

Tribologische Analysen eines hochbelasteten Rastmechanismus unter unterschied- lichen kinematischen Bedingungen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Erik Schimrosczyk

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2020

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Scherge

Korreferentin: Prof. Dr. rer. nat. Astrid Pundt

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen AG.

Kurzfassung

Fragestellung

Diese Arbeit betrachtet das Verschleißverhalten eines hochbelasteten Rastsystems unter Schmierung mit Motorenölen unterschiedlicher Viskositätsklassen. Ziel ist das Verständnis des Systemverhaltens bei den gewählten Material- und Schmierstoffkombinationen.

Das System wird aus einer federbelasteten Kugel, welche über eine Kontur zwischen zwei Endlagen oszilliert, gebildet. Bei einem Wechsel zwischen den Endlagen muss die Kugel in die Feder gedrückt und damit die Rastkraft überwunden werden. Dabei wirken im Kontakt hohe Hertzsche Pressungen bis 8 GPa. Die Kinematik der Kugel während der Umschaltung ist konstruktionsbedingt unbestimmt und kann zwischen einem Wälzen (*Rollen mit Gleitanteil*) und einem vollständigen Gleiten (*keine Kugelrotation*) schwanken.

Material und Methoden

Als Kugelmateriale werden Wälzlagerstahl und heißisostatisch gepresstes Siliciumnitrid (Si_3N_4) betrachtet. Als Gegenkörper agieren niedriglegierte Stähle, die entweder herkömmlich im Ofenprozess oder durch einen Laserstrahl gehärtet wurden. Es ergeben sich damit verschiedene *Metall-Metall-* und *Metall-Keramik-Paarungen*.

Zur Simulation einer Lebensdauerbelastung wird die federbelastete Kugel in einem Dauerversuch mit einer Frequenz von 20 Hz über die Kontur oszilliert. Für alle Versuche erfolgt eine Echtzeitmessung von Reibung und Verschleiß. Neben einer Kategorisierung der Versuchsdaten auf Basis des tribologischen Verhaltens erfolgen umfassende Analysen mittels REM und EDX sowie FIB-Schnitte an den Elementen des tribologischen Systems.

Ergebnisse

Bei Verwendung der metallischen Paarung (*Kontakt zwischen gehärteten Stählen*) wird der Verschleiß hauptsächlich durch die Schmierungssituation bestimmt. Mit abnehmender Schmierstoffverfügbarkeit steigen Reibung und Verschleiß. Durch sukzessive Verschlechterung der Schmierung von einem Ölbad zu einer Mangelschmierung kann ein fließender Übergang der typischen Verschleißmechanismen erreicht werden. Die Verschleißraten steigen dabei von Werten *kleiner 1 $\mu\text{m}/\text{h}$* bei Oberflächenermüdung über Abrasionsverschleiß mit *etwa 15 $\mu\text{m}/\text{h}$* bis zu Werten *größer 350 $\mu\text{m}/\text{h}$* bei adhäsivem Verschleiß.

Im Kontakt zwischen Metall und Keramik führt die geringe Adhäsionsneigung von Si_3N_4 allgemein zu geringen Reibwerten, die einen höheren Gleitanteil der Bewegung begünstigen. Die gleitende Bewegung der Keramikugel bedingt bei bestimmten Material- und Schmierstoffkombinationen extrem hohe abrasive Verschleißraten (*$\sim 300 \mu\text{m}/\text{h}$*) am metallischen Gegenkörper. Die kritischen Kombinationen werden betrachtet und Hypothesen zu den Ursachen aufgestellt.

Hoher Verschleiß wird im *Metall-Metall-Kontakt* durch unzureichende Schmierung, im *Metall-Keramik-Kontakt* durch eine gleitende Bewegung der Si₃N₄-Kugel verursacht. Unter optimalen Bedingungen (*wälzende Bewegung der Kugel und ausreichende Beölung*) kann für alle Varianten ein degressiver Verschleißverlauf und geringer Gesamtverschleiß erreicht werden.

Die hohen tribologischen Lasten bewirken unter fast allen Versuchsbedingungen eine starke Veränderung der oberflächennahen Mikrostruktur und die Entstehung von nanokristallinem Gefüge.

Schlussfolgerungen

Das komplexe Verschleißverhalten des betrachteten Rastsystems konnte für die untersuchten Material- und Schmierstoffkombinationen vollständig eingeordnet werden. Neben der intensiven Betrachtung des kinematischen Verhaltens (*Roll- und Gleitanteil der Kugelbewegung*) war hierzu eine Kategorisierung der Versuche anhand des tribologischen Verhaltens notwendig. 4 Kategorien beschreiben den Einfluss der Kinematik auf Basis der Verschleißraten. 5 Kategorien bilden den Einfluss der Schmierung anhand der Reibwerte ab.

Mit dieser Systematik konnten die entscheidenden Korrelationen zwischen Versuchsdaten und Analyseergebnissen herausgearbeitet werden. Die Kategorien können den klassischen Verschleißmechanismen zugeordnet werden und bilden die Basis für ein umfassendes Systemverständnis.

Abstract

Objective

This thesis evaluates the tribological performance of a mechanical locking mechanism under high contact loads when lubricated with engine oils of different viscosity grades. The primary objective is to identify the tribological behavior of different combinations of material and lubrication.

The system consists of a ball preloaded by a spring that oscillates over a contour with a frequency of 20 Hz. During the oscillation, the latching force leads to a high dynamic loading of the contact between ball and contour. The Hertzian pressure reaches values of up to 8 GPa. The kinematic behavior of the ball during oscillation is undefined and can vary between rolling and pure sliding.

Materials and Methods

Hot isostatically processed Silicon nitride balls and 100Cr6 (AISI 52100) balls were used. The contours were made from various low-alloy steels. Heat treatment of the contour material was either through hardening or local laser hardening of the surfaces. The material combinations can be divided into *metal-metal contacts* and *metal-ceramic contacts*.

Friction and wear performance were measured online. Depending on the tribological behavior, the tests were divided into different categories. Analyses were carried out with a scanning electron microscope, energy dispersive X-ray spectroscopy and focused ion beam.

Results

In the contact between metal ball and metal contour, friction and wear are mainly determined by the lubrication. Within the transition from full lubrication to a starved contact, the typical wear mechanism changes from surface fatigue to abrasion and finally to severe adhesion. This process is accompanied by a gradual increase in friction and wear rate. The measured wear rates reached values in the range of $<1 \mu\text{m}/\text{h}$ (surface fatigue) up to $350 \mu\text{m}/\text{h}$ (adhesion).

The contact between metal and ceramic is governed by the kinematic behavior. A pure sliding of the Si_3N_4 -ball leads to extreme high abrasive wear rates ($\sim 300 \mu\text{m}/\text{h}$) on the metallic counterpart for most combinations of material and lubrication. The critical combinations are summarized and hypotheses on the causes are discussed.

Under ideal conditions (meaning rolling ball movement and sufficient lubrication), low wear and a degressive wear rate can be achieved. High wear rates for the *metal-metal contact* are caused by insufficient lubrication. For *metal-ceramic contacts*, a sliding movement of the Si_3N_4 -ball leads to high wear rates.

The analysis of the near surface microstructure showed high deformation and a nanocrystalline surface layer for most of the inspected specimens.

Conclusions

With detailed kinematic considerations concerning the rotation of the ball, extensive trials and a categorization of the achieved tribological data into nine categories, a profound understanding of the locking mechanism could be achieved. Four categories are used to describe the kinematic behavior and five categories classify the influence of different lubrication. The well-known wear mechanisms are applied to the categories in order to understand the tribological system.

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen einer Industriepromotion innerhalb der Volkswagen AG. Neben dem spannenden Thema war es vor allem die konstruktive Zusammenarbeit mit vielen Personen, die meine Promotionszeit zu einer wertvollen Erfahrung gemacht haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Scherge für die Übernahme der Betreuung, das fortlaufende Interesse am Thema und viele entscheidende Hinweise bei der Bearbeitung. Ebenso möchte ich Frau Prof. Pundt für die kurzfristige Übernahme des Korreferats, den freundlichen Kontakt und die Hilfestellungen zur Überwindung der organisatorischen Hürden danken.

Ein großes Danke an Jürgen Olfe für die unzähligen fachlichen und überfachlichen Gespräche, seine unbegrenzte Motivation für wissenschaftliche Fragestellungen und wissenschaftliche Arbeitsweisen, die Fähigkeit, andere zu begeistern und die betriebliche Betreuung während der Zeit der Promotion.

Ohne das Expertenwissen zur Entwicklung von tribologischer Prüftechnik von Werner Stehr, Thomas Witt, Stefan Schelhammer und Willy Klink wäre die Arbeit in dieser Form nicht zustande gekommen. Vielen Dank für die tolle Zusammenarbeit. An dieser Stelle auch ein spezielles Danke an Willy Klink und Willy Peter für die Durchführung von annähernd 200 Versuchen.

Danke an Dominic Linsler für lehrreiche Stunden im FIB und die Erstellung von über 40 FIB-Schnitten.

Marko Seifert möchte ich dafür danken, dass er sein umfangreiches Wissen zur Wärmebehandlung von Stahl mit mir geteilt hat. Ebenso gilt mein Dank Christian Greiner für das Gespräch zur Entstehung von nanokristallinem Gefüge.

Des Weiteren bin ich vielen Kollegen zu großem Dank verpflichtet:

Vielen Dank an Sandra, Anne, Isabel und Tobi für Einweisungen in unsere Analysemethoden, Hinweise zu allen Fragen der Werkstofftechnik, Unterstützung bei einzelnen Analysen und die tolle Atmosphäre im Entwicklungslabor.

Danke an Christian dafür, dass er alles kritisch hinterfragt und damit oft den Kern der Sache trifft.

Zusätzlich geht mein besonderer Dank an Markus für die Beantwortung aller chemischen Fragestellungen und die hilfreichen Kommentare zum entscheidenden Zeitpunkt.

Danke an Jens für seine Unterstützung in allen Fragen der Datenauswertung und an Philipp für die Hilfestellungen in Matlab.

Danke an Tonio, Felix, Dennis, Dirk, Robert, Norman, Jens, Murat und Kai für die Beantwortung unzähliger Fragen, wertvolle experimentelle und konstruktive Hinweise, das Prüfprogramm zur Konturmessung und eine allgemeine Vorbildfunktion was Motivation, Arbeitsmoral und Arbeitsweise betrifft.

Danke auch an meine Studenten, die mich bei Aufbau und Inbetriebnahme der Prüftechnik und Betreuung der Versuche unterstützt haben; Sebastian Wandel, Elisabeth Schultze, Eduard Schneider und Willy Peter.

Außerdem möchte ich allen Personen danken, welche die Rahmenbedingungen für ein gutes wissenschaftliches Arbeiten innerhalb eines Industrieunternehmens gesetzt haben. Insbesondere gilt mein Dank Stefan Lieske, Marc Hladun, Helge Bergmann, Frank Loock, Dietmar Meister, Murat Saral und Kai Hartel.

Danke auch an alle namentlich nicht genannten, die mich sonst in irgendeiner Form durch Korrekturen, Motivation und Rückhalt unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	I
ABSTRACT	III
VORWORT	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	X
FORMELZEICHENLISTE	XIV
TABELLENVERZEICHNIS	XVI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XVII
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER TECHNIK	3
2.1 EIGENSCHAFTEN VON TRIBOLOGISCHEN SYSTEMEN	3
2.1.1 TRIBOLOGIE - DEFINITIONEN	3
2.1.2 TRIBOLOGISCHE OBERFLÄCHEN IM KONTAKT	5
2.1.3 ADHÄSION ALS REIBUNGSURSACHE.....	6
2.1.4 KONTAKTMECHANIK: NOMINELLE UND REALE KONTAKTFLÄCHE	7
2.1.5 RELEVANTE MATERIALPARAMETER	9
2.1.6 MATERIALANTWORT AUF DIE TRIBOLOGISCHE BELASTUNG	11
2.1.7 MIKROSTRUKTUR: NANOKRISTALLINES GEFÜGE UND DURCHMISCHUNG.....	12
2.1.8 SCHMIERUNG UND GRENZREIBUNG	16
2.1.9 ENERGETISCHE BETRACHTUNG DER REIBUNG	19
2.1.10 THEORIE DES DRITTEN KÖRPERS.....	22
2.1.11 VERSCHLEIßSCHUTZADDITIVE	23
2.2 VERSCHLEIßMECHANISMEN	24
2.2.1 ADHÄSION	25
2.2.2 ABRASION.....	26
2.2.3 OBERFLÄCHENZERRÜTTUNG.....	28
2.2.4 TRIBOCHEMISCHE REAKTION.....	30
2.3 MIKROSKOPISCHE BETRACHTUNG DER VERSCHLEIßMECHANISMEN.....	31
2.4 TRIBOLOGIE DER GENUTZTEN MATERIALIEN.....	33
2.4.1 TRIBOLOGIE VON WÄLZLAGERSTAHL	34
2.4.2 TRIBOLOGIE VON SILICIUMNITRID-METALL-PAARUNGEN	36
3 MATERIAL UND METHODEN	41
3.1 TRIBOLOGISCHES SYSTEM: RASTMECHANISMUS	41
3.2 MATERIAL	42
3.2.1 METALLE: DURCHGEHÄRTETE UND RANDSCHICHTGEHÄRTETE STÄHLE	42
3.2.2 KERAMIK: SILICIUMNITRID (Si_3N_4).....	44
3.2.3 SCHMIERSTOFFE.....	45
3.3 TRIBOLOGISCHE PRÜFTECHNIK	46
3.4 ANALYSEMETHODEN	47
4 MECHANISCHE BETRACHTUNG DES TRIBOSYSTEMS	49
4.1 KINEMATISCHE BETRACHTUNGEN.....	49
4.2 KONTAKTBELASTUNG	54
5 VERSUCHSBEDINGUNGEN UND VERSUCHSMATRIX	55
6 ERGEBNISSE: TRIBOLOGISCHE PRÜFUNG	57
6.1 VERSUCHSABLAUF UND AUSWERTUNG	57
6.1.1 ECHTZEIT-MESSUNG DES SYSTEMVERHALTENS	57
6.1.2 INDIKATOREN FÜR DIE TRIBOLOGISCHEN PROZESSE AM VERSUCHSENDE	59

6.2	ERGEBNISSE: METALL-METALL-KONTAKT (M-M)	60
6.2.1	KONTURVERSCHLEIB: EINFLUSS DER INITIALEN ÖLMENGE	60
6.2.2	KONTURVERSCHLEIB: EINFLUSS KONTURMATERIALIEN UND ÖLSORTE	62
6.2.3	KONTURVERSCHLEIB: EINFLUSS VERSUCHSZEIT	63
6.2.4	KONTURVERSCHLEIB: EINTEILUNG IN KATEGORIEN.....	64
6.2.5	SONDERVERSUCHE - GESPERRTE KUGELROTATION	66
6.2.6	KUGELVERSCHLEIB (STANDARDVERSUCHE UND GESPERRTE ROTATION).....	70
6.3	ERGEBNISSE: METALL-KERAMIK-KONTAKT (M-K)	72
6.3.1	KONTURVERSCHLEIB: STOCHASTISCHES VERHALTEN.....	72
6.3.2	KONTURVERSCHLEIB: EINTEILUNG IN KATEGORIEN.....	75
6.3.3	SONDERVERSUCHE - GESPERRTE KUGELROTATION	77
6.3.4	KUGELVERSCHLEIB	79
6.4	KURZZUSAMMENFASSUNG: TRIBOLOGISCHE PRÜFUNG	81
6.5	ERGÄNZENDE VERSUCHE.....	82
6.5.1	VARIATION DES HÄRTEVERFAHRENS	82
6.5.2	EINFLUSS DER SYSTEMTEMPERATUR.....	84
6.5.3	HÄRTEVERLÄUFE INNERHALB DER KONTUR	85
7	ERGEBNISSE: ANALYSEN NACH VERSUCH.....	87
7.1	ANALYSEN: METALL-METALL-KONTAKT	88
7.1.1	KATEGORIE: M-M: X	88
7.1.2	KATEGORIE: M-M: A	90
7.1.3	KATEGORIE: M-M: B	91
7.1.4	KATEGORIE: M-M: C	92
7.1.5	KATEGORIE: M-M: D	93
7.1.6	KATEGORIE: M-M: Y	94
7.1.7	ANALYSE DER VERSCHLEIBPASTE	95
7.1.8	ZUSAMMENFASSUNG REM	96
7.1.9	ZUSAMMENFASSUNG EDX.....	97
7.1.10	ENTSTEHUNGSGESCHWINDIGKEIT VON ÖLREAKTIONSSCHICHTEN	99
7.2	ANALYSE: METALL-KERAMIK-KONTAKT.....	100
7.2.1	KATEGORIE: M-K: X.....	100
7.2.2	KATEGORIE: M-K: Y.....	101
7.2.3	KATEGORIE: M-K: Z.....	102
7.2.4	ZUSAMMENFASSUNG EDX.....	103
7.3	KONTAKTBERECHNUNG MIT GELAUFENEN KONTUREN.....	105
7.4	FIB-SCHNITTE: MIKROSTRUKTUR AN DER OBERFLÄCHE.....	107
8	DISKUSSION.....	111
8.1	METALL-METALL-KONTAKT: HAUPTINFLUSS SCHMIERUNG.....	112
8.1.1	VERGLEICH VON KUGEL- UND KONTURVERSCHLEIB	113
8.1.2	VERSCHLEIBENTWICKLUNG.....	115
8.1.3	OBERFLÄCHENANALYSE UND VERSCHLEIBMECHANISMEN.....	116
8.1.4	EINFLUSS KONTURMATERIAL UND ÖLSORTE	122
8.1.5	TRIBOCHEMIE.....	122
8.1.6	KURZZUSAMMENFASSUNG (M-M)	124
8.2	METALL-KERAMIK-KONTAKT: HAUPTINFLUSS KINEMATIK	126
8.2.1	KUGELKINEMATIK ALS URSACHE FÜR EXTREME VERSCHLEIBUNTERSCHIEDE	127
8.2.2	OBERFLÄCHENANALYSE: KONTUR.....	133
8.2.3	OBERFLÄCHENANALYSE KUGEL	135
8.2.4	VERGLEICH VON KUGEL- UND KONTURVERSCHLEIB.....	136
8.2.5	KURZZUSAMMENFASSUNG (M-K).....	137
8.3	GESAMTSYSTEM	138

8.3.1	KONTURVERSCHLEIß – VERGLEICH M-M UND M-K	138
8.3.2	KUGELKINEMATIK UND INSTABILES SYSTEMVERHALTEN	139
8.3.3	EINFLUSS DER WÄRMEBEHANDLUNG AUF DIE ROBUSTHEIT DES SYSTEMS	143
8.3.4	VERSCHLEIßMECHANISMEN UND OBERFLÄCHENANALYSE	145
8.3.5	KUGELVERSCHLEIß – VERGLEICH M-M UND M-K	151
8.3.6	ANALYSE DER MIKROSTRUKTUR (FIB)	152
8.3.7	ZUSAMMENFASSUNG SYSTEMVERHALTEN	156
9	ZUSAMMENFASSUNG	163
	LITERATURVERZEICHNIS	167
	ANHANG	177
A	FARB- UND SYMBOLVERZEICHNIS	178
A1	MATERIALIEN UND MATERIALPAARUNGEN	178
A2	SCHMIERSTOFFE UND SCHMIERSTOFFMENGEN	178
A3	VERSCHLEIßKATEGORIEN	179
B	RASTKONTURVERSCHLEIßMESSUNG – MESSGENAUIGKEIT	180
C	UMRECHNUNG IN VOLUMETRISCHEN VERSCHLEIß	181
D	VOLLSTÄNDIGE EDX-DATEN	182
E	REM-AUFNAHMEN: ÜBERSICHTEN (METALL-METALL)	184
F	REM-AUFNAHMEN: ÜBERSICHTEN (METALL-KERAMIK)	185
G	KINEMATISCHES BERECHNUNGSMODELL	186
H	HERTZSCHE KONTAKTTHEORIE – FORMELN	188
H1	ALLGEMEINE HERTZSCHE KONTAKTFORMELN	188
H2	VEREINFACHTE FORMELN FÜR WICHTIGE KONTAKTE	189
I	NANOKRISTALLINES GEFÜGE DURCH REIBBELASTUNG	190

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung; Tribologisches System; nach [21]	4
Abb. 2: Schematische Darstellung; tribologisch beeinflusste Mikrostruktur	6
Abb. 3: Vergleich von Hertzscher- und rauer Kontaktberechnung [4].....	8
Abb. 4: Definition der dynamischen Viskosität η nach [4,21]	16
Abb. 5: Stribeck-Kurve nach [21].....	17
Abb. 6: Aufteilung der Reibenergie nach [33].....	20
Abb. 7: Einflüsse auf die Schubspannung im Reibkontakt nach [33]	21
Abb. 8: Schematische Darstellung; Dritter Körper	22
Abb. 9: Schematische Darstellung; Werkstoffeinflüsse auf Abrasionsbeständigkeit.....	27
Abb. 10: Lage maximale Schubspannung.....	29
Abb. 11: Schematische Darstellung; Rastmechanismus	41
Abb. 12: Schlitze (Geätzt mit Nital); DH + A & LH	42
Abb. 13: Härte der verwendeten Metalle im Schliff.....	43
Abb. 14: REM-Aufnahmen; geätzte Schlitze der Konturmaterialien	44
Abb. 15: Härtemessung (HV1); Kugeln im Schliff	44
Abb. 16: REM-Aufnahmen; Schlitze der Kugelmateriale	45
Abb. 17: Viskositätsmessung; verwendete Motorenöle.....	45
Abb. 18: Viskositäts-Temperaturverhalten; verwendete Motorenöle.....	46
Abb. 19: Schematischer Aufbau; Tribologische Prüfung der Rastkontur	46
Abb. 20: Rastsystem; Kinematische Randbedingungen; reibungsfrei.....	49
Abb. 21: Rastsystem; berechnete Kontaktkräfte; reibungsfrei	50
Abb. 22: Rastsystem; berechnete Kontaktkräfte; reibungsbehaftet	51
Abb. 23: Rastsystem; Momentengleichgewicht; Wälzen und Gleiten	51
Abb. 24: Verschiebekraft – Messung und Berechnung	52
Abb. 25: Verschiebekraft; Vergleich Metall- und Keramikkugel.....	53
Abb. 26: Hertzsche Pressung über Oszillationsweg (siehe Abb. 22).....	54
Abb. 27: Varianten der initialen Beölung (siehe Abb. 19)	55
Abb. 28: Schematische Darstellung; Datenaufzeichnung im Versuch	58
Abb. 29: Versuchsdaten; Metall-Metall (M-M); Temperaturen und Reibwerte.....	58
Abb. 30: Versuchsdaten; M-M; Systemparameter zu Versuchsende.....	59
Abb. 31: Verschleißmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Öleinfluss	60
Abb. 32: Verschleißraten (Profil & Volumen); 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20.....	61
Abb. 33: Reibwertmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Öleinfluss.....	61
Abb. 34: Verschleißraten (Volumen); M-M; Einfluss Beölung und Konturmaterial	62
Abb. 35: Reibwert; M-M; Einfluss Beölung und Konturmaterial.....	63
Abb. 36: Verschleißmessung; 42CrMoS4 (LH) – 100Cr6; Ölbad 0W-20; Langzeitversuch..	63
Abb. 37: Verschleißraten (Versuchsende); 42CrMoS4 (LH) – 100Cr6; Langzeitversuch	64
Abb. 38: Einteilung in Verschleißkategorien; 100Cr6-100Cr6.....	65
Abb. 39: Zusammenfassung; M-M; Endverschleißrate über Endreibwert	66
Abb. 40: Verschleißmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Kinematikeinfluss	67
Abb. 41: Reibwertmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Kinematikeinfluss.....	67

Abb. 42: Verschleißmessung; <i>42CrMoS4 (LH) – 100Cr6</i> ; 0W-20; Kinematikeinfluss.....	68
Abb. 43: Reibwertmessung; <i>42CrMoS4 (LH) – 100Cr6</i> ; 0W-20; Kinematikeinfluss	68
Abb. 44: Verschleißraten (Volumen); <i>M-M</i> ; Kinematikeinfluss.....	69
Abb. 45: Verschleißraten (Volumen); <i>M-M</i> ; Kinematikeinfluss.....	69
Abb. 46: Max. Verschleißrate über zugehörigem Reibwert; <i>M-M</i> ; Kinematikeinfluss	70
Abb. 47: Kugelverschleiß über Konturverschleiß [mm^3]; <i>M-M</i>	71
Abb. 48: Kugelverschleiß über Konturverschleiß; <i>M-M</i> ; Kinematikeinfluss	71
Abb. 49: Verschleißmessung; <i>M-K</i> ; Ölbad; (M-M im Hintergrund)	72
Abb. 50: Reibwertmessung; <i>M-K</i> ; Ölbad; (M-M im Hintergrund)	73
Abb. 51: Verschleißmessung; <i>M-K</i> ; geringe Ölmenge; (M-M im Hintergrund).....	73
Abb. 52: Reibwertmessung; <i>M-K</i> ; geringe Ölmenge; (M-M im Hintergrund)	74
Abb. 53: Verschleißmessung; <i>M-K</i> ; Einteilung in Kategorien.....	75
Abb. 54: Maximale Verschleißrate über Reibwert; <i>M-K</i>	76
Abb. 55: Maximale Verschleißrate über mittlerer Verschleißrate; <i>M-K</i>	77
Abb. 56: Verschleißmessung; <i>M-K</i> ; Gesperrte Kugelrotation.....	78
Abb. 57: Verschleißmessung; <i>M-K</i> ; Gesperrte Kugelrotation; Große Ölmenge.....	78
Abb. 58: Max. Verschleißrate über mittlere Verschleißrate; <i>M-K</i> ; Gesperrte Rotation.....	79
Abb. 59: Kugelverschleiß über Konturverschleiß [mm^3]; <i>M-K</i> ; Kategorien.....	80
Abb. 60: Kugelverschleiß über Konturverschleiß [mm^3]; <i>M-K</i> ; Ölmenge.....	80
Abb. 61: Zusammenfassung Tribologisches Verhalten; <i>M-M</i> & <i>M-K</i>	81
Abb. 62: Härteverläufe innerhalb der Konturen; Streubänder (Max. / Min.).....	85
Abb. 63: Digitalmikroskop-Aufnahmen (Kontur); Verschleißkategorien; Beispielbilder	87
Abb. 64: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: X</i> ; Konturoberfläche und Schliff.....	88
Abb. 65: REM-Aufnahmen (BSE & SE); <i>M-M: X</i> ; Konturoberfläche	89
Abb. 66: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: X</i> ; Kugeloberfläche	89
Abb. 67: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: A</i> ; Konturoberfläche.....	90
Abb. 68: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: B</i> ; Kontur- und Kugeloberfläche.....	91
Abb. 69: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: C</i> ; Kontur- und Kugeloberfläche	92
Abb. 70: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: C</i> ; Kontur (Schliff).....	93
Abb. 71: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: D</i> ; Kontur- und Kugeloberfläche	94
Abb. 72: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-M: Y</i> ; Konturoberfläche.....	94
Abb. 73: Partikelanalyse der Verschleißpaste; <i>M-M: B</i> ; Größen- und Elementverteilung	95
Abb. 74: Verschleißerscheinungen (Kontur); <i>M-M</i> ; Zusammenfassung.....	96
Abb. 75: EDX-Ergebnisse; <i>M-M</i> ; Zink; Maximum.....	97
Abb. 76: EDX-Ergebnisse; <i>M-M</i> ; Sauerstoff; Maximum	98
Abb. 77: Entstehung von zinkhaltigen Schichten.....	99
Abb. 78: REM-Aufnahmen; <i>M-K: X</i> ; Kontur- (SE,25 kV) und Kugeloberfläche (BSE)	100
Abb. 79: REM-Aufnahmen (SE); <i>M-K: Y</i> ; Konturoberfläche.....	101
Abb. 80: REM-Aufnahmen (BSE); <i>M-K: Y</i> ; Kugel; 10 und 30 kV	102
Abb. 81: REM-Aufnahmen; <i>M-K: Z</i> ; Konturoberfläche (SE) und Kugel (BSE).....	103
Abb. 82: EDX-Ergebnisse; <i>M-K</i> ; Zink.....	104
Abb. 83: EDX-Ergebnisse; <i>M-K</i> ; Materialübertrag.....	105
Abb. 84: Hertzsche Pressung im gelaufenen Zustand nach 1.1 Mio. SZ	106

Abb. 85: Hertzsche Pressung; Lage der maximalen Vergleichsspannung.....	106
Abb. 86: FIB-Schnitte; Orientierung und Beispielergebnis.....	108
Abb. 87: FIB-Schnitte; beispielhafte Schnitte	108
Abb. 88: FIB-Schnitte; Statistische Auswertung	109
Abb. 89: Zusammenfassung; Einteilung in Kategorien	111
Abb. 90: Systemverhalten; <i>M-M</i> ; Zusammenfassung I	112
Abb. 91: Systemverhalten; <i>M-M</i> ; Kugel- und Konturverschleiß	114
Abb. 92: Systemverhalten; <i>M-M</i> ; Zusammenfassung II	115
Abb. 93: Verschleißerscheinungen (REM); <i>M-M</i> ; Kontur Zusammenfassung	117
Abb. 94: Verformung des Gefüges über Endreibwert (Maximum)	119
Abb. 95: Verformung des Gefüges am Randbereich (REM-Aufnahme).....	120
Abb. 96: Verschleißerscheinungen (REM); <i>M-M</i> ; Vergleich Kontur und Kugel.....	121
Abb. 97: EDX-Ergebnisse; <i>M-M</i> ; Kontur; Übersicht	123
Abb. 98: EDX-Ergebnisse; <i>M-M</i> ; Kontur; Ölreaktionsschichten über Verschleißrate.....	123
Abb. 99: Systemverschleiß; Vergleich <i>M-M</i> & <i>M-K</i> ;	126
Abb. 100: Tribologisches Verhalten; <i>M-K</i> ; Kinematikeinfluss; Ölbad	128
Abb. 101: REM-Aufnahmen; <i>M-K</i> ; Kinematikeinfluss	129
Abb. 102: Kinematikeinfluss; Übersicht Kontur und Kugel.....	130
Abb. 103: Kippen des Systemverhaltens; <i>M-K</i> : <i>Y</i> zu <i>X</i> ; Zusammenfassung.....	131
Abb. 104: Systemverhalten; <i>M-K</i>	133
Abb. 105: Übersicht; <i>M-M</i> : <i>X</i> & <i>M-K</i> : <i>X</i> ; Oberfläche und EDX-Daten.....	133
Abb. 106: Verschleißerscheinungen (Kontur); <i>M-K</i> ; Übersicht.....	134
Abb. 107: Verschleißerscheinungen; <i>M-K</i> ; Kugel & Kontur; Übersicht.....	135
Abb. 108: Konturverschleiß (Vol.); Vergleich <i>M-M</i> & <i>M-K</i> (siehe Abb. 99)	138
Abb. 109: Systemverhalten; <i>M-M</i> ; Kugel- und Konturverschleiß; Kinematikeinfluss	140
Abb. 110: Gegenüberstellung; <i>M-M</i> : <i>Y</i> & <i>M-K</i> : <i>R</i> (siehe Abb. 103).....	141
Abb. 111: Digitalmikroskop-Aufnahmen; Schliff (geätzt mit Nital); 42CrMoS4 (LH).....	144
Abb. 112: Tribologisches Verhalten; Verschleißmechanismen (<i>basierend auf Abb. 61</i>).....	145
Abb. 113: REM-Aufnahmen; Konturoberflächen; Verschleißmechanismen	146
Abb. 114: Verstärkter Abrasivverschleiß durch gesperrte Kugelrotation.....	148
Abb. 115: Reaktionsschichten; <i>M-M</i> ; Reibungseinfluss.....	149
Abb. 116: EDX-Ergebnisse; <i>M-M</i> & <i>M-K</i> ; Kontur; Zn-Elementanteil über Verschleißrate .	150
Abb. 117: Kugel- über Konturverschleiß [mm ³]; Vergleich <i>M-M</i> & <i>M-K</i>	151
Abb. 118: Kugel- über Konturverschleiß [mm ³]; Mechanismen; (siehe Abb. 117)	151
Abb. 119: FIB-Schnitte (Kontur); Vergleich mit Versuchskategorien	153
Abb. 120: FIB-Schnitte (Kontur); <i>M-M</i>	154
Abb. 121: Tribologisches Verhalten; Rastmechanismus	157
Abb. 122: Einflüsse auf das Kippverhalten (schematisch)	160
Abb. 123: Genauigkeitsbestimmung der Echtzeit-Verschleißmessung.....	180
Abb. 124: Umrechnung; Profilverschleiß in volumetrischen Verschleiß	181
Abb. 125: Verschleißerscheinungen (Kontur); <i>M-M</i> ; Zusammenfassung	184
Abb. 126: Verschleißerscheinungen (Kugel); <i>M-M</i> ; Zusammenfassung.....	184
Abb. 127: Verschleißerscheinungen (Kontur); <i>M-K</i> ; Zusammenfassung.....	185

Abb. 128: Verschleißerscheinungen (Kugel); <i>M-K</i> ; Zusammenfassung.....	185
Abb. 129: Fallunterscheidung in der kinematischen Berechnung.....	187

Formelzeichenliste

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a	Halbachse 1 (<i>Hertzscher Kontakt</i>)	m
A_{Hertz}	Kontaktfläche (<i>Hertzscher Kontakt</i>)	m^2
b	Halbachse 2 (<i>Hertzscher Kontakt</i>)	m
$\cos \tau$	Hilfsgröße (<i>allgemeiner Hertzscher Punktkontakt</i>)	-
e_R	Reibungsenergiedichte	Pa
E	Elastizitätsmodul	Pa
E_{red}	Reduzierter Elastizitätsmodul (<i>Hertzscher Kontakt</i>)	Pa
F	Kraft (Querkraft)	N
F_N	Normalkraft	N
F_R	Reibkraft	N
F_f	Kontaktkraft zwischen Kugel und Feder	N
F_h	Kontaktkraft zwischen Kugel und Hülse	N
F_k	Reibwert zwischen Kugel und Rastkontur	N
h	Schmierspalthöhe	m
h_R	Tiefe der durch Reibung beeinflussten Zone	m
J_s	Massenträgheitsmoment der Kugel	$kg \cdot m^2$
L	Kontaktlänge (<i>Hertzscher Linienkontakt</i>)	m
p	Kontaktdruck (Flächenpressung)	Pa
\bar{p}	Mittlere Flächenpressung	Pa
p_{max}	Hertzsche Pressung (<i>max. Flächenpressung</i>)	Pa
$R_{X/Y}$	Kontaktradien	m
s_R	Gleitweg	m
S_Z	Zehn-Punkte-Höhe nach EUR 15178N (<i>analog Rz</i>)	m
v	Geschwindigkeit	m/s
V_R	An der Reibung beteiligtes Volumen	m^3
W_R	Reibungsarbeit	$N \cdot m$
α	Konturwinkel	<i>Radiant</i>
η	Dynamische Viskosität	$Pa \cdot s$
η_{Hertz}	Hilfsgröße (<i>allgemeiner Hertzscher Punktkontakt</i>)	-
μ	Reibwert / Reibungszahl	-
μ_f	Reibwert zwischen Kugel und Feder	-
μ_{f_haft}	übertragbarer Reibwert zwischen Kugel und Feder	-
μ_{f_wirk}	wirksamer Reibwert zwischen Kugel und Feder	-
μ_h	Reibwert zwischen Kugel und Hülse	-
μ_k	Reibwert zwischen Kugel und Rastkontur	-
μ_{k_haft}	übertragbarer Reibwert zw. Kugel und Rastkontur	-
μ_{k_wirk}	wirksamer Reibwert zwischen Kugel und Rastkontur	-

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
ν	Querkontraktionszahl	-
ξ_{Hertz}	Hilfsgröße (<i>allgemeiner Hertzscher Punktkontakt</i>)	-
ρ	Kontaktradien	1/m
σ	Normalspannung	Pa
τ_R	Scherspannung	Pa
Φ	Kontaktwinkel an der Feder	Radiant
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung der Kugel	Radiant/s ²

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Werkstoffeigenschaften von 100Cr6 und Si ₃ N ₄ nach [108]	33
Tabelle 2: Typische Reibwerte für Si ₃ N ₄ & Metall-Paarungen	36
Tabelle 3: Legierungsbestandteile der verwendeten Stähle [102]	42
Tabelle 4: Versuchsmatrix; Standardversuche.....	56
Tabelle 5: Versuchsmatrix; Sonderversuche.....	56
Tabelle 6: Sonderversuche; Variation des Härteverfahrens; ergänzende Versuche	83
Tabelle 7: Ergebnisse; ergänzende Versuche; Variation des Härteverfahrens	83
Tabelle 8: Ergebnisse; Sonderversuche; Variation der Systemtemperatur	84
Tabelle 9: EDX-Ergebnisse; <i>M-M: X</i> ; ausgewählte Elemente.....	90
Tabelle 10: EDX-Ergebnisse; <i>M-M: A</i> ; ausgewählte Elemente.....	91
Tabelle 11: EDX-Ergebnisse; <i>M-M: B</i> ; ausgewählte Elemente.....	92
Tabelle 12: EDX-Ergebnisse; <i>M-M: C</i> ; ausgewählte Elemente	93
Tabelle 13: EDX-Ergebnisse; <i>M-M: D</i> ; ausgewählte Elemente	94
Tabelle 14: EDX-Ergebnisse; <i>M-M: Y</i> ; ausgewählte Elemente	95
Tabelle 15: EDX-Ergebnisse; <i>M-K: X</i> ; ausgewählte Elemente	101
Tabelle 16: EDX-Ergebnisse; <i>M-K: Y</i> ; ausgewählte Elemente	102
Tabelle 17: EDX-Ergebnisse; <i>M-K: Z</i> ; ausgewählte Elemente	103
Tabelle 18: Korngrößenverteilung im FIB-Schnitt.....	107
Tabelle 19: Zusammenfassung; <i>M-M</i> ; Verschleißmechanismus	124
Tabelle 20: Systemverhalten; <i>M-K</i> : Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation	139
Tabelle 21: Systemverhalten; <i>M-M</i> : Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation	139
Tabelle 22: Gesamtsystem; Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation.....	142
Tabelle 23: Gesamtsystem; Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation; Wärmebehandlung ...	143
Tabelle 24: Gesamtsystem; Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation; Härteschwankungen .	144
Tabelle 25: Farb- und Symbolübersicht; Materialien	178
Tabelle 26: Farb- und Symbolübersicht; Schmierstoffe	178
Tabelle 27: Farb- und Symbolübersicht; Verschleißkategorien	179
Tabelle 28: EDX-Daten; Elementauswahl; Alle Kategorien I.....	182
Tabelle 29: EDX-Daten; Elementauswahl; Alle Kategorien II	183
Tabelle 30: Formeln; Hertzsche Kontakt für idealisierte Geometrien [5,122]	189
Tabelle 31: Übersicht; Nanokristallines Gefüge unter tribologischer Last.....	190

Abkürzungsverzeichnis

0W-20	SAE 0W-20
5W-30	SAE 5W-30
BSE	Rückstreuelektronenbild
DH + A	durchgehärtet und angelassen
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie
EHD	Elastohydrodynamik
FEM	Finite Elemente Methode
FIB	Focused Ion Beam
HV *	Härte nach Vickers, * = Prüfkraft in Kilopond
Kontur	Rastkontur des betrachteten Tribosystems
LH	lasergehärtet
LH + A	lasergehärtet und angelassen
m%	Massenprozent
Max.	Maximum
Min.	Minimum
M-M	Tribosystem: Metall gegen Metall
M-K	Tribosystem: Metall gegen Keramik
MW	Mittelwert
REM	Rasterelektronenmikroskop
SAE	Society of Automotive Engineers
SE	Sekundärelektronenbild
SZ	Schaltzyklen
Tribosystem	Tribologisches System (siehe Abschnitt 2.1)
Vol.	Volumen
ZDDP	Zinkdialkyldithiophosphate

1 Einleitung

Der Klimawandel wird als ein zentrales Problem unserer Zeit angesehen. Nach aktuellem Stand der Wissenschaft werden die klimatischen Veränderungen hauptsächlich durch anthropogene Treibhausgase verursacht, die wiederum zu großem Teil aus dem Verkehrssektor resultieren. Bei wachsender Weltbevölkerung und steigendem Wohlstand nimmt auch die Nachfrage nach individueller Mobilität zu [52]. Aus diesem Grund besteht hier dringender Handlungsbedarf: Transport und individuelle Mobilität müssen in Zukunft in geringerem Maße Ressourcen verbrauchen und deutlich weniger Emissionen ausstoßen. Langfristiges Ziel ist die Einführung von elektrischen Antrieben sowie deren Versorgung mit elektrischem Strom aus regenerativen Energiequellen. Parallel zur Entwicklung der notwendigen Technologie und Infrastruktur für nachhaltige elektrische Mobilität ist mittelfristig zusätzlich eine deutliche Effizienzsteigerung der herkömmlichen Antriebe erforderlich. Aus mechanischer Sicht führen diese Herausforderungen zu steigenden Leistungsdichten, die in immer höheren tribologischen Belastungen resultieren. Die tribologischen Systeme müssen den verschärften Bedingungen standhalten.

Aus dieser Motivation heraus ist die Erforschung bekannter Materialpaarungen unter extremen Belastungen von großem Interesse. An dieser Stelle leistet diese Arbeit einen Beitrag. Im Rahmen der vorgelegten Dissertation wird das tribologische Verhalten eines Rastmechanismus unter hoher tribologischer Belastung analysiert.

Der betrachtete Mechanismus besteht aus einer Kugel, die unter Federvorspannung über eine Kontur zwischen zwei Endlagen bewegt wird. Zwischen Kontur und Kugel liegen Hertzsche Pressungen im GPa-Bereich sowie eine Wälzbewegung mit unterschiedlich hohem Gleitanteil und Relativgeschwindigkeiten bis 0,5 m/s vor.

Die hohen tribologischen Lasten führen in Abhängigkeit der Materialpaarung, des kinematischen Verhaltens (*Gleitanteil*) sowie der Schmierungsbedingungen zu Verschleißraten im Bereich von kleiner 1 $\mu\text{m}/\text{h}$ bis größer 350 $\mu\text{m}/\text{h}$. Dabei treten je nach Systembedingungen alle typischen Verschleißmechanismen von Oberflächenzerrüttung bis Adhäsionsverschleiß (*Fresen*) auf.

Die genauen Einflüsse und Mechanismen, welche zu den unterschiedlichen Verschleißraten führen, werden in dieser Dissertation thematisiert. Neben einem genauen Systemverständnis des Rastmechanismus soll die vorliegende Arbeit damit grundlegende tribologische Zusammenhänge diskutieren und einen Beitrag zum allgemeinen Verständnis von Verschleißvorgängen in hochbelasteten Systemen liefern.

In tribologisch hochbelasteten Wälzkontakten haben sich niedriglegierte Stähle bewährt. Nach der Wärmebehandlung des Härtens und Anlassens zeichnet sich das metallische Gefüge durch hohe Festigkeit, große Zähigkeit, Abrasions- und Ermüdungsbeständigkeit und damit gute Verschleiß Eigenschaften bei geringen Kosten aus.

In dieser Arbeit werden der Wälzlagerstahl 100Cr6 sowie die Vergütungsstähle 42CrMoS4 und 51CrV4 als Materialien für die Rastkontur betrachtet. Analog zur typischen Wälzlageranwen-

dung sind die Konturen aus 100Cr6 im Ofenprozess durchgehärtet und angelassen. Die Rastkonturen aus Vergütungsstahl erhalten mittels Laserstrahlhärten eine lokale Randschichthärtung.

Als Gegenkörper werden neben 100Cr6-Wälzlagerkugeln auch Wälzkörper aus Si_3N_4 untersucht. Bei beiden Kugelvarianten handelt es sich um Standardprodukte der Wälzlagerindustrie. Es soll untersucht werden, ob durch Verwendung von Si_3N_4 -Kugeln eine Verbesserung des Systemverhaltens aufgrund der höheren Härte und der geringen Adhäsionsneigung des keramischen Materials möglich ist.

Zusätzlich wird für alle Materialien eine Veränderung der Viskositätsklasse des genutzten Motorenöls und eine Variation der vorhandenen Ölmenge analysiert, um den Trend zu niedrigviskosen Schmierstoffen und Minimalmengenschmierung abzubilden.

Neben einer Messung von Reibung und Verschleißraten in Echtzeit, werden die Proben vor und nach Versuch umfassend analysiert. Hierbei kommen neben Licht- und Elektronenmikroskopie vor allem metallografische Schliffe und eine Mikrostrukturanalyse mittels Ionenfeinstrahl-Mikroskopie (FIB) zum Einsatz.

Des Weiteren werden die Versuche anhand des tribologischen Verhaltens in verschiedene Kategorien eingeteilt. Mithilfe der Kategorisierung kann das tribologische Verhalten mit den Ergebnissen der Oberflächen- und Mikrostrukturanalyse korreliert werden. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, statistisch belastbare Aussagen zum Verschleißverhalten des betrachteten tribologischen Systems zu treffen.

Zur besseren Übersichtlichkeit sind große Teile der Arbeit in *Metall-Metall-Kontakte* (M-M) und *Metall-Keramik-Kontakte* (M-K) unterteilt.

2 Stand der Technik

Das Themengebiet dieser Arbeit ist der Verschleiß von Metallen und Keramiken im Kontakt unter hoher Belastung bei unterschiedlichen Schmierungsbedingungen.

Im folgenden Abschnitt 2.1 werden zunächst einige zum Verständnis notwendige Zusammenhänge im Themengebiet Tribologie (*Wissenschaft von Reibung, Schmierung und Verschleiß*) behandelt. Es erfolgt keine umfassende Einführung in das Themengebiet Tribologie. Hierzu wird auf die Quellen [50],[134] und [21] verwiesen.

Anschließend folgt eine detailliertere Betrachtung von Verschleißmechanismen (Abschnitt 2.2 & 2.3) sowie ein kurzer Überblick über den Forschungsstand zu den genutzten Stahl- und Keramikmaterialien.

2.1 Eigenschaften von tribologischen Systemen

2.1.1 Tribologie - Definitionen

Definition Tribologie

Das Wort Tribologie wurde nach JOST 1966 als „Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren“ [21] eingeführt. Alternativ kann Tribologie auch vereinfacht als Wissenschaft von Reibung, Schmierung und Verschleiß betrachtet werden [50].

Definition Reibung

Reibung bezeichnet den Widerstand gegenüber einer Relativbewegung, beispielsweise beim Abgleiten von zwei festen Körpern aufeinander. Der Reibwert μ (oder auch Reibungszahl) ist als Verhältnis aus Reibungskraft F_R und Normalkraft F_N definiert:

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (2.1)$$

Für viele alltägliche Fragestellungen wird der Reibwert als unabhängig von der Normalkraft angenommen. Ebenfalls geht man oft davon aus, dass die Reibungskraft zum Initiieren einer Bewegung aus dem Stillstand größer als innerhalb der Bewegung ist ($\mu_{\text{Haften}} > \mu_{\text{Gleiten}}$) [21].

Definition Verschleiß

Verschleiß kann als „fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines Festkörpers (Grundkörper), hervorgerufen durch tribologische Prozesse, d. h. durch Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“ [21] definiert werden. Dabei können die resultierenden Verschleißpartikel auch im Kontakt verbleiben und sich damit nach außen nicht als Materialverlust zeigen [37].

In der Ingenieurpraxis werden auch heute noch vereinfachte Vorstellungen mit allgemeingültigen Reibwerten und Verschleißkoeffizienten für bestimmte Materialien angewendet. Mit die-

sen Betrachtungen gelangt der Anwender jedoch oft nicht zu realitätsnahen Aussagen, da Reibung und Verschleiß von einer Vielzahl an Parametern abhängen, dem sogenannten tribologischen System [21] oder verkürzt *Tribosystem*.

Das *Tribosystem* wird durch Grund- und Gegenkörper gebildet, die einer Last unter Relativbewegung ausgesetzt sind. Die infolge von chemischen und mechanischen Wechselwirkungen auftretenden Reibungskräfte wirken der Relativbewegung entgegen. Wird die Bewegung vollständig gehemmt, tritt der Sonderfall der Haftreibung ein. Die chemischen und mechanischen Wechselwirkungen bringen einen Energieeintrag in das Material mit sich, der in Abhängigkeit des Tribosystems zu unterschiedlich starken Veränderungen der Oberflächen und letztendlich zu Verschleiß führt.

Zwischen den Körpern kann sich beispielsweise ein Schmierstoff befinden. Die Umgebung hat einen entscheidenden Einfluss auf das tribologische Verhalten. So unterscheiden sich beispielsweise Versuche im Vakuum hinsichtlich Reibung und Verschleiß oft extrem von Versuchen unter Normalbedingungen [21].

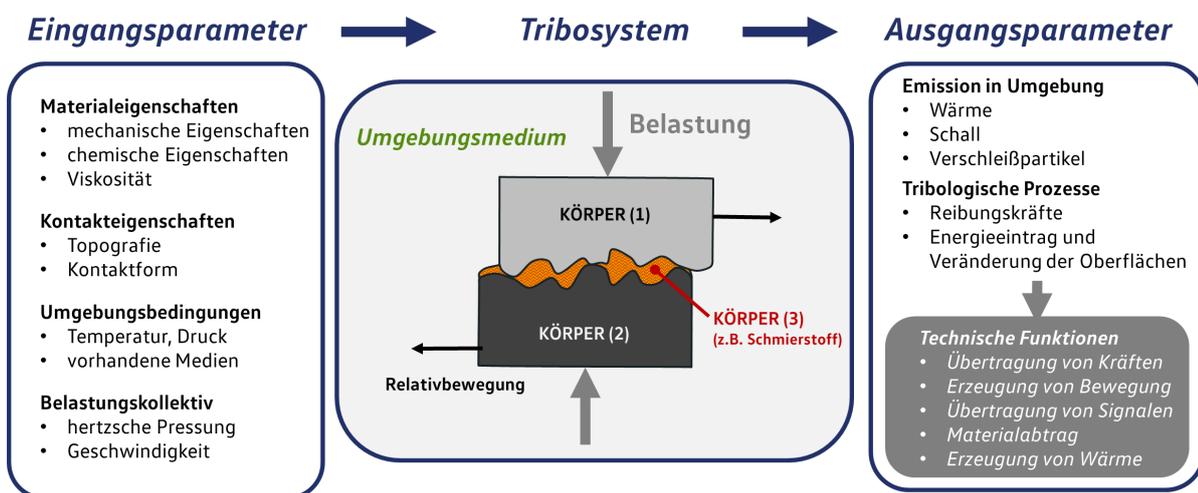


Abb. 1: Schematische Darstellung; Tribologisches System; nach [21]

Eine Vielzahl von Parametern beeinflusst das tribologische Verhalten. Einige Einflüsse sind in Abb. 1 aufgelistet. Die Liste kann erheblich erweitert werden. Auch bei einer hohen Detaillierung stellt das Modellsystem immer eine Vereinfachung der Realität dar:

Die in den Grenzflächen zwischen den Kontaktpartnern ablaufenden tribologischen Prozesse werden durch das Materialverhalten in verschiedenen Größenordnungen bestimmt [134]. Die Kontaktfläche, welche sich infolge elastischer und plastischer Verformung ausbildet, wird durch das makroskopische und mikroskopische (*Kontakt der Rauheitsspitzen*) Verformungsverhalten definiert [134]. Neben dem mechanischen Verhalten der Werkstoffe haben die chemischen Wechselwirkungen auf atomarer Ebene einen entscheidenden Einfluss [134].

Im tribologischen Prozess wirken sich in Summe viele physikalische Eigenschaften der Kontaktpartner auf das Verhalten aus [21]. Zudem werden diese Eigenschaften im Kontaktbereich durch die tribologischen Prozesse und den damit verbundenen Energieeintrag verändert und

unterscheiden sich infolgedessen oft stark von den Eigenschaften der Grundwerkstoffe. So ändert sich beispielsweise das Gefüge stark und es finden chemische Reaktionen zwischen Grund- und Gegenkörper, dem Zwischenmedium und Elementen der Umgebung statt [21]. Die Berücksichtigung aller relevanten Eigenschaften stellt die tribologische Forschung vor große Herausforderungen, weshalb eine Berechnung von Reibung und Verschleiß derzeit kaum möglich ist [21].

Das Verhalten wird in den meisten Fällen weiterhin auf Basis vieler Erfahrungen aus experimentellen Versuchen und den Erkenntnissen aus mechanischen und chemischen Simulationen in verschiedenen Größenskalen abgeschätzt [21].

Das Modell des tribologischen Systems dient zur Strukturierung und zum Verständnis des tribologischen Verhaltens von technischen Systemen. Systeme mit ähnlichen Eigenschaften können ein vergleichbares Verhalten aufzeigen. Dieser Aspekt spielt eine große Rolle beim Ableiten von Annahmen für reale Systeme aus vereinfachten Modellversuchen [21].

2.1.2 Tribologische Oberflächen im Kontakt

Technische Oberflächen stellen die Trennebene zwischen dem Körper und seiner Umgebung dar [134]. Die Oberflächen definieren damit den tribologischen Kontakt. Neben der Oberflächentopografie spielen, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, die physikalischen Eigenschaften im tribologischen Kontakt eine wichtige Rolle [134].

An der Grenze eines Körpers treten nach Verschleiß in der Regel ungesättigte Bindungen auf, welche veränderte chemische und mechanische Eigenschaften sowie Reaktionen mit der Umgebung bewirken [21]. Die Eigenschaften der Oberfläche unterscheiden sich folglich oft erheblich von denen des Grundwerkstoffes [21].

Technische Oberflächen weisen aufgrund der tribologischen Beanspruchung bzw. der mechanischen Bearbeitung i.d.R. eine, gegenüber dem Grundgefüge, deutlich veränderte Mikrostruktur auf. Typische, im Querschliff der Oberfläche sichtbare Veränderungen für kristalline Werkstoffe sind in Abb. 2 (*nächste Seite*) in zusammengefasst.

Die mechanischen Belastungen können das Gefüge bis in eine Tiefe von 100 μm verändern. Hierbei treten z.B. eine starke Kornfeinung, eine Ausrichtung und auch eine Verzerrung der Körner sowie die Bildung von mikrostrukturellen Rissen auf [21]. Im oberflächennahen Bereich bis etwa 1 μm Tiefe führen eine starke Änderung der chemischen Zusammensetzung durch chemische Reaktionen (Abschnitt 2.2.4) oder mechanische Durchmischung mit der Umgebung oder dem Gegenkörper bzw. Verschleißpartikeln (Abschnitt 2.1.7) zu Änderungen der physikalischen und damit auch der tribologischen Eigenschaften [21]. Zusätzlich werden innerhalb kurzer Zeit dünne Schichten von Flüssigkeiten und Gasen adsorbiert [21].

Die in Abb. 2 angegebenen Schichtdicken sind typische Werte für metallische Oberflächen. Je nach Tribosystem können mehr oder weniger große Abweichungen auftreten [4,21,134].

Die Umwandlung des oberflächennahen Bereichs benötigt einen Energieeintrag. Die Energie wird durch die Reibungsarbeit bereitgestellt. Die energetische Betrachtung der Reibung wird im Abschnitt 2.1.9 behandelt.

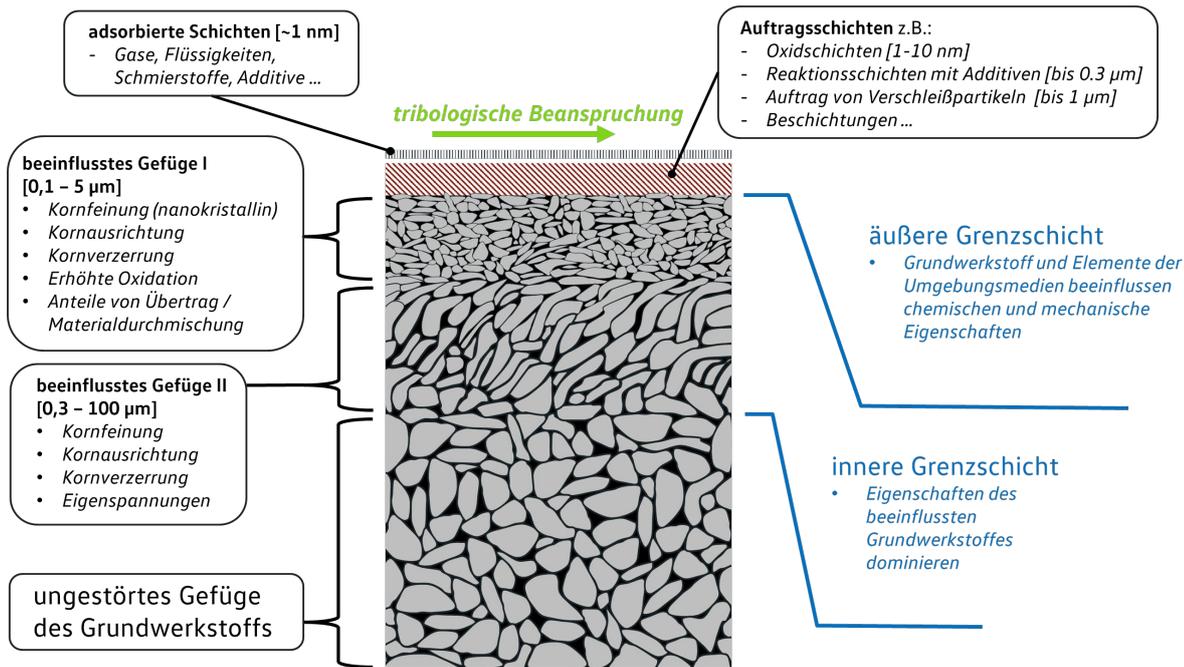


Abb. 2: Schematische Darstellung; tribologisch beeinflusste Mikrostruktur
nach: [21,134]; weitere Quellen: [58,120,84]

Die Veränderungen des oberflächennahen Bereichs beeinflussen das tribologische Verhalten stark. Im Vergleich zum Grundmaterial können die oberflächennahen Bereiche z.B. aufgrund der beschriebenen Veränderungen weicher oder härter, duktiler oder spröder sein. Die geänderten chemischen Eigenschaften können zu einer höheren oder geringeren Adhäsionsneigung führen. Diese Effekte wirken sich insbesondere bei ungeschmierten Tribosystemen stark auf Reibung und Verschleiß aus.

2.1.3 Adhäsion als Reibungsursache

Beim Abgleiten von Oberflächen aufeinander wirken neben mechanischen Verklammerungen und Deformationsanteilen vor allem adhäsive Kräfte bewegungshemmend [4]. Unter Adhäsion wird das Anhaften verschiedener Körper an den jeweiligen Oberflächen verstanden [4]. Dabei können die gleichen chemischen Bindungen auftreten, die auch im Festkörper für Zusammenhalt (Kohäsion) sorgen [21]. Im Festkörper wirken die chemischen bzw. Hauptvalenzbindungen (*homöopolare-, heteropolare- und Metallbindung*). Zusätzlich können adhäsive Kräfte auch durch physikalische Bindungen bzw. Nebenvalenzbindungen (*z.B. Dipolmomente und Wasserstoffbrückenbindungen*) verursacht werden, die im Vergleich zu den chemischen Bindungen eher schwache Bindungskräfte aufweisen [35].

Zur Abschätzung der Adhäsionskräfte zwischen unterschiedlichen Materialien wurden verschiedene Methoden erarbeitet [4]. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Bestimmung der notwendigen Parameter und begrenzten Übereinstimmungen mit den real auftretenden Effekten, haben diese Modelle bisher nur eine geringe Aussagekraft [4,89]. Für viele Materialien unterscheiden sich die Eigenschaften des oberflächennahen Bereiches stark vom Grundmaterial (siehe Abb. 2). Metalle zeigen unter Normalbedingungen meist eine relativ geringe Adhäsionsneigung aufgrund der vorhandenen Oxidschichten, während Versuche im Vakuum zu extrem

hohen Reibwerten führen [21]. Bei Keramiken kann die Luftfeuchtigkeit einen großen Einfluss besitzen [117].

Einige allgemeingültige Regeln zur Vermeidung hoher adhäsiver Bindungskräfte haben sich bewährt:

- 1) Vermeidung von Gleichpaarungen. Körper aus den gleichen Materialien weisen eine hohe chemische Affinität auf [21]. Eine Gleichpaarung von Metallen verhält sich dabei allgemein kritischer als eine Gleichpaarung von Keramik [21].
- 2) Adhäsion nimmt mit der realen Kontaktfläche zu [21]. Damit führen eine geringe Härte, eine geringe Steifigkeit und glatte Oberflächen sowie mehr Gleitsysteme im Kristallgitter tendenziell zu mehr Adhäsion (siehe Abschnitt 2.1.5) [21].
- 3) Für Metalle gilt in der Regel, dass die Adhäsionsneigung in Abhängigkeit der vorliegenden Kristallsysteme in der Reihenfolge *hexagonal* < *kubisch-raumzentriert* < *kubisch-flächenzentriert* zunimmt [21].

Aufgrund einer sehr kurzen Reichweite der chemischen und physikalischen Bindungskräfte (weniger als 3 nm [35,134]) stellt eine Trennung der Oberflächen beispielsweise durch Oxidschichten oder adsorbierte Schmierstoffe eine effektive Methode zur Vermeidung von adhäsiver Reibung dar [134].

2.1.4 Kontaktmechanik: nominelle und reale Kontaktfläche

Tribologische Vorgänge laufen in den Kontaktflächen zwischen den Körpern ab. Die Abschätzung der auftretenden Kontaktflächen ist nicht trivial und hängt stark vom tribologischen System ab.

Technische Oberflächen sind nie ideal glatt. Abweichend von der idealen Kontur treten Formabweichungen in verschiedenen Größenordnungen (Welligkeit und Rauheit) auf. Treten Oberflächen in Kontakt, berühren sich immer einzelne Rauheitsspitzen. In den Mikrokontakten wird das tribologische Verhalten definiert. Die Summe der Mikrokontakte wird als reale Kontaktfläche bezeichnet. Diese ist stets kleiner als die nominelle Kontaktfläche. Das Verhältnis von realer und nomineller Kontaktfläche liegt im Bereich von $>0,5$ bis 10^{-4} und ist allgemein abhängig von der Oberflächentopografie, der Belastung sowie den elastischen und plastischen Eigenschaften der Körper [1,134]. Infolge plastischer Verformungen vergrößert sich die reale Kontaktfläche bei Relativbewegung im Vergleich zum statischen Fall [21].

Zur Berechnung der auftretenden Kontaktflächen stehen viele Modelle zur Verfügung. Aufgrund ihrer Einfachheit werden die Hertzschen Kontaktformeln, die auf dem Ansatz des elastischen Halbraums basieren, häufig genutzt [89]. Mit den Formeln kann die nominelle Kontaktfläche und die Kontaktbelastung für linear-elastische Körper mit glatten Oberflächen im reibungsfreien Idealfall berechnet werden [89].

Es existieren weitere Berechnungsansätze, welche die Einflüsse von rauen Oberflächen, plastischem Materialverhalten und Adhäsion bzw. Reibungskräfte berücksichtigen [4]. Dabei können sowohl Halbraummodelle als auch FEM-Berechnungen angewendet werden [4]. Die höhere Ergebnisgüte ist i.d.R. mit einem deutlich höheren Berechnungsaufwand verbunden [4].

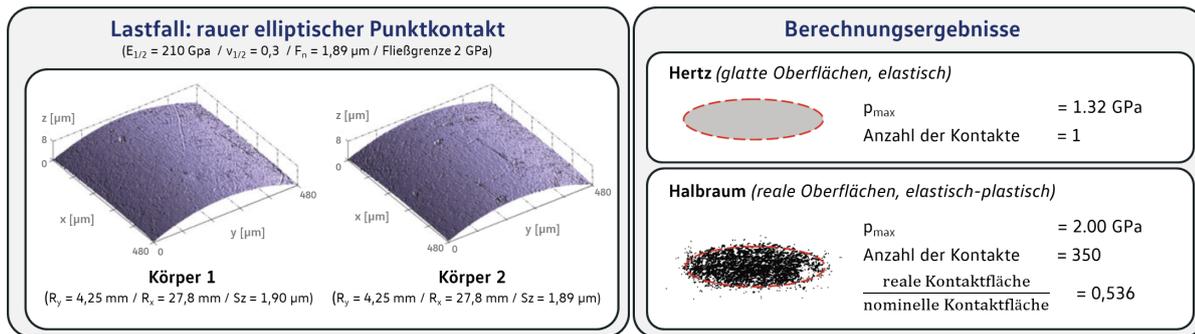


Abb. 3: Vergleich von Hertzscher- und rauer Kontaktberechnung [4]

elastisch-plastischer rauer Kontakt; Halbraummodell; *Definition der Formelzeichen siehe Formelzeichenliste*

Ein Vergleich der ideal glatten und linear elastischen Hertzschen Kontaktberechnung mit einem elastisch-plastischen Modell unter Berücksichtigung der Rauheit in Abb. 3 zeigt, dass die Hertzsche Betrachtung für die Berechnung der maximalen Flächenpressung sowie der Größe der Kontaktfläche eine gute Näherung des rauen Kontaktes bietet [4].

Zusätzlich besitzen die Halbraummodelle den Vorteil, dass auch der Verlauf aller Spannungen in die Tiefe berechnet und somit die relevante Beanspruchung bewertet werden kann. Um den dreidimensionalen Spannungszustand mit üblicherweise eindimensionalen Materialkennwerten zu vergleichen, werden verschiedene Vergleichsspannungen genutzt. Für sprödes Werkstoffverhalten kann die maximale Hauptnormalspannung (*Rankine*) als Vergleichswert herangezogen werden [4]. Bei duktilem Materialverhalten und bei Versagen durch Ermüdungsbeanspruchung wird i.d.R. die Gestaltänderungsenergiehypothese (*Huber und von Mises*) genutzt [4].

Im Kontakt sind die maximalen Hauptspannungen zur Beurteilung von sprödem Materialverhalten im Bereich der Oberflächen zu erwarten [4]. Duktilen Materialversagen wird durch plastisches Fließen und damit die maximalen Schubspannungen bestimmt. Im Hertzschen Kontakt zwischen gekrümmten und ideal glatten Oberflächen liegen die maximale Hauptschubspannung und auch die maximale Vergleichsspannung nach Gestaltänderungsenergiehypothese unter der Oberfläche [4]. Werden zusätzlich Reibungskräfte berücksichtigt, überlagern sich die Schubspannungen der Reibkräfte an den Oberflächen mit der Hertzschen Belastung [4]. Mit zunehmender Reibungszahl wandert die maximale Vergleichsspannung zur Oberfläche [4].

Als Abschätzung kann angenommen werden, dass ab Reibwerten von größer 0,2 die maximale Vergleichsspannung an der Oberfläche liegt [21]. Die Lage der maximalen Vergleichsspannung hat einen großen Einfluss auf die Art des Werkstoffversagens (siehe Abschnitt 2.2.3).

Betrachtet man den Einfluss der realen Kontaktflächen, treten an der Oberfläche im Bereich der Rauheitsspitzen zusätzlich zu den makroskopischen Spannungsfeldern einzelne mikroskopische Spannungsmaxima auf, welche vor allem den Einlauf der Materialpaarungen beeinflussen [4].

2.1.5 Relevante Materialparameter

Neben den bereits diskutierten chemischen Wechselwirkungen, die vor allem den adhäsiven Anteil der Tribologie beeinflussen, wirken sich die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe auf Reibung und Verschleiß aus. Im Folgenden wird der Einfluss an einigen wichtigen, im Maschinenbau gängigen Parametern beschrieben. Definitionen zu den beschriebenen Parametern können beispielsweise in [7] nachgeschlagen werden.

Elastizitätsmodul

Ein höherer Elastizitätsmodul führt zu geringeren Verformungen und damit zu einer kleineren Kontaktfläche, was die adhäsiven Bindungskräfte verringert [134].

Streckgrenze

Eine höhere Streckgrenze geht mit einem höheren Widerstand gegenüber plastischer Verformung einher, was i.d.R. zu geringeren Verformungen und damit wie ein höherer Elastizitätsmodul zu geringerer Adhäsion führt [134].

Plastische Verformung in kristallinen Werkstoffen wird hauptsächlich durch das Gleiten von Versetzungen entlang der Gleitebenen im jeweiligen Kristallsystem ermöglicht [7]. Dieser Vorgang wird lokal ab einer bestimmten Schubspannung und im polykristallinen Werkstoff global durch Überschreiten der Streckgrenze erreicht [7].

Folgende Mechanismen bewirken eine höhere Streckgrenze [7]:

- Mischkristallverfestigung
- Ausscheidungshärtung
- Korngrenzhärtung / Einfluss der Korngröße (*Hall-Petch-Beziehung*)
- Versetzungshärtung
- Umwandlungshärtung

In dieser Arbeit werden vor allem die Umwandlungshärtung durch unterschiedliche Gefüge im Stahlwerkstoff, die Korngrenzhärtung durch eine kleinere Korngröße und die Versetzungshärtung diskutiert.

Plastische Verformungen erzeugen in unverformten, weichen Kristallen eine Vervielfachung bzw. den Aufstau von Versetzungen und damit Hindernisse gegenüber weiterer plastischer Verformung, was insbesondere bei zyklischen Belastungen zu Kaltverfestigung bzw. Versetzungshärtung führt [7].

Im Gegenzug können erhöhte Temperaturen durch Rekristallisation und dem damit verbundenen Abbau von vorhandenen Versetzungen zu einem Absenken der Streckgrenze (Erweichen) führen [43]. Bei speziellen Legierungen oder stark plastisch verformten Werkstoffen kann es auch bei Raumtemperatur unter zyklischer Last zu einem Entfestigen kommen [43].

Festigkeit

Festigkeit beschreibt die Spannung, die ein Werkstoff bis zum Versagen aushalten kann [99]. In der Regel wird die Bruchfestigkeit verwendet, welche für metallische Werkstoffe elastische und plastische Verformungseigenschaften kumuliert [99].

Eine hohe Bruchfestigkeit schützt vor Materialablösung und damit allgemein vor Verschleiß [134]. Bei dynamischen Belastungen ist zu beachten, dass die Wechselfestigkeit i.d.R. geringer als die statische Festigkeit ist [19].

Duktilität

Ein hohes plastisches Verformungsvermögen wird durch eine hohe Duktilität beschrieben und führt, wie eine hohe Streckgrenze, zu geringerem Verschleiß, da hohe Spannungen bzw. Dehnungen ohne Bruch vom Material aufgenommen werden [99].

Eine hohe Duktilität kann adhäsiven Verschleiß analog zu einer hohen Elastizität durch das Begünstigen von großen realen Kontaktflächen verstärken.

Bruchzähigkeit

Die Bruchzähigkeit beschreibt den Widerstand gegenüber Rissinitiierung und Rissausbreitung und hängt von mehreren Materialparametern ab [99]. Duktile Werkstoffe tolerieren Risse. Dementsprechend ist hier die Rissausbreitung der entscheidende Faktor für die Bruchzähigkeit [99]. Spröde Werkstoffe wie Keramiken können hingegen nur durch eine Vermeidung von Rissentstehung gegenüber Brüchen geschützt werden [99].

Härte

Die Härte beschreibt den Widerstand gegenüber dem Eindringen eines (meist härteren) Gegenkörpers und vereint elastische und plastische Verformungseigenschaften [99]. Eine höhere Härte resultiert in einer kleineren realen Kontaktfläche und damit in geringeren Adhäsionskräften [21].

Zusätzlich hat die Härte einen großen Einfluss auf Abrasivverschleiß (Abschnitt 2.2.2). Die Härte kann in verschiedenen Größenordnungen (Makrohärte, Mikrohärt, Nanoindentierung) relativ einfach direkt an den Kontaktoberflächen bestimmt werden und ist damit zur Charakterisierung tribologischer Kontaktflächen weit verbreitet. Nach ZUM GAHR [134] ist für das tribologische Verhalten eher die Härte im verformten, also im kaltverfestigten Zustand relevant. Für die Verschleißbeständigkeit spielt neben der Härte auch die Bruchzähigkeit eine große Rolle. Im Allgemeinen führt eine höhere Werkstoffhärte zu einer geringeren Bruchzähigkeit. Dieser Zusammenhang wird in Abschnitt 2.2.2 genauer betrachtet.

Gefüge (Mikrostruktur)

Für polykristalline Werkstoffe definiert das Gefüge die Materialeigenschaften. Nach der *Hall-Petch-Beziehung* steigt die Festigkeit mit abnehmender Korngröße. Kleine Körner weisen aufgrund der geringeren Kerbwirkungen auch einen höheren Widerstand gegenüber Rissinitiierung auf. Große Körner können dagegen das Risswachstum bremsen.

Viele technische Werkstoffe weisen ein mehrphasiges Gefüge oder Mischkristalle auf. In Stählen werden z.B. Carbide für eine höhere Abrasionsbeständigkeit gezielt eingesetzt [134].

Wie homogen die einzelnen Elemente verteilt sind, kann die Verschleißbeständigkeit stark beeinflussen. Eine durch den Herstellprozess bedingte zeilige Mikrostruktur kann sich negativ auf die Verschleißfestigkeit auswirken [13,134]. Wie auch Poren oder Einschlüsse können Zeilen eine Kerbwirkung aufweisen und bei Belastung Sollbruchstellen darstellen [134].

Neben den mechanischen Parametern spielen die chemischen Eigenschaften eine große Rolle, wie bereits in Abschnitt 2.1.2 beschrieben wurde.

Die aufgeführten Parameter geben einen Überblick über die mechanischen Einflussgrößen im Reibkontakt. Eine Bestimmung aller relevanten Eigenschaften ist i.d.R. nicht zweckmäßig, weswegen mit einfach bestimmbar Parametern wie der Härte und vielen Erfahrungswerten gearbeitet wird. Die beschriebenen Parameter ändern sich nach Beanspruchung teilweise stark, worauf im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

2.1.6 Materialantwort auf die tribologische Belastung

Wie bereits in Abb. 2 (Abschnitt 2.1.2) gezeigt, verändert sich durch die tribologische Belastung der oberflächennahe Bereich und somit die Mikrostruktur unterhalb der Oberfläche. Dieser Zusammenhang ist u.a. bereits 1936 durch SCHMALTZ erkannt worden [134], da sie bei der mikroskopischen Untersuchung von metallografischen Schliffen offensichtlich ist. Diese Veränderungen des oberflächennahen Bereiches wirken sich stark auf die im vorigen Abschnitt 2.1.5 zusammengefassten Materialeigenschaften im Kontakt aus und bestimmen damit das tribologische Verhalten.

Die Kenntnis der geänderten Eigenschaften ist somit eine zentrale Voraussetzung für das Verständnis des tribologischen Verhaltens. Mit besseren Analysemethoden konnte in den letzten Jahrzehnten ein Erkenntniszuwachs in diesem Bereich erreicht werden. Im folgenden Abschnitt werden für diese Arbeit wichtige Effekte zusammengefasst, der Fokus liegt dabei auf den Veränderungen und den Auswirkungen auf das tribologische Verhalten. Die Entstehung von Verschleißpartikeln ist eng mit diesem Thema gekoppelt und wird gesondert in Abschnitt 2.2 betrachtet.

Veränderungen der Materialeigenschaften durch Reibenergie

Die tribologisch beanspruchte Mikrostruktur wird vor allem durch Wärmeeintrag und die wirkenden mechanischen Spannungen (Schub- und Normalspannungen) modifiziert.

Eine Veränderung des Gefüges durch Wärmebehandlung ist in der Materialverarbeitung Stand der Technik. Bei vielen Werkstoffen werden die Materialeigenschaften mithilfe gezielter Wärmezufuhr für die jeweilige Anwendung optimiert [7].

Durch plastische Verformungen werden die Eigenschaften auch ohne das Wirken von global erhöhten Temperaturen stark geändert [134]. Hier sind sowohl Verfestigung als auch Entfestigung möglich. Ein bekanntes Praxisbeispiel aus dem Maschinenbau ist die Kaltverfestigung von metallischen Werkstoffen durch die Zunahme und den Aufstau von Versetzungen nach plastischer Verformung. Für die gängigen Konstruktionswerkstoffe kann von diesem Verhalten ausgegangen werden [43].

Allgemein neigen normal- oder weichgeglühte Gefüge zum Verfestigen, während in stark plastisch verformten Werkstoffen mit hoher Versetzungsdichte dynamische Rekristallisation und damit Entfestigung ohne Erwärmung auftreten kann [12,43].

Mit zunehmender Temperatur wird die Rekristallisation erleichtert. Je nach Last- und Temperatureintrag kann die Materialantwort damit sehr unterschiedlich sein, wobei das Materialverhalten stark von der Vorgeschichte abhängig ist [19,43].

Im tribologischen Kontext wird der Temperatureinfluss auf adhäsiven Verschleiß (siehe 2.2.1) bereits seit Jahrzehnten betrachtet. So wird in der Getriebeauslegung zwischen Kalt- und Warmfressen unterschieden. Fressen beschreibt allgemein das Materialversagen durch intensiven adhäsiven Verschleiß und ist mit einem starken Temperaturanstieg verbunden [2,47].

Das Phänomen des Fressens geht mit einer plötzlichen, starken plastischen Verformung des oberflächennahen Bereichs einher [47]. Dieses Verhalten kann mit dem Modell der instabilen adiabatischen plastischen Verformung durch Schubspannung (englisch: *adiabatic shear plastic instability*) erklärt werden [46]. Während des Reibvorgangs laufen demnach zwei Prozesse gleichzeitig ab [17]. Zum einen wird das Material durch die plastische Verformung kaltverfestigt, zum anderen führt die Verformungsarbeit zu erhöhter Temperatur und kann damit ein Entfestigen begünstigen [17]. Wirkt die Entfestigung stärker als die Verfestigung, kann es schlagartig zu hohen Verformungen kommen. Da der Prozess in sehr kurzer Zeit abläuft, kann die Wärme nicht schnell genug abfließen (*adiabatisch*) [2]. Durch die lokal hohe Temperatur tritt eine Selbstverstärkung auf, weshalb der Prozess als instabil angesehen werden kann [17].

Neben dem beschriebenen Mechanismus kann der Energieeintrag durch den Reibprozess auch zu anderen Effekten wie Phasenumwandlungen führen. Beispielsweise wurde eine durch Fressen erzeugte Austenitisierung im geschmierten Kontakt von niedriglegiertem Stahl nachgewiesen [47].

Zusätzlich werden häufig starke Änderungen in der Mikrostruktur wie eine sehr starke Kornfeinung [1] beobachtet, auf die im Folgenden eingegangen wird.

2.1.7 Mikrostruktur: Nanokristallines Gefüge und Durchmischung

Viele Veröffentlichungen beschreiben eine starke Kornfeinung infolge der tribologischen Last. Oft werden Korngrößen kleiner 100 nm, der üblichen Definition für nanokristallines Gefüge, festgestellt [44,81,133].

Korngrößen in dieser Dimension konnten erst mit modernen Analysemethoden nachgewiesen werden, weshalb im Ingenieuralltag häufig noch von amorphen Bereichen oder „*white etching areas*“ (WEA, siehe 2.4) gesprochen wird [84]. Meist weisen diese Bereiche jedoch nanokristallines Gefüge auf [67,84,97].

Nanokristallines Gefüge nach tribologischer Belastung

Das nanokristalline Gefüge ist ein häufiges Phänomen im metallischen Reibkontakt und wurde für verschiedene Reinelemente sowie Legierungen unter unterschiedlichen Bedingungen nachgewiesen. Eine Übersichtsmatrix hierzu ist in Anhang I gegeben.

Nanokristallines Gefüge tritt bei geschmierten [58,64,130] und trockenen Kontakten [86,129], bei reinen Gleitbewegungen mit geringen [64] und hohen Flächenpressungen [131] sowie hochbelasteten Wälzkontakten [29,39,126] auf. Die dabei wirkenden Verschleißmechanismen reichen von Ermüdung [29,39,126] über starken adhäsiven Verschleiß (*Fressen*) [2,120] bis zu stark abrasivem Verschleiß [48,69].

Die Tiefe der nanokristallinen Schicht kann je nach tribologischem System mehrere μm betragen. Der Übergang zum gröberen Gefüge kann fließend [112] oder stark abgegrenzt [40] auftreten. Eine starke Kornfeinung unter tribologischer Last wird sowohl in duktilen Materialien wie kubisch-flächenzentriertem Kupfer [113] als auch in gehärtetem Stahl [129] beobachtet. Eine starke Kornfeinung kann infolge von Adhäsion auch im gehärteten Material durch einen weicheren Gegenkörper verursacht werden [129].

Nach RIGNEY ET AL. [97] zeigen Materialien, die kaltverfestigen, nach Gleitverschleiß allgemein eine zunehmende Kornfeinung zur Oberfläche bis hin zu nanokristallinem Gefüge. Die Korngröße folgt demnach der Dehnungsverteilung, die als exponentiell angenommen wird [97]. Materialien, die unter Last entfestigen, wie Blei-Zinn Lotlegierungen, weisen nach tribologischer Belastung im oberflächennahen Bereich eine gröbere Mikrostruktur mit geringerer Härte auf [97].

GREINER, GAGEL und GUMBSCH [41] fassen zusammen, dass grobe, weiche Gefüge nach tribologischer Belastung eine nanokristalline Mikrostruktur mit Übergangszonen zum groben Grundgefüge ausbilden, während initial nanokristallines Gefüge infolge der tribologischen Belastung meist Kornwachstum zeigt.

Entstehung von nanokristallinem Gefüge

Nach RIGNEY ET AL. [97] können im oberflächennahen Bereich extreme Dehnungen bis 1000 beobachtet werden. Die Dehnungen können durch Markierungen, welche mittels Beschuss der Oberflächen mit Gallium-Ionen eingebracht wurden, verfolgt werden. Mit dieser Methode konnten SCHERGE, BRINK und LINSLER [104] ähnlich hohe Dehnungen in einer Aluminiumlegierung nachweisen.

Plastische Verformung von metallischen Werkstoffen führt in den meisten Fällen zu einer Zunahme der Versetzungsdichte, was die *Kaltverfestigung* induziert (siehe 2.1.6). Ein Zusammenhang zwischen hoher plastischer Verformung und Kornfeinung wurde von RIGNEY ET AL. bereits 1978 dargestellt [94].

In aktuellen Veröffentlichungen wird davon ausgegangen, dass sich die Versetzungen bei starker plastischer Verformung bzw. hohen Dehnungen zuerst zu neuen Klein- und später zu Großwinkelkorn Grenzen organisieren und dadurch die Kornfeinung auftritt [95,96,133].

Dies deckt sich mit den Herstellerprozessen für nanokristalline Werkstoffe, die meist auf hoher Dehnung basieren [15,133].

Der nanokristalline Bereich tritt folglich in Gebieten mit hohen Dehnungen, also bei tribologischer Belastung, meist nah an der Oberfläche auf [97]. Die Umwandlung in diesen energetisch ungünstigen Zustand benötigt viel Energie aus dem Reibprozess. Bei zu hohem Energieeintrag ist allerdings auch eine Rekristallisation und damit verbunden ein Kornwachstum möglich. Deshalb ist die Ausbildung einer nanokristallinen Schicht nur innerhalb eines bestimmten tribologischen Belastungskorridors möglich [95,112].

WOLFF ET AL. [130] konnten in perlitischem Stahl bei geschmiertem oszillierendem Kontakt bereits nach zwei Oszillationszyklen die Ausbildung von nanokristallinen Körnern an der Oberfläche beobachten. Die Tiefe der nanokristallinen Schicht wächst zunächst mit der Zyklenzahl [130]. Vor Ausbildung des nanokristallinen Gefüges werden die Körner anfangs stark in Bewegungsrichtung verformt. Auf Basis weiterer Versuche folgern die Autoren, dass die Körner ab einer bestimmten plastischen Verformung keine weiteren Dehnungen mehr aufnehmen können und sich daher in nanokristallines Korn umwandeln [130]. Unterhalb der nanokristallinen Schicht setzt sich die plastische Verformung in die Tiefe fort [130].

Ein ähnliches Verhalten konnte in anderen Untersuchungen auch für reines Kupfer beobachtet werden [24].

Eigenschaften von nanokristallinem Gefüge

Die gegenüber dem Grundgefüge stark geänderte Mikrostruktur führt zu einem veränderten mechanischen Verhalten. Nach der *Hall-Petch-Beziehung* nimmt die Festigkeit von Metallen mit kleiner werdender Korngröße bei Raumtemperatur zu [99]. Die Feinkornhärtung hat den Vorteil, dass sie allgemein nicht mit einer verminderten Duktilität einhergeht [99].

Bei nanokristallinen Körnern kann jedoch der gegenteilige Effekt auftreten. Hier spricht man von der *Hall-Petch-Inversion*, die für verschiedene Metalle nachgewiesen wurde [1]. Der Übergangsbereich in das inverse Verhalten wird in [87] allgemein für Korngrößen kleiner 12 nm angegeben. Zur Ursache der Inversion wurden verschiedene Theorien publiziert [45,82,91], wobei beispielsweise ein Übergang vom Versetzungsgleiten zum Korngrenzgleiten und die Ausbildung von Gleitbahnen entlang mehrerer Korngrenzen angenommen werden.

Auch wenn es bei sehr kleinen Körnern nach der *Hall-Petch-Inversion* zu einer Abnahme der Festigkeit kommt, kann gegenüber normalisiertem Gefüge meist von einer erhöhten Festigkeit ausgegangen werden [18]. In der Literatur wird nanokristallinem Gefüge oft allgemein eine höhere Härte, Festigkeit und Ermüdungsbeständigkeit zugewiesen [72,87,95].

Für tribologisch erzeugte nanokristalline Schichten wird i.d.R. eine gegenüber dem Grundmaterial deutlich gesteigerte Härte festgestellt: Versuche zeigen erhöhte Härten in reinem Kupfer [24], perlitischem Schienenstahl und martensitischem 100Cr6 [29,39,38,62].

Zur Duktilität liegen widersprüchliche Angaben vor. Viele Veröffentlichungen weisen nanokristallinem Material eine verringerte Duktilität zu [72,87]. Dies würde die These bestärken, dass die Dehnung mit Ausbildung der nanokristallinen Schicht im tribologischen Kontakt weiter in die Tiefe wandert [24,130], da das nanokristalline Material die Dehnungen nicht weiter aufnehmen kann [24].

Andere Autoren weisen nanokristallinem Material eine hohe Duktilität mit teilweise superplastischem Materialverhalten (Dehnungen über 400 [15]) zu [15,82,113,133].

Nanokristallines Material aus Reibkontakten zeigt oft auch geänderte chemische Eigenschaften [95], die aus einer Durchmischung mit dem Gegenkörper und aus der Aufnahme von Fremdelementen aus der Umgebung resultieren.

Materialtransfer und mechanische Vermischung

Adhäsive Bindungen erzeugen oft Materialübertrag. Werden Verschleißpartikel, die häufig als Gemisch aus allen Elementen des Tribosystems vorliegen, an den Oberflächen angelagert, entstehen sogenannte *Transferschichten* oder *Tribofilme*, die aufgrund ihrer exponierten Lage an den Oberflächen naturgemäß großen Einfluss auf das tribologische Verhalten ausüben [96,104].

Durch zyklischen adhäsiven Übertrag werden im metallischen Gleitkontakt Grund- und Gegenkörper im oberflächennahen Bereich teilweise stark durchmischt. Man spricht in diesem Fall oft von *mechanischer Vermischung* (englisch: mechanical mixing) [95], wobei auch Elemente aus der Umgebung und dem Schmierstoff in die Oberflächen eingearbeitet werden [96,113]. Eine eindeutige Abgrenzung der Begriffe wurde in der Literatur nicht gefunden, mechanische Durchmischung suggeriert aber deutlich stärkere Materialvermischung als der Begriff Transferschichten.

In geschmierten Systemen werden vor allem Kohlenstoff und Sauerstoff sowie die Schmierstoffadditive in die Oberflächen eingetragen. Typische Tiefen für signifikant erhöhte Elementanteile liegen im Bereich bis einige 100 nm [59,107], wobei neben dem mechanischen Materialtransport auch Diffusion eine Rolle spielen kann [105,107].

Die Entstehung von nanokristallinem Material ist nach [95] mit der mechanischen Durchmischung gekoppelt. Die Abgrenzung des durchmischten Bereichs vom Grundmaterial ist oft scharf. Dies legt nahe, dass tatsächlich eine Durchmischung und keine Diffusionsprozesse stattgefunden haben [96]. Das nanokristalline Material ist demnach eine Art Auftragsschicht aus durchmischten Elementen des Tribosystems.

Für die Entstehung von nanokristallinem Gefüge zeichnen die zugrundeliegenden Quellen kein einheitliches Bild. Die bereits vorgestellten materialwissenschaftlichen Theorien zur Entstehung der nanokristallinen Schichten kommen auch ohne eine mechanische Durchmischung aus [40,41]. Demnach können mechanische Durchmischung und nanokristallines Gefüge auch unabhängige Effekte sein, die je nach Tribosystem unterschiedlich stark ausgeprägt sind.

Allgemein ist auf Basis der bisher gezeigten Theorien eine Unterteilung der Oberfläche für metallische Gleitkontakte in unterschiedliche Bereiche angebracht, wie sie beispielsweise in [64] oder [25] vorgenommen wird. Oft kann demnach in die Bereiche

- 1) mechanisch durchmischter Bereich (*i.d.R. amorph oder nanokristallin*)
- 2) Kornfeinungsbereich (*nanokristallin bis feinkörnig*)
- 3) umgeformter Bereich (*feinkörnig bis Ursprungsgefüge*)
- 4) gestörtes Grundgefüge mit Versetzungsanhäufungen

unterteilt werden. Die Aufteilung der Schichten kann je nach Tribosystem variieren [64].

2.1.8 Schmierung und Grenzreibung

Schmierstoffe werden zur Verringerung von Reibung und Verschleiß eingesetzt. Neben der Trennung der Oberflächen von Grund- und Gegenkörper und damit der Aufnahme der Scherspannung und der Geschwindigkeitsdifferenz, führen Schmierstoffe Wärme und Verschleißpartikel aus dem Kontaktbereich ab.

In technischen Systemen werden neben Schmierfetten vor allem Schmieröle eingesetzt. Diese setzen sich aus einem Grundöl (auf Basis von mineralischen oder synthetischen Ölen) und einem Additivpaket zusammen, mit dem das tribologische Verhalten optimiert wird [21]. In Motor- und Getriebeölen wirken eine Vielzahl von Additiven, die sich gegenseitig beeinflussen. Die genauen Mechanismen sind dabei kaum verstanden und die Auslegung erfolgt mittels empirischer Versuche [21].

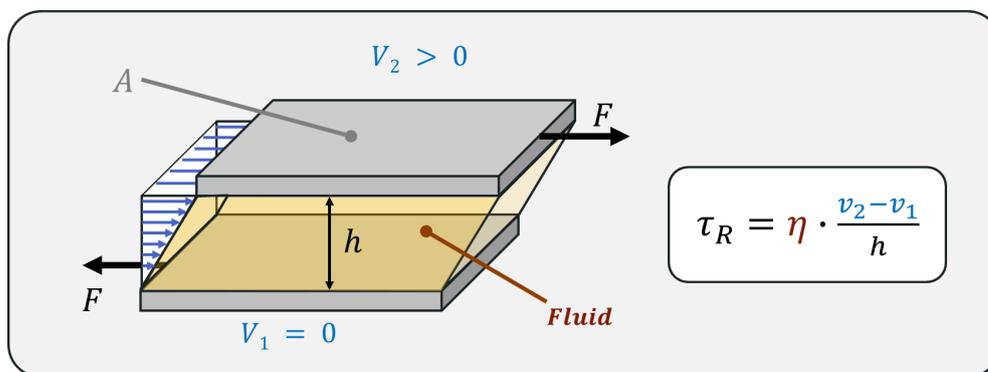


Abb. 4: Definition der dynamischen Viskosität η nach [4,21]

τ_R =Schubspannung; $v_{2/1}$ = Geschwindigkeiten; h = Spalthöhe; A = Fläche; F = Kraft

Viskosität

Die Viskosität bezeichnet die Zähflüssigkeit und damit die Tragfähigkeit eines Schmierstoffes [21]. Die dynamische Viskosität beschreibt den Widerstand gegenüber dem Verschieben benachbarter Teilchen [4]. Die kinematische Viskosität ist das Verhältnis aus der dynamischen Viskosität und der Dichte [4].

Die Viskosität ist temperatur- und druckabhängig [21]. Zusätzlich haben das Schergeschwindigkeit und die Belastungsdauer einen Einfluss. Dieser Effekt kann für viele technische Öle vernachlässigt werden [21].

Hydrodynamische Schmierung (HD)

In Abhängigkeit der Schmierfilmdicke durchlaufen geschmierte Tribosysteme unterschiedliche Reibungszustände (nach [21]):

Festkörperreibung beschreibt den unmittelbaren Kontakt ohne einen trennenden Schmierstofffilm. In den meisten Fällen sind die Oberflächen trotzdem durch adsorbierte Flüssigkeiten bzw. Gase oder Reaktionsschichten getrennt (siehe Abb. 2). Bei *Grenzreibung* sind die Oberflächen mit einer Adsorptionsschicht aus Schmierstoffmolekülen bedeckt.

Bei *Flüssigkeitsreibung* werden Belastung und Geschwindigkeitsdifferenz vollständig vom Schmierstoff aufgenommen. Die Oberflächen sind durch eine im Vergleich zur Topografie ausreichend hohe Schmierfilmdicke vollständig getrennt.

Bei *Mischreibung* reicht die Schmierfilmdicke nicht zur vollständigen Trennung aus. Belastung und Geschwindigkeitsdifferenz werden über kontaktierende Rauheitsspitzen und den Schmierfilm aufgenommen.

Verschleiß und Reibung nehmen so bis zum Erreichen der Flüssigkeitsreibung tendenziell ab. Dabei spielt der hydrodynamische Schmierfilmaufbau eine wichtige Rolle. Unter den Bedingungen eines sich verengenden Schmierpalt, einer hydrodynamisch wirksamen Geschwindigkeit, welche Schmierstoff in den Schmierpalt befördert sowie dem Vorhandensein eines ausreichend viskosen Schmierstoffs kann sich ein tragender Schmierfilm selbstständig aufbauen [26].

Die Hydrodynamik wird durch die Grundgleichungen der Strömungsmechanik (NAVIER-STOKES) beschrieben, die aktuell nur numerisch für sehr kleine Modelle unter hohem Berechnungsaufwand gelöst werden können [4]. Aus diesem Grund haben sich verschiedene Vereinfachungen bewährt. Für die Auslegung von Radialgleitlagern werden Ergebnisse aus der *Reynolds'schen Differentialgleichung* genutzt [26]. Diese wird unter Ausnutzung mehrerer vereinfachender Annahmen (z.B. ideal glatte Oberfläche) aus den *Navier-Stokes-Gleichungen* abgeleitet [4].

Der hydrodynamische Schmierfilmaufbau kann über die Stribeck-Kurve veranschaulicht werden (Abb. 5).

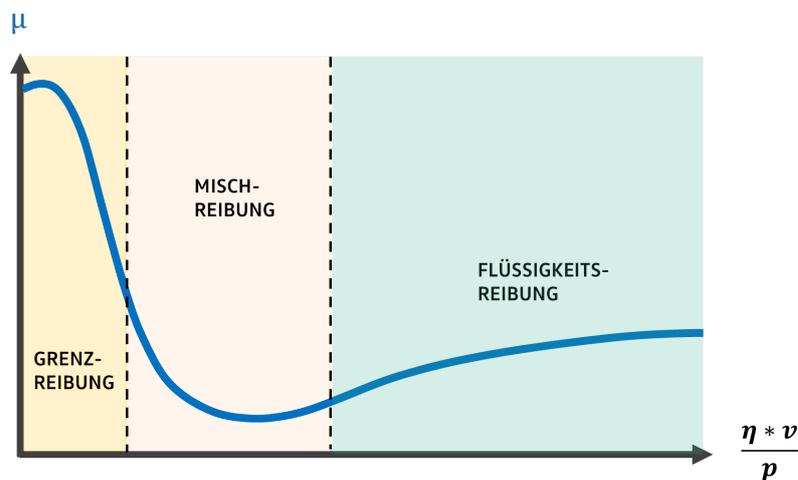


Abb. 5: Stribeck-Kurve nach [21]

η = dynamische Viskosität; v = hydrodynamisch wirksame Geschwindigkeit

p = Kontaktdruck; μ = Reibwert

Eine Zunahme der Schmierfilmdicke kann über eine geringere Last sowie eine höhere Viskosität oder höhere Geschwindigkeiten erreicht werden. Mit zunehmender Schmierfilmdicke nimmt die Reibung zunächst ab. Die Reibungszustände gehen von Festkörper- über Grenzreibung in Mischreibung über. Mit zunehmender Schmierfilmdicke steigen auch die Verluste durch innere Reibung im Schmierfilm. Die minimale Reibung liegt daher noch im Bereich der Mischreibung.

Elastohydrodynamische Schmierung (EHD)

Die Mechanismen der Hydrodynamik bestimmen die Tribologie in vielen geschmierten Systemen. Auch für hochbelastete konzentrierte Kontakte (beispielsweise in Wälzlagern oder Getrieben) kann eine vollständige Trennung der Oberflächen erreicht werden. Dies ist mit der klassischen Theorie der Hydrodynamik nicht abbildbar [27].

Für konzentrierte Kontakte mit hohen Hertzschen Pressungen (siehe Abschnitt 2.1.2) können die druckabhängigen Eigenschaften und Verformungen der Systemelemente nicht vernachlässigt werden [4]. Die elastohydrodynamische Theorie berücksichtigt daher auch die elastische Verformung der Festkörper sowie die Druckabhängigkeit von Viskosität und Dichte des Schmierstoffs [27].

Mit dieser Erweiterung der klassischen Theorie kann die elastohydrodynamische Druckverteilung beispielsweise in Wälzlagern oder Zahnradkontakten ausreichend genau berechnet werden [4]. Die Kontaktbelastung folgt in diesen Fällen annähernd der Hertzschen Druckverteilung [21].

Grenzreibung

Sind die Bedingungen zum Aufbau hydrodynamischer Schmierung z.B. durch zu hohe Lasten nicht erfüllt, liegt Grenzreibung vor [21]. In diesem Reibungszustand wird das tribologische Verhalten wie auch bei ungeschmierten Systemen durch die Grenzschichten der Oberfläche geprägt [21]. In geschmierten Systemen wird die Bildung der Grenzschichten durch die Eigenschaften des Schmierstoffs, der Kontaktpartner und vor allem der Schmierstoffadditive definiert [21],

Für die Entstehung der Grenzschichten werden die Mechanismen *Physisorption*, *Chemisorption* und *Tribochemische Reaktion* unterschieden (*nach* [21]):

Physisorption beschreibt die Adsorption von Schmierstoff- oder Additivmolekülen an den Oberflächen mit relativ schwachen physikalischen Bindungskräften. Metalle weisen aufgrund der vorhandenen Oxidschichten meist polare Oberflächen auf. Langkettige organische Moleküle mit polaren Endgruppen, die sich mit den Oberflächen verbinden, wirken in diesem Fall oft reibungssenkend. Ob die gleichen Moleküle auf Keramiken wirken können, hängt von der Bindungsart der jeweiligen Keramik ab. So konnte für Aluminiumoxid mit ionischer Bindung eine Absenkung der Reibung, für Siliciumcarbid mit kovalenter Bindung kein Effekt festgestellt werden.

Chemisorption ist durch stärkere Bindungskräfte geprägt, da Teile der Moleküle eine chemische Verbindung mit der Oberfläche eingehen. Die Reaktionen verlaufen dabei nur sehr oberflächlich [21].

Tribochemische Reaktionen beschreiben Reaktionen, bei denen feste Schichten auf den Oberflächen entstehen und Moleküle komplett umgebaut oder zersetzt werden können. Die entstehenden Bindungen wirken tiefer, wodurch sich insgesamt höhere Bindungskräfte ausbilden und die entstehenden Reaktionsschichten mechanisch und thermisch stärker belastbar sind.

2.1.9 Energetische Betrachtung der Reibung

Reibkräfte wirken ihrer Natur nach der Bewegung entgegen. Wirken Kräfte längs eines Wegs wird physikalische Arbeit verrichtet. Die infolge der Arbeit induzierte Energie muss aufgenommen werden.

Nach [134] wird in tribologischen Systemen ein Großteil der Reibungsarbeit in Wärme dissipiert. Dieser Effekt wird von den Menschen schon seit Jahrtausenden zur Herstellung von Feuer genutzt. Hohe Energieanteile können auch in bleibende plastische Verformungen und reversible elastische Verformungen übergehen [96]. Weitere dissipative Pfade des Energieflusses sind die Umwandlung in Schall oder Photonen (Tribolumineszenz) [21].

Plastische Verformung und der Einfluss von Reibungswärme können die Mikrostruktur stark verändern (siehe Abschnitte 2.1.6 und 2.1.7). Zusätzlich können chemische Reaktionen mit anderen Elementen des Tribosystems und letztendlich Verschleiß als wichtige energetische Mechanismen auftreten. Die im Nachhinein sichtbaren Verschleißerscheinungen, welche für ein Verständnis des tribologischen Verhaltens zu Rate gezogen werden, resultieren damit nur aus einem Teil der umgesetzten Energie.

Energiedissipation in Form von Wärme führt in tribologischen Kontakten zu einer Erwärmung der Systemelemente. Die Erwärmung kann sich stark auf die Eigenschaften der Materialien auswirken. Einige Beispiele hierfür sind die Temperaturabhängigkeit der Viskosität sowie eine verstärkte Oxidation von Schmierstoffen und die Änderung der mechanischen Eigenschaften der Materialien.

Neben einer generellen Erwärmung des Tribosystems treten an den Mikrokontakten teilweise lokale Temperaturerhöhungen, sogenannte Blitztemperaturen, auf. Die Energie wird in den Kontakten so schnell dissipiert, dass die Wärme nicht mehr abfließen kann [21]. Durch den Wärmestau können für Zeiträume kleiner einer Millisekunde lokal Temperaturen von bis zu 2700 °C auftreten [21,134].

Nach dem dritten newtonschen Gesetz (*Actio = Reactio*) sind die Kräfte, die an zwei Kontaktpartnern auftreten immer gleich groß. D.h. auf Grund- und Gegenkörper wirken bei einem einfachen Zweikörperkontakt die gleichen Reibkräfte. Die in den Oberflächen umgesetzte Arbeit kann sich allerdings bei unterschiedlichen Eigenschaften der Körper erheblich unterscheiden [33].

Eine energetische Betrachtung von Reibung und Verschleiß wurde von FLEISCHER [33] eingeführt[33]. Die Reibungsarbeit W_R wird dabei als proportional zum an der Reibung beteiligten Volumen V_R angenommen. Als Proportionalitätskonstante wird die Reibungsenergiegedichte e_R eingeführt [33].

$$W_R = e_R \cdot V_R \quad (2.2)$$

Die Reibungsarbeit kann sich unterschiedlich auf die einzelnen Elemente des Tribosystems aufteilen. Daraus folgt:

$$W_R = \sum_{i=1}^n W_i \quad ; \quad \text{mit } n = \text{Anzahl der Kontaktpartner} \quad (2.3)$$

Die Zusammenhänge sind in Abb. 6 schematisch für ein Tribosystem im Bereich der Hydrodynamik und der Mischreibung gegenübergestellt.

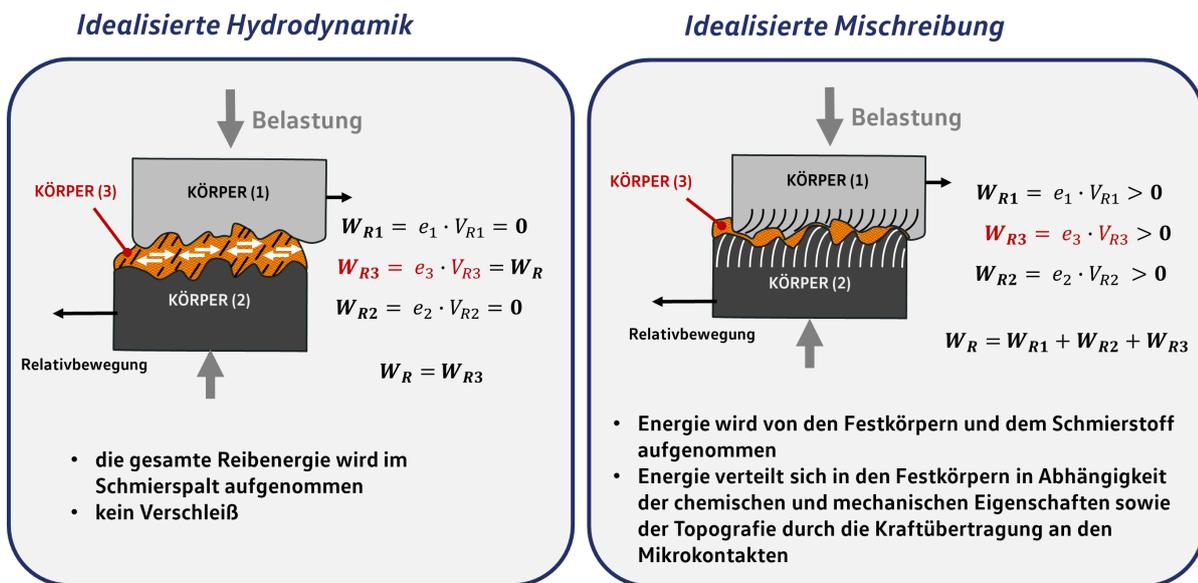


Abb. 6: Aufteilung der Reibenergie nach [33]

W_R = Reibungsarbeit; e_R = Reibenergiedichte; V_R = an Reibung beteiligtes Volumen

Im Fall der Hydrodynamik wird die gesamte Reibenergie vom Schmierfilm aufgenommen. An Grund- und Gegenkörper kommt es demnach in diesem idealisierten Beispiel zu keinem Verschleiß. Im Fall der Mischreibung teilt sich die Energie auf alle Elemente auf. An den Festkörpern wird die Energie über die Mikrokontakte aufgenommen. Die Mikrokontakte werden einerseits durch die Topografie und durch die elastischen und plastischen Eigenschaften der Werkstoffe bestimmt. Zusätzlich wirken sich chemische und mechanische Eigenschaften auf die Übertragung der Schubspannungen aus. Die Aufteilung der Energie wird demnach durch viele Parameter des Tribosystems bestimmt.

Durch Umformung von Gleichung (2.2) erhält man die Scherspannung τ_{Ri} :

$$\tau_{Ri} = e_{Ri} \cdot \frac{h_{Ri}}{s_{Ri}} \quad ; \quad \text{mit } [W_{Ri} = F_{Ri} \cdot s_{Ri}] \quad \text{und} \quad [\tau_{Ri} = \frac{F_{Ri}}{A_{Ri}}] \quad (2.4)$$

(mit A_{Ri} = Fläche eines Mikrokontaktes)

Die Scherspannung in den Kontaktpartnern τ_{Ri} ist damit abhängig von der Reibungsenergiedichte e_{Ri} und dem Verhältnis aus der Höhe des von der Reibung beanspruchten Materialbereichs h_{Ri} und dem Reibweg s_{Ri} [33].

Für das Beispiel der Mischreibung sind die Zusammenhänge in Abb. 7 dargestellt.

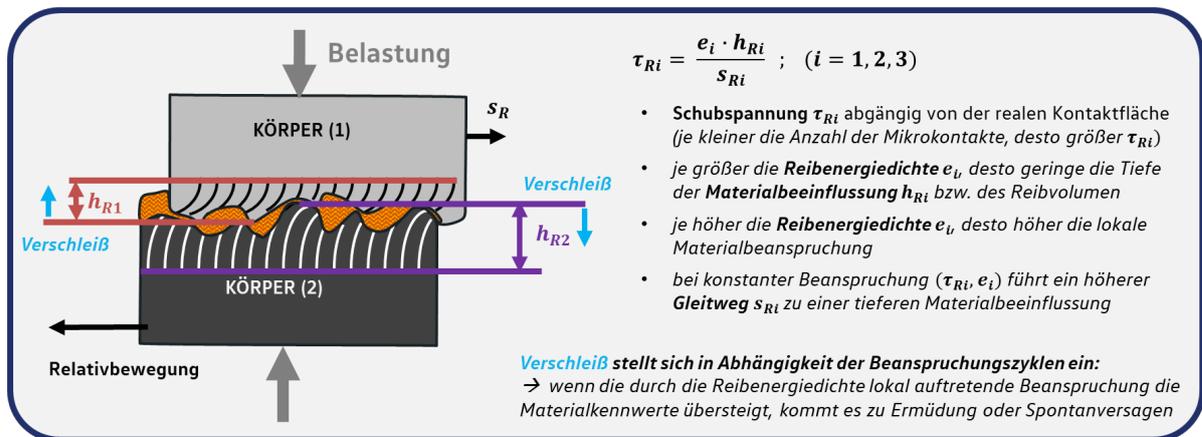


Abb. 7: Einflüsse auf die Schubspannung im Reibkontakt nach [33]

Hohe Schubspannungen und damit hohe Reibwerte können demnach entweder durch eine tiefe Beeinflussung des Materials (großes h_{Ri}) oder eine hohe Reibungsenergie (e_{Ri}) aufgenommen werden.

Ein größerer Reibweg s_{Ri} ist als größere Beanspruchungsdauer der gleichen Kontaktbereiche zu verstehen. Bei gleicher Schubspannung und Reibungsenergie führt eine höhere Beanspruchungsdauer zu einer tieferen Beeinflussung des Materials. Die Reibungsenergie besitzt die Einheit einer mechanischen Spannung und kann damit in eine Vergleichsspannung umgerechnet und mit Materialkennwerten verglichen werden. Somit ergibt sich für den energetischen Ansatz auch eine Methode zur Berechnung der Verschleißmengen.

Die energetische Betrachtung hat in Verbindung mit besseren Methoden zur Charakterisierung des oberflächennahen Bereiches an Bedeutung gewonnen. Die Veränderung der Mikrostruktur zu stark plastisch verformten bzw. nanokristallinen Körnern sowie die Bildung von Reaktionsschichten benötigt viel Energie. In der Betrachtung nach [111] wird die Reibenergie für Tribosysteme vor allem in die Hauptpfade *Erwärmung*, *Veränderungen des oberflächennahen Bereiches* und *Verschleißerzeugung* aufgeteilt.

Die energetische Betrachtung zeigt, dass Reibung und Verschleiß nicht korrelieren müssen. Bei einer effizienten spanenden Bearbeitung kann mit einem vergleichsweise geringen Reibwert viel Verschleiß erzeugt werden, da wenig Energie in die Umwandlung des oberflächennahen Bereiches bzw. Wärme und andere Emissionen umgesetzt wird.

Ein optimaler Einlauf eines Tribosystems setzt hingegen viel Reibenergie im oberflächennahen Bereich bei geringem Materialabtrag um und ermöglicht damit auch geringen Verschleiß im späteren Einsatz [104].

2.1.10 Theorie des dritten Körpers

Der Ansatz des *dritten Körpers* basiert auf der Modellvorstellung, dass sich zwischen den Kontaktflächen der beiden „ersten“ Körper ein Bereich mit stark geänderten Eigenschaften befindet [36]. Dieser Bereich wird allgemein dadurch definiert, dass er die Geschwindigkeitsdifferenz der sich bewegenden Körper zu einem Großteil aufnimmt und im Vergleich zum Grundmaterial stark geänderte Eigenschaften aufweist [36,37].

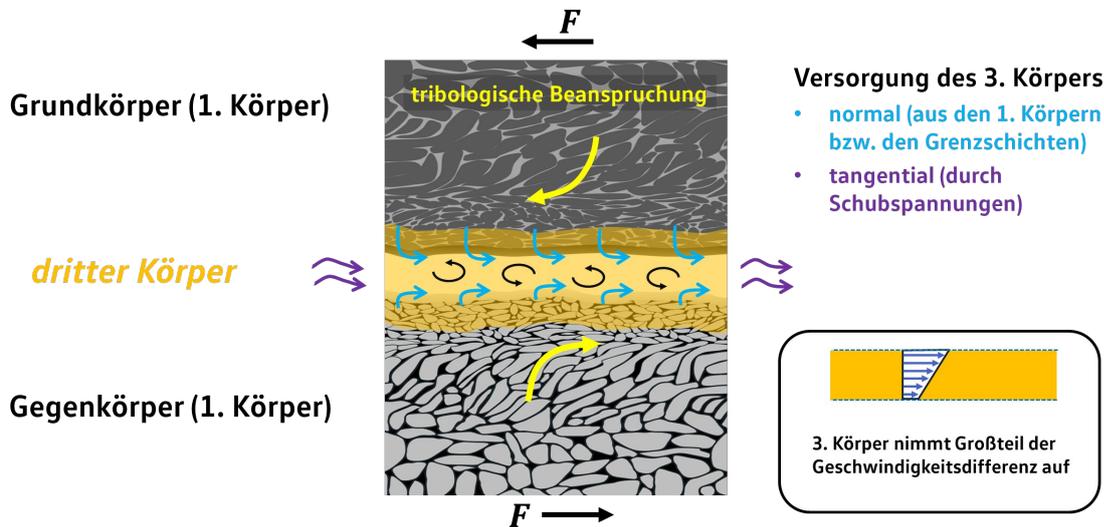


Abb. 8: Schematische Darstellung; Dritter Körper

Das Konzept wird in Abb. 8 veranschaulicht. In der Beschreibung durch GODET wird der *dritte Körper* als loses Agglomerat aus Verschleißpartikeln beschrieben, welches durch die geringen Bindungskräfte zwischen den einzelnen Partikeln die Geschwindigkeitsdifferenz aufnehmen kann und damit das Abgleiten im ungeschmierten Kontakt ermöglicht [36,37].

Der dritte Körper wird wie ein Schmierstoff betrachtet und durch sein Tragverhalten und seine Rheologie bzw. seine Fließeigenschaften (siehe Abschnitt 2.1.8) beschrieben [37]. Die Eigenschaften können dabei je nach Tribosystem zwischen losen Pulvern und einer klebrigen Masse schwanken und sich im Reibprozess ändern [36,37]. Der in Abschnitt 2.1.8 betrachtete viskose Schmierstoff ist in diesem Sinne auch ein dritter Körper.

Im Gleitkontakt zwischen Oberflächen kommt es oft zum Materialtransfer zwischen den Kontaktpartnern, der im zyklischen Kontakt zu einer mechanischen Durchmischung der im Kontakt stehenden Elemente führt (siehe auch Abb. 2) [95,96].

Nach trockenem Gleitkontakt sind kontaktierende Oberflächen im REM oft nicht mehr zu unterscheiden [36]. Die Verschleißpartikel zeigen meist die gleichen Eigenschaften wie der oberflächennahe durchmischte Bereich [134]. Daraus wird geschlossen, dass die Partikel aus dem durchmischten Bereich zwischen den Oberflächen, also dem dritten Körper stammen und der dritte Körper damit die Quelle der Verschleißpartikel ist [134].

Die Partikel zur Bildung des dritten Körpers werden sehr schnell aus den Kontaktflächen gelöst und können eine längere Zeit im Kontakt verbleiben [37]. Die Materialströme bestimmen demnach das tribologische Verhalten des dritten Körpers [37]. Materialtransport normal zu den Oberflächen führt zur Bildung des dritten Körpers und ist die Voraussetzung für Materialverlust

aus dem System [37]. Materialströme entlang der Oberflächen nehmen die Geschwindigkeitsdifferenz auf und bestimmen, wie schnell die Partikel aus dem System transportiert werden [37].

Verschleiß tritt demnach nicht bei der Bildung des dritten Körpers auf, sondern erst, wenn die Partikel das System verlassen. In Gleitversuchen auf transparenten Saphirscheiben wurde gezeigt, dass sich die Partikel im Kontakt auch entgegen oder senkrecht der Bewegungsrichtung bewegen [36]. Aufgrund der relativ engen Spalte können die Partikel über längere Zeiträume im Kontaktbereich zirkulieren und dadurch zu einer geringen Verschleißrate beitragen [36].

Abgrenzung: dritter Körper und modifizierte Oberfläche

Die Definition des dritten Körpers legt keine genaue Grenze fest. Während in den Veröffentlichungen von GODET und BERTHIER eher von losen Partikeln zwischen den Oberflächen der Grundkörper gesprochen wird [25,36], die nach der üblichen Reinigung zur Probenpräparation großteils nicht mehr vorhanden sind, konzentrieren sich aktuellere Veröffentlichungen auf den beeinflussten Bereich unter den Oberflächen, der im Reibkontakt modifiziert wird (Vergleich: Abb. 2) [104].

Auch in aktuellen Quellen sind unterschiedliche Abgrenzungen des dritten Körpers von den Grundkörpern publiziert: In Untersuchungen zum oberflächennahen Bereich von Eisenbahnschienen wurde der dritte Körper als der Bereich der mechanischen Durchmischung von Eisen und Sauerstoff betrachtet [25]. Die darunterliegenden Bereiche mit starker Kornfeinung bzw. stark verformten Körnern werden dagegen dem ersten Körper zugeordnet [25].

SCHERGE, BRINK und LINSLER definieren den Dritten Körper als den Bereich unter den Kontaktflächen mit im Vergleich zu den Grundkörpern markant geänderter Topografie, Mikrostruktur und chemischer Zusammensetzung [104]. Die Veränderungen wurden für verschiedene metallische Paarungen unter Ölschmierung durch umfangreiche Analysen nachgewiesen [104].

Die Veränderung des oberflächennahen Bereichs und damit die Ausbildung des dritten Körpers benötigt Zeit [105] und Energie [12] und ist für viele geschmierte Systeme die Voraussetzung für geringe Reibung und geringen Verschleiß [12].

Unabhängig von der gedachten Grenze des dritten Körpers werden alle Bereiche des Systems die Lasten und Geschwindigkeiten in unterschiedlichem Maße aufnehmen und damit die tribologischen Prozesse bestimmen. Von den losen Verschleißpartikeln über die Reaktionsschichten und den *mechanisch durchmischten Bereich* bis zum Bereich starker Kornfeinung sowie dem darunterliegenden beeinflussten Gefüge üben alle Schichten einen Einfluss auf Reibung und Verschleiß aus und sind damit Untersuchungsobjekte für ein besseres Verständnis der Tribologie [120].

2.1.11 Verschleißschutzadditive

Um die Eigenschaften der Schmierstoffe zu optimieren, werden in der Regel Additive hinzugefügt. Additive sind verschiedene chemische Verbindungen, die unterschiedliche Funktionen besitzen können [21]. Ein bekanntes Beispiel sind Verschleißschutzadditive. Zusätzlich werden beispielsweise Additive zum Korrosionsschutz oder zur Einstellung des Viskosität-Tempera-

turverhaltens verwendet. Eine Übersicht zu Additiven ist in [26] zu finden. Ein Motorenöl besitzt für gewöhnlich eine Vielzahl an Additiven, die von speziellen Additivherstellern als Additivpakete angeboten werden. Die Additive beeinflussen sich gegenseitig, die Funktion der Pakete wird meist empirisch ermittelt [21].

Im Folgenden sollen einige Verschleißschutzadditive betrachtet werden:

Die Funktion der Additive zum Verschleißschutz besteht in der Bildung tribologisch günstiger Grenzschichten auf den Oberflächen, die den direkten Kontakt der Grundmaterialien vermeiden und so Reibung und Verschleiß unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen verringern [4]. Die Bindung der Grenzschichten kann auf *Physisorption*, *Chemisorption* und *tribochemischer Reaktion* beruhen (siehe Abschnitt 2.1.8). Neben der Bindungsart hängt die Wirksamkeit der Additive von der Temperatur, der notwendigen Aktivierungsenergie, der Konzentration im Schmierstoff sowie den Bindungsmöglichkeiten auf der Oberfläche ab [4].

In Motorenölen werden häufig Zinkdialkyldithiophosphate (ZDDP) als Verschleißschutzadditive genutzt [21,76,134]. Unter tribologischer Belastung bilden sie festhaftende, verschleißmindernde Schichten aus Schwefelverbindungen und verschiedenen Phosphaten und damit aus den Elementen Zink, Phosphor, Schwefel und Sauerstoff [76].

Obwohl ZDDP-Additive seit vielen Jahrzehnten im Einsatz sind, ist der genaue Entstehungsprozess der verschleißmindernden Schichten bislang nicht verstanden [11,31,76]. Einen guten Einblick in den Stand der Technik bieten die Veröffentlichungen von BRINCKMANN ET AL. [11] sowie NICHOLLS ET AL. [76]. Als anerkannte Fakten können die folgenden Punkte festgehalten werden:

Verschleißmindernde Schichten durch ZDDP-Additive konnten auf zahlreichen Metallen, aber auch auf Gläsern oder Keramiken festgestellt werden [11,14].

Die Schichten sind durch eine flickenartige Ausprägung gekennzeichnet und weisen eine Dicke von bis zu 100 nm auf [11,76,101]. Die Flicken zeigen typischerweise eine Ausdehnung im Bereich von 200 bis 500 μm [114].

Die Schichten entstehen durch tribologische Belastung ausschließlich im Kontaktbereich, können aber auch rein thermisch durch Temperaturen über 100 °C erzeugt werden [11,76]. Thermisch erzeugte Schichten weisen einen anderen Aufbau und eine geringere Haftung auf [11,76].

2.2 Verschleißmechanismen

In tribologischen Systemen führen mechanische und chemische Prozesse zum Materialabtrag aus der Oberfläche. Verschleißmechanismen beschreiben die energetischen und mechanischen Interaktionen zwischen den Elementen eines Tribosystems [21]. In Tribosystemen können unterschiedliche Verschleißmechanismen wirken. Klassischerweise wird in die vier Verschleißmechanismen *Adhäsion*, *Abrasion*, *Ermüdung* bzw. *Oberflächenzerrüttung* und *tribochemische Reaktion* unterschieden [21]. Die Mechanismen werden üblicherweise getrennt betrachtet. In der Realität treten sie oft in Kombination auf. Eine scharfe Abgrenzung ist teilweise nicht möglich [134].

2.2.1 Adhäsion

Adhäsiver Verschleiß entsteht aufgrund der bereits in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen adhäsiven Kräfte an den Grenzflächen eines Tribosystems und ist damit stark durch die Oberflächenchemie geprägt [21]. Die aufgrund der atomaren und molekularen Wechselwirkungen neu entstehenden Bindungen zwischen den Oberflächen sind oft stärker als die umgebenden kohäsiven Bindungskräfte [21]. Folglich kommt es lokal zum Materialübertrag. Wiederholte adhäsive Vorgänge können zum Materialverlust aus dem System und damit zu Verschleiß führen [21]. Im Kontakt unterschiedlicher Metalle konnte festgestellt werden, dass der Übertrag vom kohäsiv schwächer zum kohäsiv stärker gebundenen Material stattfindet [21].

Neben den chemischen Oberflächeneigenschaften, welche die Entstehung der adhäsiven Bindungen prägen, haben auch die mechanischen Eigenschaften einen großen Einfluss [134]. Zum einen bestimmen sie durch die elastischen und plastischen Verformungseigenschaften die reale Kontaktfläche, zum anderen über die Fähigkeit zur Ver- und Entfestigung sowie über den Widerstand gegenüber Rissentstehung und Rissausbreitung den Materialabtrag aus den Oberflächen [134].

Zum Verständnis wird der typische Ablauf von adhäsivem Verschleiß im Folgenden nach [21] zusammengefasst:

- 1) Im Kontakt zwischen den Oberflächen werden die Rauheitshügel (siehe reale Kontaktfläche, Abschnitt 2.1.4) aufgrund der wirkenden Normal- und Tangentialspannungen in Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften deformiert.
- 2) Durch die wirkenden Lasten werden die in den meisten Fällen vorhandenen Oberflächendeckschichten (*beispielsweise Oxidschichten, Reaktionsschichten mit dem Schmierstoff oder adsorbierte Flüssigkeiten und Gase; siehe Abb. 2*) zerstört und es kommt zum direkten Kontakt der Grundwerkstoffe.
- 3) In Abhängigkeit der chemischen Eigenschaften kommt es zur Ausbildung von physikalischen und chemischen Bindungen.
- 4) Unter Relativbewegung findet die Trennung der adhäsiven Bindungen oder ein Materialversagen im Grundkörper und somit Materialübertrag statt. Der Materialübertrag wird durch mechanische (Ver- und Entfestigung) sowie tribochemische Effekte (z.B. Oxidation) verändert.

Duktile Werkstoffe zeigen infolge von adhäsivem Verschleiß oft starke plastische Verformungen, die mit einer starken Veränderung der Mikrostruktur einhergehen (siehe Abschnitt 2.1.7) [95].

Die beschriebenen Vorgänge finden wiederholt im Kontaktbereich statt und führen zu fortlaufendem Materialabtrag aus den Oberflächen und damit zu Verschleiß. Lokal spielen dabei auch Ermüdungseffekte und Abrasion eine Rolle [21]. An dieser Stelle wird deutlich, dass eine strikte Trennung der Verschleißmechanismen oft nicht möglich ist. Häufig können jedoch ein dominierender Mechanismus festgestellt und bestimmte Verschleißerscheinungen den einzelnen Mechanismen zugeordnet werden.

Adhäsionsverschleiß tritt in unterschiedlicher Schwere auf. Mit steigender Temperatur und Belastung kann es zum Systemversagen durch ein Festgehen der Gleitpaarung („Fressen“) kommen [46]. Fressen wird in der Literatur oft mit einer starken Entfestigung durch Rekristallisation verbunden, was bereits in Abschnitt 2.1.6 behandelt wurde.

Die Adhäsionsneigung kann durch trennende Schichten leicht unterbunden werden. Aufgrund der geringen Reichweite der Bindungskräfte genügen, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, dünne Trennschichten, um adhäsive Reibung und adhäsiven Verschleiß zu verhindern [134]. Mit dem Ziel, auch bei Grenzschmierung eine trennende Schicht zwischen den Oberflächen zu gewährleisten, werden in geschmierten Systemen Verschleißschutzadditive verwendet (siehe Abschnitt 2.1.11) [26].

2.2.2 Abrasion

Abrasion beschreibt den Materialverlust aus einer Oberfläche durch einen harten Gegenkörper unter Relativbewegung [21]. Dabei kann es sich um harte Partikel (3-Körperverschleiß) oder die härteren Rauheitsspitzen der Oberfläche des Gegenkörpers (2-Körperverschleiß) handeln [134].

Das Härteverhältnis zwischen der Oberfläche und dem abrasiv wirkenden Kontaktpartner ist dabei verschleißbestimmend. Zum Furchen der Oberfläche muss der härtere Gegenkörper etwa 20 % härter als der weiche Körper im verformten Zustand (*nach Kaltverfestigung*) sein [134]. Abrasiver Verschleiß wird damit stark durch die mechanischen Materialeigenschaften geprägt und ist zusätzlich von Größe und Geometrie der Kontaktpartner abhängig.

Als abrasive Gegenkörper können neben den Rauheitsspitzen der Gegenkörperoberfläche oder mineralischen, harten Fremdkörpern auch im tribologischen Prozess durch mechanische und thermische Einflüsse gehärtete Verschleißpartikel sowie Reaktionsprodukte von tribochemischen Veränderungen wirksam werden [134].

Abrasiver Verschleiß wird in die Unterkategorien *Mikropflügen*, *Mikroermüden*, *Mikrospanen* und *Mikrobrechen* unterteilt (Auflistung in Anlehnung an [21]):

Beim idealen *Mikropflügen* wird das Material durch einen harten Gegenkörper vollständig plastisch verformt. Es kommt zu einem Aufwurf an den Seiten der Gleitspur. Einmaliges Mikropflügen ist verschleißfrei, da kein Material entfernt wird.

Wiederholtes Mikropflügen kann zu einem Materialabtrag durch lokal hohe, zyklische Materialbelastung führen. Dieser Fall wird als *Mikroermüden* bezeichnet. Streng betrachtet handelt es sich auch um eine Form der Oberflächenzerrüttung.

Ideales *Mikrospanen* führt im Gegensatz zum Mikropflügen zu einem direkten Abtrag eines Spans aus der Verschleißspur. Das Spanvolumen entspricht dem Volumen der entstandenen Verschleißfurchen.

Mikrobrechen tritt vor allem bei spröden Materialien auf und ist durch eine Rissbildung und Rissausbreitung längs der Verschleißspur gekennzeichnet.

Wie auch die Verschleißmechanismen, treten die einzelnen Unterkategorien der Abrasion oft überlagert auf. Die hier betrachtete Trennung dient dem mechanistischen Verständnis.

In Abhängigkeit des Tribosystems dominieren unterschiedliche Effekte. In Abb. 9 werden die Materialeigenschaften für verschiedene Werkstoffkombinationen auf Basis von unterschiedlichen Abrasionsversuchen zusammengefasst [134].

Die Ergebnisse zeigen eine hohe Abhängigkeit des Verschleißverhaltens von den mechanischen Eigenschaften der Kontaktpartner. Das Härteverhältnis hat einen großen Einfluss. Härtere Abrasivstoffe (SiC) führen zu stärkerem Verschleiß. Zusätzlich wird deutlich, dass neben dem Härteverhältnis weitere Parameter einen großen Einfluss haben.

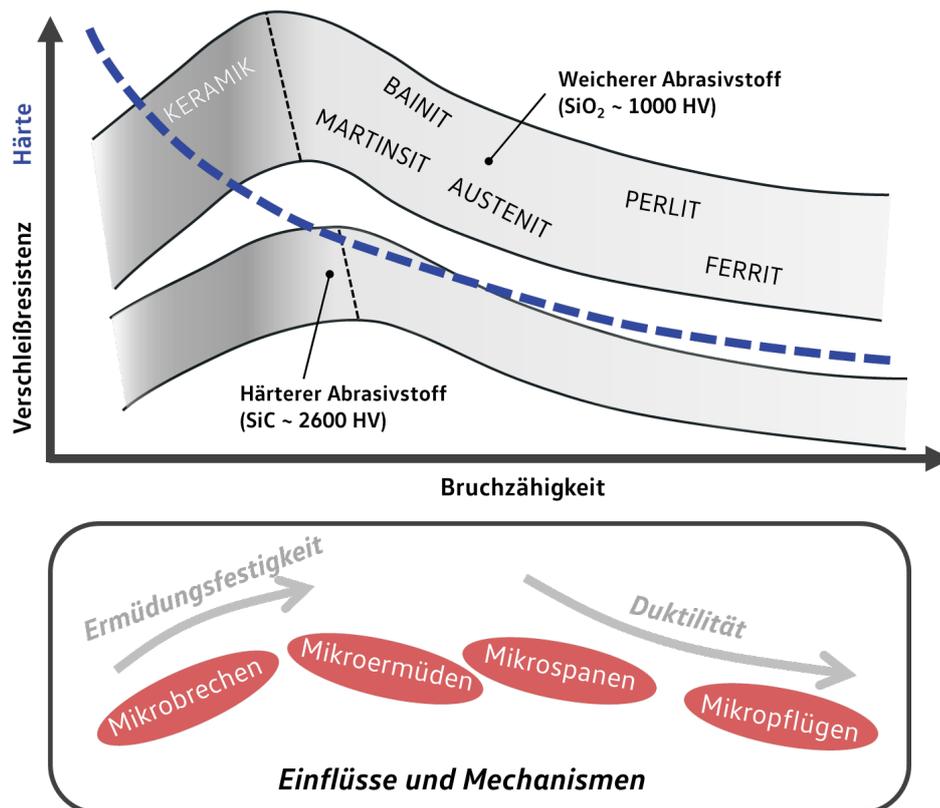


Abb. 9: Schematische Darstellung; Werkstoffeinflüsse auf Abrasionsbeständigkeit
Darstellungsform und zusammengefasste Daten aus [134]

Eine Zunahme der Härte der abrasiv beanspruchten Oberfläche führt nur unter bestimmten Bedingungen zu einer größeren Abrasionsbeständigkeit. Mit steigender Härte nimmt i.d.R. die Bruchzähigkeit ab. Das optimale Verhältnis von Bruchzähigkeit und Härte kann je nach Tribosystem bei unterschiedlichen Punkten liegen, wie die schematisch dargestellten Ergebnisse für weichere (SiO₂) und härtere Abrasivstoffe (SiC) in Abb. 9 zeigen [134].

Keramiken weisen in Relation zu ihrer hohen Härte oft eine geringe Abrasionsbeständigkeit auf. Dies ist auf die niedrige Bruchzähigkeit zurückzuführen, welche verstärktes Mikrobrechen verursacht [134].

Im anderen Extrem zeigen ungehärtete Stähle eine hohe Bruchzähigkeit und Duktilität, was große Verformungen ohne Materialabtrag zulässt. Durch die im Vergleich zum Abrasivkörper sehr geringe Härte kommt es zu einem tiefen Eindringen und starkem Mikropflügen, was bei zyklischer Belastung zu hohem Abrasivverschleiß führt [134]. Zusätzlich liegt eine deutlich höhere Adhäsionsneigung vor [134].

Gehärtete Stähle zeigen für viele Anwendungen einen guten Kompromiss aus Bruchzähigkeit und Härte. Unterschiede im Gefüge können bei vergleichbarer Härte und Bruchzähigkeit einen weiteren Einfluss darstellen. So zeigt bainitisches Gefüge in den Ergebnissen aus [134] (siehe Abb. 9, S. 27) bei gleicher Härte teilweise deutlich höhere Abrasionsbeständigkeit als Martensit. Austenit kann trotz der vergleichsweise geringen Härte vorteilhaftes Verhalten aufgrund von einer verformungsinduzierten Umwandlung in Martensit und der damit verbundenen Aufnahme von Reibenergie bei gleichzeitiger Festigkeitszunahme aufweisen [134].

2.2.3 Oberflächenzerrüttung

Zyklische tribologische Belastungen führen zu Ermüdungseffekten im Werkstoff. Infolge von Rissbildung und Rissausbreitung kommt es zum Ausbrechen von Materialbereichen aus den Werkstoffoberflächen [21]. Die Prozesse im Werkstoff folgen dabei den gleichen Gesetzmäßigkeiten wie die Ermüdung von Strukturbauteilen unter dynamischer Belastung. Auch bei den in den vorangegangenen Abschnitten gezeigten Verschleißmechanismen Adhäsion und Abrasion beruht der Materialabtrag vor allem auf bruchmechanischen Effekten im Werkstoff. Bei der Oberflächenzerrüttung liegt der Fokus jedoch nicht auf den Veränderungen im Bereich der kontaktierenden Grenzflächen. Vielmehr ist die Rissbildung unterhalb der Oberflächen der entscheidende Einfluss. Die meisten Erkenntnisse zur Ermüdung von Oberflächen unter tribologischer Belastung wurden mit metallischen Werkstoffen erarbeitet. Tritt ermüdungsbedingter Verschleiß auf, sind die Mechanismen auch auf Polymere [134] und ingenieurkeramische Werkstoffe übertragbar [93].

Bei geringer Reibbelastung dominiert in konzentrierten Kontakten die Hertzsche Belastung und die maximalen Vergleichsspannungen liegen unterhalb der Oberfläche (siehe Abschnitt 2.1.4). Oberflächenzerrüttung tritt häufig als Ausfallursache in Systemen mit geringen Reibwerten (z.B. in geschmierten Wälzkontakten) auf [21]. Ursächlich ist eine Rissbildung unter den Oberflächen im Bereich der maximalen Werkstoffbelastung nach langen Zeiträumen. Dabei kommt es vorher zu keinen signifikanten Veränderungen der kontaktierenden Oberflächen [21].

Wie bei allen Verschleißmechanismen ist der Übergang zu den anderen Mechanismen fließend. Bei einer Zunahme der Reibkräfte (z.B. durch Mangelschmierung oder Verunreinigungen in einem Wälzlager) kann die Oberflächenzerrüttung mit adhäsivem und abrasivem Verschleiß überlagert werden [39,99].

Ablauf

Die durch überlagerte Normal- und Tangentialspannungen bestimmten maximalen Vergleichsspannungen können sowohl im Bereich der Oberflächen, als auch darunter bzw. in beiden Bereichen liegen [21]. Für die Beurteilung von Ermüdungseffekten ist die maximale Vergleichsspannung nach Gestaltänderungsenergiehypothese (siehe Abschnitt 2.1.4) relevant, welche im folgenden Abschnitt als Referenz genutzt wird.

In Tribosystemen treten an den bewegten Kontaktstellen dynamische Spannungsfelder auf. Selbst wenn die Vergleichsspannungsmaxima in den beanspruchten Körpern kleiner als die Werkstoffgrenze des jeweiligen Materials sind, kommt es in der Regel durch Inhomogenität im

Werkstoff lokal zu plastischer Verformung und dadurch zu mikrostrukturellen Veränderungen (siehe Abb. 2) [134].

Durch zyklische Be- und Entlastung werden die mikrostrukturellen Veränderungen akkumuliert. Folglich können Entfestigungsmechanismen (Rekristallisation) und vor allem Verfestigungsmechanismen (Versetzungsaufstau, Kornfeinung, Gitterverzerrung) auftreten. In Abhängigkeit von Spannungsamplitude und Zyklenzahl tritt Rissbildung und Rissausbreitung auf [21].

Im fortgeschrittenen Stadium vereinigen sich Rissnetzwerke zu größeren Ausbrüchen. Die typischen Schadensbilder werden oft als Oberflächenausbrüche oder Pittingschäden bezeichnet.

Risswachstum

Die verschleißbestimmende Rissinitiation tritt im Bereich der maximalen Vergleichsspannung auf. Bei Reibwerten kleiner 0,2 kann grob von einer Rissbildung unter der Oberfläche, bei Reibwerten größer 0,2 im Bereich der Oberfläche ausgegangen werden [21].

Je nach Lage der maximalen Vergleichsspannung kann damit von einem Risswachstum aus der Tiefe zur Oberfläche (*niedrige Reibwerte*) oder einem Risswachstum von der Oberfläche in die Tiefe (*höhere Reibwerte*) bzw. einer Kombination beider Effekte ausgegangen werden.

Für Kontakte mit überlagerter Roll- und Gleitbewegung (*Wälzen*) verlaufen die Risse üblicherweise in Winkeln zwischen 15° und 30° entgegen der Wälzrichtung [115,134].

Die Ausrichtung der Risse kann durch eine Betrachtung im *Mohrschen Spannungskreis* [42] plausibilisiert werden. Im reibungsfreien einachsigen Belastungsfall (Zug- oder Druckversuch) verlaufen die maximalen Hauptschubspannungen unter 45° zur Normalbelastung. Fügt man zusätzlich Schubspannungen in Reibrichtung hinzu, verringert sich der Winkel, wie die Ergebnisse in Abb. 10 verdeutlichen. Da Normal- und Schubspannung im gewählten Beispiel in der gleichen Fläche liegen, kann das Verhältnis als Reibwert interpretiert werden.

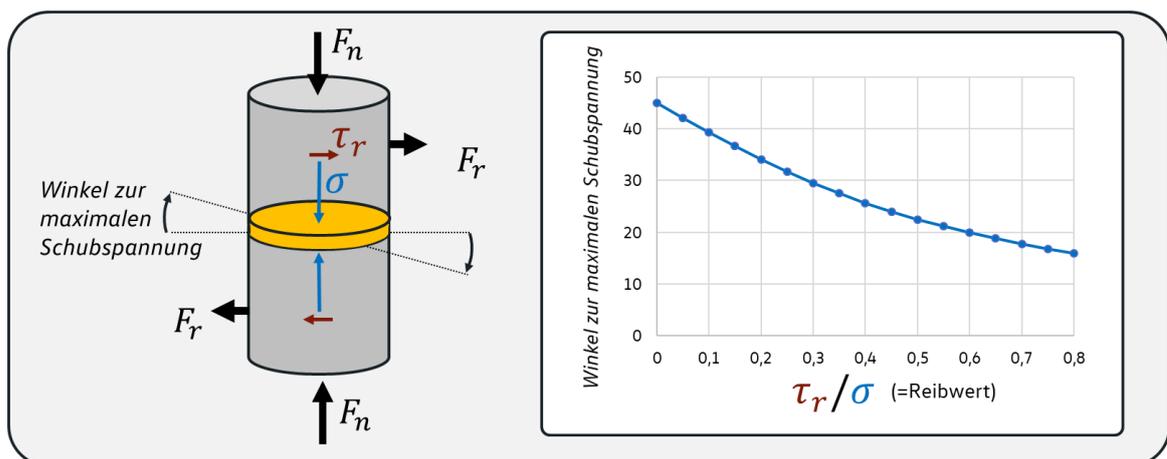


Abb. 10: Lage maximale Schubspannung
zweidimensionale Betrachtung; berechnet mit dem Mohrschen Spannungskreis

Werkstoffeigenschaften

Um Oberflächenzerrüttung zu vermeiden, ist eine geringe plastische Verformung unter der gegebenen Beanspruchung notwendig. Aus diesem Grund werden vor allem gehärtete Werkstoffe eingesetzt. Eine hohe Härte geht allgemein mit einer geringen Duktilität einher (Abb. 9, S. 27), was sich nachteilig auf den Widerstand gegenüber Rissausbreitung auswirkt. Als Kompromiss

haben sich Wälzlagerstähle mit hoher Reinheit bewährt. Durch die relativ hohe Härte und die geringe Menge an Einschlüssen kann die Rissbildung vermieden werden. Das üblicherweise angelassene Gefüge besitzt zusätzlich eine ausreichende Restzähigkeit [21].

2.2.4 Tribochemische Reaktion

Tribochemische Reaktionen beschreiben Reaktionen zwischen den Elemente des Tribosystems, also Bestandteilen von Grund- und Gegenkörper, Umgebungsmedium oder Zwischenstoff, die durch die tribologische Beanspruchung hervorgerufen bzw. verstärkt werden [21]. Infolge des reibbedingten Energieeintrags in die Systemelemente (Abschnitt 2.1.9) werden chemische und physikalische Prozesse nach ARRHENIUS aufgrund des Temperaturanstiegs in den meisten Fällen beschleunigt [60]. Tribologische Reaktionen können Reibung und Verschleiß vermindern oder Verschleiß hervorrufen [21].

Reaktionsschichten auf den Oberflächen beeinflussen das tribologische Verhalten stark. Wichtige Beispiele sind Oxidschichten auf Metallen und Reaktionsschichten der Additive von Schmierstoffen [134]. Reaktionsschichten können durch eine Passivierung des Grundmaterials vor adhäsivem Verschleiß schützen, indem sie die Scherspannungen aufnehmen und somit ähnlich wie Schmierstoffe Reibung und Verschleiß senken [21].

Entstehungsmechanismen von tribochemischen Reaktionsschichten

Bildung und Abtrag von Reaktionsschichten werden durch verschiedene chemische und physikalische Prozesse gesteuert. Im Bereich der Mikrokontakte wirken lokal hohe tribologische Beanspruchungen, die eine mechanische und thermische Aktivierung der Oberfläche bewirken [21]. Bereits vorhandene Deckschichten können abgetragen und neue Reaktionsschichten gebildet werden, welche bei nachfolgenden Kontakten die tribologische Last aufnehmen [21].

Aus den Oberflächen gelöste Verschleißpartikel verbleiben nach [37] im Kontakt und können aufgrund der größeren Reaktionsfläche, der stärkeren thermischen bzw. mechanischen Aktivierung und der Exposition gegenüber der umgebenden Atmosphäre verstärkt reagieren [21].

Zusätzlich kann eine Durchmischung der Verschleißpartikel und ein Anlagern an den Oberflächen auftreten [134]. Die beschriebenen Prozesse sind inhaltlich eng verwandt mit den Themen dritter Körper (Abschnitt 2.1.10) und mechanische Durchmischung (Abschnitt 2.1.7).

Die Reaktionsschichten wachsen meist bis zu einer kritischen Dicke. Bei Metalloxiden werden typischerweise Schichtdicken von 5 μm erreicht [134]. Bei zu großer Schichtdicke sinkt i.d.R. die Festigkeit der Schichten, was Delamination begünstigt. Eine Überschreitung der kritischen Schichtdicke führt somit zu einer Ablösung der Schichten [12].

Auswirkungen auf den Verschleiß

Ob Reaktionsschichten Verschleiß vermindern oder verstärken, hängt stark vom Tribosystem ab. Neben dem Lastkollektiv haben vor allem die Kinetik der Schichtbildung und die tribologischen Eigenschaften der Schicht einen entscheidenden Einfluss.

Werden die Schichten bei ausreichend schneller Bildung leichter als das Grundmaterial abgetragen, kann ein chemisch beschleunigter Verschleiß auftreten. Der gleiche Mechanismus wird in der Endbearbeitung von Oberflächen genutzt [134]. Verschleißschutzadditive müssen daher

auf das Tribosystem angepasst sein, da sonst ein erhöhter tribochemischer Verschleiß riskiert wird [21,134].

Neben der Temperatur, die durch den reibungsbedingten Energieeintrag stark beeinflusst wird, haben weitere Umgebungsbedingungen, wie die Luftfeuchtigkeit, teilweise große Auswirkungen auf tribochemische Reaktionen [21,134].

Beim trockenen oder mangelgeschmierten Gleitverschleiß von Metallen bestimmen tribochemische Reaktionen das Verhalten. Direkter Kontakt von Metallen, wie er im Vakuum dargestellt werden kann, zeigt extrem hohe Reibwerte. Ohne schützende Deckschichten wirken sehr hohe adhäsive Kräfte [21].

Unter normaler Atmosphäre bilden sich schnell Oxidschichten, die je nach Eigenschaften die Oberflächen bis zu einer bestimmten Belastung vor Verschleiß schützen [134].

2.3 Mikroskopische Betrachtung der Verschleißmechanismen

Mit den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Verschleißmechanismen kann eine grobe Einteilung von Verschleißprozessen erfolgen. Der mikroskopische Prozess der Materialabtrennung wird mit diesen Modellen oft nur unzureichend beschrieben. Für viele technisch relevante Systeme mit vergleichsweise kleinen Verschleißraten (z.B. geschmierte metallische Gleitpaarungen) ist eine eindeutige Zuordnung der Mechanismen nicht möglich [21,134]. Dies liegt zum einen an einem mangelnden Verständnis der Materialablösung auf mikroskopischer Ebene. Zum anderen treten die 4 Verschleißmechanismen überlagert auf.

Im folgenden Abschnitt soll ein kurzer Überblick über Theorien zur Verschleißentstehung auf mikroskopischer Ebene gegeben werden. Aufgrund der hohen Verbreitung in der technischen Anwendung basieren viele dieser Ansätze auf Erfahrungen mit metallischen Gleitpaarungen.

Delaminationstheorie

Diese Theorie wurde in den 1970er Jahren von SHU, JAHANMIR und ABRAHAMSON [116] entwickelt und basiert auf Beobachtungen aus Gleitversuchen an überwiegend metallischen Kontaktpartnern.

Die übliche Vorstellung vom adhäsiven Kontakt einzelner Rauheitsspitzen und einem punktuellen Abtrag aus dem schwächer gebundenen Material (Abschnitt 2.2.1) widerspricht den Analysen der oberflächennahen Bereiche, in denen sehr hohe Dehnungen beobachtet wurden [96]. Zusätzlich zeigen die Verschleißpartikel eine flockenartige Morphologie mit deutlich größeren Abmessungen im Vergleich zur Größe der Mikrokontakte [72,94,116]. Die Delaminationstheorie erklärt die Beobachtungen mit der Entstehung von Rissen unterhalb der Oberfläche aufgrund einer Schädigung des Materials infolge der hohen plastischen Verformungen [116].

Die Delamination wird in aktuellen Veröffentlichungen weiterhin aufgegriffen. KORRES ET AL. [58] versuchten die Verschleißentstehung mit In-situ-Messungen der Oberflächentopografie nachzuweisen. Das Ablösen eines Verschleißpartikels konnte nicht beobachtet werden, dafür aber teilweise flockenartiger Verschleiß, hohe plastische Verformungen von Bereichen der Oberfläche sowie nanokristallines Gefüge [58]. Die Autoren vermuten eine Überlagerung mehrerer Mechanismen, wobei auch die Delamination neben mechanischer Durchmischung und Ausbildung von nanokristallinem Gefüge eine Rolle spielen kann [58].

GREINER ET AL. [40] konnten im ungeschmierten Kontakt zwischen einer Saphirkugel und Kupferplatten bereits nach einmaligem Übergleiten eine Linie mit höherer Versetzungsdichte in einer Tiefe von etwa 100 nm unter der Metalloberfläche finden. Die Linie wird als wichtiger Vorläufer für spätere Veränderungen und Verschleiß angesehen [40].

Bei der Analyse von Verschleißpartikeln in geschmierten metallischen Kontakten mit sehr niedriger Verschleißrate konnten SCHERGE, MARTIN und PÖHLMANN [106] flockenartige Verschleißpartikel feststellen, die eine Mischung aller Elemente des Tribosystems darstellen. Viele Veröffentlichungen beschreiben die Verschleißpartikel im Gleitverschleiß als Mischung der Systemelemente, die während der mechanischen Durchmischung entstehen (Abschnitt 2.1.7) [25,58,95,96,134].

Verschleiß als Massestrom

Basierend auf der mechanischen Durchmischung und dem verwandten Konzept des dritten Körpers beschreiben POPOV ET AL. [90] Verschleiß im geschmierten metallischen Gleitkontakt als eine Art Massestrom. Die Verschleißpartikel verbleiben nach dem Ansatz des dritten Körpers (Abschnitt 2.1.10) länger im Kontakt, agglomerieren und werden teilweise wieder in die Oberflächen eingewalzt, was dem Konzept der mechanischen Durchmischung entspricht. Auch eine Oxidation der Verschleißpartikel, welche häufig vor adhäsivem Verschleiß schützt (Abschnitt 2.1.2), verhindert das Wiedereinwalzen in die Kontaktflächen nicht [90]. Es entsteht ein quasi-viskoses Material, das die Bewegung aufnehmen kann [90]. Verschleiß tritt erst auf, wenn das viskose Material aus dem System gepresst wird [90]. Der dritte Körper (Abschnitt 2.1.10) ist nach dieser Modellvorstellung der Ursprungsort des Verschleißes [90].

Die Entstehung des optimalen dritten Körpers, welcher die Gleitbewegung aufnimmt, wird von SCHERGE, BRINK und LINSLER [104] als Voraussetzung für geringen Verschleiß angesehen. Der dritte Körper bildet sich nur bei optimalem Energieeintrag und zeigt nanokristallines Material sowie ein durchmischtes Gefüge. Zu hohe Belastung führt zur thermischen Entfestigung und damit potentiell zum Fressen aufgrund von adiabatischer Dehnung (siehe Abschnitt 2.1.6) [12,105]. Bei zu geringem Energieeintrag kann der dritte Körper nicht ausgebildet werden, woraus auch höherer Verschleiß resultiert [105]. In diesem Fall wäre eine andere Modellvorstellung oder ein anderer dritter Körper zur Beschreibung des mikroskopischen Verschleißvorgangs notwendig.

Eine allgemeingültige Vorstellung zur mikroskopischen Verschleißentstehung existiert bisher nicht. Die unterschiedlichen Modellvorstellungen können in Zukunft auf Basis neuer Analysen weiter optimiert werden. Die meisten Quellen weisen der Entstehung von nanokristallinem Material und dem Prozess der mechanischen Durchmischung eine hohe Bedeutung zu. Die eventuell vorhandene lose Verschleißpaste zwischen den Körpern, die bei der Probenreinigung meist entfernt wird, ist seltener das Untersuchungsobjekt.

An dieser Stelle soll auf den Systemcharakter verwiesen werden, wonach das tribologische Verhalten sich je nach Systembedingungen stark unterscheiden kann. Je nach Tribosystem kann demnach ein anderes Verschleißmodell hilfreich sein.

2.4 Tribologie der genutzten Materialien

Metallische und keramische Werkstoffe weisen aufgrund der unterschiedlichen chemischen Bindungstypen (*Metallbindung und kovalente bzw. ionische Bindung*) unterschiedliche mechanische und chemische Eigenschaften auf.

In dieser Arbeit wird u.a. der Kontakt zwischen Si_3N_4 und mehreren niedriglegierten gehärteten Stählen (100Cr6, 42CrMoS4, 51CrV4) untersucht. In der folgenden Tabelle 1 sind für das tribologische Verhalten relevante Materialparameter der Wälzlagermaterialien Si_3N_4 und 100Cr6 (AISI 52100) zusammengefasst. Die Unterschiede im Materialverhalten sind anhand der Werte gut quantifizierbar.

Tabelle 1: Werkstoffeigenschaften von 100Cr6 und Si_3N_4 nach [108]
ergänzende Quellen: [51,123,126]

Eigenschaft [Einheit]	100Cr6	Si_3N_4	Veränderung durch Si_3N_4	Tribologischer Einfluss eines hohen Wertes
Elastizitätsmodul [GPa]	210	310	+50%	geringe Adhäsion & Abrasion, hohe Pressung
Härte [HV1]	700	1600	+130%	geringe Adhäsion & Abrasion
Druckfestigkeit [MPa]	880	3000	+240%	hohe ertragbare Pressung & Dauerfestigkeit
Streckgrenze [N/mm ²]	1370	1050	-25%	hohe Dauerfestigkeit & Abrasionsbeständigkeit
Zugfestigkeit [N/mm ²]	1570	~Streckgrenze	deutlich geringer	hohe ertragbare hertzsche Pressung
Bruchdehnung [%]	0,5	~0	deutlich geringer	hohe Dauerfestigkeit & Abrasionsbeständigkeit
Biegefestigkeit	2200-2600	600-1300	-50%	
Risszähigkeit [MPa*m ^{0,5}]	15-22	5-6	-70%	
maximale Einsatztemperatur	180	1000	+500%	hohe tribochemische Beständigkeit
thermische Leitfähigkeit [W/m*K]	50	30	-40%	gute Ableitung von Reibwärme
Dichte [kg/dm ³]	7,8	3,2	-60%	hohe Massenkräfte

Eigenschaften von gehärtetem Stahl

Metalle weisen eine hohe Duktilität bei gleichzeitig guten Festigkeitseigenschaften auf. Im Vergleich zu Keramiken liegt im direkten Metallkontakt eine deutlich höhere Adhäsionsneigung vor [21,117,123], die ohne trennende Schichten zu sehr hoher Reibung führt [134]. Unter Umgebungsbedingungen bilden Metalle Oxide, die den trockenen Gleitverschleiß dominieren [123].

Durch die Wärmebehandlung des Härtens und Anlassens erhält niedriglegierter Stahl hohe Zug- und Druckfestigkeiten bei Beibehaltung einer ausreichenden plastischen Verformbarkeit. Das Material zeigt so eine hohe Dauerfestigkeit aufgrund der geringen Rissausbildung und eine verbleibende Zähigkeit, welche die Rissausbreitung dämpft. Ausreichender Widerstand gegenüber Abrasion ist durch die Kombination von hoher Härte und hinreichender Zähigkeit gegeben (siehe Abb. 9, S. 27). Die chemische Reaktivität ist im Vergleich zu Keramiken hoch, was zu tribochemischem Verschleiß führen kann, im Gegenzug aber die Wirksamkeit von Verschleißschutzadditiven ermöglicht.

Eigenschaften von ingenieurkeramischen Werkstoffen

Aufgrund der geringen plastischen Verformbarkeit zeigen keramische Werkstoffe ein sprödes Bruchverhalten, welches durch die infolge des Sinterherstellprozesses vorhandene Restporigkeit bestimmt wird. Das mechanische Materialverhalten weist durch die Poren allgemein eine Streuung aus. Die hohe Härte und Festigkeit erschweren die mechanische Bearbeitung und sind ein Grund für die im Vergleich zu metallischen Materialien hohen Kosten. Si_3N_4 zeigt für Keramiken eine hohe Bruchzähigkeit, ist im Vergleich zu Metallen aber weiterhin ein sprödes Material [123].

Keramiken werden in Oxide, Carbide und Nitride eingeteilt [117] und besitzen allgemein eine hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Reaktionen und hohen Umgebungstemperaturen, was tribochemischen Verschleiß und Adhäsion vermindert [65,66,103]. Die allgemein hohe Härte von Keramiken wirkt sich durch geringe Adhäsion und hohe Abrasionsbeständigkeit tribologisch positiv auf. Im Vergleich zu Metallen ist die Abrasionsbeständigkeit aufgrund der geringeren Plastizität nicht im gleichen Maße wie die Härte erhöht (Abb. 9, S. 27). Mechanischer Verschleiß wird in der Regel durch Rissbildung an oder unter der Oberfläche an Defekten (z.B. Poren) initiiert.

Trotz der recht hohen chemischen Beständigkeit spielt tribochemischer Verschleiß eine große Rolle. Alle Nichtoxidkeramiken neigen zur Oxidation [103]. So bildet Si_3N_4 eine Passivierungsschicht aus SiO_2 [49]. Tribochemische Reaktionen an Si_3N_4 -Körnern, der Korngrenzphase oder den SiO_2 -Deckschichten werden zur Endbearbeitung von Si_3N_4 genutzt [80] und können auch in der Anwendung zu hohem Verschleiß führen [56,117].

Obwohl die Adhäsionsneigung aufgrund der hohen Härte und chemischen Beständigkeit im Selbstkontakt geringer als bei Metallen ausfällt [21,117,123], zeigen Keramiken im trockenen Gleitkontakt allgemein hohe Reibwerte und hohen Verschleiß [117], was eine Schmierung notwendig macht [123]. Im Gegensatz zum metallischen Kontakt können geringe Schmierstoffmengen oder niedrigviskose Schmierstoffe oft ausreichend effektiv sein [123].

2.4.1 Tribologie von Wälzlagerstahl

Die Tribologie von Stahlkontakten wird seit Jahrzehnten erforscht und die relevanten Erkenntnisse haben den Stand der Technik der Tribologie geprägt. Viele Zusammenhänge sind daher schon aus den Grundlagen der Tribologie (Abschnitt 2.1) ersichtlich.

Spezielle Forschungsergebnisse zu den hier verwendeten Materialien, die grundlegend vom Stand der Technik abweichen, konnten in der Literatur kaum gefunden werden. Im Bereich der Wälzlagerwerkstoffe wurden in den letzten Jahren jedoch neue Erkenntnisse zu mikrostrukturellen Veränderungen erarbeitet. Da der Wälzlagerstahl 100Cr6 in dieser Arbeit verwendet wird, folgt in diesem Abschnitt eine kurze Zusammenfassung [21].

Wälzlager versagen unter normalen Betriebsbedingungen durch Grübchenbildung aufgrund von Oberflächenzerrüttung, also infolge von Ermüdungverschleiß (siehe Abschnitt 2.2.3). Bei unüblichen Betriebsbedingungen, wie einer starken Verunreinigung des Schmierstoffs oder einer falsch dimensionierten Schmierung, können auch die Verschleißmechanismen Abrasion und Adhäsion auftreten [39]. Die Wälzlagerwerkstoffe werden gegenüber den tribologischen Belastungen durch folgende Eigenschaften optimiert:

Eine hohe Härte und ein großer elastischer Verformungsbereich schützen vor allem vor Oberflächenzerrüttung und zusätzlich gegenüber Abrasion und Adhäsion. Aus diesem Grund werden meist härtbare, niedriglegierte Stähle mit martensitischem Gefüge verwendet [34]. Dabei wird besonderer Wert auf eine hohe Reinheit gelegt, um Rissbildung an Einschlüssen und Inhomogenitäten zu vermeiden [3]. Chrom wird zur besseren Härtbarkeit hinzugefügt und führt zusätzlich zu einer hohen Abrasionsfestigkeit durch die Ausbildung von Carbiden [3,134]. Eine gleichmäßige Verteilung feinkörniger Carbide wird für eine gute Ermüdungsbeständigkeit angestrebt [21]. Je nach Wärmebehandlung sind bis zu 20 Prozent Restaustenit im Gefüge vorhanden [99], der sich bei plastischer Verformung in Martensit umwandeln kann [134].

Die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit gegenüber Ermüdungsverschleiß ist Stand der Technik und wird zur Auslegung von Wälzlagern angewendet [26]. In der Literatur wird von vielen vorzeitigen Ausfällen durch Rissbildung unter der Oberfläche berichtet, die meist bei weniger als 20 Prozent der berechneten Lebensdauer auftreten [39]. Diese Ausfälle betreffen viele verschiedene Applikationen [85], was zu umfassenden Analysen geführt hat.

Die vorzeitigen Ausfälle sind meist von mikrostrukturellen Veränderungen begleitet, für die sich aus der Vergangenheit die Begriffe „white etching matter (WEM)“ oder „white-etching-area (WEA)“ etabliert haben [39]. Die Bezeichnungen resultieren aus der weißen Erscheinungen im mit Nital geätzten Schliff [85].

Die weiß anätzenden Bereiche (WEA) treten meist unter der Oberfläche und oft an Rissen [84] oder Einschlüssen [30,67] auf. Mit hochauflösenden Analysemethoden konnten diese Bereiche als nanokristallines Material mit Korngrößen kleiner 30 nm identifiziert werden [29,39].

Einige Quellen gehen davon aus, dass die nanokristallinen Bereiche im Wälzlager durch hohe plastische Verformungen im Material ohne Mitwirkung erhöhter Temperaturen entstehen [29,74,125], was den in Abschnitt 2.1.7 beschriebenen Entstehungsmechanismen von nanokristallinem Material entspricht.

Oft wird das nanokristalline Material auch in der Nähe von Rissen beobachtet. Die Quellen sind sich nicht einig, ob das nanokristalline Material den Riss verursacht oder umgekehrt. Die meisten Veröffentlichungen tendieren aktuell zur Ansicht, dass erst der Riss entsteht und durch das Reiben der Rissflächen die starke Kornfeinung hervorgerufen wird [55,83]. Einige Veröffentlichungen vertreten die gegenteiligen Hypothese [62,110].

Gefügeanalysen haben in vielen Fällen nachgewiesen, dass das nanokristalline Material in den „weiß anätzenden Bereichen“ eine ferritische Mikrostruktur aufweist [22,29,84,110]. In der Literatur wird teilweise auch von martensitischem oder austenitischem Gefüge berichtet [62,118,125,134]. In allen Fällen konnte eine deutliche Härtesteigerung (30-50%) im Vergleich zum Grundmaterial nachgewiesen werden [38,39,62,110,125]. Die Härtesteigerung entspricht auch den Erkenntnissen aus den nach Gleitbelastung in verschiedenen Materialien nachgewiesenen nanokristallinen Bereichen an den Bauteiloberflächen (siehe Abschnitt 2.1.7).

2.4.2 Tribologie von Siliciumnitrid-Metall-Paarungen

Aufgrund der im Vergleich zu anderen Keramiken hohen Zähigkeit wird Si_3N_4 häufig im Maschinenbau eingesetzt. Neben unterschiedlichen Gleitpaarungen haben sich Si_3N_4 -Wälzkörper in sogenannten Hybridwälzlagern für Nischenanwendungen durchgesetzt. Der tribologische Kontakt von Wälzlagereisen und Si_3N_4 ist aus diesem Grund umfassend erforscht. Im folgenden Abschnitt soll zunächst eine Zusammenfassung über gleitende Kontakte gegeben und darauffolgend auf Besonderheiten im Wälzkontakt zwischen Si_3N_4 und gehärtetem Stahl eingegangen werden.

Gleitkontakt: Stahl und Si_3N_4 zur Verschleißreduktion

Der Kontakt von Si_3N_4 und Metall weist in den meisten Fällen ein deutlich besseres tribologisches Verhalten als die jeweiligen Selbstpaarungen auf, was unter anderem durch die geringere Adhäsionsneigung der Keramiken begründet ist [117]. Die Selbstpaarung aus Si_3N_4 zeigt unter den meisten Bedingungen bereits deutlich geringere Reibung und niedrigeren Verschleiß als Metallpaarungen. Durch die Kombination von Metall und Keramiken lässt sich im Vergleich der geringste Verschleiß erreichen.

Eine deutliche Verschleißreduktion durch den Ersatz einer Metallpaarung (*abgekürzt als M-M*) mit der Metall- Si_3N_4 -Paarung (*abgekürzt als M-K*) konnte für ungeschmierte Systeme [70,124], mit wässriger Lösung bzw. mit Öl geschmierte Systeme [75,127,132] und auch für trockene Wälzkontakte mit unterschiedlichen Gleitanteilen [128] sowie geschmierte Wälzkontakte [61] gezeigt werden. Die Verschleißreduktion lag dabei teilweise im Bereich von mehreren Größenordnungen [124,127] und ist in fast allen Fällen mit einer Verringerung der Reibung verbunden. Typische Reibwerte im Vergleich der Kontakte Stahl-Stahl (*M-M*), Si_3N_4 - Si_3N_4 (*K-K*) und Stahl- Si_3N_4 (*M-K*) sind in der Tabelle 2 zusammengefasst:

Tabelle 2: Typische Reibwerte für Si_3N_4 & Metall-Paarungen
Quellen: [21,56,57,70,103,117,126,127,128]

Tribosystem	Materialpaarung		
	Metall-Metall (M-M)	Si_3N_4 - Si_3N_4 (K-K)	Metall- Si_3N_4 (M-K)
trockenes Gleiten (Vakuum)	>>1	0,5 bis 0,9	keine Daten
trockenes Gleiten (Luftfeuchte)	0,5 bis 0,8	0,3 bis 1,2	0,15 bis 0,8
ölgeschmiertes Gleiten	0,1 bis 0,17	0,05 bis 0,2	0,05 bis 0,15
trockenes Wälzen (Luftfeuchte)	0,54	0,05-0,17	0,15
ölgeschmiertes Wälzen	0,11 bis 0,13	0,11 bis 0,13	0,11 bis 0,13

Die Ergebnisse decken sich auch mit den allgemeinen Konstruktionsempfehlungen, wonach Gleichpaarungen vermieden werden sollen [21,134].

Metallischer Materialübertrag

Im Vergleich zu Stahl ist Si_3N_4 chemisch sehr beständig und zeigt eine deutlich geringere Adhäsionsneigung [66]. Im Gleitkontakt wird allgemein trotzdem ein Übertrag von Metall auf die Keramiken beobachtet, der das tribologische Verhalten im direkten Kontakt prägt. Weiche und kubisch-flächenzentrierte Metalle können eine geschlossene Schicht aufweisen [117], für Stahl entsteht meist ein fragmentierter Übertrag aus einzelnen kleinen Auftragsbereichen [117].

Der Übertrag von Stahl auf Si_3N_4 führt lokal zum direkten Kontakt von Metalloberflächen und damit zu erhöhten Reibungskräften, die auch zu einer Schädigung der Keramikoberfläche führen können [132]. Meist tritt der Verschleiß aber vor allem am Metall-Grundkörper auf.

Die metallischen Transferschichten auf Si_3N_4 wurden in vielen Tribosystemen nachgewiesen und treten sowohl bei trockenem Gleitkontakt [123,128,132] als auch unter Mischreibung bei Ölschmierung im Gleitkontakt [23,75,123,132] auf. VOGT [123] beschreibt den Prozess des Materialübertrags als eine Art selbstverstärkten Schneeballeffekt und identifiziert die Zusammensetzung des Auftrags unter Ölschmierung als Mischung aus Eisen, Kohlenstoff, Sauerstoff und Silicium. Dies legt nahe, dass es auch zu Verschleiß am Siliciumnitrid kommt und der Übertrag als dritter Körper (Abschnitt 2.1.10) aufgefasst werden kann [123].

An Si_3N_4 kann bei höheren Temperaturen im Kontakt mit Stahl erhöhter tribochemisch bedingter Verschleiß auftreten, weshalb Si_3N_4 im Gegensatz zu Al_2O_3 nur bedingt für die mechanische Bearbeitung von Stahl geeignet ist [34].

Reaktion von Si_3N_4 in feuchter Atmosphäre

In ungeschmierten Versuchen werden Reibung und Verschleiß von Si_3N_4 im Selbstkontakt stark durch die Luftfeuchtigkeit bestimmt. Eine hohe Luftfeuchtigkeit kann Reibung und Verschleiß deutlich senken [57].

Bei Anwesenheit von Wasser kann eine tribochemische Reaktion von Si_3N_4 zu Kieselsäure stattfinden [123,128]. Durch den Prozess kann die Oberfläche geglättet werden [119]. Zusätzlich werden Reibung und Verschleiß im System stark reduziert [32,119]. Die Reaktionen in feuchter Umgebung senken Reibung und Verschleiß auch im Kontakt mit Metallen [123]. Teilweise kann es in wässriger Lösung auch zu starkem tribochemischem Verschleiß kommen, wenn die reibungssenkenden Transferschichten zu schnell abgetragen werden [56,117].

Wälzkontakt: Si_3N_4 für höhere Leistungsfähigkeit

Für spezielle Anwendungen mit hohen Anforderungen werden Wälzlager mit Si_3N_4 -Kugeln eingesetzt. Sie zeichnen sich bei gleicher Belastung u.a. durch eine deutlich erhöhte Lebensdauer [78,126] sowie eine höhere Toleranz gegenüber Mangelschmierung und Verunreinigungen aus [126]. Die höhere Dauerfestigkeit resultiert aus der höheren Härte und Druckfestigkeit der Keramik im Zusammenwirken mit geringeren Reib- und Massenkräften (siehe Tabelle 1, S. 33). Die höhere Toleranz gegenüber Mangelschmierung folgt aus den besseren Reibeigenschaften der Metall-Keramikpaarung (siehe Tabelle 2).

Die Ausfallmechanismen entsprechen dem herkömmlichen Metalllager. Aufgrund von Ermüdungsprozessen kommt es auch in der Keramik zum Versagen durch Ausbrüche [93]. Die Risse

entstehen durch die wechselnden Belastungen auf oder unterhalb der Oberfläche meist an Poren, Einschlüssen oder anderen Unstetigkeiten im Gefüge [93,121]. Ein Ausbrechen einzelnen Si_3N_4 -Körner aus der Matrix wurde beobachtet und daraus eine Schädigung der Oberfläche durch lokal hohe Belastungen abgeleitet [16]. Pressungen über 6 GPa führen frühzeitig zum Ausbrechen und Abblättern an den Keramikoberflächen [126].

Versuche im trockenen Wälzkontakt konnten bei hohem Gleitanteil einen einseitig extrem hohen Verschleiß an den Metalloberflächen belegen [128]. Bei niedrigem Gleitanteil war der Verschleiß eher gering und trat auf beiden Kontaktpartnern ähnlich verteilt auf [128].

Si_3N_4 : Wirkung von Schmierstoffadditiven

In geschmierten Metallkontakten schützen Verschleißschutzadditive die Oberflächen bei Grenzreibung durch *Physisorption*, *Chemisorption* und *Tribochemische Reaktion* (Abschnitt 2.1.8). Im Gegensatz zu reinen Metallkontakten führt der direkte Kontakt von Keramiken bzw. Metall und Keramik nicht zwangsläufig zu hohen Reibwerten und Verschleißraten (siehe Tabelle 2, S. 36). Hieraus erklären sich die Ergebnisse von SHEASBY, CAUGHLIN und MACKWOOD [114], wobei im keramischen Selbstkontakt eine Schmierung durch Grundöl unter Mischreibungsbedingungen bereits zu sehr geringen Reibungs- und Verschleißraten führt, während die Stahlreferenzpaarung stark verschleißt.

In anderen Verschleißversuchen zeigte sich, dass eine höhere Schmierstoffviskosität in Metall-Metall-Kontakten und Si_3N_4 - Si_3N_4 -Kontakten gleichermaßen geringeren Verschleiß hervorruft [14].

Die Additivpakete in den verwendeten Schmierstoffen sind auf Stahlkontakte abgestimmt [114]. Aufgrund der höheren chemischen Stabilität reagieren die Additive mit den Keramiken oft nur begrenzt [117]. Die Bindung der Additive an den Oberflächen über *Physisorption* und *Chemisorption* ist auf Keramiken i.d.R. effektiver als *tribochemische Reaktionen* [117]. Teilweise kann auch eine negative Wirkung von Verschleißschutzadditiven mit phosphor- und schwefelhaltigen Verbindungen auf das Verschleißverhalten von Si_3N_4 - Si_3N_4 -Kontakten festgestellt werden [114].

In dieser Arbeit wird ein besonderes Augenmerk auf Zinkdialkyldithiophosphate (ZDDP) gelegt, da diese in Motorenölen breite Anwendung finden (Abschnitt 2.1.11). Im Metall-Keramik-Kontakt konnten die typischen ZDDP-Verschleißschutzschichten auch auf Si_3N_4 festgestellt werden [14]. Die Schichten zeigten zusätzlich einen Eisenanteil und fielen im Vergleich dünner als auf den Metalloberflächen aus [14].

Auch im Si_3N_4 - Si_3N_4 -Kontakt wurde eine Verschleißschutzwirkung durch ZDDP beobachtet. Nach Versuch konnten Schichten mit erhöhten Anteilen von Zink, Phosphor und Schwefel nachgewiesen werden, wobei aber eher von Adsorption als von tribochemischer Reaktion ausgegangen wird [65].

Zusammengefasst zeigen Verschleißschutzadditive eine verringerte Wirksamkeit bei Kontakten mit Si_3N_4 , wobei teilweise auch negative Effekte auftreten können.

Tribochemische Endbearbeitung von Si₃N₄

Neben der Bearbeitung von Si₃N₄ mit Diamantpulver werden auch tribochemische Verfahren genutzt. Als Abrasivstoffe in wässriger Lösung werden dabei relativ weiche Metalloxide wie Cerdioxid verwendet [80,126]. In Versuchen mit anderen Abrasivstoffen konnte auch durch die Nutzung von Chromoxid und verschiedenen Eisenoxiden eine hohe Abtragswirkung nachgewiesen werden [53,80]. Ein effektiver Abtrag wurde in Wasser oder alkoholhaltigen Lösungen erreicht. Bei Verwendung von Ölsuspensionen trat kein messbarer Abtrag auf [54].

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden zunächst das betrachtete tribologische System (Abschnitt 3.1) mit den verwendeten Materialien (Abschnitt 3.2) sowie die tribologische Prüftechnik beschrieben (Abschnitt 3.3). Anschließend wird in Abschnitt 3.4 kurz auf die genutzten Analysemethoden eingegangen.

3.1 Tribologisches System: Rastmechanismus

Rastmechanismen oder auch Arretiervorrichtungen finden in diversen Bereichen Anwendung. Vom Kugelschreiber über Fahrradschaltungen bis zur Schalteinrichtung in großen Getrieben werden Konstruktionselemente genutzt, die meist über das Einrasten von elastisch vorgespannten Elementen mehrere Zustände mechanisch trennen. Abb. 11 zeigt das in dieser Arbeit betrachtete Rastsystem.

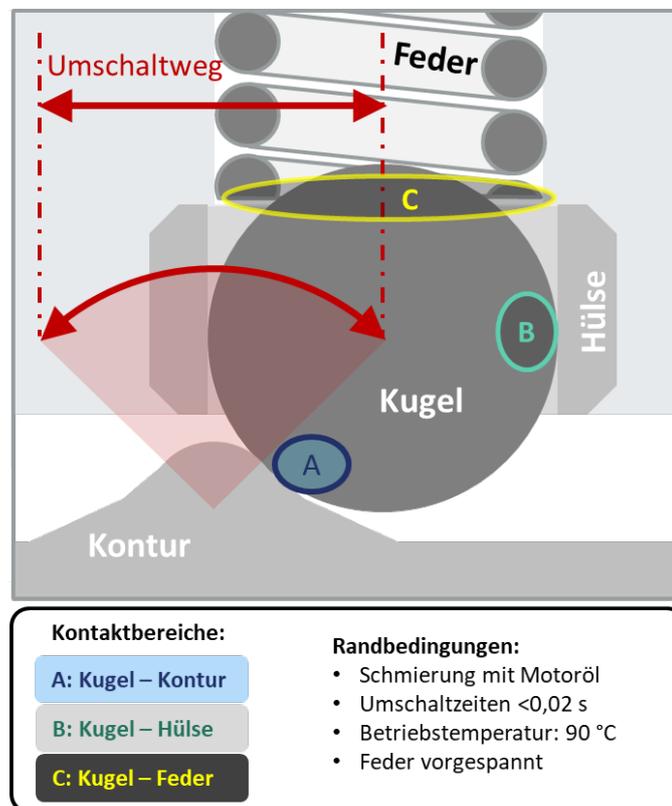


Abb. 11: Schematische Darstellung; Rastmechanismus

Dabei sichert die durch die Feder vorgespannte Rastkugel zwei verschiedene Positionen mechanisch ab. Zum Umschalten wird die Kugel über die Kontur bewegt. Dabei müssen die durch den Keileffekt an der Rastkontur verstärkten Federkräfte überwunden werden. Die Rastkontur wird im Folgenden als *Kontur* abgekürzt. Die Bewegung des Kugelmittelpunktes ist durch die Konturform eindeutig definiert, die Rotation der Kugel ist unbestimmt.

Die Randbedingungen entsprechen typischen Anwendungen im Maschinenbau. Das System soll unter Ölschmierung bei Temperaturen um 90 °C etwa 1 Mio. Schaltzyklen (*hin und zurück*) funktionssicher absolvieren. Die Schaltzyklen werden in dieser Arbeit mit SZ abgekürzt.

Um eine möglichst kostengünstige Herstellung zu gewährleisten, werden einfache Standardbauteile verwendet. Die Kugel ist ohne eine weitere Führung direkt in der Stahlfeder gelagert. Zur horizontalen Abstützung dient eine Hülse aus gehärtetem Stahl. Der relevante und in dieser Arbeit betrachtete Verschleiß findet im Kontakt zwischen Kugel und Rastkontur statt. Aufgrund der Lagerung der Kugel über die 3 Kontakte (Abb. 11 – A,B,C) bestimmen die anderen Reibstellen, ob die Kugel über die Kontur rollt oder gleitet. Im Maschinenbau wird eine Rollbewegung mit Gleitanteilen, welche in der Praxis aufgrund elastischer Verformungen immer vorliegt, als *Wälzen* bezeichnet. Diese Formulierung wird im weiteren Verlauf beibehalten. Auf die Bewegung der Kugel während der Oszillation (Kinematik) wird in Abschnitt 4.1 eingegangen.

3.2 Material

An dieser Stelle folgt eine kurze Beschreibung der genutzten Materialien. Als Rastkugeln wurden kommerzielle Wälzkörper aus 100Cr6 und Keramikugeln aus Si_3N_4 verwendet (Abschnitt 2.4). Die Kontur wurde aus verschiedenen niedriglegierten Stählen nach unterschiedlicher Wärmebehandlung gefertigt.

3.2.1 Metalle: durchgehärtete und randschichtgehärtete Stähle

Zur Herstellung der Kontur wurden neben dem auch für die Kugeln verwendeten Wälzlagerstahl 100Cr6 zwei Vergütungsstähle (42CrMoS4 und 51CrV4) genutzt. Die insgesamt relativ ähnlichen Legierungsbestandteile der Werkstoffe sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Legierungsbestandteile der verwendeten Stähle [102]

Materialanteil [m%]	C	Cr	Mo	Mn	V	Si
100Cr6	1	1,5	-	0,5	-	0,25
42CrMoS4	0,42	1,1	0,3	0,75	-	0,25
51CrV4	0,5	1,1	-	0,9	0,12	0,25

In der betrachteten Anwendung unterscheiden sich die Materialien vor allem in der Wärmebehandlung. Analog zur Wälzkörperherstellung (Abschnitt 2.4.1), wird die 100Cr6-Kontur im Ofen durchgehärtet und angelassen (*abgekürzt als DH + A*). Für viele Anwendungen müssen nur bestimmte tribologisch relevante Bereiche von Bauteilen gehärtet werden. Hierzu kann unter anderem das Laserhärten (*abgekürzt als LH*) genutzt werden [100]. Die Härtezonen sind im Vergleich zum durchgehärteten Material in Abb. 12 exemplarisch dargestellt.



Abb. 12: Schlitze (Geätzt mit Nital); DH + A & LH

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Konturen aus 42CrMoS4 und 51CrV4 wurden bis in eine Tiefe von etwa 1,5 mm lasergehärtet. Damit liegt auch bei hohem Verschleiß der Rastkontur gehärtetes Material vor.

Neben der markanten Härtezone beim lasergehärteten Material, fällt eine Zeiligkeit des Gefüges auf. Die in Abb. 12 horizontal verlaufenden Zeilen resultieren aus Inhomogenitäten im Rohmaterial, welche bei der Halbzeugbearbeitung ausgewalzt werden. Beim 42CrMoS4 ist die Zeiligkeit besonders stark ausgeprägt. Dies ist auf einen erhöhten Schwefelanteil und die daraus resultierende Mangansulfidzeiligkeit zurückzuführen [10].

Da beim Laserhärten allgemein kein Anlassen erfolgt, erreichen die Materialien nahezu die maximal mögliche Härte. Um eine vergleichbare Härte zu den Bauteilen aus 100Cr6 (DH + A) zu erreichen, sind für das Laserhärten Stähle mit geringerem Kohlenstoffanteil gewählt.

Abb. 13 fasst die mittleren Härten der genutzten Proben zusammen und zeigt, dass trotz unterschiedlicher Härteverfahren ähnliche Bauteilhärten erreicht werden können. Die Härte verbindet, wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, elastische und plastische Verformungseigenschaften und eignet sich gut zum Vergleich der unterschiedlichen Metalle.

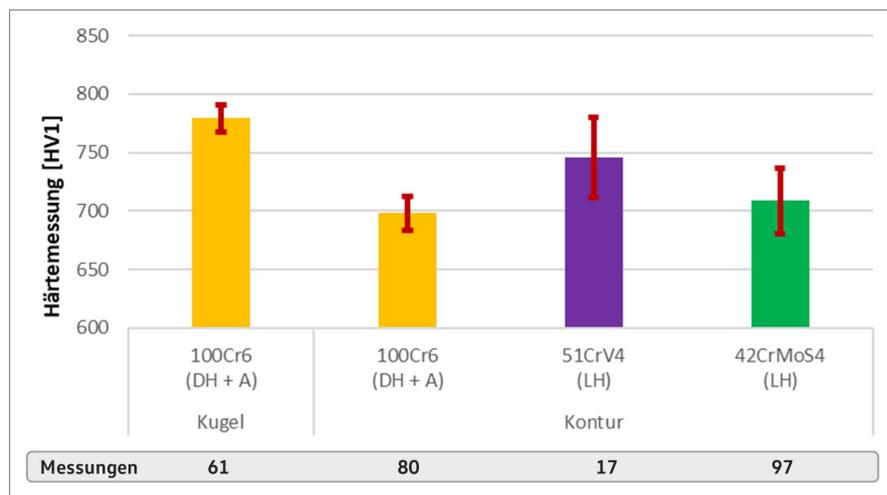


Abb. 13: Härte der verwendeten Metalle im Schliff
Einfache Standardabweichung als Fehlerbalken

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuoordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Insgesamt liegen alle Metalle auf sehr ähnlichem Härteniveau. Die Konturen aus 51CrV4 (LH) und die Wälzlagerkugeln aus 100Cr6 (DH + A) weisen im Vergleich zu den anderen Konturmaterialien eine etwas höhere Härte auf.

In Abb. 14 (*nächste Seite*) zeigt REM-Aufnahmen der verschiedenen Konturmaterialien. Die unterschiedlichen Gefüge der gehärteten Stähle sind im Schliff dargestellt.

Alle Konturmaterialien zeigen korrespondierend zu den Härtewerten martensitisches Gefüge. Im 100Cr6 bilden sich aufgrund des höheren Chrom- und Kohlenstoffanteils (siehe Tabelle 3) zusätzlich kugelige Chromcarbide. Die Konturen aus 100Cr6 zeigen allgemein etwas feinkörnigeres Gefüge als die lasergehärteten Varianten.

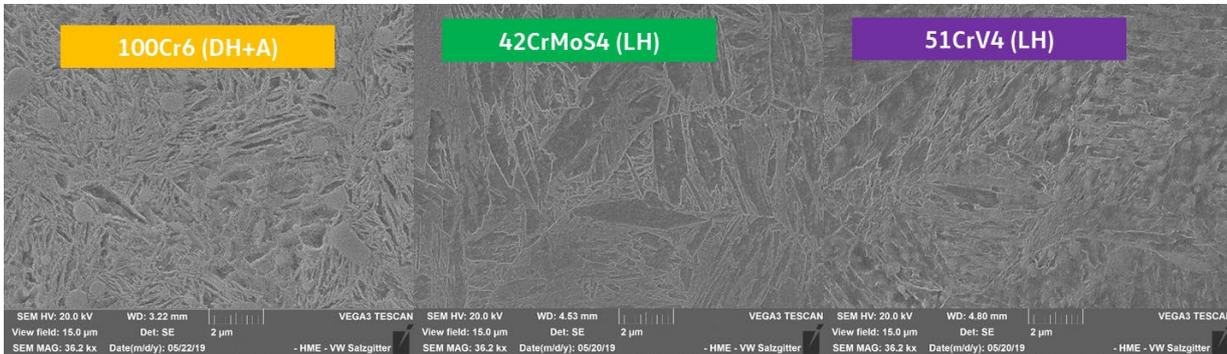


Abb. 14: REM-Aufnahmen; geätzte Schlitte der Konturmaterialien
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

3.2.2 Keramik: Siliciumnitrid (Si_3N_4)

Es wurden Standardkeramikwäzkörper aus Si_3N_4 verwendet. Die Keramikugeln zeigen eine Härte von etwa 1600 HV1 und sind somit etwa doppelt so hart wie die Metallkugeln. Die gemessenen Härtewerte entsprechen den Erfahrungen aus der Literatur (siehe Tabelle 1, S. 33).

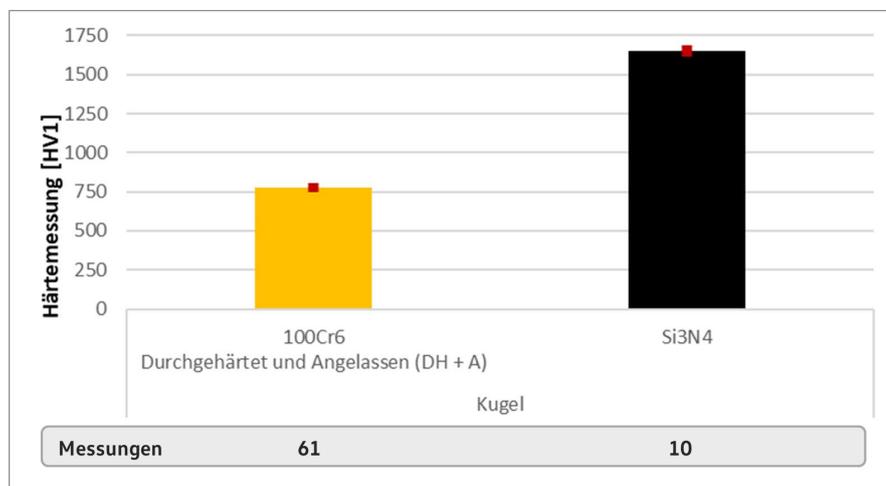


Abb. 15: Härtemessung (HV1); Kugeln im Schliff
Einfache Standardabweichung als Fehlerbalken

Abb. 16 zeigt das Gefüge der Kugelmaterien. Analog zum Konturmaterial aus 100Cr6 (DH + A) weist die Metallkugel ein martensitisches Gefüge mit Chromcarbiden auf. Die Keramikugel zeigt ein typisches zweiphasiges Siliciumnitridgefüge mit nadeligen $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ -Körnern in der amorphen bzw. teilkristallinen Phase der Sinteradditive [98]. Die hellen Punkte sind auf die Zugabe von Titan zurückzuführen.

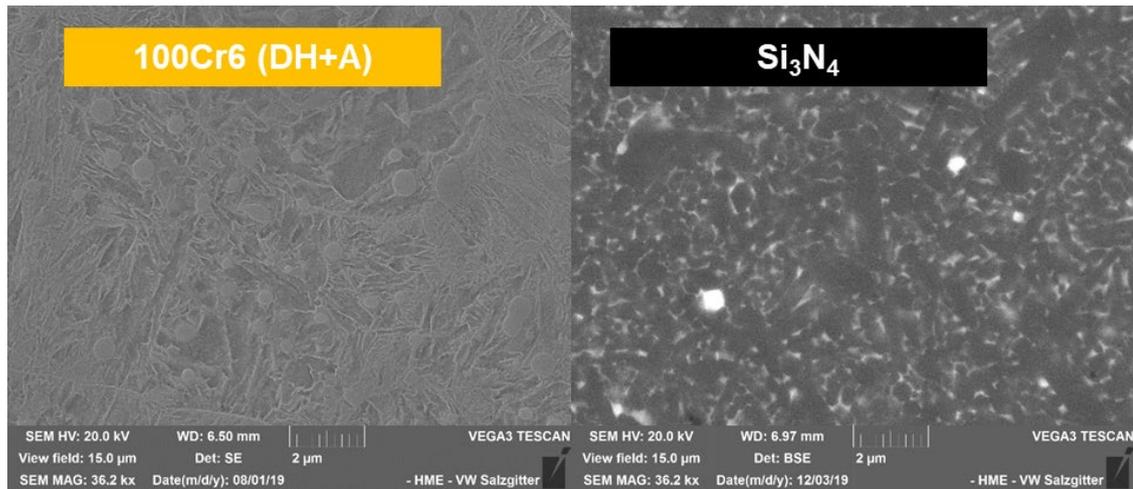


Abb. 16: REM-Aufnahmen; Schiffe der Kugelmaterialien

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Die Kugeln werden über das heißisostatische Pressen verarbeitet. Daraus resultiert eine hohe Dichte und damit eine hohe Festigkeit [98].

3.2.3 Schmierstoffe

Für die Versuche wurden zwei kommerziell verfügbare volladditivierte Motorenöle unterschiedlicher Viskosität genutzt. Die Öle erfüllen die Viskositätsklassen SAE 0W-20 und SAE 5W-30. Zu den Additivpaketen liegen keine Informationen vor.

Zur Charakterisierung wurden die dynamische und die kinematische Viskosität jeweils bei 20 °C und 90 °C mit einem *Stabinger Viskosimeter* bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 16 dargestellt.

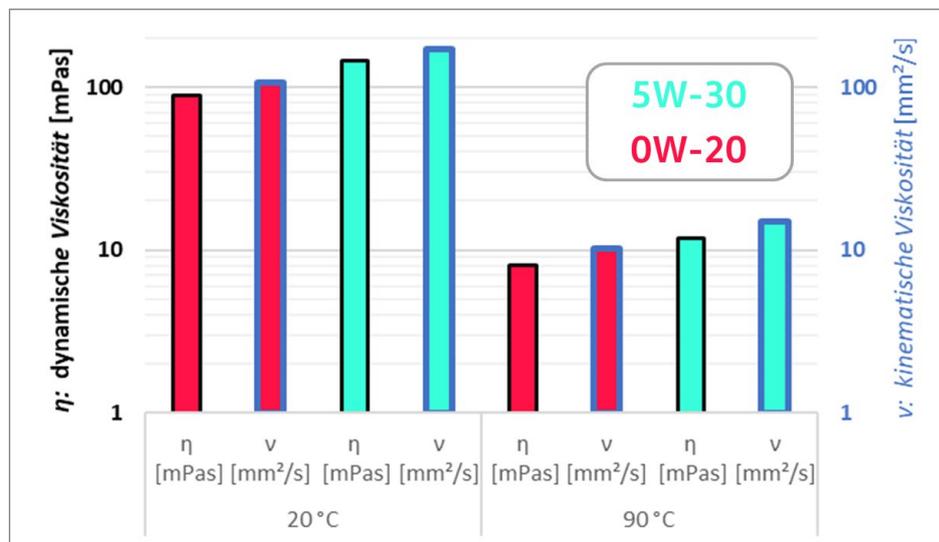


Abb. 17: Viskositätsmessung; verwendete Motorenöle

Raumtemperatur und Betriebstemperatur; SAE 0W-20 und SAE 5W-30

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Zusätzlich wurde aus den Messwerten die Temperaturabhängigkeit der dynamischen Viskosität vereinfacht nach der Arrhenius-Gleichung berechnet [60]. Der Verlauf ist in Abb. 18 abgebildet.

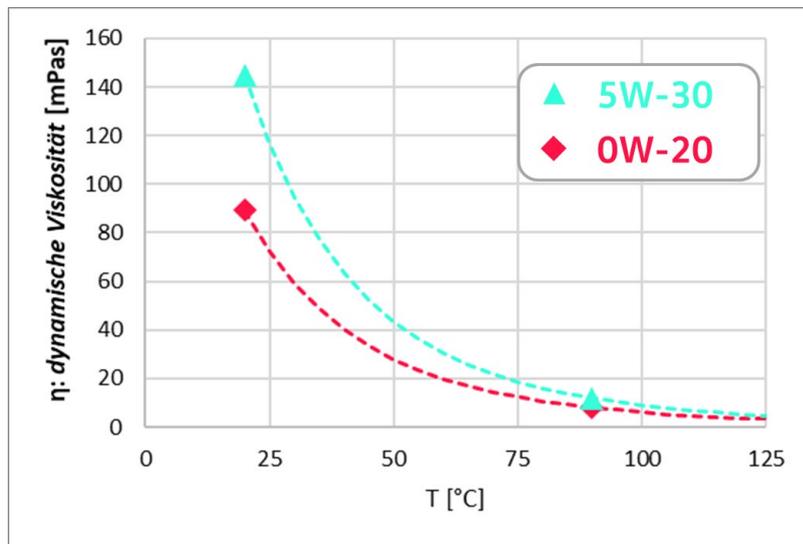


Abb. 18: Viskositäts-Temperaturverhalten; verwendete Motorenöle
Abschätzung nach Arrhenius-Gleichung

3.3 Tribologische Prüftechnik

Für die tribologische Prüfung des Rastsystems (siehe Abschnitt 3.1) wurde durch die Firma *Werner Stehr Tribologie* ein spezieller Prüfaufbau in ein bestehendes Tribometer für oszillierende Prüfungen eingebaut. Der prinzipielle Aufbau ist in Abb. 19 dargestellt.

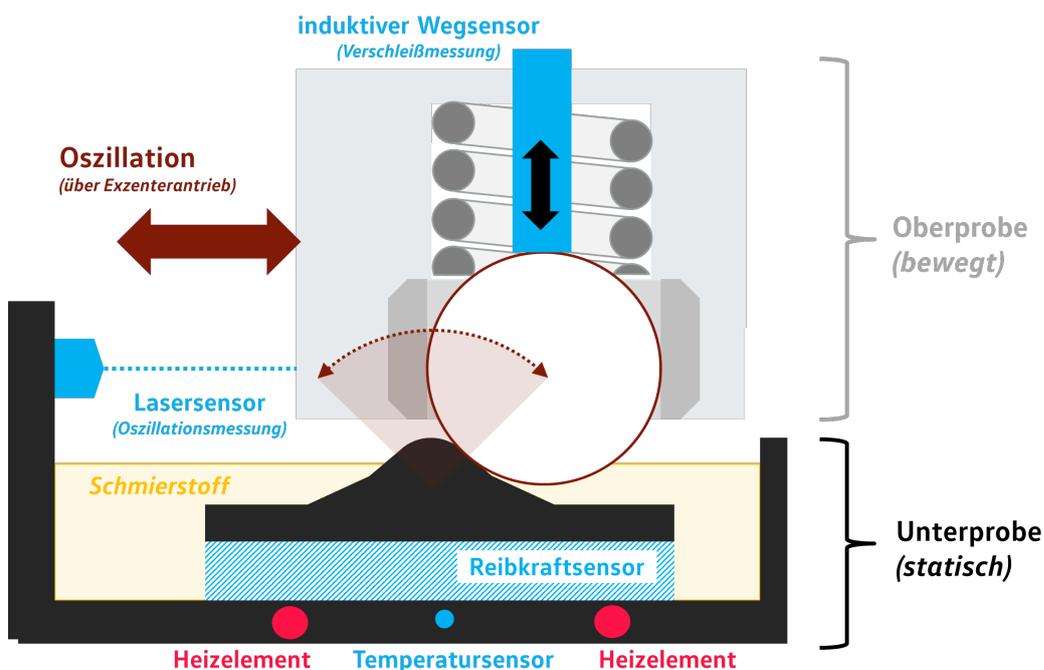


Abb. 19: Schematischer Aufbau; Tribologische Prüfung der Rastkontur

Über einen Exzenter kann die Oberprobe mit bis zu 30 Hz oszilliert werden. Die Kugel folgt dabei dem durch die Kontur aufgezwungenen Weg. Die Feder erzeugt die wirkenden Kontaktkräfte. Die Schmierung wird durch eine definierte initiale Ölmenge zu Versuchsbeginn realisiert. Eine Temperierung erfolgt über Heizelemente unter der Rastkontur.

Das Systemverhalten wird durch mehrere Sensoren überwacht. Die Heizleistung wird über einen Temperatursensor geregelt. Ein Reibkraftsensor misst die auf die Unterprobe wirkenden horizontalen Verschiebekräfte. Die horizontale Position der Oberprobe wird mit einem Lasersensor kontinuierlich gemessen.

Zur Verschleißmessung kann bei geringen Oszillationsfrequenzen von kleiner 1 Hz der Messstift eines induktiven Wegsensors auf die Kugel gedrückt werden. Durch zyklische Messung der Kugelbahn wird der Verschleiß im System bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit der Verschleißmessung wurde in Kalibrierversuchen gemessen. Die Ergebnisse sind in der Auswertung anhand der Temperaturmessung korrigiert.

Ein Abgleich der Verschleißmessung nach Versuch mit einem kalibrierten Profilmessgerät ergab eine mittlere Messgenauigkeit der Verschleißmessung von etwa 20 μm bzw. ca. 8% des Messwertes (siehe Anhang B).

Die vertikal wirkenden Kräfte ergeben sich aus der Federkennlinie. Durch das Zusammenwirken der Bewegungs- und Kraftmessungen kann das kinematische Verhalten des Systems nachvollzogen werden (siehe Kapitel 4).

3.4 Analysemethoden

Zur Beurteilung der Elemente des Tribosystems vor und nach Versuch wurden verschiedene Analysemethoden genutzt, die im Folgenden zusammengefasst sind.

Lichtmikroskopie

Zur Erstbefundung wurden alle Proben mit verschiedenen Digitalmikroskopen der Firma *Keyence* dokumentiert.

Verschleißbestimmung

Zusätzlich zur versuchsbegleitenden Verschleißmessung im System (siehe Abschnitt 3.3) wurden die Proben vor und nach Versuch einzeln vermessen.

Zur Messung der Verschleißhöhen der Konturen wird ein Konturmessgerät (*SV-C4500*) der Firma *Mitutoyo* genutzt. Außerdem ist das Verschleißvolumen der Kontur für einige Versuche mit einem konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop *VK-X260K* der Firma *Keyence* bestimmt worden (siehe Anhang C).

Zur gravimetrischen Verschleißbestimmung der Rastkugeln diente in den meisten Fällen eine Präzisionswaage vom Typ *XS204* der Firma *Mettler Toledo*. Vereinzelt wurden Kugeln bei der Fa. *Werner Stehr Tribologie* gewogen. (*XS205 Dualrange, Mettler Toledo*)

Rasterelektronenmikroskop und energiedispersive Röntgenspektroskopie

Rasterelektronenmikroskope (REM) nutzen Elektronen, die in einem elektrischen Feld beschleunigt werden, zur Bildgebung. Der fokussierte Elektronenstrahl wird schrittweise über die Oberfläche gerastert. Im Folgenden werden nur wenige Grundlagen, die zur Interpretation der

Analysedaten notwendig sind, genannt. Eine Einführung in die Elektronenmikroskopie ist beispielsweise in [68] zu finden.

Beim Auftreffen der Elektronen auf der Oberfläche entstehen verschiedene Wechselwirkungen mit der Materie. Im REM werden Sekundärelektronen sowie Rückstreuelektronen zur Bildgebung genutzt. Sekundärelektronen (SE) weisen eine Energie von weniger als 50 eV auf und zeigen einen guten Kontrast der Oberflächentopografie [68]. Rückstreuelektronen (BSE) besitzen eine höhere Energie von mehr als 50 eV und weisen in der Bildgebung einen dichteabhängigen Materialkontrast auf [68]. Neben den Elektronen wird von der Probe auch Röntgenstrahlung emittiert. Die Röntgenstrahlung kann mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) zur qualitativen und quantitativen Elementbestimmung genutzt werden [68].

Rasterelektronenmikroskopie setzt allgemein elektrisch leitfähige Proben voraus. Für die nichtleitenden Keramikugeln wurden die Proben mit Gold besputtert.

Zur Elektronenmikroskopie wurde ein Rasterelektronenmikroskop (REM) vom Typ *Vega3XMU* der Firma *Tescan* mit Haarnadelkathode genutzt. Als Detektoren kamen ein Sekundärelektronendetektor (SE) sowie ein Rückstreuelektronendetektor (BSE) zum Einsatz. Als EDX-Detektor ist ein *X-Max-50* der Firma *Oxford Instruments* verbaut. Alle EDX-Messungen wurden mit einer Beschleunigungsspannung von 10 kV durchgeführt.

Zusätzlich wurden vereinzelt Analysen mittels *Focused Ion Beam* (FIB) in einem *FEI Helios NanoLab 650* durch Dominic Linsler vom *MikroTribologie Centrum μ TC* durchgeführt. Dieses Gerät besitzt neben der Elektronenquelle zusätzlich die Möglichkeit, Ionen zur Bildgebung und Probenbearbeitung zu nutzen. Aufgrund der deutlich größeren Masse der Ionen können so im Mikroskop Schnitte eingebracht werden [6]. Mit den FIB-Schnitten kann eine hochaufgelöste Analyse der Mikrostruktur im oberflächennahen Bereich erfolgen [6].

Eine genaue Beschreibung der dabei angewandten Vorgehensweise und weitere Informationen zur *Ionenfeinstrahl-Mikroskopie* können [63] entnommen werden.

Reinigung der Proben

Die meisten Proben wurden direkt nach dem Versuch mit einem Lösungsmittel gereinigt. Anschließend erfolgte eine Konservierung der Proben mit einer geringen Menge Motorenöl als Korrosionsschutz.

Zur Analyse wurden die Proben zunächst 10 Minuten mit Ethanol im Ultraschallbad gereinigt und anschließend mit Handpülmittel vorsichtig abgerieben. Für Analysen im REM hat sich abschließend eine Reinigung nacheinander mit Essigsäureethylester, Aceton und Isopropanol bewährt, um alle organischen Reste auf den Oberflächen zu entfernen.

Zur Untersuchung der oft pastösen Verschleißpartikel wurden gezielt einige Proben nach Versuch nicht gereinigt. Danach erfolgte entweder direkt eine Analyse der Proben mit Verschleißpaste im REM oder eine Filtration der Partikel. Weitere Informationen hierzu sind in Abschnitt 7.1.7 angegeben.

4 Mechanische Betrachtung des Tribosystems

Die Kenntnis über die wirkenden Kräfte und Bewegungen ist eine Grundvoraussetzung zum ganzheitlichen Verständnis eines Tribosystems. Daher widmet sich das folgende Kapitel zunächst den kinematischen Randbedingungen. Dabei soll mittels analytischer Berechnungsmethoden ermittelt werden, ob die Kugel während der Bewegung über die Kontur eine Gleit- oder eine Wälzbewegung ausführt.

Mithilfe der dazu notwendigen Berechnungen können zusätzlich die Kontaktkräfte ermittelt werden. Sie bilden im zweiten Schritt die Basis für eine Kontaktberechnung nach HERTZ zur Bestimmung der Materialbelastung.

4.1 Kinematische Betrachtungen

Abb. 20 zeigt eine zweidimensionale Betrachtung der kinematischen Randbedingungen. Die auf das System wirkenden Lasten liegen in einer Ebene, weshalb die zweidimensionale Betrachtung eine gute Approximation des realen Systems ergibt. Weitere Informationen zum Berechnungsmodell und den verwendeten Gleichungen können in Anhang G eingesehen werden. Die Kugel ist an 3 Kontaktstellen gelagert. Der Kontakt zwischen Kontur und Kugel ist das Untersuchungsobjekt dieser Arbeit. Die Rastkraft wird durch den Kontakt zwischen Kugel und Feder aufgeprägt. Zur horizontalen Kraftaufnahme beziehungsweise zur Einleitung der Verschiebung der Kugel dient der Kontakt zwischen Kugel und Hülse, der während des Verschiebevorgangs den Anlagepunkt wechselt.

Bei allen Kontakten handelt es sich um Kontakte zwischen gehärteten Stählen. Eine vergleichbare Schmierung durch das genutzte Öl kann angenommen werden. Daher werden Reibwerte in ähnlicher Größenordnung erwartet.

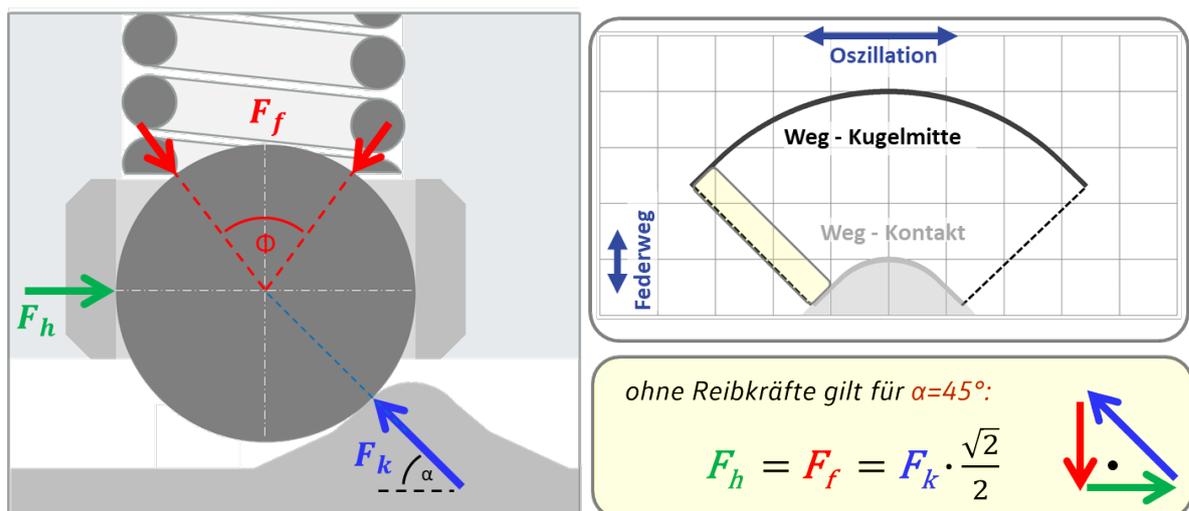


Abb. 20: Rastsystem; Kinematische Randbedingungen; reibungsfrei

Bei einer Verschiebung der Kugel über die Kontur folgt die Kugelmitte der Kontur wie in Abb. 20 oben rechts dargestellt. Die Translation der Kugel ist damit vorgegeben. Die Rotation der Kugel ist in allen Raumrichtungen frei und wird durch die Kontakt- und Reibkräfte bestimmt.

Die Kontaktkräfte können über das Kräftegleichgewicht bestimmt werden. Die zunächst reibungsfreie Betrachtung in Abb. 20 verdeutlicht, dass die Kontaktkraft an der Kontur F_k aufgrund des Keilprinzips im Betrag größer als die Federkraft F_f ist.

Abb. 21 zeigt den Verlauf der Kontaktkräfte bei einer Umschaltung. Zum besseren Verständnis wird zunächst der reibungsfreie Fall behandelt. Die Federkraft F_f folgt der Kontur: Bei maximaler Kompression der Feder (Konturmitte) liegt die höchste Federkraft vor. An dieser Stelle treten bei reibungsfreier Betrachtung nur vertikale Kräfte auf, weshalb Federkraft und Konturkontaktkraft identisch sind.

Die maximale Kontaktkraft an der Kontur tritt jedoch in der Nähe der Umkehrpunkte (Maximum und Minimum des Oszillationswegs) der horizontalen Bewegung auf. Aufgrund der Keilwirkung wird die Normalkraft an der Kontur mit abnehmendem Kontaktwinkel α erhöht.

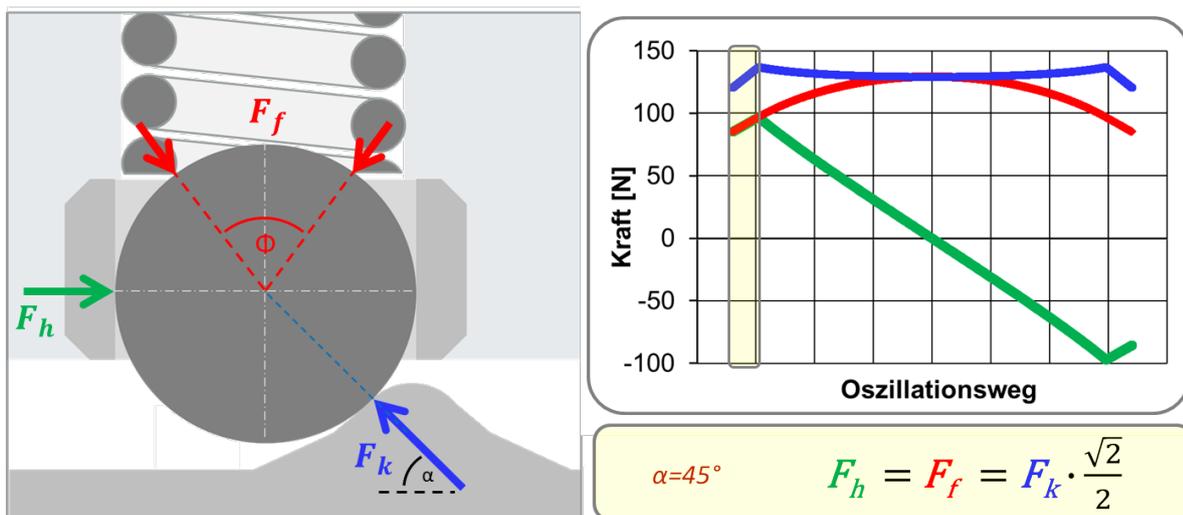


Abb. 21: Rastsystem; berechnete Kontaktkräfte; reibungsfrei

Die Reibungskräfte wirken zunächst naturgemäß normal zu den Kontaktkräften. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den Kräften führen Reibkräfte zu einer Erhöhung der Kontaktkräfte, wie die reibungsbehaftete Betrachtung in Abb. 22 zeigt. Dabei wurde für Kontur- und Hülsenkontakt ein Reibwert von 0,125 angenommen, was in diesem System eine geringe Reibung darstellt (siehe Abschnitt 8.1.6).

Für die horizontale Verschiebekraft ergibt sich eine Hysterese. Die Fläche im Inneren ist ein Maß für die (horizontale) Reibungsarbeit. Im reibungsfreien Zustand entspricht die Verschiebekraft der Kontaktkraft zur Hülse, welche als Referenz durch eine dünne, grüne Linie gezeichnet ist.

Die maximale Kontaktkraft zur Kontur F_k tritt beim Komprimieren der Feder (Kugel bewegt sich in Abb. 22 nach oben) auf. Die Kraft ist an dieser Stelle deutlich höher als die reibungsfreie Referenz (als dünne, blaue Linie dargestellt).

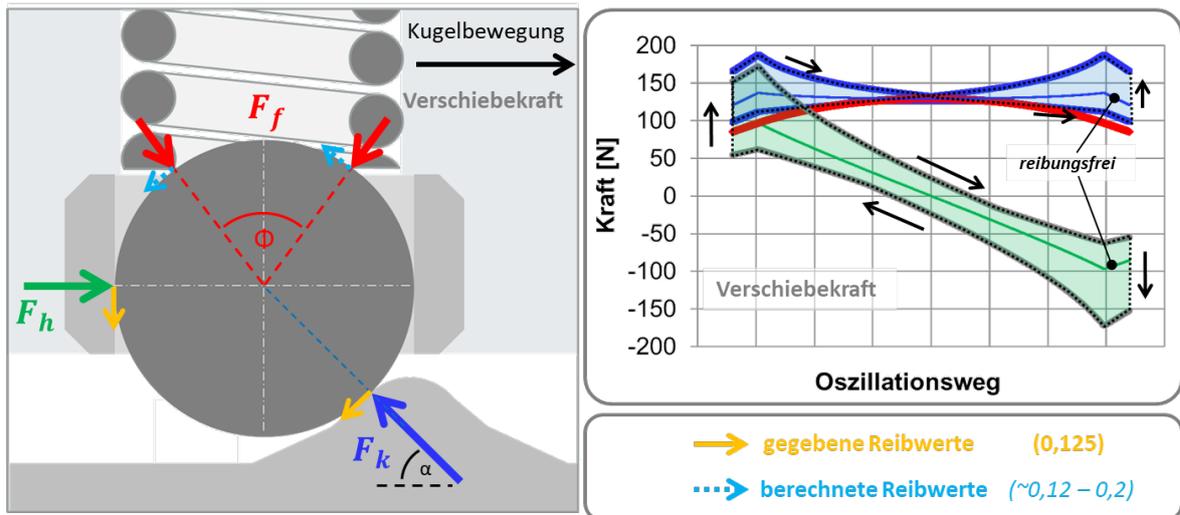


Abb. 22: Rastsystem; berechnete Kontaktkräfte; reibungsbehaftet

An dieser Stelle zeigt sich, dass für eine Abschätzung der Kontaktkräfte eine reibbehaftete Berechnung notwendig ist, da bereits geringe Reibwerte einen großen Einfluss auf die Kontaktkräfte ausüben. Abb. 22 betrachtet eine gleitende also rotationsfreie Bewegung der Kugel.

Für die hier genutzte analytische, reibungsbehaftete Betrachtung müssen die Fälle, dass die Kugel ohne Rotation gleitet (also an der Feder „haftet“) und dass die Kugel an der Kontur entlang wälzt, getrennt betrachtet werden (Abb. 23), da sich unterschiedliche Kräfte und Momentengleichgewichte ergeben. (ausführliche Betrachtung in Anhang G)

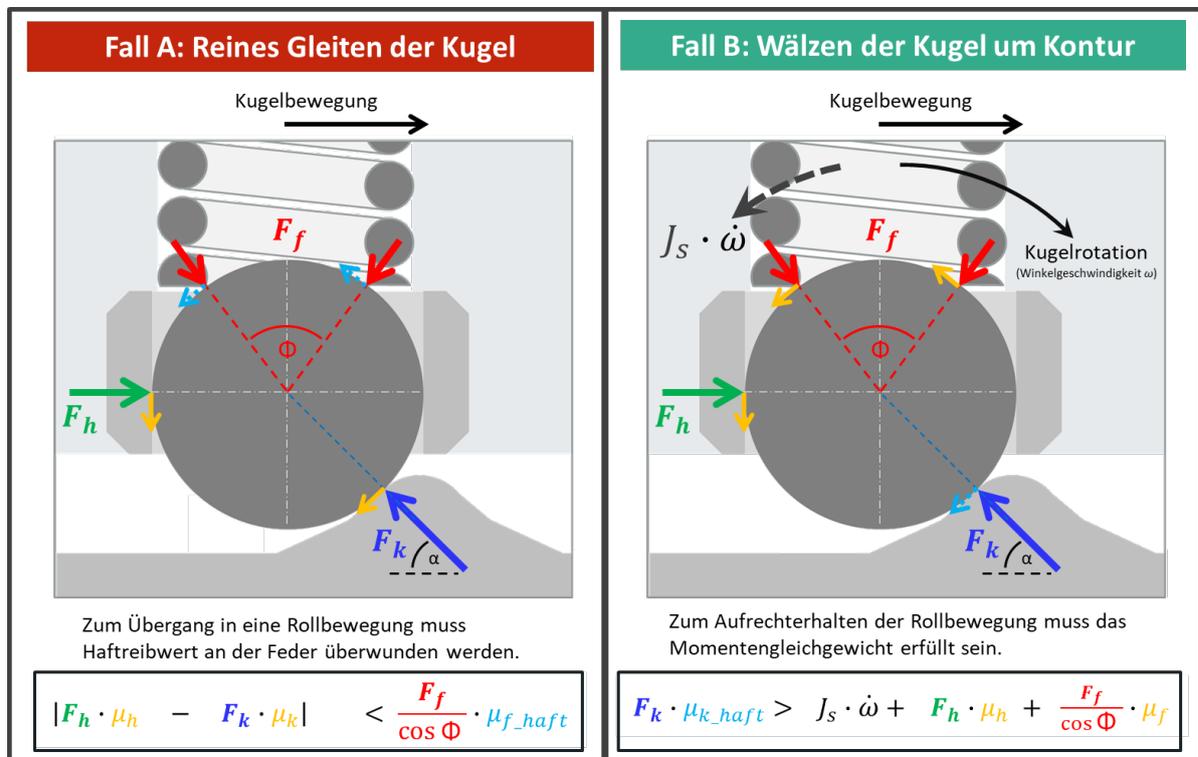


Abb. 23: Rastsystem; Momentengleichgewicht; Wälzen und Gleiten

Für das Gleiten der Kugel ohne Rotation (Fall A) liegt am Federkontakt Haften vor. Die hier wirkende Reibkraft μ_{f_wirk} muss auf Basis des Momentengleichgewichtes berechnet werden. Wird die Haftreibung an der Feder überwunden ($\mu_{f_wirk} > \mu_{f_haft}$), tritt Wälzen auf (Fall B).

In diesem Fall muss die wirksame Reibung im Konturkontakt (μ_{k_wirk}) berechnet werden. Übersteigt diese wiederum die übertragbare Reibung am Wälzkontakt ($\mu_{k_wirk} > \mu_{k_haft}$), kippt das System wieder zum Gleiten.

Auf Basis dieser Betrachtung kann das Verhalten mit geringem Aufwand analytisch bewertet werden. Abb. 24 zeigt einen Vergleich von Berechnung und Messung. Dazu wird die gemessene Verschiebekraft eines Versuchs mit Metallkugel unter Ölbadschmierung mit den Berechnungsergebnissen „gefittet“. Die in der Profilmessung exakt vermessene Kontur dieses Versuchs ist die Basis der Berechnung. In der Berechnung werden die als konstant angenommenen Reibwerte manuell variiert, bis die berechneten Verschiebekraftkurven die Messung gut abbilden (Abb. 24 – links).

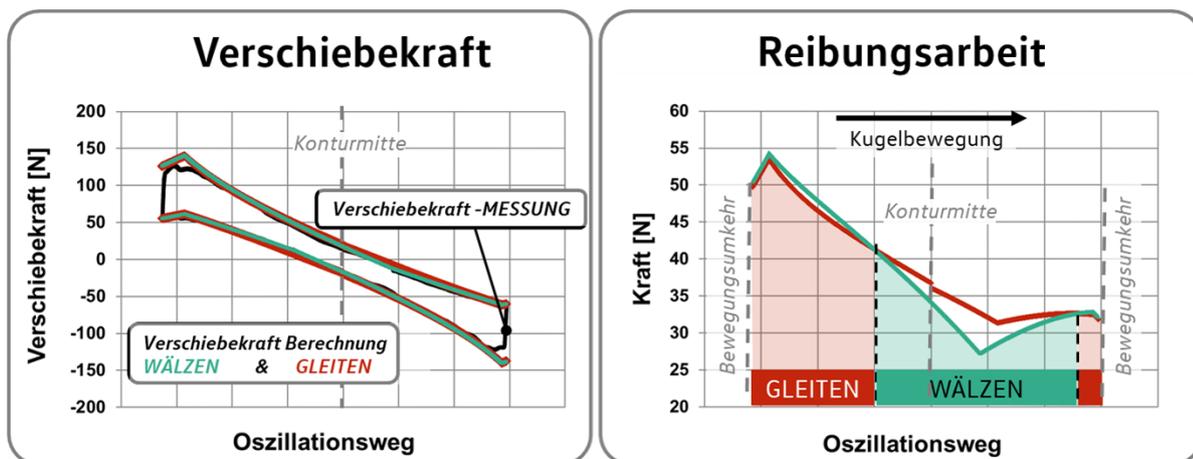
Es zeigt sich, dass für beide Fälle (*Gleiten* und *Wälzen*) eine gute Approximation der Verschiebekraftkurve möglich ist. Daraus wird deutlich, dass die gemessene Verschiebekraftkurve keine Aussage zulässt, ob während des Versuchs Gleiten oder Wälzen der Kugel stattfindet.

Allerdings können die wirkenden Reibwerte in den einzelnen Kontakten sehr gut abgeschätzt werden, da sich die Ergebnisse auch hier kaum unterscheiden: Für die gemessene Verschiebekraftkurve können die Reibwerte wie folgt angenommen werden:

$$\text{Kontur: } \mu_k = 0,15;$$

$$\text{Hülse } \mu_h = 0,11;$$

$$\text{Feder } \mu_f = 0,1.$$



	μ_k (Kontur)	μ_h (Hülse)	μ_f (Feder)
WÄLZEN	berechnet (0,11-0,15)	0,11	0,095
GLEITEN	0,15	0,11	berechnet (0,09-0,15)

Abb. 24: Verschiebekraft – Messung und Berechnung

Um eine Aussage zu treffen, ob Gleiten oder Wälzen stattfindet, wurde die Summe aller Reibkräfte über eine Verschiebung aufgetragen (Abb. 24 – rechts). Die Fläche unter den Kurven ist ein Maß für die im System aufgebrauchte Reibungsarbeit. Unter der Annahme, dass jedes System seinen energetisch günstigsten Zustand anstrebt, können Gleiten und Wälzen verglichen werden. Die jeweils tiefer liegende Kurve ist die energetisch günstigere.

Die Gesamtreibungsarbeit von Rollen und Wälzen ist relativ ähnlich, allerdings lassen sich Unterschiede der Konturbereiche feststellen:

Beim Komprimieren der Feder (*Kugel bewegt sich die Kontur hinauf*) ist demnach Gleiten wahrscheinlicher. Im Bereich der Konturmitte neigt die Kugel eher zum Wälzen. Kurz vor der Bewegungsumkehr liegen die Werte wieder gleich auf.

Dieses Verhalten konnte mit *Hochgeschwindigkeitskamera-Messungen* bestätigt werden. Bei vielen der gemessenen Zyklen gleitet die Kugel zunächst die Kontur hinauf, um dann erst im Bereich der maximalen Federkompression in ein Wälzen überzugehen. Zusätzlich zeigen die Messungen ein stochastisches Verhalten, bei dem zeitweise auch mehrere Schaltzyklen mit vollständigem Gleiten vorliegen.

Auch an dieser Stelle bestätigen die Messungen die Berechnungen: Das System bewegt sich in einem Übergangszustand zwischen Gleiten und Wälzen, so dass kleine Veränderungen der Reibbedingungen in den einzelnen Kontakten einen Wechsel der Kinematik bedeuten können.

In Abb. 25 wird die gerade betrachtete Verschiebekraftkurve für einen Metall-Metall-Kontakt (M-M) mit den Ergebnissen eines Versuchs, welcher unter gleichen Bedingungen mit einer Keramikkugel (M-K) gelaufen ist, verglichen.

Die Kurven zeigen sehr ähnliche Verläufe. Die Flächen innerhalb der Kurven sind nahezu identisch, weshalb von ähnlichen Reibbedingungen auszugehen ist. Unterschiede in der Steigung im Bereich der Umkehrpunkte sind durch leichte Abweichungen in den Konturgeometrien bedingt.

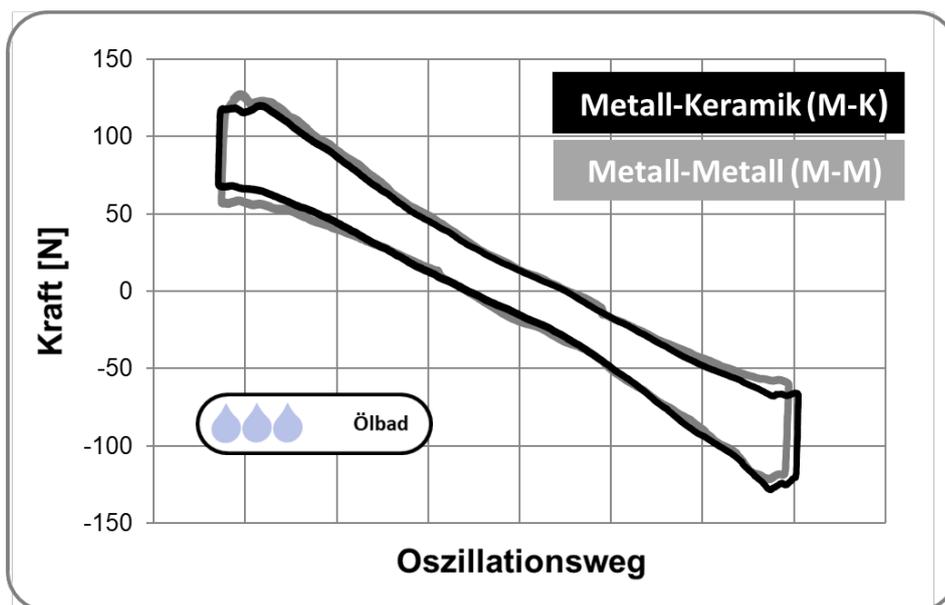


Abb. 25: Verschiebekraft; Vergleich Metall- und Keramikkugel

Das mittels *Hochgeschwindigkeitskamera* für das System M-M validierte stochastische Rotationsverhalten der Metallkugel ist aufgrund der ähnlichen Verschiebekraftmessdaten auch für das System M-K zu erwarten.

Eine Betrachtung von verschiedenen Oszillationsgeschwindigkeiten zeigt eine Abnahme der Reibkräfte bei höherer Geschwindigkeit. Daraus wird gefolgert, dass das System unter allen Bedingungen in der Grenz- bzw. Mischreibung arbeitet (siehe Abschnitt 2.1.8).

4.2 Kontaktbelastung

Auf Basis der Kraftverläufe (4.1) können die Kontaktdrücke nach HERTZ berechnet werden. Die vereinfachte Hertzsche Betrachtung liefert, wie in Abschnitt 2.1.4 dargestellt, eine gute Näherung für reale Kontaktprobleme.

In Abschnitt 4.1 wurde gezeigt, dass die Kontaktkräfte durch die Berücksichtigung der Reibkräfte stark erhöht werden. Dieser Einfluss findet auch bei den Kontaktberechnungen Berücksichtigung. Allerdings beinhaltet die Hertzsche Betrachtung keine Schubspannungen in der Kontaktfläche.

Die Krafterhöhung der Normalkraft durch die Reibung wird daher betrachtet, die Wirkung der Reibkräfte auf die Spannungen im Kontakt nicht. In der Realität sind daher vor allem bei höheren Reibwerten größere Schubspannungen an der Oberfläche zu erwarten. Als Abschätzung und insbesondere zum Vergleich mit anderen Tribosystemen wie Wälzlager sind die Hertzischen Pressungen trotzdem ein gutes Maß.

Abb. 26 zeigt den Verlauf der Hertzischen Pressung während der Oszillation der Kugel über die ungelauene Kontur. Die Pressung folgt im Verlauf der Kontaktkraft. An den Übergängen zwischen Radien und geraden Abschnitten der Kontur entstehen Sprünge im Pressungsverlauf. Diese sind durch die Sprünge im Verlauf der Kontaktradien beim Wechsel zwischen den Geraden und Radien der Konturgeometrie bedingt.

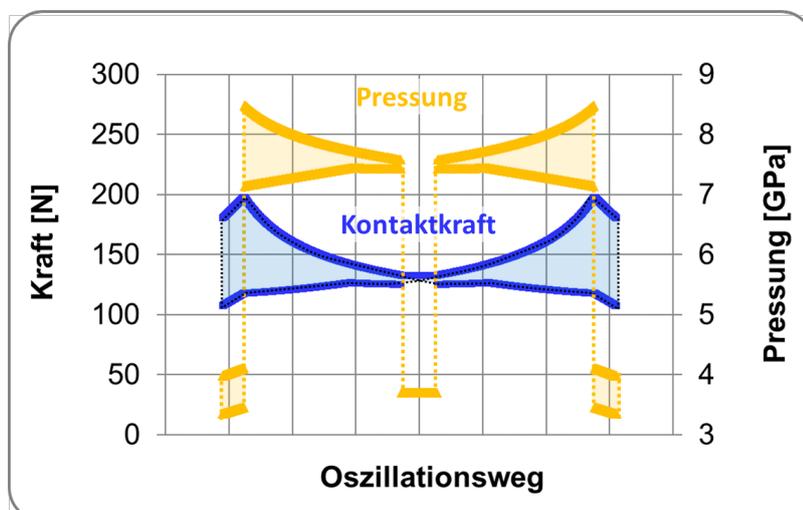


Abb. 26: Hertzische Pressung über Oszillationsweg (siehe Abb. 22)
Reines Gleiten der Kugel betrachtet (Fall A in Abb. 23)

Die maximale Pressung liegt bei über 8 GPa und damit deutlich über den statischen Tragzahlen für Wälzlager. Aufgrund der sehr hohen initialen Pressung sind plastische Verformungen zu erwarten [88].

5 Versuchsbedingungen und Versuchsmatrix

Im Abschnitt 3.1 sind typische Randbedingungen für einen Rastmechanismus angegeben. Daraus abgeleitet sind die **Standardprüfparameter** gewählt:

- Temperierung der Proben auf 90 °C (3 h Haltezeit vor Versuchsbeginn)
- Versuchsfrequenz von 20 Hz (Umschaltzeit = 0,025 s)
(Vorversuche mit 10 Hz, 20 Hz und 30 Hz zeigen keinen signifikanten Einfluss der Versuchsfrequenz auf die Verschleißrate je Schaltzyklus)
- Versuchsdauer von 16 h (ca. 1,15 Mio. Schaltzyklen)
- initiale Beölung mit definierter Ölmenge

Ziel der Versuche ist es, den Einfluss der verschiedenen Materialien, der Beölung und der kinematischen Bedingungen auf das tribologische Verhalten des Rastsystems zu verstehen.

Es ergeben sich folgende **Parametervariationen** für die Standardversuche:

- Material und Gefüge (*Härteverfahren*) der Kontur
- Material der Kugel
- Ölsorte und Ölmenge

Die verwendeten Materialien und Motorenöle sind in Abschnitt 3.2 zusammengefasst.

Nach ersten Testversuchen wurde folgende **Beölungsstrategie** gewählt:

- Es erfolgt eine initiale Beölung zu Versuchsbeginn mit definierter Ölmenge (Abb. 27).
 - **Ölbad** mit Füllstand bis zu Konturspitze (ca. 21 ml)
 - **geringe Ölmenge** (Variation zwischen 40 und 90 μ l)
- Im Versuch findet keine weitere Beölung statt.

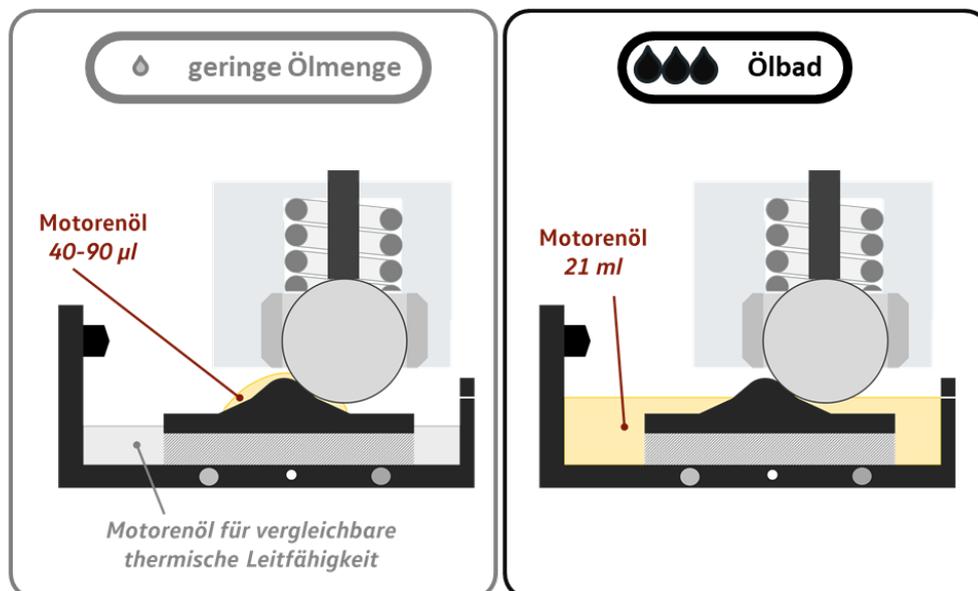


Abb. 27: Varianten der initialen Beölung (siehe Abb. 19)

Die kinematischen Betrachtungen in Abschnitt 4.1 haben gezeigt, dass sich die Kugel in einem kaum vorhersagbaren Grenzbereich zwischen Gleiten (*keine Rotation*) und Wälzen (*Rollen mit Gleitanteil*) bewegt. Daher werden auch Versuche mit gesperrtem *Rotationsfreiheitsgrad* der Kugel durchgeführt, um den Einfluss von Wälzen und Gleiten auf das Verschleißverhalten bewerten zu können.

Die gesperrte Rotation wird über einen Formschluss zwischen Kugel und Feder erreicht. Damit ist ein Abrollen über die Kontur nicht mehr möglich. Das kinematische Verhalten ist für die Versuche mit gesperrter Kugelrotation somit eindeutig definiert.

Aus den *Parametervariationen* folgt die Versuchsmatrix in Tabelle 4 mit den oben beschriebenen *Standardprüfparametern*. Die Anzahl der Versuche ist jeweils für die beiden genutzten Motorenöle angegeben.

Tabelle 4: Versuchsmatrix; Standardversuche

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

		Standardversuche, 90°C, 20Hz, mindestens 1 Mio. Zyklen [0W20 / 5W30]				
Ölmenge	Rastkontur		Material	100Cr6	42CrMoS4	51CrV4
	Kugel		Härtung	DH + A	LH	LH
	Material	Rotation				
 50µl	100Cr6	frei		23 / 2	5 / 5	1 / 1
		gesperrt		1 / -	- / -	- / -
	Si ₃ N ₄	frei		22 / 3	9 / 2	2 / 1
		gesperrt		3 / 1	3 / 1	- / -
 Ölbad	100Cr6	frei		7 / 2	4 / 2	1 / 2
		gesperrt		- / 1	1 / -	- / -
	Si ₃ N ₄	frei		4 / 1	3 / 2	1 / 2
		gesperrt		4 / 3	6 / 1	- / -

Zum besseren Systemverständnis waren noch weitere Versuche mit geänderten Versuchsbedingungen oder anderen Härteverfahren notwendig. Die zusätzlichen *Sonderversuche* sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Versuchsmatrix; Sonderversuche

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

		Sonderversuche [0W20 / 5W30]				
Ölmenge	Rastkontur		Material	100Cr6	42CrMoS4	51CrV4
	Kugel		Härtung	DH + A	mehrere Var.	LH
	Material	Rotation				
	100Cr6	frei	Kurzversuche	3 / -	4 / -	- / -
		frei	Härtevariation	- / -	3 / 4	- / -
	100Cr6	frei	Kurzversuche	- / -	3 / -	- / -
		gesperrt	Härtevariation	- / 1	4 / 1	- / -
	Si ₃ N ₄	gesperrt	Härtevariation	- / -	1 / 1	- / -
		gesperrt	Raumtemp.	1 / -	- / -	- / -

6 Ergebnisse: Tribologische Prüfung

Für die Versuche wurde der in Abschnitt 3.3 beschriebene Aufbau zur oszillierenden Prüfung (*Fa. Werner Stehr Tribologie*) des Rastsystems genutzt. Die Versuche wurden von Willy Peter im Rahmen einer studentischen Tätigkeit und Willy Klink (*Werner Stehr Tribologie*) durchgeführt. Versuchsplanung sowie die Auswertungen und Analysen zu den hier gezeigten Versuchen erfolgten durch den Autor.

6.1 Versuchsablauf und Auswertung

Während eines Versuchs werden die Proben mit der gewählten Prüffrequenz von 20 Hz über die gewählte Versuchszeit belastet. Alle 15 Minuten wird die Frequenz für 3 Schaltzyklen auf 0,1 Hz gesenkt, um in diesen 3 Zyklen die wirkenden Verschiebekräfte und die Konturhöhe zu messen.

Beim Standardversuch ergeben sich innerhalb der 16 h Versuchszeit 63 Einzelmessungen, aus denen Konturverschleiß und der Reibwert zwischen Kontur und Kugel bestimmt werden. Der Kugelverschleiß ergibt sich aus einer Gewichtsbestimmung vor und nach dem Versuch. Weitere Informationen zur Prüftechnik sind in Abschnitt 3.3 zu finden.

6.1.1 Echtzeit-Messung des Systemverhaltens

Aus den Einzelmessungen wird ein Verlauf für die Konturhöhe, den Reibwert im Kontakt zwischen Kontur und Kugel sowie für die gemessenen Temperaturen erstellt. Der Verlauf der Konturhöhe stellt den Profilverschleiß in *mm* dar. Die Methodik der Verschleißmessung ist in Abb. 28 illustriert.

Zur Verschleißbestimmung wird der höchste Punkt der Konturvermessung für jede Einzelmessung ausgewertet. Die Differenz der Messpunkte zu verschiedenen Zeitpunkten ergibt den zeitlichen Verlauf der Konturhöhe und damit den Verschleiß. Die in Abb. 28 gewählte Darstellung der Konturhöhe wird aufgrund der größeren Nähe zu den Primärdaten in der Arbeit weiterverwendet. Eine stärker sinkende Kurve bedeutet damit höheren Verschleiß.

Der im Kontakt zwischen Kontur und Kugel wirksame Reibwert kann durch die Verschiebekraftdifferenz am höchsten Punkt der Kontur berechnet werden. Am höchsten Punkt der Kontur wirken nur vertikale Kontaktkräfte und der Konturreibwert kann vereinfacht aus dem Verhältnis von wirkender Federkraft und der gemessenen Verschiebekraft berechnet werden (Abschnitt 4.1). Die wirkende Federkraft wird auf Basis der Verschleißmessung mithilfe der Federkennlinie bestimmt.

Neben der Systemtemperatur an der unteren Probenaufnahme, welche zur Regelung der Heizelemente genutzt wird, werden zusätzlich die Temperatur an der Kontur in etwa 20 mm Entfernung zum Kontakt sowie die Temperatur am Wegsensor der Verschleißmessung aufgezeichnet (siehe Abb. 29).

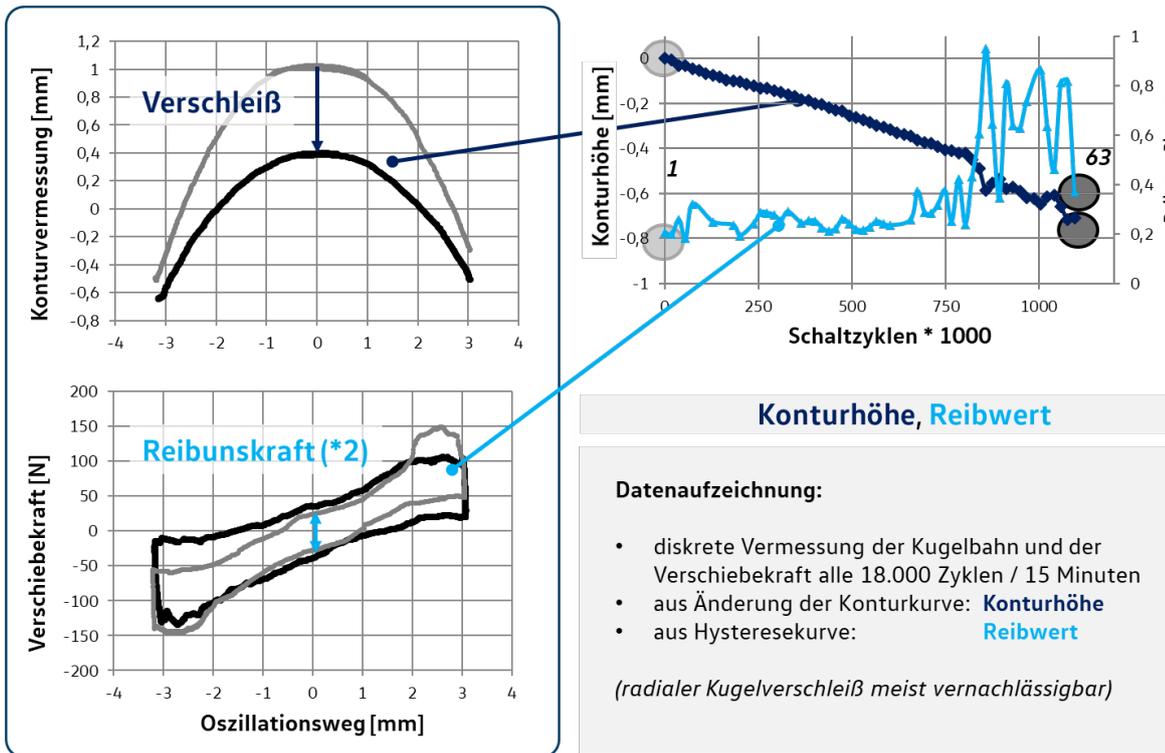


Abb. 28: Schematische Darstellung; Datenaufzeichnung im Versuch

Aufgrund der komplexen Geometrie der Kontaktpartner besteht kein linearer Zusammenhang zwischen dem Profilverschleiß der Konturhöhe und dem Verschleißvolumen. Zur Korrelation wurde das Verschleißvolumen für 16 unterschiedlich stark verschlissene Konturen mittels dreidimensionaler Vermessung (Abschnitt 3.4) vor und nach Versuch bestimmt. Die Korrelation ermöglicht die Berechnung des Verschleißvolumens aller Versuche (Anhang C) und damit den Vergleich zum gravimetrisch bestimmten Kugerverschleiß.

In Abb. 29 sind der Reibwert im Konturkontakt sowie die gemessenen Temperaturen für den gleichen Versuch dargestellt. Eine eindeutige Korrelation zwischen den Reibwerten und den an den Versuchsteilen gemessenen Temperaturen ist ersichtlich. Die Temperaturmessungen können daher zur Plausibilisierung der Reibwerte herangezogen werden.

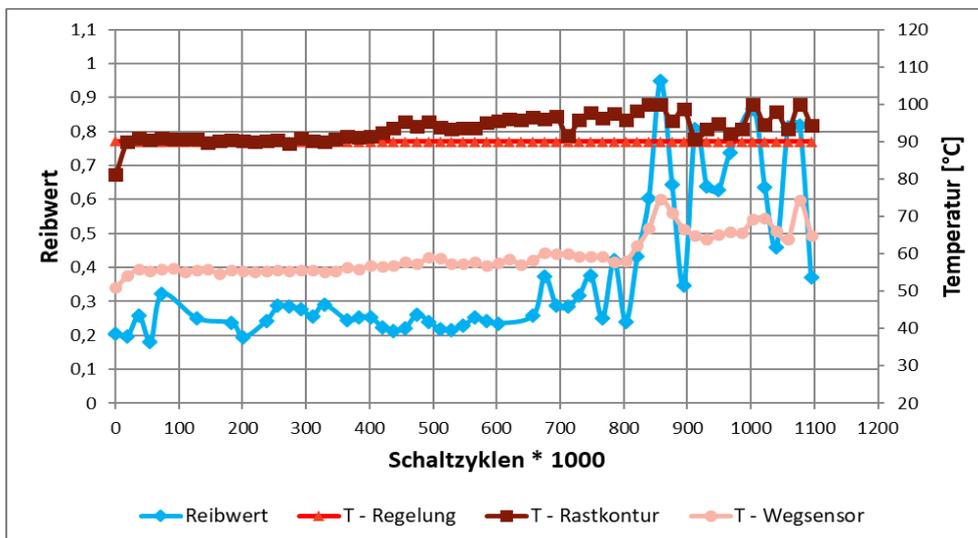


Abb. 29: Versuchsdaten; Metall-Metall (M-M); Temperaturen und Reibwerte

6.1.2 Indikatoren für die tribologischen Prozesse am Versuchsende

Die kurze Vorbetrachtung zum Versuchsablauf in Abschnitt 6.1.1 zeigt, dass es im Versuchsverlauf zu einer Änderung der Systemverhaltens kommen kann. Zum Vergleich mit den Ergebnissen aus den Oberflächenanalysen (Kapitel 7), die den Endzustand des tribologischen Systems widerspiegeln, sind die Messdaten zu *Versuchsende* relevant.

Um den Einfluss von Messungenauigkeit und Schwankungen auszugleichen, hat sich eine Mittelung der *letzten 5 Messwerte* als gute Methode herausgestellt.

Neben dem Gesamtverschleiß ergeben sich für die statistische Auswertung der Versuche die folgenden Parameter:

- Verschleißrate (Höhenprofil und volumetrisch) während der letzten 90.000 Schaltzyklen ($\cong 5$ Messpunkte)
- mittlerer Reibwert während der letzten 90.000 Schaltzyklen ($\cong 5$ Messpunkte)

Die Vorgehensweise wird in Abb. 30 verdeutlicht.

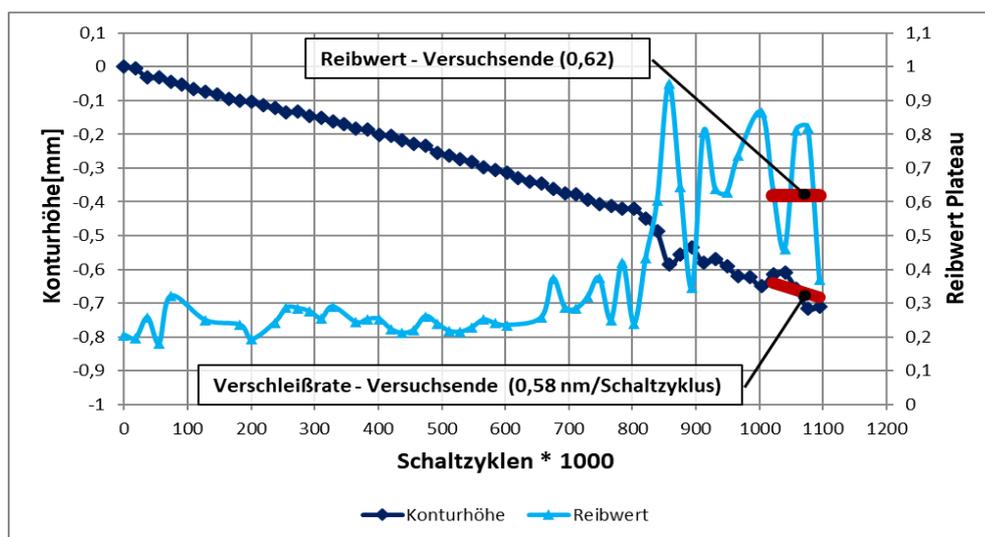


Abb. 30: Versuchsdaten; *M-M*; Systemparameter zu Versuchsende

6.2 Ergebnisse: Metall-Metall-Kontakt (M-M)

Im Tribosystem *M-M* werden folgende Standardvarianten betrachtet:

- 100Cr6-Kugel (DH + A) gegen 100Cr6-Kontur (DH + A)
- 100Cr6-Kugel (DH + A) gegen 42CrMoS4-Kontur (LH)
- 100Cr6-Kugel (DH + A) gegen 51CrV4-Kontur (LH)
- Beölung mit SAE 0W-20 und SAE 5W-30 (*abgekürzt als 0W-20 und 5W-30*)
- Ölbadschmierung und geringe Ölmenge (*siehe Abb. 27, S. 55*)

Informationen zu den Materialien sind dem Abschnitt 3.2 zu entnehmen.

6.2.1 Konturverschleiß: Einfluss der initialen Ölmenge

In Abb. 31 ist der Konturhöhenverschleiß über die Versuchszeit für die Paarung 100Cr6-Kontur gegen 100Cr6-Kugel unter Beölung mit 0W-20 dargestellt.

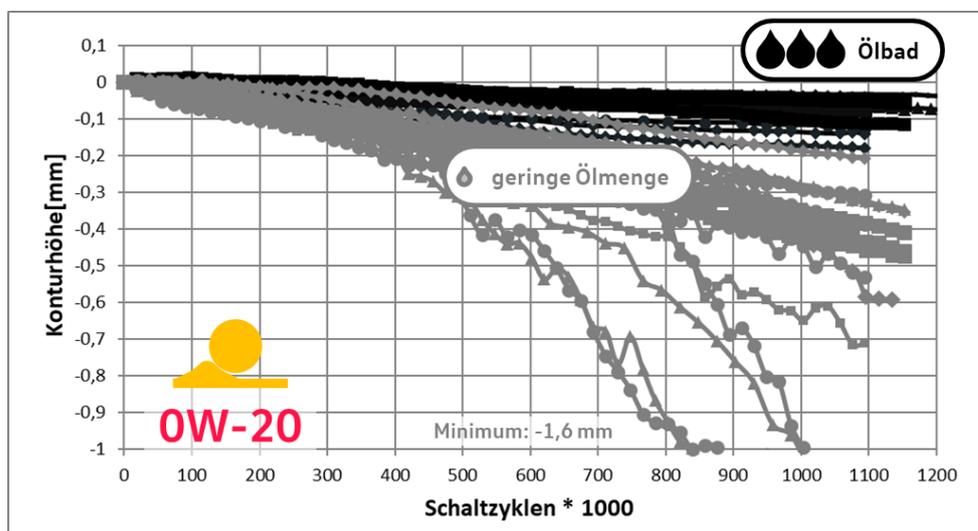


Abb. 31: Verschleißmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Öleinfluss

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Die Ergebnisse der Echtzeit-Verschleißmessung zeigen zwei aneinandergrenzende Streubereiche in Abhängigkeit der Ölmenge. Der Gesamtverschleiß zu Versuchsende liegt bei den Versuchen im Ölbad etwa zwischen 0,05 mm und 0,18 mm, für die Vergleichsversuche mit geringer Ölmenge fallen die Werte in den Bereich zwischen 0,21 mm und maximal 1,6 mm. Verschleißwerte von mehr als 1 mm können als Ausfall des Systems gewertet werden (*Verlust der Rastkraft*), weshalb das Augenmerk auf den Bereich bis 1 mm gelegt wird. Für die meisten Versuche ergibt sich ein stabiles Verhalten mit relativ konstanten Verschleißraten. Bei geringer Ölmenge zeigen einige Versuche ab ca. 500.000 SZ einen stark progressiven Verschleißverlauf mit Sprüngen in der Echtzeit-Messung.

Ergänzend zu Abb. 31 stellt Abb. 32 die mittleren Verschleißraten über die gesamte Versuchszeit aller Versuche dar. Die Höhenabnahme der Kontur (Profilverschleiß) wurde, wie in Abschnitt 6.1.1 beschrieben, in einen Volumenverschleiß umgerechnet. Um die Schwankung zwischen den einzelnen Versuchen darzustellen, sind Streubänder der Ergebnisse angegeben.

Bei geringer Ölmenge zeigen sich in Einklang zu Abb. 31 deutlich höhere Verschleißraten. Im Mittel liegt die Verschleißrate im Profil bei geringer Ölmenge etwa 7-mal höher als im Ölbad. Betrachtet man die Verschleißrate im Volumen erhöht sich der Faktor aufgrund des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Profil und Volumen um mehr als das Dreifache auf ca. 23.

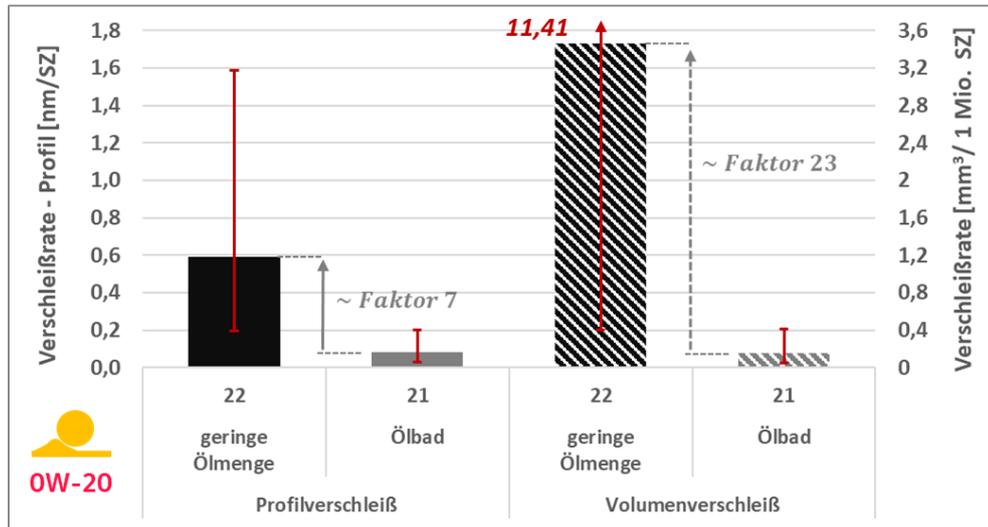


Abb. 32: Verschleißraten (Profil & Volumen); 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20

Streubänder (Max. / Min.) angegeben; Versuchsanzahl unter den Säulen; Mittelung der Daten von 1,1 Mio. SZ

Korrespondierend zu den Verschleißraten (Abb. 31) zeigt die Reibwertmessung in Abb. 33 eine deutliche Trennung zwischen Ölbad und geringer Ölmenge. Bei Ölbadschmierung liegen die Reibwerte über den gesamten Versuch konstant in einem Bereich zwischen etwa 0,1 und 0,15. Bei geringer Ölmenge beginnen die Versuche mit ähnlich niedrigen Reibwerten, die in den meisten Fällen innerhalb der ersten 100.000 SZ auf einen Bereich zwischen 0,2 und 0,35 ansteigen. Im weiteren Versuchsverlauf zeigen die Versuche mit geringer Ölmenge teilweise instabile und sehr hohe Reibwerte. Dieses Verhalten geht mit den sprunghaften Verschleißmessungen in Abb. 31 einher.

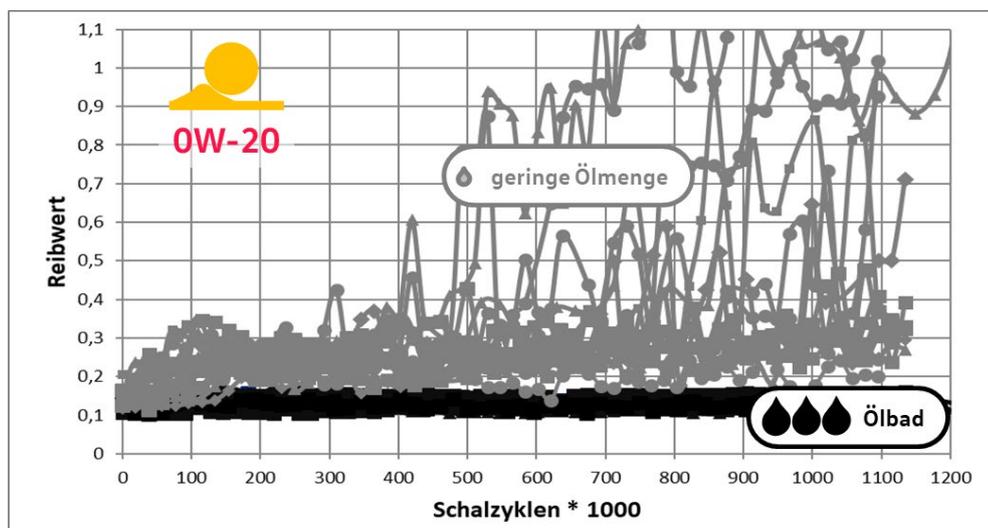


Abb. 33: Reibwertmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Öleinfluss

6.2.2 Konturverschleiß: Einfluss Konturmaterialien und Ölsorte

In Abb. 34 sind die über die Versuchszeit gemittelten Verschleißraten für verschiedene Konturmaterialien im Kontakt mit einer 100Cr6-Kugel unter unterschiedlicher Beölung dargestellt. Da sich die Verschleißraten im Vergleich von Ölbadschmierung und geringer Ölmenge etwa in einer Größenordnung unterscheiden, wurde zur besseren Übersicht eine logarithmische Achsenskalierung gewählt.

Analog zu den Ergebnissen aus Abschnitt 6.2.1 wird der Einfluss der Ölmenge deutlich: Versuche mit geringer Ölmenge zeigen einen deutlich höheren Verschleiß bei größerer Streuung. Im Vergleich zeigen die verschiedenen Konturmaterialien relativ ähnliche Verschleißergebnisse. Die Streubereiche zeigen in fast allen Fällen Überlappungen. Im Vergleich zwischen 0W-20 und 5W-30 sind keine signifikanten Unterschiede auffällig.

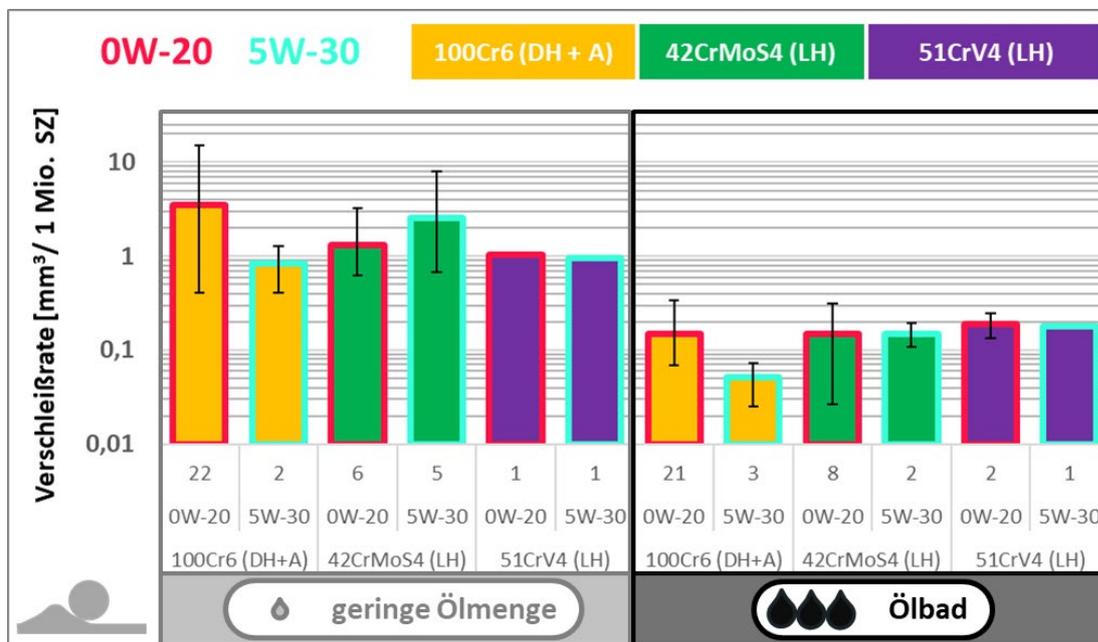


Abb. 34: Verschleißraten (Volumen); *M-M*; Einfluss Beölung und Konturmaterial
 Streubänder (Max. / Min.); Versuchsanzahl unter den Säulen; Mittelung der Daten von 1,1 Mio. SZ
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Auch bei Betrachtung der über den gesamten Versuch gemittelten Reibwerte zeigt sich kein erkennbarer Einfluss der Ölsorte oder des Konturmaterials. Abb. 35 verdeutlicht den Einfluss der Ölmenge. Im Ölbad zeigen sich vergleichsweise niedrige Reibwerte mit sehr geringer Schwankung zwischen den Versuchen. Bei geringer Ölmenge liegen sowohl ein höherer Mittelwert, als auch deutlich größere Streubänder vor.

Die höhere Streuung beim Konturwerkstoff 100Cr6 (DH + A) ist auf die größere Anzahl an Versuchen zurückzuführen.

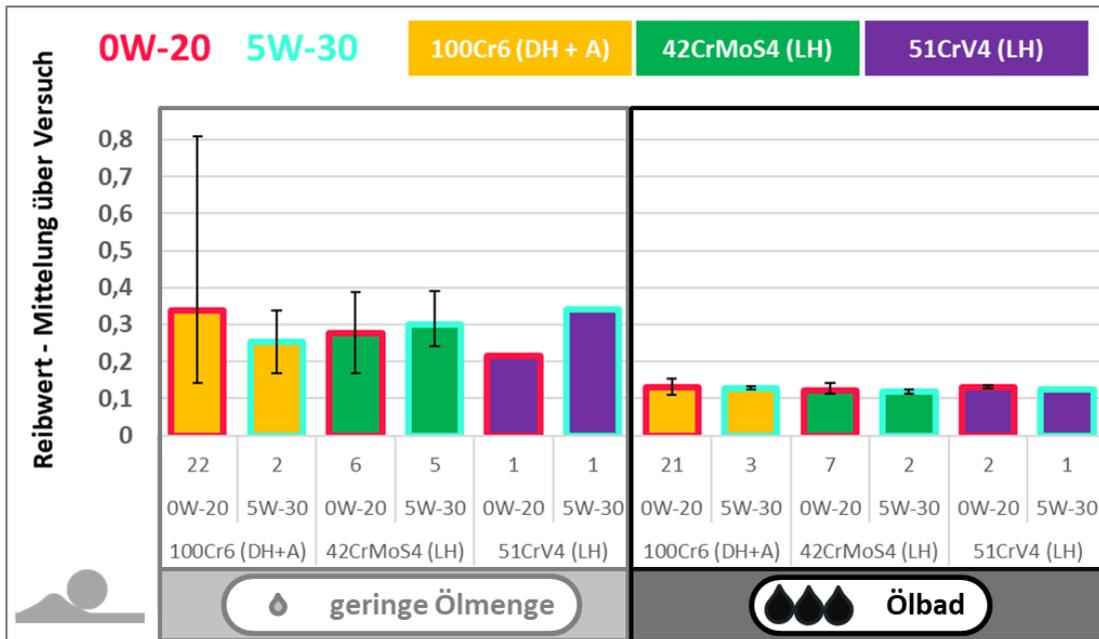


Abb. 35: Reibwert; *M-M*; Einfluss Beölung und Konturmaterial
Streubänder (Max. / Min.); Versuchsanzahl unter den Säulen; Mittelung der Daten von 1,1 Mio. SZ

6.2.3 Konturverschleiß: Einfluss Versuchszeit

Die Versuche im Ölbad zeigen unabhängig von der Ölsorte und dem Konturmaterial innerhalb von 1,1 Mio. SZ konstante Verschleißraten. Um das Langzeitverschleißverhalten zu bewerten, wurde ein Stichversuch mit mehr als der 10-fachen Laufzeit gefahren. Dabei wurde das Ölbad jeweils nach Ablauf von 1,1 Mio. SZ aufgefüllt, da sich in Vorversuchen mit 2 Mio. SZ bereits ein deutlicher Ölverlust abgezeichnet hat.

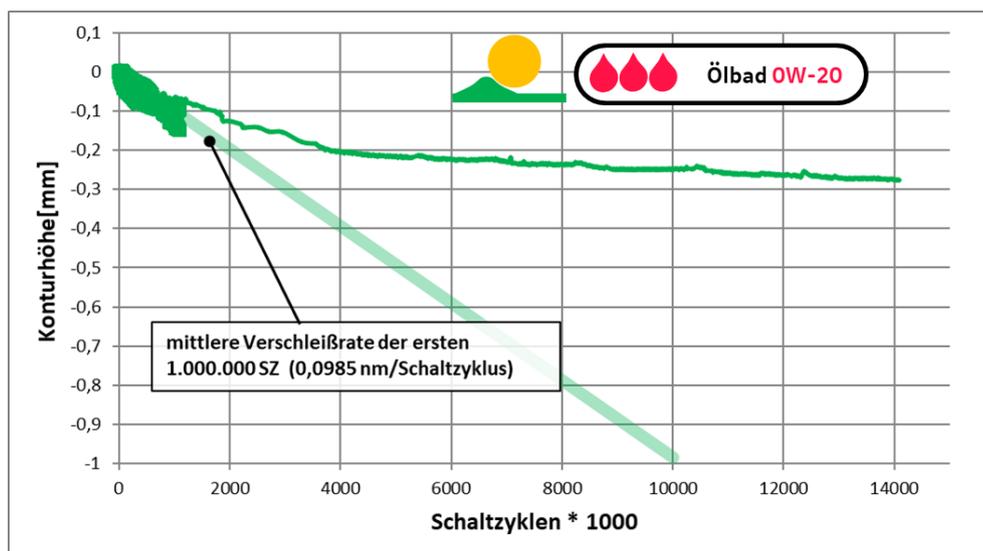


Abb. 36: Verschleißmessung; *42CrMoS4 (LH)* – *100Cr6*; Ölbad 0W-20; Langzeitversuch

Der Vergleich zwischen Langzeitversuch (14 Mio. SZ) und den Referenzversuchen mit 1,1 Mio. SZ und ansonsten gleichen Versuchsbedingungen zeigt einen degressiven Verschleißverlauf. Zur Verdeutlichung ist in Abb. 36 die mittlere Verschleißrate der Standardversuche über die normale Versuchszeit hinaus extrapoliert dargestellt.

Diese Ergebnisse werden bei Betrachtung des Verschleißes in den letzten 5 SZ (siehe Abschnitt 6.1.2) bestätigt (Abb. 37). Die Verschleißrate sinkt im Langzeitversuch auch bei Betrachtung des volumetrischen Verschleißes.

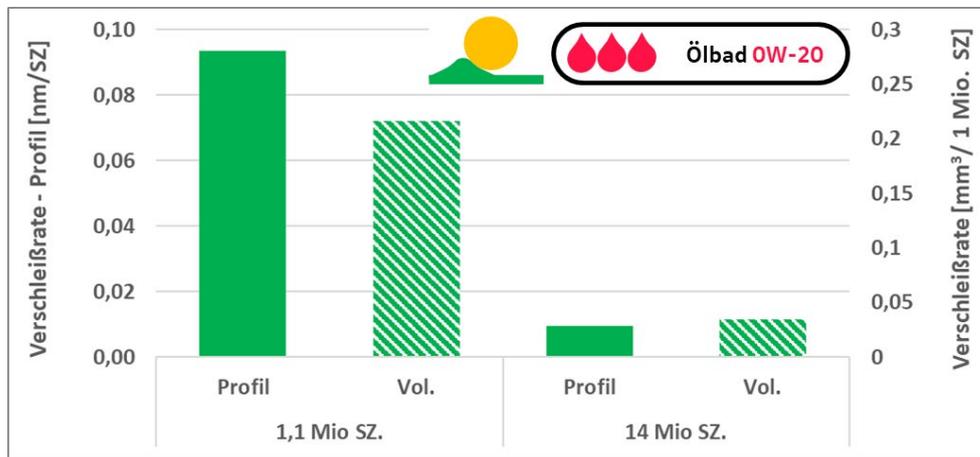


Abb. 37: Verschleißraten (Versuchsende); $42CrMoS4$ (LH) – $100Cr6$; Langzeitversuch für 1,1 Mio. SZ sind Mittelwerte aus Abb. 34 dargestellt

6.2.4 Konturverschleiß: Einteilung in Kategorien

Die bisher gezeigten Ergebnisse zum Beölungseinfluss zeigen insbesondere bei geringer Ölmenge eine große Streuung in den Messgrößen zu Versuchsende. Um Korrelationen zu den Analysen der Bauteile, bei denen der Endzustand des tribologischen Systems dokumentiert wird zu ermöglichen, sollen die Versuche anhand der Messwerte zu Versuchsende unterteilt werden.

Nach ausführlicher Aufbereitung der Daten hat sich eine Einteilung anhand des Reibwerts zu Versuchsende (*näheres zur Bestimmung in Abschnitt 6.1.2*) in 5 verschiedene Gruppen als zielführend erwiesen.

Da die hier eingeführten Verschleißkategorien im weiteren Verlauf auch für die Einteilung der Oberflächenanalysen (Kapitel 7) und die Interpretation der Ergebnisse (Kapitel 8) verwendet werden, hat sich eine möglichst kurze Bezeichnung bewährt. Die Bezeichnung der Kategorien wird aus der Abkürzung M-M (Metall-Metall) und einem weiteren Buchstaben als Kennzeichen für die jeweilige Kategorie gebildet.

In Abb. 38 wird die Einteilung exemplarisch anhand von Ergebnissen der Paarung $100Cr6$ (DH + A) – $100Cr6$ gezeigt. Dazu ist der Reibwert zu Versuchsende dargestellt. Die Einteilung in die Kategorien wird durch unterschiedliche Farben hervorgehoben. Das Farbschema wird in der gesamten Arbeit einheitlich eingehalten. Eine Gesamtübersicht ist in Anhang A gegeben.

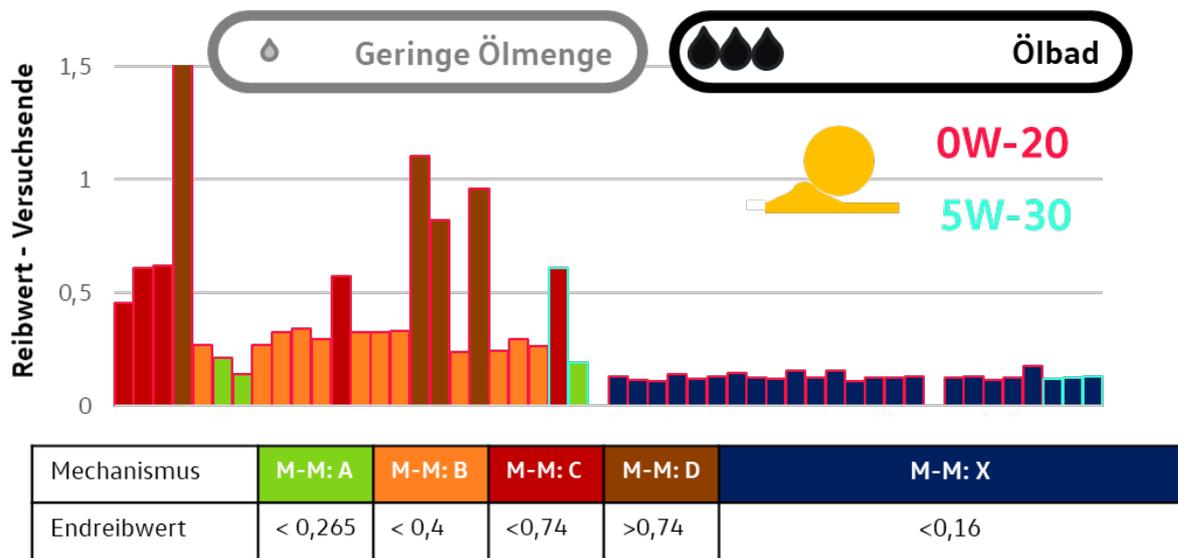


Abb. 38: Einteilung in Verschleißkategorien; 100Cr6-100Cr6

Die zur Einteilung genutzten Reibwerte zu Versuchsende korrelieren wie auch die über die Versuchszeit gemittelten Reibwerte (Abb. 35, S. 63) mit der initialen Ölmenge. Aufgrund der geringen Streuung der Versuchsergebnisse bei Ölbadschmierung liegen hier alle Versuche in der gleichen Kategorie, welche fortan als M-M: X bezeichnet wird. Mit steigendem Endreibwert folgen die Kategorien M-M: A, M-M: B, M-M: C und M-M: D.

Diese Kategorien können zur Einteilung fast aller Versuche mit 100Cr6-Kugel (M-M) genutzt werden. Nur für gesperrte Kugelrotation muss noch eine zusätzliche Kategorie (M-M: Y, siehe Abb. 45, S. 69) hinzugefügt werden.

Fortlaufend wird die **Einteilung für alle Versuche im System Metall-Metall (M-M)** genutzt, unabhängig von Konturmaterial, Ölsorte und Kugelkinematik.

In Abb. 39 sind Endverschleißrate und Endreibwert dargestellt. Neben der Aufteilung in die Kategorien werden die Versuche hier auch nach den Kriterien Ölsorte, initiale Ölmenge und Konturmaterial unterschieden.

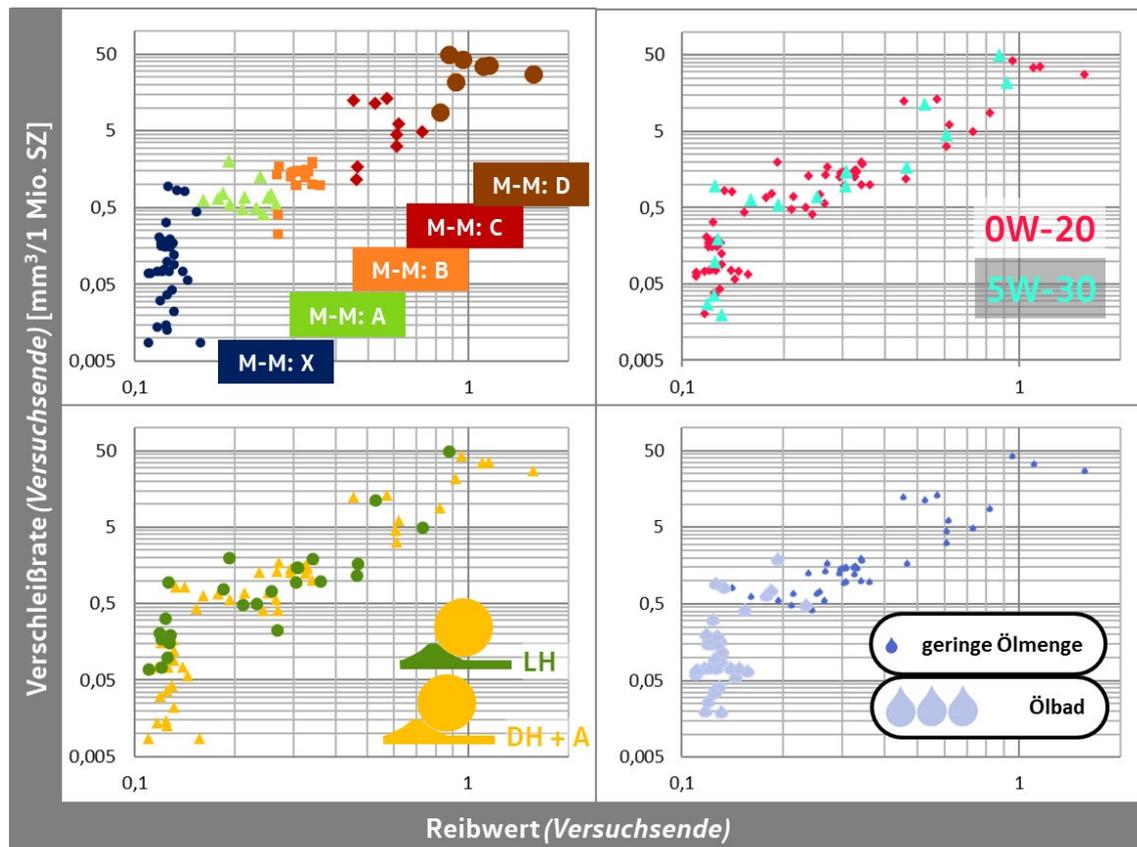


Abb. 39: Zusammenfassung; *M-M*; Endverschleißrate über Endreibwert

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Bei Betrachtung der Kategorien (oben links) zeigt sich eine deutliche Trennung der 5 Gruppen. Außerdem ist eine direkte Korrelation zwischen Endreibwert und Endverschleißrate ersichtlich. Die Endverschleißraten unterscheiden sich insgesamt um mehr als 4 Größenordnungen und damit deutlich stärker als der mittlere Gesamtverschleiß in Abb. 34 (S. 62).

Wie auch die gemittelten Daten der Versuche (Abschnitt 6.2.2) zeigen die Versuchsdaten zu Versuchsende keinen signifikanten Einfluss von Konturmateriale oder Ölsorte. Einzig bei der Kategorie *M-M: X* ist eine geringere Endverschleißrate bei Konturen aus 100Cr6 (*DH + A*) auffällig.

6.2.5 Sonderversuche - gesperrte Kugelrotation

Die kinematischen Betrachtungen (Abschnitt 4.1) zeigen, dass sich die Kugel in einem undefinierten Grenzzustand zwischen Gleiten und Rollen befindet. Um den Einfluss der Gleitbewegung zu bewerten, wurden Sonderversuche mit gesperrter Kugelrotation und damit einer erzwungenen und somit definierten Gleitbewegung durchgeführt.

Abb. 40 zeigt die Profilvermessung für die Materialkombination 100Cr6-Kontur gegen 100Cr6-Kugel unter Beölung mit 0W-20. Neben den Standardversuchen unter Ölbadschmierung und geringer Ölmenge (bereits in Abb. 31, S. 60 gezeigt) sind hier die Sonderversuche mit gesperrtem Rotationsfreiheitsgrad der Kugel dargestellt.

Bei einer Ölbadschmierung bewirkt der gesperrte Rotationsfreiheitsgrad einen etwas stärkeren Verschleiß. Die Versuche liegen leicht unter dem Streuband der Versuche mit freier Rotation.

Bei einer Schmierung mit geringer Ölmenge zeigt der Stichversuch mit gesperrter Rotation zunächst ein unauffälliges Verhalten. Ab ca. 200.000 SZ kommt es zu sehr hohen Verschleißraten und damit deutlich früher als bei den Versuchen der Referenzgruppe mit freier Rotation.

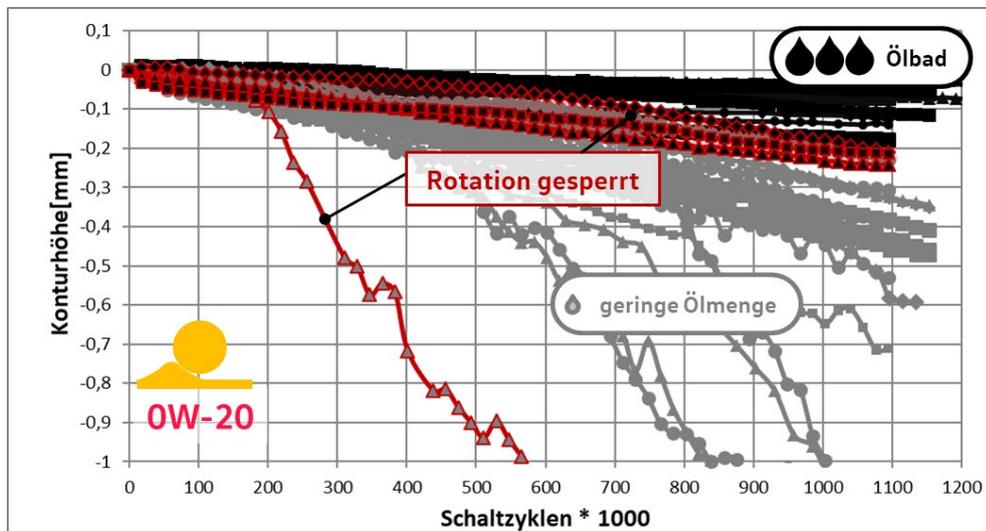


Abb. 40: Verschleißmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Kinematikeinfluss

Analog ist in Abb. 41 die Reibwertmessung der gleichen Versuche dargestellt. Im Ölbad liegen die Versuche mit gesperrter Rotation im Streuband der Referenz. Bei geringer Ölmenge steigt im Stichversuch mit gesperrter Rotation die Reibung analog zum Verschleiß bereits deutlich früher als bei den Referenzversuchen an.

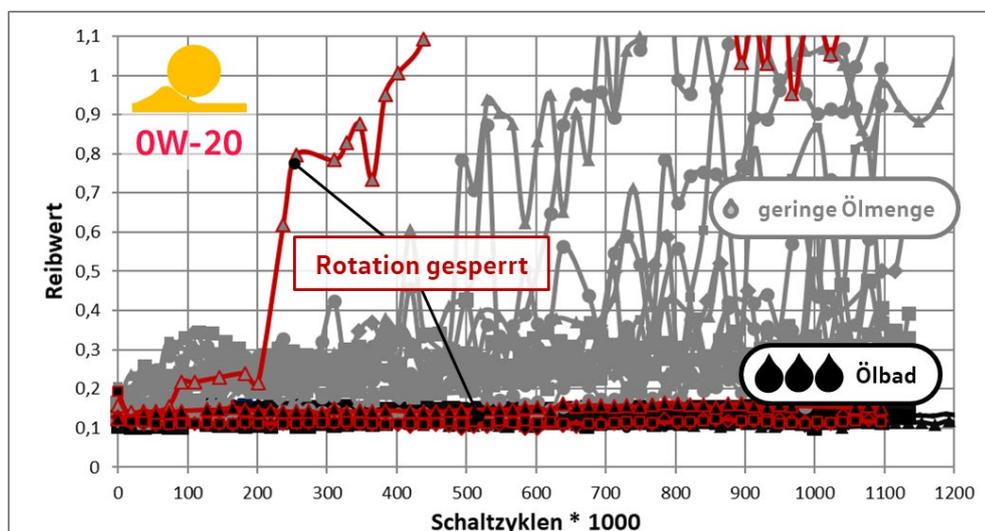


Abb. 41: Reibwertmessung; 100Cr6 – 100Cr6; 0W-20; Kinematikeinfluss

Betrachtet man den Einfluss einer gesperrten Kugelrotation beim Konturmaterial 42CrMoS4 (LH) ergibt sich ein anderes Bild:

In Abb. 42 zeigen die Versuche mit *gesperrter Rotation bei Ölbad* von Beginn an sehr hohe Verschleißraten. Im Vergleich zur Referenzgruppe im Ölbad tritt deutlich stärkerer

Verschleiß auf. Der Verschleiß ist sogar höher als bei den Versuchen mit geringer Ölmenge. Im hier betrachteten Profilverschleiß fällt zusätzlich ein degressiver Verschleißverlauf auf.

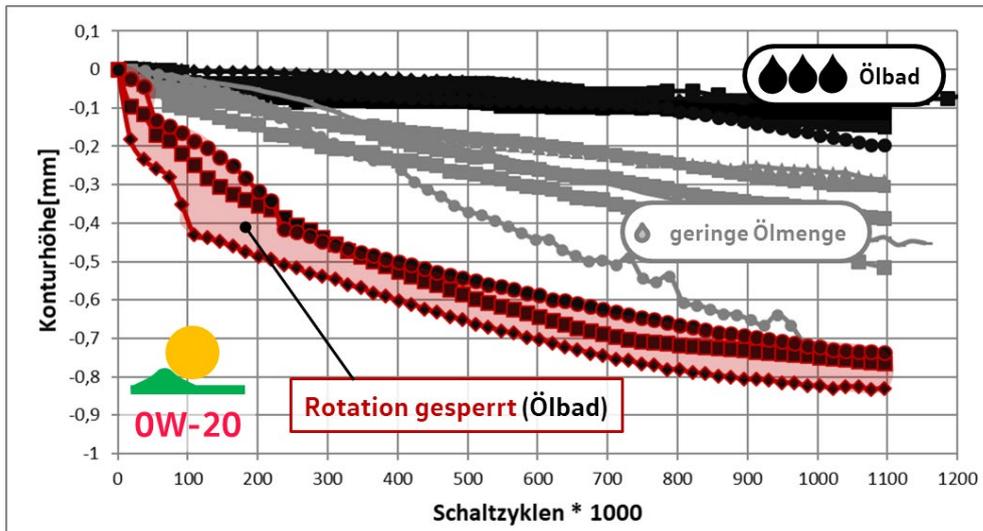


Abb. 42: Verschleißmessung; $42CrMoS4$ (LH) – $100Cr6$; 0W-20; Kinematikeinfluss

Die Reibwerte (siehe Abb. 43) sind für die Versuche mit gesperrter Rotation deutlich erhöht, liegen aber über die gesamte Versuchszeit trotz der zu Beginn deutlich höheren Verschleißraten im Mittel unter den Reibwerten der Versuche mit geringer Ölmenge.

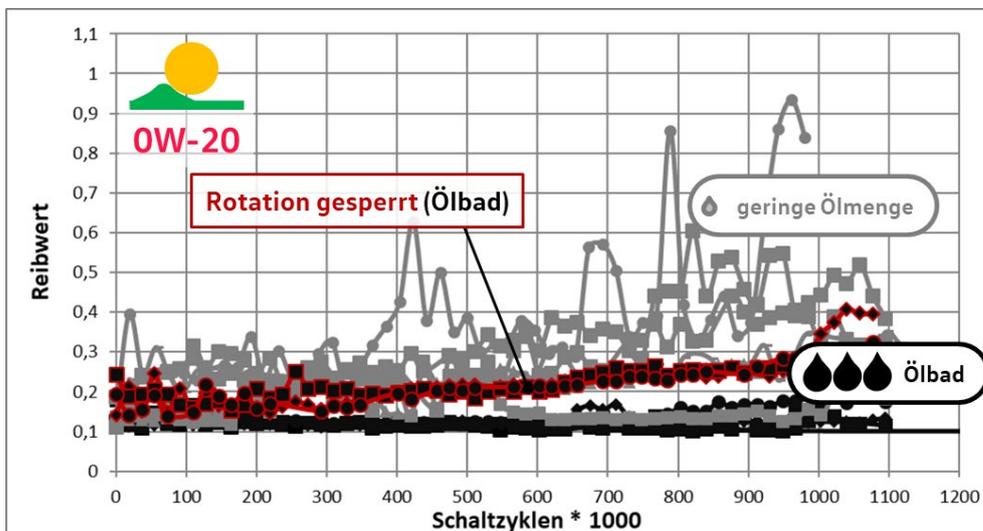


Abb. 43: Reibwertmessung; $42CrMoS4$ (LH) – $100Cr6$; 0W-20; Kinematikeinfluss

Abb. 44 zeigt die gemittelten volumetrischen Verschleißraten für Versuche unter Ölbadschmierung. Die Darstellung ist logarithmisch gewählt. Bei allen Varianten führt der gesperrte Rotationsfreiheitsgrad der Kugel zu einer Zunahme des Verschleißvolumens. In Abhängigkeit der Material- und Schmierstoffkombination liegen allerdings große Unterschiede vor.

Beim Konturmateriale $100Cr6$ (DH) ist der Einfluss unabhängig von der Ölsorte gering. Der gesperrte Rotationsfreiheitsgrad führt nur zu einer leichten Zunahme des Verschleißes.

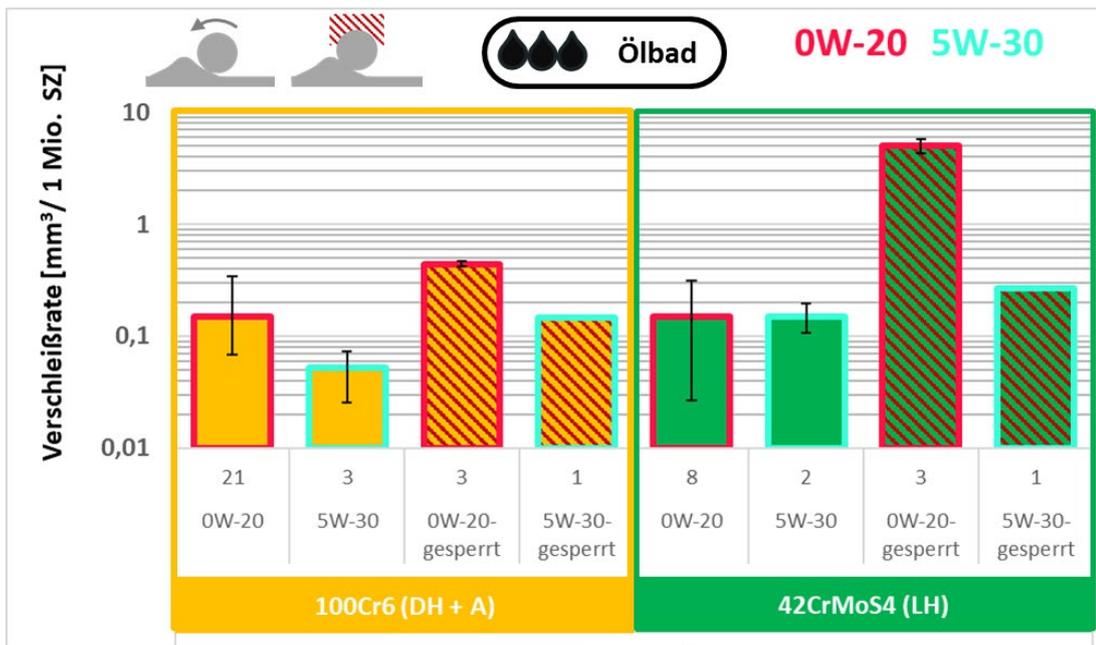


Abb. 44: Verschleißraten (Volumen); *M-M*; Kinematikeinfluss
 Streubänder (Max. / Min.); Versuchsanzahl unter den Säulen; Mittelung der Daten von 1,1 Mio. SZ
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Bei einer Schmierung mit 5W-30 weisen die Versuche mit 42CrMoS4 (LH) und gesperrter Rotation ein ähnliches Verhalten wie die Versuche mit freier Rotation auf. Lediglich die bereits in Abb. 42 betrachtete Variante (*Konturmaterial 42CrMoS4 (LH) & Schmierung durch 0W-20*) führt zu einer starken Erhöhung des Verschleißes infolge einer Sperrung der Kugelrotation. Da sich das Verschleißverhalten deutlich von den in Abschnitt 6.2.4 vorgestellten Kategorien unterscheidet, wird an dieser Stelle eine weitere Kategorie (*M-M: Y*) hinzugefügt (Abb. 45). (*Eine Gegenüberstellung aller Kategorien ist in Anhang A3 gegeben.*)

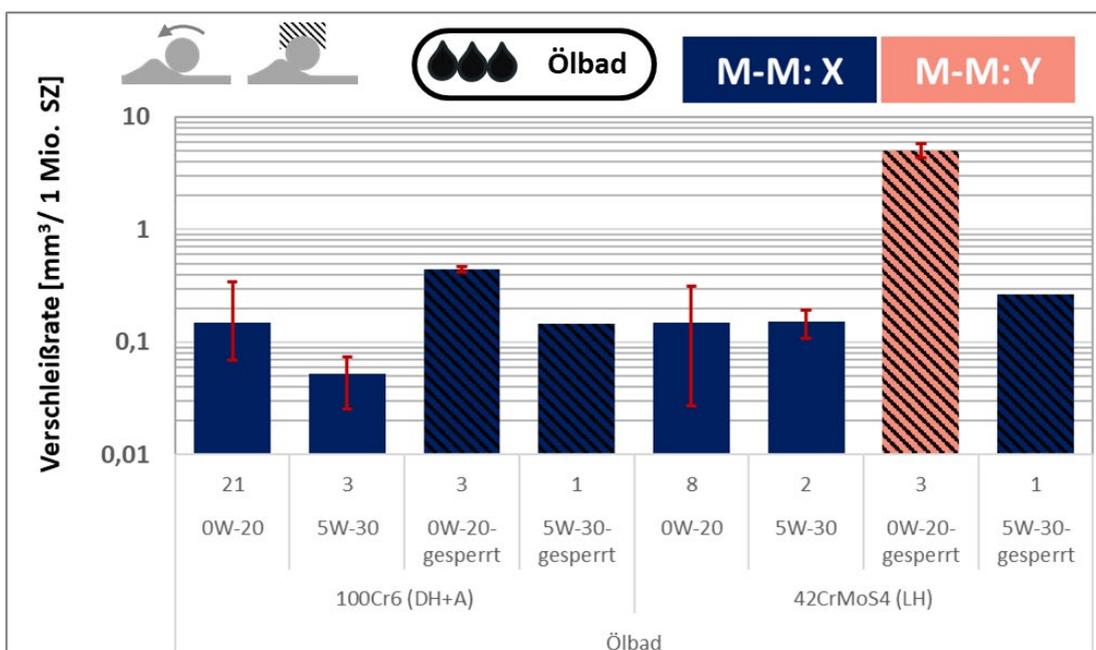


Abb. 45: Verschleißraten (Volumen); *M-M*; Kinematikeinfluss
 Streubänder (Max. / Min.); Versuchsanzahl unter den Säulen; Mittelung der Daten von 1,1 Mio. SZ
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Abb. 46 zeigt die maximale Verschleißrate aller M-M-Versuche über den Reibwert, der während der maximalen Verschleißrate vorliegt. Versuche mit gesperrter Rotation sind mit einem schwarzen Rahmen gekennzeichnet.

Fast alle Versuche liegen innerhalb eines Bands. Nur die Versuche der Kategorie M-M: Y ($42CrMoS4$ (LH); $0W-20$; gesperrte Rotation) zeigen sehr hohe Verschleißraten bei vergleichsweise geringen Reibwerten.

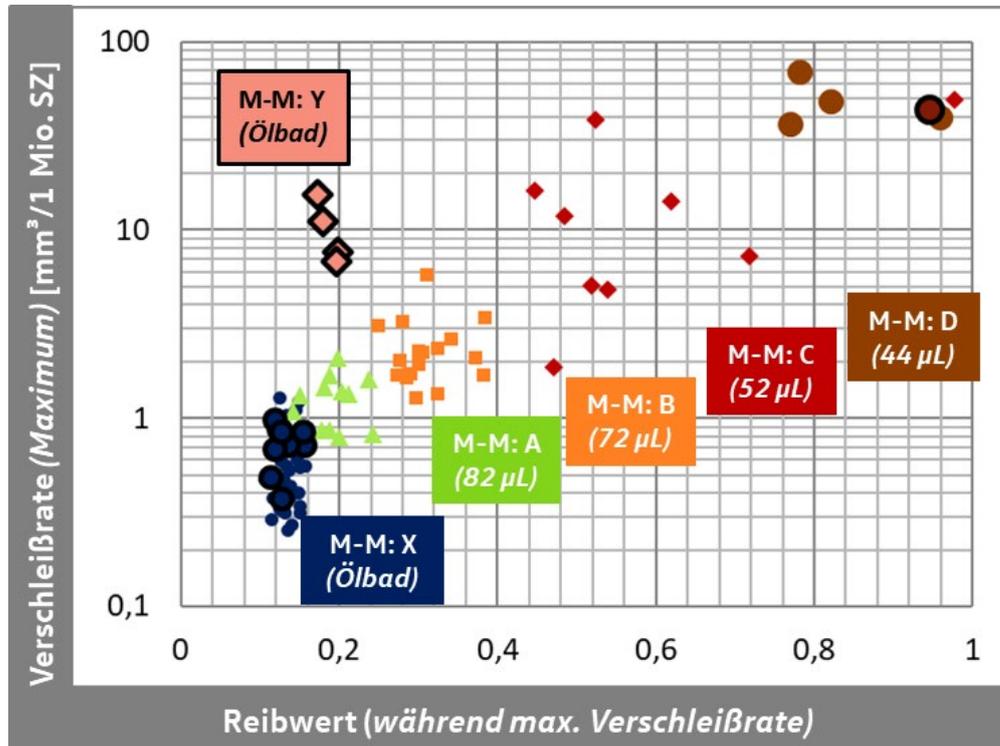


Abb. 46: Max. Verschleißrate über zugehörigem Reibwert; M-M; Kinematikeinfluss

Versuche mit gesperrter Rotation durch schwarzen Rahmen gekennzeichnet

mittlere Ölmenge vor Versuch unter den Kategorien angegeben

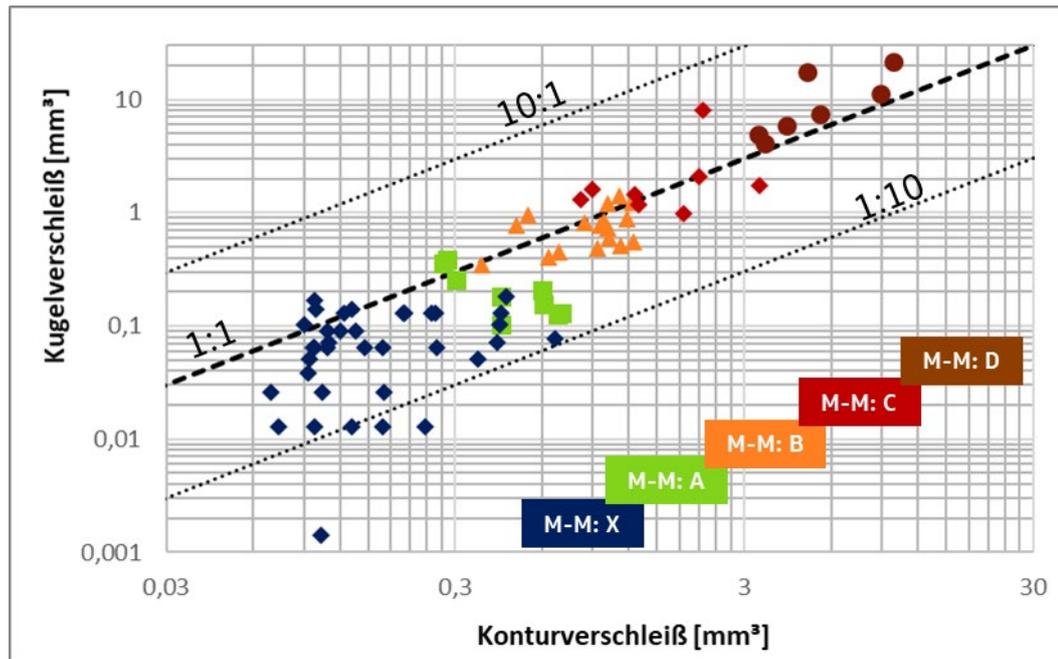
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

6.2.6 Kugelverschleiß (Standardversuche und gesperrte Rotation)

Während für den Verschleiß der Kontur umfangreiche Messdaten für die gesamte Versuchszeit vorhanden sind, kann der Verschleiß am Gegenkörper nur nach Versuch bestimmt werden. Die Vorgehensweise zur Verschleißmessung der Kugeln ist in Abschnitt 3.4 beschreiben.

Abb. 47 zeigt den volumetrischen Verschleiß von Kontur und Kugel zu Versuchsende für alle Standardversuche (M-M). Auch hier eignet sich die in Abschnitt 6.2.4 gewählte Kategorisierung gut als Methode zur Strukturierung der Versuchsdaten.

Als Orientierung sind die gestrichelten Linien mit den Verhältnissen von Kugel zu Konturverschleiß von 1/10, 1/1 und 10/1 eingefügt.

Abb. 47: Kugelverschleiß über Konturverschleiß [mm³]; M-M

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Es zeigt sich, dass Kontur und Kugel im Mittel in der gleichen Größenordnung verschleifen. Für die Kategorien M-M: X und M-M: A ist der Kugelverschleiß im Mittel etwas geringer als der Verschleiß der Kontur. Ab Kategorie M-M: B verschleifen Kontur und Kugel etwa gleich stark. Wie auch der Konturverschleiß umfasst der Kugelverschleiß mehrere Größenordnungen. Bei Verschleißmengen kleiner 0,001 mm³ liegt der Verschleiß im Bereich der Messgenauigkeit.

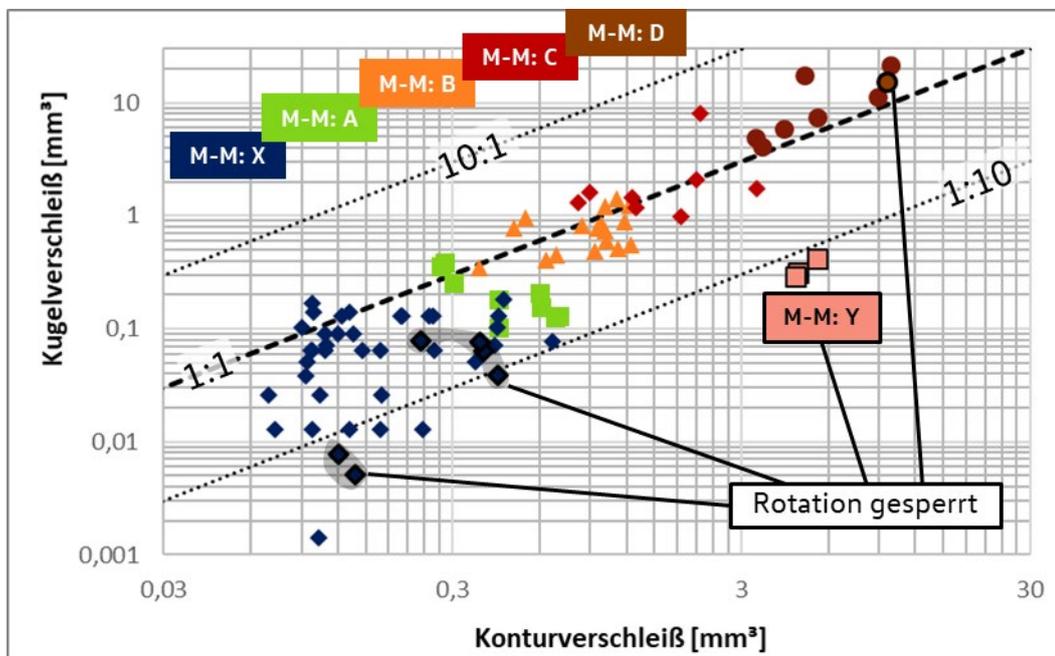


Abb. 48: Kugelverschleiß über Konturverschleiß; M-M; Kinematikeinfluss

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

In Abb. 48 sind zusätzlich die Versuche mit gesperrter Rotation (gekennzeichnet durch schwarze Rahmen) dargestellt. Die meisten Versuche mit gesperrter Kugelrotation liegen in den

Streuung der zugehörigen Kategorien. Der gesperrte Rotationsfreiheitsgrad zeigt, abgesehen von im Mittel etwas höheren Verschleißraten, keine Auffälligkeiten.

Die Versuche der Kategorie M-M: Y (*Konturmaterial 42CrMoS4 (LH) unter Schmierung mit 0W-20*) bilden hier eine Ausnahme. Neben den ungewöhnlich hohen Verschleißraten (Abschnitt 6.2.5) fallen die Versuche auch durch relativ geringen Kugelverschleiß auf, welcher sich deutlich vom Referenzstreuband unterscheidet.

6.3 Ergebnisse: Metall-Keramik-Kontakt (M-K)

Im Tribosystem *M-K* werden folgende Standardvarianten betrachtet:

- Si_3N_4 -Kugel gegen 100Cr6-Kontur (DH + A)
- Si_3N_4 -Kugel gegen 42CrMoS4-Kontur (LH)
- Si_3N_4 -Kugel gegen 51CrV4-Kontur (LH)
- Beölung mit SAE 0W-20 und SAE 5W-30 (*abgekürzt als 0W-20 und 5W-30*)
- Ölbad Schmierung und geringe Ölmenge (*siehe Abb. 27, S. 55*)

Informationen zu den Materialien sind dem Abschnitt 3.2 zu entnehmen.

6.3.1 Konturverschleiß: Stochastisches Verhalten

Abb. 49 zeigt die Verschleißergebnisse der drei Konturmaterialien 100Cr6 (DH + A), 42CrMoS4 (LH) und 51CrV4 (LH) unter Ölbad Schmierung bei Verwendung von Keramik kugeln als Gegenkörper. Die Ergebnisse für die vergleichbaren M-M-Versuche (Abb. 31, S. 60) sind als transparentes Streuband im Hintergrund dargestellt.

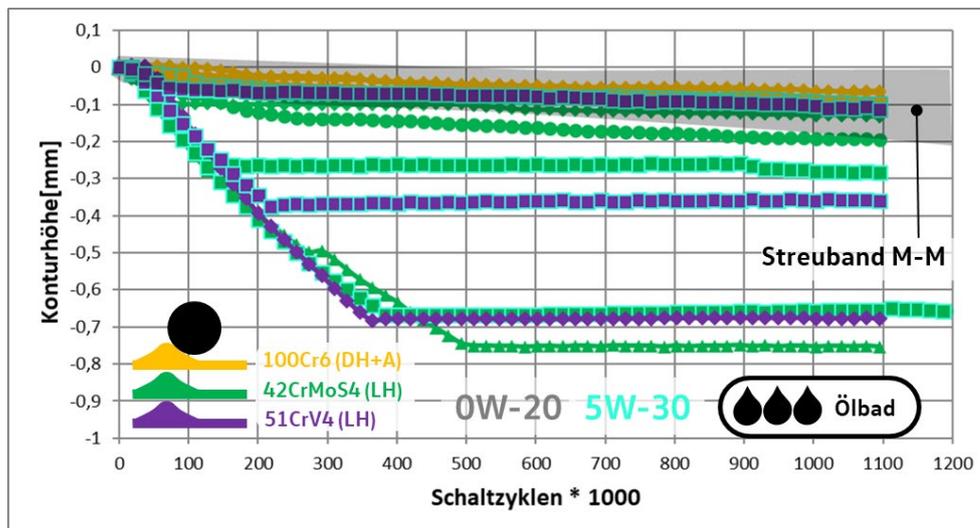


Abb. 49: Verschleißmessung; *M-K*; Ölbad; (M-M im Hintergrund)

Beölung mit 0W-20 und 5W-30 (Nur 5W-30 farblich hervorgehoben)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Im Gegensatz zum System M-M liegt im System M-K bei Ölbad Schmierung eine große Schwankungsbreite der Ergebnisse vor. Teilweise ist der Verschleiß ähnlich gering wie bei Verwendung der 100Cr6-Kugeln (M-M). Einige Versuche zeigen jedoch zu Beginn sehr hohe

Verschleißraten, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten in sehr geringe bis nicht mehr messbare Verschleißraten übergehen.

Auffällig ist, dass die hohen Verschleißraten nur bei den lasergehärteten Konturen (51CrV4 und 42CrMoS4) auftreten, während alle Versuche mit 100Cr6-Konturen (DH + A) niedrige Verschleißraten zeigen. Es ist keine Systematik bezüglich der Ölsorte erkennbar.

Alle Versuche weisen im Ölbad niedrige Reibwerte auf und liegen im Streuband der M-M-Vergleichsgruppe (Abb. 50). Die hohen Verschleißraten einiger Versuche (Abb. 49) gehen nicht mit auffällig erhöhten Reibwerten einher.

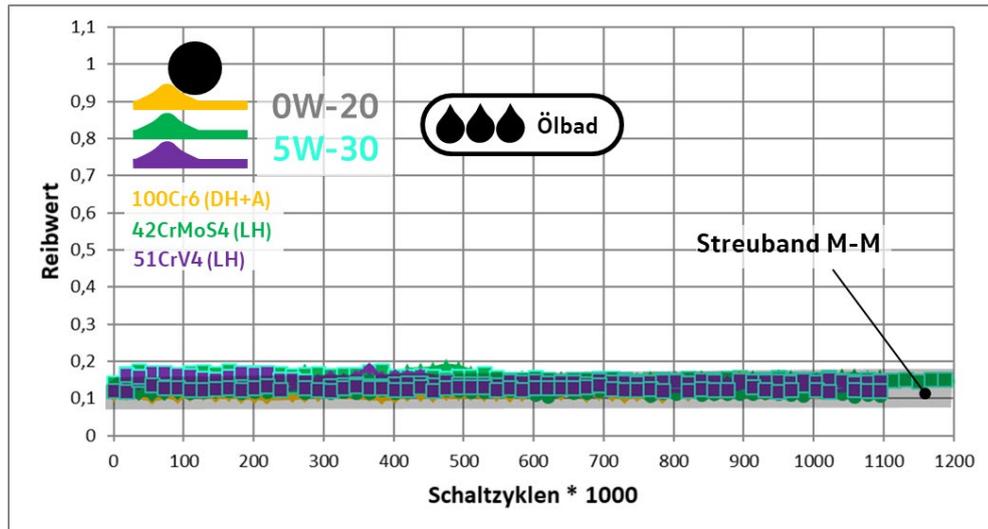


Abb. 50: Reibwertmessung; M-K; Ölbad; (M-M im Hintergrund)
Beölung mit 0W-20 und 5W-30 (Nur 5W-30 farblich hervorgehoben)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Abb. 51 und Abb. 52 zeigen die Ergebnisse der M-K-Versuche bei geringer Ölmenge analog zu den Abb. 49 und Abb. 50.

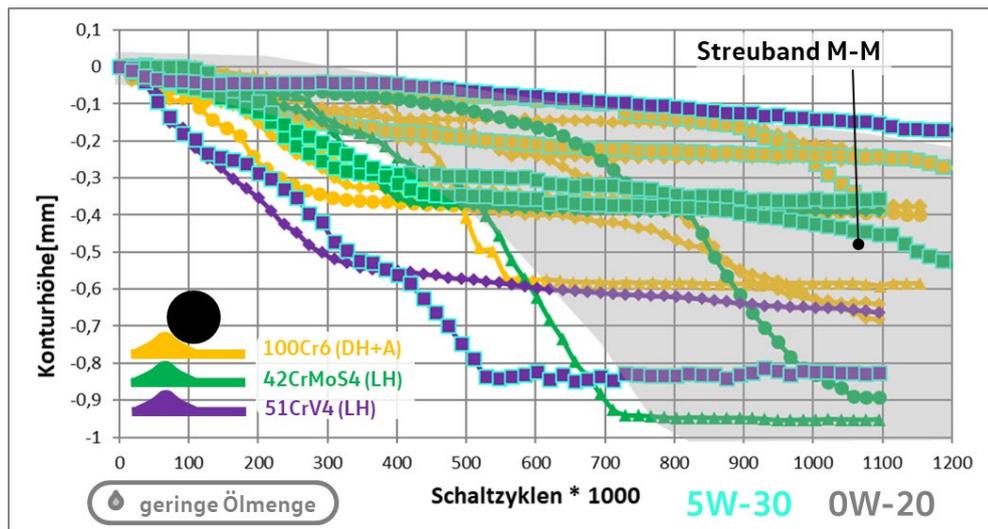


Abb. 51: Verschleißmessung; M-K; geringe Ölmenge; (M-M im Hintergrund)
Beölung mit 0W-20 und 5W-30 (Nur 5W-30 farblich hervorgehoben)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Wie auch bei der großen Ölmenge kommt es bei geringer Ölmenge scheinbar stochastisch zu deutlich höheren Verschleißraten im Vergleich zu den M-M-Versuchen (Abb. 51). Die hohen Verschleißraten können initial oder auch zu Versuchsende auftreten. Im Kontrast dazu sind auch sehr geringe Verschleißraten möglich. Dabei ist kein Zusammenhang in Bezug zu den Werkstoffen und Ölsorten erkennbar.

Die Reibwerte sind im Vergleich zu den M-M-Versuchen (Abb. 52) deutlich reduziert. Nur einige Versuche zeigen kurzzeitig eine erhöhte Reibung, wobei auffällt, dass die erhöhte Reibung immer vor dem Wechsel von extrem hohem zu niedrigem Verschleiß auftritt.

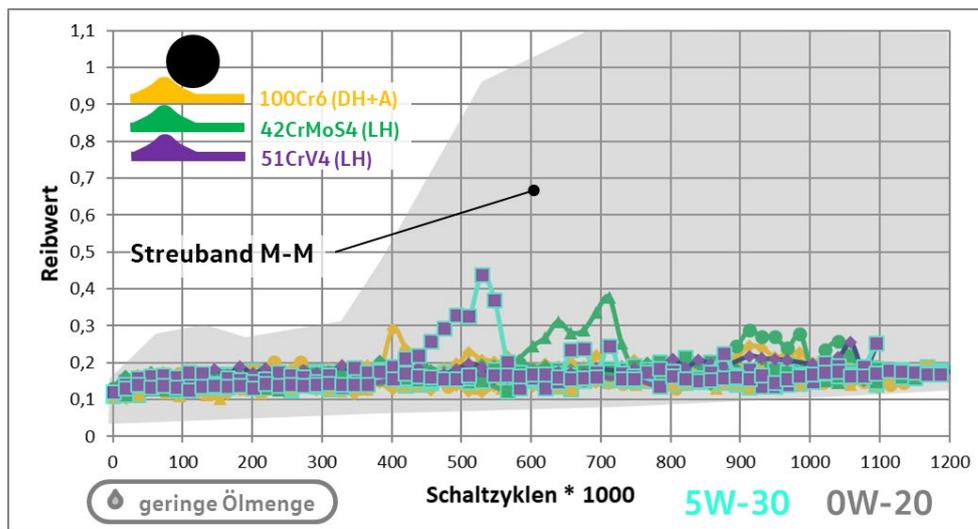


Abb. 52: Reibwertmessung; M-K; geringe Ölmenge; (M-M im Hintergrund)

Beölung mit 0W-20 und 5W-30 (Nur 5W-30 farblich hervorgehoben)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Insgesamt lassen sich aus dem Vergleich von M-K und M-M folgende Auffälligkeiten für das System M-K zusammenfassen:

- 1) Es kommt unabhängig von der Ölmenge zu scheinbar stochastisch auftretenden extrem hohen Verschleißraten.
- 2) Die Reibwerte im System M-K sind unabhängig von Ölmenge und Verschleißrate gering und dabei auf dem Niveau der M-M-Versuche unter Ölbadsschmierung.
- 3) Die Ölmenge zeigt damit keinen dominanten Einfluss auf die Reibung.
- 4) Die Ölmenge hat im Mittel auch keinen starken Einfluss auf den Verschleiß.

6.3.2 Konturverschleiß: Einteilung in Kategorien

Eine Einteilung der Versuche in Kategorien anhand der Versuchsdaten ist aufgrund der großen scheinbar stochastischen Streuung bei den Versuchen mit Keramikkugel (M-K) noch bedeutender, als bei den Versuchen der Paarung M-M.

Da der Reibwert im System M-K kein Indikator für das Verschleißverhalten ist (siehe Abschnitt 6.3.1), wird hier eine Unterteilung anhand der Verschleißraten vorgenommen:

- M-K: X – stabil geringe Verschleißrate im Ölbad $< [0,15 \text{ mm} / 1 \text{ Mio. SZ}]$
- M-K: Z – stabil geringe Verschleißrate bei geringer Ölmenge $< [0,15 \text{ mm} / 1 \text{ Mio. SZ}]$
- M-K: Y – zu Versuchsende extrem hohe Verschleißrate $> [1 \text{ mm}^3 / 1 \text{ Mio. SZ}]$
- M-K: R – Wechsel von geringen und hohen Verschleißraten

Die Einteilung ist exemplarisch in Abb. 53 illustriert.

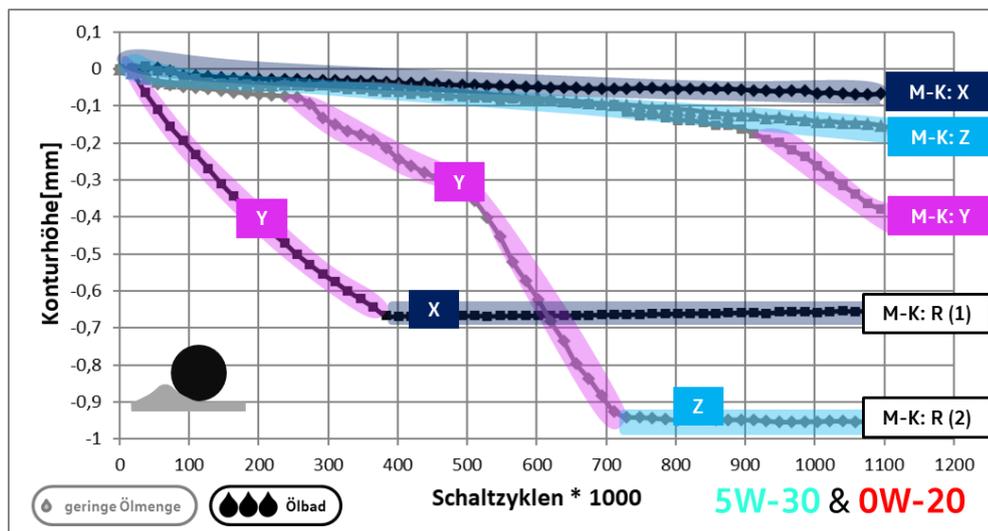


Abb. 53: Verschleißmessung; M-K; Einteilung in Kategorien

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Abb. 54 zeigt eine Übersicht aller Versuche im System M-K. Eine ähnliche Übersichtsform wurde bereits für das System M-M genutzt (Abb. 39, S. 66). Im Gegensatz zum System M-M tritt die maximale Verschleißrate i.d.R. nicht zu Versuchsende auf, weshalb hier Verschleißrate und Reibwert für jeden Versuch im kritischen Zustand (*maximale Verschleißrate*) dargestellt sind.

Da im System M-K keine große Ergebnisbreite im Reibwert vorliegt, wird in Abb. 54 auf die logarithmische Achseneinteilung der Abszisse verzichtet.

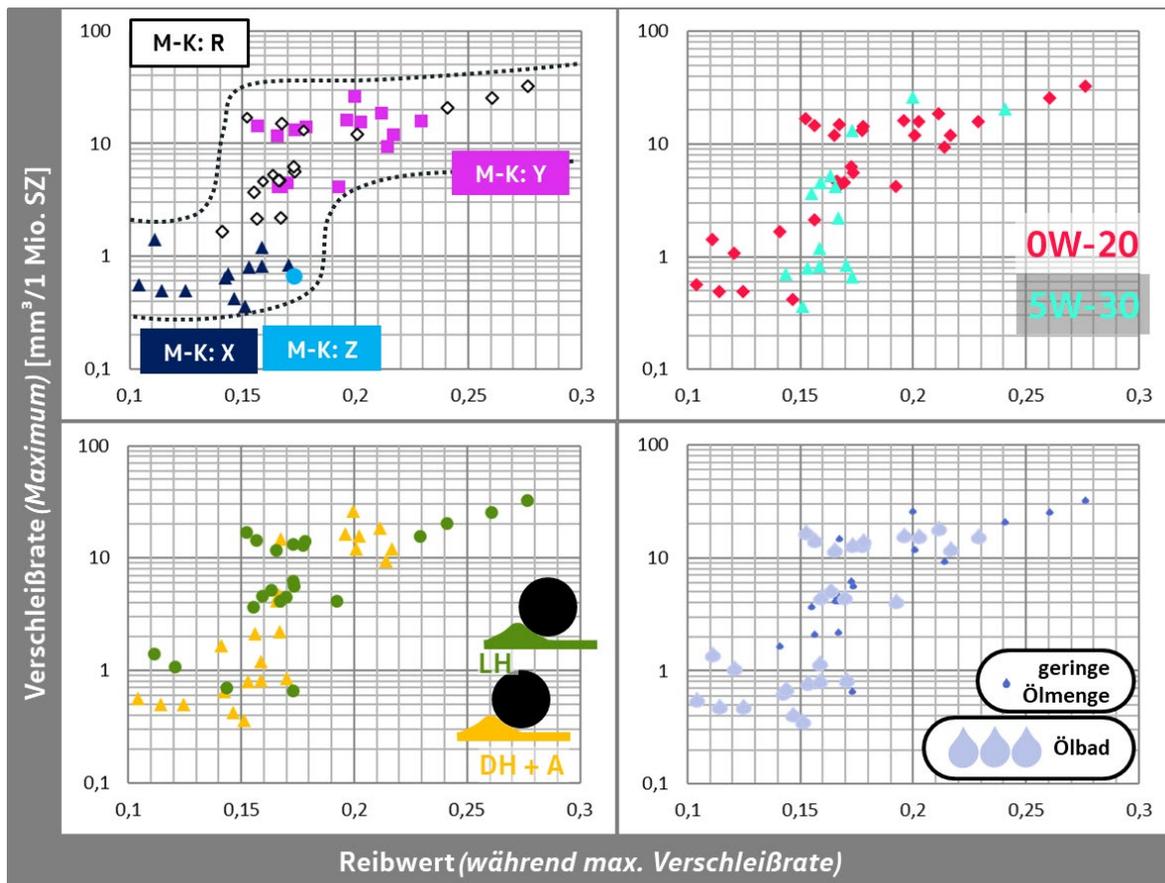


Abb. 54: Maximale Verschleißrate über Reibwert; M-K

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Unterschiede im Reibwert sind im Vergleich zu den Versuchen mit Metallkugel klein. Die Versuche im Ölbad zeigen im Mittel etwas niedrigere Reibwerte, wobei die Kategorie M-K: X über alle Versuche hinweg die geringsten Reibwerte aufweist. Reibwerte größer 0,25 treten nur bei geringer Ölmenge auf (Abb. 54 - unten rechts).

Im Gegensatz zum System M-M zeigt sich hier kein direkter Zusammenhang zwischen Reibwert und Verschleißrate oder zwischen Ölmenge und Verschleißrate. Auffällig ist, dass bei Reibwerten zwischen 0,15 und 0,2 sowohl sehr geringe, als auch sehr hohe Verschleißraten (Unterschied fast 2 Größenordnungen) für beide Ölmenge auftreten können. Das auffällige Verhalten wird in Abb. 54 mit gestrichelten Linien illustriert.

Abb. 55 zeigt die maximal auftretende Verschleißrate über der Verschleißrate zu Versuchsende. Diese Diagrammform eignet sich am besten um die unterschiedlichen Verschleißkategorien für das System M-K getrennt darzustellen, wie im Teildiagramm oben links illustriert ist.

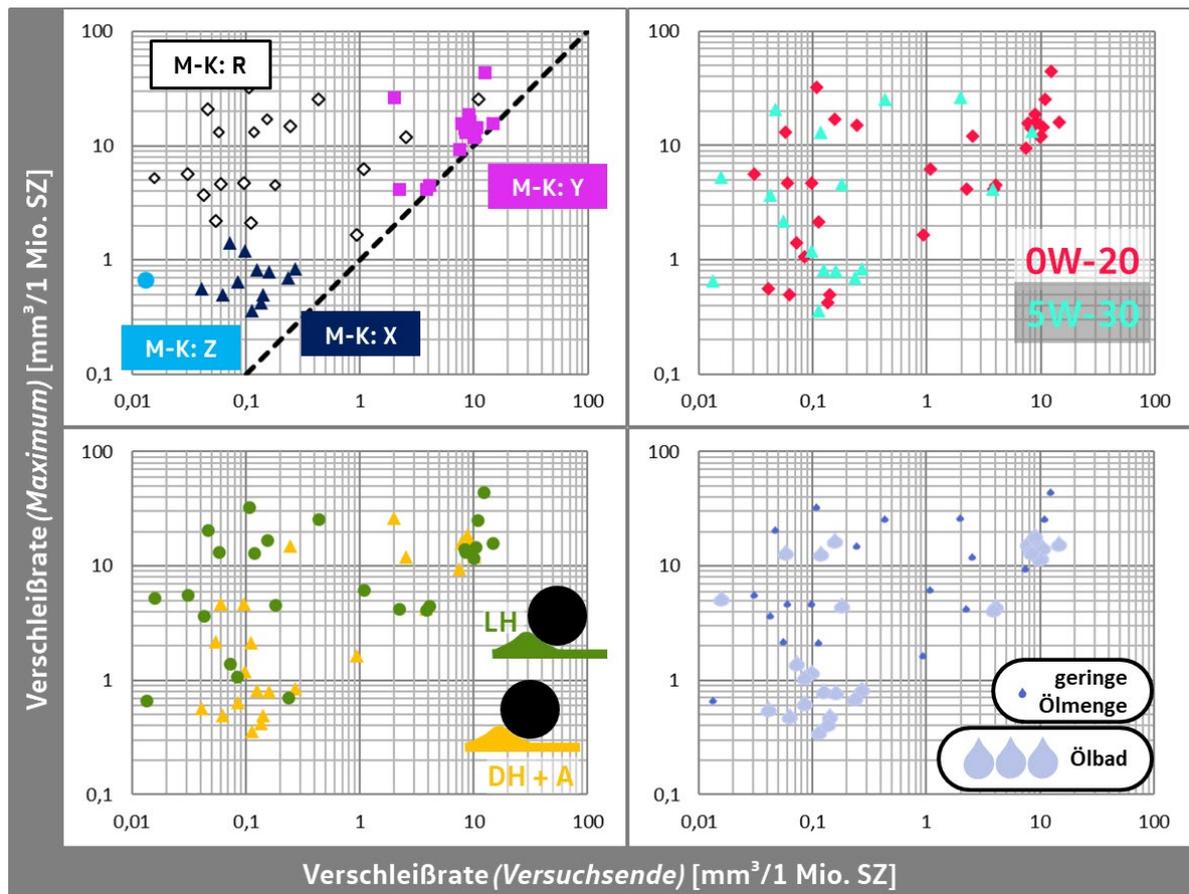


Abb. 55: Maximale Verschleißrate über finaler Verschleißrate; M-K

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Versuche der Gruppe M-K: X zeigen im Vergleich geringe Verschleißraten zu Versuchsende und geringe maximale Verschleißraten. Die Verschleißraten zu Versuchsende sind dabei noch etwas geringer als die maximale Verschleißrate, was über die Versuchszeit abnehmende Verschleißraten analog zur Kategorie M-M: X (Abb. 36, S. 63) nahelegt.

Für die Kategorie M-K: Y liegen hohe Verschleißraten zu Versuchsende vor, weshalb die maximale Verschleißrate mit der Verschleißrate zu Versuchsende übereinstimmt. (*Gleiche Achsenwerte sind durch die schwarz-gestrichelte Linie hervorgehoben.*)

Der Versuch der Kategorie M-K: Z weist eine sehr geringe Endverschleißrate bei geringer Ölmenge auf. Die weiteren Versuche mit un stetigen Verschleißraten (M-K: R) liegen im Bereich zwischen den beschriebenen Kategorien.

6.3.3 Sonderversuche - gesperrte Kugelrotation

Wie auch im System M-M, kann das kinematische Verhalten der Kugel zwischen reinem Gleiten und einem Wälzen (*Rollen mit Gleitanteil*) schwanken (Abschnitt 4.1). Um den Einfluss zu bewerten, werden die folgenden Tribosysteme mit gesperrter Kugelrotation getestet:

- 100Cr6-Kontur (DH + A) mit großer Ölmenge und SAE 0W-20 / 5W-30
- 42CrMoS4-Kontur (LH) mit großer Ölmenge und SAE 0W-20 / 5W-30

Die Ergebnisse sind in Abb. 56 zusammengefasst. Zur Orientierung sind auch die Ergebnisse für freie Kugelrotation im Hintergrund (grau-transparent) dargestellt. Nur die Versuche mit durchgehärteter 100Cr6-Kontur im 5W-30 Ölbad zeigen geringe Verschleißraten.

Alle anderen Varianten weisen über die gesamte Versuchszeit sehr hohe Verschleißraten auf. Die hohen Verschleißraten decken sich dabei mit den Phasen hohen Verschleißes (M-K: Y) der Referenzversuche mit freier Kugel im Hintergrund.

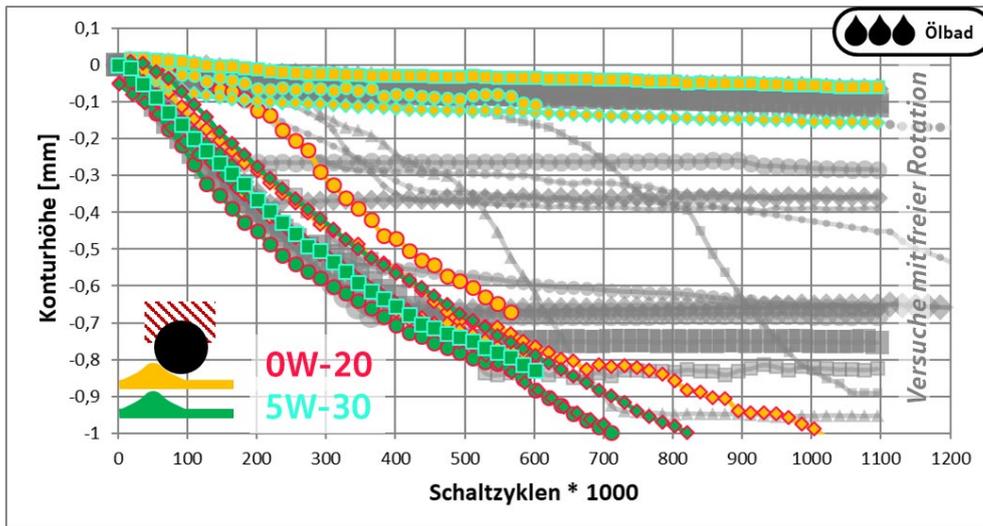


Abb. 56: Verschleißmessung; M-K; Gesperrte Kugelrotation

Ölsorte über Rahmenfarbe gekennzeichnet, Konturmateriale über Füllung gekennzeichnet

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Versuche mit gesperrter Kugel lassen sich damit eindeutig den Kategorien M-K: X und M-K: Y aus Abschnitt 6.3.2 zuordnen (Abb. 57). Dabei ist bemerkenswert, dass nur die Kombination aus höherer Ölviskosität und dem Konturmateriale 100Cr6 (DH + A) niedrige Verschleißraten erreicht. Eine Veränderung der optimalen Paarung durch eine verringerte Ölviskosität oder lasergehärtetes Konturmateriale führt jeweils zu den gleichen hohen Verschleißraten.

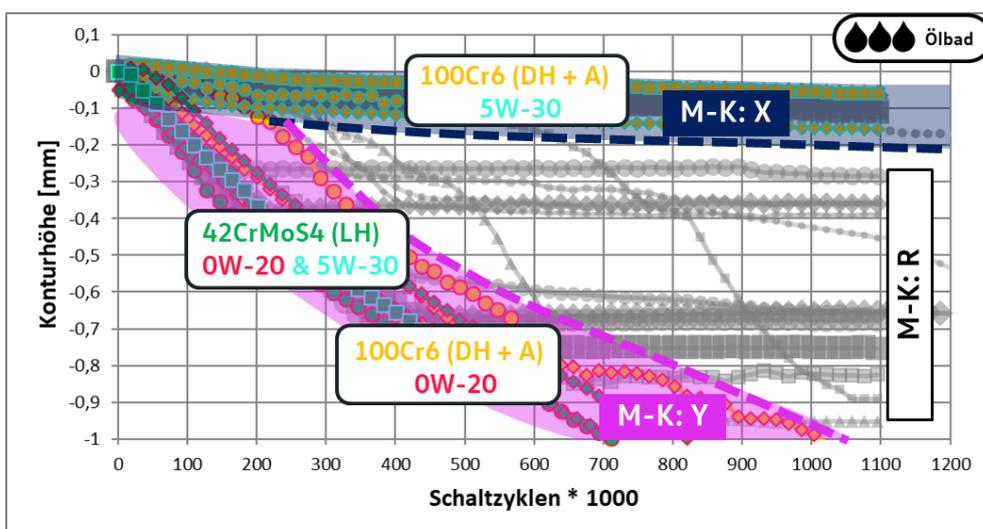


Abb. 57: Verschleißmessung; M-K; Gesperrte Kugelrotation; Große Ölmenge

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Zusammenhänge werden in Abb. 58 verdeutlicht. Hier sind im Vergleich zu Abb. 55 maximale Verschleißrate und Verschleißrate zu Versuchsende dargestellt. Die Versuche mit gesperrter Kugelrotation sind durch größere Symbole mit schwarzen Rahmen von den Versuchen mit freier Kugel abgegrenzt.

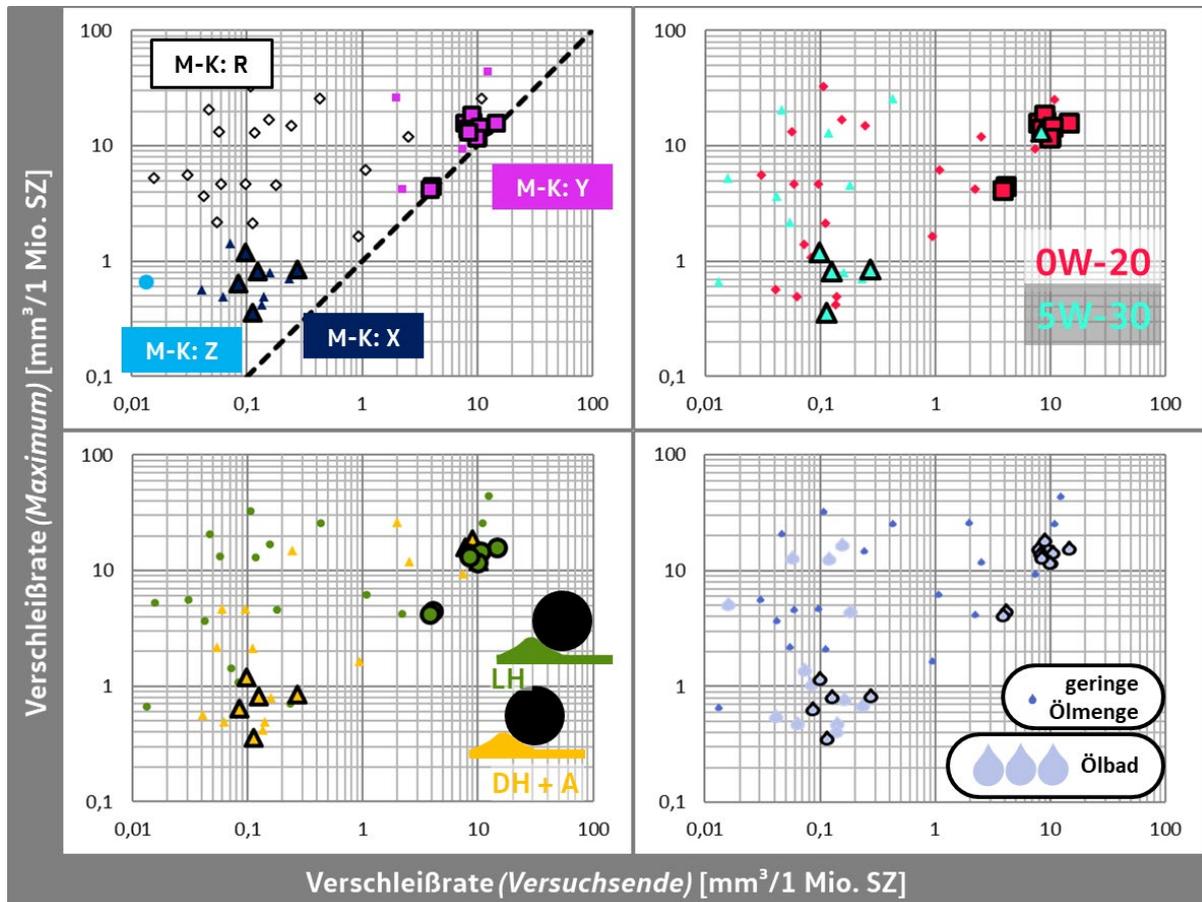


Abb. 58: Max. Verschleißrate über finaler Verschleißrate; *M-K*; Gesperrte Rotation
 gesperrte Rotation mit schwarzem Rahmen gekennzeichnet

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Das Diagramm oben links zeigt übersichtlich, dass Versuche mit gesperrter Kugelrotation in den Bereichen *M-K: Y* und *M-K: X* liegen und damit entweder über den gesamten Versuch sehr geringen oder sehr hohe Verschleißraten aufweisen. Die anderen Kategorien mit wechselnden Verschleißraten treten folglich nicht auf. Bei gesperrter Kugelrotation liegt somit immer ein definiertes, konstantes Verschleißverhalten vor.

6.3.4 Kugelverschleiß

Abb. 59 stellt den volumetrischen Kugelverschleiß gegenüber dem Konturverschleiß für das System *M-K* dar. Zur Vergleichbarkeit ist die Skalierung analog Abb. 47 (System *M-M*) gewählt. Der gravimetrische Verschleiß (*nicht dargestellt*) der Si_3N_4 -Kugeln ist dichtebedingt im Vergleich zu den Metallkugeln deutlich geringer.

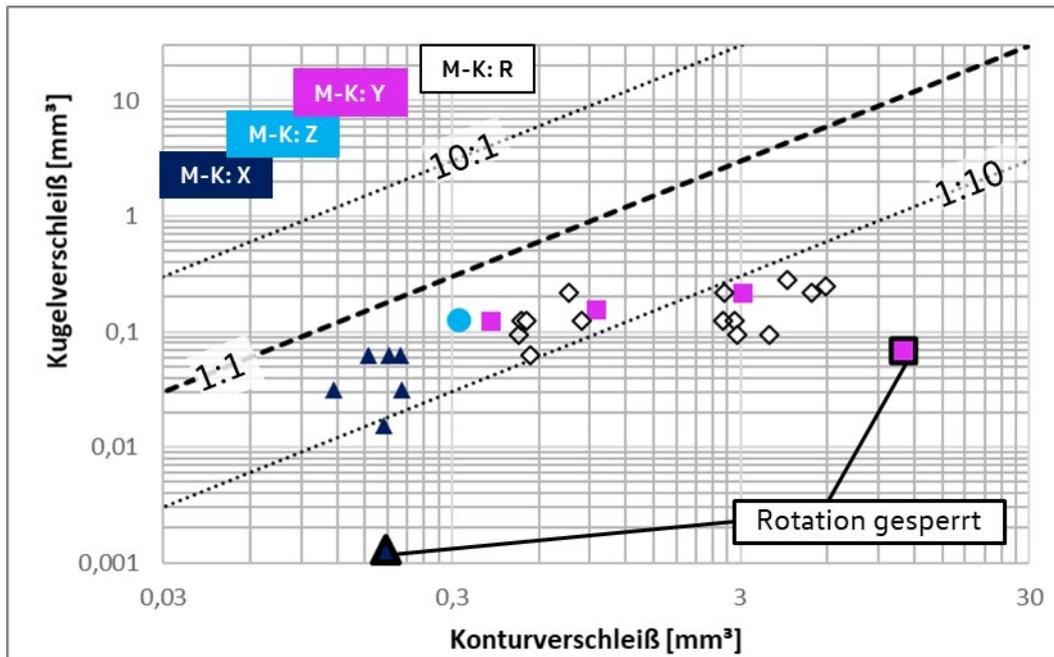


Abb. 59: Kugelverschleiß über Konturverschleiß [mm³]; M-K; Kategorien

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Ergebnisse zeigen eine Korrelation zwischen Kugel- und Konturverschleiß, wobei der Kugelverschleiß im Mittel etwa eine Größenordnung geringer als der Konturverschleiß ist. Bei Versuchen mit geringem Konturverschleiß (Kategorie M-K: X) liegt der Verschleiß im Bereich der Auflösungsgrenze ($\sim 0,001 \text{ mm}^3$).

Versuche mit gesperrter Rotation (große Symbole mit schwarzen Rahmen) zeigen eher geringen Kugelverschleiß. Bei Aufschlüsselung hinsichtlich der Ölmenge (Abb. 60) zeigt sich deutlich, dass eine geringe Ölmenge bei gleichem Konturverschleiß zu erhöhtem Verschleiß an der Keramikugel führt.

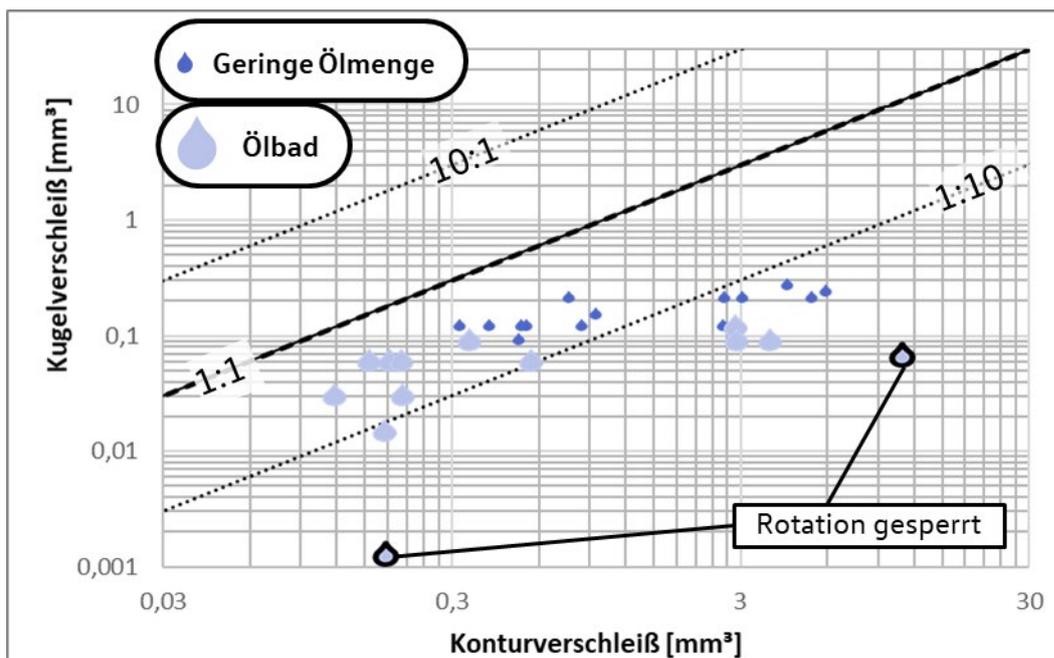


Abb. 60: Kugelverschleiß über Konturverschleiß [mm³]; M-K; Ölmenge

6.4 Kurzzusammenfassung: Tribologische Prüfung

Abb. 61 stellt die Kernergebnisse aus den Abschnitten 6.2 und 6.3 zusammen:

Metall-Metall-Kontakt

Für das Tribosystem Metall-Metall (M-M) ergibt sich eine Korrelation zwischen Reibwert und Verschleißrate. Hohe Verschleißraten korrespondieren mit hohen Reibwerten. Dabei werden Reibwerte im Bereich von 0,1 bis 1 und Verschleißraten zwischen 0,1 und 100 $[mm^3/1 Mio. SZ]$ erreicht. Aufgrund der großen Unterschiede der Zustände zu Versuchsende wurde eine Unterteilung der Versuche in 6 Kategorien vorgenommen.

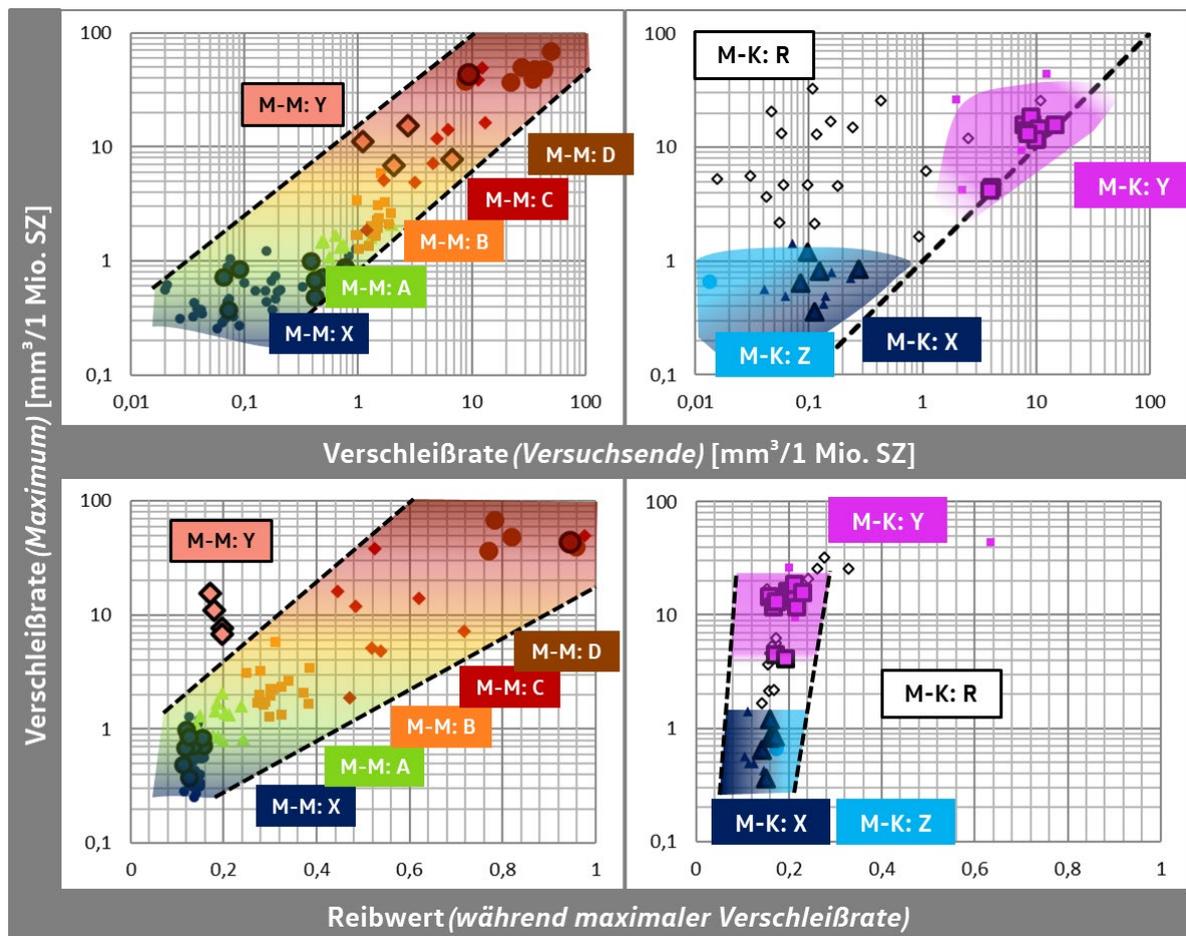


Abb. 61: Zusammenfassung Tribologisches Verhalten; M-M & M-K

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuoordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Es wurde auch gezeigt, dass für das System M-M geringe Reibwerte und Verschleißraten mit einer guten Beölungssituation korrelieren. Bei einer optimalen Beölung tritt ein degressiver Verschleißverlauf auf. Eine geringe Initialbeölung führt hingegen zu progressivem Verschleißverhalten. Die verschiedenen Konturmaterialeien $\{100Cr6 (DH + A), 42CrMoS4 (LH), 51CrV4, (LH)\}$ und Ölsorten (0W-20, 5W-30) zeigen allgemein einen geringen Einfluss auf Reibung und Verschleiß.

Nur bei gesperrter Rotation kann die Kombination aus *42CrMoS4 (LH)-Kontur* und Beölung mit 0W-20 zu deutlich höherem Verschleiß im Vergleich zu allen Vergleichsgruppen führen (M-M: Y). Dieser Punkt wird in Abschnitt 7.3 ausführlich diskutiert. Konturverschleiß und Kugelverschleiß liegen mit Ausnahme der zuletzt erwähnten Kategorie (M-M: Y) in der gleichen Größenordnung.

Metall-Keramik-Kontakt

Im Tribosystem Metall-Keramik (M-K) treten häufig Phasen mit extrem hohen Verschleißraten an der Rastkontur auf, die nicht mit der initialen Ölmenge oder der Versuchszeit korrelieren.

Der Verschleiß an der Si_3N_4 -Kugel ist allgemein deutlich geringer als der Konturverschleiß und liegt für viele Versuche an der Auflösungsgrenze der gravimetrischen Verschleißbestimmung.

Versuche mit gesperrter Kugelrotation führen bei optimaler Beölung im Ölbad entweder zu sehr hohen oder sehr geringen Verschleißraten. Dabei haben die Ölsorte und das Konturmaterial den entscheidenden Einfluss. Auch dieser Punkt wird in Abschnitt 7.3 genauer betrachtet.

6.5 Ergänzende Versuche

Die Auswertung der bisher betrachteten Versuche zeigt an einigen Stellen unerwartete Effekte, weswegen weitere Versuche zum Verständnis der Mechanismen durchgeführt wurden. Die Versuche sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

6.5.1 Variation des Härteverfahrens

Die in den Abschnitten 6.2 und 6.3 dargestellten Ergebnisse zeigen für manche Tribosysteme einen großen Einfluss des Konturmaterials. Für die bisher diskutierten Versuche wurde beim Konturmaterial aufgrund der technischen Anwendbarkeit sowohl das Material (*100Cr6*, *42CrMoS4*, *51CrV4*), als auch das Härteverfahren variiert (*durchgehärtet und angelassen bzw. lasergehärtet*).

Da die Verschleißergebnisse in Abhängigkeit des Konturmaterials teilweise stark schwanken (Abschnitte 6.2.5 und 6.3.3), sollen Material und Härteverfahren in diesem Abschnitt getrennt betrachtet werden. Dazu wurden einige Konturen aus dem Material *42CrMoS4* in den Varianten lasergehärtet und angelassen (LH + A) sowie durchgehärtet und angelassen (DH + A) mittels gesonderter Wärmebehandlung erzeugt.

Die Sonderversuchsteile werden als Stichprobe unter Versuchsbedingungen getestet, bei denen es zu großen Verschleißunterschieden zwischen durchgehärtetem und lasergehärtetem Konturmaterial gekommen ist. Die Versuche sind in Tabelle 6 dargestellt. Das unterschiedliche Verschleißverhalten der Referenzversuche ist durch Einteilung in die Verschleißkategorien (siehe Anhang A3) angegeben.

Tabelle 6: Sonderversuche; Variation des Härteverfahrens; ergänzende Versuche
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Konturmaterial		42CrMoS4			100Cr6	42CrMoS4		100Cr6
Härtung / Gefüge		LH	LH + A	DH + A	DH + A	LH	DH + A	DH + A
 Ölbad		SAE 0W-20				SAE 5W-30		
Si_3N_4 -Kugel <i>Rotation gesperrt</i>	Kategorie	M-K: Y	?	?	M-K: Y	M-K: Y	?	M-K: X
	100Cr6-Kugel <i>Rotation gesperrt</i>	M-M: Y	?	?	M-M: X	M-M: X	?	M-M: X

Ziel der Sonderversuche ist eine Einteilung der bisher nicht getesteten variierten Konturmaterialien in die Kategorien (*offene Punkte sind in Tabelle 6 durch Fragezeichen stilisiert*). Für die Versuche wurde eine Ölbadschmierung mit gesperrter Kugelrotation festgelegt. Unter diesen Randbedingungen traten in den bisherigen Versuchen eindeutig reproduzierbare Ergebnisse auf.

Die Ergebnisse der Zusatzversuche sind zusammen mit den Referenzversuchen in Tabelle 7 dargestellt. Zur Unterscheidung der Verschleißkategorien wurde die Verschleißrate für die ersten 300.000 Schaltzyklen (SZ) in mm^3 je 1 Mio. SZ bestimmt. Hintergrund ist, dass die markanten Unterschiede im Verschleißverhalten der Referenzversuche insbesondere zu Versuchsbeginn auftreten. In Abhängigkeit der Material- und Schmierstoffkombination ist das initiale Verhalten bei gesperrter Rotation entweder durch sehr hohe oder geringe Verschleißraten gekennzeichnet. (siehe Abschnitt 6.3.3)

Wenn mehr als ein Versuch durchgeführt wurde, ist die Standardabweichung angegeben. Die Abweichung ist bei allen Versuchen deutlich geringer als die vorliegenden Verschleißraten.

Tabelle 7: Ergebnisse; ergänzende Versuche; Variation des Härteverfahrens
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Härtung / Gefüge		LH	LH + A	DH + A	DH + A	LH	DH + A	DH + A							
 Ölbad		SAE 0W-20				SAE 5W-30									
Konturmaterial		42CrMoS4			100Cr6	42CrMoS4		100Cr6							
Si_3N_4 -Kugel <i>Rotation gesperrt</i>	Kategorie	M-K: Y	-	M-K: Y	M-K: Y	M-K: Y	M-K: X	M-K: X							
	Ø Verschleißrate <i>initial [mm³/1 Mio. SZ]</i>	5,73	-	8,29	6,18	8,02	0,45	0,31							
	Anzahl	Standardabw.	6	0,353	-	-	1	-	4	0,218	1	-	1	-	3
100Cr6-Kugel <i>Rotation gesperrt</i>	Kategorie	M-M: Y	M-M: X	M-M: X	M-M: X	M-M: X	M-M: X	M-M: X							
	Ø Verschleißrate <i>initial [mm³/1 Mio. SZ]</i>	6,35	0,33	0,15	0,30	0,15	0,43	0,23							
	Anzahl	Standardabw.	3	0,141	2	0,2	2	0,432	2	0,353	3	0,16	1	-	1

Bei den Versuchen mit gesperrter Si_3N_4 -Kugel ordnen sich die Sonderversuche mit *durchgehärteten und angelassenen 42CrMoS4-Konturen* eindeutig ein und weisen entweder sehr hohe oder sehr geringe Verschleißraten auf. Die Versuche zeigen, genau wie 100Cr6-Konturen mit gleicher Wärmebehandlung, geringe Verschleißraten bei Beölung mit 5W-30 und hohe Verschleißraten für 0W-20.

Auch bei Versuchen mit gesperrter 100Cr6-Kugel entspricht das Verhalten der *durchgehärteten und angelassenen 42CrMoS4-Konturen* dem der Variante 100Cr6 (DH) und unterscheidet sich deutlich von der lasergehärteten Variante, die bei Schmierung mit 0W-20 als einzige Variante sehr hohe Verschleißraten zeigt. Zwei Stichversuche mit lasergehärteten und angelassenen Konturen zeigen auch ein vergleichbares Verhalten zu den durchgehärteten Varianten.

Bemerkung: Die Angabe der Standardabweichung für sehr geringe Stichprobenumfänge ist nicht üblich. An dieser Stelle haben die Werte einen wichtigen Informationsgehalt, da die Abweichungen zwischen hohem und geringem Verschleiß eine Größenordnung betragen. Somit kann mit der Standardabweichung das Verhalten auch bei sehr kleinen Stichproben bewertet werden. Die Abweichungen sind im Vergleich zu den Verschleißunterschieden sehr gering.

6.5.2 Einfluss der Systemtemperatur

Für bestimmte Tribosysteme zeigte sich in den Abschnitten 6.2 und 6.3 ein großer Einfluss der Schmierstoffsorte. Neben vermutlich anderen Additivpaketen unterscheiden sich die genutzten Schmierstoffe 0W-20 und 5W-30 vor allem in ihrer Viskosität (Abschnitt 3.2.3).

Um zu bewerten, ob alleine die geänderte Viskosität einen Einfluss hat, wurde ein Versuch, bei dem es zu signifikanten Unterschieden im Verschleißverhalten in Abhängigkeit des gewählten Öls kam, bei deutlich verringerter Systemtemperatur durchgeführt.

Das dabei genutzte allgemein niedrigviskose 0W-20 weist bei der verringerten Betriebstemperatur (~45 °C) eine höhere Viskosität als das allgemein dickflüssigere 5W-30 auf. Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 8 zusammen mit den Referenzversuchen angegeben.

Tabelle 8: Ergebnisse; Sonderversuche; Variation der Systemtemperatur
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Konturmaterial		100Cr6					
Härtung / Gefüge		DH + A					
Ölbad		SAE 0W-20			SAE 5W-30		
Temperatur [°C]		90°C		~45°C		90°C	
dynam. Viskosität [mPas]		8,0		33,4		11,9	
Si ₃ N ₄ -Kugel Rotation gesperrt	Kategorie	M-K: Y		M-K: X		M-K: X	
	Ø Verschleißrate initial [mm ³ /1 Mio. SZ]	6,18		0,22		0,31	
	Anzahl	Standardabw.	4	0,22	1	-	3

Bei der Standardtemperatur von 90 °C kommt es in den Referenzversuchen zu extremen Verschleißunterschieden an den durchgehärteten 100Cr6-Konturen bei einer gesperrten Si₃N₄-Kugel als Gegenkörper. Eine Badschmierung mit 5W-30 führt zu sehr geringen Verschleißraten. Bei Wechsel auf das 0W-20 Öl führen ansonsten gleiche Versuchsbedingungen zu etwa 20-fach erhöhten Verschleißraten.

Der Stichversuch mit verringerter Versuchstemperatur und 0W-20 führt hingegen ebenfalls zu sehr geringen Verschleißraten. Die Viskosität von 0W-20 bei verringerter Temperatur liegt deutlich über der Viskosität beider Öle bei 90 °C

6.5.3 Härteverläufe innerhalb der Kontur

In Abschnitt 3.2.1 wurde bereits gezeigt, dass die lasergehärteten Konturen eine auffällige Zeiligkeit aufweisen. Beim Laserhärten steht prozessbedingt nur sehr wenig Zeit zum Ausgleich von Materialinhomogenität zur Verfügung. Für die durchgehärteten und angelassenen Konturen aus dem gleichen Material (42CrMoS4 DH + A, Abschnitt 6.5.1) kann daher mit einer geringeren Zeiligkeit gerechnet werden.

Zur Bewertung der Zeiligkeit wurden Mikrohärtemessungen (HV 0,1) in den Zeilen und den angrenzenden Bereichen durchgeführt. Um die Schwankungen innerhalb der Messungen zu berücksichtigen, sind mindestens 10 Messungen für eine Kontur angegeben. Die Ergebnisse sind in Abb. 62 dargestellt.

Für die lasergehärteten Konturen ergibt sich ein signifikanter Härteunterschied. Die hellen (*kohlenstoffreichen*) Phasen sind deutlich härter als das umgebende (*dunklere und damit kohlenstoffärmere*) Gefüge.

Aus der gleichen Charge wurden Bauteile nachträglich durchgehärtet und angelassen (DH + A) bzw. nur angelassen (LH + A). Die Konturen der Variante (DH + A) weisen weiterhin eine Zeiligkeit im Schliff auf (linkes Bild). Härteunterschiede zwischen den hellen und dunklen Phasen sind allerdings nicht mehr messbar. Für die Variante (LH + A) ist ein leichter Härteunterschied vorhanden.

Zusätzlich haben bei den angelassenen Varianten die mittlere Härte und auch die Standardabweichung im Vergleich zu den nur lasergehärteten Konturen deutlich abgenommen.

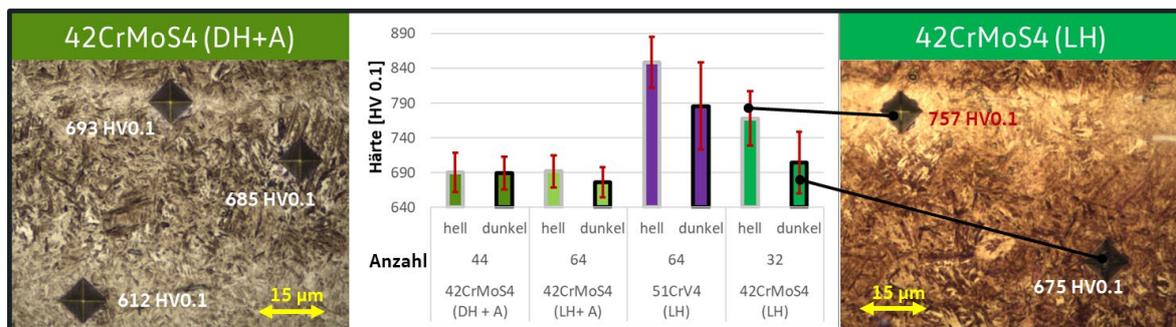


Abb. 62: Härteverläufe innerhalb der Konturen; Streubänder (Max. / Min.)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

7 Ergebnisse: Analysen nach Versuch

Im Rahmen der Untersuchungen wurden für alle 154 Versuche optische Analysen (mit Digitalmikroskop) an den Grund- und Gegenkörpern durchgeführt. Zusätzlich wurden an 17 Kugeln und 60 Konturen REM/EDX-Analysen vorgenommen. Die Reinigungsprozedur der Proben ist in Abschnitt 3.4 beschrieben.

Für EDX-Analysen wurde stets die gleiche Bildgröße (Bildbreite 0,4 mm) bei einer Beschleunigungsspannung von 10 kV gewählt. Auf den Konturen hat sich der Bereich der Konturmitte als repräsentativ erwiesen. Für die Kugel mussten die markanten Bereiche zuerst im Digitalmikroskop festgelegt werden.

Elementanalysen werden dabei über die gesamte Fläche gemittelt und für Reaktionsschichten bzw. Materialauftrag lokal als Punktmessung durchgeführt. Zur Bewertung der tribochemischen Reaktionen werden die Elemente typischer Verschleißschutzadditive (Abschnitt 2.1.11) sowie Sauerstoff als Maß für die Oxidation ausgewertet. Zusätzlich erfolgt für den Metall-Keramik-Kontakt eine Bewertung des Materialübertrags anhand der Elementanteile von Eisen und Silicium. Eine Auflistung aller EDX-Ergebnisse ist in Anhang D zu finden.

Unterteilung nach Verschleißkategorien

Um Zusammenhänge zwischen den Analyseergebnissen und dem Verschleißverhalten zu bewerten, ist das folgende Kapitel nach den bereits in Abschnitt 6.2.4 und 6.3.2 eingeführten Kategorien, welche die Versuche anhand der Prüfstands-Daten einteilen, gegliedert. An dieser Stelle kann bereits die Erkenntnis aus der Diskussion (Kapitel 8) vorweggenommen werden, dass Grund- und Gegenkörper innerhalb einer Kategorie unabhängig von Ölsorte und Konturgefüge meist gleiche Verschleißerscheinungen zeigen. Die Versuche lassen sich anhand der typischen Verschleißerscheinungen bereits nach Analyse mittels Digitalmikroskop in die Verschleißkategorien einordnen. Referenzbilder für die Zuordnung sind in Abb. 63 gegeben.

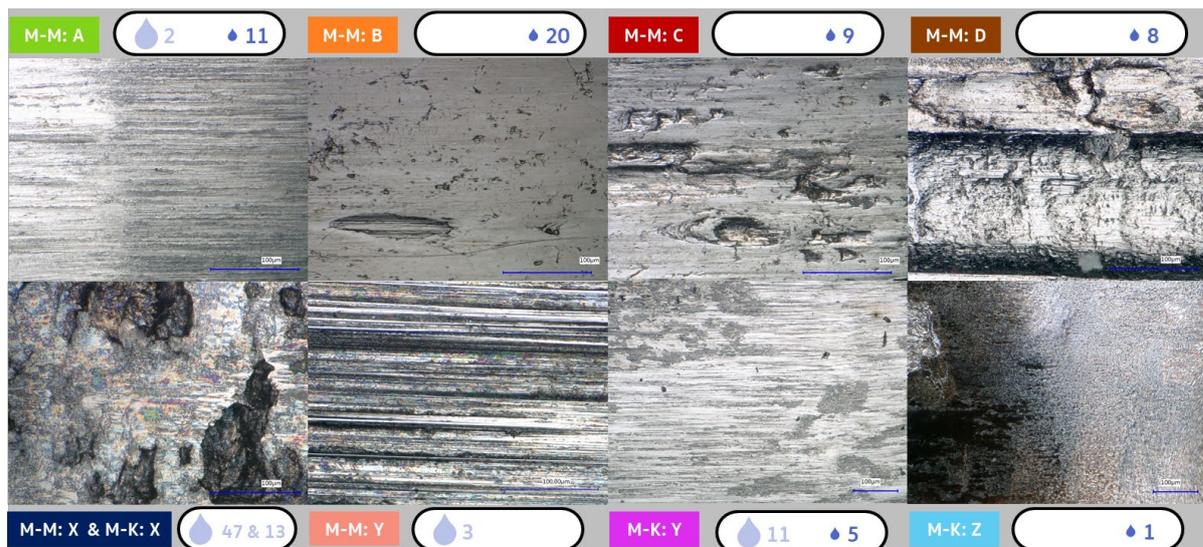


Abb. 63: Digitalmikroskop-Aufnahmen (Kontur); Verschleißkategorien; Beispielbilder Ölmengen schematisch dargestellt + Anzahl der Versuche in der Kategorie angegeben
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Bilder in Abb. 63 sind so ausgerichtet, dass sich die Kugel horizontal bewegt hat. Diese Ausrichtung ist bei fast allen Konturaufnahmen (*Digitalmikroskop und REM*) beibehalten. Bei Ausnahmen ist die Bewegungsrichtung durch Pfeile gekennzeichnet.

Zur Einführung in die Verschleißerscheinungen werden im folgenden Abschnitt zunächst einzelne, für die Kategorien repräsentative REM-Bilder gezeigt, welche die typischen Verschleißerscheinungen innerhalb dieser Kategorie gut beschreiben. Zusätzlich geben Tabellen mit EDX-Daten einen Überblick über die tribochemischen Veränderungen auf den Oberflächen. Dabei wird für alle Kategorien die gleiche Elementauswahl genutzt. Unterschiede im Konturmaterial oder der Ölsorte werden bei der Beschreibung der Kategorien im Folgenden nicht detailliert betrachtet.

7.1 Analysen: Metall-Metall-Kontakt

7.1.1 Kategorie: M-M: X

Abb. 64 zeigt REM-Aufnahmen von Rastkonturen der Verschleißkategorie M-M: X. Diese Kategorie umfasst die Versuche des Systems M-M mit den geringsten Reibwerten und Verschleißraten und kommt ausschließlich bei Versuchen mit Schmierung im Ölbad vor. Auch Versuche mit gesperrter Kugelrotation können in diese Kategorie fallen (siehe Abschnitt 6.2).

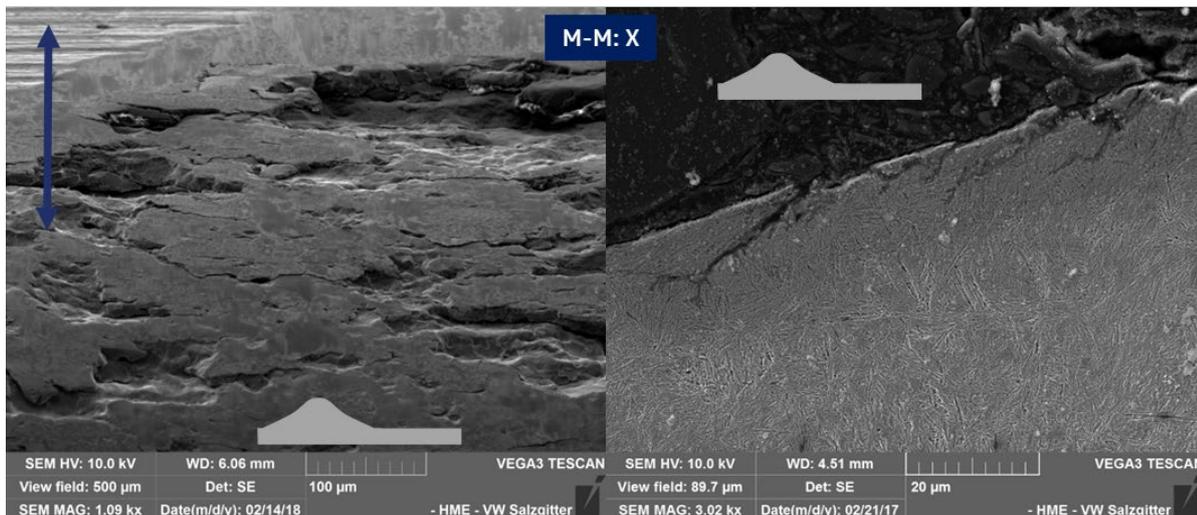


Abb. 64: REM-Aufnahmen (SE); M-M: X; Konturoberfläche und Schliff

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Die REM-Aufnahme links zeigt eine Übersicht des Verschleißbereichs. Durch eine geneigte Betrachtung kommen die Strukturen auf der Kontur gut zur Geltung. In der Ecke oben links ist die ursprüngliche Oberfläche der Kontur mit Drehriefen zu erkennen. Im Kontaktbereich mit dem Gegenkörper (100Cr6-Kugel) ist die Oberfläche glatter und mit großen Ausbrüchen und Rissen übersät. Die Ausbrüche besitzen eine Ausdehnung von bis zu 100 µm in der Fläche und bis zu 50 µm in der Tiefe. Auf den glatten Verschleißoberflächen zwischen den Ausbrüchen liegen inselartig Flecken mit dunklerer Färbung vor.

Das rechte Bild in Abb. 64 zeigt einen mit Nital geätzten Schliff einer vergleichbaren Kontur im Kontaktbereich. Die Kugel hat sich in der betrachteten Ebene von links nach rechts aufwärts

auf der Konturoberfläche bewegt (*entspricht maximaler Kontaktlast - Überwinden der Rastkraft*). Neben den gut sichtbaren Martensitnadeln fallen vor allem Risse auf, welche in einem Winkel von ca. 20° bis 30° abwärts bis in eine Tiefe von ca. $10\ \mu\text{m}$ wachsen.

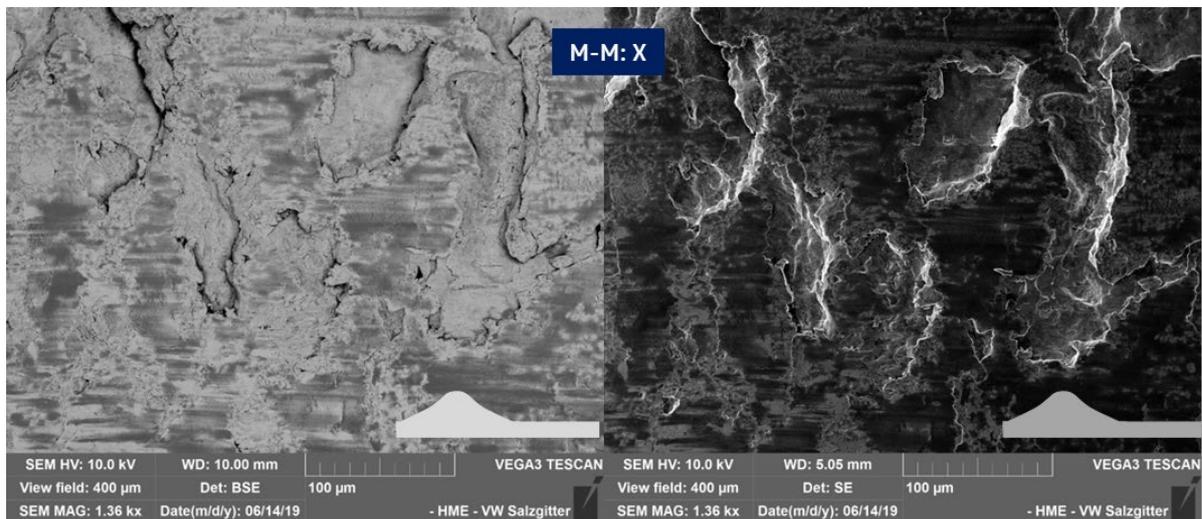


Abb. 65: REM-Aufnahmen (BSE & SE); *M-M: X*; Konturoberfläche

Abb. 65 zeigt einen Vergleich von BSE- und SE-Aufnahme einer Kontur der Kategorie *M-M: X*. Im Vergleich können die bereits in Abb. 64 auffälligen dunkleren Inseln auf der Verschleißoberfläche als Material mit geringerer Dichte identifiziert werden.

Aufgrund der stochastischen Kugelbewegung treten die Verschleißerscheinungen an den Kugeln nicht auf der gesamten Kugeloberfläche im gleichen Maße auf. Wie auch bei den Konturen können aber Bereiche mit inselartigen, im BSE-Bild dunkel erscheinenden Flecken und teilweise Ausbrüche gefunden werden. Bei gesperrter Kugelrotation ist der Kontaktbereich der Kugel definiert. In diesem Fall entsprechen die Verschleißerscheinungen genau denen auf der Kontur und es treten Ausbrüche in gleichem Ausmaß und gleicher Größenordnung auf.

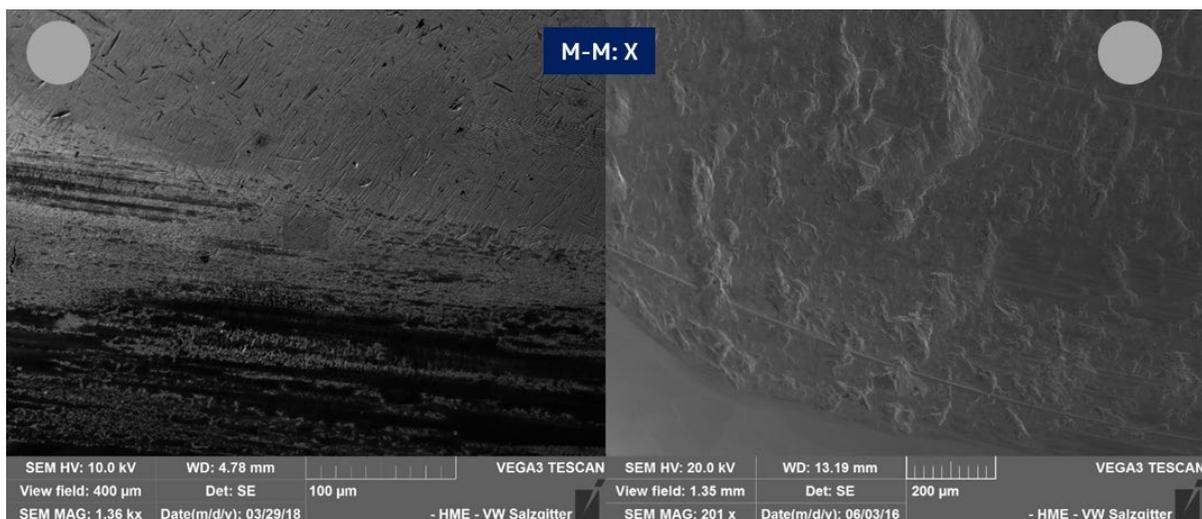


Abb. 66: REM-Aufnahmen (SE); *M-M: X*; Kugeloberfläche

In Abb. 66 ist jeweils eine REM-Aufnahme der Kugeloberfläche für einen Bereich mit farblicher Veränderung (links) und Ausbrüchen auf der Oberfläche (rechts) dargestellt. Die farblichen Veränderungen ähneln den dunkleren Inseln auf der Konturoberfläche.

Tabelle 9 zeigt EDX-Ergebnisse von Oberflächen der Kategorie M-M: X. Insgesamt wurden 6 Konturen und 2 Kugeln dieser Gruppe mittels EDX untersucht. Dabei wurde zum einen jeweils der Mittelwert über das gesamte Bild gebildet (*Gesamtfläche*). Außerdem wurden Punktspektren im Bereich der dunklen Flecken (siehe Abb. 65) aufgenommen (*Schicht*).

Tabelle 9: EDX-Ergebnisse; M-M: X; ausgewählte Elemente
Mittlung verschiedener Konturmaterien und Ölsorten

		M-M: X		Elementanteil [m%]				
		O	Si	Ca	S	Zn	P	Anzahl
Kontur	Gesamtfläche	8,29	0,21	1,27	1,73	7,44	3,25	6
	Schicht	25,83	0,11	4,58	4,51	19,94	12,14	
Kugel	Gesamtfläche	7,00	0,20	1,05	1,35	6,25	2,50	2
	Schicht	15,80	0,15	2,15	1,80	13,15	6,15	

Für Kontur und Kugel zeigen sich jeweils ähnliche Ergebnisse. Auf den Oberflächen konnten hohe Anteile von Sauerstoff und Zink festgestellt werden. Im Bereich der Schichten werden hier etwa 15 bis 30 m% erreicht. Zusätzlich liegen Phosphor im Bereich von 5 bis 10 m% sowie Calcium und Schwefel mit jeweils etwa 5 m% vor. Der Siliciumanteil ist gegenüber dem Legierungswert (0,25 m%) nicht erhöht. Allgemein zeigen die Kugeln im Vergleich zur Kontur etwas geringere Konzentrationen der betrachteten Elemente.

Vergleichbare Schichten sind in der Literatur (siehe Abschnitt 2.1.11) ausführlich als reibarme und verschleißmindernde Ölreaktionsschichten beschrieben und seit Jahrzehnten Stand der Technik. Zur besseren Lesbarkeit der Arbeit werden diese Schichten bereits im Folgenden als Reaktionsschichten der Öladditive behandelt. Eine ausführliche Diskussion erfolgt im Interpretationsteil (Abschnitt 8.1.5).

7.1.2 Kategorie: M-M: A

Die Verschleißkategorie M-M: A beschreibt nach der Einteilung in Abschnitt 6.2.4 die nächst höhere Stufe im Verschleißverhalten. In diese Gruppe fällt ein kleiner Teil der Versuche mit initialer Ölbadsschmierung und Versuche mit geringer Ölmengenschmierung. Die Versuche sind durch makroskopisch glatte und metallisch-glänzende Kontaktflächen gekennzeichnet.

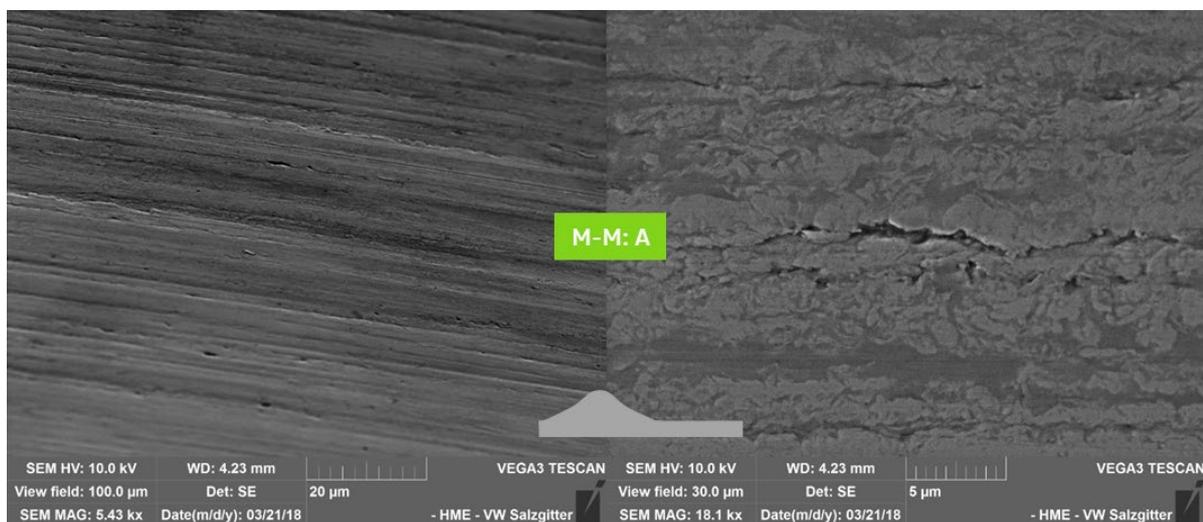


Abb. 67: REM-Aufnahmen (SE); M-M: A; Konturoberfläche

Abb. 67 zeigt eine metallisch glänzende Oberfläche im REM. Die Oberfläche weist Riefen in Bewegungsrichtung mit einem Abstand von ca. 10 μm auf, die durch eine gekippte Betrachtung gut zur Geltung kommen (linkes Bild). Bei weiterer Vergrößerung zeigt der Riefengrund Spuren von Materialumformung (rechtes Bild).

Tabelle 10: EDX-Ergebnisse; *M-M: A*; ausgewählte Elemente
Mittelung verschiedener Konturmateriale und Ölsorten

		M-M: A						Elementanteil [m%]	
		O	Si	Ca	S	Zn	P	Anzahl	
Kontur	Gesamtfläche	3,77	0,23	0,17	0,63	0,47	0,13	3	
	Schicht	10,90	0,17	0,17	0,97	0,77	0,30		
Kugel	Gesamtfläche	6,10	0,15	0,10	0,30	0,25	0,10	1	
	Schicht	18,85	0,20	0,40	0,55	0,50	0,20		

Tabelle 10 fasst die EDX-Ergebnisse der Kategorie *M-M: A* zusammen. Auf den Oberflächen von Kontur und Kugel lässt sich Sauerstoff bis etwa 20 m% nachweisen. Auf der Konturoberfläche zeigt sich bis zu 1 m% Schwefel. Die restlichen Elemente der Auswahl sind kaum nachweisbar.

7.1.3 Kategorie: M-M: B

Versuche der Kategorie *M-M: B* zeigen zu Versuchsende einen Reibwert zwischen 0,265 und 0,4. Diese Werte werden im Versuchsverlauf nur durch Versuche mit geringer Ölmengenschmierung erreicht. Bei Reibwerten über 0,3 liegt der Schmierstoff zum Ende des Versuchs nicht mehr als Flüssigkeit vor. Durch den Eintrag von Metallabrieb bildet sich eine Art Verschleißpaste (siehe Abschnitt 7.1.7). Abb. 68 zeigt REM-Aufnahmen von Kontur (links) und Kugel (rechts) einzelner Versuche der Kategorie *M-M: B*.

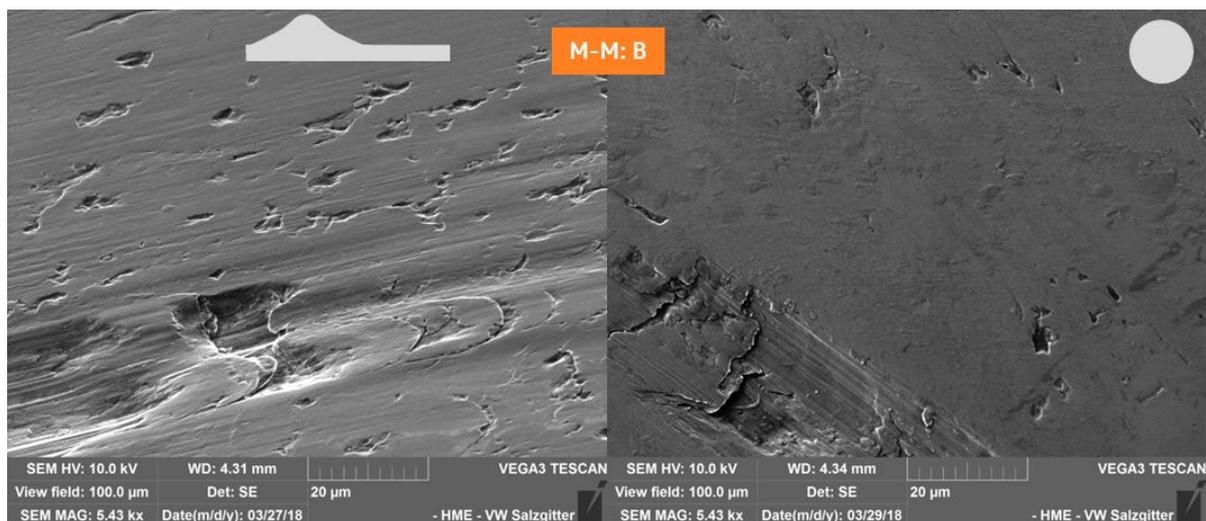


Abb. 68: REM-Aufnahmen (SE); *M-M: B*; Kontur- und Kugeloberfläche

Kugel und Kontur zeigen ähnliche Verschleißerscheinungen: Die Oberflächen sind eher glatt und weisen im Vergleich zur Gruppe *M-M: A* kaum Riefen auf. Die Bewegungsrichtung ist durch verzerrte Ausbrüche und sehr flache Kerben sichtbar. Die Ausbrüche sind mit einer Ausdehnung von wenigen μm bis 30 μm deutlich kleiner als die Ausbrüche der Kategorie *M-M: X*.

Häufig zeigen sich sichelförmige Ausbrüche und Risse. Verfärbungen auf der Oberfläche sind kaum vorhanden.

Tabelle 11: EDX-Ergebnisse; *M-M: B*; ausgewählte Elemente
Mittelung verschiedener Konturmaterialeien und Ölsorten

		M-M: B						Anzahl
		Elementanteil [m%]						
Kontur	Gesamtfläche	2,99	0,20	0,07	0,28	0,03	0,03	4
	Schicht	5,88	0,14	0,12	0,28	0,00	0,08	
Kugel	Gesamtfläche	3,50	0,20	0,05	0,35	0,15	0,05	2
	Schicht	10,80	0,25	0,25	0,35	0,25	0,20	

Die EDX-Daten in Tabelle 11 ähneln den Ergebnissen der Gruppe *M-M: A* (Tabelle 10): Auf den Oberflächen ist vor allem Sauerstoff zu finden (bis maximal 11 m%). Im Streuband zeigen einzelne Versuche noch leichte Spuren von Schwefel, ansonsten lassen sich keine Elemente der Referenzgruppe nachweisen.

7.1.4 Kategorie: M-M: C

Bei höheren Endreibwerten (*Kategorie M-M: C*) nehmen die Ausbrüche an Anzahl und Größe zu (Abb. 69). Zusätzlich fallen im REM dunkel erscheinende Verfärbungen auf der Oberfläche und kleine Strukturen auf.

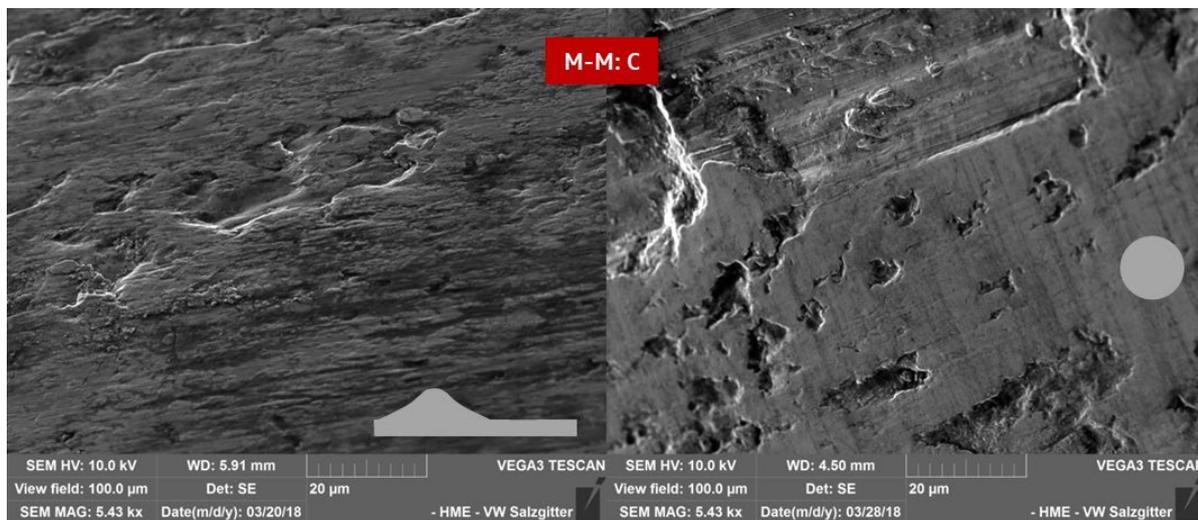
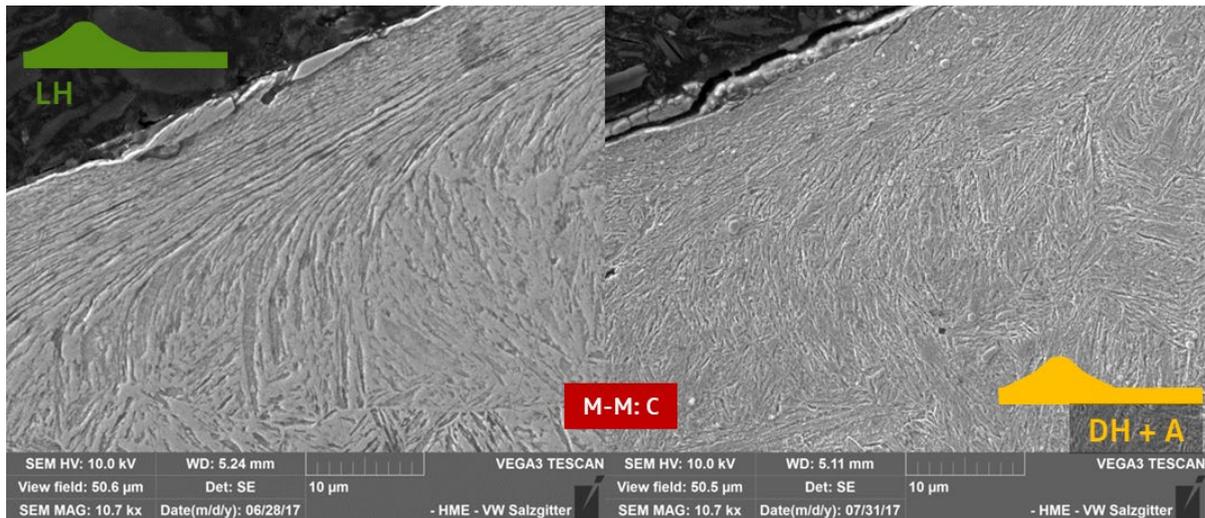


Abb. 69: REM-Aufnahmen (SE); *M-M: C*; Kontur- und Kugeloberfläche

Betrachtet man Konturen der gleichen Kategorie aus unterschiedlichen Materialien im Schliff, sind deutliche Veränderungen des Gefüges unterhalb der Oberfläche erkennbar. Während sich die Oberflächen für verschiedene Konturmaterialeien innerhalb einer Kategorie nicht unterscheiden lassen, können die verschiedenen Gefüge im Schliff identifiziert werden.

Abb. 70 zeigt eine lasergehärtete Kontur aus 42CrMoS4 (links) und eine durchgehärtete und angelassene Kontur aus 100Cr6 (rechts) im Vergleich.

Abb. 70: REM-Aufnahmen (SE); *M-M: C*; Kontur (Schliff)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Beide Schliffe zeigen etwa den gleichen Bereich der Kontur. Die Kugel hat sich von links nach rechts „aufwärts“ bewegt, was bedeutet, dass die Kugel von links nach rechts gegen die Feder Vorspannung gearbeitet hat. Die Schliffe wurden mit Nital geätzt und zeigen neben Unterschieden im martensitischen Grundgefüge (siehe Abschnitt 3.2.1) eine starke Gefügeumformung im Bereich bis etwa 20 µm unter der Oberfläche: Die Martensitnadeln werden in Richtung der maximalen Last verformt. Dies ist im gröberen Gefüge des 42CrMoS4 (LH) deutlich besser zu erkennen. Zudem kann eine Kornfeinung zur Oberfläche ausgemacht werden. Während die Körner im tieferen Bereich eine Länge von mindestens 5 µm aufweisen, ist das Gefüge im oberflächennahen Bereich (etwa 1 µm Tiefe) mit dieser Analyseverfahren nicht mehr auflösbar (siehe FIB-Schnitte, 7.3).

Tabelle 12: EDX-Ergebnisse; *M-M: C*; ausgewählte Elemente
Mittelung verschiedener Konturmateriale und Ölsorten

		M-M: C						Elementanteil [m%]	
		O	Si	Ca	S	Zn	P	Anzahl	
Kontur	Gesamtfläche	10,36	0,20	0,04	0,00	0,26	0,03	6	
	Schicht	22,72	0,23	0,12	0,06	0,43	0,06		
Kugel	Gesamtfläche	4,80	0,20	0,10	0,00	0,10	0,00	1	
	Schicht	15,70	0,20	0,10	0,00	0,30	0,00		

Die Elementanalyse für Kontur und Kugel (Tabelle 12) zeigt, ähnlich wie bei den Kategorien *M-M: A* und *M-M: B*, nur einen erhöhten Sauerstoffanteil auf den Oberflächen, welcher etwa im Bereich von 5 bis 20 m% liegt.

7.1.5 Kategorie: *M-M: D*

Bei maximalen Reibwerten und Verschleißraten zeigt die Oberfläche der Kategorie *M-M: D* zusätzlich zu den Verschleißerscheinungen der Gruppe *M-M: C* makroskopisch sichtbare Riefen (bis 100 µm Riefenbreite) und Spuren von plastischer Verformung (Abb. 71).

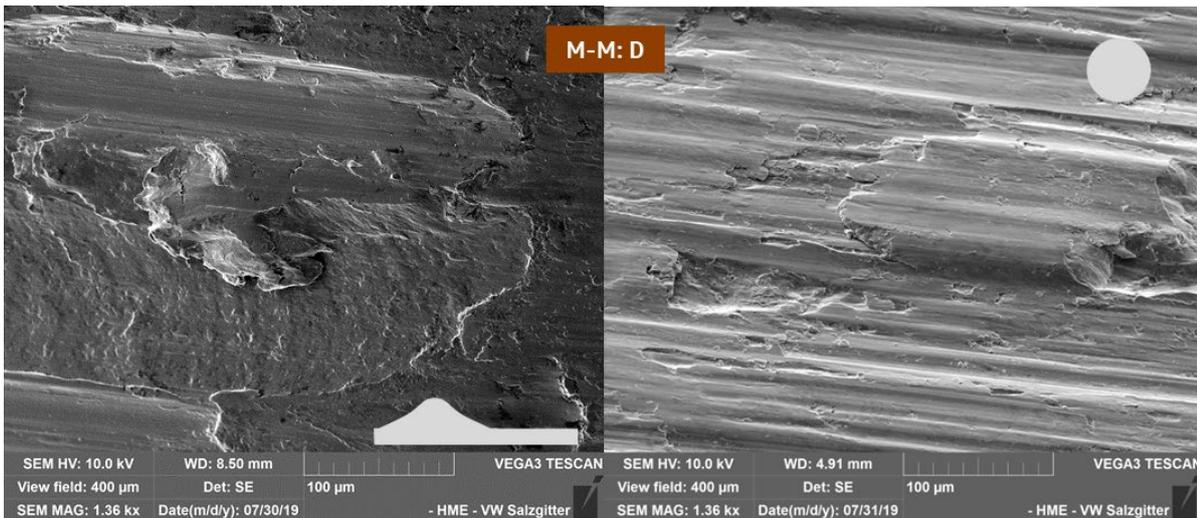


Abb. 71: REM-Aufnahmen (SE); *M-M: D*; Kontur- und Kugeloberfläche

Bei Betrachtung der EDX-Daten (Tabelle 13) fallen neben einem Sauerstoffanteil von etwa 10 bis 30 m% auf Kontur- und Kugeloberfläche leicht erhöhte Schwefel und Zinkanteile auf.

Tabelle 13: EDX-Ergebnisse; *M-M: D*; ausgewählte Elemente
Mittelung verschiedener Konturmaterialien und Ölsorten

		M-M: D						Anzahl
		Elementanteil [m%]						
		O	Si	Ca	S	Zn	P	
Kontur	Gesamtfläche	11,10	0,20	0,10	0,40	1,60	0,00	1
	Schicht	29,50	0,10	0,00	0,10	0,40	0,00	
Kugel	Gesamtfläche	8,10	0,20	0,00	0,00	0,30	0,10	1
	Schicht	28,10	0,20	0,10	0,10	0,60	0,30	

7.1.6 Kategorie: M-M: Y

Versuche der Kategorie M-M: Y stellen eine Besonderheit dar, da sie nur bei gesperrter Kugelrotation unter Ölbadschmierung und der Kombination von niedrigviskosem 0W-20 Motorenöl mit lasergehärteten Konturen auftreten (siehe Abschnitt 6.2.5).

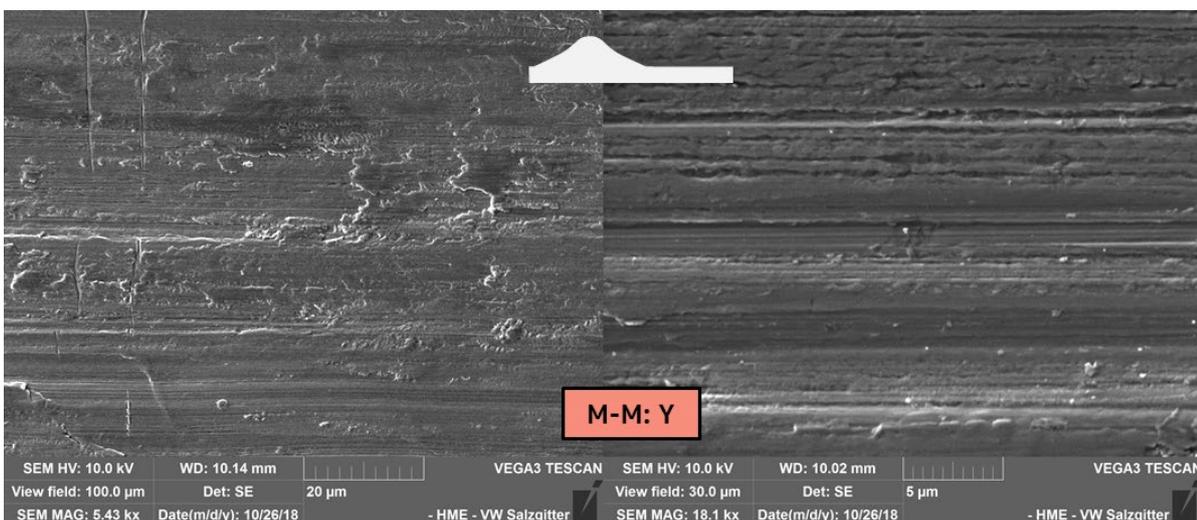


Abb. 72: REM-Aufnahmen (SE); *M-M: Y*; Konturoberfläche

Kugel und Kontur dieser Kategorie zeigen analog zu Versuchen der Kategorie M-M: A glatte Oberflächen mit mikroskopischen Riefen. Teilweise sind auch Spuren von adhäsivem Verschleiß durch verformte Oberflächenbereiche erkennbar, wie in Abb. 72 dargestellt wird.

Tabelle 14: EDX-Ergebnisse; M-M: Y; ausgewählte Elemente
Mittelung verschiedener Konturmateriale und Ölsorten

		M-M: Y						Elementanteil [m%]	
		O	Si	Ca	S	Zn	P	Anzahl	
Kontur	Gesamtfläche	3,60	0,20	0,10	0,20	0,30	0,10	1	
	Schicht	19,20	0,20	0,20	0,70	0,80	0,40		
Kontur	Gesamtfläche	2,29	0,20	0,08	0,14	0,27	0,04	1	
	Schicht	15,29	0,21	0,16	0,66	0,49	0,22		

Ähnlich wie bei Versuchen der Kategorie M-M: A ist der Sauerstoffanteil auf den Proben deutlich erhöht, während die anderen Elemente nur in geringem Maße nachweisbar sind (Tabelle 14).

7.1.7 Analyse der Verschleißpaste

Die bereits in Abschnitt 7.1.3 beschriebene Verschleißpaste wurde für einzelne Versuche der Kategorie M-M: B analysiert. Dazu wurde die Paste in Petrolether gelöst. Dieses Lösungsmittel ist gut geeignet, um Motorenöl zu lösen (*interne Quelle*). Die Lösung wurde anschließend durch einen Filter gepresst und in einem automatisierten REM in Größenklassen eingeteilt. Aufgrund der Filterweite von 7 µm können kleinere Partikel nicht aufgelöst werden.

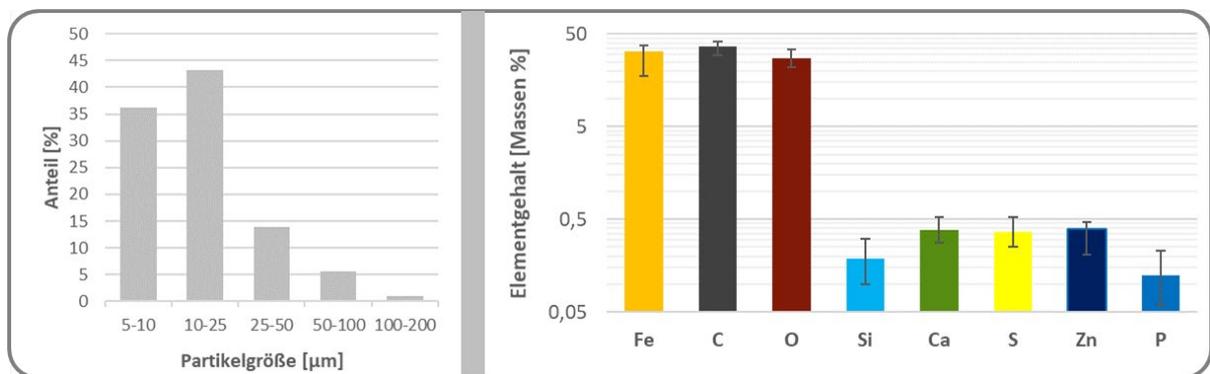


Abb. 73: Partikelanalyse der Verschleißpaste; M-M: B; Größen- und Elementverteilung
Streubänder (Max. / Min.) angegeben

Die Messergebnisse in Abb. 73 (links) zeigen, dass der Großteil der Partikel nach Filtration im Größenbereich von 5 bis 25 µm vorliegt. Da kleinere Partikel ausgeschlossen sind, könnte das Maximum der Verteilungskurve auch noch bei Partikeln kleiner 5 µm liegen.

Für 3 Versuche der Kategorie M-M: B wurde die Verschleißpaste direkt aus dem Versuch entnommen und mittels EDX untersucht. Die Daten in Abb. 73 (rechts) legen dar, dass sich die Paste massebezogen etwa zu jeweils einem Drittel aus den Elementen Eisen, Kohlenstoff und Sauerstoff zusammensetzt. Ansonsten sind die Elemente der Öladditive in geringen Mengen unter 1 m% nachweisbar.

Die Durchführung der Partikelanalysen erfolgte durch ein Labor der Volkswagen AG.

7.1.8 Zusammenfassung REM

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die markanten Verschleißerscheinungen der einzelnen Verschleißkategorien beschrieben. Dabei wurden jeweils passende Vergrößerungen gewählt. Zum Vergleich von verschiedenen Verschleißerscheinungen ist eine Betrachtung von Oberflächen unter gleichen Vergrößerungen notwendig.

Aus diesen Grund wurden die markanten Verschleißerscheinungen für die Konturen in der folgenden Abb. 74 zusammengefasst. Eine analoge Zusammenfassung der Kugelverschleißerscheinungen ist in Anhang E gegeben.

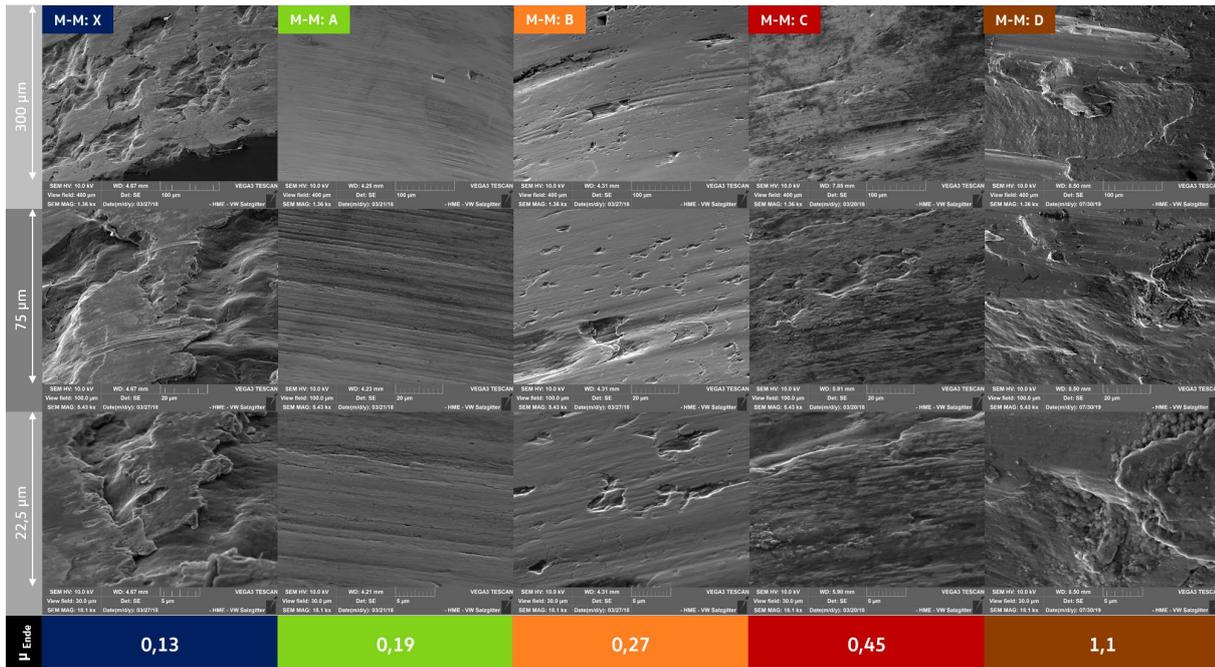


Abb. 74: Verschleißerscheinungen (Kontur); M-M; Zusammenfassung
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

In der Übersicht werden die unterschiedlichen Verschleißerscheinungen an den Konturen noch einmal sehr deutlich. Bei Ölbadsschmierung und geringen Reibwerten (M-M: X) dominieren die auffälligen Ausbrüche sowie dunkle inselartige Verfärbungen der Oberfläche.

Etwas höhere Reibwerte führen zu glatten Oberflächen mit Riefen (M-M: A). Eine weitere Zunahme von Reibung und Verschleißrate führt zu vielen kleinen Ausbrüchen aus der Oberfläche, die im Vergleich zu den Strukturen bei M-M: X deutlich geringere Abmessungen aufweisen und verzerrt erscheinen. Nehmen Reibung und Verschleißrate weiter zu, sind die Oberflächen durch Zerklüftungen mit dunklen Verfärbungen (M-M: C) sowie makroskopische Riefen und Spuren von starker plastischer Verformung (M-M: D) gekennzeichnet.

Bei den 100Cr6-Kugeln (siehe Anhang E) zeigt sich eine sehr ähnliche Entwicklung. Die Kategorien sind jedoch nicht so deutlich trennbar. Hinzu kommt, dass im Gegensatz zur Rastkontur nicht eindeutig definiert ist, welche Bereiche der Kugeln wann und wie lange im Kontakt waren.

7.1.9 Zusammenfassung EDX

Reaktionsschichten der Öladitive

In Abschnitt 7.1.1 wurde gezeigt, dass Versuche der Kategorie M-M: X auf den Oberflächen von Kontur und Kugel nach Versuch Schichten aufweisen. Mittels EDX-Analysen konnten im Bereich der Schichten erhöhte Elementgehalte von Sauerstoff sowie Zink, Schwefel, Phosphor und Calcium nachgewiesen werden. Aus der Literatur sind diese Elemente als Bestandteile von Verschleißschutzadditiven bekannt (Abschnitt 2.1.11).

Um die vorhandenen Schichten für die verschiedenen Kategorien zu vergleichen, ist in Abb. 75 der Zinkgehalt (*Punktspektrum im Bereich der Schicht*) gegenüber der Verschleißrate zu Versuchsende logarithmisch dargestellt.

In der Übersicht wird deutlich, dass ein erhöhter Zinkgehalt nur in der Kategorie M-M: X auftritt (Teildiagramm oben links). Zwischen den verschiedenen Ölsorten fällt kein Unterschied in den Ergebnissen auf (Teildiagramm unten links).

Kugel und Kontur zeigen ähnliche Ergebnisse, wobei der Zinkgehalt auf den Kugeloberflächen allgemein etwas geringer ist (Teildiagramm oben rechts).

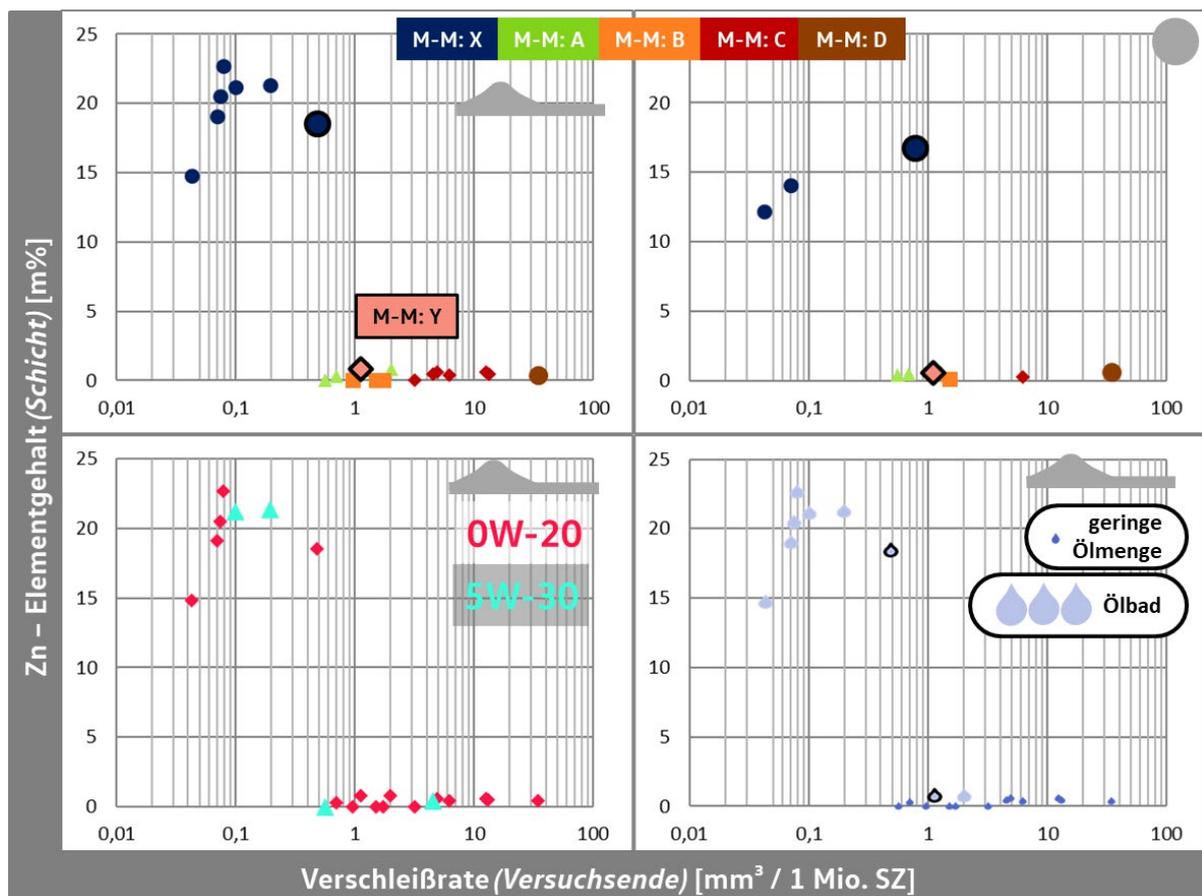


Abb. 75: EDX-Ergebnisse; M-M; Zink; Maximum

Kugel / Kontur durch Symbole; gesperrte Rotation durch schwarzen Rahmen gekennzeichnet

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Im Teildiagramm unten rechts fällt auf, dass die Verschleißschutzschichten nur bei großer Ölmenge **und** einer Verschleißrate kleiner $1 \text{ mm}^3 / 1 \text{ Mio. SZ}$ auftreten. Die Trennung liegt zwischen den Kategorien M-M: X und M-M: Y, welche jeweils Ölbad schmierung aufweisen. Für die Kategorie M-M: Y kann im Gegensatz zur Kategorie M-M: X kein erhöhter Elementanteil an Zink nachgewiesen werden.

Oxidation

Abb. 76 zeigt den Sauerstoffgehalt im Bereich der Schichten (*Punktspektrum, Maximum*) aufgetragen über den Reibwerten zu Versuchsende. Die Daten zeigen einen zunächst abfallenden Verlauf mit einem Tiefpunkt beim Reibwert von 0,25. Für die beiden Ölsorten kann kein unterschiedliches Verhalten festgestellt werden (Teildiagramm unten links).

Im fallenden Bereich des Verlaufes liegen die Kategorien M-M: X und M-M: A. Ab der Kategorie M-M: B steigt der Sauerstoffgehalt wieder an. Kontur und Kugel zeigen ein ähnliches Verhalten, wobei die Kugeln tendenziell geringere Elementanteile aufweisen.

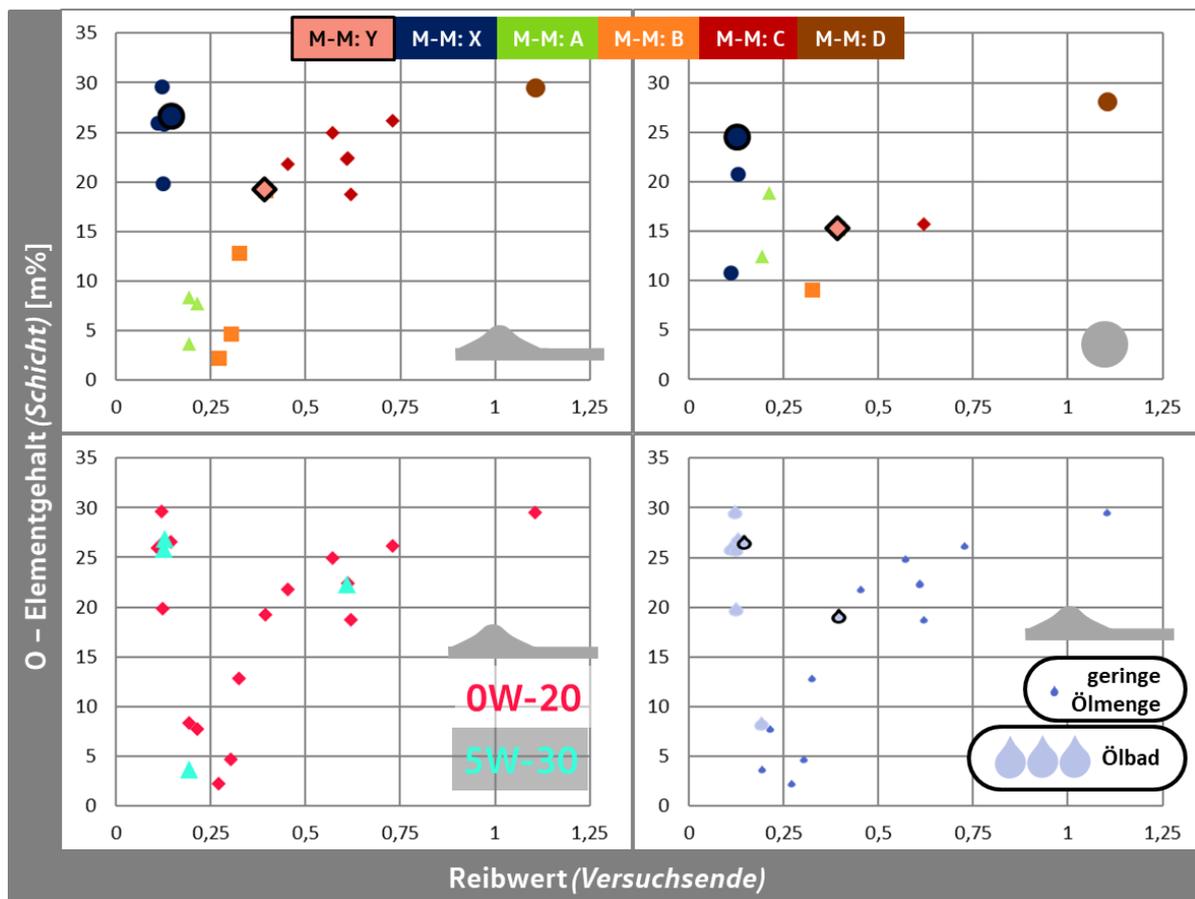


Abb. 76: EDX-Ergebnisse; M-M; Sauerstoff; Maximum

Kugel / Kontur durch Symbole; gesperrte Rotation durch schwarzen Rahmen gekennzeichnet

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

7.1.10 Entstehungsgeschwindigkeit von Ölreaktionsschichten

Versuche mit ausreichender Ölverfügbarkeit (M-M: X) zeigen zu Versuchsende, wie in Abschnitt 7.1.9 beschrieben, erhöhte Elementgehalte von Sauerstoff sowie Zink, Schwefel, Phosphor und Calcium. Bei gesonderten Versuchen im Ölbad mit geringen Zyklenzahlen oder Versuchen mit Mangelschmierung können diese Schichten nicht detektiert werden.

Um die Entstehungsgeschwindigkeit der Schichten bewerten zu können, wurden spezielle Versuche durchgeführt. Da zu Beginn der Versuche starke Einlaufeffekte auftreten, wurden die Sonderversuche zunächst über 1,1 Mio. SZ unter Mangelschmierung „eingelaufen“. Nach dem Einlaufprogramm sind diese Versuche den Kategorien M-M: A bis M-M: D zuzuordnen und weisen demnach keine auffälligen Schichten mit den oben genannten Elementen auf.

Danach wurde der Versuch im Ölbad für unterschiedliche Zeiten fortgesetzt. Abschließend wurden die Bauteile mittels REM/EDX analysiert. Exemplarisch ist der Zinkgehalt der Proben in Abb. 77 dargestellt.

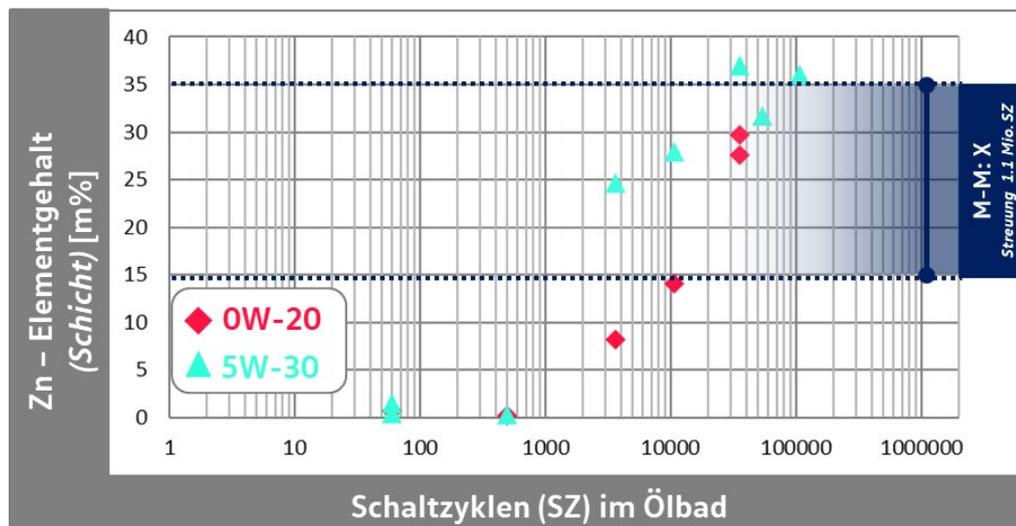


Abb. 77: Entstehung von zinkhaltigen Schichten

Für beide Ölsorten zeigt sich ein ähnlicher zeitlicher Verlauf: Bis 1.000 SZ nach Fortsetzung der Versuche unter Ölbadsschmierung ist kein erhöhter Zinkgehalt nachweisbar. Zwischen 1.000 und 10.000 SZ steigt der Zinkgehalt auf Werte über 15 Masseprozent und liegt damit in dem Bereich, der sich bei Standardversuchen unter Ölbadsschmierung nach 1,1 Mio. SZ einstellt (M-M: X).

Für die Elemente Phosphor, Schwefel und Calcium zeigt sich ein ähnlicher zeitlicher Verlauf. Die typischen Schichten aus den Standardversuchen mit Ölbadsschmierung (M-M: X) bilden sich demnach zwischen 1.000 und 10.000 SZ aus.

7.2 Analyse: Metall-Keramik-Kontakt

Die Einteilung der Versuche mit Keramik-Kugel anhand des Verschleißverhaltens ergab 4 verschiedene Kategorien (Abschnitt 6.3.2). Bei einigen Versuchen setzte sich das Verschleißverhalten aus sehr unterschiedlichen Phasen zusammen (M-K: R). Für die detaillierte Untersuchung werden nur Versuche mit stabilem Verschleißverhalten betrachtet, also die Kategorien M-K: X, M-K: Y und M-K: Z.

Wie bereits bei den Metall-Metall-Kontakten (Abschnitt 7.1) werden auch bei den Versuchen mit Si_3N_4 -Kugel die Analyseergebnisse zunächst getrennt für die einzelnen Kategorien an Beispielergebnissen betrachtet. Im Anschluss erfolgt eine Zusammenfassung.

7.2.1 Kategorie: M-K: X

Abb. 78 zeigt REM-Aufnahmen von einer Kontur und einer Kugel der Kategorie M-K: X. Wie auch in der Kategorie M-M: X (Abschnitt 7.1.1) weist die Kontur Ausbrüche mit einer Ausdehnung von bis zu 300 μm sowie dunkle Flecken auf den sehr glatten Bereichen zwischen den Ausbrüchen auf.

Die Keramik-Kugel zeigt auf der dunkleren Si_3N_4 -Grundmatrix helle Streifen im BSE-Bild, was auf eine höhere Dichte im Bereich der Streifen hinweist.

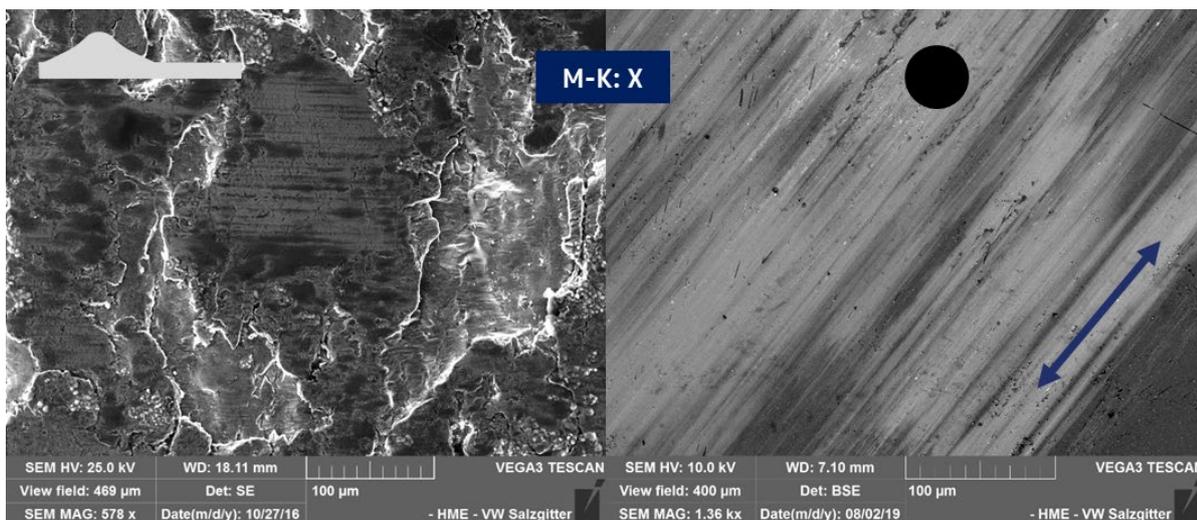


Abb. 78: REM-Aufnahmen; M-K: X; Kontur- (SE, 25 kV) und Kugeloberfläche (BSE)

In den EDX-Daten (Tabelle 15) kann für die hellen Bereiche der Kugel ein Eisenanteil (etwa 5 bis 10 m%) nachgewiesen werden. Zusätzlich kommen die Elemente Zink, Phosphor, Schwefel und Calcium sowie Sauerstoff im erhöhten Maße vor.

Auf der Konturoberfläche sind ebenfalls die Elemente Zink, Phosphor, Schwefel und Calcium sowie Sauerstoff im Bereich der Schichten nachweisbar. Der Siliciumanteil ist gegenüber dem Legierungsanteil im Stahl nicht erhöht. Die Konturen zeigen damit übereinstimmende EDX-Ergebnisse und gleiche Verschleißerscheinungen wie die Versuche der Kategorie M-M: X (Abschnitt 7.1.1). Ohne Kenntnis des Gegenkörpers lassen sich die Konturen der Gruppe M-K: X und M-M: X mit den in dieser Arbeit genutzten Analysemethoden daher nicht unterscheiden.

Tabelle 15: EDX-Ergebnisse; M-K: X; ausgewählte Elemente
Mittelung verschiedener Konturmaterialeien und Ölsorten

		M-K: X		Elementanteil [m%]				Anzahl
		O	Si	Ca	S	Zn	P	
Kontur	Gesamtfläche	7,93	0,20	1,30	1,67	10,50	4,30	3
	Schicht	27,53	0,07	4,33	4,13	25,87	15,87	
		O	Fe	Ca	S	Zn	P	
Kugel	Gesamtfläche	17,80	5,53	0,80	1,37	7,53	4,27	3
	Schicht	21,43	6,33	1,17	1,93	11,37	6,20	

7.2.2 Kategorie: M-K: Y

Versuche der Kategorie M-K: Y zeigen zu Versuchsende sehr hohe Verschleißraten bei geringen Reibwerten (Abschnitt 6.3). Die Oberfläche der Konturen erscheint makroskopisch glatt. Bei hoher Vergrößerung im REM können Riefen in Bewegungsrichtung festgestellt werden (Abb. 79). Der Abstand zwischen den Riefen liegt hier im Bereich von etwa 1 µm und ist damit deutlich geringer als bei den Konturen der Kategorie M-M: A und M-M: Y, welche auch eine feingeriefte Oberfläche aufweisen (Abschnitte 7.1.2 & 7.1.6).

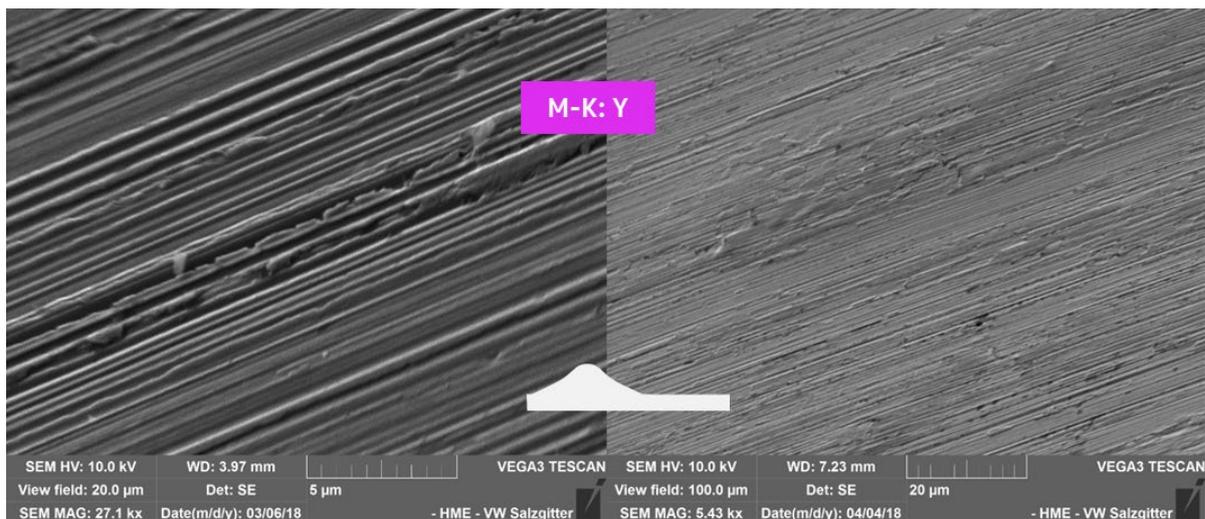
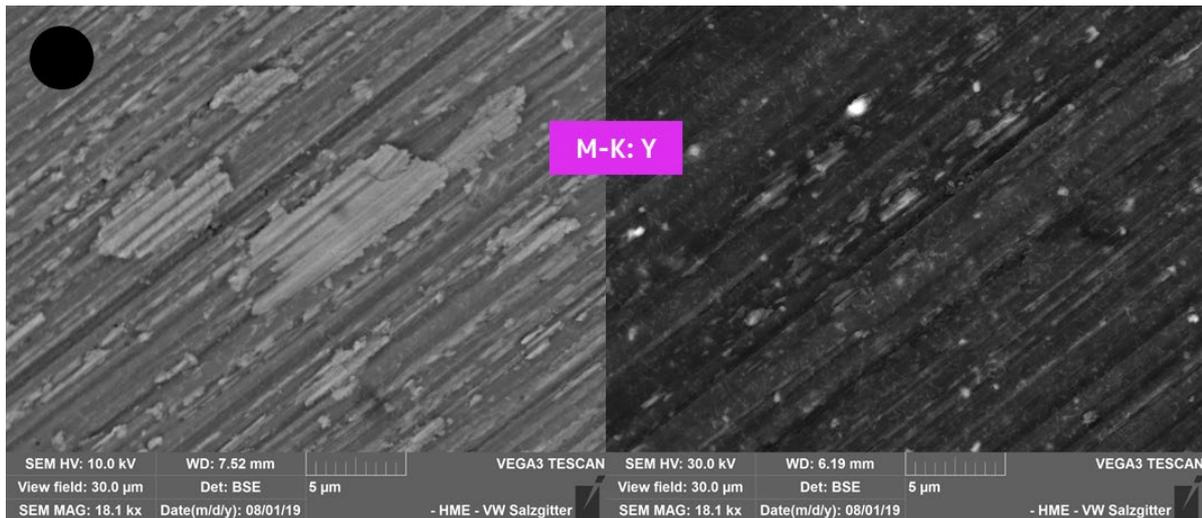


Abb. 79: REM-Aufnahmen (SE); M-K: Y; Konturoberfläche

Auf der Kugeloberfläche können ebenfalls Riefen festgestellt werden (Abb. 80). Die Größenordnung entspricht den Verschleißspuren auf der Kontur, die Riefen sind im Vergleich weniger stark ausgeprägt.

In BSE-Bild sind helle Fragmente auf der Kugeloberfläche erkennbar. Zum Teil gehen die Riefen auch durch den Auftrag, wie im linken Bild in Abb. 80 erkennbar ist. Im rechten Bild ist unter den Riefen das Gefüge der Keramik mit Si₃N₄-Kristallen, Glasphase und Titanitriden erkennbar (siehe Abschnitt 3.2.2).

Abb. 80: REM-Aufnahmen (BSE); *M-K: Y*; Kugel; 10 und 30 kV

Die hellen aufliegenden Bereiche auf der Kugel zeigen einen hohen Eisenanteil mit über 20 m% in den Punktspektren (Tabelle 16). Zusätzlich ist der Sauerstoffanteil leicht gegenüber dem Mittelwert des gesamten Messbildes erhöht.

Auf der Kontur kann vor allem Sauerstoff nachgewiesen werden. Zusätzlich zeigt sich ein erhöhter Siliciumanteil mit etwa 0,7 m%. Alle Versuche mit metallischem Gegenkörper zeigen hingegen den Siliciumanteil des Ursprungswerkstoffes mit etwa 0,25 m% (siehe Abschnitt 7.1).

Tabelle 16: EDX-Ergebnisse; *M-K: Y*; ausgewählte Elemente
Mittelung verschiedener Konturmaterialien und Ölsorten

		M-K: Y Elementanteil [m%]						
		O	Si	Ca	S	Zn	P	Anzahl
Kontur	Gesamtfläche	5,20	0,46	0,06	0,16	0,19	0,03	4
	Schicht	12,58	0,73	0,10	0,31	0,35	0,13	
Kugel		O	Fe	Ca	S	Zn	P	
	Gesamtfläche	8,50	5,67	0,03	0,07	0,07	0,00	3
Schicht	13,10	23,77	0,13	0,20	0,27	0,13		

7.2.3 Kategorie: M-K: Z

Die Kategorie M-K: Z fasst Versuche mit geringen Verschleißraten bei geringer Ölmenge zusammen. Nur ein Versuch fällt in diese Kategorie. Die Kontur erscheint makroskopisch sehr glatt mit wenigen Ausbrüchen (Abb. 81, nächste Seite). Im REM ist bei sehr starker Vergrößerung ein wolkenartiger Auftrag von Partikeln mit einer Größe von 5 bis 20 µm erkennbar (Abb. 81, links). Zur besseren Darstellung des Auftrags wurde für die Konturaufnahme eine geneigte Betrachtung gewählt. Die Auftragshöhe kann damit zu etwa 100 nm abgeschätzt werden. Bei genauer Betrachtung sind auf dem Auftrag feine Riefen in Bewegungsrichtung erkennbar. Auch auf der Kugel zeigt sich ein ähnlicher Auftrag (Abb. 81, rechts). Dieser erscheint im BSE-Bild deutlich heller als die Grundmatrix. Auch hier fallen Riefen auf den aufgetragenen Bereichen auf.

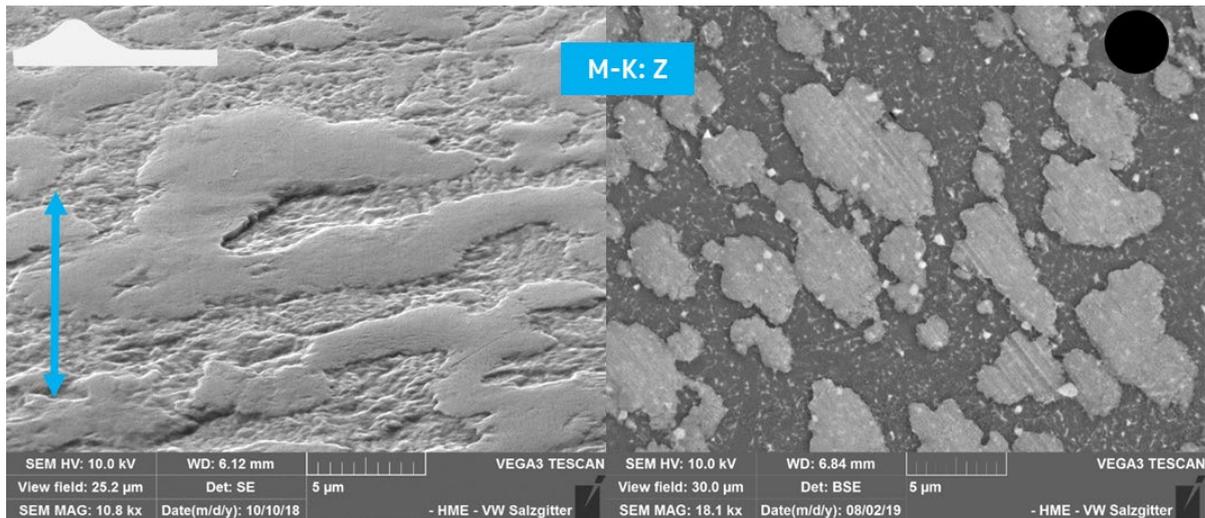


Abb. 81: REM-Aufnahmen; *M-K: Z*; Konturoberfläche (SE) und Kugel (BSE)

In den EDX-Analysen (Tabelle 17) der Kontur zeigt sich bei den Punktspektren im Bereich des Auftrags ein deutlich erhöhter Sauerstoff- und Siliciumanteil. Für die Kugel ergibt sich in den vergleichbaren Bereichen eine Zunahme von Eisen und Sauerstoff.

Tabelle 17: EDX-Ergebnisse; *M-K: Z*; ausgewählte Elemente

		M-K: Z		Elementanteil [m%]				
		O	Si	Ca	S	Zn	P	Anzahl
Kontur	Gesamtfläche	11,20	1,17	0,23	0,10	0,07	0,10	1
	Schicht	26,13	2,77	0,43	0,20	0,10	0,20	
Kugel	Gesamtfläche	11,80	9,20	0,10	0,10	0,10	0,00	1
	Schicht	14,40	14,80	0,00	0,10	0,10	0,10	

Analog zum System M-M ist eine Gegenüberstellung der REM-Aufnahmen aller Verschleißkategorien für das System M-K in Anhang F gegeben.

7.2.4 Zusammenfassung EDX

Ölreaktionsschichten

Abb. 82 fasst (*nächste Seite*) die EDX-Ergebnisse für die Ölreaktionsschichten an Kontur und Kugel zusammen. Exemplarisch ist das Element Zink gewählt. Wie auch bei den Metall-Metall-Kontakten (Abschnitt 7.1.9) tritt nennenswerter Zinkgehalt nur bei gleichzeitigem Auftreten von ausreichender Schmierung (Ölbad) **und** geringen Endverschleißraten (kleiner $1 \text{ mm}^3 / 1 \text{ Mio. SZ}$) auf. Dies trifft auf die Versuche der Verschleißkategorie M-K: X zu. Analog zu den Versuchen mit 100Cr6-Kugel (M-M) zeigen Versuche mit hoher Verschleißrate trotz Ölbad (M-K: Y) keine Ölreaktionsschichten.

Dem gegenüber treten bei Versuchen der Gruppe M-K: Z sehr geringe Verschleißraten bei geringer Ölmenge ohne messbare Ölreaktionsschichten auf. Geringer Verschleiß bei geringer Ölmenge kann nur mit Keramikugeln erreicht werden. Dieses Verhalten wird, wie die hier gezeigten EDX-Messungen belegen, nicht von Ölreaktionsschichten begleitet.

Die Keramikugeln weisen in der EDX-Messung bezüglich der Ölreaktionsschichten ähnliche Ergebnisse wie die Konturen auf, wobei die Zink-Elementgehalte etwas geringer ausfallen. (siehe Abb. 82, rechte Seite)

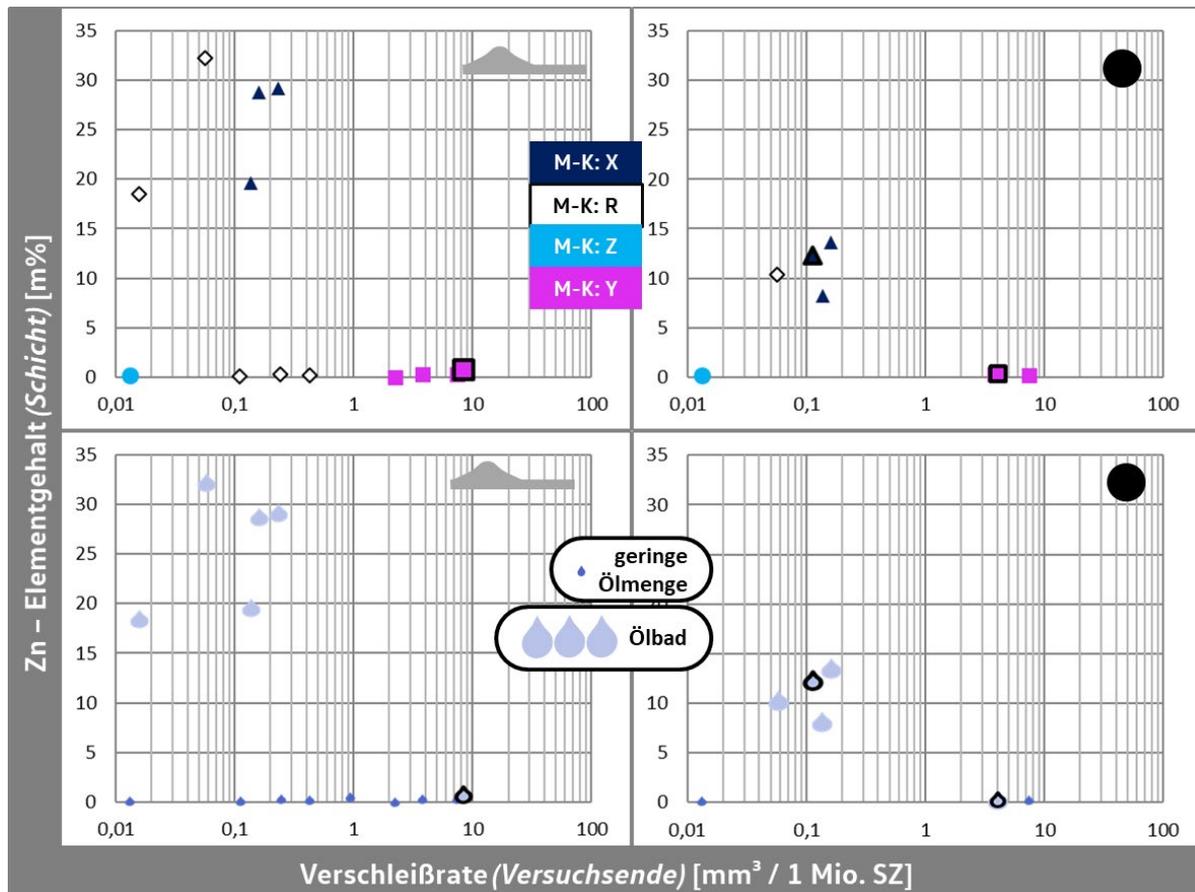


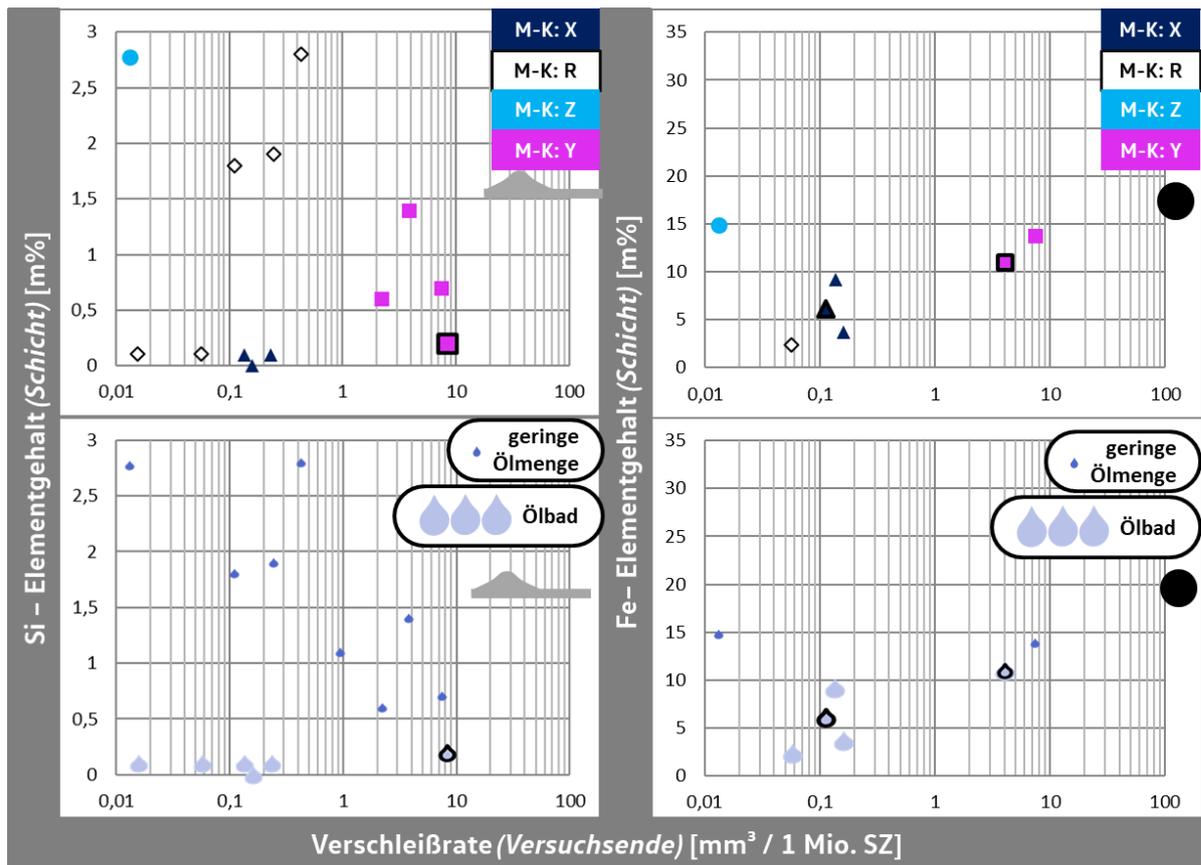
Abb. 82: EDX-Ergebnisse; M-K; Zink

Kugel / Kontur durch Symbole; gesperrte Rotation durch schwarzen Rahmen gekennzeichnet
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Materialübertrag

In Abb. 83 sind die EDX-Ergebnisse für den Siliciumanteil der Konturen und den Eisenanteil der Kugeln gegenübergestellt. Für Versuche im Ölbad ist der Siliciumanteil der Kontur gegenüber der ungelauften Legierung (siehe Abb. 13, S. 43) kaum erhöht. Bei geringer Ölmenge steigt der Siliciumanteil mit abnehmender Endverschleißrate auf bis ca. 3 m% an.

Alle Kugeln zeigen nach Versuch messbare Eisenanteile. Bei geringer Ölmenge sind Eisenanteile bis ca. 45 m% für die gewählten Messeinstellungen nachweisbar.

Abb. 83: EDX-Ergebnisse; *M-K*; Materialübertrag

Kugel / Kontur durch Symbole; gesperrte Rotation durch schwarzen Rahmen gekennzeichnet
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

7.3 Kontaktberechnung mit gelaufenen Konturen

In Abschnitt 4.2 wurde gezeigt, dass sich initial sehr hohe Hertzsche Pressungen von über 8 GPa einstellen. Bei einer dreidimensionalen Vermessung der gelaufenen Konturen mittels Laser-Scanning-Mikroskop zeigt sich, dass sich bereits nach wenigen Schaltzyklen (SZ) eine deutlich messbare Laufbahn mit dem Radius der Kugel ausbildet. Nach etwa 100.000 SZ hat sich die Laufbahn über die gesamte Konturbreite ausgebreitet. Die Verformung der Kontur führt zu einer deutlichen Senkung der Hertzschen Pressung.

Berechnung der Hertzschen Pressung

In Abb. 84 (*nächste Seite*) wurde die Pressung für Konturen mit hohem Verschleiß infolge Mangelschmierung (*M-M: B*) sowie geringem Verschleiß bei Ölbad schmierung (*M-M: X*) auf Basis der 3D-Vermessungen berechnet.

Im Vergleich zur initialen Pressung treten für beide Konturen deutlich niedrigere Werte im Bereich von 2 GPa auf. Obwohl die Kontur der Gruppe *M-M: B* wesentlich mehr Verschleiß aufweist, sinkt die Pressung durch den (gegenüber der Kategorie *M-M: X*) erhöhten Verschleiß nur noch leicht ab.

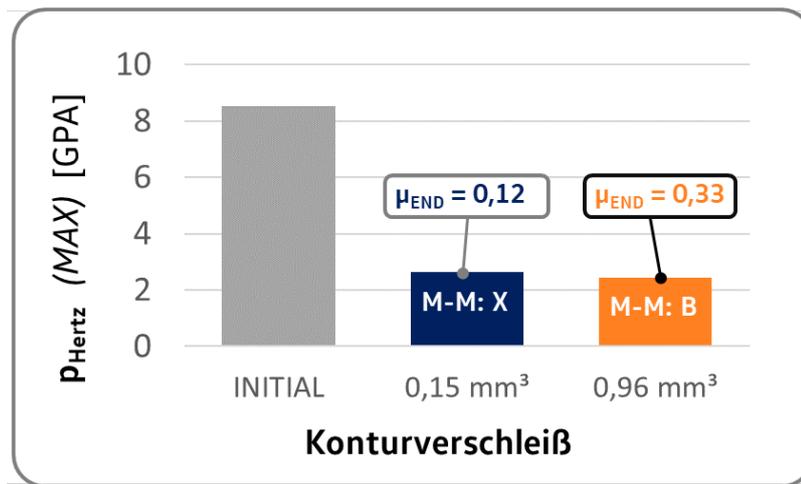


Abb. 84: Hertzische Pressung im gelaufenen Zustand nach 1.1 Mio. SZ

Lage der maximalen Vergleichsspannung

Für punkt- und linienförmige Kontakte kann die Lage der maximalen Vergleichsspannungen (siehe Abschnitt 2.1.4) direkt aus den maximalen Pressungen berechnet werden. Im betrachteten System liegt initial ein Punktkontakt vor. Die Kugel formt sich aufgrund der hohen Pressung jedoch schnell eine konforme Bahn auf der Kontur, woraufhin eine deutlich vergrößerte elliptische Kontaktfläche vorliegt. Eine exakte Berechnung der Spannungsverteilung für den elliptischen Kontakt könnte mittels FEM erfolgen.

Um ohne diese aufwendige Methode eine überschlägige Aussage zur Lage der maximalen Vergleichsspannung zu erhalten, wurde die folgende Herangehensweise genutzt. Unter der Annahme, dass sich das reale System zwischen den Extremen des idealen Punktkontaktes und des Zylinderkontaktes bewegen muss, wurden mit den realen Geometrien beide Extremfälle berechnet. Die Verläufe sind in Abb. 85 dargestellt.

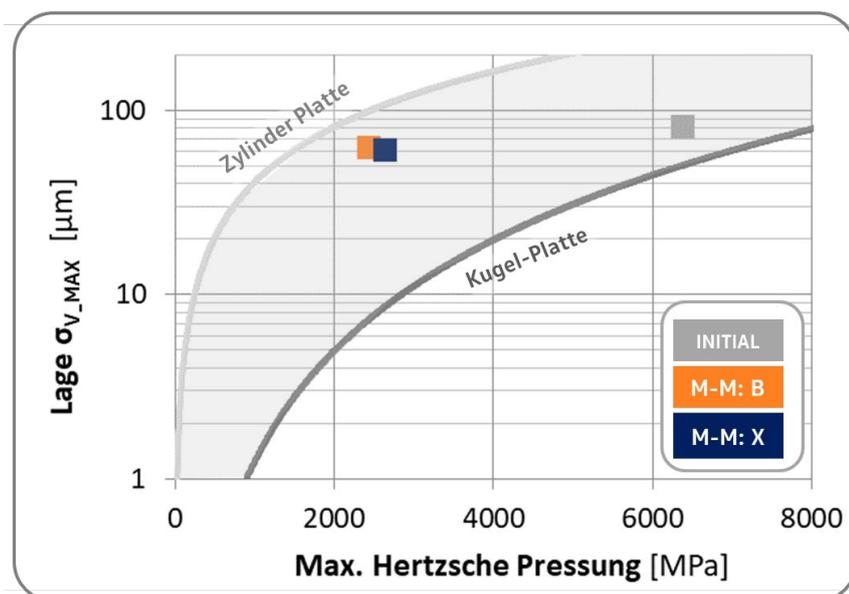


Abb. 85: Hertzische Pressung; Lage der maximalen Vergleichsspannung

Zusätzlich wurde in Abb. 85 für die berechneten Hertzschen Pressungen aus Abb. 84 die Lage der maximalen Vergleichsspannung nach *Huber und von Mises* über die Faktoren aus der Literatur abgeschätzt [4]. Dabei wurden für den initialen Punktkontakt der Faktor für Punktkontakte (0,483) und für die gelaufenen Konturen der Faktor für Linienkontakte (0,786) genutzt [5]. Weitere Informationen zur Vorgehensweise sind in Anhang H2 angegeben.

Mit dieser groben Abschätzung kann die Lage der maximalen Vergleichsspannungen durch den Kontaktdruck eingeordnet werden. Für das betrachtete System liegen die maximalen Schubspannungen durch die Kontaktbelastung demnach in einer Tiefe von 40 μm bis 100 μm .

7.4 FIB-Schnitte: Mikrostruktur an der Oberfläche

Metallografische Schliffe an Konturen und Kugeln zeigen eine deutliche Veränderung des Gefüges als Resultat der tribologischen Belastung. Es konnte eine Kornfeinung sowie eine starke Verzerrung des Gefüges festgestellt werden. Die Tiefe des beeinflussten Bereiches liegt bei Versuchen mit hoher adhäsiver Reibung bei mehr als 10 μm (Abb. 70, S. 93) und entspricht damit Werten aus der Literatur [21]. (*siehe auch Abschnitt 2.1.2*)

Die Schliffgüte eines metallografisch erzeugten Schliffes erlaubt keine Untersuchung der oberflächennahen Bereiche, weshalb an einigen Konturen und 100Cr6-Kugeln FIB-Schnitte eingebracht wurden. Dabei wurde auf Basis der Verschleißkategorien (Abschnitte 6.2.4 & 6.3.2) eine repräsentative Auswahl von Proben analysiert. Zusätzlich beschreiben Referenzschnitte an ungelautenen Proben den Ausgangszustand. Alle FIB-Schnitte wurden am KIT durch das *MikroTribologie Centrum μTC* erstellt (Abschnitt 3.4).

Die Tabelle 18 bietet eine Übersicht der Ergebnisse. An den Neuteilen liegt zu Versuchsbeginn ein feinkörniges Gefüge mit Korngrößen im Mikrometer-Bereich vor. Für fast alle Verschleißkategorien konnte nach Versuch ein nanokristallines Gefüge festgestellt werden. Auch bei Kurzversuchen nach 100 und 10.000 Schaltzyklen (SZ) entstehen im oberflächennahen Bereich bereits nanokristalline Körner.

Einzige Ausnahme sind die Versuche der Kategorie M-K: Y (Abschnitt 7.2.2), welche durch starken abrasiven Verschleiß infolge einer gleitenden Kugelbewegung gekennzeichnet sind. Bei dieser Kategorie tritt keine nennenswerte Kornfeinung auf.

Tabelle 18: Korngrößenverteilung im FIB-Schnitt
mittlere Korngröße (manuell bestimmt); Einteilung nach Verschleißkategorien
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

minimale Korngröße [nm]	100 SZ	10.000 SZ	> 250.000 SZ								
			Metall-Metall					Metall-Keramik			
Ungelaufen	Kurzversuche	M-M: A	M-M: B	M-M: C	M-M: X	M-K: X	M-K: Z	M-K: R	M-K: Y		
Anzahl Schliffe	3	1	1	2	11	3	2	5	4	4	5
 Kontur (DH + A)	ca. 1000	-	-	60	51	30	60	63	-	-	268
 Kontur (LH)	ca. 2000	50	40	-	43	-	-	65	57	319	1040
 Kugel (DH + A)	ca. 300	-	-	-	60	-	70	-	-	-	-
Reibwert (Versuchsende)		0,12	0,11	0,19	0,31	0,62	0,13	0,12	0,15	0,17	0,18
Verschleißrate (Versuchsende) [nm / SZ]		-	-	0,27	0,34	0,54	0,08	0,18	0,09	0,25	0,80

Obwohl fast alle FIB-Schnitte nach Versuch nanokristallines Gefüge aufweisen, zeigen die einzelnen Schnitte deutliche Unterschiede. Neben unterschiedlichen Verläufen der Korngrößen in die Tiefe treten zum Teil unterschiedliche, amorph erscheinende Schichten direkt an der Oberfläche auf. Teilweise kann eine scharfe Grenze zwischen nanokristallinem und größerem Gefüge festgestellt werden, teilweise liegt ein fließender Übergang vor. Die entscheidenden Merkmale sind am Beispiel eines Schliffes der Kategorie M-K: Z in Abb. 86 dargestellt.

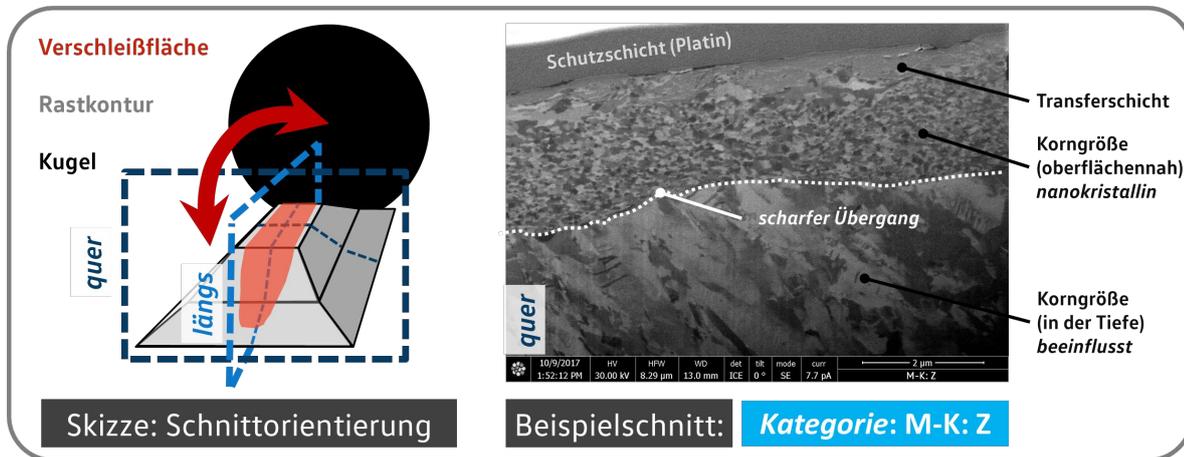


Abb. 86: FIB-Schnitte; Orientierung und Beispielergebnis

Diese Merkmale weichen zwischen den einzelnen Schnitten stark voneinander ab, wie eine exemplarische Übersicht in Abb. 87 zeigt. Oft treten auch innerhalb eines Schnittes markante Unterschiede auf.

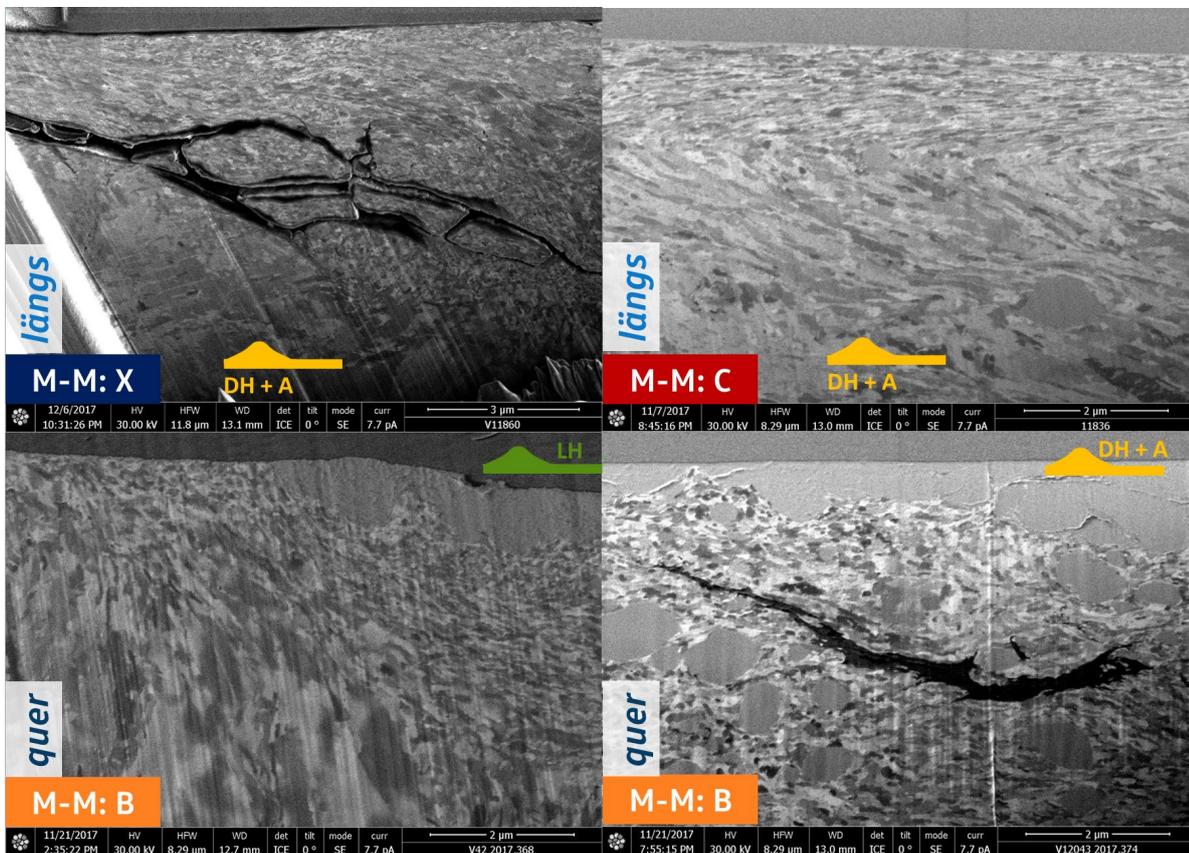


Abb. 87: FIB-Schnitte; beispielhafte Schnitte

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Abb. 87 zeigt beispielgebend Risse unter der Oberfläche (oben links und unten rechts), Transferschichten (unten), kugelige Chromcarbide (rechts) sowie unterschiedliche Korngrößenverteilungen. In Bild unten links zeigen der linke und rechte Bereich des FIB-Schnittes große Unterschiede hinsichtlich Korngröße und Transferschichten auf der Oberfläche

Statistische Auswertung

Um belastbare Aussagen zu den mikrostrukturellen Veränderungen zu erlangen, wurde für jeden FIB-Schnitt manuell die Korngrößenverteilung bis in eine Tiefe von 3 μm bestimmt. Als Auflösung ist im oberflächennahen Bereich eine *Schrittweite von 50 nm* und ab einer Tiefe von 500 nm eine *Schrittweite von 250 nm* gewählt.

Die Daten wurden mit den Versuchsergebnissen korreliert. Abb. 88 zeigt die *minimale Korngröße* sowie die *bis in eine Tiefe von 3 μm gemittelte Korngröße* über den Reibwerten zu Versuchsende aufgetragen.

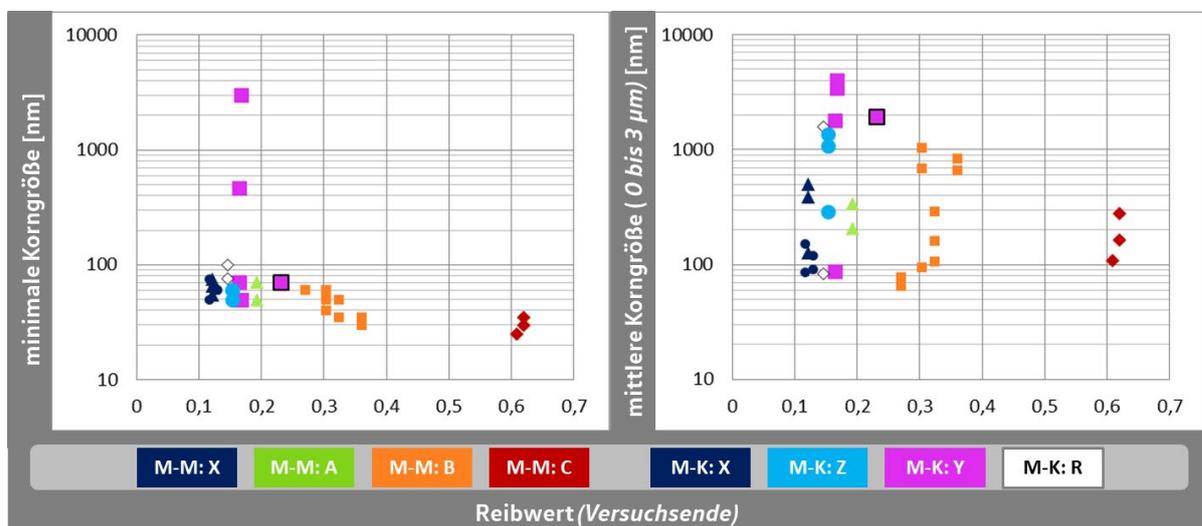


Abb. 88: FIB-Schnitte; Statistische Auswertung

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Wie bereits aus Tabelle 18 ersichtlich wird, zeigen fast alle Versuche ein nanokristallines Gefüge (Abb. 88 - links). Ausnahme sind die Versuche der Kategorie M-K: Y (*extrem hoher abrasiver Verschleiß im Kontakt mit einer Si_3N_4 -Kugel*), bei denen teilweise das Ursprungsgefüge vorliegt.

Für die mittlere Korngröße (Abb. 88 - rechts) liegt eine recht hohe Schwankungsbreite innerhalb der einzelnen Kategorien vor. Besonders tiefe Kornfeinung tritt bei Versuchen der Kategorien M-M: X, M-K: X und M-M: C auf.

8 Diskussion

In dieser Arbeit wird das Verschleißverhalten eines Rastmechanismus untersucht. Dabei wird eine federbelastete Kugel aus durchgehärtetem und angelassenem Wälzlagerstahl bzw. aus Keramik (Si_3N_4) über eine ebenfalls gehärtete Stahlkontur (verschiedene Varianten der Härting) oszillierend bewegt. Die unterschiedlichen Materialpaarungen werden in den Gruppen *Metall-Metall* (M-M) und *Metall-Keramik* (M-K) zusammengefasst. Neben der Schmierung (Ölmenge und Ölart) wird auch ein Einfluss der Kugelkinematik (gesperrte oder freie Kugelrotation) untersucht. Das System ist durch eine hohe dynamische Belastung (20 Hz Oszillationsfrequenz) und sehr hohe Kontaktlasten (initiale Hertzsche Pressung von 8 GPa) gekennzeichnet.

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Versuchsdaten und Analyseergebnisse zeigen eine hohe Komplexität. Erst durch die im Folgenden beschriebene ganzheitliche Betrachtung der Ergebnisse für Metall- und Keramik-Kugel unter Einbeziehung der Berechnungen zum kinematischen Verhalten (Abschnitt 4.1) konnte das Systemverhalten gesamtheitlich erfasst werden.

Dazu war die eindeutige Zuordnung der insgesamt 154 Versuche in verschiedene Kategorien notwendig. Die Kategorisierung basiert auf den Messdaten des Prüfstands. Neben dem Reibwert zu Versuchsende, werden die Verschleißraten sowie die Ölmenge zur Kategorisierung in insgesamt 9 Gruppen genutzt. Abb. 89 fasst die Unterteilung für alle Versuche zusammen.

M-M	Kategorie	M-M: X	M-M: A	M-M: B	M-M: C	M-M: D	gesperrte Kugelrotation	M-M: Y
	Endreibwert	< 0,16	$\geq 0,16$ < 0,265	$\geq 0,265$ < 0,4	$\geq 0,4$ < 0,74	> 0,74		< 0,3
	Verschleißrate [$\text{mm}^3 / 1 \text{ Mio. SZ}$]	-	-	-	-	-		> 1
M-K	Kategorie	M-K: X		M-K: Z	M-K: Y		M-K: R	
	Verschleißrate [$\text{mm}^3 / 1 \text{ Mio. SZ}$]	< 0,4		< 0,4	> 1		<i>wechselnd</i>	
	Ölmenge	 Ölbad		 Gering	unabhängig		unabhängig	

Abb. 89: Zusammenfassung; Einteilung in Kategorien

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Mit dieser Methode können alle Versuchsergebnisse klassifiziert werden. Jede Kategorie beschreibt ein spezifisches Verschleißverhalten. Die 9 Kategorien korrelieren mit bestimmten Verschleißerscheinungen, wie in den Analyseergebnissen in Abschnitt 7 gezeigt wurde.

Erst durch die konsequente Einteilung in die Verschleißkategorien konnten die entscheidenden Einflüsse auf das Systemverhalten bestimmt werden. Diese erfolgreiche Methode der Einteilung aufgrund von Verschleiß- und Reibungscharakteristika ist die erste Hauptidee dieser Arbeit. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus den Kapiteln 6 und 7 auf Basis der Kategorisierung diskutiert.

8.1 Metall-Metall-Kontakt: Haupteinfluss Schmierung

Abb. 90 fasst das tribologische Verhalten für das System M-M unter Verwendung der fünf Verschleißkategorien zusammen. Im Diagramm sind die maximalen Reibwerte und Verschleißraten der Versuche dargestellt, welche im System M-M zu Versuchsende auftreten. Aufgrund der einmaligen Beölung zu Versuchsbeginn kommt es zu einer Verschlechterung der Schmierungssituation während der Versuchszeit.

Für die dargestellten Versuche korrelieren Reibwerte und Verschleißraten eindeutig: Höhere Reibwerte gehen im Mittel mit höheren Verschleißraten einher. Eine Zunahme von Reibung und Verschleiß korreliert zusätzlich mit einer geringeren initialen Ölmenge vor Versuch, was die Angabe der mittleren Ölmenge vor Versuch in Abb. 90 beweist. Als Haupteinfluss kann daher eindeutig die initiale Ölmenge und die dadurch bestimmte Schmierung im Versuch benannt werden.

Die fünf Verschleißkategorien beschreiben unterschiedliche Systemzustände: Versuche mit Ölbad Schmierung (M-M: X) zeigen über den gesamten Versuch stabile geringe Reibwerte und Verschleißraten sowie einen degressiven Verschleißverlauf.

Mit abnehmender Schmierstoffverfügbarkeit nehmen Reibung und Verschleiß zu, wobei mit zunehmender Schwere des Verschleißes die Kategorien M-M: A bis M-M: D durchlaufen werden. Dabei ist der Übergang zwischen den Kategorien fließend, die Verschleißerscheinungen der Oberflächen unterscheiden sich allerdings stark. Auf diesen Aspekt wird in Abschnitt 8.1.3 detailliert eingegangen.

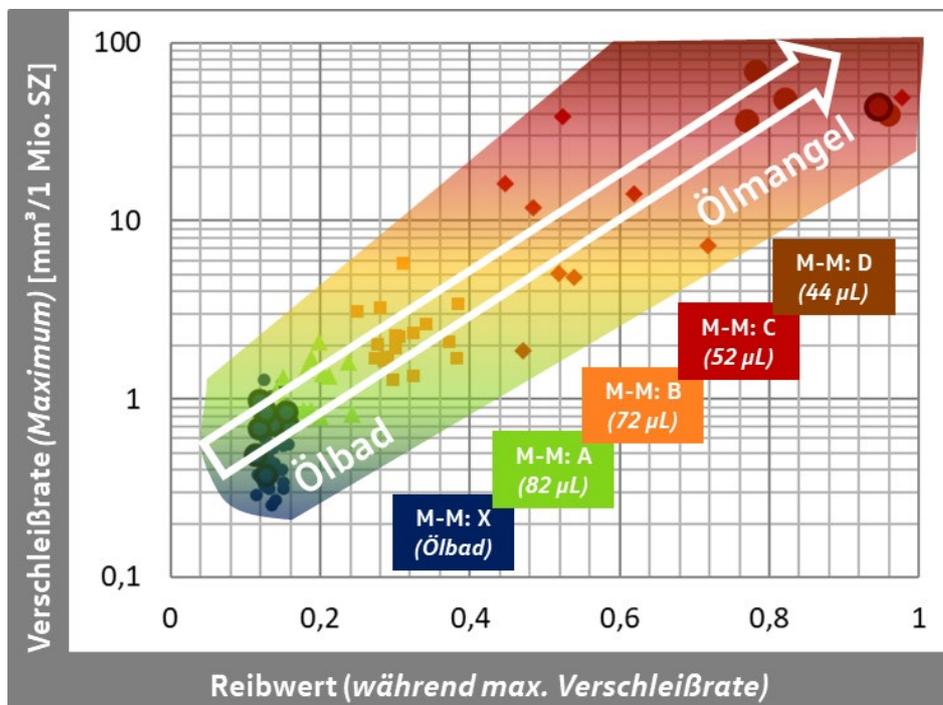


Abb. 90: Systemverhalten; M-M; Zusammenfassung I
gesperrter Rotation durch schwarzen Rahmen markiert
mittlere Ölmenge vor Versuch unter den Kategorien angegeben

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die verschiedenen Konturmaterialien und Ölsorten haben keinen bzw. nur einen untergeordneten Einfluss auf das M-M-Systemverhalten. Dies ist gut in den Gegenüberstellungen aller Versuche (Abb. 39, S. 66) sowie in den gemittelten Werten von Reibung und Verschleißraten erkennbar. (Abb. 34 & Abb. 35, S. 62 ff.)

Trotz deutlicher Unterschiede im Gefüge (z.B. *Korngröße & Chromcarbide*, siehe Abschnitt 3.2.1) der einzelnen Konturmaterialien kann damit kein Unterschied im Verschleißverhalten festgestellt werden. Unter den Standardbedingungen dieses Tribosystems verhalten sich demnach Stähle mit ähnlichen Kohlenstoffgehalten und vergleichbarer Makrohärte ähnlich.

Versuche mit gesperrter Kugelrotation sind in Abb. 90 durch schwarze Umrahmungen der Symbole gekennzeichnet und zeigen bei gleichen Schmierungsbedingungen die gleichen Verschleißkategorien wie die Referenzgruppe mit freier Kugelrotation. Das Sperren der Kugelrotation führt demnach in den meisten Fällen zu *keiner* starken Änderung des Systemverhaltens. Dies lässt darauf schließen, dass auch bei freier Kugelrotation meist ein Wälzen mit recht hohem Gleitanteil vorliegt. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass sich die Konturoberflächen der Versuche mit gesperrter Kugelrotation kaum von denen mit freier Kugelrotation in der gleichen Kategorie unterscheiden (Abschnitt 7.1.1) und die Oberflächen eine gleiche chemische Zusammensetzung auf Basis der EDX-Ergebnisse zeigen, was auf gleiche Reaktionsschichten hinweist (Abschnitt 7.1.9).

Nur die Kombination von *lasergehärteter Kontur (LH)* und *Beölung mit OW-20* führt bei Rotationsperrung zu extrem hohen Verschleißraten trotz Ölbadenschmierung (M-M: Y). Dieses Verhalten tritt im realen System (also mit einer Rotationsmöglichkeit der Kugel) jedoch nie auf, weshalb diese Kategorie für das Verständnis des Systems M-M an dieser Stelle nicht betrachtet wird. Die Anomalien bei gesperrter Kugelrotation in Abhängigkeit des Konturmaterials werden in Abschnitt 8.3.2 detailliert diskutiert.

8.1.1 Vergleich von Kugel- und Konturverschleiß

Es wurde in Abschnitt 6.2.6 beschrieben, dass Kontur und Kugel im System M-M unter Normalbedingungen (*hervorgehobener Korridor in Abb. 90*) ähnliche Verschleißerscheinungen und Verschleißraten (Volumenverschleiß) aufweisen. Kontur- und Kugelverschleiß sind in Abb. 91 gegenübergestellt.

Bei beiden Materialien handelt es sich in allen Varianten des Systems M-M um niedriglegierte Stähle mit einer Härte von 650 bis 850 HV, die aufgrund der insgesamt vergleichbaren Materialeigenschaften in gleicher Weise zum Gesamtverschleiß beitragen. Die gerade im initialen Einlaufen stark unterschiedlichen Kontaktbedingungen und der extreme Unterschied im Eingriffsverhältnis zwischen der kleinen Kontur- und der großen Kugeloberfläche (*bei gelegentlicher Rotation*) haben hier langfristig keinen entscheidenden Einfluss. Auch die vorhandenen Härteunterschiede (Abschnitt 3.2) scheinen eine untergeordnete Rolle zu spielen, da die deutlich härteren Kugeln in gleichem Maße wie die Konturen zum Verschleiß beitragen.

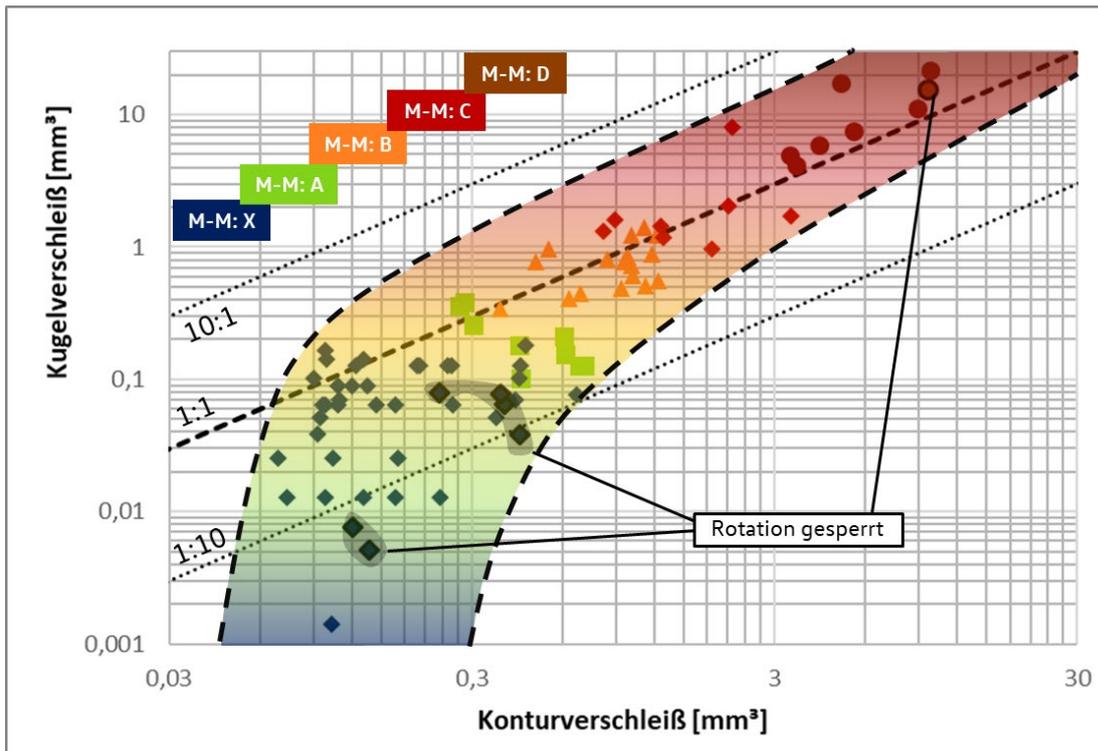


Abb. 91: Systemverhalten; *M-M*; Kugel- und Konturverschleiß

Versuche mit gesperrter Rotation durch schwarzen Rahmen markiert

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Lediglich bei sehr kleinem Gesamtverschleiß infolge einer Ölbadsschmierung (*M-M: X*) zeigen die Kugeln im Vergleich zur Kontur geringeren Verschleiß. Eine mögliche Ursache sind die starken plastischen Verformungen, die zu Beginn im Bereich der Kontur auftreten. Hier arbeitet sich die härtere Kugel (siehe Abschnitt 3.2) in die Konturoberfläche ein, was mittels 3D-Vermessungen im Laser-Scanning-Mikroskop nachgewiesen wurde: Auf der Kontur bildet sich exakt der Kugelradius ab, was mit einer starken Schädigung des Konturmaterials verbunden ist. Außerdem ist denkbar, dass die Wälzlagerkugeln bei Ermüdung aufgrund der Optimierung von Wälzlagerstahl gegenüber Ermüdungsverschleiß im Vorteil sind und deswegen vergleichsweise geringer Ermüdungsverschleiß auftritt.

Ein geringerer Kugelverschleiß durch die viel größere mögliche Kontaktfläche der Kugel (*bei stochastischer Rotation ist die gelaufene Fläche auf der Kugel um ein Vielfaches größer als die Verschleißspur auf der Kontur*) kann hingegen ausgeschlossen werden: Die Kugeln mit gesperrter Rotation und damit definiert kleiner Kontaktspur auf der Kugel (in Abb. 91 durch schwarze Rahmen hervorgehoben) weisen sogar jeweils geringen Verschleiß auf.

Für das Verständnis der tribologischen Prozesse ist die Erkenntnis, dass die Metallkugeln in gleicher Größenordnung wie die Konturen zum volumetrischen Gesamtverschleiß beitragen, entscheidend. Geometrisch ist der Kugelverschleiß aufgrund der großen Kugelkontaktfläche kaum nachweisbar (Anhang B). Die Funktion des Systems wird daher durch den Konturverschleiß bestimmt.

Ein Vergleich zum Verschleiß der Keramikugel erfolgt in Abschnitt 8.3.5.

8.1.2 Verschleißentwicklung

Der zeitliche Ablauf innerhalb der Versuche ist in Abb. 92 illustriert. Die Entwicklung wird vor allem durch eine Verschlechterung der Schmierungsbedingungen bestimmt. Die einmalige Beölung zu Versuchsbeginn führt in vielen Fällen zu einer Verschlechterung der Schmierstoffverfügbarkeit im Verlauf des Versuchs. Dieser Zustand tritt analog in realen Systemen auf.

Zu Beginn kommt es zunächst zu einem Einlaufen der Kontur mit starken plastischen Verformungen, die innerhalb der ersten 100.000 SZ schnell zu einer Reduzierung der Pressung von 8 auf 2 GPa führen (Abschnitt 7.3). Die Pressung liegt nach dem Einlaufen in einem für die Werkstoffe ertragbaren Rahmen, wenn man die statische Tragfähigkeit für Wälzlager als Referenz annimmt [88]. Zum Versuchsstart zeigen Versuche mit geringer Ölmenge kurzzeitig gleiche Reibwerte und Verschleißraten sowie ähnliche Verschleißbilder (hier nicht detailliert betrachtet) wie Versuche mit Ölbadenschmierung. Zwischen 10.000 und 100.000 SZ kommt es zu einer eindeutigen Trennung des Verhaltens in Abhängigkeit der Ölmenge. Daraus lässt sich schließen, dass die geringe Ölmenge für die ersten Zyklen eine ausreichende Schmierung zur Verfügung stellt. Ab dem Zeitpunkt, an welchem die Versuche mit geringer Ölmenge ein anderes Verhalten als vergleichbare Versuche mit Ölbadenschmierung aufweisen, kann von einer „Mangelschmierung“ gesprochen werden.

Im Laufe des Versuchs verschlechtert sich die Mangelschmierung weiter, was sich in den Versuchsdaten durch steigende Reibwerte und Verschleißraten äußert. Neben Ölverlust und der zunehmenden Kontamination des Öls mit Verschleißpartikeln tragen auch die Prozesse *Ölalterung* und *Abbau von Additiven*, wie in [21] beschrieben, zu einer zunehmenden Verschlechterung der Schmierungsituation bei.

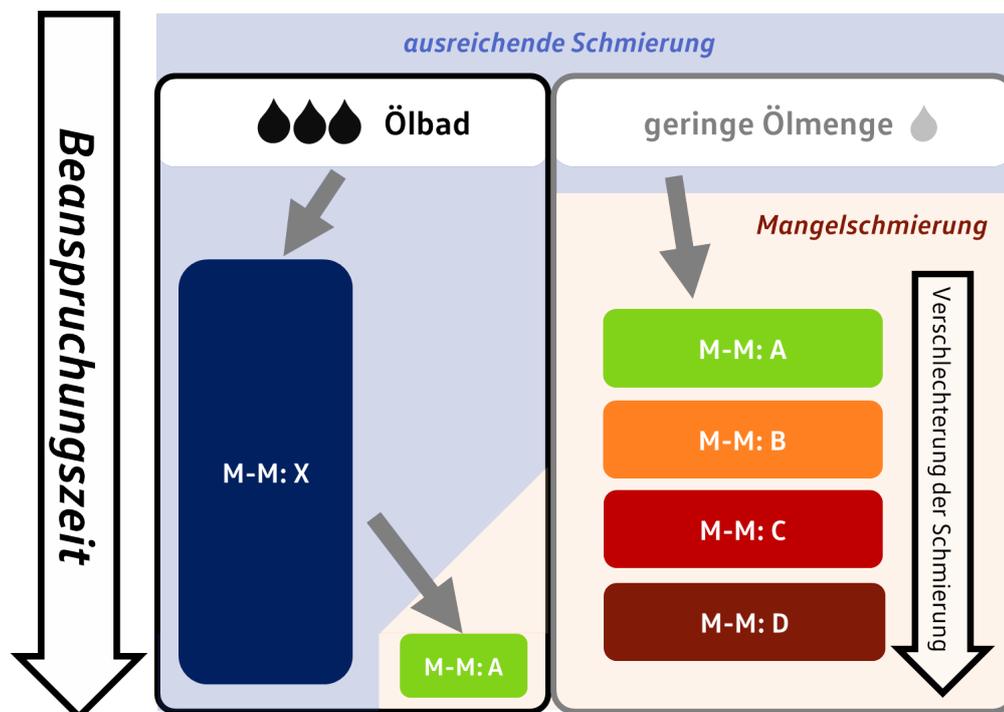


Abb. 92: Systemverhalten; M-M; Zusammenfassung II

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

In Abhängigkeit der Schmierungsqualität durchlaufen die Versuche im Bereich der Mangelschmierung unterschiedliche Verschleißstadien mit jeweils stabilen Reibwerten und Verschleißraten. Die Versuche sind daher, wie in Abschnitt 6.2.4 beschrieben, in die Gruppen M-M: A bis M-M: D eingeteilt. Der Übergang zwischen den Kategorien ist fließend, innerhalb der Kategorien treten jedoch jeweils unterschiedliche Verschleißerscheinungen auf, weswegen eine getrennte Betrachtung notwendig ist.

Für die Versuche unter Ölbadsschmierung reicht die initiale Ölmenge in den meisten Fällen aus, um geringe Reibwerte und Verschleißraten über die gesamte Versuchszeit zu gewährleisten. Einige Versuche zeigen zu Versuchsende leicht erhöhte Reibwerte und Verschleißraten. Diese sind dann auch auf Basis der Verschleißbilder der Kategorie M-M: A zuzuordnen, die vor allem bei geringer Ölmenge auftritt. An dieser Stelle wird deutlich, dass mit abnehmender Schmierstoffverfügbarkeit alle Kategorien von M-M: X bis M-M: D durchlaufen werden können (siehe Abb. 92, S. 115).

8.1.3 Oberflächenanalyse und Verschleißmechanismen

Die Verschleißerscheinungen auf der Konturoberfläche sind mit den zugehörigen Reibwerten in Abb. 93 (*nächste Seite*) gegenübergestellt. Alle Bilder zeigen vergleichbare Bereiche der Konturen unter der gleichen Vergrößerung und den gleichen Bildeinstellungen. Dadurch werden die Unterschiede zwischen den einzelnen Kategorien deutlich und vergleichbar dargestellt. Für den Gegenkörper (100Cr6-Kugel) zeigen sich sehr ähnliche Verschleißbilder (siehe Abb. 96, S. 121), worauf am Ende dieses Abschnitts detailliert eingegangen wird.

Kategorie M-M: X → *Verschleiß durch Oberflächenzerrüttung*

Bei Ölbadsschmierung und geringen Verschleißraten dominieren Ausbrüche und Ölreaktionsschichten die Oberflächen (M-M: X). Nach dem Einlaufen der Kontur liegt eine deutlich verringerte Pressung von etwa 2 GPa vor. Zusätzlich sind auf den Oberflächen Ölreaktionsschichten nachweisbar, welche die tribologische Belastung reduzieren.

Die tribologische Belastung ist jedoch weiterhin ausreichend hoch, um Ermüdungverschleiß zu erzeugen. Die Schliffbilder der Konturen zeigen ein Risswachstum, das in einem Winkel von ca. 30 ° von der Oberfläche ausgeht (Abb. 64, S. 88). In der Literatur wird dieses Verschleißbild Wälzbewegungen mit hohem Gleitanteil zugeordnet, wie sie beispielsweise bei Verzahnungen auftreten [99,134].

Die Ausbrüche weisen eine Tiefe von bis zu 50 µm auf. In dieser Tiefe liegen auch die in Abschnitt 7.3 berechneten maximalen Vergleichsspannungen. Beim in dieser Kategorie vorliegenden mittleren Reibwert von 0,13 kann von einem kombinierten Risswachstum, welches sowohl von der Tiefe, als auch von der Oberfläche initiiert wird, ausgegangen werden (siehe Abschnitt 2.2.3).

Die glatten Flächen zwischen den Ausbrüchen zeigen Bereiche mit Reaktionsschichten die aufgrund ihrer flickenartigen Ausdehnung, den Größenverhältnissen und den Ergebnissen der Elementaranalysen (Abschnitt 7.2.4) den typischen Verschleißschutzadditiven (Abschnitt 2.1.11) zugeordnet werden können.

Die Verschleißerscheinungen unterscheiden sich nicht, zwischen den Bereichen der Bewegungskehr und maximaler Geschwindigkeit (Mitte des Oszillationswegs), weswegen der Zustand der Hydrodynamik ausgeschlossen werden kann. Für das System kann von Mischreibung bis Grenzreibung ausgegangen werden. (siehe auch Kapitel 4)

Während das Ausmaß der Ausbrüche bei anderen Tribosystemen (*EHD-Kontakten wie Wälzlager oder Verzahnungen*) in der Literatur als Versagen der Bauteile bewertet wird [99], stellen die Ausbrüche im betrachteten Rastmechanismus die geringsten Verschleißraten dar. Bei ausreichender Schmierung kann das System in diesem Zustand auch mehr als das 10-fache der Standardversuchszeit von 1,1 Mio. SZ überstehen, da sich ein degressiver Verschleißverlauf einstellt (Abb. 37, S. 64). Mit weiter abnehmender Pressung werden dabei die Ausbrüche kleiner, da die maximalen Vergleichsspannungen (siehe Abschnitt 2.1.4) aufgrund der geringeren Last näher an der Oberfläche liegen.

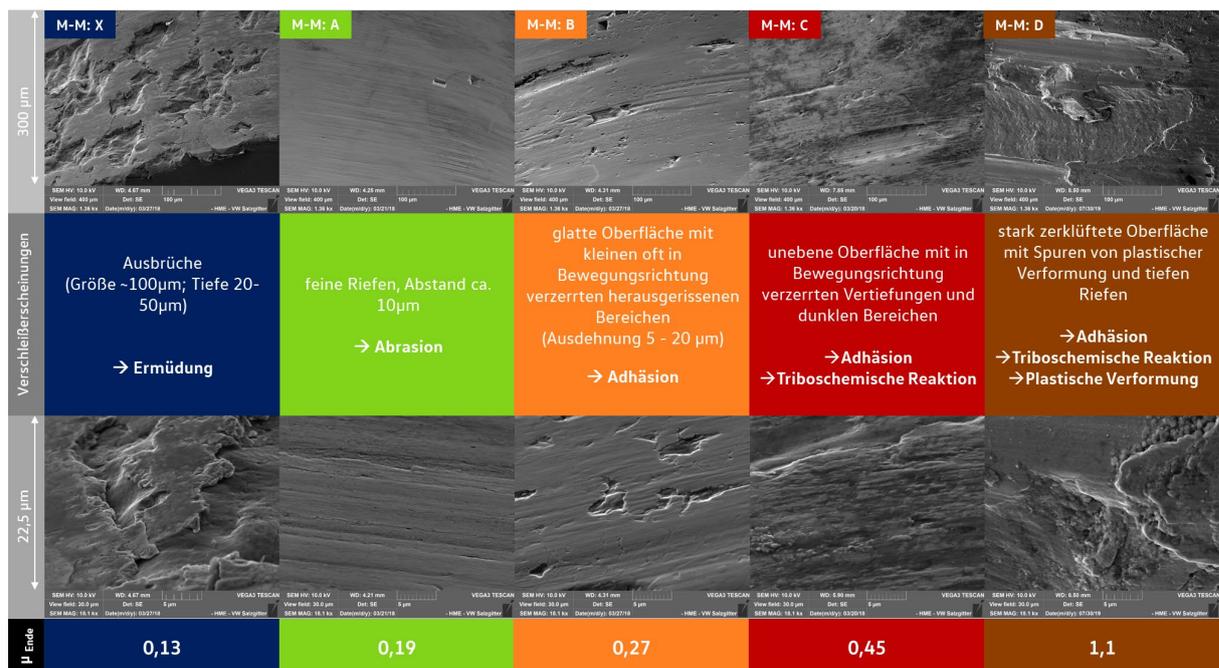


Abb. 93: Verschleißerscheinungen (REM); M-M; Kontur Zusammenfassung

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Mangelschmierung bringt neben den erhöhten Verschleißraten auch deutlich geänderte Verschleißbilder mit sich. Die vorhandene Ölmenge reicht nicht mehr aus, um die Oberflächen zu trennen. Mit der Ölmenge nimmt auch die Möglichkeit zur Bildung von verschleißreduzierenden Reaktionsschichten der Additive (siehe Abschnitt 2.1.8) ab. Die verminderte Wirksamkeit der Additive zeigt sich in geringeren Mengen von Additivelementen auf den Oberflächen (Abb. 75, S. 97). Es kommt vermehrt zum direkten Metallkontakt und damit zu anderen Verschleißmechanismen.

Kategorie M-M: A → *Verschleiß durch Abrasion*

Versuche der Kategorie M-M: A weisen eine sehr glatte Oberfläche auf. Die Riefen in Bewegungsrichtung lassen auf Abrasion als Verschleißmechanismus schließen. Die Verschleißrate ist im Vergleich zum Ermüdungverschleiß der Kategorie M-M: X deutlich höher. Die Oberfläche wird schneller abgetragen. Dadurch können die Risse nicht ausreichend wachsen und sich demzufolge auch nicht mehr zu Rissnetzwerken vereinigen. Die Ausbrüche treten folglich nicht mehr auf.

Da die Abrasionsriefen an Grund- und Gegenkörper auftreten (siehe Abb. 96), kann vermutet werden, dass der Abtrag u.a. durch harte Verschleißpartikel verursacht wird. In der Literatur werden dem oberflächennahen Bereich und den Verschleißpartikeln oft gegenüber dem Grundwerkstoff veränderte chemische und mechanische Eigenschaften zugewiesen [37,134] Im betrachteten System ist eine abrasive Wirkung von verfestigten Metallpartikeln (siehe Abschnitt 2.1.6) oder Eisenoxiden, wie es beispielsweise in [123] beschrieben ist, plausibel.

Zusätzlich sind neben den Riefen auch leichte Anzeichen von adhäsivem Verschleiß in Form von plastisch verformten Vertiefungen und kleinen herausgerissenen Bereichen erkennbar.

Kategorie M-M: B bis D → *Adhäsion und Fressen*

Bei weiterer Verschlechterung der Schmierung werden die Abrasionserscheinungen durch Fressspuren (M-M: B und M-M: C) sowie Oxidationserscheinungen (ab M-M: C) ersetzt. Der Schmierstoff liegt in diesen Kategorien als konsistente Paste aus Öl und Verschleißpartikeln vor und entspricht damit der Modellvorstellung des dritten Körpers (siehe Abschnitt 2.1.10) nach GODET [36].

Aufgrund der mangelnden Trennung der Oberflächen durch viskosen Schmierstoff kommt es zu gelegentlichen Verschweißungen zwischen Grund- und Gegenkörper beziehungsweise den Verschleißpartikeln. Beim Auftrennen im Grundwerkstoff wird Material von den Oberflächen gelöst. Diese Vorgänge laufen lokal auf der Oberfläche ab, wovon die diskreten stark verformten herausgerissenen Bereiche zeugen. Im zeitlichen und räumlichen Mittel ergeben sich stabile Reibwerte und Verschleißraten. Einzelne Verschleißpartikelanalysen zeigen eine flockenartige Morphologie und legen Delamination, wie in [116] beschrieben, als einen möglichen Mechanismus der Materialablösung nahe (siehe Abschnitt 2.3).

Wie von GODET in [37] dargelegt, kann vermutet werden, dass die Partikel auch bei der vorliegenden oszillierenden Bewegung über längere Zeit im Kontakt bleiben und dadurch das tribologische Verhalten durch die Verschleißpaste bestimmt wird, bis sie wie von POPOV ET AL. in [90] dargestellt, an den Kontaktgrenzen aus dem Kontakt gefördert wird.

Die Schliffbilder zeigen eine starke Verformung in Richtung der maximal auftretenden Lasten („bergauf“ - *Kugel komprimiert Feder*) unter der Oberfläche. Auch hier ergibt sich (unabhängig vom Konturmateriale) eine Korrelation mit dem Reibwert wie Abb. 94 zeigt. Durch höhere Reibwerte zu Versuchsende, kann das Material in tieferen Bereichen verformt werden.

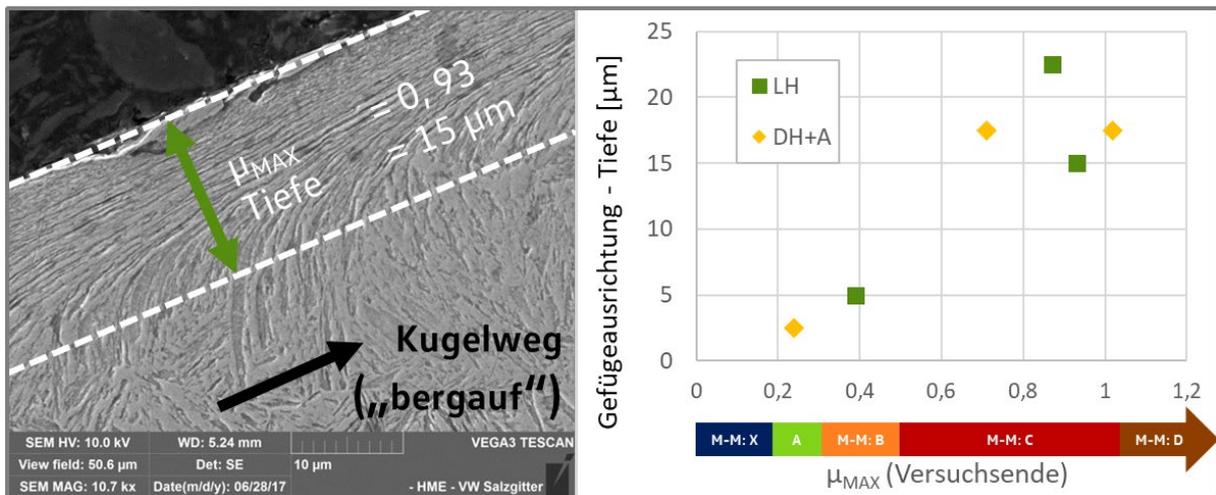


Abb. 94: Verformung des Gefüges über Endreibwert (Maximum)
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Die Ergebnisse aus den Schliffen verdeutlichen, dass ein großer Teil der Reibenergie in Veränderungen des oberflächennahen Bereichs umgesetzt wird, wie es die Betrachtungen in [33] und [111] nahelegen. Die starken Verformungen belegen, dass die Aufnahme der Geschwindigkeitsdifferenz nicht nur in der aufliegenden Verschleißpaste, sondern auch in den oberflächennahen Bereichen der Kontur stattfindet. Eine genaue Festlegung der Grenze eines dritten Körpers kann daher an dieser Stelle nicht gegeben werden (siehe Abschnitt 2.1.10).

Das beeinflusste Gefüge erstreckt sich je nach Reibwert in eine Tiefe von bis zu 25 μm . Am Randbereich führt die plastische Verformung unter der Oberfläche aufgrund des fehlenden mechanischen Rückhalts zum Abschälen der oberen Schichten.

Diese Effekte sind gut in der REM-Aufnahme einer Konturoberfläche der Kategorie M-M: B (Abb. 95, nächste Seite) erkennbar: Das Konturmaterial wird von der Kugel wie im Schliff in Abb. 94 nach oben getrieben. Insbesondere im Randbereich liegt zusätzlich eine Bewegung nach außen vor, wodurch sich das Material über die Kante hinaus verformt und später am Rand bricht.

Die Größenordnung der abgeschälten Materialbereiche liegt im Bereich des ausgerichteten und verformten Gefüges aus dem Schliffbild in Abb. 94.

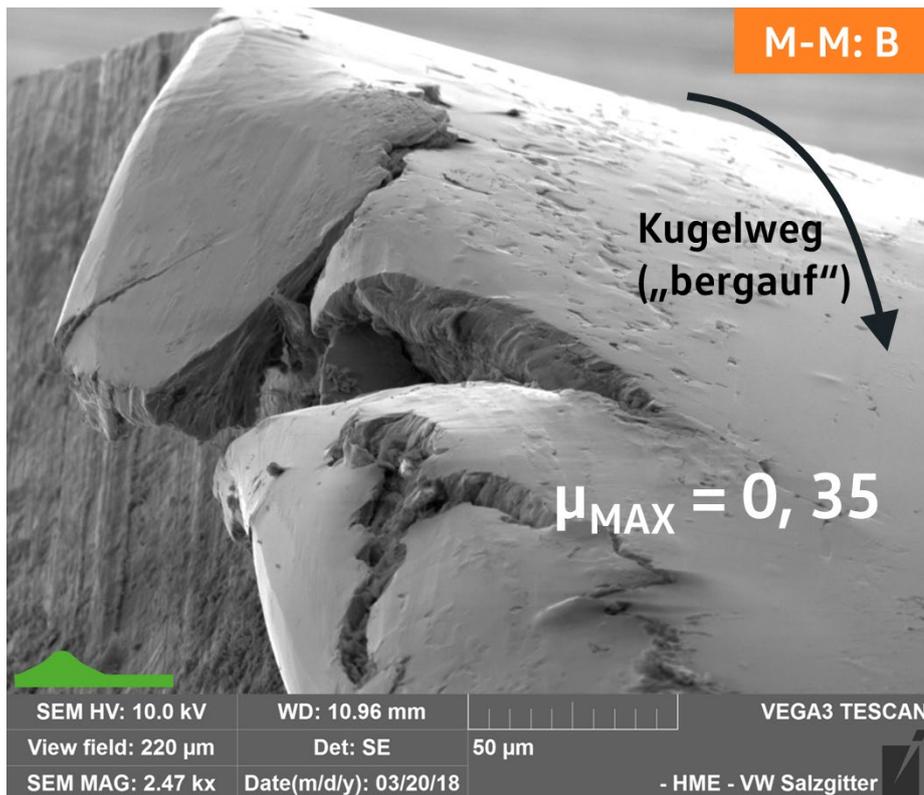


Abb. 95: Verformung des Gefüges am Randbereich (REM-Aufnahme)

Die Partikelanalysen der Verschleißpaste aus der Phase M-M: B zeigen Partikel im Größenbereich von kleiner 5 μ m bis 200 μ m (Abb. 73, S. 95). Die großen Partikel entstehen beim Ausbrechen größerer Segmente (M-M: X) oder beim Abschälen großer Materialbereiche infolge plastischer Verformung in den Randbereichen (siehe Abb. 95). Kleinere Partikel sind die Folge der Verschleißerscheinungen zwischen den Oberflächen und der Verschleißpaste sowie des Zerkleinerns größerer Partikel. Die chemische Zusammensetzung der Partikel zeigt, dass mechanische Vermischung der Systemelemente stattgefunden hat (Abb. 73, S. 95), wie sie beispielsweise in [95] beschrieben ist.

Mit höheren Reibwerten steigen die Kontakttemperaturen deutlich an, was neben dem Schmierstoffmangel eine Oxidation der Oberflächen zusätzlich fördert. Aus der Literatur ist bekannt, dass Oxidationsschichten zum einen durch das Verhindern von Adhäsion den Verschleiß senken können [21]. Andererseits Seite kann das Ablösen von Oxidationsschichten zu erhöhten Verschleißraten führen [134]. Des Weiteren führen die hohen Temperaturen zu einer weiteren Degeneration der schmierfähigen Bestandteile in der Verschleißpaste.

Schließlich kommt es bei Versuchen der Kategorie M-M: D zu einem Versagen bis tief in das Grundmaterial. Bei sehr hohen Reibwerten von über 1 zeigen sich starke Adhäsionsspuren an der Oberfläche. Zusätzlich treten tiefe Riefen und Ausbrüche auf. Die gemessenen Temperaturen sind hier deutlich erhöht und liegen in der Nähe der Kontaktstellen bei bis zu 140 °C. Im Kontaktbereich werden deutlich höhere Temperaturen erwartet. Dunkelgraue Anlassfarben an den Kugeln, welche nur in dieser Kategorie auftreten, weisen zusätzlich auf Temperaturen im Bereich von ca. 200 °C hin und konnten bei Ofenversuchen mit ungelaufenen Kugeln reproduziert werden.

Einfluss der Kugelrotation

Die meisten Versuche zeigen bei einer Sperrung der Kugelrotation das gleiche Verschleißverhalten wie die Vergleichsversuche mit freier Rotation. Dies legt nahe, dass auch bei Versuchen mit Rotationsfreiheitsgrad ein hoher Gleitanteil vorliegt. Auch die Oberflächen entsprechen den typischen Erscheinungen der jeweiligen Kategorie in Abhängigkeit der Ölmenge.

Vergleich von Kontur und Kugel

Aufgrund der Rotationsfreiheitsgrade der Kugel und dem nicht vorhersagbaren kinematischen Verhalten (Abschnitt 4.1) treten die Verschleißerscheinungen nicht bei allen Kugeln über die Oberfläche gleichverteilt auf. Für die Kontur ist der Verschleißbereich eindeutig definiert, was eine aussagekräftige Analyse vereinfacht. Zusätzlich sind für die Kontur Echtzeit-Verschleißmessungen über die gesamte Versuchszeit verfügbar, während die Kugeln nur vor und nach Versuch zur Verschleißbestimmung gewogen werden.

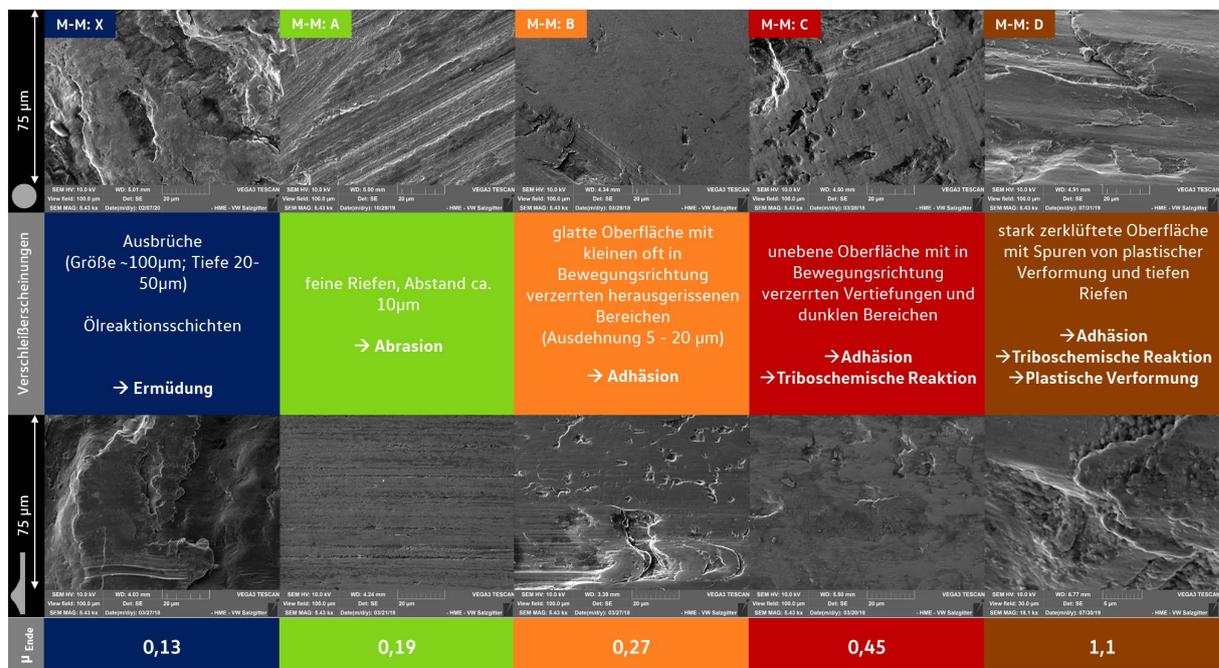


Abb. 96: Verschleißerscheinungen (REM); M-M; Vergleich Kontur und Kugel

Allgemein weisen die Kugel- und Konturoberflächen zu Versuchsende ähnliche Oberflächen auf, wie in Abb. 96 deutlich wird. Dass Grund- und Gegenkörper nach Gleitbeanspruchung im REM oft kaum unterscheidbar sind, wurde bereits von GODET in [36] beschrieben.

Kontur und Kugel zeigen für alle Versuche volumetrischen Verschleiß in der gleichen Größenordnung (Abschnitt 8.1.1). Auf Basis von gleichen Verschleißerscheinungen und ähnlichen Gesamtverschleißmengen kann auch von ähnlichen Verschleißmechanismen für Kontur und Kugel über die gesamte Versuchszeit ausgegangen werden. Die in Abschnitt 8.1.2 beschriebene Verschleißentwicklung gilt damit im System M-M auch für die 100Cr6-Kugel.

8.1.4 Einfluss Konturmaterial und Ölsorte

In den Standardversuchen zeigt sich kein signifikanter Einfluss der verschiedenen Konturmaterialien oder der Ölsorten auf das tribologische Verhalten (Abb. 34 & Abb. 35 & Abb. 39, S. 62 ff.).

Bei den vorliegenden Verschleißmechanismen von Ermüdung bis zum starken Adhäsionsverschleiß verhalten sich die Materialien unter den Standardbedingungen gleich. Solange die Härte der Konturen ähnlich ist, stellt sich demnach auch unabhängig vom Härteverfahren und der Stahlsorte das gleiche Verschleißverhalten ein.

Auch die Ölsorten zeigen keinen auffälligen Einfluss. Für die Schmierung ist vor allem entscheidend, ob und wieviel schmierfähiges Öl beziehungsweise wie viele wirksame Additive vorhanden sind. Die Viskositätsklasse zeigt daher keinen deutlichen Effekt.

Bei gesperrter Rotation der Kugel können sich die Zusammenhänge ändern. Hier kann das Konturmaterial oder die Ölsorte den entscheidenden Unterschied zwischen sehr hohen und geringen Verschleißraten darstellen. Dieser Aspekt hat auf das Systemverhalten bei freier Kugelrotation jedoch keinen Einfluss und wird in Abschnitt 8.3.2 weiterführend diskutiert.

8.1.5 Tribochemie

Die Schichtentstehung in Abhängigkeit der Reibung zu Versuchsende ist in Abb. 97 zusammengefasst. Wie in Abb. 75 und Abb. 76 gezeigt (S. 97 ff.), weisen Kugel- und Konturoberfläche die gleichen Effekte auf. In Abb. 97 sind zur besseren Übersicht nur die Ergebnisse der Kontur angegeben.

Die Oxidation mit zunehmender Reibung ist rot hervorgehoben und zeigt für die Versuche mit sehr hoher Reibung (M-M: C und M-M: D) Sauerstoffgehalte von bis zu 30 m%. Die zunehmende Oxidation korreliert mit höheren Temperaturen. Zusätzlich wird das Material in immer tieferen Bereichen in Bewegungsrichtung verformt, was die Schlifflinien der Konturen zeigen (Abb. 94, S. 119).

Der minimale Sauerstoffgehalt tritt bei Reibwerten um 0,25 also bei Versuchen der Kategorie M-M: A und abrasivem Verschleiß auf. Bei noch geringeren Reibwerten steigt der Sauerstoffgehalt wieder deutlich an, was aufgrund der direkten Korrelation mit einem Anstieg der Elemente Zink, Phosphor, Schwefel und Calcium den Ölreaktionsschichten zugeordnet werden kann.

Die aus der Literatur bekannten Elemente sind auf die Zinkdialkyldithiophosphate (ZDDP) zurückzuführen [76].

Auffällig ist, dass Schwefel noch bei Reibwerten über 0,2 nachweisbar ist, während Zink und Phosphor nur bis etwa 0,2 und Calcium nur bis 0,15 messbar sind.

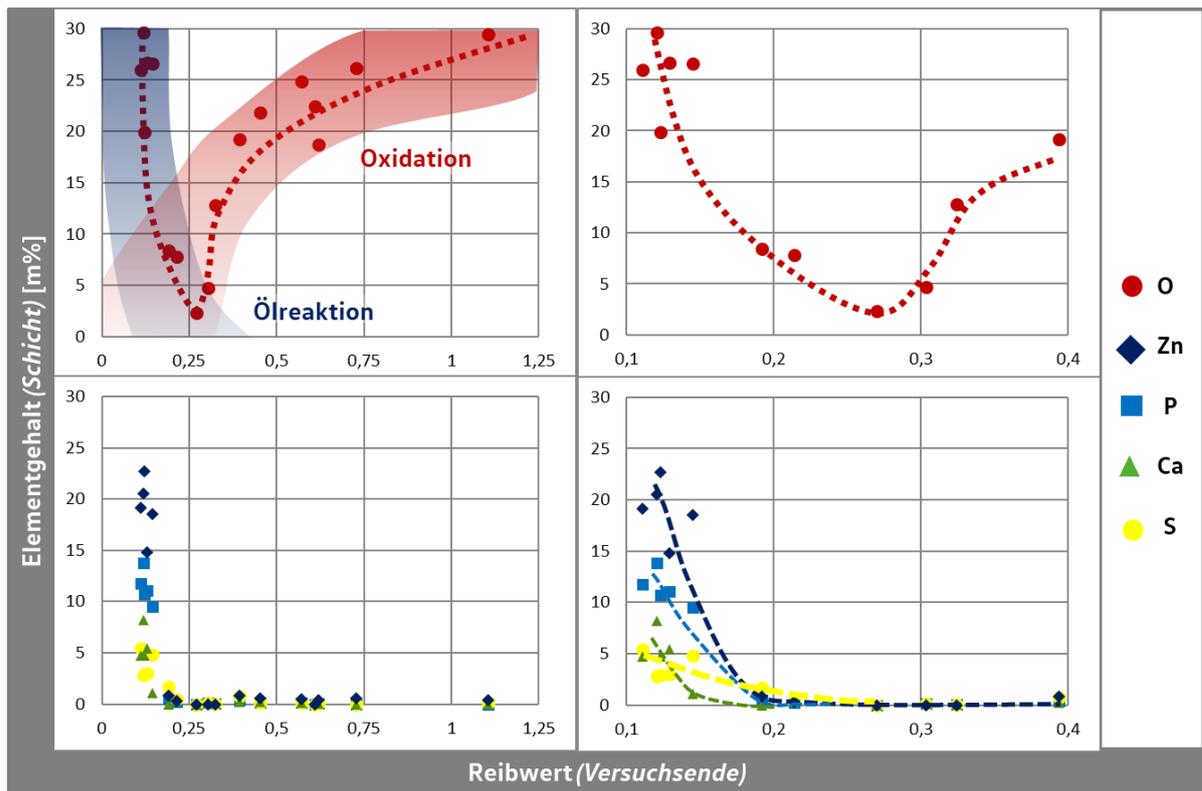


Abb. 97: EDX-Ergebnisse; M-M; Kontur; Übersicht
 Oxidation und Ölreaktionsschichten; Maßstab in den Diagrammen links und rechts variiert

Die Reaktionsschichten senken Reibung und Verschleiß, indem sie die Reibenergie aufnehmen und damit das darunterliegende Material schonen. Im Laufe des Versuchs kommt es stetig zum Abtragen und Neubilden der Schichten [21].

Die Untersuchungen zur Entstehung der Schichten konnten zeigen, dass die Schichten im eingelaufenen Rastsystem nach ca. 10.000 SZ vorhanden sind (Abschnitt 7.1.10).

Stellt man die Ölreaktionsschichten in Abhängigkeit der Verschleißrate zu Versuchsende dar (Abb. 98) zeigt sich außerdem, dass die Schichten nur bei Kombination von großer Ölmenge **und** einer Verschleißrate kleiner $1 \text{ mm}^3 / 1 \text{ Mio. SZ}$ auftreten.

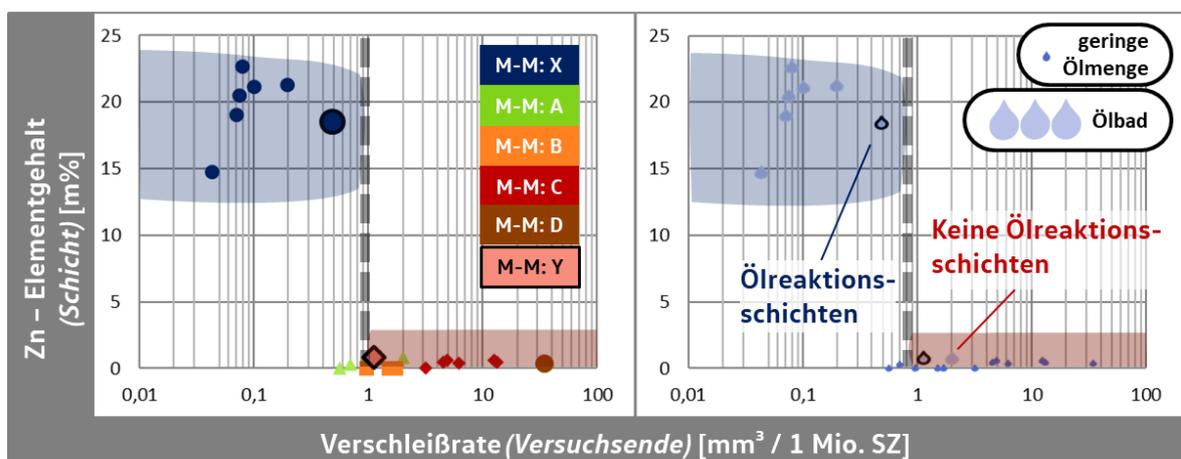


Abb. 98: EDX-Ergebnisse; M-M; Kontur; Ölreaktionsschichten über Verschleißrate

8.1.6 Kurzzusammenfassung (M-M)

Zusammengefasst ergibt sich in Abhängigkeit der Ölmenge eine große Bandbreite von Verschleißmechanismen, die für einen bestimmten Schmierungszustand über längere Zeit stabile Verschleißraten und Reibwerte zeigen. Lediglich Versuche der Kategorie M-M: D weisen zu Versuchsende teilweise instabile Systemwerte auf (Abb. 31, S. 60). Der Übergang der Verschleißmechanismen ist fließend, weswegen, wie in der Literatur [134] beschrieben, eine scharfe Abgrenzung nicht möglich ist.

Für Kontur und Kugel ergeben sich aufgrund der ähnlichen Materialeigenschaften gleiche Verschleißmechanismen, die zu volumetrischen Verschleißraten in gleicher Größenordnung führen. Die Übereinstimmung der Verschleißmechanismen konnte durch ähnliche Verschleißerscheinungen und gleiche Reaktionsschichten belegt werden.

Haupterkennntnis (M-M): Kontur und Kugel zeigen im System M-M in den meisten Fällen gleiche Verschleißmechanismen und verschleifen auf die Masse bezogen gleich stark.

Insgesamt zeigt sich eine große Bandbreite des Systemverhaltens in Abhängigkeit der Schmierungsbedingungen: Im volumetrischen Verschleiß zeigen die Versuche der Kategorie M-M: D mehr als das 20-fache des Verschleißes der Gruppe M-M: X (Abb. 32, S. 61)

Die hier gezeigten Verschleißmechanismen sind im Einzelnen bekannt und Stand der Technik. In dieser Arbeit konnte der fließende Übergang zwischen den Mechanismen im gleichen Tribosystem gezeigt werden. Dabei sind die Systembedingungen (Reibwerte, Temperaturen und Verschleißraten) für alle Versuche bekannt, wodurch eine deutliche Abgrenzung der Entstehungsbedingungen für die einzelnen Mechanismen möglich ist.

Tabelle 19: Zusammenfassung; M-M; Verschleißmechanismus

Kategorie		M-M: X	M-M: A	M-M: B	M-M: C	M-M: D
Anzahl Versuche		45	13	20	9	8
Reibwert (Versuchsende)	MW	0,13	0,22	0,32	0,56	1,07
	MAX	0,13	0,25	0,38	0,80	1,28
Verschleißrate (Versuchsende)	[mm ³ /1 Mio. SZ]	0,22	0,77	1,49	6,52	28,72
	[mm/1 Mio. SZ] = [nm/SZ]	0,08	0,26	0,34	0,88	2,25
Gesamtverschleiß	[mm]	0,12	0,27	0,46	0,54	0,89
Haupteinfluss						

Haupteinfluss ist, wie in Abschnitt 8.1 ausführlich beschrieben, die Schmierungssituation. Gesamtverschleiß, Endverschleißrate und Endreibwert stehen zueinander in Korrelation, was in Tabelle 19 durch die Farbdarstellung der Zahlenwerte gut visualisiert ist.

Ermüdungverschleiß (M-M: X) zeigt im Mittel Verschleißraten von etwa 0,1 nm /Schaltzyklen (SZ) und Reibwerte um 0,13. Dieser Zustand ist an eine gute Schmierungsituation gebunden. Mit Verschlechterung der Schmierungsbedingungen ändern sich die Verschleißmechanismen über Abrasion (M-M: A) zu unterschiedlich starkem Adhäsionsverschleiß (M-M: C bis D). Die einzelnen Verschleißmechanismen können mittels REM-Aufnahmen und EDX-Analysen charakterisiert werden. Dabei können für adhäsiven Verschleiß Reibwerte von über 1 und mittlere Verschleißraten im Bereich von 2 nm / SZ auftreten (Tabelle 19).

Haupterkennntnis (M-M): In Abhängigkeit der Schmierung sind stabile Zustände mit stark unterschiedlichen Reibwerten und Verschleißraten aufgrund verschiedener Verschleißmechanismen möglich. Dabei können die einzelnen Zustände unter gleichen Systembedingungen lange Zeit stabil bleiben und bei Wechsel der äußeren Randbedingungen (Schmierungsstatus) fließend ineinander übergehen. Die unterschiedlichen Zustände wurden in den eingeführten Kategorien M-M: X bis M-M: D zusammengefasst und sind durch die Messdaten bzw. die Ergebnisse der Oberflächenanalysen klar untereinander trennbar. Die Verschleißmechanismen gehen von Ermüdung über Abrasion zu unterschiedlich intensivem Adhäsionsverschleiß über.

Neben unterschiedlichen Oberflächentopografien wird auch die chemische Zusammensetzung der Kontaktflächen durch die unterschiedlichen Verschleißbedingungen geprägt (Abschnitt 8.1.5). So kommt es infolge von adhäsivem Verschleiß zu einer Oxidation der Oberfläche. Dabei werden mittlere Sauerstoffgehalte von bis zu 30 m% (*Kategorie M-M: D*) erreicht. Wie in der Literatur beschrieben, können Eisenoxidschichten je nach Oxidationsstufe den Verschleiß erhöhen oder abmildern [123,134]. Die über breite Reibwerte stabilen Zustände könnten daher auch durch Oxidschichten stabilisiert werden.

Bei geringsten Verschleißraten (*Ermüdung unter Ölbadtschmierung – M-M: X*) sind Reaktionsschichten der Öladditive nachweisbar. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Reaktionsschichten nur unter Zusammenwirkung von Ölbadtschmierung *und* geringen Verschleißraten auftreten (Abb. 98, S. 123).

Die verschiedenen Konturmaterialien sowie die unterschiedlichen Schmierstoffe haben nur einen geringen Einfluss (Abschnitt 8.1.4). Nur bei Sperrung der Kugelrotation zeigen sich Unterschiede in Abhängigkeit von Schmierstoffsorte und Material. Diese Effekte haben im normalen Betrieb (Rotationsfreiheitsgrad gegeben) keinen Einfluss und werden in Abschnitt 8.3.2 separat diskutiert.

Haupterkennntnis (M-M): Unter den normalen Betriebsbedingungen des Tribosystems M-M haben die Variante der Härtung und des Anlassens sowie die Legierung keinen Einfluss auf das Verschleißverhalten, solange die niedriglegierten Stähle nach Wärmebehandlung eine vergleichbare Makrohärte aufweisen. Ebenfalls ist das System tolerant gegenüber einem Wechsel der Viskositätsklasse der genutzten Motorenöle.

8.2 Metall-Keramik-Kontakt: Haupteinfluss Kinematik

Während im System M-M die Schmierungsituation der Haupteinfluss ist, zeigen die Ergebnisse für die Keramikugel keine dominante Korrelation zur Ölmenge. Versuche im Ölbad weisen zwar im Mittel stabilere, leicht geringere Verschleißraten und Reibwerte auf, die extremen Schwankungen in den Verschleißraten korrelieren jedoch nicht mit der Ölmenge (Abb. 99). Es zeigt sich auch kein Zusammenhang zwischen den Verschleißraten und den Reibwerten. Die Reibwerte sind unabhängig von den Verschleißraten stets gering. (Abschnitt 6.3.1; Abb. 50).

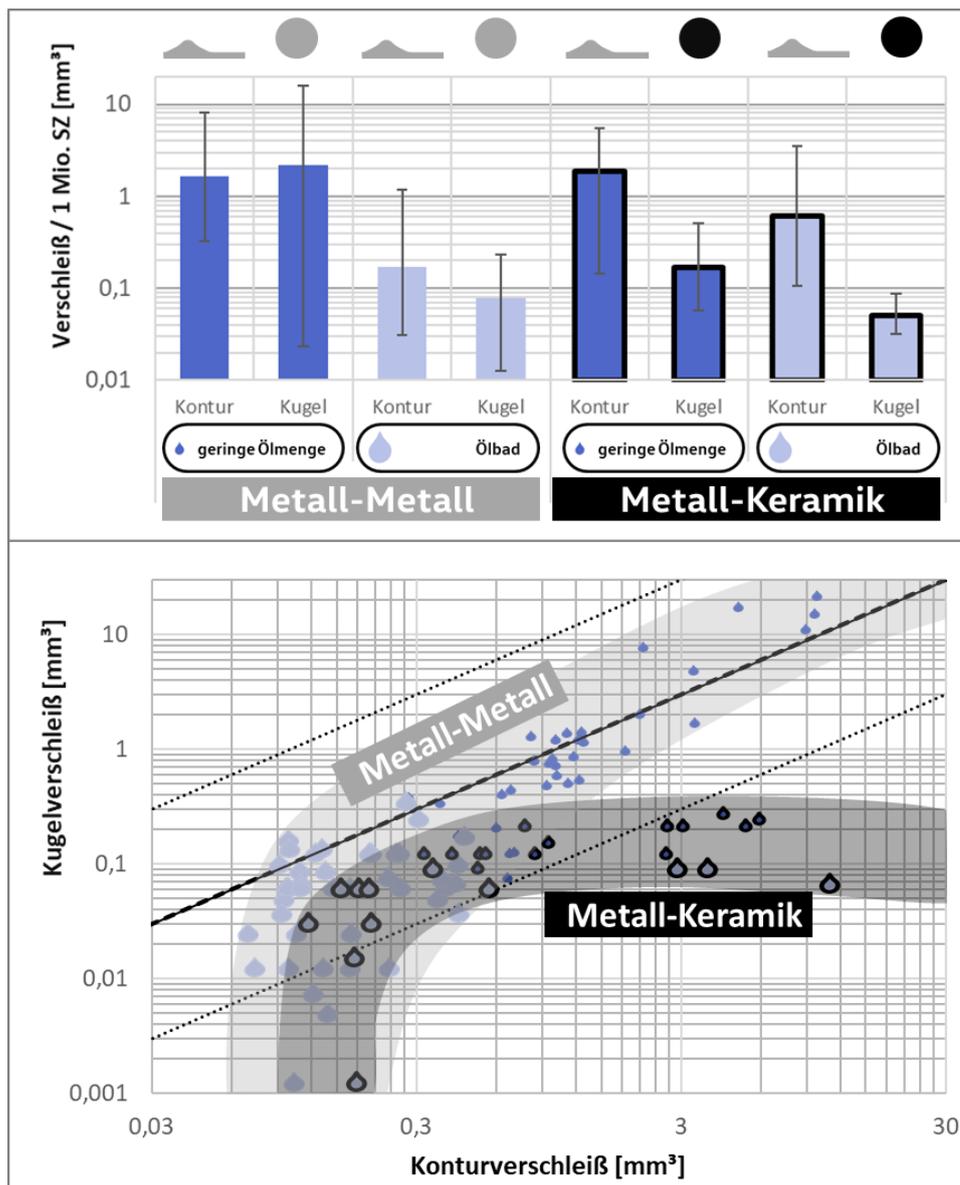


Abb. 99: Systemverschleiß; Vergleich M-M & M-K;

Streubänder (Max. / Min.) angegeben; Symbolgröße entsprechend der Ölmenge

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die Unterschiede zwischen den Systemen werden in der Gegenüberstellung von Kontur- und Kugelgewichtsverschleiß (Abb. 99) unter Berücksichtigung der Ölmenge (dargestellt durch unterschiedlich große Tropfensymbole) im unteren Teildiagramm der Abb. 99 deutlich:

Im System *M-M* zeigen nur Versuche mit Ölbadsschmierung geringen Konturverschleiß, während Mangelschmierung zu hohem Verschleiß von Kontur und Kugel führt. Dagegen ist im System *M-K* unabhängig von der Ölmenge hoher Konturverschleiß möglich. Bei hohem Konturverschleiß ist der Keramikkugelverschleiß vergleichsweise gering.

Im System *M-M* führt eine Mangelschmierung zu adhäsivem Verschleiß in unterschiedlichem Ausmaß (Abschnitt 8.1.1). Im System *M-K* bedingen die unterschiedlichen chemischen Bindungen von Grund- und Gegenkörper (*Metallbindung und kovalente Bindung*) automatisch eine deutlich geringere Adhäsionsneigung [21]. Dieser Aspekt erklärt den geringeren Einfluss der zur Verfügung stehenden Ölmenge.

Aufgrund des geringeren Kugelverschleißes ist der mittlere Gesamtverschleiß (*Kugel + Kontur*) im System *M-K* deutlich geringer. Dies bestätigt den Stand der Technik, wonach der Verschleiß durch den Einsatz von Metall-Keramik Paarungen unter vielen Betriebsbedingungen eine deutliche Verschleißreduktion des Systems bewirkt (siehe Abschnitt 2.4.2).

Im Gegensatz zum Konturverschleiß führt Kugelverschleiß zu keiner starken Beeinträchtigung der Rastfunktion, da sich der Verschleiß auf der im Vergleich viel größeren Kugeloberfläche verteilt. Somit ergibt sich allgemein keine Optimierung der Systemfunktion durch den Einsatz des höherwertigen Materials der Si_3N_4 -Kugel. Die Versuche sind jedoch zum besseren Verständnis der Mechanismen in hochbelasteten Tribosystemen von Interesse.

8.2.1 Kugelkinematik als Ursache für extreme Verschleißunterschiede

Die extrem schwankenden Verschleißraten (Abschnitt 6.3.1) können durch die Kugelkinematik erklärt werden.

Verkürzt zusammengefasst: Eine wälzende Si_3N_4 -Kugel führt unabhängig von der initialen Ölmenge zu sehr geringen Verschleißraten. Gleitet die Keramikkugel, bedingt dies für die meisten Materialkombinationen sehr hohe Verschleißraten. Das Verhalten tendiert dabei immer zu den Extremen. Für die dargestellte Erklärung sprechen eine Reihe von Aspekten, die im Folgenden aufgelistet werden:

1) Ähnliche Beobachtungen in der Literatur

WANG ET AL. [128] konnten in ungeschmierten Verschleißversuchen im Kontakt zwischen gehärtetem Lagerstahl und Si_3N_4 -Kugeln mit unterschiedlich hohen Gleitanteilen einen stark erhöhten abrasiven und adhäsiven Verschleiß der Metalloberfläche durch einen höheren Gleitanteil der Kugelbewegung feststellen.

2) Korrelation von gleitender Kugel mit hohem Verschleiß

Die Sonderversuche mit blockierter und damit *gleitender Kugel bei Ölbadsschmierung* zeigen für die meisten *Material- und Schmierstoffvarianten* sehr hohe Verschleißraten, die mit den

stochastisch auftretenden extrem hohen Verschleißraten der Versuche mit freier Rotation übereinstimmen (Abb. 100). Beide Gruppen weisen trotz sehr hoher Verschleißraten geringe Reibwerte auf.

Die einzige Variante, die auch mit gesperrter Keramikugel keinen extremen hohen Verschleiß zeigt (*DH + A und 5W-30*; siehe Abb. 57, S. 78), weist auch bei freier (undefinierter) Rotation der Keramikugel unter Ölbadenschmierung nie erhöhte Verschleißraten auf (siehe Abb. 58, S. 79). Somit korrelieren die Ergebnisse von gesperrter und freier Kugelrotation. (*bestimmter und unbestimmter Kugelbewegung*)

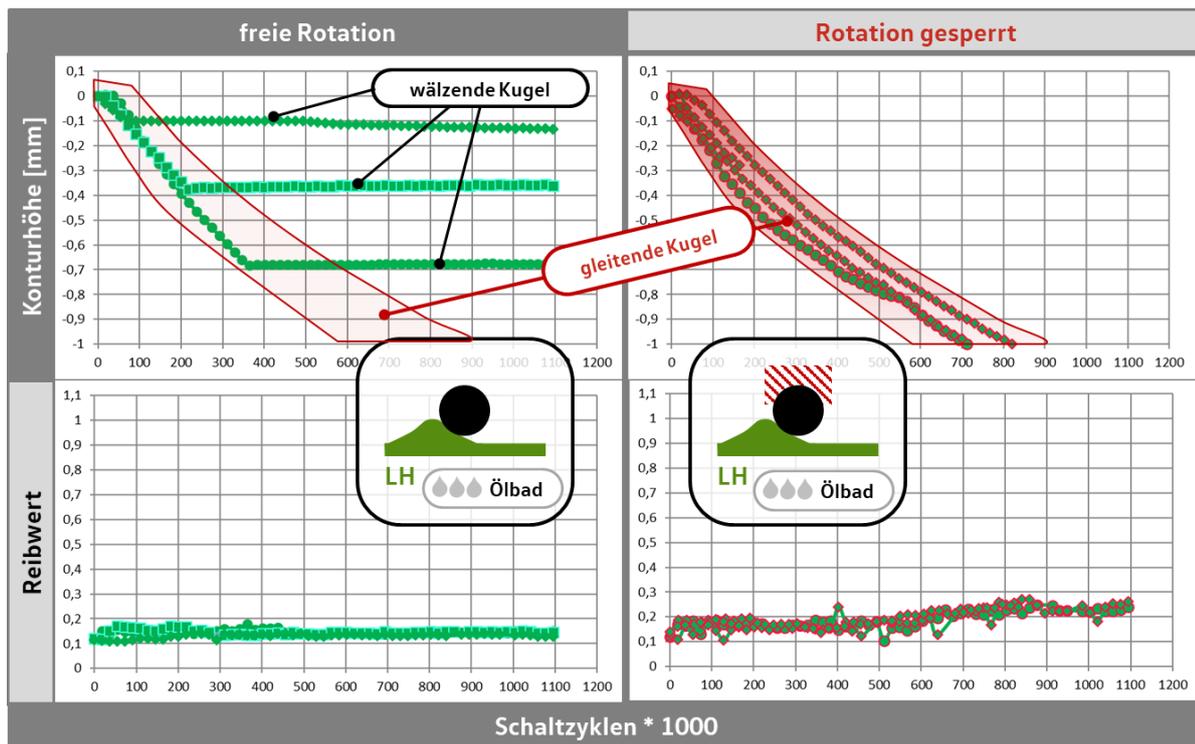


Abb. 100: Tribologisches Verhalten; M-K; Kinematikeinfluss; Ölbad

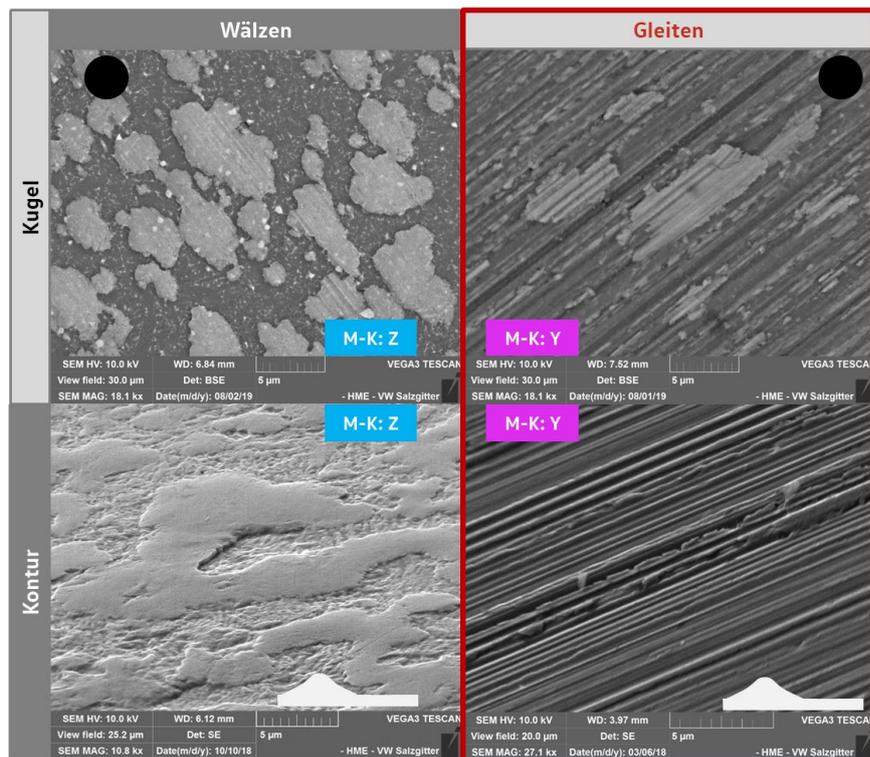
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

3) Verschleißerscheinungen auf den Oberflächen

Versuche mit freier Kugelrotation, die zu Versuchsende extrem hohe Verschleißraten (M-K: Y) zeigen, sind durch die gleichen Verschleißerscheinungen, wie die Versuche mit gesperrter Kugelrotation gekennzeichnet. Dies bestärkt die Theorie der gleitenden Kugelbewegung als Verschleißursache.

Die Oberflächen besitzen (unabhängig von der Ölmenge) sehr feine Riefen mit einem Riefenabstand von ca. 1 μm . Die Riefen sind auf Kugel- und Konturoberfläche anzutreffen (Abb. 101, rechte Seite).

Des Weiteren sind auf der Kugeloberfläche Bereiche mit Eisenauftrag (*helle Bereiche im BSE-Bild*) vorhanden (Abb. 101, obere Zeile), was jedoch auf alle Keramikugeln nach dem Versuch zutrifft und damit nicht unbedingt eine Verschleißursache darstellt.

Abb. 101: REM-Aufnahmen; *M-K*; Kinematikeinfluss

Kontur- und Kugeloberflächen durch Symbole gekennzeichnet

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Tritt zu Versuchsende geringer Verschleiß auf, zeigen sich komplett andere Oberflächen, die leicht von den Versuchen mit hoher Endverschleißrate zu unterscheiden sind. Bei geringer Ölmenge (Abb. 101, linke Seite) können auf Kontur und Kugel markante Auftragsschichten aus den Verschleißpartikeln ausgemacht werden.

Im Ölbad bilden sich bei geringen Endverschleißraten auf beiden Kontaktpartnern Ölreaktionsschichten. Die Schichten können beispielsweise in den Lichtmikroskop-Aufnahmen in Abb. 102 festgestellt werden.

Die Oberflächen in Abb. 102 (*nächste Seite*) geben zusätzlich eindeutige Hinweise auf das Verhalten der Kugel im Versuch. Zum Verständnis ist der Verschleißverlauf in der Abbildung integriert. Der Versuch zeigte während der ersten 400.000 SZ extrem hohen Verschleiß. Für den Rest des Versuchs konnten die Messungen keinen weiteren Verschleiß feststellen (*Kategorie M-K: R*).

Auf der Kugel ist der Negativabdruck der Konturverschleißfläche sichtbar. Dieser Bereich war demnach längere Zeit mit der Geometrie, die sich bis zum Ende der Hochverschleißphase bei etwa 400.000 SZ gebildet hat, im Kontakt. Auf der Kugel ist in diesem Bereich Metallauftrag (*erkennbar durch den metallischen Glanz*) vorhanden, was die EDX-Ergebnisse an den Kera­mikkugeln für die Kategorie *M-K: Y* (*gleitende Kugelbewegung*) widerspiegelt (Abschnitt 7.2.2). Ölreaktionsschichten sind in diesem Bereich nicht erkennbar.

Auf der Konturoberfläche sind zu Versuchsende sowohl Ölreaktionsschichten, als auch Ausbrüche zu finden, die im betrachteten Tribosystem nur bei geringen Verschleißraten unter Öl­badschmierung auftreten (Abschnitt 7.2.4).

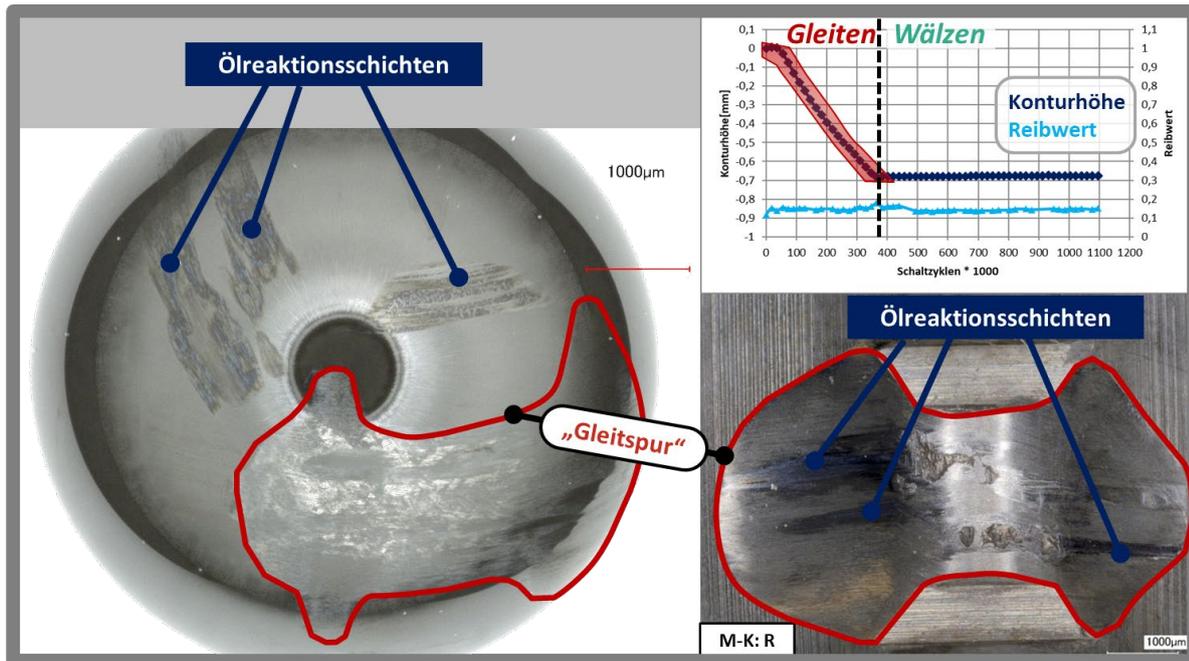


Abb. 102: Kinematikeinfluss; Übersicht Kontur und Kugel

konzentrische dunkle Ringe in Kugelmittle und am Rand sind durch Objektiv bedingte Artefakte

Auch auf der Kugeloberfläche sind Ölreaktionsschichten erkennbar. Diese befinden sich jedoch außerhalb der auffälligen Kontaktspur. Auch diese Beobachtung stützt die Theorie der gleitenden Kugelbewegung als Verschleißursache: Zunächst hatte nur der Bereich mit der auffälligen Gleitspur Kontakt zur Kontur. Das Gleiten führt zu starkem Verschleiß an der Kontur und zu metallhaltigen Übertrag von Konturmaterial bzw. Verschleißpartikeln auf die Kugel (M-K: Y, Abschnitt 7.2.2).

Nach 400.000 SZ führen Veränderungen in den Reibbedingungen der Kontakte zum Wälzen der Kugel (Abschnitt 4.1) und damit zu sehr geringem Verschleiß. Infolgedessen bilden sich auf beiden Kontaktpartnern Ölreaktionsschichten, die stochastisch verteilt überall auf der Kugel zu finden sind.

Wie in Abschnitt 7.1.10 gezeigt, bilden sich die Ölreaktionsschichten der Verschleißschutzadditive bereits nach etwa 10.000 SZ aus, womit die restliche Versuchszeit mit geringen Verschleißraten ausreichend Gelegenheit zur Entstehung der Reaktionsschichten bereitstellt.

4) Berechnungen zum Rollverhalten sowie Hochgeschwindigkeitskamera-Messungen

Die Berechnungen zum Verhalten der Kugel zeigen, dass sich das System, bei anzunehmenden ähnlichen Reibwerten in allen Kontakten, in einem instabilen Zustand zwischen Gleiten und Wälzen bewegt (Abschnitt 4.1).

Durch einen Abgleich mit den gemessenen Verschiebekraftkurven können die Reibbedingungen in allen Kontakten abgeschätzt werden (Abschnitt 4.1). Eine eindeutige Trennung zwischen Gleiten und Wälzen ist dabei nicht möglich, da die Extremfälle zu sehr ähnlichen Reibungsverlusten führen. Sie sind damit energetisch betrachtet ähnlich und somit auch gleich wahrschein-

lich. Die theoretischen Berechnungen konnten durch Messungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bestätigt werden. Dabei schwankt der Gleitanteil innerhalb der aufgenommenen Zeit stochastisch zwischen vollständigem Gleiten und Wälzen.

Stochastisch auftretende lokale Effekte können daher jederzeit zu einem Wechsel der Kinematik und somit auch der Verschleißmechanismen führen.

5) Erklärung für „degressiven Verschleißverlauf“

Alle Versuche des Systems M-K mit Ölbadschmierung zeigen geringe Verschleißraten zu Versuchsende. Wenn starker Verschleiß auftritt, dann zu Versuchsbeginn (siehe z.B. Abb. 100, S. 128). Auch dieses Verhalten kann mit Hilfe der Kinematik erklärt werden. Die wirkenden Mechanismen sind in Abb. 103 beschrieben.

Zu Beginn des Versuchs (Abb. 103 – Phase I) liegt die Kugel im Ölbad am Konturkontakt. Am Konturkontakt herrschen damit ideale Schmierungsbedingungen, während der Federkontakt nur indirekt geschmiert wird. Dies begünstigt ein Gleiten der Kugel zu Versuchsbeginn. Stellt sich ein Gleiten der Kugel ein und die Kugel rotiert folglich nicht, liegt im Kontaktbereich zur Feder ein Haften vor. Um die Kugel wieder in Rotation zu setzen, muss erst das Losbrechmoment an der Feder überwunden werden. Dies stabilisiert das Gleiten gewissermaßen.

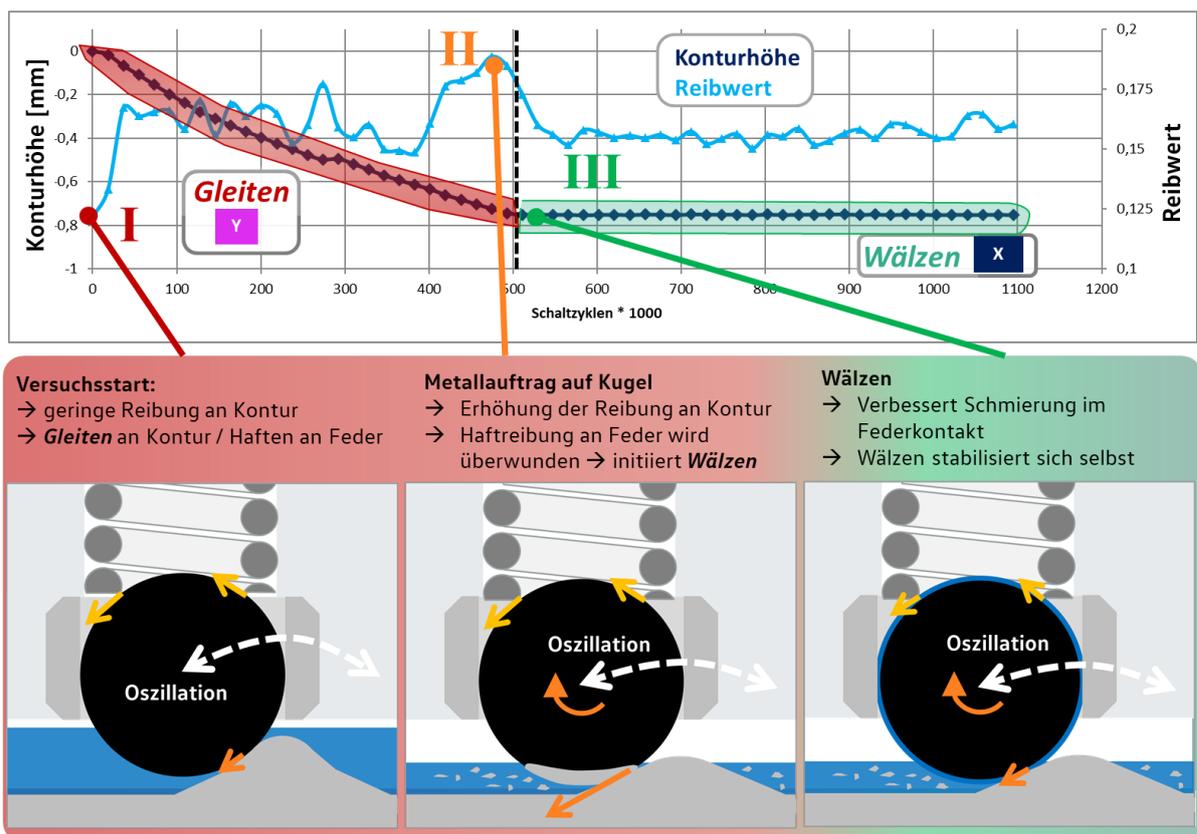


Abb. 103: Kippen des Systemverhaltens; M-K: Y zu X; Zusammenfassung
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Zusätzlich verschlechtert sich die Schmierung im Kontaktbereich der Feder durch Migration des Öls aus dem Kontakt und Mikrobewegungen („Fretting“), was die notwendigen Momente zum Drehen der Kugel mit der Zeit weiter erhöht.

Demgegenüber führt der mit dem Gleiten korrelierende extrem hohe Verschleiß über die Versuchszeit zu einer Zunahme an metallischen Verschleißpartikeln. Die Verschleißpartikel lagern sich teilweise (Abschnitt 7.2.2) auf der Keramikkugel im Bereich der Konturkontaktfläche an (Abb. 103 – Phase II).

Der metallische Auftrag ist gut auf der Keramikkugel in Abb. 102 zu erkennen.

Die Bildung des metallischen Auftrags auf der Kugel ändert wiederum die tribologischen Bedingungen im Kontakt zwischen Kontur und Kugel. Durch den Kontakt zwischen Metall und Metall (anhaftend auf der Kugel) kommt es zu adhäsiver Reibung. Hierdurch entstehen viel höhere Reibkräfte an der Kontur, was die wirkenden Drehmomente auf der Kugel erhöht. Reichen die Kräfte aus, um die Kugel wieder zu rotieren, kann frischer Schmierstoff in den Kontakt zur Feder gebracht werden, weshalb die Kugel nicht wieder in ein Gleiten zurückfällt (Abb. 103 - III). Der zeitliche Verlauf der Reibungszahl (Abb. 103 – oben) zeigt dementsprechend auch kurz vor dem Kippen des Systemverhaltens den maximalen Reibwert. Durch die hohe Reibung im Konturkontakt wird das Wälzen initiiert.

Der gleiche Mechanismus zur Initiierung der Wälzbewegung tritt auch bei geringer Ölmenge auf. Hier sind die Reibwerte vor dem Einsetzen der Wälzbewegung teilweise noch deutlicher erhöht (Abb. 51 & Abb. 52, S. 73 ff.).

6) Ähnliche Effekte bei M-M

Auch bei der Verwendung von Stahlkugeln kann eine klemmende Kugel zu erhöhtem Verschleiß führen, wie in Abschnitt 6.2.6 bereits gezeigt wurde. Die Effekte sind damit in beiden Systemen sehr ähnlich: Unter bestimmten Bedingungen tritt bei gleitender Kugelbewegung sehr starker Verschleiß auf. Hierbei unterscheiden sich zwischen den Systemen nur die Systemparameter (Konturmaterial und Ölsorte), welche das Verhalten zwischen extremem und geringem Verschleiß kippen lassen. Die Zusammenhänge werden in Abschnitt 8.3.2 diskutiert.

Zusammenfassung

Da das Verhalten einer freien Kugel, wie in den Berechnungen (Abschnitt 4.1) gezeigt, nicht vorhersagbar ist, kann die Kinematik nur bei gesperrter Rotation als bekannt angenommen werden. Die eindeutigen Korrelationen zwischen gesperrter Rotation und extrem hohen Verschleißraten sowie die weiteren diskutierten Beobachtungen belegen eindeutig, dass die hohen Verschleißraten durch ein Gleiten der Kugel auf der Kontur bedingt sind. Die Kategorie M-K: Y ist damit eindeutig dem Gleiten der Keramikkugel zuzuordnen. Umgekehrt führt ein Gleiten für die meisten Versuche auch zum Verschleißverhalten und den Verschleißerscheinungen der Kategorie M-K: Y. Hierbei gibt es jedoch in Abhängigkeit von Material und Ölsorte Ausnahmen, bei denen trotz Gleitbewegung geringer Verschleiß auftritt. Diese Ausnahmen werden in Abschnitt 8.3.2 thematisiert.

Im Umkehrschluss führt ein Wälzen der Kugel immer zu geringen Verschleißraten und damit zu Ermüdungverschleiß. Liegt während des gesamten Versuchs ein Wälzen der Kugel vor, sind die Versuche je nach Schmierungssituation den Kategorien M-K: X (Ölbad) bzw. M-K: Z (geringe Ölmenge) zuzuordnen. In beiden Fällen kommt es zu geringem Verschleiß.

Das Systemverhalten ist in Abb. 104 zusammengefasst. Insgesamt ergeben sich für das System M-K die drei Hauptverschleißmechanismen M-K: X, M-K: Y und M-K: Z. Alle weiteren Verschleißverläufe (siehe Abschnitt 6.3.2) entstehen nur durch den Wechsel von Gleiten und Wälzen und liegen im Verhalten zwischen den Extremfällen (Kategorie M-K: R).

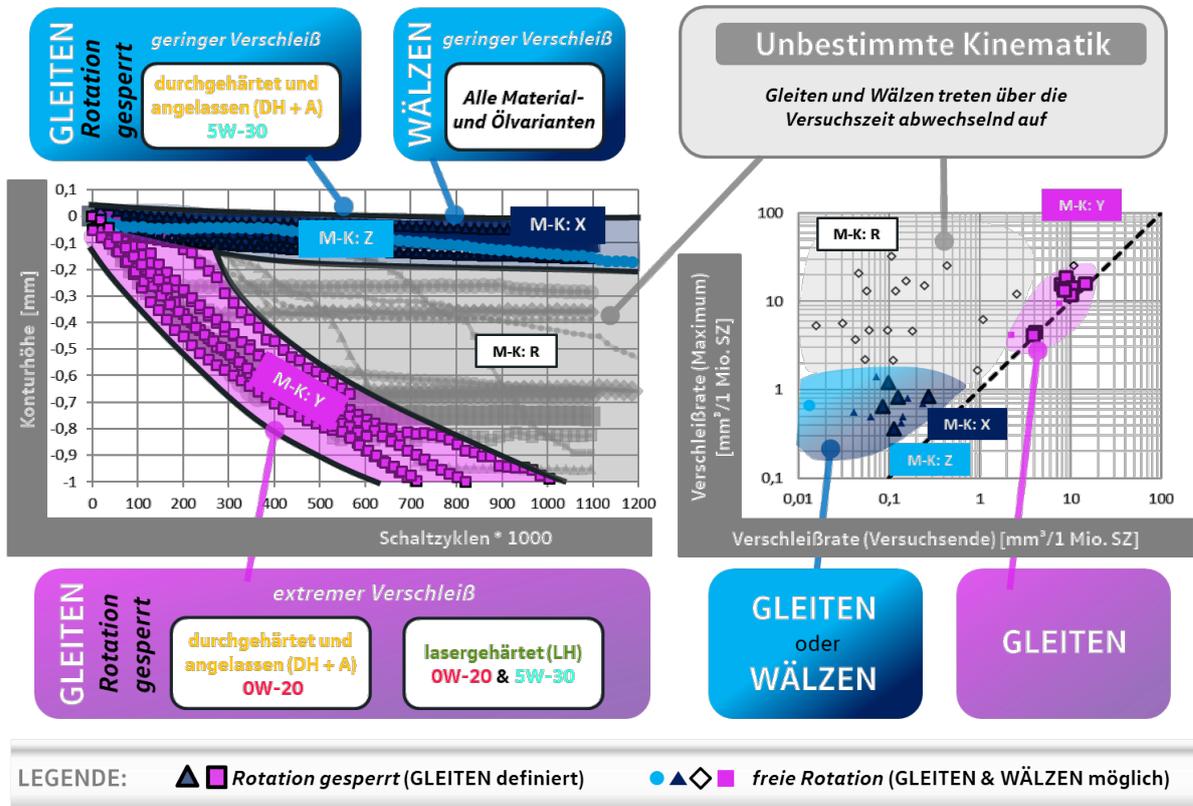


Abb. 104: Systemverhalten; M-K

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

8.2.2 Oberflächenanalyse: Kontur

Die unterschiedlichen Verschleißmechanismen in Abhängigkeit der Kinematik prägen auch die Oberflächen nach Versuch. Tritt geringer Verschleiß auf (wälzende Kugel oder gleitende Kugel mit optimalen Systemeigenschaften), entstehen im Ölbad auf den Konturen die gleichen Verschleißerscheinungen wie im System mit 100Cr6-Kugel (M-M: X).

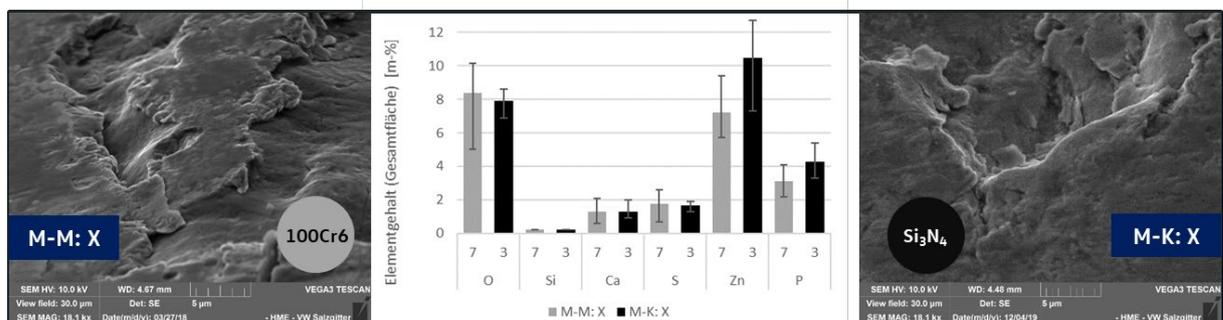


Abb. 105: Übersicht; M-M: X & M-K: X; Oberfläche und EDX-Daten
 Anzahl der Messungen unter den Balken angegeben; Streubänder (Max. / Min.) angegeben

Mit den in dieser Arbeit genutzten Analysemethoden können zwischen den Konturen der Gruppen M-M: X und M-K: X keine Unterschiede festgestellt werden. In beiden Fällen ist die Oberfläche durch Ausbrüche und Ölreaktionsschichten geprägt (Abb. 105).

Dabei ist der Elementgehalt an Zink, Phosphor, Schwefel und Sauerstoff ähnlich, was eine ähnliche Ausprägung der Ölreaktionsschichten beweist.

Für die anderen Kategorien treten neue Verschleißerscheinungen auf, die sich teilweise deutlich von den Kategorien des Tribosystems M-M unterscheiden. Abb. 106 fasst die relevante Verschleißkategorien für die Kontur bei einem Si₃N₄-Gegenkörper zusammen:

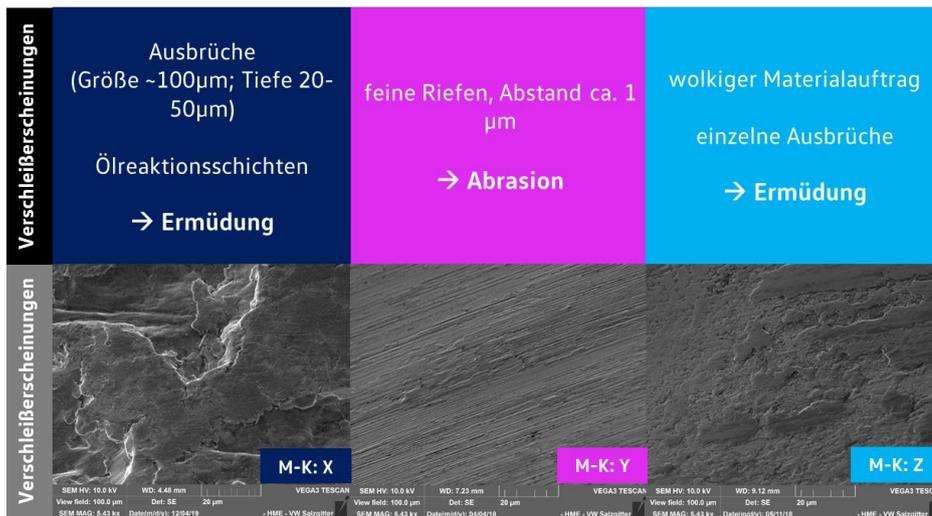


Abb. 106: Verschleißerscheinungen (Kontur); M-K; Übersicht

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Im Unterschied zum System M-M kann bei Verwendung einer Keramikkugel auch bei geringer Ölmenge vergleichsweise niedriger Verschleiß auftreten. Die Versuche der Kategorie M-K: Z zeigen eine glatte Oberfläche mit vereinzelt Ausbrüchen. Auf den Oberflächen wurde eine Transferschicht aus Verschleißpartikeln mit einer Dicke von etwa 200 nm aufgewalzt (siehe Abb. 86, S. 108). Die Transferschicht setzt sich aus den Elementen Eisen, Sauerstoff, Kohlenstoff und Silicium zusammen (Abschnitt 7.2.3) und besitzt damit Anteile aller Elemente des Tribosystems.

Ein Gleiten der Kugel (M-K: Y) erzeugt aufgrund des hohen abrasiven Verschleißes eine glatte Konturoberfläche mit sehr feinen Riefen (Abschnitt 7.2.2). Auch mit 100Cr6-Kugel kann abrasiver Verschleiß auftreten (M-M: A und M-M: Y). Die Oberflächenstruktur ist dabei jedoch deutlich gröber. Im System mit 100Cr6-Kugeln beträgt der Riefenabstand etwa 10 µm, bei Verwendung von Keramikkugeln etwa 1 µm.

Es ist denkbar, dass der größere Härteunterschied zwischen Grund- und Gegenkörper zu einem effizienteren Abrasivverschleiß führt, da weniger Energie in eine Verformung der Oberfläche bzw. die Bildung tiefer Riefen umgesetzt wird. Daher entsteht auch eine insgesamt glattere Oberfläche. Die verschiedenen Varianten des Abrasivverschleißes werden übergeordnet in Abschnitt 8.3.4 diskutiert.

8.2.3 Oberflächenanalyse Kugel

Abb. 107 stellt Verschleißerscheinungen von Keramikugel und Kontur gegenüber: Korrespondierend zum insgesamt geringen Kugelverschleiß sind auf der Keramikugel kaum Verschleißspuren erkennbar. In den meisten Fällen können nur Ölreaktionsschichten oder Metallauftrag auf dem ansonsten unauffälligen Si_3N_4 -Gefüge identifiziert werden.

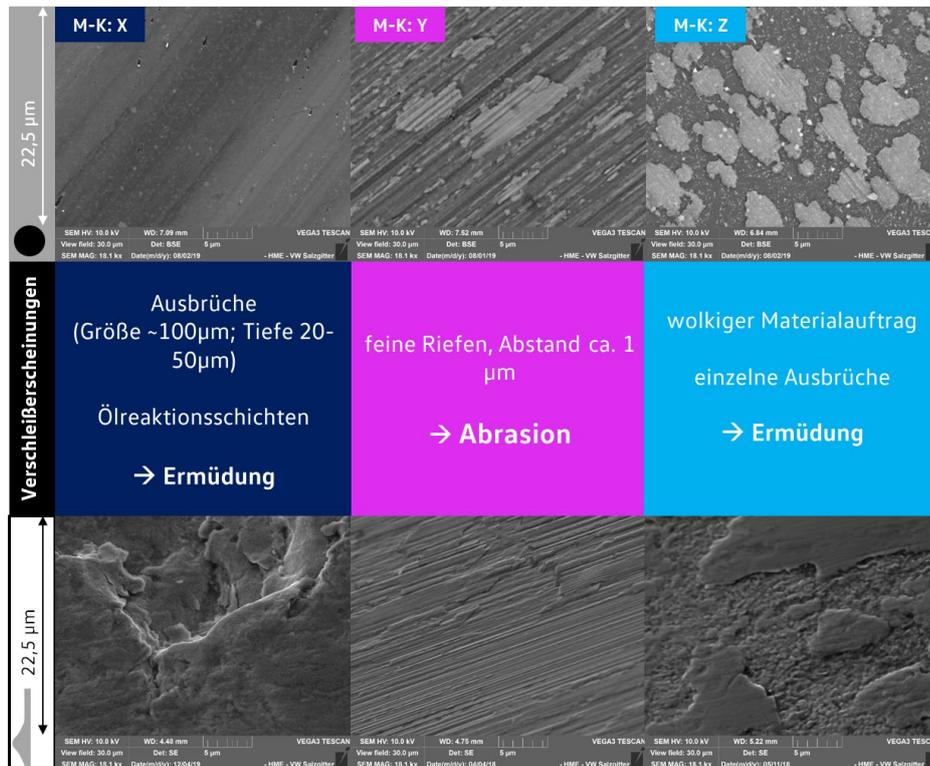


Abb. 107: Verschleißerscheinungen; *M-K*; Kugel & Kontur; Übersicht

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Teilweise kann, insbesondere bei Kugeln der Kategorie *M-K: Y*, eine leichte Riefigkeit festgestellt werden. Die ebenfalls bei dieser Kategorie, also bei extrem hohem Verschleiß durch eine gleitende Kugel, auftretenden feinen Riefen auf der Konturoberfläche sind damit vermutlich das Negativ der Kugeloberfläche. Es kann angenommen werden, dass die Riefen durch Abtrag einzelner Körner der Keramik entstanden sind. Eine plastische Verformung ist aufgrund des spröden Materialverhaltens nicht anzunehmen. Tribochemische Reaktionen werden im hier betrachteten System auf Basis der Literaturrecherche (Abschnitt 2.4.2) nicht als Verschleißursache erwartet: Versuche zur tribochemischen Bearbeitung mit einer ölhaltigen Suspension konnten im Gegensatz zum Einsatz von Wasser als Trägerfluid keinen Abtrag der Keramik feststellen [54].

Denkbare Mechanismen für den Kugelverschleiß sind eine lokale Ermüdung der Keramikoberfläche oder auch abrasiver Verschleiß in Form von Mikrobrechen oder Mikroermüden (siehe Abschnitt 2.2.2). Nach [134] ist die Abrasionsfestigkeit von Keramiken aufgrund der geringen Bruchzähigkeit nicht im gleichen Maße wie die Härte erhöht (siehe Abb. 9, S. 27). Auch ein Einfluss harter Verschleißpartikel (z.B. Carbide) ist möglich.

Auffällig ist, dass alle Kugeln nach dem Kontakt einen fragmentierten Auftrag vom Gegenkörper aufweisen (Abschnitt 7.2.4; Abb. 83). Fragmentierter Auftrag auf Si_3N_4 nach Kontakt mit Stahl wurde in der Literatur häufig beobachtet [117].

Die Eisenoxidhaltigen Schichten stammen entweder direkt von der Konturoberfläche oder wurden durch Verschleißpartikel im Kontaktbereich gebildet. Bei geringer Ölmenge und hohem Gesamtverschleiß treten die höchsten Konzentrationen an Eisen auf den Kugeln auf, was für eine Schichtbildung durch Verschleißpartikel spricht. Obwohl die geringe Adhäsionsneigung im Vergleich zum System M-M zu viel geringeren Reibwerten bei Mangelschmierung führt, reichen die Bindungskräfte demnach aus, um bei allen gelaufenen Kugeln eisenhaltigen Auftrag auf den Kugeln zu erzeugen.

8.2.4 Vergleich von Kugel- und Konturverschleiß

Für das System M-K konnte, wie in Abschnitt 8.2.1 dargelegt wurde, die Kugelkinematik als dominierender Verschleißeinfluss bestimmt werden. Daneben konnten noch weitere Unterschiede zum System M-M festgestellt werden. Während im System M-M Kontur und Kugel in gleichem Maße verschleifen, zeigen die Keramikugeln im Vergleich zur Kontur etwas geringeren Verschleiß, was die Gegenüberstellung des volumetrischen Verschleißes in Abb. 59 (Abschnitt 6.3.4, S. 80) belegt. In Abb. 60 (S. 80) wird zusätzlich deutlich, dass die Kugeln bei Ölbadsschmierung deutlich weniger als bei Mangelschmierung verschleifen, obwohl die Ölmenge auf den Konturverschleiß, wie bereits betrachtet, nur einen untergeordneten Einfluss hat.

Daraus kann geschlossen werden, dass für Kontur und Kugel unterschiedliche Verschleißmechanismen wirken müssen. Der extreme Konturverschleiß bei den Versuchen der Gruppe M-K: Y wird in seiner Höhe nicht durch die Ölmenge geprägt. Wie die Oberflächenanalysen in Abschnitt 7.2.2 belegen, tritt an der Kontur bei diesen Versuchen abrasiver Verschleiß durch die härtere Kugeloberfläche oder harte Verschleißpartikel auf.

Der Verschleiß an den Kugeln zeigt meist keine Spuren von Abrasion. Hier kann in Anlehnung an [134] von einem lokalen Herausbrechen einzelner Bestandteile der Keramik aufgrund der geringen Duktilität ausgegangen werden. Von Si_3N_4 -Wälzlagerkugeln ist bekannt, dass bei Pressungen über 6 GPa ein frühzeitiges ermüdungsbedingtes Versagen durch das Herausbrechen einzelner Körner stattfindet [126]. Im betrachteten System liegen die Pressungen initial deutlich über diesem Grenzwert (siehe Abschnitt 4.2).

Eine Schmierung senkt die Belastung der Oberfläche und damit auch vermutlich das Risswachstum. Zum einen, weil die auftretenden Scherspannungen durch den Schmierfilm reduziert werden, zum anderen weil der Schmierstoff harte Verschleißpartikel aus dem Kontakt bringt und auch damit die Belastung auf den Kugeln reduziert. Für die Konturoberfläche spielen die Verschleißpartikel hingegen keine Rolle, da die Kugel in jedem Fall ausreichend hart ist, um die Konturoberfläche anzugreifen.

8.2.5 Kurzzusammenfassung (M-K)

Für den Rastmechanismus mit Si_3N_4 -Kugel (M-K) ergibt sich im Vergleich zum System M-M insgesamt geringerer Kugelverschleiß. Der Konturverschleiß liegt im Mittel sehr ähnlich zu den Ergebnissen mit 100Cr6-Kugel (M-M), zeigt aber unabhängig von der Ölmenge extreme Schwankungen. Der Reibwert bleibt in fast allen Fällen aufgrund der geringen Adhäsionsneigung zwischen Metall und Keramik gering. Nur intensiver Metallübertrag auf die Kugel kann zu höheren Reibwerten führen.

Die extremen Schwankungen können auf das kinematische Verhalten zurückgeführt werden, wobei eine gleitende Keramikugel zu sehr hohen Verschleißraten neigt und ein Wälzen in allen Fällen zu geringem Verschleiß führt. Dieser Aspekt wird ausführlicher in Abschnitt 8.3 betrachtet.

Hoher Verschleiß ist im System M-K immer auf Abrasion zurückzuführen.

Haupterkennntnis (M-K): Im Rastsystem mit Si_3N_4 -Kugel neigt diese aufgrund der geringen adhäsiven Bindungskräfte zwischen Metall und Keramik stärker zu einer Gleitbewegung. Das Gleiten der Kugel führt in den meisten Fällen aufgrund der höheren Härte der Keramikugel zu extrem hohem abrasivem Verschleiß bei geringen Reibwerten.

Haupterkennntnis (M-K): Gleichzeitig sorgt die geringe adhäsive Bindung zwischen Metall und Keramik bei einer Wälzbewegung für geringe Verschleißraten und macht sehr niedrigen Verschleiß trotz Mangelschmierung möglich.

Haupterkennntnis (M-K): Das kinematische Verhalten der Kugel schwankt stochastisch zwischen Gleiten und Wälzen. Somit können innerhalb eines Versuchs sowohl extrem hohe, als auch sehr geringe Verschleißraten auftreten. Dieser Effekt dominiert das Systemverhalten und ist nicht vorhersagbar.

Bei den Verschleißerscheinungen sind sowohl Gemeinsamkeiten, als auch Unterschiede zum System M-M erkennbar: Die Bildung von Ausbrüchen sowie Ölreaktionsschichten (bei geringen Verschleißraten in Kombination mit ausreichender Schmierstoffverfügbarkeit) treten im System M-K und im System M-M gleichermaßen auf. (siehe Abschnitt 8.1)

Ansonsten unterscheiden sich die Verschleißerscheinungen stark von den Kategorien mit Metallkugel. Bei geringem Verschleiß unter Mangelschmierung sind die Oberflächen durch einen Auftrag der Verschleißpartikel geprägt. Hoher Verschleiß zeigt eine sehr fein geriefte Oberfläche, die sich mikroskopisch durch deutlich schärfere und feinere Riefen von der Abrasion im System M-M mit 100Cr6-Kugeln (Abschnitt 7.1.2) abhebt.

8.3 Gesamtsystem

In den beiden vorangegangenen Abschnitten wurden vor allem die Unterschiede zwischen Metall-Metall (M-M) und Metall-Keramik (M-K)-Systemen betrachtet und dabei gezeigt, dass jeweils unterschiedliche Verschleißmechanismen das Verhalten des Systems dominieren.

Einige Aspekte können jedoch übergeordnet für beide Materialgruppen zusammengefasst werden. Dazu werden die wichtigsten Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln zunächst für beide Materialkombinationen kurz beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf dem für die Funktion relevanten Konturverschleiß. Zur Einordnung der Ergebnisse werden die in den Abschnitten 6.2.4 und 6.3.2 definierten Einteilungen der Versuche in Verschleißkategorien genutzt. Im weiteren Verlauf werden übergeordnete Fragestellungen diskutiert.

8.3.1 Konturverschleiß – Vergleich M-M und M-K

Für beide Varianten ergibt sich im Mittel trotz unterschiedlicher Verschleißmechanismen ein ähnlicher Gesamtverschleiß der Kontur. Zu Versuchsbeginn kommt es aufgrund der hohen Initialpressung in jedem Fall zu einem starken Einlaufen der Kontur (Abschnitt 8.1.2). Im weiteren Verlauf entsteht im System M-M in Abhängigkeit der Ölmenge unterschiedlich hoher Konturverschleiß. Die Kugel verschleißt dabei in der gleichen Größenordnung (Abschnitt 8.1.6).

Im System M-K hat die Ölmenge, wie in Abschnitt 8.2 beschrieben, aufgrund der geringeren Adhäsionsneigung kaum Einfluss auf den Konturverschleiß. Hoher Konturverschleiß entsteht hier durch ein Gleiten der Kugel, unabhängig von der initialen Ölmenge (Abschnitt 8.2.1).

Der mittlere Gesamtverschleiß der Kontur bewegt sich für beide Systeme in der gleichen Größenordnung, wie Abb. 108 verdeutlicht:

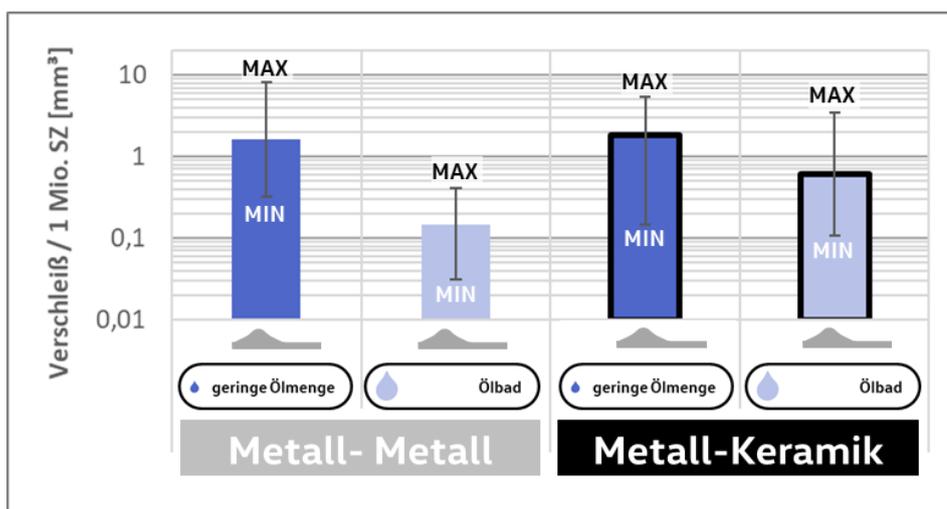


Abb. 108: Konturverschleiß (Vol.); Vergleich M-M & M-K (siehe Abb. 99)
Streubänder (Max. / Min.) angegeben

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

8.3.2 Kugelkinematik und instabiles Systemverhalten

Im System M-K wird das Verschleißverhalten durch die Kugelkinematik bestimmt. Eine gleitende Kugel führt in den meisten Fällen zu starkem abrasivem Verschleiß (Tabelle 20), was durch Sonderversuche mit gesperrtem Rotationsfreiheitsgrad nachgewiesen wurde.

Eine der getesteten Kombinationen aus Schmierstoff und Material bildet hier eine Ausnahme: Angelassene Materialien ($DH + A$, $LH + A$) in Kombination mit höherviskosem Öl ($5W-30$ bei 90 °C bzw. $0W-20$ bei Raumtemperatur) zeigen auch bei gleitender Kugelbewegung geringen Verschleiß (Abb. 58, S. 79). Für geringen Verschleiß sind demnach sowohl das optimale Konturmateriale, als auch das höherviskose Öl notwendig.

Der Stichversuch des niedrigviskosen Öls bei verminderter Öltemperatur (45 °C) zeigt, dass die Viskosität hier der entscheidende Faktor ist und eventuell vorhandene Unterschiede in der Additivierung des Öls keinen Einfluss haben (siehe Abschnitt 6.5.2).

Tabelle 20: Systemverhalten; M-K: Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Konturmateriale	42CrMoS4			100Cr6	42CrMoS4		100Cr6
Härtung / Gefüge	LH	LH + A	DH + A	DH + A	LH	DH + A	DH + A
Ölbad	0W-20 (90° C)			5W-30 (90° C)		0W-20 (45° C)	
dynamische Viskosität [mPas]	8,03			11,90		33,44	
Si ₃ N ₄ -Kugel Rotation gesperrt	M-K: Y (extremer Verschleiß)				M-K: X (geringer Verschleiß)		

Kombiniert man das verschleißresistentere angelassene Material mit niedrigviskosem 0W-20 oder höherviskoses 5W-30 mit lasergehärteten Konturen (LH), führt dies jeweils zu hohen Verschleißraten. Nur die Kombination aus optimaler Ölviskosität und optimalem Werkstoff liefert geringen Verschleiß unter Extrembedingungen. Wird ein Parameter geändert, kippt das Systemverhalten zu hohen Verschleißraten. Dabei werden dann unabhängig vom geänderten Parameter (Öl oder Viskosität) gleich hohe Verschleißraten erreicht (Abb. 57, S. 78).

Das System befindet sich daher anscheinend nah an einem kritischen Grenzpunkt, an dem sich das Verschleißverhalten durch geringfügige Änderungen von Systemeigenschaften schlagartig verschlechtert. Dieser Effekt dominiert, wie in Abschnitt 8.2 beschrieben, das Systemverhalten mit Keramikugel (M-K), da es auch bei freier (undefinierter) Kugelrotation aufgrund der geringen Reibkräfte zwischen Kontur und Kugel zum Gleiten der Kugel und damit zum extrem hohen Verschleiß kommen kann.

Analog zu Tabelle 20 sind die Ergebnisse für gesperrte 100Cr6-Kugel in Tabelle 21 dargestellt:

Tabelle 21: Systemverhalten; M-M: Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Konturmateriale	42CrMoS4			100Cr6	42CrMoS4		100Cr6
Härtung / Gefüge	LH	LH + A	DH + A	DH + A	LH	DH + A	DH + A
Ölbad	0W-20 (90° C)			5W-30 (90° C)			
100Cr6-Kugel Rotation gesperrt	M-M: Y (extremer Verschleiß)		M-M: X (geringer Verschleiß)				

Auch bei Verwendung von 100Cr6-Kugeln (M-M) zeigen sich mit gesperrter Kugelrotation ähnliche Effekte, welche bei freier Kugelrotation jedoch nicht auftreten und somit das Systemverhalten nicht dominieren. (Tabelle 21)

Der erhöhte Verschleiß bei gesperrter Rotation der 100Cr6-Kugel (*Kategorie M-M: Y*) tritt zudem nur bei einer Material- und Schmierstoffkombination (*LH und OW-20*) auf, während alle anderen Varianten trotz der gleitenden 100Cr6-Kugel vergleichsweise geringe Verschleißraten (*Kategorie M-M: X*) aufweisen. (Tabelle 21)

Der für den hohen Verschleiß verantwortliche Mechanismus ist vergleichbar mit den Effekten im System M-K mit Keramikugel: Treten infolge der gesperrten Kugelrotation hohe Verschleißraten auf, entstehen unabhängig vom Kugelmateriale sehr glatte Konturoberflächen mit feinen Riefen, die auf Abrasion schließen lassen.

Da auch die 100Cr6-Kugel eine etwas höhere Härte als die Konturen aufweist (Abb. 13, S. 43), kann es zum hohen Abrasivverschleiß an der Kontur kommen, während die 100Cr6-Kugel in diesem Fall vergleichsweise wenig verschleißt. Dies zeigt die Gegenüberstellung von Kontur- und Kugelverschleiß in Abb. 109. Der Kugelverschleiß für die Kategorie M-M: Y befindet sich deutlich außerhalb des schraffierten Bereichs, in welchem die Versuche der anderen Kategorien des Systems M-M liegen.

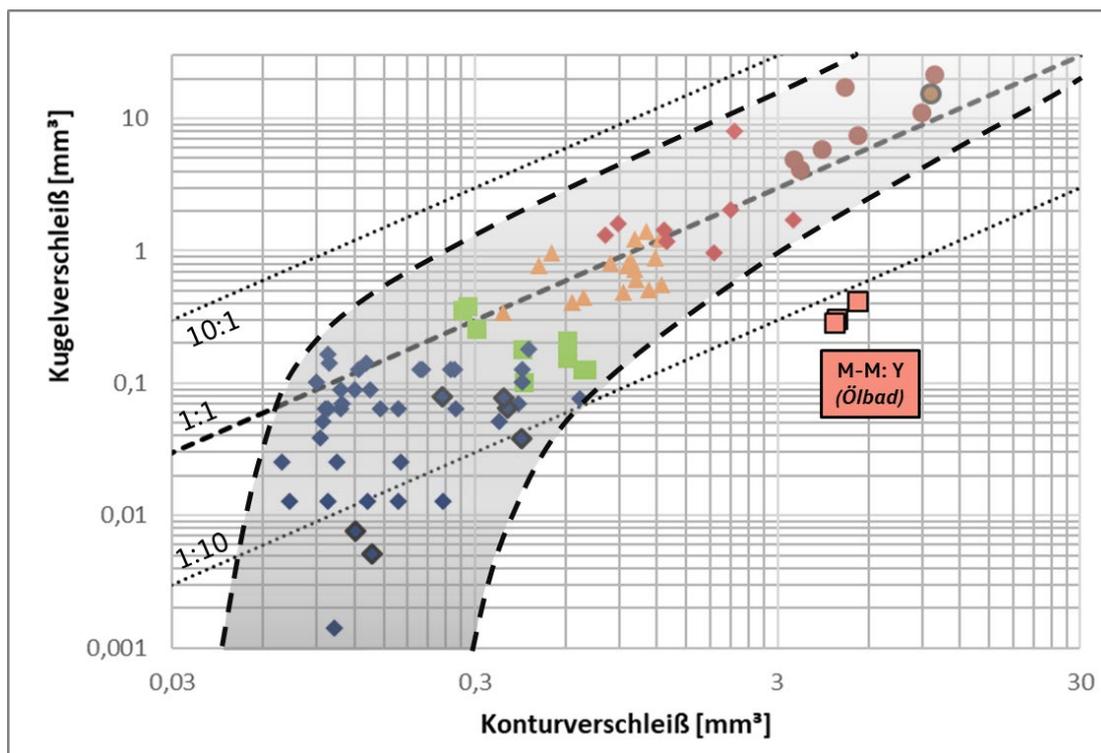


Abb. 109: Systemverhalten; M-M; Kugel- und Konturverschleiß; Kinematikeinfluss
Versuche mit gesperrter Rotation durch schwarzen Rahmen markiert; [Vgl. Abb. 91]

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Im System M-M zeigt nur die Variante, bei der die ungünstigen Systembedingungen (*geringe Viskosität und ungünstiges Material*) kombiniert werden, dieses Verhalten. Das System M-M weist daher eine deutlich geringere Anfälligkeit gegenüber dem extremen Verhalten und damit eine größere Stabilität bei gesperrter Kugelrotation auf.

Für die Standardversuche mit freier 100Cr6-Kugel konnte dieses Verhalten nicht beobachtet werden. Somit spielt der extrem hohe abrasive Verschleiß bei erzwungener Gleitbewegung (*Kategorie M-M: Y*) für den Rastmechanismus mit Metallkugel keine Rolle und wurde in 8.1 nicht betrachtet. Bei Verwendung der Keramikugel dominiert der extrem hohe Verschleiß, wie in Abschnitt 8.2 beschrieben, das Systemverhalten. Da bei den Versuchen der Kategorie M-M: Y Ähnlichkeiten zum extremen Verschleiß im System M-K auffallen, werden die Gemeinsamkeiten und Unterschieden im Folgenden betrachtet.

Warum tritt der starke abrasive Verschleiß bei freier Kugelrotation nur im System M-K auf?

Im System M-M mit Metallkugeln wirkt sich die stärkere Neigung zur adhäsiven Bindung positiv aus. Kommt es zum Gleiten der Kugel mit erhöhtem Verschleiß entstehen auch höhere Reibkräfte im Kontakt zwischen Kontur und Kugel, die einen Übergang zur Wälzbewegung begünstigen. Dieses Verhalten wird im Folgenden anhand von Versuchsdaten beschrieben.

Dazu ist ein Vergleich von gleitender Keramik- und gleitender Stahlkugel in Abb. 110 dargestellt. Beide Varianten zeigen zu Beginn sehr hohe Verschleißraten.

In Abb. 110 ist zu beachten, dass die Keramikugel in diesem Versuch (Abb. 110 – M-K: R) rotieren kann, während die Metallkugel durch ein Festsetzen der Rotation zum Gleiten gezwungen wird.

Aufgrund der vorliegenden Reibbedingungen stellt sich im Versuch mit Keramikugel über lange Zeit selbstständig eine *Gleitbewegung* ein. Durch eine Zunahme an Reibung im Bereich der Kontur infolge des Übertrags von Metall auf die Keramikkugeloberfläche kippt das Systemverhalten in diesem Versuch bei ca. 500.000 SZ zu einem *Wälzen* mit sehr geringem Verschleiß. (*Dieses Verhalten wurde am Beispiel des hier betrachteten Versuchs in Abschnitt 8.2.1 (Abb. 103) diskutiert.*)

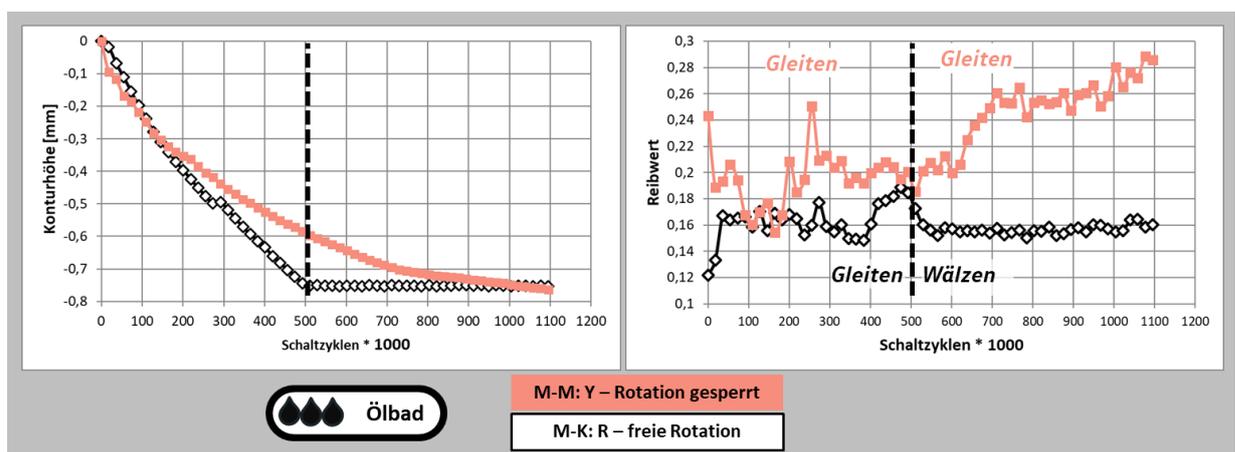


Abb. 110: Gegenüberstellung; M-M: Y & M-K: R (siehe Abb. 103)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Beide Versuche in Abb. 110 zeigen innerhalb der ersten Versuchshälfte extrem hohen abrasiven Verschleiß aufgrund der gleitenden Kugelbewegung. Der Vergleich der Reibwerte während dieser Zeit ergibt deutlich höhere Reibkräfte für die Metallkugel (M-M: Y). Durch die deutlich höheren Reibkräfte wirken auf die Kugel vergleichsweise hohe Drehmomente, die ohne den gesperrten Rotationsfreiheitsgrad sehr wahrscheinlich

zu einer selbstständigen Rotation und damit auch zu deutlich geringeren Verschleißraten führen würden. An dieser Stelle machen die stark unterschiedlichen adhäsiven Bindungen zwischen Metall und Keramik den entscheidenden Unterschied aus: Nur aufgrund der geringen Reibkräfte während der Hochverschleißphase kann die „effiziente spanende Bearbeitung“ der Kontur durch die Keramikugel ohne ein Festhalten der Kugel bzw. ein Sperren des Rotationsfreiheitsgrades aufrechterhalten werden.

Auch wenn der extrem hohe Verschleiß durch die gleitende 100Cr6-Kugel im Standardsystem mit Kugelfreiheitsgrad nicht auftritt, zeigen die Ergebnisse Unterschiede zwischen den Konturmaterialien auf, die mit den Ergebnissen der Versuche mit Keramikugel (*auch mit freier Rotation*) korrelieren (Tabelle 22).

Für beide Kugelmaterialien lässt sich beobachten: *lasergehärtetes Konturmaterial ohne nachträgliches Anlassen (LH)* ist anfälliger gegenüber extrem hohen Verschleißraten (M-M: Y und M-K: Y). Die Grenze für extremen Verschleiß liegt jeweils zwischen Konturen aus 42CrMoS4 mit und ohne nachträglichem Anlassen.

Tabelle 22: Gesamtsystem; Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Konturmaterial	42CrMoS4			100Cr6	42CrMoS4			100Cr6
Härtung / Gefüge	LH	LH + A	DH + A	DH + A	LH	DH + A	DH + A	DH + A
 Ölbad	0W-20 (90° C)				5W-30 (90°C)			
dynamische Viskosität [mPas]	8,03				11,90			
Si ₃ N ₄ -Kugel <i>Rotation gesperrt</i>	M-K: Y (extremer Verschleiß)						M-K: X (geringer Verschleiß)	
100Cr6-Kugel <i>Rotation gesperrt</i>	M-M: Y (extremer Verschleiß)	M-M: X (geringer Verschleiß)						

Für beide Kugelvarianten gilt ebenfalls: Neben dem Konturmaterial hat auch die Ölviskosität einen entscheidenden Einfluss. Eine Veränderung der Ölviskosität kann bei beiden Kugelmaterialien zwischen extrem hohem und geringem Verschleiß (M-*: Y und M-*: X) entscheiden. An dieser Stelle wird der Systemcharakter des Verschleißverhaltens sehr deutlich. Alle Eingangsparameter des Systems (*Temperatur, Werkstoffwärmebehandlung etc.*) können einen starken Einfluss auf das Verhalten haben. Dabei zeigt sich auch, wie wichtig eine tribologische Prüfung unter realen Systembedingungen sowie eine Sensitivitätsanalyse der Parameter insbesondere für hochbelastete tribologische Systeme ist. In einem vereinfachten Modellversuch würden die extremen Einflüsse der Parameter auf das Systemverhalten nicht auftreten.

Haupterkennntnis (System): Eine gleitende Kugelbewegung kann sowohl bei Verwendung von Keramikugeln, als auch im System M-M mit Metallkugeln zu extrem hohen Verschleißraten führen. Während sich der Zustand der gleitenden Kugel im System M-K häufig selbstständig einstellt, kann er für die 100Cr6-Kugel nur künstlich durch ein Sperren der Rotation erzeugt werden.

Durch die höheren adhäsiven Kräfte haftet die 100Cr6-Kugel stärker an der Kontur, was zu einer Kugelrotation führt und somit das Gleiten verhindert.

Haupterkennntnis (System): Aufgrund der hohen Belastungen im betrachteten Tribosystem (hohe Dynamik und sehr hohe Kontaktdrücke) befindet sich das System zum Teil sehr nah an einer kritischen Grenze, bei der geringe Verschleißraten zu extrem hohen Verschleißraten durch geringe Änderungen der Eingangsparameter kippen. Diese Effekte können nur auf Basis der hier genutzten realitätsnahen Systembedingungen abgebildet werden.

8.3.3 Einfluss der Wärmebehandlung auf die Robustheit des Systems

In den Abschnitten 8.3.1 und 8.3.2 wurde gezeigt, dass die Wärmebehandlung des Konturmateri- als unter Extrembedingungen (*gesperrte Kugelrotation*) neben der Ölviskosität der entscheidende Faktor zwischen sehr hohen und geringen Konturverschleißraten sein kann. Dies gilt für beide Gegenkörper (*Metall- und Keramikugel*), weshalb die Unterschiede eindeutig dem Konturmaterial zugeordnet werden können. Zur besseren Übersicht sind die bereits in Tabelle 22 diskutierten Einflüsse zusammen mit der mittleren Härte der Konturen und der Wärmebehandlung in Tabelle 23 zusammengefasst.

Tabelle 23: Gesamtsystem; Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation; Wärmebehandlung
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Konturmaterial	42CrMoS4			100Cr6	42CrMoS4			100Cr6
Härtung / Gefüge	LH	LH + A	DH + A	DH + A	LH	DH + A	DH + A	DH + A
mittlere Härte (HV)	709	631	642	698	709	642	698	698
Nach Härtung Angelassen ?	Nein			Ja		Nein		Ja
Ölbad	OW-20 (90° C)				5W-30 (90° C)			
Si ₃ N ₄ -Kugel Rotation gesperrt	Kategorie			M-K: Y (extremer Verschleiß)				M-K: X (geringer Verschleiß)
100Cr6-Kugel Rotation gesperrt	Kategorie			M-M: Y (extremer Verschleiß)	M-M: X (geringer Verschleiß)			

In der Übersicht wird deutlich, dass das Auftreten von extrem hohem Verschleiß (M-*: Y) nicht mit der mittleren Härte des Konturmateri- als korreliert. Dagegen zeigt sich ein klarer Zusammenhang mit der Wärmebehandlung nach dem Härten (*durch Blitze hervorgehoben*).

Sind die Konturen nur lasergehärtet, neigt das System zu extrem hohem Verschleiß. Wird das Material anschließend *angelassen* oder im herkömmlichen Härteprozess im Ofen *gehärtet und angelassen* sind geringe Verschleißraten möglich. Dabei ist es unerheblich, welche Legierung (*100Cr6, 42CrMoS4, 51CrV4*) gehärtet wird. Der bestimmende Einfluss ist, ob nach dem Härten ein Anlassen durchgeführt wurde oder nicht.

Bei Betrachtung des Mikrohärteverlaufs im Gefüge zeigen sich auffällige Unterschiede. Die lasergehärteten Materialien weisen allgemein eine starke Zeiligkeit im Gefüge auf (siehe Abb. 111). Ein zeiliges Gefüge resultiert aus dem Walzprozess. Bei der Herstellung des Rohteils werden Inhomogenitäten zu zeiligen Strukturen ausgewalzt. Die hier betrachtete Zeiligkeit ist höchstwahrscheinlich auf einen erhöhten Kohlenstoffanteil im Bereich von Mangansulfiden zurückzuführen. Bereiche mit hohem Mangangehalt zeigen typischerweise höhere Kohlenstoffanteile [10].

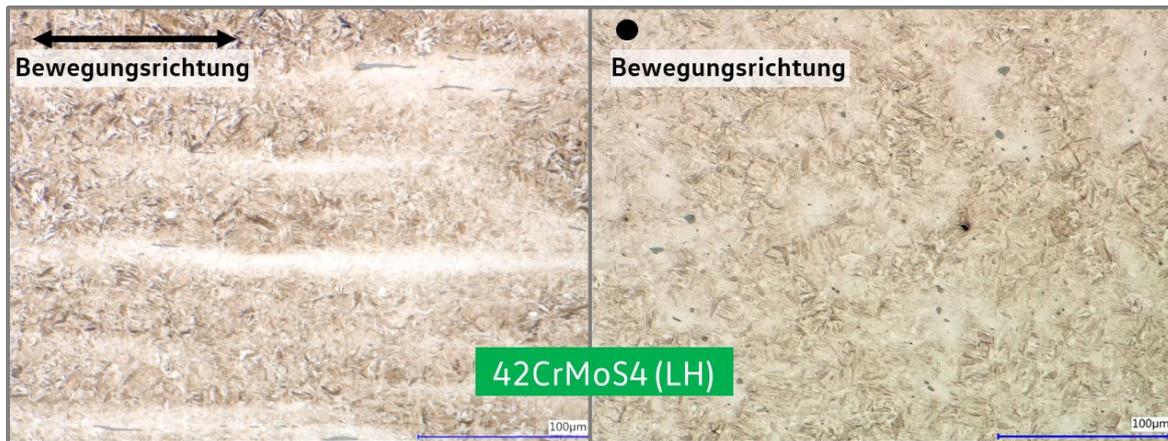


Abb. 111: Digitalmikroskop-Aufnahmen; Schliff (geätzt mit Nital); 42CrMoS4 (LH)

Wird die Härte der unterschiedlichen Zeilen gemessen, ergeben sich im nicht angelassenen, also zum extremen Verschleiß neigendem, Gefüge hohe Härteunterschiede zwischen den Zeilen. Diese sind auf unterschiedliche Kohlenstoffgehalte zurückzuführen. Durch ein nachträgliches Anlassen können die Härteunterschiede verringert werden. Die hellen kohlenstoffreichen Phasen verlieren deutlich an Härte, während die Härte im umgebenden Gefüge nur leicht abnimmt (Abb. 62, S. 85). Dieses Anlassverhalten ist aus der Literatur bekannt [10].

Tabelle 24: Gesamtsystem; Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation; Härteschwankungen
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Konturmaterial		42CrMoS4			100Cr6	42CrMoS4		100Cr6
Härtung / Gefüge		LH	LH + A	DH + A	DH + A	LH	DH + A	DH + A
Ölbad		OW-20 (90° C)				5W-30 (90°C)		
Si ₃ N ₄ -Kugel Rotation gesperrt	Kategorie	M-K: Y	-	M-K: Y	M-K: Y	M-K: Y	M-K: X	M-K: X
	Ø Verschleißrate initial [mm ³ / 1 Mio. SZ]	5,73	-	8,29	6,18	8,02	0,45	0,31
	Härteschwankung - Kontur [%]					8,0	0,1	
100Cr6-Kugel Rotation gesperrt	Kategorie	M-M: Y	M-M: X	M-M: X	M-M: X	M-M: X	M-M: X	M-M: X
	Ø Verschleißrate initial [mm ³ / 1 Mio. SZ]	6,35	0,33	0,15	0,30	0,15	0,43	0,23
	Härteschwankung - Kontur [%]	8,0	2,1	0,1				

In Tabelle 24 wird deutlich, dass die starken Härteschwankungen sehr gut mit den Verschleißraten und damit der Neigung zu extrem hohen Verschleißraten bei gesperrter Kugelrotation korrelieren, weshalb die Härteschwankungen als Ursache für die unterschiedliche Verschleißfestigkeit der Konturen angenommen werden.

Haupterkennnis (System): Die großen Härteunterschiede stellen eine Schwachstelle im Material dar. Aus der Korrelation mit extrem hohen Verschleißraten kann eine verminderte Abrasionsfestigkeit der nicht angelassenen Konturen bedingt durch die Härteunterschiede gefolgert werden. Die Bereiche mit hohen Härteunterschieden können im Material wie eine Kerbe wirken und eine verstärkte Rissbildung begünstigen [13,99,134]. In Verbindung mit den weichen Mangansulfiden ist ein Abgleiten größerer Bereiche vorstellbar.

Bei der Bewertung der Materialeigenschaften müssen die Folgerungen zum instabilen Verhalten (Abschnitt 8.3.2) berücksichtigt werden. Das System mit *gesperrter Kugelrotation* stellt allgemein ein empfindliches System dar und eine geringfügige Veränderung eines Parameters (z.B. der Mikrohärteverläufe) kann im Grenzbereich zwischen geringem und extrem hohem Verschleiß entscheiden. Für die Standardanwendung mit *freier Rotation der Metallkugel* spielt der Mikrohärteverlauf keine Rolle, wie in Abschnitt 8.3.2 dargelegt wird. Daher kann für die meisten Anwendungen das nicht angelassene Material mit inhomogenem Gefüge eine wirtschaftliche Alternative darstellen.

8.3.4 Verschleißmechanismen und Oberflächenanalyse

Mit der Erkenntnis aus Abschnitt 8.3.2, dass der extrem hohe Verschleiß bei gleitender Keramik- und Metallkugel durch den verwandten Verschleißmechanismus und die gleichen kinematischen Zusammenhänge bedingt ist, lassen sich die Verschleißkategorien in Abb. 112 schematisch zusammenfassen.

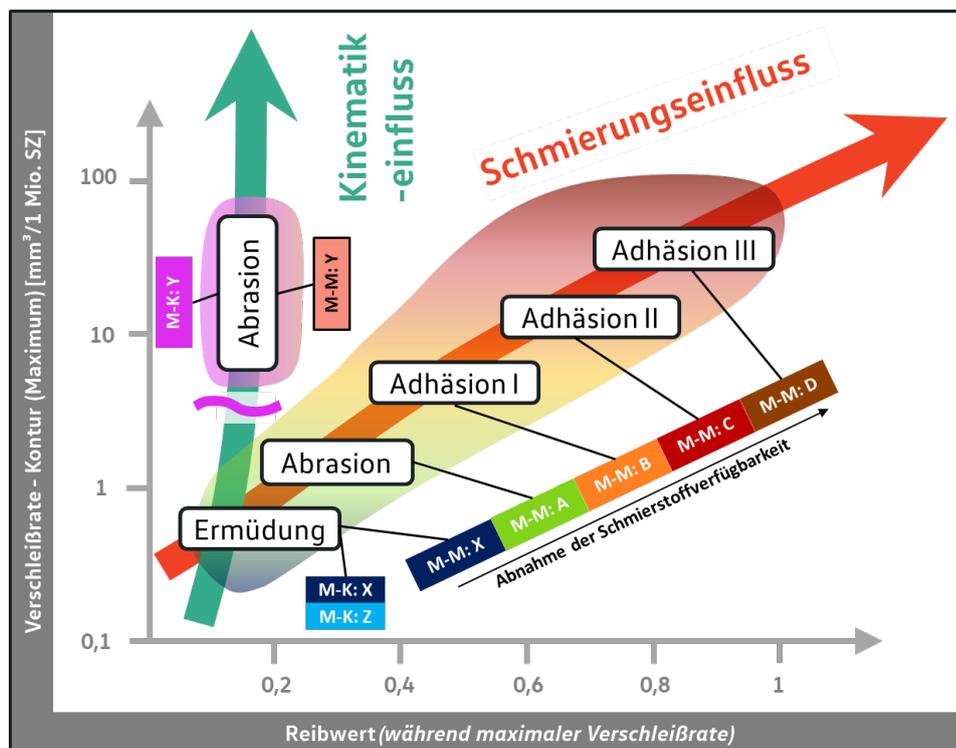


Abb. 112: Tribologisches Verhalten; Verschleißmechanismen (basierend auf Abb. 61)

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Im **System M-M** dominiert der Schmierungseinfluss das Systemverhalten und prägt damit die Verschleißmechanismen wie bereits ausführlich in Abschnitt 8.1 diskutiert wurde. Bei optimaler Schmierung liegt demnach Ermüdungsverleiß vor (M-M X), was zu vergleichsweise geringen Verschleißraten führt. Eine Verschlechterung der Schmierung führt sukzessive zu höheren Reibwerten und Verschleißraten. Dabei tritt neben Ermüdung zunächst vorwiegend abrasiver Verschleiß (M-M: A) auf. Infolge einer weiteren Verschlechterung der Schmierung kommt es zu adhäsivem Verschleiß in unterschiedlichen Stadien (M-M: B bis M-M: D). Zusätzlich

treten aufgrund der durch Adhäsionsverschleiß erhöhten Kontakttemperaturen tribochemische Reaktionen auf.

Auch im **System M-K** liegt bei geringem Verschleiß infolge einer geschmierten Wälzbewegung Ermüdungverschleiß vor (M-K: X & M-K: Z). Kommt es durch ein Gleiten der Kugel zu sehr hohen Verschleißraten dominiert abrasiver Verschleiß (M-K: Y).

Abb. 113 zeigt Oberflächenaufnahmen der Konturen für die einzelnen Verschleißkategorien mit Zuordnung zu den 4 üblichen Verschleißmechanismen.

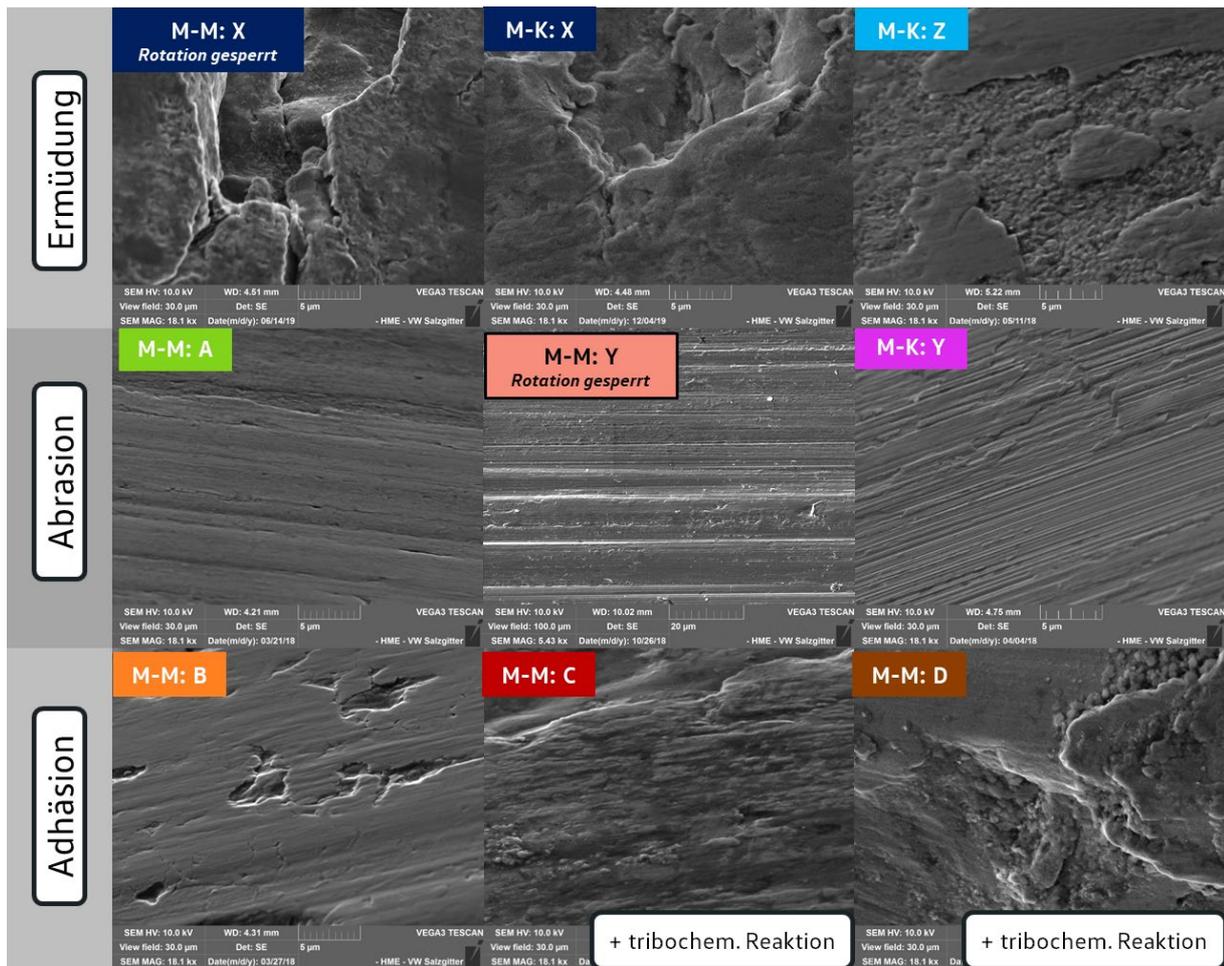


Abb. 113: REM-Aufnahmen; Konturoberflächen; Verschleißmechanismen
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzueordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Im System M-M treten, wie in Abschnitt 8.1.3 dargelegt, die gleichen Verschleißerscheinungen an 100Cr6-Kugel und an der Kontur auf, weswegen die Bilder der Kategorien M-M: * (Abb. 113) auch für die jeweiligen Kugeloberflächen repräsentativ sind.

Ermüdungverschleiß bei beiden Kugelmaterien (M-M & M-K)

Ermüdungverschleiß kann den Kategorien M-M: X, M-K: X und M-K: Z zugeordnet werden und tritt an der Kontur somit unter Verwendung von Metall- und Keramikkugel auf. Die Kategorien repräsentieren in dieser Arbeit die geringsten Verschleißraten der Rastkontur. Notwendige Voraussetzung ist eine ausreichende Schmierung sowie eine wälzende Kugelbewegung

bzw. ein System, welches eine ausreichende Robustheit gegenüber Gleitverschleiß aufweist. Ermüdung als dominierender Verschleißmechanismus der Kontur kann somit unter idealen Voraussetzungen auch bei gesperrter Rotation der Keramik- oder Metallkugel auftreten.

Aufgrund der zyklischen Bewegung sowie der ungünstigen Kontaktgeometrie, ist in diesem Tribosystem auch unter Vollschröierung von Mischreibung auszugehen. Als Verschleißerscheinungen fallen Ausbrüche auf, die durch Rissbildung, Risswachstum und Rissvereinigung entstehen. Der Ermüdungsverschleiß wird durch die auch nach Einlauf (siehe Abschnitt 7.3) noch relativ hohen Hertzschen Pressungen initiiert. Aufgrund der geringen Verschleißraten und der guten Versorgung mit Schmierstoffadditiven bilden sich unter Ölbadshröierung (M-M: X und M-K: X) Reaktionsschichten der Öladditive auf den Oberflächen (Abschnitte 7.1.1 & 7.2.1).

Da Metall- und Keramikugel im Ölbad an der Kontur die gleichen Verschleißerscheinungen und ähnliche Verschleißraten bei ähnlichen Reibwerten hervorrufen können, wird angenommen, dass die chemischen Unterschiede zwischen Metall- und Keramikugel bei ausreichender Schröierung keine Auswirkung haben. Der Verschleißmechanismus wird hauptsächlich durch die Hertzsche Pressung bestimmt. Die höheren Pressungen im System M-K durch die höhere Steifigkeit der Keramikugel haben ebenfalls keine Auswirkung. Bei gesperrter Rotation treten in den Kategorien M-M: X und M-K: X die gleichen Verschleißerscheinungen auf. Daraus kann abgeleitet werden, dass typischerweise ein Wälzverschleiß mit hohem Gleitanteil vorliegt.

Nicht messbarer Verschleiß bei wälzender Keramikugel (M-K)

Einen Sonderfall stellt die Kategorie M-K: Z dar. Dieser Versuch zeigt trotz geringer Ölmenge sehr geringe Endverschleißraten, die mit der genutzten Messtechnik nicht aufgelöst werden können. Voraussetzung ist eine wälzende Bewegung der Keramikugel. Aufgrund der geringen Adhäsionsneigung genügt eine geringe Schmierstoffmenge.

Auffällig sind die fragmentierten Auftragsschichten aus Verschleißpartikeln auf Kontur und Kugel (siehe Abb. 86, S. 108). Es ist denkbar, dass dieser *dritte Körper* eine Bedingung für die sehr geringen Verschleißraten darstellt. Nur ein Versuch mit Keramikugel zeigt geringen Verschleiß bei geringer Ölmenge. Alle weiteren Versuche mit gleichen Parametern durchliefen Phasen mit hohem Verschleiß infolge einer gleitenden Kugelbewegung (siehe Abschnitt 8.3.2), zeigen bei geringer Endverschleißrate aber die gleichen Verschleißerscheinungen.

Milder Abrasionsverschleiß im Metall-Metall-Kontakt (M-M)

Bei einer Verschlechterung der Schröierungsbedingungen werden die Ermüdungsverschleißerscheinungen im System M-M durch Abrasionsverschleiß abgelöst. Durch den verstärkten direkten Materialkontakt zwischen Grund- und Gegenkörper sowie den Verschleißpartikeln entstehen Riefen auf Grund- und Gegenkörper. Zusätzlich sind auch leichte Spuren von Adhäsion auf den Oberflächen erkennbar (Abschnitt 7.1.2).

Die Ölreaktionsschichten treten hier nicht mehr auf; entweder infolge der erhöhten Verschleißraten oder in Kombination mit dem Mangel an Additiven aufgrund der schlechteren Schröier-

stoffverfügbarkeit. Die Verschleißrate durch Abrasion ist schneller als der Ermüdungsverleiß infolge von Risswachstum und Vereinigung, weswegen auch die Ausbrüche auf den Oberflächen verschwinden.

Schwerer Abrasionsverschleiß bei gleitender Kugelbewegung (M-M & M-K)

Im System mit der Keramik­kugel kann eine Gleitbewegung der Kugel wie beschrieben zu extrem hohen Verschleißraten führen (M-K: Y). Auch in dieser Kategorie liegt abrasiver Verschleiß der Kontur vor. Im Vergleich zur Kategorie M-M: A weist die Oberfläche deutlich schärfere Riefen mit geringerem Riefenabstand auf. Die verfügbare Ölmenge hat in der Kategorie M-K: Y keinen entscheidenden Einfluss.

Versuche der Kategorie M-M: Y, welche nur für bestimmte Systemparameter unter gesperrter Rotation der 100Cr6-Kugel auftritt, zeigen ebenfalls abrasive Verschleißspuren und ähnlich hohe Verschleißraten wie die Versuche der Kategorie M-K: Y. Die Kategorien sind in Abb. 114 gegenübergestellt.

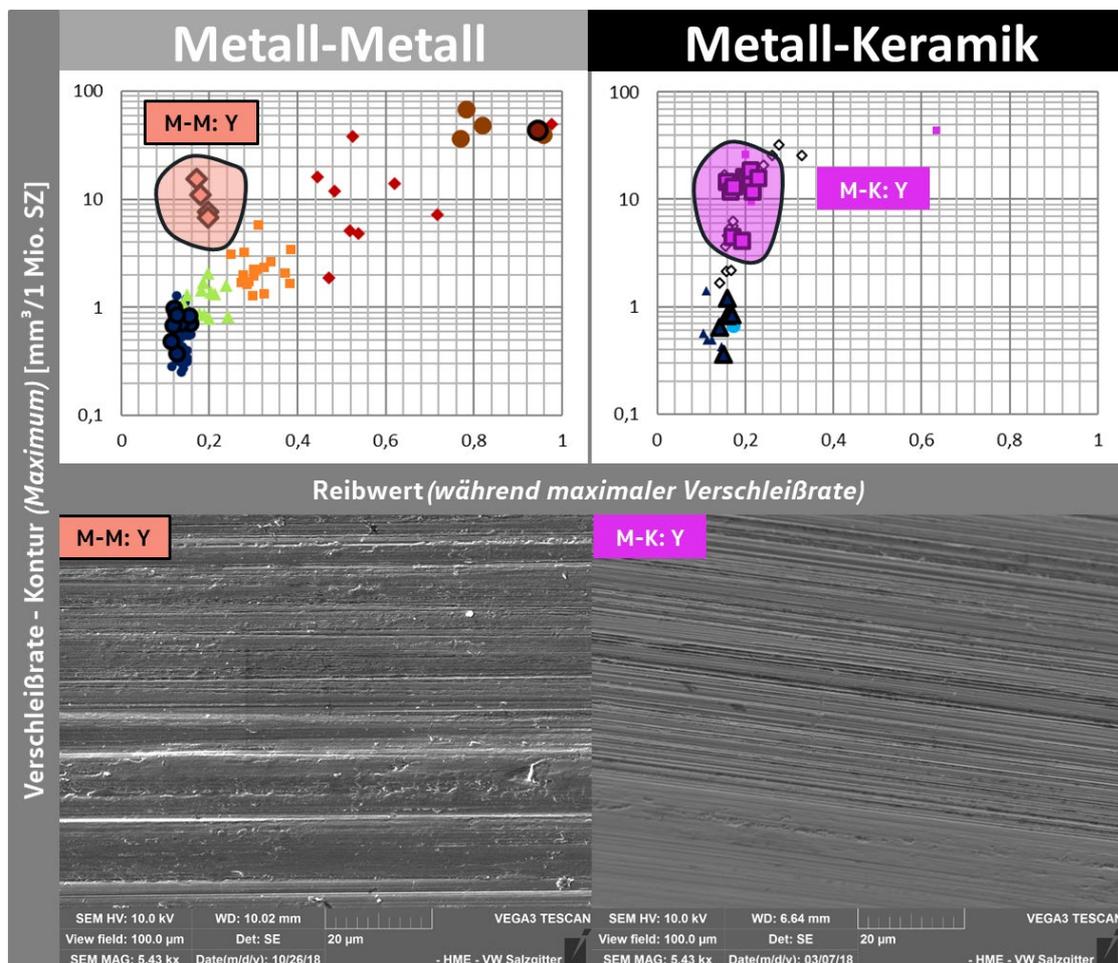


Abb. 114: Verstärkter Abrasivverschleiß durch gesperrte Kugelrotation

Vergleich von *M-M* und *M-K*; gesperrte Rotation durch schwarzen Rahmen gekennzeichnet
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

In beiden Fällen sind die Oberflächen gerieft. Im System mit Keramik­kugel (M-K: Y) ist die Oberfläche im Vergleich glatter mit feineren Riefen und geringerem Riefenabstand.

In der Literatur werden sehr ähnliche Verschleißerscheinungen an Wälzlagerstahl im Kontakt mit Si_3N_4 -Kugeln auf eine erhöhte Rauheit der Keramikugel zurückgeführt [23]. Dieser Aspekt könnte auch hier eine Rolle spielen, da die Keramikugeln nach starkem Abrasivverschleiß der Kontur eine leicht aufgeraute Oberfläche aufweisen (Abschnitt 8.2.3).

Aufgrund der höheren Adhäsionsneigung der Metallkugel im System M-M zeigt die korrespondierende Konturoberfläche (M-M: Y) teilweise leicht verformte und herausgerissene Bereiche als Folge von Adhäsion. Der Verschleiß wird aber durch den abrasiven Materialabtrag dominiert, was die geringen Reibwerte während der maximalen Verschleißrate (Abb. 114 – oben) belegen.

Auffallend in Abb. 114 sind die ähnlich hohen maximalen Konturverschleißraten bei beiden Kugelmaterialien, trotz großer Unterschiede in den Kugelhärten (Abb. 15, S. 44).

Tritt extrem hoher abrasiver Verschleiß an der Kontur auf, stellt die Grundhärte der Kugel daher keinen bestimmenden Faktor dar.

Adhäsion und tribochemische Reaktion (Oxidation) im System M-M

Bei einer weiteren Verschlechterung der Schmierung gehen Versuche der Kategorie M-M: A von der Abrasion zu vornehmlich adhäsivem Verschleiß über (M-M: B). Die Oberfläche ist durch stark in Bewegungsrichtung verformte und dabei aufgetrennte Bereiche (Fressspuren) gekennzeichnet. Mit weiterer Verschlechterung der Schmierung nehmen analog zu steigenden Reibwerten und Verschleißraten (M-M: C und M-M: D) die Tiefe und Größe der Strukturen zu. Zusätzlich kommt es zu einer Ausbildung von optisch sichtbaren Oxidschichten infolge von tribochemischen Reaktionen. Adhäsive Verschleißerscheinungen treten nur im Kontakt von Metallkugel und Metalloberfläche auf. Die Verschleißentwicklung wurde bereits ausführlich in Abschnitt 8.1.2 beschrieben und diskutiert.

Die Zunahme der Oxidation wird in Abb. 115 deutlich. Mit steigenden Reibwerten wachsen die Oxidschichten und zeigen bei den gewählten EDX-Parametern (siehe Kapitel 7, S. 87) bis zu 30 m% Sauerstoff für Versuche mit Reibwerten von ca. 1 (Kategorie M-M: D). Der minimale Sauerstoffanteil tritt bei einem Endreibwert von etwa 0,25 (Kategorie M-M: B) auf.

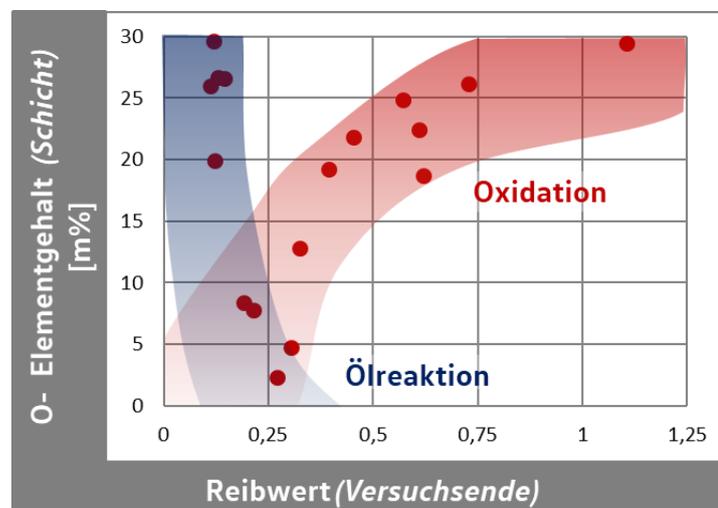


Abb. 115: Reaktionsschichten; M-M; Reibungseinfluss

Tribochemische Reaktion (Ölreaktionsschichten) in den Systemen M-M & M-K

Versuche mit Reibwerten kleiner 0,2 setzen im System M-M eine Ölbadtschmierung voraus, die bei niedrigen Verschleißraten zu einer Bildung von Ölreaktionsschichten führt. Auch hier werden hohe Sauerstoffanteile gemessen, allerdings in Verbindung mit den Elementen Zink, Phosphor und Schwefel. Diese Kombination kann auf ZDDP-Verschleißschutzadditive zurückgeführt werden [76].

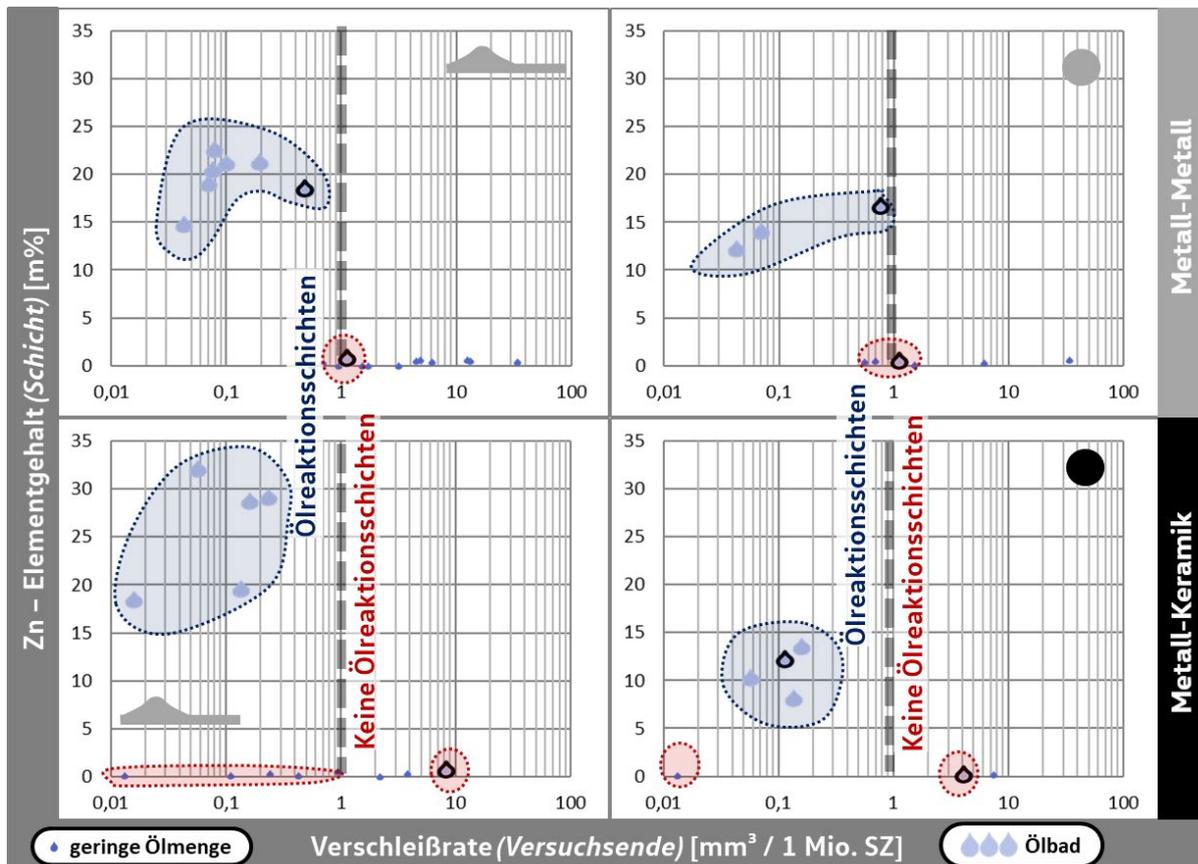


Abb. 116: EDX-Ergebnisse; M-M & M-K; Kontur; Zn-Elementanteil über Verschleißrate
Symbolgröße entsprechend der Ölmenge

Die Reaktionsschichten der Additive können sowohl im System M-M als auch im System M-K nachgewiesen werden, wie die Ergebnisse in Abb. 116 zeigen. Sie treten auch an den Keramik-kugeln und allgemein nur unter Ölbadtschmierung (*hervorgehoben durch große Tropfen*) auf.

In Abb. 116 wird zusätzlich deutlich, dass die Ausbildung von messbaren Schichten in beiden Systemen neben einer ausreichenden Schmierstoffversorgung auch eine Verschleißrate von kleiner $1 \text{ mm}^3 / 1 \text{ Mio. SZ}$ voraussetzt. Bei höheren Verschleißraten sind die Schichten auch unter Ölbadtschmierung nicht nachweisbar.

Gesonderte Versuche mit variierteter Versuchszeit zeigen, dass sich die Ölreaktionsschichten im betrachteten Tribosystem zwischen 1.000 und 10.000 SZ (*also innerhalb weniger Minuten*) ausbilden (Abschnitt 7.1.10).

8.3.5 Kugelverschleiß – Vergleich M-M und M-K

Im Vergleich zwischen den Tribosystemen mit Metall- und Keramikkugel (M-M & M-K) ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Verschleißmechanismen auch Unterschiede im Verschleißverhältnis zwischen Kontur und Kugel: Die Unterschiede sind in Abb. 117 gegenübergestellt.

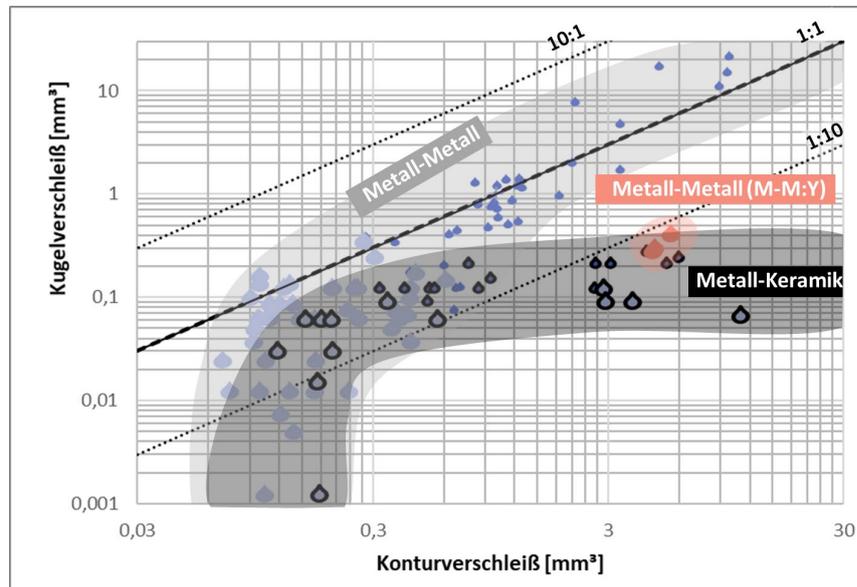


Abb. 117: Kugel- über Konturverschleiß [mm³]; Vergleich *M-M* & *M-K*
Vergleich Abb. 99; Symbolgröße entsprechend der Ölmenge

Insbesondere bei hohem Konturverschleiß zeigt die Keramikkugel vergleichsweise geringen Verschleiß, während im System *M-M* Kontur und Kugel ähnlich stark verschleifen. Der Unterschied ist weniger durch die hohe Härte und damit eine erhöhte Verschleißfestigkeit der Keramik, sondern vor allem durch die unterschiedlichen Verschleißmechanismen begründet. Dabei kann in Anlehnung an Abb. 112 grob zwischen einem dominierenden Einfluss der Kinematik bzw. der Schmierstoffverfügbarkeit unterschieden werden (Abb. 118).

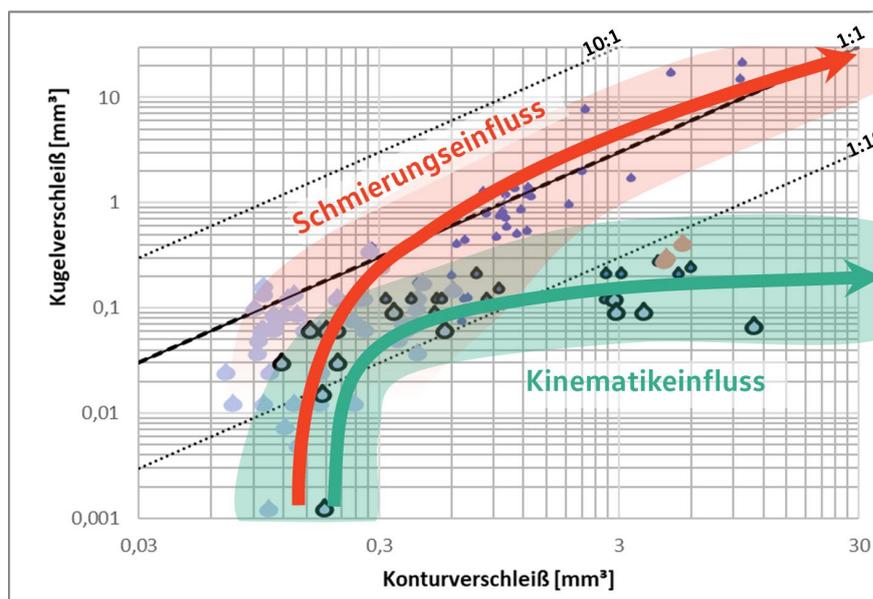


Abb. 118: Kugel- über Konturverschleiß [mm³]; Mechanismen; (siehe Abb. 117)

Im System M-M dominiert der Schmierungseinfluss (Abschnitt 8.1.6). Hoher Gesamtverschleiß entsteht durch Adhäsion zwischen Kontur und Kugel. Unter diesen Bedingungen tritt an Kugel und Kontur auch ähnlich hoher Verschleiß auf, wie Abb. 118 verdeutlicht.

Bei geringem Gesamtverschleiß (M-M: X und M-K: X) ist der Kugelverschleiß in beiden Systemen im Mittel geringer als der Konturverschleiß (siehe Abb. 117).

Im System M-K wird hoher Konturverschleiß durch abrasiven Verschleiß infolge einer Gleitbewegung der Keramikkugel erzeugt (Abschnitt 8.3.2). Der volumetrische Verschleiß der Si_3N_4 -Kugel ist in diesem Fall deutlich kleiner als der Konturverschleiß (Abb. 118).

Bei gesperrter Kugelrotation kann dieser Zustand sozusagen künstlich auch für bestimmte Kombinationen im System M-M erzeugt werden (Abb. 117 - Kategorie M-M: Y). Die Versuche der Kategorie M-M: Y zeigen vergleichsweise geringen Verschleiß der 100Cr6-Kugeln bei gleichzeitig hohem Konturverschleiß. Sie liegen damit im Streuband der Versuche mit Si_3N_4 -Kugel (Abb. 118 - *Kinematikeinfluss*).

Zusammenfassend kann aus Abb. 117 und Abb. 118 gefolgert werden, dass nur bei adhäsivem Verschleiß und damit nur im System M-M, ähnlich hoher volumetrischer Verschleiß an Kontur und Kugel auftritt. Kleine Unterschiede in der Härte und der Mikrostruktur der betrachteten metallischen Werkstoffe (Abschnitt 3.2.1) spielen damit bei adhäsivem Verschleiß keine Rolle. Die Adhäsionsbeständigkeit unter den betrachteten Systembedingungen ist vergleichbar.

Bei Ermüdungsverschleiß (M-M: X und M-K: X) sowie starkem abrasivem Verschleiß durch eine gleitende Kugelbewegung (Kinematikeinfluss; M-M: Y und M-K: Y) ist der volumetrische Kugelverschleiß im Vergleich zur Kontur deutlich geringer. Das Verschleißverhältnis zwischen Kontur und Kugel wird damit primär durch die Verschleißmechanismen und nur geringfügig durch die Kombination von Kugel- und Konturmaterial bestimmt. Der geringere Kugelverschleiß unter den Bedingungen von Abrasion und Ermüdung kann durch die günstigere Kontaktgeometrie und die im Vergleich zur Kontur für beide Kugelmaterialien höhere Härte begründet sein (siehe Härtemessungen, Abschnitt 3.2).

Auffällig ist, dass die Keramikkugeln unter Wirkung der gleichen Verschleißmechanismen ähnlich oder nur geringfügig weniger als die 100Cr6-Kugeln verschleifen. Die 100Cr6-Kugeln weisen, im Gegensatz zu den sehr harten Si_3N_4 -Kugeln, in Relation zu den Konturen nur eine leicht erhöhte Härte auf. Dies entspricht den Erfahrungen aus [134], wonach der positive Effekt der höheren Härte der Keramik durch die geringe Bruchzähigkeit teilweise kompensiert wird.

8.3.6 Analyse der Mikrostruktur (FIB)

Fast alle FIB-Schnitte zeigen eine starke Kornfeinung mit nanokristallinen Körnern (kleiner 100 nm) in einem Bereich bis 5 μm unter der Oberfläche (Abschnitt 7.3).

Es wurden unterschiedliche Verläufe der Korngröße unter der Oberfläche beobachtet. Neben einer unterschiedlichen Dicke der Schicht mit starker Kornfeinung unterscheidet sich der Gradient der Korngröße in die Tiefe. Zum tritt Teil ein scharfer Übergang zwischen dem nanokristallinen Bereich und den größeren Körnern auf. Teilweise liegt auch ein fließender Übergang vor (Abschnitt 7.3).

Des Weiteren unterscheiden sich die betrachteten Merkmale stark innerhalb verschiedener Schriffe an einer Probe (Abb. 88, S. 109) bzw. innerhalb eines Schriffes (Abb. 87, S. 108). Bei Betrachtung der oberflächlichen Verschleißerscheinungen wird deutlich, dass auch die Verschleißerscheinungen auf der Probe lokal verschieden sind (siehe Anhang E & F).

Die gemessenen Reibwerte und Verschleißraten sind die Folge einer zeitlichen und räumlichen Mittelung von lokalen Ereignissen. Im betrachteten Tribosystem stellt die große Kontaktfläche der Proben sowie die undefinierte Kugelkinematik eine besondere Herausforderung dar. Da die FIB-Schnitte nur eine sehr lokale Aussagekraft besitzen, wird eine statistische Auswertung der Daten genutzt.

Korrelationen der FIB-Schnitte zu den Versuchsdaten (*Reibwerte und Verschleißraten*) können im betrachteten System nur durch Mittelung der Daten sowie die bereits beschriebene Kategorisierung der Versuchsdaten (Anhang A3) erreicht werden. Eine Gegenüberstellung von Versuchsdaten und Parametern aus den FIB-Schnitten ist in Abb. 119 gegeben.

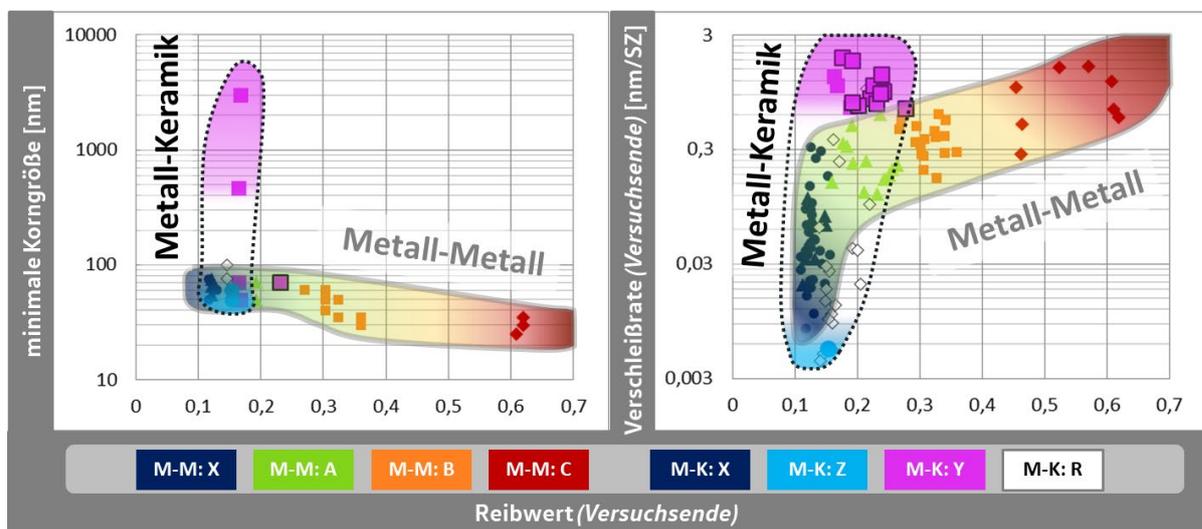


Abb. 119: FIB-Schnitte (Kontur); Vergleich mit Versuchsdaten

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Analog zur Gegenüberstellung von Verschleißraten und Reibwerten zu Versuchsende (*Abb. 119 -rechts*), die bereits in der Diskussion behandelt wurden, zeigt auch die Mikrostruktur der Konturen (*Abb. 119 -links*) je nach Gegenkörper ein unterschiedliches Verhalten. Für 100Cr6-Kugel (M-M) und Si₃N₄-Kugel (M-K) ergeben sich jeweils unterschiedliche Ergebniswolken mit Überlappung bei Ermüdungsverschleiß (*M-M: X und M-K: X*).

Unabhängig vom Kugelmaterial kann folgender Schluss gezogen werden:

Nanokristallines Gefüge bis in die Tiefe von mehreren μm tritt sowohl bei geringen Ermüdungsverschleißraten (*M-M: X, M-K: X und M-K: Z*), als auch bei leichter Abrasion (*M-M: A*) sowie unterschiedlich schwerem Adhäsionsverschleiß (*M-M: B und M-M: C*) auf.

Diese Erkenntnis deckt sich mit vielen Ergebnissen der Literaturrecherche (Abschnitt 2.1.7). Nanokristallines Gefüge wurde in vergleichbaren Materialien auch unter Abrasion [48,69], Adhäsion [2,120] sowie bei ermüdungsbedingtem Verschleiß [29,39,126] festgestellt.

Als Entstehungsmechanismus für nanokristallines Gefüge im tribologischen Kontakt wird meist eine starke plastische Verformung des oberflächennahen Bereichs angeführt [97]. Dieser Mechanismus erscheint auch im hier betrachteten Tribosystem plausibel: Durch die sehr hohe Kontaktlast (Abschnitt 4.2) sowie dem Wälzen bzw. Gleiten unter Misch- und Grenzreibungsbedingungen (Abschnitt 4.1) liegt unter allen Verschleißkategorien eine hohe tribologische Belastung vor, die lokal die Fließgrenze des Materials überschreiten und damit nanokristallines Material infolge von starker plastischer Verformung ausbilden kann.

Bereits nach 100 Schaltzyklen (SZ) ist im betrachteten System eine nanokristalline Schicht im oberflächennahen Bereich nachweisbar. Eine längere Belastung kann eine deutlich tiefere Kornfeinung sowie eine darunterliegende Verzerrung des Gefüges in Bewegungsrichtung erzeugen.

WOLFF ET AL. [130] haben für perlitischen Stahl bereits nach wenigen Belastungszyklen eine nanokristalline Schicht festgestellt, die durch weitere Belastung in die Tiefe wächst. Unter der nanokristallinen Schicht wandert das verzerrte Gefüge weiter in die Tiefe.

Mit diesen Ergebnissen lässt sich die starke Gefügeverzerrung in den hier betrachteten Proben nach 1.1 Mio. SZ plausibilisieren, die insbesondere bei Versuchen mit hoher Reibung unter dem nanokristallinen Gefüge bis in eine Tiefe von 25 μm vorliegt. (Abb. 94, S. 119)

Ein scharfer Übergang zwischen nanokristallinem und größerem Gefüge deutet auf eine Konzentration der Reibenergie in einem scharf abgegrenzten Bereich hin. Denkbar ist, dass das Material während der prägenden Verformung an der Grenze einen starken Sprung im Geschwindigkeitsgradienten aufweist. Das sporadische Auftreten der scharfen Grenze kann mit den lokal unterschiedlichen Reibbelastungen auf der Probenoberfläche begründet werden.

Eine besonders starke Kornfeinung bis in mehrere μm Tiefe tritt vor allem bei ermüdungsbedingten geringen Verschleißraten (*M-M: X* und *M-K: X*) und bei starkem adhäsivem Verschleiß („Fressen“ – *M-M: C*) auf (siehe Abb. 120).

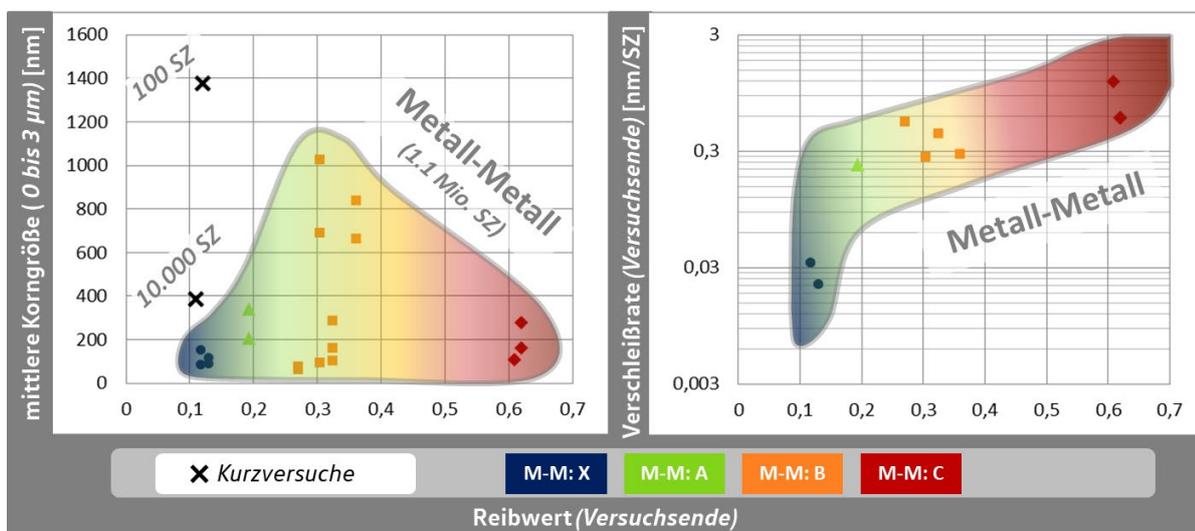


Abb. 120: FIB-Schnitte (Kontur); M-M

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

Die besonders tiefe Kornfeinung in den Extremfällen Ermüdungsverschleiß (*M-M: X*) und Fresen (*M-M: C*) kann durch die Kombination aus Energieeintrag und Verschleißrate erklärt werden [112]. Bei Oberflächenzerrüttung (*M-M: X* und *M-K: X*) ist die Verschleißrate vergleichsweise gering, weswegen die oberflächennahen Bereiche den Kontaktlasten deutlich länger ausgesetzt sind.

Dass der Energieeintrag trotz der geringen Reibleistung ausreicht, um nanokristallines Gefüge durch plastische Verformung auszubilden, wird durch viele Ergebnisse aus dem Bereich der frühzeitigen Wälzlagerermüdung bestätigt. Häufig tritt die starke Kornfeinung des Wälzlagerstahls auch in den Bereichen der maximalen Vergleichsspannung [84] und damit deutlich unterhalb der hier betrachteten Strukturen auf.

Eine Zunahme der Dicke der nanokristallinen Schicht durch längere Belastung wurde in [130] nachgewiesen. Dieses Ergebnis wird durch die Kurzversuche in dieser Arbeit mit relativ geringer Kornfeinungstiefe bestätigt (Abb. 120 - links). Bei längerer Versuchszeit führt dadurch auch ein geringer Reibwert in Kombination mit geringer Verschleißrate im hier betrachteten System zu einer tiefen Kornfeinung (Abb. 120 - links).

Bei starkem Adhäsionsverschleiß wird der oberflächennahe Bereich zwar stärker abgetragen, die deutlich höheren Schubspannungen, bedingt durch den hohen Reibwert, können das Gefüge aber in kürzerer Zeit verändern (*Kategorie M-M: C* in Abb. 120). Die mittlere *Kornfeinungsgeschwindigkeit* in die Tiefe muss damit höher als die Verschleißrate, also im Fall von *M-M: C* größer als 0,5 nm je Schaltzyklus sein.

Nur Versuche mit schwerem Abrasivverschleiß infolge einer gleitenden Si_3N_4 -Kugel (*Kategorie M-K: Y*) weisen keine Kornfeinung auf. Aufgrund der Kombination aus niedrigem Reibwert und hoher Verschleißrate steht bei Versuchen dieser Kategorie nicht genügend Zeit und Energie zur Verfügung, um eine bleibende nanokristalline Schicht auszubilden.

Die Versuche spiegeln damit die ideale spanende Bearbeitung wider, bei welcher viel Abtrag mit wenig Arbeit erreicht werden soll.

Insgesamt lassen sich aus den FIB-Analysen folgende Hypothesen zusammenfassen:

Im betrachteten System bilden die meisten Verschleißkategorien nanokristallines Gefüge unter den Oberflächen aus. Die Tiefe der starken Kornfeinung nimmt durch hohe Reibkräfte, hohe Pressungen und niedrige Verschleißraten zu. Ebenso nimmt die minimale Korngröße ab.

Hohe Verschleißraten bewirken einen schnellen Abtrag der Schichten und damit weniger nanokristallines Gefüge.

Bei sehr hoher Reibung sind auch Rekristallisationseffekte denkbar, die zu einem größeren Korn führen können. Da die Versuche mit den höchsten Reibwerten eine sehr starke Kornfeinung aufweisen, wird dieser Effekt hier nicht vermutet.

Die in dieser Arbeit betrachteten Mikrostrukturanalysen bestätigen damit den Stand der Technik (siehe Abschnitt 2.1.7). Viele Aspekte entsprechen, wie beschrieben, den Erkenntnissen aus aktuellen Veröffentlichungen und können durch die energetische Betrachtung der Tribologie (Abschnitt 2.1.9) plausibilisiert werden. Mithilfe der umfangreichen Versuchsdaten konnten für einzelne Effekte Hypothesen aufgestellt werden. Grundlage ist dabei das Verständnis des Systemverhaltens, das mithilfe der eingeführten Kategorisierung der Versuche erzielt wurde (Abschnitt 8.3.7).

Umgekehrt ist ein Verständnis des Systemverhaltens auf Basis der FIB-Schnitte im betrachteten System kaum möglich. Die FIB-Schnitte lösen nur einen sehr kleinen Bereich der Oberflächen auf. Außerdem variiert die Ausprägung der Mikrostruktur im analysierten oberflächennahen Bereich selbst innerhalb einer Probe stark. Zusätzlich konnte für viele Effekte, wie z.B. das Auftreten eines scharfen Übergangs zwischen nanokristallinem und größerem Gefüge, auch in der Literatur keine umfassende Erklärung gefunden werden.

8.3.7 Zusammenfassung Systemverhalten

Auf Basis der vergleichenden Diskussion der Tribosysteme Metall-Metall (M-M) und Metall-Keramik (M-K) kann das tribologische Verhalten des Rastmechanismus mit Abb. 121 ganzheitlich beschrieben werden.

Metall-Metall (M-M) - Abb. 121 - links

Im Kontakt zwischen gehärteter 100Cr6-Kugel und dem gehärteten Konturwerkstoff {*Metall-Metall (M-M)*} liegt der *Haupteinfluss* in der *Beölungssituation* des Kontaktes. Der Rotationsfreiheitsgrad der Kugel, der Konturwerkstoff, die Art der Härtung sowie die Ölviskosität haben im Rahmen der hier variierten Parameter keinen entscheidenden Einfluss. Das tribologische Verhalten wird durch die verfügbare *Schmierstoffmenge* dominiert (Abschnitt 8.1).

Eine optimale Schmierung (Ölbad) führt zu niedrigen Reibwerten und geringen Verschleißraten, welche über die Versuchszeit weiter abnehmen (degressiver Verlauf). Die Verschleißerscheinungen sind durch Oberflächenzerrüttung geprägt (M-M: X).

Eine begrenzte Schmierstoffverfügbarkeit führt infolge von Ölmigration aus dem Kontakt, Ölalterung und Abbau von Additiven zu einer Mangelschmierung mit erhöhtem Verschleiß und höheren Reibwerten. Eine zunehmende Verschlechterung der Schmierungsbedingungen bringt eine Intensivierung des Verschleißes mit sich, was mit höheren Reibwerten einhergeht. Die große Bandbreite der aus der unterschiedlichen Schmierstoffverfügbarkeit resultierenden Verschleißraten und Reibwerte macht eine Unterteilung in 4 Verschleißkategorien notwendig (M-M: A bis M-M: D). Eine Verschlechterung der Schmierung führt dabei fließend von einer Kategorie in die nächste.

Ursache für die hohen Verschleißraten bei Mangelschmierung ist die hohe Neigung zu adhäsivem Verschleiß, wenn die Metalloberflächen, bzw. die Oberflächen und die Verschleißpartikel, nicht durch einen ausreichenden Schmierpalt oder trennende Schichten wie Oxide separiert sind.

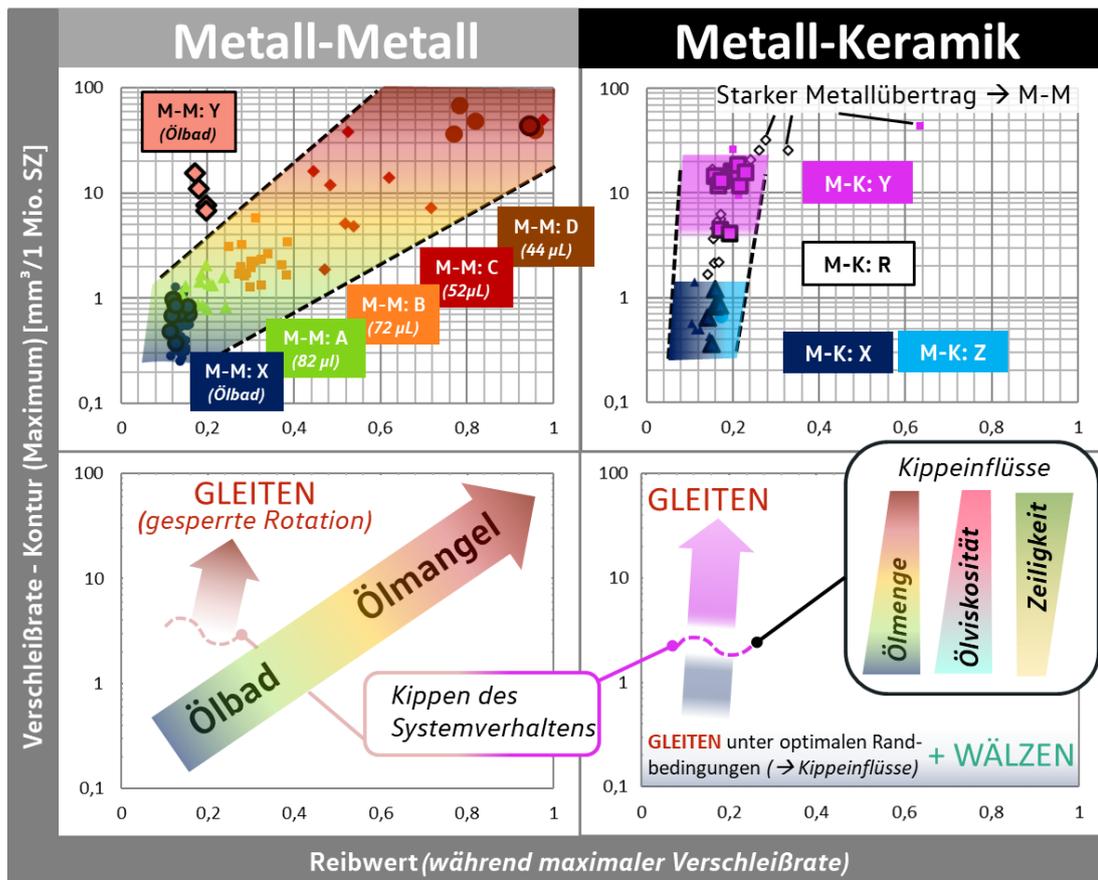


Abb. 121: Tribologisches Verhalten; Rastmechanismus

(für Versuche der Kategorie M-M ist die mittlere Schmierstoffmenge angegeben)

Versuche mit gesperrter Rotation durch schwarzen Rahmen markiert

Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuordnung (*Materialien, Ölmenge, Kategorien*) – Anhang A

Metall-Keramik (M-K) - Abb. 121 - rechts

Im System mit Si_3N_4 -Kugel ist die adhäsive Bindung zwischen Grund- und Gegenkörper deutlich schwächer [21], weshalb das System nicht durch den Schmierzustand dominiert wird. Hohe Verschleißraten ergeben sich unabhängig von der initialen Ölmenge.

Hohe Reibwerte treten im System nur durch starken Übertrag von Metallpartikeln auf die Keramikugeln und damit einen *Pseudo-Metall-Metall-Kontakt* auf. Dieser Effekt hat aber kaum Einfluss auf das Verschleißverhalten und stellt sich nur gelegentlich als Folge von hohem Gesamtverschleiß ein.

Haupteinfluss im System M-K ist die *Kinematik* der Si_3N_4 -Kugel. Die Bewegung der Kugel ist unbestimmt und kann jederzeit zwischen einem Gleiten und Wälzen schwanken. Zum Verständnis des Systemverhaltens wurden Versuche mit *gesperrter Rotation* also *erzwungenem Gleiten* durchgeführt:

Ein Gleiten der Kugel führt in den meisten Fällen zu extrem hohen Verschleißraten. Dieser Zustand wird in der Kategorie M-K: Y abgebildet. Nur die Kombination aus höherviskosem Öl und homogenem Gefüge des Konturmateriale zeigt abweichend geringe

Verschleißraten bei gleitender Kugelbewegung (Abschnitt 8.3.2). Eine optimale Parameterkombination kann damit auch im System M-K trotz gleitender Kugelbewegung geringen Verschleiß aufweisen.

Dieser optimale Zustand ist fragil. Bei Änderung eines Systemparameters (*z.B. der Ölviskosität oder den Materialeigenschaften der Kontur*) kann das Verhalten zu extrem hohen Verschleißraten kippen. Die „Kippeinflüsse“ sind in *Abb. 121 – unten rechts* aufgelistet.

Ein Wälzen der Si₃N₄-Kugel führt in allen Fällen zu geringem Konturverschleiß (M-K: X und M-K: Z). Dies belegen u.a. viele Versuche mit freier Kugelrotation, welche trotz *gegenüber Gleitverschleiß kritischer Material- und Schmierstoffkombination* geringen Verschleiß aufweisen. Dieses Verhalten kann nur durch ein Wälzen der Kugel erklärt werden (Abschnitt 8.2.1). Aufgrund der im betrachteten Rastmechanismus konstruktionsbedingt vorliegenden undefinierten Kugelkinematik (Abschnitt 4.1) kommt es im System M-K auch bei freier (undefinierter) Kugelrotation stochastisch zum Gleiten der Kugel und somit bei kritischen Parameterkombinationen zu hohem Verschleiß. Viele Versuche mit *zeitweise hohen und geringen Verschleißraten* und daraus abgeleitet *zeitweise einem Gleiten und einem Wälzen* der Si₃N₄-Kugel spiegeln dieses Verhalten wider und werden in der Kategorie M-K: R zusammengefasst (Abschnitt 6.3.1).

Zusammenführung der Ergebnisse von M-M und M-K

Auffällig ist, dass im System M-K in den Standardversuchen mit freier Kugelrotation entweder geringe oder sehr hohe Verschleißraten auftreten. Das System kippt damit bei einer Änderung der Kinematik zwischen den Extremen. Im System M-M kann dieses Verhalten für die Versuche bei freier Kugelrotation nicht beobachtet werden. Die Versuche zeigen stabile, allein durch die Schmierungssituation bestimmte, Verschleißraten.

Durch ein manuelles Sperren der Kugelrotation kann im System M-M für bestimmte Material- und Schmierstoffkombinationen jedoch ein Verhalten wie im System M-K erreicht werden:

Wie im System M-K treten unter Voraussetzung einer gleitenden Kugel bei bestimmten Systemparametern (*z.B. Ölviskosität oder Materialeigenschaften der Kontur*) sehr hohe Verschleißraten auf, während bei optimalen Parametern geringer Verschleiß vorliegt. Die „Kippeinflüsse“ (*Abb. 121 – unten rechts*) zu den hohen Verschleißraten sind identisch zum System M-K und damit unabhängig vom Werkstoff der gleitenden Kugel.

Der entscheidende Unterschied zwischen den Systemen ist, dass das kritische Gleiten mit hohem Verschleiß (*Kategorie M-M: Y*) im System M-M bei freier Kugelrotation nicht auftritt. Die stärkeren Adhäsionskräfte erzeugen während der Oszillation über die Kontur höhere Drehmomente und bewirken damit bei verstärktem Materialkontakt ein Wälzen der Kugel. Die Kippeinflüsse kommen damit bei den Standardversuchen, also *freier Kugelrotation*, nicht zum Tragen. Die Eigenschaften des Konturmaterials und die Ölviskosität spielen somit wie beschrieben im System M-M keine Rolle.

Im Gegensatz dazu reichen die geringen adhäsiven Kräfte an der Keramikugel in der Regel nicht aus, um ein Wälzen zu initiieren, was die extrem hohen Verschleißraten bei geringen Reibwerten erst ermöglicht.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Kugelkinematik den dominierenden Einfluss im System M-K darstellt. Eine Gleitbewegung der Si_3N_4 -Kugel ist die Ursache des extrem hohen Verschleißes. Weitere Einflüsse wie das Konturmateriale, die Schmierungsbedingungen und die Lasten beeinflussen nachfolgend die Verschleißempfindlichkeit *bei* einer Gleitbewegung der Kugel, wobei von den betrachteten Varianten nur die Kombination aus optimalem (*höherviskosen*) Schmierstoff und optimalem (*homogenen*) Konturmateriale eine geringe Verschleißempfindlichkeit aufweist.

Zusammenfassende Betrachtung und Systemoptimierung

In beiden Systemen ist eine Schmierung des Kontaktes notwendig. Aufgrund der geringen Adhäsionsneigung zwischen Metall und Keramik, kann im System M-K mit Si_3N_4 -Kugeln bereits eine geringe Ölmenge niedrige Verschleißraten über die gesamte Versuchszeit sicherstellen.

Die typischen Reaktionsschichten der Öladditive können bei ausreichender Schmierstoffverfügbarkeit und gleichzeitig geringen Verschleißraten in beiden Systemen jeweils auf beiden Kontaktpartnern festgestellt werden (Abb. 116, S. 150). Aufgrund der mittels EDX-Messungen bestimmten chemischen Zusammensetzung können die Schichten auf ZDDP-Verschleißschutzadditive zurückgeführt werden [76].

Eine wirksame Schichtbildung von ZDDP auf Si_3N_4 wurde in der Literatur sowohl im Selbstkontakt [65], als auch im Kontakt mit Wälzlagerstahl [14] nachgewiesen. Dabei wurde im Metall-Keramik-Kontakt [14] im Einklang mit den Ergebnissen dieser Arbeit (Abb. 116, S. 150 - *untere Zeile*) eine deutlich geringere Schichtausprägung auf der Keramik im Vergleich zum Metallgegenkörper festgestellt. Zusätzlich traten in [14] neben den Additivelementen auch Eisenanteile des Gegenkörpers auf.

Auch die Keramikugeln in dieser Arbeit zeigen im Bereich der Additivschichten immer einen Eisenauftrag (Abb. 83, S. 105). Daher ist für das betrachtete System keine Aussage möglich, ob die Additive wie in [65] direkt auf der vergleichsweise inerten Keramik oder auf dem metallischen Übertrag des Gegenkörpers reagieren, bzw. eine Kombination von beidem vorliegt.

Unabhängig vom Kugelmaterial stellt eine gesperrte Kugelrotation eine höhere Belastung dar. Für bestimmte Parameterkombinationen führt die gesperrte Kugelrotation zu extrem hohem Verschleiß.

Im System M-M ist bei gesperrter Rotation nur die Kombination aus *niedrigviskosem Öl* und einem Konturmateriale mit *ausgeprägter Zeiligkeit des Gefüges* anfällig gegenüber den stark erhöhten Verschleißraten. Alle andere Varianten zeigen auch bei gesperrter Kugelrotation geringen Verschleiß.

Im System M-K zeigen demgegenüber nur Versuche mit *hoher Ölviskosität* und *homogenem Materiale* geringen Verschleiß, während alle anderen Varianten bei gesperrter Kugelrotation versagen.

Die Versuche mit Metall- und Keramikkugel beschreiben damit die gleichen Zusammenhänge von zwei Seiten. Es liegt zwar in Abhängigkeit des Kugelmaterials eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber hohem Verschleiß bei gleitender Kugelbewegung vor, in beiden Systemen kippt das Verhalten jedoch bei Änderung der Parameter von geringen zu hohen Verschleißraten. Der kritische Punkt, an welchem das Systemverhalten von geringem zu hohem Verschleiß kippt, wird durch die gleichen Systemparameter gesteuert.

Die kritischen Parameter, welche die Stabilität des Tribologischen Systems gegenüber extrem hohem Verschleiß steuern, wurden in dieser Arbeit auf Basis der Versuche hergeleitet und sind in Abb. 122 zusammengefasst.

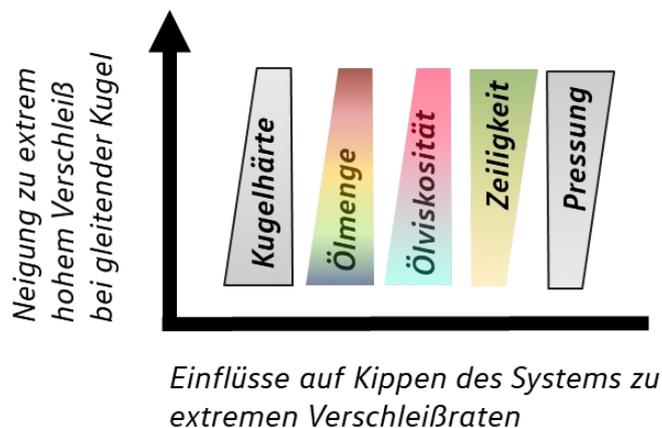


Abb. 122: Einflüsse auf das Kipverhalten (schematisch)

Für ein stabiles System ist auf Basis der Versuche mit gesperrter Rotation eine ausreichende Ölmenge, eine hohe Ölviskosität und ein homogenes Gefüge des Konturmaterials mit geringer Zeiligkeit anzustreben (Abb. 122). Um eine geringere Kontaktbelastung zu erreichen sind zusätzlich eine niedrige Pressung und eine gegenüber dem Konturmaterial nicht stark erhöhte Kugelhärte vorteilhaft.

Im Vergleich zur metallischen Paarung (M-M) neigt das System mit Keramikkugel (M-K), wie beschrieben, deutlich stärker zu extrem hohem Verschleiß bei gesperrter Kugelrotation.

Entscheidend ist jedoch, dass im System M-K aufgrund der geringeren adhäsiven Bindung zur metallischen Kontur häufig selbstständig eine Gleitbewegung stattfindet, weshalb auch im Standardversuch mit freier Kugelrotation hoher Verschleiß auftritt. Die Si_3N_4 -Kugel sperrt die Rotation gewissermaßen selbstständig.

Die geringe Adhäsionsneigung der Keramik hat somit positive und negative Folgen. Die Neigung zum Gleiten, welche in Verbindung mit der hohen Härte der Kugel häufig starken Verschleiß der Kontur hervorruft, schließt eine Nutzung der Si_3N_4 -Kugel für diese Anwendung aus. An dieser Stelle wirkt sich die geringe Adhäsionsneigung im System negativ aus.

Auf der anderen Seite belegen einzelne Versuche (M-K: Z), dass mit einer Keramikkugel auch unter Mangelschmierung sehr geringer Verschleiß möglich ist, falls eine stabile Wälzbewegung der Kugel eintritt.

Eine vergleichbare Mangelschmierung führt im System M-M aufgrund der hohen Adhäsionsneigung zum Fressen der Paarung und damit zu hohem Verschleiß. In Anwendungen, bei denen kein hoher Gleitanteil auftritt, kann der Systemverschleiß unter Extrembedingungen durch eine Si_3N_4 -Kugel gegenüber der Metall-Metall-Paarung optimiert werden, weshalb sich die Materialkombination aus Metall und Si_3N_4 für Sonderanwendungen durchgesetzt hat [126].

Die Kombination aus den gegenläufigen Effekten ist die Ursache dafür, dass die Systeme M-M und M-K im Mittel ähnlich hohen Konturverschleiß hervorrufen (Abschnitt 8.3.1), obwohl sich die Mechanismen, wie in diesem Abschnitt dargelegt, grundsätzlich unterscheiden. Mit dem erreichten Verständnis des Systemverhaltens können die folgenden Optimierungsvorschläge empfohlen werden.

Systemoptimierung: 1) Metall-Metall unter optimierter Beölung

Eine ausreichende Beölung im System M-M stellt geringe Verschleißraten sicher. Alle Versuche im Ölbad zeigen vergleichsweise geringen Verschleiß. Hoher abrasiver Verschleiß durch selbsttätiges „Klemmen“ der Kugel trat in den Versuchen mit 100Cr6-Kugel nicht auf, weshalb die Kombination aus optimaler Beölung und der Verwendung metallischer Werkstoff ein robustes System darstellt.

Die Material- und Bearbeitungskosten für Grund- und Gegenkörper können durch den Einsatz metallischer Werkstoffe gering gehalten werden. Eine höhere Ölviskosität zeigt bei gesperrter Rotation teilweise deutlich geringeren Verschleiß (Abb. 45, S. 69) und könnte damit die Robustheit des Systems weiter steigern. Eine höhere Ölviskosität widerspricht jedoch allgemein den Bestrebungen nach reibungsarmen Systemen, weshalb diese Variante für viele Anwendungen nicht zielführend ist. Auch ein homogenes Gefüge kann die Robustheit des Systems erhöhen, ist jedoch mit höheren Materialkosten verbunden.

Systemoptimierung: 2) Kontaktpartner mit geringerer Adhäsionsneigung

Kann eine Mangelschmierung nicht vermieden werden, ist eine Paarung mit geringer adhäsiver Bindung anzustreben. Dabei muss die Neigung zum starken Verschleiß bei gleitender Kugelbewegung, welche im System M-K mit Keramikkugeln das Verhalten bestimmt, verhindert werden. Hier könnte z.B. eine DLC-Beschichtung der Kugel zielführend sein. Dabei bleibt die geringe Makrohärte des Metall-Grundwerkstoffs erhalten. Aufgrund der großen Kugeloberfläche ist der Höhenabtrag der Schicht auf der Kugel bei Verschleiß gering. Erste Stichversuche, die im Rahmen dieser Arbeit nicht thematisiert werden, zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Allgemein ist in diesem hochbelasteten tribologischen System eine Echtzeit-Verschleißmessung unter realen Systembedingungen der einzige Weg zum Verständnis des Verhaltens. Aufgrund der schwer vorhersagbaren Kugelkinematik und dem möglichen Kippen zum extrem hohen Verschleiß müssen neue Materialkombinationen auch unter diesen realitätsnahen Versuchsbedingungen getestet werden.

9 Zusammenfassung

Diese Arbeit betrachtet die Tribologie am Beispiel eines Rastmechanismus. Dabei wird eine federbelastete Kugel über eine Rastkontur (abgekürzt als Kontur) unter Ölschmierung oszilliert (Abschnitt 3.1). Als Konturmateriale werden verschieden gehärtete Stähle, als Kugelmaterial Wälzlagerstahl oder Si_3N_4 -Keramik genutzt (Abschnitt 3.2). Damit ergeben sich geschmierte *Metall-Metall-Kontakte* (M-M) und geschmierte *Metall-Keramik-Kontakte* (M-K). Der Versuchsmatrix umfasst 35 Parametervariationen. Es wurden insgesamt 154 Versuche durchgeführt.

Das betrachtete Tribosystem zeichnet sich insbesondere durch eine unbestimmte Kinematik aus. Die Randbedingungen aus realen Anwendungen erfordern im betrachteten Rastmechanismus eine technische Umsetzung, bei der konstruktionsbedingt die Kinematik nicht definiert ist. Das bedeutet im konkreten Fall, dass nicht vorhersagbar ist, ob die Kugel während der Bewegung über die Kontur gleitet (*keine Rotation der Kugel*) oder eine wälzende Bewegung und damit ein Abrollen der Kugel über die Kontur stattfindet.

Das Systemverhalten ist daher instabil und kann während des Versuchs zwischen den Zuständen Gleiten und Wälzen kippen. Die Instabilität wurde durch eine Berechnung zum kinematischen Verhalten eindeutig nachgewiesen (Abschnitt 4.1).

Zusätzlich ist das System durch sehr hohe Kontaktdrücke mit Hertzischen Pressungen bis 8 GPa belastet. Diese Pressungen sind selbst für Wälzkontakte hoch und werden in technischen Anwendungen für gleitende Bewegungen in der Regel nicht erreicht [88]. Neben der kinematischen Instabilität infolge der undefinierten Bewegungsart, können auch bei konstanten kinematischen Bedingungen kleine Änderungen im System eine extreme Änderung im Verschleißverhalten hervorrufen. Das Systemverhalten kann damit sowohl durch eine spontane Änderung der Kinematik bei konstanten Systemparametern, als auch durch eine Änderung der Systemparameter (*z.B. Material oder Ölviskosität*) zwischen hohen und geringen Verschleißraten kippen.

Das Zusammenspiel aus instabiler Kinematik und hoher Pressung belastet die betrachteten Materialpaarungen stärker, als bei üblichen technischen Anwendungen [88,126]. Für zukünftige Anwendungen, bei denen eine höhere Leistungsdichte gefordert wird, sind die Erkenntnisse zum tribologischen Verhalten dieses Systems damit von allgemeiner Bedeutung.

Die hohe tribologische Belastung kann in Abhängigkeit der Systemparameter und der unbestimmten Kinematik eine große Bandbreite an Ergebnissen hervorbringen (Kapitel 6). Zur Reduzierung der Komplexität werden die 154 Versuche anhand der Messdaten in verschiedene Kategorien eingeteilt (Abschnitt 8.3.7). 4 Kategorien beschreiben die Einflüsse der unbestimmten Kinematik auf Basis der Verschleißraten. 5 weitere Kategorien charakterisieren den Einfluss unterschiedlicher Schmierungsbedingungen anhand der Reibwerte.

Die Kategorien beschreiben jeweils ein spezifisches Verschleißverhalten, welches im betrachteten tribologischen System aufgrund bestimmter Systemparameter (*z.B. Material oder Ölviskosität*) eintritt. Die gewählte Kategorisierung eignet sich zusätzlich zur Strukturierung der Analyseergebnisse (Kapitel 7).

Die entscheidenden Zusammenhänge konnten nur auf Basis der Kategorisierung der Versuche erkannt werden. Die Kategorien können den aus der Literatur bekannten Verschleißmechanismen (Abschnitt 2.2) zugeordnet werden, bilden dabei zusätzlich die Versuchshistorie und das kinematische Verhalten ab.

Das Verschleißverhalten der verschiedenen Materialpaarungen wird durch unterschiedliche Mechanismen bestimmt. Im Kontakt zwischen Metallen (M-M) dominiert der Einfluss der unterschiedlichen Beölungszustände (Abschnitt 8.1):

Reibung und Verschleiß nehmen mit abnehmender Schmierstoffverfügbarkeit stark zu. Dabei können die einzelnen Verschleißzustände unter gleichen Systembedingungen lange Zeit stabil bleiben und bei einer Verschlechterung der Schmierung fließend ineinander übergehen. Bei einer Ölbad schmierung liegen Ermüdungsverschleiß (*Kategorie M-M: X*) sowie ein degressiver Verschleißverlauf vor. Mit abnehmender Schmierstoffmenge geht das tribologische Verhalten von Abrasion (*Kategorie M-M: A*) über milde Adhäsion (*Kategorie M-M: B*) zu schweren Formen von Adhäsion in Verbindung mit tribochemischen Reaktionen (*Kategorien M-M: C, M-M: D*) über. Ab der Kategorie M-M: B bildet sich eine Verschleißpaste aus dem verfügbaren Schmierstoff und den Verschleißpartikeln, welche als Mischung aller Systemelemente vorliegt.

Die einzelnen Kategorien können sowohl auf Basis der Messdaten (*Reibwerte und Verschleißdaten*) als auch durch die jeweiligen Verschleißerscheinungen auf den Oberflächen deutlich voneinander abgegrenzt werden. Kontur und Kugel zeigen dabei in den meisten Fällen die gleichen Verschleißerscheinungen. Volumetrisch betrachtet tritt zudem ähnlich hoher Verschleiß an Kontur und Kugel auf.

Neben dem Haupteinfluss der Schmierstoffverfügbarkeit nehmen die anderen Parameter im Tribosystem M-M nur eine untergeordnete Rolle ein. Bei gegebenem Rotationsfreiheitsgrad der Kugel haben die Legierung und die Wärmebehandlung der Kontur keinen Einfluss auf das Verschleißverhalten des Systems, solange die niedriglegierten Stähle nach Wärmebehandlung eine vergleichbare Makrohärte aufweisen. Auch die unterschiedlichen Viskositätsklassen der Öladditive zeigen keinen signifikanten Einfluss.

Im Kontakt zwischen Metall und Keramik (M-K) spielt die Schmierstoffmenge hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Haupteinfluss ist hier das kinematische Verhalten der Kugel (Abschnitt 8.2):

Durch Versuche mit mechanisch gesperrtem Rotationsfreiheitsgrad der Si₃N₄-Kugel konnte gezeigt werden, dass die gleitende Bewegung (*keine Rotation*) für die meisten Material- und Schmierstoffkombinationen zu extrem hohem Verschleiß an der Metallkontur führt.

Ist die Rotation nicht gesperrt, schwankt das Verhalten scheinbar stochastisch zwischen sehr geringen und hohen Verschleißraten. Im Fall des starken Verschleißes bei freier (undefinierter) Rotation der Kermikkugel liegen die Verschleißraten auf dem Niveau der Versuche mit gesperrter Rotation. Dabei treten auch die gleichen Verschleißerscheinungen (*Kategorie M-K: Y*) auf, weshalb der extrem hohe Verschleiß bei gegebenem

Rotationsfreiheitsgrad auf eine selbstständig gleitende Bewegung der Kugel zurückzuführen ist (Abschnitt 8.3.2). Im Umkehrschluss führt die wälzende Bewegung zu geringem ermüdungsbedingtem Verschleiß (M-K: X, M-K: Z).

Die Si_3N_4 -Kugel neigt aufgrund der geringeren adhäsiven Bindungskräfte zur Metallkontur verstärkt zu einer selbstständig gleitenden Bewegung während der Oszillation. Durch die Berechnungen zur Kugelkinematik mit einem zweidimensionalen Ersatzmodell sowie Messungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera konnte die im System vorliegende unbestimmte Kugelkinematik nachgewiesen werden.

Unabhängig von der Kinematik, der vorhandenen Ölmenge und auch den Konturverschleißraten sind die Reibwerte im System M-K immer auf geringem Niveau, was auch auf die geringen adhäsiven Bindungskräfte zurückzuführen ist. Die Keramik bietet damit insbesondere bei Mangelschmierung den Vorteil geringer Reibwerte.

Die mit den geringen Reibkräften an der Kontur verbundene Neigung zu einer gleitenden Bewegung schließt die Anwendung der Si_3N_4 -Kugel für das betrachtete System aus, da das Gleiten in den meisten Fällen zu extrem hohem Verschleiß der Kontur führt. Der Verschleiß der Keramikugel selbst ist in allen Fällen vergleichsweise gering (siehe Abschnitt 8.3.5).

Die Systeme M-M und M-K werden demzufolge durch unterschiedliche Mechanismen bestimmt. Im System M-M führt die hohe adhäsive Bindung zu hohem Verschleiß, wenn keine ausreichende Trennung der Oberflächen durch den Schmierstoff oder Verschleißschutzadditive vorliegt. Im System M-K bestimmt die Kugelkinematik das Verhalten, da die geringen adhäsiven Bindungskräfte ein Gleiten der Kugel begünstigen und die Gleitbewegung in den meisten Fällen extrem hohe Verschleißraten zur Folge hat.

Ob eine gleitende Bewegung im System M-K zu extrem hohem Verschleiß führt, wird durch eine Reihe von Parametern des tribologischen Systems bestimmt. Neben einer niedrigen Ölviskosität wirkt sich insbesondere eine starke Zeiligkeit des Gefüges, welche bei den verwendeten Konturmaterialien nach dem Laserhärten vorliegt, nachteilig aus. Die Zeiligkeit kann durch nachträgliches Anlassen verringert werden. Dies führt dann auch im Versuch zu einem besseren tribologischen Verhalten (Abschnitt 8.3).

Die gleichen Parameter bestimmen auch das Systemverhalten im Metall-Metall-Kontakt (M-M) bei gesperrter Rotation der Metallkugel. Dies hat jedoch keine Relevanz für die Systemfunktion unter realen Bedingungen, da ein Gleiten in Verbindung mit extrem hohem Verschleiß bei freier (undefinierter) Kugelrotation im System M-M nicht selbstständig auftritt. An dieser Stelle wirken sich die hohen adhäsiven Bindungskräfte im System M-M positiv aus, da die höheren Reibkräfte ein Wälzen der Kugel begünstigen. Die Zeiligkeit und die Ölviskosität haben im System M-M infolgedessen nur bei einer mechanisch gesperrten Kugelrotation einen Einfluss (Abschnitt 8.3).

In Untersuchungen zur Mikrostrukturentwicklung konnte gezeigt werden, dass die hohe tribologische Belastung für die meisten Versuche eine starke Änderung der Mikrostruktur mit sich bringt. Neben einer Verzerrung des Gefüges bis in eine Tiefe von 30 μm konnte im oberflächennahen Bereich für fast alle Kategorien nanokristallines Gefüge festgestellt werden. Nur bei extremem abrasivem Verschleiß infolge einer gleitenden Keramikkugel zeigt sich keine starke Gefügebeeinflussung (Abschnitt 8.3.6).

SHAKHVOROSTOV, PÖHLMANN und SCHERGE haben in [112] beschrieben, dass zur Ausbildung eines nanokristallinen Gefüges in Metallen ein ausreichend hoher Energieeintrag notwendig ist. Zusätzlich benötigt das Wachstum der nanokristallinen Schicht in die Tiefe Zeit, was beispielsweise die Ergebnisse von WOLFF ET AL. in [131] darlegen. Bei starkem abrasivem Verschleiß durch die gleitende Keramikkugel liegt ein hoher Materialabtrag bei geringen Reibwerten vor. Damit wird zum einen wenig Energie in die Oberflächen eingeleitet, zum anderen steht aufgrund der hohen Verschleißrate kaum Zeit zur Bildung von nanokristallinem Gefüge zur Verfügung. Die Ergebnisse stehen damit in Einklang zur Literatur.

Abschließende kann die Bedeutung der Ergebnisse für die Weiterentwicklung andere tribologischer Systeme eingeordnet werden:

Durch die hohe Belastung können im betrachteten System kleine Unterschiede in den Material- oder Schmierstoffeigenschaften zu einer starken Änderung des tribologischen Verhaltens führen. Diese Aspekte werden in zukünftigen Entwicklungen, welche mit dem Ziel der Effizienzsteigerung immer höhere Leistungsdichten abbilden müssen, eine große Rolle spielen.

Das instabile Systemverhalten konnte nur durch die Betrachtung des realen Systems abgebildet werden. Im Vergleich zu einem abstrahierten Modellversuch bringt dies im betrachteten System die Nachteile einer undefinierten Kinematik und einer im Versuchsablauf stark schwankenden Last- und Kontaktsituation mit sich. Diesen Problemen wurde mit einer hohen Versuchs- und Analysestatistik begegnet. Nur mit Hilfe der Kategorisierung der Versuche konnte ein Überblick über das komplexe Systemverhalten erreicht werden.

Die Vorgehensweise der Kategorisierung sowie die Erkenntnisse zum Verschleißverhalten im geschmierten Kontakt von Metall-Metall und Metall-Keramik können auf andere hochbelastete Wälz- und Gleitkontakte übertragen werden. Die umfassenden Ergebnisse zum Übergang der bekannten Verschleißmechanismen im gleichen Tribosystem ermöglichen eine Präzisierung (Abschnitt 8.1.3) der klassischen Verschleißtheorie.

Literaturverzeichnis

- [1] AIFANTIS, K.E., KONSTANTINIDIS, A.A.: Hall-Petch revisited at the nanoscale. *Materials Science and Engineering: B* 163, S. 130-144, 2009
- [2] AJAYI, O.O.; HERSBERGER, J.G.; ZHANH, J.; YOON, H.; FENSKE, G.R.: Microstructural evolution during scuffing of hardened 4340 steel – implication for scuffing mechanism. *Tribology International* 38, S. 277-288, 2005
- [3] BHADESHIA, H.K.D.H.: Steels for bearings. *Progress in Materials Science* 57, S. 268-435, 2012
- [4] BARTEL, D.: Simulation von Tribosystemen – Grundlagen und Anwendungen (Habilitationsschrift). Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 1.Auflage, 2010
- [5] BARTEL, D.: *Tribologie – Grundlagen*. unveröffentlichtes Vorlesungsskript, Institut für Maschinenkonstruktion ,OvGU Magdeburg, 2011
- [6] BAUCH, J.; ROSENKRANZ, R.: Physikalische Werkstoffdiagnostik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2017
- [7] BERGMANN, W.: Werkstofftechnik - Teil 1: Grundlagen. Hanser-Verlag, München, 6. Auflage, 2008
- [8] BERGMANN, W.: Werkstofftechnik – Teil 2: Anwendung. Hanser-Verlag, München, 4. Auflage, 2009
- [9] BERTHIER, Y.: *Maurice Godet's third body*. in: *The Third Body Concept*, Elsevier Verlag, Amsterdam, 1996
- [10] BLECK, W.: Werkstoffkunde Stahl - für Studium und Praxis, Verlagsgruppe Mainz, 3. Auflage, Mainz, 2010
- [11] BRINCKMANN, S.; STRATMANN, A. DEHM, G.; JACOBS, G.: Tribolayer formation during macro- and microscale cyclic contact. *Tribology International* 129, S. 436-441, 2019
- [12] BRINK, A.; LICHTENBERG, K.; SCHERGE, M.: The influence of the initial near-surface microstructure and imposed stress level on the running-in characteristics of lubricated steel. *Wear* 360-361, S.114-120, 2016
- [13] BURKART, K.: *Überrollungslebensdauer des Wälzlagerstahls 100Cr6 in Abhängigkeit von nicht idealen Gefügeausbildungen unter besonderer Berücksichtigung der Karbidzeitigkeit* (Dissertation). Universität Bremen, 2009
- [14] CAI, Z.-B.; MEYER, H.M.; MA, C.; CHI, M.; LUO, H.; QU, J.: Comparison of the tribological behavior of steel–steel and Si₃N₄–steel contacts in lubricants with ZDDP or ionic liquid. *Wear* 319, S. 172-183, 2014

- [15] CAO, Y.; NI, S.; LIAO, X.; SONG, M.; ZHU, Y.: Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: R 133*, S.1-59, 2018
- [16] CHEN, Z.; CUNEO, J.C.; MECHOLSKY, J.J.; HU, S.: Damage processes in Si₃N₄ bearing material under contact loading. *Wear 198*, S 197-207, 1996
- [17] CHO, D.-H.; KIM J.-S.; JIA, J.; LEE, Y.-Z.: Comparative analysis based on adiabatic shear instability for scuffing failure between unidirectional and reciprocating sliding motion. *Wear 297*, S. 774.780, 2013
- [18] CHOKSI, A.H.; ROSEN, A.; KARCH, J.; GLEITER, H.: On the validity of the Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials. *Scripta Metallurgica*, Vol. 23, S. 11679-1684, 1989
- [19] CHRIST, H.-J.: Wechselverformung von Metallen – Zyklisches Spannungs-Dehnungsverhalten und Mikrostruktur. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1991
- [20] CIHAK-BAYR, U.; MOZDZEN, G.; BADISCH, E.; MERSTALLINGER, A.; WINKELMANN, H.: High plastically deformed sub-surface tribozones in sliding experiments. *Wear 209*, S. 11-20, 2014
- [21] CZICHOS, H.; HABIG, K.-H.: Tribologie Handbuch – Reibung und Verschleiß. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1.Auflage, 1992
- [22] DANIELSEN, H.K.; GUTIERREZ GUZMAN, F.; DAHL, K.V.; LI, Y.J.; WU, J.; JACOBS, G.; BURGHARDT, G.; FAESTER, S.; ALIMADADI, H.; GOTO, S.; RAABE, D.; PETROV, R.: Multiscale characterization of White Etching Cracks (WEC) in a 100Cr6 bearing from a thrust bearing test rig. *Wear 370-371*, S. 73.82, 2017
- [23] DENAPE, J.; MARZINOTTO, A.; PETIT, J.A.: Roughness effect of silicon nitride sliding on steel under boundary lubrication. *Wear 159*, S. 173-184, 1992
- [24] DENG Q.; GODFREY, A.; LIU, W.; ZHANG, C.L.: Microstructural evolution of pure copper subjected to friction sliding deformation at room temperature. *Materials Science and Engineering: A 639*, S. 448-455, 2015
- [25] DESCARTES, S.; BERTHIER, Y.: Rheology and flows of solid third bodies: background and application to an MoS_{1.6} coating. *Wear 252*, S.546-556, 2002
- [26] DETERS, L.: Reibung, Schmierung und Verschleiß. in: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2* (Hg.: STEINHILPER, W.; SAUER, B.), Springer Verlag, Berlin, 2008
- [27] DOWSON, D.: Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication. *Wear 190* (1995), S.125-138, 1995
- [28] DRYZEK, J.: Detection of tribolayer in different metals using positron lifetime spectroscopy. *Tribology International 131*, S.268-276, 2019
- [29] EVANS, M.-H.; WALKER, J.C.; MA, C.; WANG, L.; WOOD, R.J.K.: A FIB/TEM study of butterfly crack formation and white etching area (WEA) microstructural

- changes underrolling contact fatigue in 100Cr6 bearing steel. *Materials Science and Engineering: A* 570, S. 127-134, 2013
- [30] EVANS, M.-H.; RICHARDSON, A.D.; WANG, L.; WOOD, R.J.K.; ANDERSON, W.B.: Confirming subsurface initiation at non-metallic inclusions as one mechanism for white etching crack (WEC) formation. *Tribology International* 75, S. 87-97, 2014
- [31] FERGUSON, S.; JOHNSON, J.; GONZALES, D.; HOBBS, C.; ALLEN, C.; WILLIAMS, S.: Analysis of ZDDP Content and Thermal Decomposition in Motor Oils Using NAA und NMR, *Physics Procedia* 66, S. 439-444, 2015
- [32] FISCHER, T.E.; ZHU, Z.; KIM, H.; SHIN, D.S.: Genesis and role of wear debris in sliding wear of ceramics. *Wear* 245, S. 53-60, 2000
- [33] FLEISCHER, G.: Zur Energetik der Reibung. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg*, Jg. 34 Heft 8, S.55-66, Magdeburg, 1990
- [34] GLAESER, W. A.: *Materials for Tribology*, Elsevier Verlag, Amsterdam, 1992
- [35] GLEICH, H.: *Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie* (Dissertation). Universität Duisburg-Essen, 2004
- [36] GODET, M: The Third-Body approach: A mechanical view of wear. *Wear* 100, S.437-452, 1984
- [37] GODET, M: Third-Bodies in Tribology. *Wear* 136, S. 29-45, 1990
- [38] GRABULOV, A.; ZIESE, U., ZANDBERGEN, H.W.: TEM/SEM investigation of microstructural changes within the white etching area under rolling contact fatigue and 3-D crack reconstruction by focused ion beam. *Scripta Materialia* 57, S. 635-638, 2007
- [39] GRECO, A.; SHENG, S.; KELLER, J.; ERDEMIR, A.: Material wear and fatigue in wind turbine Systems. *Wear* 203, S.1583.1591, 2013
- [40] GREINER, C.; LIU, Z.; SCHNEIDER, R.; PASTEWKA, L.; GUMSCH, P.: The origin of surface microstructure evolution in sliding friction. *Scripta Materialis* 153, S. 63-67, 2018
- [41] GREINER, C.; GAGEL, J.; GUMSCH, P.: Solids Under Extreme Shear: Friction-Mediated Subsurface Structural Transformations. *Advanced Materials* 2019-31, 1806705, 2019
- [42] GROSS, D.; HAUGER, W.; WRIGGERS, P. *Technische Mechanik 4*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2018
- [43] HAHN, F.: *Untersuchung des zyklisch plastischen Werkstoffverhaltens unter umformnahen Bedingungen* (Dissertation). TU Chemnitz, 2003
- [44] HAHN, H.; PADMANABHAN, K.A: Mechanical response of nanostructured materials. *Nanostructured Materials Vol.6*, S. 191-200, 1995

- [45] HAHN, H.; MONDAL, P.; PADMANABHAN, K.A: Plastic Deformation of nanocrystalline materials. *Nanostructured Materials*, Vol. 9, S. 603-606, 1997
- [46] HERSHBERGER, J.; AJAYI, O.O.; ZHANG, J.; YOON, H.; FENSKE, G.R., Evidence of scuffing initiation by adiabatic shear instability. *Wear* 258, S. 1471-1478, 2005
- [47] HERSHBERGER, J. AJAYI, O.O.; ZHANG, J.; YOON, H.; FENSKE, G.R.: Formation of austenite during scuffing failure of SAE 4340 steel. *Wear* 256, S. 159-167, 2004
- [48] HOSSEINI, S.B.; KLEMENT, U.; YAO, Y.; RYTTBERG, K.: Formation mechanisms of white layers induced by hard turning of AISI 52100 steel. *Acta Materialia* 89, S. 258-267, 2015
- [49] HÜLSENBERG, D.: Keramik – Wie ein alter Werkstoff hochmodern wird. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2014
- [50] HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P.: Tribology – Friction and Wear of Engineering Materials. Elsevier Verlag, New York, 2017
- [51] IBC Wälzlager GmbH: *Werkstoffe für Wälzlager*. Online im Internet unter: https://www.ibc-waelzlager.com/files/IBC_Waelzlagerwerkstoffe.pdf (14.06.2020)
- [52] IPCC: Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (Hg.: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P.R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J.B.R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T.), World Meteorological Organization, Genf, Schweiz, 2018
- [53] JIANG, M.; KOMANDURI, R.: On the finishing of Si₃N₄ balls for bearing applications. *Wear* 215, S.267-278, 1998
- [54] JIANG, M.; WOOD, N.O.; KOMANDURI, R.: On chemo-mechanical polishing (CMP) of silicon nitride (Si₃N₄) workmaterial with various abrasives. *Wear* 220, S. 59-71, 1998
- [55] KADIN, Y.; SHERIF, M.Y.: Energy dissipation at rubbing crack faces in rolling contact fatigue as the mechanism of white etching area formation. *International Journal of Fatigue* 96, S. 114-126, 2017
- [56] KHADER, I.; KÜRTEEN, D.; KAILER, A.: A study on the wear of silicon nitride in rolling–sliding contact. *Wear* 296, S. 630-637, 2012
- [57] KLAFFKE, D.: Fretting wear of ceramics, *Tribology International*, 0301-679X, S. 89-101, 1989
- [58] KORRES, S.; FESSER, T.; DIENWIEBEL, M.: In situ observation of wear particle formation on lubricated sliding surfaces. *Acta Materialia* 60, S. 420-429, 2012

- [59] KÜRTEEN, D.R.: *Einfluss der tribochemischen Schmierstoffoxidation auf die wasserstoffinduzierte Wälzkontaktermüdung* (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015
- [60] KURZWEIL, P.: *Chemie – Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 10. Auflage, 2015
- [61] LAKSHMINARAYANAN, R.; CHAO, L.-Y.; IYER, N.; SHETTY, D.K.: Wear of steel in rolling contact with silicon nitride. *Wear* 210, S. 278-286, 1997
- [62] LI, S.-X.; ZHAO, P.-G.; HE, Y.-N.; YU, S.-R.: Microstructural evolution associated with shear location of AISI 52100 under high strain rate loading. *Materials Science and Engineering: A* 662, S. 46-53, 2016
- [63] LINSLER, D.: *Einlaufverhalten einer untereutektischen AlSi-Legierung unter Berücksichtigung des Randzonengefüges* (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- [64] LIU, L.; SHENG, Y.; LIU, M.; DIENWIEBEL, M.; ZHANG, Z.; DASTAN, D.: Formation of the third bodies of steel sliding against brass under lubricated conditions. *Tribology International* 140, 105727, 2019
- [65] LIU, W.; DUDA, J.L.; KLAUS, E.E.: Wear property of silicon nitride in steel-on-Si₃N₄ and Si₃N₄-on-Si₃N₄ systems. *Wear* 199, S. 217-221, 1996
- [66] LIU, W.; KLAUS, E.E.; DUDA, J.L.: Wear behaviour of steel-on-Si₃N₄ and Si₃N₄-on-Si₃N₄ systems with vapor phase lubrication of oleic acid and TCP. *Wear* 214, Issue 2, S. 207-211, 1998
- [67] LOJKOWSKI, W.; DJAHANBAKHS, M.; BÜRKLE, G.; GIERLOTKA, S.; ZIELINSKI, W.; FECHT, H.-J.: Nanostructure formation on the surface of railway tracks. *Materials Science and Engineering A* 303, S. 197-208, 2001
- [68] MACHERAUCH, E.; ZOCH, H.-W.: *Praktikum in Werkstoffkunde*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019
- [69] MARQUES, F.P.; SCANDIAN, C.; BOZZI, A.C.; FUKUMASU, N.K.; TSCHIPTSCHIN, A.P.: Formation of a nanocrystalline recrystallized layer during microabrasive wear of a cobalt-chromium based alloy (Co-30Cr-19Fe). *Tribology International*, Vol. 116, S. 105-112, 2017
- [70] MATSUHIRO, K.; SAKAI, H.; SOMA, T.; ODA, I.: Tribological Study of selected Ceramics versus Metal Sliding Couples. *SAE-Paper 870417*, 1987
- [71] MEERKAMM, H.: *Schaeffler Technisches Taschenbuch*. Schaeffler Technologies, Herzogenaurach, 2. Auflage, 2013
- [72] MEYERS, M.A.; MISHRA, A.; BENSON, D.J.: Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science* 51, S. 427-556, 2006

- [73] MORIMOTO, T.; KAMIKAWE, K.: Friction and wear of silicon nitride – steel and cemented carbide – steel pairs in lubricated sliding. *Tribology International Vol. 29 No.7*, S. 537-546, 1996
- [74] MORSDORF, L.; MAYWEG, D.; LI, Y.; DIEDERICHS, A.; RAABE, D.; HERBIG, M.: Moving cracks form white etching areas during rolling contact fatigue in bearings. *Materials Science & Engineering A 771*, 128659, 2020
- [75] MUTHUNILAVAN, N.; RAJARAM, G.: Effect on lubrication regimes with silicon nitride and bearing steel balls. *Tribology International 116*, S. 403-413, 2017
- [76] NICHOLLS, M.A.; DO, T.; NORTON, P.R.; KASRAI, M.; BANCROFT, G.M.: Review of the lubrication of metallic surfaces by zinc dialkyl-dithiophosphates. *Tribology International 38*, S. 15-39, 2005
- [77] NOVAK, S.; DRAZIK, G.; SAMARDZIJA, Z.; KALIN, M.; VIZINTIN, J.: Wear of silicon nitride ceramics under fretting conditions. *Materials Science and Engineering A 215*, S. 125-133, 1996
- [78] O'BRIEN, M.J.; PRESSER, N.; ROBINSON, E.Y. : Failure analysis of three Si₃N₄ balls used in hybrid bearings. *Engineering Failure Analysis 10*, S 453-473, 2003
- [79] ÖSTERLE, W.; ROOCH, H.; PYZALLA, A.; WANG, L.: Investigation of white etching layers on rails by optical microscopy, electron microscopy, X-ray and synchrotron X-ray diffraction. *Materials Science and Engineering A 303*, S. 150.157, 2001
- [80] UMEHARA, N.; KOMANDURI, R.: Magnetic fluid grinding of HIP-Si₃N₄ rollers. *Wear 192*, S. 85.93, 1996
- [81] PADMANABHAN, K.A.: Mechanical properties of nanostructured materials. *Materials Science and Engineering A304-306*, S. 200-205, 2001
- [82] PADMANABHAN, K.A.; SCRIPATHI, S.; HAHN, H.; GLEITER, H.: Inverse Hall–Petch effect in quasi-and nanocrystalline materials. *Materials Letters 133*, S. 151-154, 2014
- [83] PALADUGU, M.; HYDE, S.R.: White etching matter promoted by intergranular embrittlement. *Scripta Materialia 130*, S. 219-222, 2017
- [84] PALADUGU, M.; HYDE, S.R.: Microstructure deformation and white etching matter formation along cracks. *Wear 390-391*, S. 367-375, 2017
- [85] PALADUGU, M.; LUCAS, D.R.; HYDE, S.R.: Effect of lubricants on bearing damage in rolling-sliding conditions: Evolution of white etching cracks. *Wear 398-399*, S. 165-177, 2018
- [86] PAN, R.; REN, R.; CHEN, C.; ZHAO, X.: Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear. *Materials Characterization*, Vol. 132, S. 397-404, 2017
- [87] PANDE, C.S., COOPER, K.P.: Nanomechanics of Hall-Petch relationship in nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science 54*, S. 689-706, 2009

- [88] POLL, G. Wälzlager. in: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2* (Hg.: STEINHILPER, W.; SAUER, B.), Springer Verlag, Berlin, 2008
- [89] POPOV, V.L.: *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2009
- [90] POPOV, V.L.; GERVE, A.; KEHRWALD, B.; SMOLIN, I.Y.: Simulation of wear in combustion engines. *Computational Materials Science 19*, S. 285-291, 2000
- [91] QUEK, S.S.; CHOOI, Z.H.; WU, Z.; ZHANG, Y.W.; SCROLOVITZ, D.J.: The inverse hall-petch relation in nanocrystalline metals: A discrete dislocation dynamics analysis. *Journal of Mechanics and Physics of Solids 88*, S. 252-266, 2016
- [92] RAGA, R.: *Damage initiation and evolution in silicon nitride under cyclic and rolling contact* (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017
- [93] RAGA, R.; KHADER, I.; CHLUP, Z.; KAILER, A.: Damage initiation and evolution in silicon nitride under non-conforming lubricated hybrid rolling contact. *Wear*, Vol. 360-361, S. 147-159, 2016
- [94] RIGNEY, D.A.; GLAESER, W.A.: The Significance of near surface microstructure in the wear process. *Wear 46*, S. 241-250, 1978
- [95] RIGNEY, D.A.: Comments on the sliding wear of metals. *Tribology International Vol. 30*, No. 5, S. 351-367, 1997
- [96] RIGNEY, D.A.: Transfer, mixing and associated chemical and mechanical processes during the sliding of ductile materials. *Wear 235*, S. 1-9, 2000
- [97] RIGNEY, D.A.; FU, X.Y.; HAMMERBERG, J.E.; HOLIAN, B.L.; FALK, M.L.: Examples of structural evolution during sliding and shear of ductile materials. *Scripta Materialia 49*, S. 977-983, 2003
- [98] ROOS, E.; MAILE, K.: *Werkstoffkunde für Ingenieure*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2011
- [99] RÖSLER, J.; HARDERS, H.; BÄKER, M.: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- [100] RUDLAFF, T.: *Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 1993
- [101] RYDEL, J.J.; PAGKALIS, K.; KADIRIC, A.; RIVERA-DIAZ-DEL-CASTILLO, P.E.J.: The correlation between ZDDP tribofilm morphology and the microstructure of steel. *Tribology International Vol. 113*, S. 12-25, 2017
- [102] SAARSTAHL AG: *Datenblätter*. Online im Internet unter: <https://www.saarstahl.com/sag/de/allgemein/suche/index.shtml?q=Datenbl%C3%A4tter> (07.05.2020)
- [103] SAHOO, P.; DAVIM, P.D.: *Tribology of Ceramics and Ceramic Matrix Composites*. in: *Tribology for Scientists and Engineers*, Springer Verlag, New York, 2013

- [104] SCHERGE, M.; BRINK, A.; LINSLER, D.: Tribofilms Forming in Oil-Lubricated Contacts. *Lubricants* 2016, 4, 27, 2016
- [105] SCHERGE, M.; LINSLER, D.; SCHLARB, T.: The running-in corridor of lubricated metal-metal contacts. *Wear* 342-343, S. 60-64, 2015
- [106] SCHERGE, M.; MARTIN, J.M.; PÖHLMANN, K.: Characterization of wear debris of systems operated under low wear-rate conditions. *Wear* 260, S. 458-461, 2006
- [107] SCHERGE, M.; SHAKHVOROSTOV, D.; PÖHLMANN, K.: Fundamental wear mechanism of metals. *Wear* 255, S. 395-400, 2003
- [108] SCHÖPPL, O.: Siliciumnitrid in Wälzlagern, *Vortragsunterlagen für die Fachtagung „Industrietag Siliciumnitrid“ am Fraunhofer IKTS*. Dresden, S. 13, 2018
- [109] SMELOVA, V.; SCHWEDT, A.; WANG, L.; HOLWEGGER, W.; MAYER, J.: Electron microscopy investigations of microstructural alterations due to classical Rolling Contact Fatigue martensitic bearing steel. *International Journal of Fatigue* 98, S. 142-154, 2017
- [110] SMELOVA, V.; SCHWEDT, A.; WANG, L.; HOLWEGGER, W.; MAYER, J.: Microstructural changes in White Etching Cracks (WECs) and their relationship with those in Dark Etching Region (DER) and White Etching Bands (WEBs) due to Rolling Contact Fatigue (RCF). *International Journal of Fatigue* 100, S. 148-158, 2017
- [111] SHAKHVOROSTOV, D.; PÖHLMANN, K.; SCHERGE, M.: An energetic approach to friction, wear and temperature. *Wear* 257, S. 124-130, 2003
- [112] SHAKHVOROSTOV, D.; PÖHLMANN, K.; SCHERGE, M.: Structure and mechanical properties of tribologically induced nanolayers. *Wear* 260, S. 433-437, 2006
- [113] SHAKHVOROSTOV, D.; JIAN, L.; NOLD, E.; BEUCHLE, G.; SCHERGE, M.: Influence of Cu Grain Size on Running-in Related Phenomena. *Tribol Lett* 28, S. 307-318, 2007
- [114] SHEASBY, J.S.; CAUGHLIN, T.A.; MACKWOOD, W.A.: A comparison of the boundary lubrication of 52100 steel, zirconia and silicon nitride by S, P, S/P and zinc dialkyl dithiophosphate additives. *Wear* 196, S. 100-109, 1996
- [115] SOMMER, K.; HEINZ R.; SCHÖFER, J.: Verschleiß metallischer Werkstoffe. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 1. Auflage, 2010
- [116] SHU, N.P.; JAHANMIR, S.; ABRAHAMSON, E.P.: The Delamination Theory of Wear. *National Technical Information Service*, U.S. Department of commerce, 1974
- [117] STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A.: Engineering Tribology. 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005
- [118] SU, Y.-S.; LI, S.-X.; LU, S.-Y.; SHU, X.-D.: Deformation-induced amorphization and austenitization in white etching area of a martensite bearing steel under rolling contact fatigue. *International Journal of Fatigue* 105, S. 160-168, 2017

- [119] TAKADOUM, J.; HOUMID-BENNANI, H.; MAIREY, D.: The Wear Characteristics of Silicon Nitride. *Journal of the European Ceramic Society* 18, S. 553-556, 1998
- [120] TARASSOV, S.U.; KOLUBAEV, A.V.: Effect of friction on subsurface layer microstructure in austenitic and martensitic steels. *Wear* 231, S. 228-234, 1999
- [121] VIEILLARD, C.: Observation of subsurface rolling contact fatigue cracks in silicon nitride and comparison of their location to Hertzian contact subsurface stresses. *International Journal of Fatigue* 96, S. 283-292, 2017
- [122] VILLWOCK, J.; HANAU, A.: Beanspruchung bei Berührung zweier Körper (Hertz'sche Formeln). Abschnitt C4 in: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau*, (Hg.: GROTE, K.-H.; Bender, B.; GÖHLICH, D.), Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2018
- [123] VOGT, O.: *Haftreibung und reversierender Gleitverschleiß von Al₂O₃ und Si₃N₄-Keramik in Paarung mit Stahl und Gusseisen* (Dissertation). Universität Karlsruhe (TH), 2001
- [124] VOGT, O.; ZUM GAHR, K.-H.: Tribologisches Verhalten von Grauguß/ Keramik bzw. Stahl/Keramik-Paarungen im ungeschmierten reversierenden Gleitkontakt. *Tribologie und Schmierungstechnik*, Jahrgang 47, S. 28-33, 2000
- [125] WAN, S.; LI, D.; ZHANG, G.; TIEU, A.K.; ZHANG, B.: Comparison of the scuffing behaviour and wear resistance of candidate engineered coatings for automotive piston rings. *Tribology International* 106, S. 10-22, 2017
- [126] WANG, L.; SNIDLE, R.W.; GU, L.: Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research. *Wear* 246, S. 159-173, 2000
- [127] WANG, L.; WOOD, R.J.K.; HARVEY, T.J.; MORRIS, S.; POWRIE, H.E.G.; CARE, I.: Wear performance of oil lubricated silicon nitride sliding against various bearing steels. *Wear* 255, Issues 1-6, S. 657-667, 2003
- [128] WANG, W.; WEN, H.; HE, N.; CHEN, W.: Effect of load on tribological properties of silicon nitride/steel under rolling-sliding contact condition. *Tribology International* 125, S. 27-28, 2018
- [129] WANG, X.; WEI, X.; HONG, X.; YANG, J.; WANG, W.: Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel. *Applied Surface Science*, Vol. 280, S. 381-387, 2013
- [130] WOLFF, K.; LIU, Z.; BRAUN, D.; SCHNEIDER, J.; GREINER, C.: Chronology of the microstructure evolution for pearlitic steel under unidirectional tribological loading. *Tribology International* 102, S. 540-545, 2016
- [131] ZHANG, Y.S.; WEI, Q.M.; NIU, H.Z.; LI, Y.S.; CHEN, C.; YU, Z.T.; BAI, X.F.; ZHANG, P.X.: Formation of nanocrystalline structure in tantalum by sliding friction treatment. *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 45, S. 71-75, 2014

- [132] ZHAO, X.; LIU, J.; ZHU, B.; MIAO, H.; LUO, Z.: Tribological characteristics of Si₃N₄ ceramic sliding on stainless steel. *Wear* 206, S. 78-82, 1997
- [133] ZHU, Y.T.; LANGDON, T.G.: The Fundamentals of Nanostructured Materials Processed by Severe Plastic Deformation. *JOM – October 2004*, S. 58-63, 2004
- [134] ZUM GAHR, K.-H.: *Microstructure and Wear of Materials*. Elsevier Verlag, New York, 1987

Anhang

A	FARB- UND SYMBOLVERZEICHNIS	178
B	RASTKONTURVERSCHLEIßMESSUNG – MESSGENAUIGKEIT	180
C	UMRECHNUNG IN VOLUMETRISCHEN VERSCHLEIß	181
D	VOLLSTÄNDIGE EDX-DATEN.....	182
E	REM-AUFNAHMEN: ÜBERSICHTEN (METALL-METALL)	184
F	REM-AUFNAHMEN: ÜBERSICHTEN (METALL-KERAMIK)	185
G	KINEMATISCHES BERECHNUNGSMODELL.....	186
H	HERTZSCHE KONTAKTTHEORIE – FORMELN	188
I	NANOKRISTALLINES GEFÜGE DURCH REIBBELASTUNG.....	190

A Farb- und Symbolverzeichnis

A1 Materialien und Materialpaarungen

Tabelle 25: Farb- und Symbolübersicht; Materialien

Material	Farbcode	Wärmebehandlung	Bezeichnung (Text & Diagramme)	Symbole
100Cr6 (AISI 52100)	100Cr6	durchgehärtet und angelassen	* DH + A	
42CrMoS4	42CrMoS4	lasergehärtet	* LH	
42CrMoS4	42CrMoS4	lasergehärtet und angelassen	* LH + A	-
42CrMoS4	42CrMoS4	durchgehärtet und angelassen	* DH + A	-
51CrV4	51CrV4	lasergehärtet	* LH	
Stahl	alle	lasergehärtet	* LH	
Stahl	M	alle	M	
Si ₃ N ₄	K	-	K	-
Material- paarung	Farbcode		Bezeichnung (Text & Diagramme)	Symbole
Stahl-Stahl	M-M	-	M-M	
Stahl-Si ₃ N ₄	M-K	-	M-K	

A2 Schmierstoffe und Schmierstoffmengen

Tabelle 26: Farb- und Symbolübersicht; Schmierstoffe

Ölsorte	Farbe	Bezeichnung (Text & Diagramme)	Symbole
SAE 0W-20		0W-20	
SAE 5W-30		5W-30	
Ölmenge	Farbe	Bezeichnung (Text & Diagramme)	Symbole
Ölbad		Ölbad	
geringe Ölmenge		geringe Ölmenge	
Kinematik	Farbe	Bezeichnung (Text & Diagramme)	Symbole
Wälzen		WÄLZEN	
Gleiten		GLEITEN	 roter / schwarzer Rahmen

A3 Verschleißkategorien

Tabelle 27: Farb- und Symbolübersicht; Verschleißkategorien

Paarung	Kategorie / Farbe	Definition <i>Reibwert zu Versuchsende</i> (μ_{FINAL})	Bezeichnung <i>(Text & Diagramme)</i>	Symbole <i>(freie / gesperrte Rotation)</i>
Metall-Metall (M-M)	M-M: X	$\mu_{FINAL} < 0,16$	M-M: X	 
	M-M: A	$0,16 < \mu_{FINAL} < 0,265$	M-M: A	 
	M-M: B	$0,265 < \mu_{FINAL} < 0,4$	M-M: B	 
	M-M: C	$0,4 < \mu_{FINAL} < 0,74$	M-M: C	 
	M-M: D	$\mu_{FINAL} > 0,74$	M-M: D	 
	Kategorie / Farbe	Definition <i>Verschleißverhalten</i>	Bezeichnung <i>(Text & Diagramme)</i>	Symbole <i>(freie / gesperrte Rotation)</i>
M-M: Y	Verschleißrate (Mittel) > [0,7 mm / 1 Mio. SZ] <i>bei gesperrter Kugelrotation</i>	M-M: Y		
Paarung	Kategorie / Farbe	Definition <i>Verschleißverhalten</i>	Bezeichnung <i>(Text & Diagramme)</i>	Symbole <i>(freie / gesperrte Rotation)</i>
Metall-Keramik	M-K: X	stabile Verschleißrate (Mittel) < [0,15 mm / 1 Mio. SZ] < [0,4 mm ³ / 1 Mio. SZ] <i>(Ölbad)</i>	M-K: X	 
	M-K: Z	stabile Verschleißrate < [0,15 mm / 1 Mio. SZ] < [0,4 mm ³ / 1 Mio. SZ] <i>(geringe Ölmenge)</i>	M-K: Z	
	M-K: Y	Verschleißrate (Versuchsende) > [1 mm ³ / 1 Mio. SZ]	M-K: Y	 
	M-K: R	wechselnde Verschleißraten	M-K: R	

B Rastkonturverschleißmessung – Messgenauigkeit

Abb. 123 zeigt einen Vergleich zwischen der Echtzeit-Verschleißmessung (siehe Abschnitt 3.3) und einer nachträglichen Vermessung in einem Profilmessgerät. Im Mittel liefert die Echtzeit-Messung einen leicht erhöhten Verschleiß. Der Unterschied ist mit 7,8 % deutlich kleiner als die allgemeinen Messschwankungen, weswegen dieser Faktor nicht zur Korrektur der Ergebnisse genutzt wird.

Bei der Echtzeitmessung wird die Kugel zur Abtastung genutzt. Die Ergebnisse beweisen, dass eine Vermessung der Kontur mithilfe der Kugel eine ausreichend genaue Methode darstellt. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass die mittlere Verschleißhöhe der Kugel im Vergleich zur Rastkontur vernachlässigbar klein ist.

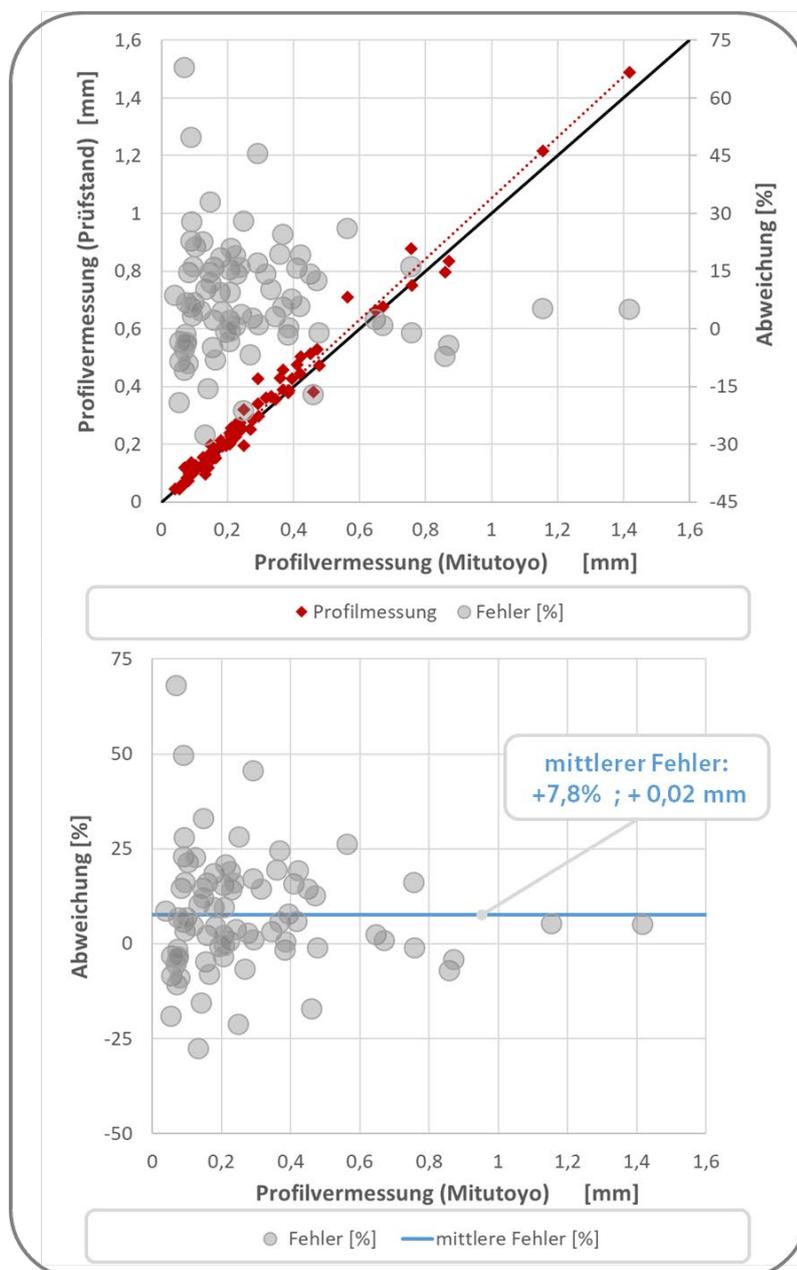


Abb. 123: Genauigkeitsbestimmung der Echtzeit-Verschleißmessung

C Umrechnung in volumetrischen Verschleiß

Abb. 124 zeigt für einzelne Konturen mit unterschiedlich hohem Abtrag den Zusammenhang zwischen volumetrischen und im Profil gemessenen Verschleiß.

Das Verschleißvolumen wurde im konfokalen Laser-Scanning-Mikroskop (siehe Abschnitt 3.4) durch dreidimensionale Vermessung der Konturen vor und nach Versuch bestimmt.

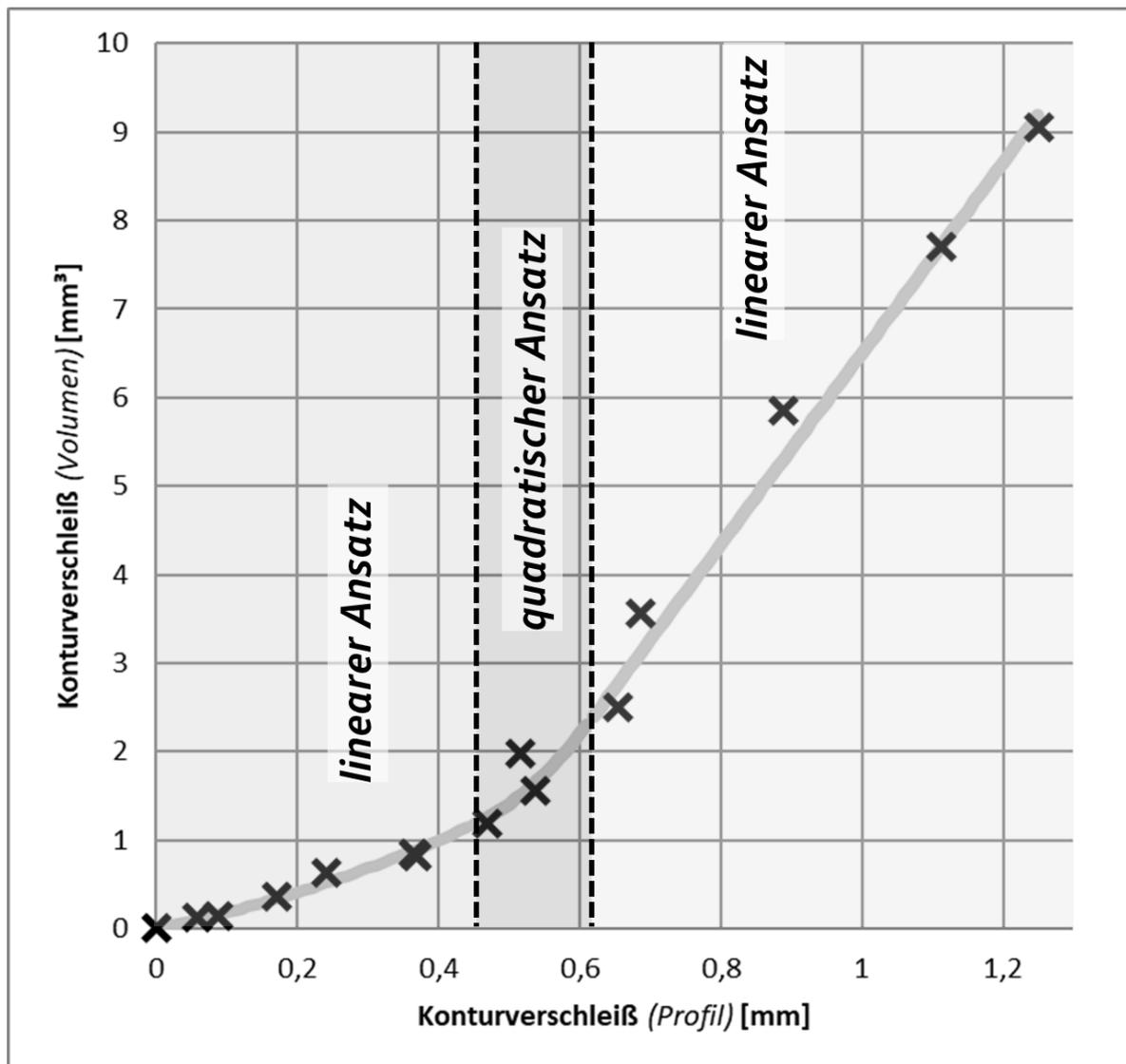


Abb. 124: Umrechnung; Profilverschleiß in volumetrischen Verschleiß
Messdaten und daran angepasste Umrechnung

Tabelle 29: EDX-Daten; Elementauswahl; Alle Kategorien II

Elementgehalt [m%] EDX-Messung 10 kV		 Kontur						 Kugel							
M-M: Y	Gesamt-fläche	Mittelwert	3,60	0,20	0,10	0,20	0,30	0,10	2,29	0,20	0,08	0,14	0,27	0,04	
		Max.													
		Min.													
	Anzahl	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Schicht	Mittelwert	19,20	0,20	0,20	0,70	0,80	0,40	15,29	0,21	0,16	0,66	0,49	0,22	
		Max.													
Min.															
Anzahl	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
M-K: X	Gesamt-fläche		O	Si	Ca	S	Zn	P	O	Fe	Ca	S	Zn	P	
		Mittelwert	7,93	0,20	1,30	1,67	10,50	4,30	17,80	5,53	0,80	1,37	7,53	4,27	
		Max.	8,60	0,20	2,00	1,90	12,70	5,40	18,90	7,00	1,00	1,50	8,30	4,40	
		Min.	6,90	0,20	0,90	1,30	7,30	3,30	16,40	4,00	0,70	1,20	6,50	4,20	
	Anzahl	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	Schicht		O	Si	Ca	S	Zn	P	O	Fe	Ca	S	Zn	P	
		Mittelwert	27,53	0,07	4,33	4,13	25,87	15,87	21,43	6,33	1,17	1,93	11,37	6,20	
		Max.	30,40	0,10	7,80	5,80	29,20	17,70	23,20	9,20	1,40	2,20	13,60	6,50	
		Min.	25,80	0,00	2,50	2,60	19,60	14,60	20,40	3,70	1,00	1,50	8,20	5,80	
	Anzahl	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	M-K: Z	Gesamt-fläche	Mittelwert	11,20	1,17	0,23	0,10	0,07	0,10	11,80	9,20	0,10	0,10	0,10	0,00
			Max.												
Min.															
Anzahl		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Schicht		Mittelwert	26,13	2,77	0,43	0,20	0,10	0,20	14,40	14,80	0,00	0,10	0,10	0,10	
		Max.													
	Min.														
Anzahl	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
M-K: Y	Gesamt-fläche		O	Si	Ca	S	Zn	P	O	Fe	Ca	S	Zn	P	
		Mittelwert	5,20	0,46	0,06	0,16	0,19	0,03	8,50	5,67	0,03	0,07	0,07	0,00	
		Max.	11,80	0,70	0,10	0,40	0,30	0,10	10,50	7,70	0,10	0,10	0,10	0,00	
		Min.	1,50	0,20	0,00	0,05	0,05	0,00	5,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Anzahl	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	
	Schicht		O	Si	Ca	S	Zn	P	O	Fe	Ca	S	Zn	P	
		Mittelwert	12,58	0,73	0,10	0,31	0,35	0,13	13,10	23,77	0,13	0,20	0,27	0,13	
		Max.	18,70	1,40	0,20	0,90	0,80	0,40	18,10	46,50	0,30	0,30	0,30	0,30	
		Min.	10,30	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	8,30	11,00	0,00	0,00	0,20	0,00	
		Anzahl	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3

E REM-Aufnahmen: Übersichten (Metall-Metall)

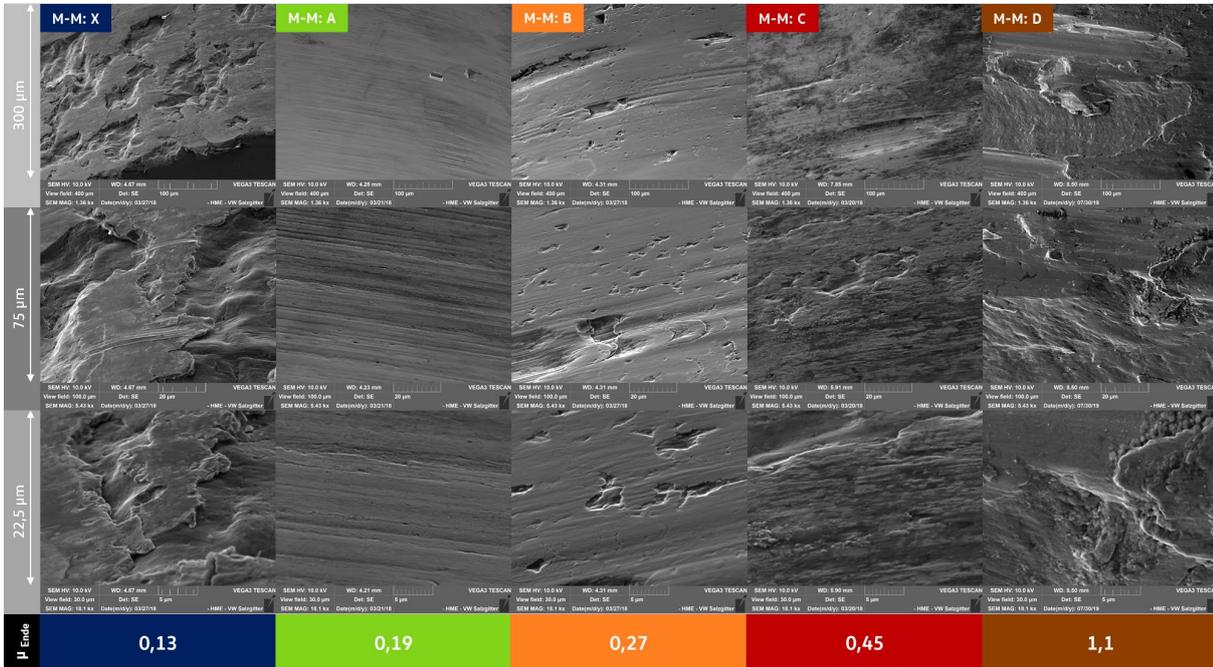


Abb. 125: Verschleißerscheinungen (Kontur); M-M; Zusammenfassung
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

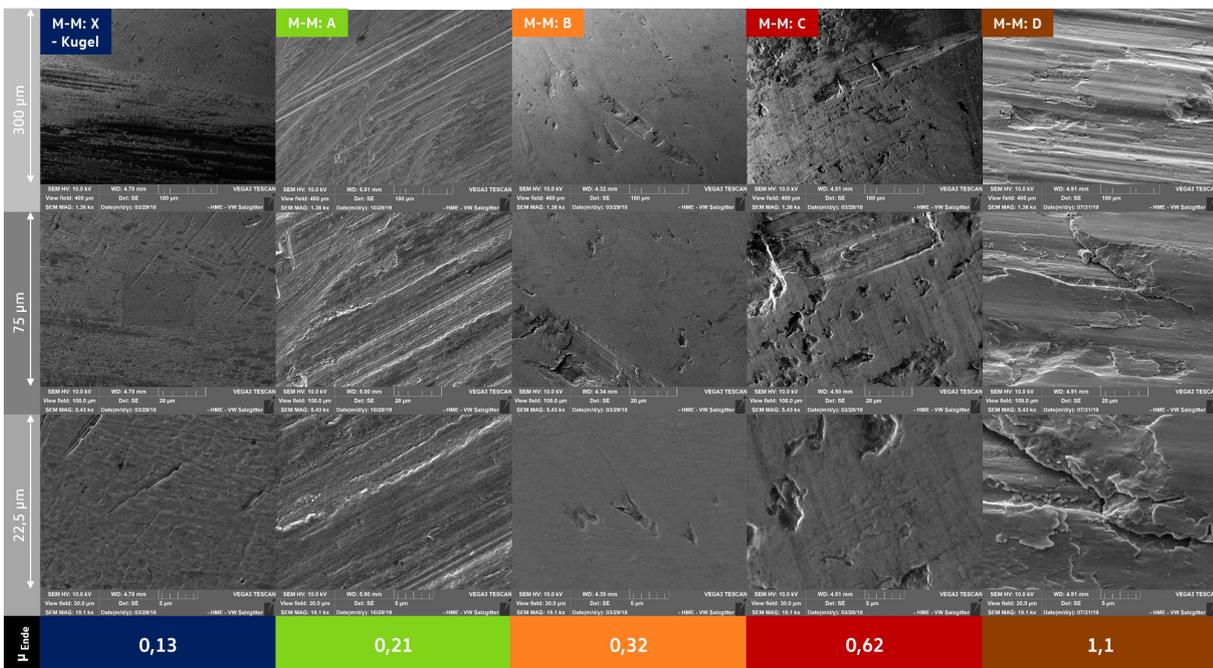


Abb. 126: Verschleißerscheinungen (Kugel); M-M; Zusammenfassung
 Übersicht: genutzte Symbole und Farbzunordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

F REM-Aufnahmen: Übersichten (Metall-Keramik)

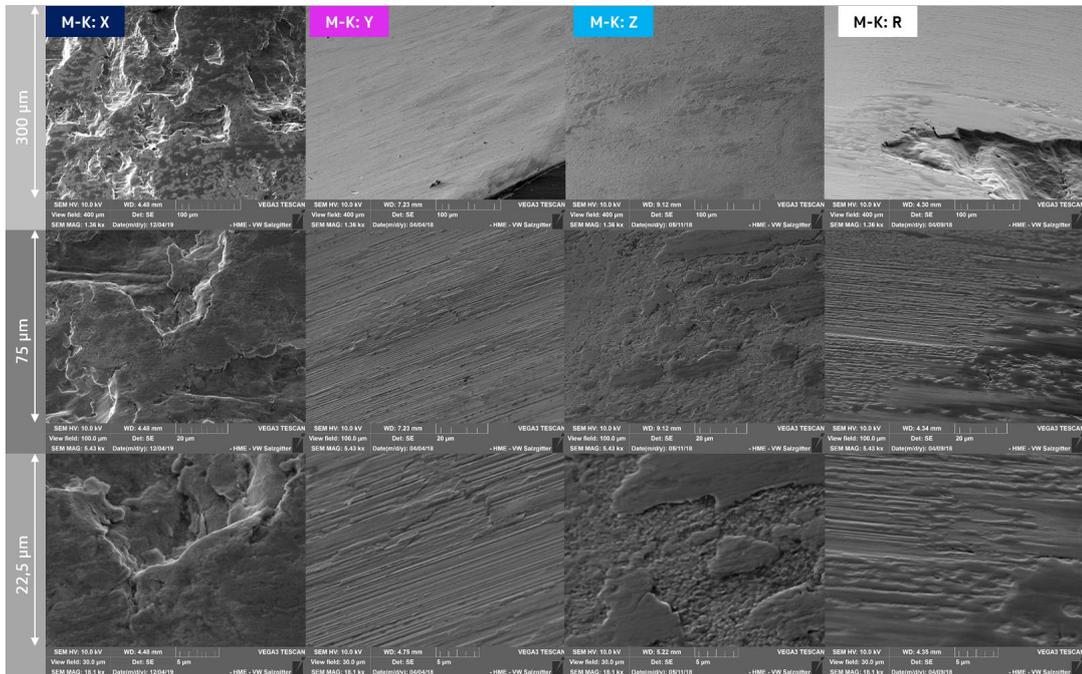


Abb. 127: Verschleißerscheinungen (Kontur); M-K; Zusammenfassung
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuoordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

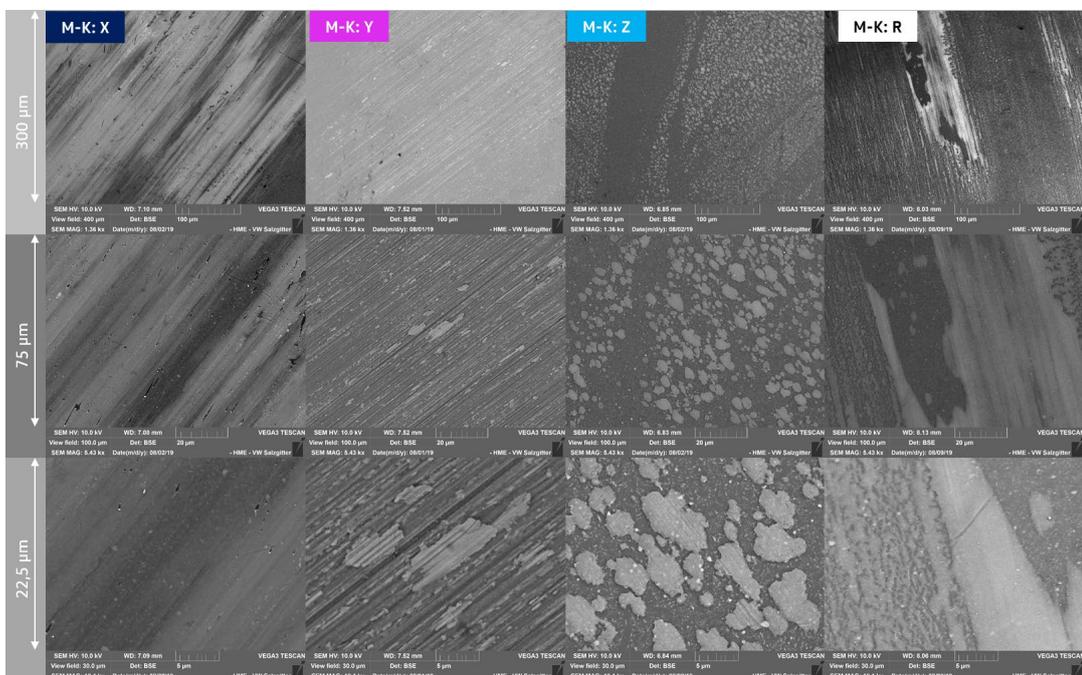


Abb. 128: Verschleißerscheinungen (Kugel); M-K; Zusammenfassung
Übersicht: genutzte Symbole und Farbzuoordnung (Materialien, Ölmenge, Kategorien) – Anhang A

G Kinematisches Berechnungsmodell

Zur Berechnung der Kontaktkräfte, welche die Basis für die Berechnung der Reibwerte im Versuch sowie die Bestimmung der Kontaktdrücke darstellen, wird ein zweidimensionales Ersatzmodell verwendet. Da alle Kräfte in einer Ebene liegen, ist die Vereinfachung zweckmäßig.

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, müssen die Fälle der gleitenden und wälzenden Kugelbewegung unterschieden werden. Am Beispiel des in Abb. 23 (S. 51) gezeigten Zustands (*Kugel bewegt sich auf der Kontur „bergauf“*) wird die Vorgehensweise der Berechnung dargestellt.

Es ergeben sich jeweils die folgenden Gleichungen für das Kräftegleichgewicht und das Momentengleichgewicht um den Kugelmittelpunkt.

Fall A (Gleiten):

$$\text{Kräftegleichgewicht (vertikal): } F_k \cdot (\sin \alpha - \mu_k \cos \alpha) = F_f + F_h \cdot \mu_h \quad (\text{G.1})$$

$$\text{Kräftegleichgewicht (horizontal): } F_k \cdot (\mu_k \sin \alpha + \cos \alpha) + F_f \cdot \mu_{f_wirk} = F_h \quad (\text{G.2})$$

$$\text{Momentengleichgewicht: } |F_h \cdot \mu_h - F_k \cdot \mu_k| = \frac{F_f}{\cos \Phi} \cdot \mu_{f_wirk} \quad (\text{G.3})$$

Fall B (Wälzen):

$$\text{Kräftegleichgewicht (vertikal): } F_k \cdot (\sin \alpha - \mu_{k_wirk} \cos \alpha) = F_f + F_h \cdot \mu_h \quad (\text{G.4})$$

$$\text{Kräftegleichgewicht (horizontal): } F_k \cdot (\mu_{k_wirk} \sin \alpha + \cos \alpha) + F_f \cdot \mu_f = F_h \quad (\text{G.5})$$

$$\text{Momentengleichgewicht: } F_k \cdot \mu_{k_wirk} = J_s \cdot \dot{\omega} + F_h \cdot \mu_h + \frac{F_f}{\cos \Phi} \cdot \mu_f \quad (\text{G.6})$$

Aus den Gleichungen können die Kontaktkräfte zwischen Kontur und Kugel F_k sowie zwischen Kugel und Hülse F_h auf Basis der wirkenden Federkraft F_f (verschleißabhängig) mithilfe der über die Verschiebekraftmessung kalibrierten Reibwert (μ_k, μ_h, μ_f) berechnet werden.

Zusätzlich gehen der Kontaktwinkel an der Feder Φ , der Konturwinkel α und das Massenträgheitsmoment der Kugel J_s sowie die Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}$ ein.

Für die Fälle Gleiten und Wälzen gehen jeweils nur 2 Reibwerte in die Berechnung ein. Im Fall der wälzenden Bewegung ergibt sich ein wirksamer Reibwert μ_{k_wirk} für den Konturkontakt aus dem Momentengleichgewicht. Solange dieser Reibwert an dieser Stelle aufgebracht werden kann, ist das Wälzen stabil. Umgekehrt muss zum Aufrechterhalten einer Gleitbewegung der wirksame Reibwert am Federkontakt aufgebracht werden (μ_{f_wirk}). Diese Werte müssen für die berechneten Fälle auf Plausibilität geprüft werden.

Die beschriebenen Gleichungen gelten jeweils nur für den in Abb. 23 (S. 51) gezeigten Fall. Zur Berechnung der gesamten Bewegung müssen 2 weitere Fälle berücksichtigt werden.

Abb. 129 fasst alle Fälle für die Bewegung über die Kontur zusammen:

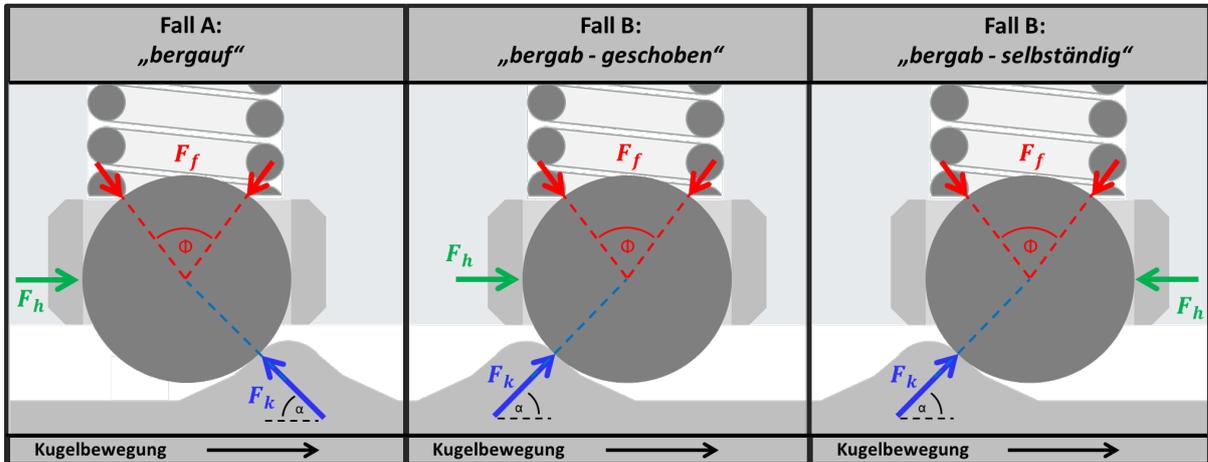


Abb. 129: Fallunterscheidung in der kinematischen Berechnung

Für die Bewegung in Gegenrichtung kann die Symmetrie des Systems ausgenutzt werden. Im Berechnungstool erfolgt die Fallunterscheidung automatisch auf Basis der Konturgeometrie und den vorliegenden Reibwerten.

H Hertzsche Kontakttheorie – Formeln

H1 Allgemeine Hertzsche Kontaktformeln

Die Berechnungsformeln für den Kontakt gekrümmter Oberflächen können z.B. [71] und [122] entnommen werden. Für die Berechnungen nach Hertz gelten folgende Annahmen [122]:

- homogenen isotrope Materialeigenschaften
- linear elastische Verformungseigenschaften (*Hookesches Gesetz*)
- keine Schubspannungen in der Kontaktfläche (*reibungsfrei*)
- ideal glatte Oberflächen
- kleine Verformungen (*Halbachsen der Kontaktflächen sind klein gegenüber den Krümmungsradien*)

Die im folgenden vorgestellten Formeln sind in der Notation aus [5] aufgeführt. Sie entsprechen inhaltlich den Formeln aus [71] oder [122].

Die maximale (=Hertzsche) Pressung im Kontakt p_{max} ergibt sich aus der wirkenden Normalkraft F_N und der über die Kontaktachsen a und b berechneten Fläche der Kontaktellipse sowie dem Faktor 1,5.

$$p_{max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_N}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (\text{H.1})$$

Die Kontakthalbachsen a und b können mit der Krümmungssumme $\sum \rho$, dem reduzierten Elastizitätsmodul E_{red} sowie den Hilfsgrößen ξ_{Hertz} und η_{Hertz} berechnet werden.

$$a = \xi_{Hertz} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_N}{2 \cdot E_{red} \cdot \sum \rho}}; \quad b = \eta_{Hertz} \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_N}{2 \cdot E_{red} \cdot \sum \rho}} \quad (\text{H.2})$$

Der reduzierte Elastizitätsmodul E_{red} ergibt sich aus den elastischen Eigenschaften der beiden Kontaktpartner.

$$\frac{1}{E_{red}} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad (\text{H.3})$$

Die Krümmungssumme $\sum \rho$ wird aus den Krümmungsradien der Kontaktpartner in den Koordinatenrichtungen x und y berechnet.

$$\sum \rho = \rho_{1x} + \rho_{1y} + \rho_{2x} + \rho_{2y} \quad (\text{H.4})$$

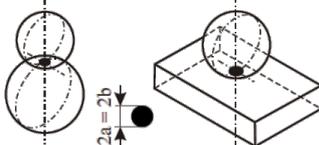
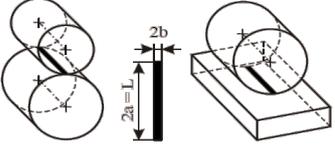
Für die Bestimmung der Hilfsgrößen ξ_{Hertz} und η_{Hertz} wird der Hilfwert $\cos \tau$ berechnet.

$$\cos \tau = \frac{|\rho_{1x} - \rho_{1y} + \rho_{2x} - \rho_{2y}|}{\sum \rho} \quad (\text{H.5})$$

Mit dem Hilfwert $\cos \tau$ können die Hilfsgrößen ξ_{Hertz} und η_{Hertz} beispielsweise über die Tabellen in [71] oder [122] bestimmt werden.

H2 Vereinfachte Formeln für wichtige Kontakte

Tabelle 30: Formeln; Hertzsche Kontakt für idealisierte Geometrien [5,122]

Kontakt ($\nu_{1/2} = 0,3$)		
Halbachsen der Kontaktfläche	$b = a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_N}{4 \cdot E_{red} \cdot (\rho_1 + \rho_2)}} \quad (\text{H. 6})$	$b = \sqrt{\frac{4 \cdot F_N}{\pi \cdot E_{red} \cdot L \cdot (\rho_1 + \rho_2)}} \quad (\text{H. 12})$
Größe der Hertz-schen Kontaktfläche	$A_{Hertz} = \pi \cdot a^2 \quad (\text{H. 7})$	$A_{Hertz} = 2 \cdot b \cdot L \quad (\text{H. 13})$
mittlere Flächen- pressung	$\bar{p} = \frac{F_N}{A_{Hertz}} \quad (\text{H. 8})$	
maximale Flächen- pressung	$p_{max} = \frac{3}{2} \cdot \bar{p} \quad (\text{H. 9})$	$p_{max} = \frac{4}{\pi} \cdot \bar{p} \quad (\text{H. 14})$
Lage der max. Ver- gleichsspannung (Huber und von Mises)	$z = 0,483 \cdot a \quad (\text{H. 10})$	$z = 0,483 \cdot b \quad (\text{H. 15})$
reduzierter Elastizi- tätsmodul	$\frac{1}{E_{red}} = \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \quad (\text{H. 11})$	

I Nanokristallines Gefüge durch Reibbelastung

Tabelle 31: Übersicht; Nanokristallines Gefüge unter tribologischer Last
Quellen in der jeweiligen Zeile angegeben

	Grundkörper	Gegenkörper	Schmierung	Pressung	Mikrostruktur nach Versuch, Grundkörper		Quelle
					Korngröße	Tiefe der nanokristallinen Schicht	
[Stift-Scheibe]	Messing	100Cr6	unadditiviertes Öl (PAO-8)	1-8 MPa	~ 100nm	fließender Übergang	[64]
Mikroskopischer Einzelkontakt	Kupfer	Diamant-Kugel	PAO Grundöl und SAE 5W-30	unbekannt	500nm	nur oberflächlich	[113]
[ähnlich Stift-Scheibe]	Kupfer	Stahl	trocken	44 MPa	50-100 nm	scharfer Übergang 15-20 µm	[24]
[Kugel-Platte]	Tantal (Platte)	WC-Co (Kugel)	trocken	~[GPa]	5-50nm	fließender Übergang	[131]
[Stift-Scheibe]	C85 (perlitischer Stahl)	100Cr6	unadditiviertes Öl (PAO-18)	3 MPa	<100nm	0,4 µm nach 1000 Zyklen	[130]
Rad-Schiene [Realsystem]	Schiene (perlitischer Stahl)	Stahlradreifen	trocken	unbekannt	ca. 100 nm	10 µm	[79]
Rad-Schiene [Block on Ring]	perlitischer Stahl 285 HV (Block = Rad)	Perlitischer Stahl 311HV (Ring = Schiene)	trocken	unbekannt	35 nm	1,5 µm	[86]
Rad-Schiene [Realsystem]	Schiene (perlitischer Stahl)	Stahlradreifen	trocken	unbekannt	25-500 nm	~[µm]	[67]
Wälzlager - Ermüdung [Realsystem]	100Cr6 (gehärtet)	100Cr6 (gehärtet)	geschmiert (Öl)	~[GPa]	3- 40 nm	bis 100 µm, scharf	z.B.: [29,39]
Abrasion, Drehversuch	100Cr6 (gehärtet)	Drehwerkzeug (CBN)	Wasserbasierter Kühlschmierstoff	unbekannt	10 nm	5 µm	[48]
Abrasier Verschleiß	Co-Cr-Legierung	Al2O3 - Suspension auf Basis von Wasser		unbekannt	20nm	1-2 µm	[69]
Adhäsiiver Verschleiß [Stift-Scheibe]	niedrig legierter Stahl 680HV (Stift)	niedrig legierter Stahl 380 HV (Scheibe)	trocken	~ [MPa]	50-200nm (Grund und Gegenkörper)	mehrere µm, auch am Gegenkörper	[129]
Adhäsiiver Verschleiß [Block on Ring]	niedrig legierter Stahl (gehärtet)	niedrig legierter Stahl (gehärtet)	geschmiert (Öl) PAO unadditiviert	~ [MPa]	< 500 nm	5 µm	[2]
Adhäsiiver Verschleiß [Stift-Scheibe]	austenitischer und martensitischer Stahl (Scheibe)	Werkzeugstahl, weich (Stift)	geschmiert (Mineralöl)	~ [MPa]	10-100m,	~[µm]	[120]
Umformversuch, hohe Reibung	austenitischer Stahl 185HV	Warmarbeitsstahl 490HV (Umformwerkzeug)	trocken	390 MPa	400 nm	~[µm]	[20]