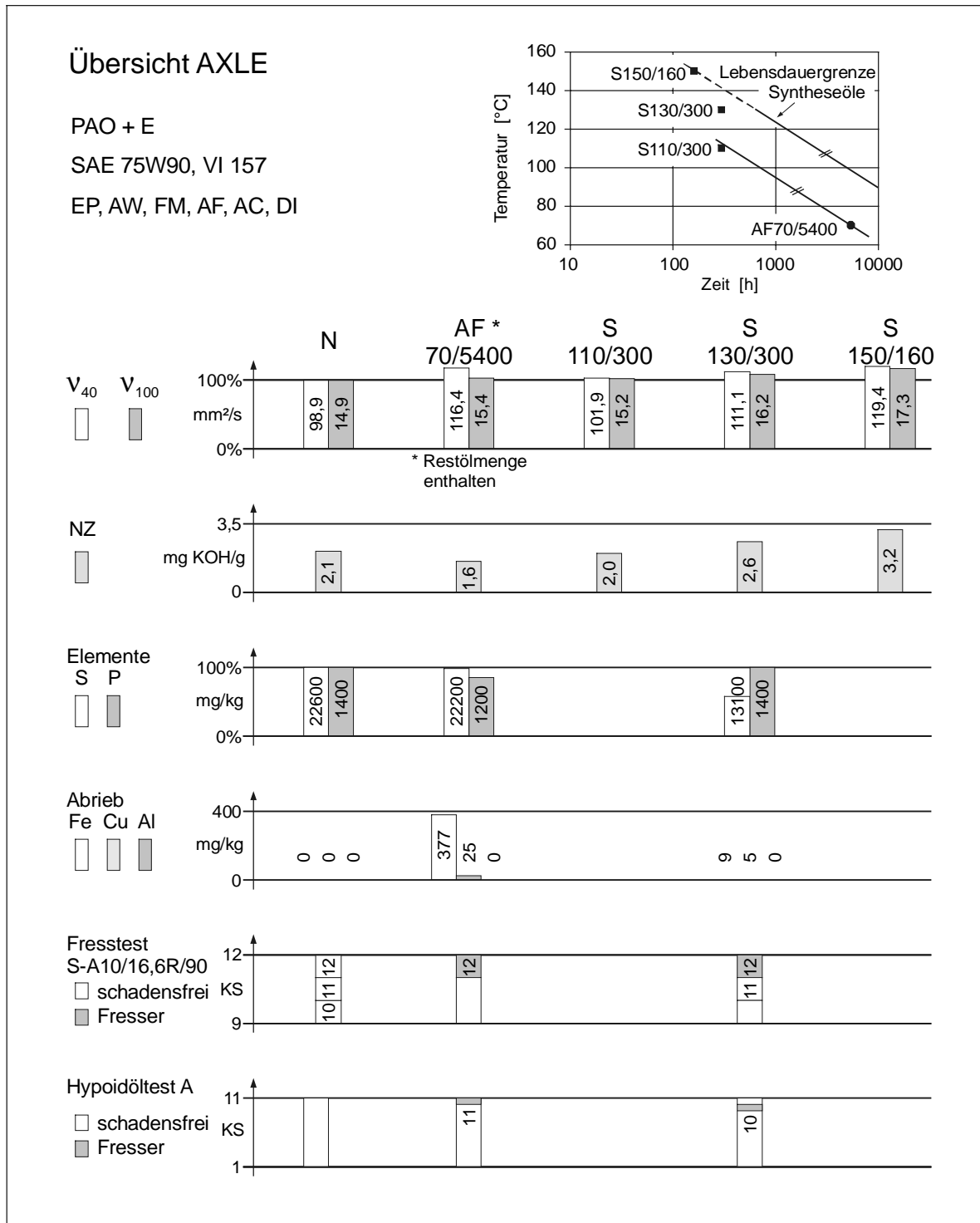


Bild 5.35: Ergebnisse AXLE

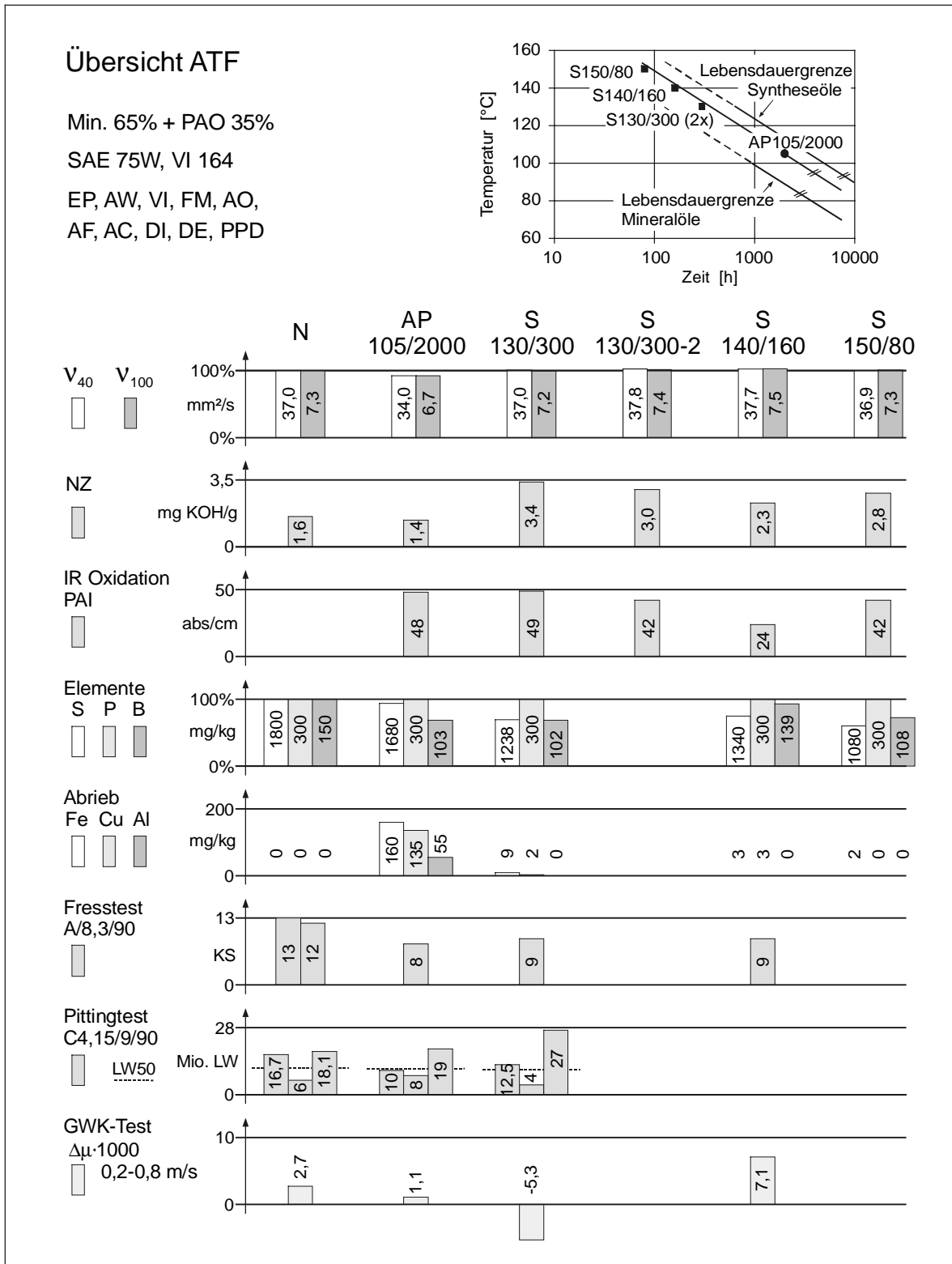


Bild 5.36: Ergebnisse ATF

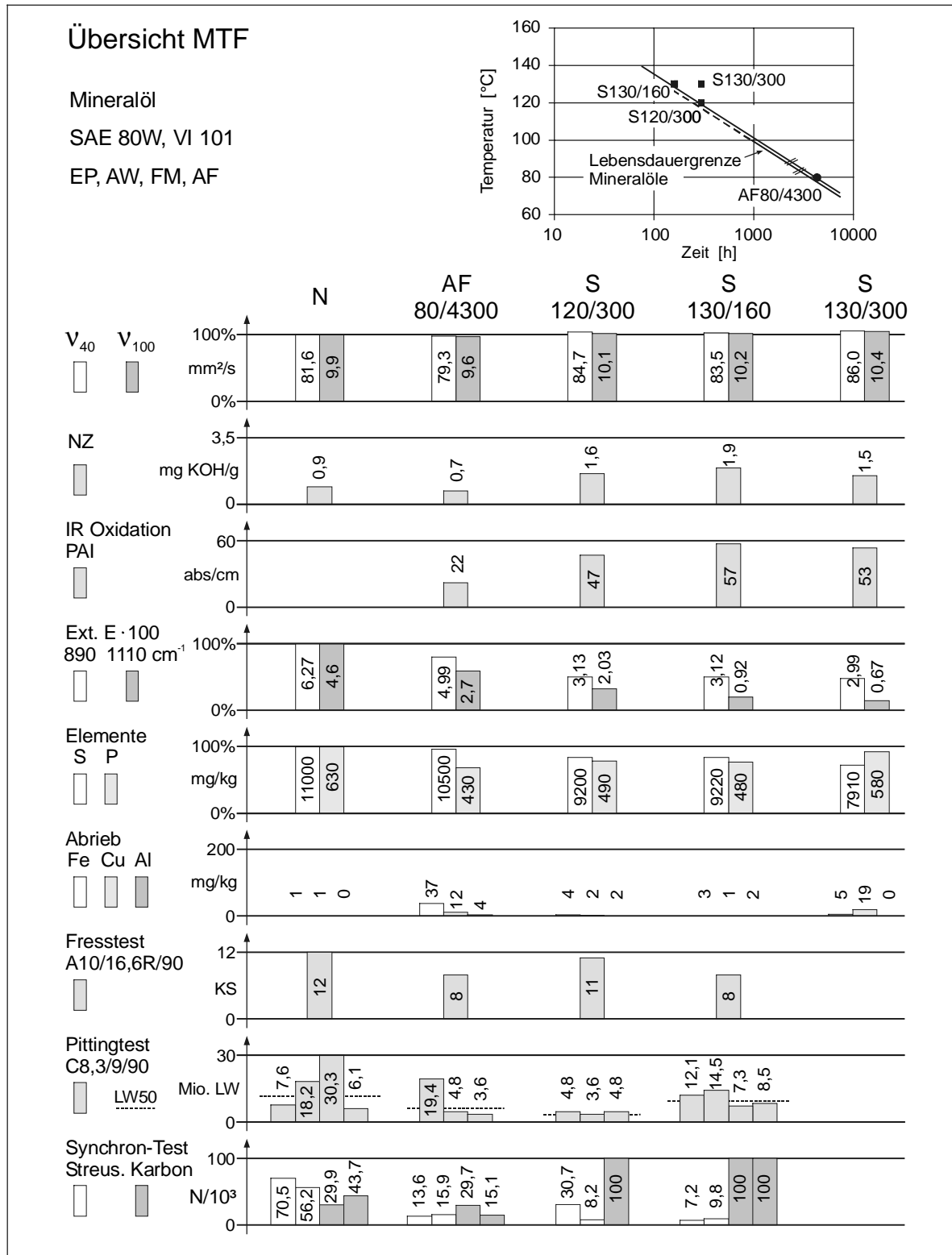


Bild 5.37: Ergebnisse MTF

5.8 Ergänzende Schmierstoffuntersuchungen

5.8.1 Luftabscheidevermögen LAV

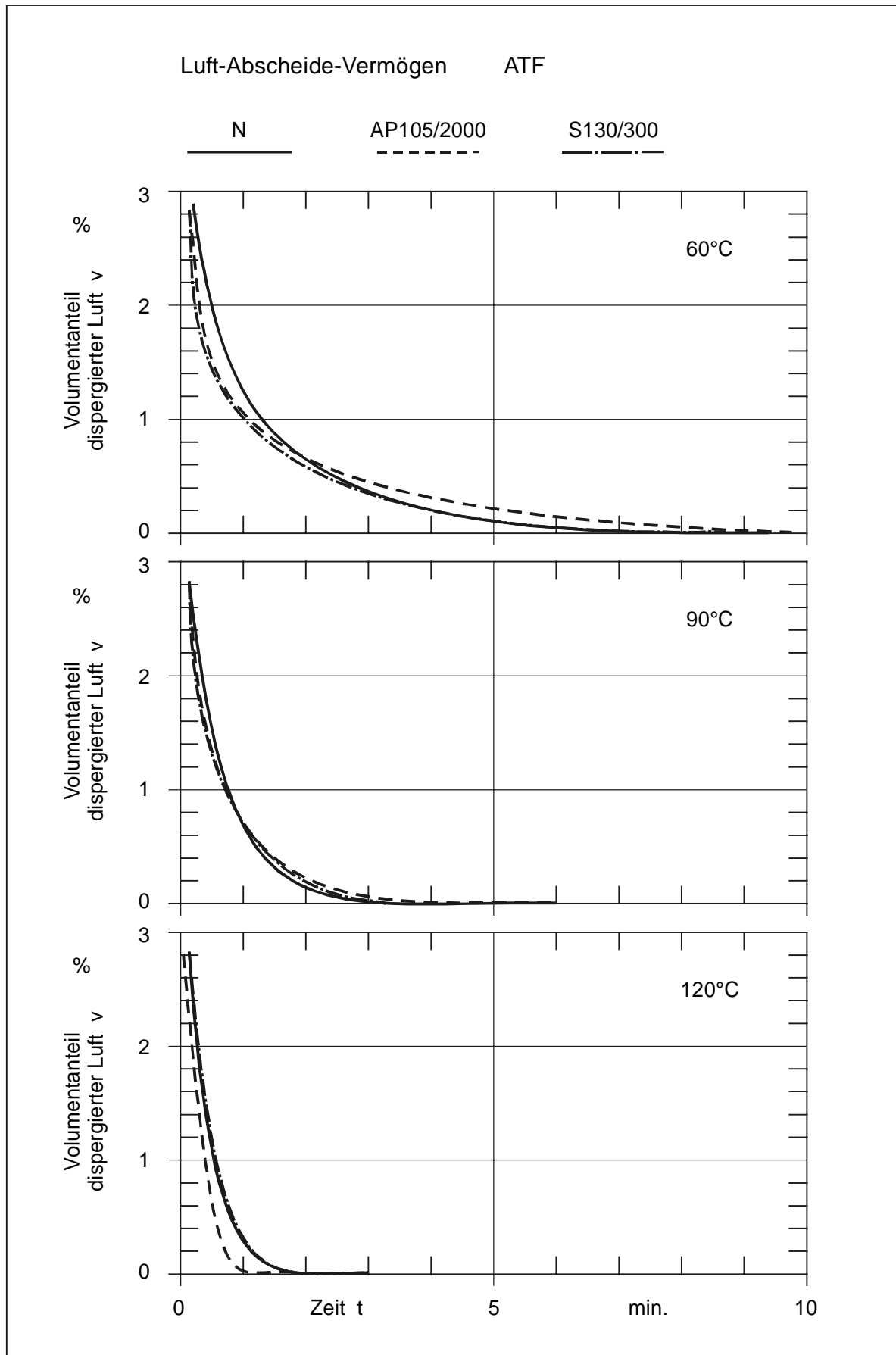
Von den Schmierstoffen ATF und MTF wurde das Luft-Abscheide-Verhalten an der Fakultät für Chemie der Ruhr-Universität Bochum untersucht. In dem dort entwickelten Verfahren wird als Maß für das Luftabscheidevermögen der relative Volumenanteil v der im Öl dispergierten Luftblasen über der Zeit ermittelt. Die Ergebnisse sind in den **Bildern 5.38** und **5.39** dargestellt, die sich zur besseren Differenzierung der Ölproben untereinander im Maßstab der Abszisse unterscheiden.

Die Diagramme zeigen die bei LAV-Messungen üblichen Temperaturabhängigkeiten. Je höher die Temperatur ist, desto steiler fallen die $v(t)$ -Kurven ab, d.h. umso schneller wird die Luft abgegeben. Der Abfall der Kurven liegt nach Erfahrungen des durchführenden Instituts im üblichen Zeitbereich.

Bild 5.38 zeigt, dass für das ATF bei einer vorgegebenen Temperatur die LAV-Kurven des Neuöls und der gealterten Proben sehr ähnlich sind. Die Alterung hat für diesen Schmierstoff wenig Einfluss auf das Luftabscheidevermögen.

Im Vergleich zum ATF zeigt das Neuöl des MTF ähnliches Verhalten hinsichtlich des LAV. Lediglich bei 60°C ist die erforderliche Zeit für die Luftabscheidung deutlich höher. Bei 90°C und 120°C werden mit dem MTF etwas geringere Werte als für das ATF ermittelt. Dagegen ist für das MTF ein deutlicher Einfluss der Alterung auf das LAV zu erkennen. Das in der Anwendung gealterte Öl zeigt bei allen untersuchten Temperaturen wesentlich schlechteres Verhalten im Test als das Neuöl. Die für die Luftabscheidung ermittelten Zeiten erreichen etwa die doppelten Werte des Neuöls. Das Luftabscheidevermögen der im FZG-Prüfstand bei 120°C gealterten Probe entspricht demgegenüber im wesentlichen dem des Neuöls. Eine nachhaltige Veränderung im LAV nach der Alterung ist nicht feststellbar. Die bei 130°C im FZG-Prüfstand gealterte Probe wurde aufgrund der Silikonzugabe während der Alterung nicht untersucht, da ein Einfluss des Silikonöls zu erwarten gewesen wäre.

Für beide Schmierstoffe wurden mit mehreren Proben jeweils zwei Messreihen durchgeführt. Es zeigte sich eine sehr gute Wiederholbarkeit, die zudem verdeutlicht, dass während einer Messreihe keine merkliche zusätzliche Alterung der Proben auftritt.

**Bild 5.38:** Ergebnisse LAV-Messungen, ATF

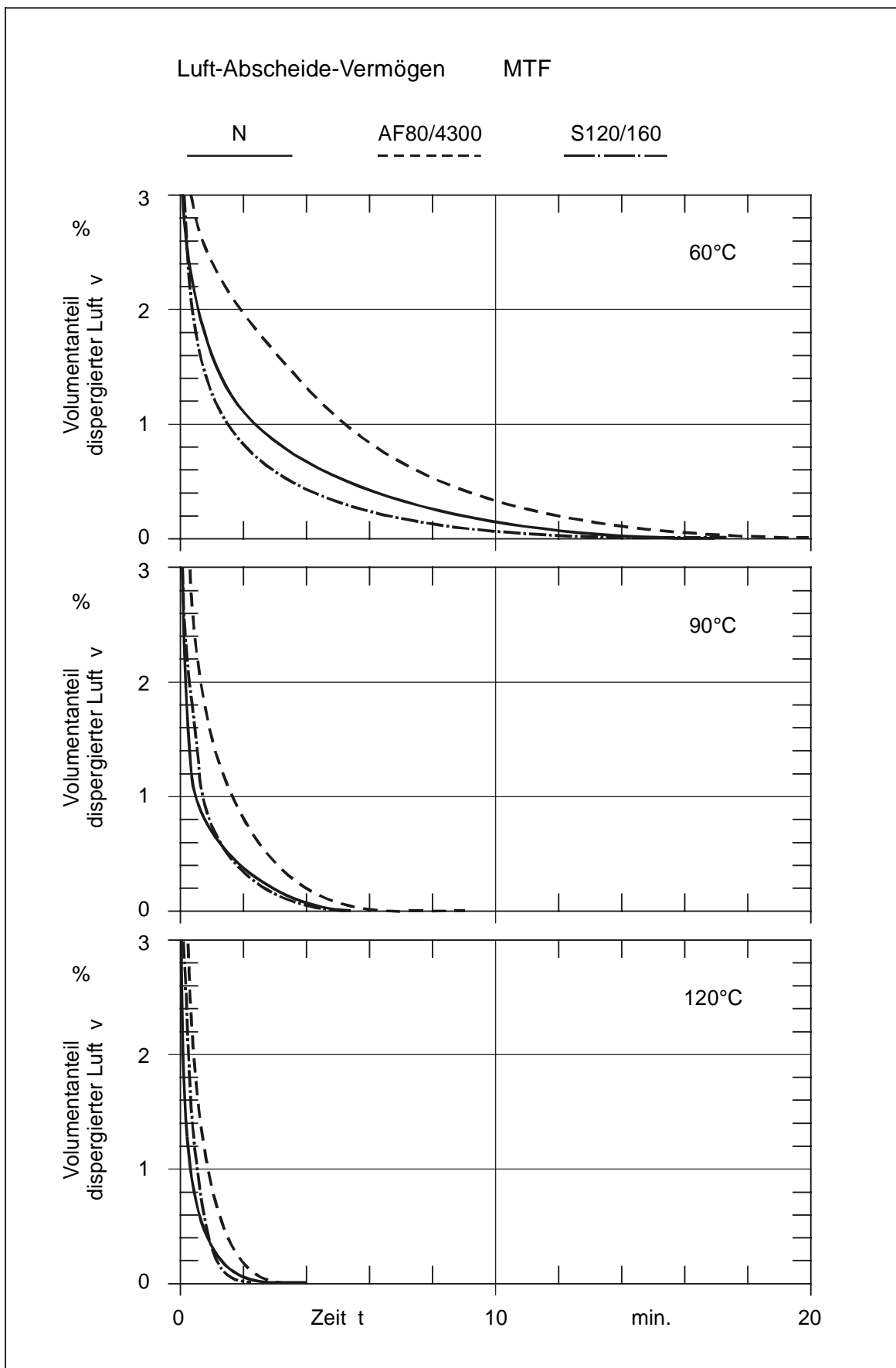


Bild 5.39: Ergebnisse LAV-Messungen, MTF

5.8.2 Schmierstoffveränderungen infolge der Komponententests

Die Alterung der Schmierstoffe erfolgte in einem Temperaturbereich von 110°C bis 150°C, wobei die Dauer der Alterung an die Temperatur angepasst war. Die Komponententests zur Ermittlung der Grübchen- und Graufleckentragfähigkeit sowie die Synchronisationstests wurden bei 90°C Öltemperatur durchgeführt. Die Laufzeiten hierbei lagen im Bereich von ca. 250 h bis 350 h. Die Stufentests zur Ermittlung der Fresstragfähigkeit werden bei 90°C Öltemperatur begonnen und erreichen in den hohen Kraftstufen Werte bis zu 150°C bei allerdings nur sehr kurzen Laufzeiten von mehreren Minuten je Kraftstufe.

Die Beanspruchungen im Kontakt liegen bei den Komponententests deutlich höher als bei der Alterungsmethode, so dass überprüft werden sollte, inwieweit eine Alterung der Schmierstoffe im Rahmen der Komponententests erfolgt. Für die Untersuchung nach den Komponententests wurden die Ölproben nach **Tabelle 5.1** ausgewählt, wobei möglichst der Schmierstoff MTF ausgewählt wurde, da dieser bereits bei der Alterung bei 120°C deutliche Veränderungen zeigte.

Schmierstoff	nach Untersuchung im Testverfahren
ATF-N	Fresstest A/8,3/90 - 13. Kraftstufe
MTF-N	Fresstest A10/16,6R/90 - 12. Kraftstufe
MTF-N	Pittingtest PT-C/9/90 - 350 h
MTF-N	Synchronisationstest Streusinter und Karbon - ca. 350 h
MTF-S130/160	Synchronisationstest Streusinter und Karbon - ca. 350 h
CLP-PG-N	Graufleckentest GF-C/8,3/90

Tabelle 5.1: Ölproben zur Untersuchung nach den Komponententests

Die Veränderungen der Kennwerte Viskosität, Neutralisationszahl und Oxidation sind in **Bild 5.40** dargestellt. Die Veränderungen im Gehalt der Additivelemente sowie der Abriebelemente zeigt **Bild 5.41**.

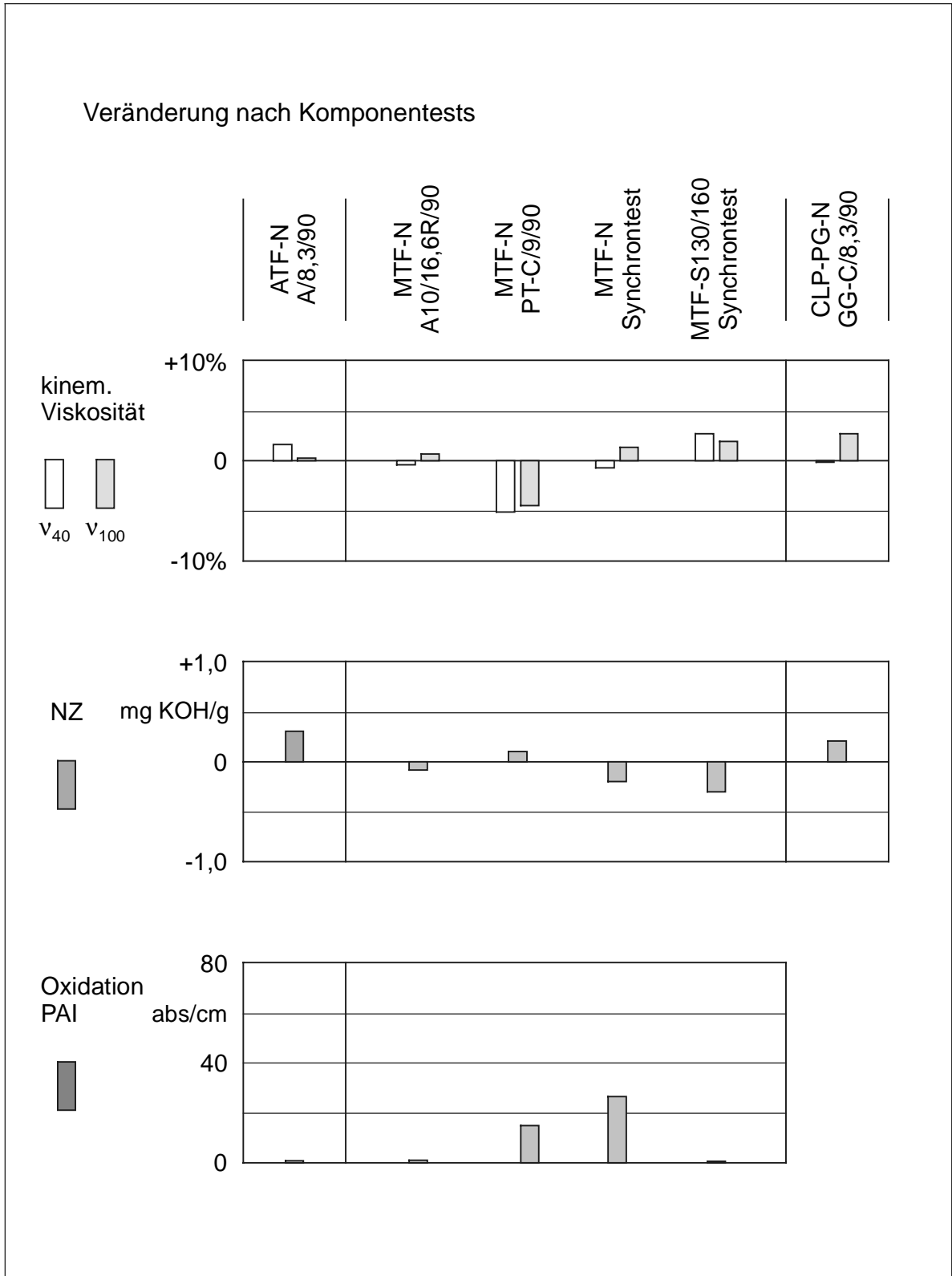


Bild 5.40: Veränderung nach Komponententests (1)

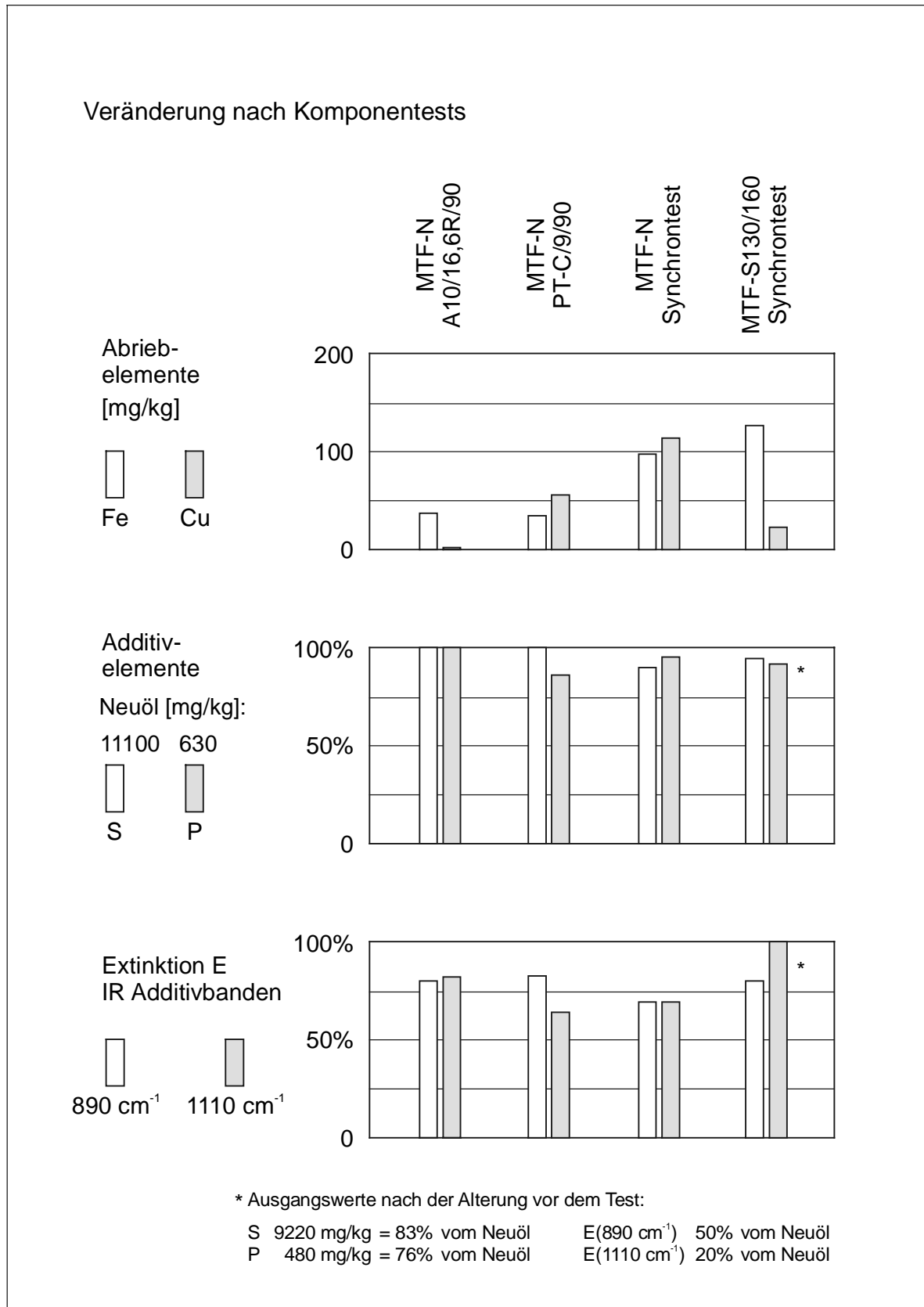


Bild 5.41: Veränderung nach Komponententests (2)

Nach den Tests zur Ermittlung der Fresstragfähigkeit ergeben sich keine nachhaltigen Veränderungen der Kennwerte Viskosität, Neutralisationszahl und Oxidation.

Der Pittingtest führt zu einer leichten Verringerung der Viskosität und leichter Oxidation des Schmierstoffs. Nach dem Synchronisationstest zeigt das Neuöl erhöhte Oxidationswerte, wohingegen für das gealterte Öl, das nach der Alterung bereits deutlich oxidiert war, keine weiteren Veränderungen feststellbar sind. Der Graufleckentest mit dem sehr alterungsstabilen CLP-PG führte erwartungsgemäß zu keiner Änderung der Viskosität oder NZ.

Bei der Betrachtung der Schmierstoffveränderungen infolge der Komponententests sind die dabei verwendeten Ölvolumina zu berücksichtigen. Eine Übersicht über die Verhältnisse für den Schmierstoff MTF zeigt **Tabelle 5.2**.

Verfahren	Ölvolumen
Alterung im FZG-Prüfstand	ca. 30 l
Alterung in der Anwendung (Schaltgetriebe Nutzkraftfahrzeug)	ca. 13 l
Synchronisationstest (jew. Streusinter und Karbon)	ca. 8 l
Fresstest A10/16,6R/90	ca. 2 l
Pittingtest PT/C/9/90	ca. 2 l

Tabelle 5.2: Ölvolumina im Vergleich

Es fällt auf, dass nach den Komponententests höherer Abriebgehalt vorliegt als nach der Feldalterung (Bilder 5.22 und 5.41). Insbesondere nach den Synchronisationstests liegt der Eisengehalt über 100 mg/kg (Feldalterung 37 mg/kg). Hier sind sicherlich die unterschiedlichen Ölvolumina von Bedeutung. Der Kupfergehalt nach den Synchronisationstests mit Streusinter und Karbon fällt aus ungeklärter Ursache sehr unterschiedlich aus. Möglicherweise ist das Ergebnis auf ungleiche Probenahme zurückzuführen.

Der Schwefelgehalt ist nach den Komponententests nahezu unverändert, im Phosphorgehalt zeigt sich tendenziell eine leichte Reduzierung. Die Extinktion der charakteristischen Additivbanden ist nach den Tests mit dem Neuöl auf etwa 70 - 80% gefallen. Das im FZG-Prüfstand gealterte Öl, bei dem die Höhe der Bande bei Wellenzahl 1110 cm^{-1} nur 20% vom Neuöl aufwies, zeigt für diese Bande keine weiteren Veränderungen. Die Höhe der Bande bei Wellenzahl 890 cm^{-1} ist auf ca. 80% des Wertes vor dem Test gefallen. Insgesamt ist die Empfindlichkeit der Additivbanden größer als die Messungen der Elementgehalte mittels RFA. Dies kann darin begründet sein, dass Veränderungen in der Bindungsform der Additivelemente vorliegen, nicht aber eine Verminderung im Absolutgehalt.

5.9 Ergebnisse der Verschleißtests

Der Einfluss der Ölalterung auf den Langsamlaufverschleiß von Zahnrädern wurde anhand von zehn Schmierstoffen jeweils im Neuzustand sowie in zwei verschiedenen Alterungsstufen untersucht. Es handelte sich um fünf Mineralöle, die im Rahmen des FVA Forschungsvorhabens Nr. 171/I-II [65] gealtert worden waren sowie um fünf synthetische Öle aus dem FVA Forschungsvorhaben Nr. 171/III [6]. Eine Übersicht über die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen zeigt **Bild 5.42**.

Die untersuchten Mineralöle zeigen im Neuzustand überwiegend höheren Verschleiß als in den beiden Alterungsstufen. Mit Ausnahme des Dieselmotorenöls ergeben die Syntheseöle sowohl im Neuzustand als auch im gealterten Zustand nur sehr geringen Verschleiß. Eine Differenzierung zwischen Neu- und gealtertem Öl nach dem Verschleißverhalten ist in diesen Fällen nicht möglich.

Mit Ausnahme eines Öles zeigen die Mineralöle im Neuzustand höheren Verschleiß als die Syntheseöle. Eine Verschlechterung im Verschleißverhalten infolge der Alterung ist für keinen der untersuchten Prüfschmierstoffe festzustellen.

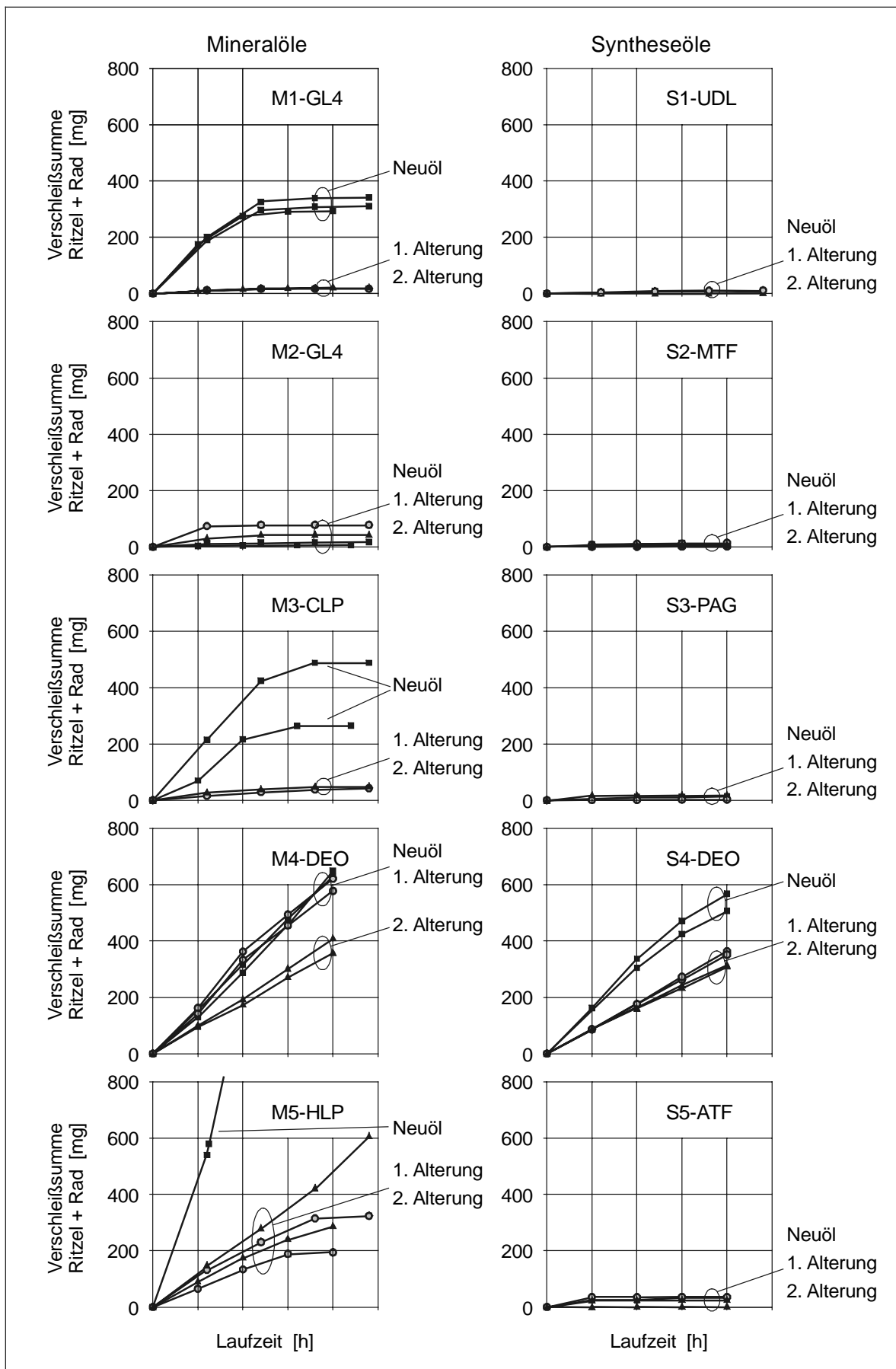


Bild 5.42: Übersicht über die Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen

5.9.1 Korrelation der Verschleißergebnisse mit den Schmierstoffkennwerten

Bei der Alterung der Schmierstoffe wurden die Veränderungen der Kennwerte Viskosität und Neutralisationszahl sowie charakteristischer Banden im Infrarotspektrum ermittelt (Kennwerte siehe Anhang). Eine direkte Korrelation dieser Veränderungen mit dem geänderten Verschleißverhalten wurde nicht gefunden. Selbst im Falle von deutlichem Abbau der Additivkomponenten zeigen gealterte Mineralöle günstigeres Verschleißverhalten als im Neuzustand. Auch ein deutlicher Anstieg der Viskosität und der Neutralisationszahl erweisen sich nicht als negativ.

5.9.2 Begleitende Untersuchungen zu den Verschleißversuchen

Einlaufversuche

Um den Einfluss eingelaufener Zahnräder auf das Verschleißverhalten zu ermitteln, wurden Versuche durchgeführt, in denen die Prüfverzahnung zunächst einem Einlauf unterzogen wurde. Der Einlauf erfolgte bei Bedingungen des Chevron-Testes [2], der gegenüber dem ansonsten verwendeten Getriebeölverschleißtest durch mildere Bedingungen in Form von geringerer Last und höherer Drehzahl charakterisiert ist. Es hat sich gezeigt, dass sich der Zahnradverschleiß infolge des Einlaufes der Verzahnung deutlich verringert. Für Mineralöle, die im Neuzustand bei neuer Prüfverzahnung hohen Verschleiß ergaben, lag das Verschleißniveau bei eingelaufener Prüfverzahnung im dem niedrigen Bereich der gealterten Öle. Bei einem Ölwechsel auf ein Neuöl mit ungünstigen Verschleißigenschaften ist demnach nicht mehr mit erhöhtem Zahnradverschleiß zu rechnen.

Bestimmung der polaren Eigenschaften

Eine mögliche Ursache für das unterschiedliche Verschleißverhalten von Neu- und gealterten Ölen kann die Veränderung der polaren Eigenschaften des Schmierstoffs infolge der Alterung sein. Liegt eine Veränderung dahingehend vor, dass sich die gealterten Proben eines Öles infolge günstigerer Polaritätseigenschaften besser als das Neuöl an den Zahnradwerkstoff anlagern können und damit eine bessere Adsorptions-Schutzschicht aufbauen, so würde dies das beobachtete Verschleißverhalten erklären.

Die Überprüfung, ob sich die polaren Eigenschaften eines Schmierstoffs bei der Alterung ändern, erfolgte anhand des Schaltgetriebeöles M1-GL4. Es wurden hierzu die Dielektrizitätszahlen ϵ sowie die Verlustfaktoren D in einem Kondensator gemessen. Der Verlustfaktor D ist ein Maß für den Anteil des ölbedingten ohmschen Wider-

standes am Gesamtwiderstand des Wechselstromkreises. Öle mit Dipolcharakter, wie z.B. Polyglykole, weisen deutlich höhere Verlustfaktoren auf als Öle ohne polaren Eigenschaften. Die Messungen erfolgten unter Umgebungsdruck bei Messfrequenzen von 20 kHz bis 10 MHz an der LCR-Messbrücke. Neben der Temperatur hängen die Dielektrizitätszahlen und Verlustfaktoren auch vom Druck ab. Die Untersuchungen von Kopatsch [42] zeigten jedoch, dass für eine qualitative Aussage die Variation des Drucks nicht erforderlich ist, da sich charakteristische Unterschiede bereits bei Umgebungsdruck abbilden. Die Ergebnisse sind in **Bild 5.43** dargestellt.

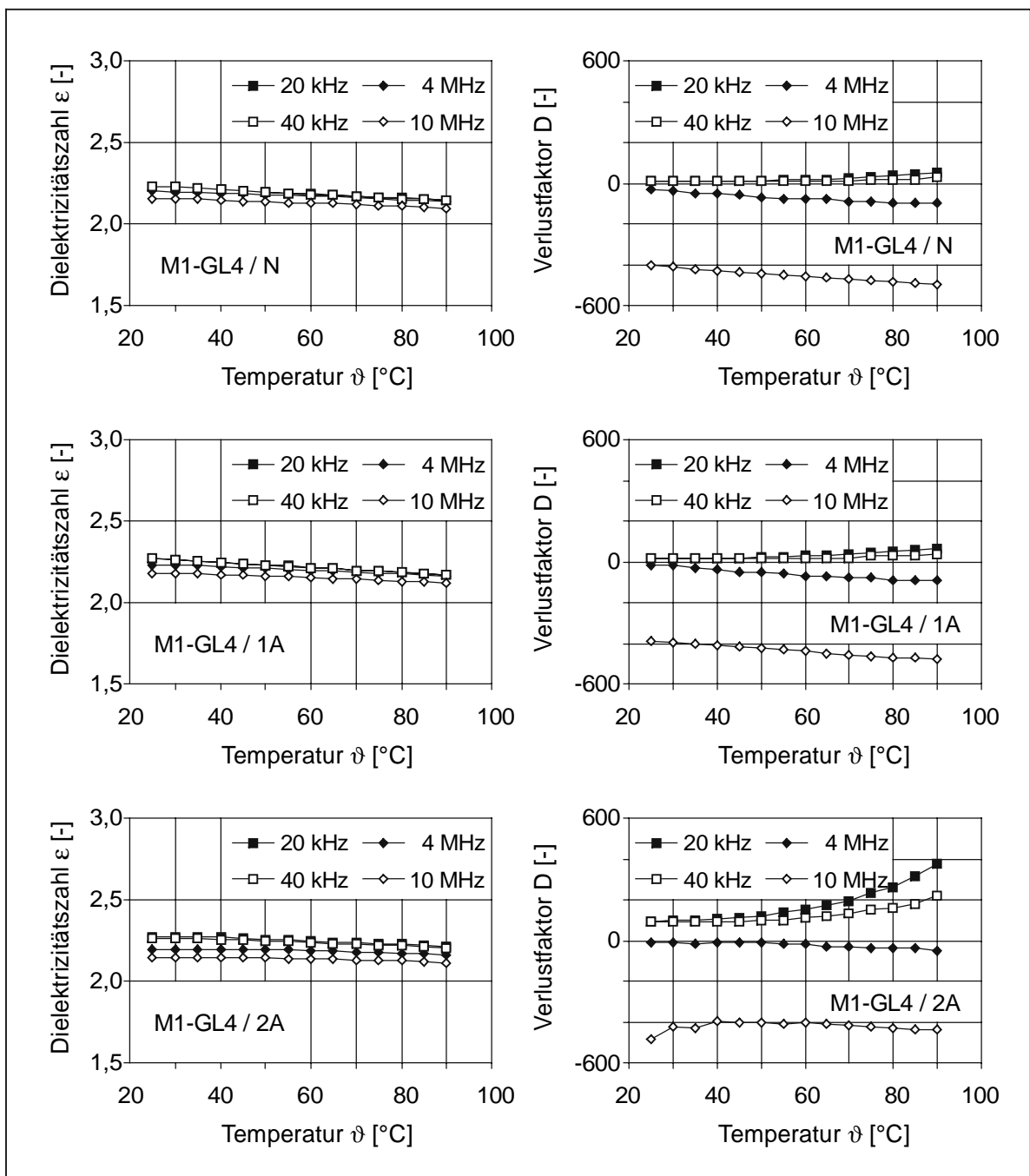


Bild 5.43: Dielektrizitätszahlen und Verlustfaktoren von M1-GL4

Die Dielektrizitätszahlen ϵ des Neuöls und der gealterten Proben unterscheiden sich nicht. Eine Änderung der polaren Eigenschaften lässt sich daraus nicht ableiten.

Die Messungen der Verlustfaktoren D ergeben gleiche Resultate für das Neuöl und das Öl der ersten Alterungsstufe. In der zweiten Alterungsstufe zeigt sich bei den Messfrequenzen 20 und 40 kHz ein höheres Niveau und ein deutlicher Anstieg des Verlustfaktors mit der Temperatur. Somit korrespondieren diese Ergebnisse nicht mit dem Verschleißverhalten des Schmierstoffs, das eine Übereinstimmung bei den beiden gealterten Proben und eine Abweichung des Neuöles erwarten ließ.

Die Analogie der gealterten Proben des Schmierstoffs in ihrer Verschleißcharakteristik gegenüber dem Neuöl spiegelt sich in den Dielektrizitätszahlen und Verlustfaktoren nicht wieder. Damit kann eine mögliche Änderung der Polarität des Öles bei der Alterung dessen Verschleißverhalten nicht erklären.

Kontaktwinkelmessungen

Weiterhin wurde das Benetzungsverhalten der Schmierstoffe M1-GL4 und M3-CLP im Neu- und gealterten Zustand untersucht. Am Institut für Werkstofftechnik Bremen IWT wurden die Kontaktwinkel der Proben bei drei Temperaturen gegenüber einer polierten Probe aus 16MnCr5 mit Hilfe einer optischen Messvorrichtung bestimmt. Die Ergebnisse ließen keinen Zusammenhang mit der gefundenen Verschleißcharakteristik erkennen.

Korrelation der Verschleißergebnisse mit Schichtdickeuntersuchungen

In begleitenden Untersuchungen im Rahmen der Forschungsvorhaben FVA 171/I, II [65] wurden mittels Rasterelektronenmikroskop REM und Sekundärneutralteilchen-Massenspektroskopie SNMS Reaktionsschichtuntersuchungen an gelaufenen Zahnflanken durchgeführt. Es wurden hierbei die Öle M1-GL4 und M2-GL4 untersucht. Wie sich gezeigt hat produzieren Gebrauchtöle dickere Reaktionsschichten als die jeweiligen Neuöle. Für den Schmierstoff M1-GL4 wurde nach den Laufversuchen mit der stark gealterten Probe ein höherer Sauerstoffgehalt (ca. 20%) in der Reaktionsschicht nachgewiesen als für das Neuöl (ca. 14%). Bei einem Vergleich der beiden Neuöle M1-GL4 und M2-GL4 zeigte das M2-GL4 höhere Sauerstoffkonzentration in der Reaktionsschicht (ca. 20%). Stellt man diese Ergebnisse den Verschleißuntersuchungen gegenüber, so lässt sich feststellen, dass niedrigerer Verschleiß mit dickeren Reaktionsschichten und höherer Sauerstoffkonzentration in der Reaktionsschicht einhergeht. Dies deckt sich mit den Aussagen von Föhl [29] hinsichtlich Reaktionsschichtbildung an langsamlaufenden Axialzylinderrollenlagern.

6 Diskussion der Ergebnisse

6.1 Auswertung der Schmierstoffkennwerte

In diesem Abschnitt erfolgt ein Vergleich der in den Komponententests ermittelten Änderungen im tribologischen Verhalten der Schmierstoffe und den in den umfangreichen Analysen ermittelten Kennwerten. Der Vergleich wird getrennt nach der Zahnradtragfähigkeit und dem Synchronisationsverhalten durchgeführt. Es werden jeweils die im Vergleich zum Neuöl relativen Veränderungen der einzelnen Schmierstoffproben gegenübergestellt, wobei nur diejenigen Proben herangezogen werden, die in Komponententests untersucht wurden.

6.1.1 Zahnradtragfähigkeit

Für die Fresstragfähigkeit werden als Auswertegrößen jeweils die Hertzschen Pressungen der Kraftstufe herangezogen, in der der Ausfall der Prüfverzahnung erfolgte. Da das Neuöl des Schmierstoffs AXLE im Sprungtest S-A10/16,6R/90 sowie im Hypoidölstest A die maximalen Kraftstufen schadensfrei durchlief, wurden als 100% Referenzwerte für die Tragfähigkeit die Hertzschen Pressungen der theoretisch nächsthöheren Kraftstufen definiert. Diese Werte sind im Diagramm zusätzlich angegeben.

Für die Grübchentragfähigkeit wird als Ausgangsgröße der aus den einzelnen Prüfläufen berechnete logarithmische Mittelwert LW_{50} herangezogen, entsprechend der 50%-Ausfallwahrscheinlichkeit. Das Graufleckenverhalten wird durch die im Grauflecken-Stufentest C/8,3/90 ermittelte mittlere Profilformabweichung f_{fm} nach Kraftstufe 9 beschrieben.

In **Bild 6.1** sind die Ergebnisse der Schmierstoffe CLP-PG und AXLE zusammengefasst. Für das CLP-PG liegt weder bei der Zahnradtragfähigkeit, charakterisiert durch das Verhalten im Grauflecken- und im modifizierten Fresstest, noch bei den Kennwerten des Schmierstoffs eine deutliche Veränderung im Vergleich zum Neuöl vor. Eine Korrelation zwischen den Analysewerten und dem tribologischen Verhalten im Zahnradkontakt ist aufgrund der geringen Veränderungen nicht möglich.

Das AXLE zeigt nur geringe Veränderungen in der Fresstragfähigkeit nach der Alterung. Die Analysewerte der gealterten Proben unterscheiden sich dagegen teilweise deutlich voneinander. Insbesondere für die Neutralisationszahl und für den Schwefelgehalt liegen große Differenzen vor. Die noch sehr hohe Fresstragfähigkeit ist möglicherweise mit dem kaum reduzierten Phosphorgehalt zu erklären. Allerdings

weist das in der Anwendung gealterte AF tendenziell trotz geringeren Phosphorgehaltes die höhere Fresstragfähigkeit auf.

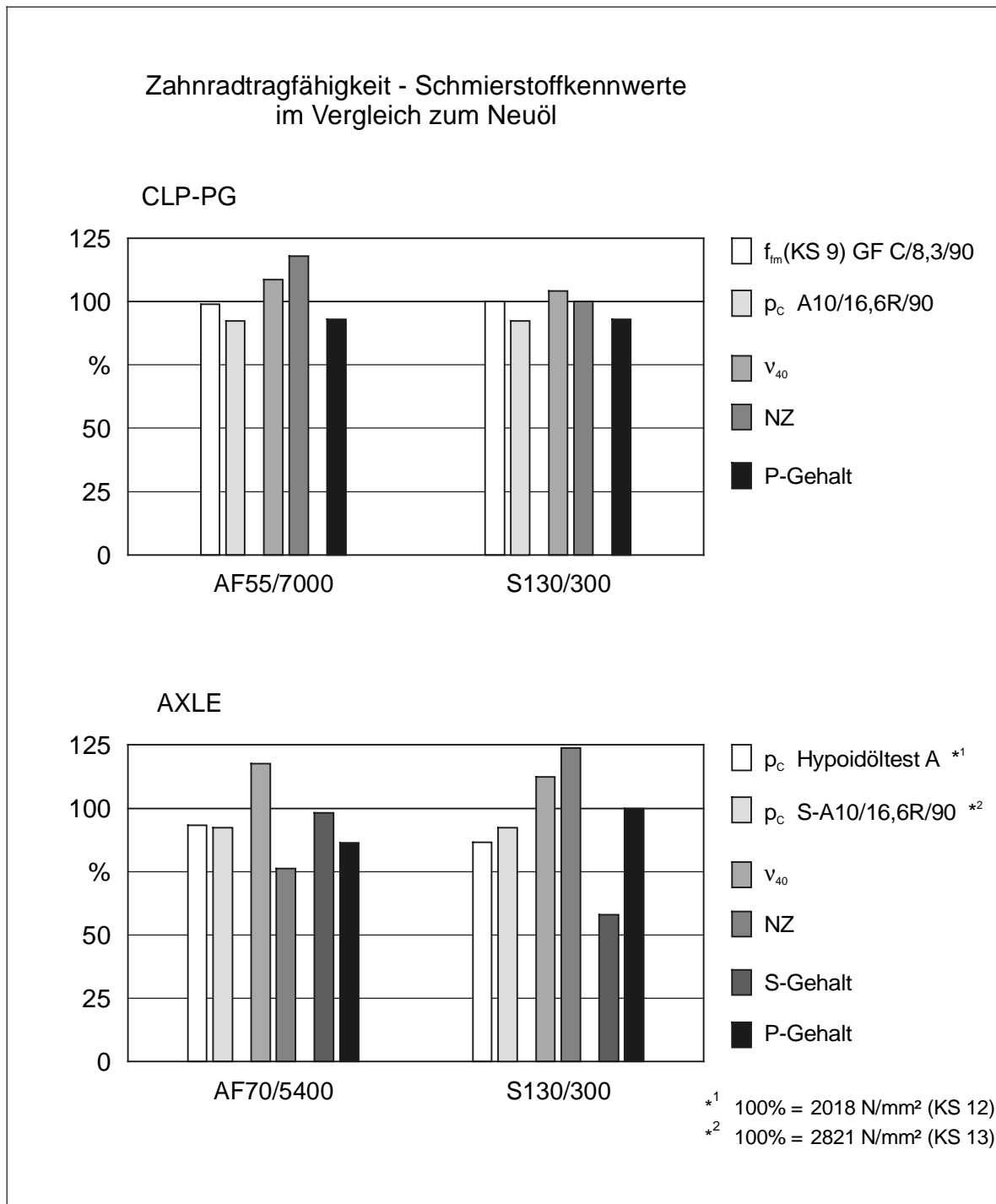


Bild 6.1: Auswertung Schmierstoffkennwerte - Zahnradtragfähigkeit, CLP-PG und AXLE

In **Bild 6.2** sind die Ergebnisse des Schmierstoffs ATF dargestellt. Die Fresstragfähigkeit der gealterten Öle ist in etwa gleichem Maße gegenüber dem Neuöl reduziert. Die Grübchentragfähigkeit ist nach der Alterung fast identisch zum Neuöl. Dem steht eine etwa gleiche im IR-Spektrum ermittelte Oxidation gegenüber, wobei die bei

140°C gealterte Probe geringere Werte aufweist (s. Kapitel 5.1.3). Die Viskosität ist nahezu unverändert und kann ebenso wenig als Alterungskennwert herangezogen werden wie die NZ, die nach der Alterung in der Anwendung und im FZG-Prüfstand stark differiert.

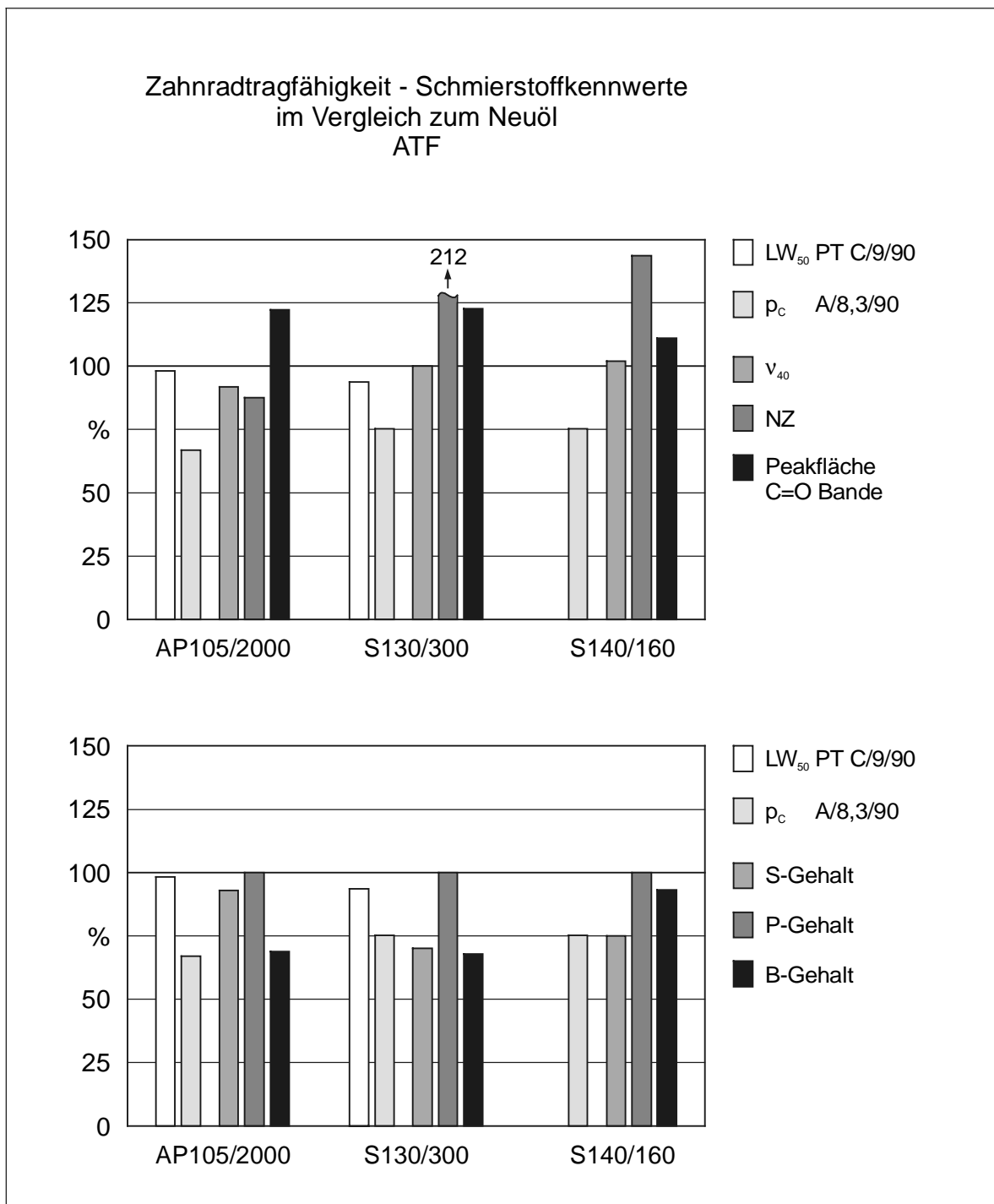


Bild 6.2: Auswertung Schmierstoffkennwerte - Zahnradtragfähigkeit, ATF

Die Vermutung, dass die für das AXLE ermittelte hohe Fresstragfähigkeit nach der Alterung auf den nur gering veränderten Phosphorgehalt zurückzuführen ist, bestätigt sich für das

ATF nicht. Nach der Alterung des ATF ist dessen Phosphorgehalt nahezu unverändert, die Fresstragfähigkeit aber deutlich gesunken. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Schwefel-, Phosphor- und Borgehalt mit den Ergebnissen in den Zahnradtests ist nicht erkennbar. Es kann lediglich festgestellt werden, dass ein verringerter Gehalt an Additivelementen mit einer Reduzierung der Fresstragfähigkeit einhergeht, nicht aber eine quantitative Zuordnung zu einzelnen Additivelementen. Für die Grübchentrugfähigkeit scheint der Umfang des vorliegenden Additivabbaus keine Rolle zu spielen.

Das Luft-Abscheide-Vermögen (Bild 5.38) des ATF ist nach der Alterung unverändert zum Neuöl, so dass sich daraus kein Zusammenhang zur Fresstragfähigkeit ableiten lässt. Ein Zusammenhang mit der Grübchentrugfähigkeit ist dagegen theoretisch möglich, da beide Größen unverändert blieben, lässt sich aber mit den vorliegenden Ergebnissen nicht verifizieren.

In **Bild 6.3** sind die Ergebnisse für den Schmierstoff MTF dargestellt. Ein Zusammenhang zwischen dem Verhalten in den Zahnradtests und den Kennwerten Viskosität und Neutralisationszahl ist nicht erkennbar. Während die bei 130°C im FZG-Prüfstand gealterte Probe die höchste NZ aufweist entspricht die Fresstragfähigkeit der des Öls aus der Feldalterung. Im Pittingtest zeigt das bei 120°C gealterte Öl, dessen NZ zwischen denen der beiden anderen Proben liegt, das schlechteste Ergebnis. Die Viskosität ist nach der Alterung kaum verändert, so dass daraus kein Rückschluss auf Änderungen im tribologischen Verhalten gezogen werden kann. Der Grad der Alterung steigt von der feldgealterten Probe über die FZG-Alterung bei 120°C bis zur FZG-Alterung bei 130°C.

Mit den Veränderungen im IR-Spektrum hinsichtlich Oxidation und den charakteristischen Additivbanden lassen sich die Ergebnisse in den Zahnradtest dagegen qualitativ korrelieren. Die Verringerung der Fress- und Grübchentrugfähigkeit des Neuöls geht mit der Vergrößerung der Peakfläche der C=O Bande sowie der Verringerung der Peakhöhen der Additivbanden einher. Quantitative Aussagen sind jedoch nicht möglich.

Bezüglich des Gehalts an Additivelementen lässt sich nur dahingehend ein Zusammenhang finden, dass verminderter Gehalt mit verminderter Fress- und Grübchentrugfähigkeit einhergeht. Quantitative Aussagen sind auch hier nicht möglich.

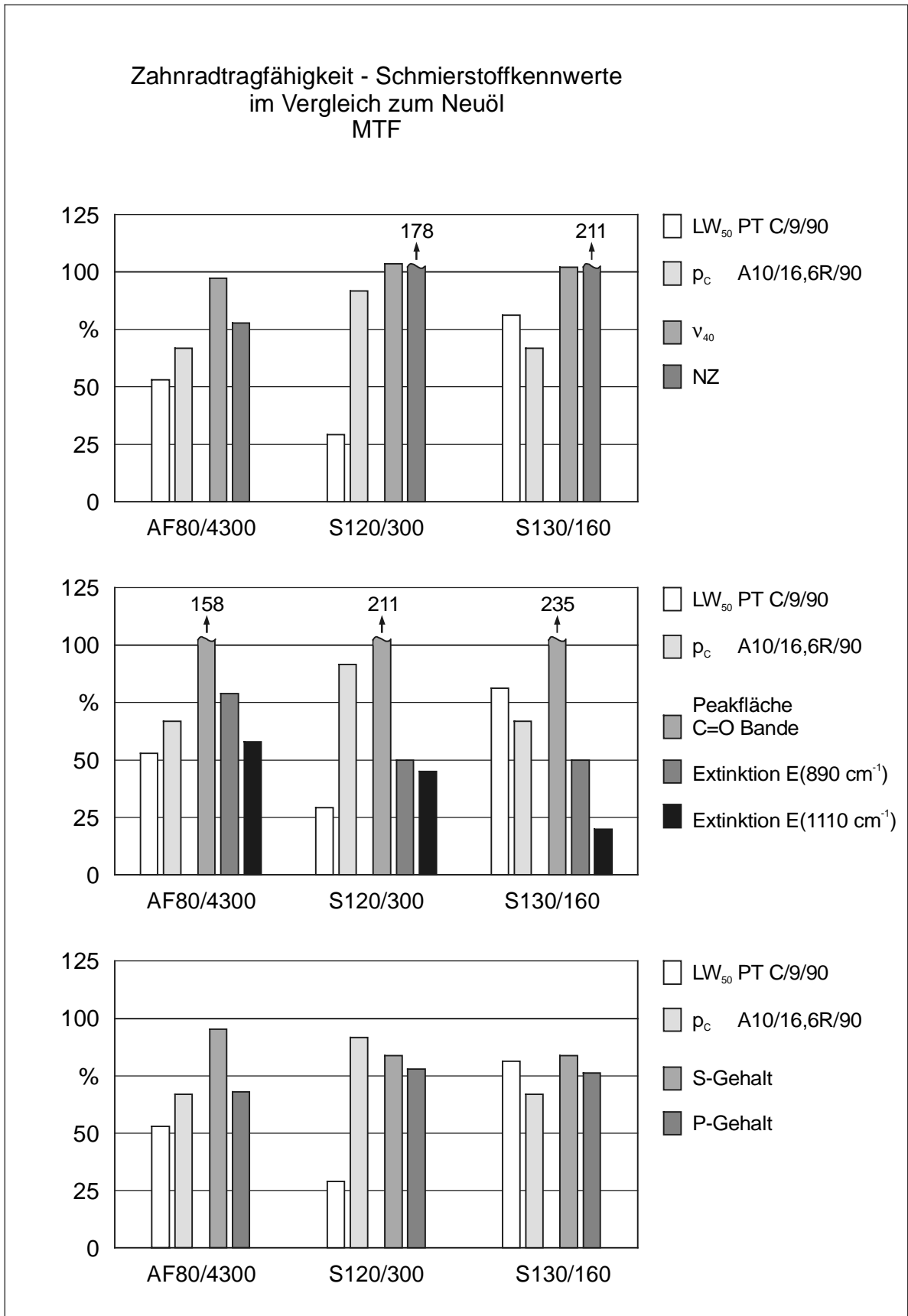


Bild 6.3: Auswertung Schmierstoffkennwerte - Zahnradtragfähigkeit, MTF

Das Luft-Abscheide-Vermögen (Bild 5.39) des MTF war für das Öl aus der Anwendung gegenüber dem Neuöl deutlich verschlechtert im Gegensatz zu der bei 120°C im FZG-Prüfstand gealterten Probe. Zusammen mit den Fresstestergebnissen für das ATF ist damit kein Zusammenhang zwischen LAV und Fress- oder Grübchentragfähigkeit erkennbar. Dies bestätigt die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben FVA 43 "Luftöldispersion" [52], in dem bei Luftgehalten von 10% kein negativer Einfluss auf die Fressstragfähigkeit gefunden wurde. Eine Verschlechterung in der Fressstragfähigkeit trat erst bei einem Luftgehalt von 20% auf, wenn der Luftanteil bereits die Kühlwirkung des Öls beeinflusste.

6.1.2 Synchronisationsverhalten

Für die Auswertung der Schmierstoffkennwerte wurden zur Beschreibung des tribologischen Verhaltens in Synchronisierungen in Analogie zum Forschungsvorhaben FVA 296 "Ölalterung Synchronisierungen" [50] als maßgebliche Größen die minimale Reibungszahl μ_{\min} sowie der Kennwert V_{μ} jeweils nach 1000 Schaltungen herangezogen. **Bild 6.4** zeigt die Gegenüberstellung für die Ergebnisse mit dem Reibbelag Streusinter, **Bild 6.5** für den Reibbelag Karbon.

Für beide Reibbeläge lässt sich übereinstimmendes Verhalten in den Kennwerten $\mu_{\min, 1000}$ und $V_{\mu, 1000}$ finden. Die minimale Reibungszahl $\mu_{\min, 1000}$ ist nach der Alterung quasi identisch zum Neuöl. Der das Reibungsverhalten über dem Schaltvorgang beschreibende Kennwert $V_{\mu, 1000}$ ist nach der Alterung in der Anwendung geringfügig, nach der Alterung im FZG-Prüfstand deutlich gegenüber dem Neuöl reduziert. In den Analytik findet sich hier eine gute Korrelation zu den im IR-Spektrum ermittelten Werten für die Oxidation sowie die charakteristischen Additivbanden. Mit der Viskosität und der NZ lassen sich die tribologischen Veränderungen dagegen nicht korrelieren.

Ein Zusammenhang zwischen den Reibungskennwerten und den Additivelementen deutet sich für den Schwefelgehalt an. Allerdings ist der Schwefelgehalt wohl kaum ursächlich für das geänderte Reibungsverhalten, kann aber als allgemeiner Hinweis für alterungsbedingte Veränderungen dienen.

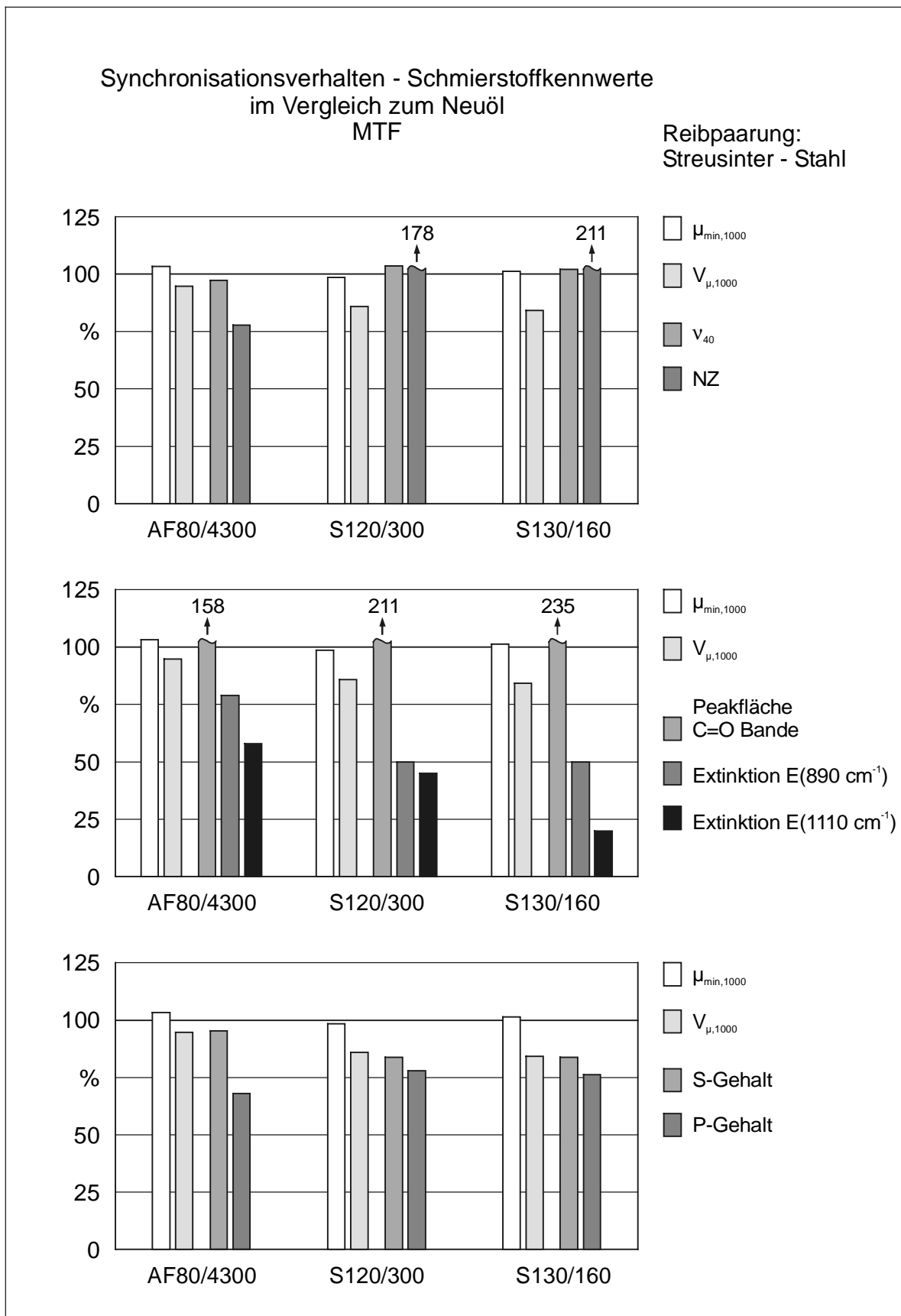


Bild 6.4: Auswertung Schmierstoffkennwerte - Synchronisationsverhalten (1), MTF

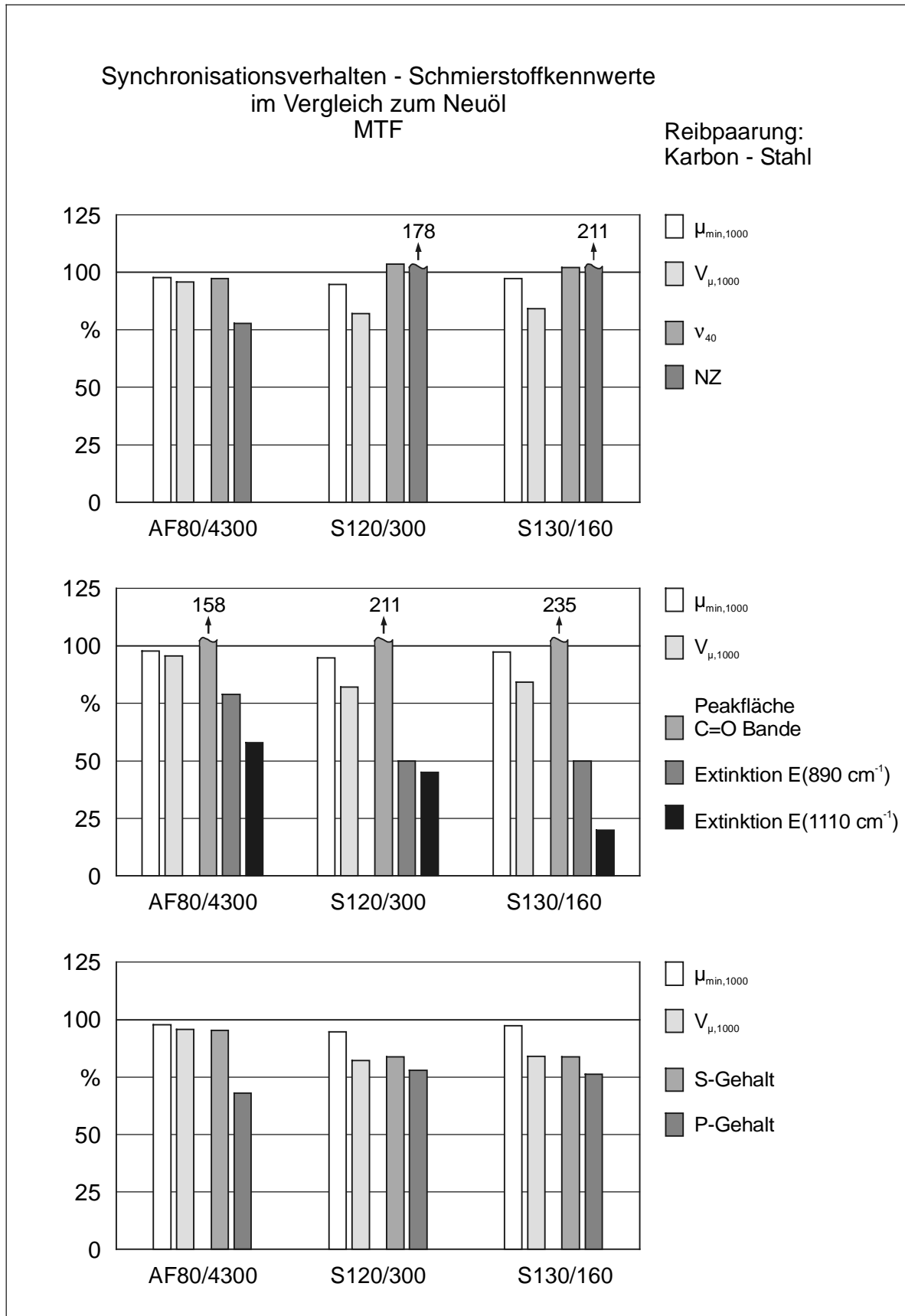


Bild 6.5: Auswertung Schmierstoffkennwerte - Synchronisationsverhalten (2), MTF

6.2 Bewertung der Alterungsmethode

In diesem Abschnitt wird die Alterungsmethode im FZG-Prüfstand hinsichtlich der Übereinstimmung zur Praxisalterung anhand den Ergebnissen der Ölanalytik sowie der Komponententests bewertet und die Anwendung der Alterungssimulation erläutert. Zunächst wird eine Betrachtung nach Schmierstoffen getrennt durchgeführt und anschließend eine Gesamtbewertung. Dabei wird die Alterungsmethode bei 130°C bewertet. Die Versuche mit dem AXLE bei 150°C führten zu starken Ablagerungen, weswegen diese Temperatur für die Alterungsmethode mit diesem Öl nicht in Frage kommt. Jedes Additiv hat eine thermische Grenze, oberhalb derer es thermisch zerstört wird. Die in Abhängigkeit der Temperatur auftretende Schaumproblematik mit dem MTF legt nahe, für die Alterungsmethode die Temperatur nicht über 130°C zu setzen. Andererseits wäre eine Alterung bei 120°C mit etwa dem doppelten Zeitaufwand gegenüber der Alterung bei 130°C verbunden.

6.2.1 Schmierstoff CLP-PG

Die Ergebnisse der Versuche mit dem Schmierstoff CLP-PG können kaum für eine Bewertung der Alterungsmethode verwendet werden, da nach der Alterung in der Anwendung nur ein sehr geringer Alterungszustand vorliegt. Wie Bild 4.2 verdeutlicht, ist nach dem Betrieb über 8000 h bei einer Temperatur von 50 - 60°C die Lebensdauer dieses Schmierstoffs bei weitem nicht erreicht. Sowohl die Ergebnisse der Ölanalytik insbesondere aber auch der Komponententests bestätigen, dass das Öl noch annähernd dieselben Eigenschaften wie das Neuöl besitzt. Die Alterung im FZG-Prüfstand erfolgte daran orientiert bei für diesen Schmierstoff milden Bedingungen von 110° und 130°C Öltemperatur über eine Dauer von 300 h. Auch hierdurch haben sich die Eigenschaften kaum verändert. Somit besteht zwar Übereinstimmung zwischen Anwendung und Simulation, eine sinnvolle Bewertung der Alterungsmethode ist damit aber nicht möglich.

6.2.2 Schmierstoff AXLE

Auch das vollsynthetische Achsöl hat nach der Alterung in der Anwendung seine Lebensdauer nach [5, 27] noch nicht erreicht. Die Differenz zu den Eigenschaften des Neuöls ist aber im Vergleich zum CLP-PG größer. Dies war auch gemäß der Einordnung in das Lebensdauerdiagramm zu erwarten (Bilder 4.2 und 4.3).

Der Vergleich der Kennwerte nach der Feldalterung und nach der Alterung bei 130°C im FZG-Prüfstand zeigt eine deutliche Differenz in der NZ. Die Viskosität ist aufgrund der im feldgealterten Öl enthaltenen Fremdölmenge aus früheren Getriebe-

befüllungen nicht vergleichbar. Eine signifikante Veränderung der Additivelemente ergibt sich nur nach der Alterung im FZG-Prüfstand in Form von Schwefelabbau.

Die Zahnrad-Komponententests liefern eine gute Übereinstimmung zwischen Feldalterung und Alterung bei 130°C im FZG-Prüfstand, wenn auch die Veränderungen im Vergleich zum Neuöl verhältnismäßig gering sind. Die Bewertung der Alterungsmethode anhand des AXLE ist in **Tabelle 6.1** zusammengefasst.

Bereich	Kriterium		Bewertung
Analytik	Kennwerte	NZ	-
		v	o
	Additivelemente	S	-
		P	+
Tribologie	Zahnradtragfähigkeit		+

Übereinstimmung: + gut - schlecht o nicht bewertbar

Tabelle 6.1: Bewertung der Alterungsmethode bei 130°C, AXLE

Die Alterung bei 150°C, die zu starken Ablagerungen im Ölaggregat führte, hat gezeigt, dass die Alterungstemperatur auch für synthetische Schmierstoffe, insbesondere mit derartiger Additivierung, nicht beliebig erhöht werden kann, um kürzere Alterungsdauern zu erreichen.

6.2.3 Schmierstoff ATF

Die Bedingungen der Alterung in der Anwendung des teilsynthetischen Schmierstoffs ATF liegen bei Veranschaulichung in einem Lebensdauerdiagramm zwischen den Lebensdauergeraden von Mineral- und Syntheseölen nach [27] (Bild 4.4). Die Lebensdauergeraden von Schmierstoffen sind zwar streng genommen für jeden Schmierstoff und für jede Anwendung separat zu definieren, die dargestellten Grenzlinien können aber zumindest als Anhaltswerte für Zahnradgetriebeöle dienen (vgl. Kapitel 4.2.2). Unter Zugrundelegung dieser Grenzen hat der Schmierstoff nach der Alterung in der Anwendung seine Leistungsgrenze in etwa erreicht. Die Ergebnisse der Komponententests spiegeln dieses Bild in Form von verringerter Fresstragfähigkeit, aber noch unveränderter Grübchentrugfähigkeit zum Teil wider.

Der Vergleich der Kennwerte nach der Feldalterung und nach der Alterung im FZG-Prüfstand liefert eine deutliche Differenz in der NZ sowie Unterschiede im Schwe-

felgehalt. Die Viskosität sowie die Oxidation und der Gehalt an Phosphor und Bor zeigen gute Übereinstimmung.

Die Untersuchungen zur Ermittlung der Zahnradtragfähigkeit ergeben gute Übereinstimmung zwischen Feldalterung und Alterung bei 130°C im FZG-Prüfstand. Der Tribometertest zur Beschreibung des Verhaltens in einer geregelten Wandler-Kupplung weist auf geringfügig stärkere Veränderung des Schmierstoffs nach der FZG-Alterung bei 130°C hin. Für eine Korrelation zwischen Praxisalterung und Alterungssimulation kann das Ergebnis als gut bewertet werden. Die Bewertung der Alterungsmethode anhand des ATF ist für die Alterungstemperatur von 130°C in **Tabelle 6.2** zusammengefasst.

Bereich	Kriterium	Bewertung	
Analytik	Kennwerte	NZ	-
		v	+
	Oxidation		+
	Additivelemente	S	-
		P	+
		B	+
Tribologie	Zahnradtragfähigkeit	+	
	Verhalten im Wandler-Kupplungs-Test	+	

Übereinstimmung: + gut - schlecht

Tabelle 6.2: Bewertung der Alterungsmethode bei 130°C, ATF

6.2.4 Schmierstoff MTF

Der in der Anwendung gealterte Schmierstoff MTF hat nach der Einordnung in ein Lebensdauerdiagramm für Mineralöle sehr genau die Lebensdauergrenze erreicht (Bild 4.5). Die Ergebnisse in den Komponententests spiegeln diese Alterung in Form von verringerter Fress- und Grübchentrugfähigkeit sowie ungünstigerem Synchronisationsverhalten wider.

Der Schmierstoff wurde bei 120°C und 130°C im FZG-Prüfstand gealtert, wobei die Alterung bei 120°C einen Einfluss des Silikonöls auf das Synchronisationsverhalten

klären sollte. Da dies widerlegt wurde, ist aus Gründen der Zeitersparnis die Alterung bei 130°C zu bevorzugen.

Der Vergleich zwischen Feldalterung und Alterungssimulation im FZG-Prüfstand bei 130°C liefert nur eine bedingte Übereinstimmung in den Analysekenwerten. In der NZ ist eine deutliche Diskrepanz vorhanden. Die Viskosität sowie die Ergebnisse aus den IR-Untersuchungen weisen auf eine stärkere Alterung im FZG-Prüfstand hin. Dagegen liegen die Veränderungen der Additivelemente auf einem vergleichbaren Niveau.

In den Zahnradkomponententests stimmen die unterschiedlich gealterten Proben in der Fresstragfähigkeit sehr gut überein. Die Verringerung der Grübchentrugfähigkeit fällt für das Öl aus der Feldalterung deutlicher aus. Im Synchronisationsverhalten sind die Veränderungen in der Tribologie gut vergleichbar. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen, die im Forschungsvorhaben FVA 296 [50] ermittelt wurden. Im Wälzlagertest zeigen Neuöl und feldgealtertes Öl einen völlig unzureichenden Verschleißschutz. Dagegen hat sich das tribologische Verhalten durch die Alterungssimulation deutlich verbessert.

Die Bewertung der Alterungsmethode anhand des MTF ist für die Alterungstemperatur von 130°C in **Tabelle 6.3** zusammengefasst.

Bereich	Kriterium		Bewertung
Analytik	Kennwerte	NZ	-
		v	+
	Oxidation		-
	Extinktion Additivbanden	890 cm ⁻¹	-
		1110 cm ⁻¹	+
	Additivelemente	S	+
P		+	
Tribologie	Zahnradtragfähigkeit		+
	Verhalten in Synchronisierung	HS	+
		Karbon	-

Übereinstimmung: + gut - schlecht

Tabelle 6.3: Bewertung der Alterungsmethode bei 130°C, MTF

6.2.5 Gesamtbewertung

Eine Gesamtübersicht über die Bewertung der Alterungsmethode für alle vier Versuchsschmierstoffe zeigt **Tabelle 6.4**.

			CLP-PG	AXLE	ATF	MTF
Grad der Alterung nach der Alterung in der Anwendung			sehr gering	gering	mittel	stark
Bereich	Kriterium		Bewertung			
Analytik	Kennwerte	NZ	+	-	-	-
		v	o	o	+	+
	Oxidation				+	-
	Extinktion Additivbanden	890 cm ⁻¹				-
		1110 cm ⁻¹				+
	Additivelemente	S		-	-	+
		P	+	+	+	+
B				+		
Tribologie	Zahnradtragfähigkeit		+	+	+	+
	Verhalten in Synchronisierungen	HS				+
		Karbon				-
	Verhalten in Wandler-Kupplung				+	

Übereinstimmung: + gut - schlecht o nicht bewertbar

Tabelle 6.4: Bewertung der Alterungsmethode bei 130°C für alle Versuchsschmierstoffe

Es lässt sich feststellen, dass nach der Alterung in der Anwendung sowie im FZG-Prüfstand zum Teil deutliche Diskrepanzen in den Analysewerten vorliegen. Insbesondere weist die NZ auf andere Alterungsreaktionen hin. Die NZ ist jedoch von Additiveinflüssen stark überlagert. Aufgrund der schwierigen Bestimmbarkeit und der daraus resultierenden schlechten Wiederholbarkeit sowie aufgrund des häufig U-förmigen Verlaufs über der Alterungsdauer und der dadurch bedingten schwierigen Interpretation einzelner Werte ist sie zur Beschreibung des Alterungszustandes nicht generell geeignet.

Für das Verhalten im Zahnradkontakt sowie in Synchronisierungen scheinen die Unterschiede in den chemisch-physikalischen Kennwerten nur von untergeordneter Bedeutung zu sein. Hier liefert die Alterungsmethode für die untersuchten Schmierstoffe durchaus gute Ergebnisse. Das Ziel, nach kurzer Zeit tendenzielle Aussagen über das tribologische Verhalten nach längerem Praxisbetrieb treffen zu können, wird erreicht.

Mit den Veränderungen der Analysewerte alleine ist jedoch noch keine Vorhersage der Veränderungen im tribologischen Verhalten möglich, sie können aber dazu dienen einen Bezug zur Feldalterung herzustellen. Die Veränderungen der chemisch-physikalischen Kennwerte weisen zwar auf eine Alterung des Schmierstoffs und damit verbundene Veränderungen hin, können aber nicht die tatsächlichen Auswirkungen im tribologischen Verhalten anzeigen. Diese müssen nach der Alterung in entsprechenden Komponententests ermittelt werden.

Vergleicht man die Bedingungen, unter denen die Alterung in der Anwendung und im FZG-Prüfstand stattfindet (s. Tabelle 4.4), so stellt man fest, dass in der Anwendung eine geringere Ölmenge einer vergleichsweise geringen Temperatur und vielen Eingriffen (Zahnradern, Lagern, etc.) ausgesetzt ist. Demgegenüber wird bei der Alterung im FZG-Prüfstand eine große Ölmenge einer hohen Temperatur und nur wenigen Eingriffen ausgesetzt. Dies legt den Schluss nahe, dass sich Veränderungen, die auf thermisch-oxidative Beanspruchung zurückzuführen gut abbilden lassen, Veränderungen aus Eingriffen dagegen eher weniger. Die Ergebnisse der Veränderungen der Alterungsbande im IR-Spektrum und der Komponententests einerseits und die Partikelgehalte andererseits bestätigen dies.

6.3 Anwendung der Alterungsmethode

Mit Hilfe der Alterungssimulation ist es möglich, anwendungs- und schmierstoffspezifische Öllebensdauergrenzen zu ermitteln. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis des lebensdauerbegrenzenden Kriteriums. Dieses Kriterium kann je nach Anwen-

dung beispielsweise das Reibungsverhalten in einer Wandler-Kupplung oder in Synchronisierungen, die Grübchenträgfähigkeit oder Anderes sein. Zudem müssen Proben aus dem Feld mit bekannter Beanspruchungstemperatur und -zeit vorliegen. Dabei ist zu unterscheiden, ob diese Proben das lebensdauerbegrenzende Kriterium bereits erreicht haben oder nicht. Die Vorgehensweise zur Ermittlung von Öltemperatur-Zeit-Kennlinien mit Hilfe der Alterungssimulation wird anhand der **Bilder 6.6** und **6.7** erläutert.

Zunächst wird der Fall betrachtet, dass die Probe aus dem Feld die Lebensdauer bezüglich des lebensdauerbegrenzenden Kriteriums erreicht hat (Fall 1), siehe Bild 6.6.

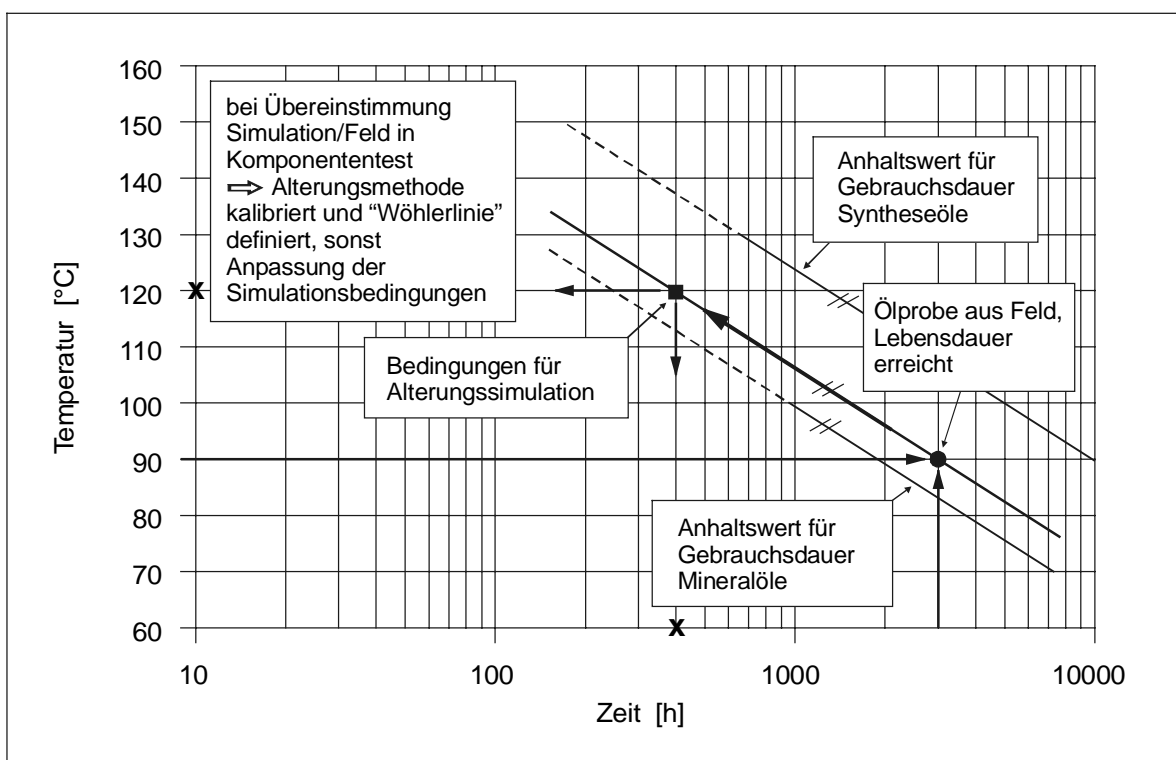


Bild 6.6: Anwendung der Alterungssimulation - Fall 1

Durch Eintragung der Temperatur- und Zeitbedingungen für die Schmierstoffprobe aus dem Feld ergibt sich ein Punkt der anwendungs- und schmierstoffspezifischen Lebensdauergeraden, d.h. der "Wöhlerlinie". Die Bedingungen der Alterungssimulation können durch Geraden ermittelt werden, die durch den Punkt der Feldprobe und parallel zu Grenzlinien aus allgemeinen Erfahrungen für Gebrauchsdauern von Mineral- und Syntheseölen verlaufen. Die Temperatur für die Alterungssimulation sollte in Abhängigkeit der Temperatur in der Anwendung festgelegt werden. Eine Alterung bei 20 bis 30 K Öltemperatur über der Temperatur in der Praxis erlaubt eine Reduzierung der Zeit auf 1/4 bis 1/8. Höhere Temperaturen als maximal 130°C zu einer weiteren Reduzierung der Alterungszeiten erwiesen sich, abhängig von Grund-

öl und Additivsystem, in den vorliegenden Untersuchungen als ungeeignet, da hier andere Reaktionen als in der Praxis ablaufen können.

Die gealterten Proben sind in einem Komponententest auf ihre tribologische Eigenschaft hinsichtlich des lebensdauerbegrenzenden Kriteriums zu untersuchen. Bei Übereinstimmung zwischen den Proben aus dem Feld und der Alterungssimulation ist letztere "kalibriert" und die "Wöhlerlinie" bezüglich dieses tribologischen Kriteriums für diesen Schmierstoff festgelegt. Ist die Übereinstimmung nicht gegeben, so sind die Bedingungen der Alterungssimulation entsprechend anzupassen.

Mit der "Wöhlerlinie" ist eine Zuordnung zwischen Beanspruchungstemperatur und möglicher Laufzeit gegeben. Bei Veränderung der mittleren Öltemperatur in der Anwendung lässt sich damit die zugehörige Ölwechselfrist bestimmen. Eine Extrapolation auf Getriebe mit gleichem Beanspruchungskennfeld ist für den untersuchten Schmierstoff möglich. Die mittlere Öltemperatur kann anhand von Erfahrungswerten oder durch geeignete Berechnungsprogramme, z.B. WTplus [26], bestimmt werden. Die Überprüfung der Veränderungen anderer tribologischer Eigenschaften kann anhand von weiteren Komponententests erfolgen.

Für den Fall, dass die Ölprobe aus dem Feld das lebensdauerbegrenzende Kriterium noch nicht erreicht hat (Fall 2), ist eine modifizierte Vorgehensweise zur Ermittlung der Öltemperatur-Zeit-Kennlinie erforderlich, siehe Bild 6.7.

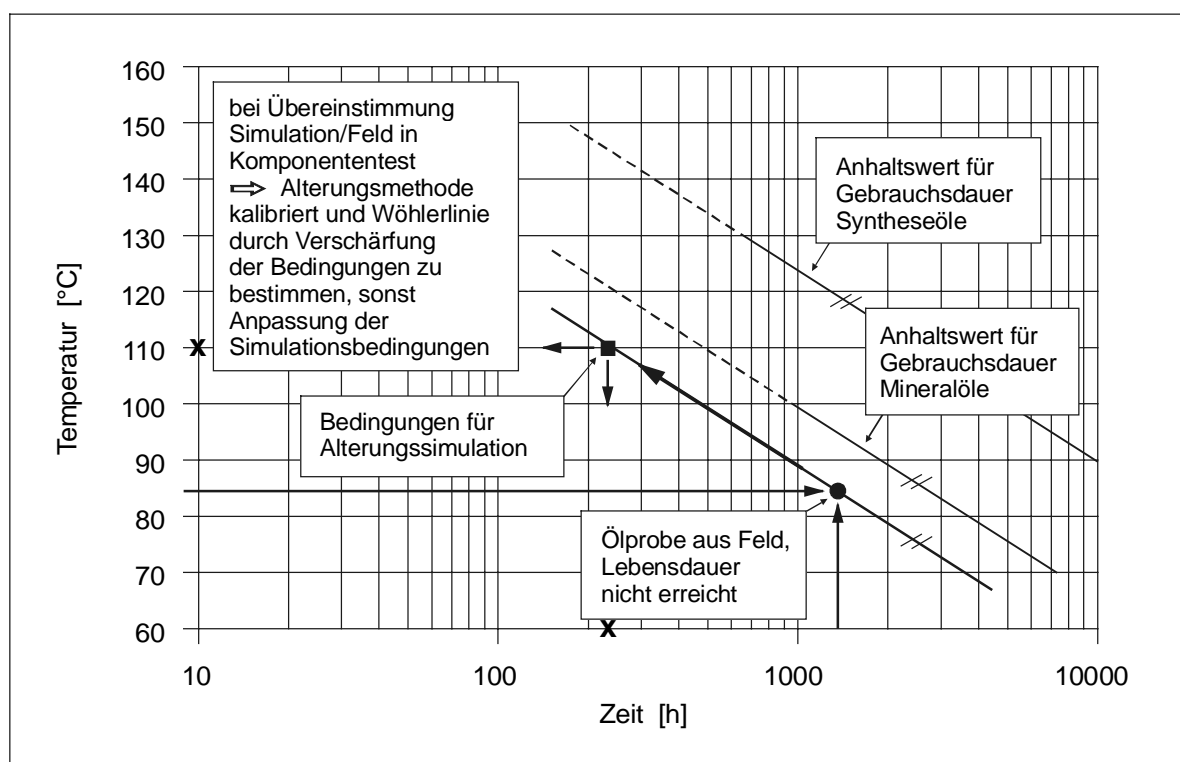


Bild 6.7: Anwendung der Alterungssimulation - Fall 2

Die Bedingungen der Alterungssimulation werden identisch zu Fall 1 ermittelt. Bei Übereinstimmung zwischen den Proben aus dem Feld und der Alterungssimulation im Komponententest bezüglich des lebensdauerbegrenzenden Kriteriums ist die Alterungssimulation "kalibriert" und die "Wöhlerlinie" kann nun durch schrittweise Steigerung der Beanspruchung in der Alterungssimulation in Form von Temperatur und/oder Zeit und anschließende Komponententests ermittelt werden. Ist die Übereinstimmung nicht gegeben, müssen die Bedingungen der Alterungssimulation entsprechend angepasst werden.

7 Einfluss der Ölalterung auf die Grübchentragfähigkeit

Im Rahmen der Arbeiten von Bayerdörfer [5] und Weiß [64] sowie der vorliegenden Untersuchungen wurden zahlreiche Versuche zur Ermittlung der Veränderungen der Grübchenlebensdauer bei Alterung des Schmierstoffs durchgeführt. Die für den Anwender wichtige rechnerische Abschätzung der Grübchentragfähigkeit unter Berücksichtigung der Ölalterung wurde bisher noch nicht abgeleitet. Die Versuche mit Mineralölen typischer Schwefel-Phosphor Additivierung zeigten, dass mit der Alterung eine Reduzierung der Grübchenlebensdauer zu erwarten ist. Aus den Versuchen mit Syntheseölen ließ sich keine einheitliche Aussage ableiten. Daher beschränkt sich die nachfolgende rechnerische Ermittlung des Einflusses der Ölalterung auf die Grübchentragfähigkeit auf Mineralöle mit S-P Additivierung.

7.1 Berechnung der Grübchentragfähigkeit nach DIN 3990

Die Berechnung der Grübchentragfähigkeit nach DIN 3990 [12] basiert auf der Flankenpressung σ_H im Wälzpunkt oder im inneren Einzeleingriffspunkt, wobei der höhere der beiden Werte maßgebend ist. Die auftretende Flankenpressung σ_H und die zulässige Flankenpressung σ_{HP} werden getrennt für Ritzel und Rad berechnet. Für eine ausreichende Flankentragfähigkeit muss σ_H kleiner als σ_{HP} sein:

$$\sigma_H = Z_B \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}} \leq \sigma_{HP} \quad (3)$$

Z_B berücksichtigt die Umrechnung der Flankenpressung im Wälzpunkt auf die Flankenpressung im maßgebenden Eingriffspunkt des Ritzels. σ_{H0} ist die nominelle Flankenpressung im Wälzpunkt. Sie ist definiert als die bei Belastung einer fehlerfreien Verzahnung durch das statische Nennmoment hervorgerufene Pressung und kann wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{H0} = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\varepsilon \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t}{d_l \cdot b} \cdot \frac{u+1}{u}} \quad (4)$$

Die K-Faktoren berücksichtigen Kraftüberhöhungen durch äußere (K_A) und innere (K_V) Einwirkungen sowie ungleichmäßige Kraftaufteilungen über die Zahnbreite ($K_{H\beta}$) bzw. in Umfangsrichtung ($K_{H\alpha}$). Die Z-Faktoren hängen von der Verzahnungsgeometrie und dem -werkstoff ab. Auf die Bestimmungsgleichungen dieser

Größen wird hier nicht eingegangen. Sie sind in DIN 3990 [12] und [51] enthalten und ausführlich erläutert.

Die zulässige Flankenpressung σ_{HP} wird wie folgt bestimmt:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_{NT}}{S_{Hmin}} \cdot Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_X = \frac{\sigma_{HG}}{S_{Hmin}} \quad (5)$$

σ_{Hlim} ist der Dauerfestigkeitswert für Flankenpressung. S_{Hmin} ist der geforderte Mindest-Sicherheitsfaktor. Mit Z_{NT} wird die höhere Tragfähigkeit im Zeitfestigkeitsbereich gegenüber der Dauerfestigkeit berücksichtigt. Die Faktoren Z_L , Z_V , Z_R erfassen den Einfluss der Schmierfilmbildung auf die Flankenfestigkeit. Die Werkstoffpaarung und die Abmessungen gehen in Form von Z_W und Z_X in die Flankenfestigkeit ein.

Der Faktor Z_{NT} beinhaltet die Abhängigkeit der zulässigen Flankenpressung σ_{HP} von der Lastwechselzahl N_L . Es lässt sich unterscheiden zwischen den Bereichen statischer Festigkeit für $N_L < 10^5$, Zeitfestigkeit für $10^5 < N_L \leq 5 \cdot 10^7$ und Dauerfestigkeit für $N_L > 5 \cdot 10^7$. In **Bild 7.1** ist die zulässige Flankenpressung σ_{HP} in Abhängigkeit der Lastwechselzahl N_L für Räder aus einsatzgehärtetem Stahl dargestellt.

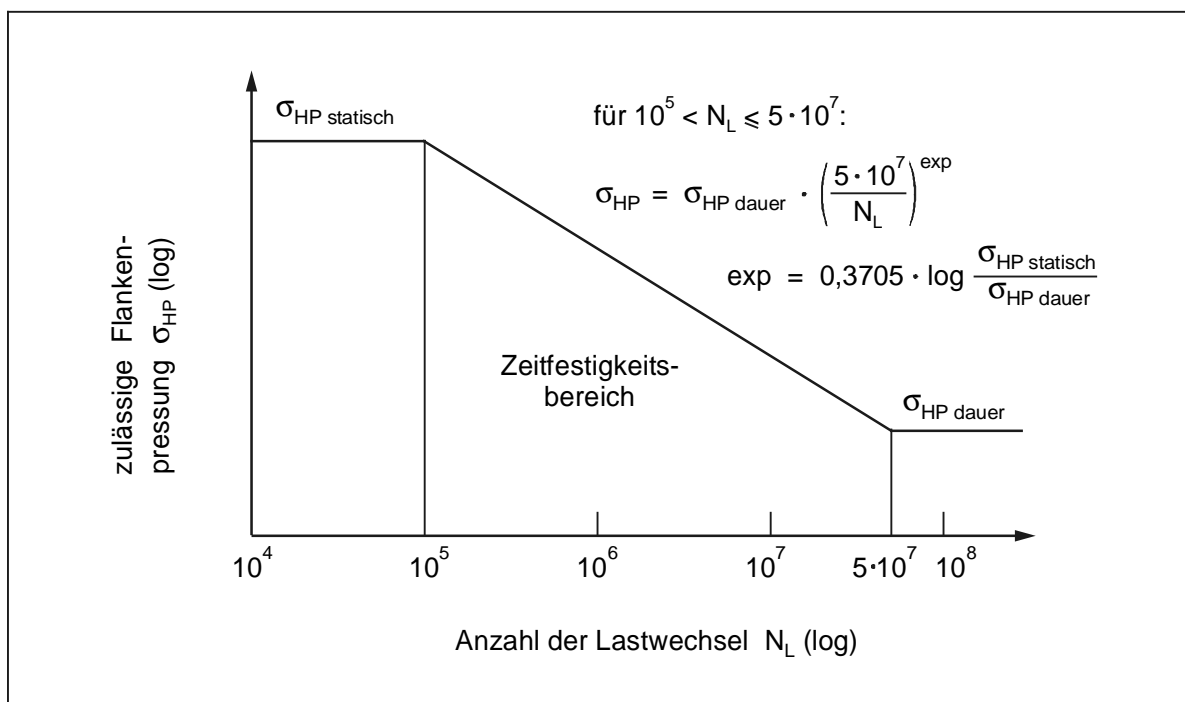


Bild 7.1: Zulässige Flankenpressung σ_{HP} nach DIN 3990 [12] für einsatzgehärtete Räder

Während die Faktoren Z_V und Z_R den Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit bzw. der Flankenrauheit auf die Wirkung des Schmierfilms berücksichtigen, wird der

Schmierstoffeinfluss durch Z_L erfasst. Allerdings wird Z_L lediglich anhand der Nennviskosität des Schmierstoffs bei 40°C oder 50°C bestimmt. Die tatsächliche Viskosität bei Betriebstemperatur geht nicht in die Rechnung ein. Als weitere Schmierstoffeinflussfaktoren auf die Grübchentragsfähigkeit sind in DIN 3990 die Art des Schmierstoffs (Mineralöl oder synthetisches Öl), seine Herkunft und sein Alterungszustand erwähnt. Diese Faktoren werden jedoch rechnerisch nicht erfasst. Über die DIN 3990 hinausgehende Ansätze zur Erfassung des Schmierstoffeinflusses auf die Grübchentragsfähigkeit, z.B. nach Knauer [43], werden im nächsten Abschnitt berücksichtigt.

7.2 Wöhlerlinien unter Berücksichtigung der Ölalterung

Wie bereits in Abschnitt 4.2.2 erläutert lässt sich nach Mobil [27] die Gebrauchsdauer für Getriebeöle auf Mineralölbasis in Abhängigkeit der Betriebstemperatur festlegen. Die angegebene Grenzlinie stellt dabei einen Anhaltswert aus allgemeinen Erfahrungen dar. Weiß [65] ermittelte im FVA Forschungsvorhaben 171/I, II Lebensdauern für EP-additivierte Getriebeöle auf Mineralölbasis, wobei als Grenzkriterium ein Absinken der Grübchenlebensdauer auf 80% des Neuöls angesetzt wurde. Die so ermittelte Lebensdauerkurve entspricht sehr genau den Angaben nach Mobil (vgl. Bild 4.5).

Damit lässt sich der Zusammenhang zwischen Betriebstemperatur ϑ und Dauer bis zum Absinken der Grübchenlebensdauer auf 80% des Neuöls t_{80} rechnerisch folgendermaßen erfassen:

$$t_{80}(\vartheta) = e^{\frac{193,5 - \vartheta}{13,8}} \quad (6)$$

mit t_{80} [h] Zeit bis zum Absinken der Grübchenlebensdauer auf 80% des Neuöls
 ϑ [°C] Öltemperatur im Bereich 70 bis 130°C

Für das Absinken der Grübchenlebensdauer mit der Laufzeit kann ein linearer Zusammenhang zwischen relativer Grübchenlebensdauer und Zeit angenommen werden. Hierfür spricht insbesondere der Verlauf der chemisch-physikalischen Schmierstoffkennwerte über der Alterungsdauer (vgl. Bilder 5.11 bis 5.16). Die relative Grübchenlebensdauer lässt sich somit qualitativ in Abhängigkeit der Zeit gemäß **Bild 7.2** darstellen.

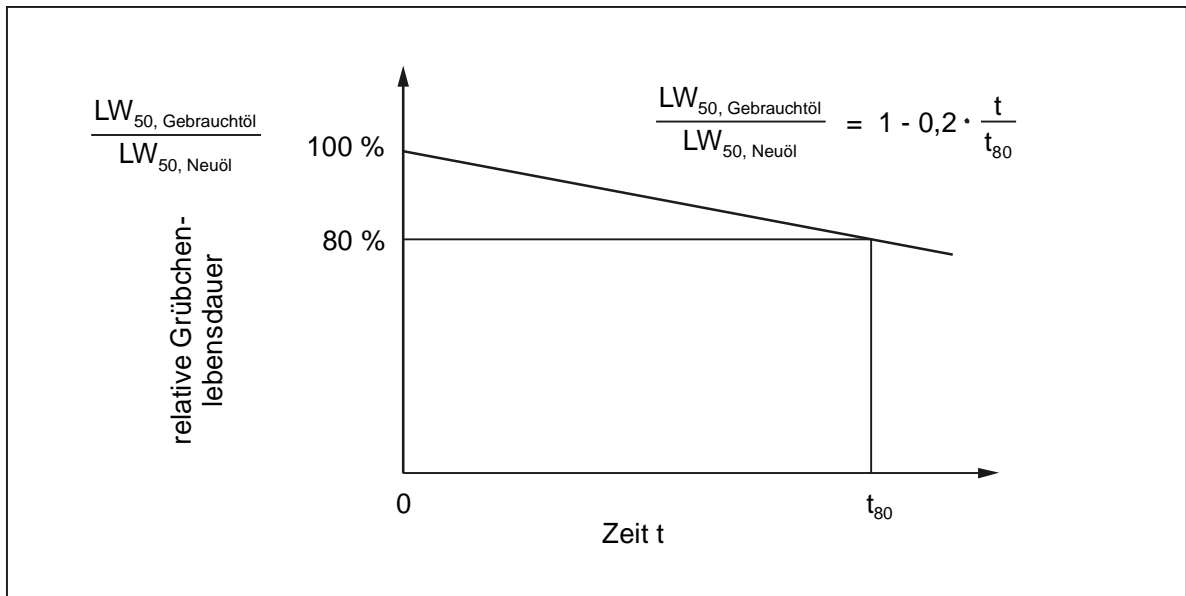


Bild 7.2: Relative Grübchenlebensdauer in Abhängigkeit der Zeit

Der rechnerische Zusammenhang zwischen relativer Grübchenlebensdauer und Laufzeit t lässt sich wie folgt angeben:

$$\frac{LW_{50, \text{Gebrauchtöl}}}{LW_{50, \text{Neuöl}}}(t) = 1 - 0,2 \cdot \frac{t}{t_{80}} \quad (7)$$

Durch Einsetzen der Bestimmungsgleichung für t_{80} aus (6) ergibt sich:

$$\frac{LW_{50, \text{Gebrauchtöl}}}{LW_{50, \text{Neuöl}}}(t, \vartheta) = \left(1 - 0,2 \cdot \frac{t}{\frac{193,5 - \vartheta}{e^{13,8}}} \right) \quad (8)$$

Der Zusammenhang zwischen der Grübchenlebensdauer und der Grübchentragfähigkeit ist im Zeitfestigkeitsgebiet durch den Exponenten \exp nach DIN 3990 gegeben (vgl. Bild 7.1). Damit lässt sich die Grübchentragfähigkeit im Zeitfestigkeitsgebiet unter Berücksichtigung der Ölalterung wie folgt ermitteln:

$$\frac{\sigma_{HP, \text{Gebrauchtöl}}}{\sigma_{HP, \text{Neuöl}}}(t, \vartheta) = \left(1 - 0,2 \cdot \frac{t}{\frac{193,5 - \vartheta}{e^{13,8}}} \right)^{\exp} \quad (9)$$

$$\text{mit } \exp = 0,3705 \cdot \log \frac{\sigma_{HP, \text{statisch}}}{\sigma_{HP, \text{dauer}}} \quad (10)$$

Aus der Herleitung ergibt sich, dass Gleichung (9) für eine Öltemperatur ϑ im Bereich von 70 bis 130°C gültig ist (vgl. Bild 4.5). Außerdem kann die relative Grüb-

chentragfähigkeit nicht kleiner als Null werden. Dementsprechend ist bei $t \geq 5 \cdot t_{80}$ als Festigkeitswert die Dauerfestigkeit $\sigma_{HP \text{ dauer}}$ einzusetzen.

In **Bild 7.3** sind die nach Gleichung (8) berechneten Grübchenlebensdauern den in Versuchen ermittelten Werten gegenübergestellt. Bei den Ölen handelt es sich um das MTF aus der vorliegenden Arbeit sowie um zwei Mineralöle mit S-P Additiv aus den Untersuchungen von Weiß [64]. Der Vergleich der Werte liefert eine im Rahmen der allgemeinen Streuung von Pittingtestergebnissen gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Versuch.

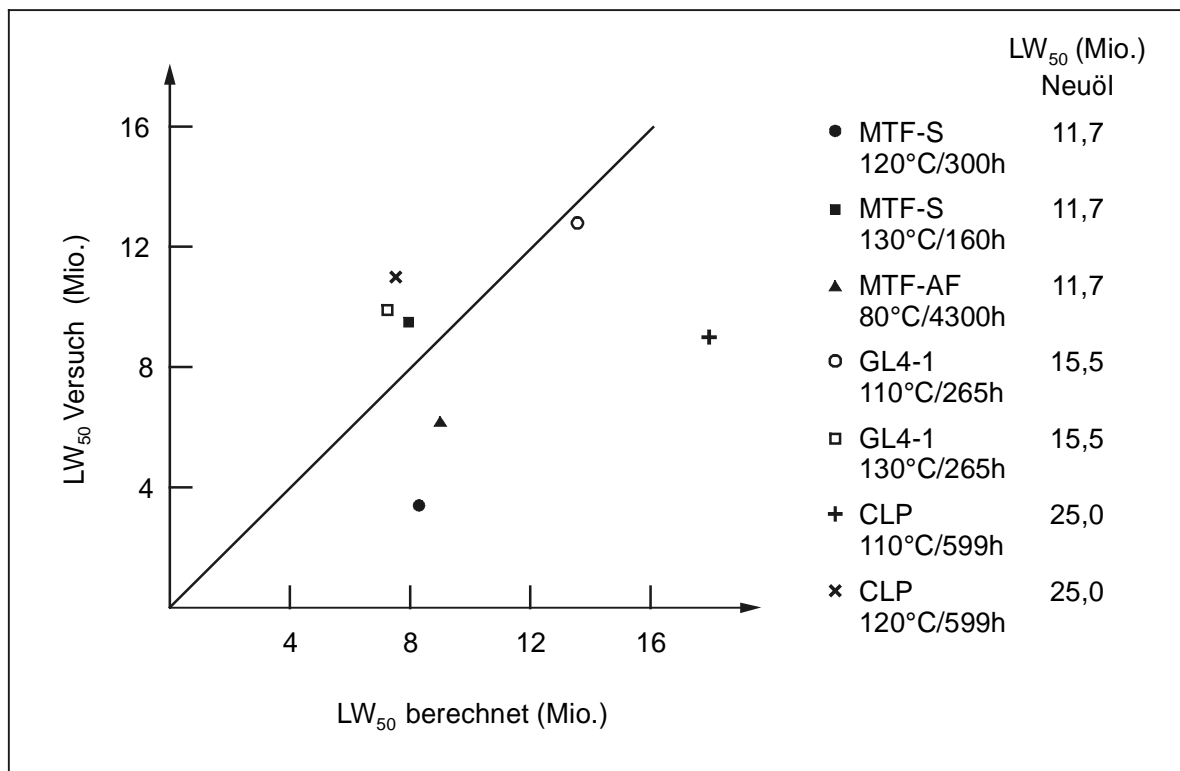


Bild 7.3: Vergleich Grübchenlebensdauer unter Ölalterung

Im Gegensatz zur Berechnung nach DIN 3990 geht bei Berücksichtigung der Ölalterung im Zeitfestigkeitsgebiet die Drehzahl in die Grübchentragfähigkeit ein. Mit steigender Drehzahl werden in kürzerer Zeit hohe Lastwechselzahlen und damit schneller der Übergang zur Dauerfestigkeit erreicht, so dass die Ölalterung weniger weit fortschreiten kann und damit nur geringeren Einfluss hat als bei niedrigen Drehzahlen.

Zwischen Zeit t , Drehzahl n und Lastwechselzahl N besteht folgender Zusammenhang:

$$t = \frac{N}{n} \quad (11)$$

In den **Bildern 7.4 - 7.6** ist die Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Räder unter Berücksichtigung der Ölalterung für unterschiedliche Temperaturen und unterschiedliche Drehzahlen über der Lastwechselzahl dargestellt.

Die Faktoren Z_L , Z_V , Z_R , Z_W und Z_X wurden für die Berechnung gleich 1 gesetzt. Als Dauerfestigkeit wurde $\sigma_{HP \text{ dauer}} = 1500 \text{ N/mm}^2$ angenommen, als statische Festigkeit $\sigma_{HP \text{ statisch}} = 2400 \text{ N/mm}^2$ ($Z_{NT} = 1,6$).

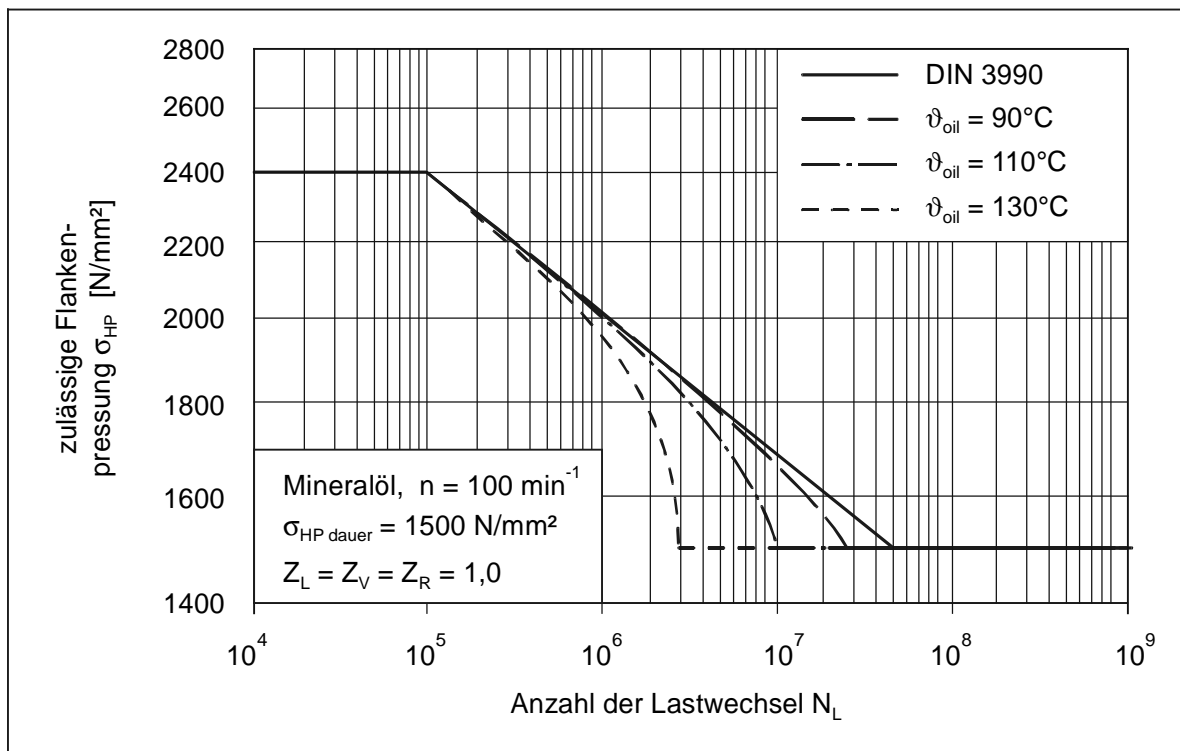


Bild 7.4: Grübchentragsfähigkeit einsatzgehärteter Räder für Mineralöle unter Berücksichtigung der Ölalterung, $n = 100 \text{ min}^{-1}$

Die Bilder verdeutlichen, dass sich die Ölalterung lediglich bei hoher Temperatur und niedriger Drehzahl auf die Grübchentragsfähigkeit im Zeitfestigkeitsbereich auswirkt. Mit steigender Drehzahl nähern sich die Festigkeitswerte selbst für hohe Temperaturen immer mehr der Festigkeitsfunktion nach DIN 3990 an. Oberhalb von $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ können die Unterschiede ohne und mit Berücksichtigung der Ölalterung im untersuchten Temperaturbereich bis $\vartheta_{oil} = 130^\circ\text{C}$ vernachlässigt werden.

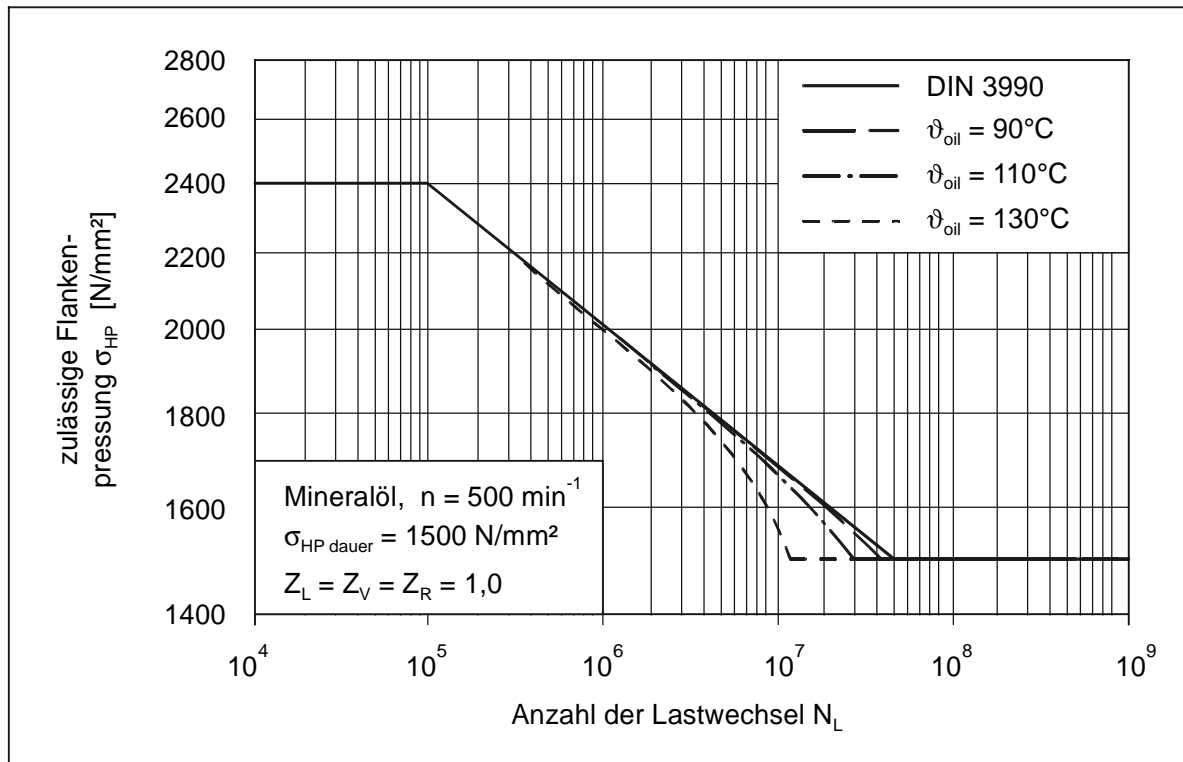


Bild 7.5: Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Räder für Mineralöle unter Berücksichtigung der Ölalterung, $n = 500 \text{ min}^{-1}$

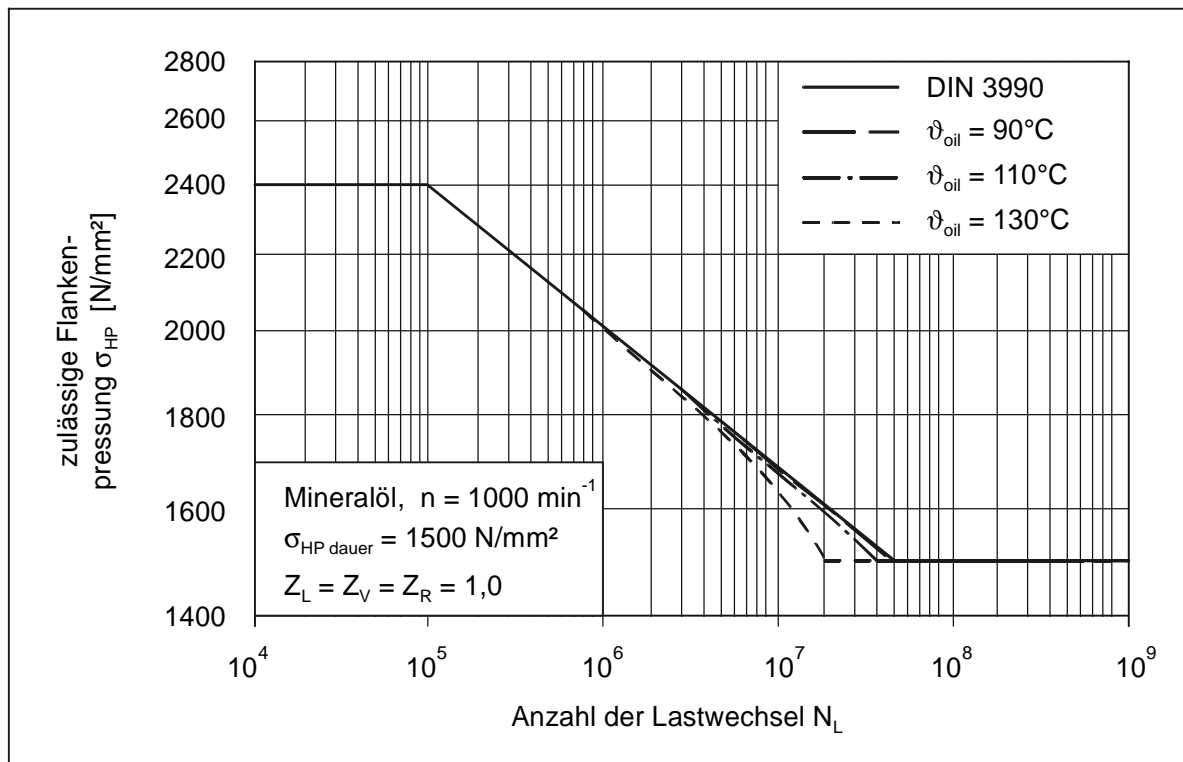


Bild 7.6: Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Räder für Mineralöle unter Berücksichtigung der Ölalterung, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$

In den vorliegenden Untersuchungen sowie in den Versuchen von Weiß [64] wurden die Schmierstoffe zunächst separat bei hoher Temperatur gealtert und anschließend in Komponententests bei geringerer Temperatur untersucht. In Praxisgetrieben erfolgt die thermische und tribologische Beanspruchung zeitgleich. Dementsprechend wird nicht nur der Schmierstoff der hohen Temperatur ausgesetzt, sondern auch die Zahnräder.

Knauer [43] stellt in Untersuchungen zur Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder einen deutlichen Einfluss der Öleinspritztemperatur fest. Versuche im Bereich von $60^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_E \leq 120^{\circ}\text{C}$ ergeben geringere Grübchenlebensdauer mit steigender Einspritztemperatur. Anhand von Werkstoffuntersuchungen wird nachgewiesen, dass bei Massentemperaturen $\vartheta_M \geq 120^{\circ}\text{C}$ Veränderungen im einsatzgehärteten Randgefüge der Zahnflanken stattfinden, durch die die Grübchentragfähigkeit gemindert wird. Auch nach AGMA 2001 [1] wird der Festigkeitswert für Grübchenbeanspruchung reduziert, wenn die Massentemperatur 120°C übersteigt. Für den Zahnradwerkstoff 16MnCr5 wird der Temperatureinflussfaktor Z_{ϑ} nach Knauer für den Bereich $120^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_M \leq 180^{\circ}\text{C}$ wie folgt bestimmt

$$Z_{\vartheta} = 1 - 0,15 \cdot \log(\vartheta_M - 120) \quad (12)$$

Darüber hinaus führt Knauer [43] den Schmierfilmfaktor Z_{λ} ein. Z_{λ} entspricht der Schmierstoffkenngröße $Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R$ nach DIN 3990 und berücksichtigt den Einfluss des Schmierfilms auf die Grübchentragfähigkeit. Für die Berechnung ist die Schmierfilmdicke bei Massentemperatur zu bestimmen. Damit geht im Gegensatz zur Rechnung nach DIN die Betriebsölviskosität ein. Die Verringerung der Grübchentragfähigkeit mit abnehmender Betriebsölviskosität wird durch Untersuchungen von Goll [34] bestätigt. Für Zahnreibungszahlen von $\mu_m = 0,04$ lässt sich Z_{λ} aus der spezifischen Schmierfilmdicke λ berechnen. Für $\lambda \geq 1,0$ ist $Z_{\lambda} = 1,0$, da die Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder dann nicht mehr von der Schmierfilmdicke beeinflusst wird. Im Bereich $\lambda \leq 1,0$ gilt

$$Z_{\lambda} = \lambda^{0,15} = \left(\frac{2 \cdot h_C}{R_{a1} + R_{a2}} \right)^{0,15} \quad (13)$$

In **Bild 7.7** sind die Versuchsergebnisse von Knauer mit dem Schmierstoff FVA 3 (Mineralöl ISO VG 100) bei Öleinspritztemperatur $\vartheta_E = 120^{\circ}\text{C}$ eingetragen. Zusätzlich ist die Wöhlerlinie nach DIN 3990 für 16MnCr5 mit $\sigma_{Hlim} = 1460 \text{ N/mm}^2$ sowie die Wöhlerlinie nach Knauer unter Berücksichtigung von Z_{λ} und Z_{ϑ} dargestellt. Zur

Einordnung der Versuchsergebnisse wurden die Dauerfestigkeiten jeweils mit dem Umrechnungsfaktor $f_{\text{XHD}} = 0,90$ nach [37, 39] und die statische Festigkeit mit dem Umrechnungsfaktor $f_{\text{XHS}} = 0,95$ nach [12] von 1% auf 50% Ausfallwahrscheinlichkeit umgerechnet. Die in den Versuchen ermittelte nominelle Flankenpressung wurde mit Z_B und \bar{K} auf die zugehörige auftretende Flankenpressung σ_{H0} umgerechnet.

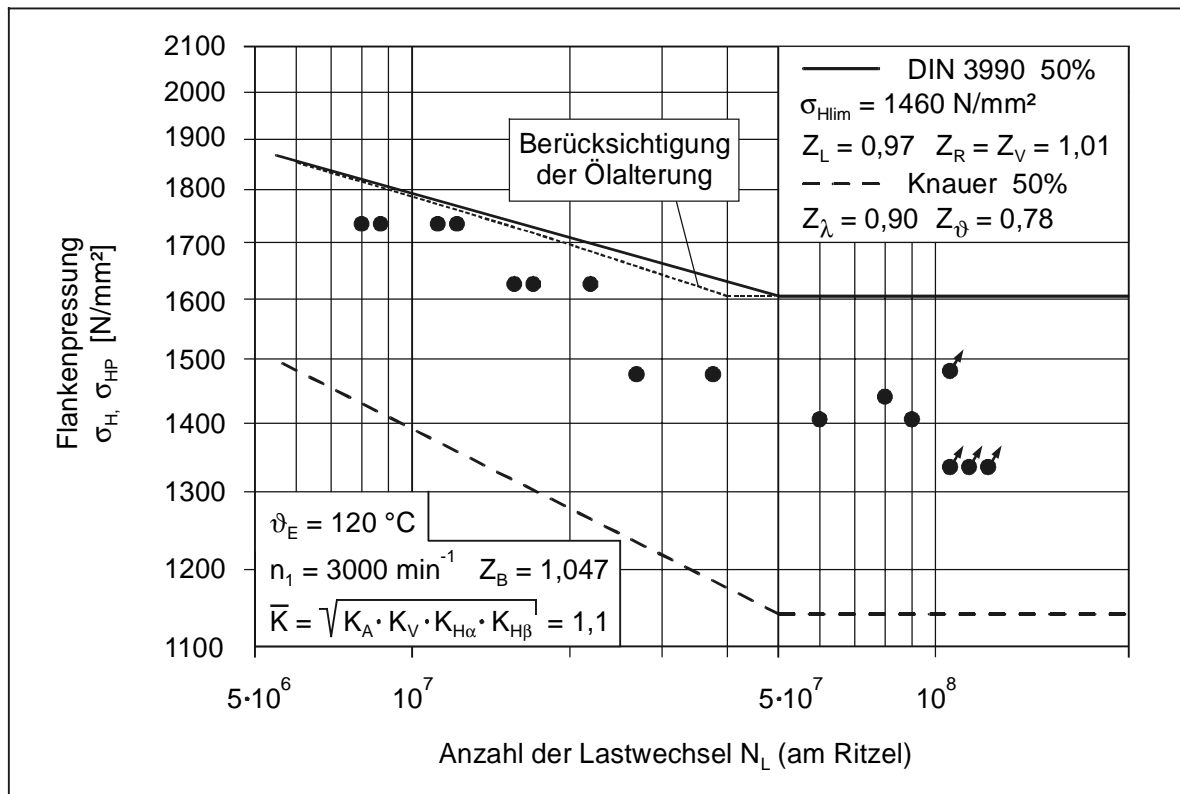


Bild 7.7: Versuchsergebnisse von Knauer [43] für Schmierstoff FVA3 bei $\vartheta_E = 120^\circ\text{C}$ und rechnerische Wöhlerlinie sowie Wöhlerlinie nach DIN 3990 für einsatzgehärtete Zahnräder aus 16MnCr5 und unter Berücksichtigung der Ölalterung

Die Versuchsergebnisse liegen deutlich unterhalb der Wöhlerlinie nach DIN 3990. Die Versuche wurden bei Öleinspritztemperatur $\vartheta_E = 120^\circ\text{C}$ ermittelt. Bei dieser Temperatur sind alterungsbedingte Veränderungen des Schmierstoffs und damit ein Einfluss auf die Grübchentragsfähigkeit möglich. Allerdings wurden die Versuche bei Ritzeldrehzahl $n_1 = 3000 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt, so dass kein Einfluss der Ölalterung zu erwarten ist. Das Absinken der Tragsfähigkeit scheint somit auf die von Knauer angegebene Festigkeitsminderung des Werkstoffs infolge der Temperatur zurückzuführen zu sein. Bestätigt wird diese Annahme durch Auslagerungsversuche von Knauer. Versuchsräder, die ca. 165 Stunden bei 150°C bzw. 120 Stunden bei 200°C ausgelagert worden waren, ergaben bei Öleinspritztemperatur $\vartheta_E = 60^\circ\text{C}$ eine auf 40% bzw. 20% reduzierte Grübchenlebensdauer im Vergleich zu neuen Rädern. Hierbei ist ein Einfluss der Ölalterung auszuschließen. Bei $\vartheta_E = 120^\circ\text{C}$ zeigte sich nur ein geringfügiger

giges Absinken der Grübchenlebensdauer im Vergleich zu neuen Prüfrädern, was darauf zurückgeführt werden kann, dass bei dieser Temperatur auch in den Laufversuchen Anlassvorgänge stattfanden.

Damit ergibt sich für eine hohe Temperatur insgesamt ein erheblicher Einfluss auf die Grübchentragfähigkeit. Zum einen wird die Werkstofffestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder infolge von Anlassvorgängen gemindert und zum anderen reduziert sich die Filmdicke aufgrund der geringeren Betriebsölviskosität. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit steigender Temperatur der Einfluss auf die Filmdicke abnimmt. Im Bereich hoher Temperaturen ändert sich die Schmierfilmdicke nur noch geringfügig. Neben dem Einfluss auf die Viskosität wirkt sich die Temperatur aber auch auf die übrigen chemisch-physikalischen Eigenschaften des Schmierstoffs aus. Bei hoher Temperatur finden im Lauf der Zeit Alterungsreaktionen und Veränderungen der Additive statt. Als weiterer Einflussparameter muss somit auch die Dauer der Beanspruchung berücksichtigt werden. Eine qualitative Abschätzung der Einflüsse kann anhand des Beispiels in **Bild 7.8** erfolgen.

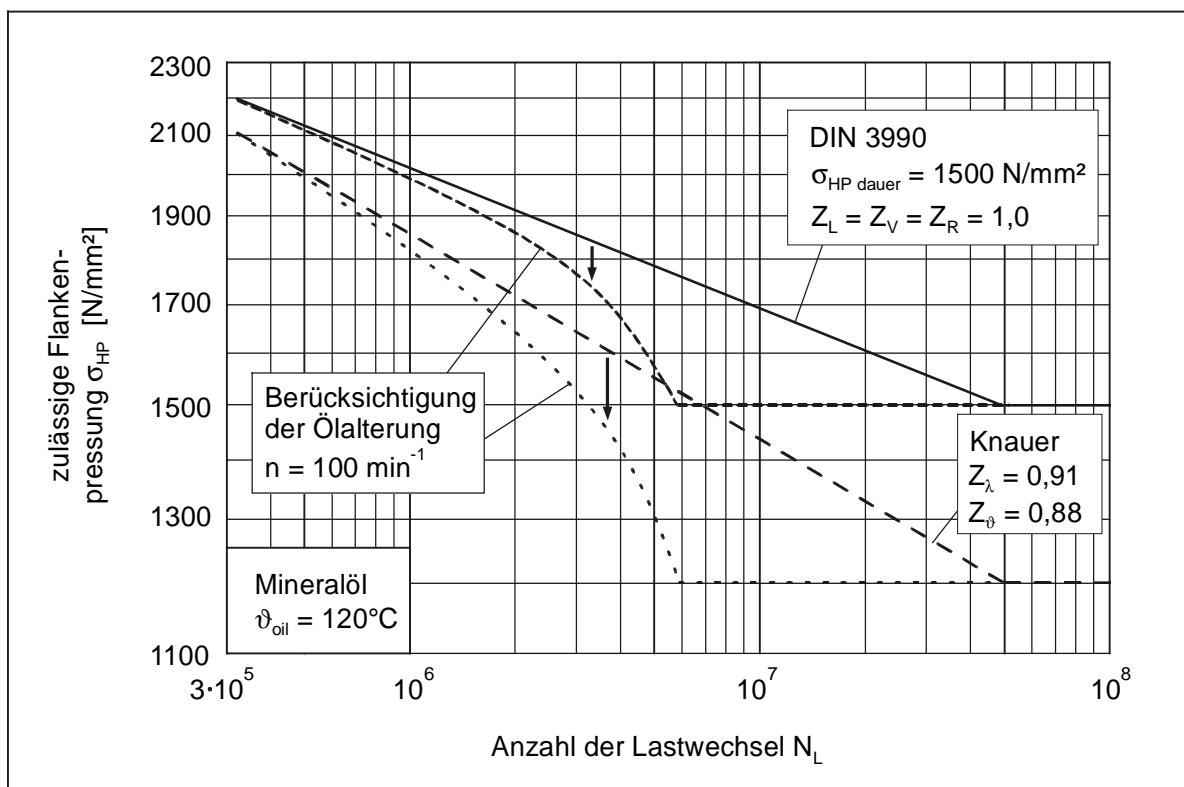


Bild 7.8: Beispielhafte Gegenüberstellung der berechneten Wöhlerlinien nach DIN 3990 und nach Knauer [43] und Berücksichtigung der Ölalterung

Bei Öltemperatur $\vartheta_{oil} = 120^\circ\text{C}$ und Drehzahl $n = 100 \text{ min}^{-1}$ ergeben sich die dargestellten Festigkeitswerte nach DIN und Knauer. Für die Berechnung wurde $Z_L \cdot Z_V \cdot Z_R = 1$ angenommen. Dem Temperatureinflussfaktor Z_ϑ liegt eine ange-

nommene Massentemperatur $\vartheta_M = 126^\circ\text{C}$ zugrunde. Der Einfluss der Ölalterung wurde nach Gleichung (9) ermittelt, wobei als Ausgangsfestigkeit für Neuöl in einem Fall die Werte nach DIN und im anderen Fall nach Knauer herangezogen wurden.

Legt man als Ausgangsfestigkeit für Neuöl die Werte nach DIN 3990 zugrunde, so ist der Einfluss der Ölalterung rechnerisch bereits abgedeckt durch eine Berechnung nach Knauer. Andererseits wurde die Festigkeitsminderung infolge der Werkstoffveränderungen aus Auslagerungsversuchen und Laufversuchen hergeleitet, in denen die Ölalterung keinen Einfluss hatte. Somit wäre es naheliegend, die Minderung der Festigkeit infolge Ölalterung als zusätzlichen Effekt zu betrachten. Dementsprechend kann als Festigkeit für Neuöl der Wert nach Knauer herangezogen werden und davon ausgehend der mindernde Einfluss der Ölalterung berücksichtigt werden.

7.3 Anwendung der Erkenntnisse für Praxisgetriebe

Wie gezeigt wurde, müssen für einen Einfluss der Ölalterung auf die Grübchentragsfähigkeit zwei Bedingungen erfüllt sein. Die Öltemperatur muss dauerhaft über ca. 100°C liegen und es müssen niedrige Drehzahlen vorliegen. Diese Kombination kommt in Praxisgetrieben nicht häufig vor. Getriebe mit Einspritzschmierung sind meist mit einem Ölkühler ausgeführt. In langsam laufenden Industriegetrieben mit Tauchschmierung ist die Öltemperatur in der Regel deutlich niedriger. Und bei Getrieben mit bekannter hoher Öltemperatur, z.B. Fahrzeuggetrieben mit ϑ_{oil} bis zu 100°C , liegen üblicherweise höhere Drehzahlen vor. Es sind jedoch einzelne Anwendungen aus dem Bereich Papiermaschinen und Holzverarbeitung (Pressen) im Einsatz, die mit niedriger Drehzahl in der Abtriebsstufe bei 95°C Ölsumpftemperatur betrieben werden. Hier könnte sich bei langen Ölwechselintervallen ein Einfluss der Ölalterung auf die Grübchentragsfähigkeit bemerkbar machen. Aufgrund der sehr hohen Kosten, die mit einem Ausfall dieser speziellen Anlagen verbunden wären, sind jedoch kurze Ölwechselintervalle im Rahmen der jährlichen Inspektionen festgelegt, so dass die Gefahr eines Schadens infolge nachlassender Schmierstoffleistungsfähigkeit a priori vermieden wird.

Prinzipiell lässt sich die Empfehlung ableiten, bei höherer Öltemperatur und insbesondere bei Drehzahl $n < 500 \text{ min}^{-1}$ die Grübchentragsfähigkeit nach Knauer [43] zu ermitteln. Bei niedrigeren Temperaturen deutlich unter 100°C sowie bei Drehzahlen über 1000 min^{-1} muss die Alterung von Mineralölen für die Grübchentragsfähigkeit im Zeitfestigkeitsbereich nicht berücksichtigt werden.

Im Bereich der Dauerfestigkeit ist für den Einfluss des Schmierstoffs die Viskosität maßgeblich. Mit steigender Viskosität nimmt die Dauerfestigkeit zu. Bei hoher Öltemperatur ist mit einer alterungsbedingten Erhöhung der Viskosität zu rechnen. Somit ist für die Dauerfestigkeit keine Abnahme der Grübchentrugfähigkeit infolge der Ölalterung zu erwarten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Alterung von Getriebschmierstoffen im Zahnradprüfstand und in Praxisgetrieben zu vergleichen.

Die Alterung erfolgte in einem FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfstand unter thermisch-oxidativer Beanspruchung und Scherung. Mit vier Versuchsschmierstoffen unterschiedlicher Anwendungsbereiche wurden mehrere Ölalterungsversuche unter Variation der Öltemperatur und Zeit durchgeführt und mit gealterten Proben aus der jeweiligen Anwendung verglichen.

In umfangreichen Ölanalysen wurden die chemisch-physikalischen Änderungen der gealterten Öle ermittelt sowie Untersuchungen zu den tribologischen Veränderungen im FZG-Prüfstand durchgeführt. Mit jeweils einem Öl wurden Versuche zum Verhalten in Synchronisierungen im SSP 180 und in einem Wandler-Kupplungs-Tribometertest bei der Fa. ZF Friedrichshafen durchgeführt.

Wesentliche Unterschiede zwischen der Alterung im Zahnradprüfstand und im Praxisgetriebe sind:

- Praxisgetriebe: kleine Ölmenge, viele tribologische Kontakte (Lager, Verzahnungen, etc.) niedrige Temperatur, lange Zeit
- Zahnradprüfstand: große Ölmenge, wenige tribologische Kontakte, hohe Temperatur, kurze Zeit

Daraus lässt sich ableiten, dass temperaturbedingte Veränderungen des Schmierstoffs, die der Halbwertszeitregel von 10 K folgen, gut nachgebildet werden können, eingriffsbedingte Änderungen eher nicht.

Hinsichtlich der Zahnradtragfähigkeit konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Praxisalterung und Alterung im Zahnradprüfstand erzielt werden. Auch das veränderte Verhalten in Synchronisierungen kann mittels der Alterungsmethode teilweise

gut abgebildet werden. Offenbar kann der Abbau von Wirkstoffen im Additivsystem mit einer Kombination aus hoher thermisch-oxidativer und geringer eingriffsbedingter Beanspruchung in der Simulation die tatsächlichen Änderungen in der Praxis nachbilden. Der Grad der Alterung in der Anwendung konnte für die vier Versuchsschmierstoffe mit der Simulation nachvollzogen werden.

Zusammenhänge zwischen den heute üblicherweise gemessenen chemisch-physikalischen Kennwerten der Schmierstoffe und dem tribologischen Verhalten sind nur sehr bedingt ableitbar. Insbesondere in den Untersuchungen der praxisgealterten Öle hat sich gezeigt, dass die Ermittlung nur einzelner Werte, beispielsweise Viskosität und Neutralisationszahl, nicht ausreicht, um alterungsbedingte Veränderungen der Öle zu erkennen bzw. zu beschreiben. Zur sicheren Bestimmung von Alterungserscheinungen sind IR-Spektroskopie und gegebenenfalls auch Methoden zur Ermittlung von Elementgehalten unerlässliche Hilfsmittel. Anhand der Ergebnisse können dann allerdings nicht unmittelbar Rückschlüsse auf konkrete tribologische Veränderungen getroffen werden. Vielmehr müssen die Analysewerte als Anzeichen für Ölveränderungen betrachtet werden, die verschiedene mögliche Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit des Schmierstoffs zur Folge haben können. Diese Einflüsse sind wiederum stark öltyp- und additivabhängig.

Eine allgemeingültige Methode zur Simulation von Öllebensdauerschmierung oder Verlängerung von Ölwechselfristen lässt sich nicht definieren. Die alterungsbedingten Einflüsse auf tribologische Veränderungen sind zu sehr von der jeweiligen Anwendung und dem jeweiligen Schmierstoff sowie der Additivierung abhängig, als dass eine einheitliche Methode diese Einflüsse vollständig erfassen könnte.

Für eine gezielte Untersuchung der Auswirkungen von verlängerten Ölwechselintervallen muss das öl- und anwendungsspezifische lebensdauerbegrenzende Kriterium bekannt sein, z.B. aus Schadensfällen oder Langzeituntersuchungen in der Anwendung. Zudem sind Proben aus der Anwendung mit bekannter Beanspruchungstemperatur und -zeit erforderlich. Mit Hilfe der Alterungsmethode kann nun der Schmierstoff im FZG-Prüfstand bei erhöhter Temperatur und damit verkürzter Laufzeit gealtert und anschließend auf das Verhalten hinsichtlich der kritischen Komponenten getestet werden. Aus den Ergebnissen lassen sich dann öl- und anwendungsspezifische Lebensdauergrenzen ableiten, also "Öltemperatur-Zeit-Wöhlerlinien". Mit diesen "Wöhlerlinien" ist eine Zuordnung zwischen Beanspruchungstemperatur und möglicher Laufzeit gegeben.

In den Versuchen zum Verschleißverhalten in langsam laufenden Zahnrädern wurde für Mineralöle überwiegend günstigeres Verschleißverhalten mit der Alterung fest-

gestellt. Für die untersuchten Syntheseöle lag der Verschleiß sowohl im Neuzustand als auch im gealterten Zustand auf sehr niedrigem Niveau. Die Veränderungen von Viskosität, Neutralisationszahl und Additivgehalt korrelierten nicht mit dem Verschleißverhalten. Weitere Untersuchungen zur Polarität und zum Benetzungsverhalten der Schmierstoffe konnten nicht zu Klärung des gefundenen Verschleißverhaltens beitragen.

Die rechnerische Abschätzung des Einflusses der Ölalterung auf die Grübchentragefähigkeit für Mineralöle hat ergeben, dass bei Öltemperaturen unter 100°C sowie bei Drehzahlen über ca. 1000 min⁻¹ kein maßgeblich schädigender Einfluss der Ölalterung auf die Grübchentragefähigkeit zu erwarten ist.

8.2 Ausblick

Die tendenzielle Übereinstimmung zwischen den Veränderungen im tribologischen Verhalten nach der Alterung in Praxisgetrieben und im Zahnradprüfstand ist gegeben. Die chemisch-physikalischen Kennwerte der Schmierstoffe sind dagegen teilweise unterschiedlich. Verbesserungen in Form von neuen Analysemethoden zur besseren Beschreibung des Alterungszustands wären hier wünschenswert.

Zur besseren Nachbildung der in Praxisgetrieben vorliegenden Verhältnisse sollte die Anzahl der tribologischen Kontakte, denen der Schmierstoff bei der Alterung im Prüfstand ausgesetzt ist, erhöht werden. Denkbar ist, das Ölaggregat zur Alterung unmittelbar an die jeweilige Anwendung anzuschließen. Damit ließe sich hinsichtlich der tribologischen Beanspruchung des Schmierstoffs eine bessere Übereinstimmung zwischen Praxis und Prüfstand erreichen.

Die Versuchsöle wurden in den vorliegenden Untersuchungen auf ihr Verhalten in Zahnrädern sowie in einem Fall auch in Synchronisierungen bzw. in einer geregelten Wandler-Kupplung getestet. Nicht berücksichtigt wurde der Einfluss der Alterung auf das Verhalten in einem Variator. Wie Erfahrungen in der Praxis gezeigt haben, sind aufgrund der spezifischen Anforderungen an den Schmierstoff in diesem System sehr deutliche Veränderungen mit der Alterung möglich. Für diesen Bereich wären weiterführende systematische Untersuchungen erstrebenswert.

9 Literatur

- [1] ANSI/AGMA 2001-C: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, 1995.
- [2] ANSI/ASTM D 4998 Standard D 4998-89: Test Method for Evaluating Wear Characteristics of Tractor Hydraulic Fluids, 1995.
- [3] Bartz, W. J.: Getriebeschmierung, Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik, Band 5. Expert Verlag, 1989.
- [4] Bartz, W. J.: Einfluss von Schmierstoffen auf die Grübchenbildung bei Zahnradern. Antriebstechnik 12, 1973.
- [5] Bayerdörfer, I.: Einfluss des Alterungszustandes synthetischer und mineralischer Schmierstoffe auf die Grübchen- und Graufleckentragfähigkeit unter Berücksichtigung der Ölverschmutzung. FVA Forschungsvorhaben Nr. 171/III, FVA Heft 618, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2001.
- [6] Bayerdörfer, I.: Untersuchungen zum Einfluss von Schmierstoff und Betriebsbedingungen auf das Verschleißverhalten von Zahnradern. DGMK Forschungsprojekt Nr. 377-01, 1997.
- [7] CEC L48 A00: Oxidation Stability of Lubricating Oils used in Automotive Transmissions by Artificial Ageing, 2000.
- [8] DIN 3960: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder und Stirnradpaare mit Evolventenverzahnung, 1987.
- [9] DIN 3962: Toleranzen für Stirnradverzahnungen, 1978.
- [10] DIN 3965: Toleranzen für Kegelradverzahnungen, 1986.
- [11] DIN 3969: Oberflächenrauheit von Zahnflanken, 1991.
- [12] DIN 3990: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, 1987.
- [13] DIN EN 10084: Einsatzstähle - Technische Lieferbedingungen, 1998.
- [14] DIN 50323, Teil 2: Tribologie - Verschleiß, Begriffe, 1995.
- [15] DIN 51354, Teil 1: FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine, Allgemeine Arbeitsgrundlagen, 1990.

-
- [16] DIN 51354, Teil 2: FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine, Prüfverfahren A/8,3/90 für Schmieröle, 1990.
- [17] DIN 51391, Teil 3: Prüfung von Schmierstoffen, Bestimmung des Gehaltes an Additivelementen, Direkte Bestimmung von Ca, Mg, Zn und Ba durch optische Emissionsspektralanalyse mit induktiv angekoppeltem Plasma (ICP OES), 2001.
- [18] DIN 51418: Röntgenspektralanalyse, Röntgenemissions- und Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA), 1996.
- [19] DIN 51443, Teil 2: Prüfung von Schmierstoffen, Bestimmung des Borgehaltes, Direkte Bestimmung durch optische Emissionsspektralanalyse mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP OES), 2001.
- [20] DIN 51451: Prüfung von Mineralölerzeugnissen und verwandten Produkten; Infrarotspektrometrische Analyse; Allgemeine Arbeitsgrundlagen, 1988.
- [21] DIN 51558: Bestimmung der Neutralisationszahl, 1979.
- [22] DIN 51562, Teil 2: Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter, 1988.
- [23] DIN 51777, Teil 2: Bestimmung des Wassergehaltes nach Karl-Fischer, Indirektes Verfahren, 1974.
- [24] DIN 51819, Teil 1: Prüfung von Schmierstoffen - Mechanisch-dynamische Prüfung auf dem Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät FE8, Allgemeine Arbeitsgrundlagen, 1999.
- [25] DIN 51819, Teil 2: Prüfung von Schmierstoffen - Mechanisch-dynamische Prüfung auf dem Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät FE8, Verfahren für Schmierfette, einzusetzende Prüflager, Schrägkugellager oder Kegelrollenlager, 1999.
- [26] Doleschel, A.: EDV-Programm WTplus. FVA Forschungsvorhaben Nr. 69/III, Abschlussbericht, FVA Heft 625, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2001.
- [27] Eckhardt, F.: Stationäre Zahnradgetriebe. Schmierung und Wartung, Mobil Oil AG, 2. Auflage, 1987.

- [28] Federn, K., Hugo, P.: Ölalterung in Lastschaltgetrieben. FVA Forschungsvorhaben Nr. 67, Abschlussbericht, FVA Heft 115, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1981.
- [29] Föhl, J., Sommer, K., Gerber, A.: Verschleiß und Reibungsminderung durch Reaktionsschichtbildung bei langsamlaufenden Wälzlagern und Zahnrädern. FVA Forschungsvorhaben Nr. 126/II, FVA Heft 330, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1991.
- [30] FVA Informationsblatt Nr. 2/IV: Einfluss der Schmierstoffs auf die Grübchenlebensdauer einsatzgehärteter Zahnräder im Einstufen- und Lastkollektivversuch, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1997.
- [31] FVA Informationsblatt Nr. 54/7: Testverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Entstehung von Grauflecken bei Zahnrädern, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1993.
- [32] FVA Informationsblatt Nr. 243: Verfahren zur Bestimmung der Fresstragfähigkeit hochlegierter Schmierstoffe in der FZG-Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1995.
- [33] GfT-Arbeitsblatt Nr. 5: Zahnradschmierung. Gesellschaft für Tribologie e.V., Moers, 1999.
- [34] Goll, S.: Einfluss des Schmierstoffs auf die Grübchentrugfähigkeit von Zahnrädern, Versuchsergebnisse und Prüftechnik. Antriebstechnik 26, 5, 1987.
- [35] Henzel, B.: Einfluss des Wasserstoffgehaltes auf die Wälzfestigkeit. FVA Forschungsvorhaben Nr. 102, FVA Heft 253, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1987.
- [36] Höhn, B.-R., Pflaum, H., Pinnekamp, B.: Untersuchung des Lebensdauerhaltens von Schaltgetriebe-Synchronisierungen mit dem Standard-Synchronisationsprüfstand FZG-SSP. VDI-Berichte Nr. 878, 1991.
- [37] Hösel, Th., Joachim, F. J.: Zahnflankenwälzfestigkeit unter Berücksichtigung der Ausfallwahrscheinlichkeit. Tribologie + Schmierungstechnik 31, 3, 1984.
- [38] Joachim, F. J., Thies, H. E., Brügel, E.: Lebensdauerschmierung bei Fahrzeuggetrieben. Tribologie + Schmierungstechnik 39, 6, 1992.
- [39] Joachim, F. J.: Streuungen der Grübchentrugfähigkeit. Antriebstechnik 21, 4, 1982.

- [40] Käser, W.: Beitrag zur Grübchenbildung an gehärteten Zahnrädern - Einfluss von Härtetiefe und Schmierstoff auf die Flankentragfähigkeit. Dissertation TU München, 1977.
- [41] Kara, W. H.: Schmierstoffe - Herstellung, Eigenschaften, Anwendung. Deutsche Shell AG, Hamburg, 1986.
- [42] Knauer, G.: Zur Grübchentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. Dissertation TU München, 1988.
- [43] Kopatsch, F.: Wirksamkeit von Viskositätsindex-Verbesserers im EHD-Zahnradkontakt. Dissertation TU München, 2000.
- [44] Krzysztof, D., Olszewski, O., Romanowski, P.: Viscosity and influence on pitting of laboratory-ager gear oil. *Wear* 141, 1991.
- [45] Loewenthal, S.H., Moyer, D.W.: Filtration effects on ball bearing life and condition in a contaminated lubricant. *Journal of Tribology*, Vol. 101, 1979.
- [46] Lorösch, H.-K.: Die Lebensdauer des Wälzlagers bei unterschiedlichen lasten und Umweltbedingungen. *Wälzlagertechnik* 1, 1981.
- [47] Michaelis, K.: Die Integraltemperatur zur Beurteilung der Fresstragfähigkeit von Stirnradgetrieben. Dissertation TU München, 1987.
- [48] Möller, V. J.: Schmierölveränderungen im Betrieb und Gebrauchölbeurteilungen bei Getriebeölen. *Getriebeschmierung - Lehrgang der Technischen Akademie Esslingen* Nr. 8191, 1985.
- [49] Neumüller, M.: Einfluss der Ölalterung auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. Dissertation TU München, 2001.
- [50] Neumüller, M.: Einfluss der Ölalterung auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. FVA Forschungsvorhaben Nr. 296, FVA Heft 652, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 2001.
- [51] Niemann G., Winter, H.: *Maschinenelemente*, Band II. Springer-Verlag, 1989.
- [52] Oppelt, J.: Einfluss von Lufteinschlüssen im Schmieröl auf die Fresstragfähigkeit und den Verschleiß von Zahnradpaarungen. FVA Forschungsvorhaben Nr. 43, FVA Heft 59, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1979.
- [53] Oster, P.: Beanspruchung der Zahnflanken unter Bedingungen der Elastohydrodynamik. Dissertation TU München, 1982.

- [54] v. Perponcher, C.: Einflüsse der Reibflächentopographie und Beanspruchung auf das Reibungs- und Verschleißverhalten von Synchronisierungen. Dissertation TU München, 1998.
- [55] Rank, R.: Untersuchungen zur Lebensdauerprüfung von Synchronisierungen. Dissertation TU München, 1995.
- [56] Renius, K. Th.: Traktoren - Technik und ihre Anwendung. BLV Verlag, 2. Auflage, München, 1987.
- [57] Richter, M.: Der Verzahnungswirkungsgrad und die Fresstragfähigkeit von Hypoid- und Schraubenradgetrieben. Dissertation TU München, 1975.
- [58] Schaller, K. V.: Betriebsfestigkeitsuntersuchungen zur Grübchenbildung an einsatzgehärteten Zahnrädern. Dissertation TU München, 1990.
- [59] Schedl, U.: Einfluss des Schmierstoffs auf die Grübchenlebensdauer einsatzgehärteter Zahnräder. Dissertation TU München, 1998.
- [60] Schönnenbeck, G.: Einfluss der Schmierstoffe auf die Zahnflankenermüdung. Dissertation TU München, 1984.
- [61] Schrade, U.: Einfluss von Verzahnungsgeometrie und Betriebsbedingungen auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. Dissertation TU München, 2000.
- [62] Spilker, M.: Langzeiterprobung von Getriebeölen. Tribologie + Schmierungstechnik 35, 2, 1988.
- [63] Stow, S. N.: Ermittlung des abrasiven Verschleißes von ungehärteten Zahnrädern bei Schmierung mit verunreinigtem Öl. Dissertation TU Dresden, 1971.
- [64] Weiß, R.: Einfluss der Ölalterung auf die Zahnflankentragfähigkeit. Dissertation TU München, 1994.
- [65] Weiß, R.: Prüfung der Ölleistungsfähigkeit als Funktion der Öllebensdauer unter Berücksichtigung der Fres- und Grübchentragfähigkeit. FVA Forschungsvorhaben Nr. 171/I+II, Abschlussbericht, FVA Heft 434, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1994.
- [66] Winkenbach: Einfluss von Getriebeölen auf Radialwellendichtring-Werkstoffe. Interner Prüfbericht Fa. Freudenberg., 1991.

-
- [67] Winter, H., O'Connor, B. M: Use of Low Speed FZG Test Methods to Evaluate Tractor Hydraulic Fluids. TAE - 7. Kolloquium Kraftfahrzeugschmierung, 1990.
- [68] Zander, R., Rupprath, P, Schneider, G. M., Rohne, E.: Neue Labormessmethode zur Beurteilung des Luftabscheideverhaltens von Fluiden.
- [69] Zinecker, R.: Einfluss ungelöster Fremdstoffe im Schmierstoff auf die Veränderung der Laufbahnoberfläche und das Geräusch der Wälzlager. FVA Forschungsvorhaben Nr. 63, FVA Heft 173, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., 1984.

10 Anhang

10.1 Daten der Testverzahnungen

Bezeichnung			Wert
Achsabstand		a	91,5 mm
Zähnezahl	Ritzel	z_1	16
	Rad	z_2	24
Normalmodul		m_n	4,5 mm
Eingriffswinkel		α	20°
Betriebseingriffswinkel		α_{wt}	22,44°
Schrägungswinkel		β	0°
Profilverschiebungsfaktor	Ritzel	x_1	0,8532
	Rad	x_2	0,5000
Zahnbreite (Typ A10: Ritzel $b_1 = 10$ mm)		b	20 mm
Teilkreisdurchmesser	Ritzel	d_1	72,0 mm
	Rad	d_2	108,0 mm
Wälzkreisdurchmesser	Ritzel	d_{w1}	73,2 mm
	Rad	d_{w2}	109,8 mm
Grundkreisdurchmesser	Ritzel	d_{b1}	67,66 mm
	Rad	d_{b2}	101,49 mm
Kopfkreisdurchmesser	Ritzel	d_{a1}	88,77 mm
	Rad	d_{a2}	112,50 mm
Profilüberdeckung		ϵ_α	1,36
Gleitfaktor am Kopf	Ritzel	v_{g1}/v	0,67
	Rad	v_{g2}/v	0,15
Ersatzkrümmungsradius im Wälzpunkt C		ρ_{redC}	8,38

Tabelle 10.1: Hauptgeometriedaten der Verzahnung Typ A (A10) nach DIN 3960 [8]

Bezeichnung			Wert
Achsabstand		a	91,5 mm
Zähnezahl	Ritzel	z_1	16
	Rad	z_2	24
Normalmodul		m_n	4,5 mm
Eingriffswinkel		α	20°
Betriebseingriffswinkel		α_{wt}	22,44°
Schrägungswinkel		β	0°
Profilverschiebungsfaktor	Ritzel	x_1	0,1818
	Rad	x_2	0,1716
Zahnbreite		b	14 mm
Teilkreisdurchmesser	Ritzel	d_1	72,0 mm
	Rad	d_2	108,0 mm
Wälzkreisdurchmesser	Ritzel	d_{w1}	73,2 mm
	Rad	d_{w2}	109,8 mm
Grundkreisdurchmesser	Ritzel	d_{b1}	67,66 mm
	Rad	d_{b2}	101,49 mm
Kopfkreisdurchmesser	Ritzel	d_{a1}	82,64 mm
	Rad	d_{a2}	118,64 mm
Profilüberdeckung		ϵ_α	1,47
Gleitfaktor am Kopf	Ritzel	v_{g1}/v	0,44
	Rad	v_{g2}/v	0,44
Ersatzkrümmungsradius im Wälzpunkt C		ρ_{redC}	8,38

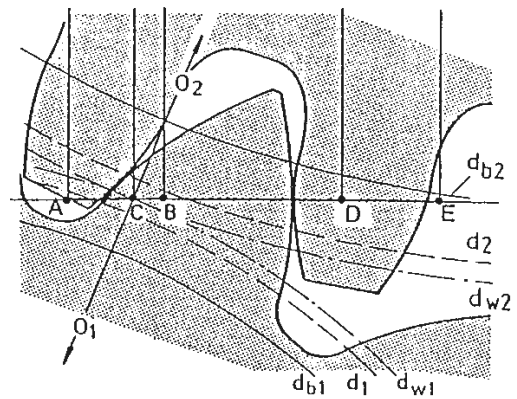
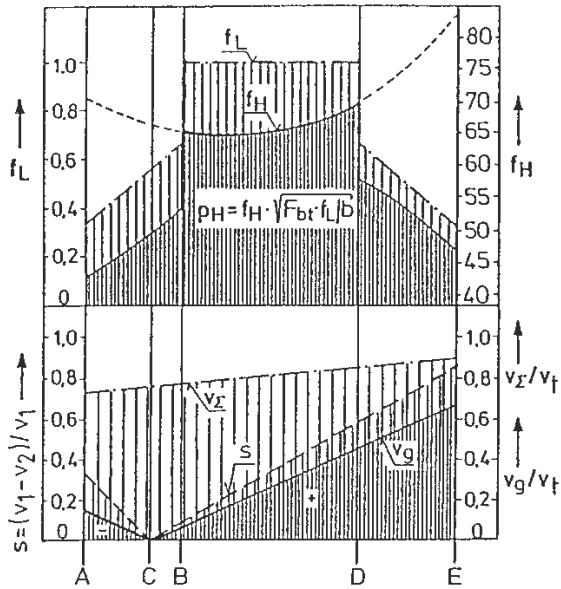
Tabelle 10.2: Hauptgeometriedaten der Verzahnung Typ C nach DIN 3960 [8]

Bezeichnung		Wert	
Werkstoff nach DIN EN 10084 [13]	-	20 MnCr5 E	
Wärmebehandlung	-	einsatzgehärtet	
Schleifverfahren	-	Maag-Kreuzschliff	
Qualität nach DIN 3962 [9]	-	5	
Rauheit R_a nach DIN 3969 [11]	Ritzel	μm	$0,35 \pm 0,1$
	Rad	μm	$0,30 \pm 0,1$
Oberflächenhärte	HRC	60 - 62	
Einsatzhärtungstiefe 550 HV 1	mm	0,6 - 0,8	
Kernfestigkeit R_m	N/mm ²	1000 - 1250	
Korrekturen		keine	

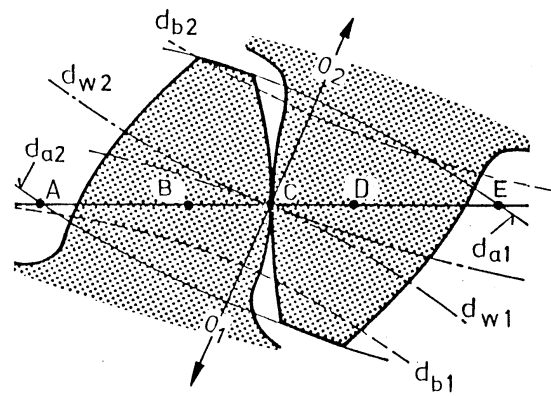
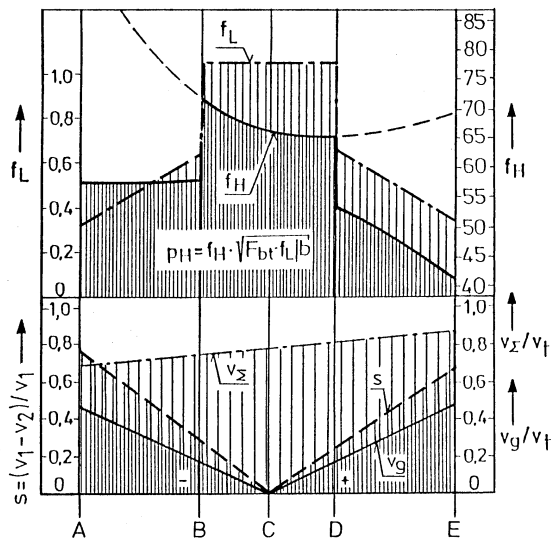
Tabelle 10.3: Werkstoff- und Fertigungsdaten der Verzahnung Typ A und A10

Bezeichnung		Wert	
Werkstoff nach DIN EN 10084 [13]	-	16 MnCr5 E	
Wärmebehandlung	-	einsatzgehärtet	
Schleifverfahren	-	Maag-Glattschliff	
Qualität nach DIN 3962 [9]	-	5	
Rauheit R_a nach DIN 3969 [11]	C-PT	μm	$0,30 \pm 0,1$
	C-GF	μm	$0,30 \pm 0,1$
Oberflächenhärte	HRC	59 - 63	
Einsatzhärtungstiefe 550 HV 1	mm	0,8 - 1,0	
Kernfestigkeit R_m	N/mm ²	1000 - 1300	
Korrekturen		keine	

Tabelle 10.4: Werkstoff- und Fertigungsdaten der Verzahnung Typ C-PT und C-GF



Verzahnung Typ A



Verzahnung Typ C

Bild 10.1 Zahnformen Typ A und Typ C, Achsabstand a = 91,5 mm

Bezeichnung		Wert	
Achsversetzung		a	44 mm
Achsenwinkel		Σ	90°
Zähnezahl	Ritzel	z_1	12
	Rad	z_2	45
Stirnmodul	Rad außen	m_{et2}	4,163 mm
Teilkreisdurchmesser	Rad außen	d_{e2}	187,33 mm
Spiralwinkel	Mitte Ritzel	β_{m1}	50,66°
	Mitte Rad	β_{m2}	21,05°
Teilkegelwinkel	Ritzel	δ_1	20,32°
	Rad	δ_2	66,93°
Eingriffswinkel	Zugflanke	α_{nz}	12,93°
	Schubflanke	α_{ns}	25,06°
Zahnbreite	Ritzel	b_1	33,44 mm
	Rad	b_2	25,4 mm
Zahnhöhe	Ritzel gesamt	h_1	9,66 mm
	Rad gesamt	h_2	9,38 mm
Zahnkopfhöhe	Ritzel	h_{a1}	6,90 mm
	Rad	h_{a2}	1,41 mm
Messerkopfradius		r_c	3 mm
Verzahnungsart	Gleason SB ("Spread Blade")		

Tabelle 10.5: Hauptgeometriedaten der Hypoidtestverzahnung

Bezeichnung		Wert	
Werkstoff nach DIN EN 10084 [13]	-	16 MnCr5 E	
Wärmebehandlung	-	einsatzgehärtet	
Verzahnungsbearbeitung	-	geläppt	
Oberflächenbehandlung		phosphatiert	
Qualität nach DIN 3965 [10]	-	7	
Rauheit R_z nach DIN 3969 [11]	Flanke	μm	8,0
	Fuss	μm	16,0
Oberflächenhärte		HRC	58 - 62
Einsatzhärtungstiefe 550 HV 1		mm	0,8 - 1,0

Tabelle 10.6: Werkstoff- und Fertigungsdaten der Hypoidtestverzahnung

10.2 Daten der Testsynchronisierungen

Bezeichnung		Wert	
Werkstoff	Ring	Streusinter HS45 Fa. Hörbiger	
	Konus	Stahl, geschliffen	
Ringoberfläche		Waffelrillierung	
Mittlerer Durchmesser		d_m	117 mm
Reibfläche		A	3900 mm ²
Halber Kegelwinkel		α	6,5°

Tabelle 10.7: Hauptdaten der Testsynchronisierung Streusinter - Stahl

Bezeichnung		Wert	
Werkstoff	Ring	Karbon 7040 - 1 Fa. Raybestos	
	Konus	Stahl, geschliffen	
Ringoberfläche		Axialnutung	
Mittlerer Durchmesser		d_m	119 mm
Reibfläche		A	3950 mm ²
Halber Kegelwinkel		α	6,5°

Tabelle 10.8: Hauptdaten der Testsynchronisierung Karbon - Stahl

10.3 Versuchsschmierstoffe für die Verschleißuntersuchungen

10.3.1 Mineralöle

M1-GL4	Grundöl: Mineralöl	Viskosität: SAE 80W		Additivbasis: S-P	
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt IR Extinktion E P-O-C Schwingung 10,3 µm / 970 cm ⁻¹
		v ₄₀	v ₁₀₀		
M1-GL4 / N	Neuöl	68	9,4	0,78	E _{10,3} = 9
M1-GL4 / 1A	265h-110°C	77	10,5	1,16	E _{10,3} = 6,5
M1-GL4 / 2A	265h-130°C	89	10,7	1,63	E _{10,3} = 3,4

Tabelle 10.9: Schmierstoffkennwerte M1-GL4 [65]

M2-GL4	Grundöl: Mineralöl	Viskosität: SAE 90		Additivbasis: S-P	
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt IR Extinktion E SO ₂ Schwingung 8,6 µm / 1160 cm ⁻¹ SO Schwingung 8,95 µm / 1120 cm ⁻¹
		v ₄₀	v ₁₀₀		
M2-GL4 / N	Neuöl	90	10,6	0,68	E _{8,6} = 15 E _{8,95} = 11
M2-GL4 / 1A	80h-60°C	91	10,4	0,62	E _{8,6} = 15 E _{8,95} = 11
M2-GL4 / 2A	370h-130°C	107	11,4	1,75	E _{8,6} = 10 E _{8,95} = 1

Tabelle 10.10: Schmierstoffkennwerte M2-GL4 [65]

M3-CLP	Grundöl: Mineralöl		Viskos.: ISO VG 220		Additivbasis: S-P
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt RFA Phosphorgehalt [ppm]
		v ₄₀	v ₁₀₀		
M3-CLP / N	Neuöl	207	18,0	1,6	420
M3-CLP / 1A	599h-110°C	220	187	2,2	380
M3-CLP / 2A	719h-120°C	295	21,9	4,6	80

Tabelle 10.11: Schmierstoffkennwerte M3-CLP [65]

M4-DEO	Grundöl: Mineralöl		Viskos.: SAE 20W20		Additivbasis: ZnDTP
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		TBN [mgKOH/g]	Additivgehalt und Oxidation IR Extinktion E P-O-C Schwingung 10 µm / 1000 cm ⁻¹ P=S Schwingung 14,9 µm / 670 cm ⁻¹ C=O Schwingung 5,8 µm / 1725 cm ⁻¹
		v ₄₀	v ₁₀₀		
M4-DEO / N	Neuöl	68	9,2	7,8	E ₁₀ = 12,9 E _{14,9} = 6,3 E _{5,8} = 9,3
M4-DEO / 1A	300h-110°C	66	8,7	7,0	E ₁₀ = 9,8 E _{14,9} = 2,4 E _{5,8} = 11,1
M4-DEO / 2A	400h-130°C	69	9,0	3,0	E ₁₀ = 2,9 E _{14,9} = 0,6 E _{5,8} = 14,7

Tabelle 10.12 Schmierstoffkennwerte M4-DEO [65]

M5-HLP	Grundöl: Mineralöl	Viskos.: ISO VG 32		Additivbasis: ZnDTP	
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt IR Extinktion E P-O-C Schwingung 10,3 µm / 970 cm ⁻¹
		v ₄₀	v ₁₀₀		
M5-HLP / N	Neuöl	32,0	5,5	1,8	E _{10,3} = 47
M5-HLP / 1A	800h-110°C	32,5	5,5	2,9	E _{10,3} = 38
M5-HLP / 2A	800h-130°C	34,2	5,7	1,8	E _{10,3} = 6

Tabelle 10.13: Schmierstoffkennwerte M5-HLP [65]

10.3.2 Syntheseöle

S1-UDL	Grundöl: PAO + HC	Viskos.: SAE 75W90		Additivbasis: S-P		
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt RFA	
		v ₄₀	v ₁₀₀		Gehalt S [%]	Gehalt P [%]
S1-UDL / N	Neuöl	81,4	14,6	2,0	2,1	0,17
S1-UDL / 1A	480h-110°C	83,4	14,6	2,2	1,5	0,16
S1-UDL / 2A	360h-130°C	95,8	17,2	4,9	1,2	0,15

Tabelle 10.14: Schmierstoffkennwerte S1-UDL [5]

S2-MTF	Grundöl: PAO + E		Viskos.: SAE 75W80		Additivbasis: S-P	
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt RFA	
		v ₄₀	v ₁₀₀		Gehalt S [%]	Gehalt P [%]
S2-MTF / N	Neuöl	63,0	11,7	1,6	0,08	0,03
S2-MTF / 1A	600h-130°C	63,5	11,7	1,7	0,08	0,03
S2-MTF / 2A	360h-150°C	68,9	12,5	2,6	0,07	0,03

Peakfläche der C=O Bande 5,4 - 6,5 µm / 1840 - 1620 cm ⁻¹	S2-MTF / N	S2-MTF / 1A	S2-MTF / 2A
		38,8	44,6

Tabelle 10.15: Schmierstoffkennwerte S2-MTF [5]

S3-PAG	Grundöl: PG		Viskos.: ISO VG 100		Additivbasis: P	
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt RFA Gehalt P [%]	
		v ₄₀	v ₁₀₀			
S3-PAG / N	Neuöl	98,0	18,1	0,95	0,17	
S3-PAG / 1A	480h-130°C	101,1	19,1	1,11	0,15	
S3-PAG / 2A	360h-150°C	98,3	17,9	2,2	0,15	

Peakfläche der C=O Bande 5,5 - 6,1 µm / 1820 - 1650 cm ⁻¹	S3-PAG / N	S3-PAG / 1A	S3-PAG / 2A
		2,9	7,1

Tabelle 10.16: Schmierstoffkennwerte S3-PAG [5]

S4-DEO	Grundöl: PAO		Viskos.: SAE 5W40		Additivbasis: ZnDTP
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		TBN [mgKOH/g]	Additivgehalt RFA Gehalt P [%]
		v ₄₀	v ₁₀₀		
S4-DEO / N	Neuöl	85,3	13,9	12,5	0,12
S4-DEO / 1A	360h-110°C	87,4	14,2	9,0	0,12
S4-DEO / 2A	240h-130°C	83,4	13,6	7,8	0,12

Peakfläche der C=O Bande 5,7 - 6,1 μm / 1750 - 1640 cm ⁻¹	S4-DEO / N	S4-DEO / 1A	S4-DEO / 2A
		3,8	6,1

Tabelle 10.17: Schmierstoffkennwerte S4-DEO [5]

S5-ATF	Grundöl: PAO + HC		Viskos.: ISO VG 32		Additivbasis: S-P	
Bezeichnung	Alterung	kinematische Viskosität [mm ² /s]		NZ [mgKOH/g]	Additivgehalt RFA	
		v ₄₀	v ₁₀₀		Gehalt S [%]	Gehalt P [%]
S5-ATF / N	Neuöl	33,8	7,3	1,6	0,07	0,03
S5-ATF / 1A	730h-130°C	30,8	6,6	1,5	0,08	0,03
S5-ATF / 2A	360h-150°C	33,2	7,1	1,6	0,07	0,03

Tabelle 10.18: Schmierstoffkennwerte S5-ATF [5]