

HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
HAMBURG



University of Applied Sciences Hamburg
INSTITUT FÜR KONSTRUKTION UND PRODUKTENTWICKLUNG
DEPARTMENT MASCHINENBAU UND PRODUKTION
LABOR FÜR MASCHINENELEMENTE UND TRIBOLOGIE (MUT)
PROF.DR.-ING. E.KUHN

Tribologische Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Modellfetten an einem Kugel-Scheibe-Tribometer

Diplomarbeit

Götz Klucker und Peter Baumgartner

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Erik Kuhn

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Niels Eiben

Hamburg, 27. Oktober 2011

Diplomarbeit

Prüfungsexemplar

Name:	Vorname:
Klucker	Götz
Studiengang:	vorgelegt am:
Produktionsmanagement	26.10.2011
Name:	Vorname:
Baumgartner	Peter
Studiengang:	vorgelegt am:
Produktionstechnik	26.10.2011
Erstprüfer:	Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Erik Kuhn	Dipl.-Ing. Niels Eiben
Thema: Tribologische Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Modellfetten an einem Kugel-Scheibe-Tribometer	



University of Applied Sciences Hamburg
INSTITUT FÜR KONSTRUKTION UND PRODUKTENTWICKLUNG
DEPARTMENT MASCHINENBAU UND PRODUKTION
LABOR FÜR MASCHINENELEMENTE UND TRIBOLOGIE (MUT)
PROF.DR.-ING. E.KUHN

Aufgabenstellung für eine Diplomarbeit
für
Herrn P.Baumgartner und Herrn G.Klucker

Kurzbezeichnung "Tribologische Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Modellfetten an einem Kugel-Scheibe-Tribometer"

Die Schmierfettstruktur ist charakterisiert durch die Eigenschaften und das Verhalten des Verdickers in Verbindung mit dem Grundöl. In der Arbeit werden verschiedene Verdickerarten und unpolare Grundöle hinsichtlich Einflusses auf die aufzuwendende Reibungsenergie und den entstehenden Festkörperverschleiß untersucht. Die experimentellen Arbeiten erfolgen an einem Modelltribometer mit Kugel-Scheibe Kontakt. Es sind folgende Punkte zu bearbeiten:

- Einarbeitung in die Thematik „Tribologie der Schmierfette“
- Einarbeitung in die Funktionsweise des Tribometers
- Durchführung von Testversuchen und Festlegung der Versuchsplanung
- Systematische Messungen an ausgewählten biogenen Modellfetten
- Ergänzende Untersuchungen zum Verschleißverhalten

Die Arbeit kann in Absprache mit dem Betreuer erweitert oder gegebenenfalls eingengt werden.

SS 2011

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VI
Symbolverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XV
1 Einführung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Grundlagen der Tribologie	3
2.1.1 Bedeutung und Aufgaben der Tribologie	3
2.1.2 Definitionen der Tribologie	3
2.1.3 Geschichte der Tribologie	4
2.1.4 Tribologisches System	5
2.2 Reibung	7
2.2.1 Reibungszustände	7
2.2.1.1 Festkörperreibung	8
2.2.1.2 Flüssigkeitsreibung	8
2.2.1.3 Mischreibung	9
2.2.1.4 Grenzreibung	10
2.2.1.5 Gasreibung	10
2.2.2 Reibungsmessgrößen	11
2.2.3 Reibungsmechanismen	12
2.2.3.1 Adhäsion und Scheren	13
2.2.3.2 Plastische Deformation	14
2.2.3.3 Furchung	14

Inhaltsverzeichnis

2.2.3.4	Energiedissipation	14
2.2.4	Reibungsarten	14
2.2.4.1	Gleitreibung	15
2.2.4.2	Rollreibung	16
2.2.4.3	Bohrreibung	17
2.2.5	Energetische Betrachtungsweise der Reibung	17
2.3	Verschleiß	18
2.3.1	Verschleißmessgrößen	19
2.3.1.1	Direkte Verschleißmessgrößen	19
2.3.1.2	Bezogene Verschleißmessgrößen	20
2.3.1.3	Indirekte Verschleißmessgrößen	20
2.3.2	Verschleißmechanismen	21
2.3.2.1	Adhäsion	21
2.3.2.2	Abrasion	22
2.3.2.3	Oberflächenzerrüttung (Ermüdung)	22
2.3.2.4	Tribochemische Reaktion (Tribooxidation)	23
2.3.3	Maßnahmen zur Verschleißminimierung durch Beeinflussung der Verschleißmechanismen	23
2.3.4	Verschleißarten	24
2.3.5	Rheologischer Verschleiß	29
3	Grundlagen der Rheologie	30
3.1	Allgemeines	30
3.2	Rheologische Begriffe	31
3.2.1	Schubspannung	31
3.2.2	Scherdeformation	32
3.2.3	Scherrate	32
3.2.4	Viskosität	32
3.3	Fließverhalten	33
3.3.1	Newtonsches Fließverhalten	34
3.3.2	Nicht-Newtonsches Fließverhalten	34
3.3.2.1	Pseudoplastisches Fließverhalten	34
3.3.2.2	Dilatantes Fließverhalten	35
3.3.2.3	Plastisches Fließverhalten	35

3.3.2.4	Thixotropes Fließverhalten	35
3.4	Beschreibung der Rheologie von Schmierfetten	36
4	Grundlagen der Schmierstoffe	37
4.1	Allgemeines zu Schmierstoffen	37
4.1.1	Konsistenz	37
4.1.2	Penetration	38
4.1.3	Tropfpunkt	38
4.2	Schmieröle	39
4.2.1	Schmieröle auf Mineralölbasis	39
4.2.2	Schmieröle auf Syntheseölbasis	40
4.3	Schmierfette	41
4.3.1	Klassifizierung und Aufbau	42
4.3.2	Grundöl	43
4.3.3	Verdicker	44
4.3.4	Additive	45
4.3.5	Pasten	47
4.3.6	Schmierfettarten	47
4.3.6.1	Einfache Seifenfette	48
4.3.6.1.1	Lithium-Seifenfette	48
4.3.6.1.2	Calcium-Seifenfette	49
4.3.6.1.3	Natrium-Seifenfette	49
4.3.6.1.4	Aluminium-Seifenfette	49
4.3.6.1.5	Barium-Seifenfette	49
4.3.6.2	Gemischtbasische-Seifenfette	50
4.3.6.3	Gelfette	50
4.3.6.4	Komplexseifenfette	50
4.3.6.4.1	Lithium-Komplexseifenfette	50
4.3.6.4.2	Calcium-Komplexseifenfette	50
4.3.6.4.3	Natrium-Komplexseifenfette	51
4.3.6.4.4	Aluminium-Komplexseifenfette	51
4.3.7	Herstellung von Schmierfetten	52
4.3.7.1	Diskontinuierliche Herstellung	52
4.3.7.2	Kontinuierliche Herstellung	52

5	Versuchsaufbau und -durchführung	54
5.1	Aufbau des Versuchsstandes	54
5.2	Verwendete Schmierfette	56
5.3	Versuchsvorbereitung	57
5.4	Härteprüfung nach Vickers	58
5.4.1	Theoretische Grundlagen	58
5.4.2	Durchführung und Auswertung der Härteprüfung	59
5.5	Versuchsplanung	60
5.6	Versuchsdurchführung	61
6	Versuchsauswertung	63
6.1	Versuche mit C45-Unterprobe	64
6.1.1	Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 10 N	65
6.1.2	Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 10 N	66
6.1.3	Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 20 N	68
6.1.4	Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 20 N	69
6.1.5	Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 30 N	71
6.1.6	Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 30 N	72
6.1.7	Zusammenfassung der Reibwertuntersuchungen mit C45	74
6.1.8	Zusammenfassung der Verschleißuntersuchungen mit C45	75
6.2	Versuche mit 9SMn28-Unterprobe	76
6.2.1	Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 10 N	76
6.2.2	Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 20 N	77
6.2.3	Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 30 N	78
6.2.4	Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 10, 20 und 30 N	80
6.2.5	Zusammenfassung der Reibwerte mit 9SMn28	81
6.3	Reibung und Verschleiß in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes C45 und 9SMn28	82
6.4	Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von der NLGI-Klasse	87
6.5	Abhängigkeit des Reibwertes und der Standardabweichung vom Versuchs- durchlauf	90

Inhaltsverzeichnis

7 Zusammenfassung und Ausblick	93
7.1 Zusammenfassung	93
7.1.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	93
7.1.2 Mögliche Optimierungsmaßnahmen der Versuche	94
7.2 Ausblick	95
Literaturverzeichnis	97
Anhang	100
A Abbildungen zu Reibwerten	101
A.1 Reibwerte in Abhängigkeit der Zeit	101
A.1.1 Unterprobenwerkstoff C45	101
A.1.2 Unterprobenwerkstoff 9SMn28	103
A.2 Reibwerte in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes	105
A.3 Reibwerte und Standardabweichung in Abhängigkeit des Versuchsdurchlaufs	106
B Daten verwendeter Werkstoffe	109
B.1 Unterprobenwerkstoff 9SMn28	109
B.2 Unterprobenwerkstoff C45	110
B.3 Wälzlagerkugelwerkstoff 100Cr6	111
B.4 Ergebnisse der Spektralanalyse für Werkstoff C45	112
B.5 Ergebnisse der Spektralanalyse für Werkstoff 9SMn28	112
B.6 Ergebnisse der Härtemessung	113
B.7 Ergebnisse der Oberflächenauheitsmessung	114
B.7.1 9SMn28-Unterprobe	114
B.7.2 C45-Unterprobe	116

Abkürzungsverzeichnis

SiO ₂	Siliciumdioxid
Al	Aluminium
ASME	American Society of Mechanical Engineers
B	Beryllium
BMFT	Bundesministeriums für Forschung und Technologie
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
Co	Cobalt
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
DIN	deutsches Institut für Normung
EHD Schmierung ...	elastohydrodynamische Schmierung
EN	Europäische Norm
EP-Additive	Extreme-Pressure-Additive
Fe	Eisen
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
HV	Härte nach Vickers
ISO	International Organization for Standardization
IWS	Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik
Li	Lithium
MDI	Diphenylmethandiisocyanat

Inhaltsverzeichnis

Mn	.....	Mangan
Mo	.....	Molybdän
Na	.....	Natrium
Nb	.....	Niob
Ni	.....	Nickel
NLGI	.....	National Lubricating Grease Institute
P	.....	Phosphor
PAO	.....	Polyalphaolefine
Pb	.....	Blei
PC	.....	Personal Computer
PU	.....	Polyurethane
S	.....	Schwefel
Si	.....	Silicium
Sn	.....	Zinn
St	.....	unlegierter Baustahl
Ti	.....	Titan
TTS	.....	Tribotechnisches System
USA	.....	United States of America
V	.....	Vanadium
VI	.....	Viskositätsindex
W	.....	Wolfram

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	$[mm^2]$	Fläche
A	$[\mu m^2]$	Querschnittsfläche der Verschleißspur
A_R	$[J]$	Reibungsarbeit
d	$[mm]$	Diagonale des Eindrucks
e	$\left[\frac{J}{m^2}\right]$	Energiedichte
F	$[N]$	Kraft
F_N	$[N]$	Normalkraft
F_R	$[N]$	Reibungskraft
h	$[mm]$	Spalthöhe
M	$[Nm]$	Drehmoment
M_R	$[Nm]$	Reibungsmoment
P	$[N]$	waagrecht wirkende Kraft

Symbolverzeichnis

p_{max}	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	maximaler Kontaktdruck
\bar{p}	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	spezifische Lagerbelastung
P_R	$[J]$	Reibungsarbeit
R_a	$[\mu m]$	arithmetischer Mittelwert der Profilkoordinaten
R_e	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Streckgrenze
R_z	$[\mu m]$	größte Höhe des Profils
r	$[mm]$	Wälzlagerkugelradius
s_R	$[mm]$	Reibungsweg
T	$[^\circ C]$	Temperatur
t	$[s]$	Zeit
T_G	$[h]$	Gesamtgebrauchsdauer
T_W	$[h]$	verschleißbedingte Gebrauchsdauer
V	$[mm^3]$	Volumen
v	$\left[\frac{mm}{s} \right]$	Geschwindigkeit
W	$[J]$	Energie
W	$[m; m^2; m^3; kg]$	Verschleißbetrag
$\frac{1}{W}$	$\left[\frac{1}{m}; \frac{1}{m^2}; \frac{1}{m^3}; \frac{1}{kg} \right]$	Verschleißwiderstand

Symbolverzeichnis

W_G	$[mm^3; kg; Stck]$	verschleißbedingte Durchsatzmenge
W_l	$[m]$	linearer Verschleißbetrag
W_m	$[m]$	massenmäßiger Verschleißbetrag
W_q	$[m^2]$	planimetrischer Verschleißbetrag
W_r	$[-]$	relativer Verschleißbetrag
$\frac{1}{W_r}$	$[-]$	relativer Verschleißwiderstand
W_R	$[J]$	Reibungsenergie
W_v	$[m^3]$	volumetrischer Verschleißbetrag
$\{x\}$	$[-]$	Eingangsgrößen
$\{y\}$	$[-]$	Ausgangsgrößen
$\{x\}$	$[-]$	Störgrößen
α	$[^\circ]$	Anstrahlwinkel
α	$[-]$	Mittelpunktswinkel
η	$[Pas \cdot s]$	Scherviskosität
η'	$[Pas \cdot s]$	scheinbare Viskosität
μ	$[-]$	Reibungszahl, Reibungskoeffizient
μ_G	$[-]$	Gleitreibungskoeffizient

Symbolverzeichnis

ν	$\left[\frac{mm^2}{s} \right]$	kinematische Viskosität
γ	$[-; \%$]	Scherdeformation
$\dot{\gamma}$	$\left[\frac{1}{s} \right]$	Scherrate
ω	$\left[\frac{1}{s} \right]$	Kreiszahl
ρ	$\left[\frac{kg}{mm^3} \right]$	Dichte
ρ	$[\circ]$	Reibungswinkel
τ	$[Pa]$	Scherspannung

Abbildungsverzeichnis

2.1	Erweiterte Darstellung eines Tribotechnischen Systems (TTS)	6
2.2	Reine Festkörperreibung	8
2.3	Flüssigkeitsreibung	9
2.4	Mischreibung	9
2.5	Grenzreibung	10
2.6	Stribeck-Kurve (schematisch)	11
2.7	Vereinfachte Illustration der grundlegenden Reibungsmechanismen	13
2.8	Einteilung der Reibungsarten nach der Kinematik	15
2.9	Gesetzmäßigkeiten bei der trockenen Gleitreibung	16
2.10	Beispiel für Rollreibung	16
2.11	Beispiel für Bohrreibung	17
2.12	Mögliche auftretende Energieanteile (energetische Betrachtungsweise)	18
2.13	Neue Auffassung des Verschleißprozesses	19
2.14	Adhäsion	22
2.15	Abrasion	22
2.16	Oberflächenzerrüttung	23
2.17	Tribochemischer Verschleiß	23
3.1	Zwei-Platten-Modell	31
3.2	Einwirkung einer Kraft auf einen Körper	32
3.3	Newtonsches Fließverhalten	34
3.4	Pseudoplastisches oder strukturviskoses Fließverhalten	35
3.5	Dilatantes Fließverhalten	35
3.6	Thixotropes Fließverhalten	36
4.1	Schmierfetttypen	42
4.2	Anteil unterschiedlicher Fettgruppen in der Anwendung	48

Abbildungsverzeichnis

5.1	Aufbau des Versuchsstandes	54
5.2	Abstreifer zur optimalen Schmierfettversorgung	56
5.3	Beispiel einer Härteangabe nach Vickers	58
5.4	Härtmessung im IWS	59
6.1	Lineare Trendline der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 10 N$	65
6.2	Verschleißspuren der C45-Unterprobe bei $F_N = 10 N$	66
6.3	Lineare Trendline der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 20 N$	68
6.4	Verschleißspuren der C45-Unterprobe bei $F_N = 20 N$	69
6.5	Lineare Trendline der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 30 N$	71
6.6	Verschleißspuren der C45-Unterprobe bei $F_N = 30 N$	72
6.7	Übersicht der Reibungszahlen inkl. der Standardabweichung mit C45- Unterprobe bei verschiedenen Normalkräften	74
6.8	Verschleißspurbreite in Abhängigkeit der Normalkraft und der NLGI-Klasse	75
6.9	Lineare Trendline der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 10 N$	76
6.10	Lineare Trendline der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 20 N$	77
6.11	Lineare Trendline der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 30 N$	78
6.12	Verschleißspurbreiten der 9SMn28-Unterproben bei Normalkräften von 10, 20 und 30 N	80
6.13	Übersicht der Reibungszahlen inkl. der Standardabweichung mit 9MnS28- Unterprobe bei verschiedenen Normalkräften	81
6.14	Vergleich der Reibungszahlen in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes	82
6.15	Vergleich der Reibungszahlen inkl. der Standardabweichung in Abhängig- keit des Unterprobenwerkstoffes dargestellt im Säulendiagramm	83
6.16	Vergleich der Verschleißspurbreite mit gleichem Schmierfett $SiO_2PAOMIN-$ 0 unter gleichen Parametern in Abhängigkeit der Unterprobenwerkstoffe C45 und 9SMn28	84
6.17	Verschleiß und Reibungszahl in Abhängigkeit der NGLI Klasse	87
6.18	Abhängigkeit der Verschleißspurbreite vom Verdickeranteil	89
6.19	Standardabweichung und Reibungszahl in Abhängigkeit des Versuchs- durchlaufs	92
7.1	Verbesserung der Unterprobenaufnahme	95

Abbildungsverzeichnis

A.1	Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 10 N$	101
A.2	Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 20 N$	102
A.3	Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 30 N$	102
A.4	Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 10 N$	103
A.5	Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 20 N$	104
A.6	Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 30 N$	104
A.7	Vergleich der Reibungswerte in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes	105
A.8	Standardabweichung und Reibungszahl in Abhängigkeit mit 9SMn28-Unterprobe des Versuchsdurchlaufs	106
A.10	Standardabweichung und Reibungszahl in Abhängigkeit des Versuchsdurchlaufs	107
A.9	lineare Trendlinie der Standardabweichung und Reibungszahl mit 9SMn28-Unterprobe in Abhängigkeit des Versuchsdurchlaufs	108
B.1	Erste Messung der Oberflächenauheit der 9SMn28-Unterprobe	114
B.2	Zweite Messung der Oberflächenauheit der 9SMn28-Unterprobe	115
B.3	Erste Messung der Oberflächenauheit der C45-Unterprobe	116
B.4	Zweite Messung der Oberflächenauheit der C45-Unterprobe	117
B.5	Zusammenhang von Verschleisspurbreite und Querschnittsfläche der Verschleißspur	118

Tabellenverzeichnis

2.1	Überblick über historische Anwendungen und Versuche zu Reibung und Verschleiß	5
2.2	Direkte Verschleißmessgrößen	20
2.3	Indirekte Verschleißmessgrößen	21
2.4	Gliederung des Verschleißgebietes nach Art der tribologischen Beanspruchung	28
4.1	Schmierstoff Konsistenzklassen (NLGI-Klassen) nach DIN 51818	38
4.2	Verdickertypen für Schmierfette	45
4.3	Wichtige Schmierstoffadditive	46
4.4	Fette und ihre Eigenschaften	51
5.1	Übersicht der untersuchten Schmierstoffe	57
5.2	Prüfbedingungen und Prüfkkräfte für die Härteprüfung nach Vickers	58
6.1	Verschleißspurbreiten der Verschleißuntersuchungen auf C45-Unterprobe bei $F_N=10\text{ N}$	67
6.2	Verschleißspurbreiten der Verschleißuntersuchungen auf C45-Unterprobe bei $F_N=20\text{ N}$	70
6.3	Verschleißspurbreiten der Verschleißuntersuchungen auf C45-Unterprobe bei $F_N=30\text{ N}$	73
6.4	Rangfolge der Reibwerte in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bei $F_N = 10\text{ N}$	77
6.5	Rangfolge der Reibwerte in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bei $F_N = 20\text{ N}$	78
6.6	Rangfolge der Reibwerte in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bei $F_N = 30\text{ N}$	79
B.1	Werkstoffdaten 9SMn28	109
B.2	Werkstoffdaten C45	110
B.3	Werkstoffdaten 100Cr6	111

Tabellenverzeichnis

B.4	Ergebnisse der Spektralanalyse für Werkstoff C45	112
B.5	Ergebnisse de Spektralanalyse für Werkstoff 9SMn28	112
B.6	Ermittelte Werkstoffhärten nach Vickers HV 10	113

1 Einführung

„Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste“ [7, S. 4]. So beschäftigt sich die Tribologie mit Reibung und Verschleiß, welche in der Technik häufig unerwünschte Erscheinungsformen sind. Ihre Verringerung ist wirtschaftlich von großer Bedeutung. Nach einer Studie des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMFT) von 1983 fallen in Industrieländern c. a. 4,5 % des Bruttosozialproduktes Reibung, Verschleiß und Korrosion zum Opfer. Bezogen auf Deutschland wären dies 35 Milliarden Euro. Besonders von den Verlusten betroffen sind die Bereiche der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sowie der Energietechnik [19]. Ähnliche Ergebnisse zeigen Studien aus den USA oder Kanada. Beispielsweise werden nach einer Studie der American Society of Mechanical Engineers (ASME) 25 % des Energieverbrauchs von Industrie und Transportwesen tribologischen Verlustprozessen zugeschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass durch die Erweiterung tribologischer Erkenntnisse ein enormes Einsparungspotential möglich ist. So wird ein Einsparungspotential von 11 % (16 Mrd. US \$) für realistisch gehalten. Folgende Maßnahmen auf dem Gebiet der Tribologie bieten daher große Einsparungspotentiale.

- Einsparungen an Instandhaltungs- und Ersatzteilkosten
- Einsparungen durch erhöhte Lebensdauer der Betriebsanlagen
- Einsparungen durch Erhöhung der Nutzungs- und Wirkungsgrade
- Einsparung durch Reduzierung des reibungsbedingten Energieverbrauchs
- Einsparungen bezüglich der Schmierstoffkosten [7]

1. Einführung

Die Auswirkungen des Reibungs- und Verschleißverhaltens sind nicht nur von den Eigenschaften eines Parameters, wie bspw. Härte, Rauheit oder Dichte abhängig, sondern es sind Systemeigenschaften. Schon die Änderung einer Einflussgröße kann das Reibungs- und Verschleißverhalten drastisch verändern. Aus diesem Grund sind experimentelle Versuche nötig, um diese Abhängigkeiten zu untersuchen[8].

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, das Reibungs- und Verschleißverhalten in Abhängigkeit ausgewählter, am Reibungs- und Verschleißprozess beteiligter, Elemente zu untersuchen und zu beurteilen. So sollen reproduzierbare Ergebnisse und Abhängigkeiten untersucht und analysiert werden. Zur Untersuchung des Reibungs- und Verschleißverhaltens wird allgemein ein Parameter geändert, während alle anderen konstant gehalten werden. Davon ausgehend werden Grundöle, Verdicker, Werkstoffpaarungen und einwirkende Normalkräfte verändert, um so deren Einflüsse auf das Reibungs- und Verschleißverhalten bewerten zu können. Kapitel 2-4 befassen sich mit den theoretischen Grundlagen der Tribologie dabei werden Reibung, Verschleiß, Schmierstoffe sowie die Grundlagen der Rheologie näher dargestellt. Kapitel 5-6 befassen sich mit dem Aufbau des Versuchsstandes, der Durchführung der Versuche und der Interpretation der ermittelten Versuchsergebnisse. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung, in der die gemessenen Ergebnisse, mögliche Optimierungen des Versuchsstandes und der Versuchsbedingungen dargestellt werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen der Tribologie

2.1.1 Bedeutung und Aufgaben der Tribologie

Der Begriff Tribologie ist eine Ableitung der griechischen Wörter $\tau\rho\iota\beta\eta\iota\nu$ (tribein) = Reiben und $\lambda\omicron\gamma\iota\alpha$ (logia) = Lehre und bedeutet Reibungslehre. So versteht man unter dem Begriff Tribologie die Wissenschaft und Technik der Reibung und ihren Folgeerscheinungen, wie bspw. dem Verschleiß, der im Allgemeinen durch Schmierung verringert werden soll. So kann man Tribologie als technischen Begriff betrachten, der die Zusammenhänge zwischen Reibung, Verschleiß und Schmierstoffen beinhaltet [4][5].

Die Aufgaben der Tribotechnik beschäftigen sich vielfach mit der Minimierung von Reibung und Verschleiß. So trägt die Tribotechnik zur Erhöhung von Leistungs- und Wirkungsgrad, zur Verbesserung von Qualität, Zuverlässigkeit und Gebrauchsdauer, zu Energie und Materialeinsparung und dadurch Verminderung von Umweltbelastungen bei [7].

2.1.2 Definitionen der Tribologie

Nach DIN 50323 ist die Tribologie die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein.

2. Theoretische Grundlagen

Die Grunddefinition der Tribologie begründete Peter Jost 1966 im „Jost-Report“, der Tribologie wie folgt definierte: „Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices“ [7, S. 4].

Ins Deutsche übersetzt: Tribologie ist „die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren“ [7, S. 4].

„Nach Czichos ist die Tribologie ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste“ [7, S. 4].

2.1.3 Geschichte der Tribologie

Obwohl die Grunddefinition der Tribologie erst 1966 von Peter Jost begründet wurde beschäftigte sich die Menschheit schon Jahrtausende vor Christus mit Reibung. So war Reibung einerseits nötig um Feuer zu machen, andererseits versuchte man Reibung bspw. durch untergelegte Holzstämme zu minimieren, um schwere Lasten zu befördern. Tabelle 2.1 zeigt einen Überblick über die Geschichte der Tribologie.

2. Theoretische Grundlagen

Tabelle 2.1: *Überblick über historische Anwendungen und Versuche zu Reibung und Verschleiß[7]*

Geschichte der Tribologie
<p>3500 bis 30 v. Chr., Zeit der Sumerer und Ägypter</p> <ul style="list-style-type: none">→ Einfache Lager zur Entfachung von Feuer und zur Herstellung von Bohrungen durch Drehbewegungen→ Töpferscheiben mit Holz und Steinlager→ Achslager mit Lederschlaufen für Rollen- und Räderfahrzeuge→ Einsatz von Schmiermitteln wie Öl, Fett, Wasser→ Konstruktion von Schlitten zum Transport schwerer Steine
<p>1452-1519 Leonardo da Vinci</p> <ul style="list-style-type: none">→ Untersuchungen zur Reibung an horizontaler und schiefer Ebene→ Untersuchungen zum Verschleiß an Gleitlagern
<p>1663-1705 Guillaume Amontons</p> <ul style="list-style-type: none">→ Untersuchungen auf dem Gebiet der Mischreibung→ Reibungskraft hängt von der Normalkraft ab→ Oberflächenrauheit als Ursache für Reibung
<p>1683-1744 John Theophilus Desaguliers</p> <ul style="list-style-type: none">→ Modell zur Erklärung der Reibung→ Reibung auf Einfluss der Kohäsion / Adhäsion zurückgeführt
<p>1707-1783 Leonhard Euler</p> <ul style="list-style-type: none">→ Untersuchung zur Reibung an schiefer Ebene→ Einführung des Reibkoeffizienten „μ„
<p>1736-1806 Charles Augustin Coulomb</p> <ul style="list-style-type: none">→ entwickelt grundlegende Gedanken Amontons weiter

2.1.4 Tribologisches System

Ein tribologisches System ist ein System, das alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten und Größen sowie ihren Eigenschaften beinhaltet.

2. Theoretische Grundlagen

Die Funktion tribotechnischer Systeme besteht darin, die Eingangsgrößen $\{x\}$ in technisch nutzbare Ausgangsgrößen $\{y\}$ umzusetzen. Dabei kommt es durch Reibung und Verschleiß zur sog. Verlustgröße $\{z\}$ als weitere Ausgangsgröße. Eine weitere nicht gewollte Eingangsgröße ist die Störgröße, die sowohl Ausgangs- als auch Verlustgröße beeinflusst. Als Systemstruktur werden hierbei die stofflichen Komponenten (Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium) bezeichnet, die Eingangsgrößen (Bewegung, Belastung, Temperatur etc.) als Beanspruchungskollektiv (Abbildung 2.1). Bei der Struktur von Tribosystemen kann zwischen geschlossenen und offenen Systemstrukturen unterschieden werden. Geschlossene Systemstrukturen sind primär energiedeterminiert, d. h. sie dienen hauptsächlich der Bewegungs-, Kraft-, Energie- oder Signalübertragung. Offene Tribosysteme sind primär stoffdeterminiert, d. h. die Systemelemente befinden sich im permanenten Stofffluss oder in permanenter Veränderung [7] [11].

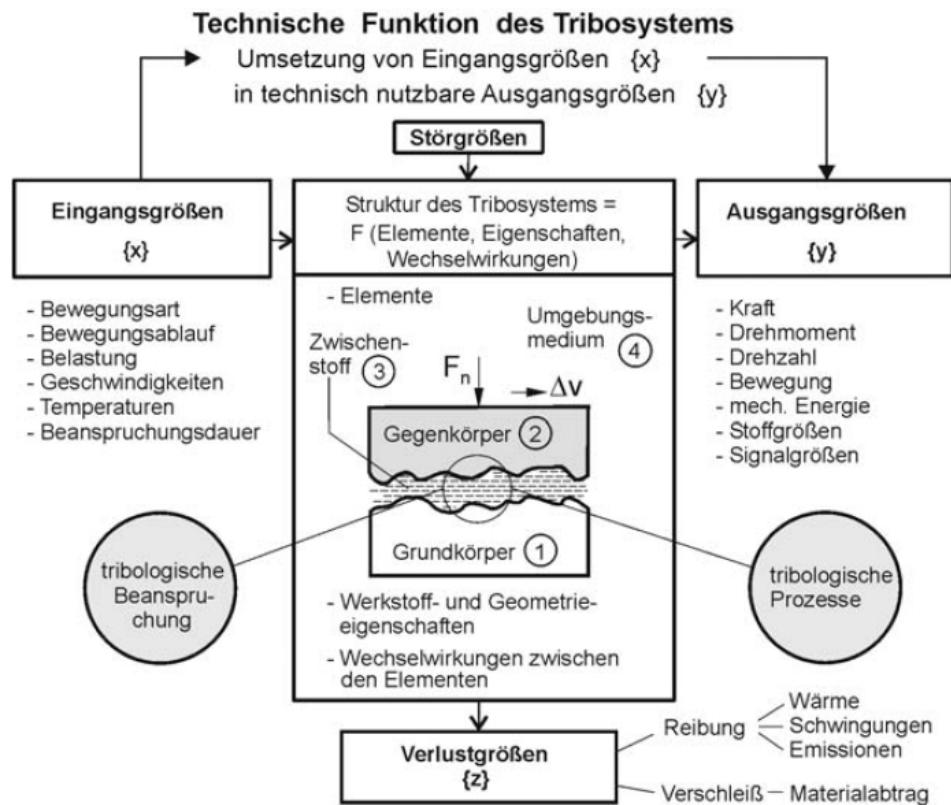


Abbildung 2.1: Erweiterte Darstellung eines Tribotechnischen Systems (TTS) nach [6] [25]

2. Theoretische Grundlagen

Wichtig für die Auswertung tribotechnischer Systeme sind die Parameter, die durch geeignete Messverfahren zu ermitteln sind, die sog. tribotechnischen Größen. Sie kennzeichnen die Veränderungen, die sich durch die tribologischen Beanspruchungen ergeben (bspw. Stoff- und Formänderungen der Kontaktpartner). Ebenso die Verlustgrößen tribotechnischer Systeme durch Reibungs- und Verschleißmessgrößen. Reibungsmessgrößen sind bspw. Reibungszahl, Reibungsenergie oder Reibungskraft. Verschleißmessgrößen sind verschleißbedingte Dimensions- oder Masseänderungen der Systemkomponenten.

2.2 Reibung

Nach DIN 50281 „Reibung in Lagerungen“ ist Reibung ein mechanischer Widerstand (Verlust an mechanischer Energie), der eine Relativbewegung einander berührender Körper hemmt (Bewegungsreibung) oder verhindert (Ruhreibung, Haftreibung).

Nach Fleischer ist Reibung „der Verlust an mechanischer Energie beim Ablauf, Beginnen oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Stoffbereiche“ [10, S. 21].

Es wird zwischen äußerer und innerer Reibung unterschieden, wobei die äußere Reibung jene Reibung ist, die zwischen sich berührenden Grenzflächen von Festkörpern auftritt. Innere Reibung ist der Widerstand eines Körpers gegen die Relativbewegung seiner Volumenbestandteile. Bei Reibungsvorgängen treten stets Reibungskräfte F_R auf, die überwunden werden müssen, um einen Körper in Bewegung zu setzen. Die Größe der Reibungskraft ist abhängig von den Materialpaarungen sowie deren Oberflächenbeschaffenheit, wobei die Reibungskraft proportional zu wirkenden Normalkraft ist. Das Verhältnis von Reibungskraft und Normalkraft bezeichnet man als Reibungskoeffizient bzw. Reibungszahl μ .

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (2.1)$$

2.2.1 Reibungszustände

Der Reibungszustand beschreibt den Reibungsvorgang bezüglich der stofflichen und energetischen Zustandsgrößen. So wird der Reibungszustand über der Aggregatzustände sowie deren Mischformen beschrieben. Demnach wird sie nach folgenden Kontaktzuständen der Reibpartner unterteilt:

2. Theoretische Grundlagen

- Festkörperreibung
- Flüssigkeitsreibung
- Mischreibung
- Grenzreibung
- Gasreibung

Die Reibungszustände werden durch die Stribeckkurve gekennzeichnet

2.2.1.1 Festkörperreibung

Bei der Festkörperreibung erfolgt der Reibkontakt direkt im Festkörperbereich. Die Körper sind nicht durch einen Zwischenstoff, wie Haft-, Reaktions- oder Schmierstoffschichten voneinander getrennt. Bei der reinen Festkörperreibung handelt es sich um sogenannte Trockenreibung [21]. Sobald der Durchmesser der Abriebspartikel kleiner dem Schmierpalt ist, dienen diese als eine Art Schmierstoff (siehe Abbildung 2.2).

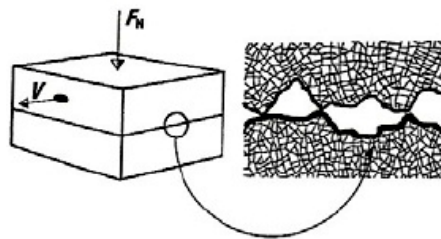


Abbildung 2.2: Reine Festkörperreibung [17]

2.2.1.2 Flüssigkeitsreibung

Bei der Flüssigkeitsreibung kommt es möglichst zu einer vollständigen Trennung der Kontaktflächen. Findet kein Festkörperkontakt mehr statt, d. h. der Reibungsvorgang findet allein in der Flüssigkeitsschicht statt, spricht man von hydrodynamischer Schmierung. Die hydrodynamische Schmierung hat beispielsweise bei Gleitlagern eine große Bedeutung (siehe Abbildung 2.3)[17].

2. Theoretische Grundlagen

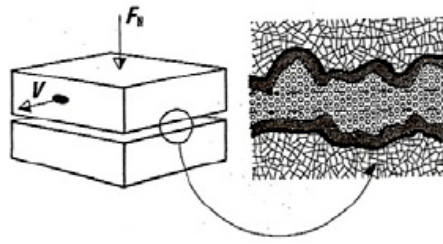


Abbildung 2.3: Flüssigkeitsreibung [17]

2.2.1.3 Mischreibung

Mischreibung tritt auf, wenn der Schmierfilm zwischen Kontaktflächen unterbrochen ist und sich so die Reibungszustände zeitlich und örtlich überlagern. Nach Fleischer ist die „Mischreibung eine Mischform von mindestens zwei Reibungszuständen, die gleichzeitig nebeneinander auftreten (siehe Abbildung 2.4).

Danach sind vier Hauptvarianten möglich:

- Mischform des Zustands der Festkörper- und Flüssigkeitsreibung
- Mischform des Zustands der Flüssigkeits- und Gasreibung
- Mischform des Zustands der Festkörper- und Gasreibung
- Mischform des Zustands der Festkörper- und Flüssigkeits- und Gasreibung „ [10, S. 30]

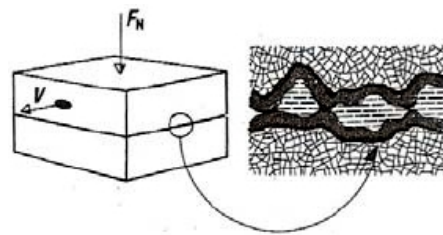


Abbildung 2.4: Mischreibung [17]

Nach Kuhn ist es bei der Mischreibung mit Festkörper- und Flüssigkeitsreibung nicht zwingend notwendig, dass direkter Festkörperkontakt stattfindet [14].

2. Theoretische Grundlagen

2.2.1.4 Grenzreibung

Grenzreibung ist jene Reibung, bei der die Reibung zwischen festen Grenzschichten mit gegenüber dem Grundmaterial modifizierten Eigenschaften stattfindet, bspw. zwischen Reaktionsschichten. Die Grenzschichten auf den Kontaktflächen bestehen aus je einem molekularen Film, der von einem Schmierstoff stammt. Die hydrodynamische Wirkung des Schmierstoffs ist bei der Grenzreibung vernachlässigbar, da die Geschwindigkeit sehr klein ist oder die vorhandene Schmierstoffmenge nicht ausreicht, um den Spalt zu füllen (siehe Abbildung 2.5)[25].

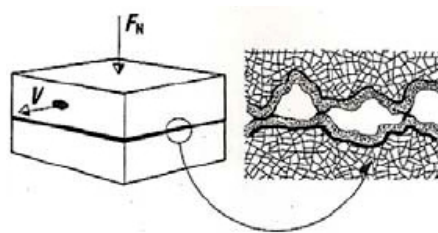


Abbildung 2.5: Grenzreibung [17]

2.2.1.5 Gasreibung

Unter Gasreibung versteht man die Reibung, die zwischen einem Festkörper und einem Gasfilm aerostatisch oder aerodynamisch erzeugt werden kann [7].

Stribeckkurve

Einen guten Überblick über auftretende Reibungszustände, hier am Beispiel von Gleitlagern, gibt die Stribeck-Kurve (siehe Abbildung 2.6). Diese zeigt den Zusammenhang zwischen der Reibungszahl μ und dem bezogenen Reibungsdruck $\frac{\eta\omega l}{p}$, wobei μ als $\mu = \frac{F_R}{F}$ definiert, und F die Lagerkraft ist. Nach dem Anfahren aus dem Stillstand wird zunächst Gebiet I durchlaufen und es herrscht Grenzreibung. Die Oberflächen sind von einem molekularen Schmierfilm bedeckt, daher haben sowohl Schmierfilm, als auch Oberflächeneigenschaften einen Einfluss auf das Reibungsverhalten. Mit steigender Geschwindigkeit nimmt auch die Schmierfilmdicke zu, so dass Grenz- und Flüssigkeitsreibung nebeneinander auftreten und so Mischreibung vorliegt (Gebiet II). In Punkt A

2. Theoretische Grundlagen

erreicht die Reibungszahl μ ein Minimum in Gebiet I. In Punkt B erfolgt der Übergang von Misch- in Flüssigkeitsreibung und der Schmierfilm trennt die Oberflächen vollständig voneinander [25].

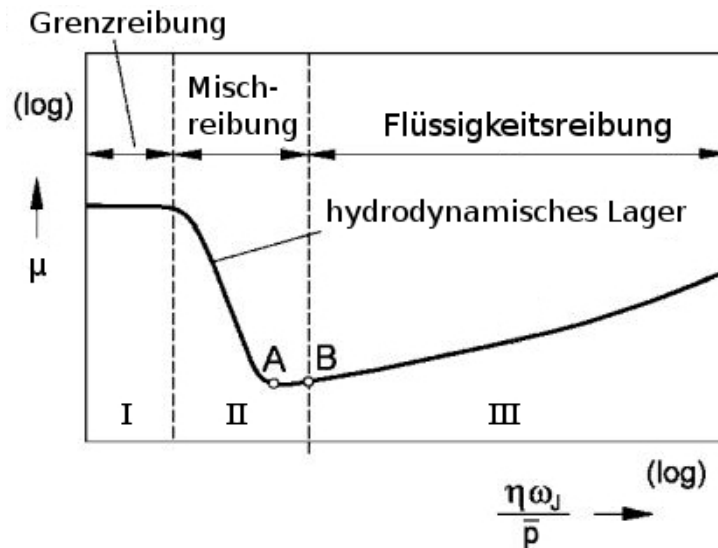


Abbildung 2.6: Stribeck-Kurve (schematisch) vgl. [25]

2.2.2 Reibungsmessgrößen

Eine Reibungsmessgröße bezeichnet nicht die Eigenschaft eines einzelnen Körpers oder Stoffes, sondern muss stets auf die Material-Paarung, d. h. allgemein auf das betreffende tribologische System, bezogen werden. Es gilt also: Reibungskenngröße = $f(\text{Systemstruktur, Beanspruchungskollektiv})$. Die Reibung kann im Wesentlichen durch kräftemäßige und energetische Messgrößen gekennzeichnet werden (nach DIN 50281)[7]:

- **Reibungskraft F_R**

Kraft, die infolge der Reibung als mechanischer Widerstand gegen eine Relativbewegung auftritt und der Bewegungsrichtung entgegengesetzt ist

$$F_R = \sum_{(j)} F_{Rj} \quad (2.2)$$

2. Theoretische Grundlagen

- **Reibungsmoment M_R**

Moment, das infolge der Reibung als Widerstand gegen eine rotatorische Relativbewegung auftritt:

$$M_R = F_{Rj} \cdot r \quad (2.3)$$

- **Reibungszahl μ**

Quotient aus Reibungskraft F_R und Normalkraft F_N

$$\mu = \frac{F_R}{F_N}$$

- **Reibungsarbeit A_R**

Die zur Aufrechterhaltung eines Bewegungsvorganges unter Reibung zu verrichtende (Verlust-) Arbeit, bezogen auf die vorliegende Kinematik:

$$A_R = F_R \cdot s_R \quad (2.4)$$

- **Reibungsleistung P_R**

Die zur Aufrechterhaltung eines Bewegungsvorganges unter Reibung aufzuwendende (Verlust-) Leistung:

$$P_R = F_R \cdot v_R = M_R \cdot \omega_R = \frac{W_R}{t_R} \quad (2.5)$$

- **Reibungswinkel ρ**

Winkel zwischen der Richtung der Normalkraft F_N und der Richtung der Resultierenden aus Reibungskraft F_R und Normalkraft F_N :

$$\rho = \arctan(\mu) \quad (2.6)$$

2.2.3 Reibungsmechanismen

„Als Reibungsmechanismen werden die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems auftretenden bewegungshemmenden, energiedissipierenden Elementarprozesse der Rei-

2. Theoretische Grundlagen

zung bezeichnet. Sie gehen von den im Kontaktbereich örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten aus. Nach den Ergebnissen der Kontaktmechanik nimmt bei einer Berührung technischer Oberflächen die Anzahl der Mikrokontakte etwa linear mit der Normalkraft F_N zu. Geht man davon aus, dass jeder Mikrokontakt einen elementaren Bewegungswiderstand darstellt, so ergibt sich für die makroskopische Reibungskraft näherungsweise der folgende Ansatz:

Reibungskraft $F_R \sim \text{Anzahl der Mikrokontakte} \sim \text{Normalkraft } F_N$ [6, S. 85]

Vereinfacht können die Reibungsmechanismen in folgende Typen eingeteilt werden:

- Adhäsion und Scheren
- Plastische Deformation
- Furchung
- Elastische Hysterese und Dämpfung

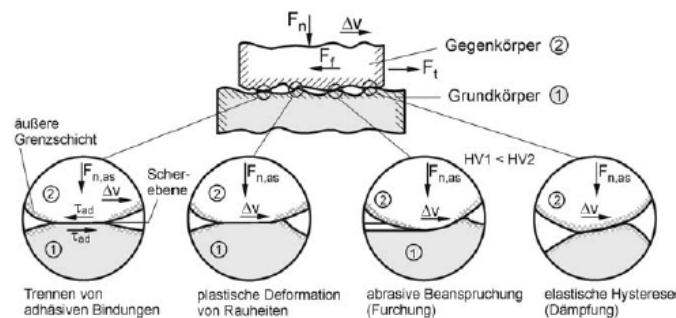


Abbildung 2.7: Vereinfachte Illustration der grundlegenden Reibungsmechanismen [17]

2.2.3.1 Adhäsion und Scheren

Die Adhäsion stellt einen atomar/molekular bedingten Reibungsmechanismus dar. Die Wirkung der Adhäsionskomponente der Reibung beruht auf dem Energieverlust, der dadurch entsteht, dass die auf den realen Kontaktflächen aufgebauten atomaren oder molekularen Bedingungen bei Relativbewegung wieder getrennt werden. Die Van-der-Waals-Bindung ist die häufigste Ursache der Adhäsion (Van-der-Waals-Adhäsion)[25] [7].

2. Theoretische Grundlagen

2.2.3.2 Plastische Deformation

Beim Kontakt und der tangentialen Relativbewegung sich berührender Körper tritt stets eine Kontaktdeformation auf, so können sich dadurch Energieverluste durch dissipative Prozesse ergeben [7, S. 92].

2.2.3.3 Furchung

Furchung entsteht beim Kontakt zweier Körper mit unterschiedlicher Härte. Dabei können die härteren Oberflächenrauheitshügel in den weicheren Gegenkörper eindringen. Bei einer Tangentialverschiebung ergibt sich eine Reibungskomponente als Resultat des Widerstandes des Materials gegenüber der Furchung durch den härteren Gegenkörper. Die Furchung kann einen erheblichen Anteil an der Reibung haben [7].

2.2.3.4 Energiedissipation

Die Energiedissipation beschreibt die Umwandlung der Bewegungsenergie in eine andere Energieform. Der Satz „Durch Reibungsenergie geht als Wärme verloren“ beschreibt den hauptsächlichen Prozess der reibungsbedingten Energiedissipation und kann durch das mechanische Wärmeäquivalent bilanziert werden [7].

2.2.4 Reibungsarten

Reibung wird grob in zwei Bereiche unterteilt, Ruhereibung (Haftreibung, statische Reibung) und Bewegungsreibung (kinematische Reibung). „Für tribotechnische Anwendungen ist eine Unterteilung der Reibung nach der Kinematik gebräuchlich. Je nach Art der Relativbewegung der Kontaktpartner werden die folgenden Hauptreibungsarten unterschieden [7, S. 97].“

- Gleitreibung
- Rollreibung
- Bohrreibung

2. Theoretische Grundlagen

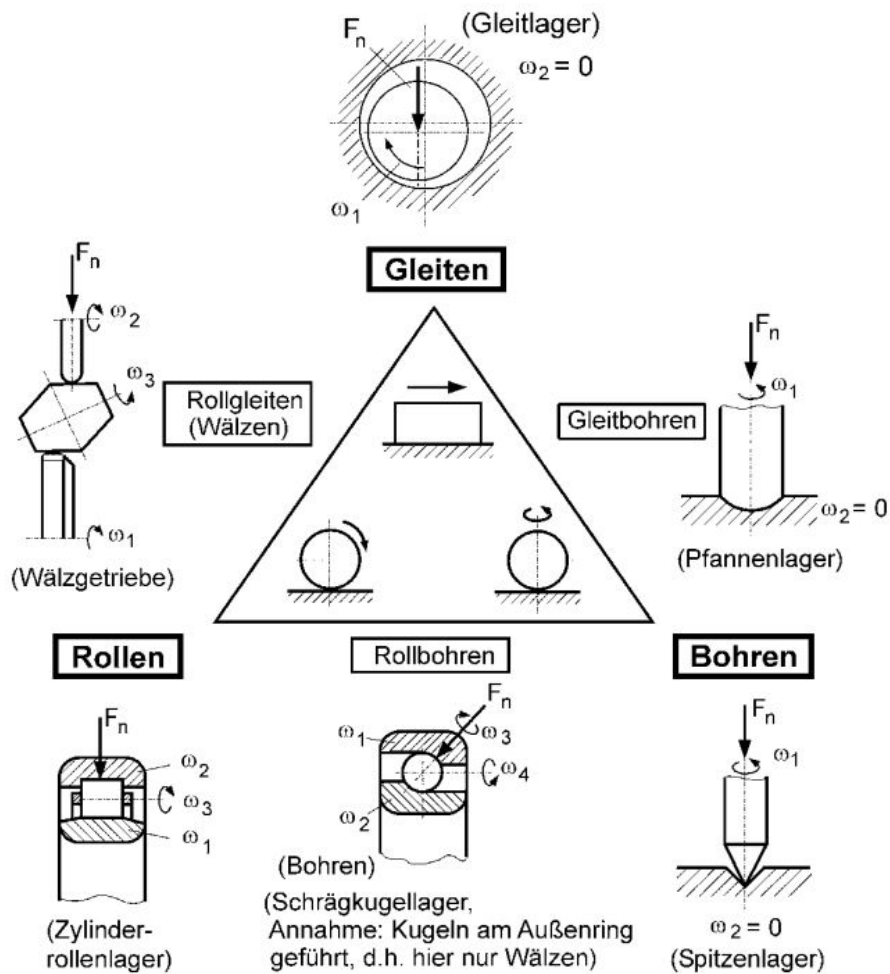


Abbildung 2.8: Einteilung der Reibungsarten nach der Kinematik [25]

2.2.4.1 Gleitreibung

Als Gleitreibung bezeichnet man die Reibung, bei der eine translatorische Bewegung im Kontaktbereich zweier Körper stattfindet. Bei der trockenen Gleitreibung ist das coulombsche Gesetz gültig (Abbildung 2.9). Es ist erst dann möglich, einen Körper in Bewegung zu setzen, wenn eine horizontal wirkende Kraft P gleich dem Reibwiderstand bzw. der Reibungszahl μ_G ist. Die Reibungszahl μ_G ist das Verhältnis von Reibkraft F_R und Normalkraft F_N . [17]

2. Theoretische Grundlagen

$$\frac{F_R}{F_N} = \mu_G$$

Verglichen mit anderen Reibungsarten ist die Gleitreibung mit den größten tribologischen Beanspruchungen im Kontaktgrenzbereich verbunden. Dies gilt sowohl für thermische Vorgänge, als auch für einen möglichen Verschleiß [7].

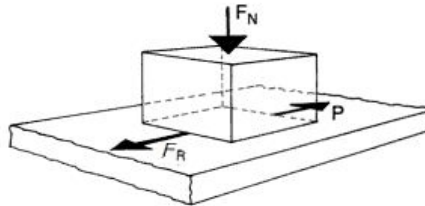


Abbildung 2.9: *Gesetzmäßigkeiten bei der trockenen Gleitreibung [17]*

2.2.4.2 Rollreibung

Unter Rollreibung versteht man die Reibung, bei der zwei linien- oder punktförmig berührende Körper eine rotierende Bewegung ausüben, wobei deren Rotationsachsen parallel zur Reibfläche liegen (siehe Abbildung 2.10)[17].



Abbildung 2.10: *Beispiel für Rollreibung; einreihiges Rillenkugellager [7]*

2. Theoretische Grundlagen

2.2.4.3 Bohrreibung

Unter Bohrreibung versteht man jene Reibung, bei der mindestens eine Drehachse senkrecht zur Kontaktfläche steht und die Körper sich punktförmig berühren. Die Geschwindigkeit in der Berührungsfäche ist nach Betrag und Richtung unterschiedlich (siehe Abbildung 2.11)[17].

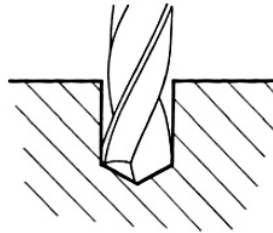


Abbildung 2.11: Beispiel für Bohrreibung [7]

2.2.5 Energetische Betrachtungsweise der Reibung

Die Reibung ist nach Fleischer als eine energetische Größe zu betrachten, hierbei ist die Energie W_R [J] ein Produkt von Reibungskraft F_R [N] und Reibungsweg s_R [m]:

$$W_R = F_R \cdot s_R \quad (2.7)$$

Grundlage der energetischen Betrachtungsweise ist die sog. Doppelnatur der Reibung. Diese setzt sich aus einem Deformations- und Adhäsionsanteil zusammen (Abbildung 2.12).

Für die gesamte aufzuwendende Reibungsenergie ergibt sich:

$$W_R = \sum_{ij} W_{ij} \quad (2.8)$$

„Dabei steht Index i für die Nummer des Reibkörpers bzw. des Stoffbereichs des tribologischen Systems und Index j für die laufende Nummer der Art des Energieanteils, bezogen auf jeden Reibkörper bzw. Stoffbereich“ [10, S. 103 f.].

2. Theoretische Grundlagen

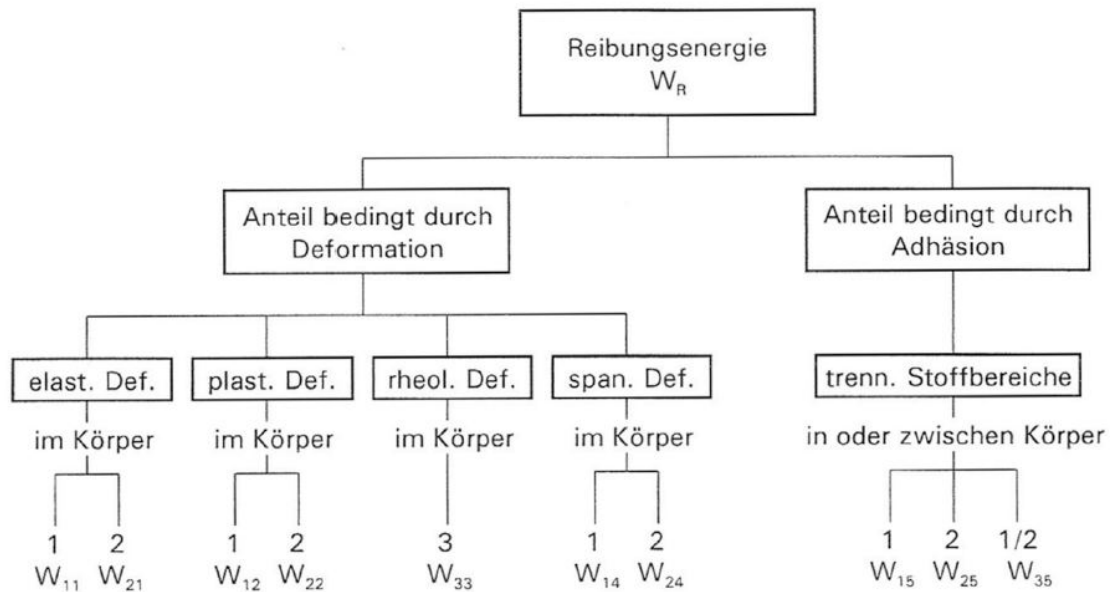


Abbildung 2.12: Mögliche auftretende Energieanteile (energetische Betrachtungsweise) [10]

Um die einzelnen Energieanteile bestimmen zu können, muss die kritische Energiedichte für die betreffende Art der Energieaufwendung, das daran beteiligte Volumen und die Anzahl n_{ij} gleicher Energieanteile bekannt sein.

So ergibt sich für die Reibungsenergie:

$$W_R = \sum_{ij} (e_{ij} \cdot V_{Rij} \cdot n_{ij}) \quad (2.9)$$

[10]

2.3 Verschleiß

Verschleiß ist nach DIN 50320 der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Allgemein wird Verschleiß in der Technik als unerwünscht angesehen, d. h. er wirkt sich wertmindernd aus [9]. „In Ausnahmefällen, wie z. B. bei Einlaufvorgängen, können Verschleißvorgänge

2. Theoretische Grundlagen

jedoch auch technisch erwünscht sein. Bearbeitungsvorgänge als wertbildende technologische Vorgänge gelten in Bezug auf das herzustellende Werkstück nicht als Verschleiß, obwohl im Kontaktbereich zwischen Werkstück und Werkzeug tribologische Prozesse wie beim Verschleiß ablaufen“ [9, S. 21].

Nach Kuhn ist der Verschleiß „eine infolge einwirkender Reibungsenergie auftretende Produktion von Irreversibilität und umfasst alle Elemente eines tribologischen Systems“ [14, S. 9].

Nach Fleischer ist der Verschleiß eine „infolge Reibung eintretende bleibende Form-, Größen- oder Stoffänderung, der die Oberfläche von Festkörpern bildenden Stoffbereichen“ [10, S. 38].

Abbildung 2.13 zeigt neben dem Festkörperverschleiß auch den Schmierstoffverschleiß.

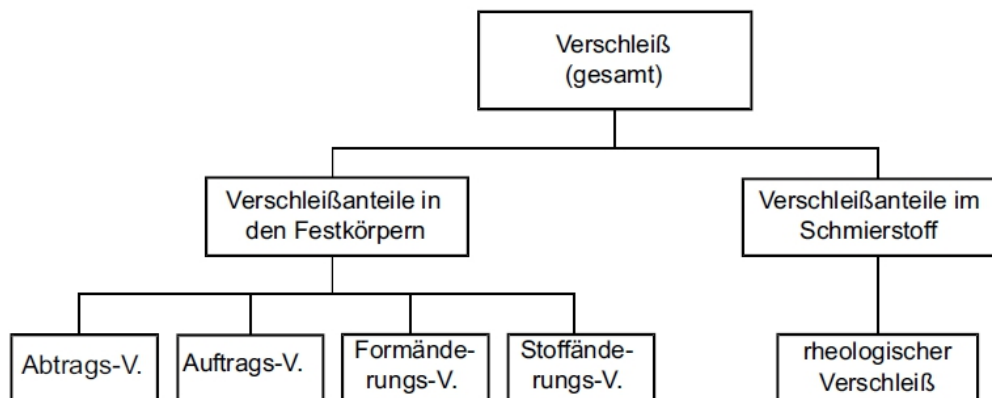


Abbildung 2.13: Neue Auffassung des Verschleißprozesses [15]

2.3.1 Verschleißmessgrößen

Die Änderungen der Gestalt oder Masse eines Körpers durch Verschleiß werden als Verschleißmessgrößen bezeichnet. Hierbei unterscheidet man zwischen direkten, bezogenen und indirekten Verschleißmessgrößen [9].

2.3.1.1 Direkte Verschleißmessgrößen

Direkte Verschleißmessgrößen sind Maßzahlen für die Gestalt- oder Massenänderung eines verschleißenden Körpers. Der Verschleißbetrag beschreibt die Längen-, Flächen-

2. Theoretische Grundlagen

, Volumen- oder Massenänderung des verschleißenden Körpers. Hierbei wird zwischen linearem, planimetrischem, volumetrischem und massenmäßigem Verschleißbetrag unterschieden, wobei der Reziprokwert dieser Größen als Verschleißwiderstand bezeichnet wird (siehe Tabelle 2.2)[9].

Tabelle 2.2: *Direkte Verschleißmessgrößen vgl. [1]*

Verschleiß-Messgröße		Zeichen	Einheit
Verschleißbetrag	Längen-, Flächen, Volumen oder Massenänderung des verschleißenden Körpers	W	$[m]; [m^2]; [m^3]; [kg]$
linearer Verschleißbetrag	Längenänderung senkrecht zur verschleißenden Fläche	W_l	$[m]$
Planimetrischer Verschleißbetrag	Größe der Schnittfläche, die senkrecht zur verschleißenden Fläche abgetragen wird	W_q	$[m^2]$
Volumetrischer Verschleißbetrag		W_v	$[m^3]$
Massenmäßiger Verschleißbetrag		W_m	$[kg]$
Relativer Verschleißbetrag	Verhältnis der Verschleißbeträge des verschleißenden Körpers und eines unter den gleichen Bedingungen verschleißenden Referenzkörpers	W_r	$[-]$
Verschleißwiderstand	Reziprokwert des Verschleißbetrages	$\frac{1}{W}$	$\left[\frac{1}{m}\right]; \left[\frac{1}{m^2}\right]; \left[\frac{1}{m^3}\right]; \left[\frac{1}{kg}\right]$
relativer Verschleißwiderstand	Reziprokwert des relativen Verschleißbetrages	$\frac{1}{W_r}$	$[-]$

2.3.1.2 Bezogene Verschleißmessgrößen

Bei den bezogenen Verschleißmessgrößen wird der Verschleiß in Relation zu einer Bezugsgröße gesetzt. Diese werden auch als Verschleißraten bezeichnet und durch die mathematische Ableitung des Verschleißbetrages nach der Bezugsgröße ermittelt. Als Bezugsgröße gelten primär die Beanspruchungsdauer, der Beanspruchungsweg sowie der Durchsatz.

2.3.1.3 Indirekte Verschleißmessgrößen

Im Gegensatz zu den direkten Verschleißmessgrößen beruhen die indirekten Verschleißmessgrößen nicht auf der Messung von verschleißbedingten Gestalt- oder Masseänderungen, sondern auf der Messung der Dauer oder des Durchsatzes, in welcher ein verschleißendes Bauteil oder Tribosystem seine Funktionsfähigkeit verliert. Hierbei ist eine

2. Theoretische Grundlagen

Abschätzung der indirekten Verschleiß-Messgrößen notwendig, um den Neuzustand des Tribosystems genau zu erfassen und das Erreichen seiner Funktionsunfähigkeit genau festzulegen, z. B. durch Angabe eines zulässigen Grenzwertes für die Leistungsabnahme einer Maschine (siehe Tabelle 2.3)[9].

Tabelle 2.3: Indirekte Verschleißmessgrößen vgl. [1]

Verschleiß-Messgröße		Zeichen	Einheit
Verschleißbedingte Gebrauchsdauer	Dauer der Beanspruchung abzüglich der Stillstandzeiten, in der ein Bauteil oder ein Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert	T_w	[h]
Gesamt-Gebrauchsdauer	Dauer der Beanspruchung einschließlich der Stillstandzeiten, in der ein Bauteil oder ein Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert	T_G	[h]
Verschleißbedingte Durchsatzmenge	Volumen, Masse oder Anzahl der Körper, durch die ein Bauteil oder ein Tribosystem durch Verschleiß seine Funktionsfähigkeit verliert	W_G	[m ³]; [kg]; [Stck]

2.3.2 Verschleißmechanismen

Verschleißmechanismen sind die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems ablaufenden physikalischen und chemischen Wechselwirkungen. Die daraus resultierenden Elementarprozesse führen zu Stoff- und Formänderungen der Kontaktpartner. Als hauptsächliche Verschleißmechanismen gelten:

- Adhäsion
- Abrasion
- Oberflächenzerrüttung (Ermüdung)
- Tribochemische Reaktion (Tribooxidation)

2.3.2.1 Adhäsion

Adhäsion ist das Ausbilden und Trennen von Haftverbindungen an der Grenzfläche von Grund- und Gegenkörper, d. h. dass stoffliche Wechselwirkungen auf atomarer Ebene

2. Theoretische Grundlagen

ein entscheidende Rolle spielen. Verschleißerscheinungsformen sind z. B. Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen und Materialübertrag (Kaltverschweißung, Fressen)(siehe Abbildung 2.14) [17].

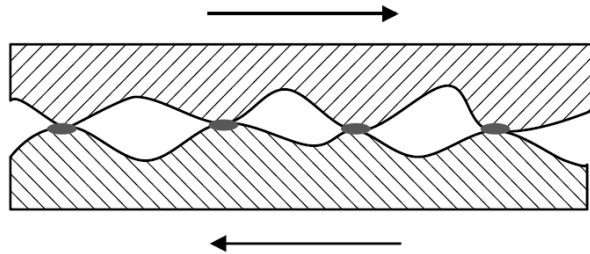


Abbildung 2.14: Adhäsion [13]

2.3.2.2 Abrasion

Abrasion ist der Materialabtrag durch wiederholte ritzende Beanspruchung. Sie tritt auf, wenn in tribologischen Kontakten der Gegenkörper entscheidend härter und rauher ist oder harte Partikel im Zwischenstoff in einen tribologisch beanspruchten Körper eingedrückt werden (siehe Abbildung 2.15)[17].

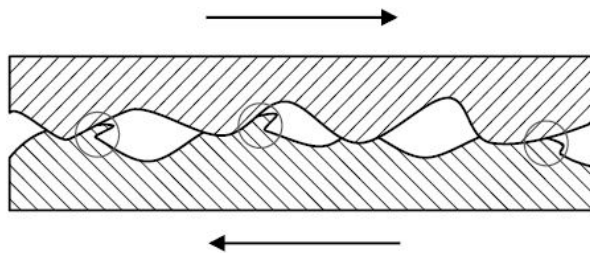


Abbildung 2.15: Abrasion [13]

2.3.2.3 Oberflächenzerrüttung (Ermüdung)

Oberflächenzerrüttung basiert auf der Rissbildung, dem Risswachstum und dem Abtrennen von Verschleißpartikeln Ermüdung und Rissbildung durch Wechselbeanspruchung im Oberflächenbereich (siehe Abbildung 2.16)[17].

2. Theoretische Grundlagen

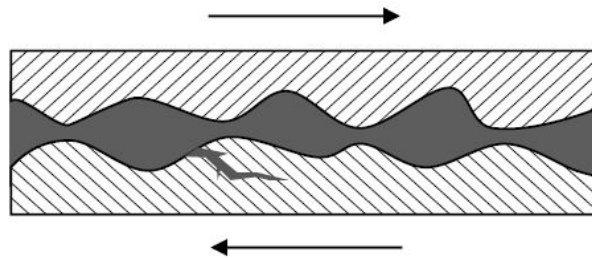


Abbildung 2.16: Oberflächenzerrüttung [13]

2.3.2.4 Tribochemische Reaktion (Tribooxidation)

Die tribochemische Reaktion ist das Entstehen von Schichten oder Partikeln auf oder zwischen den sich berührenden Oberflächen zwischen den Elementen des Tribosystems. Diese sind Folge einer reibungsbedingten Aktivierung der beanspruchten oberflächennahen Bereiche (siehe Abbildung 2.17)[7].

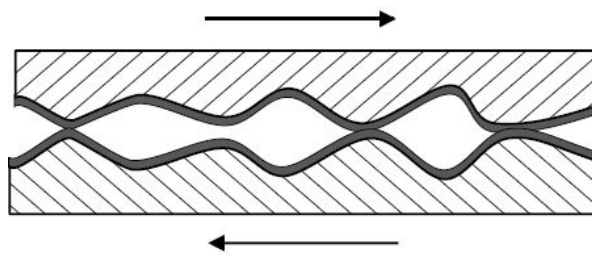


Abbildung 2.17: Tribochemischer Verschleiß [13]

2.3.3 Maßnahmen zur Verschleißminimierung durch Beeinflussung der Verschleißmechanismen

- **Beeinflussung der Abrasion:**

- Härte des beanspruchten Werkstoffs mindestens um den Faktor 1,3 größer als die Härte des Gegenkörpers
- Harte Phasen, z.B. Carbide in zäher Matrix
- wenn das angreifende Material härter als der Werkstoff ist: zäher Werkstoff

- **Beeinflussung der Oberflächenzerrüttung:**

2. Theoretische Grundlagen

- Werkstoffe mit hoher Härte und hoher Zähigkeit
- Homogene Werkstoffe
- Druckeigenspannung in den Oberflächenzonen
- **Beeinflussung der Adhäsion:**
 - Schmierung
 - Vermeiden von Überbeanspruchung
 - Verwendung von Schmierstoffen mit EP-Aditiven
- **Beeinflussung tribochemischer Reaktionen**
 - Keine Metalle, höchstens Edelmetalle
 - Formschlüssige anstelle von kraftschlüssigen Verbindungen
 - Hydrodynamische Schmierung

vgl. [7]

2.3.4 Verschleißarten

Zur Kennzeichnung des Verschleißes in tribotechnischen Anwendungen ist ähnlich wie bei der Klassifizierung der Reibung eine Unterteilung nach Verschleißarten üblich. Eine Eigenschaft, die alle Verschleißarten besitzen ist, dass an ihnen mit unterschiedlichen Anteilen benannten Verschleißmechanismen beteiligt sein können. Die Verschleißarten werden je nach Art des tribologischen Systems und der dominierenden Kinematik wie folgt nach offenen und geschlossenen Tribosystemen unterteilt:

Verschleißarten, die primär in geschlossenen Tribosystemen auftreten:

- Gleitverschleiß
- Wälzverschleiß
- Stoßverschleiß

2. Theoretische Grundlagen

- Schwingungsverschleiß
- Furchungsverschleiß (Gegenkörperfurchung)

Verschleißarten, die primär in offenen Tribosystemen auftreten:

- Furchungsverschleiß (Teilchenfurchung)
- Strahlverschleiß
- Erosion (Strömungsverschleiß)

Gleitverschleiß

Gleitverschleiß ist der Ablauf und das Ergebnis von Verschleißprozessen bei einer Gleitbewegung kontaktierender Werkstoffe oder Bauteilen. Gleitverschleiß tritt bei allen in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Reibungszuständen auf [7].

Wälzverschleiß

Wälzverschleiß tritt bei den Bewegungsarten Rollen oder Wälzen auf, wobei der dominierende Verschleißmechanismus die Oberflächenzerrüttung ist (Abschnitt 2.3.2.3)[7].

Stoßverschleiß

Stoßverschleiß ist die, beim Zusammenstoßen oder Aufprallen zweier fester Körper, auftretende Verschleißart. Hervorgerufen wird der Stoßverschleiß durch die dabei wirkenden impulsförmigen, kräftemäßigen und energetischen Wechselwirkungen. Die im Kontaktbereich umgesetzte Stoßenergie bewirkt Formänderungen (plastische Deformation, Rissbildung) sowie Stoffänderungen, wodurch die Reaktionsfähigkeit der beanspruchten Kontaktpartner mit dem Umgebungsmedium steigt[7].

2. Theoretische Grundlagen

Schwingungsverschleiß

Schwingungsverschleiß ist durch die Relativbewegung mit kleinen Schwingungen der Kontaktpartner in einem tribologischen System gekennzeichnet. Dabei ist die Amplitude der Relativbewegung allgemein kleiner als der Durchmesser der momentanen geometrischen Kontaktfläche. Beim Schwingungsverschleiß sind alle vier Hauptverschleißmechanismen möglich (Abschnitt 2.3.2). Bei Stahlkontaktpartnern führt Schwingungsverschleiß zu sog. „Passungs-“ oder „Reibrost“ [7].

Furchungsverschleiß

Beim Furchungsverschleiß kommt es zum Eindringen von Rauheitshügeln eines kontaktierenden Partners, harter Partikel in die Oberflächenbereiche des beanspruchten Werkstoffs bzw. Bauteils. Dadurch entstehen durch Abrasionsprozesse Kratzer oder Riefen bzw. Furchen. Üblicherweise wird der Furchungsverschleiß in zwei Untergruppen eingeteilt:

1. Gegenkörperfurchung, auch Abrasiv-Gleitverschleiß genannt (Zwei-Körper-Abrasion)
2. Teilchenfurchung, je nach Kinematik gegliedert in Korngleitverschleiß, Kornwälzverschleiß, Kornstoßverschleiß (Drei-Körper-Abrasion)[7]

Strahlverschleiß

Ursache des Strahlverschleißes ist das Auftreffen körniger Teilchen auf eine Werkstoff- oder Bauteiloberfläche. Je nach Anstrahlwinkel α , mit dem die Partikel auf die Oberfläche treffen, wird der Strahlverschleiß wie folgt eingeteilt:

- Gleitstrahlverschleiß ($\alpha \approx 0^\circ$)
- Prallstrahlverschleiß ($\alpha \approx 90^\circ$)
- Schrägstrahlverschleiß ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)[7]

2. Theoretische Grundlagen

Erosion

Unter dem Begriff Erosion werden allgemein Verschleißarten zusammengefasst, die infolge von Gas- oder Flüssigkeitsströmungen entstehen. Die daraus entstehenden Materialschädigungen können dabei durch das Fluid selbst oder die möglicherweise darin enthaltenen Feststoffpartikeln hervorgerufen werden. Die Erosionsarten werden jeweils durch das Beanspruchungsmedium (Gas, Dampf, Flüssigkeit) bewegter Materie oder deren Kombinationen bestimmt, danach treten folgende Erosionsarten auf: [7]

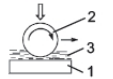











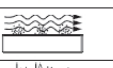




„Erosionsart	Beanspruchungsmedium
- Gaserosion	Gas
- Kavitationserosion	Flüssigkeit (Unterdruckzonen)
- Tropfenschlagerosion	Flüssigkeit (Tropfen)
- Flüssigkeitserosion	Flüssigkeit + Partikel
- Erosionskorrosion	Flüssigkeit + Partikel + Fluidphasen“ [7, S. 146]

Mit der Einteilung in verschiedene Verschleißarten ist zu beachten, dass bei jedem Verschleißvorgang verschiedene Verschleißmechanismen wirksam werden können, so dass sich auch bei ein und derselben Verschleißart unterschiedliche Verschleißerscheinungsformen zeigen können.

Tabelle 2.4 zeigt die an den beanspruchten Werkstoffoberflächen hauptsächlich auftretenden Verschleißerscheinungsformen mit den hauptsächlich wirkenden Verschleißmechanismen.

2. Theoretische Grundlagen

Tabelle 2.4: Gliederung des Verschleißgebietes nach Art der tribologischen Beanspruchung [17]

Elemente der Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung		Verschleißart	Beispiele	Wirkende Mechanismen ● vorherrschend ○ untergeordnet			
					Adhäsion	Abrasion	Oberflächenzer-rüttung	Tribochemische Reaktionen
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Flüssigkeit) Gegenkörper 2	Gleiten Roll Wälzen		Gleitverschleiß, Wälzverschleiß	Gleitlager, Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen	(○)	(○)	●	○
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Verschleißpartikel, Flüssigkeitsreste, Gase oder Vakuum) Gegenkörper 2	Gleiten		Gleitverschleiß	Führungsbahnen, Zylinderbüchsen	●	○	○	●
	Roll Wälzen		Rollverschleiß, Wälzverschleiß	Wälzlager, Zahnräder, Nockenwellen, Rad/Schiene	○	○	●	●
	Oszillieren		Schwingungsverschleiß	Passflächen, Lagersitze	●	●	●	●
	Stoßen		Stoßverschleiß	Ventilnadeln	○	○	●	●
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Festgestein, Stückgut, Schüttgut)	Stoßen		Zweikörper-Abrasiveverschleiß	Prallplatten, Schlagmühlen	○	●	●	○
	Gleiten			Baggerschaufeln, Schurren, Gesteinsbohrer	○	●	○	(○)
Grundkörper 1 Zwischenstoff 3 (Stückgut, Partikel) Gegenkörper 2	Gleiten		Dreikörper-Abrasiveverschleiß	Verunreinigung in Lagern und Führungen	○	●	●	○
	Wälzen			Wälzmühlen	○	●	●	○
	Stoßen			Backenbrecher	○	●	●	(○)
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit mit Partikeln)	Strömen		Hydroerosiv- (hydroabrasiv)verschleiß	Pumpen, Transportleitungen	(○)	●	●	○
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Gas mit Partikeln)	Strömen		Gleitstrahlverschleiß	pneumatische Förderanlagen	○	●	●	○
	Gleiten Stoßen		Schrägstrahl-, Prallstrahlverschleiß		○	●	●	○
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Flüssigkeit)	Strömen Schwingen		Kavitationserosion	Pumpen, Ventile, Wasserturbinen			●	○
	Stoßen Gleiten		Tropfenschlagerosion	Rotorblätter, Dampfturbinen			●	○
	Strömen		Flüssigkeitserosion	Pumpen, Ventile, Rohrleitungen		(○)	○	●
Grundkörper 1 Gegenkörper 2 (Gas)	Strömen		Gaserosion	Gasturbinen, Hitzeschilde				●

2. Theoretische Grundlagen

2.3.5 Rheologischer Verschleiß

Allgemein bezieht sich der Verschleiß primär auf die geometrisch-stoffliche Änderung von festen Reibpartnern, aber auch Schmierfette besitzen ein zeitabhängiges rheologisches und tribologisches Verhalten. So ändern sich bei tribologischer Beanspruchung auch die Stoffeigenschaften eines Fettes irreversibel. Diese infolge von Reibung (Scherprozess) auftretende Stoffeigenschaftsänderung wird als rheologischer Verschleiß bezeichnet [14]. Nach Kuhn wird der rheologische Verschleiß daher wie folgt definiert:

Rheologischer Verschleiß ist die „infolge tribologischer Beanspruchung eintretende irreversible Eigenschaftsänderung beanspruchter Stoffbereiche eines strukturviskosen Schmierstoffes“ [14, S. 9].

3 Grundlagen der Rheologie

3.1 Allgemeines

Die Rheologie ist die Lehre der Deformation und des Fließens von Substanzen. Ihr Name leitet sich aus dem griechischen Wort „rheos“ (dt. Fließen) ab. Der Prozess des Fließens beschreibt die fortwährende Verformung eines Materials unter der Einwirkung äußerer Kräfte. Die Rheologie beschäftigt sich nicht nur mit dem Fließverhalten von Flüssigkeiten, sondern auch mit dem Deformationsverhalten von Festkörpern. Primär dient die Rheologie dazu das Stoffverhalten unterschiedlicher Substanzen unter Einwirkung äußerer Kräfte zu messen, zu beschreiben und zu erklären. Als Bemessungsgrundlage bei rheologischen Untersuchungen dienen die beiden idealisierten Grundfälle: dem Fließen von idealviskosen Flüssigkeiten und dem Verformen von idealelastischen Festkörpern. Ein idealelastischer Festkörper verhält sich unter der Einwirkung einer äußeren Kraft reversibel elastisch. Die Energie der Deformation wird bei der Entlastung des Körpers vollständig zurückgewonnen. Dieses bezeichnet man als „Hookschen Körper“. Bei idealen Fluiden ergibt sich durch Einwirkung einer äußeren Kraft eine irreversible Verformung, das Fließen. Die aufgewendete Energie wird vollständig in Wärme umgewandelt und kann beim Entfallen der Krafteinwirkung nicht zurückgewonnen werden. Alle Formen des Scherverhaltens finden zwischen diesen beiden idealisierten Grundfällen statt. Die rheologischen Eigenschaften der zu untersuchenden Substanzen hängen von mehreren Faktoren ab. Zu nennen sind hier die Beanspruchungsart, die Beanspruchungshöhe, die Beanspruchungsdauer und die Temperatur. Beschrieben werden die rheologischen Eigenschaften u. a. durch die Viskosität, die Elastizität und die Plastizität.

3.2 Rheologische Begriffe

Die für Beschreibung erforderlichen physikalischen Größen definiert man mit Hilfe eines Zwei-Platten-Modells. Zwischen den beiden Platten befindet sich ein beliebiges Volumenelement wie bspw. eine Flüssigkeit. Übt man auf die obere Platte der Fläche A eine Kraft F in eine beliebige Richtung aus, so deformiert sich das Volumenelement. Das Verhältnis der aufgewendeten Kraft zu der Fläche der Platte ist als Schubspannung definiert.

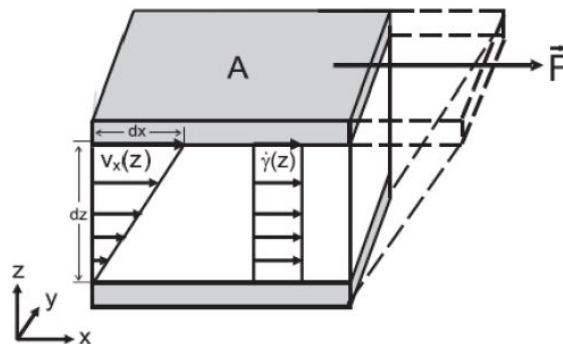


Abbildung 3.1: Zwei-Platten-Modell [20]

Je nach Richtung der Krafteinwirkung unterscheidet man folgende Fälle (siehe Abbildung 3.1):

- Stauchung oder Dehnung entsteht bei Krafteinwirkung parallel zur Flächennormalen der Fläche A
- Scherung entsteht bei Krafteinwirkung senkrecht zur Flächennormalen der Fläche A

3.2.1 Schubspannung

Die Schubspannung oder auch Scherspannung τ [$Pa = \frac{N}{m^2}$] ist die auf die Fläche A bezogene Kraft F , deren Richtung tangential zur Angriffsfläche liegt. Sie ist definiert durch die Scherkraft F [N] und die Scherfläche A [m^2]:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

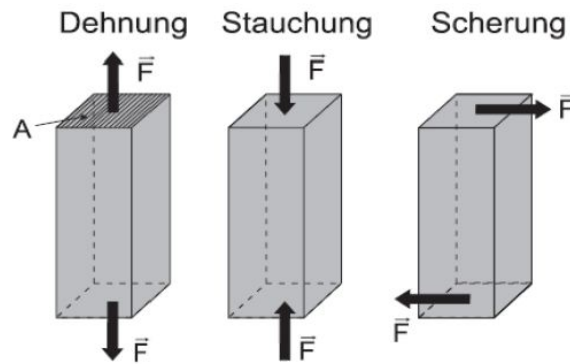


Abbildung 3.2: Einwirkung einer Kraft auf einen Körper [20]

3.2.2 Scherdeformation

Die Scherdeformation γ wird als die Auslenkung $dx[m]$ im Verhältnis zur Spalthöhe $h[m]$ definiert und ist folglich einheitslos.

$$\gamma = \frac{dx}{h} \quad (3.2)$$

3.2.3 Scherrate

Die Scherrate $\dot{\gamma}$ wird auch als Schergeschwindigkeit, Schergefälle oder Deformationsrate benannt. Sie ist der Quotient aus Geschwindigkeit $v[\frac{m}{s}]$ und Spalthöhe $h[m]$:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad (3.3)$$

3.2.4 Viskosität

Unter Viskosität versteht man die innere Reibung eines Fluids. Diese Reibung entsteht durch die molekularen Wechselwirkungen zwischen den Teilchen eines Stoffes. Die Viskosität beschreibt somit das Fließverhalten eines Stoffes. Je dickflüssiger eine Substanz ist, umso höher ist ihre Viskosität. Durch Kohäsion bzw. durch Impulsübertragung können in einem Fluid Scherkräfte und Scherspannungen übertragen werden.

3. Grundlagen der Rheologie

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten der Viskosität:

- **Dynamische Viskosität** η [Pas] - Auch Scherviskosität genannt definiert sich durch Scherspannung τ und Scherrate $\dot{\gamma}$:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3.4)$$

- **kinematische Viskosität** ν $\left[\frac{mm^2}{s}\right]$ - Wird durch die dynamische Viskosität η [Pas] und die Dichte ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ definiert:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3.5)$$

Die Viskosität hängt grundsätzlich von mehreren Faktoren ab. Dazu zählen der Druck, die Temperatur, die Intensität der Beanspruchung, die Zusammensetzung der Probe und die Dauer der Belastung. Im Belastungsfall hat die Temperatur üblicherweise einen erheblichen Einfluss. Mit ansteigender Temperatur verringert sich die Viskosität von Flüssigkeiten wogegen sie bei Gasen oft leicht zunimmt. Der Einfluss des Druckes gewinnt hinsichtlich der Viskosität erst bei sehr hohem Absolutdruck an Bedeutung. Bei einem Druck von mehreren hundert bar werden Flüssigkeiten kompressibel und ändern ihre Viskosität. [6]

3.3 Fließverhalten

Das Fließverhalten eines Fluides wird durch seine Viskosität bestimmt. Das Viskositätsverhalten verschiedener Fluide kann man in Form einer Fließ- oder Viskositätskurve in einem sog. Rheogramm darstellen. Bei der Fließkurve wird das Schergefälle D über der Schubspannung τ aufgetragen, bei der Viskositätskurve entsprechend die Viskosität η über der Schubspannung τ . Besteht keine Abhängigkeit vom Schergefälle, spricht man von einer newtonschen Flüssigkeit. Analog dazu bezeichnet man die Fluide, deren Viskosität vom Schergefälle abhängt als nichtnewtonsche Flüssigkeit.

3. Grundlagen der Rheologie

3.3.1 Newtonsches Fließverhalten

In diesem Fall ist die dynamische Viskosität η unabhängig von der Schubspannung τ . Aus diesem Grund lässt sich die Viskosität dieser Substanzen anhand einer Messung mit einem Viskosimeter eindeutig bestimmen. Zu den newtonschen Fluiden zählt man u. a. Wasser und verschiedene Öle.

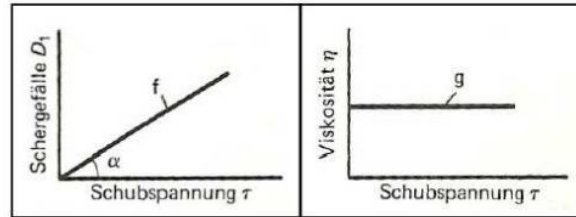


Abbildung 3.3: Newtonsches Fließverhalten [17]

3.3.2 Nicht-Newtonsches Fließverhalten

Viele flüssige Systeme wie Suspensionen, Emulsionen oder Lösungen weichen von dem newtonschen Fließverhalten ab. Bei konstanter Temperatur, konstantem Druck und konstanter Zusammensetzung verhält sich die Viskosität η nicht konstant. Sie ist in diesem Fall abhängig von dem Schergerade und in einigen Fällen auch von der Beanspruchungsdauer.

3.3.2.1 Pseudoplastisches Fließverhalten

Bei vielen zäheren Flüssigkeiten ist die Viskosität abhängig von der Schubspannung, bei der sie gemessen wird. Abnehmende Viskosität bei steigender Schubspannung nennt man pseudoplastisch oder strukturviskos. Es existiert keine universelle mathematische Beziehung um dieses Fließverhalten zu beschreiben. Der Verlauf der verschiedenen Fließkurven ist bei jeder polymeren Substanz individuell und kann nur empirisch ermittelt werden.

3. Grundlagen der Rheologie

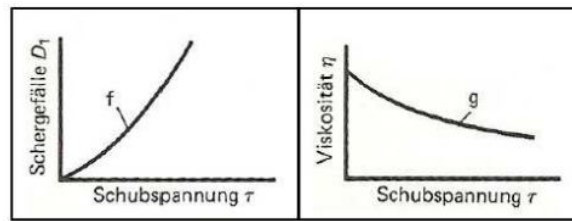


Abbildung 3.4: Pseudoplastisches oder strukturviskoses Fließverhalten [17]

3.3.2.2 Dilatantes Fließverhalten

Das dilatante Fließverhalten stellt den umgekehrten Verlauf des pseudoplastischen Verhaltens dar. Mit steigender Schubspannung erhöht sich auch die Viskosität des Fluides. Dieses Verhalten spielt bei der Betrachtung von Schmierstoffen kaum eine Rolle.

3.3.2.3 Plastisches Fließverhalten

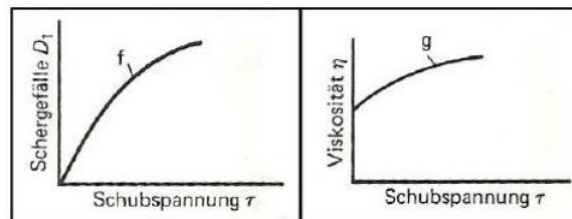


Abbildung 3.5: Dilatantes Fließverhalten [17]

3.3.2.4 Thixotropes Fließverhalten

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Systemen kommt bei dem thixotropen Verhalten eine weitere Komponente zum Tragen. Die Viskosität ist nicht nur von Temperatur, Druck und Schergewichte abhängig, sondern auch von der Beanspruchungsdauer. Bei andauernder scherender Beanspruchung und konstanten Bedingungen nimmt die Viskosität ab und regeneriert nach einer Ruhezeit. Zur Wiederherstellung der ursprünglichen Viskosität kann eine beachtliche Zeit vergehen. Wird die ursprüngliche Viskosität nicht vollständig zurückerlangt, spricht man von unechter Thixotropie.

3. Grundlagen der Rheologie

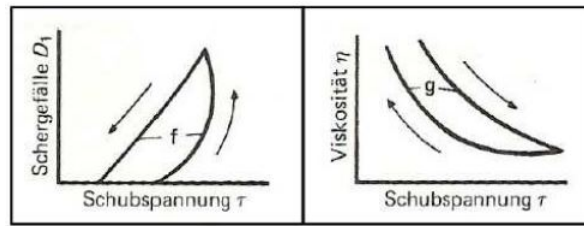


Abbildung 3.6: Thixotropes Fließverhalten [17]

3.4 Beschreibung der Rheologie von Schmierfetten

Das rheologische Verhalten von Schmierfetten, wie sie auch bei der Durchführung unserer Versuchsreihen Verwendung fanden, kann man allgemein wie folgt charakterisieren:

- Schmierfette verhalten sich unecht thixotrop. Ihre Viskosität fällt mit steigender Scherzeit und erreicht auch nach längerer Ruhezeit nicht das Ausgangsniveau zurück.
- Bei steigendem Geschwindigkeitsgefälle zeigt die Viskosität einen abnehmenden Verlauf. Somit liegt ein strukturviskoses Fließverhalten vor.
- Bei Schmierfetten existiert eine Fließgrenze [14].

4 Grundlagen der Schmierstoffe

4.1 Allgemeines zu Schmierstoffen

Schmierstoffen kommen in tribologischen Systemen mehrere Aufgaben zuteil. Primär dienen sie dazu, eine Relativbewegung zwischen festen, belasteten Oberflächen zu optimieren. Die Bewegung soll unter Schonung der geometrischen Gestalt ablaufen, der Abrieb dadurch minimiert, die Lebensdauer und die Wirtschaftlichkeit erhöht werden. Zusammengefasst kann man als Hauptaufgabe der Schmierstoffe also die Kraftübertragung nennen. Die Auswahl des Schmierstoffs richtet sich nach dem Beanspruchungsprofil innerhalb einer Reibpaarung. Hierbei müssen Dichtung, Schmierstoff und Reibpaarung als eine Einheit behandelt und berücksichtigt werden. Weitere Aufgaben eines Schmierstoffs sind die Wärmeabfuhr, Abdichtung und der Korrosionsschutz. Als Basis der Schmierstoffe dienen in den häufigsten Fällen Mineralöle oder Syntheseöle. Eine Unterteilung kann nach dem Fließverhalten und dem Aggregatzustand vorgenommen werden.

4.1.1 Konsistenz

Als Konsistenz bezeichnet man die Widerstandsfähigkeit eines Fettes gegen Verformung. Nach DIN 51818 sind Schmierfette in neun NLGI-Klassen unterteilt. Detaillierte Angaben zu den verschiedenen Klassen entnimmt man der Tabelle. Die sehr weichen Klassen 0, 00 und 000 bezeichnet man als Fließfette. Sie werden unter anderem zur Schmierung von Nutzfahrzeugaggregaten wie dem Getriebe eingesetzt.

4. Grundlagen der Schmierstoffe

Tabelle 4.1: Schmierstoff Konsistenzklassen (NLGI-Klassen) nach DIN 51818 [26]

NLGI-Klasse (DIN 51818)	Walkpenetration in 0,1 mm	Konsistenz	Anwendungen
000	445 ... 475	fließend	Getriebefette, Zentralschmieranlagen
00	400 ... 430	schwach fließend	Getriebefette, Zentralschmieranlagen
0	355 ... 385	halbflüssig	Getriebefette, Wälzlagerfette, Zentralschmieranlagen
1	310 ... 340	sehr weich	Wälzlagerfette
2	265 ... 295	weich	Wälzlagerfette, Gleitlagerfette
3	220 ... 250	mittelfest	Wälzlagerfette, Gleitlagerfette, Wasserpumpenfette
4	175 ... 205	fest	Wälzlagerfette, Wasserpumpenfette
5	130 ... 160	sehr fest	Wasserpumpenfette, Blockfette
6	85 ... 115	hart	Blockfette

4.1.2 Penetration

Die Penetration ist ein Maß für die Konsistenz eines Schmierfettes. Dieser Wert kann anhand eines Penetrationsversuches nach DIN 150 2137 an einem Penetrometer ermittelt werden. Hierbei wird die Eindringtiefe eines standardisierten Kegels nach 5 s in eine Fettprobe ermittelt. Die Eindringtiefe wird in 0,1 mm gemessen wobei eine Hohe Eindringtiefe ein weiches Fett beschreibt. Unterschieden wird bei diesem Verfahren nach Ruhepenetration und Walkpenetration. Bei der Walkpenetration wird das Schmierfett vor der Messung in einem Fettknetter einer definierten Anzahl an Belastungszyklen (Doppelhübe) ausgesetzt, um anschließend den Penetrationsabfall zu ermitteln.

4.1.3 Tropfpunkt

Unter dem Tropfpunkt versteht man die Temperatur, bei der ein Schmierstoff ein definiertes Fließverhalten erreicht. Die Ermittlung des Tropfpunkts findet unter genorm-

4. Grundlagen der Schmierstoffe

ten Prüfbedingungen statt und ist in der DIN ISO 2176 geregelt. Der Tropfpunkt ist dann erreicht, wenn eine Schmierfettprobe nach einer stetigen Temperaturerhöhung vom festen in den flüssigen Aggregatzustand übergeht und aus dem Prüfgerät zu tropfen beginnt. Der Tropfpunkt hat in der Praxis eine begrenzte Aussagekraft bezüglich der Charakterisierung des Schmierfett-Verhaltens.

4.2 Schmieröle

Schmieröle sind sehr wichtige technische Schmierstoffe. Sie zeichnen sich durch eine geringe Viskosität aus und sind somit flüssig. In erster Linie dienen sie der Reibungs- und Verschleißminderung in Lagern und Kontaktstellen. Weitere wichtige Aufgaben die von den Schmierölen erfüllt werden sind der Korrosionsschutz, der Wärmetransport und die Entfernung von Partikeln in der Reibstelle wie sie beispielsweise in Kraftfahrzeugmotoren entstehen. Schmieröle findet man in den verschiedensten Bereichen. Sie erfüllen ihre Funktion in Maschinenelementen, bei der Metallbearbeitung und als Druckmedien. Die Basis für Schmieröle kann sowohl mineralisch als auch synthetisch sein. Auch treten Schmieröle mit und ohne Zusatz von Additiven auf. Additive sind öllösliche Zusätze und dienen der Verbesserung von chemischen und physikalischen Eigenschaften. Zu nennen wären hier bspw. Korrosionsverminderung, Verschleißschutz, Oxidationshemmung und Reibkraftminderung. Im Gegensatz zu Schmierfetten sind die Schmieröle wesentlich besser geeignet um Prozesswärme abzuführen. Außerdem können sie deutlich effizienter auf hohe Geschwindigkeiten und hohe Beschleunigungen reagieren, wie sie in einigen tribotechnischen Systemen vorherrschen.

4.2.1 Schmieröle auf Mineralölbasis

Mineralöle werden durch Destillation aus Erdöl und teilweise aus Kohle gewonnen. Sie stellen ein Gemisch von vielen Kohlenwasserstoffen verschiedener Molekülstruktur und Molekülgröße dar. Die Kohlenwasserstoffe unterscheiden sich durch die Bindungsverhältnisse und durch die Anzahl der Atome im Molekül. Sie können Ketten- oder Ringförmig auftreten und in gesättigten oder ungesättigten Verbindungen vorliegen. Durch die Auswahl der Basisöle sowie durch die Steuerung des Herstellungsverfah-

4. Grundlagen der Schmierstoffe

rens (Raffination) könne bei der Herstellung von Schmierstoffen gewünschte Zusammensetzungen erreicht und damit gewünschte Eigenschaften beeinflusst werden. Für den Aufbau der Mineralöle sind nachfolgende Kohlenwasserstofftypen wichtig: Paraffine (gesättigte kettenförmige Kohlenwasserstoffe), cyclische Alkane (gesättigte ringförmige Kohlenwasserstoffe) und Aromaten (ringförmige Kohlenwasserstoffe mit aromatischem Doppelbindungssystem)[21] [12].

4.2.2 Schmieröle auf Syntheseölbasis

Die synthetischen Basisöle werden aus chemisch definierten Grundbausteinen hergestellt, welche aus Erdöl und Kohle gewonnen werden. Oft sind sie auf ein sehr gutes Viskosität-Temperatur-Verhalten und eine geringe Verkokungsneigung hin entwickelt worden. Ebenso häufig sind ein tiefer Stockpunkt und ein gutes Schmierverhalten in weiten Temperaturbereichen gefordert. Syntheseöle sind somit prädestiniert für Spezialfälle wie Flugzeugturbinen [21].

Syntheseöle lassen sich in folgende Typen einteilen [17]:

- Carbonsäureester (Di-Esteröle)
- Polyetheröle
- Aromatische Polyetheröle
- Phosphorsäureester (Phosphatester)
- Siliconöle
- Kieselsäureester (Silikatester)
- Chlor-Fluor-Kohlenstofföle

4.3 Schmierfette

Nach DIN 51825 sind Schmierfette konsistente Schmierstoffe, die aus Mineralöl und/oder Syntheseöl sowie einem Dickungsmittel bestehen. In der Regel bestehen sie aus drei Komponenten: Grundöl, Verdicker und Additiven. Man zieht ihren Einsatz immer dann vor, wenn die Verwendung von Schmierölen aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen unvorteilhaft oder ausgeschlossen ist. Dieser Fall kann u. a. dann eintreten, wenn Schmieröle abtropfen oder wegfließen würden und eine dauerhafte Versorgung mit Schmieröl sowohl ökologisch als auch ökonomisch nicht zu realisieren wäre. Hier spielen Schmierfette ihre Stärken aus. Sie haben gegenüber den Schmierölen den Vorteil, dass sie nicht von der Reibstelle (z. B. in einem Wälzlager) wegfließen können. Eine kostenintensive, konstruktive Maßnahme zur Abdichtung wird somit überflüssig. Die meisten Schmierfette enthalten Seifen als Verdicker. Um bestimmte Eigenschaften des Fettes zu gewährleisten werden die oben erwähnten Additive zugefügt. Die Schmierfette zählen zu den Nicht-Newtonschen Flüssigkeiten. Sie weisen im Allgemeinen ein thixotropes Verhalten auf, wodurch ihre Viskosität bei steigender Scherbeanspruchung abnimmt. Eine andauernde, hohe Scherbeanspruchung, kann das innere Gefüge des Schmierfettes irreversibel schädigen, hierbei spricht man von rheologischem Verschleiß. Da Schmierfette unter normaler Scherbeanspruchung und Temperatur ihre Form behalten, werden sie auch oft als Dichtungsmittel verwendet. Nicht ausreichend gegen äußere Verschmutzungen geschützte Reibstellen werden durch das Fett abgedichtet und so ein Eindringen von Wasser und Schmutzpartikeln verhindert. Unter Belastung fangen Schmierfette an zu fließen. Damit einher geht die Erhöhung der Temperatur. Schließlich können Schmierfette stoßartige Lagerbelastungen besser auffangen und besitzen im Misch- und Grenzreibungsgebiet günstigere Schmiereigenschaften als Öle. Viele mit Schmierfett versorgte Aggregate eines Kraftfahrzeugs sind Sicherheitsbauteile. In den meisten Fällen wird es nicht gewechselt bzw. nachgefüllt. Es handelt sich um eine Lebensdauerschmierung. Im Gegensatz zum Schmieröl fehlen dem Schmierfett jedoch die Kühl- und Reinigungswirkung [2].

4. Grundlagen der Schmierstoffe

Abbildung 4.1 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Schmierfetttypen:

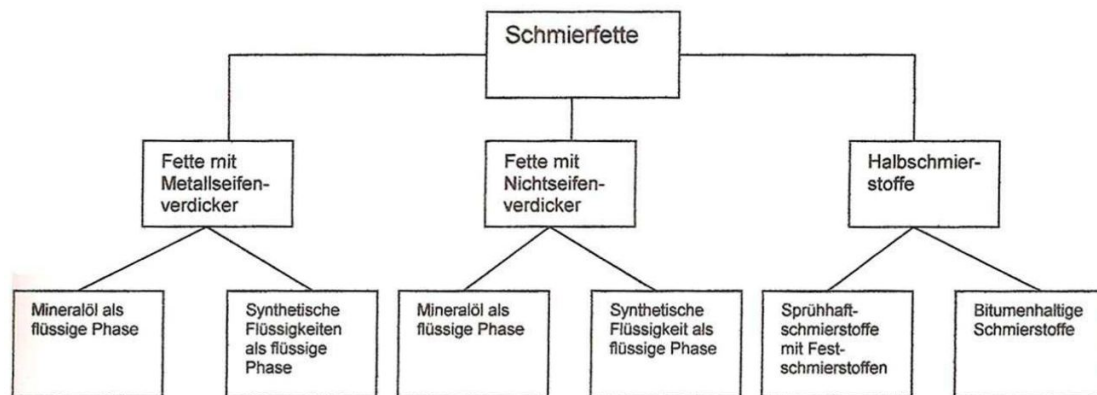


Abbildung 4.1: Schmierfetttypen [3]

In der Schmiertechnik kommen den Schmierfetten viele wichtige Aufgaben zuteil:

- Mechanische Stabilität und kragenbildende Eigenschaften um Schmierstellen gegen äußere Einflüsse abzudichten.
- Ausreichende Haftung auf den zu schmierenden Flächen.
- Keine Einschränkung der Funktionsfähigkeit durch geringe Verunreinigungen.
- Kein Aushärten oder Weichwerden bei normaler Beanspruchung (Formstabilität).
- Gewährleistung eines sicheren Korrosionsschutzes.
- Abgabe des flüssigen Schmieröls durch langsame Separation über weite Temperaturbereiche um Reibung und Verschleiß zu mindern.

4.3.1 Klassifizierung und Aufbau

Üblicherweise werden Schmierfette nach verschiedenen Kriterien klassifiziert:

- Nach NLGI-Konsistenzklassen (DIN 51818)
- Nach Art des Grundöls - mineralische oder synthetische Fette

4. Grundlagen der Schmierstoffe

- Nach der Zusammensetzung - Hier ist meistens der Verdicker ausschlaggebend z. B.: Lithiumfett, Kalkfett etc.
- Nach Eigenschaften - Fließfett, Blockfett etc.
- Nach Anwendungsbereich - Wälzlager, Gleitlager, offene Getriebe etc.
- Gebrauchstemperatur - Niedrig-, Normal- oder Hochtemperaturfette

Die Formulierung eines Fettes richtet sich nach den spezifischen Anforderungen beim Einsatz. Am gebräuchlichsten ist die Benennung nach der Zusammensetzung der drei Basiskomponenten. Die prozentuale Zusammensetzung ist dabei wie folgt aufgeteilt:

- Grundöl 65 bis 95 %
- Verdicker 3 bis 30 %
- Additive 0 bis 10 %

Die Mischbarkeit von Fetten ist nur unter bestimmten Umständen gegeben. So müssen die Fette gleiche Verdicker und ähnliche Grundöle aufweisen.

4.3.2 Grundöl

Fette werden mit den gleichen Grundölen hergestellt wie die Schmieröle. Im überwiegenden Teil handelt es sich um Mineralöl, für anspruchsvolle oder spezielle Anwendungsfälle werden auch synthetische Öle und Pflanzenöle eingesetzt. Das Grundöl spielt eine wesentliche Rolle für die Eigenschaften des Schmierfettes. Es gewährleistet die Schmierung, indem es die betreffenden Bauteile mit einem Film umgibt und so ihren, meist metallischen Kontakt, unterbindet. Dabei steht die Dicke des Ölfilms in direktem Zusammenhang mit der Viskosität des Grundöls. Die Viskosität ihrerseits ist maßgeblich von der Temperatur abhängig. Aus diesem Grund ist das Verhältnis von der Viskosität zur Temperatur des Grundöls ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl des Fettes. Dieses Verhalten wird anhand des Viskositätsindex beschrieben.

Gängige Fette enthalten Grundöle der Viskosität $100 - 220 \frac{mm^2}{s}$ bei $40^\circ C$. Sind eine gute Pumpfähigkeit oder besonders gute Kaltstarteigenschaften gefragt, kommen

4. Grundlagen der Schmierstoffe

dünnflüssigere Grundöle zum Einsatz. Hohe Geschwindigkeiten und gutes Temperaturverhalten verlangen ebenfalls nach niedrig viskosen Grundölen. Bei besonderen Anforderungen wie hoher Belastung und niedriger Geschwindigkeit finden zähflüssigere Grundöle Verwendung. Auch sind bei hoch viskosen Grundölen die Verdampfungsverluste niedriger, die Hafteigenschaften besser und die Eignung für hohe Temperaturen besser. Grundöle besitzen eine Vielzahl von Eigenschaften, die durch das Hinzufügen von Additiven noch verbessert werden können. Die folgenden Anforderungen werden an das Grundöl gestellt:

- gute Schmierungseigenschaften
- gute Oxidationsstabilität
- gute thermische Beständigkeit
- ausreichende Fließeigenschaften
- geringe chemische Reaktivität

4.3.3 Verdicker

Verdicker sind in den meisten Fällen Seifen. Sie bilden ein räumliches, relativ stabiles Netz und stellen die Feststoff- und disperse Phase eines Schmierstoffes dar. Die Konsistenz des Fettes ist maßgeblich von der Konzentration des Verdickers abhängig und steigt mit höherer Konzentration. Weiterhin ist die Konsistenz von der Temperatur abhängig. Sinkende Temperaturen verfestigen das Fett, steigende Temperaturen erweichen es.

Die Verdicker sind im Wesentlichen in drei Hauptgruppen unterteilt:

- Metallseifen
- Komplexseifen
- Seifenfreie Verdicker
 - Organische Verdicker
 - Unorganische Verdicker

4. Grundlagen der Schmierstoffe

Tabelle 4.2 stellt die wichtigsten Verdickertypen dar:

Tabelle 4.2: Verdickertypen für Schmierfette [2]

Einfache Metallseifen	Komplexe Metallseifen	Nichtseifen	
		Organische	Anorganische
Lithiumseifen Kalziumseifen Aluminiumseifen Natriumseifen Bleiseifen Zinkseifen	Lithium- Kalzium- Aluminium- Natrium- Barium- komplexeifen	Harnstoffe Polyamide, Polymide Organische Pigmente (z.B. Phthalocyanin Polyethylen, Polypropy- len	Bentonit Pyrogene Kieselsäure Metallbeize Graphit

Folgende Schmierfetteigenschaften sind maßgeblich von Art und Konzentration des verwendeten Verdickers abhängig:

- Temperaturbeständigkeit
- Drehzahlverhalten
- Lasttragvermögen
- Ölabgabecharakteristik
- Tropfpunkt
- Rheologisches Verhalten
- Wasser- und Säurebeständigkeit
- Mechanisch-dynamische Stabilität

4.3.4 Additive

Additive sind chemische Verbindungen und Zusätze, die die Eigenschaften der angesprochenen Grundöle deutlich verbessern können. Den Ölen können neue Eigenschaften verliehen, bzw. vorhandene Eigenschaften verbessert werden. Mit Hilfe von Additiven können Eigenschaften der Öle erreicht werden, die selbst durch die aufwändigsten Prozesse der Erdölverarbeitung nicht erreicht werden. Eine Kategorisierung der Additive kann auf unterschiedlich Weise stattfinden.

4. Grundlagen der Schmierstoffe

Hinsichtlich ihrer Löslichkeit:

1. Unlösliche Additive wie Graphit, Molybdändisulfid, Talcum oder Glimmer verbessern das Reibungsverhalten metallischer Oberflächen und finden bei Hochdruckanwendungen Verwendung
2. Lösliche Additive wie Antioxidantien, Rost- und Korrosionsinhibitoren

Hinsichtlich ihrer Eigenschaften:

1. Additive, die physikalische Eigenschaften des Grundöls verbessern
2. Additive, die chemische Eigenschaften des Grundöls verbessern
3. Additive die chemische und physikalische Eigenschaften des der reiboberfläche verbessern

Es folgt eine Auflistung wichtiger Schmierstoffadditive:

Tabelle 4.3: *Wichtige Schmierstoffadditive [2]*

Additive	Aufgabe	Wirkstoff	Wirkungsweise
Viskositätsindexverbesserer (VI-Verbesserer)	Verringerung der Viskositätsabnahme mit steigender Temperatur	polymerisierende Olefine und Isoolefine, Polymetjacrylate, Polyalkylstyrole	Streckung von verknäulten Molekülen mit steigender Temperatur
Stockpunktniedriger (Pourpointniedriger)	Verhinderung des Stockens (Nichtfließen bei niedrigen Temperaturen)	Kondensationsprodukte von chloriertem Paraffin und Naphtalin, Polymethacrylate u.a.	Adsorption an den Oberflächen der Paraffinkristalle, Behinderung des Wachstums von Paraffinkristallen
Hochdruckzusätze (EP-Additive), Antiverschleiß-Additive	Verhinderung des Fressens bzw. des adhäsiven Verschleißes bei hohen Belastungen	Organische Schwefel-, Phosphor- und Chlorverbindungen und deren Kombinationen u.a.	Bildung von Reaktionsschichten auf den tribologisch beanspruchten Oberflächen
Reibungsminderer	Verminderung der Gleitreibungszahl	Fettsäuren, Fettsäureester, Fettsäureamide, Fettsäuresalze, u.a.	Bildung von Adsorptions- und Reaktionsschichten auf den tribologisch beanspruchten Oberflächen
Korrosionsinhibitoren	Einschränkung der Korrosion metallischer Werkstoffe	Fettsäuren, Stickstoff-, Phosphor-, Schwefelverbindungen u.a.	Bildung von Schutzschichten, welche den Zutritt von Sauerstoff und Wasser zur Metalloberfläche beeinträchtigen
Oxidationsinhibitoren	Verminderung der Oxidation von Schmierölen	Schwefel- und Phosphorverbindungen, Phenolderivate, Amine u.a.	Unterbrechung des Radikalkettenmechanismus der Oxidation
Detergentien	Verhinderung von Ablagerungen auf Werkstoffoberflächen	metallorganische Verbindungen wie Phenolate, Sulphonate, Phosphate, Naphtenate u.a.	Verhinderung der Koagulation
Dispersants	Verminderung der Kalkschlamm- und Schlamm- und Kalkbildung	Amide, Imide von mehrbasischen organischen Säuren	Pepisation von ö unlöslichen Oxidationsprodukten
Demulgatoren	Trennung von Öl und Wasser	polare, grenzflächenaktive Verbindungen	Erhöhung der Grenzflächenspannung zwischen Öl und Wasser
Emulgatoren	Bildung von Emulsionen (für Kühlschmierstoffe)	Alkalisalze von Carbonsäuren u.a.	Herabsetzung der Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Öl
Schaumverhütungsmittel	Verhinderung der Bildung von Schaum	Siliconpolymere u.a.	Zerstörung von Ölhäutchen, welche die Luftbläschen umgeben

4.3.5 Pasten

Pasten entsprechen vom Aufbau grundsätzlich den Fetten. Allerdings ist der Anteil an Festschmierstoffen deutlich höher. Dadurch wird gewährleistet, dass unter extremen Temperatur- und Druckbedingungen und beim Kontakt mit aggressiven Medien die Funktion des Schmierstoffes erhalten bleibt. Pasten werden häufig eingesetzt bei Schraubverbindungen, beim Einpressen von Bolzen und Stiften, bei Zahnrädern, Spannfuttern, Gelenken und Gleitlagerungen. Ihre primären Aufgaben sind daher Schmierung, Trenn- und Korrosionsschutz.

4.3.6 Schmierfettarten

Wie im vorangegangenen Teil erwähnt, findet eine Einteilung der verschiedenen Schmierfette oft nach der NLGI-Klasse und nach dem Verdicker statt. Im Folgenden wird nun detaillierter auf die Eigenschaften der unterschiedlichen Schmierfette in Hinblick auf deren Verdickern eingegangen. Detailliert werden die Metallseifenfette beschrieben, da sie am weitesten verbreitet sind.

- Metallseifenfette: Hierunter fallen alle Schmierfette, die als Verdicker eine einfache Metallseife, eine komplexe Metallseife oder eine Mischseife aufweisen.
- Nichtseifenfette: Hierunter fallen alle Schmierfette, die als Verdicker beispielsweise modifizierte Tone (Bentonite), Polyharnstoffverbindungen oder Pigmente enthalten.

Hinsichtlich ihrer Verbreitung nehmen die Metallseifenfette den mit Abstand größten Teil aller verwendeten Schmierfette ein. Ihr Gesamtanteil liegt ca. bei 75 Prozent. Unter Ihnen wiederum sind die Lithiumseifen-Schmierfette die verbreitetsten Fette. Ihr Gesamtanteil an allen in Verwendung befindlichen Schmierfetten beläuft sich auf ca. 70 Prozent.

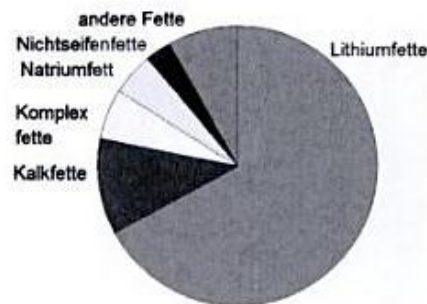


Abbildung 4.2: Anteil unterschiedlicher Fettgruppen in der Anwendung [14]

4.3.6.1 Einfache Seifenfette

4.3.6.1.1 Lithium-Seifenfette

Die Lithiumfette stellen heute den allgemein vorherrschenden Schmierfetttyp überhaupt dar. Sie halten diese dominierende Stellung trotz höherer Rohstoffkosten aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften. Die besondere Stärke der Lithiumfette gegenüber den andern einfachen Metallseifenfetten besteht darin, dass sie neben dem erweiterten Temperatureinsatzbereich auch deutlich bessere mechanisch-dynamische Eigenschaften besitzen (Walkstabilität, Scherstabilität), und eine gute Wasserbeständigkeit aufweisen. Aufgrund dieses breiten Spektrums positiver Gebrauchseigenschaften, sind sie für die meisten normalen Einsatzzwecke gut geeignet, was ihnen verdientermaßen die Bezeichnung Mehrzweckfette eingebracht hat. Es ist auch hervorzuheben, dass die Struktur der Lithiumfette so stabil ist, dass sie kaum durch Additive gestört wird. Somit können weniger stark ausgeprägte Eigenschaften durch fast beliebige Additivkombinationen verstärkt werden. Diese besonderen Eigenschaften weisen allerdings nur die Lithiumfette auf, die mit 12-Hydroxystearinsäure bzw. deren Tryglicerid, dem gehärteten Ricinusöl, hergestellt sind.

4. Grundlagen der Schmierstoffe

4.3.6.1.2 Calcium-Seifenfette

Diese Fette haben die geringsten Herstellungskosten. Sie besitzen gute Tieftemperatureigenschaften und eine sehr gute Wasserbeständigkeit bei hoher mechanischer Beanspruchbarkeit. Nachteilig wirkt sich die geringe Anwendungstemperatur von 60°C - 80°C und der geringe Tropfpunkt von 90°C - 100°C aus. Die Verwendung einer Hydroxystearinsäure kann den Tropfpunkt auf bis zu 120°C erhöhen.

4.3.6.1.3 Natrium-Seifenfette

Natriumfette, auch Natronfette genannt, spielen heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Der Grund dafür ist in der ausgesprochen unzureichenden Wasserbeständigkeit zu finden. Auch bei diesen Fetten kann man die Temperatur- und Scherstabilität durch die Herstellung eines Natrium-12-Hydroxystearatfettes erreichen. Normalerweise liegt ihre Einsatztemperaturbereich bei -30°C bis 120°C . Wegen ihrer langfaserigen Struktur sind diese Fette für den Einsatz in langsam laufenden Zahnradgetrieben und zur Schmierung geschlossener Getriebe gut geeignet. Bei Erwärmung über den Tropfpunkt bilden sie sich nach Abkühlung in ihre Ausgangsstruktur zurück.

4.3.6.1.4 Aluminium-Seifenfette

Fette dieser Gruppe zeichnen sich durch eine hohe Wasserresistenz sowie durch gutes Haftungsvermögen aus. Aufgrund gravierender Nachteile sind sie jedoch heute durch andere Schmierfette verdrängt worden und werden nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Diese Nachteile sind zum einen die geringe Scherstabilität und der geringe Tropfpunkt, zum anderen ein ausgeprägtes thixotropes Verhalten.

4.3.6.1.5 Barium-Seifenfette

Lange Zeit wurden diese Fette großtechnisch hergestellt. Ihre Vorzüge sind die hervorragende Scherstabilität und der hohe Tropfpunkt von ca. 150°C . Auch die Barium-Seifenfette wurden von anderen Fetten verdrängt. Die Gründe dafür sind die hohen Rohstoffpreise und die ökologischen bzw. toxikologischen Bedenken hinsichtlich ihrer Verwendung. Desweiteren hat dieses Fett ein schlechtes Tieftemperaturverhalten.

4. Grundlagen der Schmierstoffe

4.3.6.2 Gemischtbasische-Seifenfette

Hierunter versteht man eine Mischung einfacher Seifenfette. Das heißt Ca-Na, Li-Ca oder Na-Li-Ca-Seifenfette. Durch das Mischen verschiedener Fette werden negative Eigenschaften der einzelnen Bestandteile kompensiert. So weisen beispielsweise Li-Ca-Seifenfette bei geringeren Rohstoffkosten eine bessere Wasserbeständigkeit auf als Lithium-Seifenfette und einen höheren Tropfpunkt als Ca-Seifenfette.

4.3.6.3 Gelfette

Gelfette enthalten spezielle Verdicker wie beispielsweise Silikat (Kieselgelfette). Chemisch gesehen ist SiO_2 eine äußerst reaktionsträge Verbindung und sorgt somit für eine besonders gute Oxidationsbeständigkeit. Weiterhin zeichnet diese Fette eine äußerst hohe Temperaturbeständigkeit aus. Sie haben wegen der hohen Temperaturbeständigkeit ihres Verdickers keinen Tropfpunkt wie die Metallseifenfette. Weiterhin sind sie sehr beständig gegen Wasser, Dampf, Säuren und wässrigen Alkalien. Ihre Einsatzdomänen sind hohe Einsatztemperaturen bis $180^\circ C$ bei den Kieselgelfetten auch bei Anwesenheit von Wasser bzw. Wasserdampf.

4.3.6.4 Komplexseifenfette

4.3.6.4.1 Lithium-Komplexseifenfette

Besonders in der letzten Zeit haben die Lithiumkomplexseifenfette stark an Bedeutung gewonnen und werden vorzugsweise in der Wälzlagerschmierung eingesetzt. Durch die Verwendung synthetischer Esteröle und entsprechender Additive bei der Herstellung, können Lithiumkomplexseifenfette auch als Mehrbereichsfette eingesetzt werden. Die Herstellung von Lithiumkomplexseifenfette ist relativ aufwendig und schwierig.

4.3.6.4.2 Calcium-Komplexseifenfette

Sie waren die ersten Komplexseifenfette die ihren Einsatz als Schmierfett gefunden haben. Sie weisen einerseits einen sehr hohen Tropfpunkt von über $250^\circ C$ auf und andererseits

4. Grundlagen der Schmierstoffe

eine sehr gute Scherstabilität und Wasserbeständigkeit. Diese guten Eigenschaften prädestinieren diese Fette für die Wälzlagerschmierung.

4.3.6.4.3 Natrium-Komplexseifenfette

Auch den Natriumkomplexseifenfetten ist die geringe Wasserbeständigkeit der einfachen Natriumfette zu eigen. Häufig besitzen sie einen hohen Seifengehalt und weisen einen hohen Tropfpunkt auf. Aus diesen Gründen finden sie häufig Einsatz als Radlagerfette.

4.3.6.4.4 Aluminium-Komplexseifenfette

Aluminiumkomplexseifenfette zeichnen sich gegenüber Lithiumfetten und Kalkkomplexfetten dadurch vorteilhaft aus, dass sie bei Einwirkung höherer Temperaturen nicht verhärten. Sie werden stattdessen weich bis flüssig und nehmen bei anschließendem Erkalten wieder die ursprüngliche Struktur und Konsistenz an. Aluminiumkomplexseifenfette sind Mehrzweckfette mit erweitertem Temperatureinsatzbereich und werden vorzugsweisen in Wälz- und Gleitlagern verwendet.

Tabelle 4.4: *Fette und ihre Eigenschaften [14]*

	Tropfpunkt [°C]	Kälte- verhalten	Einsatz- temperatur [°C]	Wasser- beständigkeit	Wälzlager- anwendung	Gleitlager- anwendung
Calciumfett	80-100	gut	von -35 bis 50 (60)	sehr beständig	nur bedingt	bedingt
Natriumfett	130-200	mäßig	von -30 bis 120	unbeständig	gut	gut
Lithiumfett	170-220	gut	von -40 bis 130 (140)	beständig	sehr gut	gut
Aluminiumfett	ca. 120	gut	von -35 bis 100	quelle	sehr gut	gut
Li/Pb-Fett	ca. 90	schlecht	von 0 bis 75	(beständig)	gut	gut
Ca/Pb-Fett	ca. 90	schlecht	von 0 bis 75	(beständig)	gut	gut
Ca-Komplexfett	> 240	mäßig	bis 120 (130)	sehr beständig		
Al-Komplexfett	> 230		bis 160 (185)	sehr beständig		
Kieselgelfett	-		bis 130 (150)			
Betonitfett	-		bis 150 (160)	beständig		
Silikonfett	-	gut	bis 320	beständig		
Esterfett	-	sehr gut	von -70 bis 150 (180)			

4.3.7 Herstellung von Schmierfetten

Bei der Herstellung von Schmierfetten wird folgende primäre Aufgabe verfolgt. Ein Grundöl wird durch die Einarbeitung eines geeigneten Verdickers, aus dem flüssigen Zustand in den halbflüssigen bis halbfesten Zustand überführt. Diese Eindickung erfolgt durch Errichtung einer dreidimensionalen Matrix im Grundöl mit der Eigenschaft, die Grundölmoleküle zu fixieren. Der Herstellungsprozess von Metallseifenfetten besteht im Wesentlichen aus einer chemischen Reaktion und einer chemisch-physikalischen Strukturausbildung. Somit ist die Schmierfetherstellung nicht nur eine Frage des ausgewählten Verdickertyps und der Rezeptur im Allgemeinen, sondern ist auch von diversen verfahrenstechnischen Parametern abhängig. Diese Parameter beeinflussen wesentlich die Schmierfett Feinstruktur. Dazu zählen z. B.: Druck, Temperaturführung, Rührgeschwindigkeit u. a.

4.3.7.1 Diskontinuierliche Herstellung

Die Produktion von Einzelchargen, auch Kesselverfahren oder Batchverfahren genannt, ist immer noch die am weitesten verbreitete Methode der Schmierfetherstellung. Anlagen dieser Art bestehen aus nacheinander geschalteten Einzelaggregaten die durch Pumpen und Rohrleitungen miteinander verbunden sind. Die Chargengröße wird in erster Linie von der Größe des verwendeten Kessels limitiert und variiert in der Regel zwischen 3 t und 10 t. Nachteile dieser an sich einfachen Anlagen- und Herstellungsart sind u. a. die lange Herstellungszeit, der hohe spezifische Energieverbrauch und die prozessbedingten Abweichungen zwischen verschiedenen Chargen.

4.3.7.2 Kontinuierliche Herstellung

Die vollkontinuierliche Herstellung von Schmierfetten ist gekennzeichnet durch einen nichtunterbrochenen Materialfluss von der Eingabe aller Komponenten bis zum Austritt des fertigen Schmierfettes, wobei letzteres keiner weiteren Nachbearbeitung bedarf. Dieses Verfahren hat sich für die Produktion größerer Schmierfettmengen durchgesetzt und besteht im Wesentlichen aus einer Reaktor-, Entwässerungs- und Endstufe. Die Schmierfette werden mit Seifen als Eindicker zubereitet und bei verhältnismäßig hoher Temperatur

4. Grundlagen der Schmierstoffe

die Fettsäure im Grundöl gelöst. Anschließend wird das entsprechende Metallhydroxid zugegeben. Nach dem Verkochen lässt man das Fett in einer fest bestimmten Zeit abkühlen.

5 Versuchsaufbau und -durchführung

5.1 Aufbau des Versuchsstandes

Um die Eigenschaften der unterschiedlichen Schmierfette zu untersuchen, wurde als Versuchsstand ein Kugel-Scheibe-Tribometer des Tribologie-Labors der HAW-Hamburg verwendet.

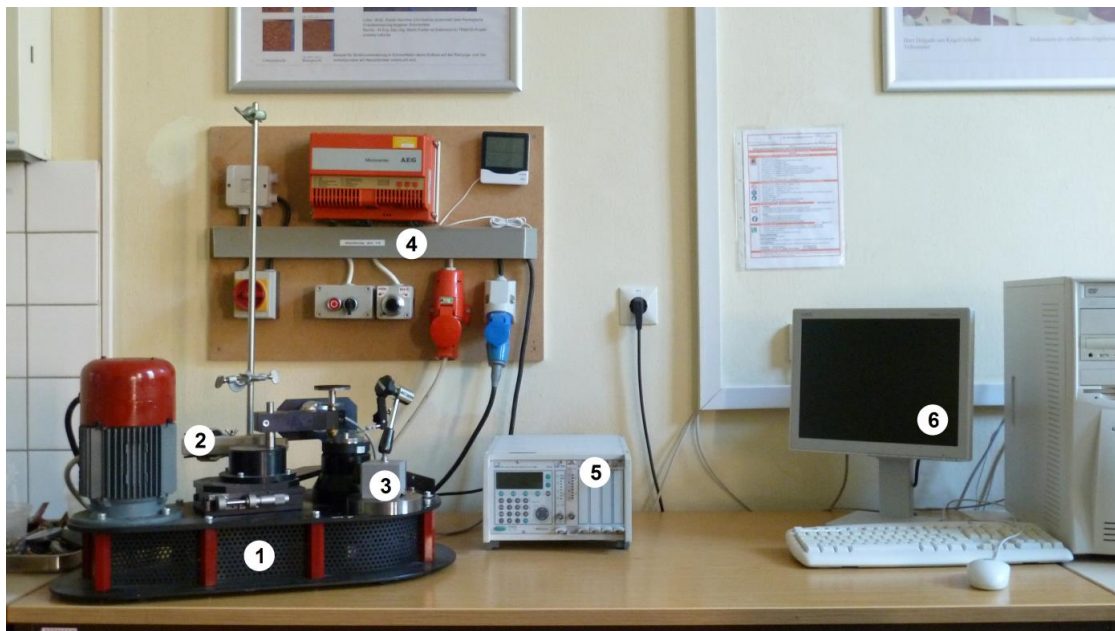


Abbildung 5.1: *Aufbau des Versuchsstandes*

- | | | |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| 1. Kugel-Scheibe-Tribometer | 2. Drehzahlmesser | 3. Fettabstreifer |
| 4. Motorsteuerung | 5. Messverstärker | 6. Computer |
- [eigene Darstellung]

5. Versuchsaufbau und -durchführung

Funktionsweise

Das Kugel-Scheibe-Tribometer besteht aus einem massiven Aluminiumrahmen an dessen Ende ein kräftiger Elektromotor befestigt ist. Dieser treibt über einen Zahnriemen einen horizontal drehend gelagerten Teller an, der als Aufnahme für die scheibenförmigen Metallproben dient. Ein Innengewinde im Zentrum des Drehtellers erlaubt die Fixierung der Probe mittels einer Schraube. Neben diesem Drehteller ist ein Schwenkarm auf einem verschiebbaren Schlitten verschraubt. Dieser Schwenkarm hat an seinem Ende eine Aufnahmevorrichtung für eine Kugellagerkugel. Diese Aufnahme ist gleitend im Schwenkarm eingehängt und kann von oben mit einem Gewicht belastet werden. Der Schwenkarm ist genauso platziert, dass die Kugellagerkugel auf die drehende, scheibenförmige Metallprobe gesetzt werden kann. Durch die Rotation der Scheibe und die von oben belastete Stahlkugel entsteht eine Reibkraft F_R die die Stahlkugel samt dem Schwenkarm gegen einen Kraftsensor drückt. Dieser Sensor ist an einem massiven Metallträger befestigt und begrenzt das Ausschwenken der Kugelhalterung. Der Kraftsensor gibt bei Einwirken der resultierenden Reibkraft F_R eine Spannung aus. Diese Spannung verläuft linear zur einwirkenden Kraft. Mit Hilfe eines Messverstärkers, der an einem PC angeschlossen ist, und einem speziellen Computerprogramm (LabVIEW) werden die Werte für die Reibungszahl $\mu = \frac{F_R}{F_N}$ in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet. Um die Versuchsbedingungen variieren oder vergleichbar machen zu können gibt es verschiedene Justierungsmöglichkeiten an dem Versuchsstand. Der auf dem verfahrbaren Schlitten befestigte Schwenkarm kann mit Hilfe einer Mikrometerschraube verschoben werden. Dadurch kann die Oberprobe in verschiedenen Radien die Metallscheibe überlaufen und erlaubt somit mehrere Versuchsdurchläufe auf einer Unterprobe. Eine elektronische Motorsteuerung gewährleistet das stufenlose Justieren der Scheibendrehzahl. Sie kann unter anderem dazu eingesetzt werden konstante Bahngeschwindigkeiten auf verschiedenen Radien zu gewährleisten. Um die genaue Umdrehungsgeschwindigkeit der Metallprobe ermitteln zu können steht ein Drehzahlmesser zur Verfügung. Während des Versuchs ist eine konstante Versorgung der Reibstelle mit dem Schmiermittel erforderlich. Zu diesem Zweck gibt es eine Vorrichtung, die durch eine flexible, geschlitzte Gummilippe die Schmierstoffzuführung optimiert.



Abbildung 5.2: Abstreifer zur optimalen Schmierfettversorgung [eigene Darstellung]

5.2 Verwendete Schmierfette

Untersucht wurden zwölf unterschiedliche Modellfette, die sich einerseits durch Verdickertypen, sowie deren Anteile unterscheiden, als auch durch das Basisöl. Hierbei wird zwischen synthetisch und teilsynthetisch unterschieden. Teilsynthetisch heißt, dass neben der Basisflüssigkeit den Polyalphaolefinen (PAO) für Schmiermittel noch ein Mineralölanteil einhalten ist. Bei den verwendeten Modellfetten handelt es sich um:

- Lithiumfette, teilsynthetisch
- Lithiumfette vollsynthetisch
- PU-Fette vollsynthetisch
- Gelfette teilsynthetisch

Die untersuchten Schmierfette haben jeweils die NLGI-Klassen 0-2. Tabelle 5.1 zeigt die Übersicht der untersuchten Schmierstoffe inklusive deren Verdickertypen, -anteile etc.

5. Versuchsaufbau und -durchführung

Tabelle 5.1: Übersicht der untersuchten Schmierstoffe vgl. [16]

Bezeichnung		Verdicker		Basisöl			Konsistenz		Schmierfettart
Probe	Firma Fuchs Europe	Typ	Anteil	Typ	v40	PP	Pw60	NLGI	
[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	$\frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$	[°C]	[0,1mm]	[-]	[-]
VP-740-CR-04	LiPAOMIN-0	Li-12-hydroxystearat	4,5	PAO Min. Öl	100	-24	363	0	Lithiumfett teilsynthetisch
VP-740-CR-05	LiPAOMIN-1		6,5	PAO Min. Öl		-24	331	1	Lithiumfett teilsynthetisch
VP-740-CR-06	LiPAOMIN-2		9,5	PAO Min. Öl		-24	283	2	Lithiumfett teilsynthetisch
VP-740-CR-07	LiPAO-0		7	PAO		-60	363	0	Lithiumfett vollsynthetisch
VP-740-CR-08	LiPAO-1		9,8	PAO		-60	332	1	Lithiumfett vollsynthetisch
VP-740-CR-09	LiPAO-2		12,9	PAO		-60	284	2	Lithiumfett vollsynthetisch
VP-759-CR-16	DUPAO-0	Diharnstoff (MDI/C18-Amin)	8,1	PAO		-60	362	0	PU Fett vollsynthetisch
VP-759-CR-17	DUPAO-1		8,9	PAO		-60	340	1	PU Fett vollsynthetisch
VP-759-CR-18	DUPAO-2		12,9	PAO		-60	275	2	PU Fett vollsynthetisch
VP-750-CR-01	SiO ₂ PAOMIN-0	Hochdisperse Kieselsäure	6,3	PAO Min. Öl		-24	368	0	Gelfett teilsynthetisch
VP-750-CR-02	SiO ₂ PAOMIN-1		7	PAO Min. Öl		-24	338	1	Gelfett teilsynthetisch
VP-750-CR-03	SiO ₂ PAOMIN-2		8,6	PAO Min. Öl		-24	290	2	Gelfett teilsynthetisch

5.3 Versuchvorbereitung

Zur Versuchsdurchführung standen 7 Scheiben zur Verfügung. Entgegen der Vorgabe unterschieden sich diese einerseits optisch voneinander, auch aufgrund dessen ermittelten Reibungs- und Verschleißwerte wiesen deutliche Unterschiede auf. Daher war es wahrscheinlich, dass es sich bei den zur Verfügung stehenden Scheiben um unterschiedliche Werkstoffe handelt. Leider lagen keine Werkstoffdaten zu den einzelnen Proben vor. Es war lediglich bekannt, dass nur die Werkstoffe C45 und S235JR+AR für den Unterprobenyp in Frage kamen. Um die Verschleiß- und Reibungsuntersuchen korrekt auswerten zu können, wurde der Werkstoff der Stahlscheiben über die Vickers-Härteprüfung ermittelt. Da C45 der härte Werkstoff ist, ist eine Unterscheidung mittels Härtemessung möglich.

5.4 Härteprüfung nach Vickers

5.4.1 Theoretische Grundlagen

Bei der Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507-1) ist der Eindringkörper eine vierseitige Pyramide aus Diamant (Spitzenwinkel 136°). Diese wird über eine bestimmte Dauer (Eindringdauer) in den zu untersuchenden Werkstoff eingedrückt. Die Vickershärte wird so über den Mittelwert der dabei entstehenden Diagonalen des Pyramidenabdrucks gemessen und lässt sich wie folgt berechnen:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F_N^2}{d} \quad (5.1)$$

wobei

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5.2)$$

Tabelle 5.2: Prüfbedingungen und Prüfkräfte für die Härteprüfung nach Vickers

Prüfbedingung	HV 100	HV 50	HV 30	HV 20	HV 10	HV 5
Prüfkraft F in N	980,7	490,3	294,2	196,1	98,07	49,03
Prüfbedingung	HV 3	HV 2	HV 1	HV 0,5	HV 0,3	HV 0,2
Prüfkraft F in N	29,42	19,61	9,807	4,903	2,942	1,961

Die Härteangabe wird wie in Abbildung 5.3 angegeben:

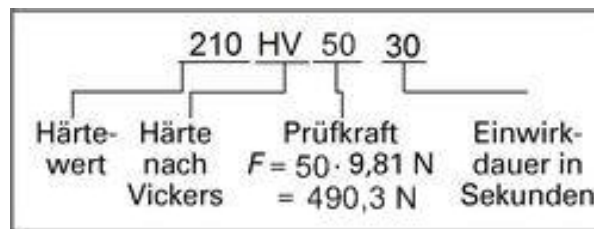


Abbildung 5.3: Beispiel einer Härteangabe nach Vickers [18]

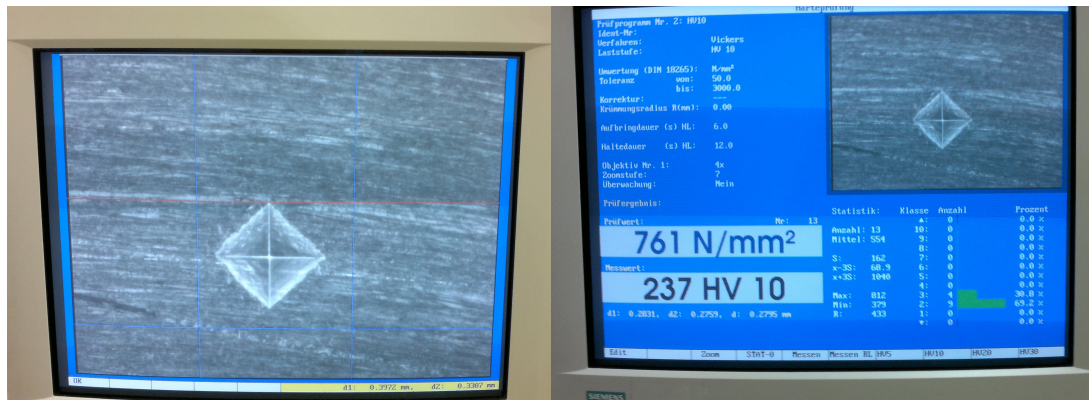
5. Versuchsaufbau und -durchführung

5.4.2 Durchführung und Auswertung der Härteprüfung

Die Prüfungen wurden im Institut für Werkstoffkunde (IWS) durchgeführt. Bei jeder Probe wurde die Härte einmalig gemessen. Da die Härtemessung primär dazu diente den Werkstoff zu ermitteln, waren mehrere Versuche nicht notwendig. Die Versuche wurden am Härtemessgerät KB 250 BRV der Firma KB Prüftechnik nach HV 10 durchgeführt. Zu Beginn wurden jeweils die einzelnen Werkstücke auf den Prüftisch gelegt, danach wurde die Höhe des Prüftisches so eingestellt, dass über das eingebaute Mikroskop mit Kamera ein scharfes Bild erkennbar war. Im Folgenden wurde der Versuch gestartet, der Prüfkörper bewegt sich dabei in Richtung der Scheibe, berührt diese und baut langsam die Prüfkraft auf, bis das eingegebene Maximum erreicht ist. Aus den Längen der Diagonalen, die direkt am Bildschirm über Messlinien messbar sind, wird die Härte nach Vickers ermittelt.

$$d = \frac{0,2831\text{mm} + 0,2759\text{mm}}{2} = 0,2795\text{mm}$$

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{98,7\text{N}}{(0,2795\text{mm})^2} = 237\text{HV}$$



(a) Messen der Diagonalen

(b) Vollendete Härtemessung

Abbildung 5.4: Härtemessung im IWS [eigene Darstellung]

5. Versuchsaufbau und -durchführung

Die Ergebnisse der Härtemessungen haben die Vermutung, dass es sich um zwei unterschiedliche Werkstoffe handelt bestätigt. Es liegen eindeutige Unterschiede bezüglich der Härte vor (siehe Tabelle B.6). Diese geben jedoch keinen Aufschluss darüber, ob es sich tatsächlich um die Werkstoffe C45 und S235JR+AR handelt. Obwohl es sich bei diesem Unterprobenotyp ausschließlich um diese beiden Werkstoffe handeln soll, wurden in der Vergangenheit Versuche mit einem anderen Werkstoff durchgeführt. Hierbei handelt es sich um den Werkstoff 9SMn28, einem Automatenstahl. Um sicher zu stellen, um welche Werkstoffe es sich handelt, musste eine Spektralanalyse durchgeführt werden. So konnten die Werkstoffe anhand der Zusammensetzung bestimmt werden. Die Analyse ergab, dass es sich um die Werkstoffe C45 und 9SMn28 handelt, also nicht um S235JR+AR. Der Kohlenstoffgehalt von 9SMn28 lag dabei etwas höher als erwartet. Der für den Automatenstahl typische Schwefelgehalt stimmte mit den erwarteten Werten überein (siehe Tabelle B.1 und B.5)

5.5 Versuchsplanung

Die zu untersuchenden zwölf Modellfette sollten in Abhängigkeit von jeweils drei unterschiedlichen Normalkräften (10, 20 und 30 N) auf Reibungs- und Verschleißigenschaften untersucht werden. Um miteinander vergleichbare Ergebnisse zu erzielen galten für alle Versuche die gleichen Versuchsparameter, d. h. Geschwindigkeit und Versuchsdauer inkl. Versuchsdurchläufe etc. waren für alle Versuche konstant. Da die Geschwindigkeit über die Drehzahl gesteuert wurde, wurden die Drehzahlen ausgehend von einer Basisdrehzahl jeweils berechnet, sodass auf jedem Radius die gleiche Bahngeschwindigkeit herrschte. Für die Versuche standen sieben Versuchsscheiben zur Verfügung, daher wurden sowohl Vorder- als auch Rückseite genutzt. Dabei wurde für jeweils eine Seite der gleiche Schmierstoff verwendet und mit jeweils 10, 20 und 30 N belastet. Ein gesamter Versuchsdurchlauf pro Schmierfett und Normalkraft bestand aus fünf Einzelversuchen. Diese fanden pro Schmierfett und Normalkraft auf demselben Radius statt, d. h. die Folgeversuche liefen jeweils auf der Spur des vorherigen Versuches. Um Unregelmäßigkeiten zu Beginn der Versuche auszuschließen bzw. zu vermindern, gab es jeweils vor dem ersten Versuch eine Einlaufphase. Auf diese Weise begann die Messung erst, wenn schon eine Verschleißspur entstanden war. Die gesamten Versuche waren so besser untereinander vergleichbar und wurden nicht durch den jeweils ersten Versuch verfälscht. Damit

5. Versuchsaufbau und -durchführung

ein gleichmäßiger Schmierfilm erzeugt wird, wurde das Schmierfett mittels Abstreifer im Bereich des zu untersuchenden Radiuses positioniert. Folgende Parameter werden über die gesamte Versuchsreihe konstant gehalten:

- Geschwindigkeit mit $v = 253 \frac{mm}{s}$
- Versuchsdauer von 5 Minuten
- Wälzlagerkugelradius von $12,7 mm$
- Scheibendurchmesser von $54 mm$
- Wälzlagerkugelwerkstoff 100Cr6
- Temperatur $\pm 24^\circ C$

Auf Grund der unterschiedlichen Unterprobenwerkstoffe wurden die Lithiumfette auf C45-, die Gel- und PU-Fette auf 9SMn28-Scheiben durchgeführt.

5.6 Versuchsdurchführung

Um Umrechnungsfehler zu vermeiden wurde zu Beginn jedes Versuchstages der Umrechnungsfaktor von Reibungskraft $F_R [N]$ in Spannung $[V]$ neu ermittelt. Zu diesem Zweck wurde der Schwenkarm jeweils mit Kräften von 2, 4, 6, 8, 10 N belastet und der jeweilige Umrechnungsfaktor (Proportionalitätsfaktor) durch die dadurch erzeugte Spannung ermittelt. Aus diesen 5 Faktoren wurde dann der Mittelwert berechnet, der als tatsächlicher Umrechnungsfaktor genutzt wurde. Die Kräfte wurden mittels Federwaage jeweils senkrecht zum Schwenkarm erzeugt und gemessen. Die jeweilige Spannung wurde dann abgelesen. Danach wurden, nach Notierung der Temperatur, die Versuche gestartet. Die Unterprobe (Versuchsscheibe) wurde auf dem horizontal drehend gelagerten Teller montiert. Die jeweilige Drehzahl wurde mittels Drehzahlmessgerät eingestellt. Im Folgenden begann der eigentliche Versuch: Während der Rotation wurde das jeweilige Schmierfett auf die Unterprobe aufgetragen und mittels Abstreifer auf dem zu untersuchenden Radius positioniert. Die Unterprobe wurde mit der jeweilig vertikal wirkenden Kraft belastet. Jeweils beim ersten Versuch je Spur (Radius) wurde eine einminütige Einlaufphase durchgeführt. Nach Abschluss der Einlaufphase wurde der Reibungsfaktor in abhängig

5. Versuchsaufbau und -durchführung

der Zeit erfasst. Die Erfassung dieser Verläufe geschah mittels LabVIEW. Dazu war es nötig einerseits die Aufzeichnung als auch die Erfassung separat zu starten. Nach jedem Einzelversuch wurden Unter- und Oberscheibe mit Ethanol gereinigt und die Wälzagerkugel gedreht. Die folgenden Einzelversuche wurden auf die gleiche Weise durchgeführt. Um Ausreißer zu vermeiden bzw. zu minimieren wurde die Messung jeweils nach Aufsetzen der Kugel gestartet. Nach Durchführung der Versuche wurden die entstandenen Verschleißspurbreiten gemessen. Diese Messungen wurden mit einem Auflichtmikroskop durchgeführt. Durch geeignete Filtereinstellungen konnte man die Sichtbarkeit der Verschleißspuren noch verstärken und so genauere Ergebnisse erzielen.

6 Versuchsauswertung

Ziele der Versuchsreihe

Die Versuche wurden durchgeführt um Erkenntnisse über die Eigenschaften der verschiedenen Schmierstoffe zu erlangen. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei auf den Einfluss der unterschiedlichen Verdicker gelegt werden. Die Ermittelten Werte für die Reibungszahlen und die Verschleißspurbreite dienten als Anhaltspunkte um die spezifischen Eigenschaften der unterschiedlichen Schmierstoffe zu beschreiben.

Probleme bei der Durchführung der Versuche

Leider gab es im Verlauf der Versuchsreihe einige Komplikationen, aufgrund derer die ursprüngliche Planung der Versuchsauswertung umstrukturiert werden musste. Während der Messungen ergaben sich starke Abweichungen selbst bei ähnlichen Schmierfetten. Der Verdacht, die bereitgestellten Metallproben könnten aus unterschiedlichen Metallen bestehen, bestätigte sich nach einer Härteprüfung mit der Vickers-Methode, sowie durch eine Spektralanalyse. Dieser Umstand erschwerte die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Schmierfette erheblich, da das Testsystem um eine weitere Variable erweitert wurde:

- Grundöl Schmierstoff
- Verdicker Schmierstoff
- Konzentration Verdicker (NLGI-Klasse)
- Material Unterprobe

6. Versuchsauswertung

Um einen direkten Vergleich zwischen zwei Schmierfetten bezüglich seines Verdickers ziehen zu können, müssen sowohl Unterprobenmaterial als auch das Grundöl konstant sein. Allgemein darf bei einem Vergleich nur eine Variable differieren, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Diese Rahmenbedingungen waren leider nur für den Vergleich von zwei Grundölen gegeben, der Einfluss der verschiedenen Verdicker konnte nicht ermittelt werden. Auf folgende Aspekte der Versuchsreihe wurden folgende Abhängigkeiten in den Fokus gesetzt:

- Einfluss der Verdickerkonzentration auf Reibung und Verschleiß
- Verhalten der Reibungszahl in Abhängigkeit von der Zeit
- Standardabweichung der Reibzahl in Abhängigkeit von des Versuchsdurchlaufs
- Qualitative Einordnung der unterschiedlichen Schmierstoffe
- Reibung (quantitativ) und Verschleiß (qualitativ) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Unterproben bei identischem Schmierstoff

6.1 Versuche mit C45-Unterprobe

Diese Versuchsreihe lässt als einzige einen direkten Vergleich zwischen zwei Grundbestandteilen der verwendeten Schmierstoffe zu. Da die Messungen auf identischer Unterprobe und mit identischen Verdickern stattgefunden haben, kann man einen direkten Vergleich zwischen den beiden Grundölen ziehen. Es handelt sich hierbei um teilsynthetische Polyalphaolefine und vollsynthetische Polyalphaolefine. In allen folgenden Versuchen weichen mindestens zwei Elemente voneinander ab, sodass sich auf eine detaillierte Beschreibung der Messergebnisse und auf eine qualitative Einteilung beschränkt werden muss. Ein direkter Vergleich ist immer nur dann möglich, wenn maximal ein Faktor des Testsystems abweicht.

6. Versuchsauswertung

6.1.1 Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 10 N

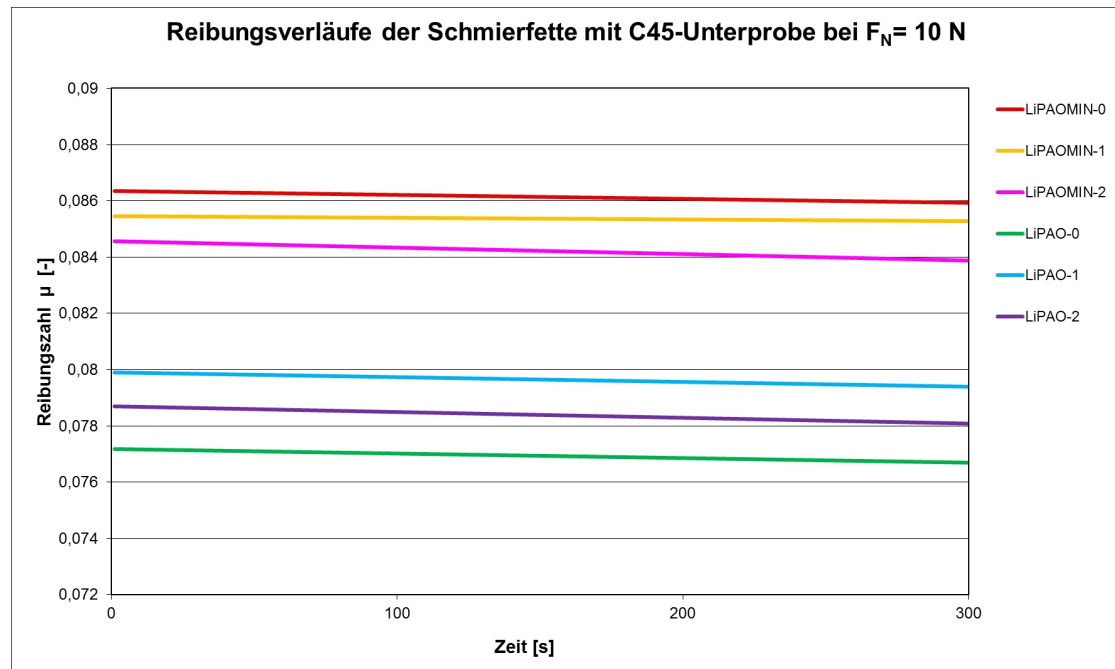


Abbildung 6.1: Lineare Trendline der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 10 \text{ N}$
[eigene Darstellung]

In Abbildung 6.1 erkennt man deutlich, dass das synthetische Grundöl bessere Schmierreigenschaften besitzt und dadurch zu einer geringeren Reibungszahl führt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Reibungszahl tendenziell mit steigendem Verdickeranteil fällt. Bis auf eine Ausnahme zeigt sich dieses Bild hier deutlich. Eine entsprechende mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist in 6.4 Seite 88 nachzulesen. Eine weitere Erkenntnis aus dieser Versuchsreihe, ist das Abnehmen der Reibungszahl über die Zeit. Dieses Ergebnis zeigt sich bei allen hier untersuchten Material-Schmierstoff-Paarungen. Begründen lässt sich dieses Verhalten durch ein Einlaufen der Verschleißspur. Hierbei werden die größeren Unebenheiten mit der Zeit angetragen und geglättet. Die hierbei zu erwartende, abnehmende Standardabweichung bestätigte sich ebenfalls im überwiegenden Teil der Versuche.

6. Versuchsauswertung

6.1.2 Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 10 N

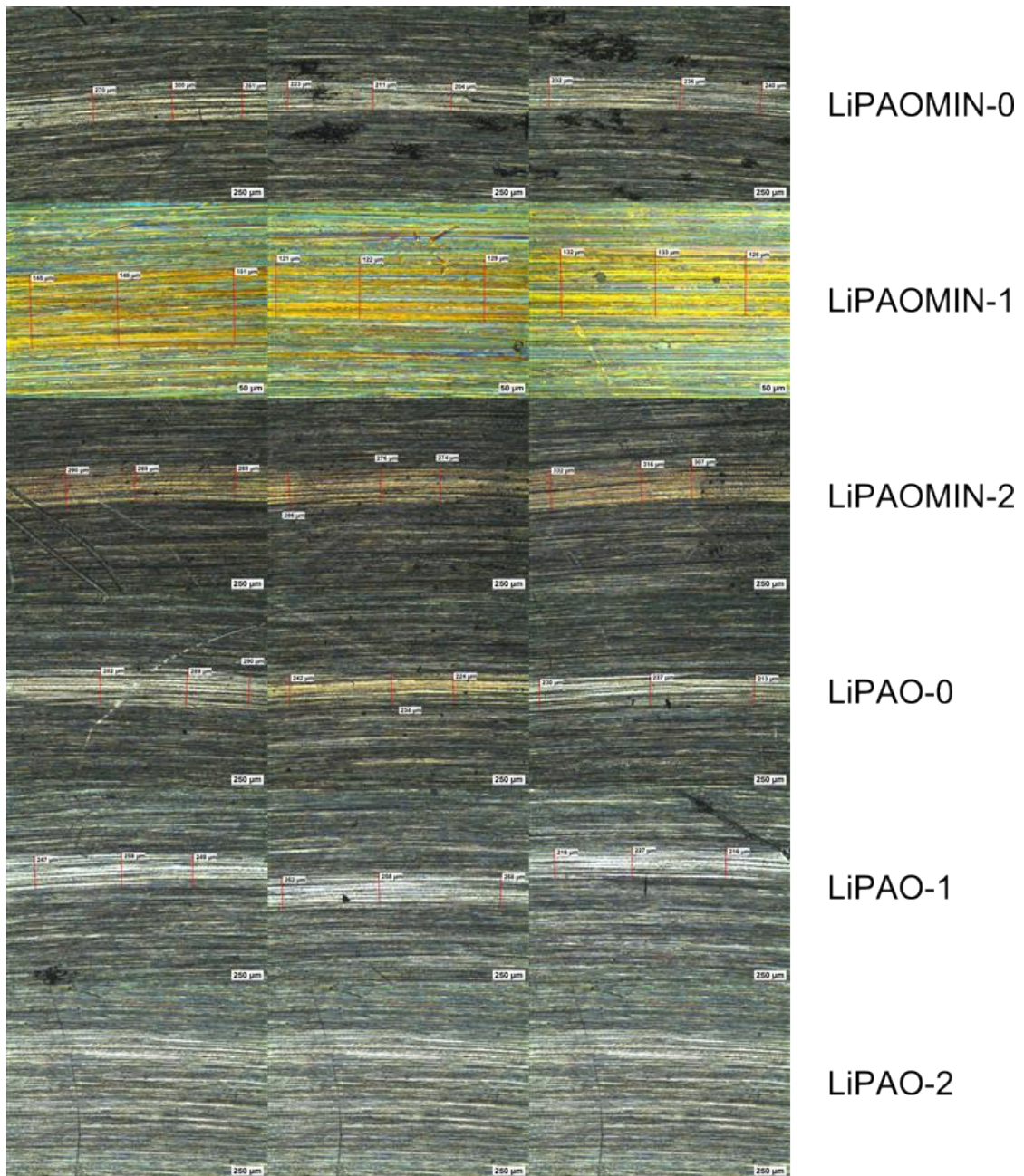


Abbildung 6.2: Verschleißspuren der C45-Unterprobe bei $F_N = 10\text{ N}$ [eigene Darstellung]

6. Versuchsauswertung

Die Ergebnisse der Verschleißspurbreitenmessung mit einer Gewichtskraft von 10 N lieferte keine Ergebnisse, die einen Rückschluss über die Eigenschaften der unterschiedlichen Fette zulassen. Die Probe des LiPAO-2 wies nur sehr schlecht auswertbare Spuren auf. Erschwerend kam die ungünstige Schleifrichtung der Unterprobe hinzu, so dass keine aussagekräftige Messung vorgenommen werden konnte. Festzustellen ist eine starke Abweichung der Verschleißspurbreite bei Verwendung des teilsynthetischen LiPAOMIN-1. Bemerkenswerter Weise ist hier die Verschleißspurbreite um ca. den Faktor zwei kleiner als die Proben des gleichen Fettes mit unterschiedlichen Verdickerkonzentrationen. Ein Zusammenhang mit der Verdickerkonzentration kann aber ausgeschlossen werden, da es sich bei dem LiPAOMIN-1 um das Fett mit der mittleren NLGI-Klasse handelt. Allgemein kann erwähnt folgendes werden: Die erwartete geringere Verschleißspurbreite bei der Verwendung des vollsynthetischen Grundöls wird in diesem Versuch nicht bestätigt. Die ermittelten geringeren Reibzahlen haben dieses erwarten lassen.

Tabelle 6.1: Verschleißspurbreiten der Verschleißuntersuchungen auf C45-Unterprobe bei $F_N = 10\text{ N}$ [eigene Darstellung]

	Vergleich Gewichtskräfte 10N					
Fett	LiPAOMIN-0	LiPAOMIN-1	LiPAOMIN-2	LiPAO-0	LiPAO-1	LiPAO-2
NLGI Klasse	0	1	2	0	1	2
Verschleißspurbreite [μm]	244	134	275	249	257	n.m.

6. Versuchsauswertung

6.1.3 Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 20 N

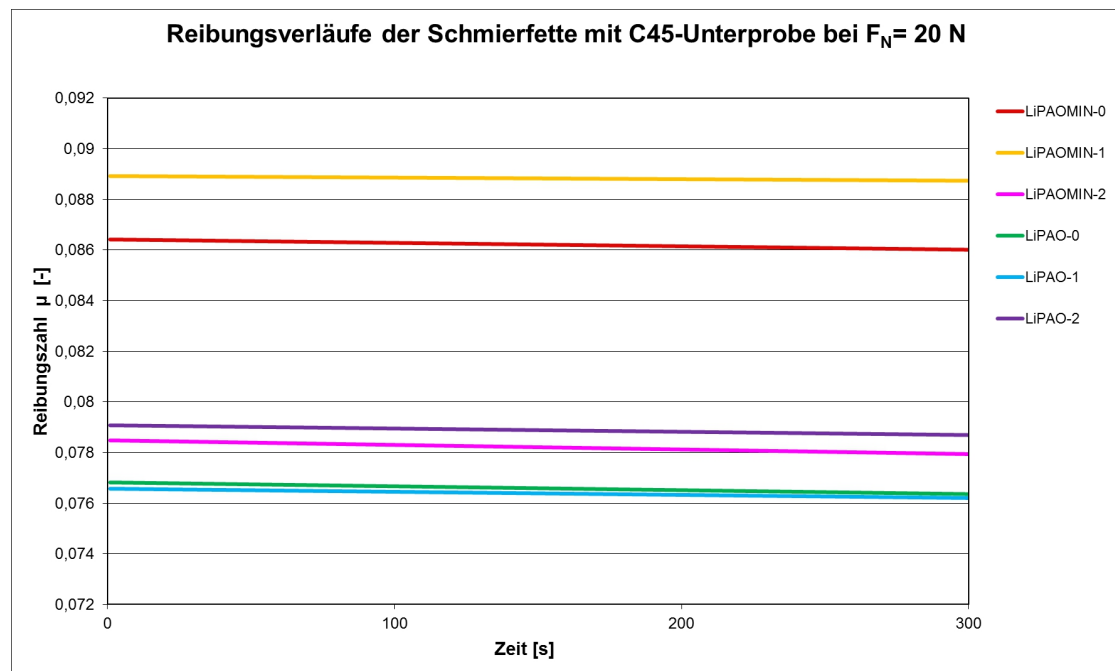


Abbildung 6.3: Lineare Trendline der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 20\text{ N}$ [eigene Darstellung]

Die Messungen mit einer Gewichtskraft von 20 N bestätigen die anfänglichen Beobachtungen bezüglich der besseren Schmiereigenschaften des vollsynthetischen Polyalphaolefine. Einzig das teilsynthetische Polyalphaolefinefett mit der NLGI-Klasse 2 weicht deutlich stärker ab als in der Versuchsreihe mit 10 N . Die Reibungszahl fällt niedriger als erwartet aus. Die im Versuch mit 10 N ermittelten Zusammenhänge zwischen einer hohen Verdickerkonzentration und dadurch sinkenden Reibungszahlen können hier nicht vollständig bestätigt werden. Bei den vollsynthetischen Polyalphaolefinen zeigt sich eher eine gegenteilige Tendenz. Die teilsynthetischen Polyalphaolefine verhalten sich in dieser Hinsicht eher wie erwartet. Eine mögliche Erklärung für steigende Reibungszahlen bei zunehmender Verdickerkonzentration ist ebenfalls in Abschnitt 6.4 Seite 88 nachzulesen. Ein schlüssigeres Bild zeigt sich bei der Auswertung der Standardabweichung. Sie nimmt sowohl mit steigender Gewichtskraft als auch mit Länge der Versuchszeit ab. Das Einlaufen der Verschleißspur, und damit das Abtragen der Rauheitshügel, werden durch die zunehmende Gewichtskraft begünstigt und beschleunigt.

6. Versuchsauswertung

6.1.4 Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 20 N

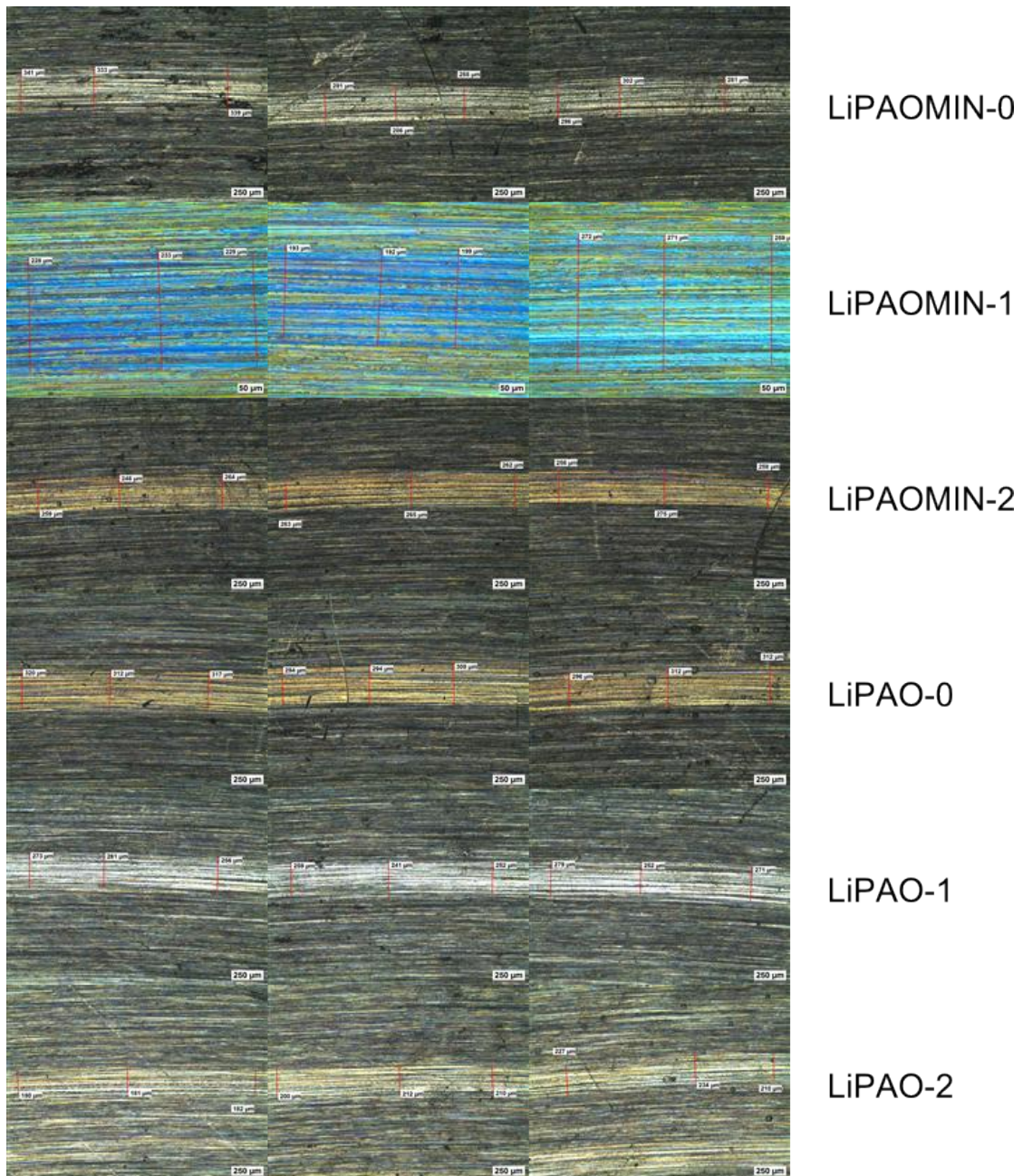


Abbildung 6.4: Verschleißspuren der C45-Unterprobe bei $F_N = 20\text{ N}$ [eigene Darstellung]

6. Versuchsauswertung

Bei den Messergebnissen mit einer Gewichtskraft von 20 N fällt wie bei den Versuchen mit 10 N folgendes auf: Die gemessenen Verschleißspurbreiten unterscheiden sich nur unwesentlich zwischen den Fetten mit teilsynthetischem Grundöl und denen mit vollsynthetischem Grundöl. Einzig das Fett LiPAO-2 bildet hier eine Ausnahme und weicht deutlich von der erwarteten Richtung nach unten ab. Die Reibwertversuche haben ein relativ klares Bild gezeigt. Das vollsynthetische Grundöl hat stets zu einer geringeren Reibung geführt als das teilsynthetische. Die deshalb erwarteten schmaleren Verschleißspurbreiten trafen auch bei diesem Versuch nicht ein. Die abfallende Verschleißspurbreite mit steigender Verdickerkonzentration bei dem vollsynthetischen Grundöl zeigt sich wiederum deutlich. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt wird in Abschnitt 6.4 Seite 88 gegeben. An dieser Stelle muss noch einmal erwähnt werden, dass die Verschleißspurbreite ein nur sehr ungenaues Indiz für den tatsächlichen Verschleiß ist. Es kann keinerlei Aussage darüber getroffen werden wie hoch das tatsächliche Verschleißvolumen ist. Die ermittelten Werte sind also kritisch zu betrachten, wenn man sie als Indikator für den tatsächliche Verschleiß heranzieht (siehe Abbildung B.5).

Tabelle 6.2: Verschleißspurbreiten der Verschleißuntersuchungen auf C45-Unterprobe bei $F_N = 20\text{ N}$ [eigene Darstellung]

Vergleich Gewichtskräfte 20N						
Fett	LiPAOMIN-0	LiPAOMIN-1	LiPAOMIN-2	LiPAO-0	LiPAO-1	LiPAO-2
NLGI Klasse	0	1	2	0	1	2
Verschleißspurbreite [μm]	302	231	270	307	247	199

6. Versuchsauswertung

6.1.5 Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 30 N

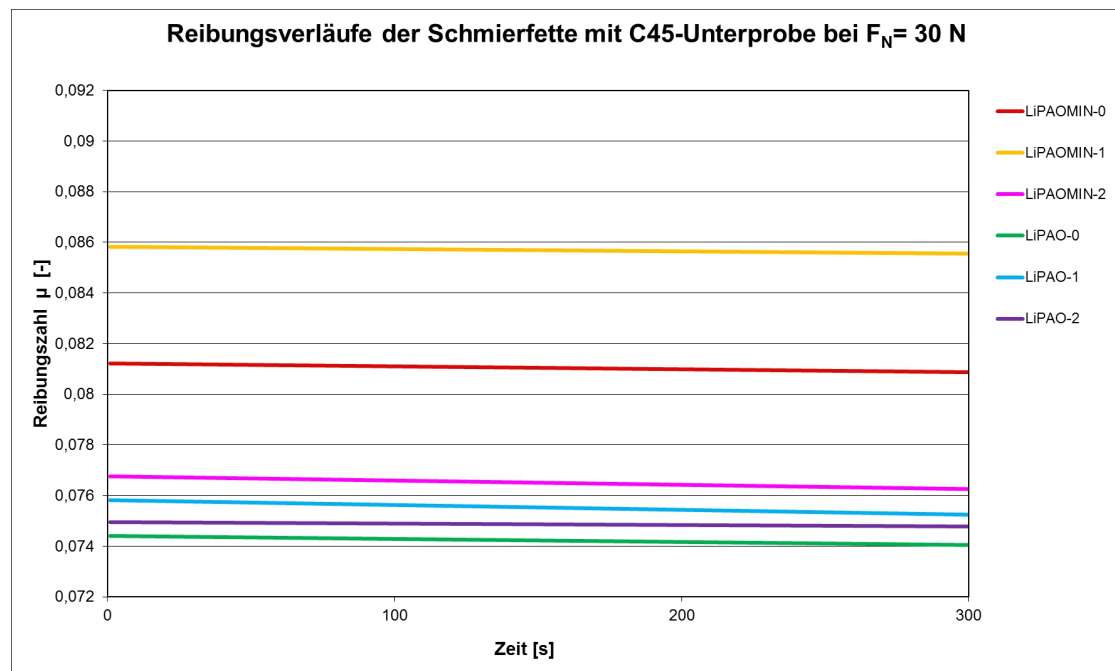


Abbildung 6.5: Lineare Trendline der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 30\text{ N}$ [eigene Darstellung]

Auch die Messergebnisse mit einer Gewichtskraft von 30 N erhärten die Beobachtungen der beiden vorherigen Messungen bezüglich der besseren Schmiereigenschaften der vollsynthetischen Polyalphaolefine. Alle ermittelten Reibungszahlen liegen unterhalb der der teilsynthetischen Polyalphaolefine. Die Reibung im Verhältnis zu Verdickerkonzentration lässt wieder eine Tendenz erkennen. Ähnlich wie im Versuchsdurchlauf mit 10 N Gewichtskraft, führt hier eine höhere Verdickerkonzentration eher zu niedrigeren Reibungszahlen. Leider ist hier nicht von einem klaren Bild zu sprechen. Bezüglich der Standardabweichung bestätigt sich auch hier der Verlauf der vorangegangenen Messungen. Sie nimmt mit steigender Gewichtskraft (30 N) weiter ab. Die Gründe sind die gleichen, wie in der zuvor abgegebenen Erklärung. Hierfür wird auf Abschnitt 6.1.7 verwiesen.

6. Versuchsauswertung

6.1.6 Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 30 N

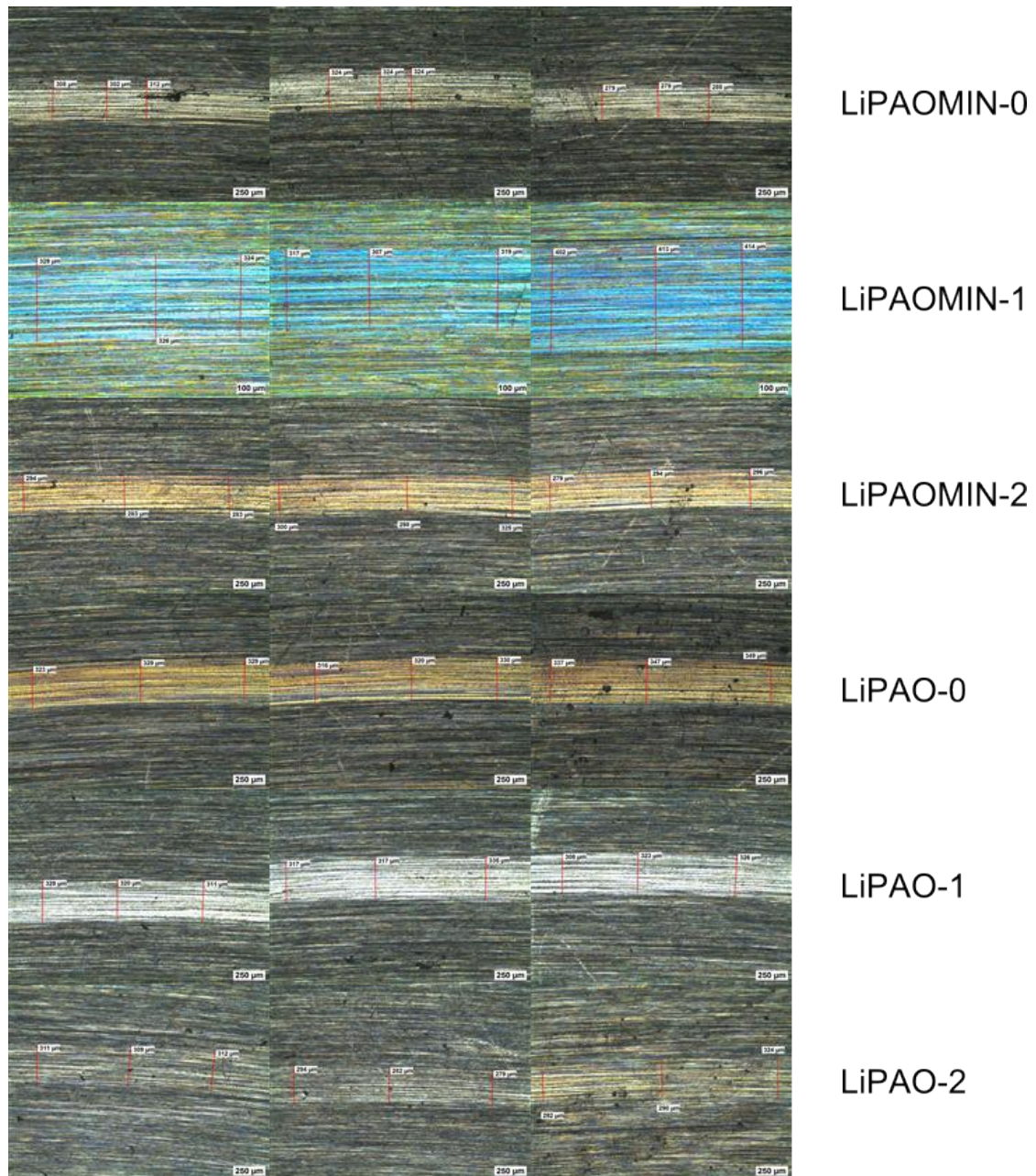


Abbildung 6.6: Verschleißspuren der C45-Unterprobe bei $F_N = 30\text{ N}$ [eigene Darstellung]

6. Versuchsauswertung

Die Ergebnisse aus der Messreihe mit 30 N decken sich größtenteils mit den Ergebnissen aus der Messreihe mit 20 N. Wieder ist nicht zu erkennen, dass die Verschleißspurbreite des vollsynthetischen Grundöls gegenüber dem teilsynthetischen abnimmt. Auch hier waren die gemessenen Reibwerte bei dem vollsynthetischen Grundöl niedriger und hätten eine schmalere Verschleißspur erwarten lassen. Wieder ist die Einschränkung zu beachten, dass die Verschleißspurbreite nicht in direktem/linearen Zusammenhang mit dem tatsächlichen Verschleißvolumen stehen muss (siehe Abbildung B.5). Die abfallende Verschleißspurbreite bei steigendem Verdickeranteil des vollsynthetischen Fetts tritt wie bei dem vorherigen Versuch auf.

Tabelle 6.3: Verschleißspurbreiten der Verschleißuntersuchungen auf C45-Unterprobe bei $F_N = 30 \text{ N}$ [eigene Darstellung]

Vergleich Gewichtskräfte 30N						
Fett	LiPAOMIN-0	LiPAOMIN-1	LiPAOMIN-2	LiPAO-0	LiPAO-1	LiPAO-2
NLGI Klasse	1	2	3	1	2	3
Verschleißspurbreite [μm]	303	350	292	340	329	303

6. Versuchsauswertung

6.1.7 Zusammenfassung der Reibwertuntersuchungen mit C45

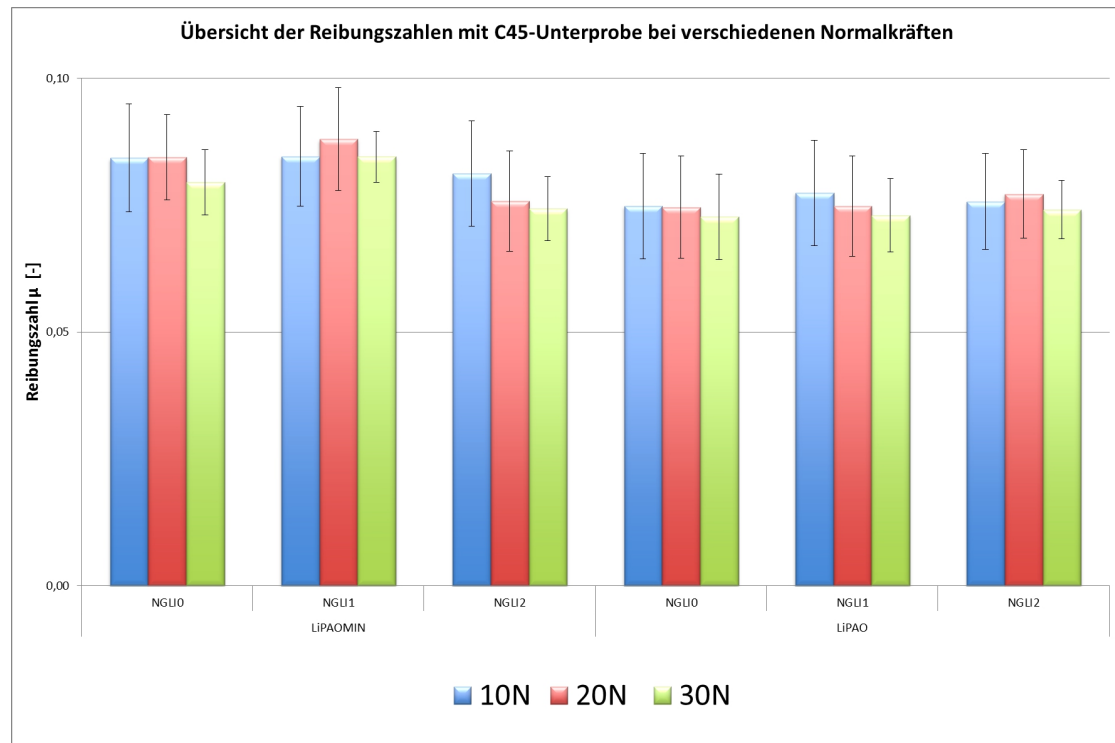


Abbildung 6.7: Übersicht der Reibungszahlen inkl. der Standardabweichung mit C45-Unterprobe bei verschiedenen Normalkräften [eigene Darstellung]

In Abbildung 6.7 sind die Mittelwerte aller Reibwerte, die auf der C45-Unterprobe durchgeführt wurden in einem Säulendiagramm dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass sowohl Reibwert als auch Standardabweichung allgemein mit steigender Normalkraft kleiner werden. Diese Ergebnisse lassen sich damit erklären, dass sich die beiden Werkstoffe durch die höhere Normalkraft schneller aneinander anpassen. Die höhere Normalkraft bewirkt ein schnelleres Abtragen von Rauheitshügeln, wodurch das Reibverhalten gleichmäßiger wird. So verringern sich die sich die maximalen Reibwerte, die um einen Mittelwert schwanken bei höherer Normalkraft schneller als bei geringeren Normalkräften. Demnach sinkt der Reibwert jeweils mit zunehmender Versuchsdauer. Das schnellere sinken der maximalen und Minimalen Reibwerte hat ebenfalls zur Folge, dass die Standardabweichung mit zunehmender Normalkraft geringer wird. Bezüglich der Reibwerte in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bzw. des Verdickeranteils lassen sich keine Gesetzmäßigkeiten erkennen.

6. Versuchsauswertung

6.1.8 Zusammenfassung der Verschleißuntersuchungen mit C45

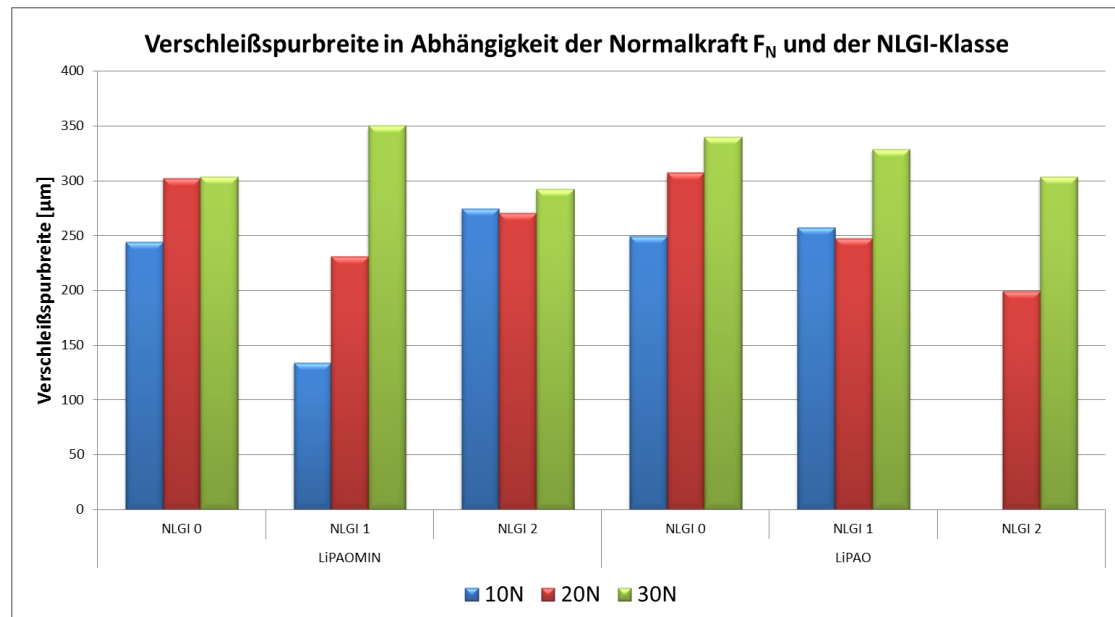


Abbildung 6.8: Verschleißspurbreite in Abhängigkeit der Normalkraft und der NLGI-Klasse [eigene Darstellung]

Die Verschleißspurbreiten aller auf C45 durchgeführten Versuche sind in Abbildung 6.8 zusammengefasst. Wie erwartet steigt der Verschleiß mit zunehmender Normalkraft an. Die höhere Normalkraft bewirkt ein schnelleres Abtragen des Unterprobenwerkstoffes, wodurch sich die höhere Verschleißspurbreite ergibt. Vergleicht man jeweils NLGI-Klasse 0 und 2 bei einer Normalkraft von 30 N so ist ein abnehmen der Verschleißspurbreite mit steigender NLGI-Klasse erkennbar. Dies könnte an der, durch die höhere NLGI-Klasse bedingten, geringeren Festkörperreibung liegen, wodurch der Verschleiß geringer wird. Wegen der geringen Unterschiede sind dabei allerdings die Ungenauigkeiten bei den Messungen zu berücksichtigen. Erschwerend kommt hinzu, dass diese Abhängigkeit nicht bei jeder Normalkraft zu beobachten ist. Auch hier ist zu beachten, dass die Verschleißspurbreite nur bedingt Auskunft über den volumetrischen Verschleiß gibt (siehe Abbildung B.5).

6.2 Versuche mit 9SMn28-Unterprobe

6.2.1 Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 10 N

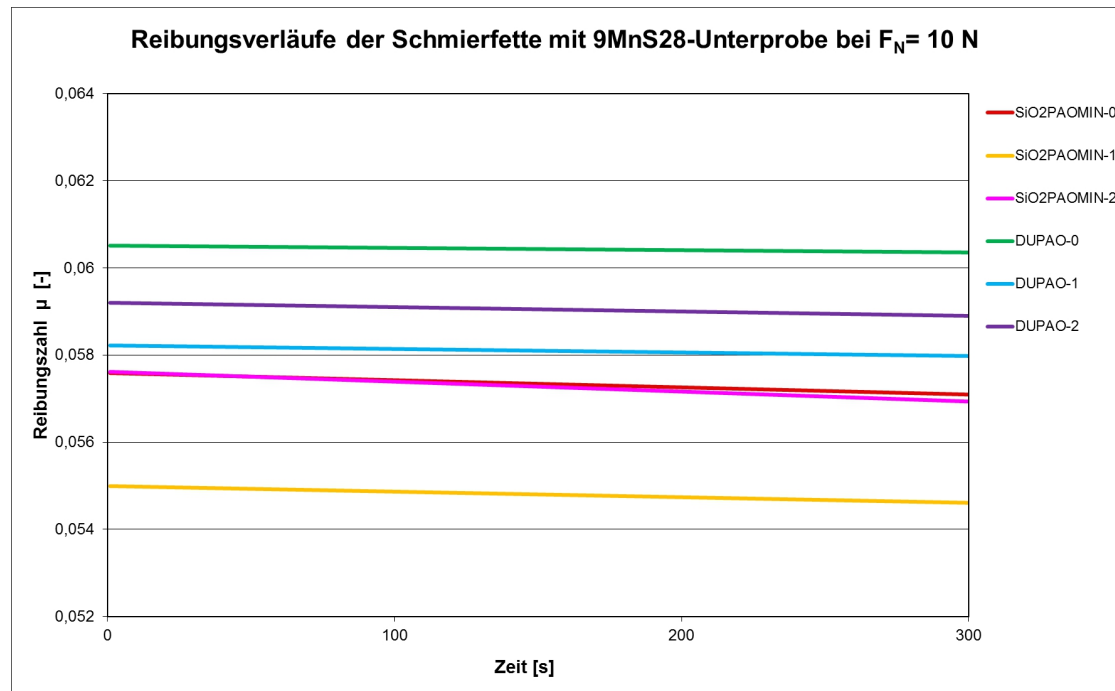


Abbildung 6.9: Lineare Trendlinie der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 10\text{ N}$
[eigene Darstellung]

Abbildung 6.9 zeigt eine lineare Trendlinie der 9SMn28-Unterprobe mit einer Normalkraft von $F_N = 10\text{ N}$. Auf der 9SMn28-Unterprobe wurden das Gelfett ($\text{SiO}_2\text{PAOMIN}$) sowie das PU-Fett (DUPAO) untersucht. Im Vergleich zum Unterprobenwerkstoff C45 sind deutlich geringere Reibwerte erkennbar. Auf diesen Umstand wird in Abschnitt 6.3 genauer eingegangen. Die Versuchsergebnisse zeigen bezüglich der Reibwerte deutliche Unterschiede zwischen den beiden Fetttypen. Die Reibungszahlen des Gelfettes weisen unabhängig vom Verdickeranteil geringere Reibwerte auf. Es fällt zusätzlich auf, dass sich beide Fette in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bzw. des Verdickeranteils ähnlich verhalten. So hat die NLGI-Klasse 0 in bei beiden Fetttypen den jeweils höchsten Reibwert, den zweithöchsten Reibwert hat jeweils die NLGI-Klasse 2 und den geringsten Reibwert jeweils die NLGI-Klasse 1 (siehe Tabelle 6.4).

6. Versuchsauswertung

Tabelle 6.4: Rangfolge der Reibwerte in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bei $F_N = 10N$

Rangfolge	$SiO_2PAOMIN$	DUPAO
1.	NLGI0	NLGI0
2.	NLGI2	NLGI2
3.	NLGI1	NLGI1

6.2.2 Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 20 N

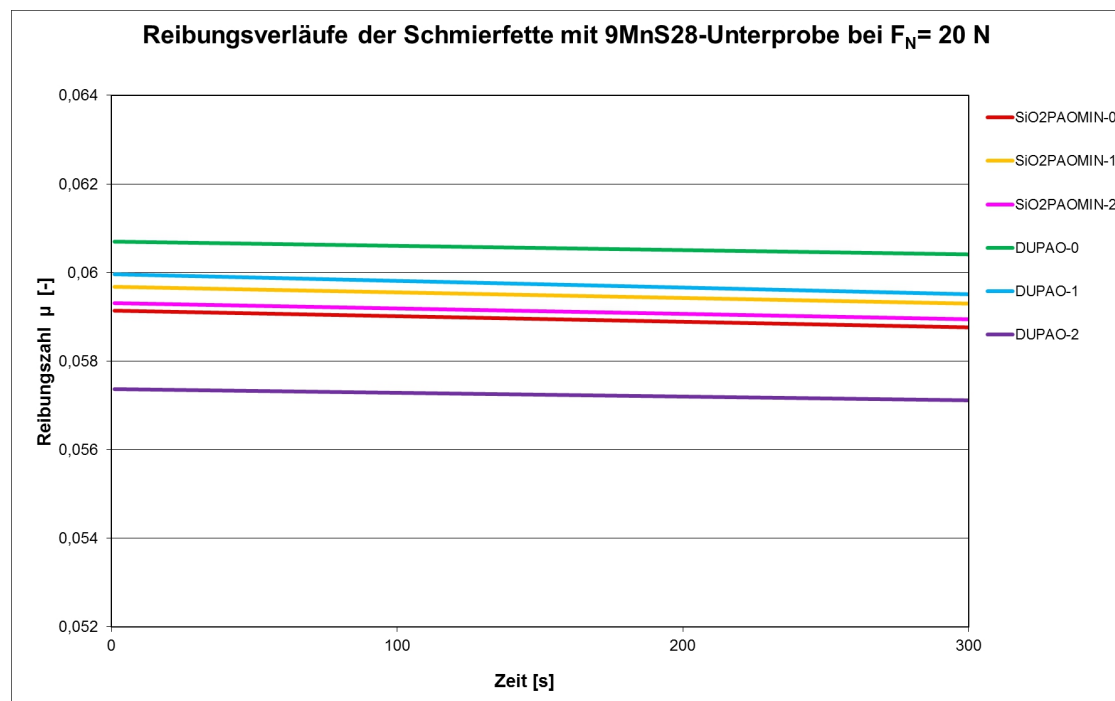


Abbildung 6.10: Lineare Trendline der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 20 N$ [eigene Darstellung]

Die linearen Trendlinien der 9SMn28-Unterprobe der untersuchten Fette mit einer Normalkraft von $F_N = 20 N$ werden in Abbildung 6.10 dargestellt. Im Vergleich zu den Reibwerten mit einer Normalkraft von $10 N$ fällt auf, dass die Reibungswerte weniger

6. Versuchsauswertung

stark voneinander abweichen. Die Differenz der minimalen und der maximalen durchschnittlichen Reibungszahl hat sich von 0,0066 auf 0,0031 fast halbiert. Zusätzlich ist erkennbar, dass sich die Reibwerte je Fetttyp in Abhängigkeit der der NLGI-Klasse bzw. des Verdickeranteils geändert hat (siehe Tabelle 6.5).

Tabelle 6.5: Rangfolge der Reibwerte in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bei $F_N = 20\text{ N}$

Rangfolge	$SiO_2PAOMIN$	DUPAO
1.	NLGI1	NLGI0
2.	NLGI2	NLGI1
3.	NLGI0	NLGI2

6.2.3 Auswertung der Reibwertuntersuchungen bei 30 N

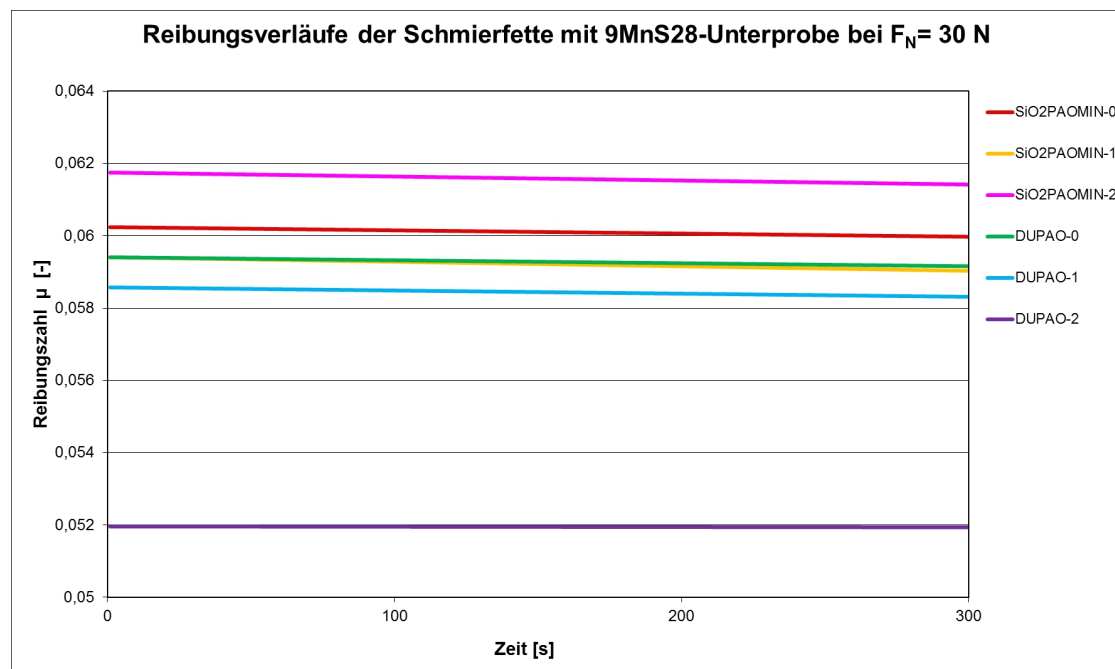


Abbildung 6.11: Lineare Trendline der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 30\text{ N}$ [eigene Darstellung]

6. Versuchsauswertung

Die in Abbildung 6.11 dargestellten linearen Trendlinien der bei einer Normalkraft von 30 N untersuchten Fette auf 9SMn28-Unterproben zeigen die größten Abweichungen zwischen minimalem und maximalem Reibwert. Im Vergleich zur Belastung mit 20 N hat sich der Unterschied bezüglich der maximalen Differenz der Reibwerte von $0,0031$ auf $0,0083$ fast verdreifacht. Dies ist besonders beim PU-Fett der NLGI-Klasse 2 (DUPAO-2) erkennbar, welches mit mehr als $0,006$ geringer ist als der nächsthöhere Reibwert. Die übrigen Reibwerte differieren nur maximal um ca. $0,003$ voneinander. Auch die Rangfolge der Reibwerte je Fetttyp in Abhängigkeit der der NLGI-Klasse bzw. des Verdickeranteils zeigen beim Gelfett erneut ein ganz anderes Bild. Nur beim PU-Fett ist die Rangfolge mit denen der Belastung mit 20 N identisch (siehe Tabelle 6.6).

Tabelle 6.6: Rangfolge der Reibwerte in Abhängigkeit der NLGI-Klasse bei $F_N = 30\text{ N}$

Rangfolge	<i>SiO₂PAOMIN</i>	DUPAO
1.	NLGI2	NLGI0
2.	NLGI0	NLGI1
3.	NLGI1	NLGI2

6. Versuchsauswertung

6.2.4 Auswertung der Verschleißuntersuchungen bei 10, 20 und 30 N

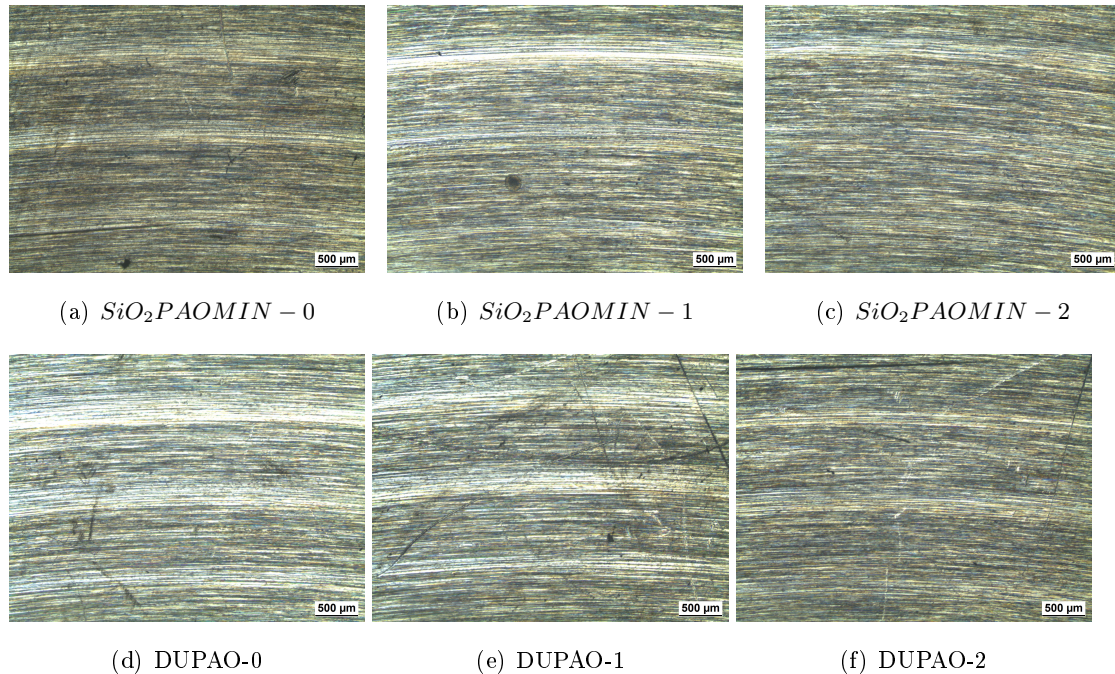


Abbildung 6.12: Verschleißspurbreiten der 9SMn28-Unterproben bei Normalkräften von 10, 20 und 30 N

Abbildung 6.12 zeigt die Verschleißspuren der 9SMn28-Unterproben. Der innere Radius wurde jeweils mit 10, der mittlere mit 20 und der äußere mit 30 N belastet. Im Vergleich zur C45-Unterprobe sind die Spuren deutlich schmaler. Daher war die Verschleißspurbreite mit dem Lichtmikroskop und dessen Filtern nicht messbar. Aufgrund der schlechten Qualität der Oberfläche war nicht zu erkennen, wo genau die Spurbreiten beginnen und enden. Eine quantitative Messung der Verschleißspurbreiten würde verfälschte Ergebnisse liefern und sind so für eine Verschleißuntersuchung unbrauchbar. Die Abhängigkeit der Verschleißspuren vom Werkstoff wird in Abschnitt 6.3 analysiert. Deutlich zu sehen ist, dass die Verschleißspuren mit zunehmender Normalkraft breiter werden. Dies ist damit zu erklären, dass höhere Normalkräfte ein schnelleres Abtragen des Werkstoffs bzw. der Rauheitshügel bewirken. Es ist ebenfalls eine Gesetzmäßigkeit der Verschleißspurbreite in Abhängigkeit der der NLGI-Klasse bzw. des Verdickeranteils erkennbar. Demnach sinkt der Verschleiß bei den durchgeführten Versuchen mit steigender NLGI-Klasse.

6. Versuchsauswertung

6.2.5 Zusammenfassung der Reibwerte mit 9SMn28

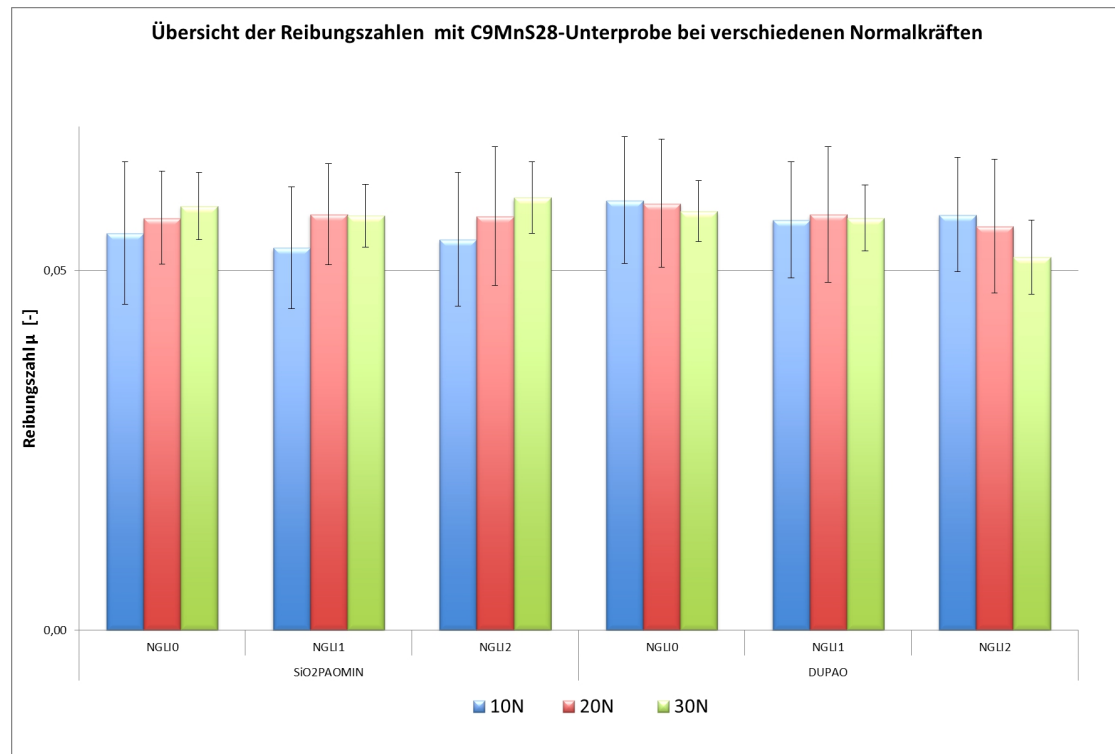


Abbildung 6.13: Übersicht der Reibungszahlen inkl. der Standardabweichung mit 9MnS28-Unterprobe bei verschiedenen Normalkräften [eigene Darstellung]

Abbildung 6.13 zeigt eine Übersicht der Reibwerte der auf 9SMn28-Unterproben durchgeführten Versuche. Während sich die Reibungszahl beim PU Fett (DUPAO) in Abhängigkeit der Normalkraft ähnlich verhält wie bei der C45-Unterprobe, also mit zunehmender Normalkraft sinkt, zeigt das Gelfett ($SiO_2PAOMIN$) ein gegenteiliges Verhalten. Beim Gelfett nimmt der Reibwert mit steigender Normalkraft zu. Dieses Phänomen ist bei jeder NLGI-Klasse des Gelfettes der Fall. Bei der Standardabweichung zeigen sich die gleichen Abhängigkeiten wie bei den C45-Unterproben. Aufgrund des schnelleren Abtragens der Rauheitshügel und den damit verbundenen geringeren Reibwertschwankungen nimmt die Standardabweichung mit zunehmender Normalkraft ab

6.3 Reibung und Verschleiß in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes C45 und 9SMn28

Die bisherigen Versuche haben das Reibungs- und Verschleißverhalten in Abhängigkeit der unterschiedlichen Schmierfette, NLGI-Klassen und Normalkräfte untersucht. Die Werkstoffpaarungen wurden bei den jeweiligen Versuchen konstant gehalten um diese Abhängigkeiten untersuchen zu können. Die Reibungs- und Verschleißwerte sind aber nicht nur von den verwendeten Fetten, den Normalkräften etc. abhängig. Besonders die Werkstoffpaarungen haben einen gravierenden Einfluss auf das Reibungs- und Verschleißverhalten. Diese Abhängigkeiten werden im Folgenden untersucht, in Diagrammen dargestellt und analysiert. Alle Versuche fanden unter Verwendung des Unterprobenwerkstoffes C45 und 9SMn28 statt. So ist das Reibungs- und Verschleißverhalten vom Werkstoff der Unterprobe bzw. dessen Oberflächeneigenschaften abhängig. Beim verwendeten Schmierfett handelt es sich um $SiO_2PAOMIN - 0$. Bei den 9SMn28-Unterproben ist im Vergleich zur C45-Unterprobe ein höherer Verschleiß zu erwarten, da es sich sowohl um den weicheren Werkstoff als auch den mit geringerer Streckgrenze handelt (siehe Tabelle B.4 und B.5). Daher sollte C45 eine höhere Verschleißfestigkeit aufweisen.

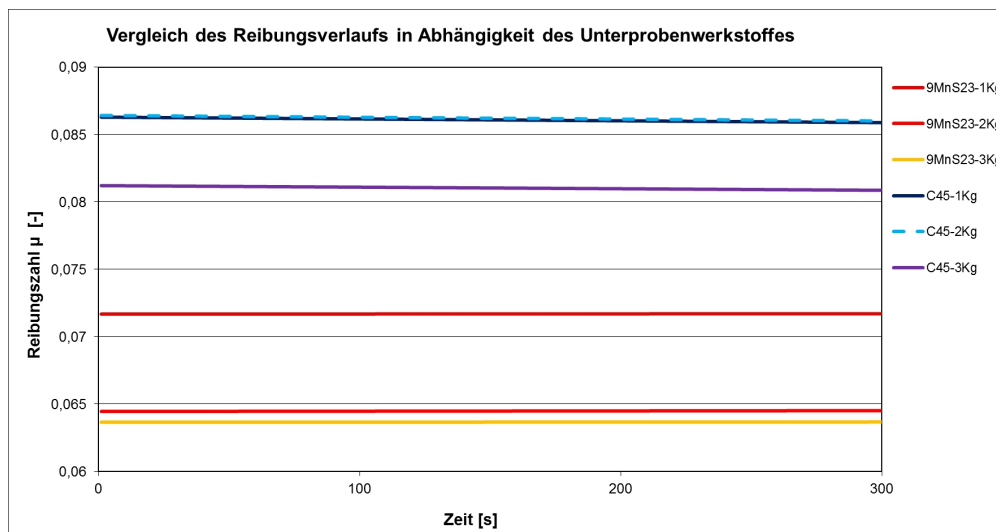


Abbildung 6.14: Vergleich der Reibungszahlen in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes [eigene Darstellung]

6. Versuchsauswertung

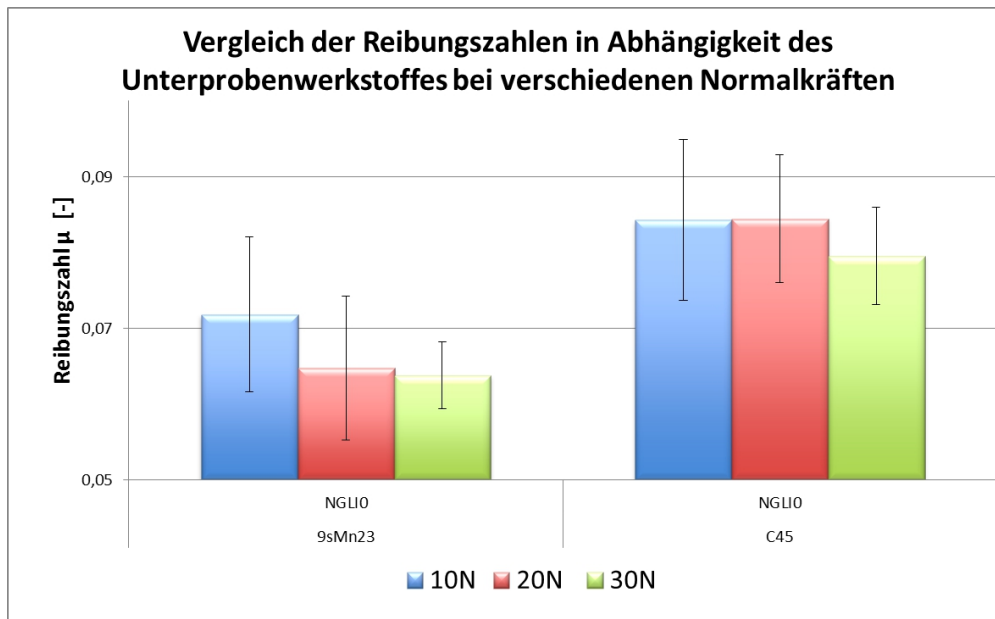
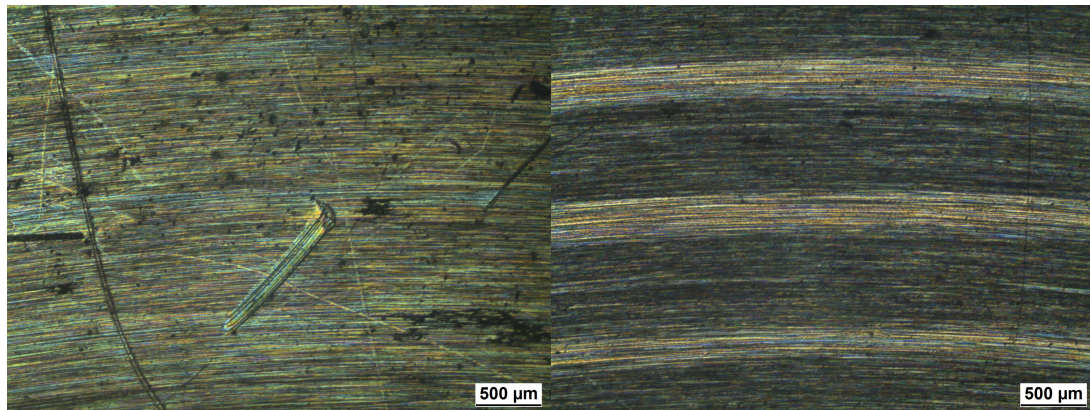


Abbildung 6.15: Vergleich der Reibungszahlen inkl. der Standardabweichung in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes dargestellt im Säulendiagramm [eigene Darstellung]

Abbildung 6.14 und 6.15 zeigen die Abhängigkeiten der Reibungszahl vom Unterprobenwerkstoff. Diese wurden mit dem Schmierfett *SiO₂PAOMIN – 0* untersucht. Die Normalkräfte betragen jeweils 10, 20 und 30 N. Es ist erkennbar, dass die Versuche mit der C45-Unterprobe deutlich höhere Reibwerte aufweisen. Aufgrund der dabei aufgebrauchten Energie ist zu erwarten, dass auch der Verschleiß beim Werkstoff C45 höher ist als beim Werkstoff 9SMn28.

6. Versuchsauswertung



(a) Verschleißspuren bei 9SMn28

(b) Verschleißspuren bei C45

Abbildung 6.16: *Vergleich der Verschleißspurbreite mit gleichem Schmierfett $\text{SiO}_2\text{PAOMIN} - 0$ unter gleichen Parametern in Abhängigkeit der Unterprobenwerkstoffe C45 und 9SMn28 [eigene Darstellung]*

In Abbildung 6.16 ist die Abhängigkeit der Verschleißbreite vom Unterprobenwerkstoff dargestellt. Wie aufgrund der höheren Reibwerte erwartet ist erkennbar, dass die Verschleißspurbreite bei der C45-Unterprobe ebenfalls höhere Werte aufweist. Diese sind klar erkenn- und messbar. Die Verschleißspurbreiten der 9SMn28-Unterproben sind hingegen kaum erkennbar. Daher waren keine Messungen der Verschleißspurbreite mit 9SMn28-Unterprobe durchführbar.

Der Unterschied des Verschleißverhaltens in Abhängigkeit des Werkstoffes kann verschiedene Ursachen haben. Einerseits kann dieses Verhalten vom Werkstoff bzw. dessen Eigenschaften abhängen, d. h. dass die Deformation auf Grund der Werkstoffeigenschaften bei den Versuchen mit 9SMn28 überwiegend im elastischen Bereich stattfindet. Demnach ist die elastische Deformation nur während des Versuches selbst erkennbar und so nach dem Versuch nicht mehr messbar. Diese Untersuchungen waren im Rahmen der Versuchsreihe nicht durchführbar. Daher war es auch nicht möglich diese These zu bestätigen. Sie widerspricht allerdings den wegen der Werkstoffkennwerte (siehe Tabelle B.1 und B.2) erwarteten Ergebnisse, da sowohl die Streckgrenze als auch die Härte bei C45 größer sind als die des Werkstoffes 9SMn28. Das Maß für die Höhe des Verschleißes konnte allein die Verschleißspurbreite geben. Diese gibt jedoch nur bedingt Auskunft auf den tat-

6. Versuchsauswertung

sächlichen, den volumetrischen Verschleiß (siehe Abbildung B.5). Um diesen zu ermitteln ist es notwendig die Tiefe der die Verschleißspur zu kennen. Diese konnte jedoch nicht ermittelt werden. Demnach wäre es möglich, dass der Verschleiß aufgrund einer tieferen Verschleißspur bei der 9SMn28-Unterprobe größer ist. Die geringeren Reibwerte sprechen allerdings gegen diese These.

Das Verschleiß- und Reibungsverhalten hängt allerdings nicht allein von den Eigenschaften des Werkstoffes ab, sondern auch dessen Oberflächenrauheit, Wärmebehandlung, dem Gefüge, der Bearbeitung, der Rauheit usw.

Die vorangegangenen Oberflächenbehandlungen der Proben sind nicht bekannt gewesen. Allein die Oberflächenrauheit der Proben konnte ermittelt werden. Diese könnten das den Werkstoffdaten entgegengesetzte Verhalten erklären. Die Abbildungen B.1, B.2, B.3, sowie B.4 zeigen, dass sowohl die größte Höhe des Rauheitsprofils R_z , als auch der arithmetische Mittelwert der Profilkordinaten R_z , bei den 9SMn28-Unterproben deutlich geringer sind als die der C45 Unterproben. Dabei ist die größte Höhe des Rauheitsprofils R_z der C45-Unterprobe um den Faktor 2 höher als die der 9SMn28-Unterprobe. Der arithmetische Mittelwert der Profilkordinaten R_z ist sogar um den Faktor 3 höher. Dies kann entscheidenden Einfluss auf das Reibungs- und Verschleißverhalten haben. Aufgrund der höheren Rauheit der C45-Unterprobe, den damit verbundenen höheren Rauheitshügeln bzw. dem geringeren Werkstoffvolumen scheint es, gemessen an der Verschleißspurbreite so, als wäre mehr Werkstoff abgetragen worden. Dies muss jedoch nicht der Fall sein. Durch die höhere Rauheit der raueren Oberfläche kann weniger Werkstoff vorhanden sein, wodurch im Bereich dieses Rauheitsprofils die Verschleißbreite bzw. -höhe schneller zunehmen kann. Dadurch scheint es, dass gemessen an der Schleifspurbreite bzw. der Schleifspurhöhe mehr Werkstoff abgetragen würde. Der tatsächliche, der volumetrische Verschleiß wäre in diesem Fall aber geringer. Dieser könnte aber aufgrund der fehlenden Messinstrumente nicht gemessen werden. Weitere Parameter, der beiden vorliegenden Unterproben sind nicht bekannt wie bspw. die vorangegangenen Oberflächenbehandlungen. Es ist jedoch sehr wahrscheinlich, dass die beiden Werkstoffe unterschiedliche Behandlungen durchlaufen haben.

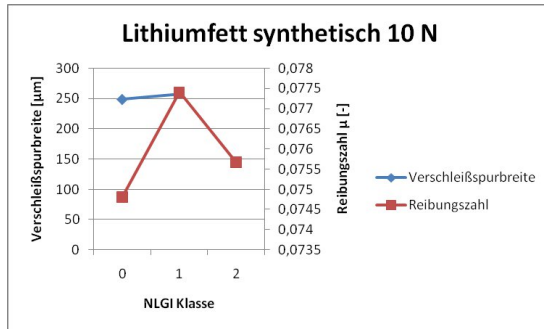
Einen weiteren Einfluss auf das Reibungs- und Verschleißverhalten hat die Oberflächenhärte. Obwohl die Härte nach Vickers HV10, also mit einer Kraft von 98,1 N bei jeder Probe gemessen wurde, ist es möglich, dass das erwartete Verhalten bei den versuchen ein anderes

6. Versuchsauswertung

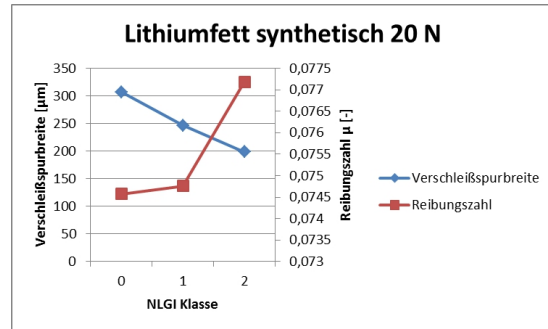
ist. Die Versuche wurden nur mit einer Normalkraft von 10, 20 und 30 N durchgeführt also 10-30 Prozent der Kraft, mit der die Härte gemessen wurde. Demnach ist es möglich, dass die äußerste Oberflächenschicht eine andere Härte aufweist als die nach Vickers gemessene.

6. Versuchsauswertung

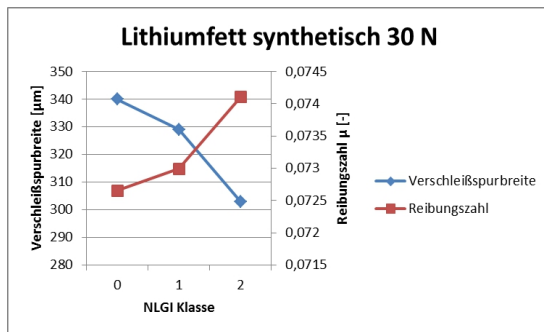
6.4 Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von der NLGI-Klasse



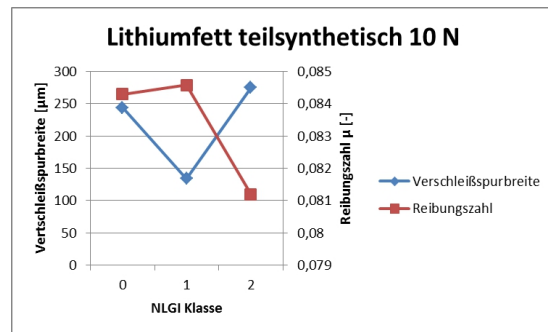
(a) Lithiumfett synthetisch $F_N=10\text{ N}$



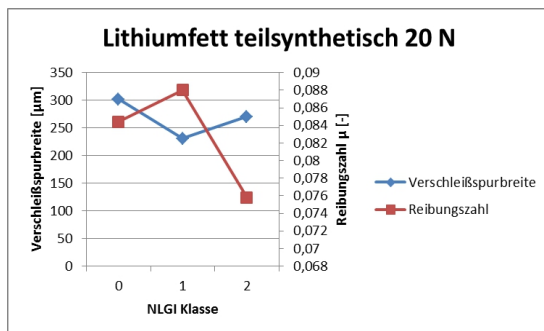
(b) Lithiumfett synthetisch $F_N=20\text{ N}$



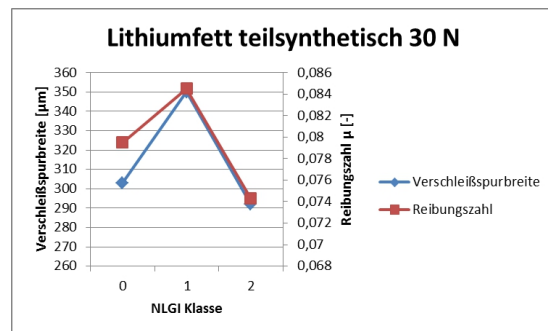
(c) Lithiumfett synthetisch $F_N=30\text{ N}$



(d) Lithiumfett teilsynthetisch $F_N=10\text{ N}$



(e) Lithiumfett teilsynthetisch $F_N=20\text{ N}$



(f) Lithiumfett teilsynthetisch $F_N=30\text{ N}$

Abbildung 6.17: Verschleiß und Reibungszahl in Abhängigkeit der NGLI Klasse
[eigene Darstellung]

6. Versuchsauswertung

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen der Verdickerkonzentration des Schmierfetts, der Reibungszahl und dem Verschleiß untersucht. Der real entstandenen Verschleiß der Unterprobe sollte durch eine Messung der Spurtiefe ermittelt werden. Leider ließen die vorhandenen technischen Geräte dieses nicht wie erhofft zu. Die Verschleißspur war für eine aussagekräftige Messung nicht tief genug. Als Indiz bzw. Anhaltspunkt für den entstandenen Verschleiß wurde deshalb die Verschleißspurbreiten ausgemessen. Da die Spurbreite ohne genaue Kenntnis über die Tiefe keine verlässliche Aussage über das Verschleißvolumen zulässt, sind die erhaltenen Werte kritisch zu betrachten. Leider stellte sich auch heraus, dass die zur Verfügung gestellten Unterproben aus unterschiedlichen Materialien bestanden. Auf den Proben des Automatenstahls 9SMn28 waren die Verschleißspuren nur so schwach ausgeprägt, dass das Ausmessen nicht möglich war. Diesen Umständen geschuldet kann eine Auswertung nur für die Unterproben aus C45 und den darauf zum Einsatz gekommenen Lithiumseifenfetten erfolgen.

Reibung

Die Auswertung der Reibungszahlen in Abhängigkeit zu der NLGI-Klasse liefert stark abweichende Ergebnisse, die keine Regelmäßigkeiten erkennen lassen. Ungefähr die Hälfte der Messungen zeigt eine Steigende Reibungszahl bei höherer Verdickerkonzentration, die andere Hälfte verhält sich gegensätzlich. Diese gegensätzlichen Verläufe ergeben sich unabhängig von dem Grundöl des Schmierfetts und sind deshalb auch nicht durch dieses zu begründen. Folgende Überlegungen wurden angestellt um sowohl steigende Reibungszahlen als auch sinkende Reibungszahlen bei erhöhtem Seifenanteil im Schmierfett zu begründen.

1. Reibung sinkt mit Erhöhung des Seifenanteils

Bei den untersuchten Reibpaarungen liegt eine Mischreibung vor. Die resultierende Reibungszahl ist somit im Wesentlichen von zwei Komponenten abhängig: der Festkörperreibung und der Flüssigkeitsreibung. Von diesen beiden Komponenten fällt der größere Teil auf die Festkörperreibung. Durch die Erhöhung des Seifenanteils im Schmierfett erhöht sich dessen dynamische Viskosität. Aus diesem Umstand entsteht der Effekt, dass die Flüssigkeitsreibung steigt (es müssen höhere Scherkräfte überwunden werden) und sich

6. Versuchsauswertung

parallel dazu die Festkörperreibung verringert. Der verminderte Einfluss der Festkörperreibung wirkt sich stärker aus als die erhöhte Flüssigkeitsreibung und somit verringert sich die Summe der beiden Reibungskomponenten.

2. Reibung steigt mit Erhöhung des Seifenanteils

Dieser Effekt kann dadurch verursacht werden, dass das Schmierfett mit steigendem Seifenanteil eine höhere Viskosität erlangt. Dadurch verschlechtern sich die spaltfüllenden Eigenschaften des Schmierfetts. Eine vollständige Füllung der Spalten in der Reibstelle wird dadurch verhindert und die Festkörperreibung nimmt zu.

Verschleißspurbreite

Zur Ermittlung des Verschleißes bedienten sich und hilfsweise der Verschleißspurbreite. Die anhand dieses Indikators ermittelten Ergebnisse zeigten ebenfalls ein teilweise paradoxes Verhalten. Entgegen der Erwartungen verhielt sich die Verschleißspurbreite teilweise gegenläufig zu der ermittelten Reibungszahl. Jedoch ist bezüglich der Verschleißspurbreiten eine Tendenz erkennbar. In der überwiegenden Anzahl der Ergebnisse sank die Verschleißspurbreite mit zunehmendem Seifenanteil im Schmierfett. Dieser Umstand stützt die These, dass die Reibung im Allgemeinen mit steigendem Verdickeranteil abnimmt. Denn ein geringerer Festkörperverschleiß sollte mit einer verminderten Reibung einhergehen.

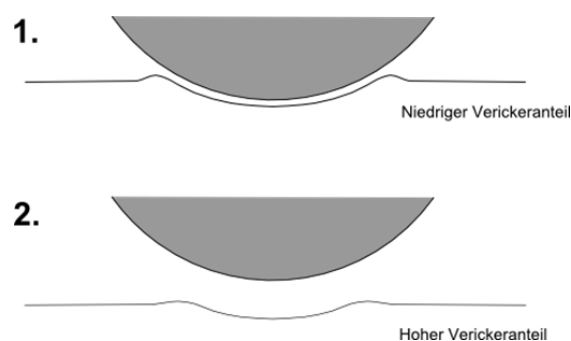


Abbildung 6.18: *Abhängigkeit der Verschleißspurbreite vom Verdickeranteil
[eigene Darstellung]*

6. Versuchsauswertung

In Abbildung 6.1 (oben) wird ein Schmierfett mit einem niedrigen Verdickeranteil benutzt. Durch die niedrige Viskosität füllt relativ wenig Schmiermittel die Reibstelle aus. Das Ergebnis ist eine geringere Flüssigkeitsreibung und eine erhöhte Festkörperreibung. Die verschleißspurbreite fällt dadurch relativ hoch aus. Im Gegensatz dazu wird in Abbildung 6.1 (unten) ein Fett mit höherem Verdickeranteil verwendet. Die hohe Viskosität erzeugt einen dickeren Schmierfilm. Die entstehende höhere Flüssigkeitsreibung geht zugunsten einer verminderten Festkörperreibung und zeigt sich in einer niedrigeren Verschleißspurbreite.

6.5 Abhängigkeit des Reibwertes und der Standardabweichung vom Versuchsdurchlauf

Versuchsauswertungen basieren meist auf Mittelwerten mehrerer Versuchsdurchläufe bei identischen Bedingungen. So soll die Wirkung eventueller Ausreißer minimiert werden. Um die Abweichung abzuschätzen wird dabei der Mittelwert der Abweichung berechnet, die sog. Standardabweichung. Bei den in diesem Fall durchgeführten Versuchen waren die Versuchsvoraussetzungen jedoch nicht identisch. Alle fünf Versuche wurden auf demselben Radius durchgeführt, d. h. jeder Versuch wurde auf der Spur des bzw. der vorherigen Versuche durchgeführt. Demnach besteht die Möglichkeit, dass eine Gesetzmäßigkeit bezüglich der Reibungszahl und deren Standardabweichung bezüglich des Versuchsdurchlaufs existiert. Abbildung 6.19 zeigt lineare Trendlinien der mittleren Reibwerte μ in Abhängigkeit der einzelnen Versuchsdurchläufe. So soll trotz vorhandener Schwankungen eine Abhängigkeit der Reibungszahl von der Zahl des Versuchsdurchlaufs ermittelt werden. Aufgrund der deutlichen Reibwerte werden nur die Versuche mit C45 betrachtet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Reibungszahl mit der Zahl der Versuchsdurchläufe abnimmt. Dies kann damit erklärt werden, dass durch den härteren und verschleißfesteren Werkstoff der Wälzlagerkugel Rauheitshügel vom Unterprobenwerkstoff abgetragen. Dieser Effekt nimmt mit steigender Zeit/Versuchszahl zu. Durch diese Anpassung des Unterprobenwerkstoffes, also das Abtragen der Rauheitshügel, an die Kugel sinkt die Reibungszahl. Auch der Verschleiß an der Kugel, der nicht Thema dieser Diplomarbeit ist, hat Auswirkungen auf die Reibungszahl. So war während der Versuche zu erkennen, dass nach dem Drehen der Kugel zu Beginn der Versuche der Reibungswert

6. Versuchsauswertung

höher war als bei Beendigung des jeweils vorherigen Versuches. Der Effekt der Anpassung der Kugel an die Unterprobe wurde so aufgehoben.

Bei der Standardabweichung zeigen nur die Versuche mit einer Normalkraft von $30N$ klare Ergebnisse. Bei allen sechs Fetten sinkt die Standardabweichung mit der Zahl der Versuchsdurchführungen. Der deutliche Effekt hängt wie in Abschnitt 6.1.7 mit der höheren Normalkraft zusammen, die ein schnelleres Anpassen von Kugel und Scheibe bewirkt.

6. Versuchsauswertung

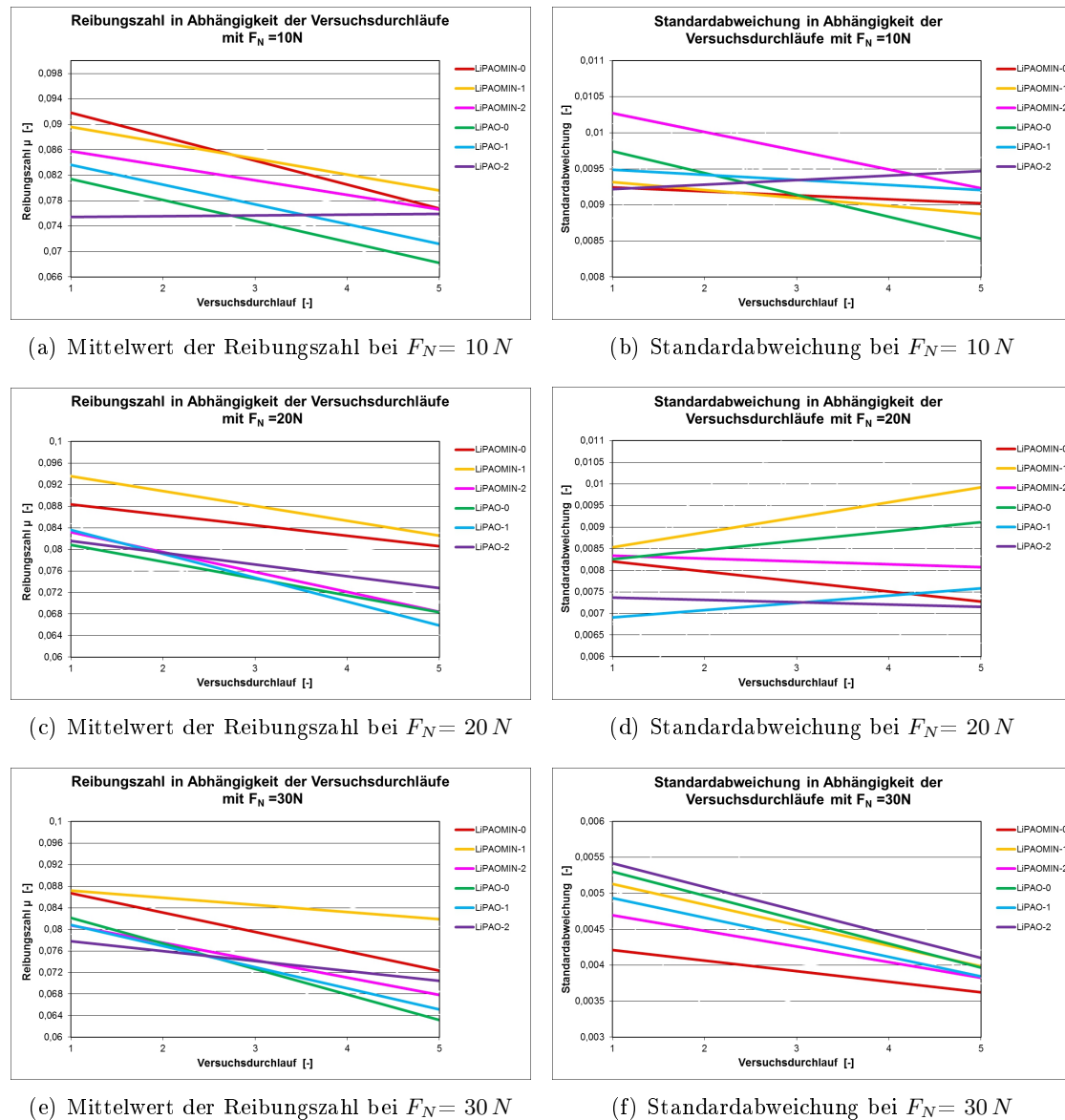


Abbildung 6.19: Standardabweichung und Reibungszahl in Abhängigkeit des Versuchsdurchlaufs [eigene Darstellung]

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

7.1.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Diese Diplomarbeit hatte die Untersuchung verschiedener Schmierfette zum Ziel. Anhand der durchgeführten Reibungs- und Verschleißversuche am Kugel-Scheibe-Tribometer sollten Erkenntnisse über die unterschiedlichen Fette, deren spezifische Verdicker und Grundöle erlangt werden. Im ersten Teil dieser Arbeit werden theoretischen Grundlagen dargestellt. Hierzu zählen Informationen über die Tribologie im Allgemeinen, ausführliche Grundlagen zur Reibung, dem Verschleiß und zu den unterschiedlichen Schmierstoffen. In den folgenden Kapiteln werden der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung beschrieben. Die Ergebnisse der Versuche zeigten teilweise widersprüchliche Ergebnisse. Durch eigene Nachforschungen stellten sich etliche abweichende Faktoren heraus, die eine Beurteilung der Ergebnisse im direkten Vergleich erschwerten. Hierzu zählen u. a.:

- Unterproben aus zwei unterschiedlichen Materialien
- Dadurch unterschiedliche Härte der Unterproben
- Oberflächenrauheit differiert um den Faktor zwei
- Verschleißvolumen mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht messbar

Auch wenn der direkte Vergleich der Schmierstoffe durch die Vielzahl der abweichenden Versuchsparameter nicht mehr möglich war, konnten doch einige Erkenntnisse aus den Versuchsreihen gewonnen werden. Unabhängig von der Schmierstoff und Werkstoffpaarung wurde beobachtet, dass die Reibwerte mit der Zeit abnahmen. Ebenso

7. Zusammenfassung und Ausblick

deutlich war die parallel dazu sinkende Standardabweichung zu beobachten. Die Standardabweichung sank ebenfalls mit steigender Gewichtskraft. Abschließend kann noch folgende Beobachtung festgehalten werden: Die unterschiedlichen Metall- und Schmierstoffpaarungen wiesen erhebliche Unterschiede bezüglich der Reibung und des Verschleißes auf. Dieser Umstand macht deutlich, wie viel Optimierungspotential in geschmierten Reibpaarungen besteht. Aufgrund der Vielzahl der unbekannter Parameter gestaltete sich die Bewertung des Verschleißes schwierig. Die Verschleißspurbreite als Indikator des Verschleißes gibt nur bedingt Auskunft über den tatsächlichen, den volumetrischen Verschleiß.

7.1.2 Mögliche Optimierungsmaßnahmen der Versuche

Bei der Durchführung der Versuche waren einige Rahmenbedingungen nicht optimal und erschwerten so die Auswertung der Ergebnisse. Die wohl wichtigste Optimierungsmaßnahme ist die Verbesserung der Unterproben. Die Oberflächenqualität der Unterproben ließ zu wünschen übrig, da sie relativ grob und kreisförmig geschliffen war. Zusätzlich war die Oberfläche durch Kratzer und Riefen nicht unerheblich beschädigt. Ein Einfluss auf das Reibungsverhalten kann somit nicht ausgeschlossen werden. Die unvorteilhafte, kreisförmige Schleifrichtung der Unterproben erschwerte das Ausmessen der Verschleißspurbreite zusätzlich. Sie verlief in der gleichen Richtung wie die Verschleißspuren. Aufgrund dieser Mängel waren die Schleifspurbreiten nur sehr schwer auszumessen. Es ist daher zu empfehlen die Proben quer zu schleifen, damit man die kreisförmigen Verschleißspurbreiten im rechten Winkel zu den Schleifriefen messen kann. Eine bessere Möglichkeit wäre es, die Unterproben zu polieren. So wären die Verschleißspuren noch deutlicher zu erkennen. Beim mechanischen Polierverfahren kann es zu Spannungen in der Oberfläche des Werkstoffes kommen, wodurch sich deren metallurgischen Eigenschaften ändern. Ebenso kann es bei mechanischen Verfahren zu mikroskopischen Kratzern, Metallabtrag und Schleifmittelrückständen kommen. Diese negativen Auswirkungen treten beim elektrolytischen Polieren nicht auf. Es ist daher zu empfehlen, die Proben zukünftig dieser speziellen Oberflächenbehandlung zu unterziehen, um eine optimale Beschaffenheit der Oberfläche zu gewährleisten. Dies wäre bei der Firma Böge METALLVEREDELUNGS GMBH in Bergedorf durchführbar. Auf Anfrage wurde uns dort auch eine Bearbeitung von kleinen Chargen zugesagt. Sollte weiter auf mechanische Verfahren gesetzt werden ist dringend

7. Zusammenfassung und Ausblick

anzuraten, dass alle Proben dieselbe Oberflächenbehandlung erfahren. Bezüglich der Materialauswahl für die Unterproben kann folgende Empfehlung gegeben werden. Die Reibungs- und Verschleißuntersuchungen lassen sich deutlich besser auf dem Werkstoff C45 auswerten. Sowohl die Reibwerte als auch die Verschleißspuruntersuchungen weisen deutlich höhere Werte auf. Aus diesem Grund lassen sich die Unterschiede besser analysieren. Die Verschleißspurbreite war auf den 9SMn28-Unterproben nicht messbar. Weitere Optimierungsmaßnahmen betreffen den Versuchstand. Das Kugel-Scheibe-Tribometer sollte auf einem massiven Tisch oder Gestell stehen und von äußeren Einflüssen entkoppelt sein. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Versuchsergebnisse nicht verfälscht werden. Eine weitere Fehlerquelle stellt die Aufnahme für die Unterproben dar. Wie in der Abbildung dargestellt, ist der Durchmesser der Unterproben zu groß für die Aufnahme. Aus diesem Grund kommt es vor, dass die Probe nicht genau horizontal auf der Aufnahme fixiert wird. Dadurch werden die Oberprobe und das auf ihr lastende Gewicht mit jeder Scheibendrehung auf und ab bewegt. Dabei muss bei jeder Umdrehung die Massenträgheit des Gewichtes überwunden werden, was zu einer ungleichmäßigen Belastung der Reibstelle führt. Es wurde bei der Auswertung versucht diesen Effekt nachzuweisen, indem die Verschleißspurbreiten der Unterproben in 90° Winkeln vermessen wurden. Teilweise stützten die ermittelten Werte die These, dass ein Einfluss auf die Messergebnisse besteht.

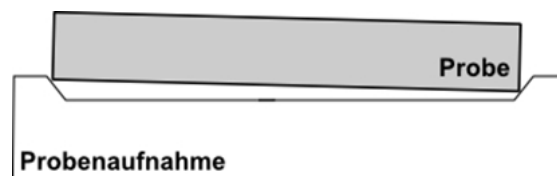


Abbildung 7.1: Verbesserung der Unterprobenaufnahme [eigene Darstellung]

7.2 Ausblick

Bei der Analyse der Versuchsergebnisse konnten einige Gesetzmäßigkeiten ermittelt bzw. bestätigt werden. Beispielsweise das Sinken der Standardabweichung bei zunehmender Normalkraft. Ein Sinken der Reibwerte bei zunehmender Normalkraft hat sich bei allen Versuchen bestätigt. Die einzige Ausnahme bildete hierbei das Gelfett. Andere Ergebnisse waren wiederum nicht eindeutig oder widersprachen den Erwartungswerten. Dies ist

7. Zusammenfassung und Ausblick

beispielsweise bei der Abhängigkeit von Reibwerten und Verschleiß der Fall. Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten wäre es notwendig weitere Versuche durchzuführen, die diesen Zusammenhang beleuchten. Weitere interessante Aspekte könnten in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes untersucht werden. Die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Versuche haben deutliche Unterschiede bezüglich des Unterprobenwerkstoffes aufzeigen können. Allerdings wurde diese nur in Abhängigkeit eines Schmierstoffes untersucht. Zukünftige Versuchsreihen könnten die Auswirkungen der Schmierstoffe in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes untersuchen. Dies ist besonders interessant, da der große Einfluss des Unterprobenwerkstoffes sich in den durchgeführten Versuchen bestätigt hat.

Literaturverzeichnis

- [1] BARTZ, Willfried J. ; MÖLLER, Uwe J.: *Expert Praxislexikon Tribologie plus: 2010 Begriffe für Studium und Beruf*. 2. Auflage. Renningen : expert Verlag, 2000
- [2] BARTZ, Winfried J.: *Schmierfette - Zusammensetzung, Eigenschaften, Prüfung und Anwendung*. expert Verlag, 2000
- [3] BARTZ, Winfried J.: *Einführung in die Tribologie der Schmierungstechnik - Tribologie - Schmierstoffe - Anwendungen*. 2. Auflage. Renningen : expert Verlag, 2010
- [4] BEHRENDT, Matthias: *Entwicklung eines Systemtribometers mit Abbildung mehrachsiger instationärer Beanspruchungskollektive zur Analyse von Reibung und Verschleiß im Mischreibungsgebiet im Kontext nasslaufender Umschlingungs-CVT*. Version:2009. http://www.ipek.kit.edu/downloads/IPEK_FB_Band36_M_Behrendt.pdf, Abruf: 15.07.2011
- [5] BREDEL, Horst: *Wissensspeicher Tribotechnik*. 2. Auflage. VEB Fachbuchverlag, 1988
- [6] CZICHOS, Horst ; HABIG, Karl-Heinz: *Tribologie-Handbuch - Reibung und Verschleiß*. 2. Auflage. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2003
- [7] CZICHOS, Horst ; HABIG, Karl-Heinz: *Tribologie-Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. 3. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010
- [8] DETERS, Ludger: Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen. In: *Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen - Tribologische Optimierung und Schadensbekämpfung* (2004), S. 1-35

Literaturverzeichnis

- [9] DETERS, Ludger ; FISCHER, Alfons ; SANTNER, Erich ; STOLZ, Ulrich: *Tribologie - Arbeitsblatt 7 - Verschleiß, Reibung - Definitionen, Begriffe, Prüfung*. Version: 2003. http://www.gft-ev.de/pdf/2002_AB_7.pdf, Abruf: 04.08.2011
- [10] FLEISCHER, Gerd ; GRÖGER, Horst ; THUM, Heinz: *Verschleiß und Zuverlässigkeit*. VEB Verlag Technik, 1980
- [11] FLORES, Gerhard: *Tribologie*. Version: 2009. [http://www6.hs-esslingen.de/sixcms/media.php/512/Tribologie\(1\).pdf](http://www6.hs-esslingen.de/sixcms/media.php/512/Tribologie(1).pdf), Abruf: 03.08.2011
- [12] HEINZ, Kloß ; MEYER, Klaus: *Reibung und Verschleiß geschmierter Reibsysteme*. expert Verlag, 1993
- [13] KLOCKE, Fritz ; KÖNIG, Wilfried: *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2006
- [14] KUHN, Erik: *Zur Tribologie der Schmierfette*. Renningen : expert Verlag, 2009
- [15] KUHN, Erik: *Tribologische Grundlagen - Masterblatt 2*. Version: o. J. <http://www.mp.haw-hamburg.de/tribologie/Masterblatt2.pdf>, Abruf: 04.08.2011
- [16] LITTGERS, Thomas ; KOCH, Bernhard: Untersuchungen zum Kälte-Fließverhalten von Schmierfetten mit modernen Rotationsviskosimetern - Einfluss von Verdicker und Basisöl auf die viskoelastischen Eigenschaften bei -40 °C. In: *47. Tribologie Fachtagung - Reibung und praktische Anwendungen Band 2* (2006), S. 59/6
- [17] NASSER, Jamil ; MÖLLER, Uwe: *Schmierstoffe im Betrieb*. 2. Auflage. Berlin : Springer Verlag, 2002
- [18] o.V.: *Härteprüfung Vickers*. <http://www.metall-wissen.de/image/Haerteangabe.jpg>, Abruf: 05.09.2011
- [19] o.V.: *BMFT Report: „Damit Rost und Verschleiß nicht Milliarden fressen“*. Bonn : Bundesministeriums für Forschung und Technologie, 1983
- [20] o.V.: *Versuch: Rheologie von kolloidalen Suspensionen*. Version: 2007. http://www.chemie.uni-bayreuth.de/pci/de/lehre/23489/kc_rheologie.pdf, Abruf: 28.07.2011

Literaturverzeichnis

- [21] PIGORS, Oltwig: *Werkstoffe in der Tribotechnik*. Renningen : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993
- [22] SAARSTAHL: *Werkstoffdatenblatt 100Cr6*. http://www.saarstahl.de/fileadmin/saarstahl_extranet/images/04_produkte/walzstahlsorten/deutsch/3505_100Cr6.pdf, Abruf: 19.09.2011
- [23] SAARSTAHL: *Werkstoffdatenblatt 9SMn28*. http://www.saarstahl.de/fileadmin/saarstahl_extranet/images/04_produkte/walzstahlsorten/deutsch/m_0715_11SMn30_9SMn28.pdf, Abruf: 19.09.2011
- [24] SAARSTAHL: *Werkstoffdatenblatt C45*. http://www.saarstahl.de/fileadmin/saarstahl_extranet/images/04_produkte/walzstahlsorten/deutsch/0503_C45.pdf, Abruf: 19.09.2011
- [25] STEINHILPER, Waldemar ; ALBERS, Albert: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2*. 6. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer, 2008
- [26] WITTEL, Herbert ; MUHS, Dieter ; JANNASCH, Dieter ; VOSSIEK, Joachim: *Rollhoff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, 2009

Anhang

A Abbildungen zu Reibwerten

A.1 Reibwerte in Abhängigkeit der Zeit

A.1.1 Unterprobenwerkstoff C45

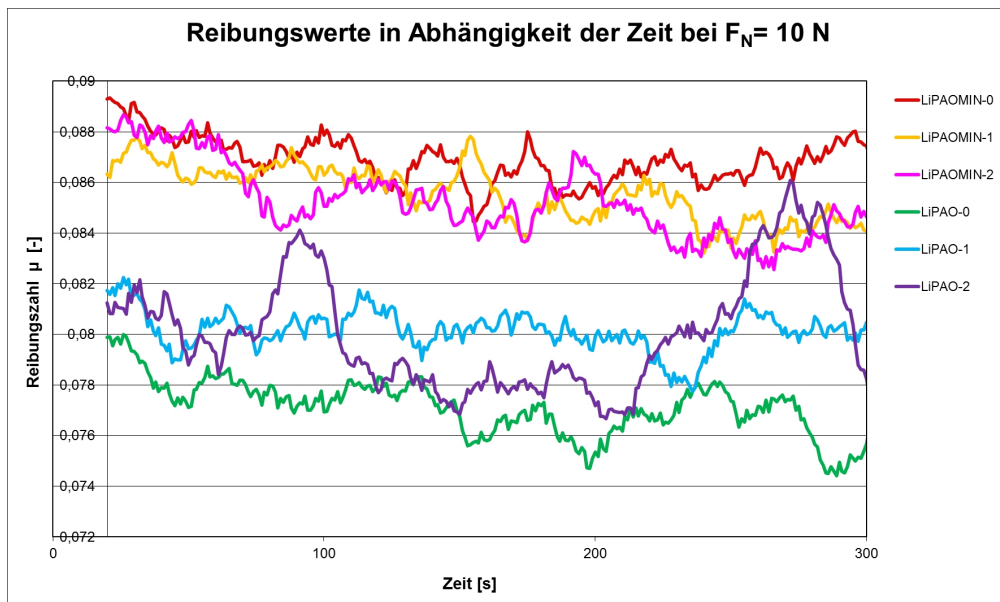


Abbildung A.1: Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 10\text{ N}$ [eigene Darstellung]

A. Abbildungen zu Reibwerten

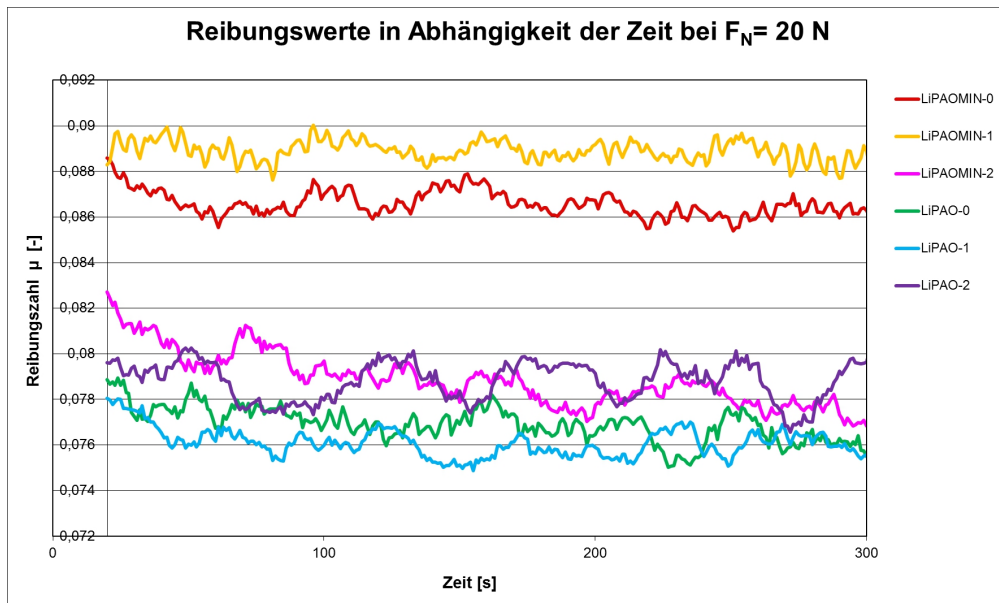


Abbildung A.2: Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 20\text{ N}$ [eigene Darstellung]

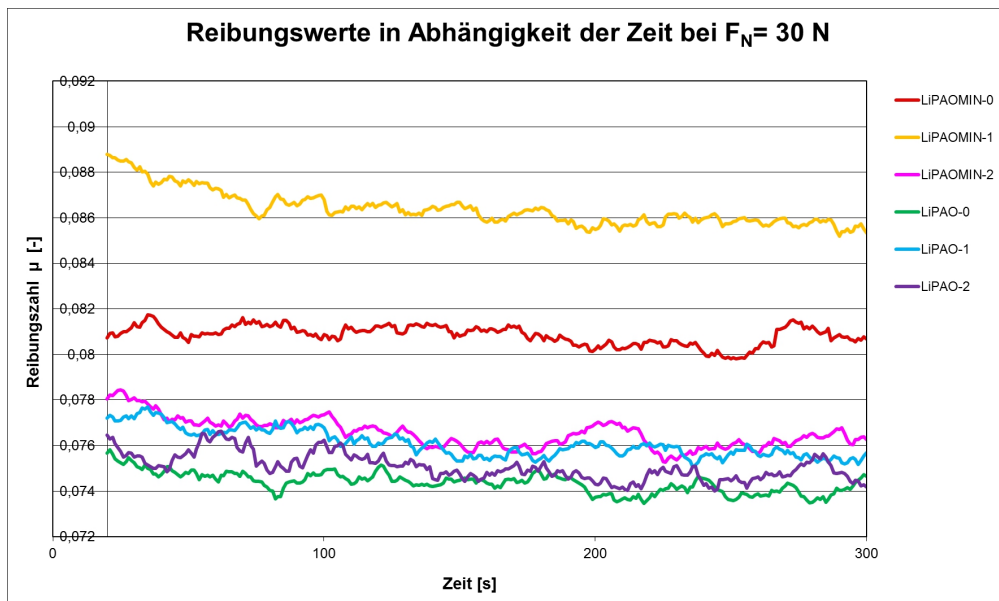


Abbildung A.3: Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der C45-Unterprobe bei $F_N = 30\text{ N}$ [eigene Darstellung]

A. Abbildungen zu Reibwerten

A.1.2 Unterprobenwerkstoff 9SMn28

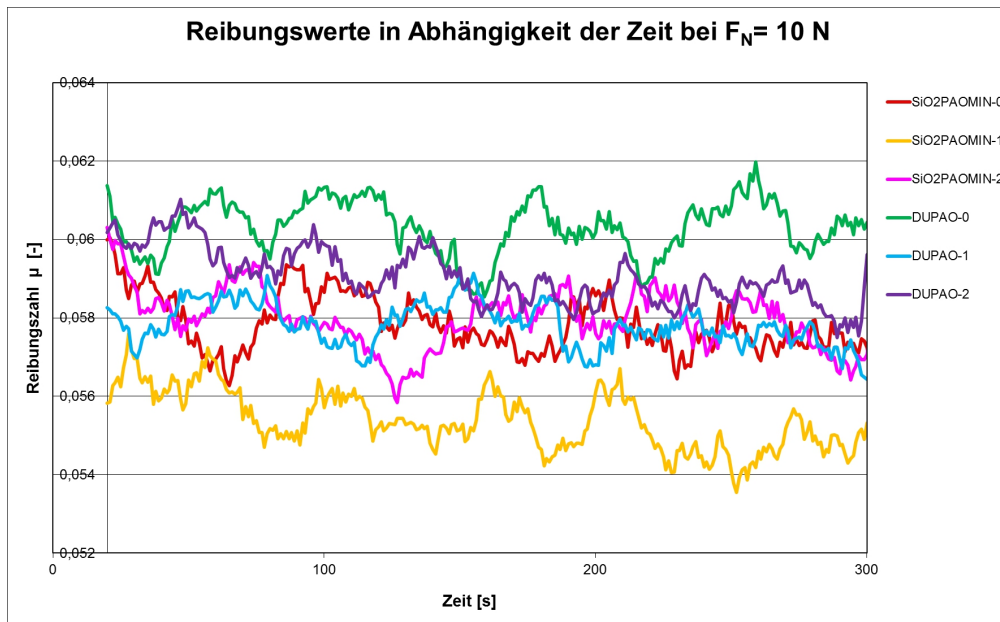


Abbildung A.4: Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 10\text{ N}$ [eigene Darstellung]

A. Abbildungen zu Reibwerten

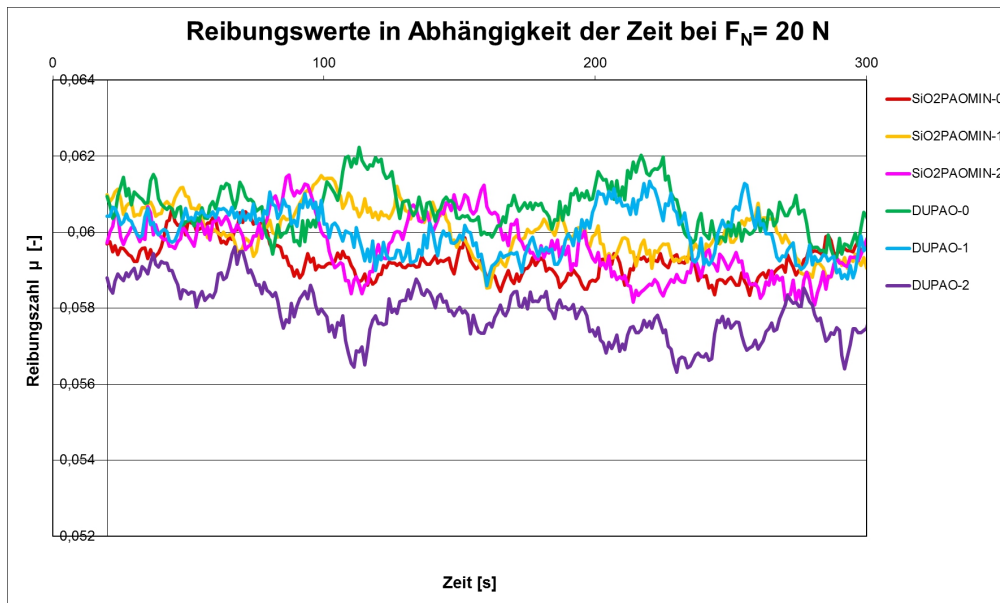


Abbildung A.5: Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 20\text{ N}$ [eigene Darstellung]

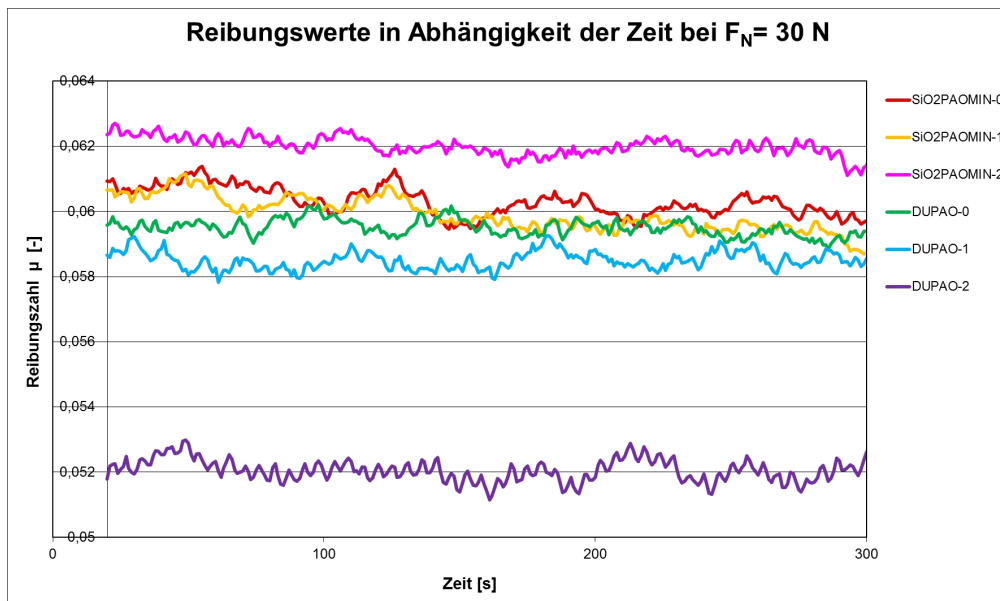


Abbildung A.6: Trendlinie des gleitenden Durchschnittes der Reibwerte der 9SMn28-Unterprobe bei $F_N = 30\text{ N}$ [eigene Darstellung]

A.2 Reibwerte in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes

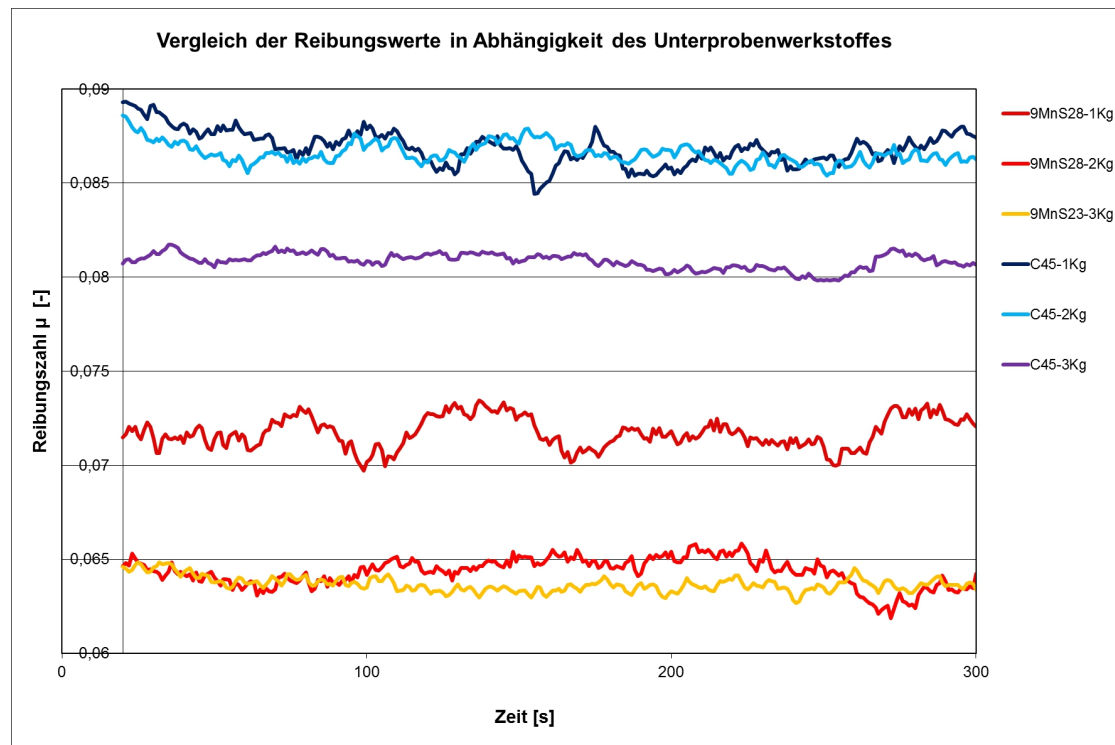


Abbildung A.7: Vergleich der Reibungswerte in Abhängigkeit des Unterprobenwerkstoffes
[eigene Darstellung]

A. Abbildungen zu Reibwerten

A.3 Reibwerte und Standardabweichung in Abhängigkeit des Versuchsdurchlaufs

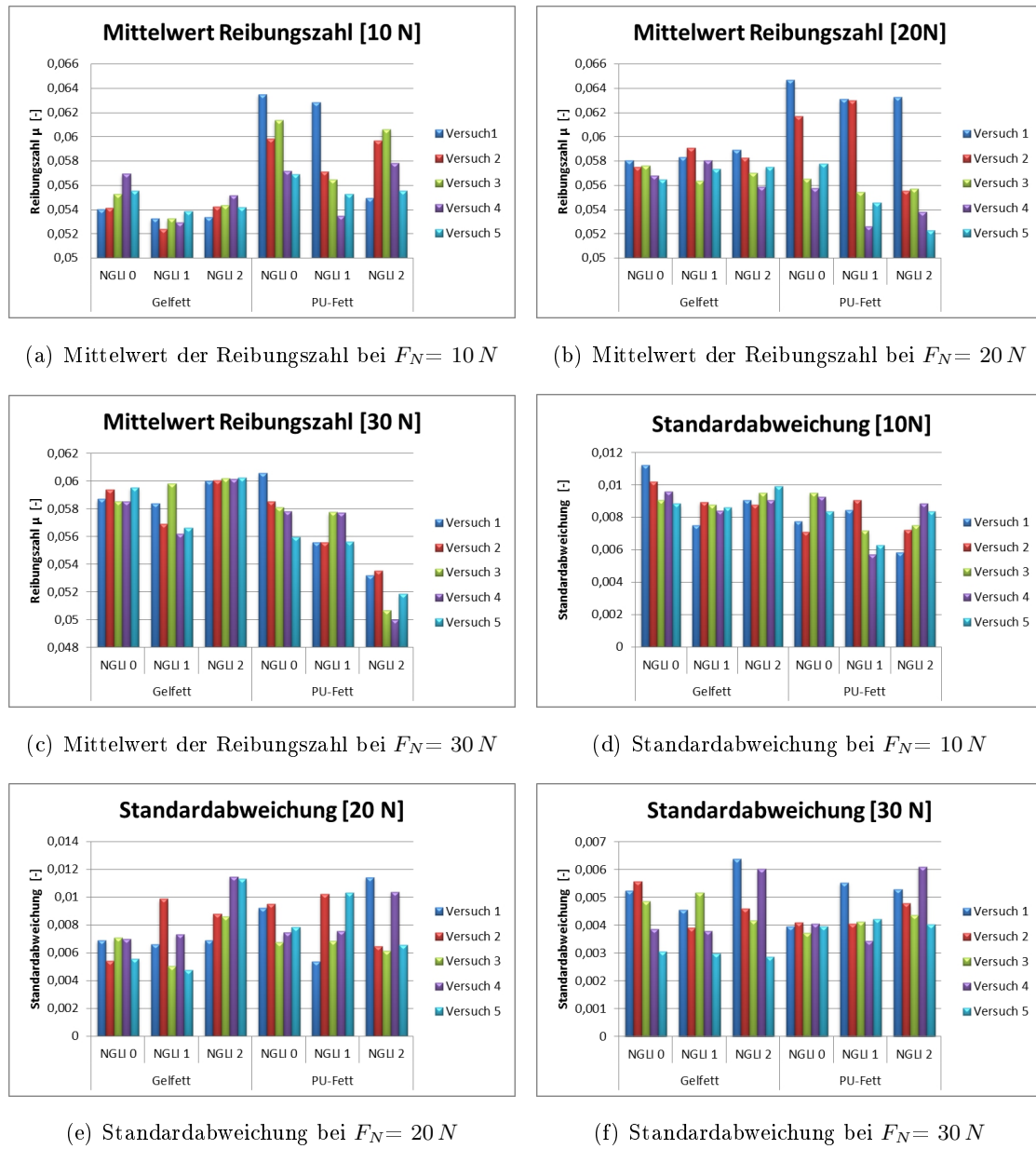
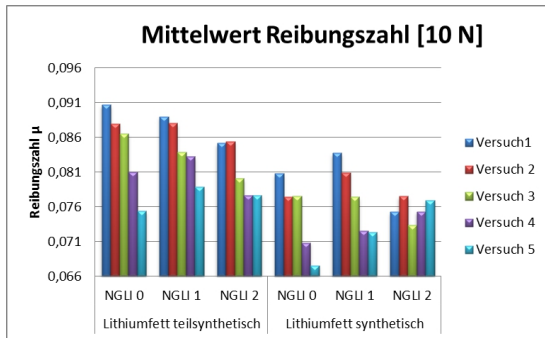
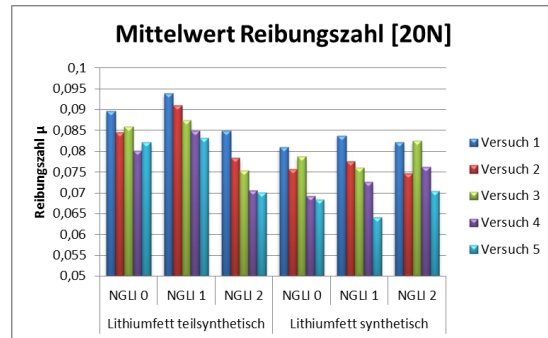


Abbildung A.8: Standardabweichung und Reibungszahl mit 9SMn28-Unterproben in Abhängigkeit des Versuchsdurchlaufs [eigene Darstellung]

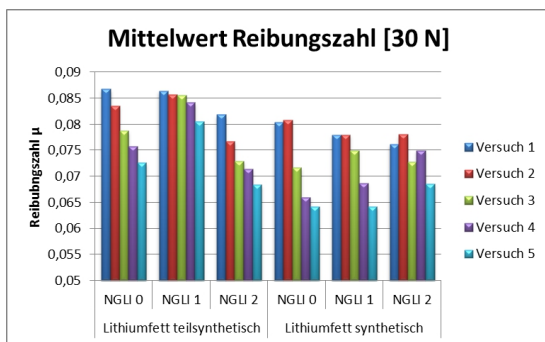
A. Abbildungen zu Reibwerten



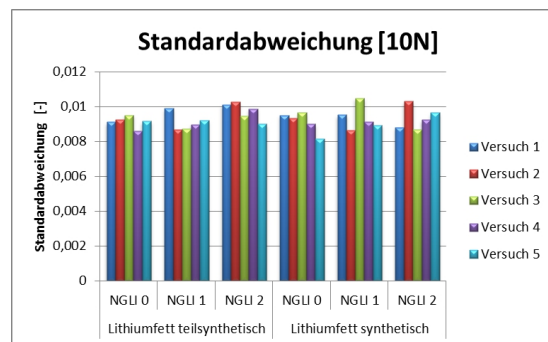
(a) Mittelwert der Reibungszahl bei $F_N = 10$ N



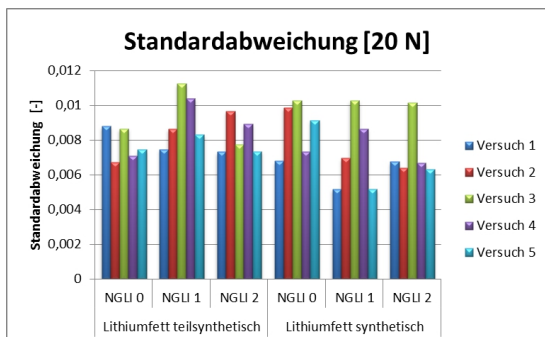
(b) Mittelwert der Reibungszahl bei $F_N = 20$ N



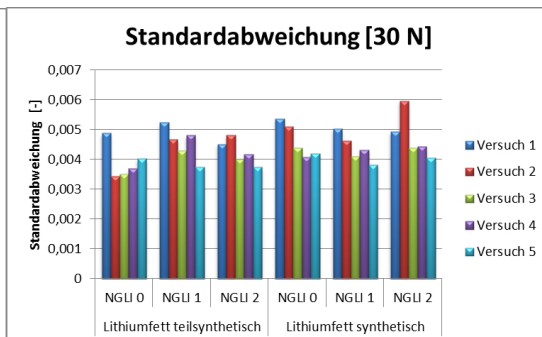
(c) Mittelwert der Reibungszahl bei $F_N = 30$ N



(d) Standardabweichung bei $F_N = 10$ N



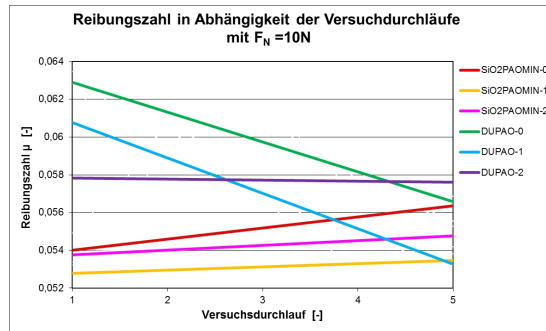
(e) Standardabweichung bei $F_N = 20$ N



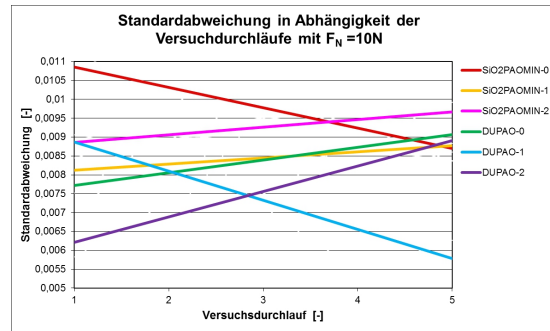
(f) Standardabweichung bei $F_N = 30$ N

Abbildung A.10: Standardabweichung und Reibungszahl in Abhängigkeit des Versuchsdurchlaufs [eigene Darstellung]

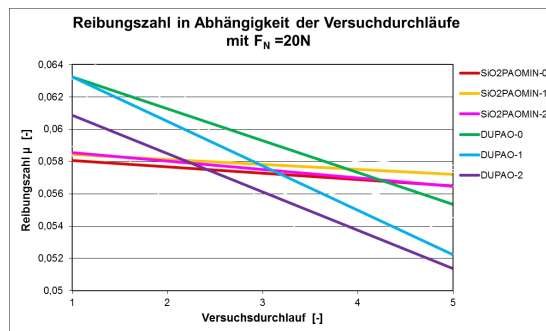
A. Abbildungen zu Reibwerten



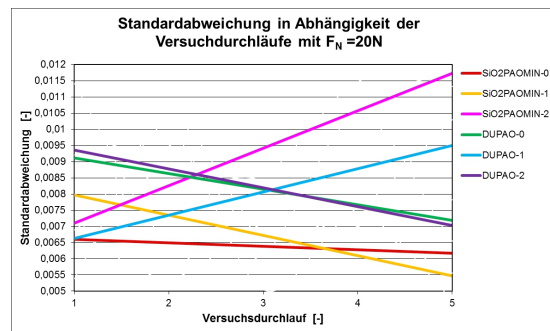
(a) Mittelwert der Reibungszahl bei $F_N = 10\text{ N}$



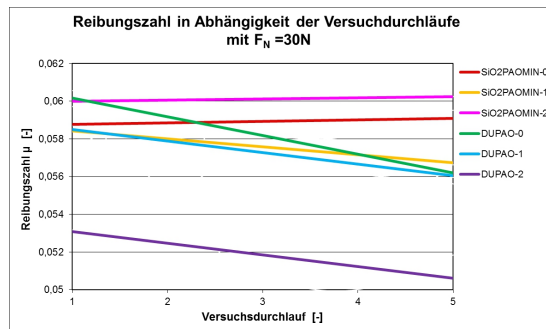
(b) Standardabweichung bei $F_N = 10\text{ N}$



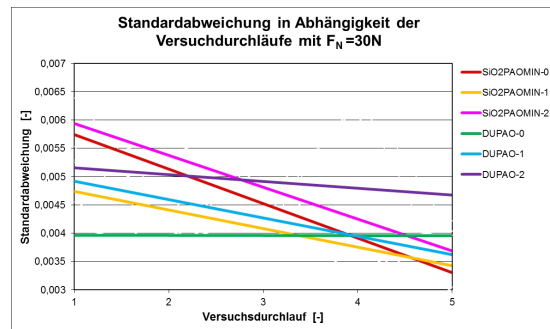
(c) Mittelwert der Reibungszahl bei $F_N = 20\text{ N}$



(d) Standardabweichung bei $F_N = 20\text{ N}$



(e) Mittelwert der Reibungszahl bei $F_N = 30\text{ N}$



(f) Standardabweichung bei $F_N = 30\text{ N}$

Abbildung A.9: lineare Trendlinie der Standardabweichung und Reibungszahl in Abhängigkeit mit 9SMn28-Unterprobe des Versuchsdurchlaufs [eigene Darstellung]

B Daten verwendeter Werkstoffe

B.1 Unterprobenwerkstoff 9SMn28

Tabelle B.1: *Werkstoffdaten 9SMn28 [23]*

Werkstoff-Datenblatt

Saarstahl - 11SMn30 (9SMn28)					
Werkstoff-Nr.:	Deutsche Norm:		Internationale Bezeichnungen:		
1.0715	DIN EN 10087 DIN EN 10277-3		SAE: ~ SAE 1213, ~ SAE 1215 JIS: ~ SUM 22, ~ SUM 23		
Werkstoffgruppe:	Automatenstahl				
Chemische Zusammensetzung: (Richtanalyse nach Saarstahl in %)	C	Si	Mn	P	S
	0,08	<0,05	1,10	0,07	0,30
Abweichende Analyse auf Anfrage					
Verwendung:	Automatenstahl für die Verwendung bei Massengütern für Verbindungselemente im Automobil- und Metallbau.				
Mechanische Eigenschaften:					
Lieferzustand:	Gewalzt und geschält (+SH)				
Dicke [mm]	>5 - 10	>10 - 16	>16 - 40	>40 - 63	>63 - 100
Härte [HB]	-	-	112 - 169	112 - 169	107 - 154
Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]	-	-	380 - 570	370 - 570	360 - 520
Lieferzustand:	Kaltgezogen (+C)				
Dicke [mm]	>5 - 10	>10 - 16	>16 - 40	>40 - 63	>63 - 100
Streckgrenze R _{p0,2} [N/mm ²]	min. 440	min. 410	min. 375	min. 305	min. 245
Zugfestigkeit R _m [N/mm ²]	510 - 810	490 - 760	460 - 710	400 - 650	360 - 630
Bruchdehnung A ₅ [%]	min. 6	min. 7	min. 8	min. 9	min. 9

B.2 Unterprobenwerkstoff C45

Tabelle B.2: Werkstoffdaten C45 [24]

Werkstoff-Datenblatt

Saarstahl - C45									
Werkstoff-Nr:	Alte Werksmarke:			Internationale Bezeichnungen:					
1.0503				BS:	C45, 50CS, 080M46				
				AFNOR:	C45, AF65C45, 1C45				
				SAE:	1045				
Werkstoffgruppe:	Vergütungsstahl nach DIN EN 10083								
Chemische Zusammensetzung: (Schmelzanalyse in %)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cr+Mo+Ni
	0,42 0,50	<0,40	0,50 0,80	<0,045	<0,045	<0,40	<0,10	0,40	<0,63
Verwendung:	Unlegierter Baustahl für Teile im allgemeinen Maschinenbau und Fahrzeugbau								
im normalgeglühten Zustand, +N:									
Durchmesser d [mm]	< 16	>16 – 100	>100 – 250						
Dicke t [mm]	< 16	16<t<100	100<t<250						
Streckgrenze R_{p0,2} [N/mm²]	min. 340	min. 305	min. 275						
Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	min. 620	min. 580	min. 560						
Bruchdehnung A₅ [%]	min. 14	min. 16	min. 16						
im vergüteten Zustand, +QT:									
Durchmesser d [mm]	< 16	>16 – 40	>40 – 100	>100 – 160	>160 – 250				
Dicke t [mm]	< 8	8<t<20	20<t<60	60<t<100	100<t<160				
Streckgrenze R_{p0,2} [N/mm²]	min. 490	min. 430	min. 370	-	-				
Zugfestigkeit R_m [N/mm²]	700 - 850	650 - 800	630 - 780	-	-				
Bruchdehnung A₅ [%]	min. 14	min. 16	min. 17	-	-				
Brucheinschnürung Z [%]	min. 35	min. 40	min. 45	-	-				

B.3 Wälzlagerkugelwerkstoff 100Cr6

Tabelle B.3: *Werkstoffdaten 100Cr6 [22]*

Werkstoff-Datenblatt

Saarstahl - 100Cr6					
WerkstoffNr:	Alte Werksmarke:	Internationale Bezeichnungen:			
1.3505	RW3	BS:	2S135, 535A99		
		AFNOR:	100C6		
		SAE:	52100		
Werkstoffgruppe:		Wälzlagerstahl nach EN ISO 683-17			
Chemische Zusammensetzung: (Richtanalyse in %)	C	Si	Mn	Cr	Sonst.
	1,00	0,25	0,35	1,50	-
Verwendung:		Wälzlagerstahl für Kugeln und Rollen aller Abmessungen, Ringe und Scheiben in der Regel bis 30 mm Fertigwanddicke.			
Warmformgebung und Wärmebehandlung:	Schmieden oder Walzen:	1100 - 850°C			
	Normalglühen:	870 - 900°C/Luft			
	Weichglühen:	780 - 800°C/Ofen			
	Härten:	800 - 830°C/Wasser			
	Härten:	830 - 870°C/Öl			
	Anlassen:	150 - 180°C			
Mechanische Eigenschaften:	weichgeglüht, +A:	max. 207 HB			
Behandlungszustand:	Gehärtet und angelassen				
Oberflächenhärte [HRC]:	ca. 62				

B. Daten verwendeter Werkstoffe

B.4 Ergebnisse der Spektralanalyse für Werkstoff C45

Tabelle B.4: Ergebnisse der Spektralanalyse für Werkstoff C45

FE-NI-LE	Fe-Niedriglegierter-Stahl										28.09.11 10:56
Probe-ID	Probe 2										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
1	0.458	0.168	0.617	.00970	0.0147	0.0631	0.0382	0.0141	.00308	0.148	
2	0.448	0.168	0.618	.00973	0.0134	0.0615	0.0382	0.0142	.00309	0.145	
3	0.448	0.171	0.622	0.0102	0.0146	0.0613	0.0387	0.0144	.00319	0.146	
	Nb	Ti	Al	Co	W	Pb	Sn	B	Fe		
1	.00218	.00818	0.0114	.00395	0.0122	<.00031	.00654	.00029	98.42		
2	.00188	.00802	0.0110	.00427	0.0159	<.00031	.00648	.00022	98.43		
3	.00228	.00804	0.0111	.00438	0.0155	<.00031	.00656	.00026	98.42		

FE-NI-LE	Fe-Niedriglegierter-Stahl										28.09.11 10:56
Probe-ID	Probe 2										
Mittelwert	von 3 Abfunkungen										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
Min											
X	0.451	0.169	0.619	.00988	0.0142	0.0620	0.0383	0.0142	.00312	0.147	
Max											
	Nb	Ti	Al	Co	W	Pb	Sn	B	Fe		
Min											
X	.00211	.00808	0.0112	.00420	0.0145	<.00031	.00652	.00026	98.43		
Max											

B.5 Ergebnisse der Spektralanalyse für Werkstoff 9SMn28

Tabelle B.5: Ergebnisse der Spektralanalyse für Werkstoff 9SMn28

FE-AUTOM	Fe-Automaten-Stahl										28.09.11 10:53
Probe-ID	Probe 1										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
1	0.131	<.00747	1.12	0.0735	0.317	0.155	0.114	0.0210	.00394	0.123	
2	0.139	<.00747	1.11	0.0774	0.318	0.158	0.117	0.0206	.00397	0.126	
3	0.132	<.00747	1.11	0.0766	0.324	0.158	0.117	0.0205	.00414	0.124	
	Nb	Ti	Al	Co	W	Pb	Sn	B	Fe		
1	.00276	.00050	.00123	0.0117	0.0146	0.0122	0.0149	.00084	97.88		
2	.00282	.00038	.00100	0.0130	0.0134	0.0132	0.0161	.00085	97.86		
3	.00247	.00050	.00130	0.0128	0.0163	0.0140	0.0160	.00138	97.86		

FE-AUTOM	Fe-Automaten-Stahl										28.09.11 10:53
Probe-ID	Probe 1										
Mittelwert	von 3 Abfunkungen										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
Min											
X	0.134	<.00747	1.11	0.0759	0.320	0.157	0.116	0.0207	.00402	0.125	
Max											
	Nb	Ti	Al	Co	W	Pb	Sn	B	Fe		
Min											
X	.00268	.00046	.00118	0.0125	0.0148	0.0131	0.0157	.00102	97.87		
Max											

B.6 Ergebnisse der Härtemessung

Tabelle B.6: *Ermittelte Werkstoffhärten nach Vickers HV 10 [eigene Darstellung]*

Scheibe für Schmierstoff	Vickershärte HV10	Werkstoff
<i>SiO₂</i> PAOMIN-0	142	9SMn28
<i>SiO₂</i> PAOMIN-1	141	9SMn28
<i>SiO₂</i> PAOMIN-2	141	9SMn28
LiPAOMIN-0	245	C45
LiPAOMIN-1	245	C45
LiPAOMIN-2	253	C45
LiPAO-0	253	C45
LiPAO-1	239	C45
LiPAO-2	239	C45
DUPAO-0	146	9SMn28
DUPAO-1	146	9SMn28
DUPAO-2	142	9SMn28

B.7 Ergebnisse der Oberflächenauheitsmessung

B.7.1 9SMn28-Unterprobe

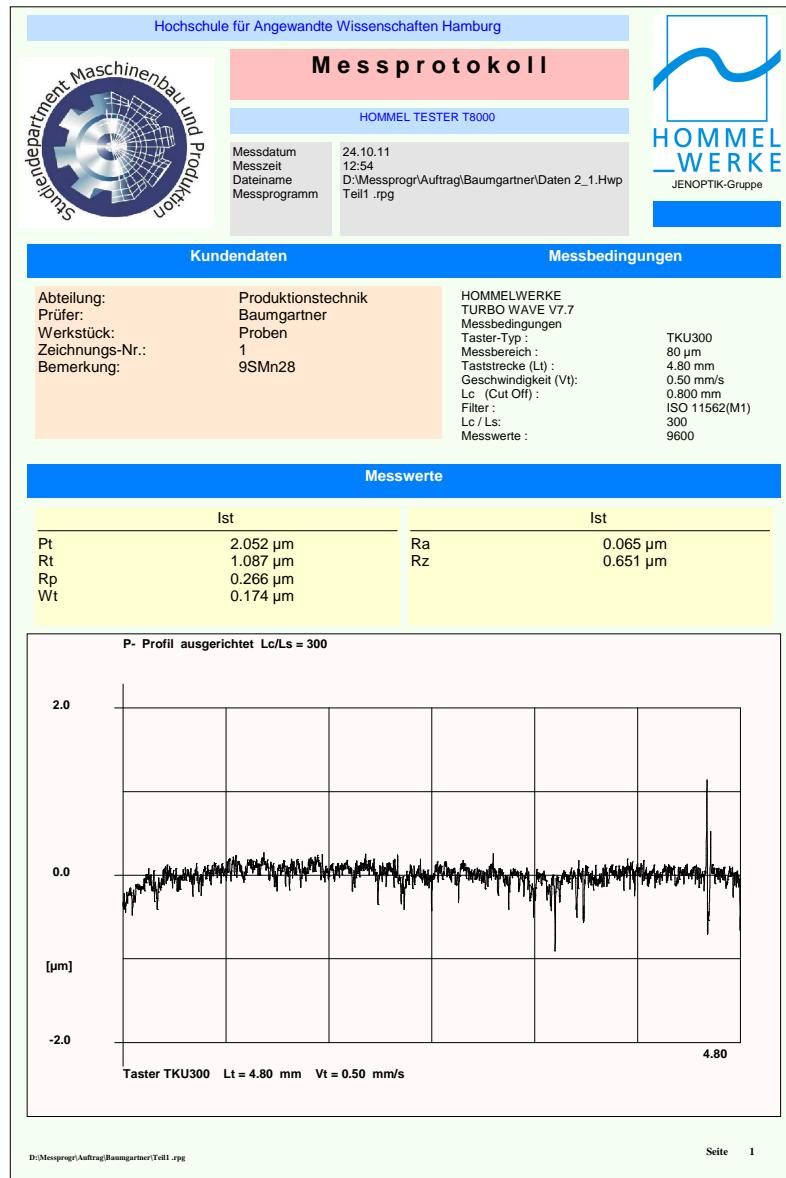


Abbildung B.1: Erste Messung der Oberflächenauheit der 9SMn28-Unterprobe [eigene Darstellung]

B. Daten verwendeter Werkstoffe

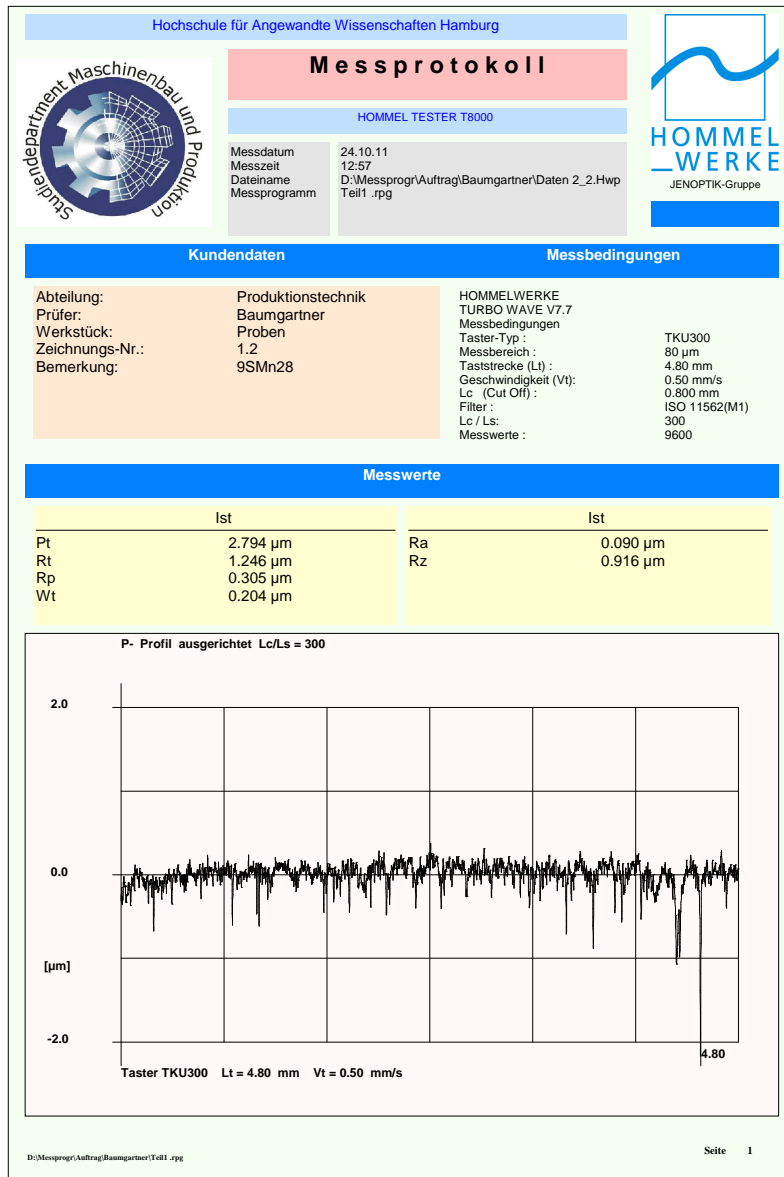


Abbildung B.2: Zweite Messung der Oberflächenrauheit der 9SMn28-Unterprobe [eigene Darstellung]

B. Daten verwendeter Werkstoffe

B.7.2 C45-Unterprobe

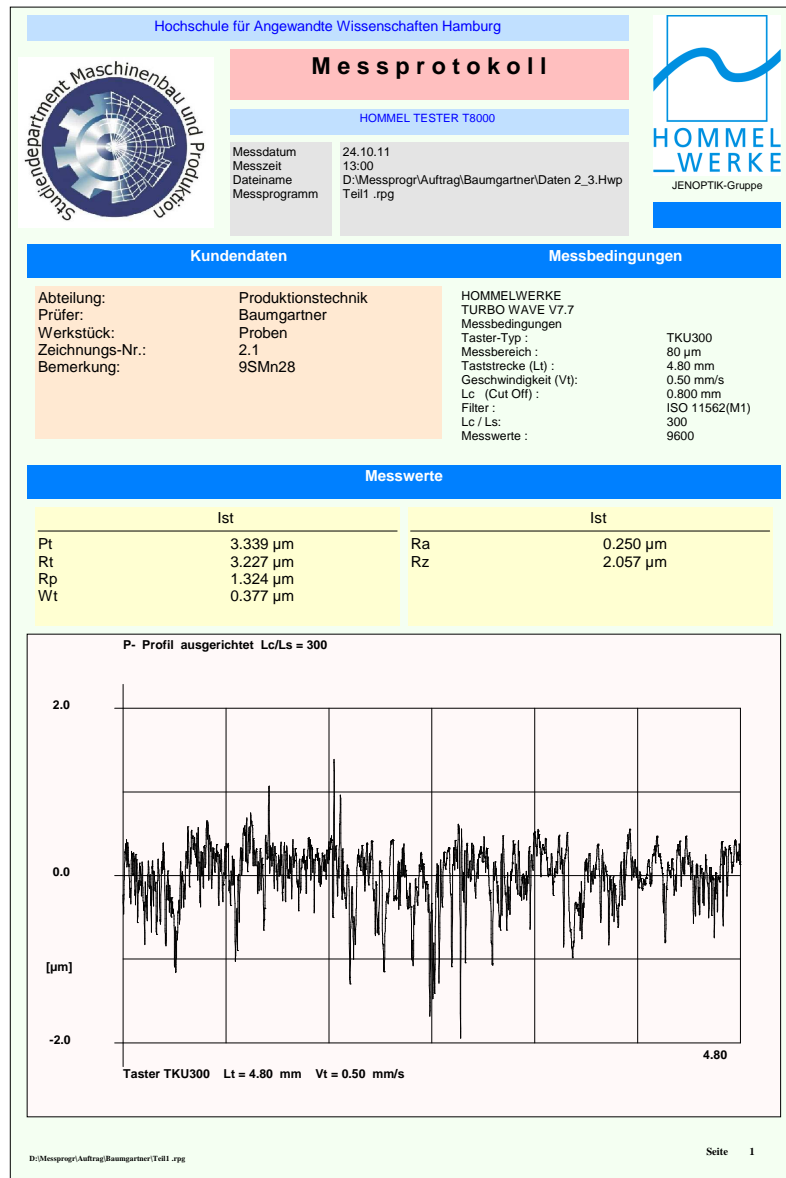


Abbildung B.3: Erste Messung der Oberflächenauflösung der C45-Unterprobe [eigene Darstellung]

B. Daten verwendeter Werkstoffe

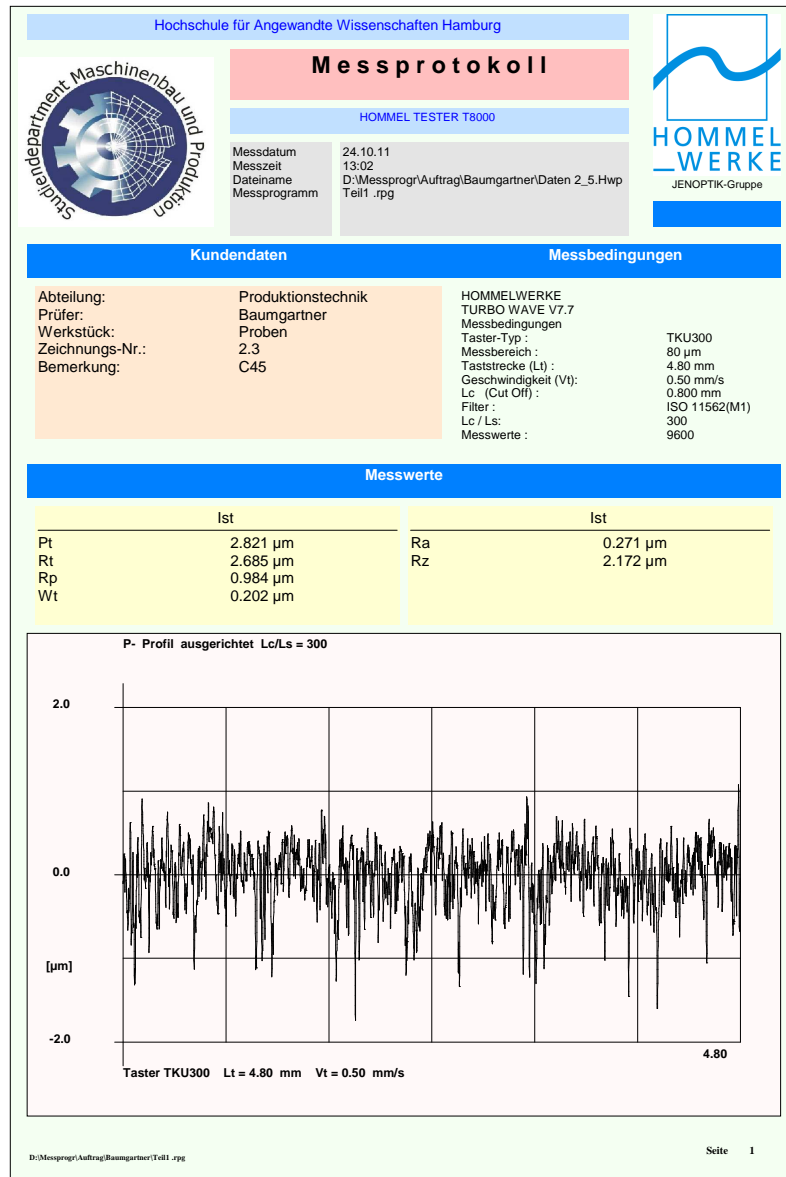


Abbildung B.4: Zweite Messung der Oberflächenrauheit der C45-Unterprobe [eigene Darstellung]

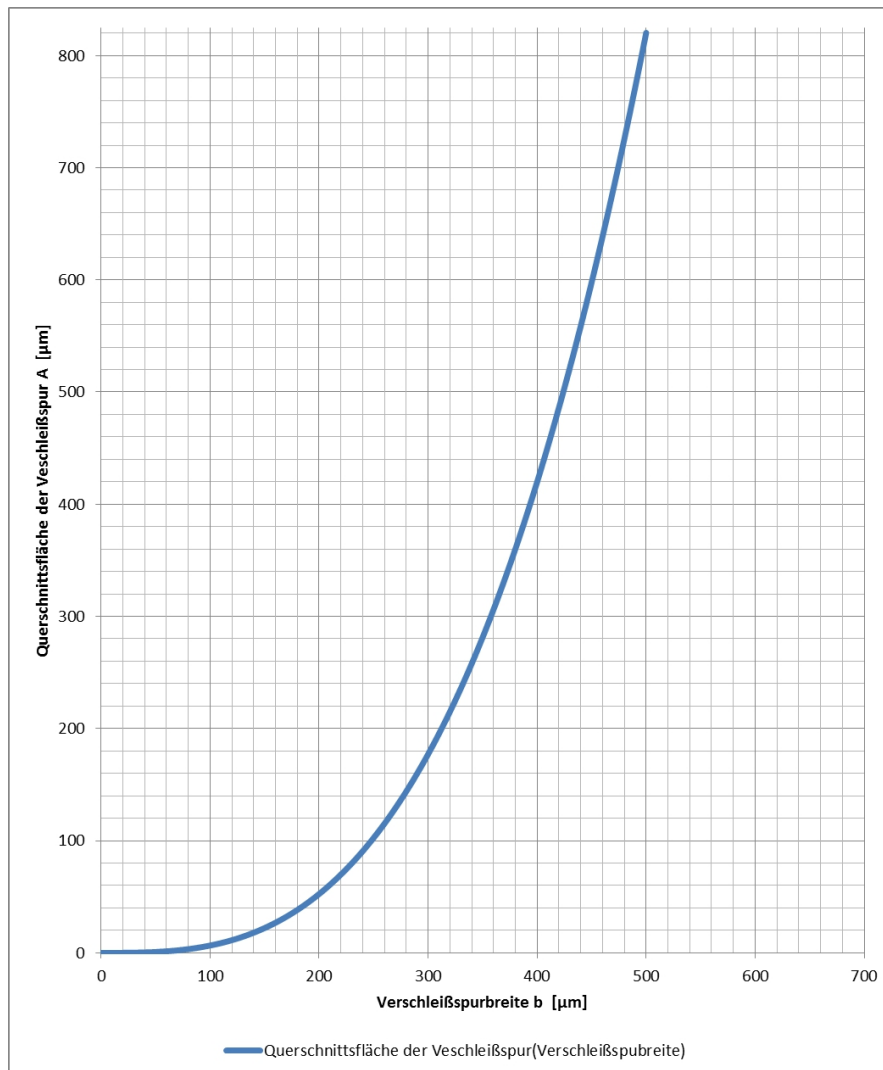


Abbildung B.5: Zusammenhang von Verschleißspurbreite und Querschnittsfläche der Verschleißspur [eigene Darstellung]

$$A = \frac{r^2}{2} \cdot (\sin(\alpha) - \alpha) \quad (\text{B.1})$$

A = Querschnittsfläche der Verschleißspur

α = Mittelpunktswinkel

r = Wälzlagerkugelradius

Danksagung

Wir möchten Herrn Professor Erik Kuhn sehr für die Ermöglichung dieser Diplomarbeit und die interessante Aufgabenstellung danken. Herrn Dipl.-Ing. Niels Eiben, Herrn M.Eng. Dipl.-Ing. Martin Fiedler sowie Herrn Dipl.-Ing. Thomas Rieling danken wir für die Unterstützung bei theoretischen Fragestellungen.

Dank richtet sich auch an die Mitarbeiter des IWS Instituts Herrn Heinrich Strübig und Frau Vera Liedtke-Scheffler, die uns die Möglichkeit boten unsere Verschleißmessungen durchzuführen.

Ebenfalls bedanken möchte wir uns bei Herrn Dipl.-Ing. Klaus Opalka, der mit uns die Rauheitsmessungen der Werksückeroberflächen durchgeführt hat.

Unseren Familien möchten für die Unterstützung danken, ohne die dieses Studium und diese Arbeit nicht möglich gewesen wären.

Kapitelaufteilung

1. Einleitung	Peter Baumgartner / Götz Klucker
2. Theoretische Grundlagen	Peter Baumgartner
3. Grundlagen der Rheologie	Götz Klucker
4. Schmierfette	Götz Klucker
5. Versuchsaufbau und -durchführung	Peter Baumgartner / Götz Klucker
6. Versuchsauswertung	Peter Baumgartner / Götz Klucker
7. Fazit und Ausblick	Peter Baumgartner / Götz Klucker