

# **Fertigungstechnische und tribologische Wirkmechanismen beim Polymerlappen am Beispiel der Werkstoffpaarung einer Nockenwellenlagerung**

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für

Maschinenbau

des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Tim Weyhmüller

aus Weinsberg

Tag der mündlichen Prüfung

11. März 2016

Hauptreferent

Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Scherge

Korreferent

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze



# Kurzfassung

Die Oberflächen technischer Werkstoffe werden durch die Kräfte und chemische Substanzen, welche im letzten Bearbeitungsschritt der Fertigung einwirken, maßgeblich beeinflusst. Die Wirtktiefe der Endbearbeitung liegt zwischen wenigen Nanometern bis zu circa zehn Mikrometer. In diesen Bereichen gibt es eine zum Grundgefüge veränderte Gefügestruktur sowie eine andere chemische Zusammensetzung, die das Reib- und Verschleißverhalten im Grenz- und Mischreibungsbereich des Tribokontakts bestimmen.

Die in dieser Arbeit betrachtete Werkstoffpaarung, St52-3 und AlSi10Mg, entspricht dem Werkstoffsystem der Nockenwellenlagerung. Der oberflächennahe Bereich des Nockenwellenstahls St52-3 wird hier in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter beim betrachteten Läppprozess unterschiedlich ausgebildet. Bei klassischen Endbearbeitungsverfahren konnte in anderen Arbeiten gezeigt werden, welche Auswirkungen diese Werkstoffveränderungen auf das Reib- und Verschleißverhalten haben. Jedoch wurde bisher der energetische Ansatz, wie er beim Einlauf im Tribokontakt bereits untersucht wurde, noch nicht auf den Energieeintrag bei der Endbearbeitung übertragen, um diese Verhalten zu beschreiben und entsprechend zu bewerten. Zudem wird in der vorliegenden Arbeit gezeigt, welche Auswirkung ein Werkzeug aus einem Polymerwerkstoff bei der Endbearbeitung auf die Ausprägung des, für das Reib- und Verschleißverhalten verantwortlichen, Werkstoffbereichs hat.

Das Polymerlappen wird in dieser Arbeit anhand von Modellproben untersucht, welche in einem Stift-Scheibe Tribometer auf das Reib- und Verschleißverhalten bewertet werden. Damit können die bei der Bearbeitung eingestellten Prozessparameter, beziehungsweise die eingebrachte Energie, mit den tribologischen Ergebnissen gekoppelt und diskutiert werden. Um das Zielsystem der Nockenwellenlagerung so genau wie möglich mit den Modellproben abzubilden, wurde das Polymerlappen von Wellenbauteilen auf die Bearbeitung von ebenen Scheiben zur Herstellung von Stiftproben übertragen. Zur Analyse der Bauteileigenschaften erfolgten Messungen vor und nach der Endbearbeitung sowie nach der Durchführung der Tribotests. Die erzeugte Oberflächentopographie wird dabei mit Tastschnittverfahren zur Bewertung von klassischen Rauheitswerten sowie mit optischen Verfahren zur Charakterisierung der dreidimensionalen Oberfläche beschrieben. Das Grundgefüge wird mit Schliften im REM beurteilt. Zur Visualisierung und Bewertung des oberflächennahen Gefügebereichs, mit Übergang zum Grundgefüge, werden FIB-Aufnahmen verwendet. Die chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Bereichs wird zum einen mit EDX im REM sowie durch chemische Tiefenprofile mit XPS charakterisiert. Wie sich diese Eigenschaften auf die Härte im oberflächennahen Bereich auswirken, wurde vor den Tribotests mit Nanoindentermessungen analysiert.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wird das Polymerlappen mit einer Druckvariation von 1 bis 4 bar beurteilt, was einem Gesamtenergieeintrag von 480 bis 1200 J entspricht. Bei Drücken von 3 bis 4 bar ist dieser druckinduzierte Energieeintrag ausreichend groß, um ein stabiles Einlaufverhalten mit kleinen Reibwerten und geringem Verschleiß im Grenz- und

Mischreibungsbereich herzustellen. Im Gegensatz dazu ist der Energieeintrag mit einem Lappdruck von 1 bis 3 bar zu gering. Dies führt zu einer doppelt so großen Reibung und erhöhtem Verschleiß beziehungsweise zum Fresser. Der Zusammenhang zwischen Energieeintrag und das sich dadurch einstellende Reib- und Verschleißverhalten, kann anhand zweier Charakteristika des oberflächennahen Werkstoffbereichs nachvollzogen werden. Zum einen ist dies die Tiefe des durch Kornverfeinerung verfestigten, oberflächennahen Gefügebereichs und zum anderen die Adsorption einer organischen Grenzschicht. Zwischen Energieeintrag und erreichter Tiefe mit verfeinertem Gefüge besteht ein linearer Zusammenhang. Je höher der Bearbeitungsdruck beim Läppen, desto tiefer ist dieser veränderte Gefügebereich ausgebildet. Die Adsorption einer organischen Grenzschicht erfolgt beim Läppen mit Polymerwerkzeug und einer organischen Lapppaste ebenso in Abhängigkeit des druckinduzierten Energieeintrags. Je größer der Bearbeitungsdruck, desto großflächiger ist die organische Schicht auf der Oberfläche. Am flächigsten ist diese beim Polymerläppen mit 4 bar vorzufinden.

Wie im Einlauf eines Tribosystems zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass bei der Endbearbeitung die geringsten Reib- und Verschleißwerte mit dem größtmöglichen Energieeintrag zur Veränderung des oberflächennahen Werkstoffbereichs einhergehen. Wird der druckinduzierte Energieeintrag beim Polymerläppen ausreichend groß gewählt, gelingt es einen vorkonditionierten oberflächennahen Werkstoffbereich zu generieren, welcher beim Einlauf im Tribokontakt mit großen Belastungen zu einem stabilen Einlauf mit geringer Reibung und Verschleiß führt.

# Abstract

The surfaces of technical materials are decisively influenced by the acting forces and the chemical substances involved in the final processing step. The depth of such impact is apparent in a range from few nanometers to approximately ten micrometers of the top surface. In comparison to the basic material those areas show a different grain texture and chemical composition. These properties define the friction and wear behavior in the region of boundary and mixed friction of the tribological contact.

The regarded material combination in this work, St52-3 and AlSi10Mg, represents the camshaft bearing. The near-surface area of the camshaft steel St52-3 forms up differently depending on the machining parameters of the examined lapping process. The effects of the material change through traditional finishing processes regarding friction and wear behavior have been discussed in previous works. However the energetic approach, that has already been examined for the tribological contact, has not yet been transferred to the finishing process, to evaluate the arising consequence for friction and wear. Additionally to that this work demonstrates the consequence of a final processing step using a polymer tool on the material area, which is responsible for friction and wear.

The polymer lapping process has been examined in this work with sample parts that have been tested in a Pin-on-Disc Tribometer regarding friction and wear. Thereby it is possible to correlate the adjusted process parameters of the treatment, respectively the induced energy, with the tribological results and subsequently to discuss them. For the purpose of reproducing the camshaft bearing system with sample parts as exact as possible, the polymer lapping process for the treatment of shafts has been transferred to a treatment of flat discs, which are then used for the fabrication of pins. Measurements to analyze the characterization of the parts have been carried out before and after the finishing process as well as after the completed runs of the tribological tests. The performed surface topography is being described by both, the profile method, to evaluate the common roughness values, as well as by optical methods to determine the three dimensional surface characteristics. The basic grain texture has been assessed with specimens in the SEM. Texture FIB images have been used for the visualization and valuation of the near-surface grain texture zones, including the transition to the basic grain. The chemical composition of the near-surface area is being characterized by EDX in the SEM as well as through chemical depth profiles by XPS. The consequences of these characteristics on the hardness in the near-surface area have been analyzed through nanoindentation.

During the examinations of the polymer lapping process a pressure variation from 1 to 4 bar has been evaluated, which causes a total energy input variation between 480 and 1200 J. If this pressure induced energy input is high enough, which is the case, when impinging with 3 to 4 bar, it leads to a stable running-in behavior with small friction coefficients and low wear at boundary and mixed friction. In the other case, with a lower lapping pressure between 1 and 3 bar, the energy input is too small. This leads to twice as much friction, high wear and to

seizing respectively. The correlation between energy input and the resulting friction coefficient and wear can be explained by two characteristics of the near-surface material. One is the depth of the strengthened near-surface material texture and the other is the adsorption of an organic boundary layer. It can be shown, that there is a linear correlation between energy input and the reached depth of refined material texture. The higher the applied pressure at the lapping process is, the deeper the modified texture zone is formed. The adsorption of an organic boundary layer is also enhanced in dependency of the pressure induced energy input through the lapping with a polymer tool and an organic lapping paste. The higher the process pressure is the larger the area of the organic layer grows on the surface. The largest area has been achieved with the polymer lapping processed at 4 bar.

Equivalent to the running in behavior of a tribological system the results of the examinations show, that the smallest friction and wear values can be achieved when performing the finishing process with the greatest energy input possible for a maximum modification of the surface nearby material zone. If the pressure induced energy input is chosen high enough it causes the generation of a preconditioned near-surface material zone, which then leads to a stable behavior with small friction and low wear at the running-in under high load.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Verzeichnis der Abbildungen</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Formelzeichen, Abkürzungen und Indices</b> .....	<b>XI</b>
Formelzeichen .....	XI
Abkürzungen .....	XIV
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Endbearbeitungsverfahren .....	1
1.2 Reibleistung bei Verbrennungsmotoren .....	2
1.3 Ziele und Vorgehensweise.....	3
<b>2 Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse</b> .....	<b>6</b>
2.1 Fertigungsverfahren .....	6
2.1.1 Einteilung der Verfahren .....	6
2.1.2 Zerspanvorgang .....	7
2.1.3 Läppen .....	9
2.2 Allgemeine tribologische Zusammenhänge .....	13
2.2.1 Tribotechnisches System .....	13
2.2.2 Modelle in der Tribologie .....	15
2.3 Tribologie und Endbearbeitung .....	20
2.4 Gleitlager .....	24
2.4.1 Aufbau .....	24
2.4.2 Funktionsweise .....	25
2.4.3 Anwendungen im Verbrennungsmotor.....	26
2.4.4 Ansätze zur Reibleistungsreduzierung.....	28
<b>3 Analytik</b> .....	<b>31</b>
3.1 Tribologisch relevante Bauteileigenschaften.....	31
3.2 Makro- und Mikrogeometrie .....	32
3.3 Werkstoffeigenschaften .....	37
3.3.1 Gefüge .....	38

3.3.2	Chemie .....	40
3.3.3	Härte .....	41
<b>4</b>	<b>Versuchseinrichtung und -bauteile für fertigungstechnische Untersuchungen .....</b>	<b>45</b>
4.1	Zielbauteil und Modellsystem .....	45
4.1.1	Nockenwellenlagerung im Zylinderkopf .....	46
4.1.2	Modellsystem für Tribometer .....	51
4.2	Bearbeitungsanlage .....	58
4.3	Werkzeuge .....	59
4.3.1	Geometrie .....	59
4.3.2	Werkstoff .....	61
4.3.3	Läpppaste .....	62
4.4	Bearbeitungsprozess .....	63
4.4.1	Kinematik .....	63
4.4.2	Kinetik .....	64
4.5	Messtechnik bei den Bearbeitungsversuchen .....	65
4.5.1	Dynamometer .....	65
4.5.2	Messdatenauswertung .....	66
<b>5</b>	<b>Fertigungstechnische Untersuchungen .....</b>	<b>70</b>
5.1	Zielgrößen .....	70
5.2	Versuchsablauf .....	70
5.3	Grundlagenuntersuchungen des Werkzeugs .....	71
5.3.1	Werkzeugwerkstoff .....	71
5.3.2	Werkzeuggeometrie .....	79
5.4	Werkstückeigenschaften durch Energieeintrag beim Polymerläppen .....	83
5.4.1	Energieeintrag beim Polymerläppen .....	83
5.4.2	Werkstückeigenschaften nach dem Polymerläppen .....	91
<b>6</b>	<b>Tribologische Bewertung .....</b>	<b>101</b>
6.1	Ableitung der Betriebsbedingungen für die Tribometerversuche .....	101
6.2	Durchführung der Tribometertests .....	102
6.3	Versuchsergebnisse .....	103
6.3.1	Reibung .....	103
6.3.2	Verschleiß .....	109
6.4	Werkstückeigenschaften nach den Versuchen .....	120
6.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse .....	123

<b>7</b>	<b>Fertigungstechnische und tribologische Zusammenhänge .....</b>	<b>126</b>
7.1	Wirkeffekte bei der Endbearbeitung.....	126
7.2	Wirkeffekte bei tribologischer Beanspruchung.....	131
7.3	Zieleigenschaften zur Reibleistungs- und Verschleißminderung.....	134
7.4	Anwendung auf andere Reibstellen im Verbrennungsmotor .....	135
7.5	Optimierungsansätze für die Endbearbeitung.....	137
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>139</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>142</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>147</b>

## Verzeichnis der Abbildungen

Bild 1.1: Reibungsaufteilung eines PKW- Ottomotors [80].....	3
Bild 1.2: Vorgehensweise für das Verständnis der Zusammenhänge der Endbearbeitung auf das tribologische Bauteilverhalten.....	4
Bild 2.1: Einteilung der Fertigungsverfahren Trennen nach DIN 8580. ....	6
Bild 2.2: Spanentstehung [45]. ....	8
Bild 2.3: Wirkprinzip des Schneideneingriffs [46].....	9
Bild 2.4: Einteilung der Läppverfahren nach DIN8589-15. ....	10
Bild 2.5: Umfangs-Außen-Rundläppen nach DIN8589-15. ....	11
Bild 2.6: Spanvorgang beim Läppen [46].....	11
Bild 2.7: Bewegung der Läppkörner im Läppfilm mit dem bahngelassenen Spanvorgang [52].....	12
Bild 2.8: Schematische Darstellung des Tribotechnischen Systems mit den allgemein dargestellten Systemfunktionen [25]. ....	15
Bild 2.9: Schematische Darstellung der Stribeckkurve [41].....	17
Bild 2.10: Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Tangential- zur Kontaktkraftkomponente bei der Endbearbeitung und dem Reibwert im Tribokontakt in Abhängigkeit der Variation des Kühlschmierstoffs mit Schwefel und Phosphor sowie der Kontaktzeit [12].....	23
Bild 2.11: Fest-Loslager-Anordnung der Nockenwelle im Zylinderkopf. ....	25
Bild 2.12: Funktionsweise hydrodynamisches Radialgleitlager.....	26
Bild 2.13: Einteilung der dominierenden Lagerart bei Verbrennungsmotoren [3]. ....	27
Bild 2.14: Einfluss des Wellendurchmessers $d$ und der Lagerbreite $b$ auf die Reibleistung $PR$ [3].....	29
Bild 2.15: Reibungsverluste eines Kurbeltriebsgleitlagers bei verschiedenen Drehzahlen, Schmiermittelklassen, Temperaturen sowie unterschiedliche Lagerbreiten [63]...	30
Bild 3.1: Einflüsse auf die relevanten Bauteileigenschaften eines Tribosystems [69].....	32
Bild 3.2: Ordnungssystem für Gestaltabweichung nach DIN4760 [47]. ....	33
Bild 3.3: Profilmeterschrieb a.) typische verzerrte Darstellung b.) gleicher horizontaler und vertikaler Maßstab. A, B, C und D sind an der gleichen Stellen in beiden Profilschrieben [83]. ....	34
Bild 3.4: Oberflächenschriebe mit Materialanteilkurve und Oberflächenkennwerte nach [66].....	35
Bild 3.5: Bestimmung der Rautiefe $RZ$ [50].....	36
Bild 3.6: Bestimmung der Rautiefen $Rpk$ , $Rvk$ und $Rk$ [50].....	36
Bild 3.7: Schichtaufbau Metalle [72].....	39
Bild 3.8: Eindruck eines Berkovich-Indenters und dazugehörige Kraft-Eindringkurve. ....	42
Bild 3.9: ESP-Messmethode. ....	44

Bild 4.1: Außenrundläppanlage zum automatisierten Polymerlappen von Wellenbauteilen.	45
Bild 4.2: Ausspindelwerkzeug für die Nockenwellenlagergasse und schematische Darstellung der charakteristischen Welligkeit durch den Ausspindelprozess. ....	46
Bild 4.3: Tastschnittprofil der Zylinderkopflagergasse. ....	46
Bild 4.4: Grundgefüge der Zylinderkopflagergasse. ....	47
Bild 4.5: Oberflächennahes Gefüge der Zylinderkopflagergasse. ....	47
Bild 4.6: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Zylinderkopflagergasse. ....	48
Bild 4.7: Profilschrieb einer geschliffenen Nockenwellenlagerstelle. ....	49
Bild 4.8: REM-Aufnahmen eines Schliffs der Nockenwellenrohre zur Visualisierung des zeitigen Gefügeaufbaus aus Ferrit und Perlit. ....	49
Bild 4.9: Oberflächennahes Gefüge im Bereich von ferritischem Grundgefüge der Nockenwellenlagerstelle. ....	50
Bild 4.10: Oberflächennahes Gefüge im Bereich von perlitischem Grundgefüge der Nockenwellenlagerstelle. ....	50
Bild 4.11: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Nockenwellenlagerstelle. ....	51
Bild 4.12: Stift-Scheibe Tribometer und schematische Darstellung der Funktionsweise. ....	52
Bild 4.13: Tastschnittprofil der Zylinderkopf Modellscheibe. ....	52
Bild 4.14: Grundgefüge der Zylinderkopf Modellscheibe. ....	53
Bild 4.15: Oberflächennahes Gefüge der Zylinderkopf Modellscheibe. ....	53
Bild 4.16: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Zylinderkopf Modellscheibe. ....	54
Bild 4.17: Schleifen der Triboscheiben mit radialen Bearbeitungsspuren. ....	55
Bild 4.18: Tastschnitt einer Modellscheibe für den Tribometerstift zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle. ....	55
Bild 4.19: Entgraten der Fase an den Stiften für den tribologischen Modelltest. ....	56
Bild 4.20: Laserscanaufnahmen vor und nach dem Entgraten der Fase. ....	56
Bild 4.21: Gefüge der Tribostifte zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle. ....	57
Bild 4.22: Oberflächennahes Gefüge der Tribostifte zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle. ....	57
Bild 4.23: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Tribostifte zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle. ....	58
Bild 4.24: Bearbeitungsanlage zum Polymerlappen von flachen Scheiben. ....	59
Bild 4.25: Einfache Werkzeuggeometrie und Bearbeitungsanordnung für Werkstoffuntersuchungen. ....	60
Bild 4.26: Werkzeuggeometrie mit einer Wechselwirkungsfläche als Ring. ....	60
Bild 4.27: Läppwerkzeuge mit einfacher Werkzeuggeometrie aus unterschiedlichen Polymerwerkstoffen. ....	61
Bild 4.28: Schneidkörnerbeschaffenheit der Läpppaste White Aluminium Oxide 600 von USP. ....	62
Bild 4.29: Kinetik und Kinematik des Polymerlappens von flachen Scheiben. ....	64

Bild 4.30: Kistler 4K Dynamometer Type 9123CQ14 mit Anordnung in der Bearbeitungsanlage.....	66
Bild 4.31: Bearbeitungskräfte und verfügbare Messkomponenten des Dynamometers.....	66
Bild 4.32: Koordinatentransformation des rotierenden Koordinatensystems am Dynamometer.....	67
Bild 4.33: Kräfteverlauf in Oszillationsrichtung der Läppbearbeitung mit gekennzeichneten Maximalwerten sowie die hierfür beschreibende gleitende Mittelwertskurve.....	68
Bild 4.34: Kräfteverlauf in Rotationsrichtung der Läppbearbeitung mit der gleitenden Mittelwertskurve.....	68
Bild 5.1: Abrichtscheibe zum Abrichten der Polymerwerkzeuge.....	71
Bild 5.2: Statistischer Versuchsplan zur Bestimmung der optimalen Bearbeitungsparameter.....	72
Bild 5.3: Paretodiagramm für den $Rpk$ -Wert beim Polymerläppen mit dem PVC Blockwerkzeug.....	73
Bild 5.4: Konturdiagramm des $Rpk$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz (Druck 1,5 bar).....	74
Bild 5.5: Konturdiagramm des $Rpk$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz (Druck 4 bar).....	74
Bild 5.6: Paretodiagramm für den $RZ$ -Wert beim Polymerläppen mit dem PVC Blockwerkzeug.....	75
Bild 5.7: Konturdiagramm des $RZ$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Druck (Frequenz 600 DH/min.).....	76
Bild 5.8: Konturdiagramm des $RZ$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Druck (Frequenz 1200 DH/min.).....	76
Bild 5.9: Reduzierte Spitzenhöhe $Rpk$ durch das Polymerläppen mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen mit einfacher Werkzeugblockgeometrie, einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 4 bar.....	77
Bild 5.10: Gemittelte Oberflächenrauheit $Rz$ durch das Polymerläppen mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen mit einfacher Werkzeugblockgeometrie, einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 4 bar.....	78
Bild 5.11: Wechselwirkungszeit bei einer Bearbeitungszeit von 30 s aufgrund der Werkzeuggeometrie des einfachen Blockwerkzeugs.....	79
Bild 5.12: Vergleich der erzielten Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie mit angepasstem Bearbeitungsdruck bei einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm und einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min.....	80
Bild 5.13: Visualisierung des Polymerläppens mit geschäumtem Werkzeug.....	81
Bild 5.14: Vergleich der erreichbaren Oberflächentopographie mit dem PVC-Ringflächenwerkzeug zum PUR-Schaum-Ringflächenwerkzeug nach jeweils 10 Bearbeitungsversuchen bei einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 7 bar.....	82

Bild 5.15: PUR-Schaumwerkzeug vor und nach dem Polymerlappen mit bearbeiteter Tribometerscheibe. ....	83
Bild 5.16: Parametervariation beim Polymerlappen mit Bestimmung des Energieeintrags.....	84
Bild 5.17: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei Drehzahlen von 100, 200 und 220 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 2 bar. ....	85
Bild 5.18: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei einer Oszillationsamplitude von 1 und 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min, einer Drehzahl von 200 U/min und einem Bearbeitungsdruck von 2 bar. ....	86
Bild 5.19: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei einer Oszillationsfrequenz von 600 und 1200 DH/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Drehzahl von 200 U/min und einem Bearbeitungsdruck von 2 bar. ....	87
Bild 5.20: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei Bearbeitungsdrücken von 1, 2, 3 und 4 bar, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einer Drehzahl von 200 U/min. ....	88
Bild 5.21: Übersicht der Energieeinträge durch Variation der Bearbeitungsparameter ausgehend von den Referenzeinstellungen. ....	90
Bild 5.22: Übersicht der Energieeinträge in Oszillations- und Rotationsrichtung durch Variation der Bearbeitungsparameter. ....	90
Bild 5.23: Rauheitswerte $R_z$ und $R_{pk}$ der Stahlscheiben als Ausgangsgeometrie für die Stifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar. ....	91
Bild 5.24: Rauheitswerte $R_k$ und $R_{vk}$ der Stahlscheiben als Ausgangsgeometrie für die Stifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar. ....	92
Bild 5.25: Oberflächennahes Gefüge der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1 bis 4 bar. ....	93
Bild 5.26: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar. ....	94
Bild 5.27: Nanohärteverteilung der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar. ....	96
Bild 5.28: REM- und EDX-Aufnahmen an Bereichen der Indentereindrücken der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar. ....	97
Bild 5.29: Kraft-Weg Verlauf einer einzelnen Picoindentermessung nach dem Polymerlappen mit 4 bar ohne Kriechverhalten. ....	98
Bild 5.30: Härtetiefenverlauf der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar..	99
Bild 5.31: Tiefenverlauf des E-Moduls der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar. ....	100
Bild 6.1: Verschleißbereich an der Nockenwellenlagerung am ersten Lager. ....	101
Bild 6.2: Anordnung des Stift-Scheibe Triboversuchs. ....	102
Bild 6.3: Reibwert der 1 und 2 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s. ....	104
Bild 6.4: Reibwert der 3 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s. ....	105
Bild 6.5: Reibwert der 4 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s. ....	105

Bild 6.6: Reibwert der 1 und 2 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten. ....	106
Bild 6.7: Reibwert der 3 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten. ....	107
Bild 6.8: Reibwert der 4 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten. ....	108
Bild 6.9: Reibwert der 1, 2, 3 und 4 bar polymergeläppten Stahlstifte am Ende der jeweiligen Betriebspunkte in Bezug auf den Quotienten der Gleitgeschwindigkeit zur Flächenpressung. ....	109
Bild 6.10: Verschleiß der 1 und 2 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.....	110
Bild 6.11: Verschleiß der 3 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.....	111
Bild 6.12: Verschleiß der 4 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.....	111
Bild 6.13: Verschleiß der 1 und 2 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten. ....	112
Bild 6.14: Verschleiß der 3 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten. ....	113
Bild 6.15: Verschleiß der 4 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten. ....	113
Bild 6.16: WLI-Aufnahmen vor dem Triboversuch eines mit 4 bar polymergeläppten Stahlstifts (oben) und einer feingedrehten Aluminiumscheibe (unten). ....	114
Bild 6.17: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 1 bar polymergeläppten Tribostift. ....	115
Bild 6.18: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 1 bar polymergeläppten Tribostift. ....	115
Bild 6.19: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 2 bar polymergeläppten Tribostift. ....	116
Bild 6.20: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 2 bar polymergeläppten Tribostift. ....	116
Bild 6.21: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 3 bar polymergeläppten Tribostift. ....	117
Bild 6.22: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 3 bar polymergeläppten Tribostift. ....	118
Bild 6.23: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit den beiden ersten 4 bar polymergeläppten Tribostift. ....	119
Bild 6.24: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit den beiden ersten 4 bar polymergeläppten Tribostift. ....	119
Bild 6.25: WLI-Aufnahme und Profil der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem dritten 4 bar polymergeläppten Tribostift. ....	120
Bild 6.26: Oberflächennahes Gefüge des Tribostifts nach dem zweiten 3 bar Prüflauf mit höherer Reibung und Hochverschleiß. ....	121

Bild 6.27: Oberflächennahes Gefüge des Tribostifts nach dem Prüflauf mit der dritten 4 bar Probe mit geringer Reibung und wenig Verschleiß.....	122
Bild 6.28: Chemische Zusammensetzung im oberflächennahen Werkstoffbereich der Tribostifte nach dem zweiten 3 bar Prüflauf (links) und nach dem Prüflauf mit der dritten 4 bar Probe (rechts).....	123
Bild 7.1: Randzonenveränderungen durch Zerspanung [56].....	127
Bild 7.2: Mechanische Tiefenwirkung beim Polymerlappen mit 1 bis 4 bar Bearbeitungsdruck. ....	128
Bild 7.3: Qualitativer Verlauf der Fließspannung in Abhängigkeit der Tiefe nach dem Polymerlappen der Stahlproben mit 1 bis 4 bar.....	130
Bild 7.4: Vergleichsspannungstiefenverlauf in Abhängigkeit des Reibwerts [31].....	132
Bild 7.5: Reibanteile in den Grenzschichten, aus [68]. ....	134
Bild 7.6: Einfluss der Ölviskosität auf den Stribeck-Kurvenverlauf [7]. ....	136

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2.1: Lagerstellen verschiedener Verbrennungsmotoren [3]. .....	28
Tabelle 4.1: Vergleich von Werkstoffeigenschaften verschiedener Polymere. ....	62

# Formelzeichen, Abkürzungen und Indices

## Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$P_i$	indizierte Leistung	kW
$P_e$	effektive Leistung	kW
$P_r$	Reibleistung	kW
$p_{mr}$	Reibmitteldruck	bar
$p_{mi}$	indizierter Mitteldruck	bar
$p_{me}$	effektiver Mitteldruck	bar
$i$	Arbeitsspiele pro Umdrehungen	-
$M_d$	Drehmoment des Motors	Nm
$n$	Drehzahl	1/min
$V_H$	Gesamthubvolumen des Motors	m <sup>3</sup>
$V_h$	Hubvolumen eines Zylinders	m <sup>3</sup>
$F_N$	Normalkraft	N
$F_R$	Reibkraft	N
$\mu$	Reibwert	-
$\mu_{initial}$	initialer Reibwert	-
$\mu_{final}$	finaler Reibwert	-
$P_{initial}$	initiale Reibleistungsdichte	W/mm <sup>2</sup>
$s_R$	Länge des tribologischen Kontaktes	µm
$h_s$	Schmierfilmdicke	µm
$\eta$	Viskosität	
$v$	Gleitgeschwindigkeit	m/s
$\tau$	Scherfestigkeit	MPa
$\tau_{max}$	maximale Scherfestigkeit	MPa
$A$	nominale Kontaktfläche	m <sup>2</sup>
$A_{real}$	reale Kontaktfläche	m <sup>2</sup>
$A_{Tribol}$	Nominale Kontaktfläche beim Tribokontakt	m <sup>2</sup>
$\dot{E}_{ein}$	eingebrachte Leistung	W
$\dot{E}_W$	in Wärme umgewandelte Leistung	W
$\dot{E}_V$	in Verschleißpartikel umgewandelte Leistung	W
$\dot{E}_M$	in Materialumwandlungen dissipierte Leistung	W
$b$	Lagerbreite	mm
$d$	Wellendurchmesser	mm

$R_z$	gemittelte Rautiefe	$\mu\text{m}$
$R_{pk}$	reduzierte Spitzenhöhe	$\mu\text{m}$
$R_{vk}$	reduzierte Riefenhöhe	$\mu\text{m}$
$R_k$	Kernrautiefe	$\mu\text{m}$
$l_n$	Einzelmessstrecken des Rauheitsprofils	mm
$M_{ri}$	Materialanteil	%
$E_{bin}$	Bindungsenergie des Elektrons	J
$E_{xray}$	Energie des monofrequenten Röntgenstrahls	J
$E_{final}$	Energie der ausgesendeten Elektronen	J
$H_{pic}$	Härte bei der Picoindentation	MPa
$F_{max}$	Maximalkraft bei der Picoindentation	N
$A_{Berk}$	Projizierte Fläche des Indentationseindrucks	$\text{mm}^2$
$h_{max}$	Maximale Eindringtiefe bei der Indentation	$\mu\text{m}$
$h_c$	Kontakttiefe bei der Indentation	$\mu\text{m}$
$S$	Kontaktsteifigkeit bei der Indentation	N/m
$\epsilon$	Geometriefaktor des Berkovich-Indenters	-
$E_r$	reduziertes E-Modul	GPa
$E_{probe}$	E-Modul der Probe	GPa
$E_{indenter}$	E-Modul des Indenters	GPa
$\nu_{probe}$	Querkontraktionszahl der Probe	-
$\nu_{indenter}$	Querkontraktionszahl des Indenters	-
$h$	Eindringtiefe des Indenters	$\mu\text{m}$
$t_{erh}$	Zeit zur Belastung eines Belastungszyklus	s
$t_{red}$	Zeit zur Entlastung eines Belastungszyklus	s
$s_{osz}$	Weg der Oszillation beim Läppen	mm
$a_{osz}$	Amplitude der Oszillation beim Läppen	mm
$f_{osz}$	Frequenz der Oszillation beim Läppen	DH/min
$t$	Zeit	s
$v_{osz}$	Oszillationsgeschwindigkeit beim Läppen	mm/s
$v_{rot}$	Rotationsgeschwindigkeit beim Läppen	
$d_{NW}$	Durchmesser der Nockenwelle	mm
$D$	Außendurchmesser der bearbeiteten Ringfläche	mm
$d_i$	Innendurchmesser der bearbeiteten Ringfläche	mm
$d_m$	Mittlerer Durchmesser der bearbeiteten Ringfläche	mm
$F_{pneu}$	Kraft des pneumatischen Zylinders im Finishgerät	N
$F_{osz}$	Bearbeitungskraft beim Läppen in Oszillationsricht.	N
$F_{rot}$	Bearbeitungskraft beim Läppen in Rotationsricht.	N
$F_x, F_y, F_z$	Kraftkomponenten des Dynamometers	N
$M_z$	Moment um die Rotationsachse des Dynamometers	N
$\varphi$	Winkelposition des Dynamometers	°
$F_G$	Gewichtskraft des Dynamometers	N
$\dot{E}_{osz}$	Leistung in Oszillationsrichtung beim Läppen	W

$\dot{E}_{rot}$	Leistung in Roationsrichtung beim Läppen	W
$W_{osz}$	Arbeit in Oszillationsrichtung beim Läppen	Nm
$W_{rot}$	Arbeit in Roationsrichtung beim Läppen	Nm
$E_{osz}$	Energieeintrag in Oszillationsrichtung beim Läppen	J
$E_{rot}$	Energieeintrag in Roationsrichtung beim Läppen	J
$F_{Lager1}$	Kraft an der ersten Lagerstelle der Nockenwelle	N
$b_{ver}$	Breite der Verschleisspur	mm
$A_{ver}$	Verschleissflache	mm <sup>2</sup>
$P_{ver}$	Pressung über der Verschleissflache	MPa
$\sigma$	Flieisspannung	MPa
$\sigma_0$	Flieisspannung des Einkristalls	MPa
$\sigma_{HP}$	Flieisspannung im verformten Gefügebereich	MPa
$\sigma_G$	Flieisspannung im Grundgefüge	MPa
$R_e$	Streckgrenze	MPa
$R_m$	Zugfestigkeit	MPa
$\sigma_v$	Vergleichsspannung nach Tresca	MPa
$D_K$	Mittlere Korngröße	mm
$k_{HP}$	Hall-Petch-Konstante	N/mm <sup>3/2</sup>

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
PKW	Personenkraftwagen
HB	Härte Brinell
DLC	Diamond Like Carbon
WLI	Weißlichtinterferometrie
LSM	Laserscanmikroskopie
REM	Rasterelektronenmikroskopie
FIB	Focused Ion Beam
EDX	Energiedispersiven Röntgenspektroskopie
XPS	Röntgen Photoelektronenspektroskopie
CNC	Computerisierte numerische Steuerung
PP	Polypropylen
PMMA	Polymethylmethacrylat
PTFE	Polytetrafluorethylen
PE	Polyethylen
PUR	Polyurethan
PET	Polyethylenterephthalat
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid
At.-%	Atomprozent

# 1 Einführung

## 1.1 Endbearbeitungsverfahren

Früher wurden die letzten Bearbeitungsschritte meist durch Zerspanprozesse mit geometrisch bestimmter Schneide durchgeführt, wie zum Beispiel das Drehen einer Welle. Heute ist die erreichbare Geometrie und Topographie mit solchen Bearbeitungen oft nicht ausreichend. Deshalb werden heutzutage nach den Bearbeitungsprozessen mit geometrisch bestimmten Schneiden, Verfahren mit geometrisch unbestimmten Schneiden hinzugefügt oder diese komplett durch eine Bearbeitung mit unbestimmter Schneide ersetzt. Diese Verfahren werden häufig als Endbearbeitungsverfahren bezeichnet. Im Hinblick auf Gleitlagerungen im Verbrennungsmotor werden dort meist Schleif- oder Honverfahren eingesetzt.

Die Endbearbeitung dient der Herstellung definierter Bauteileigenschaften wie Geometrie und Oberflächenfeingestalt. Im Unterschied zu den spanenden Vor- und Zwischenbearbeitungen, wird bei der Endbearbeitung nur ein geringes Werkstoffvolumen abgetragen. Steigende Ansprüche bezüglich Lebensdauer und Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren erfordern immer höhere Bearbeitungsqualitäten. Als der letzte und damit qualitätsbestimmende Prozess, spielt die Endbearbeitung der Bauteile eine zentrale Rolle, diese Anforderungen zu erfüllen. Deshalb müssen die Endbearbeitungsverfahren an die Anforderungen angepasst beziehungsweise durch andere Verfahren ersetzt oder mit weiteren Verfahren ergänzt werden, um das angestrebte Bauteilverhalten im Betrieb zu erreichen. Werden verbesserte Bauteileigenschaften durch die Endbearbeitung erreicht, hat dies den Vorteil, dass auf aufwendige Maßnahmen, wie zum Beispiel die Veränderung der Konstruktion oder des Werkstoffes, verzichtet werden kann. Die Verbesserung der Endbearbeitung stellt somit den einfachsten Weg der Bauteiloptimierung dar.

Verbesserte Bauteileigenschaften durch die Endbearbeitung bedeuten für den Einsatz der Bauteile eine zuverlässigere Bauteilfunktion, eine höhere Bauteillebensdauer, geringerer Verschleiß sowie eine reduzierte Reibung. Die geforderten Bauteileigenschaften werden durch den Konstrukteur mit Zeichnungsangaben festgelegt. Die Umsetzung dieser Vorgaben erfolgt durch die Fertigung. Der Konstrukteur muss dabei den Entwicklungsstand der Fertigungstechnik und Realisierbarkeit unter Produktionsgesichtspunkten berücksichtigen. Die Endbearbeitung dient dabei der Einhaltung von Maß-, Form- und Lagevorgaben sowie der Oberflächenqualität mit engen Toleranzen. Seit Jahrzehnten ist die Wichtigkeit dieser Bauteileigenschaften bekannt. Durch die stetige Weiterentwicklung dieser klassischen Kriterien werden funktionelle Vorteile erreicht. Dabei werden die Toleranzen von Motorbauteilen wie Kurbelwellen, Nockenwellen und die Lager im Bereich von wenigen Mikrometern definiert. Beispielsweise können dadurch präzisere Lagerspiele der Gleitlager erreicht werden. Neben den erwähnten geometrischen Bauteileigenschaften gibt es weitere Merkmale, die durch die Endbearbeitung verändert werden. Hierzu gehören Werkstoffeigenschaften wie die Festigkeit, die Eigenspannungen sowie die Konditionierung der Werkstückoberfläche mit Bestandteilen aus

Werkzeug und dem Kühlschmierstoff. Mach und Berlet haben in [49] und [12] festgestellt, dass diese Veränderungen durch die Endbearbeitung das Verhalten des Bauteils beim späteren Betrieb in starkem Maße beeinflusst. Einen Zusammenhang zwischen der für die Veränderungen verantwortlichen eingesetzten Energie bei der Endbearbeitung und den Auswirkungen im späteren Betrieb wurde bis heute jedoch nicht betrachtet.

## 1.2 Reibleistung bei Verbrennungsmotoren

Der Verbrennungsmotor erzeugt aus chemischer Energie eines Kraftstoffs mittels Verbrennung mechanische Energie. Die erzeugte mechanische Energie, welche als innere Leistung an den Kolben anliegt, wird indizierte Leistung  $P_i$  genannt. Dabei geht ein Teil der mechanischen Energie beim Übertragen der Kräfte zur Abtriebswelle und zur Steuerung des Verbrennungsmotors selbst verloren. Die mechanischen Verluste entstehen am Triebwerk mit Kurbelwellenhauptlager, Pleuellager, Kolbengruppe und eventuell vorhandenem Massenausgleich, aber auch am Ventil- und Steuertrieb sowie den Nebenaggregaten mit zum Beispiel der Ölpumpe, der Kühlmittelpumpe, dem Generator, der Einspritzpumpe, dem Kühlerventilator, der Vakuumpumpe, dem Klimakompressor, der Lenkhilfepumpe oder dem Luftkompressor. Da die Steuerung des Motors und die Übertragung der Energie zur Motorabtriebswelle die verfügbare Nutzleistung (effektive Leistung  $P_e$ ) reduzieren, wird dieser Leistungsverlust als mechanische Verlustleistung bezeichnet. Die beschriebene mechanische Verlustleistung wird bei den aufgezählten Komponenten durch Reibung an den einzelnen Kontaktstellen verursacht. Deshalb spricht man hier von der sogenannten Reibleistung  $P_r$  des Verbrennungsmotors. Somit gilt der Zusammenhang

$$P_r = P_i - P_e. \quad 1-1$$

Wird also die Reibleistung reduziert, erhöht sich die vorhandene effektive Leistung und reduziert somit den Gesamtenergiebedarf des Kraftfahrzeugs. Die Reibleistungsreduzierung stellt deshalb für die Automobilindustrie eine wichtige Stellschraube zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge dar.

Reibung entsteht an den Stellen der Motorkomponenten, bei denen zwei Bauteile eine Relativbewegung zueinander ausführen. Der Reibungsanteil und somit der Anteil an der Verlustleistung der einzelnen Kontaktstellen ist neben den Bauteileigenschaften abhängig von den vorliegenden tribologischen Verhältnissen. Diese sind gegeben durch die Kräfte, Geschwindigkeiten sowie Einflüsse aus dem Schmiermittel, wie zum Beispiel der Viskosität oder der Additivierung. Da sich diese Größen in einem Betriebspunkt des Motors bei den Einzelkomponenten unterscheiden, führt dies zu einer Last- und Drehzahlabhängigkeit der einzelnen Reibungsanteile.

Der Ventiltrieb hat, wie in Bild 1.1 zu sehen, bei geringen Drehzahlen zwischen 500 und 1500 U/min mit über 30% den prozentuell größten Reibanteil im Verbrennungsmotor. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die Tribopaarung der gleitgelagerten Nockenwelle im Ventiltrieb untersucht. In Bild 1.1 ist die Drehzahl auf der Abszisse und der Reibmitteldruck  $p_{mr}$  auf der Ordinate gezeigt. Der Mitteldruck gibt Auskunft über alle mechanischen Verluste, der Reibung des Motors und eignet sich deshalb für die Darstellung der Reibleistungsaufteilung eines

Verbrennungsmotors. Vorteil bei der Betrachtung des Mitteldrucks ist die Unabhängigkeit vom Hubraum oder von der Größe des Motors. Der Reibmitteldruck  $p_{mr}$  ergibt sich zu

$$p_{mr} = p_{mi} - p_{me} = \frac{P_i - P_e}{i \cdot n \cdot V_H} = \frac{P_r}{i \cdot n \cdot V_H}. \quad 1-2$$

Der indizierte Mitteldruck  $p_{mi}$  gibt dabei den Druck, welcher auf den Kolben wirkt, an und wird mit Hilfe von Messungen bestimmt. Der effektive Mitteldruck  $p_{me}$  kann aus dem Drehmoment des Motors  $M_d$  bestimmt werden. Hierfür gilt

$$p_{me} = \frac{M_d \cdot 2\pi}{i \cdot V_H}. \quad 1-3$$

Bei den aufgeführten Berechnungen steht  $i$  für die Arbeitsspiele pro Umdrehungen (0,5 für 4-Takt und 1 für 2-Takt) und  $n$  gibt die Motorumdrehungen pro Zeit an. Das Hubvolumen  $V_h$  beschreibt das Volumen eines Motorzylinders vom unteren bis zum oberen Totpunkt. Das Gesamthubvolumen des Motors  $V_H$  ergibt sich aus dem Hubvolumen eines Zylinders  $V_h$  multipliziert mit der Anzahl der Zylinder [80].

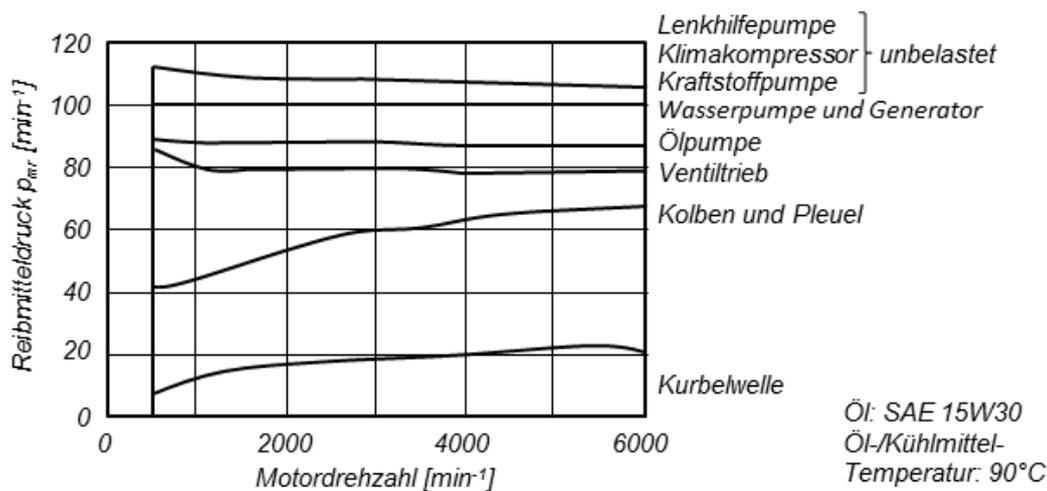


Bild 1.1: Reibungsaufteilung eines PKW- Ottomotors [80].

### 1.3 Ziele und Vorgehensweise

In der zentralen Fragestellung dieser Dissertation ist zu eruieren, wie der Zusammenhang zwischen der Endbearbeitung und den dadurch erzielten Bauteileigenschaften mit dem tribologischen Bauteilverhalten korreliert werden kann. Dabei sollen neben den herkömmlichen makro- und mikrogeometrischen Bauteilanforderungen und den Grundwerkstoffeigenschaften, die Eigenschaften des oberflächennahen Werkstückbereichs im Bereich der obersten Nano- bis Mikrometer sowie die Beanspruchung der Werkstücke durch die Endbearbeitung betrachtet werden. Diese Thematik wird in drei Aspekte unterteilt, welche zur Beschreibung der zentralen Fragestellung betrachtet werden müssen. Diese Aspekte und die Vorgehensweise

zur Untersuchung der Zusammenhänge sind in Bild 1.2 dargestellt. Es sollen die Aspekte der Endbearbeitung, des Triboverhaltens sowie der begleitenden Analytik in Zusammenhang gebracht werden.

Hierzu gilt es, als erstes Variationen eines geeigneten Endbearbeitungsverfahrens mit Analyseergebnissen vor, nach und während der Bearbeitung in Verbindung zu bringen, welche ausschlaggebend für das spätere Triboverhalten der Werkstücke sein können. Danach folgt die Betrachtung der Analyseergebnisse hinsichtlich des Triboverhaltens der Bauteile durch die Bewertung von Reibung und Verschleiß bei den Prüfstandsuntersuchungen. Damit ist es möglich, die zentrale Fragestellung zu beantworten und einen Hinweis zu bekommen, wie eine Variation der Endbearbeitung bei Einhaltung der heutzutage verwendeten geometrischen Zeichnungsvorgaben zu einem unterschiedlichen Triboverhalten der Bauteile führen kann.

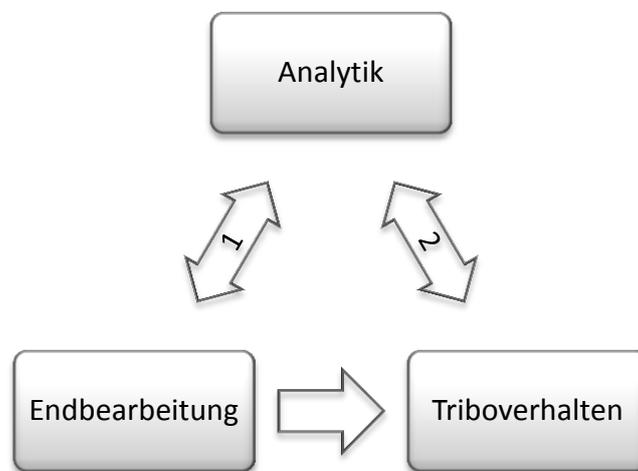


Bild 1.2: Vorgehensweise für das Verständnis der Zusammenhänge der Endbearbeitung auf das tribologische Bauteilverhalten.

Das erste Untersuchungsziel wird anhand eines speziellen Endbearbeitungsverfahrens erarbeitet. Dieses verspricht neben der eigentlichen Herstellung der geforderten Bauteilgeometrie, den oberflächennahen Werkstückbereich hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung und der Gefügeausbildung für einen reibungs- und verschleißreduzierten Betrieb zu konditionieren. Es handelt sich dabei um einen Läppprozess, bei dem eine zusätzliche chemische Wirkung durch die Verwendung eines polymeren Läppwerkzeugs und einer Läpppaste mit organischen Bestandteilen erreicht werden soll. Die Erprobung erfolgt mit verschiedenen Polymerwerkstoffen als Werkzeug und der Variation der Prozessparameter. Die Ergebnisse dieses Endbearbeitungsverfahrens werden hinsichtlich der relevanten, genormten Kenngrößen bewertet und das Polymerlappen hierfür optimiert. Zu den relevanten Kenngrößen zählen die aktuell als Konstruktionsvorgabe verwendeten Maß-, Form- und Lageabweichungen sowie Topographiekenngößen. Die Bauteilabweichungen sollen ausgehend von den festgelegten Nennmaßen der Konstruktion so gering wie möglich gehalten werden. Außerdem gilt es kleine Oberflächenrauheiten prozesssicher zu erreichen. Zusätzlich zu den geforderten geometrischen Kenngrößen zur Bewertung der Endbearbeitung gilt es weitere Analysemethoden anzuwenden, welche es ermöglichen Rückschlüsse aus den bei der Endbearbeitung eingestellten

Prozessparametern zu ziehen. Hierzu gehören Analyseverfahren zur Bewertung der erwarteten Veränderungen der chemischen Zusammensetzung sowie der Gefügeausbildung des oberflächennahen Werkstückbereichs. Diese Analysen werden bei den auf Reibung und Verschleiß getesteten Proben, vor und nach der Endbearbeitung sowie vor und nach den Tribotests, durchgeführt. Eine weitere Messung, welche die Beanspruchung des oberflächennahen Werkstückbereichs durch das Polymerlappen und die dadurch resultierenden Veränderungen der Eigenschaften dieses Bereiches widerspiegelt, wird während den Bearbeitungsversuchen durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgen anhand von Läppbearbeitungen mit variierten Prozessparametern, welche eine möglichst vergleichbare Maß-, Form- und Lageabweichung sowie Topographie erreichen. Dadurch können die Ergebnisse aus den angewandten Analysen zur Beschreibung der chemischen Zusammensetzung, der Gefügeausbildung des oberflächennahen Werkstoffbereichs und der durchgeführten Messungen während den Bearbeitungen mit der variierten Endbearbeitung in Korrelation gebracht werden.

Das zweite Ziel dieser Arbeit ist, die mit den beschriebenen Analysen untersuchten Bearbeitungsvarianten auf das Reib- und Verschleißverhalten im Tribokontakt zu vergleichen. Damit bei den Untersuchungen die Wirkung des analysierten, oberflächennahen Werkstückbereichs sowie der Messgröße zur Beschreibung der Beanspruchung bei der Endbearbeitung betrachtet werden kann, ist es wichtig, neben einer vergleichbaren Maß-, Form- und Lageabweichung und Topographie andere mögliche Einflüsse des Tribosystems konstant zu halten. Da dies am besten mit einem Modelltest gewährleistet werden kann, wird das betrachtete Tribosystem der Nockenwellenlagerung auf eine Stift - Scheibe Paarung für den Tribometer überführt.

## 2 Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse

### 2.1 Fertigungsverfahren

#### 2.1.1 Einteilung der Verfahren

Die Fertigungsverfahren werden nach der DIN 8580 in sechs Hauptgruppen eingeteilt. Diese Hauptgruppen werden in weitere Untergruppen aufgeteilt. Die dritte Hauptgruppe beschreibt das Trennen, bei der die Formänderung durch Verminderung des Materialzusammenhalts erfolgt. Die Formänderung wird erreicht, indem eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück realisiert wird, bei der eine Energieübertragung stattfindet. Zu der Hauptgruppe Trennen gehört auch das Spanen. Spanen wird dabei hinsichtlich der eingesetzten Schneiden in zwei Gruppen untergliedert. Zum einen gibt es hier das Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden und zum anderen das Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Zu den geometrisch bestimmten Schneiden gehört beispielsweise Bohren, Drehen oder Fräsen. Dabei ist die Geometrie der Schneide sowie deren Kinematik gezielt einstellbar und berechenbar. Endbearbeitungsverfahren, welche eingesetzt werden, um sehr hohe Oberflächengüten und Maßgenauigkeiten zu erzielen, gehören zum größten Teil zu den Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide. Das sind Schleifen mit rotierendem Werkzeug, Bandschleifen, Hubschleifen, Honen, Läppen, Strahlspanen und Gleitspanen. Bei den verwendeten Werkzeugen sind die Schneidenanzahl, die Geometrie der Schneidenkante und die Lager der Schneiden zum Werkstück unbestimmt (DIN 8589). Da sich diese Arbeit mit einem Endbearbeitungsverfahren, welches zu der Gruppe der geometrisch unbestimmten Schneiden zählt befasst, wird bei der dargestellten Unterteilung der Hauptgruppe Trennen in Bild 2.1 nur der Teil 3.3 detailliert aufgeführt.

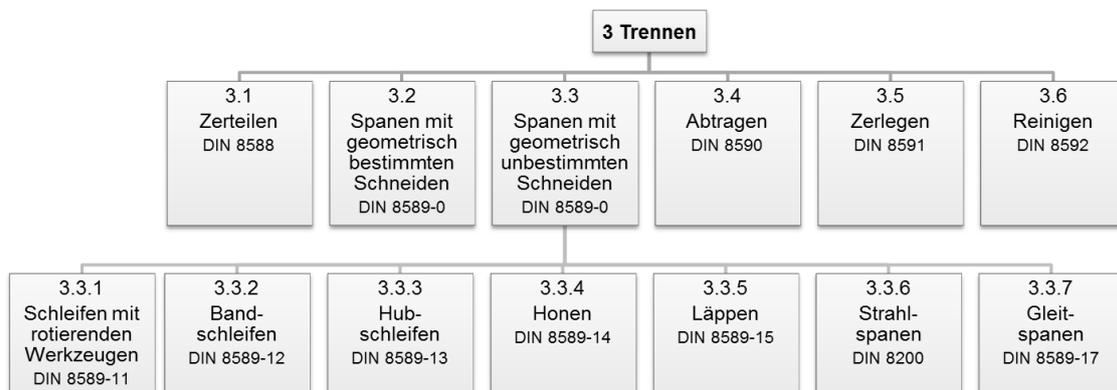


Bild 2.1: Einteilung der Fertigungsverfahren Trennen nach DIN 8580.

## 2.1.2 Zerspanvorgang

Grundvoraussetzung für einen Zerspanvorgang ist, dass die Schneide eine größere Härte als der Werkstückwerkstoff hat. Die Darstellung des Zerspanvorgangs ist am anschaulichsten anhand einer definierten Schneide beschreibbar. Betrachtet man das Drehen, handelt es sich um eine einzelne Schneide, an der die Zerspanung erfolgt. Beim Beginn des Zerspanens dringt die Schneide des Werkzeugs in den Werkstoff ein. Dieser wird dadurch elastisch und plastisch verformt bis er nach dem Überschreiten der maximal zulässigen werkstoffabhängigen Schubspannung zu fließen beginnt. Der verformte Werkstoff bildet sich in Abhängigkeit der vorgegebenen Schneidengeometrie zu einem Span aus. Dieser Span schiebt sich über die Spanfläche der Schneide hinaus.

Die für die Zerspanung notwendige plastische Verformung des Werkstoffs ist nicht nur von den werkstoffseitigen Eigenschaften abhängig. Eine weitere große Bedeutung für die plastische Verformung eines Werkstoffs ist der Betrag und die Richtung der Belastung bei der Zerspanung. Der Betrag der Spannungen setzt sich aus den Zerspangeschwindigkeiten sowie der Schnitttiefe zusammen. Die Richtung der Belastung wird durch den eingestellten Span-, Einstell- und Neigungswinkel des Werkzeugs vorgegeben [45].

In Bild 2.2 links ist die Spanbildung schematisch dargestellt. Das Schema spiegelt die im Bild rechts dargestellte Spanwurzelaufnahme wider. Die Abbildung zeigt die plastische Verformung während der Spanentstehung. Im Bereich (a) ist der Strukturverlauf im Werkstück zu sehen, wie er durch einfaches Scheren entsteht. Dieser Verlauf geht dann in die Struktur des Bereichs (b) über. Handelt es sich um einen spröden Werkstoff, kann schon eine geringe Verformung in der Scherebene zu einer Werkstofftrennung führen. Bei Werkstoffen, welche duktiler sind, erfolgt die Trennung erst vor der Schneidkante im Bereich (e). Wirkende Zugbelastung und gleichzeitig senkrecht auftretender Druck führt in Verbindung mit den dabei entstehenden hohen Temperaturen zu starken Verformungen in den Randbereichen nahe der Spanfläche (c) sowie der Freifläche (d). Während des Abgleitens des Spans über die Werkzeugfläche entstehen in den Grenzschichten weitere plastische Verformungen. An der Unterseite des Spans bildet sich die sogenannte Fließzone aus. Die sich dabei parallel zur Spanfläche ausbildende Verformungstextur ist auf einen viskosen Fließvorgang mit hohen Verformungen zurückzuführen. Der beschriebene Spanbildungsvorgang beschreibt einen Fließspan. Weitere Spanarten sind der Scherspan, der Lamellenspan und der Reißspan [45].

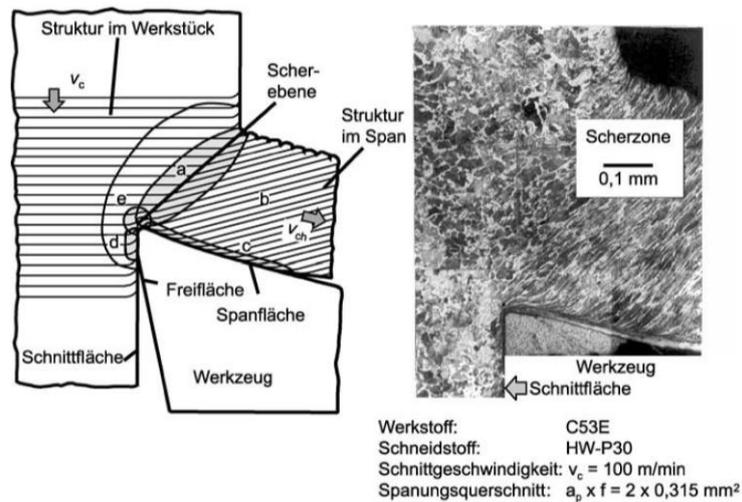


Bild 2.2: Spanentstehung [45].

Im Unterschied zur Zerspaltung mit geometrisch bestimmter Schneide gibt es bei der Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide eine stetige Änderung der Schneidengeometrie. Die Schneidkörner bestehen aus kristallinen, sprödharten Kornwerkstoffen. Der Zerspaltungsvorgang erfolgt nach verschiedenen Wirkprinzipien. Eine übersichtliche Einteilung nach den Wirkprinzipien bei der Zerspaltung mit geometrisch unbestimmter Schneide ist in Bild 2.3 dargestellt. Die Aufteilung erfolgt nach Verfahren mit energie-, kraft-, bahn- und raumbundenem Wirkprinzip.

Schleif-, Hon- und Gleitschleifoperationen mit gebundenem Korn sind oft kraftgebunden. Die Körner ritzen dabei feine Riefen in die Werkstückoberfläche. Eine Wälzbewegung können die Körner in diesem Fall nicht ausführen, da sie mit erhöhter Kraft gegen das Werkstück gedrückt werden. Das dabei häufig relativ starr gehaltene Schneidkorn dringt dabei durch die vorgegebenen Bewegungen von Werkzeug beziehungsweise dem Werkstück auf einer bestimmten Bahn in das Werkstück ein. Somit ist der Schneideingriff bedingt bahngebunden. Bei bahngebundenen Spanvorgängen dringt die Kornschneide flach in die Werkstückoberfläche ein und verformt diesen Bereich bis in den plastischen Bereich. Da bei geometrisch unbestimmten Schneiden keine definierte Schneidenform, wie bei geometrisch bestimmten Schneiden, vorhanden ist, wird zunächst kein richtiger Span gebildet. Der verformte Werkstückwerkstoff wird anfänglich zur Seite hin gedrückt und bildet dort Rückstände und es kommt gegebenenfalls zu einem gleichzeitigen Fließvorgang des Werkstoffes unter der Schneide hindurch. Erst wenn die Schneide tief genug ins Werkstück eingedrungen ist, erfolgt eine Spanbildung. Bei den Zerspaltungsvorgängen tritt ein Wechsel von Verdrängungs- und Schneidvorgängen auf.

Zu dem energiegebundenen Wirkprinzip zählt das Strahlspanen. Dabei bekommen die abrasiven, ungebundenen Körner einen Energieimpuls, welcher in eine Energie zur Zerspaltung umgesetzt wird. Diese Energie bestimmt die spanende Wirkung. Auch hier erfolgt erst ein Fließvorgang, welcher zur Erhöhung von Druckspannungen in der Werkstückoberfläche führt. Wird ein spröder Werkstoff durch Strahlspanen bearbeitet, platzen Werkstückteilchen ab.

Ein weiteres Verfahren, bei dem ungebundene Körner zum Einsatz kommen, ist das Läppen. Die Schneidkörner befinden sich zwischen Werkstück und Werkzeug. Die Körner erfahren einen Wälzvorgang durch die Relativbewegung von Werkstück zu Werkzeug. Durch den Abrollvorgang und der dauerhaft herrschenden Anpresskraft zwischen Werkstück und Werkzeug entstehen immer wieder Verformungen, Quetschungen und feine Zerspanungen durch Materialermüdung. Da der Raum zwischen Werkstück und Werkzeug den Vorgang des Schneideingriffs bestimmt, liegt ein raumgebundenes Wirkprinzip vor. Da in dieser Arbeit das Läppen näher untersucht wird, erfolgt eine detailliertere Prozessbeschreibung des Läppens im nächsten Kapitel.

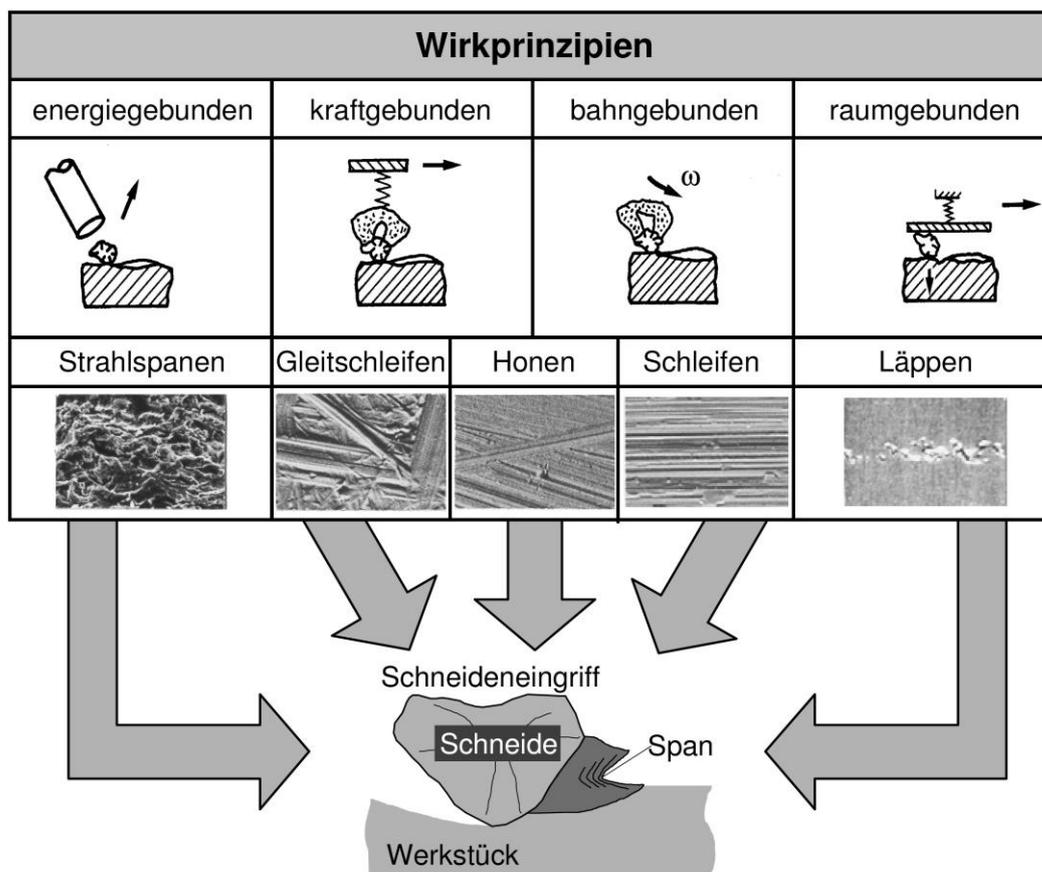


Bild 2.3: Wirkprinzip des Schneideneingriffs [46].

### 2.1.3 Läppen

Das Läppen, wie im Kapitel zuvor erläutert, gehört zu den raumgebundenen Prozessen mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Durch das Läppen werden sehr geringe Oberflächenrauigkeiten erzielt. Bei der Zerspanung im Läppprozess spricht man vom Spanen mit losem, in einer Paste oder Flüssigkeit verteiltem Korn. Diese Mischung wird als Läpppaste bezeichnet. Dieses Läppgemisch wird meist auf einem formübertragenden Werkzeug bei ungerichteten Schneidbahnen der Körner geführt, siehe DIN78a.

In DIN 8589-15 erfolgt die Einteilung des Läppens nach der zu bearbeitenden Werkstückform. Dazu gehören das Planläppen, das Rundläppen, das Schraubläppen, das Wälzläppen und das Profilläppen, wie in Bild 2.4 dargestellt.

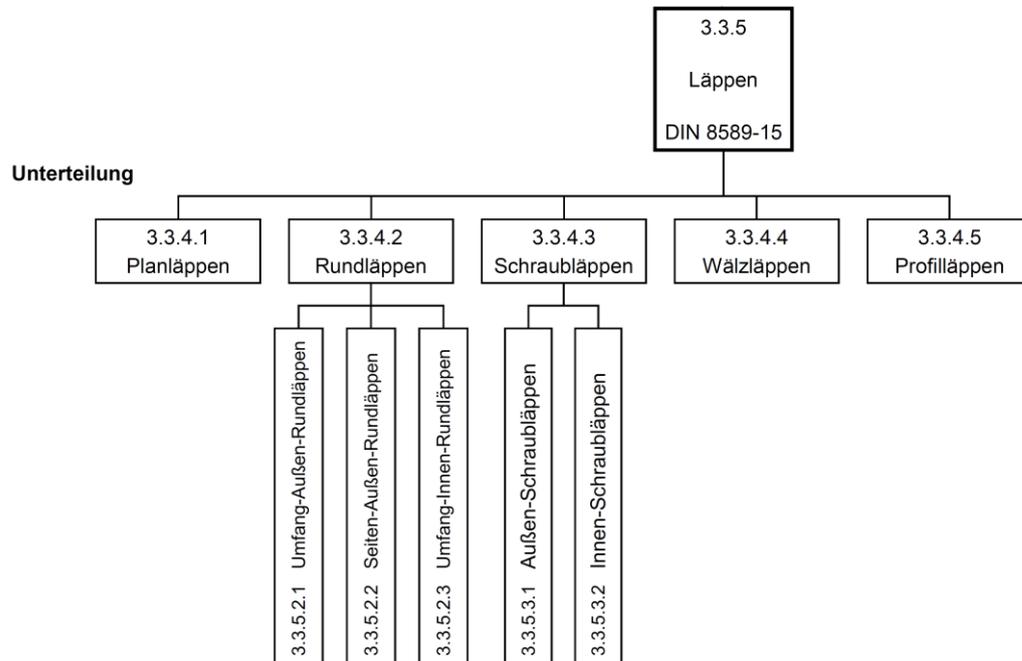


Bild 2.4: Einteilung der Läppverfahren nach DIN8589-15.

Das Polymerläppverfahren in dieser Arbeit wird für eine Wellenbearbeitung betrachtet und deshalb dem Umfangs-Außen-Rundläppen, wie in Bild 2.5 schematisch dargestellt, zugeordnet. Diese Form der Läppbearbeitung wird nach DIN als „Läppen einer zylindrischen Außenkontur mit Flächenberührung, die durch eine das Werkstück umschließende Hülse als Läppwerkzeug gegeben ist“ definiert. Da für die Untersuchungen dieser Arbeit das Umfangs-Außen-Rundläppverfahren von Wellen auf Modellscheiben abgebildet wird, war es notwendig, die Kinematik dieses Verfahrens anzupassen. Die kinematischen Veränderungen sind in Kapitel 4 erklärt.

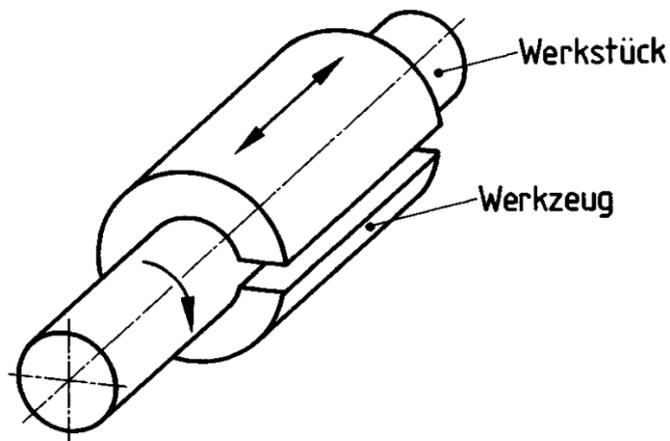


Bild 2.5: Umfangs-Außen-Rundlappen nach DIN8589-15.

Beim Läppvorgang treten neben dem eigentlichen Schnittvorgang eine große Anzahl an Knet- und Rollvorgängen auf. Die Zerspanung erfolgt in der Kontaktzone durch das zwischen Werkstück und dem formgebenden Werkzeug abrollenden oder temporärer verankerten Abrasivkorn, siehe Bild 2.6.

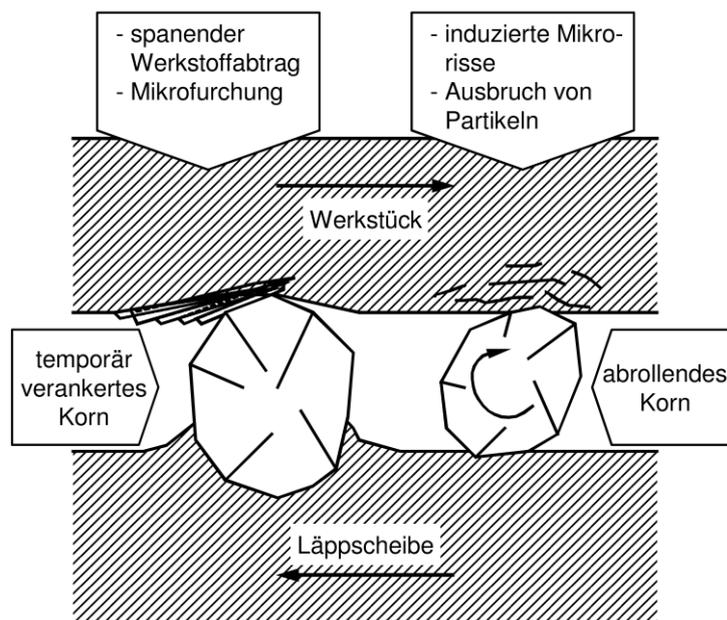


Bild 2.6: Spanvorgang beim Läppen [46].

Dabei drücken sich die scharfkantigen Läppkörner in den Werkstoff des Werkstückes sowie natürlich auch in das formgebende Werkzeug. Die Tiefe der Eindrücke ist abhängig von der eingestellten Pressung bei der Bearbeitung sowie von den Materialeigenschaften von Werkstück und Werkzeug. Die Läppgeschwindigkeit sowie die Körneranzahl pro Flächenelement bestimmen die Anzahl der Eindrücke. Durch die raumgebundene Führung der Körner richten sich auch flachliegende Läppkörner im Läppgemisch auf und tragen zum Zerspanen bei. Die

bewegten Spitzen greifen mit ihren Kanten in die Oberfläche ein. Die beschriebenen Bewegungen der Körner im Läppprozess sowie deren Wirkung sind in Bild 2.7 zu sehen. Beim Läppen von duktilem Werkstoff wird der Werkstoff durch das wiederholte Eindringen der Kornspitzen in die Werkstückoberfläche bis zur Ermüdung umgeformt, wodurch es zum Materialabtrag kommt. Dagegen entstehen bei der Bearbeitung von sprödem Werkstoff Mikrorisse an der Werkstückoberfläche. Ein sich dadurch ausbildendes Netz von Rissen führt zum Ausbruch von Partikeln [74].

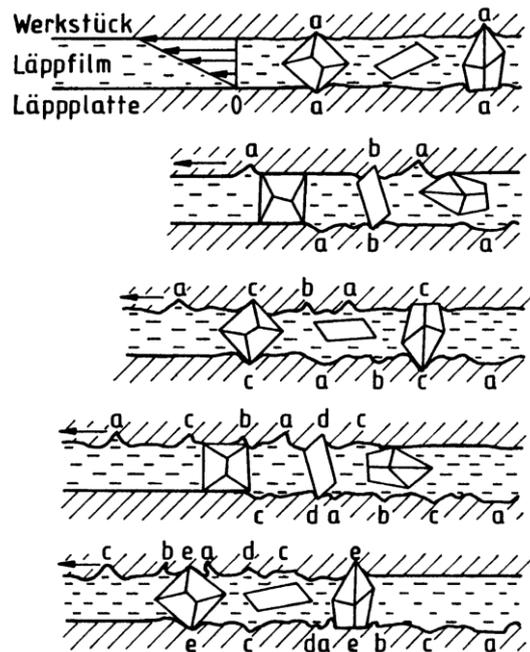


Bild 2.7: Bewegung der Läppkörner im Läppfilm mit dem bahngebundenen Spanvorgang [52].

Oft wird als Läppwerkzeug alleine der formgebende Werkzeugkörper bezeichnet. Dabei besteht das Werkzeug neben dem Werkzeugkörper aus der Läpppaste mit den abrasiven Schneidkörnern.

Das Läppkorn, welches durch die Flüssigkeit zwischen Werkstück und Werkzeug in Bewegung gehalten wird, hat die Aufgabe durch lokale Pressungen, Knet- und Spanvorgänge einen Materialabtrag zu erzeugen. Damit dieser Prozess optimal abläuft, werden die folgenden Anforderungen an das Läppkorn gestellt. Die Härte des Läppkorns muss ausreichend groß sein, damit das Schneidkorn in den Werkstoff eindringen kann. Das Korn muss eine gewisse Druckfestigkeit besitzen, sonst zerbricht oder verformt es sich beim Läppen zu schnell. Der Eingriff der Körner sollte gleichmäßig vorhanden sein. Durch vereinzelte zu große Körner entstehen tiefe Riefen. Bei zu kleinen Körnern erfolgt kein Abtrag. Sie haben keinen Nutzen beim Läppvorgang. Für einen optimalen Spanvorgang müssen die Körner scharfe Kanten haben und dürfen nicht zu flach sein. Die am häufigsten eingesetzten Schneidkörner beim Läppen sind Korund  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Siliziumkarbid  $\text{SiC}$ , Borkarbid  $\text{B}_4\text{C}$  sowie Diamant. Siliziumkarbid ist der am häufigsten eingesetzte Werkstoff, da er für fast alle Materialien eingesetzt werden kann. Korund verschleißt schnell. Aus diesem Grund wird es bevorzugt bei weicheren Werk-

stückwerkstoffen oder bei einem gewünschten weicheren Schnitt eingesetzt. Härter als Siliziumkarbid ist Borkarbid und Diamant. Diese Schneidstoffe werden für gehärtete Stähle und Hartmetalle verwendet.

Die Läppkörner und das Trägermedium sind nicht willkürlich wählbar. Ein gutes Läppgemisch zeichnet sich unter anderem durch eine gute Mischbarkeit aus, bei der es nicht zum Verklumpen oder zum vorzeitigen Absetzen der Schneidkörner kommt.

Das Trägermedium des Läppgemisches hat neben der Aufgabe die Schneidkörner zwischen Werkstück und Werkzeug in Bewegung zu halten dafür zu sorgen, dass der Spänetransport aus der Wirkzone gewährleistet wird. Körner ohne Trägermedium könnten nicht abrollen und die bearbeitete Oberfläche würde wie beim Schleifen oder Honen geordnete Riefen erhalten. Da bei der Bearbeitung kein richtiger Durchfluss der Läpppaste entsteht, kann die Prozesswärme nicht über die Läpppaste, wie beispielsweise bei einem Kühlschmierstoff beim Schleifen, abtransportiert werden. Die Wärme kann deshalb beim Läppen nur über Wärmeleitung in das Werkstück oder das formübertragende Werkzeug abgeführt werden. Das Trägermedium beeinflusst den Spanvorgang in Abhängigkeit der Viskosität. Ein zähes Trägermedium führt zu einem gedämpften und somit weicheren Schnitt, während ein dünnflüssiges Medium zu einem aggressiveren Eindringen der Körner führt. Das Trägermedium ist, nachdem es sich mit abgetragenen Werkstoffpartikeln angereichert hat, verbraucht.

Im Allgemeinen bestehen die zum Läppen eingesetzte Werkzeugkörper aus besonders feinkörnigen, perlitischen und lunkerfreien Gusswerkstoffen oder aus einer gehärteten Stahllegierung. Neben den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Werkstoffs des Werkzeugs, wird oft die Eindringtiefe der Läppkörner als relevante Größe beachtet. Dabei werden drei Härtebereiche unterschieden. Die weichen Werkzeugkörper haben eine Härte  $< 140$  HB, die mittelharten eine Härte zwischen 140 und 220 HB und die harten haben eine Härte  $> 220$  HB [76]. Die Härte bestimmt, wie die Bewegung der Körner abläuft. Bei den weichen Werkzeugkörpern kommt es häufig zu Verankerungen von Läppkörnern, was eine spanende Wirkung des Läppens begünstigt. Die geläppte Werkstückoberfläche besitzt bei einer Bearbeitung mit weichem Werkzeugkörper feine Riefen. Die entstehende Riefenstruktur hat eine Zusammensetzung wie beim Honen. Im Gegensatz hierzu führen die Läppkörner bei harten Werkzeugkörpern häufiger eine Abrollbewegung durch und es ist keine Richtungsstruktur zu erkennen. Die mittelharten Werkzeugkörper nutzen sich im Vergleich zu den harten schneller ab. Dadurch richten sich jedoch die mittelharten Werkzeugkörper besser ab, was für eine bessere Passgenauigkeit der Werkzeugform zum Werkstück führt.

## **2.2 Allgemeine tribologische Zusammenhänge**

### **2.2.1 Tribotechnisches System**

Reibung und Verschleiß, wie sie im Verbrennungsmotor auftreten, sind keine geometrie- oder stoffspezifischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Rauheit einer Bauteiloberfläche. Es handelt sich dabei um Eigenschaften, welche durch beteiligte Elemente in einem System auftreten. Dieses System wird tribotechnisches System genannt. Es gilt, dass wenn bereits ein

Element des Systems verändert wird, das Verhalten des gesamten tribotechnischen Systems beeinflusst werden kann.

Ein tribotechnisches System kann in allgemeiner Form, wie in Bild 2.8 zu sehen, dargestellt werden. Die in diesem System beteiligten Bauteile und Stoffe sind alle Elemente, welche unmittelbar an Reibung und Verschleiß beteiligt sind. Die Beschreibung des Systems erfolgt um diese Elemente durch eine Systemgrenze. Innerhalb der Systemgrenze ist die Grundstruktur des Tribosystems, welche aus vier Elementen besteht. Dem Grundkörper, dem Gegenkörper des Reibkontakts und dem dazwischen befindlichen Zwischenstoff sowie das Umgebungsmedium. Der Zwischenstoff ist nicht Bestandteil jedes tribotechnischen Systems. Auch das Umgebungsmedium des Tribosystems kann im Vakuum fehlen. Auf den Gegenkörper wird eine Normalkraft  $F_N$  aufgebracht. Durch die Relativbewegung entsteht zwischen dem Grundkörper und dem Gegenkörper die Reibkraft  $F_R$ . Die Reibkraft wirkt immer der Bewegungsrichtung entgegen.

Die Tribosysteme sind durch ihre Funktion gekennzeichnet. Ihre Funktion und Hauptaufgabe ist die Umsetzung einer Eingangsgröße in eine Ausgangsgröße. Dabei wird mechanische Energie über Wirkflächen umgewandelt. Zu den Eingangsgrößen gehören Bewegungen, Belastungen, Geschwindigkeiten und Temperaturen, welche über eine Beanspruchungsdauer wirken. Die Ausgangsgrößen des Systems sind die technisch nutzbaren Größen wie Kraft, Drehmoment, Stoffgrößen, Drehzahl, Bewegungen, Signalgrößen oder mechanische Energie.

Die Ausgangsgrößen, beziehungsweise das Systemverhalten, werden nicht alleine durch die Eingangsgrößen bestimmt. Der Umwandlungsprozess der Eingangs- in die Ausgangsgröße kann durch zusätzliche Störgrößen, wie zum Beispiel Vibrationen, beeinflusst werden und ist mit Verlustgrößen behaftet. Die Verlustgrößen des Tribosystems werden mit der Reibung und dem Verschleiß beschrieben. Die Verlustenergie bei der Reibung geht dabei in Wärme und in Materialveränderungen über. Der Materialabtrag wird als Verschleiß bezeichnet [25].

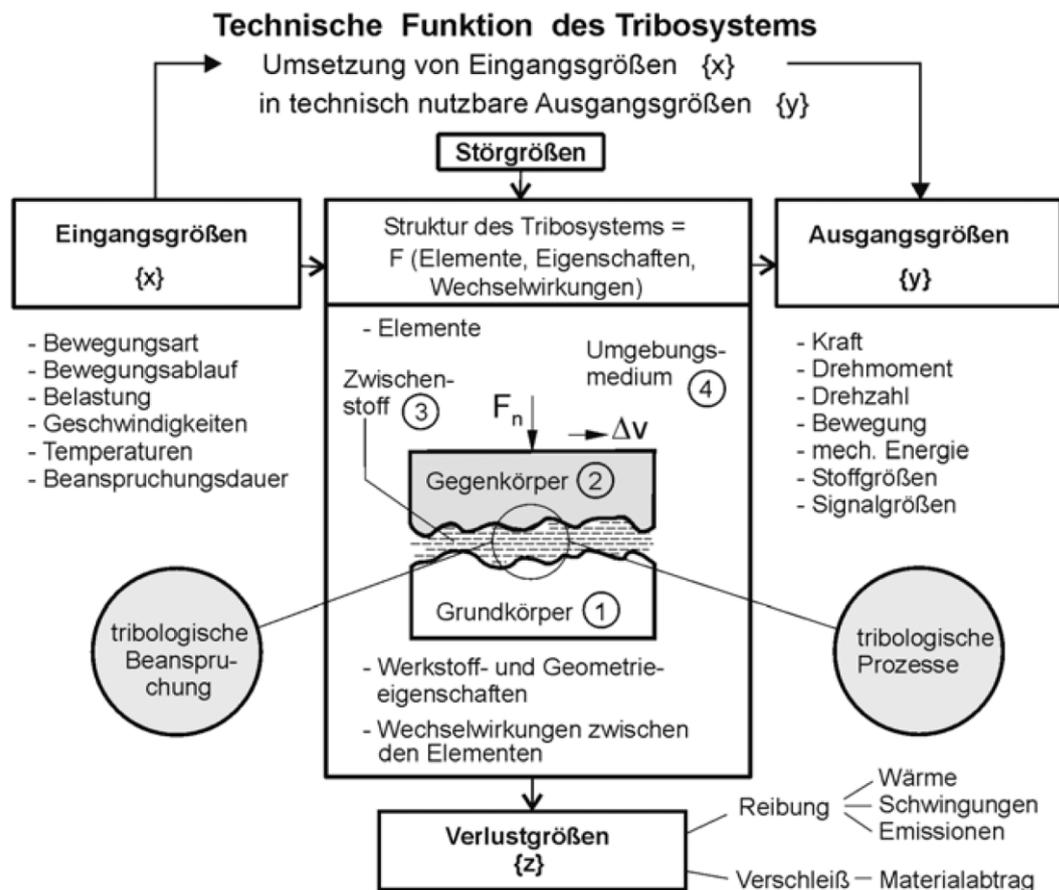


Bild 2.8: Schematische Darstellung des Tribotechnischen Systems mit den allgemein dargestellten Systemfunktionen [25].

## 2.2.2 Modelle in der Tribologie

Modelle der Tribologie wurden bereits von Leonardo da Vinci aufgestellt. Zweihundert Jahre später wurde das Reibgesetz von Amontons [4] und daraufhin von Coulomb [23] wiederentdeckt und ausgearbeitet. Hieraus stammt die Beziehung zwischen der Belastung des Tribosystems und der Bewegung entgegengesetzten Reibkraft nach der gilt

$$F_R = \mu F_N. \quad 2-1$$

In diesem Zusammenhang wurde zunächst davon ausgegangen, dass die Größe der Kontaktfläche keinen Einfluss auf den sogenannten Reibwert  $\mu$  hat. Bis heute gibt es verschiedene Veröffentlichungen, die einen Reibwert  $\mu$ , aufgeteilt in einen Haft- und Gleitreibwert für eine Materialpaarung angeben. Dabei wird nicht berücksichtigt, wie groß die Kontaktfläche und wie die Beschaffenheit der Oberfläche ist. Es wird bei diesen Angaben der Eindruck vermittelt, dass die Reibung nach dem Amontonschen Gesetz nur von den Materialgrundeigenschaften der Kontaktpartner mit dem Reibwert  $\mu$  sowie der Belastung  $F_N$  abhängig ist. Die bei verschiedenen Literaturstellen angegebenen Reibwerte  $\mu$  für bestimmte Materialpaarungen sind jedoch teilweise sehr unterschiedlich. Eine Übersicht einiger Reibwerte von unterschied-

lichen Literaturstellen hat Blau in [14] aufgezeigt. Deshalb kann der Reibwert  $\mu$  nicht nur in Abhängigkeit der Materialpaarung angegeben werden.

In dieser Arbeit wird die Tribologie von geschmierten Reibkontakten betrachtet. Anhand experimenteller Untersuchungen von Gleitlagern hat Petrow in [59] die wichtigsten Zusammenhänge der hydrodynamischen Schmierung formuliert. Daraufhin hat Reynold in [65] seine Theorie der hydrodynamischen Schmierung veröffentlicht. Die dabei entstandene „Reynoldsche Gleichung“ ist auch heute noch die Grundlage für die Berechnung von hydrodynamisch geschmierten Systemen. Daraus ergibt sich für die Größenordnung des Reibwertes

$$\mu \approx \frac{s_R}{h_S} \quad 2-2$$

wobei  $s_R$  die Länge des tribologischen Kontaktes und  $h_S$  die Schmierfilmdicke beschreibt. Diese Gesetzmäßigkeit gilt jedoch nur solange, bis die Oberflächen so nahe aneinander kommen, dass die Dicke des Schmierfilms vergleichbar mit den Rauheiten der Festkörper wird. Befindet sich das System in diesem Bereich, spricht man von Mischreibung. Dieser Bereich wurde ausführlich von Stribeck untersucht [61].

Die bekannte Stribeck-Kurve zeigt die Reibung in Abhängigkeit von der Reibgeschwindigkeit  $v$  bei einer bestimmten Belastung durch die Normalkraft  $F_N$  und eines Schmierstoffs mit der Viskosität  $\eta$ , siehe Bild 2.9. Dabei gibt es neben der Mischreibung drei weitere wesentliche Bereiche der Stribeck-Kurve. Liegt keine Relativbewegung zwischen den Reibpartnern vor, herrscht zunächst noch Haftreibung. Wird die Haftreibungskraft überschritten, kommt es zur Grenzreibung. In diesem Bereich herrscht eine Bewegung zwischen Grund- und Gegenkörper, bei der jedoch die neu ausbildenden Kontaktstellen den Schmierstoff vollständig verdrängen und die Reibung nur im Kontakt der Festkörper stattfindet. Sobald einige Moleküle des Schmierstoffs sich zwischen den Rauheiten der Festkörper befinden, liegt der bereits beschriebene Mischreibungsbereich vor. Desto mehr Schmierstoff sich zwischen den beiden Reibpartnern befindet, desto geringer wird die Reibung bis zu dem Punkt, an dem beide Reibpartner vollständig durch den Schmierstoff voneinander getrennt sind. Wird dieser Zustand erreicht, spricht man vom Bereich der Flüssigkeitsreibung. In Abhängigkeit von der Viskosität der Flüssigkeit, steigt nun die Reibung mit der Geschwindigkeit im Bereich der Flüssigkeitsreibung stetig wieder an.

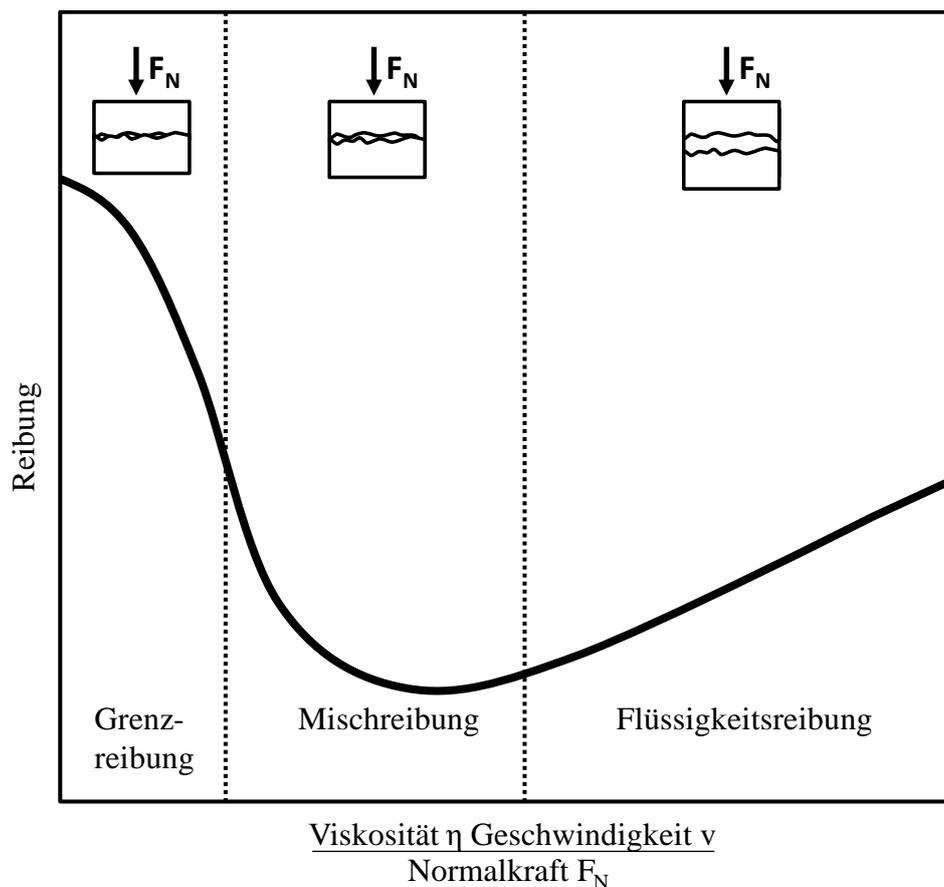


Bild 2.9: Schematische Darstellung der Stribeckkurve [41].

Die trockene Reibung wurde in [15] von Bowden und Tabor betrachtet. Sie hatten als erste die Rauheit der kontaktierenden Körper in Betracht gezogen. Die Rauheit der Kontaktpartner führt dazu, dass die Kontaktfläche zwischen den Reibpartnern für gewöhnlich um Größenordnungen kleiner als die geometrisch beschreibbare Kontaktfläche ist. Dabei wird diese Fläche, welche im Kontakt der Reibpartner vorliegt, als wahre beziehungsweise reale Kontaktfläche bezeichnet. Die beim Einlauf sich verändernde Bauteiltopographie kann mit Hilfe der von Abott und Firestone in [1] beschriebenen Materialanteilskurve beschrieben werden. Hiermit kann gut nachvollzogen werden, wie sich die tatsächliche Kontaktfläche verändert. Am Anfang berühren sich lediglich die höchsten Rauheitsspitzen der Kontaktflächen. Sobald sich die Oberflächen unter Last gegeneinander bewegen, werden die Rauheitsspitzen abgetragen und die tatsächliche Kontaktfläche wird größer. Der Materialabtrag ist zunächst groß, nimmt aber sobald die Kontaktfläche größer wird ab. Bowden und Tabor hatten in [15] die Idee aufgezeigt, welche die Reibung zwischen reinen metallischen Oberflächen durch Bildung und Scherung von Schweißbrücken erklärt. Die Gesamtfläche dieser Schweißbrücken stellt die reale Kontaktfläche  $A_{real}$  dar. Zum Scheren dieser Stellen ist die Tangentialspannung  $\tau$  erforderlich. Somit gilt für die Reibkraft  $F_R$  nach Bowden und Tabor

$$F_R = \tau A_{real} \quad 2-3$$

Popov [61] sieht die Arbeiten von Bowden und Tabor als Auslöser für eine Reihe von Theorien zur Kontaktmechanik von rauen Oberflächen. Er beschreibt, dass die Arbeiten von Ar-

chard [5] als Pionierarbeiten auf diesem Gebiet gelten. Dort kommt es zu der Aussage, dass auch im Kontakt von elastischen, rauen Oberflächen die Kontaktfläche ungefähr proportional zur Normalkraft ist. Zudem erwähnt Popov, dass die Arbeiten von Greenwood und Williamson [39], Bush [19] und Persson [57] zu der Aussage kommen, dass die wahre Kontaktfläche bei rauen Oberflächen im groben proportional zur Normalkraft ist, während die Bedingungen in einzelnen Mikrokontakten (Druck, Größe des Mikrokontaktes) nur schwach von der Belastung abhängen.

Seit den siebziger Jahren gibt es den Ansatz des dritten Körpers. Godet beschreibt diesen Ansatz in mehreren Veröffentlichungen. Der Ansatz des dritten Körpers streckt sich von der Hydrodynamik bis zur trockenen Reibung. Er ist sehr stark durch die Theorie der Flüssigkeitsreibung geprägt, da die Aufgabe des dritten Körpers ähnlich wie die der Flüssigkeit sind. Dies ist im Fall der trockenen Reibung am anschaulichsten erklärbar, da hier der dritte Körper die Aufgaben der Schmierung übernimmt. In den meisten Fällen besteht ein Kontakt zuerst aus zwei Körpern. Bewegen sich diese Körper zueinander, kommt es zum Ablösen von Partikeln der Kontaktpartner, welche Rauheitstäler füllen und darüber hinaus eine Zwischenschicht, den sogenannten dritten Körper, bilden. Dadurch hat der dritte Körper eine andere Materialzusammensetzung als das Grundmaterial der Kontaktkörper. Sind die Rauheitstäler mit dem dritten Körper gefüllt und wird der dritte Körper weiter aufgebaut, kommt es zur Trennung der Kontaktkörper. In diesem Fall gleicht der dritte Körper die Geschwindigkeitsunterschiede der beiden Kontaktkörper aus und übernimmt die Aufgabe der Lastübertragung. Dabei unterliegt der dritte Körper Fließbewegungen, bei denen sich dessen Bestandteile in ihrer Größe und Morphologie als auch in ihrer Zusammensetzung und somit ihrer mechanischen Eigenschaften ändern. Die anfängliche Bezeichnung des dritten Körpers als Übertragungsschicht ist demnach nicht gerechtfertigt. Eine Übertragungsschicht stellt nämlich lediglich eine reine Schutzschicht eines Grundkörpers dar und der dritte Körper ist im kinematischen Sinne am Reibprozess beteiligt, in dem er die Bewegungen der Kontaktpartner zueinander ausgleicht. Eine weitere verbreitete Annahme, dass Verschleißpartikel im Kontakt zu mehr Verschleiß führen, gilt nicht für trockene Reibung [6]. Vielmehr passen sich lose Partikel zwischen den Grundkörpern den Bewegungen an und sind so im Vergleich zu festen Rauheitsspitzen an den Grundkörper keine Verursacher von mehr Verschleiß [35] [36].

Die Bildung des dritten Körpers erfolgt zu Beginn des tribologischen Kontakts im Einlauf. Die Oberfläche wird durch elastische und für gewöhnlich auch irreversible, plastische Verformungen beansprucht. Während dieses Prozesses kann sich die Gitteranordnung verändern. So werden die Substruktur und die mechanischen Eigenschaften im oberflächennahen Werkstoffbereich verändert.

Die Einlaufdauer bei der sich der dritte Körper bildet, ist mit den bisherigen Modellen der Tribologie nicht abschätzbar. Ursprünglich wurde angenommen, dass wenn die Veränderung der Reibung sich nicht mehr signifikant ändert, auch die Verschleißrate einen konstant bleibenden geringen Wert annimmt. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass der Einlauf für die Reibung nicht direkt mit dem Einlauf des Verschleißes gekoppelt ist.

Aus den genannten Gründen ist der Bedarf entstanden, das tribologische System mit einer grundlegend anderen Betrachtungsweise zu beschreiben. Hieraus entstand die energetische Betrachtungsweise. Die eingebrachte Energie in einem tribologischen System bewirkt die Erzeugung von Wärme, von Verschleiß und von Materialumwandlungen. In Abhängigkeit der

Verteilung der Energie in diese drei Formen, ändern sich die Vorgänge im Tribokontakt und somit auch das Einlaufverhalten bezüglich Reibung und Verschleiß [13].

Die eingebrachte Energie  $\dot{E}_{ein}$  im Reibkontakt kann durch das Produkt aus Normalkraft  $F_N$ , Reibgeschwindigkeit  $v$  sowie des Reibungskoeffizienten  $\mu$  beschrieben werden. Die beiden ersten Parameter können als vorgegebene Eingangsgrößen angesehen werden. Der Reibungskoeffizient dagegen stellt sich in Abhängigkeit des Systemverhaltens ein. Zudem ist die eingebrachte Energie eine Funktion der Zeit. Deshalb ist es notwendig, die oben erwähnte Unterteilung der Energie in Wärme  $\dot{E}_W$ , Verschleiß  $\dot{E}_V$  und zur Materialumwandlung  $\dot{E}_M$  als zeitabhängige Energieflüsse darzustellen. Somit ergibt sich die eingebrachte Energie zu

$$\dot{E}_{ein} = F_N v \mu = \dot{E}_W + \dot{E}_V + \dot{E}_M. \quad 2-4$$

Diese Terme lassen sich durch Messungen und Angaben aus der Literatur bestimmen.

Die Bauteilerwärmung kann mit einer Temperaturmessung nah am tribologischen Kontakt erfolgen. Der Energiefluss zur Bauteilerwärmung  $\dot{E}_W$  wird durch die Temperaturmessung und dem Fourierschen Gesetz der Wärmeleitung berechnet.

Die energetische Betrachtung des Verschleißes wurde von Fleischer [32] entwickelt. Die Energie, welche dem Verschleiß zugeschrieben werden kann, ist stark von der Größe der erzeugten Verschleißpartikel abhängig. Das Produkt aus der Energiedichte für den Verschleiß mit der Verschleißrate ergibt den Energieanteil für den Verschleiß  $\dot{E}_V$ . Die Energiedichte für den Verschleiß ist unbekannt. Eine Abschätzung dieses Wertes erfolgt mit der Verwendung der Sublimationsenergiedichte als höchster Wert und der Trenn- oder Bruchenergiedichte als unterster Wert. Das Erreichen der Sublimationsenergiedichte bedeutet das Trennen aller Atome im Gitter. Die niedrigere Trenn- oder Bruchenergiedichte wird bei einer Trennung einzelner Schichten erreicht. Die Verschleißrate liegt bei geschmierten Reibkontakten, wie sie in Verbrennungsmotoren vorkommen, in der Größenordnung von Nanometer pro Stunde.

Mit den verfügbaren Energieflüssen ist die verbrauchte Energie zur Materialumwandlung  $\dot{E}_M$  aus der Gleichung für  $\dot{E}_{ein}$  bestimmbar [20].

In [20] wurde beschrieben, dass die größte Reibungsreduzierung im Einlauf eines Tribosystems mit dem größtmöglichen Energieeintrag zur Materialumwandlung stattfindet. Dieses Ergebnis wird durch die initiierten chemischen und mechanischen Veränderungen im oberflächennahen Werkstoffbereich bei der Materialumwandlung begründet. Der höchste Energieeintrag zur Materialumwandlung erfordert einen hohen Gesamtenergieeintrag. Ist dieser jedoch zu groß, resultiert ein geringerer Energieanteil zur Materialumwandlung.

Der Ansatz des dritten Körpers und dessen ganzheitliche Betrachtungsweise mit der durch 2-4 angegebenen Energiebilanz ist ursprünglich zur Beschreibung der tribologischen Vorgänge im Betrieb aufgestellt worden. In dieser Arbeit werden die Vorgänge jedoch auf die Abläufe bei der Endbearbeitung transferiert, wie im nachfolgenden Kapitel erläutert.

## 2.3 Tribologie und Endbearbeitung

In den beiden vorhergehenden Kapiteln sind die Zerspanung und die Tribologie getrennt voneinander beschrieben. Im Gegensatz dazu werden in diesem Kapitel die Zusammenhänge beider Aspekte beleuchtet. Als erstes werden die tribologischen Vorgänge, welche bei der Zerspanung auftreten, dargestellt. Danach folgt die Betrachtung der durch die Endbearbeitung gefertigten Produkte. Dabei werden auch Endbearbeitungsuntersuchungen beziehungsweise -verfahren aufgeführt, welche optimierte Bauteileigenschaften für niedrige Reibwerte und geringen Verschleiß erzeugen.

Grundsätzlich kann die Endbearbeitung mit Vorgängen eines tribotechnischen Systems betrachtet werden. Bei der Zerspanung ist das Werkzeug der Grundkörper, welcher eine Relativbewegung zum Werkstück, dem Gegenkörper, ausführt. Gegebenenfalls befindet sich zwischen Werkzeug und Werkstück eine Schneidflüssigkeit, dem Zwischenstoff und um das System gibt es den Einfluss aus der Atmosphäre. Durch die mechanische, thermische und chemische Beanspruchung zwischen beiden Kontaktpartnern kommt es zu Reibung und Verschleiß. Am anschaulichsten ist der tribologische Zerspanungsprozess an einer Schneide beschreibbar. Diese verformt das Werkstückmaterial bis es zum Abscheren eines Spans kommt. Der entstandene Span wird über die Spanfläche der Werkzeugschneide abgeführt. Dabei kommt es zwischen Span und Spanfläche zu Reibung. Aufgrund der Reibung entstehen Werkzeugverschleiß und Änderungen in der Topographie sowie des oberflächennahen Werkstoffbereichs. In [78] werden bei den Vorgängen der Zerspanung hauptsächlich Ausbildungen von Eigenspannungen, Ver- und Entfestigen des Werkstoffs, Phasenumwandlungen, die Aufnahme und Abgabe chemischer Elemente sowie Schädigungen durch Rissbildung angegeben.

Wie bei der ganzheitlichen energetischen Betrachtungsweise von tribologischen Systemen, wie sie mit der Energiebilanz 2-4 in Kapitel 2.2.2 beschrieben wird, kann auch der Zerspanprozess mit der energetischen Betrachtungsweise beschrieben werden. Dabei fließt, wie bei der tribologischen Belastung, die aufgebrachte Energie in die Bauteilerwärmung, in den Materialabtrag (Verschleiß) und in die Materialumwandlung, ein. Der Anteil für die Bauteilerwärmung hängt bei der Endbearbeitung sehr stark vom Bearbeitungsprozess, dem eingesetzten Werkzeug, den Prozessparametern sowie vom Kühlschmierstoff ab und lässt sich demnach nicht allgemein mit dem Anteil in der Tribologie vergleichen. Der Energieanteil für den Materialabtrag ist mit dem Energieanteil des Verschleißes bei der tribologischen Betrachtungsweise gegenüberzustellen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass bei der Endbearbeitung ein im Vergleich zur tribologischen Belastung größerer Energieanteil durch den Materialabtrag umgesetzt wird. Diese Annahme kann dadurch begründet werden, dass bei einem Endbearbeitungsprozess der Materialabtrag in einer Größenordnung mit Nanometer pro Sekunde angegeben werden kann und im Gegensatz dazu bei einem geschmierten Tribosystem im Verbrennungsmotor der Verschleiß mit wenigen Nanometern pro Stunde erfolgt. Der für die Bildung des dritten Körpers verantwortliche Energieanteil zur Materialumwandlung ist im tribologischen Kontakt sowie bei der Endbearbeitung vorhanden und ergibt sich bei beiden Betrachtungsweisen aus der Differenz zur eingebrachten Gesamtenergie.

Die Zielstellungen bei der Weiterentwicklung von Zerspanprozessen sind jedoch für gewöhnlich anders als zum Beispiel bei der Verbesserung einer gleitgelagerten Welle. Die Zerspanung hat das Ziel, große Zerspanvolumen zu erreichen und bei der Endbearbeitung hohe

Oberflächengüten darzustellen. Da die Zerspanung des Werkstücks auch zum Verschleiß des Werkzeugs führt, ist es aus fertigungstechnischer Sicht wichtig, diesen tribologischen Aspekt zu betrachten. Werkzeugverschleiß führt zu einer veränderten Schneidengeometrie, wodurch die geforderte Oberflächengüte und Maßhaltigkeit des Werkstückes abnimmt. Ist der Verschleiß hoch, kommt es zu kurzen Werkzeugstandzeiten. Es werden Abrasion, Adhäsion, Oberflächenzerrüttung und Tribooxidation als Verschleißursachen in der Literatur genannt. Diese Mechanismen sind vom Werkstoff und von den eingestellten Bearbeitungsparametern, wie der Schnittgeschwindigkeit, der Vorschubgeschwindigkeit, den Spankräften sowie der sich einstellenden Schnitttemperatur abhängig [45].

Batchelor und Stachowiak unterteilen in [8] die grundlegenden, tribologischen Mechanismen bei der Materialbearbeitung in die der Reibung und des Verschleißes. Zu den Mechanismen der Reibung zählen drei Punkte. Als erster Mechanismus für die Ursache von Reibung werden elastische und plastische Deformationsvorgänge beschrieben. Diese werden durch Rauheitsspitzen oder durch Verschleißpartikel des härteren Kontaktpartners initiiert. Ein weiterer Reibungsmechanismus ist die Adhäsion. Die Adhäsionskräfte spielen in vielen technischen Anwendungen eine große Rolle und sind bei vielen Anwendungen, wie zum Beispiel beim Kleben, erwünscht. Dieser Effekt tritt hauptsächlich bei Oberflächen von Kontaktpartnern auf, bei denen Verunreinigungen oder Oxidschichten abgetragen sind. Ein gutes Beispiel für Adhäsion in der Zerspanung ist das Anhaften von Werkstückmaterial an der Werkzeugschneide. Der dritte Mechanismus ist die viskose Reibung eines Mediums zwischen den angrenzenden Reibpartnern. Dieser Mechanismus wird für gewöhnlich bei ausreichender Menge an Schmiermittel zwischen den Kontaktpartnern beobachtet. Dabei kann durch die viskose Reibung in einem sich konvergierenden Schmierpalt der Bereich der Hydrodynamik erreicht werden. Bei reiner Hydrodynamik ist für den gesamten Reibungswiderstand nur die Flüssigkeitsreibung vorhanden. Die Einteilung des Verschleißes erfolgt ebenso in drei Mechanismen. Dazu gehören der abrasive, der erosive sowie der Verschleiß aufgrund von Kavitation. Beim abrasiven Verschleiß wurde davon ausgegangen, dass harte Bestandteile des Werkstückwerkstoffes wie kleine Werkzeugschneiden wirken und dadurch ein abrasiver Materialabtrag am Werkzeug entsteht. Diese Modellvorstellung hat sich jedoch als ungenau erwiesen. Abrasiver Verschleiß kann durch Materialermüdung hervorgerufen werden. Dabei wird die Oberfläche des Werkzeugwerkstoffes von harten Werkstoffbestandteilen des Werkstückes immer wieder deformiert, bis das Material ermüdet und verschleißt. Es kommt auch vor, dass ganze Körner des Werkzeugwerkstoffes durch harte Bestandteile des Werkstücks herausgerissen werden. Dies geschieht, wenn der Zusammenhalt zwischen den Werkstoffkörnern zu schwach ist. Erosion ist ein weiterer Verschleißmechanismus, welcher durch das Aufprallen von festen oder flüssigen Partikeln hervorgerufen wird. Dabei unterscheidet man zwischen abrasiver Erosion und Erosion durch Ermüdung. Bei der abrasiven Erosion schlagen harte Partikel in einem sehr flachen Winkel auf die Oberfläche auf und bewirken somit einen Materialabtrag. Bei der Ermüdung ist ein sehr großer Winkel zwischen der Flugbahn der Partikel und der Werkzeugoberfläche vorhanden. Dabei kommt es durch die immer wieder aufschlagenden Partikeln zur Materialermüdung und Verschleiß. Der dritte Verschleißmechanismus wird durch Kavitation beschrieben. Kavitation entsteht durch Zerplatzen von Blasen in einer Flüssigkeit. Das Zerplatzen bewirkt einen Unterdruck direkt an der Werkzeugoberfläche. Dabei kommt es zu Deformationen oder zum Herausbrechen von Werkstoffteilen aus dem Werkzeug. Neben den Beschreibungen der Mechanismen für die Reibung und des Verschleißes wird in [8] gezeigt,

wie diese Vorgänge besser beherrschbar sind. Dabei wird die Verbesserung der Reibung und des Verschleißes durch gezielte Oberflächenbeschichtungen, wie zum Beispiel PVD oder CVD, beschrieben. Aber auch Schmierstoffe mit Additiven sind vorteilhaft. Bei den Zerspanvorgängen mit Schmierstoff wird beschrieben, dass es dabei zu chemischen Reaktionen zwischen den Additiven und den Werkzeugwerkstoffen kommt und dadurch eine veränderte Oberflächenschicht gebildet wird, die andere tribologische Eigenschaften als das Grundmaterial des Werkzeugs besitzt.

Bei den meisten Tribountersuchungen wird die durch die Endbearbeitungen erzeugte Topographie für die Bewertung der Triboergebnisse zu Grunde gelegt. In [81] sind Stribeck-Kurven von Stahlwellen mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit bei sonst konstanten tribologischen Bedingungen abgebildet, diese zeigen, dass eine Oberfläche mit geringerer Rauheit im Grenz- und Mischreibungsbereich geringere Reibwerte erzielt. In der Hydrodynamik sind dagegen kaum Unterschiede festzustellen. Bis jetzt gibt es nur wenige Untersuchungen, welche den Einfluss der geometrischen Eigenschaften ausklammern und darauf abzielen, den Einfluss weiterer Bauteileigenschaften zu betrachten.

Ein Ansatz zur Bewertung des Zusammenhangs der durch die Endbearbeitung erzeugten oberflächennahen Werkstoffeigenschaften mit dem späteren Reibverhalten wurde durch Mach in [49] und Berlet in [12] vorgestellt. Es wird bei beiden Arbeiten die Vorwegnahme des Einlaufs durch die Bildung des dritten Körpers mit Endbearbeitungsverfahren nachgewiesen. Die betrachteten Endbearbeitungsverfahren sind Drehen, Honen, Schleifen und Rollieren. Es wurde auch gezeigt, wie sich die chemische Zusammensetzung des Kühlschmierstoffs auf das Bauteilverhalten im Tribokontakt auswirkt.

In der Arbeit von Mach wurden Graugussoberflächen trocken und mit verschiedenen Kühlschmierstoffen sowie Motoröl feingedreht. Im Vergleich zur Trockenbearbeitung wird bei der Verwendung von Kühlschmierstoff ein deutlicher Unterschied bezüglich des Triboverhaltens im Betrieb festgestellt. Grundsätzlich haben die Ergebnisse gezeigt, dass die Trockenbearbeitung zu den größten Reib- und Verschleißwerten führt. Die Erhöhung der Schwefelkonzentration sowie die Verwendung eines reaktiven Phosphoradditives im Kühlschmierstoff bewirken beim untersuchten Feindreihen eine Reduzierung der Reibung und des Verschleißes. Beim Vergleich der Endbearbeitungsverfahren Honen, Schleifen und Rollieren wurden geringe Unterschiede im Reib- und Verschleißverhalten diagnostiziert. Schleifen zeigt bei geringen Pressungen von 15 und 30 MPa im Vergleich zum Honen und Rollieren eindeutig die größeren Reibwerte. Bei höheren Pressungen (45, 60 und 75 MPa) sind die ermittelten Reibwerte beim Honen gleich hoch und teilweise höher als beim Schleifen.

Berlet hat in seiner Arbeit untersucht, wie sich das Verhältnis von Tangential- zur Kontaktkraftkomponente beim Schleifen von Stahl in Abhängigkeit von Phosphor beziehungsweise von Schwefel im Kühlschmierstoff und der Kontaktzeit verändert und wie sich diese Varianten auf das Reibverhalten im Tribokontakt auswirken. Das Verhältnis von Tangential- zur Kontaktkraftkomponente wird von Berlet als Schleifkraftverhältnis definiert. Anhand seiner Versuchsergebnisse konnte er feststellen, dass Schwefel im Kühlschmierstoff und die Erhöhung der Kontaktzeit ein erhöhtes Schleifkraftverhältnis sowie einen größeren Reibwert bewirkt. Der Zusatz von Phosphor im Kühlschmierstoff dagegen führt zu einem geringeren Schleifkraftverhältnis und zu einem kleineren Reibwert. Diese Zusammenhänge sind in Bild 2.10 gezeigt.

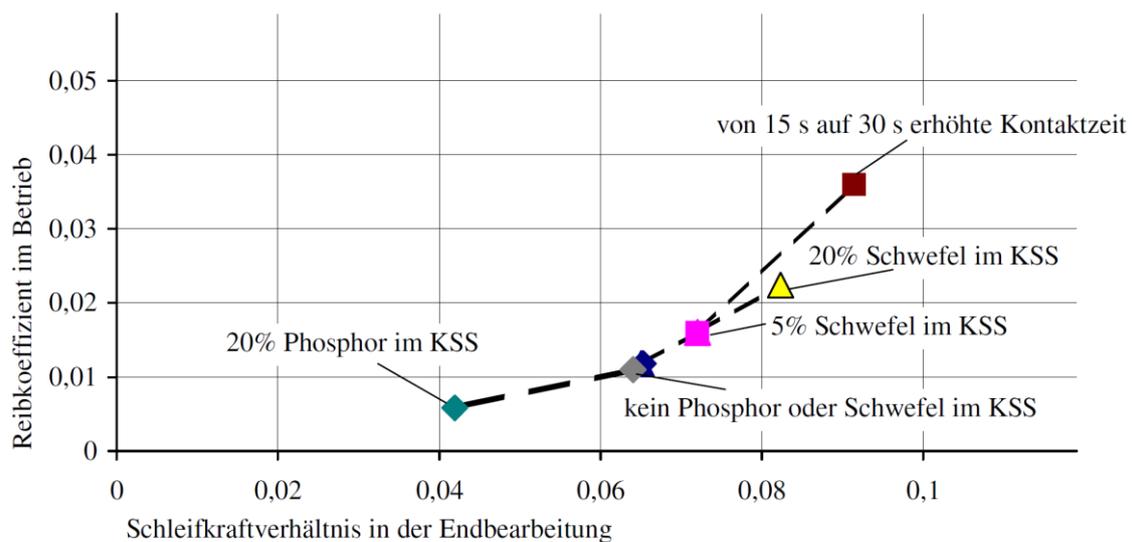


Bild 2.10: Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Tangential- zur Kontaktkraftkomponente bei der Endbearbeitung und dem Reibwert im Tribokontakt in Abhängigkeit der Variation des Kühlschmierstoffs mit Schwefel und Phosphor sowie der Kontaktzeit [12].

Zu den gezeigten Variationen des Kühlschmierstoffs und der Veränderung der Kontaktzeit, hat Berlet die Auswirkungen einer veränderten Kontaktkraft beim Schleifen aufgezeigt. Die Erhöhung der Kontaktkraft führt dabei zu einer vernachlässigbaren, kleinen Auswirkung auf das Schleifkraftverhältnis. Sie führt jedoch zu einem deutlichen Anstieg der Tangentialkraft. Die chemische Zusammensetzung der ersten 10 nm von der Oberfläche unterscheidet sich dabei weder durch die Elementzusammensetzung, noch in der Tiefe des Eintrags von chemischen Elementen in den Grundwerkstoff. Die Erhöhung der Kontaktkraft von 600, 1000 und 1400 N führt bei den durchgeführten Tribometerversuchen zu einem höheren Reibwert und zu sehr hohen Verschleißgeschwindigkeiten. Es wird bei Berlet davon ausgegangen, dass es ein Fertigungsoptimum für die Verschleißgeschwindigkeit gibt, welches von der Leistungsdichte bei der Endbearbeitung abhängig ist. Die Leistungsdichte wird dabei aus dem Quotient von Schnittleistung zum beanspruchten Volumen deklariert. Zur Bestätigung dieser Annahme gilt es Untersuchungen durchzuführen, welche zeigen, dass eine Erhöhung des Verschleißes durch eine zu geringe Kontaktkraft bei der Fertigung vorliegt. Dabei gilt es außerdem aufzuzeigen, welche Eigenschaften in Abhängigkeit der Kontaktkraftvariation im oberflächennahen Werkstoffbereich für das veränderte Reib- und Verschleißverhalten verantwortlich sind.

Ein besonderes Endbearbeitungsverfahren, bei dem eine sogenannte „Tribokonditionierung“ der Werkstückoberflächen bei der Bearbeitung gezielt erreicht werden soll, stellt beispielsweise auch das Verfahren der Firma „Applied Nano Surfaces - ANS“ dar. Es handelt sich dabei um eine Art Rollierprozess, welcher eine Triboreaktion initiiert, bei dem *in situ* die Rauheitstäler mit Wolframdisulfid aufgefüllt werden. Der Rollierprozess reduziert die Rauigkeit, indiziert Oberflächenspannungen und durch die Triboreaktion mit dem Werkzeug und einer speziellen Bearbeitungsflüssigkeit entsteht eine Beschichtung, welche reibungs- und verschleißminimierend wirkt [84].

Ein weiteres Endbearbeitungsverfahren, welches auf die mechanische und chemische Beeinflussung der Werkstückoberfläche zum Erreichen einer Reibungs- und Verschleißreduzierung abzielt, ist der Polymerlappprozess der Firma Fricso. Es handelt sich bei den Überlegungen der Firma Fricso um einen Polymerlappprozess, welcher in dieser Arbeit, wie in Kapitel 1.3 angeführt, näher untersucht wird. Ein spezieller Werkzeugwerkstoff mit Polymeranteilen verspricht bei diesem Lappprozess, neben einer optimierten Werkstücktopographie, eine an der Bauteiloberfläche chemisch gebundene, organische Nanoschicht zu erreichen. An der Oberfläche ist dadurch eine bessere Adhäsion und Affinität zum Motoröl zu erwarten. Optional empfiehlt die Firma Fricso vor dem Polymerlappen eine Strukturierung der Oberfläche durchzuführen, um Vertiefungen für einen Ölrückhalt zu bekommen. Diese Vertiefungen sollen bei Mangelbeölung die Gleitlagerung mit Schmierstoff versorgen. Durch die Bearbeitung einer Nockenwellenlagerung mit Struktur und anschließendem Polymerlappen, wird eine Reduktion der Reibverluste von bis zu 26 % angegeben [10].

## 2.4 Gleitlager

Gleitlager dienen der Lagerung von Wellen. Dabei haben sie die Aufgabe, die zueinander beweglichen Teile abzustützen oder zu führen. Außerdem müssen sie die dabei auftretenden Kräfte aufnehmen und übertragen. Gleitlager laufen sehr geräuscharm, benötigen einen geringeren Bauraum und sind kostengünstiger als Wälzlager. Sie eignen sich sehr gut für die Aufnahme hoher Belastungen bei verhältnismäßig langsamen Drehbewegungen. Der Einsatz von Gleitlager ist bei hohen und tiefen Temperaturen möglich. Die genannten Eigenschaften führen dazu, dass das Gleitlager in fast allen Industriebereichen eingesetzt wird.

### 2.4.1 Aufbau

Ein Gleitlager besteht aus einem festen und einem beweglichen Teil. Der feste Teil ist meist die Bohrung, in der die gelagerte Welle läuft. Dabei kann die Gleitfläche des festen Teils eine Lagerschale / Lagerbuchse oder Bestandteil des Gehäuses sein. Die Welle, welche gelagert wird, stellt den beweglichen Teil dar und führt die Rotationsbewegung aus.

Das Gleitlager besteht meist aus einem weicheren Werkstoff als die Welle. Als Wellenwerkstoff wird im Allgemeinen ein Stahl oder ein Kugelgraphitgrauguss eingesetzt. Die Lagerschalen werden dabei aus einem metallischen Gleitlagerwerkstoff, aber auch aus nichtmetallischen Werkstoffen hergestellt. Zu den gebräuchlichsten metallischen Gleitlagerwerkstoffen gehören Blei-, Zinn-, Kupfer- und Aluminiumlegierungen. Bei nichtmetallischen Gleitlagern werden Gummi, Kunststoff und Keramik eingesetzt. Die Wahl des Gleitlagerwerkstoffes richtet sich nach den Aufgaben des Lagers bei Störungen nach DIN 50282. Der Gleitlagerwerkstoff muss eine Anpassungsfähigkeit haben, um die durch Fertigung, Montage und elastischen Verformungen bedingten Abweichungen der Sollform auszugleichen. Der dabei entstehende Verschleiß sowie Verformungen dürfen die Funktion des Lagers nicht beeinträchtigen. Der Verschleißwiderstand im Bereich von Misch- oder Grenzreibung sollte so groß wie möglich sein. Nur so kann das Gleitlager eine hohe Lebensdauer erreichen. Bei auftretenden Partikeln im Reibkontakt, ist eine Einbettfähigkeit im Gleitlager wünschenswert, damit Partikel nicht zum Ausfall der Gleitlagerfunktion führen. Bei der Wahl des Schmierstoffes und des Gleitla-

gerwerkstoffes ist außerdem darauf zu achten, dass es keine Korrosion gibt. Weiterhin ist eine gute Benetzung der Festkörperoberflächen mit dem Schmierstoff vorteilhaft, damit beim Anlaufen des Lagers schnell Schmierstoff in das Lager gelangt. Die Abschätzung der mechanischen Beanspruchung des Lagers erfolgt mithilfe der erwartenden Lagerkraft bezogen auf die mit Kraft beaufschlagte, projizierte Lagerfläche. Anhand dieser Abschätzung kann ein geeigneter Lagerwerkstoff ausgewählt werden.

Bei einem Vergleich des konstruktiven Aufbaus der Gleitlagerung zur Wälzlagerung ergeben sich folgende Punkte als Vorteil für die Gleitlagerung. Zum einen können die Gleitlager ungeteilt oder radial teilbar ausgeführt werden, was den Ein- und Ausbau stark vereinfacht. Zum anderen sind der Platzbedarf eines Gleitlagers sowie das Gewicht im Vergleich zu einem Wälzlager relativ gering. Weitere Vorteile sind die geringe Empfindlichkeit gegenüber Überlastung und Verschmutzung, gute Dämpfung von Belastungsstößen und Schwingungen, gute Notlaufeigenschaften, geräuscharm beim Betrieb, niedrige Herstellungskosten sowie eine lange Lebensdauer [25] [26].

Die in dieser Arbeit betrachtete Nockenwellenlagerung besteht aus vier hydrodynamischen Gleitlagern. Drei von den Lagern sind als Radialgleitlager und eines als Radial-Axial-Gleitlager ausgeführt. Somit liegt eine klassische Fest-Loslager-Anordnung vor. Die drei Radialgleitlager sind mit zwei Freiheitsgraden als Loslager eingesetzt. Ein Freiheitsgrad davon erlaubt die Rotation und der andere die Translation in Wellenachsrichtung. Das Radial-Axial-Gleitlager stellt das Festlager dar. Es hat nur einen Freiheitsgrad in Rotationsrichtung der Welle und bestimmt durch die axiale Lagerung, die Position der Welle. Die betrachtete Lageranordnung ist in Bild 2.11 schematisch dargestellt.

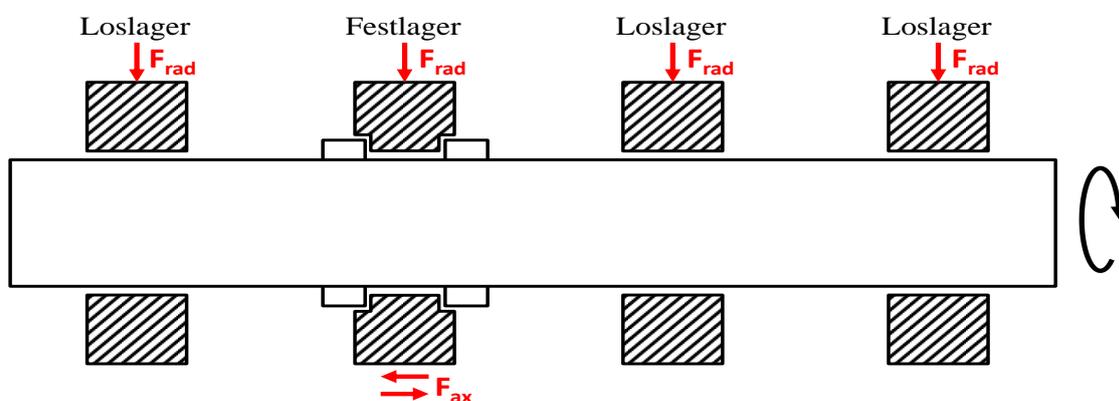


Bild 2.11: Fest-Loslager-Anordnung der Nockenwelle im Zylinderkopf.

## 2.4.2 Funktionsweise

Bei der Betrachtung der Funktionsweise der Gleitlager muss zunächst zwischen zwei Funktionsprinzipien unterschieden werden. Dem hydrostatischen und dem hydrodynamischen Prinzip. Beim hydrostatischen Prinzip wird eine externe Energiequelle (Pumpe) eingesetzt, um Schmiermittel zwischen die Festkörperoberflächen zu fördern. Dagegen erfolgt der Aufbau des Schmiermitteldrucks im Lager beim hydrodynamischen Prinzip selbsttätig, durch die Be-

wegung der Gleitpartner zueinander, wie bei der hier betrachteten Nockwellenlagerung. Das Lager wirkt beim Anfahren wie eine Pumpe, die das an den Oberflächen anhaftende Öl in einen sich konvergierenden Spalt fördert und dort einen hydrodynamischen Druck aufbaut. Das Integral der Druckverteilung über der beaufschlagten Fläche muss im Gleichgewicht mit der auf das Lager wirkenden Kraft stehen, siehe Bild 2.12. Ist dies der Fall, befindet sich das Radiallager in der Hydrodynamik und kann so mit geringer Reibung und geringem Verschleiß betrieben werden. Es ist offensichtlich, dass das hydrodynamische Prinzip von der Rotationsgeschwindigkeit der Welle und der Lagerbelastung abhängig ist. Daraus folgt, dass bei jedem Start des Lagers, vom Stillstand bis zur Betriebsdrehzahl, die verschiedenen Reibungszustände durchlaufen werden. Erst muss die Grenz- und Mischreibung überwunden werden, bevor die Festkörperoberflächen durch das Schmieröl getrennt werden und die Hydrodynamik erreicht wird. Es ergeben sich durch die Drehzahlabhängigkeit Funktionseigenschaften, wie ein hohes Anlaufreibmoment, der verschleißbehaftete Betrieb bei niedriger Drehzahl, die höhere Reibung sowie ein größerer Schmiermittelbedarf gegenüber Wälzlager [25] [26].

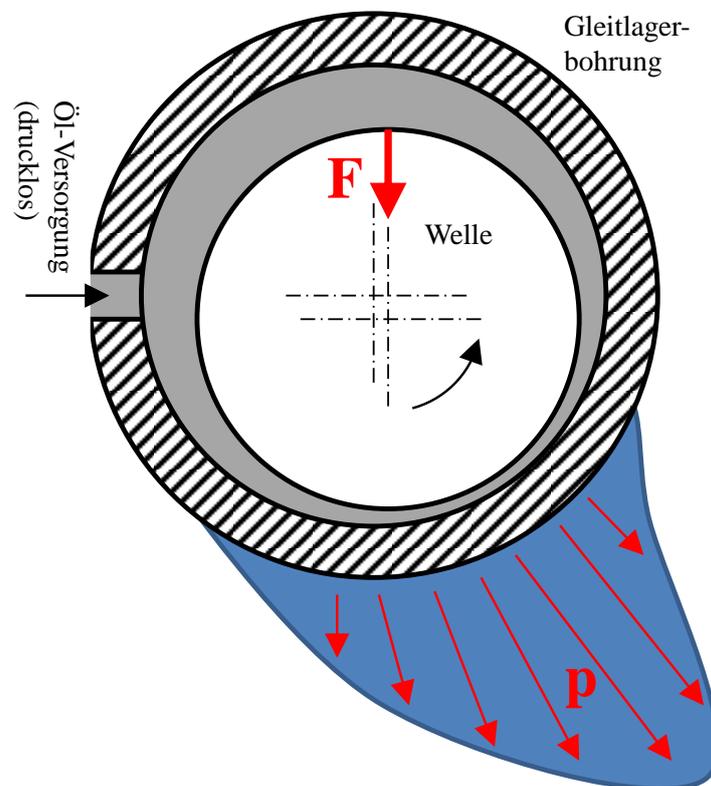


Bild 2.12: Funktionsweise hydrodynamisches Radialgleitlager.

### 2.4.3 Anwendungen im Verbrennungsmotor

Die Gleitlagerung ist die im Verbrennungsmotor dominierende Lagerart. Dies liegt an den bereits aufgezählten Vorteilen der Gleitlagerung gegenüber der Wälzlagerung. Eine Einteilung nach den wichtigsten Gesichtspunkten der Gleitlager ist in Bild 2.13 gegeben. Es wird dort immer nur der Hierarchiezeitpunkt weiterverfolgt, welcher für die Lagerung im Verbren-

nungsmotor relevant ist. Aufgrund der Übertragung von Momenten im Verbrennungsmotor werden Radialgleitlager eingesetzt, welche die Kräfte in Rotationsrichtung aufnehmen.

Im Verbrennungsmotor treten aufgrund der charakteristischen Gas- und Massenkräfte zeitlich veränderte Belastungen auf. Deshalb handelt es sich bei den im Verbrennungsmotor verwendeten Gleitlagern, wie aus der in Bild 2.13 ersichtlichen Einteilung, um dynamisch beanspruchte Gleitlager. Im Gegensatz zu statisch belasteten Gleitlagern, verändert sich die Lage der Welle in Abhängigkeit der Richtung und Größe der Lagerkraftvektoren.

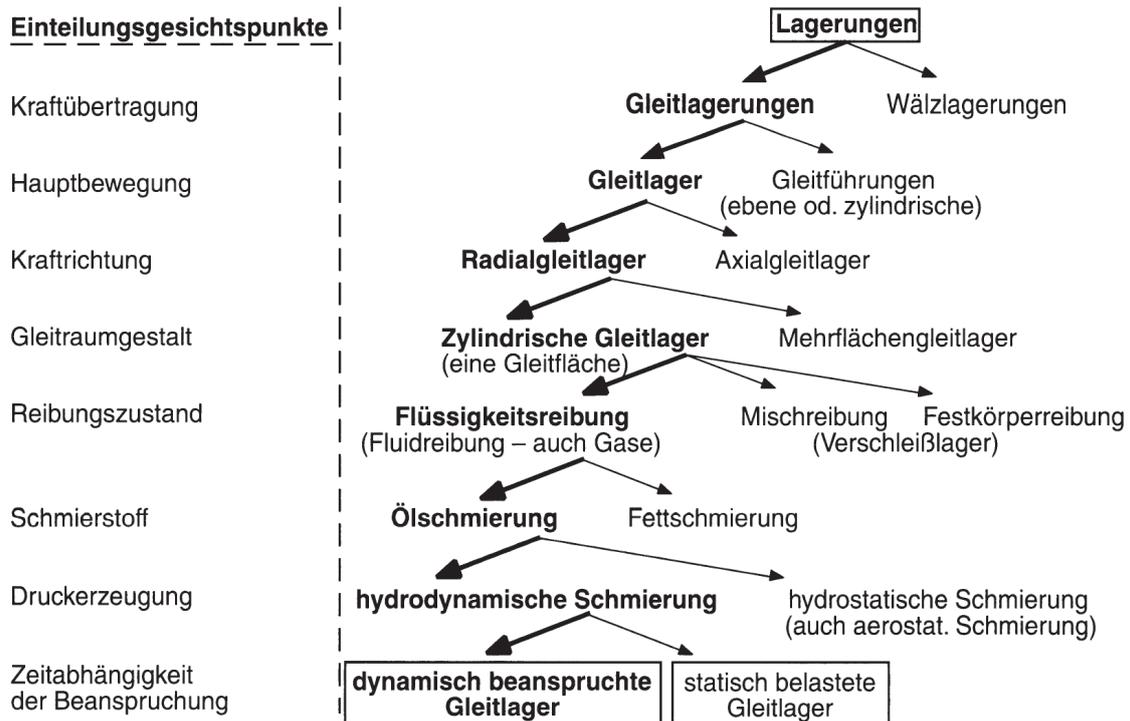


Bild 2.13: Einteilung der dominierenden Lagerart bei Verbrennungsmotoren [3].

In der Tabelle 2.1 sind beispielhaft die Lagerstellen in verschiedenen Verbrennungsmotoren aufgezeigt. Daraus wird ersichtlich, welche große Vielfalt und Anzahl an Lagern im Verbrennungsmotor eingesetzt werden und welche große Bedeutung die Betriebssicherheit der Gleitlager für die Funktion des Verbrennungsmotors hat [3].

Tabelle 2.1: Lagerstellen verschiedener Verbrennungsmotoren [3].

Lagerstelle	4-Zylinder- Reihenmotor (1,6 i CVH – Ford)	8-Zylinder- V-Motor (OM 442 – Mercedes-Benz)	12-Zylinder- V-Motor
Grundlager (einschl. Führungslager)	5+(1) <sup>a</sup>	5+(1) <sup>a</sup>	7
Pleuellager	4	8	12
Kolbenbolzen	(8) <sup>b</sup>	8	12
Nockenwelle	5+(1) <sup>a</sup>	5	7 oder 14
Kipphebel	8	16	(24 oder 36 oder 48) <sup>c</sup>
Nockenrolle	–	–	(24 oder 36 oder 48) <sup>c</sup>
Ölpumpe	1	–	4 oder 8
Zwischenrad	–	–	(2 oder 4) <sup>c</sup>
Gesamtzahl	23 bis 33	42 bis 43	66 bis 153

<sup>a</sup> Axiallager

<sup>b</sup> Kolbenbolzen im Pleuel fest

<sup>c</sup> Lager können konstruktionsbedingt entfallen

## 2.4.4 Ansätze zur Reibleistungsreduzierung

Es gibt zwei Hauptanforderungen an die Gleitlager. Die wichtigste davon ist die Sicherstellung der Lagerfunktion, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Der beim Betrieb auftretende Verschleiß sowie Ausfälle des Lagers müssen so lange wie möglich hinausgezögert werden, um möglichst keine vorzeitige Schädigung des Lagers in der vorhergesehenen Lebensdauer zu erhalten. Zu den Ausfällen von Gleitlagern gehören im Allgemeinen plastische Verformung, Schmelzen, Fressen, Ermüdung, Bruch und Oberflächenzerstörung. Bei der Gleitlagerung der Nockenwelle im Ventiltrieb sind diese Ausfälle jedoch in der Regel nicht zu erwarten. Ursachen für den Ausfall der Nockenwellengleitlagerung können am ehesten plastische Verformungen oder Fressen sein. Die zweite Anforderung, mit der sich die Arbeit hier schwerpunktmäßig befasst, verlangt einen möglichst geringen Reibungswiderstand. Die Erfüllung dieser Hauptanforderungen und somit das optimierte Funktionsverhalten des Gleitlagers, wird durch dessen Auslegung bestimmt.

Die konstruktive Lagerauslegung gibt beispielsweise das Funktionsprinzip sowie alle geometrischen Abmessungen vor. Wellendurchmesser, das Lagerspiel und die Lagerbreite sind dabei die entscheidendsten Größen für die Laufeigenschaften des Gleitlagers. Generell gibt es für die Konstruktion die in Bild 2.14 grundlegenden Zusammenhänge zwischen der Lagergeometrie und deren Auswirkung auf die Reibleistung  $P_R$ , welche so in der Hydrodynamik vorliegen. Daraus ist der Einfluss der Lagerbreite  $b$  sowie des Wellendurchmessers  $d$  ersichtlich. Eine Veränderung des Wellendurchmessers hat einen wesentlich stärkeren Einfluss als die Veränderung der Lagerbreite.

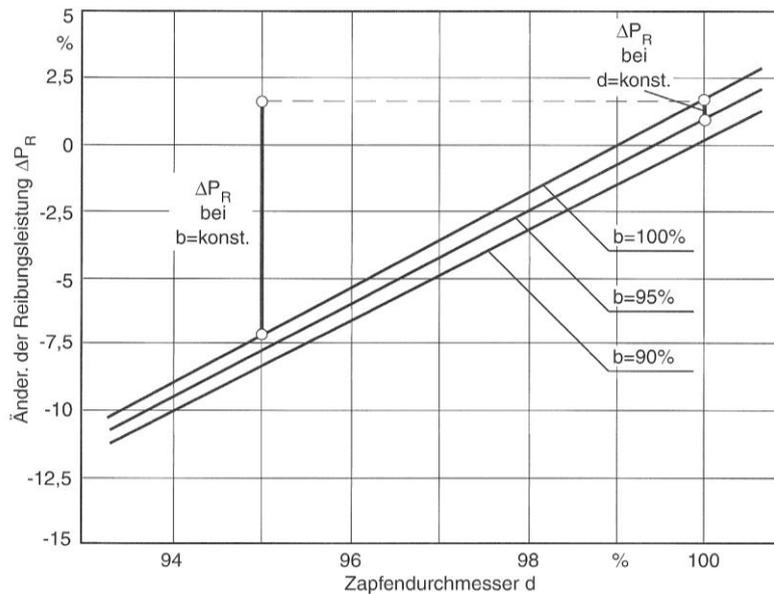


Bild 2.14: Einfluss des Wellendurchmessers  $d$  und der Lagerbreite  $b$  auf die Reibleistung  $P_R$  [3].

Der bei einem hydrodynamischen Radialgleitlager verwendete Schmierstoff ist ein weiterer wichtiger Faktor für die auftretende Reibung. Zu den wichtigsten Eigenschaften des Schmierstoffs hinsichtlich der sich einstellenden Lagerreibung gehören die Viskosität und die Additive. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass sich die Schmierstoffeigenschaften in Abhängigkeit der vorliegenden Motortemperatur verändert. Eine Gegenüberstellung der Aspekte Lagerbreite, Schmierstoffviskosität und Temperatur ist in Bild 2.15 zu sehen. Die Reibungsverluste für die niedrige Öltemperatur von  $40^\circ\text{C}$  sind in der angestrebten Hydrodynamik etwa doppelt so hoch im Vergleich zu der hohen Temperatur von  $100^\circ\text{C}$ . Es ist auch deutlich erkennbar, dass die Ölviskosität hier einen stärkeren Einfluss auf die Reibung hat, als die Lagerbreite. Daraus folgt der Ansatz für eine reduzierte Reibung in Gleitlagern durch die Verwendung möglichst niedrigviskosen Öls und eines etwas breiteren Lagers zum Erhalt der Lastkapazität des Lagers [63].

Die Werkstoffauswahl wird jedoch hauptsächlich nach den Gesichtspunkten der in Kapitel 2.4.1 aufgeführten Punkten zur Prävention von Lagerschäden oder einem Totalausfall durchgeführt und ist somit für die Optimierung hinsichtlich Reibung bislang noch nicht im Fokus. Aus diesem Grund stellt der Werkstoff momentan keinen Stellhebel zur Reibleistungsreduzierung der Gleitlagerung der Nockenwellen dar.

Generell sind die genannten Hauptgrößen der Gleitlager im Verbrennungsmotor für die Bestimmung der Reibung jedoch nur eingeschränkt variierbar. In einem Verbrennungsmotor ist der vorhandene Raum begrenzt. Ebenso ist der verwendete Schmierstoff nur eingeschränkt variierbar, da er an verschiedenen Stellen im Motor seinen Zweck erfüllen muss. Wird ein Schmierstoff mit niedriger Viskosität eingesetzt, ist dies für Gleitlagerstellen, welche sich hauptsächlich in der Hydrodynamik befinden, von Vorteil. Wenn diese Schmierstoffviskosität jedoch an anderen Lagerstellen im Verbrennungsmotor zu Fressern führt, ist der Einsatz eines Öls mit zu geringer Viskosität nicht zielführend. Zudem ist zu beachten, dass die Viskosität des Schmierstoffs temperaturabhängig ist. Der Verbrennungsmotor muss bei allen auftreten-

den Temperaturen funktionsfähig sein. Die Umgebung, aber auch die Betriebszustände bestimmen die vorhandene Temperatur, welche sich im Bereich von Minustemperaturen bis zu Temperaturen von über 130° C bewegen.

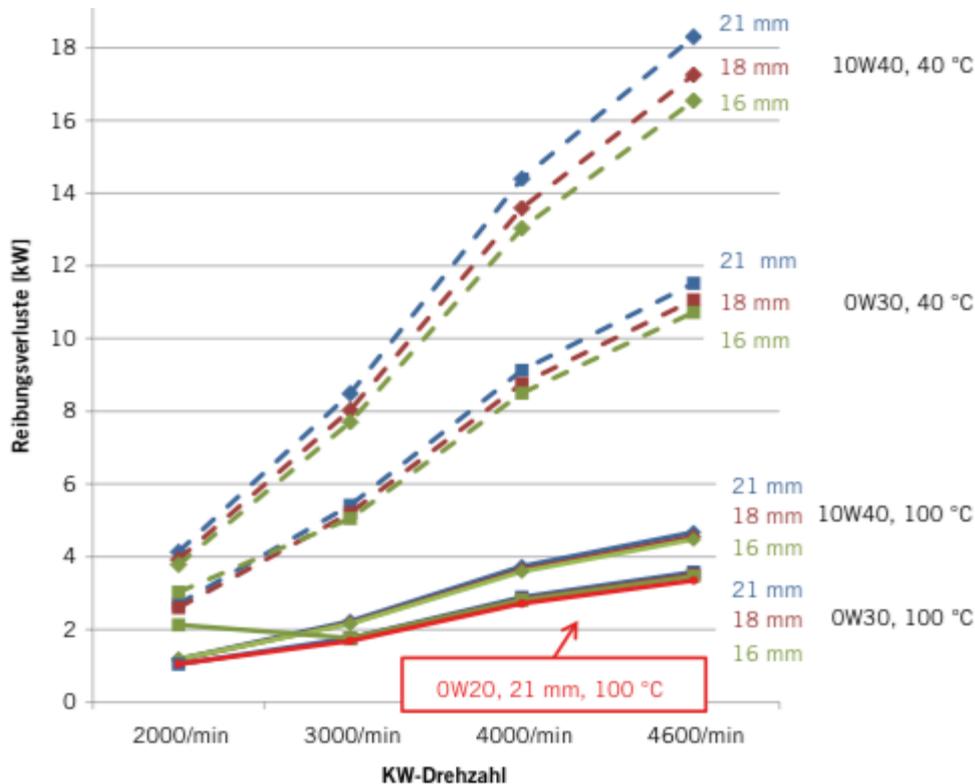


Bild 2.15: Reibungsverluste eines Kurbeltriebgleitlagers bei verschiedenen Drehzahlen, Schmiermittelklassen, Temperaturen sowie unterschiedliche Lagerbreiten [63].

Da die genannten, grundlegenden Zusammenhänge als Möglichkeit zur Reibleistungsoptimierung oftmals schon ausgereizt sind, verfolgt die Automobilindustrie weitere Ansätze zur Verringerung der Reibung in Gleitlagern. Überwiegend werden die Oberflächen der beteiligten Kontaktpartner zur Optimierung der Reibung modifiziert. Zu den Oberflächenmodifikationen gehören im Allgemeinen die Variation der Rauheit, Einbringen von Strukturen und Beschichtungen. Es werden grundsätzlich Topographien mit reduzierten Rauheitsspitzen angestrebt, welche über ausreichend große Täler oder eingebrachte Strukturen als Schmierstoffreservoir verfügen. In manchen Fällen werden auch Beschichtungen eingesetzt. Diese sind meist sehr harte Schichten, wie zum Beispiel DLC, welche einen Verschleißschutz bieten und bei Mangelschmierung Notlaufeigenschaften besitzen.

Die in Kapitel 2.3 beschriebenen Endbearbeitungsverfahren sowie das in dieser Arbeit untersuchte Polymerlappverfahren zur Modifikation der Eigenschaften des oberflächennahen Werkstoffbereiches, ist eine weitere Möglichkeit die Reibung der Radialgleitlager der Nockenwelle zu reduzieren. Die beschriebenen Modifikationen dieses oberflächennahen Werkstoffbereiches durch diese Verfahren, können jedoch nur einen Vorteil aufweisen, wenn die grundlegende konstruktive Auslegungen der Makro- und Mikrogeometrie sowie die Werkstoffanforderungen für die Gleitlagerung optimiert wurden.

## 3 Analytik

Die Analytik stellt Methoden zur Charakterisierung von technischen Bauteileigenschaften sowie der Beurteilung des Zusammenspiels mehrerer Bauteile dar. Bei den Untersuchungen dieser Arbeit werden die Eigenschaften von Bauteilen durch das Polymerlappen variiert und mit analytischen Methoden vor- und nachher charakterisiert. Die charakterisierten Bauteile werden daraufhin durch einen Modellversuch hinsichtlich Reibung und Verschleiß getestet und die dabei veränderten charakteristischen Bauteileigenschaften wieder analysiert. Damit die angewendeten Betrachtungsweisen den Erkenntnisbedarf erfüllen, werden Messgrößen bei den verwendeten Messmethoden ausgewählt, welche die entsprechenden Zielaussagen zur Bewertung der tribologischen Vorgänge bereitstellen. Hierzu gehören spezifisch definierte sowie genormte Messgrößen. In diesem Kapitel werden die verwendeten Messprinzipien und die damit erzeugten Messgrößen beschrieben.

### 3.1 Tribologisch relevante Bauteileigenschaften

Alle an der Reibung und dem Verschleiß beteiligten Körper und Stoffe sind für das tribologische Verhalten des Tribosystems von Bedeutung. Dazu gehören, wie bereits im Kapitel 2.2.1 erläutert, die beiden Reibpartner, der Zwischenstoff sowie das Umgebungsmedium. Da diese Arbeit den Einfluss der Endbearbeitung eines Reibpartners auf das tribologische Verhalten beleuchtet, ist es notwendig, die dafür relevanten Bauteileigenschaften der Reibpartner zu betrachten und den Zwischenstoff sowie die Umgebungsmedien als konstante Größen zu behandeln.

Die in Bild 3.1 gezeigten Bereiche zeigen die in dieser Arbeit betrachteten Einflüsse und die dadurch prägenden Bauteileigenschaften des untersuchten Tribosystems. Die Fertigung der Kontaktpartner gibt nach der Auswahl des Grundwerkstoffs die grundlegenden Bauteileigenschaften vor. Ausgehend von den Bauteilabmessungen im mm- $\mu$ m Bereich werden von der Konstruktion zum Beispiel Toleranzvorgaben definiert. In deren Umsetzung stellen sich bei der Fertigung bauteilspezifische Eigenschaften, wie Lagerspiel, Flächenpressung, Rauheit oder Härteveränderungen ein. Im darauffolgenden Größenbereich wird der Einfluss der Endbearbeitung sowie des Einlaufs im Tribokontakt aufgeführt. Bei beiden Vorgängen kommt es in Abhängigkeit der dabei vorliegenden Werkstoffbeanspruchungen zu Veränderungen der Oberflächen- und Volumenchemie, der Mikrorauheit, der Mikrohärtigkeit sowie zu Veränderungen der Werkstoffstruktur. Diese Veränderungen bilden den dritten Körper. Bei den ersten Nanometern unterhalb der Oberfläche entscheiden zudem die Additive, wie sie bei der Endbearbeitung und im Schmieröl eingesetzt sind, über die Zusammensetzung des sich bildenden dritten Körpers. Die Vorgänge zur Bildung des dritten Körpers werden in Bild 3.1 mit dem Begriff Tribomutation beschrieben.

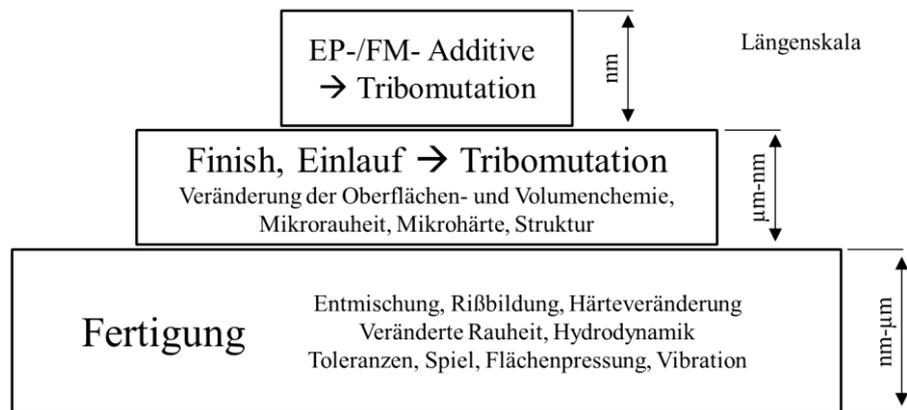


Bild 3.1: Einflüsse auf die relevanten Bauteileigenschaften eines Tribosystems [69].

Zusammenfassend kann die Vielzahl der tribologisch relevanten Bauteileigenschaften in Geometrie- und Werkstoffeigenschaften unterteilt werden. Alle in dieser Arbeit relevanten geometrischen Eigenschaften werden im darauffolgenden Kapitel 3.2 erläutert. Die übrigen in Bild 3.1 aufgeführten Punkte werden durch die Werkstoffeigenschaften bestimmt, wie sie im Kapitel 3.3 beschrieben sind. Dabei wird in Abhängigkeit der Entfernung zur Werkstückoberfläche zwischen dem Grundwerkstoff und dem oberflächennahen Werkstoffbereich unterschieden, da sich das Werkstoffgefüge und die chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Bereichs durch die Bearbeitungsprozesse und den Reibprozess im Tribokontakt deutlich zum Grundmaterial unterscheidet. Im tribologischen Kontakt sind die im oberflächennahen Werkstoffbereich wirkenden Eigenschaften des Gefügebauaufbaus, die chemische Zusammensetzung und die Härte von größter Relevanz [69] [27].

## 3.2 Makro- und Mikrogeometrie

Die Makro- und Mikrogeometrie von Bauteilen haben in Abhängigkeit von den eingesetzten Bearbeitungsverfahren eine Abweichung zur idealen Geometrie und bestimmen neben den vorliegenden Kräften sowie den Werkstoffeigenschaften die reale Kontaktfläche. Diese Gestaltabweichungen werden in der DIN4760 als Formabweichung, Welligkeit und Rauheit klassifiziert, siehe Bild 3.2. Hier werden die Gestaltabweichungen in vier Ordnungen tabellarisch unterteilt. Diese Ordnungen kommen nie getrennt voneinander vor, sondern es liegt stets eine Überlagerung der klassifizierten Gestaltabweichungen vor. Die Formabweichung und die Welligkeit zählen zu den makrogeometrischen Eigenschaften, die Rauheit wird der Mikrogeometrie zugeordnet. Die maximal zulässige Abweichung von der geometrischen Idealform wird dabei durch die jeweils genormten Kenngrößen beschrieben.

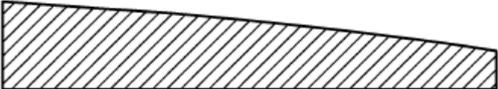
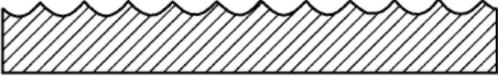
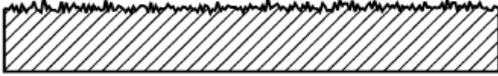
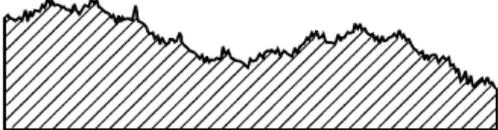
Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache
1. Ordnung: Formabweichungen 	Unebenheit Ungeradheit Unrundheit	Fehler in Führungen von Werkzeugmaschinen, Biegung an Maschinenteilen oder am Werkstück, unsachgemäße Einspannung des Werkstücks, Härteverzug, Verschleiß
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen	außermittige Einspannung, Form- oder Lageabweichungen eines Fräasers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeugs
3. Ordnung: Rauheit 	Rillen	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeugs
4. Ordnung: Rauheit 	Riefen Schuppen Kuppen	Vorgänge bei Spanbildung (Reißspan, Scherspan, Aufbau-schneide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: Rauheit Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefüge- struktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), Korrosionsvorgänge
6. Ordnung: Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffs	
1. bis 4. Ordnung: Überlagerung 	Überlagerung der Gestaltsabweichungen 1. bis 4. Ordnung zur Istoberfläche	

Bild 3.2: Ordnungssystem für Gestaltabweichung nach DIN4760 [47].

Die Makrogeometrie gibt die grundlegenden Bauteil- und Systemeigenschaften vor und wird mit den Maß-, Form- und Lagetoleranzen beschrieben. Das Lagerspiel der Nockenwelle gehört zum Beispiel zur Makrogeometrie. Da in dieser Arbeit die Nockenwellenlagerung mit

einem Stift-Scheibe Tribometer bewertet wird, sind jedoch andere makrogeometrische Kenngrößen von Bedeutung. Hierzu gehört die Ebenheit und die Parallelität der verwendeten Modellscheiben, damit eine gleichmäßige Übertragung der eingestellten Flächenpressung sowie ein guter Rundlauf beim Rotieren der Scheibe im Tribometer einjustiert werden kann. Die in dieser Arbeit verwendeten Modellproben wurden alle mit gleichablaufenden Dreh- und Schleifprozessen hergestellt. Bei der Vorgabe der Ebenheit und der Parallelität wurde hierbei die kleinstmögliche Abweichung von der Idealgeometrie angestrebt und somit im Hinblick auf die makrogeometrischen Eigenschaften, die bestmöglichen Voraussetzungen für die durchgeführten Untersuchungen zu schaffen.

Die Mikrogeometrie beschreibt die Ausbildung der Oberflächentopographie. Je nach eingesetztem Werkzeug und zu bearbeitendem Werkstück bei der Endbearbeitung sowie deren Prozessparameter, können unterschiedliche Oberflächengüten erreicht werden. Es werden Riefen erzeugt, welche in verschiedene Richtungen angeordnet sein können. Die Messgrößen zur Kennzeichnung der Oberflächenrauheit nach DIN4762, welche sich auf einen Profilschnitt der betrachteten Oberfläche beziehen, werden durch das klassische, genormte Tastschnittverfahren gewonnen. Die Auswirkung der variierten Prozessparameter beim Polymerlappen auf die erreichte Oberflächenrauheit wird mit der beschriebenen Tastschnittmessung bewertet. Damit ist ein Vergleich der erreichten Rauheiten beim Polymerlappen zu anderen Endbearbeitungsverfahren, welche ebenso mit der genormten Tastschnittmessung beurteilt sind, möglich. Die Rauheitskenngrößen werden mit Tastschnittprofilen quer zur Bearbeitungs- und Laufrichtung gemessen.

### Tastschnittverfahren

Beim Tastschnittverfahren wird eine genormte Messstreckenlänge taktil erfasst. Das eingesetzte Tastschnittmessgerät Hommel-T8000 der Firma Jenoptik führt mit Hilfe eines Vorschubgeräts, einen Oberflächentaster mit einer Diamantspitze und einem Spitzenradius von  $2\ \mu\text{m}$  über die Oberfläche. Dabei entsteht das ertastete Profil. Die erzeugten Profilschriebe werden dabei in vertikaler Richtung meist viel größer als in horizontaler Richtung dargestellt. Die dabei vorhandene Verzerrung muss für die Interpretation der Profilschriebe berücksichtigt werden. Das Bild 3.3 zeigt in a.) eine gewöhnliche Darstellung eines Profilschriebs. In b.) ist das reale Profil des Tastschriebs a.) zu sehen, bei welchem der Maßstab in vertikaler und horizontaler Richtung gleich groß ist. In der realen Darstellung b.) erscheint das Profil viel flacher als in der üblichen verzerrten Ansicht a.) [47].

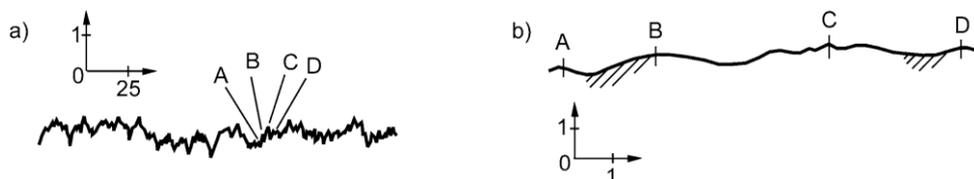
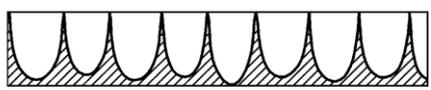
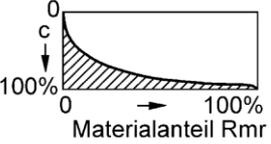
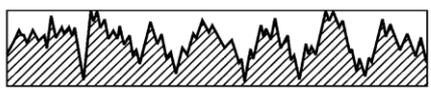
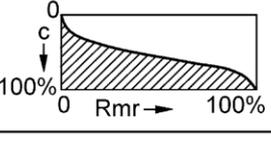
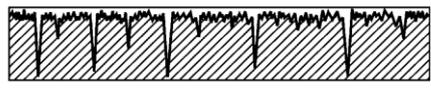
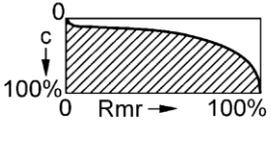


Bild 3.3: Profilmeterschrieb a.) typische verzerrte Darstellung b.) gleicher horizontaler und vertikaler Maßstab. A, B, C und D sind an der gleichen Stellen in beiden Profilschrieben [83].

Beim Vergleich verschiedener Oberflächentopographien sind geeignete Rauheitskennwerte zu wählen, um aussagekräftige Bewertungen der Topographie zu machen, siehe Bild 3.4. Die Charakterisierung von Gleitflächen benötigt Rauheitsgrößen, welche zum einen die durch die Endbearbeitungen erzeugten, plateauartigen Oberflächen widerspiegeln und damit einen Hinweis auf den Traganteil der Kontaktflächen liefern. Zum anderen ist eine Kenngröße zur Bestimmung der Täler in der Oberfläche von Bedeutung, da hierdurch das vorhandene Schmierstoffspeichervolumen beschrieben wird. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit neben der gemittelten Rautiefe  $R_Z$ , die reduzierte Spitzen- und Riefenhöhe  $R_{pk}$  und  $R_{vk}$  sowie die Kernrautiefe  $R_k$  bestimmt.

Oberflächenprofil	Materialanteilkurve	Oberflächen-Kennwerte							
		Rt	Rz	Ra	Rp	Rmr(c)	Rk	Rpk	Rvk
 <p>spitzkammig</p>	 <p>Materialanteil Rmr</p>	5	5	1	4	6,5%	*	*	*
 <p>zerklüftet</p>	 <p>Rmr</p>	5	4,5	1	2,5	20%	3	1,5	0,5
 <p>füllig, plateauförmig</p>	 <p>Rmr</p>	5	4,7	1	1	85%	1	0,2	3,8

(c = Schnitttiefe)

Bild 3.4: Oberflächenschriebe mit Materialanteilkurve und Oberflächenkennwerte nach [66].

Die Rautiefe  $R_Z$  wird durch die Einzelrautiefen von fünf aufeinander folgenden Einzelmessstrecken  $l_n$  aus dem Rauheitsprofil bestimmt, siehe Bild 3.5. Demnach gilt für die gemittelte Rautiefe

$$R_Z = \frac{1}{5} (R_{Z1} + R_{Z2} + R_{Z3} + R_{Z4} + R_{Z5}). \quad 3-1$$

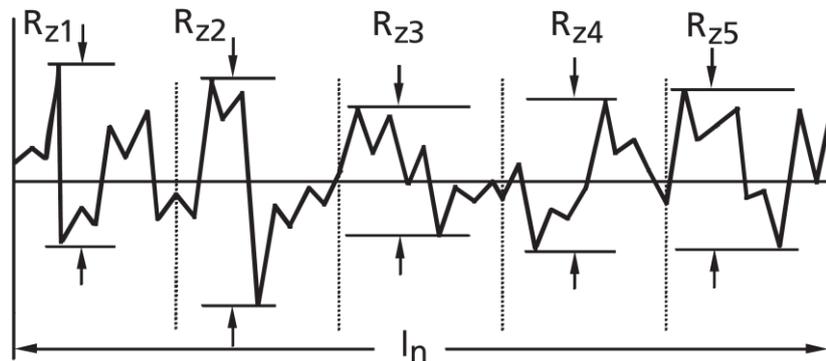


Bild 3.5: Bestimmung der Rautiefe  $R_z$  [50].

Die Rauheitsgrößen  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  und  $R_k$  werden aus dem Verlauf der sogenannten Abbott-Kurve bestimmt. Diese stellt die graphische Aufzeichnung der Summenhäufigkeitsverteilung des Oberflächenprofils dar. Zur Konstruktion der Abbott-Kurve führt man eine gedachte Schnittlinie durch das erzeugte Oberflächenprofil, von der höchsten Spitze zum tiefsten Tal. Für jede gedachte Schnitttiefe berechnet man in Prozent den Anteil des geschnittenen Profils bezogen auf die Messstrecke und trägt diesen Wert als Materialanteil für die jeweils betrachtete Schnitttiefe in die Abbott-Kurve ein. Zur Bestimmung der Kenngrößen  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  und  $R_k$  wird als erstes eine Sekante über 40 % Materialanteilsdifferenz an diese Kurve angelegt. Dabei wird die Sekante mit der geringsten Steigung gewählt. Durch Verlängern der Sekante entsteht eine Ausgleichsgerade, welche einen Schnittpunkt bei einem Materialanteil von  $M_r=0\%$  und bei  $M_r=100\%$  bildet. Die Distanz der beiden Schnittpunkte auf der y-Achse entspricht der Kernrautiefe  $R_k$ . Die Größen  $M_{r1}$  und  $M_{r2}$  werden durch das Lot von den Schnittpunkten der Ausgleichsgeraden bei  $M_r=0\%$  und  $M_r=100\%$  und der Abbottkurve bestimmt. Die entstandenen Dreiecksflächen im oberen und unteren Bereich der Kurve, werden durch ein jeweils flächengleiches, rechtwinkliges Dreieck dargestellt. Die Seitenkanten ergeben die reduzierte Spitzenhöhe  $R_{pk}$  und die reduzierte Riefentiefe  $R_{vk}$ , siehe Bild 3.6.

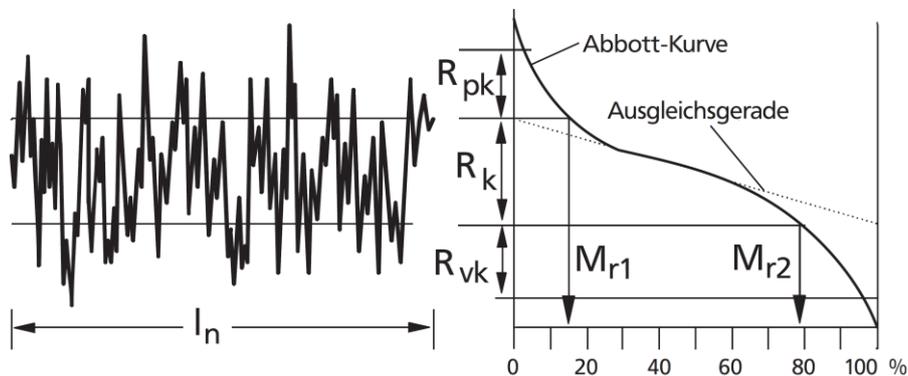


Bild 3.6: Bestimmung der Rautiefen  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  und  $R_k$  [50].

Zur ganzheitlichen Betrachtung der Kontaktfläche der Triboproben stößt das klassische Tastschnittverfahren jedoch an seine Grenzen. Aus diesem Grund wird die Topographie mit opti-

schen Verfahren dreidimensional erfasst. Zur Kontrolle der Ebenheit und den Rändern der Kontaktflächen der eingesetzten Stiftproben, aber auch zur Bestimmung der jeweils vorliegenden Stiftflächen, wird ein Laserscanmikroskop vor den Tribotests verwendet. Mithilfe eines Weisslichtinterferometers wurden ebenso dreidimensionale Aufnahmen vor und nach den Tribotests gemacht, um damit den Verschleiß auf den Modellproben zu beurteilen.

### **Laserscanmikroskopie (LSM)**

Die heutzutage verfügbaren Laser stellen eine zuverlässige Lichtquelle zur Verfügung, die in den unterschiedlichsten Spektralbereichen gut kollimiertes Licht abstrahlt. Zudem sind leistungsfähige Ablenkelemente für Laserstrahlen vorhanden. Seitdem ist es möglich, ein Mikroskop zu bauen, bei dem das Messobjekt nicht mehr ganzflächig beleuchtet wird, sondern bei dem der Messbereich auf dem Messobjekt punktuell, optisch abgetastet und das reflektierte Licht mit Photodetektoren registriert wird. Dabei wird nur das im Fokus befindliche Licht vollständig von den Photodetektoren aufgenommen. Diese Funktion wird durch den Einsatz einer Lochblende erreicht. So wird Ebene für Ebene und Messpunkt für Messpunkt gescannt. Durch das Zusammensetzen der elektronisch detektierten Signale entsteht eine dreidimensionale Abbildung der gescannten Oberfläche. Das verwendete LSM ist ein VK-9700, ein konfokales Laserscan-Farbmikroskop, der Firma Keyence [82].

### **Weißlichtinterferometrie (WLI)**

Das WLI ist wie das LSM ein spezielles Lichtmikroskop zur Darstellung einer dreidimensionalen Bauteiloberfläche. Es wird hier ein WLI der Firma Sensofar-Tech S.L. vom Typ PL $\mu$ 2300 eingesetzt. Mithilfe eines halbdurchlässigen Spiegels (Strahlenteiler), werden Lichtwellen einer Lichtquelle in räumlich kohärentes aber breitbandiges Licht aufgeteilt. Dieses trifft zum einen auf das Messobjekt und zum anderen auf einen Referenzspiegel. Das Licht wird an dem Messobjekt und dem Referenzspiegel wiederum reflektiert und trifft dann auf Photodetektoren einer Kamera. Bei einer Übereinstimmung der Distanz zum Messobjekt mit der Distanz zum Referenzspiegel entstehen Interferenzmuster, welche die Kamera aufnimmt. Die Helligkeitsunterschiede werden durch eine Software ausgewertet und jedem Pixel ein Höhenwert zugeordnet. Dies erfolgt wie beim LSM Ebene für Ebene der Oberfläche des Messobjekts und es entsteht eine dreidimensionale Abbildung [11].

Bei beiden optischen Messverfahren LSM und WLI ist es neben der rein graphischen Abbildung der dreidimensionalen Topographie möglich, in beliebiger Richtung und Länge einen Profilschnitt zu erzeugen. Zudem können Rauheitswerte bezogen auf eine Linie oder Fläche generiert werden.

## **3.3 Werkstoffeigenschaften**

Zur Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften gehören, wie bereits in Kapitel 3.1 aufgeführt, die Betrachtung des Gefügebauaufbaus, die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung und die dadurch resultierende Härte. Dafür ist es notwendig, den Werkstoffbereich von der Oberfläche bis zum Grundgefüge hin zu analysieren, was durch zerstörende Verfahren erfolgt. Analog zu den beschriebenen Analyseverfahren zur Darstellung der geometrischen

Bauteileigenschaften in Kapitel 3.2, werden im Folgenden die eingesetzten Vorgehensweisen und Analyseverfahren zur Beschreibung der relevanten Werkstoffeigenschaften erläutert.

### 3.3.1 Gefüge

Gefügeeigenschaften sind maßgeblich bedingt durch die chemische Zusammensetzung und die Herstellprozesse. Zu den bedeutsamen Herstellprozessen zählen hierfür insbesondere Ur-, Umform- und Wärmebehandlungsprozesse. Betrachtet man die Gefüge mikroskopisch nach entsprechender Vorbehandlung, sind klare Grenzlinien zu erkennen. Es wird dabei von Körnern, Korngrenzen und Kornformen gesprochen. Die Größe der einzelnen Körner variiert typischerweise von wenigen nm bis zu 100  $\mu\text{m}$ . Für die Betrachtung von Reibung und Verschleiß kontaktierender Werkstoffbereiche, ist jedoch nicht das Grundgefüge allein entscheidend. Vielmehr ist die Zusammensetzung des oberflächennahen Gefüges von Bedeutung, da dieser Bereich hauptsächlich im Reibkontakt beansprucht wird. Dieser Bereich mit verändertem Gefüge kann in Abhängigkeit der Beanspruchung der Fertigung oder des tribologischen Kontakts unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Bowden und Tabor [15] berichten, dass der betrachtete, oberflächennahe Bereich feinkristalline oder sogar amorphe Struktur hat, welche in einer Tiefe bis zu 10 nm zu finden ist. Darunter befindet sich das plastisch verformte und verfestigte Gefüge. Der schematische Aufbau von Bild 3.7 veranschaulicht den geschilderten Schichtaufbau von Metallen ganz allgemein.

Der gesamte Gefügebau kann am besten an einem polierten und angeätzten Schliff sichtbar gemacht werden. Das Ätzen bewirkt eine Kontrasterhöhung. Um die notwendige Vergrößerung des geätzten Schliffes zu erreichen, wird hier ein Rasterelektronenmikroskop (REM) eingesetzt. Hiermit ist eine Auflösung von 1 bis 2  $\mu\text{m}$  möglich. Damit das Gefüge des oberflächennahen Bereichs sichtbar wird, benötigt man andere Verfahren, die eine Probenaufnahme der ersten Nanometer unterhalb der Oberfläche ermöglichen. Hierfür wird in dieser Arbeit das Focused Ion Beam (FIB) eingesetzt. REM und FIB sind beides Verfahren, welche zur Abbildung des Gefügebau verwendet werden.

Die Helligkeitskontraste in den FIB-Aufnahmen liefern Hinweise auf die Größe der Versetzungsdichte, Umlagerungen der Versetzungsanordnungen oder auch einer vorliegenden Subkornbildung. Dadurch werden neben der chemischen Zusammensetzung, wie sie im darauffolgenden Kapitel beschrieben ist, die Festigkeitseigenschaften bestimmt. Dazu gehört die Scherfestigkeit des oberflächennahen Werkstoffbereichs, welche wie anhand der Gleichung 2-3 zu sehen, für die Reibung im Grenz- und Mischreibungsbereich von Relevanz ist. Neben dem Aufbau des oberflächennahen Gefüges ist auch die Dicke dieser Zone von Bedeutung, da durch die Hertzsche Pressung die größte Belastung im Tribokontakt unterhalb der Oberfläche vorliegt. Die Dicke der Zone mit verändertem Gefügebau wird in den Betrachtungen dieser Arbeit mit der Tiefe von der Oberfläche ab angegeben.

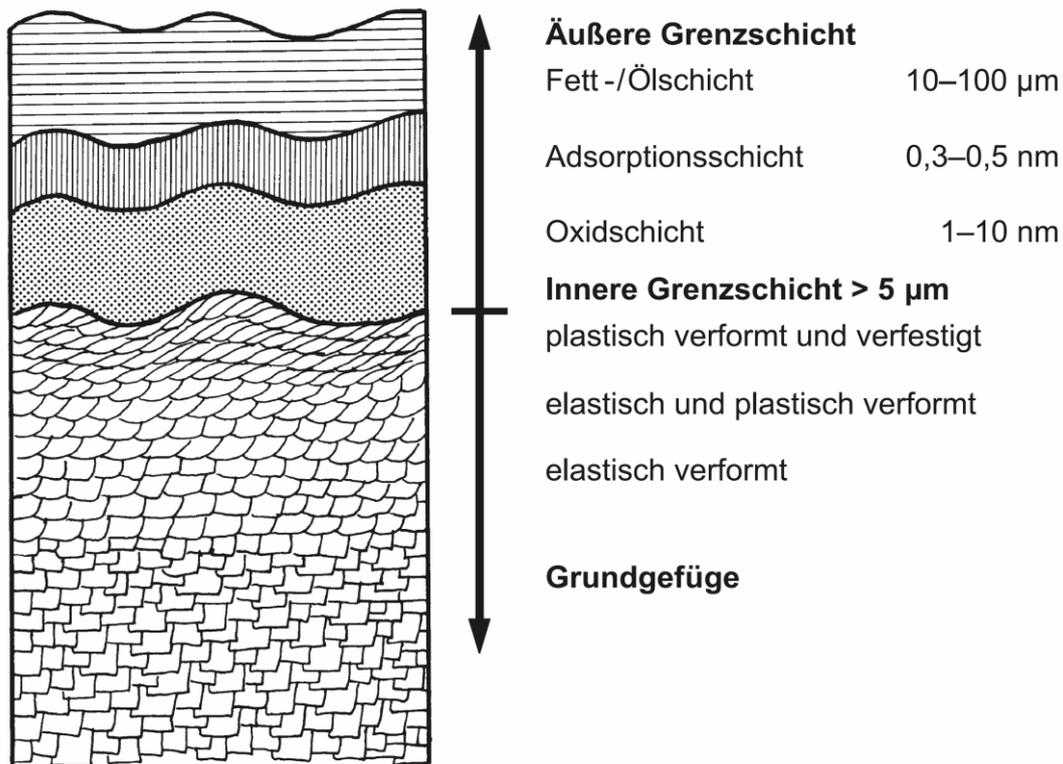


Bild 3.7: Schichtaufbau Metalle [72].

### Rasterelektronenmikroskop (REM)

Das REM der Firma Tescan vom Typ MIRA3 wird in dieser Arbeit zur Abbildung des Grundgefüges verwendet. Es arbeitet, wie der Name bereits sagt, mit der Emission eines gebündelten Elektronenstrahls. Dieser wird über die zu analysierende Fläche Punkt für Punkt geführt. Das Bündeln des Strahls und das Abrastern funktioniert wie beim LSM durch geeignete Ablenssysteme. An jedem betrachteten Punkt entstehen durch den primären Elektronenstrahl Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen, welche von Detektoren aufgefangen und zur Helligkeitssteuerung eines Bildschirms genutzt werden [49]. Die Anzahl der rückgestreuten Elektronen steht in direkter Abhängigkeit zu der Ordnungszahl der streuenden Atome. Hiermit ist es möglich Phasen darzustellen, die diverse Atomarten aufweisen. Zudem hängt die Rückstrahlintensität der Elektronen von der Kristallorientierung ab [43].

### Focused Ion Beam (FIB)

Das FIB wird, wie eingangs erwähnt, zur Abbildung des oberflächennahen Gefüges verwendet. Dabei handelt es sich um das Gerät Fei875 der Fa. Fei. Ein fokussierter Ionenstrahl dient beim FIB der Probenpräparation sowie der Oberflächenanalyse. Dabei ähnelt die Funktion des FIB einem REM, bei dem anstatt eines Elektronenstrahls Galliumionen verwendet werden. Der auf wenige Nanometer fokussierte Ionenstrahl wird dann analog zum REM über die zu analysierende Fläche zeilenweise geführt und bewirkt an der Werkstoffoberfläche eine Emission von Sekundärelektronen. Diese werden durch einen Sekundärelektronendetektor zur Bildgewinnung aufgenommen. Wird der Ionenfluss des FIB erhöht, wird eine Sputtererosion

erreicht. Ein lokaler Materialabtrag ist somit einstellbar. Damit der Gefügeaufbau direkt unterhalb der Oberfläche betrachtet werden kann, werden mit dem FIB zunächst Gräben in der Oberfläche erzeugt. Eine Seite der Gräben ist dabei senkrecht zur Oberfläche. Durch Kippen der Probe ist es möglich, die senkrechten Wände in den Gräben zu betrachten, indem ionenstrahlinduzierte Sekundärelektronenbilder erzeugt werden. Damit die Schnittqualität durch den fokussierten Ionenstrahl bis an die Oberfläche hin gleichbleibend gut ist, wird an der zu untersuchenden Stelle zuvor eine Platin-Schutzschicht abgeschieden.

### **3.3.2 Chemie**

Damit bestimmte Werkstoffeigenschaften, wie beispielsweise Korrosionsbeständigkeit, Zerspanbarkeit, Festigkeit, etc. von Motorkomponenten erreicht werden, kommen im Aggregatbau hauptsächlich speziell abgestimmte Legierungen zum Einsatz. Die angegebene chemische Zusammensetzung der Legierungen ist jedoch nur im Grundmaterial vorhanden. Bei der Betrachtung, der für die Tribologie relevanten oberflächennahen Werkstoffbereiche, ist eine andere chemische Zusammensetzung vorzufinden. Diese Zusammensetzung wird durch die eingesetzten Fertigungsverfahren sowie der tribologischen Beanspruchung geprägt, wie in Kapitel 2.3 erläutert. Analog zur Unterscheidung des Grundgefüges zum oberflächennahen Gefügeaufbau, gibt es einen Übergang von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes zur chemisch veränderten Randzone. Des Weiteren gilt es, die vorliegenden chemischen Elemente des oberflächennahen Bereichs zu detektieren, da einige Bestandteile, wie beispielsweise Phosphor oder Schwefel, für das geforderte Bauteilverhalten im Tribokontakt unterschiedliche Auswirkungen haben. Dieses Postulat ist aus den bereits erwähnten Publikationen von Mach und Berlet zu entnehmen, siehe Kapitel 2.3.

Die in dieser Arbeit eingesetzten Verfahren zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs, sind die Energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) sowie die Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS). Die integrale chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs erfolgt mithilfe der Energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) sehr einfach und schnell, weshalb diese Analysemethodik eine sehr verbreitete Methodik zur Analyse von Elementen geworden ist. Die Darstellung von chemischen Tiefenprofilen ist mit dem Analyseprinzip der EDX jedoch nicht möglich. Zu diesem Zweck werden hier Messungen mit der XPS durchgeführt.

#### **Energiedisperive Röntgenspektroskopie (EDX)**

Die Atome im oberflächennahen Bereich der Probe werden bei der EDX-Spektroskopie durch einen Elektronenstrahl einheitlicher Energie angeregt, was üblicherweise im Rasterelektronenmikroskop (REM) erfolgt. Die so angeregten Atome senden dann die für die Elementzusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs charakteristische Röntgenstrahlung aus. Diese für ein Element spezifische Energie der Röntgenstrahlung misst ein EDX-Detektor. Durch die Rasterfunktion eines REM-Geräts können mit diesen Informationen Elementverteilungsmaps erzeugt werden.

Die Analyse der chemischen Zusammensetzung ist mit der EDX Methode bei allen Elementen mit einer Ordnungszahl größer vier (Bor) möglich. Der auf der Probe auftreffende Elektronenstrahl wird im oberflächennahen Werkstoffbereich gestreut. Dabei entstehen in einem birnenförmigen Raumvolumen mit einem Durchmesser von circa 1 bis 2  $\mu\text{m}$  und einer Tiefe

von 1 bis 5  $\mu\text{m}$  die emittierten Röntgenstrahlen. Somit ergibt sich ein Untersuchungsvolumen, welches größer als 1  $\mu\text{m}^3$  ist [29].

### Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS)

Die analysierende Oberfläche wird beim XPS mit einer niedrigerenergetischen Röntgenstrahlung beschossen. Die Photonen des Röntgenstrahls schlagen dabei Elektronen aus den inneren Atomorbitalen heraus, welche mit einem Elektronenenergieanalysator gemessen werden. Diese Messung liefert die Energie der ausgesendeten Elektronen  $E_{final}$ . Zusammen mit der bekannten Energie des monofrequenten Röntgenstrahls  $E_{xray}$  ergibt sich die Bindungsenergie  $E_{bin}$  des Elektrons zu

$$E_{bin} = E_{xray} - E_{final}. \quad 3-2$$

Eine besondere Stärke des XPS ist die Möglichkeit, den chemischen Bindungszustand zu bestimmen. Dies gelingt, da die gebundenen Atome eine energetische Verschiebung der XPS-Linien eines Elementes verursachen. Beispielsweise ist der Eisen Peak von  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  um nahezu 4 eV vom elementaren Eisen Peak verschoben [2].

Damit chemische Tiefenprofile mit XPS darstellbar sind, ist es erforderlich, nach jeder Einzelmessung einen gezielten Materialabtrag für die nächsttiefere Messung durchzuführen. Dieser Vorgang, welcher durch eine ionenstrahlinduzierte Erosion hervorgerufen wird, bezeichnet man als Sputtern. Die analysierte Fläche bei den XPS-Analysen beträgt jeweils 100 – 200  $\mu\text{m}$  im Durchmesser und die verwendete Sputterrate ist ca. 2 nm/min. Die Tiefeninformation der jeweiligen Einzelmessung beträgt dabei 5 bis 10 nm. In dieser Arbeit wurde ein PHI 5000 Versa Probe der Firma Ulvac-Phi Inc. verwendet.

### 3.3.3 Härte

Eine bedeutende Werkstoffeigenschaft für den Tribokontakt, welche durch die bereits beschriebenen Eigenschaften der Kristallstruktur und der chemischen Zusammensetzung bestimmt wird, ist die Härte der Tribopartner. Die Härte gibt den Widerstand an, den ein Körper dem Eindringen eines anderen Körpers entgegensetzt [53]. Dieses Prinzip stellt die Grundlage für die üblichen Prüfverfahren zur Härtebestimmung dar. Es wird dabei nach der Form des Eindringkörpers zwischen den Verfahren nach Brinell, Knoop, Rockwell und Vickers unterschieden. Bei diesen Verfahren wird der Härtewert anhand des vermessenen Eindrucks bestimmt. Die Darstellung eines Härte-Tiefenprofil im Pico- beziehungsweise im Nanometerbereich zur Charakterisierung des hier relevanten oberflächennahen Werkstoffbereichs, erfolgt hingegen durch die gleichzeitige Messung von Kraft und Weg des elastischen und plastischen Kontakts eines harten Prüfkörpers (Indenter) mit dem Werkstück. Bei der hier eingesetzten Härteprüfung handelt es sich deshalb um ein Indentationsverfahren, bei dem neben den tiefenabhängigen Eindringhärten, die elastische und plastische Verformung bestimmt wird und somit auch die Angabe des Elastizitätsmoduls tiefenabhängig ermöglicht.

#### Indentation

Bei der Härteprüfung mittels eines Indentationsverfahrens wird der Indenter, meist eine Diamantspitze, bis zum Erreichen der eingestellten Maximalkraft oder eine maximalen Indentationstiefe in das Werkstück gedrückt. Die in dieser Arbeit verwendete Picoindentation zur Charakterisierung der Härte, wird mit einem Berkovich-Indenter aus Diamant durchgeführt. Der

Berkovich-Indenter hat die Form einer dreiseitigen Pyramide. Zur Auswertung der gleichzeitig aufgezeichneten Kraft und Eindringtiefe über der Zeit, wird hier die Methode von Oliver und Pharr eingesetzt [55]. Hierfür werden aus den elastisch-plastischen Kraft-Eindringkurven die Materialeigenschaften Härte und E-Modul des oberflächennahen Werkstoffbereichs bestimmt. In der Darstellung in Bild 3.8 sind die definierten Eindringtiefengrößen für einen Berkovich-Eindruck sowie die dazugehörige Kraft-Eindringkurve zu sehen.

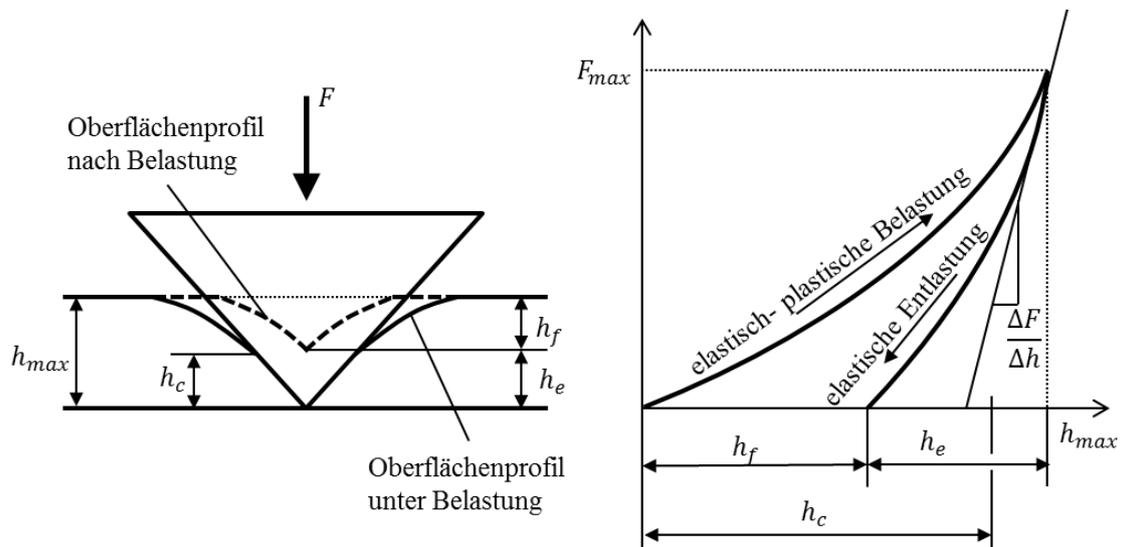


Bild 3.8: Eindruck eines Berkovich-Indenters und dazugehörige Kraft-Eindringkurve.

Die Härte  $H_{Pic}$  ergibt sich aus der anliegenden Maximalkraft  $F_{max}$  und der projizierten Fläche  $A_{Berk}$  des Eindrucks zu

$$H_{Pic} = \frac{F_{max}}{A_{Berk}}. \quad 3-3$$

Bei der Berkovich-Indenter Geometrie wird die projizierte Fläche  $A_{Berk}$  unter Last betrachtet. Dabei ergibt sich die projizierte Fläche  $A_{Berk}$  in Abhängigkeit von der Kontakttiefe  $h_c$  zu

$$A_{Berk} = 24,56h_c^2. \quad 3-4$$

Aus der maximalen Eindringtiefe  $h_{max}$ , einem von der Indentergeometrie abhängigen Faktors  $\epsilon$ , der Maximalkraft  $F_{max}$  und der Kontaktsteifigkeit  $S$  wird die Kontakttiefe  $h_c$  mit

$$h_c = h_{max} - \epsilon \frac{F_{max}}{S} \quad 3-5$$

bestimmt. Nach [55] wird für den Faktor  $\epsilon$  bei der Berkovich-Indenter Geometrie üblicherweise der Wert 0,75 verwendet.

Die Berechnungen für die Bestimmung der projizierten Kontaktfläche in Abhängigkeit der Eindringtiefe mit den Gleichungen 3-4 und 3-5, gelten nur für eine ausreichend große Eindringtiefe. Bei geringen Eindringtiefen wird eine Spitzengeometriefunktion  $A_{Berk}(h)$ , welche die Verrundung der nicht idealen Indenterspitzengeometrie berücksichtigt, zur Bestimmung der projizierten Fläche  $A_{Berk}$ , verwendet. Die Funktion  $A_{Berk}(h)$  wird durch Kalibriermes-

sungen an einem Material mit bekanntem E-Modul und Querkontraktionszahl bestimmt [60] [28]. In dieser Arbeit wird diese Spitzengeometriefunktion durch Kalibriermessungen auf Quarzglas festgelegt. Das amorphe Quarzglas wird hierfür standardmäßig verwendet, da es sich isotrop verhält und keine tiefenabhängige Härte und E-Modul zu erwarten sind. Diese Funktion wird bei den Auswertungen bis zu einer Eindringtiefe von 0,186  $\mu\text{m}$  verwendet.

Somit kann die Härte des Probenmaterials anhand der gemessenen Werte der Maximalkraft  $F_{max}$  und der Eindringtiefe  $h$  angegeben werden.

Für die Kontaktsteifigkeit  $S$  wird die Steigung der Entlastungskurve bei 98% von  $F_{max}$  berechnet. Hierfür gilt nach Sneddon [75]

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta h} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_{Berk}}. \quad 3-6$$

Durch diese Gleichung wird der reduzierte E-Modul  $E_r$  ermittelt. In Kombination mit dem bekannten E-Modul des Indenters von  $E_{Indenter} = 1140 \text{ GPa}$  und der dazugehörigen Querkontraktionszahl  $\nu_{Indenter} = 0,07$  ergibt sich für das E-Modul des untersuchten Probenmaterials die Gleichung

$$\frac{1}{E_r} = \left\{ \frac{1 - \nu^2}{E} \right\}_{Indenter} + \left\{ \frac{1 - \nu^2}{E} \right\}_{Probe}. \quad 3-7$$

Die Querkontraktionszahl  $\nu_{Probe}$  wird bei den durchgeführten Auswertungen mit  $\nu_{Probe} = 0,3$  für Stahl vorgegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Picodentor HM500 der Firma Helmut Fischer GmbH mit der in der Software von Fischerscope hinterlegten Messmethode ESP verwendet. Bei der Messmethode ESP wird die Gesamtmesszeit in eine vorgegebene Zyklanzahl an Teilentlastungen aufgeteilt. Anhand der Be- und Entlastungen ist eine Darstellung der Materialkennwerte über der Materialtiefe realisierbar. Eine beispielhafte Kraft-Eindringkurve der ESP Messmethode ist in Bild 3.9 abgebildet. Es wird eine Gesamtzeit von 120 s festgelegt. Diese wird auf 20 vorgegebenen Teilentlastungen aufgeteilt. Dabei wird jeweils auf 50 % von der Maximalkraft des vorhergehenden Belastungszyklus in einer Zeit von  $t_{red} = 3 \text{ s}$  entlastet. Eine weitere Vorgabe ist die Gesamtzeit für die reine Krafterhöhung von 20,6 s. Im Diagramm von Bild 3.9 sind die Zeiten einzelner Krafterhöhungszyklen rot eingezeichnet. Diese setzen sich aus der vorgegebenen reinen Krafterhöhungszeit (Summe aller  $t_{erh}$ ) und der Zeit zur Kompensation der vorhergehenden Kraftreduzierung zusammen. Diese Zeitabschnitte sind alle gleich lang und werden über die Software anhand der vorgegebenen Gesamtzeit automatisch bestimmt.

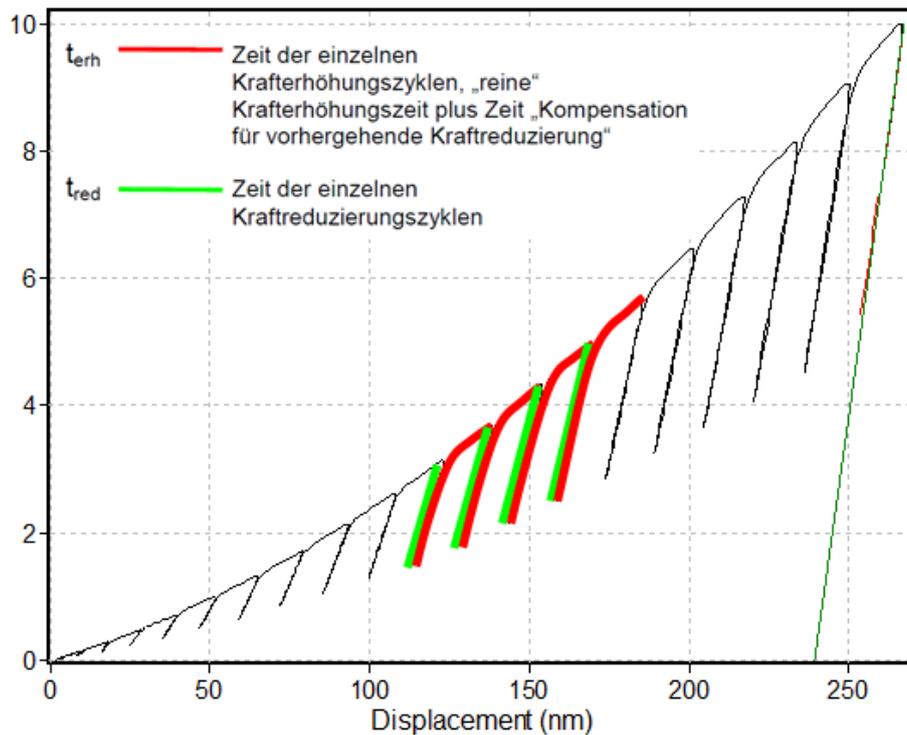


Bild 3.9: ESP-Messmethode.

Zur Bestimmung der tiefenabhängigen Festigkeitswerte wurden in dieser Arbeit bei jeder Probe Indentermessungen an 20 bis 30 Stellen durchgeführt. Durch das Verwenden konstanter Abstände von einem Eindruck zum anderen, wird der Benutzereinfluss auf die Wahl der Einzelmesspositionen vermieden.

Die erzeugten Messkurven wurden anschließend hinsichtlich des Nullpunkts und des thermischen Drifts korrigiert. Messkurven, welche stark von der restlichen Kurvenschar abwichen, wurden als Artefakte von der weiteren Aus- und Bewertung ausgeschlossen. Die Auswertung der belastbaren Kraft-Eindringkurven erfolgte nach der Methode von Oliver und Pharr, wie in diesem Kapitel beschrieben. Damit lassen sich letztendlich die Härte- und das E-Modul in Abhängigkeit der Tiefe bei den jeweils untersuchten Endbearbeitungsvarianten vergleichend in einem Diagramm darstellen.

## 4 Versuchseinrichtung und -bauteile für fertigungstechnische Untersuchungen

Das betrachtete Polymerlappverfahren wird für die Nockenwellenlagerung im Zylinderkopf untersucht. Dafür wurde eine CNC gesteuerte Außenrundlappanlage aufgebaut, um die automatisierte Bearbeitungsmöglichkeit aufzuzeigen. Bei der Maschine handelt es sich um eine umgebaute Bandfinishmaschine des Typs Supfina 720/1 NC5 vom Hersteller Supfina Grieshaber GmbH & Co. Dabei werden die Wellen zwischen Spitzen aufgenommen und rotiert, während ein Finishgerät das Polymerwerkzeug mit einer Oszillationsbewegung gegen die Lagerstelle der Welle mit definierter Kraft drückt. Die Anlage ist in Bild 4.1 zu sehen.



Bild 4.1: Außenrundlappanlage zum automatisierten Polymerlappen von Wellenbauteilen.

### 4.1 Zielbauteil und Modellsystem

Wie eingangs erwähnt, handelt es sich bei dem Zielsystem um die Nockenwellenlagerung. Damit das Tribosystem mit geringst möglichen Einflussgrößen, wie beispielsweise dem Lagerspiel etc., betrachtet werden kann, erfolgt die Übertragung der Bearbeitung von Real- auf Modellbauteile. Hierzu erfolgt zunächst die Darstellung der Nockenwellenlagerung, gefolgt von der Übertragung auf das vergleichbare Modellsystem.

### 4.1.1 Nockenwellenlagerung im Zylinderkopf

Bei der tribologischen Betrachtung der Nockenwellenlagerung im Zylinderkopf müssen die Motorkomponenten Zylinderkopf, Zylinderkopfhabe und die Nockenwellen des Zielaggregats beachtet werden.

#### Zylinderkopf

Der Zylinderkopf wird im Kokillengussverfahren aus AlSi10Mg urgeformt. Die Zylinderkopfhabe ist ein Druckgussbauteil aus AlSi9Cu3. Beide Bauteile stellen gemeinsam die Lagergasse der Nockenwelle dar und werden im zusammengebauten Zustand ausgespindelt. Die Zerspanung mit der geometrisch bestimmten Schneide des eingesetzten Ausspindelwerkzeugs erzeugt dabei eine charakteristische Welligkeit, die durch den Vorschub von 0,2 mm/U definiert wird. Das Ausspindelwerkzeug und die dadurch erzeugte Welligkeit sind in Bild 4.2 schematisch dargestellt. Ein Tastschrieb der erzielten Oberflächentopographie wird in Bild 4.3 gezeigt. Hier ist die charakteristische Welligkeit wie beschrieben erkennbar, welche durch den Vorschneider erzeugt wird. Dieser hinterlässt eine steile sowie eine flachere, rauere Flanke. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Berge durch die Schlichtschneide gekappt sind.

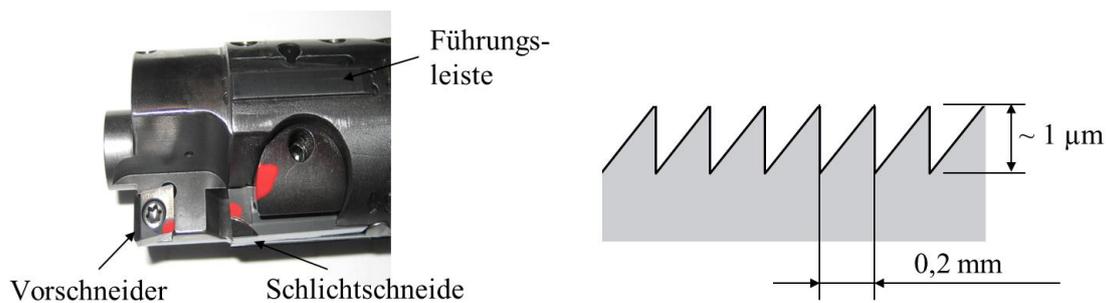


Bild 4.2: Ausspindelwerkzeug für die Nockenwellenlagergasse und schematische Darstellung der charakteristischen Welligkeit durch den Ausspindelprozess.

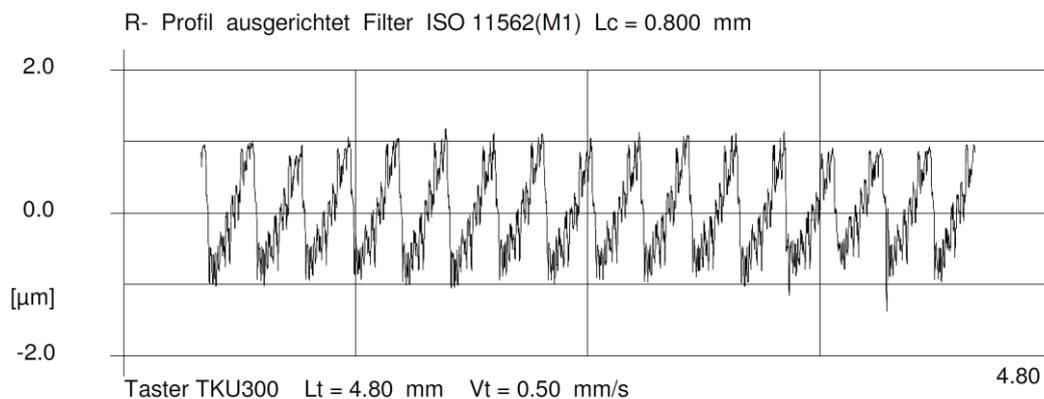


Bild 4.3: Tastschnittprofil der Zylinderkopflagergasse.

Legierungen aus Aluminium und Silizium bilden mit circa 12,5 % Silizium ein Eutektikum aus, welches bei  $577^{\circ}\text{C}$  erstarrt. Bei beiden eingesetzten Legierungen handelt es sich um untereutektische AlSi-Legierungen, welche entsprechend der Zusammensetzung primäre  $\alpha$ -Al-Mischkristalle und ein Eutektikum aus Aluminium und Silizium bilden. In Bild 4.4 ist das Grundgefüge des Zylinderkopfs unterhalb der Nockenwellenlagergasse dargestellt. In dieser REM-Aufnahme sind die primären Al-Dendriten im feinkörnigen Al-Si Eutektikum der Al-Si10Mg Legierung gut zu erkennen. Bei der Betrachtung des oberflächennahen Gefüges mit FIB ist ein feinkörniger Bereich mit einer Dicke von 1200 - 1900 nm, wie in Bild 4.5 abgebildet, über dem Grundgefüge zu sehen.

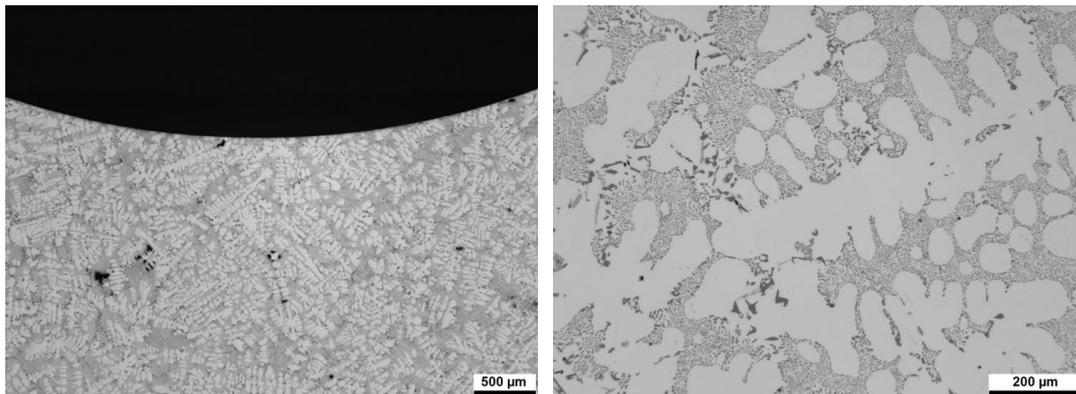


Bild 4.4: Grundgefüge der Zylinderkopflagergasse.

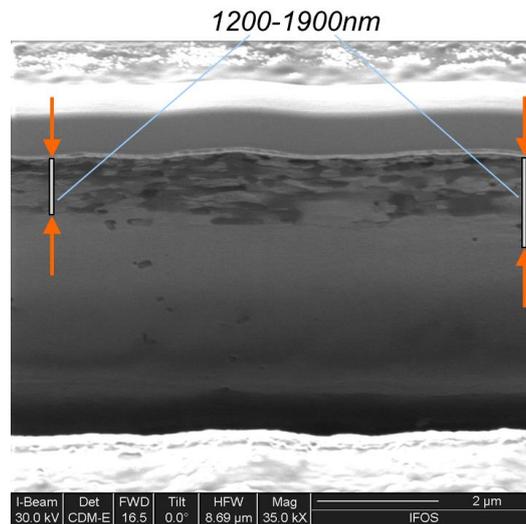


Bild 4.5: Oberflächennahes Gefüge der Zylinderkopflagergasse.

Durch die Bearbeitungsverfahren und die dabei eingesetzten Medien, wie beispielsweise dem Kühlschmierstoff, ergibt sich im Zusammenhang mit den Bearbeitungskräften eine zum Grundwerkstoff veränderte chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbe-

reichs. Neben den Hauptbestandteilen Aluminium, Silizium und Magnesium werden weitere Elemente, wie in Bild 4.6 zu sehen, durch die XPS Analyse detektiert. Hierzu gehört ein großer Anteil an Sauerstoff mit einer maximalen Konzentration von über 60 At.-% in einer Tiefe von 20 nm und einer Konzentration von 5 At.-% in einer Tiefe von 200 nm. Mit einer Konzentration von weniger als 5 At.-% sind zudem Zink und Stickstoff festzustellen. Die angegebenen Konzentrationen der Hauptlegierungsanteile von Aluminium und Silizium werden erst in Tiefen größer als 200 nm erreicht.

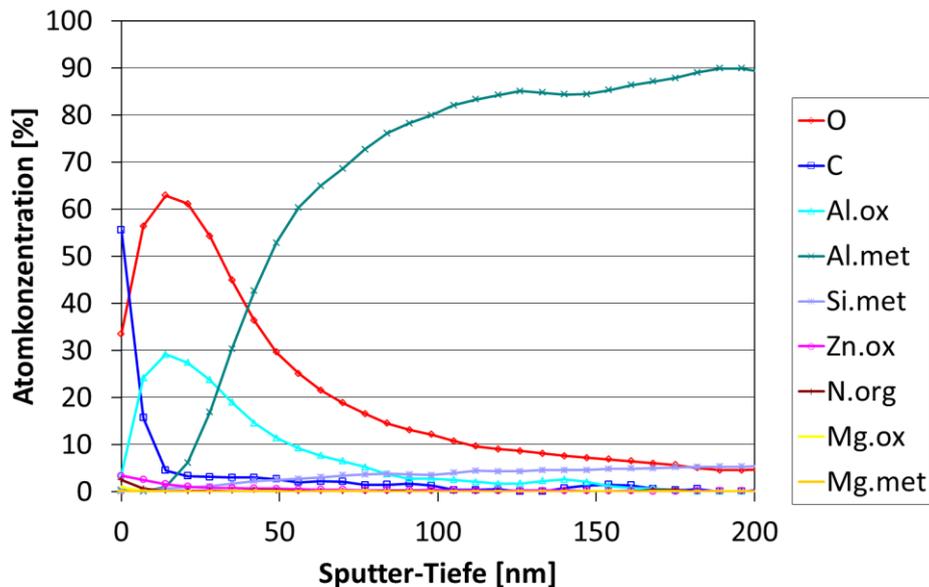


Bild 4.6: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Zylinderkopflagergasse.

## Nockenwelle

Die betrachtete Nockenwelle wird aus Rohrmaterial ST52/3 (E355+N) gefertigt. Da sich diese Arbeit mit der Hauptlagerung der Nockenwelle befasst, wird hier ausschließlich die Bearbeitung der Nockenwellenhauptlagerstellen betrachtet. Die Oberfläche der Nockenwellenlagerstellen wird durch einen Einstechschleifprozess bestimmt, welcher über den Umfang charakteristische Schleifriefen erzeugt.

Zur Bewertung dieser Topographie wurden Tastschnittmessungen an den Hauptlagerstellen von Seriennockenwellen durchgeführt. Ein repräsentativer Tastschrieb der geschliffenen Oberfläche ist in Bild 4.7 dargestellt. Zur Charakterisierung dieser Topographie wurden die in dieser Arbeit betrachteten Rauheitskennwerte  $R_z$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  und  $R_k$  an mehreren Nockenwellenhauptlagerstellen ausgewertet. Anhand dieser Werte wurden zulässige Grenzrauheitswerte zur Abbildung der geschliffenen Nockenwellenlagerstelle festgelegt und für das Schleifen der für die Untersuchungen verwendeten Modellproben berücksichtigt.

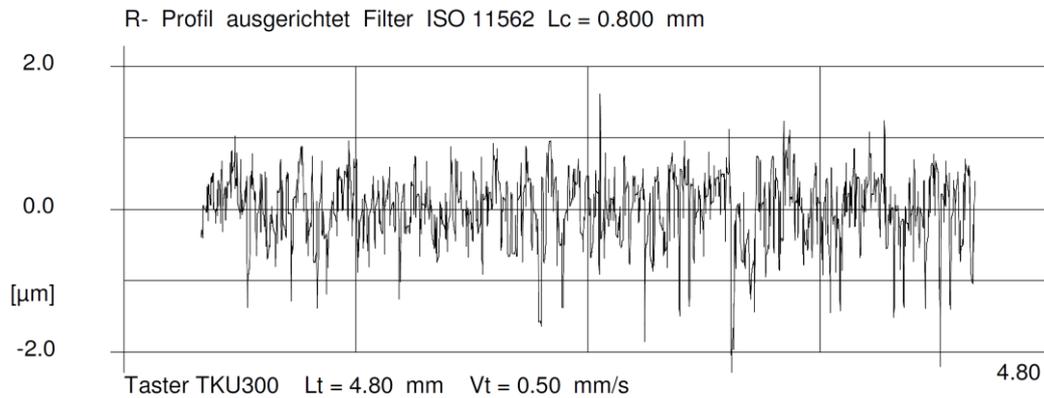


Bild 4.7: Profilschrieb einer geschliffenen Nockenwellenlagerstelle.

Die Umformprozesse des untereutektischen Stangenmaterials zur Fertigung des Nockenwellenrohrs führen zu einem zeiligen Gefügebau aus Ferrit- und Perlitbereichen, wie es in den REM-Aufnahmen in Bild 4.8 zu sehen ist. Da sich das zeilige Gefüge der Nockenwellenrohre parallel zur Achsrichtung erstreckt, ist an der Oberfläche entweder verstärkt der Ferrit oder der Perlit vorzufinden. Jedoch kann es wie im gezeigten REM Bild auch dazu kommen, dass die dünnere Perlitschicht an manchen Stellen an der Oberfläche sitzt und daneben schon abgetragen wurde. Die Perlitbereiche sind circa 2 bis 10  $\mu\text{m}$  und die Ferritbereiche 5 bis 20  $\mu\text{m}$  stark. An der Oberfläche variiert die Stärke der Ferrit- oder Perlitbereiche stark, da dies abhängig vom letzten Bearbeitungsprozess ist.

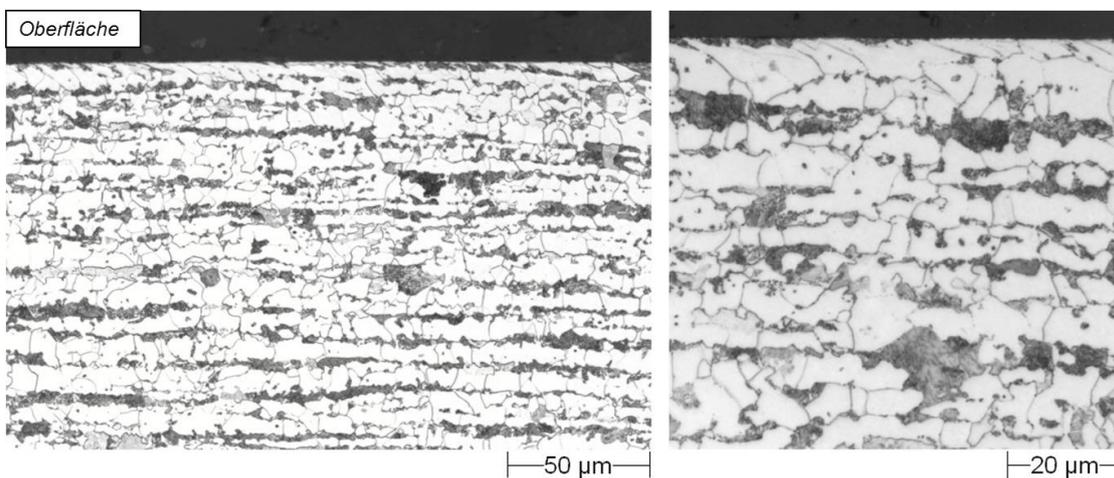


Bild 4.8: REM-Aufnahmen eines Schliffs der Nockenwellenrohre zur Visualisierung des zeiligen Gefügebau aus Ferrit und Perlit.

Aufgrund der beschriebenen, stark unterschiedlichen Ausbildung der Ferrit- und Perlitbereichen unterhalb der Oberfläche ist es nur bedingt möglich, eine Aussage über die Gefügeausbildung der ersten Nanometer unter der Oberfläche zu treffen. So gibt es feinkristallines Gefüge über Ferritzonen mit einer Stärke von ungefähr 1800 sowie 4300 nm, siehe Bild 4.9. Genauso vielfältig ist der oberflächennahe Bereich, bei denen man Teile des Perlitgrundgefüges

erkennt. In Bild 4.10 sind zwei FIB Bilder dargestellt, bei denen ein verformtes, feineres Gefüge über Perlit von 1800 aber auch von 4600 nm zu sehen ist.

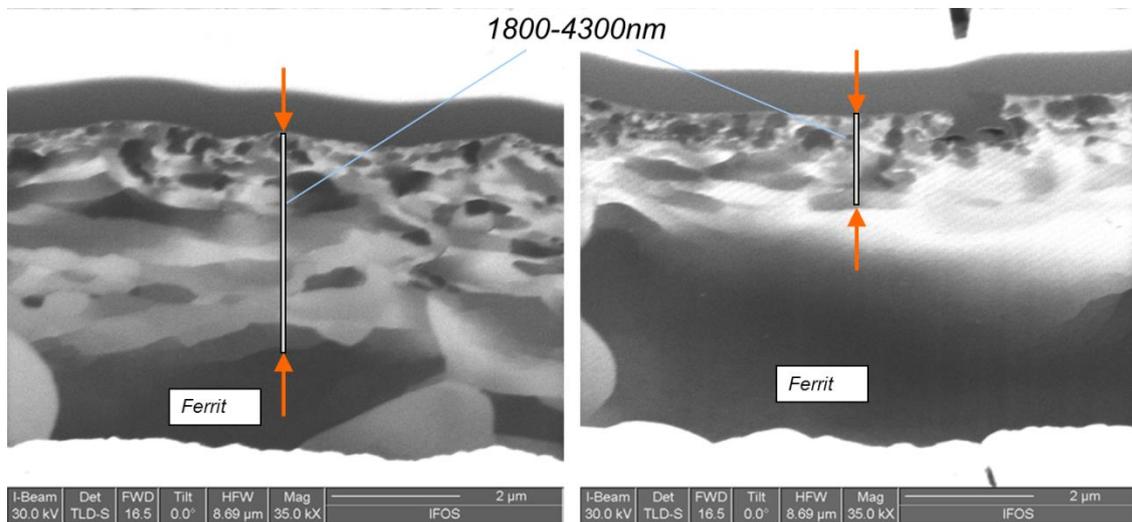


Bild 4.9: Oberflächennahes Gefüge im Bereich von ferritischem Grundgefüge der Nockenwellenlagerstelle.

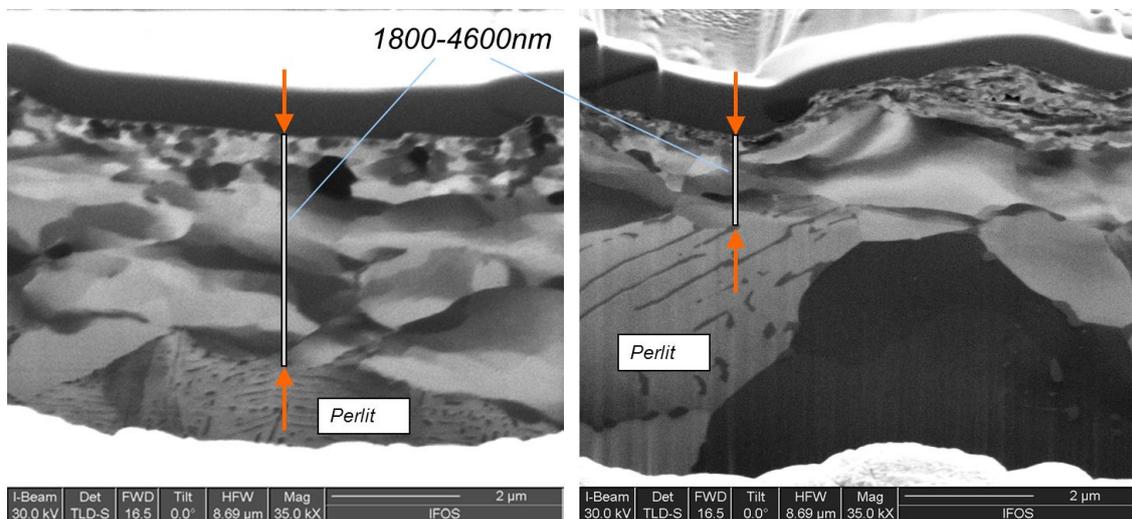


Bild 4.10: Oberflächennahes Gefüge im Bereich von perlitischem Grundgefüge der Nockenwellenlagerstelle.

Der Nockenwellenwerkstoff St52/3 besteht, wie aus den Gefügeanalysen ersichtlich, größtenteils aus ferritischem Eisen. Der Kohlenstoff des Werkstoffs befindet sich dabei in chemischer Verbindung mit Eisen als Zementitlamellen im Perlit. Der Anteil dieser Zementitlamellen ist sehr gering und deshalb ist der Kohlenstoff bei der XPS-Analyse nur mit einer geringen Atomkonzentration detektierbar. Aus der XPS-Analyse des Nockenwellenwerkstoffs in Bild

4.11 ist erkennbar, dass der Hauptbestandteil Eisen in metallischer Form ab einer Tiefe von 40 nm bereits mit circa 95 bis 100 At.-% wie im Grundwerkstoff vorhanden ist. Sauerstoff und oxidisch gebundenes Eisen sind mit einer maximalen Konzentration von 40 und 12 At.-% ungefähr 7 nm unter der Oberfläche vorzufinden. Des Weiteren sind geringe Mengen Magnesium, Calcium und Zink zu verzeichnen, welche Bestandteile des Bearbeitungskühlschmierstoffs sind.

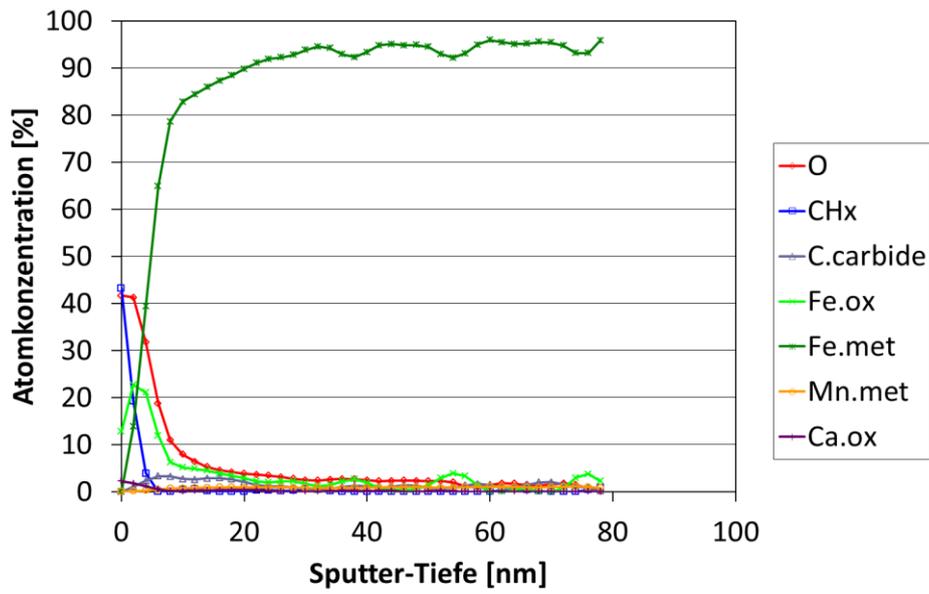


Bild 4.11: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Nockenwellenlagerstelle.

## 4.1.2 Modellsystem für Tribometer

In Anlehnung an die Herstellung der Motorkomponenten wurden die Modellproben gefertigt, um die zielbauteilnahe Erprobung des Systems auf einem Stift-Scheibe Tribometer zu ermöglichen.

Im Tribometer drückt ein mit konstanter Normalkraft belasteter Stift gegen eine mit konstanter Geschwindigkeit rotierende Scheibe. Das verwendete Tribometer sowie die schematische Darstellung der eingebrachten Normalkraft  $F_N$  und der Rotationsbewegung mit der Geschwindigkeit  $v$ , sind in Bild 4.12 abgebildet. Die Darstellung des Läppprozesses auf einer ebenen Scheibe mit annähernd vergleichbaren kinematischen Bedingungen wie beim Außenrundlappen von Wellenbauteilen führt dazu, dass nur eine relativ schmale Ringfläche mit einer gleichmäßigen Bearbeitung gefertigt werden kann. Dies wird im folgenden Kapitel 4.4 aufgezeigt. Als Konsequenz hieraus wurden aus der geläpften Ringfläche die Stahlstifte zur Abbildung der als Zielbauteil betrachteten Nockenwelle erzeugt. Als Gegenpartner im Modellversuch wurden folglich Aluminiumscheiben, zur Repräsentation der Lagergasse, einge-

setzt. Diese Konstellation ermöglicht zudem, dass die ebene Aluminiumscheibe für mehrere Testläufe mit Laufspuren auf unterschiedlichen Radien verwendet werden konnte.

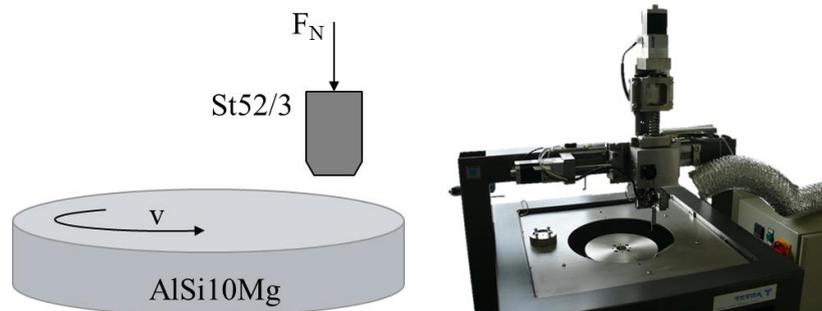


Bild 4.12: Stift-Scheibe Tribometer und schematische Darstellung der Funktionsweise.

### Scheibe für Triboversuch

Bei der Abbildung der Nockenwellenlagergasse als Scheibe für den Tribometer beschränken sich die Untersuchungen auf den Werkstoff des Zylinderkopfs aus AlSi10Mg. Die benötigte Scheibengeometrie wurde aus gegossenen Masseln gedreht. Damit die charakteristische Welligkeit des Originalbauteils, wie zuvor in Bild 4.2 rechts gezeigt entsteht, werden die Oberflächen der Scheiben auf einer Drehmaschine und einem Vorschub von 0,2 mm/U bearbeitet. Die erzeugte Oberfläche wird durch das repräsentative Tastschnittprofil in Bild 4.13 gezeigt. Hieraus ist erkennbar, dass die Erhebungen bei den gefertigten Modellscheiben im Vergleich zur Nockenwellenlagergasse, siehe Bild 4.3, um circa 1 bis 1,5  $\mu\text{m}$  erhöht sind. Jedoch reduzieren sich diese Erhebungen beim Einlauf im Tribometer sehr schnell auf ein niedrigeres Niveau und gleichen dann dem Zustand am Zylinderkopf.

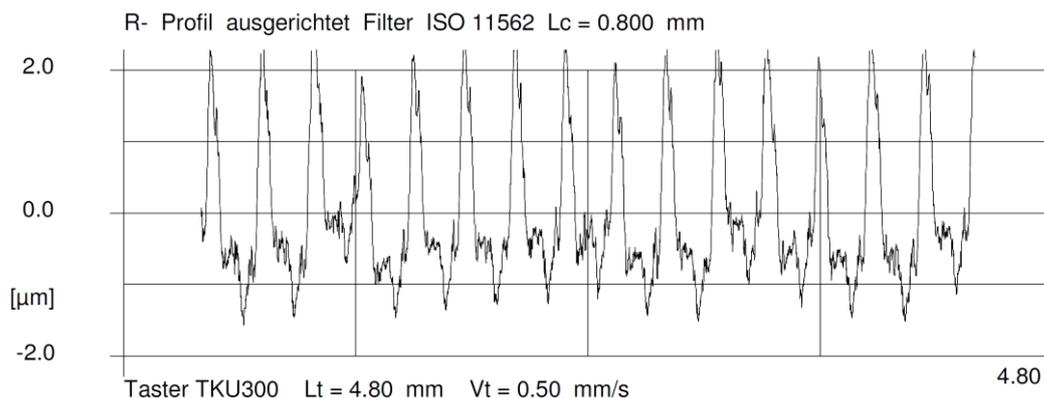


Bild 4.13: Tastschnittprofil der Zylinderkopf Modellscheibe.

Der Nachweis über die Ähnlichkeit des Grundgefüges der Modellscheibe zur Nockenwellenlagergasse im Zylinderkopf erfolgt durch die zum Bild 4.4 dargestellte, vergleichbare REM-Aufnahme in Bild 4.14. Das Gefüge der Modellscheibe besteht wie beim Gefüge des Zylinderkopfs aus primären Al-Dendriten im feinkörnigen Al+Si Eutektikum. Der Zylinderkopf

weist ein etwas gröberes Gussgefüge auf. Die Porosität ist bei beiden betrachteten Gefügen vergleichbar. Bei der Gegenüberstellung der oberflächennahen Gefügeaufnahmen mit FIB ist bei der Modellscheibe zum Zylinderkopf ein ähnlich starker, beanspruchter Gefügebereich mit einer Stärke von 1400 bis 1900 nm erkennbar. Die Gefügestruktur dieser Oberflächennzone liegt bei beiden Proben in einer annähernd gleichen Größenordnung. Dieser Vergleich ist durch die Betrachtung von Bild 4.5 und Bild 4.15 nachvollziehbar.

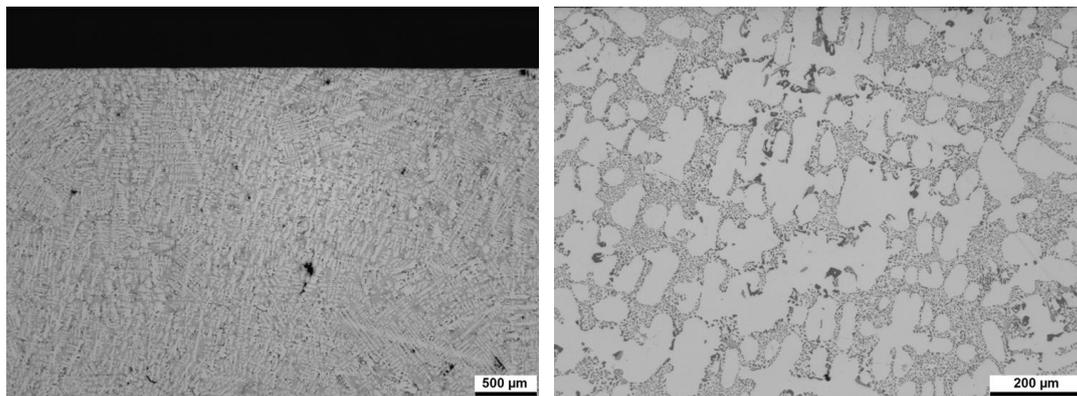


Bild 4.14: Grundgefüge der Zylinderkopf Modellscheibe.

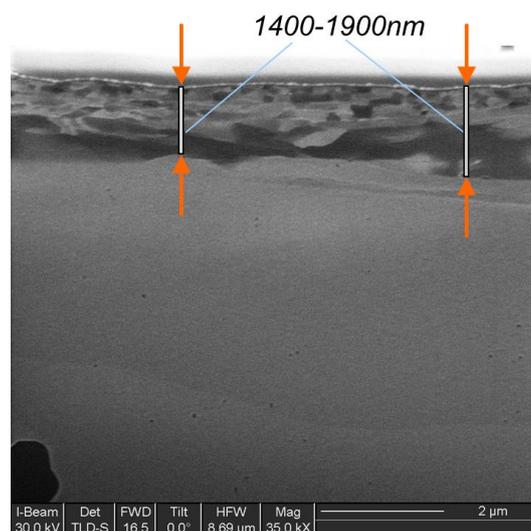


Bild 4.15: Oberflächennahes Gefüge der Zylinderkopf Modellscheibe.

In Bild 4.16 ist das XPS-Tiefenprofil der Modellscheibe zu sehen. Beim Vergleich zu Bild 4.6, dem Tiefenprofil der Nockenwellenlagergasse, ist als erstes der geringere, chemisch veränderte oberflächennahe Werkstoffbereich festzustellen. Bereits ab 80 bis 100 nm Tiefe verändern sich die Hauptlegierungsbestandteile Aluminium und Silizium kaum mehr. Dies ist ein Indikator dafür, dass ab hier die chemische Grundzusammensetzung der Legierung erreicht ist. Ein weiterer Unterschied besteht in den vorhandenen chemischen Elementen. Neben den

Bestandteilen Sauerstoff und Stickstoff, wie in der Nockenwellenlagergasse, sind in der Modellscheibe Spuren von Natrium, Kupfer, Eisen und Calcium zu finden, jedoch kein Zink.

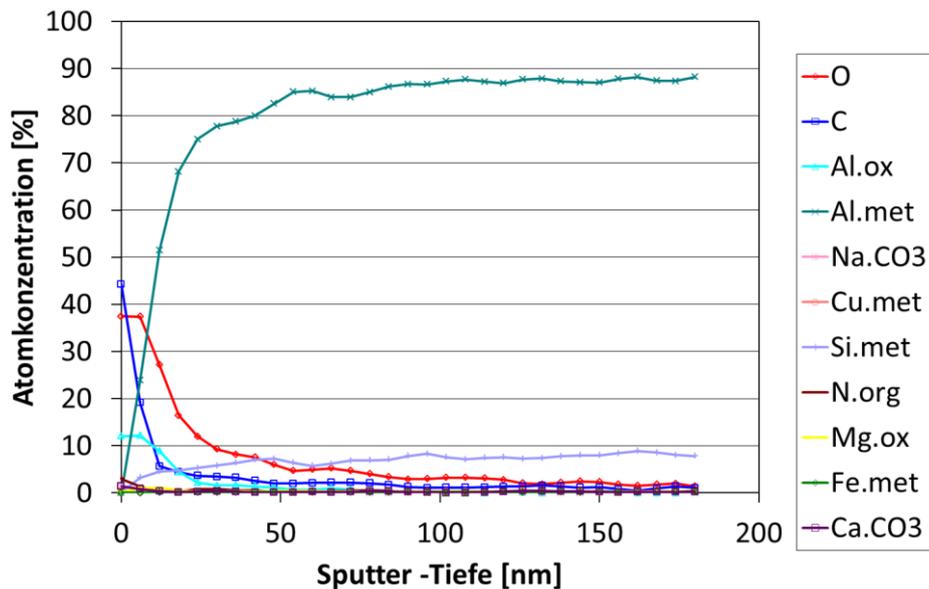


Bild 4.16: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Zylinderkopf Modellscheibe.

### Stift für Triboversuch

Der Gegenkörper, welcher als Stift im Tribometer eingesetzt wurde, besteht wie die abzubildende Nockenwelle aus einem ST52/3 Stangenmaterial. Die für die Fertigung des Stifts notwendige Bearbeitung erfolgte in mehreren Schritten. Dabei ist zu beachten, dass der Stift einige Anforderungen erfüllen muss. Hierzu gehört die notwendige Ebenheit und Parallelität, damit eine gleichmäßige Flächenpressung zwischen Stift und Scheibe bereits beim Einlauf des Tribotests vorliegt. Zudem ist eine gleichmäßige Bearbeitung erforderlich, damit der verwendete Stift eine repräsentative Oberfläche aufweist. Aufgrund der Kippgefahr des Stifts beim Starten der Rotationsbewegung der Scheibe, müssen die Kanten entsprechend gefast sein.

Der erste Bearbeitungsschritt besteht aus dem Abdrehen der Scheiben aus Stangenmaterial. Diese wurden dann mit einer speziellen Schleifmaschine so bearbeitet, dass die Schleifriefen in radialer Richtung angeordnet sind, siehe Bild 4.17. Die zu bearbeitende Scheibe rotiert dabei auf einem Magnettisch und die ebenfalls rotierende Schleifscheibe, mit der Breite des Radius der Modellscheibe, wurde auf den Modellscheibenradius zugestellt. Damit ist die Anordnung der Schleifriefen zur Bewegungsrichtung im Tribometerversuch analog zum Originalsystem, bei dem die Schleifriefen der Nockenwelle in Bewegungsrichtung verlaufen. Bei der verwendeten Schleifscheibe handelt es sich wie beim Kühlschmierstoff um die gleiche Zusammenstellung wie beim Schleifen der Seriennockenwellenhauptlagerung in der Serienproduktion.

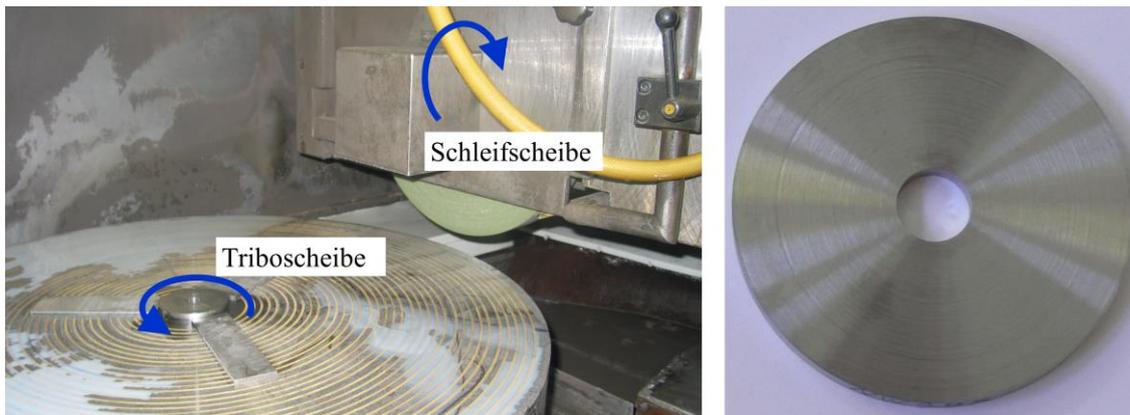


Bild 4.17: Schleifen der Triboscheiben mit radialen Bearbeitungsspuren.

Die anschließende Bewertung der erzeugten Oberflächentopographie erfolgte mit Tastschnittmessungen und den im Kapitel zuvor beschriebenen Grenzrauheitswerten. Ein Beispiel eines Tastschriebs ist in Bild 4.18 zu sehen. Die anhand der Grenzrauheitswerte ausgewählten Scheiben wurden für die Polymerlappversuche eingeplant. Diese mussten jedoch nach dem durchgeführten Schleif- und Polymerlappprozess weiter bearbeitet werden, um die Form eines Stiftes für den Tribometer zu bekommen. Durch Erodieren unter Öl wurden die Stifte mit einem Durchmesser von 3 mm erzeugt. Dieser spezielle Erodierprozess unter Öl ist notwendig, damit der oberflächennahe Werkstoffbereich chemisch und mechanisch keine Veränderung erfährt. Die Stifte hatten nach dem Erodieren einen Überstand am Rand, welche den Stift beim Anfahren im Tribometer zum Kippen bringen würde. Deshalb wurden die Stifte im nächsten Schritt durch eine Werkzeugschleifmaschine mit einer 45°-Fase versehen. Der übriggebliebene Grat in der Größenordnung von wenigen Mikrometern an der Kante zur Oberfläche, wurde durch eine Schleifmaschine für metallographische Proben entfernt, siehe Bild 4.19. Dabei wurden die Stifte durch einen Druckluftmotor rotiert und in einem flachen Winkel gegen das rotierende Schleifpapier der Schleifmaschine zugestellt.

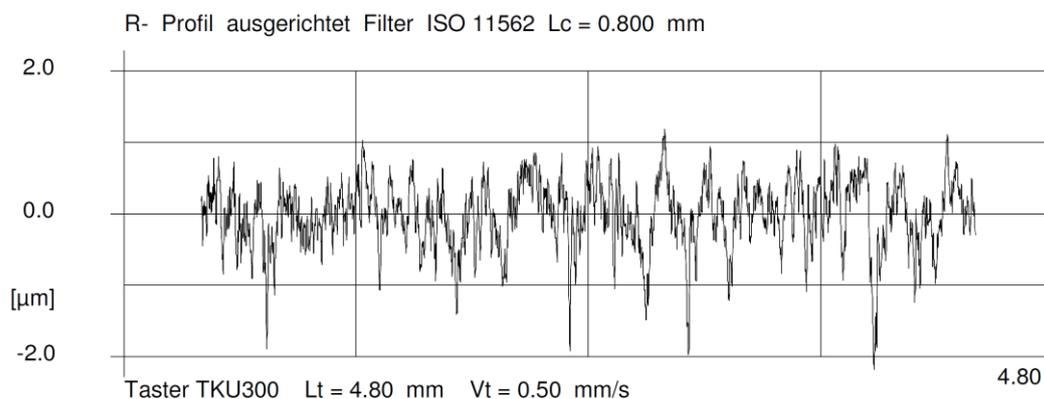


Bild 4.18: Tastschnitt einer Modellscheibe für den Tribometerstift zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle.

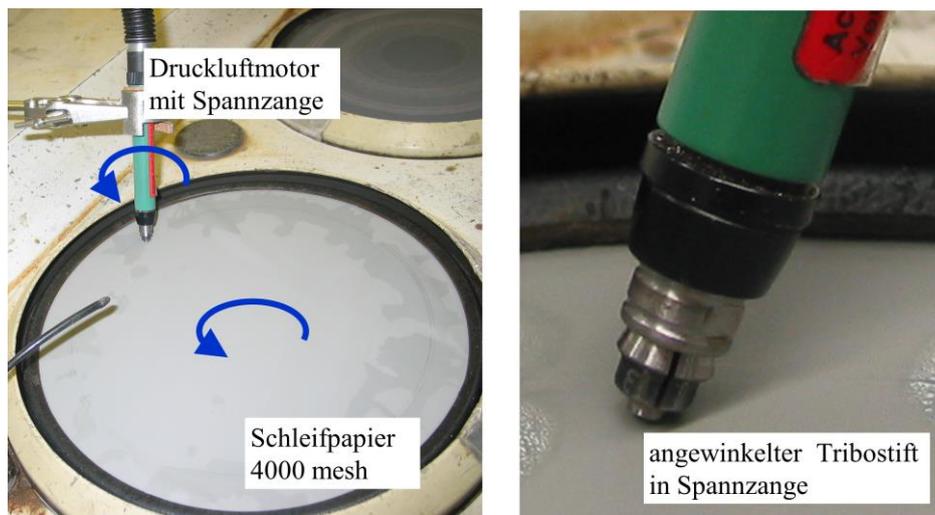


Bild 4.19: Entgraten der Fase an den Stiften für den tribologischen Modelltest.

Die Kontrolle der Kante an den Stiften erfolgte durch die Betrachtung der Stifte unter dem Laserscannmikroskop. In Bild 4.20 ist eine Laserscanaufnahme der Kante eines Stiftes vor und nach dem Entfernen des Grats mittels der Metallographieschleifmaschine gezeigt. Aus dem dargestellten Profil der Laserscanaufnahme vor dem letzten Bearbeitungsschritt ist ersichtlich, dass der Grat am Rand des Stiftes im Mittel 15  $\mu\text{m}$  hoch und 30  $\mu\text{m}$  breit ist.

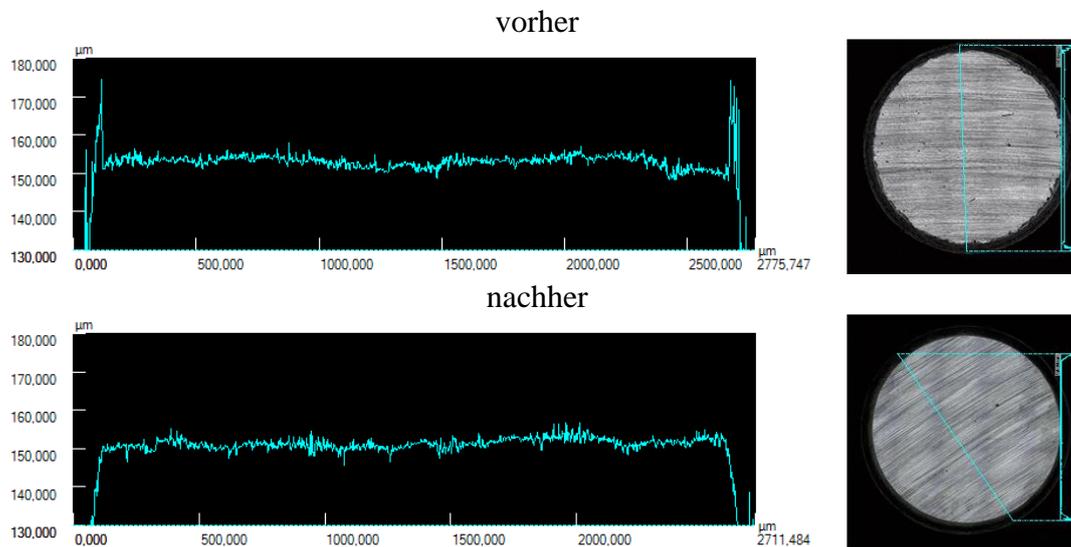


Bild 4.20: Laserscanaufnahmen vor und nach dem Entgraten der Fase.

Die Anordnung der zeiligen Perlit- und Ferritbereiche sind bei den Tribometerstiften anders als bei der Nockenwelle im rechten Winkel zur Oberfläche angeordnet. Wie aus den REM-Aufnahmen in Bild 4.21 ersichtlich, sind die Ferritbereiche circa 40  $\mu\text{m}$  und die Perlitbereiche circa 20  $\mu\text{m}$  breit. Der Bereich nahe der Oberfläche wird wie bei den Analysen zuvor mit FIB-Aufnahmen Bild 4.22 visualisiert. Bei diesen Proben ist es möglich den Bereich über

Ferritzonen und Perlitzenen zu charakterisieren, da die Anordnung der Zeiligkeit der Modellproben im Vergleich zur Nockenwelle eine bessere Trennung der Zonen zulässt. Der feinkörnige Bereich über dem im Vergleich zum Ferrit härteren Perlit hat eine Stärke von 300 bis 350 nm. Über Ferrit ist dieser Bereich mit 950 bis 1050 nm ungefähr dreimal so groß.

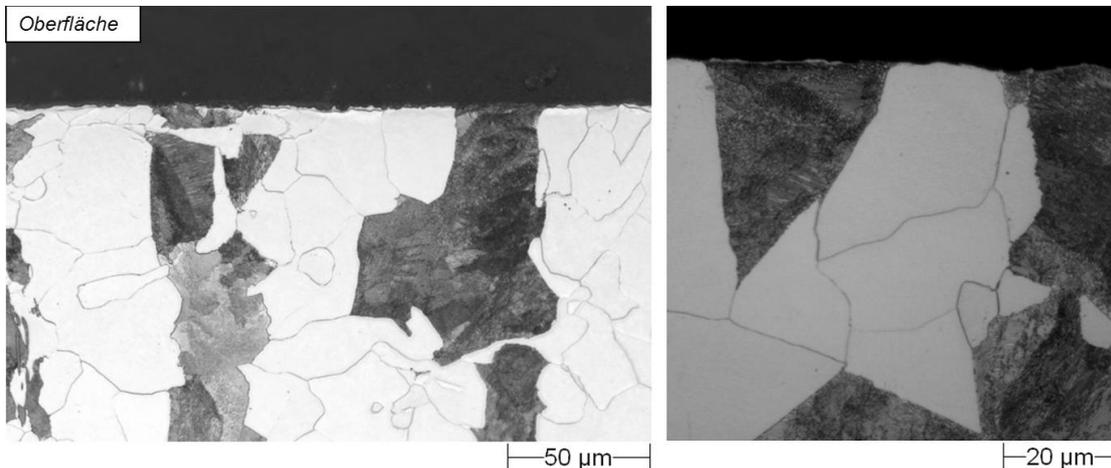


Bild 4.21: Gefüge der Tribostifte zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle.

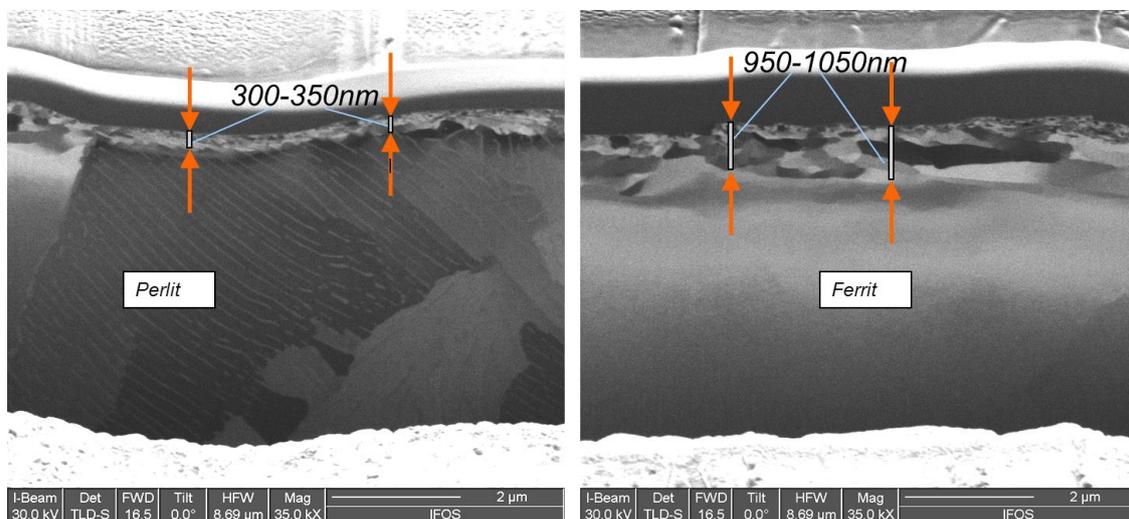


Bild 4.22: Oberflächennahes Gefüge der Tribostifte zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle.

Die chemische Zusammensetzung im oberflächennahen Werkstoffbereich der geschliffenen Tribostifte ist in Bild 4.23 zu sehen. Im Vergleich zur Nockenwellenlagerstelle ist das gezeigte Tiefenprofil sehr ähnlich. Geringe Unterschiede sind bei den Konzentrationen des oxidisch gebundenen Eisens sowie von Karbid festzustellen. Das oxidisch gebundene Eisen hat bei der Modellprobe, dem Tribostift, ein Maximum von über 20 At.-% und bei der Nockenwelle über 10 At.-% direkt unter der Oberfläche. Die Karbide erscheinen beim Originalbauteil kaum und

sind bei der Modellprobe mit 3 At.-% in einer Tiefe von 5 bis 30 nm zu finden. Weiterhin sind bei dem Originalbauteil geringe Spuren von Zink ersichtlich, welche bei der Modellprobe nicht vorhanden sind. Da die genannten chemischen Unterschiede sehr gering sind, ist die chemische Zusammensetzung der Modellprobe mit der Nockenwelle vergleichbar.

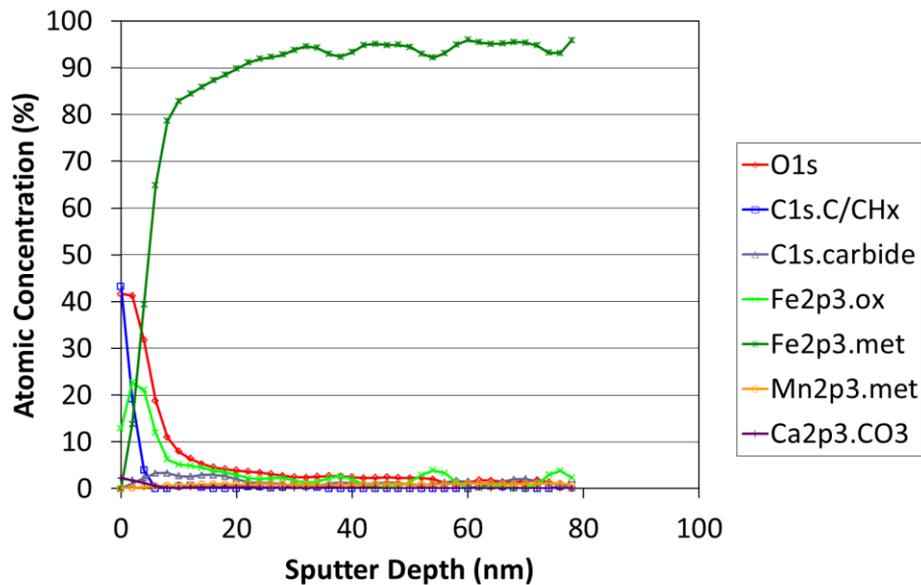


Bild 4.23: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Tribostifte zur Abbildung der Nockenwellenlagerstelle.

## 4.2 Bearbeitungsanlage

Der Polymerlappprozess, welcher ursprünglich auf die Bearbeitung von Wellenbauteilen ausgelegt wurde, erforderte eine Übertragung des Bearbeitungsprozesses auf die zuvor beschriebenen, geschliffenen Stahlscheiben. Damit die Bearbeitung der Stahlscheiben den Bearbeitungsprozess der Nockenwellenlagerstellen so nah wie möglich abbildet ist es notwendig, dass die Scheiben eine Rotationsbewegung und das Lappwerkzeug eine Oszillation ausführen. Als Grundmaschine für diese Aufgabe bietet sich die Verwendung einer Drehmaschine an. In Bild 4.24 ist die verwendete Drehmaschine mit den für die Polymerlappversuche notwendigen Anbauteilen zu sehen.

Die Aufnahme und Oszillationsbewegung des Werkzeugs übernimmt ein Finishgerät, welches auch für die Endbearbeitung von Wellenbauteilen eingesetzt wird. Das Finishgerät besitzt einen Hochfrequenzmotor, welcher über einen Exzenter eine Oszillationsbewegung erzeugt. Das eingesetzte Finishgerät vom Typ SGM50 der Firma Nagel, kann Oszillationsamplituden von 0 bis 5 mm und eine Oszillationsfrequenz von bis zu 1200 DH/min erzeugen. Damit das Werkzeug auf Spitzenhöhe der Drehmaschine ist, wurde eine Adapterplatte zwischen dem Werkzeugquerschleifen der Drehmaschine und dem Finishgerät verwendet. Die horizontale Positionierung des Finishgeräts zum Zentrum des Backenfutters erfolgte über die Betätigung

des Handrads am Werkzeugquerschlitten. Das Finishgerät ist zudem mit einem pneumatischen Druckzylinder ausgestattet, welcher über die Druckluftzufuhr steuerbar ist. Damit kann beim Läppprozess eine vorgegebene Pressung zwischen dem im Backenfutter eingespannten Werkstück und Werkzeug aufgebracht werden.

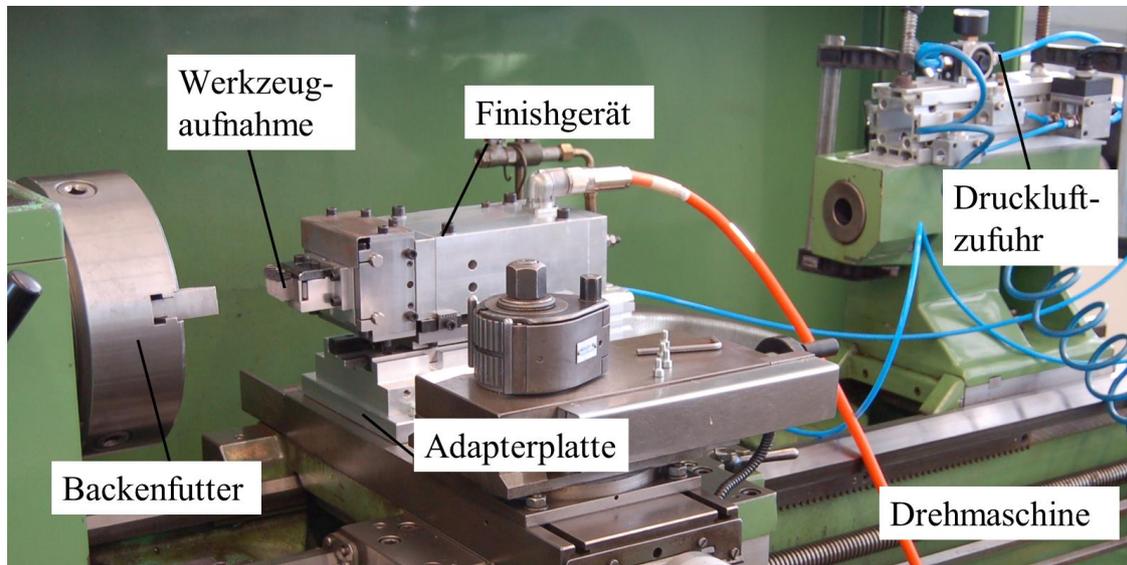


Bild 4.24: Bearbeitungsanlage zum Polymerlappen von flachen Scheiben.

## 4.3 Werkzeuge

Wie in der allgemeinen Beschreibung des Läppens in Kapitel 2.1.3 beschrieben, gehört zum Läppwerkzeug der formgebende Werkzeugkörper sowie die Läpppaste mit den abrasiven Schneidkörnern. Die Bearbeitungsversuche beinhalten die Variation der Geometrie sowie der Werkstoffe des Werkzeugkörpers.

### 4.3.1 Geometrie

Das Läppen benötigt ein formübertragendes Werkzeug. Deshalb werden Wellenbauteile mit einer hülsenförmigen Werkzeuggeometrie bearbeitet und die Bearbeitung ebener Werkstückoberflächen, wie die zu bearbeitende Tribometerscheibe, erfordert dagegen eine ebene Werkzeuggeometrie. Damit die Anforderungen an die Tribometerstifte, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, erfüllt werden, muss die hierfür zu bearbeitende Scheibe einen Bereich aufweisen, welcher eine gleichmäßige und eben bearbeitete Oberfläche hat. Dieser Bereich muss so groß sein, dass hieraus Tribometerstifte mit einem Durchmesser von 3 mm hergestellt werden können. Die ersten verfahrenstechnischen Untersuchungen dienen der Bestimmung des Einflusses des Werkzeugwerkstoffs. Hierfür wurde eine einfache Werkzeuggeometrie gewählt, bei der die Bearbeitung auf einer Seite der eingespannten Scheibe im Backenfutter stattfindet. Ein Beispielwerkzeug und die Bearbeitungsanordnung der zu bearbeitenden Scheibe mit dem blockförmigen Werkzeug ist in Bild 4.25 zu sehen. Das Werkzeug, welches aus einem recht-

eckigen Würfel besteht und eine umlaufende Fase auf der Bearbeitungsseite hat, ist auf der linken Seite des Bilds zu sehen. Auf der rechten Seite des Bilds sieht man die beschriebene Bearbeitungsanordnung des Werkzeugs zur Werkstückscheibe. Der durch die Rotationsbewegung der Scheibe und der überlagerten Oszillationsbewegung bei der Läppbearbeitung erzeugte Bereich, stellt eine Kreisringfläche dar. Diese Spur ist mehr als 3 mm breit und in Abhängigkeit der Ebenheit für die Fertigung der Tribometerstifte verwendbar.

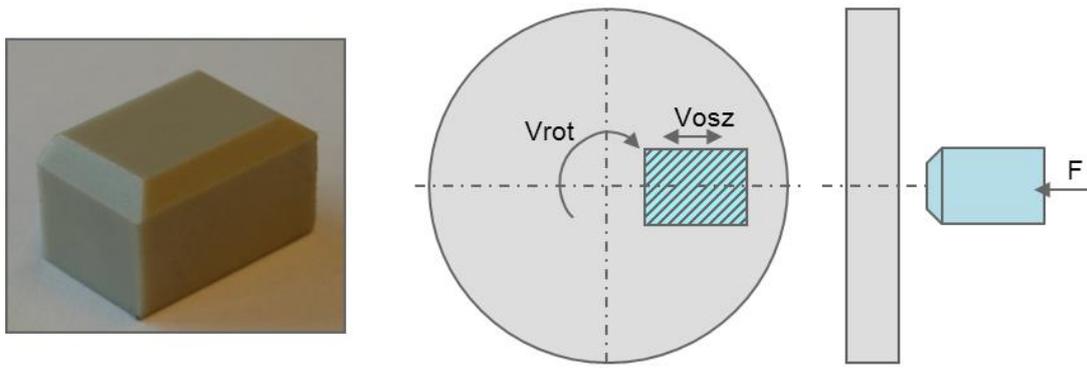


Bild 4.25: Einfache Werkzeuggeometrie und Bearbeitungsanordnung für Werkstoffuntersuchungen.

Da die Werkzeuggeometrie die Wechselwirkungsfläche beziehungsweise -zeit sowie die Verteilung der Flächenpressung definiert, wurden bei den Versuchen in dieser Arbeit unterschiedliche Geometrievarianten untersucht. Eine Vergrößerung der Wechselwirkungsfläche bei der Bearbeitung mit daraus resultierender größerer Wechselwirkungszeit sowie optimierter Verteilung der Flächenpressung wird durch die Ausführung des Werkzeugs als Ringfläche erreicht. Das Werkzeug und die Werkzeuggeometrie mit einer schraffiert gekennzeichneten Wechselwirkungsfläche ist in Bild 4.26 dargestellt. Es wird durch diese Werkzeuggeometrie wie beim Blockwerkzeug eine Kreisringfläche bearbeitet, welche eine Spur mit einer Breite größer als 3 mm hat und somit die Fertigung von Tribometerstiften zulässt.

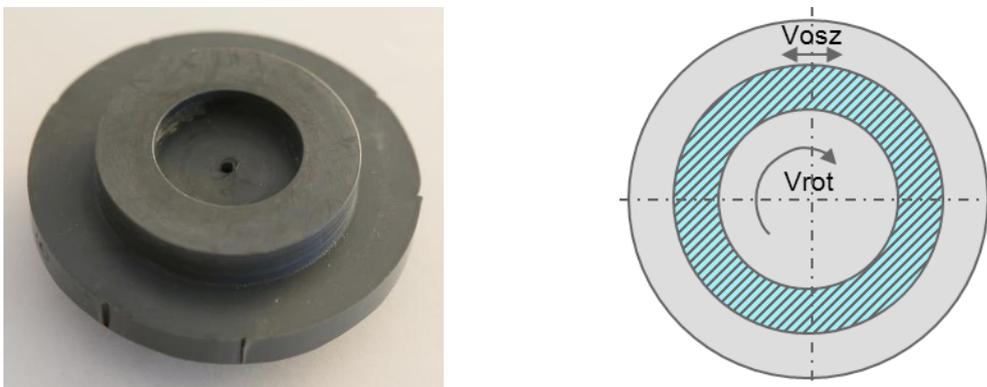


Bild 4.26: Werkzeuggeometrie mit einer Wechselwirkungsfläche als Ring.

### 4.3.2 Werkstoff

In dieser Arbeit wurden für die ersten Läppversuche Polymerwerkstoffe mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften ausgewählt und zur Verwendung als Polymerwerkzeug untersucht. Die gewählten Polymere für den Vergleich der Werkzeugwerkstoffe sind in Bild 4.27 zu sehen. Die Geometrie entspricht dabei der im Kapitel zuvor erklärten einfachen Werkzeuggeometrie.

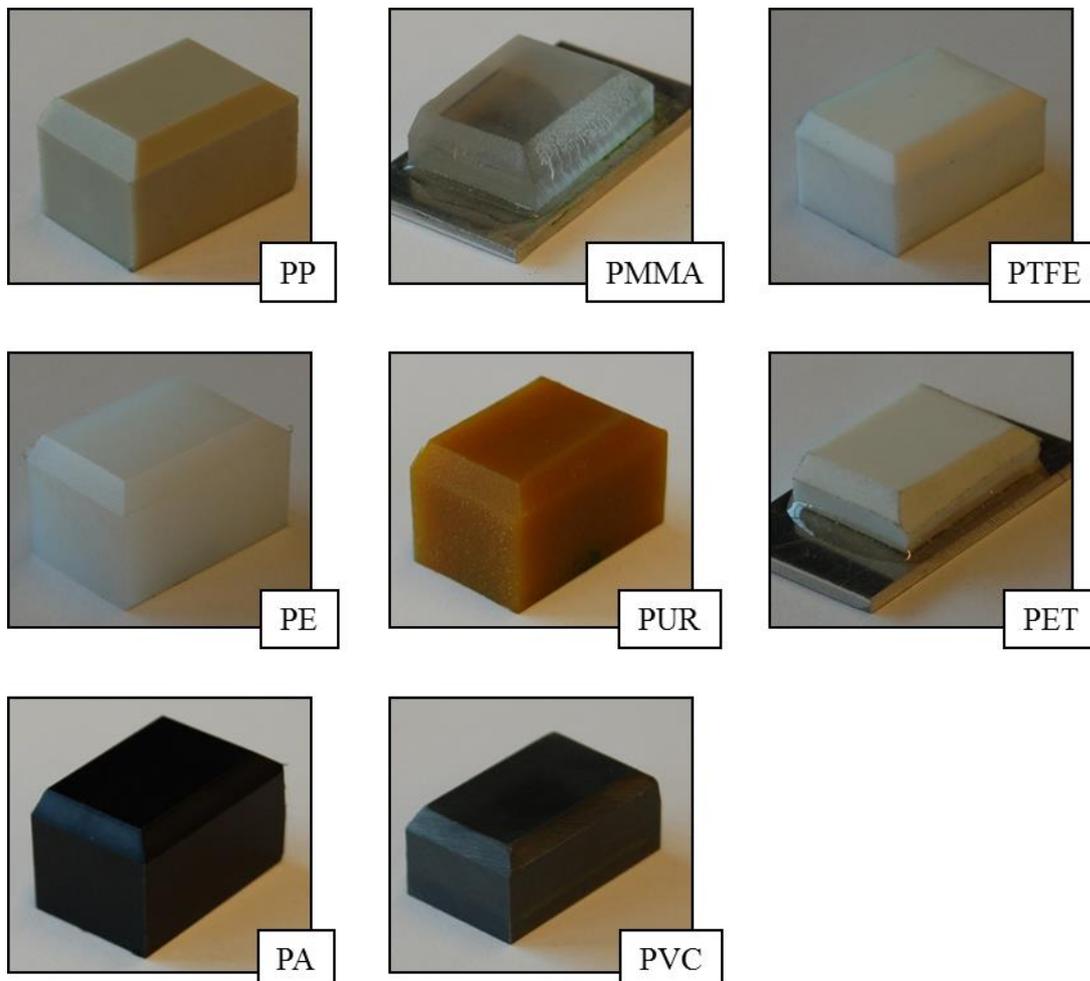


Bild 4.27: Lappwerkzeuge mit einfacher Werkzeuggeometrie aus unterschiedlichen Polymerwerkstoffen.

Zur übersichtlichen Darstellung der stark unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften sind die relevanten Punkte aus den Datenblättern der Polymerhersteller in Tabelle 4.1 zusammengefasst gegenübergestellt. Daraus sind die sehr verschiedenen Werkstoffeigenschaften, wie die Dichte, das E-Modul sowie die maximale Gebrauchstemperatur ersichtlich.

Tabelle 4.1: Vergleich von Werkstoffeigenschaften verschiedener Polymere.

Kurzbezeichnung	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ] nach DIN En ISO	E-Modul [MPa] nach DIN En ISO	Maximale Gebrauchs- temperatur [°C]
	1183-1-A	527	
PP	0,9	1520	100
PMMA	1,19	3000	100
PTFE	2,16	-	260
PE	0,95	1100	69
PUR	1,19	-	-
PET	1,38	3000	115
PA	1,14	3200	85
PVC	1,44	2700	65

### 4.3.3 L ä p p p a s t e

Die L ä p p p a s t e besteht, wie im allgemeinen Teil dieser Arbeit in Kapitel 2.1.3 erklärt, aus einem Trägermedium und dem Abrasivkorn. Die Aufgaben, Funktionen und Eigenschaften der L ä p p p a s t e n b e s t a n d t e i l e sind dort ebenso erläutert. Da bei den Untersuchungen in dieser Arbeit die L ä p p p a s t e nicht verändert wurde, beschränkt sich dieses Kapitel auf die Eigenschaften der verwendeten L ä p p p a s t e. Die L ä p p p a s t e hat die Bezeichnung White Aluminium Oxide 600 der Firma USP.

Bei den Schneidkörnern dieser Paste handelt es sich um Aluminiumoxid mit einer angegebenen Korngröße von 600 Mesh. Die Beschaffenheit der Körner ist mittels einer REM-Aufnahme in Bild 4.28 zu sehen. Hierfür wurden die Schneidkörner vom Trägermedium durch einen Waschprozess getrennt. Die Körner sind scharfkantig und haben eine maximale Seitenlänge von circa 16  $\mu\text{m}$ . Das Verhältnis des Gewichts der Abrasivkörner zum Gewicht der L ä p p p a s t e gibt den Feststoffanteil von 40 Gew.-% an.

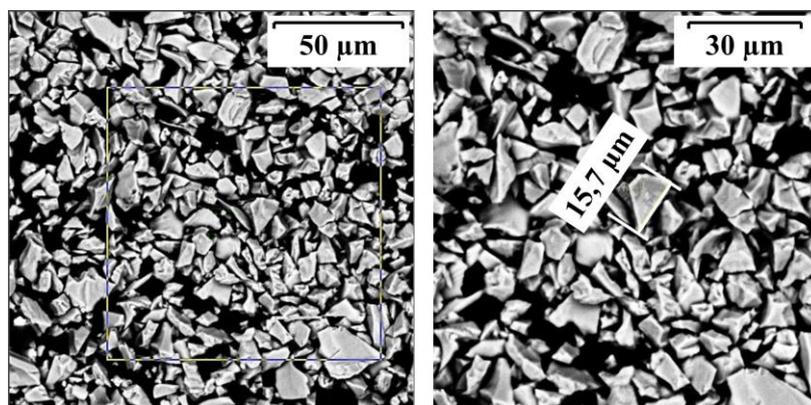


Bild 4.28: Schneidkörnerbeschaffenheit der L ä p p p a s t e White Aluminium Oxide 600 von USP.

Die organischen Bestandteile des Trägermediums wurden ebenso charakterisiert. Hiermit ist nachvollziehbar, ob chemische Elemente bei der Bearbeitung ins Werkstück eingebracht werden, welche ursprünglich aus der Lapppaste stammen. Es wurde ein Gemisch von Fettsäureestern durch die Infrarotspektroskopie bestimmt und mittels der Gaschromatographie erfolgte die Detektion von 72 Gew.-% Kohlenwasserstoffe im mittleren Siedebereich von 160 - 396° C sowie 19 Gew.-% Pflanzenölannteile im Siedebereich von 584 - 630° C. Die dynamische Viskosität der Paste beträgt laut einer Messung mit einem Rotationsviskosimeter 178 – 172 mPas, bei einer Scherrate von 200 1/s und 25° C.

## 4.4 Bearbeitungsprozess

Die Untersuchungen zum Polymerlappen wurden wie zuvor erläutert, anhand von Bearbeitungsversuchen an ebenen und geschliffenen Stahlscheiben durchgeführt. Da die kinematischen und kinetischen Verhältnisse bei der Bearbeitung für die Ausbildung des dritten Körpers mitentscheidend sind, ist es notwendig, die Zusammenhänge bei den durchgeführten Bearbeitungsversuchen zu erläutern.

### 4.4.1 Kinematik

Beim Lappprozess auf der Drehmaschine werden die kinematischen Zusammenhänge des Außenrundlappens von Bauteilen mit zylindrischer Außenkontur nachempfunden. Eine schematische Darstellung der Kinematik des abzubildenden Außenrundlappens ist in Bild 2.5 gezeigt. Die Bearbeitung erfolgt beim Außenrundlappen sowie beim angepassten Bearbeitungsprozess auf der Drehmaschine durch die Überlagerung zweier Schnittbewegungen, welche die für diese Bearbeitung typischen Kreuzstrukturen erzeugen. Das formübertragende Werkzeug führt in beiden Fällen die Oszillation und das Werkstück die Rotation aus. Die Richtung der Oszillations- und Rotationsbewegung sind bei der Bearbeitung der flachen Modellscheiben in den schematischen Darstellungen der Werkzeugvarianten in Bild 4.25 und Bild 4.26 mit Geschwindigkeitsvektoren eingezeichnet.

Die Oszillationsbewegung des Werkzeugs besteht aus Beschleunigungsphasen und Umkehrpunkten, bei denen keine Geschwindigkeit vorhanden ist. Die Bewegung wird durch den Sinusverlauf des Oszillationswegs  $s_{osz}$  mit vorgegebener Oszillationsamplitude  $a_{osz}$ , der Oszillationsfrequenz  $f_{osz}$  zum Zeitpunkt  $t$  beschrieben. Demnach gilt

$$s_{osz}(t) = a_{osz} \sin(2\pi f_{osz} t). \quad 4-1$$

Durch die Ableitung des Wegs erhält man die zeitlich abhängige Oszillationsgeschwindigkeit mit

$$v_{osz}(t) = \frac{ds_{osz}(t)}{dt} = 2\pi f_{osz} a_{osz} \cos(2\pi f_{osz} t). \quad 4-2$$

Parallel zur erläuterten Oszillation des Werkzeugs führt das Werkstück eine Rotationsbewegung mit der Geschwindigkeit  $v_{rot}$  aus. Die Geschwindigkeit wird durch die Drehzahl  $n$  und dem Durchmesser  $d$  vorgegeben und kann durch die Beziehung

$$v_{rot} = \pi d n \quad 4-3$$

berechnet werden. Beim Außenrundlappen der Nockenwelle ist der Durchmesser  $d$  gleich dem Wellendurchmesser  $d_{NW}$ . Bei der hier betrachteten Bearbeitung der flachen Modellscheiben wirkt die Bearbeitung dagegen nicht auf einem einzelnen Durchmesser. Es ist eine Variation der Rotationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des betrachteten Durchmessers vorhanden. Jedoch sind die Geschwindigkeitsunterschiede im benötigten Bereich von 3 mm für die Darstellung der Tribometerstifte vernachlässigbar klein. Deshalb wird bei der Betrachtung der Rotationsgeschwindigkeit in diesem Fall die mittlere Geschwindigkeit verwendet. Durch die Beschreibung der bearbeiteten Ringfläche mit dem Außendurchmesser  $D$  und dem Innendurchmesser  $d_i$  ergibt sich der mittlere Durchmesser zu

$$d_m = d = d_i + \frac{(D-d_i)}{2}. \quad 4-4$$

#### 4.4.2 Kinetik

Bei der kinetischen Betrachtung der Lappbearbeitung ist die eingebrachte Kraft durch den pneumatischen Druckzylinder im Finishgerät sowie die beiden zuvor erläuterten Geschwindigkeiten in Oszillations- und Rotationsrichtung von Bedeutung. Die Geschwindigkeiten  $v_{osz}$  und  $v_{rot}$  sowie die Kraft  $F_{pneu}$  sind in Bild 4.29 eingezeichnet. Durch die eingebrachte Kraft und den beiden Bewegungen entstehen an der Kontaktstelle von Werkzeug und Werkstück Reaktionskräfte in Oszillations- und Rotationsrichtung  $F_{osz}$  und  $F_{rot}$ . Die Energie für die Rotationskraft wird durch den Antrieb der Drehmaschine und die Energie für die Oszillation durch den Antrieb im Finishgerät aufgebracht. Die eingebrachte Kraft durch den pneumatischen Druckzylinder im Finishgerät wird dabei über einen Druckmanometer reguliert. Der eingestellte Druck sowie die Fläche des Pneumatikkolbens ergeben die auf das Polymerwerkzeug wirkende Kraft. Diese Kraft erzeugt, in Abhängigkeit der Bearbeitungskontaktfläche, eine Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück. Die Bestimmung der beiden Bearbeitungskräfte erfolgt im nachfolgenden Kapitel mit der Erläuterung der hierfür verwendeten Messtechnik.

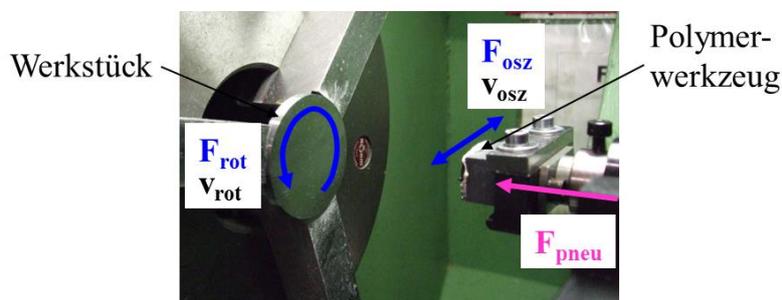


Bild 4.29: Kinetik und Kinematik des Polymerlappens von flachen Scheiben.

## 4.5 Messtechnik bei den Bearbeitungsversuchen

Zur Bewertung der im Kapitel zuvor erläuterten kinematischen und kinetischen Verhältnisse ist es notwendig, die beschreibenden Messgrößen zu bestimmen. Die Oszillations- und Rotationsgeschwindigkeit zur Beschreibung der Kinematik, wie sie in Kapitel 4.4.1 erläutert sind, werden anhand von Vorgaben an der Bearbeitungsanlage eingestellt oder aus den einzustellenden Parametern berechnet. Zur Beschreibung der Kinetik ist es notwendig, die Bearbeitungskräfte direkt während der Bearbeitung aufzuzeichnen. Dies erfolgt mit einem Dynamometer, wie es in diesem Kapitel aufgeführt ist. Anhand der aufgeführten kinematischen und kinetischen Größen wird der Energieeintrag bei den Bearbeitungsversuchen bestimmt. Wie in Kapitel 2.2.2 bereits für den tribologischen Kontakt aufgeführt, ist der Energieeintrag eine Größe, welche die Erzeugung von Wärme, Verschleiß und der Materialumwandlung beschreibt. Durch die Bestimmung dieser Messgröße bei der Endbearbeitung ist es hier, wie in Kapitel 2.3 angedeutet, ebenso möglich, Rückschlüsse auf die Ausbildung des dritten Körpers beim Bearbeitungsprozess abzuleiten. Der Energieeintrag wird in dieser Arbeit nach den zwei Bewegungsrichtungen des Läppprozesses in den Energieeintrag durch die Oszillation und den Energieeintrag durch die Rotation getrennt aufgeführt. Die Herleitung und Bestimmung des Energieeintrags erfolgt in Kapitel 4.5.2.

### 4.5.1 Dynamometer

Das Dynamometer zur Aufzeichnung der Bearbeitungskräfte während des Polymerlappens beruht auf dem Messprinzip der direkten Kraftmessung mittels piezoelektrischer Sensoren. Unter Einwirkung einer Kraft auf den piezoelektrischen Kristall des Sensors entsteht eine Ladung, die mittels eines Ladungsverstärkers aufgezeichnet wird. Die Ladung ist proportional zur anliegenden Kraft. Die Signale des Sensors werden im eingebauten Zustand vor der Bearbeitung auf Null gesetzt. Damit sind die Auswertungen unabhängig von Kräften durch die Einbausituation. Das verwendete Dynamometer ist ein rotierendes Vierkomponenten Messsystem der Firma Kistler, wie es in Bild 4.30 gezeigt ist. Bei diesem Mehrkomponentendynamometer werden die Quarzmeßelemente mit unterschiedlicher Kristallorientierung zu einem Stapel zusammengebracht. Die Erfassung der Ladungen erfolgt durch Elektroden, welche von jedem Element nach außen geführt sind. Die einzelnen vier Elemente sind nur für jeweils eine Komponente empfindlich. Zu den vier Komponenten des eingesetzten Dynamometers gehören drei Kräfte für die drei Raumrichtungen  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  sowie das Moment  $M_z$  um die Rotationsachse  $z$  des Dynamometers beziehungsweise der Drehmaschinenspindel. Der Dynamometer wird im Versuchsaufbau mit einem Adapter direkt im Backenfutter der Drehmaschinenspindel gespannt, wie in Bild 4.30 zu sehen. Die zu bearbeitenden Stahlscheiben sind auf der gegenüberliegenden Seite über einem Triboscheibenhalter zentrisch mit dem Dynamometer befestigt. Die Übertragung der Signale an den Messverstärker erfolgt berührungslos über ein Telemetriesystem. Der Stator des Telemetriesystems wird für die Versuche an einer Vorrichtung aus Aluminiumprofilen befestigt.



Bild 4.30: Kistler 4K Dynamometer Type 9123CQ14 mit Anordnung in der Bearbeitungsanlage.

## 4.5.2 Messdatenauswertung

Zur Bestimmung der Kräfte und zur Berechnung des Energieeintrags in Oszillations- und Rotationsrichtung der Läppbearbeitung ist eine Aufbereitung und Auswertung der Dynamometermessdaten notwendig. In Bild 4.31 sind die benötigten Bearbeitungskräfte  $F_{osz}$  und  $F_{rot}$  sowie die hierfür verfügbaren Messkomponenten  $F_x$ ,  $F_y$  und  $M_z$  des Dynamometers gekennzeichnet.

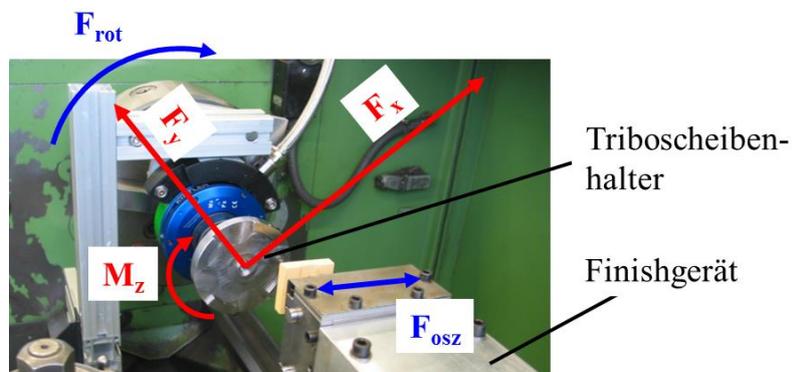


Bild 4.31: Bearbeitungskräfte und verfügbare Messkomponenten des Dynamometers.

Da der Dynamometer ein rotierendes Messsystem ist, erfordert die Bestimmung der Bearbeitungskraft in Oszillationsrichtung des Werkzeugs eine Koordinatentransformation der aufgezzeichneten Kräfte  $F_x$ ,  $F_y$  in das feste Koordinatensystem. Dieses ist horizontal und vertikal zur Oszillationsrichtung ausgerichtet. Somit berechnet sich die Kraft  $F_{osz}$  in Oszillationsrichtung des Werkstücks, wie aus Bild 4.32 ersichtlich, zu

$$F_{osz}(\varphi) = \cos(\varphi)F_x - \sin(\varphi)F_y. \quad 4-5$$

Die winkelabhängige Koordinatentransformation wird zur Berechnung der zeitlich aufgezeichneten Kräfte mit

$$\varphi(t) = nt360 \quad 4-6$$

umgerechnet und angewendet. Dabei gibt  $n$  die an der Drehmaschine eingestellte Drehzahl an. Vertikal zu der Kraft  $F_{osz}$  angeordnet wirkt die Gewichtskraft  $F_G$  des Dynamometers mit eingespanntem Werkstück, welche für die Bewertung der Bearbeitungskräfte irrelevant ist und deshalb hier nicht betrachtet wird.

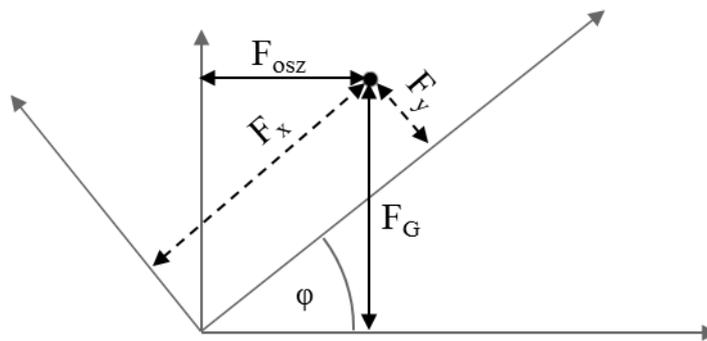


Bild 4.32: Koordinatentransformation des rotierenden Koordinatensystems am Dynamometer.

Die Bestimmung der Kraft in Rotationsrichtung  $F_{rot}$  erfolgt direkt aus dem aufgezeichneten Moment  $M_z$ . Dieses Moment wirkt auf der bearbeiteten Ringfläche am Werkstück. Somit erfolgt die Berechnung der Kraft  $F_{rot}$  mit dem mittleren Durchmesser  $d$  der bearbeiteten Ringfläche zu

$$F_{rot}(t) = \frac{2}{d} M_z(t). \quad 4-7$$

Zum Vergleich der bei den Versuchen vorhandenen Bearbeitungskräfte, werden die Kräfte in Oszillations- und Rotationsrichtung durch eine charakteristische Kurve approximiert. Zur Beschreibung der Kräfte in Oszillationsrichtung werden die Maximalkräfte am Umkehrpunkt in positiver Krafrichtung bewertet. Diese Punkteschar wird durch den gleitenden Mittelwert abgebildet. Der Kurvenverlauf für die approximierte Oszillationskraft  $\overline{F_{osz}}$  ist in Bild 4.33 grün dargestellt.

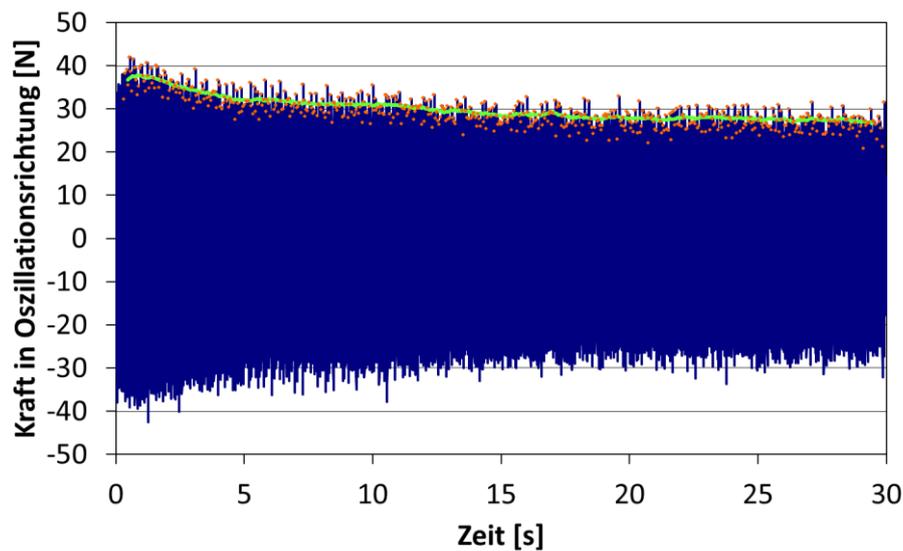


Bild 4.33: Kräfteverlauf in Oszillationsrichtung der Läppbearbeitung mit gekennzeichneten Maximalwerten sowie die hierfür beschreibende gleitende Mittelwertskurve.

Die in Rotationsrichtung wirkende Kraft während der Bearbeitung wird ebenso durch den gleitenden Mittelwert dargestellt. In Bild 4.34 sind die Messwerte der Rotationskraft mit der Farbe Blau und die gemittelte Kurve mit der Farbe Magenta dargestellt.

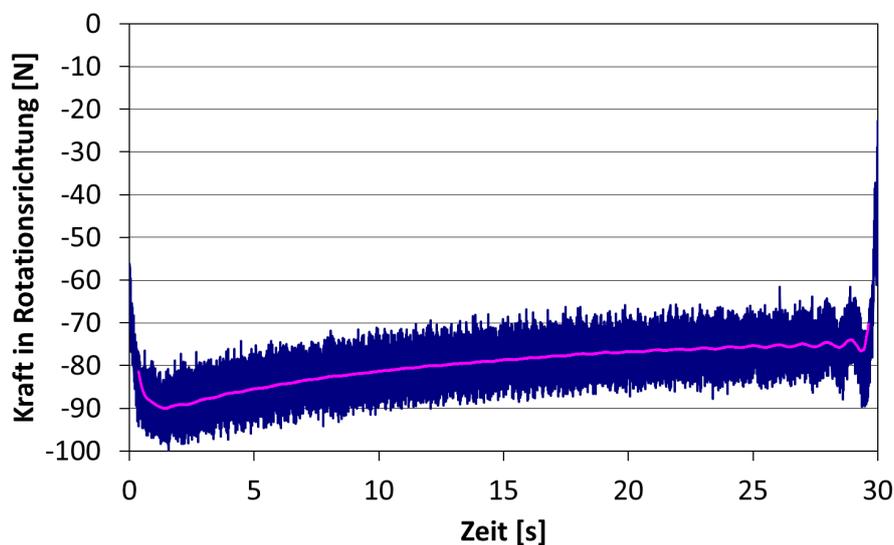


Bild 4.34: Kräfteverlauf in Rotationsrichtung der Läppbearbeitung mit der gleitenden Mittelwertskurve.

Die wirkenden Bearbeitungskräfte im Zusammenhang mit den in Kapitel 4.4.1 hergeleiteten Bearbeitungsgeschwindigkeiten, ergeben durch Multiplikation den Energieeintrag des Bearbeitungsprozesses. Demnach gilt

$$\dot{E}_{osz} = \frac{dW_{osz}}{dt} = v_{osz}(t)F_{osz}(t) \quad 4-8$$

und

$$\dot{E}_{rot} = \frac{dW_{rot}}{dt} = v_{rot}(t)F_{rot}(t). \quad 4-9$$

Aus den zeitlich abhängigen Energieeinträgen wird die eingebrachte Energie bei der Bearbeitung mittels numerischer Integration bestimmt. Somit ergibt sich die eingebrachte Energie in Oszillations- und Rotationsrichtung für eine Bearbeitung zu

$$E_{osz} = \sum_{i=0}^{i=end} (t_{i+1} - t_i) \left( \dot{E}_{osz i} + \frac{\dot{E}_{osz i+1} - \dot{E}_{osz i}}{2} \right) \quad 4-10$$

und

$$E_{rot} = \sum_{i=0}^{i=end} (t_{i+1} - t_i) \left( \dot{E}_{rot i} + \frac{\dot{E}_{rot i+1} - \dot{E}_{rot i}}{2} \right). \quad 4-11$$

Die Zählvariable  $i$  steht für die Anzahl der Einträge der  $\dot{E}_{osz}$ - und  $\dot{E}_{rot}$ -Vektoren sowie den dazugehörigen Zeitpunkten  $t$ . Durch die Bestimmung der eingebrachten Energie werden zusammen mit der Kontaktfläche, welche sich bei der Bearbeitung zur Übertragung der Energie einstellt, die Vorgänge beziehungsweise die Belastung des oberflächennahen Werkstückbereichs beschrieben. Da sich die bei der Bearbeitung einstellende Kontaktfläche bei den hier verglichenen Polymerlappbearbeitungen nicht stark unterscheiden kann, ist es möglich, hier den Energieeintrag als charakteristischen Wert für die Belastungen bei den Bearbeitungsvarianten anzusetzen.

## 5 Fertigungstechnische Untersuchungen

### 5.1 Zielgrößen

Eine Grundvoraussetzung für die Bewertung des Polymerlappens besteht in der Erzeugung einer Bauteiloberfläche mit geringstmöglichen Geometrieabweichungen. Nach [48] ist bei einem Gleitlager die Auswirkung der Rauheit auf den Reibwert und auf die Einlaufdauer von Bedeutung. Es wird gezeigt, dass im Bereich der Grenz- und Mischreibung eine Welle mit geringerer Rauheit zu kleineren Reibwerten führt. Anhand des Materialabtrags im Einlauf wird zudem gezeigt, dass mit feineren Wellen schneller ein stabiler Oberflächenzustand erreicht wird. Daraus ergibt sich die Forderung, bei den Läppversuchen eine Oberflächentopographie anzustreben, welche eine möglichst geringe Oberflächenrauheit aufweist. Damit verlässliche Triboversuche durchführbar sind, muss die durch den Läppprozess erzeugte Oberflächentopographie gleichmäßig und reproduzierbar darstellbar sein. Zur Erreichung dieser Grundanforderungen wurden zum einen die fertigungstechnischen Untersuchungen mit einfacher Blockwerkzeuggeometrie aus verschiedenen Werkzeugwerkstoffen sowie die Läppversuche mit variiertem Werkzeuggeometrie durchgeführt, ausgewertet und bewertet.

Nach den Untersuchungen zur Erfüllung der Grundvoraussetzungen wurden Bearbeitungsparameter variiert, welche einen geringen Einfluss auf die erzeugte Oberflächentopographie haben. Dabei liegt das Hauptaugenmerk bei diesen Bearbeitungsversuchen auf den Veränderungen der Gefügeausbildung, der chemischen Zusammensetzung und den Festigkeitseigenschaften im oberflächennahen Werkstoffbereich, welche durch einen variierten Energieeintrag bei der Läppbearbeitung hervorgerufen werden. Zudem wurden die bei diesen Bearbeitungsversuchen gefertigten Proben für die Tribometerversuche verwendet und die Ergebnisse der Bearbeitung mit dem tribologischem Bauteilverhalten korreliert.

### 5.2 Versuchsablauf

Die Bearbeitungsversuche wurden auf der Bearbeitungsanlage, wie in Kapitel 4.2 vorgestellt, durchgeführt. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Versuche wurden mehrere Schritte vor der eigentlichen Bearbeitung ausgeführt. Hierzu gehört die horizontale und vertikale Positionierung des Finishgeräts und dem dort eingespannten Werkzeug zum Werkstück. Bei der einfachen Blockwerkzeuggeometrie wird das Werkzeugzentrum auf dem zu bearbeitenden Radius der im Backenfutter eingespannten Modellscheibe eingestellt. Beim Ringflächenwerkzeug werden die Zentren von Werkzeug und Werkstück konzentrisch zueinander angeordnet. Damit bei der Bearbeitung die Flächenpressung zwischen Werkstück und Werkzeug gleichmäßig verteilt ist, wird das Werkzeug vor dem eigentlichen Läppprozess durch einen Abrichtprozess angepasst. Hierfür wird eine Abrichtscheibe, wie in Bild 5.1 dargestellt, verwendet. Diese wird beim Abrichtvorgang, wie die zu bearbeitenden Modellscheiben, im Backenfutter der Drehmaschine rotiert und das oszillierende Werkzeug im Finishgerät mit dem

Werkzeugschlitten zugestellt. Neben der Anpassung der Werkzeugmakrogeometrie wird beim Abrichtvorgang eine vergleichbare Werkzeugoberflächentopographie als Ausgangszustand für die Bearbeitungsversuche erreicht. Nach dem Abrichtvorgang erfolgt der Läpppastenauftrag auf das Werkzeug. Das Werkzeug wird dabei vollständig mit Läpppaste benetzt. Nach dem Blockieren des Werkzeugschlittens unter dem Finishgerät sowie der eingeschalteten Rotations- und Oszillationsbewegung, erfolgt die Läppbearbeitung. Dazu wird die eingestellte Flächenpressung zwischen Werkstück und Werkzeug durch Betätigung des Hydraulikzylinders am Finishgerät erzeugt.

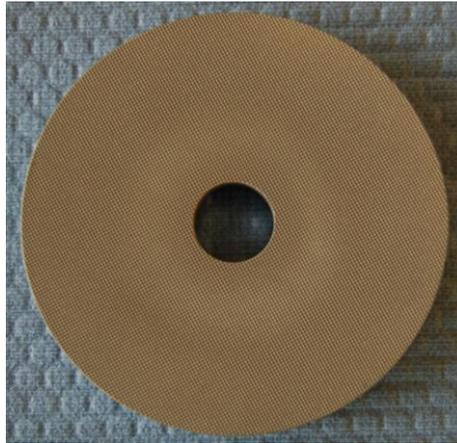


Bild 5.1: Abrichtscheibe zum Abrichten der Polymerwerkzeuge.

## 5.3 Grundlagenuntersuchungen des Werkzeugs

Die Grundlagenuntersuchungen wurden mit mehreren Teilversuchen durchgeführt. Damit werden neben den optimalen Prozessparametern, der Werkzeugwerkstoff und die Werkzeuggeometrie zur Bestimmung des besten Setups, hinsichtlich der erreichbaren Rauheit für das Polymerläppen, definiert.

### 5.3.1 Werkzeugwerkstoff

Die Durchführung der Versuche zur Bestimmung des geeignetsten Werkzeugwerkstoffs erfolgte mit der einfachen Blockwerkzeuggeometrie, wie in Bild 4.25 gezeigt. Die Werkzeugbreite beträgt 20 mm und die Höhe 14 mm. In Abhängigkeit der Grenzen der Bearbeitungsanlage wurden hierfür mögliche Prozessparameter gewählt. Zur Bestimmung der optimalen Parameter des Polymerläppens wurde ein statistischer  $2^3$  vollfaktorieller Versuchsplan angewendet. Die 2 steht für die Stufen jedes Faktors und die 3 für die Anzahl der Faktoren. Hieraus ergeben sich  $2^3$  Kombinationen und somit 8 Teilversuche. Die Variationen der sogenannten Faktoren beziehungsweise Bearbeitungsparameter sind in Bild 5.2 dargestellt. Es wird die Oszillationsamplitude mit 1 und 5 mm, die Oszillationsfrequenz mit 600 und 1200 DH/min und der eingestellte Bearbeitungsdruck mit 1 und 4 bar variiert. Die Drücke 1 und 4 bar bewirken beim Läppen mit der einfachen Blockwerkzeuggeometrie eine Flächenpressung zwi-

schen Werkstück und Werkzeug von 0,43 und 1,7 MPa. Der mittlere, bearbeitete Durchmesser auf der Scheibe beträgt 34 mm. Die Werkstückrotation wird mit 190 U/min und die Bearbeitungszeit mit 30 s konstant gehalten. Durch Vorversuche konnte festgestellt werden, dass mit dieser gewählten Bearbeitungszeit gewährleistet werden kann, dass sich die erreichte Oberflächenrauheit bei einer längeren Bearbeitungszeit nicht mehr verändert.

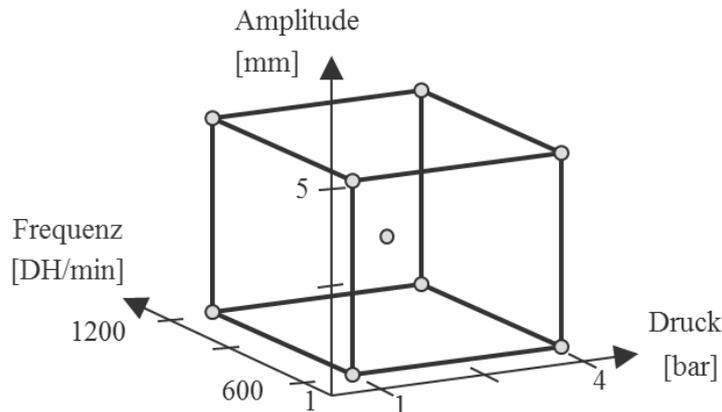


Bild 5.2: Statistischer Versuchsplan zur Bestimmung der optimalen Bearbeitungsparameter.

Die in Bild 4.27 aufgeführten Werkzeugwerkstoffe wurden alle nach der beschriebenen statistischen Versuchsplanung mit denselben Bearbeitungsparametern getestet und die erzeugten Oberflächen mit der gleichen Auswertemethodik bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass die optimalen Bearbeitungsparameter zur Erzeugung einer möglichst geringen Oberflächenrauheit unabhängig vom Werkzeugwerkstoff immer dieselben sind. Deshalb werden der Übersichtlichkeit halber nur die Ergebnisse aus der statistischen Versuchsreihe mit dem PVC als Werkzeugwerkstoff vorgestellt. Die sich daraus erschließenden optimalen Bearbeitungsparameter werden, falls nicht anders angegeben, für alle nachfolgenden Versuche angewendet.

Neben der Auswertung der reduzierten Spitzenhöhe mit dem  $R_{pk}$ -Wert erfolgt hier die Bestimmung der Ergebnisse hinsichtlich der gemittelten Rautiefe, welche mit dem  $R_z$ -Wert angegeben wird. Diese beiden Rauheitswerte beschreiben die veränderte Topographie durch das Polymerläppen am besten.

Aus den Versuchsergebnissen mit dem PVC-Blockwerkzeug leitet sich das in Bild 5.3 gezeigte Pareto-Diagramm für den  $R_{pk}$ -Wert ab. Mit Hilfe des Pareto-Diagramms werden aus vielen möglichen Einflussfaktoren auf den Bearbeitungsprozess diejenigen herausgefiltert, welche eine größte Signifikanz für die betrachtete Zielgröße haben. Die Signifikanz der jeweiligen Einflussgröße kann dabei direkt aus dem Diagramm abgelesen werden. Die absoluten Werte der Effekte sind als Balken dargestellt. Als signifikante Größen gelten alle Effekte, die über die rot dargestellte Signifikanz-Schwelle hinausreichen. Die Signifikanz-Schwelle wird für die Auswertungen mit einem 95-prozentigen Vertrauensbereich festgelegt. Somit ist die Wahrscheinlichkeit 95 Prozent, dass die über dieser Schwelle liegenden Einflussgrößen signifikante Größen des Polymerläppens für das betrachtete Werkzeug im Hinblick auf die betrachtete Zielgröße sind. Beim PVC-Blockwerkzeug und dem Rauheitswert  $R_{pk}$  als Zielgröße,

wie in Bild 5.3 dargestellt, sind demnach die signifikanten Größen der Druck, die Wechselwirkung des Drucks mit der Amplitude sowie die Wechselwirkung zwischen Amplitude und Frequenz.

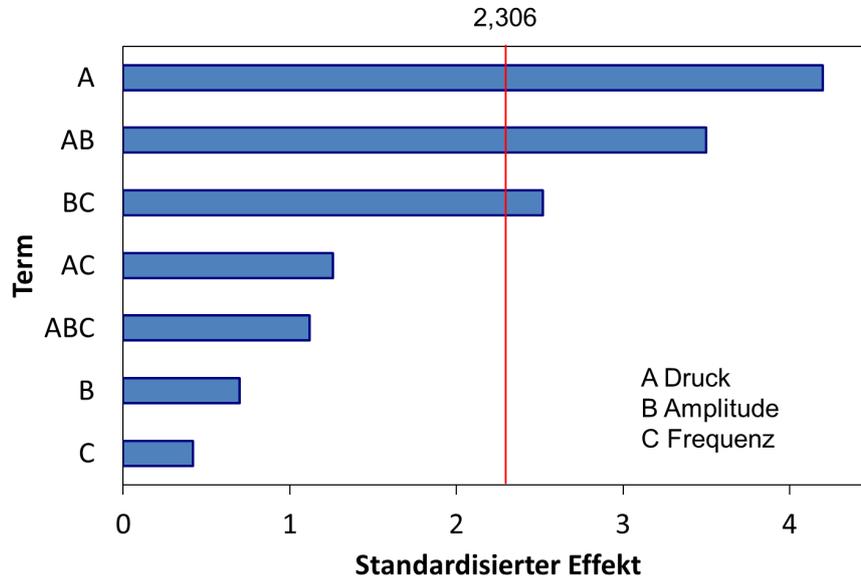


Bild 5.3: Pareto diagramm für den  $R_{pk}$ -Wert beim Polymerlappen mit dem PVC Blockwerkzeug.

Aufgrund der für den betrachteten  $R_{pk}$ -Wert bestimmten Einflussgrößen und Wechselwirkungen mit Signifikanz, wird der  $R_{pk}$  mit einem Konturdiagramm in Abhängigkeit der Oszillationsfrequenz und -amplitude bei einem Haltewert des Drucks von 1,5 und 4 bar dargestellt, siehe Bild 5.4 und Bild 5.5. Die farbliche Verteilung veranschaulicht die  $R_{pk}$ -Werteverteilung. Der Wertebereich der jeweiligen Farben ist dabei direkt im Konturdiagramm angegeben. Das Konturdiagramm für 1,5 bar zeigt  $R_{pk}$ -Werte in einem Bereich von 0,12 bis 0,24  $\mu\text{m}$ , siehe Bild 5.4. Am geringsten sind diese Werte bei einer Frequenz von 1200 DH/min sowie einer Amplitude von 1 mm. Beim Vergleich der beiden Konturdiagramme ist festzustellen, dass die  $R_{pk}$ -Werte bei einem Druck von 4 bar, wie in Bild 5.5 zu sehen, kleiner als die Werte bei 1,5 bar sind. Die  $R_{pk}$ -Werte sind hier im Bereich von 0,06 bis 0,12  $\mu\text{m}$ . Die geringsten Werte werden hier bei einer Amplitude von 5 mm erreicht. Dabei ist die Auswirkung der Frequenz nicht maßgebend, da der Gradient der Veränderung sehr gering ist. Diese Prozessparameter gelten als Optimum für die Betrachtung der  $R_{pk}$ -Werte beim Polymerlappen mit dem PVC-Blockwerkzeug.

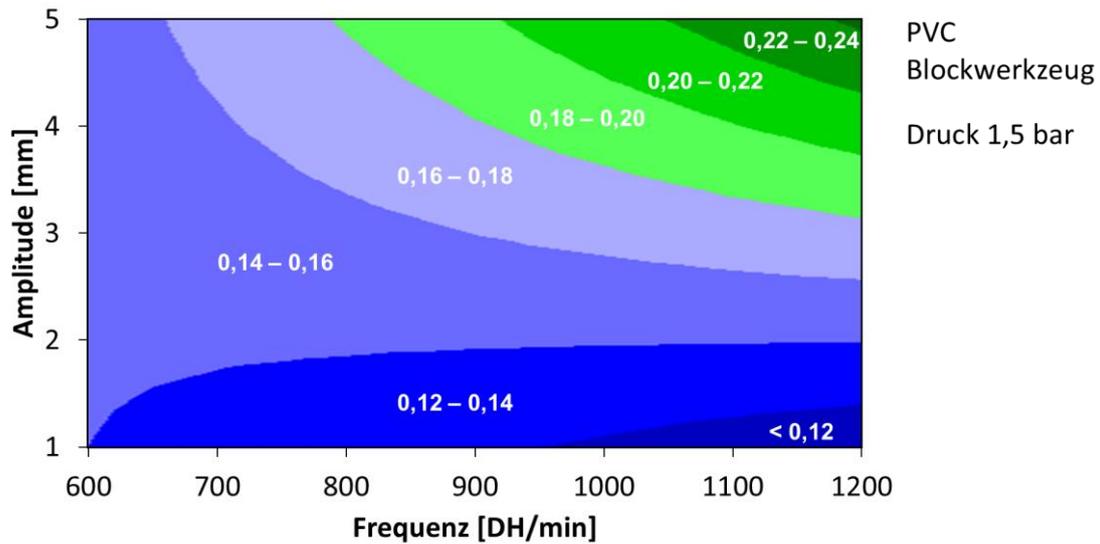


Bild 5.4: Konturdiagramm des  $R_{pk}$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz (Druck 1,5 bar).

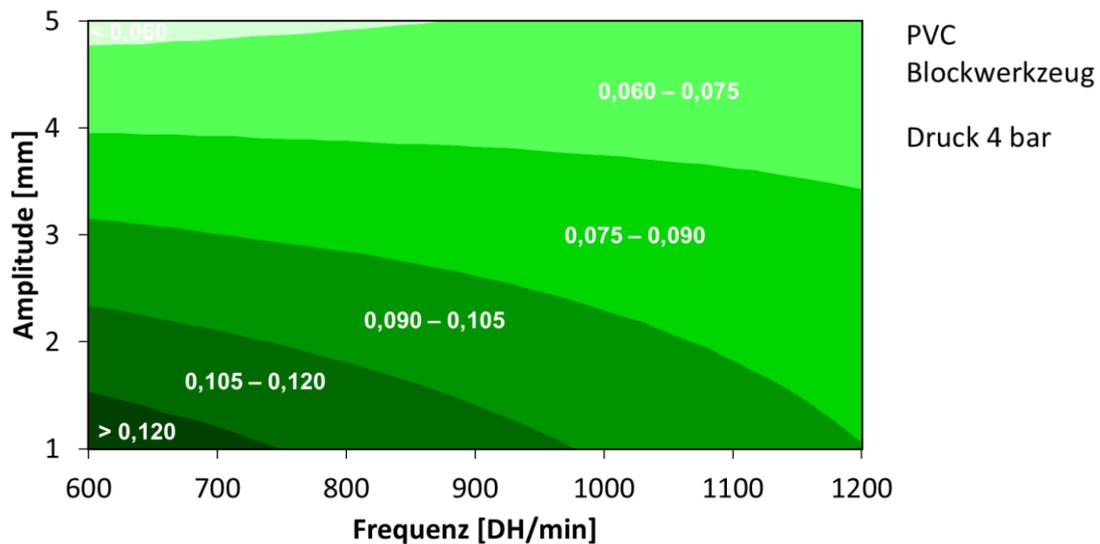


Bild 5.5: Konturdiagramm des  $R_{pk}$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Frequenz (Druck 4 bar).

In Bild 5.6 ist das Pareto-Diagramm für die Zielgröße  $R_Z$  abgebildet. Demnach sind die signifikanten Terme für die gemittelte Rautiefe der Druck sowie die Wechselwirkung von Druck mit der Amplitude.

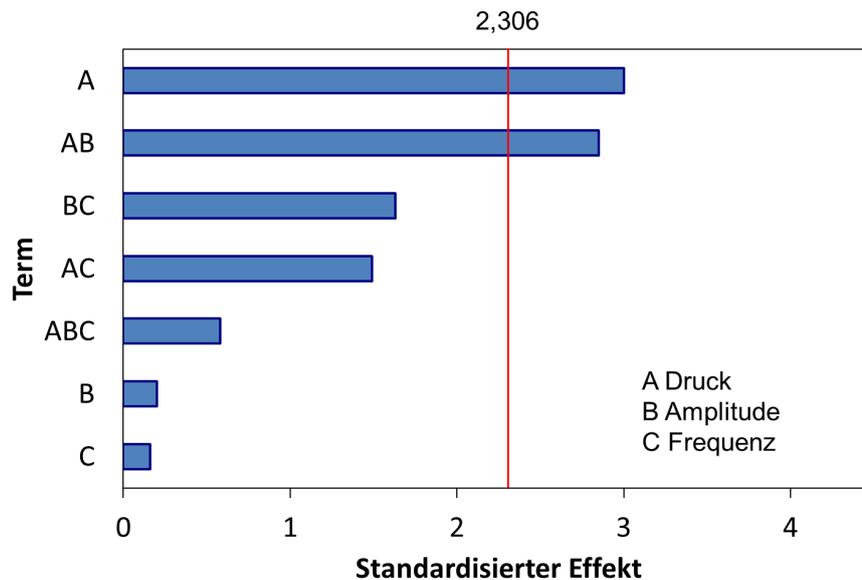


Bild 5.6: Paretodiagramm für den  $R_Z$ -Wert beim Polymerlappen mit dem PVC Blockwerkzeug.

Zur Darstellung der Wechselwirkung von Druck und Amplitude wurden Konturdiagramme bei einer konstanten Frequenz ausgewertet. In Bild 5.7 ist das Konturdiagramm für die Frequenz von 600 DH/min und in Bild 5.8 für 1200 DH/min zu sehen. Die  $R_Z$ -Werte für die gemittelte Rautiefe sind im betrachteten Bereich mit einer Frequenz von 600 DH/min geringfügig größer als die Werte bei der Frequenz von 1200 DH/min. Für eine Frequenz von 600 DH/min liegen die  $R_Z$ -Werte im Bereich von 2,7 bis 3,9  $\mu\text{m}$ . Bei einer Frequenz von 1200 DH/min variiert die gemittelte Rautiefe  $R_Z$  von 2,8 bis 3,4  $\mu\text{m}$ . Bei beiden Frequenzen wird die kleinste gemittelte Rautiefe mit einer Oszillationsamplitude von 5 mm und einem Druck von 4 bar erreicht.

Aus der Betrachtung der gemittelten Rautiefe  $R_Z$  und der zuvor bewerteten Rauigkeit der reduzierten Spitzenhöhe  $R_{pk}$  ergeben sich die optimalen Bearbeitungsparameter für eine reduzierte Rauigkeit beim Polymerlappen. Der optimale Druck ist demnach 4 bar, die Frequenzamplitude 5 mm und die optimale Oszillationsfrequenz 1200 DH/min. Die Drehzahl und die Bearbeitungszeit wurden wie erwähnt konstant belassen. Wie bereits angegeben, ist deshalb die einzustellende Werkzeugrotation 190 U/min und die anzuwendende Bearbeitungszeit 30 s.

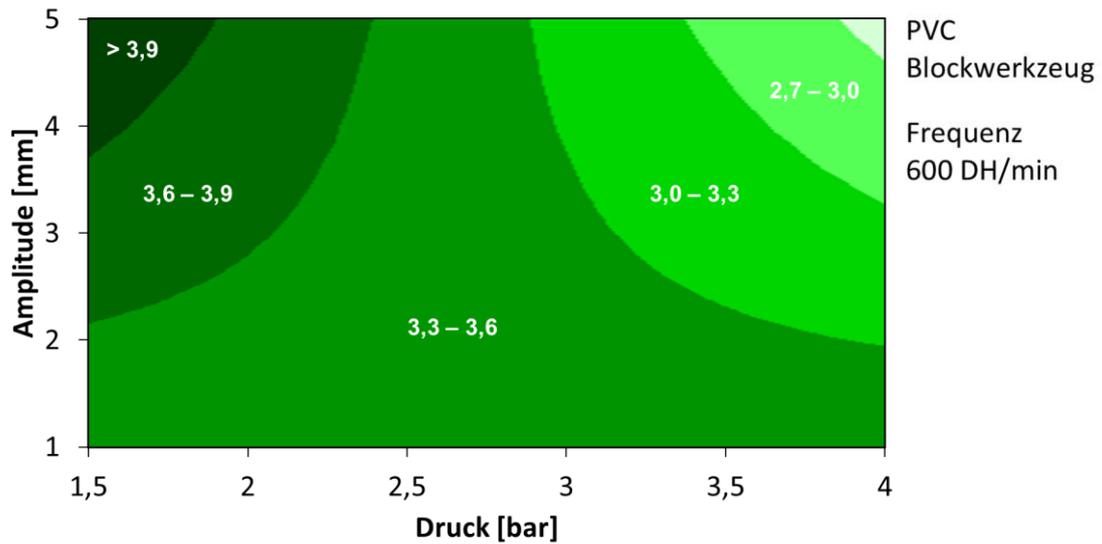


Bild 5.7: Konturdiagramm des  $R_Z$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Druck (Frequenz 600 DH/min.).

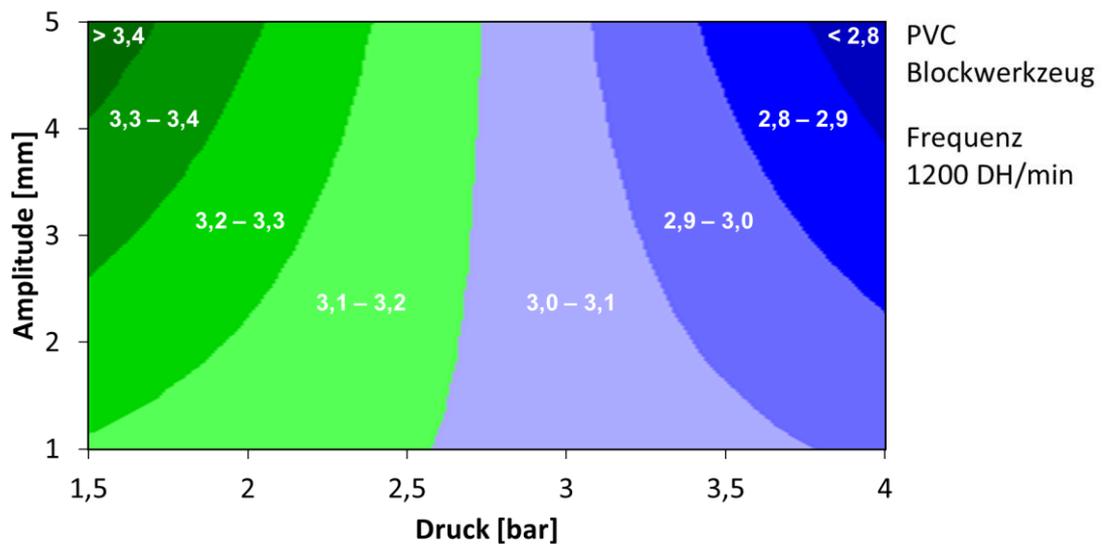


Bild 5.8: Konturdiagramm des  $R_Z$ -Werts in Abhängigkeit von Amplitude und Druck (Frequenz 1200 DH/min.).

Zum Vergleich der erreichbaren Rauheit mit den betrachteten Werkzeugwerkstoffen werden hier die Ergebnisse mit den eingestellten optimalen Bearbeitungsparametern gezeigt.

Die Bewertung der erreichbaren reduzierten Spitzenhöhe  $R_{pk}$  erfolgt anhand der Darstellung der Werte im Diagramm, siehe Bild 5.9. Die beiden Säulen stellen zwei Messungen der jeweiligen Variante dar. Bei den Werkstoffen PP, PMMA und PET ist die erzeugte Topographie

bezüglich der reduzierten Spitzenhöhe sehr inhomogen. Die anderen Werkstoffe erzeugen eine gleichmäßigere reduzierte Spitzenhöhe  $R_{pk}$ . Die Läppbearbeitung mit dem PVC-Werkzeug ergibt für den  $R_{pk}$ -Wert den geringsten Wert mit  $0,05 \mu\text{m}$ . Einen  $R_{pk}$ -Wert von  $0,1 \mu\text{m}$  wird durch das PA-Werkzeug erreicht. Die anderen Varianten ergeben einen geringfügigen größeren  $R_{pk}$ -Wert. Dieser beträgt für die Varianten PUR, PE sowie PTFE im Mittel  $0,13 \mu\text{m}$ .

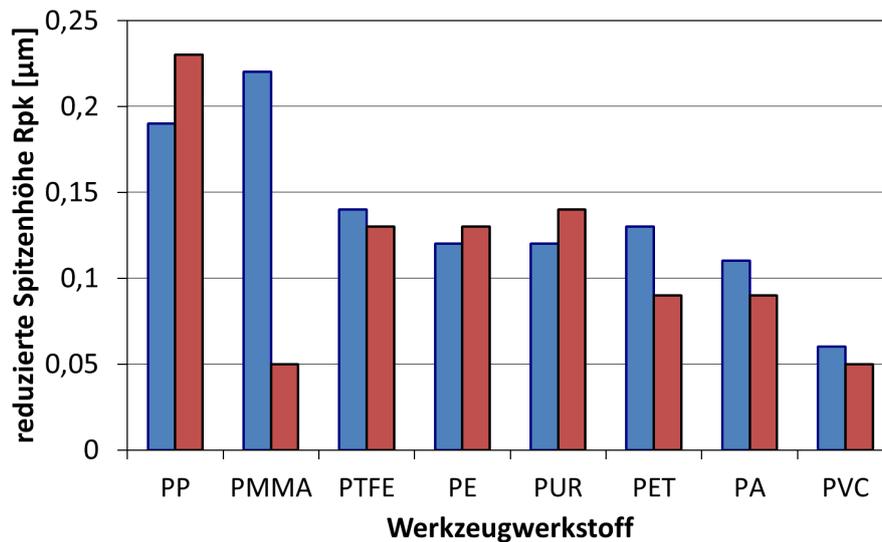


Bild 5.9: Reduzierte Spitzenhöhe  $R_{pk}$  durch das Polymerlappen mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen mit einfacher Werkzeugblockgeometrie, einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 4 bar.

Das in Bild 5.10 dargestellte Diagramm zeigt den Werkzeugwerkstoffeinfluss beim Polymerlappen, bezogen auf die gemittelte Rautiefe  $R_z$ . Größere Abweichungen sind anhand der Bewertung der gemittelten Rautiefe bei den Werkzeugwerkstoffen PP, PMMA, PE sowie PET vorhanden. Die geringsten  $R_z$ -Werte mit  $2,5 \mu\text{m}$  werden, wie bereits bei der Betrachtung des  $R_z$ -Werts, beim Polymerlappen mit dem Werkzeug aus PVC erreicht. In der Reihenfolge PUR, PA und PTFE werden immer größere  $R_z$ -Werte erzielt. Der größte  $R_z$ -Wert beträgt bei einer gleichmäßig vorhandenen Rauheit mit dem PTFE-Werkzeug  $3,4 \mu\text{m}$ .

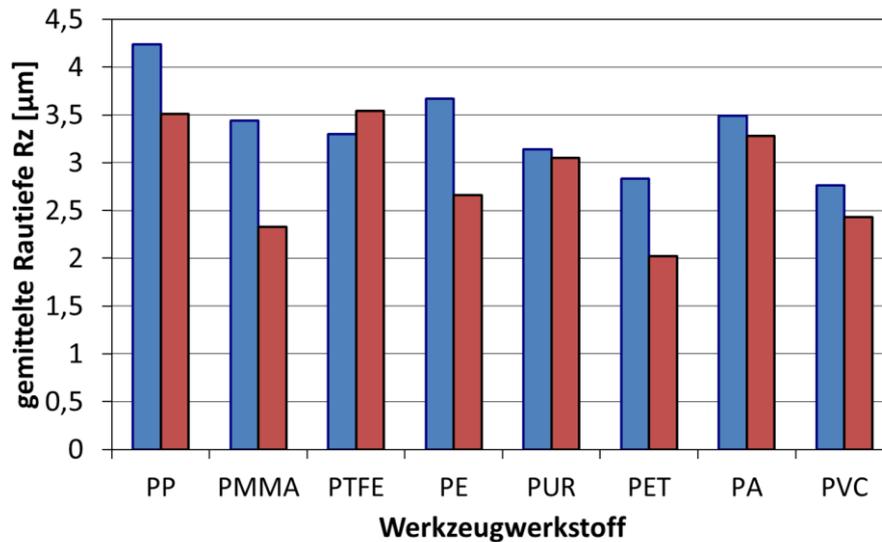


Bild 5.10: Gemittelte Oberflächenrauheit  $R_z$  durch das Polymerlappen mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen mit einfacher Werkzeugblockgeometrie, einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 4 bar.

Aus der Betrachtung dieser beiden Rauheitswerte ergibt sich für die Bearbeitung mit einfachem Blockwerkzeug folgendes Ranking. Der Werkstoff PVC gilt aus dieser Sichtweise als geeignetster Werkstoff, gefolgt von PUR, PA und PTFE. Bei den gezeigten Versuchsergebnissen ist vor jeder Bearbeitung der zuvor beschriebene Abrichtvorgang durchgeführt worden. Es hat sich gezeigt, dass bereits nach einer Bearbeitung die Werkzeugkontaktfläche unterschiedlich stark eingelätet ist. Mehrere Bearbeitungen nacheinander haben zur Folge, dass die Bearbeitung im Bereich zur Werkstückmitte hin stärker und der Bereich zum Werkstückrand weniger stark erfolgt. Dieser Zusammenhang ist nachvollziehbar, da die Wechselwirkungszeit zwischen Werkstück und Werkzeug in Abhängigkeit der eingesetzten Werkzeuggeometrie steht. Unter Wechselwirkungszeit wird dabei die Zeitdauer bezeichnet, in der eine Interaktion an der Triboscheibe mit dem Werkzeug vorhanden ist. Bei der Werkzeuggeometrie des einfachen Blockwerkzeugs, wie sie für die Versuche des Werkstoffvergleichs eingesetzt worden sind, ergibt sich der Zusammenhang zwischen der betrachteten Position des Werkzeugbereichs an der Triboscheibe, wie es in Bild 5.11 gezeigt ist.

Links in Bild 5.11 ist die rechnerisch ermittelte Wechselwirkungszeit über der Position an der Triboscheibe aufgetragen. Die maximal mögliche Wechselwirkungszeit, welche der Bearbeitungszeit von 30 s entspricht, wird bei der verwendeten Werkzeuggeometrie und -anordnung an keiner Position auf der Triboscheibe erreicht. Aufgrund des auf einer Seite angeordneten Werkstücks, beträgt die maximal mögliche Wechselwirkungszeit 15 s. Diese wird jedoch nur im Bereich zur Werkstückmitte erreicht. Am äußersten Bereich des Werkstücks ist die Wechselwirkungszeit mit weniger als 3 s mehr als fünf Mal so klein wie im Innenbereich und mehr als zehn Mal so klein wie die gesamte Bearbeitungszeit von 30 s. Ein mehrmals eingesetztes PVC-Blockwerkzeug sowie die bearbeitete Triboscheibe sind in Bild 5.11 rechts gezeigt. Man erkennt die mit Werkstückantrieb stärker gesättigte Lapppaste zum Innenbereich der Triboscheibe.

scheibe hin. Die Untersuchungen im nächsten Kapitel beleuchten die Auswirkung einer variierten Wechselwirkungszeit durch die eingesetzte Werkzeuggeometrie.

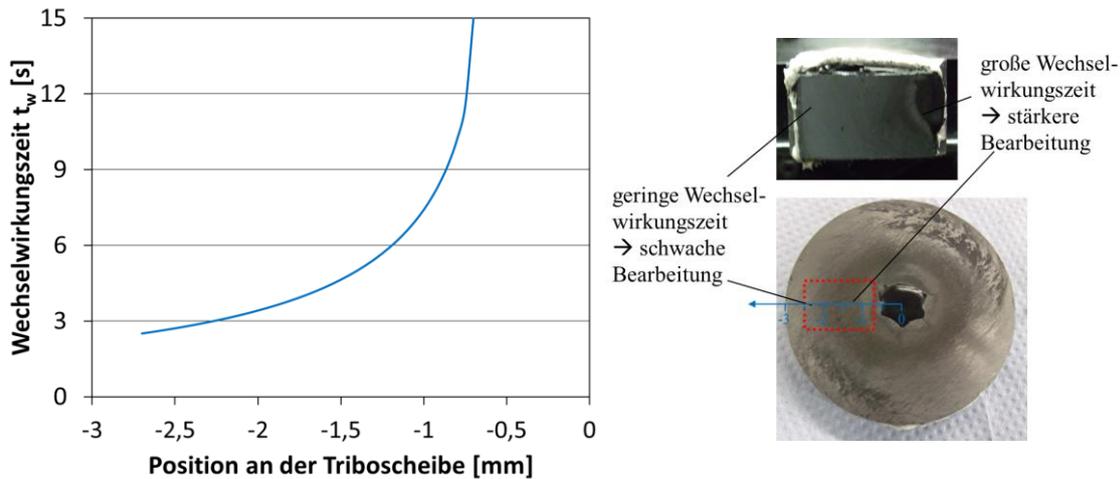


Bild 5.11: Wechselwirkungszeit bei einer Bearbeitungszeit von 30 s aufgrund der Werkzeuggeometrie des einfachen Blockwerkzeugs.

### 5.3.2 Werkzeuggeometrie

Die Werkzeuggeometrie und Oberflächenbeschaffenheit beim Polymerlappen gibt vor, wie groß die Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug ist, wie gleichmäßig die Bearbeitungskraft eingebracht wird, wie sich die Lapppaste verteilen kann und welche Werkzeugstandzeit erreicht wird. Aufgrund der genannten Einflüsse wird die einfache Blockgeometrie, wie sie zur Untersuchung des Werkstückwerkstoffs eingesetzt wurde, mit dem Ringflächenwerkzeug verglichen. Das Ringflächenwerkzeug ist in Bild 4.26 gezeigt. Durch die geschlossene Ringfläche dieser Werkzeugvariante wird eine Wechselwirkungszeit zwischen Werkzeug und Werkstück erreicht, welche gleich der Bearbeitungszeit ist. Die Versuche wurden mit den zuvor bestimmten Bearbeitungsparametern durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Wechselwirkungsflächen der beiden Werkzeugausführungen wurde jedoch der Bearbeitungsdruck angepasst. Ein Druck von 4 bar beim einfachen Blockwerkzeug entspricht einem Druck von 13 bar beim Ringflächenwerkzeug, um die gleiche Flächenpressung zu erzielen. Da der verfügbare Druck an der Bearbeitungsanlage bei 7 bar liegt, wurden die Versuche beim Ringwerkzeug mit dem maximal verfügbaren Druck von 7 bar und somit im Vergleich mit dem Blockwerkzeug mit einer geringeren Flächenpressung durchgeführt. Der eingesetzte Werkzeugwerkstoff ist in beiden Fällen der gleiche PVC. Das Ergebnis des Bearbeitungsvergleichs mit den beiden Werkzeugvarianten ist in Bild 5.12 im Diagramm gezeigt. Das Diagramm zeigt auf der Primärachse die Werte für die gemittelte Rautiefe  $R_z$  und auf der Sekundärachse die Werte für die reduzierte Spitzenhöhe  $R_{pk}$ . Die  $R_z$ -Werte sind durch rote Säulen und die  $R_{pk}$ -Werte durch grüne Säulen dargestellt. Beim Vergleich beider Rauheitswerte ist festzustellen, dass die Werte des Ringflächenwerkzeugs geringer als die des einfachen Blockflächenwerkzeugs sind. Am stärksten wirkt sich die veränderte Werkzeuggeometrie auf die gemittelte Rautiefe  $R_z$  aus. Dies liegt an der vergrößerten Wechselwirkungszeit, wodurch

mehr Material abgetragen wird und somit die Kernrauheit sowie die Rauheit durch die Riefen reduziert wird.

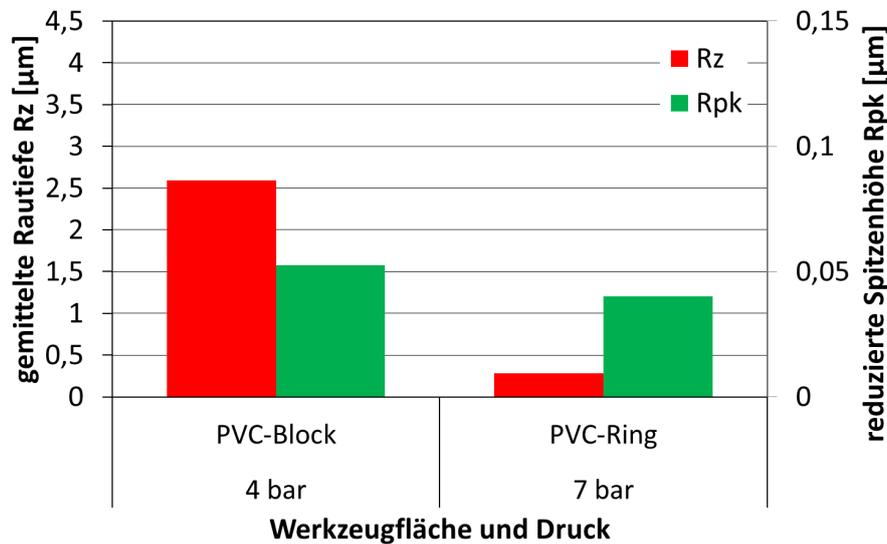


Bild 5.12: Vergleich der erzielten Oberflächenrauigkeit in Abhängigkeit der Werkzeuggeometrie mit angepasstem Bearbeitungsdruck bei einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm und einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min.

Die dargestellten Versuche wurden wie eingangs erwähnt mit einem Abrichtvorgang am Werkzeug vor jeder Bearbeitung durchgeführt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Bereits bei den Werkstoffuntersuchungen mit der einfachen Blockwerkzeuggeometrie wurde erkannt, dass nach mehreren Bearbeitungen ohne Abrichtvorgang ein ungleichmäßiger Abtrag erfolgt. Bei der Betrachtung des PVC-Ringflächenwerkzeugs ist trotz gleicher Wechselwirkungszeit über der kompletten Bearbeitungsspur festzustellen, dass bereits nach nur einer Bearbeitung ein starkes Einglätten der Werkzeugoberfläche stattfindet. Wird das Werkzeug ohne einen weiteren Abrichtvorgang verwendet, ist die erreichte Oberflächentopographie beim zweiten Werkstück bereits nicht mehr gleichmäßig. Die Läpppaste wird beim Aufbringen des Bearbeitungsdrucks zum größten Teil sofort nach dem Aufbringen des Bearbeitungsdrucks aus der Wirkstelle verdrängt, da aufgrund der glatten Werkzeugoberfläche kein Verankern der Läppkörner in der Wirkstelle zwischen Werkstück und Werkzeug erreicht wird.

Aus diesem Grund wurden weitere Polymerläppversuche mit einem geschäumten Werkzeugwerkstoff durchgeführt. Ein geschäumtes Polymer bietet im Vergleich zum Vollmaterial auch bei Abnutzung immer wieder eine Oberfläche mit Poren, welche wie eine raue Oberfläche eine gleichmäßige Verteilung der Schneidkörner ermöglichen. Da der PVC geschäumt nicht erhältlich ist, werden für die Werkzeugvariante mit geschäumtem Polymer ein PUR verwendet. PUR gilt laut der Werkzeugwerkstoffuntersuchung aus Kapitel 5.3.1 neben dem PVC als geeignetster Werkstoff hinsichtlich der erreichbaren Oberflächenrauheit. In Bild 5.13 wird das Polymerläppen mit geschäumtem Werkzeugwerkstoff veranschaulicht. Das geschäumte Werkzeug ist gelb und das bearbeitende Werkstück blau schraffiert dargestellt. In Bereichen

ohne Poren ist anzunehmen, dass die Abrasivpartikel der Läpppaste einen Abrieb am Werkstück und Werkzeug in Abhängigkeit der vorliegenden Bearbeitungskraft und Relativgeschwindigkeit erzeugen. Zudem ist im weiteren Verlauf des Läppprozesses eine Einarbeitung von Werkzeugbestandteilen in die Werkstückoberfläche vorstellbar. Dieser Bereich ist in Bild 5.13 mit einer I gekennzeichnet. Andere Stellen, wie der Bereich II des Werkzeugschaums, haben zur Wirkfläche hin geöffnete Poren in denen ebenso Abrasivpartikel der Läpppaste sowie Abrieb von Werkstück und Werkzeug vorzufinden sind. Dabei ist es denkbar, dass es in den Poren durch die wirkende Bearbeitungskraft und der Abnutzung des Schaumwerkzeugs zu einer Druckentwicklung des Läppgemisches mit Abriebpartikeln kommt, was zu einer zusätzlichen Effizienzsteigerung des Läppprozesses führt.

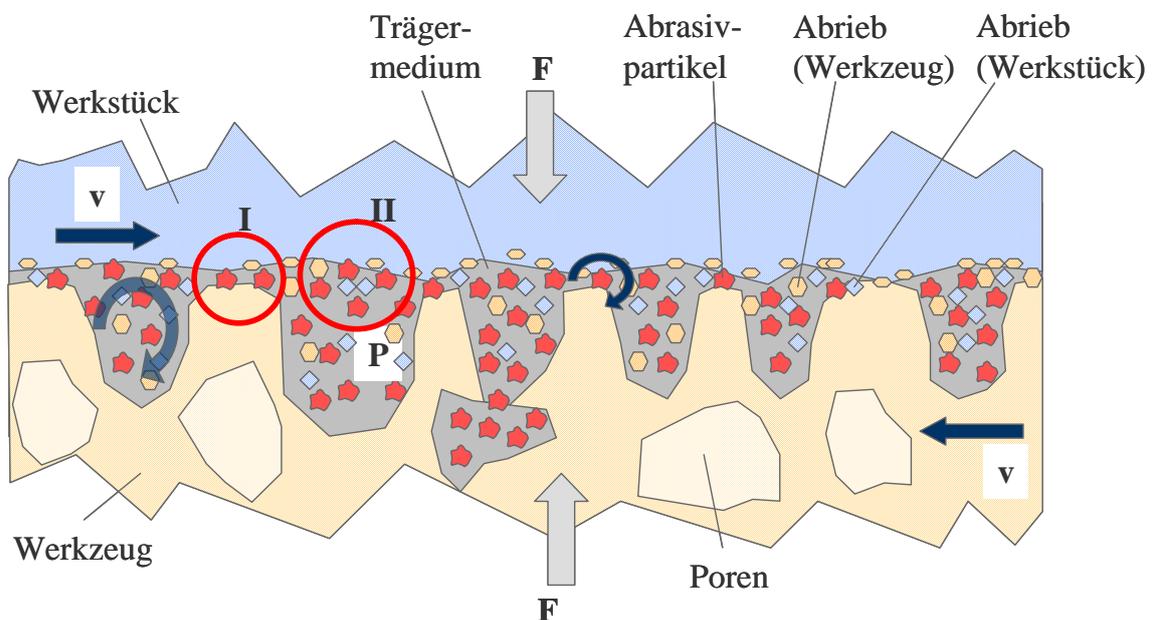


Bild 5.13: Visualisierung des Polymerlappens mit geschäumtem Werkzeug.

Die Bewertung des Polymerlappens mit geschäumtem PUR erfolgt, wie bei den bisher durchgeführten Bearbeitungsversuchen, durch die Auswertung der erzeugten Werkstückoberflächenrauheit mit der gemittelten Rautiefe  $R_z$  und der reduzierten Spitzenrauheit  $R_{pk}$ . Die Ergebnisse sind in einem Diagramm direkt den Ergebnissen des PVC-Ringflächenwerkzeugs aus Polymervollmaterial gegenübergestellt, siehe Bild 5.14. Die Geometrie des untersuchten Werkzeugs aus PUR-Schaum entspricht dabei dem PVC-Ringflächenwerkzeug. Die Versuche für die Gegenüberstellung der beiden Werkzeugvarianten wurden mit denselben Bearbeitungsparametern durchgeführt. Die Werkstückdrehzahl betrug 190 U/min, der eingestellte Bearbeitungsdruck am Oszillator war 7 bar und die Oszillationsbewegung des Werkzeugs wurde mit einer Amplitude von 5 mm und einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min ausgeführt. Im Unterschied zu den bisherigen Ergebnisdarstellungen, werden hier die erreichten Oberflächentopographien nach jeweils 10 Bearbeitungsversuchen mit dem gleichen Werkzeug bewertet. Beim PVC-Ringflächenwerkzeug musste nach jeder Bearbeitung ein erneuter Abrichtvorgang durchgeführt werden, um eine gleichmäßige Rauheit zu erzielen. Beim PUR-Schaum-Ringflächenwerkzeug wurde dagegen nur vor der ersten Bearbeitung ein Abrichtvor-

gang durchgeführt. Bei der Betrachtung der erreichten Rauheitswerte ist festzustellen, dass sich der  $R_z$ -Wert bei beiden Varianten kaum unterscheidet. Der  $R_{pk}$ -Wert dagegen zeigt, dass die Werkzeugvariante mit geschäumtem PUR größere Werte erzeugt. Da der erreichbare  $R_{pk}$ -Wert mit dem geschäumten PUR-Werkzeug mit  $0,065 \mu\text{m}$  ohne Abrichtvorgang vor jeder Bearbeitung erreichbar ist, wird die Variante mit dem geschäumten PUR- Ringflächenwerkzeug empfohlen. Die Detailuntersuchungen des Polymerlappens sowie die Herstellung von Scheiben für die Tribometeruntersuchungen erfolgten mit dieser Werkzeugvariante.

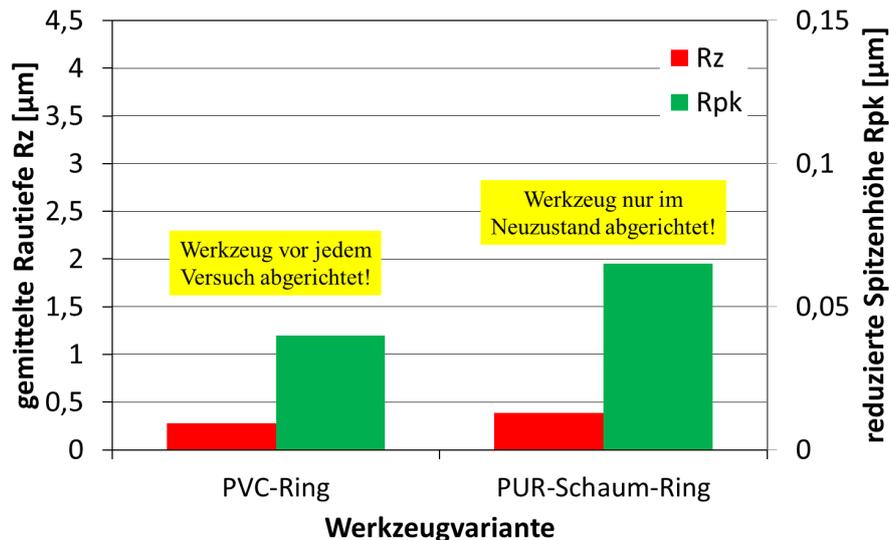


Bild 5.14: Vergleich der erreichbaren Oberflächentopographie mit dem PVC-Ringflächenwerkzeug zum PUR-Schaum-Ringflächenwerkzeug nach jeweils 10 Bearbeitungsversuchen bei einer Werkstückrotation von 190 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 7 bar.

Das PUR-Schaum Werkzeug mit aufgetragener Lapppaste sowie das Werkzeug und das Werkstück nach der Bearbeitung sind in Bild 5.15 zu sehen. Das abgebildete Werkstück erfordert nach der Bearbeitung vor den Tribometeruntersuchungen eine Reinigung, der mit Werkstück- und Werkzeugabrieb angereicherten Lapppaste.

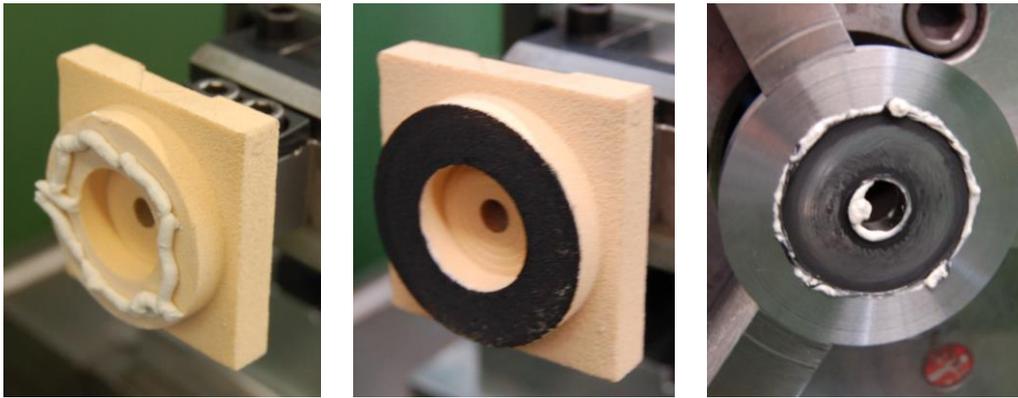


Bild 5.15: PUR-Schaumwerkzeug vor und nach dem Polymerlappen mit bearbeiteter Tribometerscheibe.

## 5.4 Werkstückeigenschaften durch Energieeintrag beim Polymerlappen

Im Gegensatz zu den Grundlagenversuchen, bei denen ausschließlich die Oberflächentopographie bewertet wurde, liegt das Hauptaugenmerk der Untersuchungen in diesem Kapitel zusätzlich auf den Veränderungen der Werkstoffeigenschaften durch den Energieeintrag beim Polymerlappen. Die Größe des Energieeintrags wird dabei über die Prozessparameter des Polymerlappens bestimmt.

### 5.4.1 Energieeintrag beim Polymerlappen

Die Bestimmung des Energieeintrags erfolgte zunächst beim Polymerlappen mit Referenzparametern, welche sich an den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen orientieren. Ausgehend von diesen Referenzwerten wurden Bearbeitungsversuche mit variierten Parametern und somit mit variiertem Energieeintrag durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Bearbeitungsparameter des Polymerlappens verändert, während die übrigen Parameter der Referenzeinstellung entsprechen. Die Versuchsparameter sind in Bild 5.16 zu sehen. Die verwendeten Parameter wurden von den Grundlagenuntersuchungen übertragen. Der Bearbeitungsdruck wurde bei der Referenz dieser Untersuchungen abweichend vom Optimum bezüglich der erreichbaren Oberflächenrauheit für das Ringflächenwerkzeug auf 2 bar eingestellt. Dadurch wird die Gefahr eines Werkzeugversagens durch zu große Pressungen vermieden und sichergestellt, dass eine Variation des Drucks bis zu 4 bar getestet werden kann. Es wurden die eingestellten Drücke am Finishgerät von 1, 2, 3 und 4 bar untersucht. Dies entspricht den Flächenpressungen zwischen Werkstück und Werkzeug von 0,12; 0,23; 0,35 und 0,47 MPa. Die Rotationsbewegung des Werkstücks wurde über die Spindeldrehzahl der Drehmaschine mit 100, 200 und 220 U/min eingestellt. Die Oszillationsbewegung des Werkzeugs wurde über die Amplitude mit 1 und 5 mm sowie der Frequenz von 600 und 1200 DH/min variiert.

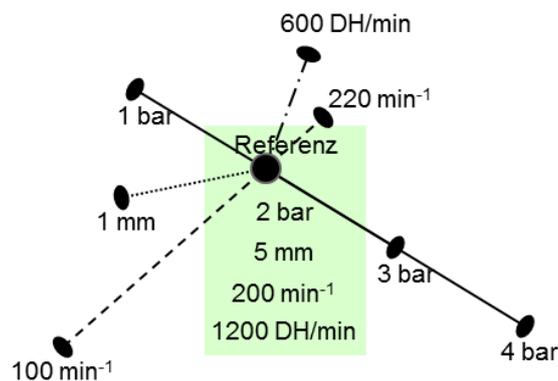


Bild 5.16: Parametervariation beim Polymerlappen mit Bestimmung des Energieeintrags.

Vor der Darstellung des ermittelten Energieeintrags erfolgen die Abbildungen der aufgezzeichneten Kraftverläufe. Hiermit wird verglichen, wie schnell sich die Kraft über der Bearbeitungszeit verändert und wie groß die Unterschiede zu jedem Zeitpunkt der Bearbeitung sind. Die Kräfte in Rotations- und Oszillationsrichtung des Polymerlappens wurden mit dem Dynamometer, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, aufgezeichnet und ausgewertet. Damit der Vergleich eines variierten Parameters zur Referenzeinstellung möglich ist, sind die Kraftverläufe mit jeweils variiertem Parameter mit dem Kraftverlauf der Referenzeinstellung gezeigt. Die Kraftverläufe der Referenzeinstellung sind bei den aufgeführten Diagrammen mit der Farbe Grün erkennbar.

In Bild 5.17 werden die Kraftverläufe bei den verschiedenen Werkstückdrehzahlen gezeigt. Eine Verringerung der Drehzahl von 200 U/min auf 100 U/min oder eine Erhöhung auf 220 U/min führen in den ersten 5 s der Bearbeitung zu einer Veränderung des Verlaufs der Rotationskraft  $F_{rot}$ . Beide Varianten mit 100 und 220 U/min weisen im Vergleich zur Referenz einen kleineren Gradienten in diesem Zeitraum auf. Jedoch sind diese beiden Verläufe über die ganze Bearbeitungszeit zueinander parallel. Eine Begründung für den größeren Gradienten mit der Referenz von 200 U/min in den ersten 5 s, können kleinere Abweichungen der Ausgangsrauheit von Werkstück bzw. Werkzeug oder Regelvorgänge des Spindelantriebs der Drehmaschine zu Beginn der Bearbeitung sein. Die Kraft  $F_{rot}$  bei der Referenzeinstellung beträgt am Anfang 60 N und am Ende 43 N. Bei einer Drehzahlerhöhung von nur 20 U/min gegenüber der Referenzeinstellung, ist diese Kraft zu Beginn des Polymerlappens um 6 N höher und beträgt demnach 66 N. Bei einer Bearbeitung mit einer Drehzahl von 100 U/min beträgt der Anfangswert der Rotationskraft 42 N und ist somit kleiner als der Wert für die beiden höheren Drehzahlen. Nach einer Bearbeitungszeit von 12 s haben die Rotationskräfte für alle Drehzahlinstellungen einen jeweils nahezu gleichbleibenden Wert erreicht. Ab diesem Zeitpunkt kann davon ausgegangen werden, dass sich die erreichte Oberflächenrauheit durch die eingestellten Läppparameter nur noch in geringem Maße verändert. Diese Aussage konnte, wie bereits zuvor erwähnt, anhand von vorbereitenden Bearbeitungstests festgestellt werden. Für die Drehzahl von 220 U/min beträgt die Rotationskraft am Ende der Bearbeitung 53 N, bei 200 U/min 43 N und bei 100 U/min 35 N. Bei der Betrachtung der Oszillationskraft sind die Gradienten aller drei gezeigten Drehzahlvariationen über die komplette Bearbei-

tungszeit vergleichbar. Die Kurvenverläufe unterscheiden sich hier durch das Kraftniveau. Die zu Beginn auftretende Kraft in Oszillationsrichtung beträgt bei der Bearbeitung mit einer Drehzahl von 100 U/min 77 N und reduziert sich bei diesen Einstellungen nach der Bearbeitungszeit auf 60 N. Die Referenzeinstellung mit einer Drehzahl von 200 U/min bewirkt eine Kraft  $F_{osz}$  zu Beginn von 48 N, welche am Ende der Bearbeitung auf 35 N absinkt. Bei der zur Referenz geringfügig erhöhten Drehzahl von 220 U/min beginnt die Bearbeitung mit einer Oszillationskraft von 36 N, welche innerhalb der 30 s auf 28 N abfallen.

Beim Vergleich der beiden Kraftverläufe in Rotations- und Oszillationsrichtung ist auffallend, dass die wirkende Kraft in Rotationsrichtung bei einer höheren Drehzahl stets größer ist. Bei der Kraft in Oszillationsrichtung ist dieser Zusammenhang umgekehrt. Hier sind die Kräfte bei einer höheren Drehzahl über die ganze Bearbeitungszeit kleiner.

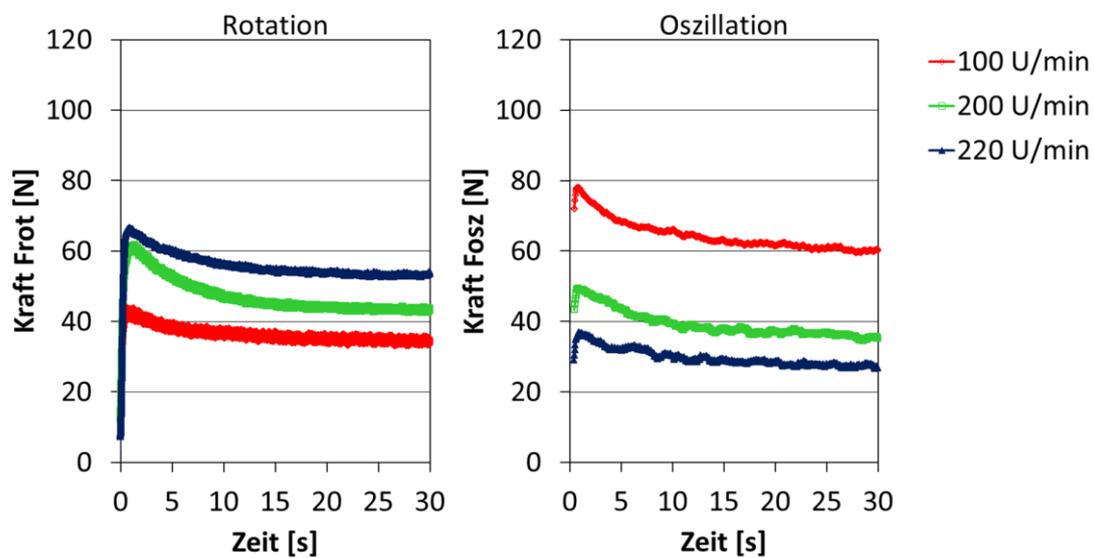


Bild 5.17: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei Drehzahlen von 100, 200 und 220 U/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einem Bearbeitungsdruck von 2 bar.

Die Variation der Oszillationsamplitude mit 1 und 5 mm ergeben die in Bild 5.18 gezeigten Kraftverläufe in Rotations- und Oszillationsrichtung. Der Kraftverlauf in Rotationsrichtung bei dem Versuch mit einer Amplitude von 1 mm zeigt, wie bei den variierten Drehzahlen, eine im Vergleich zur Referenzeinstellung geringere Steigung innerhalb der ersten 5 s der Bearbeitung. Bei einer Amplitude von 1 mm beträgt die Kraft zu Beginn 68 und nach 30 s 53 N. Der Unterschied beim Beginn der Bearbeitung ist bei beiden Amplitudeneinstellungen mit 8 N sehr gering. Nach circa 10 s verlaufen die beiden Kurven mit einem Unterschied von 10 N parallel zueinander. Da es sich bei der variierten Amplitude um einen Parameter der Oszillationsbewegung handelt, ist es nachvollziehbar, dass hier im Gegensatz zur Drehzahlvariation der Unterschied der Kräfte in Oszillationsrichtung stärker vorhanden ist. Bei einer Amplitudeneinstellung von 1 mm verändert sich die Kraft von 17 N zu Beginn bis zum Ende mit 12 N sehr wenig. Die beiden Kraftverläufe in Oszillationsrichtung weisen einen nahezu

gleich bleibenden Unterschied von 25 N nach 7 s bis zum Ende des Bearbeitungsprozesses auf.

Analog zur Drehzahlvariation ergibt sich bei der Verringerung der Oszillationsamplitude zur Referenz ein vergleichbarer Zusammenhang. Durch die geringere Oszillationsamplitude und somit der in dieser Richtung kleineren Geschwindigkeit, wirkt eine verringerte Kraft  $F_{osz}$  und gleichzeitig eine erhöhte Kraft  $F_{rot}$ .

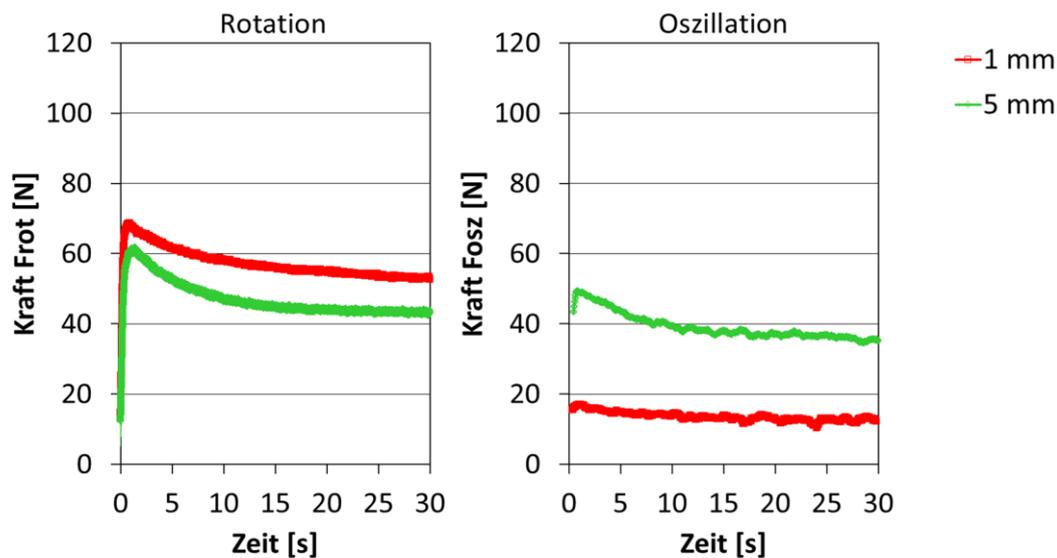


Bild 5.18: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei einer Oszillationsamplitude von 1 und 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min, einer Drehzahl von 200 U/min und einem Bearbeitungsdruck von 2 bar.

Eine veränderte Oszillationsfrequenz von 600 DH/min zur Referenzeinstellung mit 1200 DH/min ist in Bild 5.19 zu sehen. Die zueinander vorliegenden Verhältnisse der Kraftverläufe bei der Variation der Oszillationsfrequenz unterscheiden sich kaum zu den bereits gezeigten Kurvenverläufe für die Variation der Oszillationsamplitude in Bild 5.18. Dies trifft vor allem für die Betrachtung der Kurvenverläufe der Rotationskräfte zu. Hier ist bei der variierten Oszillationsfrequenz mit 600 DH/min zu Beginn die Kraft  $F_{rot}$  70 N groß und fällt während der Bearbeitung auf 53 N ab. Es handelt sich bei einer Verringerung der Frequenz ebenso wie bei einer Verringerung der Amplitude um eine in Oszillationsrichtung verringerte Geschwindigkeit. Aufgrund dieser Tatsache und der unwesentlichen Unterschiede der Kurvenverläufe der Rotationskräfte bei der Bearbeitung mit 600 DH/min zum Polymerlappen mit einer Oszillationsamplitude von 1 mm, wird hier auf die Beschreibung des Kraftverlaufs der variierten Oszillationsamplitude verwiesen. Der Verlauf der in Oszillationsrichtung wirkenden Kraft bei der reduzierten Oszillationsfrequenz von 600 DH/min im Vergleich zur Referenz mit 1200 DH/min unterscheidet sich durch eine geringere Kraftveränderung von Beginn bis zum Ende des Polymerlappens bei einem geringeren Kraftniveau. Diese Zusammenhänge sind vergleichbar mit dem Kraftverlauf einer reduzierten Oszillationsamplitude, jedoch auf einem leicht erhöhten Kraftniveau. Bei der reduzierten Oszillationsfrequenz von 600 DH/min

wirkt eine Kraft zu Beginn des Polymerlappens von 23 N. Dieser Startwert ändert sich über die Bearbeitungszeit kaum auf eine Kraft von 18 N.

Eine geringere Oszillationsfrequenz hat ebenso wie eine geringere Oszillationsamplitude eine verringerte Kraft  $F_{osz}$  und gleichzeitig eine erhöhte Kraft  $F_{rot}$  zur Folge.

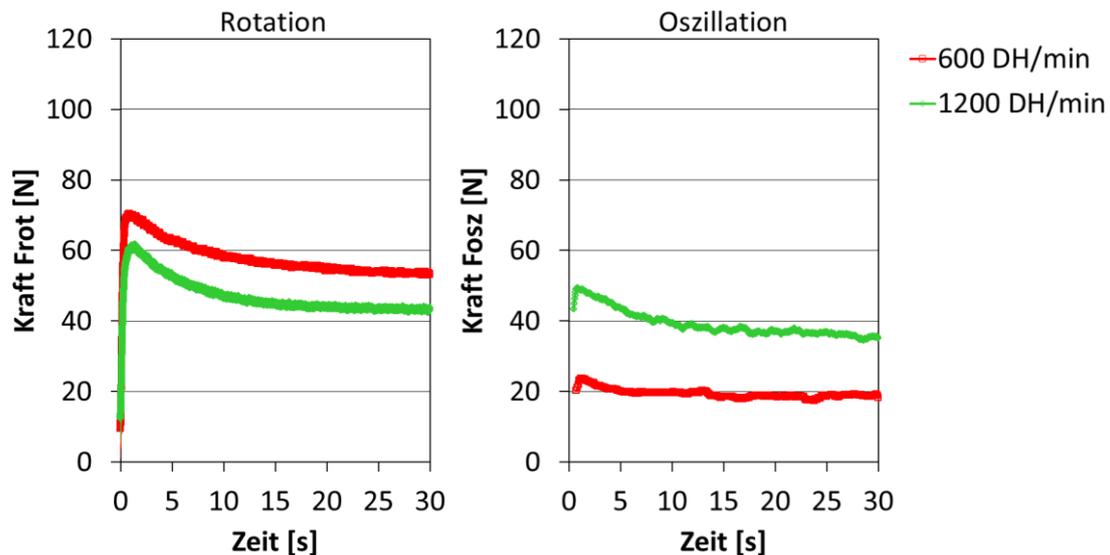


Bild 5.19: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei einer Oszillationsfrequenz von 600 und 1200 DH/min, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Drehzahl von 200 U/min und einem Bearbeitungsdruck von 2 bar.

Wie bereits erwähnt, beeinflusst die Schnittgeschwindigkeit die wirkenden Schnittkräfte in die jeweiligen Bearbeitungsrichtungen. Bei den Variationen der Drehzahl, der Oszillationsamplitude und -frequenz konnte hier ein generell vorliegender Zusammenhang gezeigt werden. Hierfür gilt, dass eine Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit zu einer kleineren Schnittkraft in Rotationsrichtung und zu einer Erhöhung der Kraft in Oszillationsrichtung führt. Bei einem kleineren Wert der in Oszillationsrichtung wirkenden Geschwindigkeit werden eine Verringerung der gemessenen Oszillationskraft sowie eine Erhöhung der in Rotationsrichtung wirkenden Kraft hervorgerufen. Die verringerte Oszillationsgeschwindigkeit stellt sich dabei entweder durch eine kleinere Amplitude oder Frequenz ein.

Beim Zerspanprozess des Polymerlappens ist davon auszugehen, dass bei höheren Läppgeschwindigkeiten ein größerer Anteil an Wärme und Reibung zwischen den Schneidkörnern und dem Werkstückwerkstoff auftritt. Bei dieser Zerspanung steht der Mechanismus des Mikrofurchens im Vordergrund. Es erfolgt eine anteilig erhöhte Werkstückstoffverdrängung, was zu einer starken Einglättung der Rauheitsspitzen führt. Am Beispiel der Drehzahlvariation erfolgt die Erläuterung der Folgen dieses Zusammenhangs. Durch eine höhere Rotationsgeschwindigkeit läuft der beschriebene Mechanismus verstärkt in Rotationsrichtung ab. Die dabei größere Einglättung der Werkstückoberfläche führt zu geringen Widerständen für die wirkende Kraft in Oszillationsrichtung. Hiermit ist nachvollziehbar, dass eine geringe Kraft  $F_{osz}$  bei einer höheren Kraft  $F_{rot}$  wirkt.

Die in Bild 5.20 gezeigten Kräfteverläufe sind abhängig von den bei der Bearbeitung eingestellten Bearbeitungsdrücken. In Rotations- sowie in Oszillationsrichtung ergibt sich für die Drücke 1, 2, 3 und 4 bar ein jeweils vergleichbarer Verlauf der Kräfte bei unterschiedlichen Kraftniveaus. Die Anfangskräfte für die Versuche mit 1 bis 4 bar sind in Rotationsrichtung 42, 60, 92 und 115 N. Am Ende der Bearbeitungszeit betragen die Rotationskräfte 32, 43, 63 und 80 N. Die Oszillationskräfte für die Drücke 1 bis 4 bar sind beim Start der Bearbeitung 29, 48, 64 und 80 N und am Ende 22, 35, 45 und 58 N.

Die Kraftniveaus korrelieren direkt mit der Größe des eingestellten Drucks. Je höher der Druck, desto höher die wirkende Kraft in Rotations- und Oszillationsrichtung. Die wirkenden Kräfte in Rotations- sowie in Oszillationsrichtung sind proportional zum eingestellten Druck. Die Variation des Drucks ist der einzig betrachtete Parameter, welcher eine Veränderung des Kraftniveaus in Oszillations- und Rotationsrichtung in gleicher Achsrichtung bewirkt. Bei der Druckvariation werden die Schneidkörner stärker in den Werkzeugwerkstoff eingedrückt und es kommt dadurch in beiden Bewegungsrichtungen zu einer erhöhten Erwärmung und Reibung zwischen den Abrasivkörnern und der Werkstückoberfläche. Dies führt zu einer Erhöhung der Schnittkräfte in beide Richtungen, da die Verhältnisse der Rotations- zur Oszillationsbewegung im Gegensatz zu den zuvor gezeigten Variationen, der Drehzahl und der Oszillation, konstant bleiben.

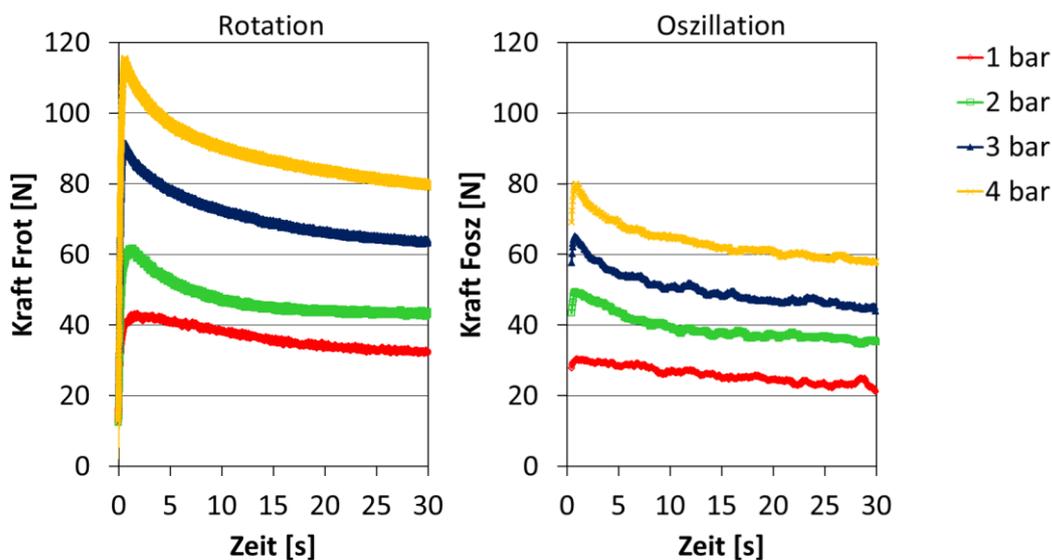


Bild 5.20: Kräfteverlauf in Oszillations- und Rotationsrichtung bei Bearbeitungsdrücken von 1, 2, 3 und 4 bar, einer Oszillationsamplitude von 5 mm, einer Oszillationsfrequenz von 1200 DH/min und einer Drehzahl von 200 U/min.

Aus den gezeigten Kraftverläufen ergibt sich nach den Berechnungen, wie in Kapitel 4.5.2 beschrieben, die sich einstellenden Energieeinträge beim Polymerlappen in Oszillations- und Rotationsrichtung. Die Gegenüberstellung in Bild 5.21 zeigt die Energieeinträge in Abhängigkeit des jeweils veränderten Bearbeitungsparameters. Die nicht variierten Bearbeitungsparameter entsprechen dabei den Referenzeinstellungen, welche in Bild 5.16 eingetragen sind. Der Energieeintrag der Referenzeinstellung ist mit der Druckeinstellung von 2 bar zu sehen.

Zusätzlich zur Gesamtenergie bei der jeweiligen Bearbeitungseinstellung ist, aus der farblichen Unterteilung der einzelnen Balken, die Aufteilung in Oszillations- und Rotationsrichtung durch die Farben Rot und Grün erkennbar.

Der geringste Gesamtenergieeintrag wird durch die Bearbeitung mit einer reduzierten Drehzahl von 100 U/min oder durch einen reduzierten Bearbeitungsdruck von 1 bar erzielt und stellt mit 480 und 482 J einen vergleichbaren Gesamtenergieeintrag dar. Weiterhin sind die Energieeinträge des Polymerlappens mit einer Oszillationsamplitude von 1 mm oder einer Oszillationsfrequenz von 600 DH/min mit der Referenzeinstellung von 2 bar vergleichbar. Die Gesamtenergie für diese drei Bearbeitungseinstellungen variiert von 624 bis 656 J. Mehr Gesamtenergie wird bei einer Drehzahl von 220 U/min mit 773 J und bei den höheren Bearbeitungsdrücken von 3 bar mit 952 J und 4 bar mit 1203 J im Bearbeitungsprozess umgesetzt.

In allen Fällen, mit Ausnahme der reduzierten Drehzahl von 100 U/min, ist der Anteil der Rotationsenergie im Vergleich zur Oszillationsenergie viel größer. Bei einer Drehzahl von 100 U/min wird weniger Weg in Rotations- als in Oszillationsrichtung pro Zeit absolviert. Bei der Bearbeitungszeit von 30 s beträgt hier der zurückgelegte Weg in Rotationsrichtung 5,17 m. In Oszillationsrichtung dagegen beträgt dieser 6 m. Dies erklärt, warum hier weniger Energie in Rotations- als in Oszillationsrichtung eingebracht wird. Bei den anderen Parametervariationen ist der beschriebene Zusammenhang ebenso gültig. Bei der Erhöhung der Drehzahl auf 220 U/min wird mit einem Weg von 11,37 m in Rotationsrichtung deutlich mehr Weg als in Oszillationsrichtung mit 6 m absolviert. Demnach wird hier wesentlich mehr Energie in Rotationsrichtung als im Vergleich zum Energieeintrag in Oszillationsrichtung verbraucht. Die in Oszillationsrichtung durchgeführten Variationen bewirken bei einer geringeren Frequenz von 600 DH/min eine Reduzierung des Wegs in Oszillationsrichtung auf 3 m. Eine kleinere Oszillationsamplitude von 1 mm führt zu einem noch geringeren Weg in dieser Richtung von 1,2 m. Dies erklärt, die in Bild 5.21 gezeigten Aufteilungen der Energieeinträge in Rotations- und Oszillationsrichtung für die Variation der Rotations- und Oszillationsbewegungen. Bei der Variation des Drucks bleibt der zurückgelegte Weg konstant. Demnach ist hier allein das unterschiedliche Kraftniveau, wie in Bild 5.20 gezeigt, für die veränderten Energien von Relevanz. Eine Erhöhung des Drucks entspricht somit aufgrund der dadurch größeren Kräfte einem größeren Energieeintrag in beiden Bewegungsrichtungen.

Im Vergleich zur Darstellung der Energieeinträge aus Bild 5.21 werden bei Bild 5.22 die Energieeinträge als Kacheln in einem x-y-Diagramm veranschaulicht. Die beiden Achskomponenten des Diagramms sind die Oszillations- und Rotationsrichtung. In dieser Übersicht ist ausgehend von der Referenzeinstellung zu sehen, wie sich die betrachteten Energieanteile durch die jeweiligen Parametervariationen verändern. Die Veränderungen des jeweiligen Parameters sind bei dieser Diagrammdarstellung durch eine Gerade verbunden, bei der in Abhängigkeit des Parameters der Strichtyp analog zur Übersicht in Bild 5.16 formatiert ist. In dieser Darstellung ist gut erkennbar, dass die Variation des Bearbeitungsdrucks bei beiden betrachteten Bewegungsrichtungen eine Veränderung in gleicher Achsrichtung bewirkt. Zudem wird mit der Variation des Drucks bei 4 bar der größte rotatorische sowie nahezu der größte oszillatorische Energieanteil erreicht. Bei einer Bearbeitung mit 1 bar werden geringe Werte für beide Bewegungsrichtungen erreicht.

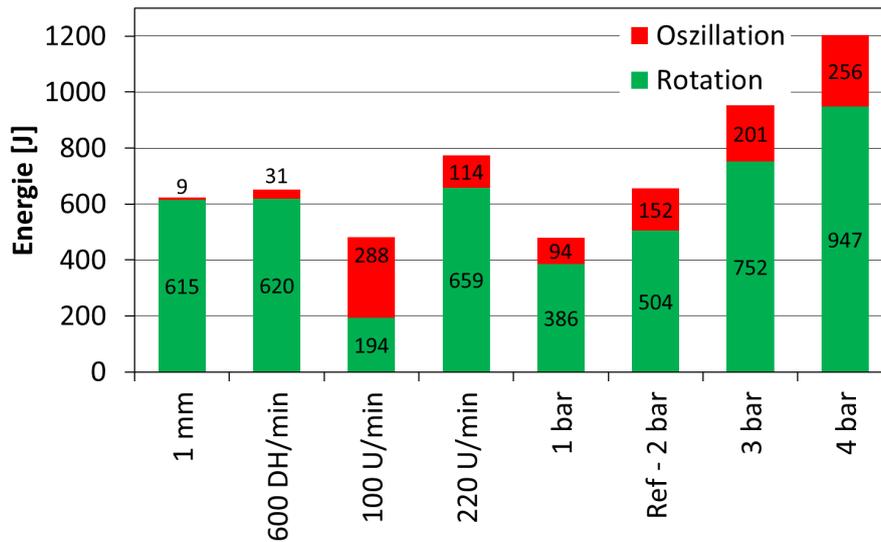


Bild 5.21: Übersicht der Energieeinträge durch Variation der Bearbeitungsparameter ausgehend von den Referenzeinstellungen.

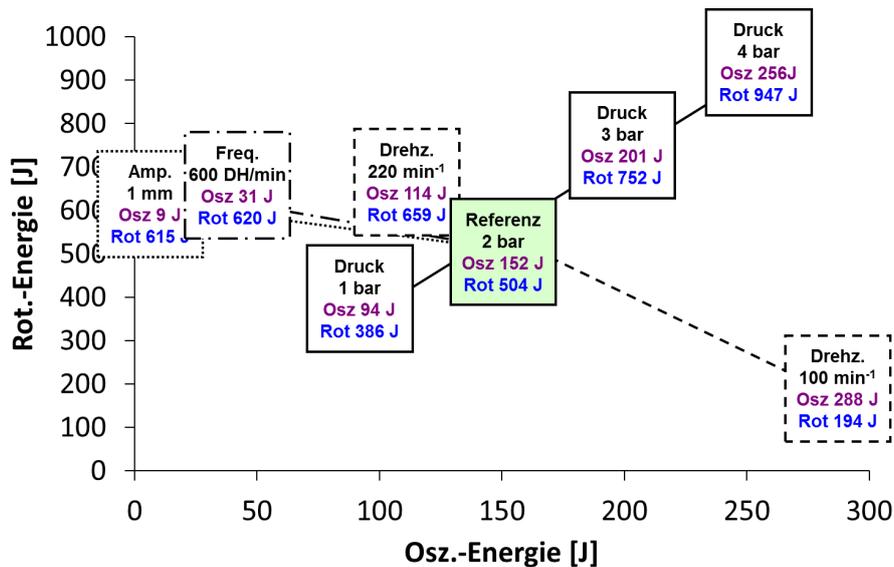


Bild 5.22: Übersicht der Energieeinträge in Oszillations- und Rotationsrichtung durch Variation der Bearbeitungsparameter.

Im Folgenden beschränken sich die Untersuchungen auf die Variation des Drucks beim Polymerlappen, da bei dieser Parameterveränderung die größte Spreizung des Energieeintrags vorhanden ist und die Energieeinträge äquidistant zueinander sind. Hierzu gehört die Bestimmung der Werkstoffeigenschaften sowie die Durchführung der in Kapitel 6 gezeigten Tribometeruntersuchungen.

## 5.4.2 Werkstückeigenschaften nach dem Polymerlappen

Die Werkstückeigenschaften durch das Polymerlappen werden, wie im vorherigen Kapitel erläutert, anhand der bearbeiteten Stahlproben mit variiertem Bearbeitungsdruck bestimmt. In dieser Arbeit sind die betrachteten Bauteileigenschaften und Analyseverfahren in Kapitel 3 aufgeführt.

Wie bei den Grundlagenuntersuchungen des Polymerlappens wird als erstes die Topographie mit Tastschnittmessungen beschrieben. Die Rauheitskennwerte  $R_z$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_k$  und  $R_{vk}$  als Messgrößen zur Beschreibung der Oberflächenrauheit sind in Bild 5.23 und Bild 5.24 zu sehen. In den einzelnen Diagrammen ist das Niveau der Ausgangsrauheit vor dem Polymerlappen mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet. An jedem Werkstück wurde die Rauheit der Bearbeitungsspur durch jeweils drei Messungen an zwei gegenüberliegenden Stellen bestimmt. Der Mittelwert dieser Messwerte für ein Werkstück ist mit einem horizontalen Balken eingezeichnet. Die Streuung der Messwerte ist anhand der Fehlerbalken ersichtlich.

Beim Polymerlappen mit 1 bar sind die Werte für  $R_z$ ,  $R_{pk}$  sowie  $R_k$  etwas größer im Vergleich zu den Ergebnissen bei den Einstellungen von 2 bis 4 bar. Durch die Bearbeitung mit 1 bar wird ein  $R_z$  von 1,6  $\mu\text{m}$ , ein  $R_{pk}$  von 0,13  $\mu\text{m}$  und ein  $R_k$  von 0,6  $\mu\text{m}$  erreicht. Bei der Bearbeitung mit 2 bis 4 bar liegt der  $R_z$ -Wert im Mittel zwischen 0,6 und 1,2  $\mu\text{m}$ , der  $R_{pk}$ -Wert zwischen 0,06 und 0,11  $\mu\text{m}$  und der  $R_k$ -Wert zwischen 0,21 und 0,29  $\mu\text{m}$ . Das Polymerlappen mit 1 und 2 bar hat weniger Einfluss auf die reduzierte Riefentiefe  $R_{vk}$ . Der  $R_{vk}$ -Mittelwert reduziert sich durch das Polymerlappen mit 1 oder 2 bar vom Ausgangswert von 0,73 auf 0,55  $\mu\text{m}$ . Im Gegensatz dazu reduziert sich dieser Wert durch eine Bearbeitung mit 3 oder 4 bar auf 0,25  $\mu\text{m}$ . Somit ist bei den Diskussionen der Ergebnisse in den darauffolgenden Kapiteln zu beachten, dass die Probe, welche mit 1 bar geläpft wurde, eine rauere Oberfläche aufweist. Die Bearbeitungsdrücke 2 bis 4 bar stellen einen vergleichbaren Materialtraganteil dar, wie aus dem bewerteten  $R_k$ - und  $R_{pk}$ -Wert ersichtlich ist.

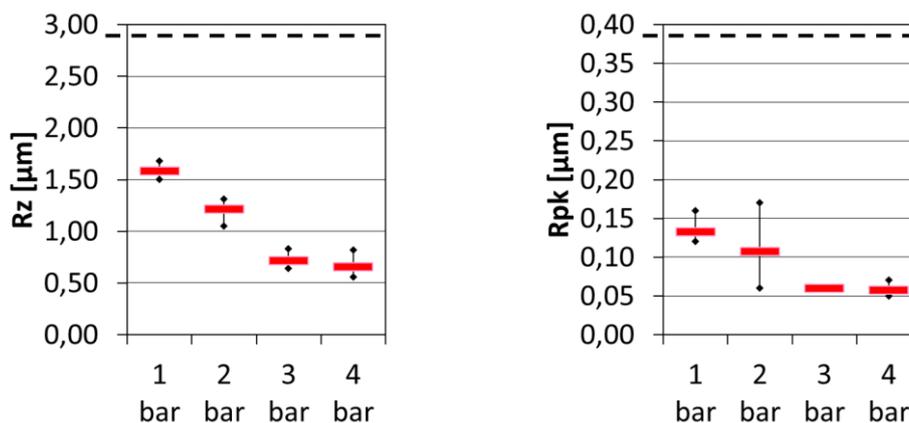


Bild 5.23: Rauheitswerte  $R_z$  und  $R_{pk}$  der Stahlscheiben als Ausgangsgeometrie für die Stifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar.

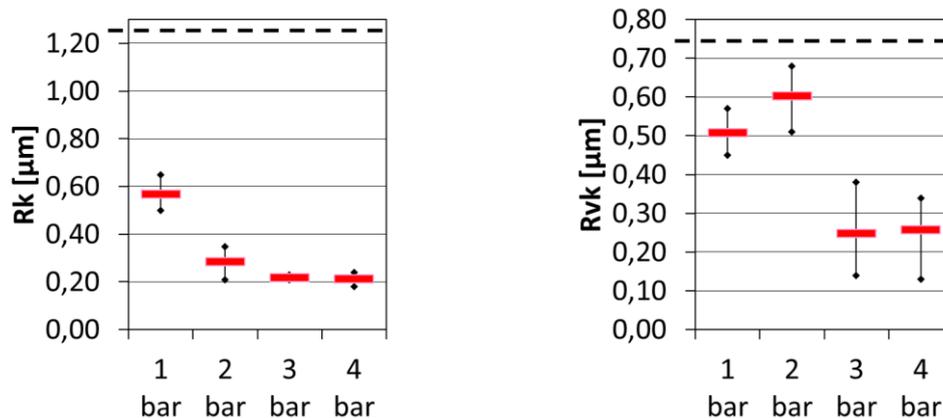


Bild 5.24: Rauheitswerte  $R_k$  und  $R_{vk}$  der Stahlscheiben als Ausgangsgeometrie für die Stifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar.

Die Beeinflussung des oberflächennahen Gefüges durch die Variation des Bearbeitungsdrucks, ist aus den FIB-Aufnahmen in Bild 5.25 ersichtlich. Wie bereits bei der Darstellung des oberflächennahen Gefüges vor dem Polymerlappen in Bild 4.22 ist es notwendig, aufgrund des zeitigen Gefüges die ferritischen und perlitischen Bereiche separat zu bewerten. Der Bereich mit verändertem Gefügebau über den Perlitzenen, ist wie bereits beim Ausgangszustand vor dem Polymerlappen, grundsätzlich kleiner als bei den Ferritzonen. Im Vergleich zum Ausgangszustand von Bild 4.22 ist der Bereich des veränderten Gefügebbaus nach dem Polymerlappen bei allen betrachteten Varianten größer. Demnach sind die Veränderungen auf das Polymerlappen zurückzuführen. In den mit Tiefenangaben versehenen Zonen sind abgrenzbare Helligkeitskontraste zu sehen. Diese Kontraste entstehen durch erhöhte Versetzungsdichten, Umlagerung von Versetzungsanordnungen oder Subkornbildungen, wie sie durch den mehrachsig eingebrachten Spannungszustand beim Polymerlappen hervorgerufen werden. Bereiche mit Kornverschiebungen entlang von Zementitlamellen werden für die Tiefenangabe der veränderten Zone nicht dazugezählt, da es sich hier nicht um eine Kornverfeinerung handelt. Durch die angegebene Tiefe des veränderten Gefüges zur Oberfläche hin, ist eine Korrelation zum eingestellten Druck ersichtlich. Bei einer Bearbeitung mit 1 bar sind die Bereiche mit verändertem Gefügebau über Perlit mit einer Stärke von 280 bis 400 nm und beim Ferrit mit 1100 bis 1270 nm am kleinsten. Bei steigendem Bearbeitungsdruck werden diese Bereiche sowohl über ferritischen als auch über perlitischen Zonen größer. Eine Ausnahme ergibt sich bei einer Einstellung von 3 bar. Bei dieser Druckeinstellung entsteht über Perlit stellenweise ein dickerer Bereich mit verändertem Gefügebau, gegenüber dem höheren Druck von 4 bar. Zudem ergibt sich bei dem Druck mit 3 bar über ferritischen Zonen eine vergleichbare Dicke des veränderten Gefügebbaus, wie bei der Bearbeitung mit 2 bar.

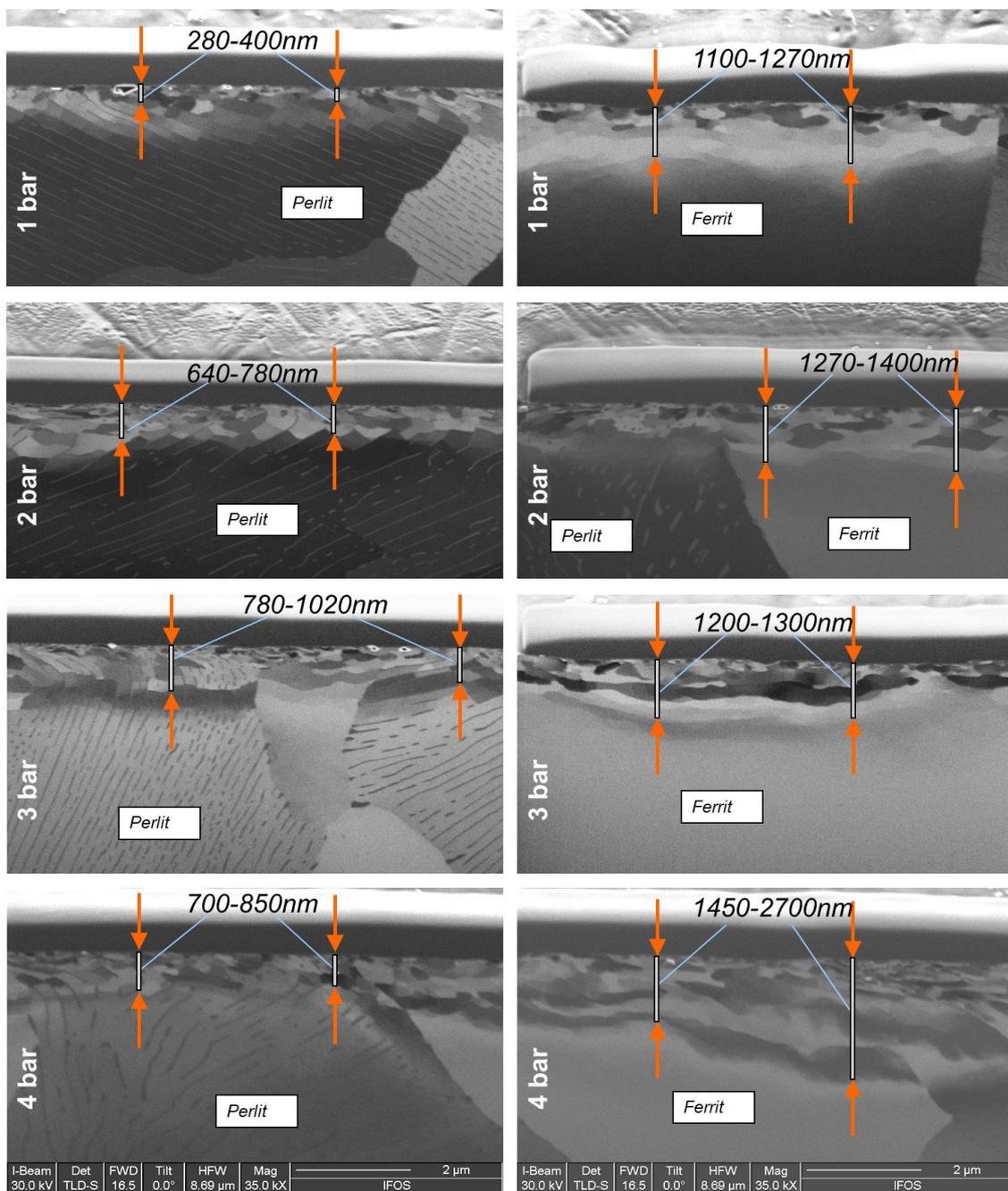


Bild 5.25: Oberflächennahes Gefüge der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1 bis 4 bar.

In Bild 5.26 sind die chemischen Zusammensetzungen des oberflächennahen Werkstoffbereichs für die Bearbeitungsvariation mit 1 bis 4 bar durch XPS-Tiefenprofile dargestellt. Die Variation des Bearbeitungsdrucks ergibt für alle Einstellungen von 1 bis 4 bar ein vergleichbares XPS-Tiefenprofil. Ab einer Tiefe von 15 nm ist bei allen Bearbeitungsdrücken die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffs erreicht. Dabei beträgt der Eisenanteil im Mittel 90 At.-%. Eisenoxid hat direkt unter der Oberfläche einen Anteil von 30 At.-% und ist im Bereich tiefer als 10 nm unter 1 At.-%. Der Sauerstoff beträgt unmittelbar an der Oberflä-

che 50 At.-% und ist ab einer Tiefe von 10 nm bei konstanten 5 bis 7 At.-% vorhanden. Der Kohlenstoff, welcher in Form von CH<sub>x</sub>-Gruppen vorhanden ist, beträgt direkt an der Oberfläche im Mittel 40 At.-% und ab einer Tiefe von 4 nm unter 1 At.-%. Bei einem Bearbeitungsdruck von 2 bar ist der Anteil des Kohlenwasserstoffs bei der Tiefe von 4 nm mit 4 At.-% noch geringfügig höher. Ab 35 nm Tiefe ist der Anteil von Kohlenwasserstoff wie bei den Bearbeitungsdrücken von 1, 3 und 4 bar unter 1 At.-%. Da dieser geringe Unterschied innerhalb der Messunsicherheit der XPS Analyse liegt, wird dieser Unterschied als nicht signifikant eingestuft. In Carbiden gebundener Kohlenstoff ist bis zu 7 At.-% in einer Tiefe von 5 bis 7 nm Tiefe vorhanden. Ab 15 nm ist dieser mit weniger als 3 At.-% detektierbar. In geringen Mengen unter 1 At.-% ist Mangan, Calcium und Zink in den Werkstücken vorzufinden.

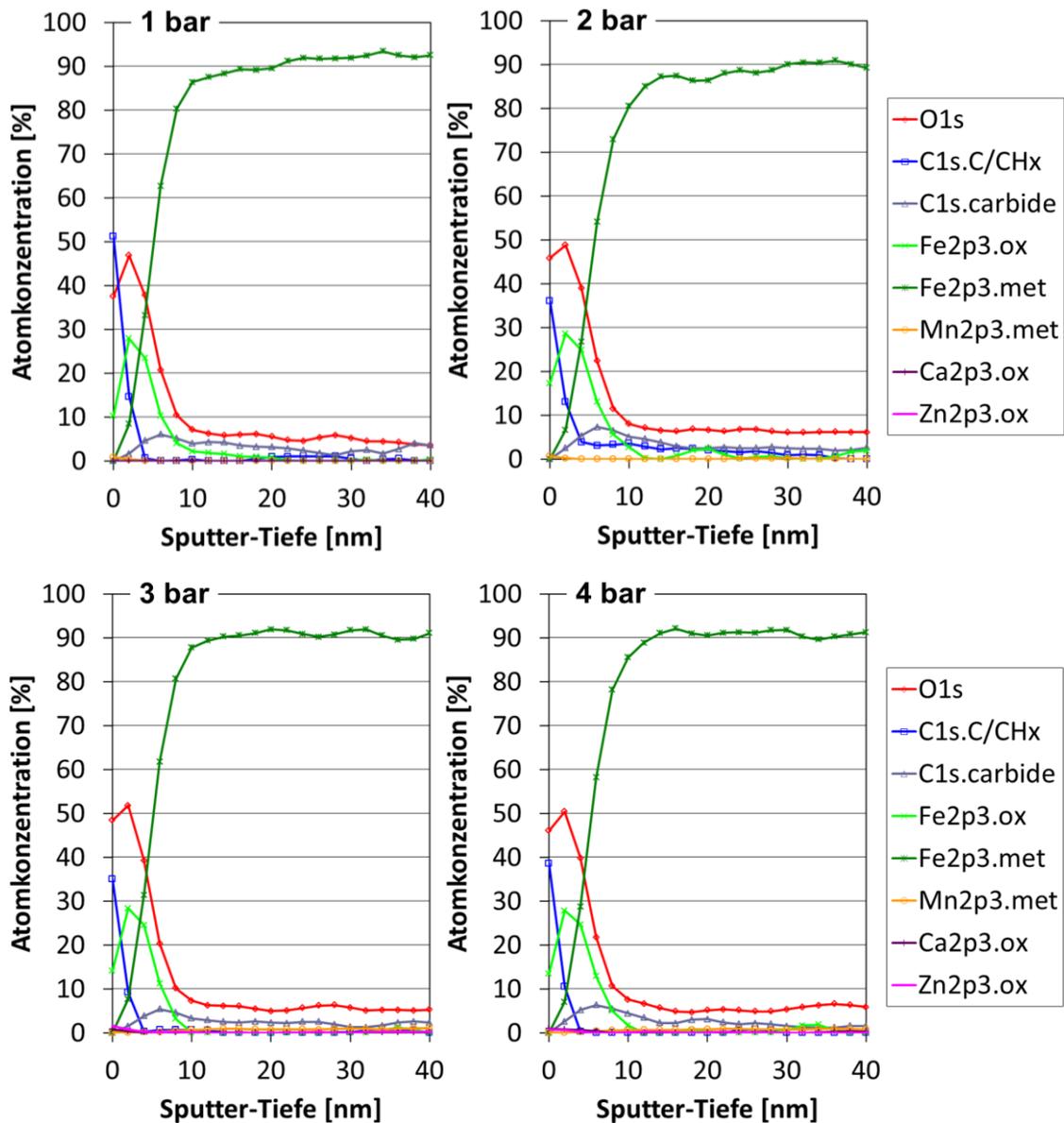


Bild 5.26: Chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar.

Die Auswirkung der unterschiedlich ausgeprägten oberflächennahen Gefügebereiche durch die Variation des Bearbeitungsdrucks auf die Festigkeitskennwerte, wird in diesem Kapitel durch Indentationsmessungen untersucht. Hierfür wurden nach dem Polymerlappen mit den unterschiedlichen Bearbeitungsdrücken von 1 bis 4 bar in der betrachteten Grenzschicht bis zu einer Tiefe von circa 400 nm die Härte und der E-Modul bestimmt.

Die Bestimmung dieser Materialkennwerte erfordert beim Eindringen des Prüfkörpers einen ausreichend großen Widerstand. Aus diesem Grund konnten bei den meisten Einzeleindrücken der 3 bar Variante erst ab einer Tiefe von circa 50 nm und bei der 4 bar Variante ab 140 nm die Festigkeitswerte bestimmt werden. Da dieses Kriechverhalten bei circa 80 % der Eindrücke dieser Varianten auftrat, wurden die Kurven dieser Einzeleindrücke als repräsentativ für die nachfolgend dargestellten Tiefenverläufe der untersuchten Variante verwendet.

Eine flächenbezogene Übersicht mit den Mittelwerten aus den jeweils ersten drei Härtewerten eines Tiefenverlaufs aus den Kurven von Bild 5.30, ist in Bild 5.27 zu sehen. Hier sind auch die Werte aus den Kurven ohne Kriechverhalten für die 3 und 4 bar Variante mit abgebildet. Dadurch ergibt sich eine Gesamtübersicht der Verteilung der Härtewerte auf einer Fläche der Proben von circa 150 mal 100  $\mu\text{m}$ . Die Abstände der einzelnen Indents zueinander sind, wie bereits in Kapitel 3.3.3 erwähnt, zueinander gleich. Die Felder in dieser Darstellung repräsentieren die Eindrücke auf der jeweiligen Probe. Die Nummerierungen der Felder zeigen die Reihenfolge der durchgeführten Indentationen. Entscheidend für die Beurteilung der Härtewerte sind die verwendeten Feldfarben, welche mit den im rechten Bildbereich angegebenen Härtewerten korrespondieren.

Im Bild oben links ist die Darstellung für die 1 bar Probe zu sehen. Hier sind nur wenige Bereiche mit Härtewerten kleiner als 10 GPa vorhanden. Bei den anderen Varianten treten im Gegensatz dazu die Indents mit Härten größer als 10 GPa kaum auf. Bei der 2 bar Variante oben rechts überwiegt die Anzahl der Indents mit einem Härtewert im Bereich von 7 bis 9 GPa. Die mittleren Härtewerte der 3 bar Variante, in dem Bild unten links, liegen im Bereich von bis zu 3 GPa. Bei der Probe nach der Bearbeitung mit einem Lappdruck von 4 bar sind die Werte größtenteils geringer als 2 GPa, wie aus der Darstellung in dem Bild unten rechts zu sehen. Bei dieser Ergebnisdarstellung ist jedoch auffällig, dass bei jeder geläpften Variante vereinzelt Indents mit Härtewerten größer als 14 GPa vorhanden sind. Die einzelnen Indents mit den rot gekennzeichneten, großen Härtewerten bei der 3 und 4 bar Variante stellen dabei die Messkurven dar, welche beim Eindringen des Prüfkörpers kein Kriechverhalten aufweisen.

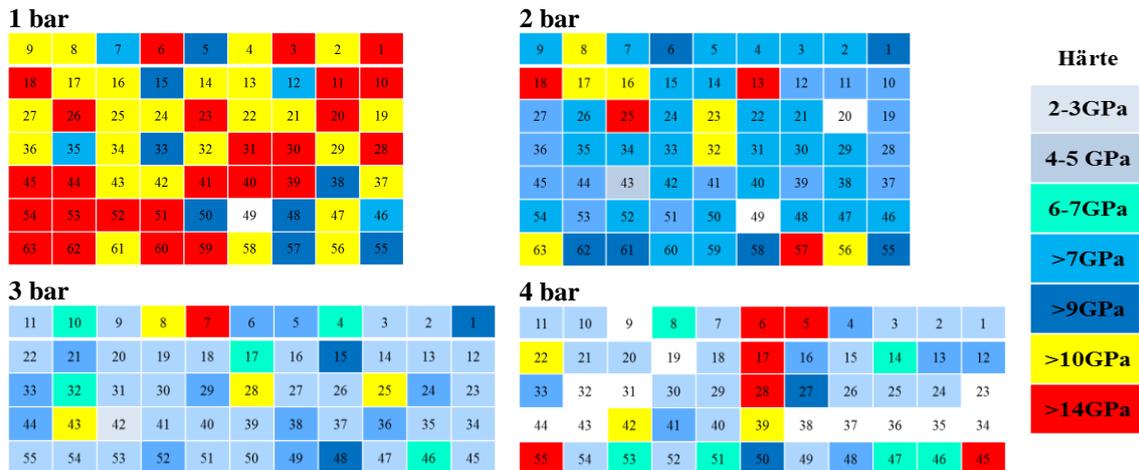


Bild 5.27: Nanohärteverteilung der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar.

Aufgrund dieser einzelnen hohen Härtewerte, wurden in den Bereichen mit den Indentereindrücken EDX-Aufnahmen als weitere Möglichkeit zur Bestimmung chemischer Elemente im oberflächennahen Bereich gemacht.

Hierfür wurden als Erstes punktuelle EDX-Spektren aufgezeichnet und ausgewertet. Neben den zu erwartenden Peaks, wie beispielsweise des deutlichsten Peaks von Eisen, wurden dabei an den polymergeläpften Oberflächen häufig Kohlenstoffpeaks festgestellt. Deshalb sind in Bild 5.28 EDX-Mappings des Kohlenstoffs und die dazugehörigen REM-Aufnahmen gezeigt. Die Bereiche mit Kohlenstoffanlagerungen sind in den EDX-Maps rot eingefärbt zu sehen. In den dazugehörigen REM-Aufnahmen erscheinen diese Bereiche dunkel. Bei der 1 und 2 bar Probe sind kaum Kohlenstoffanlagerungen vorhanden. Im gezeigten Bildausschnitt der 1 bar Probe sind jedoch im Vergleich zur 2 bar Variante mittig fleckige Kohlenstoffanlagerungen zu sehen. Die Oberfläche der 3 bar Variante weist wesentlich flächigere Bereiche mit Kohlenstoffanlagerungen auf. Das Bild der 4 bar Variante zeigt auch Kohlenstoffanlagerungen, welche im Gegensatz zur 3 bar Variante noch weitaus größere Bereiche bedeckt.

Im Gegensatz zu den in Bild 5.26 dargestellten chemischen Tiefenprofilen mit XPS, ist eine Tiefeninformation bei den gezeigten EDX-Messungen nicht möglich. Die Kalibrierung zur Korrelation der Abtragszeit mit der Tiefeninformation, erfolgt bei den gezeigten XPS-Messungen auf einem Werkstoff, welcher eine vergleichbare Abtragsgeschwindigkeit zu metallischen Werkstoffen hat. Befindet sich auf dem metallischen Werkstoff eine dünne, organische Schicht, welche eine wesentlich höhere Abtragsgeschwindigkeit besitzt, führt dies dazu, dass diese Schicht im XPS-Tiefenprofil mit einer kleineren Tiefenangabe erscheint. In Abhängigkeit von der Position des XPS-Analysebereichs, mit einem Durchmesser von 100 bis 200  $\mu\text{m}$ , erscheint der direkt an der Oberfläche auftretende Kohlenwasserstoffpeak stärker oder schwächer. Deshalb kann mit den hier vorliegenden XPS-Tiefenprofilen keine Korrelation der Bearbeitungsdrücke zu der flächigen Verteilung des Kohlenwasserstoffs gemacht werden, wie es mit den gezeigten EDX-Mappings aus Bild 5.28 möglich ist.

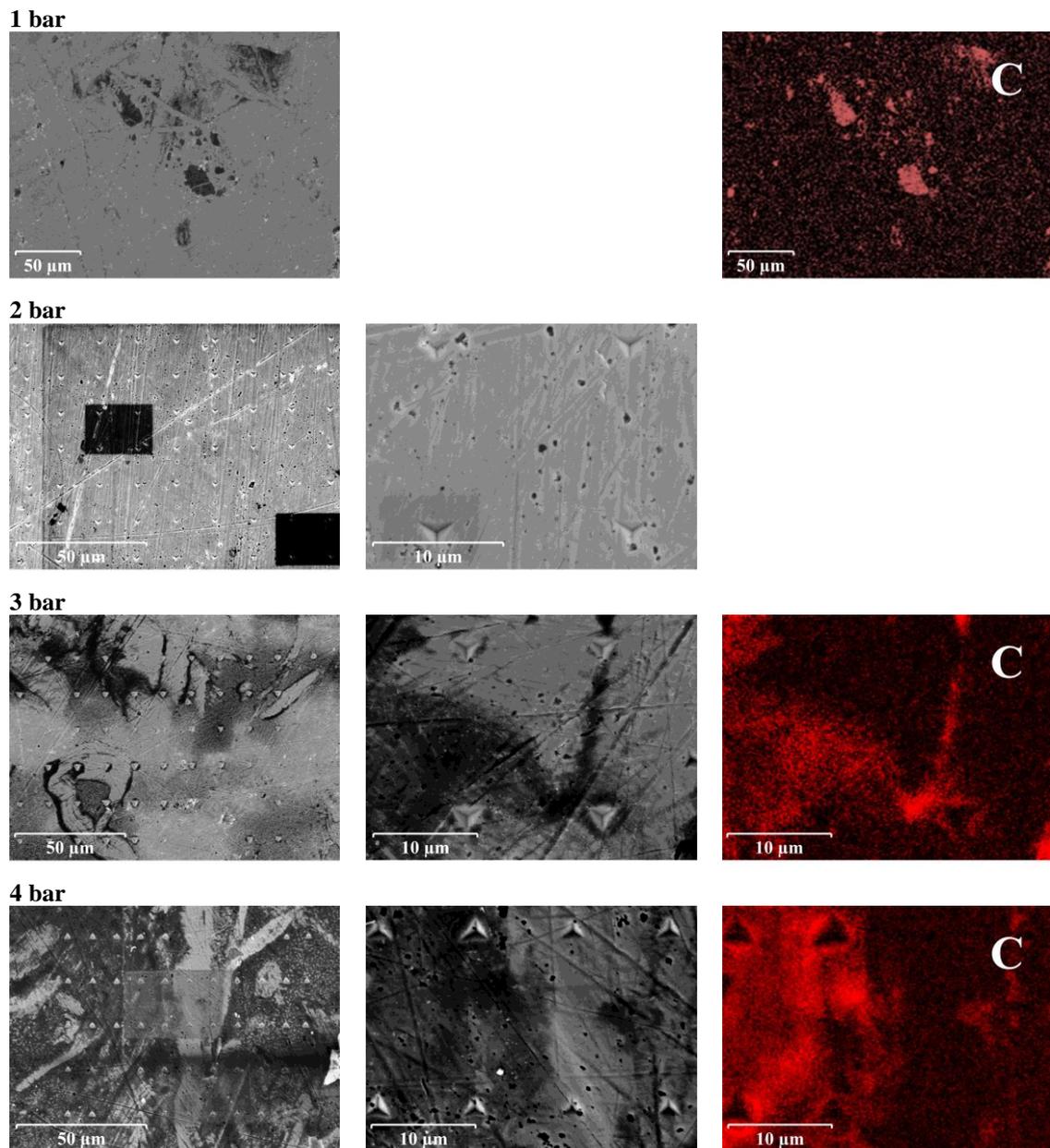


Bild 5.28: REM- und EDX-Aufnahmen an Bereichen der Indentereindrücken der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar.

Korreliert man die REM- und die EDX-Aufnahmen aus Bild 5.28 mit den Härtewerten der einzelnen Eindrücke von Bild 5.27 ist deutlich zu sehen, dass an den Stellen mit Kohlenwasserstoffanlagerungen die geringen Oberflächenfestigkeiten vorhanden sind und bei den Stellen ohne Kohlenwasserstoffanlagerungen die hohen Festigkeiten festzustellen sind. Dies ist am besten bei der 4 bar Variante zu sehen. Weiterhin ist bei der 4 bar Variante festzustellen, dass das Verhältnis von Bereichen mit Kohlenwasserstoffanlagerung zu Bereichen ohne Kohlenwasserstoffanlagerung dem von ferritischen zu perlitischen Bereichen entspricht. Hiermit kann davon ausgegangen werden, dass Kohlenwasserstoffanlagerungen den ferritischen Bereichen zugeordnet werden können. Diese Annahme wird durch die Tatsache bekräftigt, dass

Perlit aufgrund der höheren Festigkeit des Gefüges eine im Vergleich zu Ferrit geringere Adhäsionsneigung besitzt [45].

In Bild 5.29 ist die Messkurve eines Eindrucks auf der 4 bar Probe ohne Kriechverhalten dargestellt. Dieses Verhalten ist somit einem perlitischen Bereich zuzuordnen. Im Kraft-Wege Diagramm ist hier eine sich einstellende Hysterese zu erkennen. Damit wird gezeigt, dass durch die sich ändernden Steigungen der Be- und Entlastungskurven mit der verwendeten Prüfgeometrie sowie der angewandten Kraftfunktion als Vorgabe für die Picoindenterversuche, keine absoluten Härte- und E-Modulwerte bei dem Materialverhalten der 4 bar Probe bestimmbar sind. Zur Darstellung der 4 bar Kurve im Vergleich mit den anderen Varianten, wurden die Kurven mit den sich einstellenden Hysteresen jedoch gewertet, da dieses Materialverhalten repräsentativ für diese Variante ist. Die Kurven der 4 bar Variante in Bild 5.30 und in Bild 5.31 sollten deshalb nicht direkt mit den anderen Varianten gegenübergestellt werden. Zur Bewertung der unterschiedlichen Varianten werden die bestimmten Festigkeitswerte trotzdem für einen Vergleich verwendet. Der gesamte Verlauf der Be- und Entlastungszyklen eines Eindrucks bei der 4 bar Probe zeigt zudem eine Steigungsänderung, was auf eine Phasenveränderung im oberflächennahen Bereich dieser Variante zurückzuführen ist. Dies ist ein Hinweis dafür, dass es sich um eine nichtmetallische Phase an der Oberfläche bis zu einer Tiefe von circa 40 nm handeln muss, welche eine andere Festigkeitseigenschaft hat.

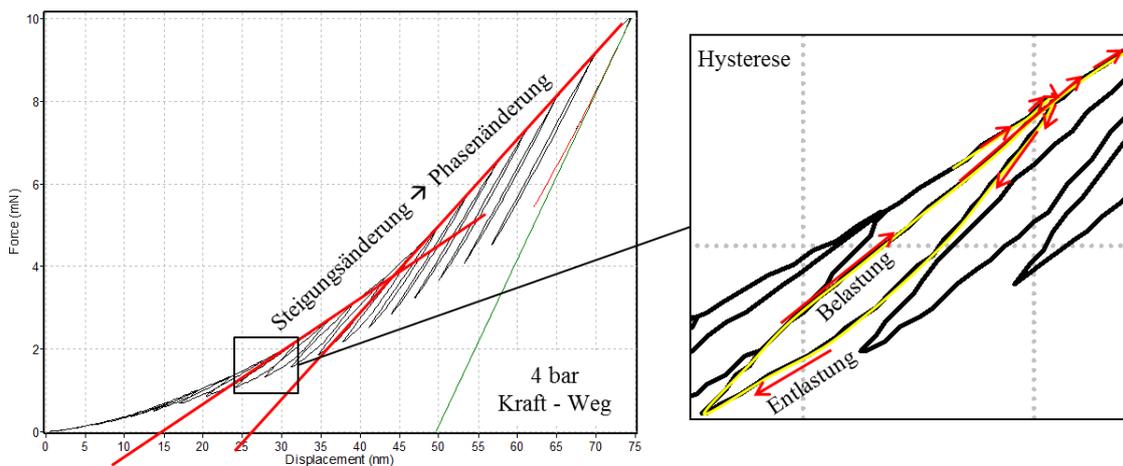


Bild 5.29: Kraft-Wege Verlauf einer einzelnen Picoindentermessung nach dem Polymerläppen mit 4 bar ohne Kriechverhalten.

Die Härtewerte über der Materialtiefe sind in Bild 5.30 zu sehen. Die gezeigten vier Kurven stellen für die untersuchten Bearbeitungsdrücke die Mittelwertkurven dar. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen ausgehend von den jeweils berücksichtigten Messungen aus 20 bis 30 Eindrücken pro Variante. Die vier betrachteten Varianten liegen dabei alle auf unterschiedlichen Härteniveaus und weisen zudem unterschiedliche Kurvenverläufe auf. Der oberflächennahe Bereich mit der größten Härte hat die polymergeläppte 1 bar Variante. Mit zunehmendem Bearbeitungsdruck bis 4 bar ist eine Abnahme der Härtewerte vorhanden. Bei den 1 und 2 bar Varianten befindet sich das Maximum direkt unter der Oberfläche. Die 1 bar Variante weist eine maximale Härte von 12 GPa und die 2 bar Variante von 7 GPa auf. Beide Kurven zeigen einen abfallenden Kurvenverlauf mit einer Asymptote ab circa 300 nm. Der

bei der Asymptote erreichte Härtewert liegt in beiden Fällen bei circa 4 GPa. Im Gegensatz zu der 1 und 2 bar Variante liegt das Maximum der 3 bar Variante mit 3,5 GPa bei einer Tiefe im Material von circa 250 nm. Es ist hier ein ansteigender Kurvenverlauf mit einer Asymptote bei 300 nm vorhanden. Dabei wird in dieser Tiefe analog zu der 1 und 2 bar Variante ein konstanter Wert von circa 4 GPa erreicht. Bei der 4 bar Variante wird innerhalb der untersuchten Tiefen das Maximum nicht erreicht. Das Maximum im untersuchten Bereich stellt der letzte Wert im Tiefenverlauf mit 2 GPa dar. Der Kurvenverlauf ist ansteigend und eine Asymptote ist nicht abschätzbar.

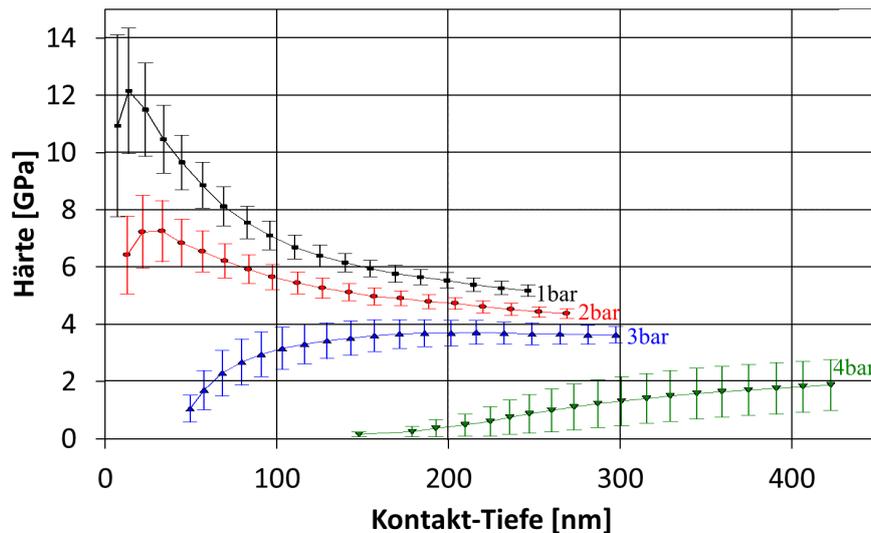


Bild 5.30: Härtetiefenverlauf der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar.

Das Bild 5.31 zeigt die Tiefenverläufe des E-Moduls bei den betrachteten, polymergeläpften Varianten in dieser Arbeit. Die Kurvenverläufe der E-Module gleichen denen der Härten von Bild 5.30. Die Kurven haben bei beiden betrachteten Materialkennwerten einen vergleichbaren charakteristischen Verlauf. Ebenso ist das Ranking der Maximalwerte der E-Module entsprechend dem Ranking bei den Härtewerten. Das Endniveau des gezeigten E-Modulverlaufs der 4 bar Variante repräsentiert ebenso wie beim Kurvenverlauf der Härte noch nicht den Maximalwert.

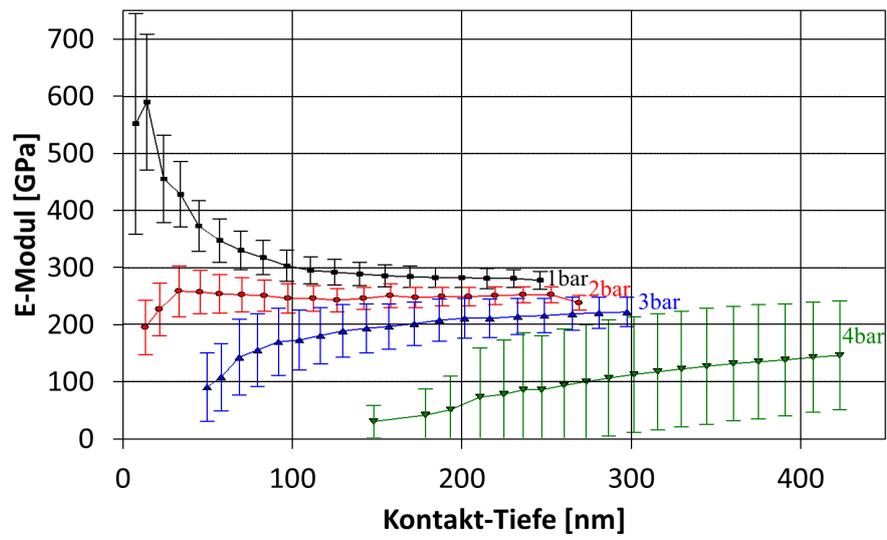


Bild 5.31: Tiefenverlauf des E-Moduls der Stahlstifte nach dem Polymerlappen mit 1, 2, 3 und 4 bar.

## 6 Tribologische Bewertung

### 6.1 Ableitung der Betriebsbedingungen für die Tribometerversuche

Bei den Tribometerversuchen wurden die Modellproben zur Abbildung der Nockenwellenlagerung hinsichtlich der Reibung und des Verschleißes untersucht. In Anlehnung an die Erkenntnisse über einen optimierten, harten Einlauf zum Erreichen von möglichst geringen Verschleißgeschwindigkeiten und niedriger Reibung, wie beispielsweise in [44] und [69] gezeigt, wurden für die Triboversuche hier die Einlaufparameter anhand der Stelle bei der Nockenwelle mit größter Belastung abgebildet. Am stärksten wird die Nockenwelle mit dem Lagerdurchmesser  $d_{NW}$  von 26 mm an der ersten Lagerstelle direkt am Kettentrieb beansprucht. Die sich einstellende Pressung an dieser Stelle ergibt sich aus der wirkenden Kraft und der sichtbaren Verschleißkontaktfläche. Am ersten Lager der Nockenwelle  $F_{Lager1}$  beträgt die mittlere Kraft laut FEM-Berechnung 3 kN. Diese Kraft wird hauptsächlich an dem durch Verschleißspuren erkennbaren Bereich übertragen. In Bild 6.1 ist dieser Bereich an der Nockenwelle sowie am Zylinderkopf zu sehen. Zur Berechnung der Verschleißfläche wird die Breite dieser Verschleißspuren von  $b_{Ver} = 2,2$  mm sowie eine Übertragung der Kräfte auf  $120^\circ$  der Nockenwelle angenommen.

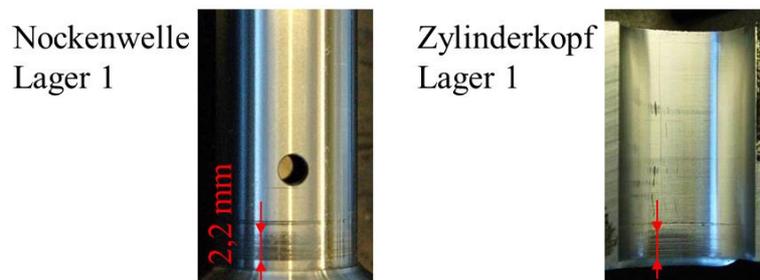


Bild 6.1: Verschleißbereich an der Nockenwellenlagerung am ersten Lager.

Hiermit ergibt sich die Verschleißfläche

$$A_{Ver} = \frac{1}{3} \pi d_{NW} b_{Ver} \quad 6-1$$

und die sich einstellende Pressung zu

$$P_{Ver} = \frac{F_{Lager1}}{A_{Ver}}. \quad 6-2$$

Laut diesen Berechnungen beträgt die Pressung  $P_{Ver} = 50$  MPa. Die Motordrehzahl, welche der doppelten Nockenwellendrehzahl entspricht, wird im Grenz- und Mischreibungsbereich mit 500 U/min angenommen. Hiermit ergibt sich für die Untersuchung des Tribosystems der

Nockenwellenlagerung im Grenz- und Mischreibungsbereich eine für den Einlauf einzustellende Pressung von 50 MPa und eine Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.

Zur Schmierung des Tribosystems wird das Motoröl Shell Helix Ultra 5W30 bei einer konstanten Temperatur von 70° C verwendet.

## 6.2 Durchführung der Tribometertests

Die tribologische Bewertung wurde, wie in Bild 4.12 gezeigt, auf einem Stift-Scheibe Tribometer durchgeführt. Vor der tribologischen Belastung ist es notwendig, dass die Scheibe auf dem Tribometer über einen Adapter ausgerichtet wird. Der zylindrische Stift wird durch einen Stifthalter gehalten. In diesem Halter wird durch ein Kugelausgleichselement eine Anpassung der Stiftstirnfläche zur Scheibenoberfläche ermöglicht. Die geregelte Belastung des Stifts erfolgt über die Krafterzeugung durch eine Feder. Hierfür sind in Krafrichtung eine Kraftmessdose sowie ein Wegmesssensor eingebaut. Die Reibkraft wird mit Dehnungsmessstreifen erfasst und aufgezeichnet. Diese sind am Stifthalter appliziert. Damit die Kraftmessungen der Versuche vergleichbar sind, wurden die Sensoren vor jedem Test mit Meistergewichten neu kalibriert. Des Weiteren erfolgt die Ölzufuhr direkt vor dem Stift über der rotierenden Scheibe. Somit ist die Kontaktstelle immer mit ausreichend temperiertem Öl versorgt. Die Ölversorgung wurde bereits vor dem eigentlichen Tribotest gestartet, damit die Bauteile die gewünschte Temperatur zu Beginn des Versuchs haben. Die beschriebene Anordnung der Scheibe zum Stift mit Ölzufuhr ist in Bild 6.2 zu sehen.

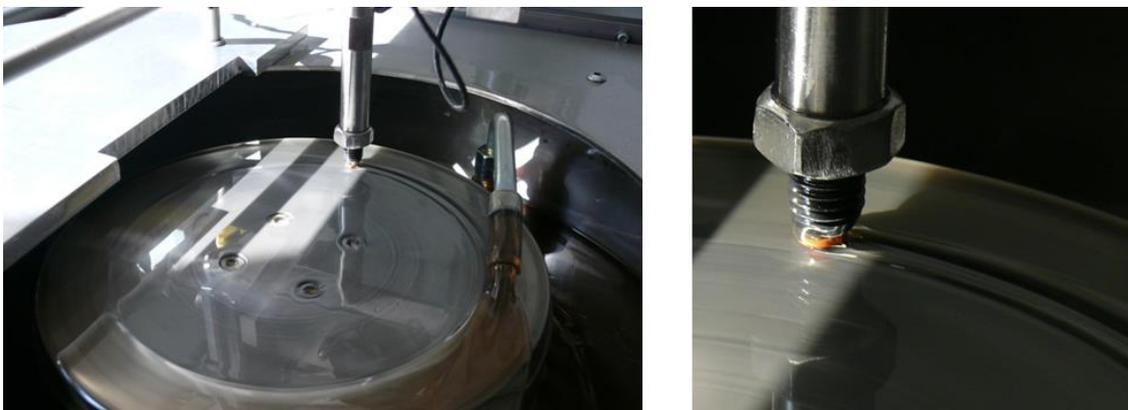


Bild 6.2: Anordnung des Stift-Scheibe Triboversuchs.

Das Versuchsprogramm gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil, die Einlaufphase, dient der Anpassung der beiden Tribopartner sowie des Erreichens eines stabilen Reibwerts und einer annähernd konstanten Verschleißrate. Der Einlauf wurde mit der im Kapitel zuvor bestimmten Pressung von 50 MPa sowie der Geschwindigkeit von 0,34 m/s durchgeführt. Die Einlaufdauer wurde mithilfe von Ergebnissen aus Vorversuchen auf 12 Stunden festgelegt. Danach folgte die Bestimmung der Reibwerte für verschiedene Geschwindigkeiten, um daraus eine Stribeckkurve für die jeweilige Tribopaarung zu erstellen. Begonnen wurden die Geschwindigkeitsstufen mit der höchsten Geschwindigkeit von 1,3 m/s, da hierbei die geringste

Veränderung der Modellproben zu erwarten ist. Die folgenden Geschwindigkeiten sind 0,9; 0,5; 0,35; 0,25; 0,18; 0,1 und 0,08 m/s. Jeder dieser Betriebspunkte wurde 2 Stunden gehalten. Damit die Materialveränderungen bei der Bestimmung der Reibwerte bei verschiedenen Geschwindigkeiten möglichst gering sind, wurde hierfür eine reduzierte Pressung gegenüber dem Einlauf von 36 MPa verwendet.

Die Tribometerversuche wurden mit den geläpften Stahlstiften, welche sich durch den Bearbeitungsdruck beim Läppen unterscheiden, durchgeführt. Hierzu wurden je Bearbeitungsvariante, zwei vergleichbare Stifte mit jeweils neuen und ebenso vergleichbaren Gegenpartnern (Aluminiumscheiben) nacheinander mit dem zuvor beschriebenen Versuchsablauf getestet. Die Auswertungen dieser Versuche hinsichtlich Reibung und Verschleiß im Einlauf und den darauffolgenden Betriebspunkten mit variierter Geschwindigkeit, ist Inhalt des nachfolgenden Kapitels.

## 6.3 Versuchsergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse aus den Tribometerversuchen erfolgt für die Reibung und den Verschleiß getrennt voneinander. Dabei werden der Einlauf sowie die einzelnen Betriebspunkte mit verschiedenen Geschwindigkeiten ebenso separat gezeigt und bewertet.

### 6.3.1 Reibung

Die Auswirkung der Bearbeitungsdrücke beim Polymerläppen auf die Reibung, erfolgt durch die Bewertung des Reibwerts  $\mu$ . Dieser wird aus den Messaufzeichnungen, der über eine Feder geregelte Normalkraft und die sich beim Versuch einstellende Reibkraft berechnet. Als erstes erfolgt die Bewertung der zeitlichen Verläufe des Reibwerts beim Einlauf und den variierten Geschwindigkeitsstufen. Aus den Ergebnissen der variierten Geschwindigkeitsstufen erfolgt im Anschluss eine Gegenüberstellung der Ergebnisse anhand von Stribeckkurven. In den Darstellungen des zeitlichen Verlaufs vom Reibwert wird neben der ungefilterten Messkurve  $\mu$  in der Farbe Blau, eine mit dem Savitzky-Golay Filter geglättete Kurve in Rot gezeigt. Diese gefilterte Kurve wird für die Bewertung und Gegenüberstellung der Varianten betrachtet.

In den Diagrammen von Bild 6.3 bis Bild 6.5 ist das Einlaufverhalten der betrachteten Varianten zu sehen. Das Einlaufverhalten der beiden 1 bar Versuche, wie in den Diagrammen von Bild 6.3 dargestellt, ist zueinander vergleichbar. Innerhalb der ersten drei bis vier Stunden steigt der Reibwert von 0,06 auf 0,08 an und bleibt von da an nahezu konstant. Beim ersten Versuch mit 1 bar steht am Schluss des Einlaufs der Reibwert immer noch bei 0,08 und beim zweiten Versuch ist der Reibwert am Schluss auf 0,06 zurückgegangen. Das ebenso in Bild 6.3 gezeigte Reibverhalten der beiden Versuche mit 2 bar geläpften Stiften ist im Einlauf auch miteinander vergleichbar. In beiden Fällen ist der Startwert des Reibwerts, wie bei der 1 bar Variante, bei 0,06. Danach fällt der Reibwert in der ersten Stunde ab und steigt von da an kontinuierlich an. Beim ersten Versuch kam es zu einem Abbruch der Messaufzeichnung nach sechs Stunden. Der Versuch lief jedoch ohne Messdatenaufzeichnung bis zum Ende weiter. Der zweite Versuch zeigt einen Reibwert am Ende des Einlaufs von 0,08.

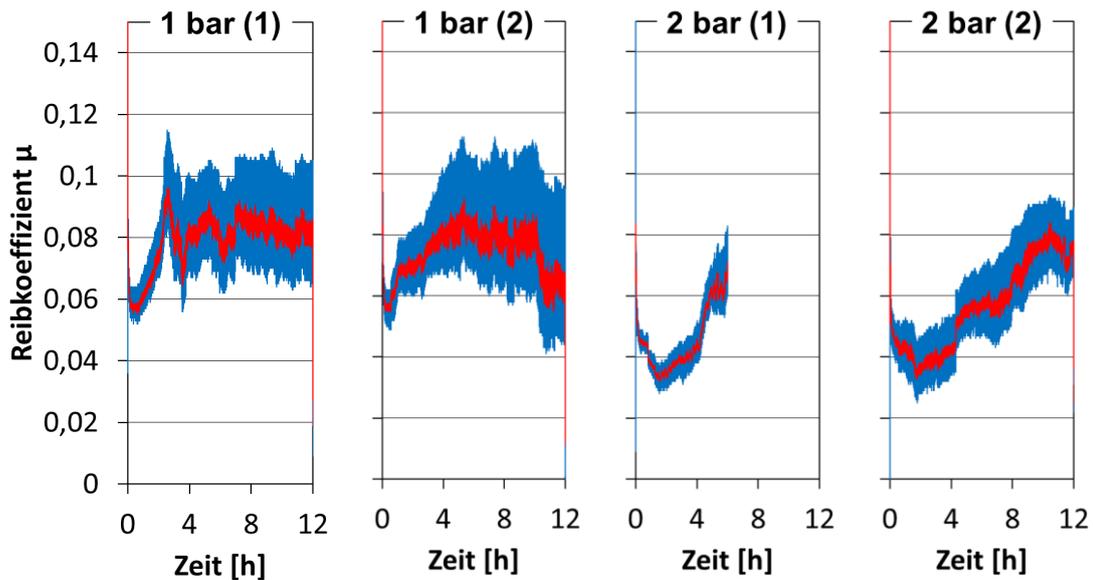


Bild 6.3: Reibwert der 1 und 2 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.

Im Gegensatz zu den Einlaufergebnissen der 1 und 2 bar Variante, sind die beiden Ergebnisse mit den 3 bar Proben nicht vergleichbar, siehe Bild 6.4. Beide Versuche beginnen, wie bei den Versuchen zuvor, bei einem Reibwert von 0,06. Im Gegensatz zu den Versuchen mit der 1 und 2 bar Variante zeigt der Versuch mit der ersten 3 bar Probe keine Erhöhung des Reibwerts. Bei dem Kurvenverlauf der zweiten 3 bar Probe ist nach einer Laufzeit von circa zwei Stunden jedoch wieder ein deutlicher Anstieg des Reibwerts vorhanden. Hieraus resultiert ein Reibwert nach dem Einlauf für den ersten 3 bar Versuch von 0,05 und beim zweiten 3 bar Versuch von 0,09.

Die Reibwerte des Einlaufs der 4 bar Proben zeigen keine nennenswerten Unterschiede, wie in Bild 6.5 zu sehen ist. Der Einlauf startet hier bei einem Reibwert von circa 0,06 und verringert sich innerhalb der 12 Stunden stetig auf einen Wert zwischen 0,03 und 0,05. Die abrupten Änderungen der Reibung nach circa halber Einlaufzeit sind auf das Nachregeln der Normalkraft zurückzuführen. Somit kann bei der Bewertung des Einlaufs lediglich für die 4 bar Variante bei allen getesteten Proben eine Reduzierung des Reibwerts bestätigt werden.

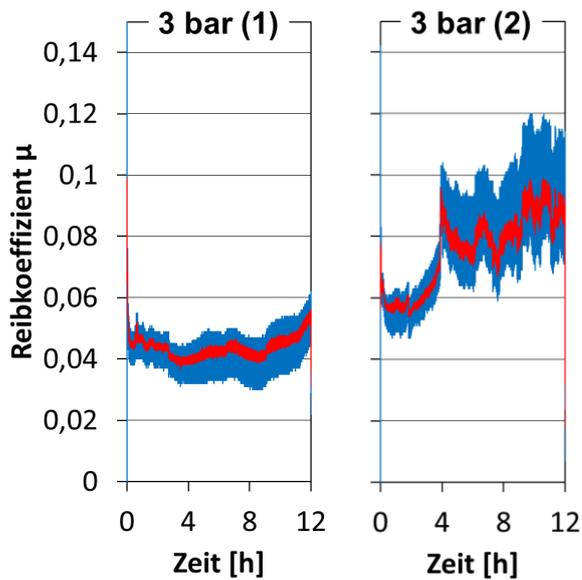


Bild 6.4: Reibwert der 3 bar polymergeläpften Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.

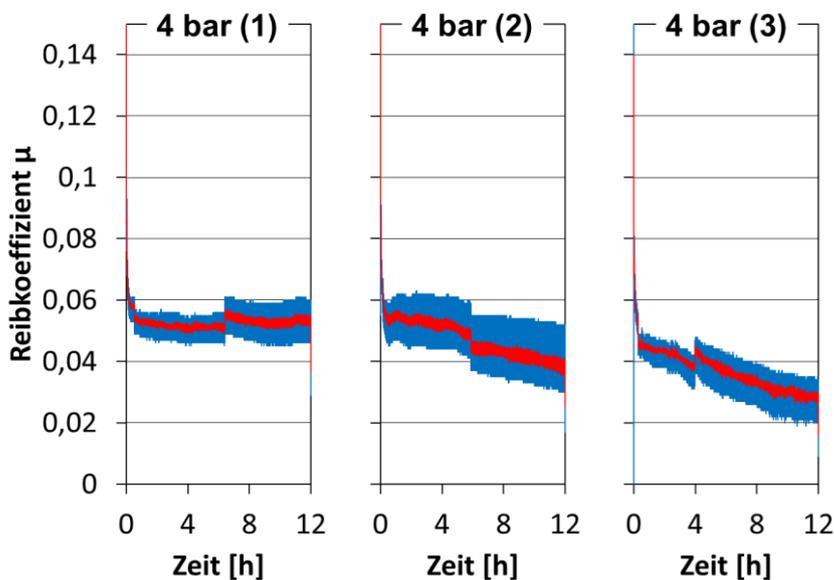


Bild 6.5: Reibwert der 4 bar polymergeläpften Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.

In den Diagrammen in Bild 6.6, Bild 6.7 und Bild 6.8 sind die zeitlichen Verläufe des Reibwertes bei den variierten Geschwindigkeitsstufen dargestellt. Anhand der schwarzen Kurve und mithilfe der eingezeichneten Sekundärachse sind die jeweiligen Geschwindigkeitsstufen

ablesbar. Die Ergebnisse der 1 und 2 bar Variante sind in Bild 6.6 zu sehen, die der 3 bar Variante in Bild 6.7 und die der 4 bar Variante in Bild 6.8.

In Bild 6.6 sind die Reibwertverläufe der 1 bar Variante abgebildet. Hier sind bei beiden Durchläufen mit den 1 bar Triboproben große Änderungen des Reibwerts innerhalb der Laufzeit bei den Geschwindigkeitsstufen zu erkennen. Lediglich die Reibwerte bei den Gleitgeschwindigkeiten 1,3; 0,9; 0,1 und 0,08 m/s weisen einen gleichbleibenden, zeitlich anhaltenden Kurvenverlauf auf. Beide Kurven haben zu Beginn des Versuchs mit der höchsten Gleitgeschwindigkeit von 1,3 m/s einen Reibwert von 0,02. Zum Ende des ersten 1 bar Versuchs mit der Gleitgeschwindigkeit von 0,08 m/s beträgt der Reibwert 0,115 und beim zweiten 1 bar Versuch 0,1.

Weiterhin ist aus diesen Ergebnissen erkennbar, dass bei der Geschwindigkeit von 0,18 und 0,35 m/s Resonanzschwingungen auftreten, die für ein überlagertes Schwingungssignal im Reibwert sorgen.

Der Reibwertverlauf der 2 bar Variante, welche auch in Bild 6.6 dargestellt ist, zeigt starke Reibwertänderungen in allen Betriebspunkten. Das Tribosystem erreicht hier keinen stabilen Zustand. Bereits bei der hohen Gleitgeschwindigkeit von 1,3 m/s stellt sich hier ein vergleichsweise hoher Reibwert von 0,04 ein. Der Reibwert bei der niedrigsten Gleitgeschwindigkeit mit 0,08 m/s ist, wie beim Versuch mit der zweiten 1 bar Probe, bei 0,1.

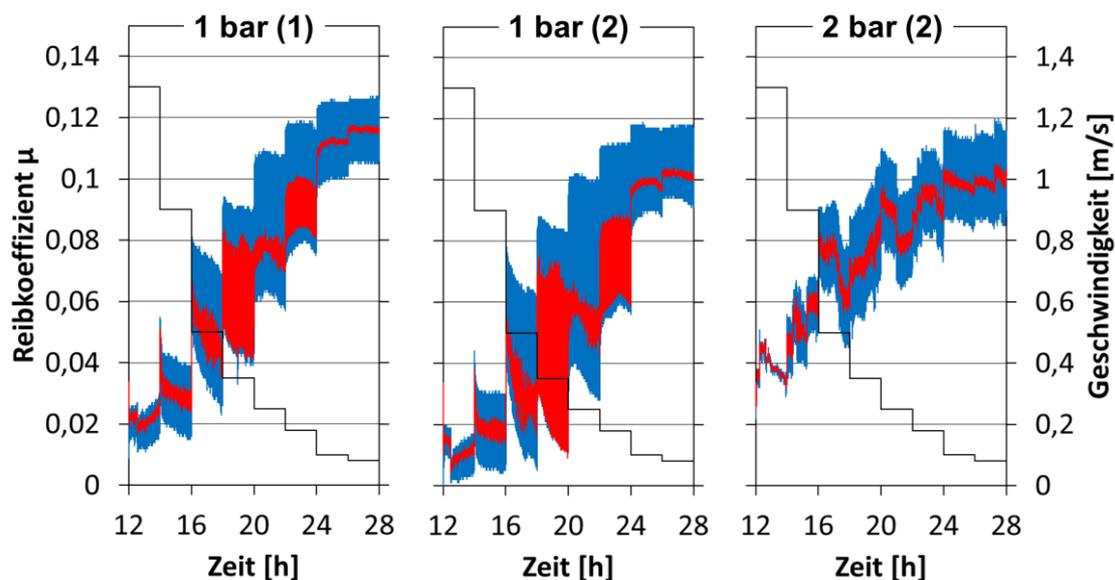


Bild 6.6: Reibwert der 1 und 2 bar polymergeläpften Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten.

In Bild 6.7 sind die Reibwertverläufe der beiden 3 bar Versuche zu sehen. Die Reibwertverläufe verändern sich innerhalb eines Betriebspunktes des ersten Versuchs nur sehr wenig. Im Gegensatz dazu gibt es beim zweiten Versuch größere Varianzen des Reibwerts in den jeweiligen Betriebspunkten und es wird kein konstant bleibender Wert erreicht. Erst bei den letzten beiden Geschwindigkeitsstufen pendelt sich der Reibwert auf einen gleichbleibenden Wert

ein. Das Niveau der Reibwerte ist bei den getesteten 3 bar Triboproben beim zweiten Versuch bis auf den ersten Betriebspunkt mit einer Gleitgeschwindigkeit von 1,3 m/s um 0,01 bis 0,02 größer als beim ersten Versuch. Aus diesem Vergleich ist ersichtlich, dass die 3 bar Variante entweder zu einem niedrigen und konstant bleibenden Reibniveau nach dem hier durchgeführten Einlauf führen kann oder wie das Ergebnis des zweiten Versuchs beweist, auch hohe Reibwerte erreicht werden, bei denen das Einlaufverhalten nicht abgeschlossen ist.

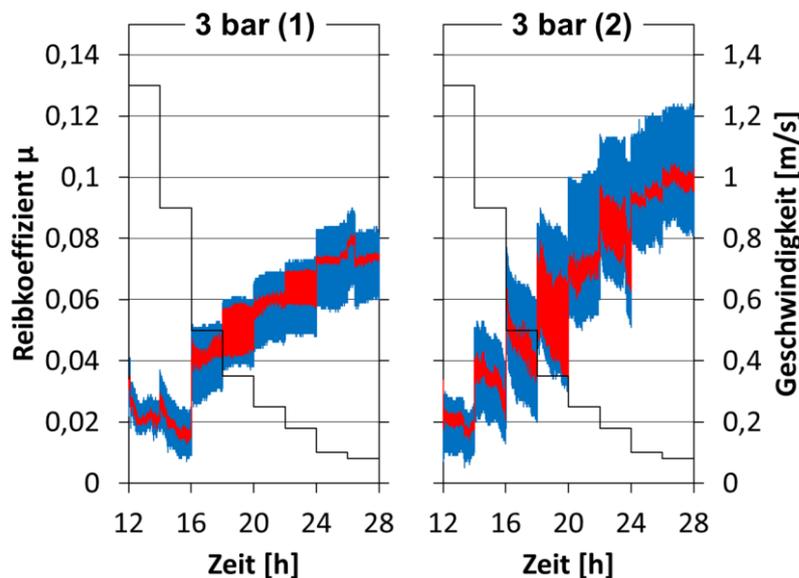


Bild 6.7: Reibwert der 3 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten.

Wie bei der Betrachtung des Einlaufs haben die drei 4 bar Versuche einen vergleichbaren, stabilen Reibwertverlauf. In allen Betriebspunkten bleibt der Reibwert über der Laufzeit bei den jeweiligen Geschwindigkeitsstufen auf einem konstanten Niveau. Die Kurvenverläufe der beiden ersten Versuche beginnen bei einem Reibwert von circa 0,03 bei einer Geschwindigkeit von 1,3 m/s. Bei der geringsten Geschwindigkeit von 0,08 m/s wird aufgrund des höheren Mischreibungsanteils ein Reibwert von 0,08 bei diesen beiden Versuchen erreicht. Beim dritten Versuch mit einem 4 bar Stift wurden bei allen Geschwindigkeitsstufen geringere Reibwertverläufe erzielt. Hier sinkt der Reibwert von Beginn an bei der höchsten Geschwindigkeit direkt auf ein Minimum von 0,01. Der Reibwert bei der geringsten Geschwindigkeit ist bei diesem Versuch mit 0,6 ebenso geringer, wie bei den beiden 4 bar Versuchen zuvor.

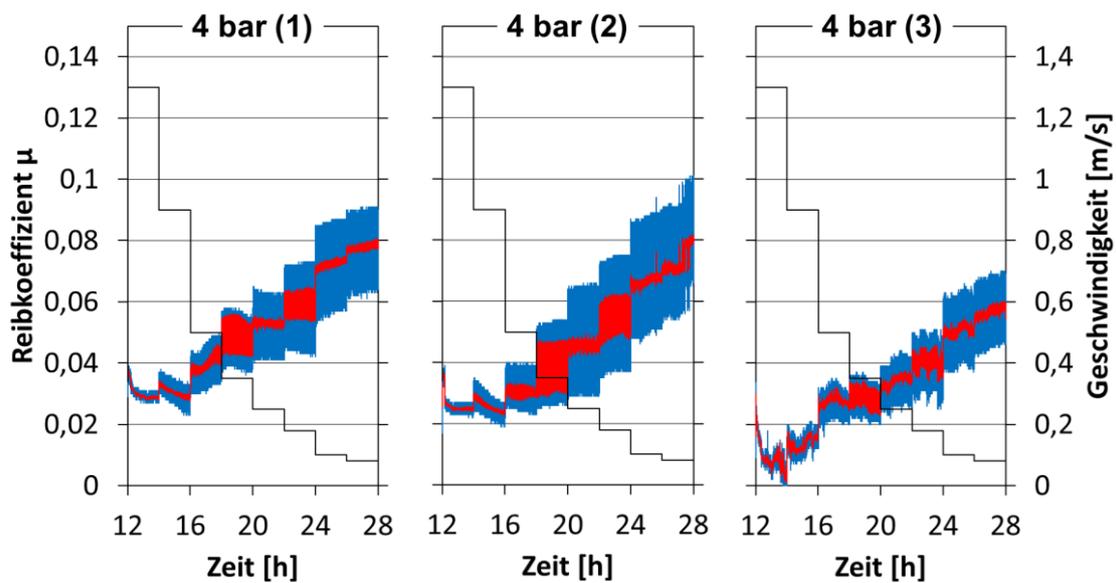


Bild 6.8: Reibwert der 4 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten.

Aus den Reibwertverläufen der Diagramme von Bild 6.6 bis Bild 6.8 wurden für jede getestete Versuchsvariante eine Stribeckkurve erstellt, um einen direkten Vergleich der Reibergebnisse zu erhalten. Hierzu wurde bei jeder Geschwindigkeitsstufe der sich einstellende Reibwert  $\mu$  am Ende des jeweiligen Betriebspunktes für die jeweilige Kurve verwendet. Die gegenübergestellten Stribeckkurven der getesteten Varianten sind in Bild 6.9 zu sehen.

Aus diesem Diagramm ist gut erkennbar, dass die Reibwerte aller getesteten 4 bar Proben sowie eine der beiden 3 bar Proben im Bereich der Grenzreibung bis zu einem  $v/p$ -Verhältnis von 0,01 um durchschnittlich den Faktor zwei geringer sind, als bei den anderen Varianten. Die ersten beiden Proben der 4 bar und die erste Probe der 3 bar Variante zeigen bis zu dem erwähnten  $v/p$ -Verhältnis von 0,01 vergleichbare Reibwerte, die hier geringer als die 1, 2 sowie die zweite 3 bar Proben sind. Bei der dritten 4 bar Probe werden die geringsten Reibwerte bei allen Geschwindigkeiten erzielt. Ab einem  $v/p$  von 0,01 im Bereich der Mischreibung sind die Streuungen der Messwerte so groß, dass keine Unterschiede bei den getesteten Varianten ableitbar sind.

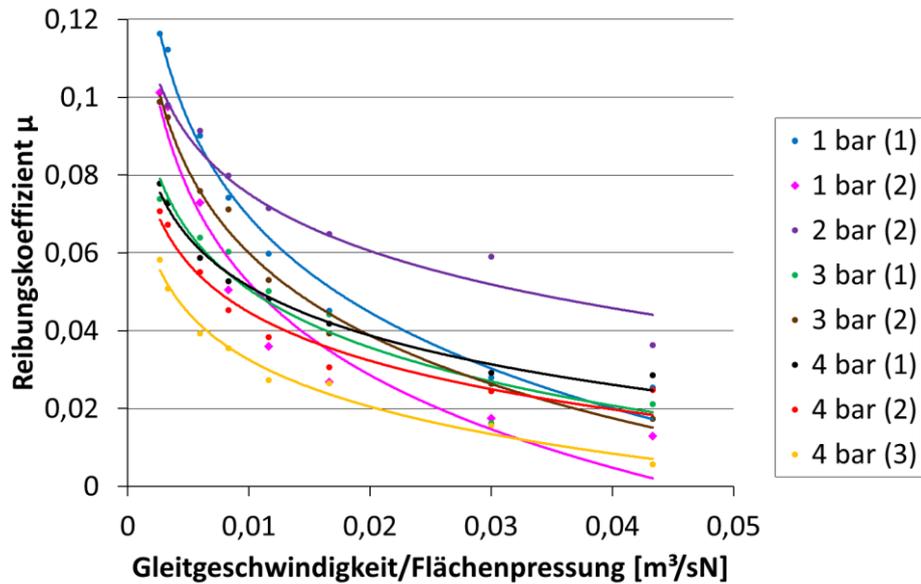


Bild 6.9: Reibwert der 1, 2, 3 und 4 bar polymergeläpften Stahlstifte am Ende der jeweiligen Betriebspunkte in Bezug auf den Quotienten der Gleitgeschwindigkeit zur Flächenpressung.

### 6.3.2 Verschleiß

Neben der Reibung wird der Verschleiß des betrachteten Modellsystems zur Abbildung der Nockenwellenlagerung bewertet. Dies ist wichtig, da beispielsweise eine geringe Reibung vorliegen kann, bei der jedoch erhöhter Verschleiß festzustellen ist. Der erhöhte Verschleiß wiederum verändert das Systemverhalten, was zu erhöhter Reibung oder aber auch zum Ausfall des Systems führen kann.

Die Bewertung des Verschleißes erfolgt zum einen an der aufgezeichneten Positionsnachstellung der Feder zum Aufbringen der Normalkraft und zum anderen anhand von Topographieaufnahmen vor und nach den Triboversuchen. Mit diesen Methoden kann lediglich beurteilt werden, ob sich das System in einem Verschleißregime mit bis zu 100 nm pro Stunde, wie es für angetriebene Wellen im Verbrennungsmotor üblich ist, bewegt oder aber ein Hochverschleiß vorliegt, der im Bereich von über 300 bis 600 nm pro Stunde einen nicht akzeptablen Zustand für Motorbauteile darstellt und in der Regel zum Fresser führt.

Der Tribometer wurde bei den Versuchen kraft geregelt betrieben. Damit die durch eine Feder im Tribometer erzeugte Normalkraft über die Zeit der Versuchsdauer konstant bleibt, erfolgt bei Verschleiß der Triboproben ein Nachregeln der Spannposition der Feder mittels eines Antriebs. Die Position des Antriebs zur Erhaltung der Federauslenkung, dient der Beurteilung des Triboprobenverschleißes. In den Diagrammen aus Bild 6.10 bis Bild 6.15 sind die Veränderung der Spannposition als Verschleiß in mm auf der y-Achse aufgetragen. Die darauffolgenden Abbildungen zeigen die Topographie der Reibpartner vor und nach dem Tribotest.

Durch diesen Vergleich ist feststellbar, welcher Reibpartner seine Topographie verändert und somit einem Verschleiß unterliegt.

Während des Einlaufs mit den 1 bar Proben ist eine Positionsnachstellung der Feder von 0,3 bis 0,4 mm innerhalb der 12 Stunden erfolgt, siehe Bild 6.10. Ein ebenso hoher Verschleiß mit einer Nachstellung von 0,6 mm ist bei dem Versuch mit der zweiten 3 bar Probe in Bild 6.11 zu sehen. Dagegen zeigen die Versuche beim Einlauf mit den 2 bar und 4 bar Proben sowie mit der 3 bar (1) Probe nur einen geringen Verschleiß. Die hierzu gehörigen zeitlichen Verläufe der Positionsnachstellung sind aus den Diagrammen von Bild 6.10 bis Bild 6.12 zu entnehmen. Das Zurückfahren der Spannposition der Feder von bis zu 0,1 mm bei diesen Tests, ist möglicherweise auf Erwärmungen des Tribometers während des Betriebs zurückzuführen und somit für die Bewertung des Verschleißes irrelevant.

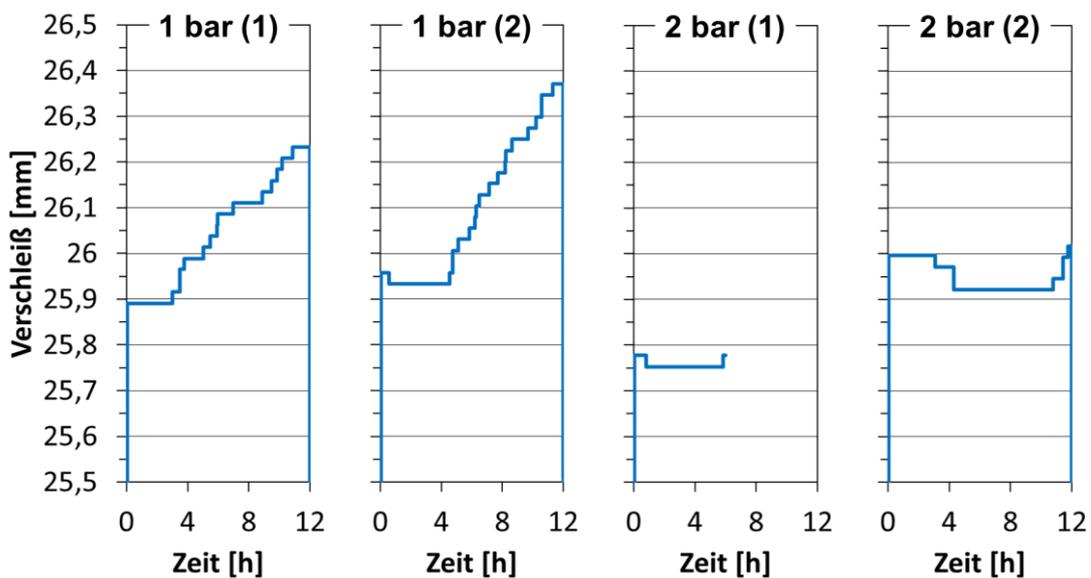


Bild 6.10: Verschleiß der 1 und 2 bar polymergeläppten Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.

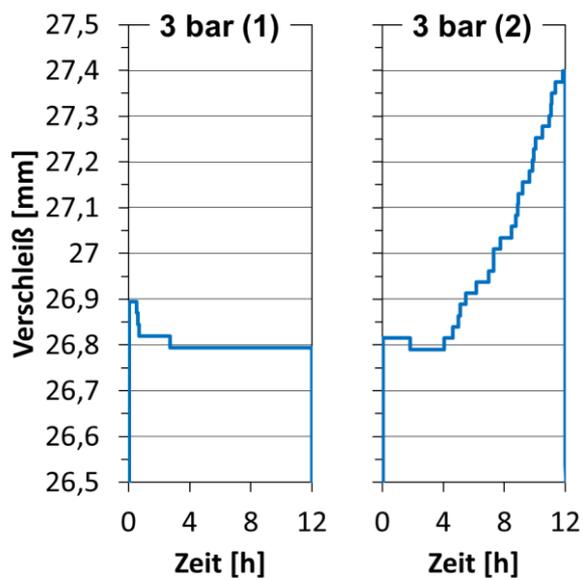


Bild 6.11: Verschleiß der 3 bar polymergeläpften Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.

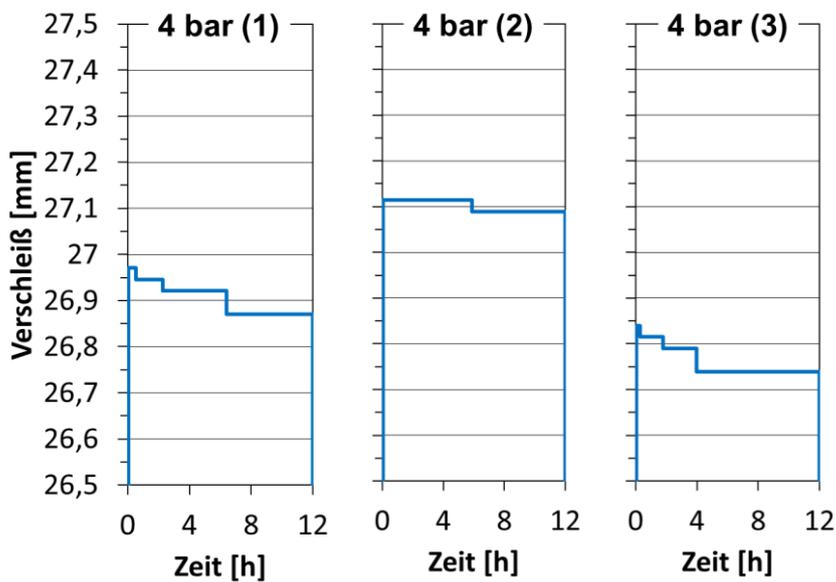


Bild 6.12: Verschleiß der 4 bar polymergeläpften Stahlstifte in der Einlaufphase bei einer Flächenpressung von 50 MPa und einer Gleitgeschwindigkeit von 0,34 m/s.

Analog zur Betrachtung des Reibverhaltens, wird beim Verschleiß auch der Verlauf bei den Betriebspunkten mit variierteter Gleitgeschwindigkeit bewertet.

Die Verschleißverläufe der 1 bar Variante bei den variierten Gleitgeschwindigkeiten unterscheiden sich zu den Ergebnissen der Verschleißbetrachtung beim Einlauf. Beim Einlauf wurde, wie in Bild 6.10 zu sehen, ein Hochverschleiß von 0,3 und 0,4 mm festgestellt. Dagegen ist bei der Betrachtung des Verschleißverlaufs mit variierten Gleitgeschwindigkeiten, wie in Bild 6.13 zu sehen, mit der hier angewendeten Methode kein messbarer Verschleiß mehr vorhanden. Daraus geht hervor, dass bei den 1 bar Proben durch die Belastungen mit hohem Verschleiß im Einlauf sich ein bezüglich des Verschleißes stabiles System gebildet hat.

Beim Triboversuch mit der zweiten 2 bar Probe ist am Ende des Einlaufs ab circa 10 bis 11 Stunden Laufzeit bereits erhöhter Verschleiß durch eine Veränderung der Spannposition um circa 0,1 mm innerhalb von circa 1 bis 2 Stunden entstanden, siehe Bild 6.10. Innerhalb der letzten 9 Stunden des Versuchs bei den Geschwindigkeiten kleiner als 0,35 m/s, ist eine Nachstellung der Feder-Spannposition von weiteren 0,1 mm, aufgrund hohen Verschleißes, erfolgt.

Das Verschleißverhalten der beiden 3 bar Versuche in Bild 6.14 zeigt die Fortsetzung der Verschleißmessungen aus der Einlaufzeit. Der erste 3 bar Versuch zeigt keinen Hochverschleiß. Beim zweiten 3 bar Versuch ist dagegen, wie beim Versuch mit der 2 bar (2) Probe, ein Hochverschleiß von weiteren 0,1 mm in den letzten 10 Stunden vorhanden.

Die Versuche mit den 4 bar Proben, wie in Bild 6.15 abgebildet, zeigen wie bei den Verschleißkurven des Einlaufs keinen hier messbaren Verschleiß.

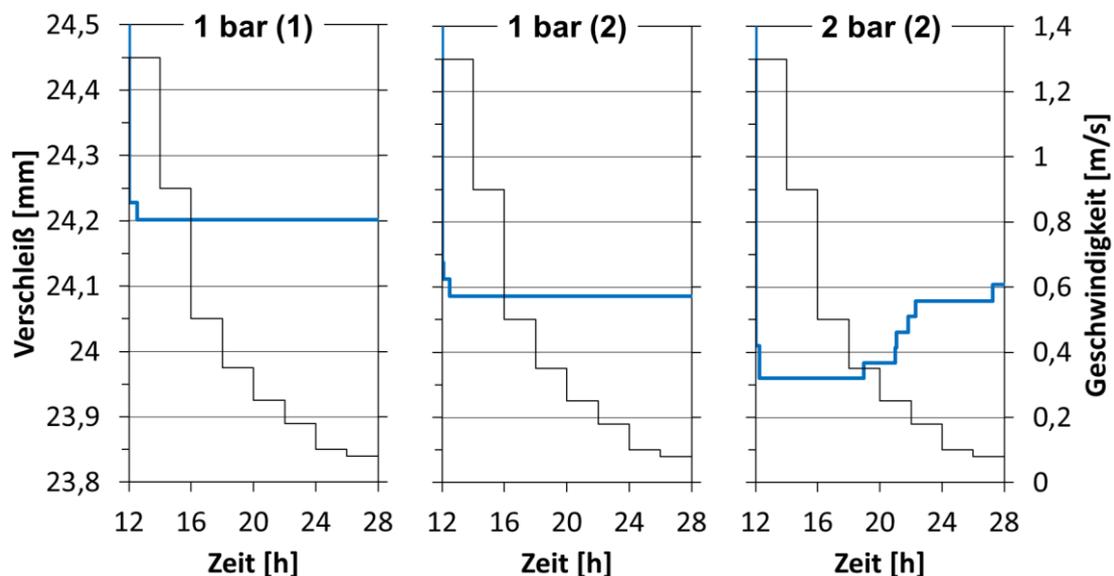


Bild 6.13: Verschleiß der 1 und 2 bar polymergeläpften Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten.

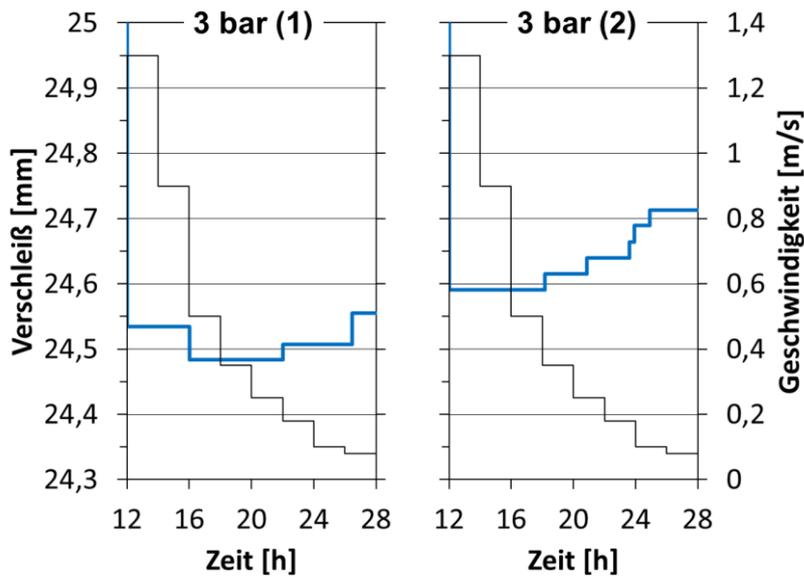


Bild 6.14: Verschleiß der 3 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten.

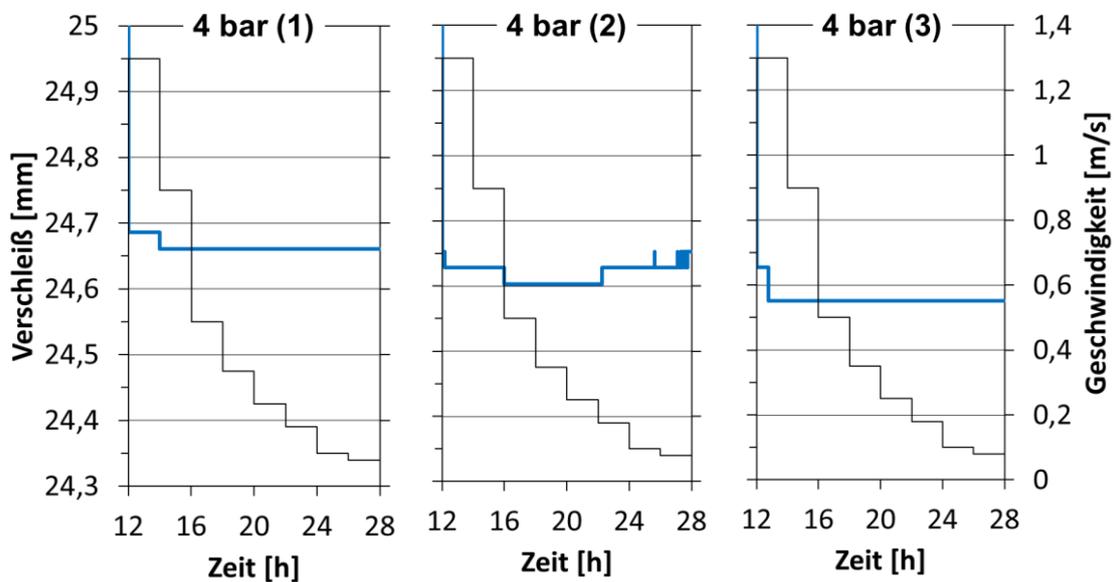


Bild 6.15: Verschleiß der 4 bar polymergeläppten Stahlstifte bei einer Flächenpressung von 36 MPa und variierten Gleitgeschwindigkeiten.

Des Weiteren erfolgt die Beurteilung des Verschleißes anhand von WLI-Aufnahmen der Topographie. Die Darstellung der Topographien vor dem Prüflauf erfolgt am Beispiel eines polymergeläppten 4 bar Stifts und einer repräsentativen Scheibe. Die Stifttopographien der 1 bis

3 bar polymergeläpften Varianten werden hier nicht gezeigt, da sich alle untersuchten polymergeläpften Oberflächen nur minimal durch die unterschiedlich stark ausgeprägten Rauheitstiefen unterscheiden, siehe Kapitel 5.4.2. In Bild 6.16 ist links oben ein Ausschnitt der Topographie des 4 bar polymergeläpften Stifts in der 3D-Darstellung gezeigt. Der Ausschnitt zeigt einen Streifen mit einer Breite von 1 mm über dem gesamten Durchmesser des Stiftes. Darunter ist ein dreidimensionaler Ausschnitt der Triboscheibe zu sehen. Der Ausschnitt zeigt die komplette Breite der Laufspur auf einer Länge von 0,5 mm. Rechts daneben sind die jeweils dazugehörigen Profile zu sehen. Diese sind hier grundsätzlich im rechten Winkel zur Bearbeitungspur und zur Laufspur angeordnet. Aus der gezeigten Topographie nach der Bearbeitung und vor dem Prüflauf, ist beim Tribostift, das für das Polymerlappen charakteristische Kreuzmuster mit einer sehr geringen Rauheit zu erkennen. Die dargestellte Scheibe zeigt die geometrisch bestimmte Riefenstruktur, wie sie durch den Drehprozess vorgegeben wird.

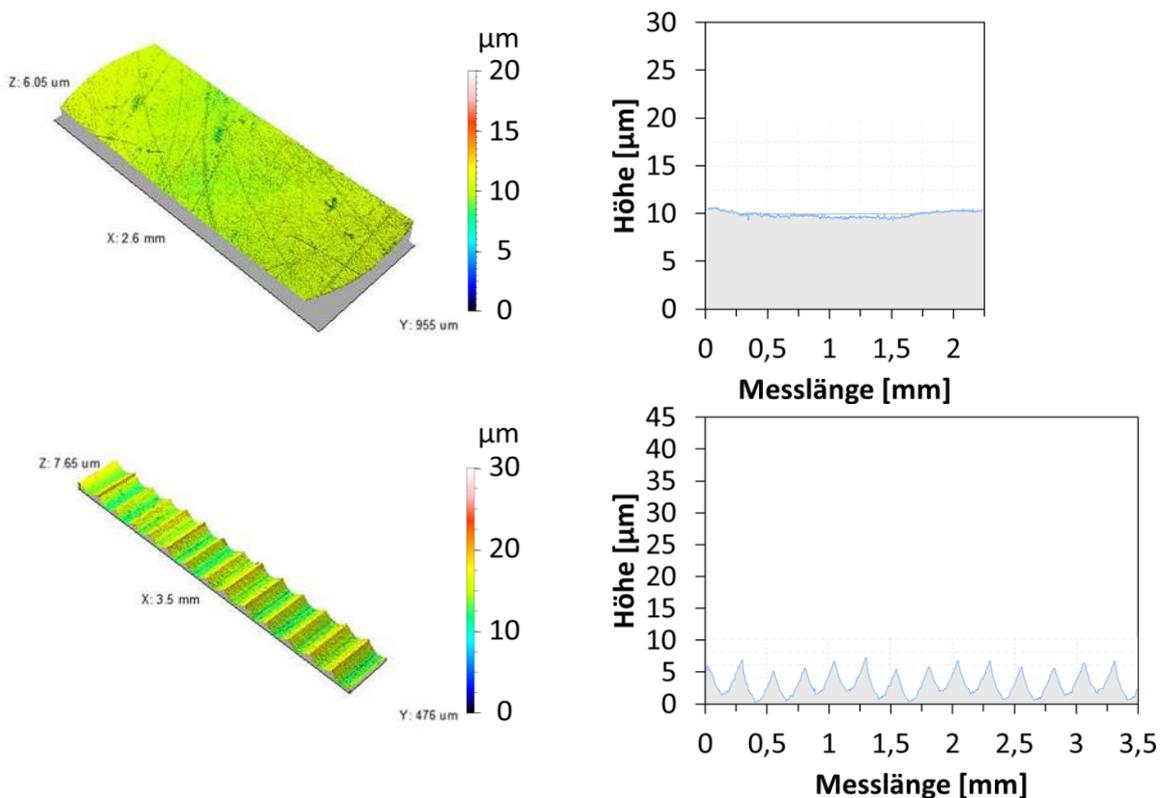


Bild 6.16: WLI-Aufnahmen vor dem Triboversuch eines mit 4 bar polymergeläpften Stahlstifts (oben) und einer feingedrehten Aluminiumscheibe (unten).

Die nachfolgenden WLI-Aufnahmen zeigen die Oberflächen der Stahlstifte mit dem dazugehörigen Bereich der Laufspur auf der Aluminiumscheibe nach dem Prüflauf.

In Bild 6.17 bis Bild 6.20 sind die dreidimensional abgebildeten Topographien sowie die dazugehörigen Profilschriebe der 1 und 2 bar polymergeläpften Stifte mit den jeweiligen Scheibengegenkörpern zu sehen. In beiden Fällen ist nach der Tribobelastung die originäre Ausgangsoberfläche nicht mehr erkennbar. Es ist bei beiden Kontaktpartnern eine verschlissene und raue Oberfläche entstanden. Hiermit wird das zuvor bewertete Nachstellen der Federspannposition zur Kompensation des aufgetretenen hohen Verschleißes bestätigt.

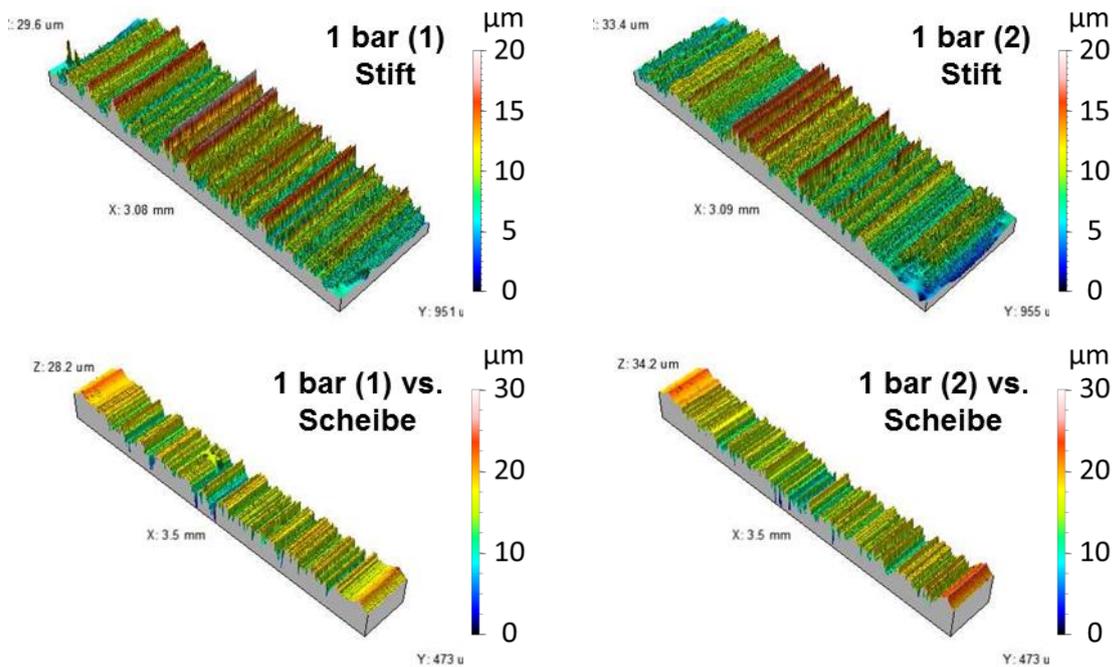


Bild 6.17: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 1 bar polymergeläpften Tribostift.

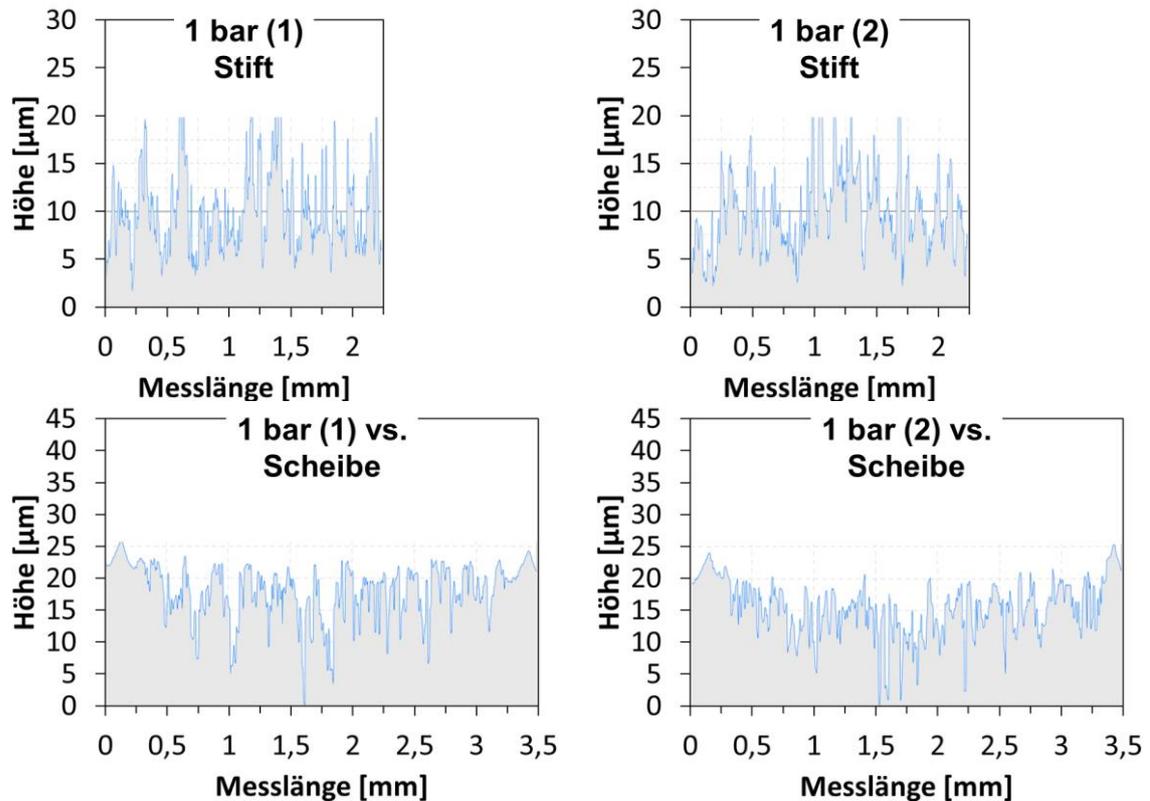


Bild 6.18: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 1 bar polymergeläpften Tribostift.

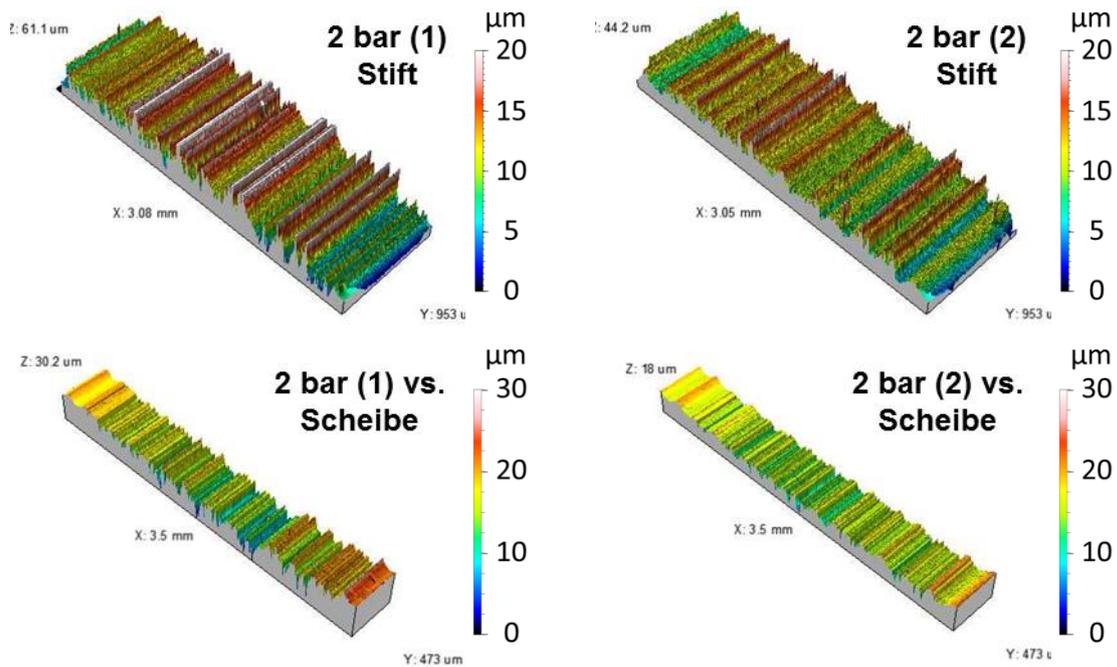


Bild 6.19: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 2 bar polymergeläpften Tribostift.

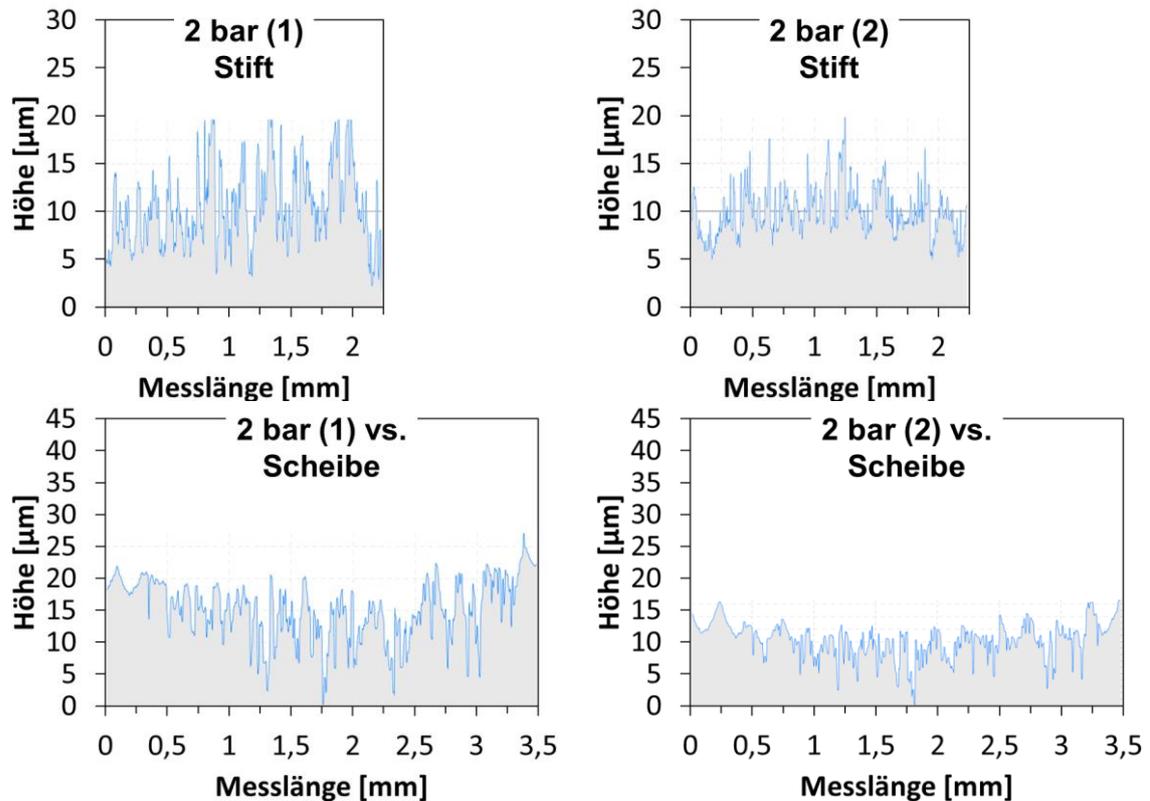


Bild 6.20: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 2 bar polymergeläpften Tribostift.

Bei der getesteten 3 bar polymergeläpften Stiftvariante gibt es bei den beiden durchgeführten Tribotests, wie bei der Online-Methode zur Bewertung des Verschleißes, zwei unterschiedliche Ergebnisse nach dem Prüflauf, siehe Bild 6.21 und Bild 6.22. Nach dem ersten Test ist ein Übertrag der geometrisch bestimmten Riefenstruktur der Scheibe auf den Stift festzustellen. Die Profilschriebe dieser Aufnahmen in Bild 6.22 zeigen, dass die Riefenstruktur der Scheibe exakt zu der erzeugten Riefenstruktur des Stifts passt. Die „Berge“ und „Täler“ haben die gleiche Breite und Höhe und dieselben Abstände zueinander. Nach dem Prüflauf mit dem zweiten 3 bar Stift sind, wie bei den Prüfläufen mit den beiden 1 und 2 bar Stiften, verschlissene Oberflächentopographien von Stift und Scheibe erkennbar, welche keine Merkmale der Oberflächen vor den Prüflauf mehr aufweisen.

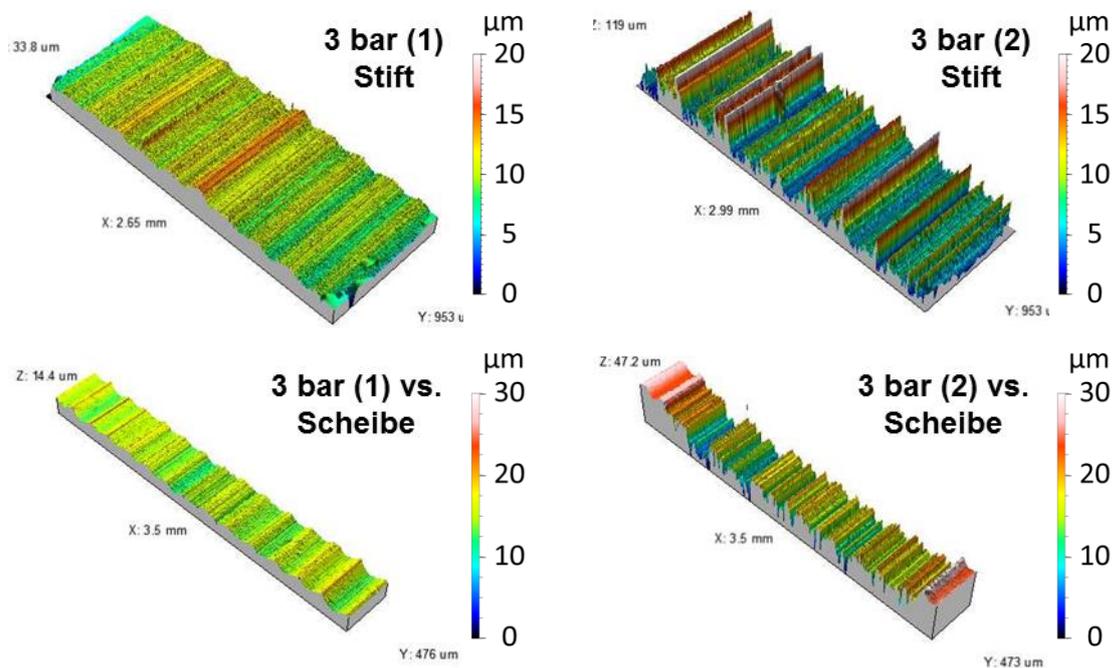


Bild 6.21: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 3 bar polymergeläpften Tribostift.

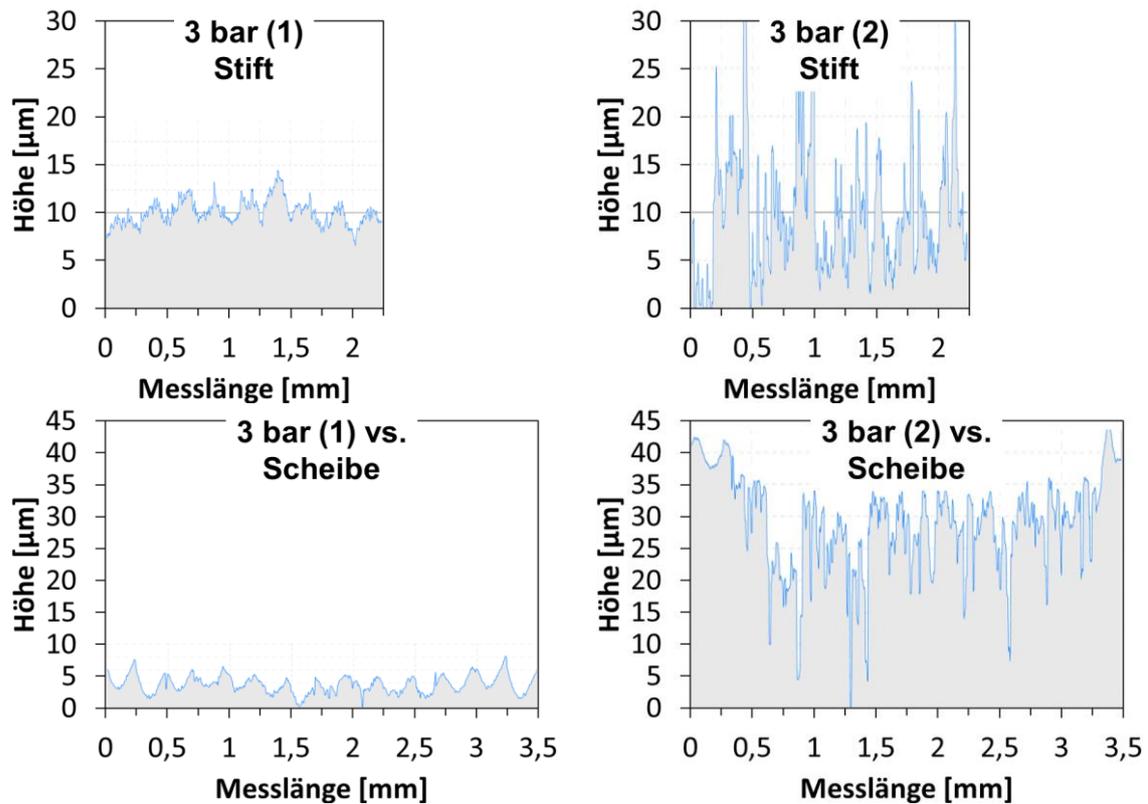


Bild 6.22: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem 3 bar polymergeläpften Tribostift.

In Bild 6.23 und Bild 6.24 sind die Oberflächentopographien nach den beiden ersten Versuchsläufen mit den 4 bar Stiftproben dargestellt. Die Topographie der Reibpartner ähnelt der Topographie nach dem Versuch mit dem ersten 3 bar Stift. Deutlich ist dies anhand der Profilschriebe zu erkennen, bei denen der stattgefunden Übertrag der Riefenstruktur der Scheibe auf den polymergeläpften Stift nachvollziehbar ist. Die WLI-Aufnahmen und die dazugehörigen Querschnittsprofile des Prüflaufs mit dem dritten 4 bar Tribostift sind in Bild 6.25 zu sehen. Im Gegensatz zu den ersten beiden 4 bar Versuchen, glättet sich die auf der Triboscheibe vor dem Prüflauf vorhandene geometrisch bestimmte Riefenstruktur ein und es entsteht an beiden Tribopartnern eine eingelaufene Oberflächenstruktur mit geringerer Rauigkeit. Diese Struktur hat im Vergleich zu den beiden ersten 4 bar Versuchen eine halb so hohe Profilhöhe.

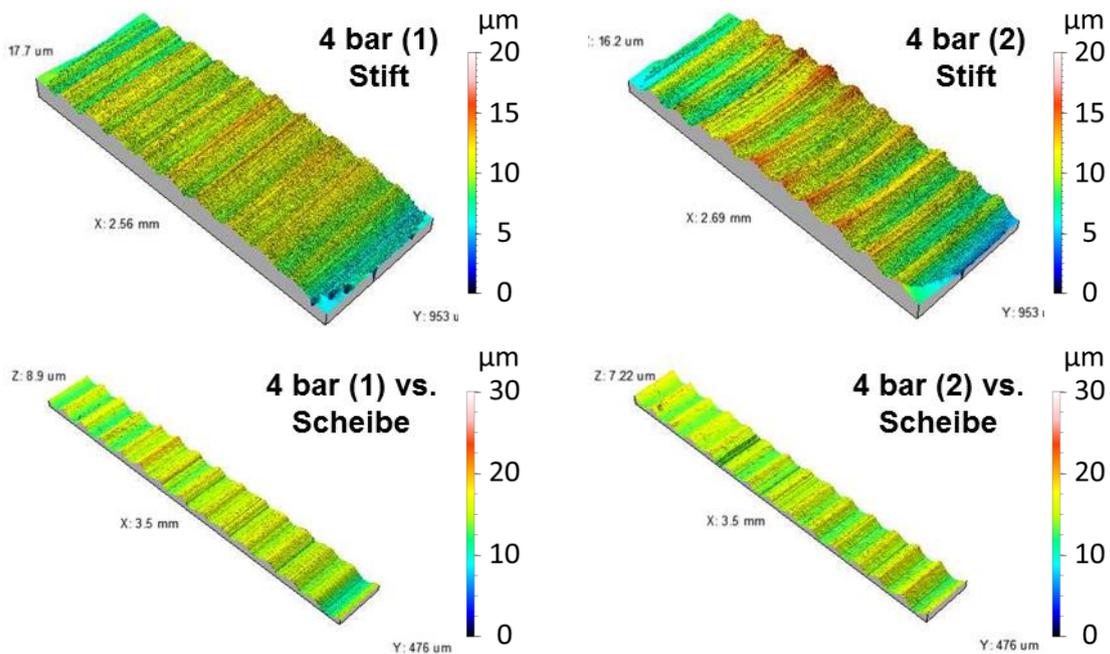


Bild 6.23: WLI-Aufnahmen der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit den beiden ersten 4 bar polymergeläpften Tribostift.

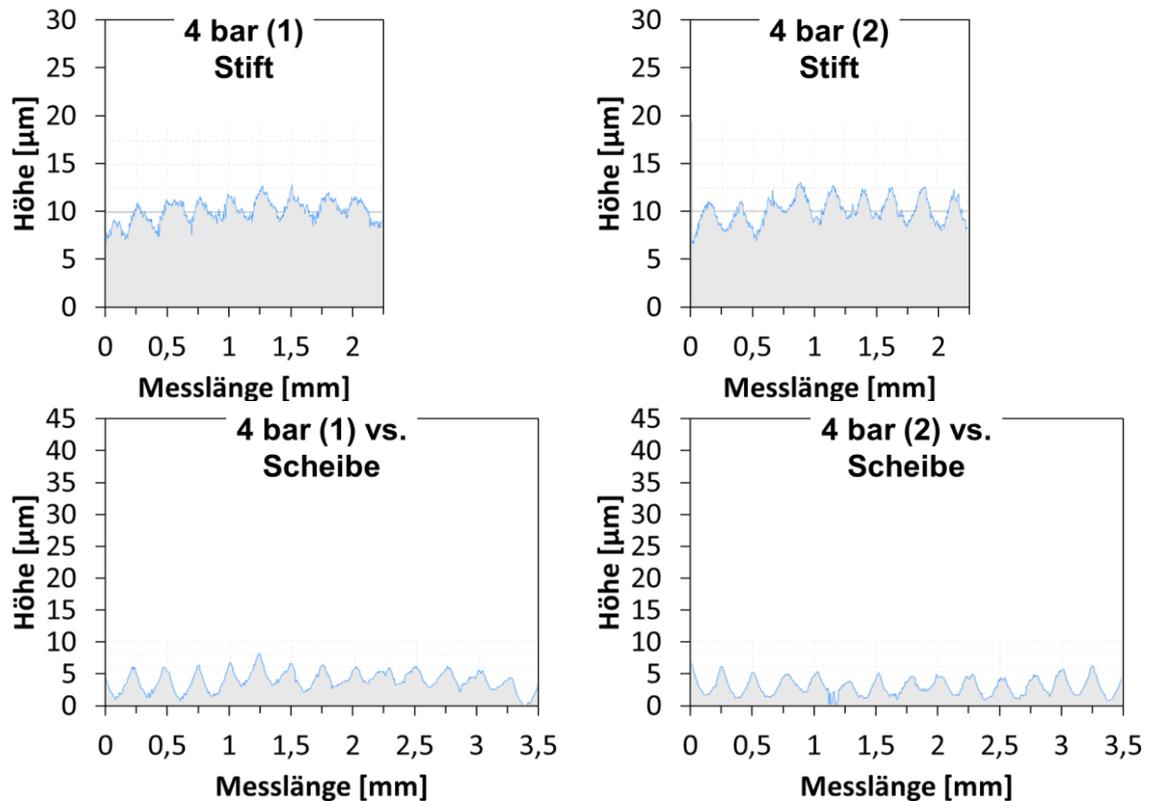


Bild 6.24: WLI-Profile der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit den beiden ersten 4 bar polymergeläpften Tribostift.

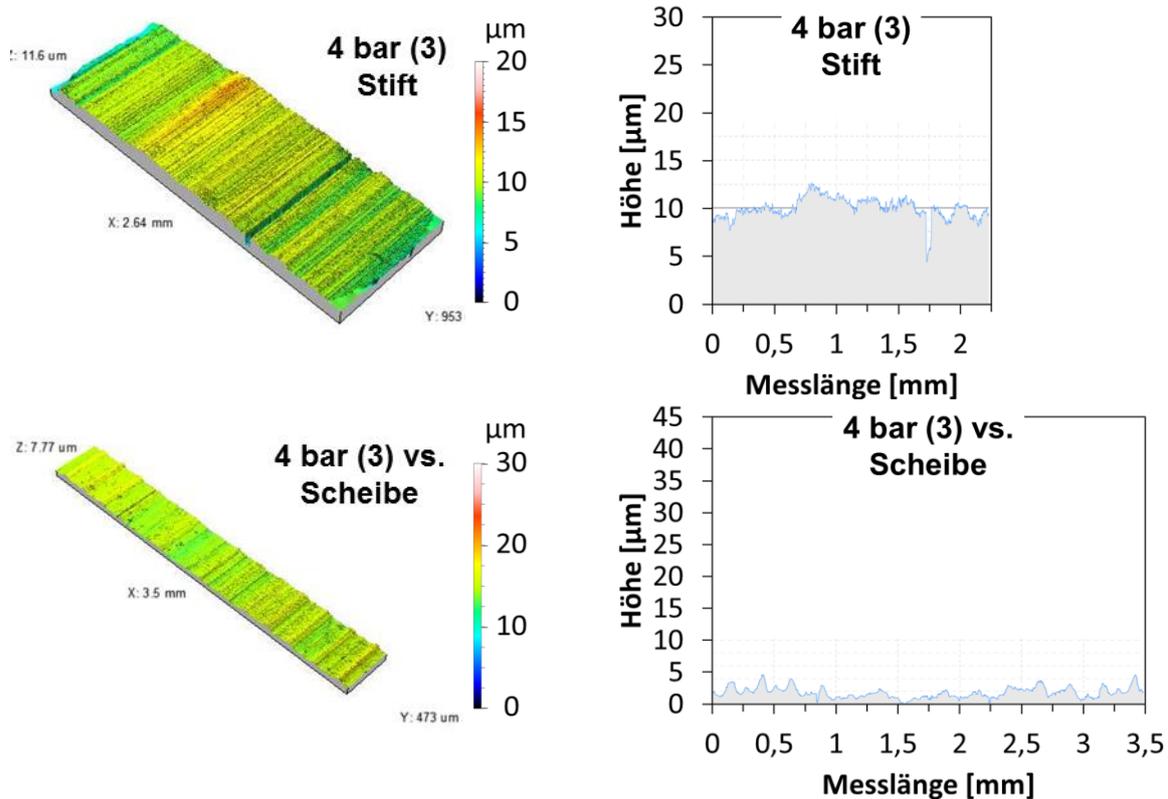


Bild 6.25: WLI-Aufnahme und Profil der Stift- und Scheibentopographie nach dem Triboversuch mit dem dritten 4 bar polymergeläpften Tribostift.

## 6.4 Werkstückeigenschaften nach den Versuchen

Neben den dargestellten Topographien durch WLI-Aufnahmen bei der Verschleißbetrachtung im vorhergehenden Kapitel, werden hier die Gefügeausbildung sowie die chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs nach den Tribometerversuchen gezeigt.

In Bild 6.26 ist das oberflächennahe Gefüge des zweiten 3 bar polymergeläpften Stifts nach dem Tribotest mit höherer Reibung und Hochverschleiß zu sehen. Der feinkörnige, oberflächennahe Bereich ist sehr unterschiedlich ausgeprägt. Dies ist deutlich bei der linken FIB-Aufnahme in Bild 6.26 zu erkennen. Hier ist der feinkörnige Bereich über dem perlitischen Grundgefüge zwischen 600 und 3200 nm stark. Im Bereich der besonders massiven Ausprägung ist eine von rechts nach links geformte Überlappung des Werkstoffs zu erkennen, welche sich bei weiterer Belastung ablösen kann. Über ferritischem Grundgefüge ist der veränderte Gefügebau, wie bei allen Gefügeuntersuchungen in dieser Arbeit, stärker ausgebildet als über den perlitischen Gefügebereichen. Der mechanisch belastete Gefügebereich mit einer Tiefe von 4000 bis 5800 nm zeigt hier länglich verformte Kornstrukturen und veränderte Gitterorientierungen. Wie bei der Werkstoffüberlappung über perlitischem Grundgefüge sind in der äußersten Zone, über dem ferritischen Bereich weiße Stellen zu sehen, welche einen Hinweis auf Leerstellen oder Risse darstellen. Diese können bei wiederholter Belastung zum Ausbrechen ganzer Werkstoffbereiche führen. Das Herausbrechen ganzer Werkstoffbereiche

entspricht dem festgestellten Hochverschleiß bei dieser Variante, wie im vorherigen Kapitel gezeigt.

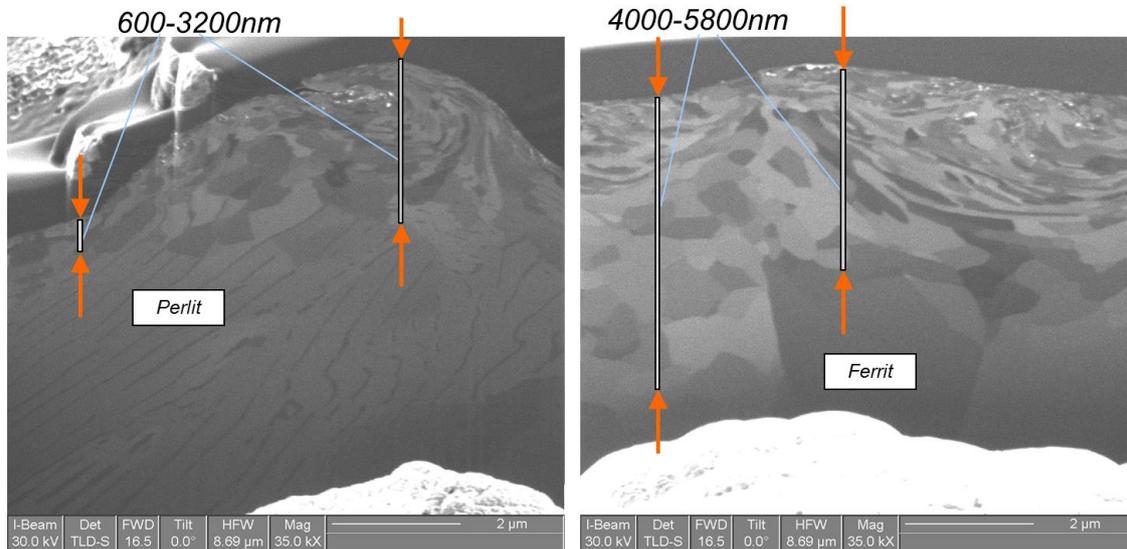


Bild 6.26: Oberflächennahes Gefüge des Tribostifts nach dem zweiten 3 bar Prüflauf mit höherer Reibung und Hochverschleiß.

Im Gegensatz dazu ist in Bild 6.27 das oberflächennahe Gefüge des dritten 4 bar polymergeläpten Stifts zu sehen. Diese Variante hat bei den durchgeführten Tribotests die geringste Reibung sowie den geringsten Verschleiß verursacht. In Bild 6.27 ist hier ein veränderter Gefügebau oberhalb des perlitischen Grundgefüges, mit einer gleichmäßigen Stärke von 2100 bis 2900 nm, vorhanden. Im ferritischen Bereich ist der feinkristalline Bereich zwischen 4100 und 6700 nm stark.

Beim Vergleich der FIB-Aufnahmen des 4 bar polymergeläpten Stifts nach dem Prüflauf aus Bild 6.27 mit den Aufnahmen vor dem Prüflauf aus Bild 5.25, ist ein großer Unterschied festzustellen. Der Bereich des veränderten Gefüges nach dem Versuch ist zwei- bis dreimal größer als zuvor. Zudem ist die Gefügezusammensetzung in diesem oberflächennahen Bereich nach dem Prüflauf feiner.

Bei der Betrachtung des Gefüges nach dem 3 bar Versuch mit erhöhter Reibung und Hochverschleiß im Vergleich zum Gefüge nach dem 4 bar Versuch mit geringer Reibung und Verschleiß, gibt es wesentliche Unterschiede. Zum einen erscheinen die Korngrößen im veränderten Gefügebereich nach dem Versuch mit dem 4 bar polymergeläpten Stift kleiner und gleichmäßiger an der Oberfläche verteilt, als nach dem zweiten Versuch mit dem 3 bar polymergeläpten Stift. Stark umgeformte längliche Körner, wie sie bei der gezeigten 3 bar Variante über ferritischem Gefüge vorliegen, sind im ferritischen Bereich der 4 bar Variante nicht vorzufinden. Des Weiteren ist der Bereich mit verändertem Gefügebau der 3 bar Variante mit bis zu 600 nm stellenweise viel geringer als bei der 4 bar Variante, welche eine geringste Stärke von 2100 nm aufweist. Auch in der maximalen Stärke ist der Bereich mit verändertem Gefügebau der 4 bar gegenüber der 3 bar Variante mit einer Stärke von 6700 nm um 900 nm überlegen.

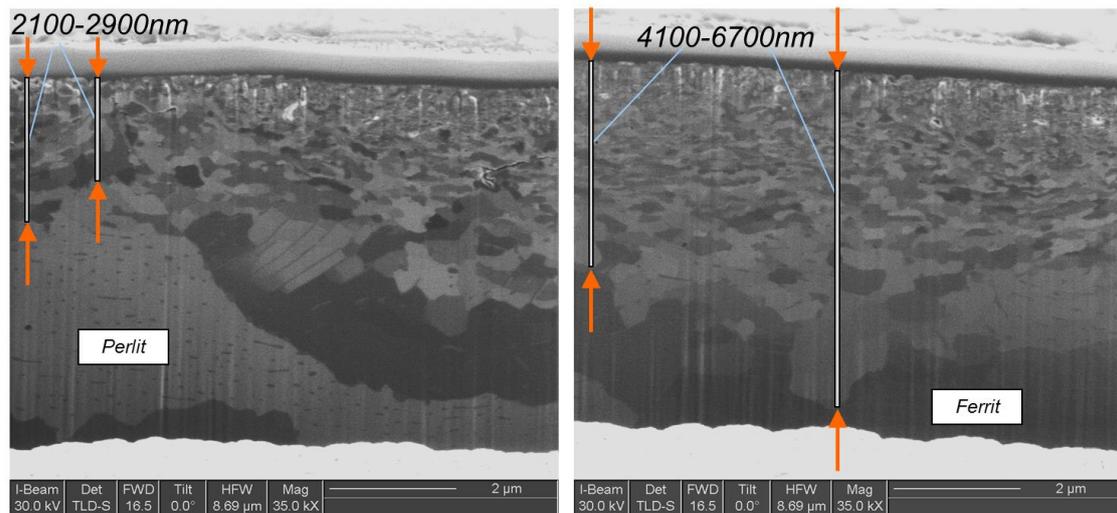


Bild 6.27: Oberflächennahes Gefüge des Tribostifts nach dem Prüflauf mit der dritten 4 bar Probe mit geringer Reibung und wenig Verschleiß.

Analog zu den betrachteten oberflächennahen Gefügeausbildungen, wird nun die chemische Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffbereichs dieser beiden Proben gezeigt. Dazu sind in Bild 6.28 die XPS-Tiefenprofile dargestellt. Die beiden in diesem Bild oben positionierten Diagramme dienen als Übersichtsdarstellung mit der y-Achse bis 100 At.-%. Die Diagramme darunter zeigen den Bereich bis 25 At.-%.

In den Übersichtsdigrammen fällt auf, dass sich die Tiefe des chemisch veränderten oberflächennahen Werkstoffbereichs im Vergleich zum Zustand vor der tribologischen Belastung sehr stark unterscheidet. Vor den Tribotests, wie in Bild 5.26 zu erkennen, liegt die zum Grundwerkstoff veränderte chemische Zusammensetzung bis zu einer Tiefe von circa 15 nm vor und nach den Tribotests ist diese Zone bis in einer Tiefe von circa 300 nm vorhanden. Die vorliegenden Elemente in dieser 300 nm starken Zone sind, neben den Elementen aus der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffs, alle Bestandteile des verwendeten Motoröls. Diese Vermischung, welche durch die tribologischen Belastung im Tribotest entstanden ist, zeigt, dass der Energieeintrag ausreichend war, um mit den reaktiven Elementen des Motoröls einen dritten Körper mit chemisch veränderter Zusammensetzung zu bilden.

Die Unterschiede der beiden mit XPS analysierten chemischen Tiefenprofile sind marginal. Geringfügige Unterschiede sind beim Tiefenverlauf von Magnesium und Schwefel zu erkennen. Der Magnesiumgehalt ist direkt an der Oberfläche beim 4 bar Stift mit 19 At.-% höher als beim 3 bar Stift mit 13 At.-%. Im Tiefenverlauf bleibt ein Unterschied im Magnesiumgehalt zwischen den beiden Proben von circa 1 bis 2 At.-% vorhanden. Bei dem 3 bar Stift ist im Vergleich zum 4 bar Stift ein höherer Schwefelgehalt festzustellen. Dieser beträgt beim 3 bar Stift von der Oberfläche bis zu einer Tiefe von circa 70 nm 8 At.-% und ist dann kontinuierlich auf einen Gehalt von circa 2 At.-% in einer Tiefe von 300 nm abgeklungen. Der 4 bar Stift weist mit 6 At.-% direkt an der Oberfläche und von da an fallendem Gehalt bis Werte unter 1 At.-% in einer Tiefe von 300 nm weniger Schwefel im oberflächennahen Werkstoffbereich auf.

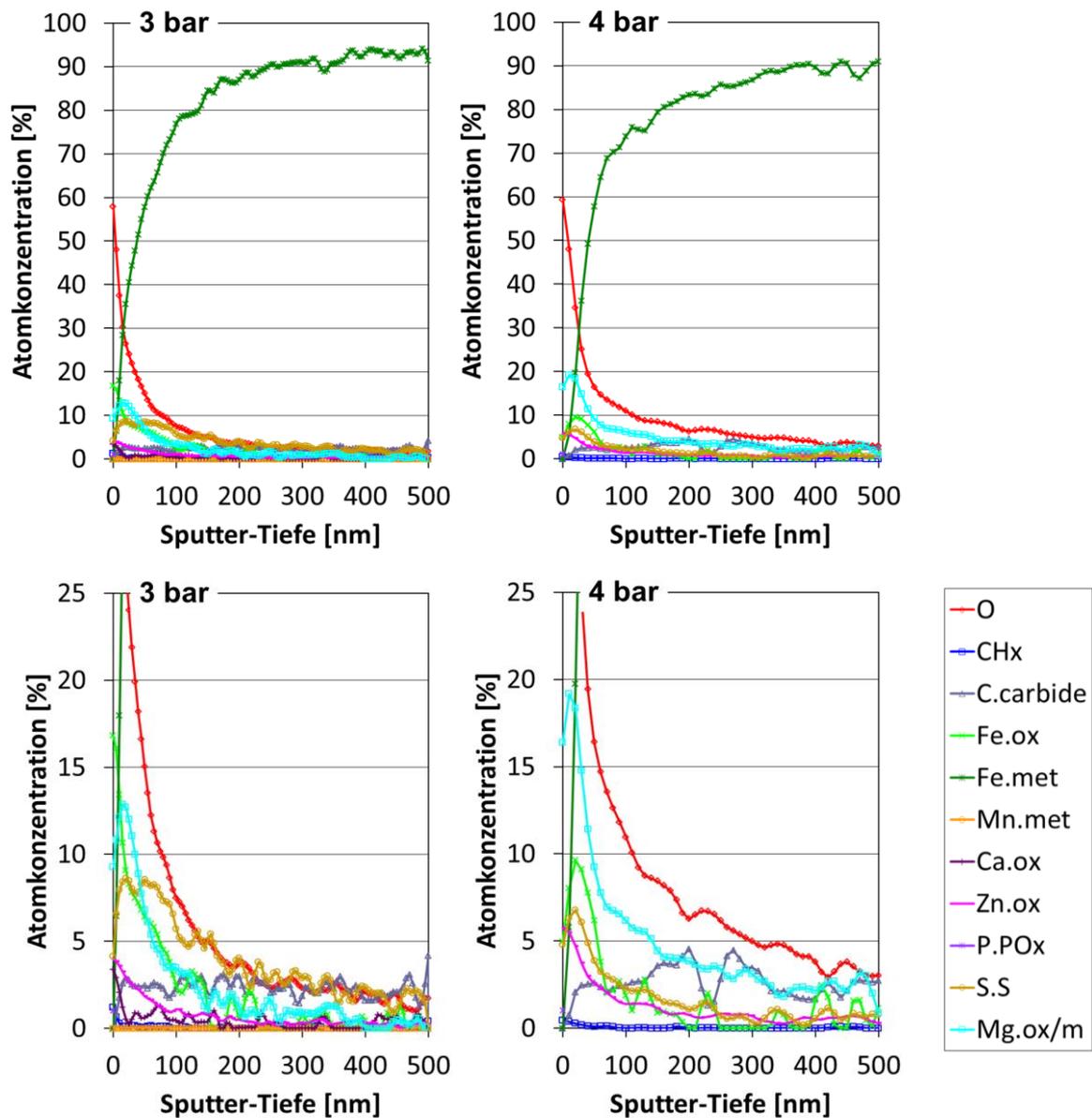


Bild 6.28: Chemische Zusammensetzung im oberflächennahen Werkstoffbereich der Tribostifte nach dem zweiten 3 bar Prüflauf (links) und nach dem Prüflauf mit der dritten 4 bar Probe (rechts).

## 6.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die durchgeführten Triboversuche zur Bewertung der polymergeläpften Oberflächen im Grenz- und Mischreibungsbereich führen zu einem einheitlichen Ergebnis bezüglich der Reibung und dem Verschleiß.

Die Bewertung der Reibung in der Einlaufphase und die Ergebnisse der Reibwerte bei den separat bewerteten Betriebspunkten mit variiertem Gleitgeschwindigkeit, ergeben einen zueinander passenden Gesamtzusammenhang. Dies gilt für jede der untersuchten polymergeläppten Varianten mit den Drücken 1, 2, 3 und 4 bar. Alle drei Versuche mit der 4 bar sowie einer der zwei Versuche mit der 3 bar polymergeläppten Oberfläche, zeigen im Einlauf eine Verringerung des Reibwerts auf konstant bleibende niedrige Werte. Die Reibwertverläufe zeigen bei den Versuchsabschnitten mit verschiedenen Geschwindigkeitsstufen bei diesen Testvarianten ebenso einen jeweils konstanten, niedrigen Reibwert. Beim zweiten Versuch der 3 bar Variante, bei den Versuchen mit den beiden 2 bar und den beiden 1 bar polymergeläppten Tribostiften, findet dagegen eine Erhöhung des Reibwerts im Einlauf statt. Zudem führen die Reibwertverläufe in den Betriebspunkten mit variiertem Gleitgeschwindigkeit zu einer hohen Varianz des Reibwerts.

Diese Zusammenhänge für das Reibverhalten der betrachteten, polymergeläppten Varianten widerspiegeln sich auch im Vergleich der Stribeckkurven von Bild 6.9. Hier ergeben alle drei 4 bar Versuche sowie ein 3 bar Versuch niedrigere Reibwerte im Grenz- und Mischreibungsbereich, als die anderen polymergeläppten Varianten.

Die Ergebnisse für den Hochverschleiß sind bei der separaten Betrachtung des Einlaufs und der Untersuchung des drehzahlabhängigen Verhaltens nicht kohärent. Beim Einlauf entsteht lediglich bei den polymergeläppten Stiften bei einem der zwei 3 bar sowie bei beiden 1 bar Varianten hoher Verschleiß. Bei den Betriebspunkten mit variiertem Gleitgeschwindigkeit nach dem Einlauf entsteht dagegen kein Hochverschleiß bei den beiden Tests mit der 1 bar Variante, dafür jedoch bei beiden 2 bar polymergeläppten Proben. Hochverschleiß, welcher zu Veränderungen der Formtoleranzen und im schlimmsten Fall zum Fressen führt, ist für den realen Einsatz eines Tribosystems nicht praktikabel. Aus diesem Grund ist es notwendig, die gesamte Versuchsdauer bezüglich auftretenden Hochverschleißes zu werten. Dadurch ergibt sich für das Verschleißverhalten der gleiche Zusammenhang wie bei der Bewertung des Reibverhaltens.

Somit erreichen zusammenfassend betrachtet alle drei 4 bar sowie eine der beiden 3 bar polymergeläppten Proben die geringste Reibung sowie einen geringen, vergleichbaren Verschleiß. Bei den anderen Varianten versagt das System und es entsteht neben hohem Verschleiß auch größere Reibung. Diese Ergebnisse korrespondieren mit den Oberflächentopographien nach den Triboversuchen. Nach den Versuchen mit Hochverschleiß ist im Gegensatz zu den Varianten mit geringer Reibung und geringem Verschleiß, eine sehr zerklüftete Topographie mit großer Rauheit bei beiden Reibpartnern anzufinden.

Der geringe Reibungsunterschied des dritten 4 bar Versuchs zu den beiden anderen 4 bar und dem einen 3 bar Versuch ist ebenfalls anhand der Topographieaufnahmen nach den Triboversuchen nachzuvollziehen. Bei den drei Versuchen der 3 und 4 bar Variante mit minimal höherer Reibung ist ein Übertrag der Makrotopographie des Aluminiumreibkörpers auf die geläppten Stahlkörper zu sehen. Bei der 4 bar Variante mit der geringsten Reibung glätten sich die Oberflächen beider Kontaktpartner auf eine Endrauigkeit ein. Die angepassten Makrotopographien der Reibpartner mit der rilligen Ausgangsstruktur der Aluminiumscheibe weisen eine größere reale Kontaktfläche als die eingeglätteten Reibpartner auf, sodass in diesem Fall nach Gleichung 2-3 eine höhere Reibung vorliegt.

Mittels FIB Analysen konnte beispielhaft gezeigt werden, dass nach einem Versuch mit geringerer Reibung und geringem Verschleiß ein großer feinkörniger Bereich mit geringen Korngrößen im oberflächennahen Bereich vorhanden ist. Dagegen ist dieser Bereich nach einem Versuch mit viel Verschleiß und erhöhter Reibung kleiner und wesentlich inhomogener. Zudem ist die mittlere Korngröße bei dieser Variante größer. Die Variante mit Hochverschleiß vergegenwärtigt außerdem anhand der vorhandenen Überlappung von Werkstoffmaterial, den hier ständig ablaufenden Prozess von herausbrechendem Werkstoffmaterial.

Die geringfügig vorhandenen Unterschiede der chemischen Zusammensetzung, bei den beiden beispielhaft bewerteten Stahlstiften mit geringen und hohen Reib- und Verschleißwerten, lassen sich bei der Betrachtung der geregelten Federspannposition zur Kompensation von Verschleiß nachvollziehen. Bei der Betrachtung der letzten drei Betriebsstunden im Tribokontakt ist bei beiden betrachteten Tests, wie aus Bild 6.14 und Bild 6.15 zu entnehmen, kein Verschleiß mehr aufgetreten. Diese Zeit ist ausreichend, um auch nach dem vorliegenden abrasiven Verschleiß bis zu 3 Stunden vor Versuchsende bei der 3 bar Variante eine erneute chemische Vermischung der Bestandteile des Motoröls mit dem Stiftwerkstoff zu erhalten.

## 7 Fertigungstechnische und tribologische Zusammenhänge

### 7.1 Wirkeffekte bei der Endbearbeitung

Hauptaufgabe der zerspanenden Endbearbeitung ist der Materialabtrag zum Erreichen der geforderten Maß-, Form und Lagetoleranzen. Neben dem Materialabtrag wird durch die Endbearbeitung prozessbedingt ein Teil der eingesetzten Energie in Wärme umgewandelt und zur Materialumwandlung eingesetzt. Diese Betrachtung ist analog zur Beschreibung der Energieaufteilung bei der tribologischen Belastung nach Blau und Fleischer [13] [32]. Die Wirkeffekte bei den Polymerlappvarianten 1 bis 4 bar werden im Folgenden, mit Bezug auf deren Gesamtenergieeinträge, nach dieser Aufteilung betrachtet. Da die Gesamtenergieeinträge proportional zu den Bearbeitungsdrücken sind, erfolgen hier die Zuordnungen der Effekte mit den Bearbeitungsdrücken.

Das Polymerlappen mit variierten Bearbeitungsparametern führt zwangsläufig zu einem veränderten Materialabtrag und eine dadurch veränderte Oberflächenbeschaffenheit bezüglich der Rauheit und Struktur. Bei einem geringen Bearbeitungsdruck von 1 bar werden bereits die „Oberflächenspitzen“, welche durch den  $R_{pk}$ -Wert gekennzeichnet sind, annähernd gleich stark wie bei den anderen Druckvariationen abgetragen. Hiermit begründen sich die vergleichbaren  $R_{pk}$ -Werte bei der Bewertung der Topographie nach dem Polymerlappen. Aufgrund des größeren Abtrags bei größerem Lappdruck ergibt sich für die Bearbeitung mit 3 und 4 bar ein halb so großer  $R_{vk}$ -Wert gegenüber dem Lappen mit 1 und 2 bar. Die  $R_k$ -Werte werden von 1 bis 3 bar größer. Die  $R_k$ -Werte bei 3 und 4 bar sind vergleichbar. Die Tastschnittergebnisse sind in Bild 5.23 und Bild 5.24 zu sehen. Demnach ergibt sich ein Materialabtrag beim Polymerlappen in Abhängigkeit des Energieeintrags bei 1 bar von 1,1  $\mu\text{m}$ , bei 2 bar von 1,45  $\mu\text{m}$  und bei 3 und 4 bar von 1,9  $\mu\text{m}$ .

Der Wärmeeintrag wird anhand der Zustandsänderung der Lapppaste nach dem Polymerlappen abgeschätzt. Es ist festzustellen, dass die Paste nach dem Lappen mit einem Bearbeitungsdruck von 4 bar im Gegensatz zu 1 bis 3 bar, die Schmelztemperatur der Lapppaste überschreitet und dabei von einer festen beziehungsweise pastösen Konsistenz in eine flüssige Konsistenz wechselt. Dieser Zusammenhang ermöglicht den Rückschluss auf das bei der Bearbeitung vorhandene Temperaturniveau. Die verwendete Lapppaste hat einen Schmelzpunkt von 43°C. Somit kann angenommen werden, dass der integral betrachtete Wärmeeintrag bei der Lappbearbeitung nicht sehr groß ist und mit größerem Bearbeitungsdruck zunimmt. Der untersuchte Stahl hat eine Schmelztemperatur von circa 1500°C. Erst ab einer Temperatur oberhalb von etwa 40 % dieser Schmelztemperatur erfährt der Werkstoff Zustandsänderungen, wie beispielsweise Erholungsvorgänge, Rekristallisation oder Kornvergrößerungen [18]. Die lokal auftretenden Temperaturen direkt an den Schneidkörnern sind weitaus größer als das integrale Temperaturniveau. Eine Zustandsänderung des Werkstoffs durch Wärmeeintrag würde da, bei einem ausreichend hohen lokalen Temperaturanstieg, zu einem Wachstum der

Oxidationsschicht des oberflächennahen Werkstoffbereichs führen. Ist eine Oxidationsschicht bei einer Temperatur von 20° C 10 nm stark, wächst diese laut Godfrey bei einer reinen Temperaturerhöhung bis 300° C auf bis zu 100 nm an [37]. Bei den durchgeführten XPS-Messungen liegt jedoch bei den Tiefenverläufen des Sauerstoffs und des oxidierten Eisens keine Veränderung vor und nach dem Polymerlappen vor, siehe Bild 4.23 und Bild 5.26. Aus diesen Gründen ist der Wirkeffekt des Wärmeeintrags durch das Polymerlappen auf die Veränderung des oberflächennahen Werkstoffbereichs vernachlässigbar.

Neben dem Materialabtrag und dem Wärmeeintrag, wird ein weiterer Energieanteil bei der Zerspanung in den oberflächennahen Werkstoffbereich in Form von Gefügeumformungen eingebracht. Pauusch beschreibt, dass diese plastischen Verformungen der Werkstückrandzone einen Anstieg der Oberflächenhärte und die Ausbildung von Eigenspannungen in der Oberflächenschicht bewirken [56]. Die bei der Bearbeitung entstehende charakteristische Randzone wird von ihm, wie in Bild 7.1 zu sehen, schematisch dargestellt. Die Dicke der verformten Schicht, welche zur inneren Grenzschicht zählt, entspricht der hier bestimmten Tiefenwirkung aus den FIB-Analysen. Die äußere Grenzschicht mit einer Tiefe von bis zu 10 nm, welche ebenfalls in Bild 7.1 eingetragen ist, kann anhand der in dieser Arbeit durchgeführten EDX- und XPS-Aufnahmen nachvollzogen werden.

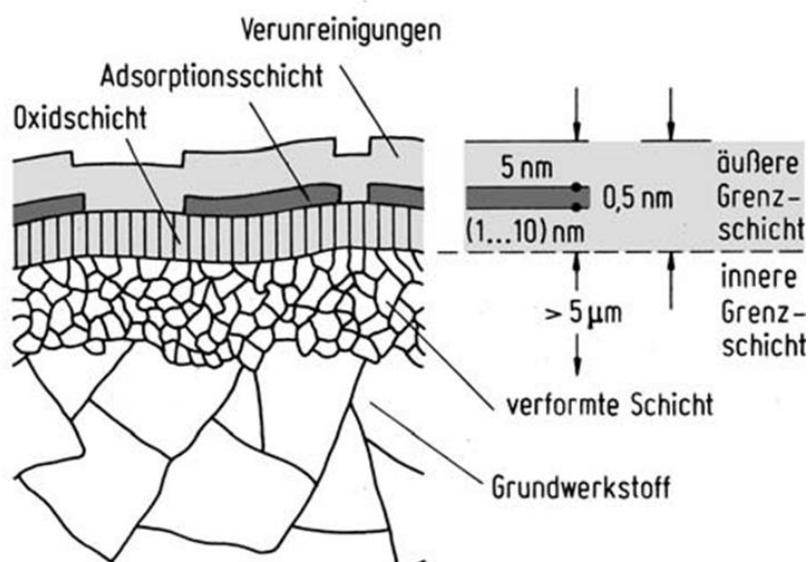


Bild 7.1: Randzonenveränderungen durch Zerspanung [56].

### Innere Grenzschicht

Zuerst werden hier die Werkstoffeigenschaften der inneren Grenzschicht beleuchtet. Diese ist anhand der FIB-Gefügebilder vom Grundgefüge unterscheidbar. Mithilfe dieser Aufnahmen wurde in Kapitel 5.4.2 mit Bild 5.25 die mechanisch veränderte Randzone mit der Tiefenwirkung beschrieben. Anhand der bestimmten Tiefenwirkungen, wird in Bild 7.2 eine Zusammenfassung des Ergebnisses in Form eines Diagramms gezeigt. Aus diesem Diagramm ist anschaulich erkennbar, dass bei einer Bearbeitung mit einem Druck von 4 bar die größte verformte Schicht erreicht wird, welche mit einer Stärke von 1450 bis 2700 nm über dem ferriti-

schen und 700 bis 850 nm über dem perlitischen Werkstoffbereich circa doppelt so groß im Vergleich zur Bearbeitung mit 1 bar ist.

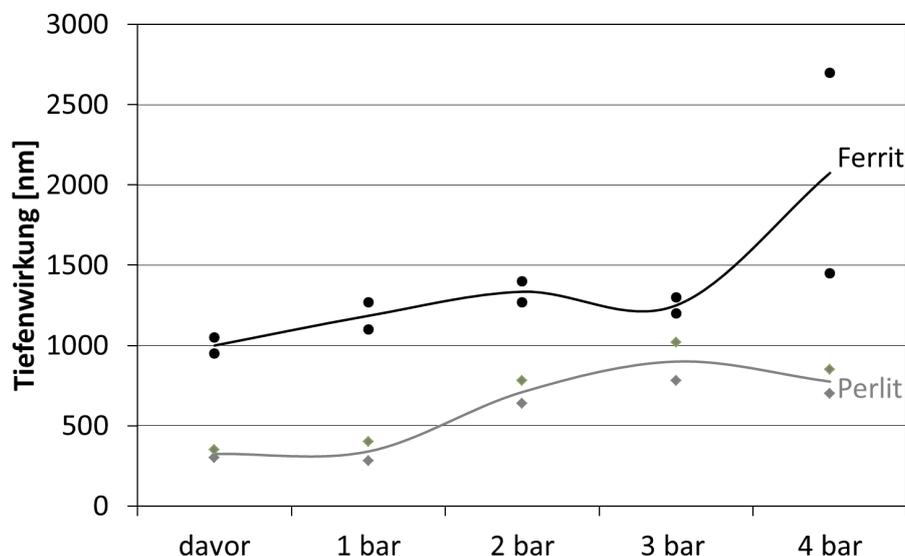


Bild 7.2: Mechanische Tiefenwirkung beim Polymerlappen mit 1 bis 4 bar Bearbeitungsdruck.

Aufgrund der Temperaturen weit unter der Schmelztemperatur beziehungsweise der Glasübergangstemperatur sowie der Annahme von kleinen Verzerrungsraten, kann das durch den Druckprozess des Lappens indizierte plastische Fließen zur Erzeugung der veränderten Randzone, den Schubspannungen zugeordnet werden. Nach Überschreiten der kritischen Schubspannungen, wird das Ausgangsmaterial in diesem Bereich zu großen Scherdehnungen plastisch hochverformt, wobei atomare Umordnungsprozesse einsetzen. Kristallbaufehler wie Leerstellen, Zwischengitteratome, Fremdatome, Stufen-, Schraubenversetzungen, etc. sind bei technisch relevanten, kristallinen Materialien immer vorhanden. Diese Fehler beeinflussen die plastischen Eigenschaften der Materialien. Bei plastischer Verformung verändern sich diese Strukturen, wodurch es beispielsweise zur Erhöhung der Versetzungsdichte, der Umlagerung der Versetzungsanordnung oder zu einer Subkornbildung kommt.

Eine Verfestigung des Materials ist die Folge vieler dieser Prozesse. Hauptsächlich kommt es zur Verformungsfestigkeit, welche auch als „Taylor hardening“ bezeichnet wird. Die vorhandenen Versetzungen stellen dabei eine Blockade für Bewegungen dar, was beim Verformungsprozess zu einer Erhöhung der inneren Spannungen führt. Dies führt wiederum zur Neubildung von Versetzungen. Die Anhäufungen der Versetzungen führen makroskopisch gesehen zu einer Erhöhung der Fließspannung. Die Vielkristallverfestigung ist ein weiterer Verfestigungsmechanismus. Beim Verformungsprozess müssen sich alle Einzelkörner der Gesamtmatrix bewegen. Da diese teilweise starken Zwangsbedingungen unterliegen, führt dies ebenso zu einer Verfestigung und somit zum Anstieg der Fließspannung. Des Weiteren stellen Korngrenzen eine Barriere für Versetzungsbewegungen dar. Die aufgestauten Versetzungen erzeugen Rückspannungen im Korn. Dies führt zu einer weiteren Einschränkung der Versetzungsbewegungen im begrenzten Kornvolumen. Die makroskopische Fließspannung ist

aufgrund dieses Zusammenhangs bei kleinen Körnern größer. Dieser beschriebene Verfestigungsmechanismus wird mit der Hall-Petch-Beziehung beschrieben [22].

Die mechanisch verformte Gefügerandzone in der inneren Grenzschicht der polymergeläpften Proben weist Körner in der Größenordnung von 50 bis 500 nm auf. Dies ist in den FIB-Aufnahmen in Bild 5.25 zu erkennen. Damit sind die Strukturen größer als nanokristalline Strukturen, jedoch kleiner als das darunterliegende Grundgefüge mit Korngrößen bei dem hier betrachteten Werkstoff im Bereich von 2 bis 10  $\mu\text{m}$ . Somit können für diesen Werkstoffbereich die aufgeführten Verfestigungsmechanismen zu Grunde gelegt werden. Nach der empirischen Hall-Petch-Beziehung gilt für die Fließspannung

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k_{HP}}{\sqrt{D_K}}. \quad 7-1$$

Dabei steht  $\sigma_0$  für die Fließspannung des Einkristalls,  $k_{HP}$  für die materialspezifische Hall-Petch-Konstante und  $D_K$  für die mittlere Korngröße [58].

Dies ermöglicht die Zuweisung von höheren Fließspannungen für die Werkstoffbereiche mit verformter Schicht mit Korngrößen von 50 bis 500 nm. Daraus ergibt sich für den hier untersuchten Werkstoff anhand der Tiefenangaben in den FIB-Aufnahmen von Bild 5.25, der in Bild 7.3 dargestellte Kurvenverlauf der Fließspannung für den am häufigsten vorhandenen ferritischen Werkstoffbereich. Die Kurve zeigt die Fließspannung in Abhängigkeit von der Tiefe und dem eingestellten Druck von 1 bis 4 bar bei dem untersuchten Polymerläppen. Neben den zugewiesenen Fließspannungen  $\sigma_{HP}$  für den verformten, verfestigten Gefügebereich und dem Fließspannungsniveau für das Grundgefüge  $\sigma_G$ , sind in diesem Diagramm auch die Verläufe der Spannungen aus den Ergebnissen der Picoindentermessungen mit grauer Farbe eingezeichnet.

Festzustellen ist, dass lediglich beim Polymerläppen mit einem Druck von 4 bar in der Tiefe bis zu 2700 nm von der Oberfläche erhöhte Festigkeiten aufgrund der hier verformten Werkstoffschicht vorliegen. Die geringe Fließspannung im Bereich bis zu circa 700 nm Tiefe bei der 4 bar Variante und bis zu circa 300 nm bei der 3 bar Variante sind mit den EDX-Aufnahmen aus Bild 5.28 und dem Kriechverhalten bei den Indentationsmessungen auf die großflächigeren Kohlenwasserstoffanlagerungen zurückzuführen. Die höheren Spannungen bei der 1 und 2 bar Variante sind ein Hinweis auf dort vorliegende Gitterverspannungen, welche durch den vorangegangenen Schleifprozess oder durch das Läppen mit den Drücken von 1 und 2 bar verursacht werden könnten.

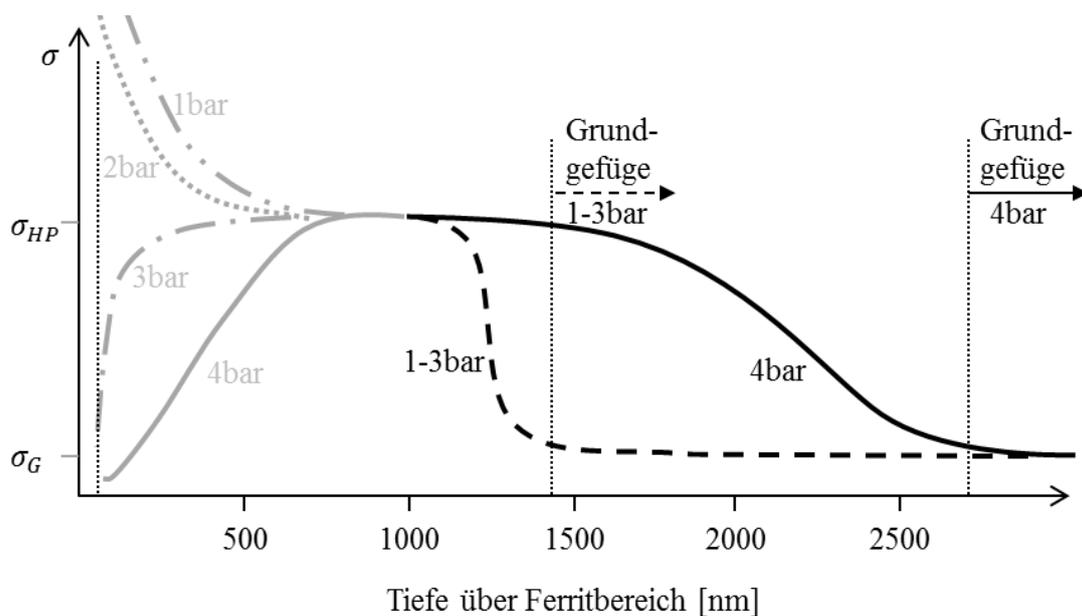


Bild 7.3: Qualitativer Verlauf der Fließspannung in Abhängigkeit der Tiefe nach dem Polymerlappen der Stahlproben mit 1 bis 4 bar.

### Äußere Grenzschicht

Durch Wechselwirkungen des Werkstückwerkstoffs mit den bei der Zerspanung beteiligten Stoffen, können Veränderungen der Oberflächenzusammensetzung sowie die Vermischung mit dem Umgebungsmedium stattfinden. Die Reaktivität des Werkzeugwerkstoffs wird im Allgemeinen durch den Zerspanvorgang erhöht und es kommt zur Adhäsion und Adsorption von weiteren am Zerspanprozess beteiligten Medien sowie den darauf befindlichen Verunreinigungen. Dieser oberflächennahe Werkstoffbereich wird nach Paucksch als äußere Grenzschicht bezeichnet, siehe Bild 7.1. Nach dem Schleifen der hier untersuchten Stahlproben ist eine äußere Grenzschicht mit einer Stärke von ungefähr 10 nm vorhanden. Diese Schicht hat nach den XPS-Tiefenprofilen vor und nach der Polymerlappbearbeitung eine vom Bearbeitungsdruck unabhängige, annähernd vergleichbare chemische Zusammensetzung, wie man aus Bild 4.23 und Bild 5.26 erkennen kann. Jedoch konnte in Abhängigkeit des beim Lappprozess eingestellten Bearbeitungsdrucks von 1 bis 4 bar anhand von EDX-Aufnahmen unterschiedlich stark ausgeprägte Bereiche mit Kohlenstoffanlagerungen detektiert werden, siehe Bild 5.28. Diese Bereiche sind nach dem Polymerlappen mit einem Bearbeitungsdruck von 4 bar am flächigsten vorhanden. Da der C/Chx-Peak bei der XPS-Analyse immer direkt an der Oberfläche erscheint und nicht in unterschiedlichen Tiefen vorhanden ist, kann angenommen werden, dass die Kohlenwasserstoffverbindungen nicht mit der äußeren Stahlschicht vermischt, sondern als separate Schicht darüber vorliegen. Die These der Anhaftung einer separaten Schicht von Kohlenwasserstoffverbindungen kann ebenso durch die Ergebnisse der Picoindenterversuche nachvollzogen und somit bekräftigt werden. Hierbei wurde zu Beginn des eindringenden Prüfkörpers ein sogenanntes Kriechverhalten festgestellt, welches bei metallischen Proben sonst nicht vorhanden ist. Am ausgeprägtesten ist dieses Verhalten bei der 4 bar Variante.

Die Bindungsenergie dieser Kohlenwasserstoffe zur Metalloberfläche ist bei den untersuchten Proben so groß, dass sie nicht durch Reinigungsverfahren mit Aceton, Isopropanol oder Cyclohexan im Ultraschallbecken sowie mit einem Plasmacleaner entfernt werden können.

Da die Kohlenwasserstoffanlagerungen erst nach dem Polymerlappen vorliegen, muss der Kohlenwasserstoff aus den bei der Bearbeitung beteiligten Stoffen stammen. Dazu gehören das Polymerwerkzeug aus geschäumtem PUR und die Lapppaste, bestehend aus den Schneidkörnern mit einem Gemisch aus Fettsäureestern, welche pflanzlicher oder tierischer Herkunft sind.

Der Verbund zwischen organischen Molekülen und Metallen wird in der Literatur auf Adhäsionskräfte zurückgeführt [24] [54]. Hierfür gibt es mehrere Modellvorstellungen. In [24] werden die vier Adhäsionsmechanismen der mechanischen Verankerung, der elektrostatischen Theorie, der Diffusions- und Adsorptionstheorie beschrieben. Die in dieser Arbeit unterschiedlich stark vorhandene Adhäsion der Kohlenwasserstoffe mit dem Metall, kann auf die Adsorptionstheorie zurückgeführt werden. Die wirkenden interatomaren und intermolekularen Kräfte beziehungsweise Wechselwirkungen, beruhen dabei auf Primär- und Sekundärbindungen entlang der Grenzfläche.

## 7.2 Wirkeffekte bei tribologischer Beanspruchung

Die polymergeläppten Stahlstiftvarianten wurden alle mit derselben Tribobbeanspruchung im Grenz- und Mischreibungsbereich getestet. Es gibt Literaturstellen die zeigen, dass in diesem Reibungsregime ein größeres Ölrückhaltevolumen aufgrund topographischer Unterschiede vorteilhaft für Reibung und Verschleiß ist [67]. Die Oberflächenstrukturen der untersuchten 3 und 4 bar Variante bietet jedoch für die Mangelschmierung ein geringeres Ölrückhaltevolumen als die 1 und 2 bar Variante. Da die Variante mit dem 3 und 4 bar polymergeläpptem Stift jedoch bei den Tribometertests im Grenzreibungsbereich mit wesentlich stabileren und geringeren Reibwerten sowie niedrigem Verschleiß hervorgeht, weist dies darauf hin, dass die erzeugte Topographie in der Grenz- und Mischreibung nicht die entscheidende Bauteileigenschaft für das sich hier einstellende Triboverhalten ist.

Zum Verständnis dieses Ergebnisses wird nun der tribologische Kontakt als Einzelkontakt betrachtet, da hiermit die Abhängigkeit der Triboergebnisse im Grenz- und Mischreibungsbereich, unabhängig von der Topographie nachvollziehbar ist. Nach Bowden und Tabor gilt für die Einzelkontaktbetrachtung, wie in Kapitel 2.2.2 mit der Formel 2-3 beschrieben, dass die Reibkraft  $F_R$  bei größerer Scherfestigkeit  $\tau$  und/oder bei größerer realer Kontaktfläche  $A_{real}$  steigt. Diese Kenngrößen werden maßgeblich durch die Eigenschaften des oberflächennahen Werkstoffbereichs beeinflusst. Hierzu erfolgt die Betrachtung der inneren und äußeren Grenzschicht wie im Kapitel zuvor.

### Innere Grenzschicht

Bei der Tribobelastung entsteht durch die wirkende Pressung und vorhandene Gleitgeschwindigkeit eine Scherbeanspruchung des oberflächennahen Werkstoffbereichs. Die maximale Schubspannung  $\tau_{max}$  wirkt nach der Hertzschen Theorie bei der Annahme eines Kugel – Flächenkontaktes im Bereich von 0,47-mal des Kontaktradius unterhalb der Kontaktstelle. Der

Kontaktradius eines Einzelkontakts kann im hier betrachteten Tribosystem anhand des Rillenprofils der Aluminiumscheibe abgeschätzt werden. Die Radien der Spitzen des rilligen Profils variieren zwischen 1,5 und 3  $\mu\text{m}$ , demnach ergibt sich für  $\tau_{max}$  eine Tiefe zwischen 705 und 1410 nm. Dieser Bereich zählt zur inneren Grenzschicht, welcher in Abhängigkeit des eingestellten Lämpdrucks unterschiedlich tief verfestigt ist und somit eine gegenüber dem Grundgefüge größere Streckgrenze  $R_e$  aufweist, siehe Kapitel 7.1. Eine schematische Darstellung der Fließspannung, in Abhängigkeit des beim Lämpprozess eingestellten Bearbeitungsdrucks, ist für den am häufigsten vorhanden ferritischen Werkstoffbereich in Bild 7.3 zu sehen.

Anhand der wirkenden Vergleichsspannung  $\sigma_v$  kann das Werkstoffversagen bestimmt werden. Übersteigt  $\sigma_v$  die Streckgrenze  $R_e$  kommt es zum Fließen des Werkstoffs. Ist  $\sigma_v$  größer als die Zugfestigkeit  $R_m$  führt dies zum Herausbrechen von Werkstoffmaterial, was mit dem bei den 1 bis 3 bar polymergeläpten Varianten auftretenden Hochverschleiß gleichzusetzen ist. Die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  wird nach Tresca mit

$$\sigma_v = 2\tau_{max} \quad 7-2$$

bestimmt.

Beim Werkstoffversagen der inneren Grenzschicht durch Fließen kann davon ausgegangen werden, dass sich dadurch die reale Kontaktfläche  $A_{real}$  vergrößert und damit der Wert für die nach Bowden und Tabor beschriebene Reibkraft  $F_R$  erhöht. Höhere Reibwerte führen zur Verschiebung des Vergleichsspannungsmaximums zur Oberfläche hin, siehe Bild 7.4. Dies hat zur Folge, dass Werkstoffversagen im oberflächennahen Bereich und der dabei entstehende Hochverschleiß begünstigt wird.

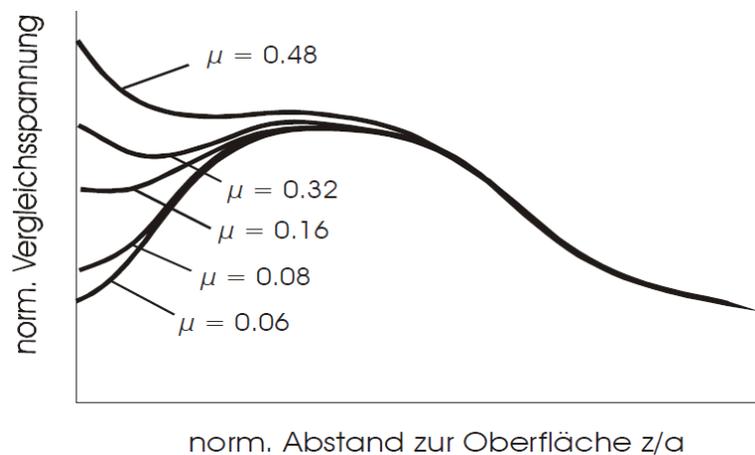


Bild 7.4: Vergleichsspannungstiefenverlauf in Abhängigkeit des Reibwerts [31].

Aus dieser Erkenntnis kann abgeleitet werden, dass bei einem stark belasteten Tribosystem in Grenz- und Mischreibung eine ausreichend tief verfestigte innere Grenzschicht vorteilhaft ist, wie es bei der hier getesteten 4 bar polymergeläpten Variante in einem Bereich bis zu einer Tiefe von 2700 nm der Fall ist. Siehe hierzu für den größeren ferritischen Werkstoffbereich Bild 7.3.

In [70] wird beschrieben, dass im Werkstoffsystem Stahl / AlSi der Einlaufkorridor von der Tiefe des feinkristallinen Gefügebereichs abhängig ist. Unter Einlaufkorridor wird dabei der

Betriebsbereich bezeichnet, in dem ein System einen stabilen Zustand mit niedriger Reibung und geringen Verschleißraten erreicht. Dabei ist der im System sich einstellende Reibwert  $\mu_{final}$  eine Funktion der Reibleistungsdichte zu Beginn der Tribobelastung. Diese Reibleistungsdichte  $P_{initial}$  ergibt sich durch den initialen Reibwert  $\mu_{initial}$ , der Gleitgeschwindigkeit  $v$ , der Normalkraft  $F_N$  und der nominalen Fläche bei der Tribobelastung  $A$  zu

$$P_{initial} = \frac{\mu_{initial} v F_N}{A} \quad 7-3$$

Bei einer geringen Tiefe des feinkristallinen, verformten sowie verfestigten Gefügebereichs ist der Einlaufkorridor schmaler als bei einem durch die Endbearbeitung erzeugten tieferen feinkristallinen Gefügebereich. Zudem befindet sich der Einlaufkorridor in diesem Fall bei kleineren initialen Reibleistungsdichten [70].

Demnach ergibt sich für die Tiefe der inneren Grenzschicht, wie sie in Abhängigkeit vom Bearbeitungsdruck beim untersuchten Lappprozess variiert wurde eine dementsprechende Lage und Breite des Einlaufkorridors. Beim Bearbeitungsdruck von 4 bar liegt in der inneren Grenzschicht der feinkörnige, verformte und verfestigte Gefügebereich mit der größten Tiefe vor, wie aus Bild 5.25 ersichtlich ist. Demnach ist der Einlaufkorridor für diese Variante am breitesten und bei größeren initialen Reibleistungsdichten. Das System ist in diesem Fall robuster und bei kleinen Abweichungen der Einlaufparameter kann trotzdem ein geringes Reibniveau stabil erreicht werden.

### Äußere Grenzschicht

Im Grenz- und Mischreibungsbereich findet als erstes im oberflächennahen Bereich von wenigen Nanometern eine Scherung des Werkstoffes statt. Deshalb sind hier vor allem die Eigenschaften der äußeren Grenzschicht von Relevanz. Bei der hier untersuchten polymergeläppten 4 bar Variante mit geringster Reibung und geringem Verschleiß sowie bei der 3 bar Variante, besteht dieser Bereich hauptsächlich aus einer großflächigen Kohlenwasserstoffanlagerung, welcher sich durch eine wesentlich kleinere Scherfestigkeit gegenüber dem metallischen Grundwerkstoff auszeichnet. Diese physi- oder chemisorbierte Schicht fungiert im Grenzreibungsbereich als Festschmierstoff und verhindert den direkten Metall-Metallkontakt. Hiermit ergibt sich bei der 3 und 4 bar Variante gegenüber der 1 und 2 bar Variante für die tribologisch belasteten Metalloberflächen nach Gleichung 2-3 eine geringere Reibung sowie ein Schutz gegen Verschleiß. Die geringeren Reibwerte der 3 und 4 bar Variante sind durch die anhaftenden Kohlenwasserstoffverbindungen bereits zu Beginn der Tribobelastung vorhanden und haben demnach auch einen entscheidenden Einfluss auf den Einlauf des Systems. Da die Reibleistungsdichte durch den geringeren Reibwert kleiner ist, erfährt das System trotz hoher Belastungen im Tribokontakt einen Einlauf, welcher zu stabilen und niedrigen Reib- und Verschleißwerten führt.

Die tribologischen Wechselwirkungen der inneren und äußeren Grenzschicht lassen sich mit Anlehnung an die Aufteilung von Scherge [68] mit Bild 7.5 zusammenfassend aufzeigen. In der äußersten Schicht ist hier die in den Untersuchungen der 4 bar polymergeläppten Variante vorhandene, quasiviskose Festkörperwechselwirkung eingezeichnet. Die bei der Ausbildung der inneren Grenzschicht aufgeführten Mechanismen sind die Hertzsche Pressung sowie die elastischen und plastischen Verformungen. Die Pyramidendarstellung verdeutlicht, dass ne-

ben einer äußeren optimalen Grenzschicht auch geeignete Eigenschaften bei der inneren Grenzschicht vorhanden sein müssen, um der tribologischen Belastung Stand zu halten.

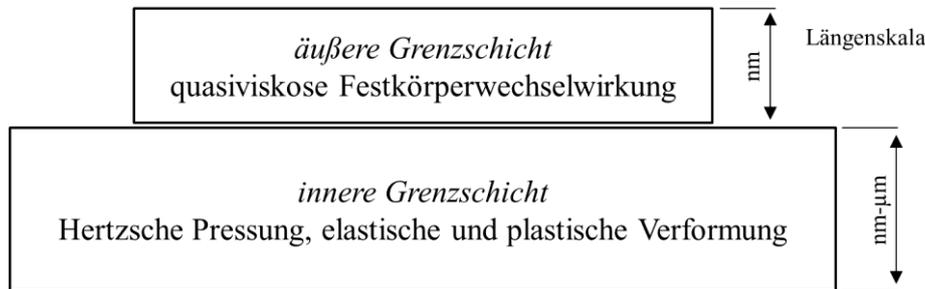


Bild 7.5: Reibanteile in den Grenzschichten, aus [68].

### 7.3 Zieleigenschaften zur Reibleistungs- und Verschleißminderung

Anhand der durchgeführten Versuche im Grenz- und Mischreibungsbereich des Werkstoffsystems St52-3 gegen AlSi10Mg, können Zieleigenschaften zur Reibleistungs- und Verschleißminderung angegeben werden. Diese Zieleigenschaften ergeben sich durch die Bewertung der durchgeführten Vor- und Nachcharakterisierungen des oberflächennahen Werkstoffbereichs beim variierten Polymerlappen. Zuerst werden die vorteilhaften Charakteristika des oberflächennahen Werkstoffbereichs für die innere und äußere Grenzschicht getrennt voneinander betrachtet. Danach folgt die Darstellung der Zieleigenschaften für das betrachtete Bearbeitungsverfahren zum Erreichen dieser optimalen Werkstoffeigenschaften.

#### Zieleigenschaften für die innere Grenzschicht

Die innere Grenzschicht sollte bis zu einer ausreichend großen Tiefe ausgebildet sein und hier eine höhere Festigkeit als der Grundwerkstoff aufzeigen, um große Pressungen während des Tribokontakts aufnehmen zu können. Dadurch werden plastische Verformungen, welche zu Verschleiß und Vergrößerung der Reibung durch die Erhöhung der realen Kontaktfläche führen, vermieden. Bei der Tribobelastung mit einer Pressung von 50 MPa mit Shell Helix Ultra 5W30 bei einer Temperatur von 70° C sollte die verformte, verfestigte Schicht über dem Grundgefüge bei perlitischen Bereichen bis zu einer Tiefe von mindestens 700 nm vorliegen. Bei ferritischen Bereichen sollte diese Schicht bis zu einer Tiefe von 2700 nm vorliegen. Die Schichtdicke mit verändertem Gefüge gegenüber dem Grundgefüge stellt somit eine bedeutende Zieleigenschaft für das Tribosystem dar.

#### Zieleigenschaften für die äußere Grenzschicht

In Grenz- und Mischreibung ist für eine geringe Reibung und wenig Verschleiß eine äußere Grenzschicht mit einer reduzierten Festigkeit, welche sich leicht scheren lässt, von Vorteil. Eine Option zur Aufnahme der Scherkräfte kann durch eine anhaftende Adsorptionsschicht oder vergleichbarer Beschichtung erreicht werden. Diese Schicht dient dabei als Festschmierstoff und beinhaltet bei den Untersuchungen in dieser Arbeit Kohlenwasserstoffanlagerungen.

Die Ausbildung einer solchen Schicht ist anhand chemischer Analysen durch beispielsweise C-Maps beziehungsweise durch die Härte- und E-Modulverläufe von Indentermessungen im Nanometerbereich nachweisbar.

### **Zieleigenschaften der Endbearbeitung**

Bei dem betrachteten Endbearbeitungsverfahren Polymerläppen ist der Energieeintrag ein Merkmal für das Erzeugen einer reibleistungs- und verschleißreduzierten Oberfläche. Hierzu gehört auch die Aufteilung der eingetragenen Energie in einen Anteil für die Zerspanung, der Wärmeeinbringung sowie der in dieser Arbeit entscheidende Anteil der Materialumwandlung. Zur Beurteilung, ob der Energieanteil zur Materialumwandlung ausreichend groß ist, ist es unabdingbar die zuvor beschriebenen Werkstoffeigenschaften der inneren und äußeren Grenzschicht nach der Endbearbeitung mit Gefügeaufnahmen, Indentermessungen sowie einer chemischen Analyse des oberflächennahen Bereichs zu bestimmen und nach den zuvor beschriebenen Kriterien zu bewerten. Zudem zeigen die EDX-Aufnahmen von Bild 5.28, dass zum Erreichen einer Physi- und Chemisorption für die Anhaftung einer Adsorptionsschicht ein ausreichend großer Energieeintrag notwendig ist, wie er beim Polymerläppen mit einem Gesamtenergieeintrag von 1200 J bei der geläpften 4 bar Variante erreicht wird.

## **7.4 Anwendung auf andere Reibstellen im Verbrennungsmotor**

Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse dieser Dissertation auf andere Reibstellen im Verbrennungsmotor erfordert einige Voraussetzungen, damit sich ein Reibleistungs- und Verschleißvorteil einstellt. Hierzu gehören System- bzw. Bauteileigenschaften, welche im Vergleich zu den chemischen und mechanischen Eigenschaften des oberflächennahen Werkstoffbereichs eine übergeordnete Rolle spielen. In Kapitel 3.1 sind in Bild 3.1 die Einflüsse der Fertigung, der Endbearbeitung und des Einlaufs auf die relevanten Eigenschaften eines Tribosystems aufgezeigt. Aus dieser pyramidischen Darstellung ist ersichtlich, dass die Eigenschaften wie sie durch die Fertigung geprägt sind, neben der Wahl eines geeigneten Schmierstoffs für das Verhalten des Tribosystems am bedeutendsten sind. Werden hier für das betrachtete Tribosystem unvorteilhafte Eigenschaften eingestellt, kann das sich dadurch einstellende Triboverhalten nicht mehr durch eine optimierte Endbearbeitung beeinflusst werden. Hierzu gehört beispielsweise die durch die mikro- und makrogeometrischen Eigenschaften vorgegebene Kontaktfläche. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dieser Arbeit erfordert zudem, dass sich das Tribosystem häufig in Grenz- und Mischreibung befindet.

Zur Reduzierung der Reibung des Verbrennungsmotors werden zunehmend Motoröle eingesetzt, welche eine niedrigere Viskosität haben. Dieser Trend liegt an dem dadurch erreichten positiven Effekt der geringeren Flüssigkeitsreibung in der Hydrodynamik. Bei sehr stark belastete Lagerstellen nimmt der positive Einfluss eines niedrig viskosen Öls allerdings ab, weil dadurch der Bereich der Mischreibung zunimmt. Dies ist anhand der Verschiebung des Ausklinkpunkts in der Stribeckkurve zu höheren Drehzahlen nachvollziehbar. Der Ausklinkpunkt stellt in der Stribeckkurve den Übergang von der Mischreibung zur Hydrodynamik dar. Dieser Zusammenhang ist im Diagramm von Bild 7.6 mit drei Stribeckkurven übersichtlich dar-

gestellt. Ausgehend von der Stribeckkurve mit einer mittleren Viskosität des Öls, sind hier eine Kurve für Öl mit höherer und eine mit niedriger Viskosität eingezeichnet.

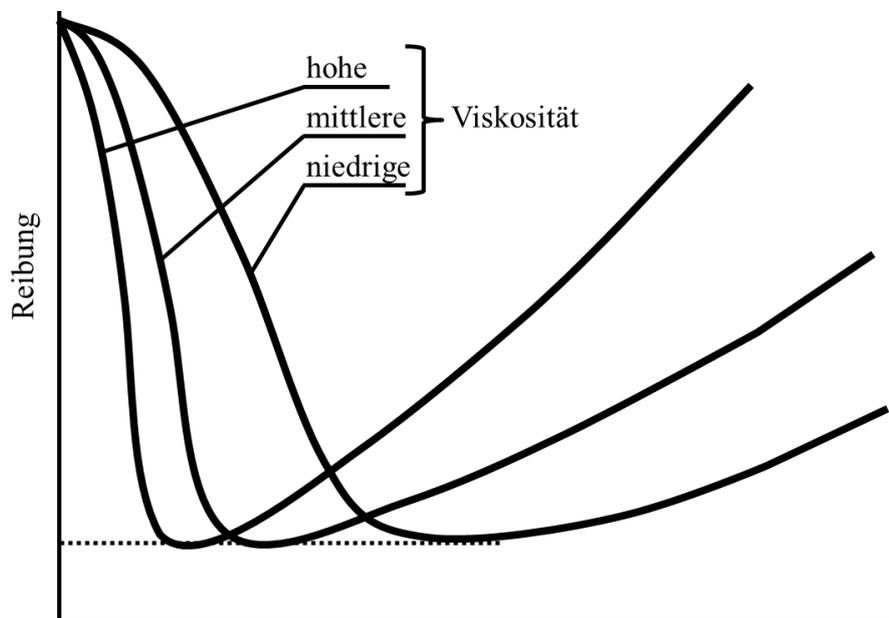


Bild 7.6: Einfluss der Ölviskosität auf den Stribeck-Kurvenverlauf [7].

Durch die steigenden Motorbelastungen aufgrund von „Downsizing“, höheren Einspritzdrücken, höheren Pressungen und längeren Ölwechselzeiten sowie der Verschiebung des Ausklinkpunkts bei niedrig viskosem Öl entstehen dadurch vermehrt Stellen im Motor, welche im Bereich der Mischreibung betrieben werden [38]. Hieraus folgen hohe Anforderungen an den oberflächennahen Werkstoffbereich, welche durch die Anpassung der in Kapitel 7.3 beschriebenen Zieleigenschaften erfüllt werden können.

Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs, welche bereits in vielen Fahrzeugen eingesetzt wird, stellt der Einsatz von Start-Stopp Systemen dar. Dabei schaltet der Motor unter einigen Voraussetzungen, wie beispielsweise dem Erreichen einer bestimmten Temperatur, den Motor beim Stillstand ab. Bei Fahrzeugen mit Hybridantrieben werden sogar zusätzlich zu den Stopps beim Stillstand des Fahrzeugs auch Start-Stopp Zyklen durchgeführt, wenn zwischen dem Elektromotor und dem Verbrennungsmotor umgeschaltet wird. Da bei diesen Systemen der Motor bei jedem Startvorgang den Bereich der Grenz- und Mischreibung durchläuft, führt dies ebenfalls zur Notwendigkeit die oberflächennahen Werkstoffbereiche für diese Belastung auszulegen.

Aus diesen Gründen wird bei der Verwendung von noch niedriger viskosem Öl und dem hieraus erhöhten Mischreibungsanteil, in Zukunft eine Anwendung der hier gewonnenen Erkenntnisse in weiteren Systemen des Verbrennungsmotors von größerer Relevanz sein.

Die Anwendung der Erkenntnisse aus dieser Arbeit ist auch für die Substitution von Systemen mit Beschichtungen oder gar von Gleitlagerschalen denkbar. Beschichtungen werden eingesetzt, wenn die Werkstoffeigenschaften der eingesetzten Bauteile den Belastungen gerade in Misch- und Grenzreibung nicht standhalten oder in diesem Bereich das System ohne Be-

schichtung zu viel Reibung und Verschleiß erzeugt. Lagerschalen haben ebenso wie die Beschichtungen die Aufgabe, die Lagerbelastungen aufzunehmen, da der Lagerstuhl nicht die notwendigen Werkstoffeigenschaften aufweist. Durch eine angepasste Endbearbeitung hinsichtlich der in Kapitel 7.1 aufgeführten Punkte besteht die Möglichkeit, die notwendigen Werkstoffeigenschaften im oberflächennahen Bereich, wie in Kapitel 7.3 aufgezählt, zu erzielen. Dies hätte den großen Vorteil, zusätzliche Beschichtungsprozesse beziehungsweise komplette Lagerschalen durch eine angepasste Endbearbeitung einzusparen.

## 7.5 Optimierungsansätze für die Endbearbeitung

Die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse vom untersuchten Polymerläppen auf andere klassische Endbearbeitungsverfahren, wie sie derzeit in der Serienproduktion eingesetzt werden, ist bei einigen Verfahren denkbar. Dies erfordert eine Abstimmung der Prozessparameter beziehungsweise die Anpassung der Werkzeuge, um neben den bisher geforderten Maß- und Formtoleranzen die innere und äußere Grenzschicht gezielt zu beeinflussen. Die relevanten Punkte zum Erreichen der inneren und äußeren Grenzschicht werden im Folgenden getrennt voneinander erläutert.

### Innere Grenzschicht

Bearbeitungsverfahren, welche sich für die Optimierung hinsichtlich der Anpassung der inneren Grenzschicht eignen, sollten einen dem Polymerläppen ähnlichen Energieeintrag in Form von Drück- und Reibprozessen in Normal- und Bearbeitungsrichtung aufweisen und dabei eine Reduzierung der Rauheit von 1 bis 2  $\mu\text{m}$  über einer Fläche von circa 340  $\text{mm}^2$  erzeugen. Diese Anforderung können beispielsweise durch umformende Verfahren wie Rollieren, Glattwalzen oder Klopfen erfüllt werden. Spanende Fertigungsverfahren könnten diese Anforderungen auch erfüllen. Dabei muss jedoch der meist größere Energieanteil für die Zerspanung stärker in die Energie zur Materialumwandlung einfließen. Dies kann am Beispiel eines Zerspanprozesses mit geometrisch definierter Schneide durch eine veränderte Schneidengeometrie (z.B. mit dem Keilwinkel und dem Schneidkantenradius) und dem eingestellten Span- bzw. Freiwinkel erreicht werden. Ein konkretes Vorgehen zur Optimierung der aufgeführten Verfahren kann wie folgt ablaufen. Zunächst ist ein Bearbeitungsversuch mit Referenzparameter und gleichzeitiger Messung der wirkenden Kräfte erforderlich. Die Referenzparameter sind so zu wählen, dass in Bearbeitungsrichtung Kräfte in der Größenordnung der gemessenen Kräfte beim Polymerläppen mit einem Bearbeitungsdruck von 4 bar wirken, siehe hierzu Bild 5.20. Die in Normalkraftrichtung einzustellende Pressung von 0,47 MPa entspricht der Pressung beim Polymerläppen mit einem eingestellten Bearbeitungsdruck von 4 bar. Danach erfolgt die Bestimmung des Gefüges, der Chemie und Härte der inneren Grenzschicht mit den in dieser Arbeit verwendeten Analysemethoden, siehe hierzu Kapitel 3.3. Der mit den gemessenen Kräften bestimmbare Energieeintrag kann daraufhin in Verbindung mit den analysierten Werkstoffeigenschaften aus Kapitel 5.4 gebracht werden. Ausgehend davon ist die Normalkraftkomponente des betrachteten Bearbeitungsverfahrens, welche in gleiche Richtung wie der Bearbeitungsdruck beim Polymerläppen wirkt anzupassen, um eine vergleichbare umgeformte innere Grenzschicht wie beim Polymerläppen mit einem Bearbeitungsdruck von 4 bar zu erreichen. Wie bereits in Kapitel 7.3 beschrieben, sollte die umge-

formte innere Grenzschicht einen verfestigten Bereich über perlitischem Grundgefüge bis zu einer Tiefe von 700 nm und über ferritischem Grundgefüge bis zu einer Tiefe von 2700 nm haben.

### **Äußere Grenzschicht**

Neben der inneren Grenzschicht konnte in dieser Arbeit bei der untersuchten Probe mit der geringsten Grenz- und Mischreibung sowie dem niedrigsten Verschleiß, die Ausbildung einer auf der metallischen Oberfläche befindlichen Schicht mit Kohlenwasserstoffverbindungen vor der tribologischen Belastung festgestellt werden. Damit diese äußere Grenzschicht mit einem klassischen Endbearbeitungsverfahren erreicht werden kann ist Grundvoraussetzung, dass beim anvisierten Bearbeitungsprozess die chemischen Elemente beteiligt sind. Am einfachsten ist dies durch eine abgestimmte Additivierung des in den meisten klassischen Bearbeitungsverfahren sowieso eingesetzten Kühlschmierstoffs zu realisieren. Wie die durchzuführende Prozessoptimierung zum Erreichen einer optimierten inneren Grenzschicht, ist ebenso für die Adhäsion von chemischen Elementen in der äußeren Grenzschicht eine Abstimmung der Parameter hinsichtlich dieses Aspekts notwendig. Zum Erreichen des gewünschten Sorptionsvorgangs ist eine genügend große Flächenpressung bei der Bearbeitung von Relevanz, wie sie beim Polymerlappen mit 0,47 MPa bei einem Bearbeitungsdruck von 4 bar erreicht wird. Der Nachweis einer anhaftenden Sorptionschicht kann beispielsweise mit EDX-Mappings erfolgen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, wie die Endbearbeitung das tribologische Bauteilverhalten beeinflusst und somit als Vorkonditionierungsmaßnahme der Gleitflächen angesehen werden kann. Anhand des Polymerlappens wurde ein Verfahren betrachtet, welches chemische und mechanische Veränderungen des oberflächennahen Werkstoffbereichs bewirkt. Zu Beginn der Arbeit wurde eine automatisierte Anlage zum Polymerlappen von Wellenbauteilen aufgebaut und gezeigt, dass der Prozess auf Wellen eines Gleitlagers anwendbar ist. Damit dieser Bearbeitungsprozess mit möglichst wenigen Systemeinflussgrößen, wie beispielsweise dem Lagerspiel oder Kantenträger in der Nockenwellenlagerung, bewertet werden konnte, wurde das Polymerlappen auf die Bearbeitung von flachen Modellproben für den Stift-Scheibe Tribometer übertragen. Aufgrund des Zielbauteils der Nockenwelle beziehen sich die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf das Polymerlappen von Proben aus St52-3, welche im Tribokontakt gegen eine Scheibe aus AlSi10Mg laufen. Die Aluminiumscheibe repräsentiert hierbei die Zylinderkopflagergasse als Reibpartner zur betrachteten Stahlnockenwelle. Die Proben wurden hinsichtlich der Topographie, der chemischen Zusammensetzung sowie der Gefügeausbildung mit den Realbauteilen verglichen. Zum Erreichen einer gleichmäßigen Makrogeometrie mit möglichst geringer Oberflächenrauigkeit durch das Polymerlappen auf den Modellbauteilen, folgten Variationen des Werkzeugwerkstoffes und der Prozessparameter. In Anlehnung an die Ergebnisse dieser Grundlagenuntersuchungen wurden die jeweils einstellbaren Prozessparameter getrennt voneinander variiert und mit dem dabei eingesetzten Energieeintrag verglichen. Bei der Erhöhung des Bearbeitungsdrucks konnte eine kontinuierliche Zunahme des Energieeintrags in Oszillations- und Rotationsrichtung festgestellt werden. Aus diesem Grund wurde die Druckvariation für weitere Untersuchungen hinsichtlich der Bewertung des oberflächennahen Werkstoffbereichs sowie des Reib- und Verschleißverhaltens ausgewählt. Dabei wurde gezeigt, dass bei einem größeren Energieeintrag durch einen höheren Bearbeitungsdruck neben der Topographie mit geringeren  $R_{vk}$ -Werten aufgrund des größeren Materialabtrags, eine innere Grenzschicht mit verformtem, verändertem Gefüge in größeren Tiefen vorliegt. Dieser Bereich ist bei einem ausreichend großen Bearbeitungsdruck von 4 bar in den Untersuchungen dieser Arbeit über Perlit bis zu einer Tiefe von 700 nm und über Ferrit in einer Tiefe von bis zu 2700 nm vorhanden. Die angegebenen Festigkeitsbereiche wurden hier anhand des Hall-Petch-Effekts abgeleitet. Der Bereich der inneren Grenzschicht hat unabhängig vom Energieeintrag eine vergleichbare chemische Zusammensetzung. Zudem bildet sich mit einem ausreichend großen Energieeintrag eine äußere Grenzschicht mit Kohlenwasserstoffanlagerungen über dem metallischen Gefüge aus. Picoindentertests zeigen, dass diese Schicht eine geringe Festigkeit besitzt, welche folglich im Tribokontakt leicht scherbar ist. Diese Schicht ist nach dem Polymerlappen mit 3 bar partiell und bei 4 bar am flächigsten vorhanden.

Die Reibung und der Verschleiß der polymergeläppten Modellproben wurden im Grenz- und Mischreibungsbereich untersucht, da dieses Reibungsregime durch eine größere Anzahl von Start-Stopp Zyklen und durch die Verwendung von Leichtlaufölen im Verbrennungsmotor an

Bedeutung gewinnt. Die polymergeläppten Modellproben mit einem Bearbeitungsdruck von 4 bar und einer von den zwei Modellproben mit 3 bar, zeigen hier beim kleinsten  $v/p$ -Verhältnis einen Reibwert  $\mu$  von 0,06 bis 0,07. Dies ist im Vergleich zu den 1 und 2 bar geläppten Proben und der anderen 3 bar geläppten Probe mit Reibwerten  $\mu$  zwischen 0,1 und 0,115 eine Reduzierung um annähernd den Faktor 2. Das Verschleißergebnis zeigt die gleiche Abhängigkeit vom druckinduzierten eingebrachten Energieeintrag. Lediglich bei den Versuchen mit einem ausreichend großen Energieeintrag während des Polymerlappens, wie bei den 4 bar Proben und der einen 3 bar Probe, ist ein geringer Verschleiß festzustellen, welcher nicht zum Hochverschleiß und somit zum Werkstoffversagen führt. Zudem ist bei diesen Proben mit geringem Verschleiß entweder die originäre Oberflächenstruktur vom Drehprozess der Scheiben oder eine Einglättung auf beiden Tribopartnern vorzufinden. Bei den übrigen Varianten mit der anderen 3 bar Probe und den 1 und 2 bar Proben ist die Ausgangsoberfläche nicht mehr erkennbar. Der erhöhte Verschleiß hat sich hier auch durch die Aufzeichnung der Federvorspannposition bestätigt, welche während der Triboversuche zum Ausgleich des Verschleißes und zum Erhalten der vorgegebenen Normalkraft nachgeregelt werden musste.

Aus den Bearbeitungs- und Triboergebnissen konnten mithilfe der durchgeführten Analysen Erkenntnisse abgeleitet werden, welche auf die modifizierte, oberflächennahe Werkstoffcharakteristik durch den druckabhängigen Energieeintrag beim Polymerlappen zurückzuführen sind. Die Topographie hat hier eine untergeordnete Rolle, da bei den Varianten mit der geringsten Reibung und dem niedrigsten Verschleiß sogar geringere Ölrückhaltevolumen vorhanden sind, was sich in der Mischreibung eher negativ auswirken müsste. Ist ein ausreichend großer Energieeintrag beim Polymerlappen vorhanden, kann die dabei gebildete innere Grenzschicht die wirkenden Kräfte durch die Hertzsche Pressung bei der Tribobelastung im Grenz- und Mischreibungsbereich aufnehmen und führt zu einem robusteren System mit breiterem Einlaufkorridor, bei höheren Reibleistungsdichten. Desweiteren ermöglicht die im Bereich der äußeren Grenzschicht in Abhängigkeit des Energieeintrags festgestellte Adsorption von Kohlenwasserstoffen eine gute Anpassung der Kontaktflächen beider Tribopartner und begünstigt durch deren geringe Festigkeit die Materialscherung im Grenz- und Mischreibungsbereich. Damit gelingt es bei großen Flächenpressungen und Gleitgeschwindigkeiten einen stabilen Einlauf mit geringen Reibwerten zu erreichen. Die beschriebenen Charakteristika der inneren und äußeren Grenzschicht durch den Energieeintrag beim Polymerlappen führen zu niedrigen Reibwerten und einem reduziertem Verschleiß im Bereich der Grenz- und Mischreibung, wie es durch die Untersuchungsergebnisse in dieser Arbeit bestätigt wurde. Somit ist es beim Polymerlappen möglich, den Energieeintrag bei der Druckvariation als Messgröße der Endbearbeitung für das spätere tribologische Bauteilverhalten zu verwenden.

Da es sich beim Polymerlappen um kein Serienbearbeitungsverfahren handelt, ist es, wie in Kapitel 7.5 erwähnt, wünschenswert, die ablaufenden Mechanismen beim Polymerlappen auf klassische Endbearbeitungsverfahren zu übertragen. Ergänzend dazu ist es sinnvoll Grundsatzzuntersuchungen durchzuführen, um die Wirkung der beim Polymerlappen parallel ablaufenden Effekte für den späteren tribologischen Kontakt voneinander abzugrenzen und zu bewerten. Ziel der dafür notwendigen Versuche und Bewertungen sollte sein herauszufinden, welche dieser Effekte für ein Tribosystem mit möglichst geringer Reibung und wenig Verschleiß im Grenz- und Mischreibungsbereich besonders wirkungsvoll sind. Denkbar wäre zum Beispiel, dass nur der veränderte Gefügebereich der inneren Grenzschicht in einer ausreichend

---

großen Tiefe notwendig ist, um die großen Kräfte im Grenz- und Mischreibungsregime aufzunehmen. Es könnte aber auch möglich sein, dass anstatt der veränderten Gefügestruktur lediglich eine veränderte äußere Grenzschicht durch die Adsorption von beispielsweise Kohlenwasserstoffen zielführend ist. Diese Abgrenzung müsste durch Bearbeitungsversuche mit einer geeigneten Auswahl von Endbearbeitungsverfahren und der begleitenden Analytik, wie sie auch in dieser Arbeit eingesetzt wurde, erfolgen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Abbott, E.J., Firestone, F.A.: On specifying surface quality, *Mech. Eng.*, 55, S.569, 1933
- [2] Abel, P.B., Ferrante, J.: *Surface Physics in Tribology* in Bhushan, B.: *Modern Tribology Handbook Vol. 1*, CRC Press, New York, 2001
- [3] Affenzeller, J., Gläser, H.: *Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren, Die Verbrennungskraftmaschine, Neue Folge Bd. 8*, Wien: Springer, 1996
- [4] Amontons, G.: *De la Resistance Causée dans les Machines*, *Histoire Acad. Roy Sci. Paris* 12, S.206, 1699
- [5] Archard, J.F.: Elastic deformation and the laws of friction, *Proc. Roy Soc. London A* 243, S. 190-205, 1957
- [6] Ayers, J.D., Bolster, R.N.: Abrasive wear with fine diamond particles of carbide containing aluminum and titanium alloy surfaces, *Wear*, 93, S.193-205, 1984
- [7] Bartz, W.J.: *Lehrgangsunterlagen: TAE-Lehrgang: Tribologie und Schmierungstechnik*, Technische Akademie Esslingen, 1993
- [8] Batchelor, A.W., Stachowiak, G.W.: Tribology in material processing, *Journal of Materials Processing Technology*, 48, S.503-515, 1995
- [9] Beilby, G.: *Aggregation and Flow of Solids*, Macmillan and Co., Ltd., London, 1921
- [10] Ben-Tsur, L.: Reduzierte Reibung durch umweltfreundliche Oberflächen- und Nanotechnologie, *MTZ*, 69, S.132-139, 2008
- [11] Berggold, W., Häusler, G.: Optische 3D-Sensoren, *Optik & Photonik*, Nr.3, S.28-32, 2010
- [12] Berlet, P.: Einfluss spanender Endbearbeitungen mit geometrisch unbestimmten Schneiden auf tribologische Funktionsflächen im Motorenbau sowie auf Reibung und Verschleiß. *Dissertation*, Karlsruhe, 2009
- [13] Blau, P.J.: On the nature of running-in, *Tribology International*, 38, S.1007-1012, 2005
- [14] Blau, P.J.: The significance and use of the friction coefficient, *Tribology International*, 34, S.585-591, 2001
- [15] Bowden, F.P., Tabor, D.: *The friction and lubrication of solids*, Oxford University Press, Amen House, London, 1950
- [16] Brehm, A.: *Praktikum der Technischen Chemie - Adsorption*, Universität Oldenburg, 2009
- [17] Brendel, H., Winkler, H.: *Wissensspeicher Tribotechnik*, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1979

- 
- [18] Bürgel, R., Maier, H.J., Niendorf, T.: Handbuch Hochtemperatur – Werkstofftechnik. Wiesbaden, 4. Auflage, Vieweg+Teubner, 2011
- [19] Bush, A.W., Gibson, R.D., Thomas, T.R.: The elastic contact of a rough surface, *Wear*, 35(1), S.87-111, 1975
- [20] Chakhvorostov, D., Pöhlmann, K., Scherge, M.: An energetic approach of friction, wear and temperature, *Wear*, 257, S.124-130, 2004
- [21] Chokshi, A.H., Rosen A., Karch J., Gleiter H.: On the Validity of the Hall-Petch Relationship in Nanocrystalline Materials, *Scripta Metall.* 23(10), 1989
- [22] Clausner, A.: Bewertung von Verfahren zur Fließspannungsbestimmung in der Nanoindentation. Dissertation, Chemnitz, 2013
- [23] Coulomb, E.: Théorie des machines simples, *Mem. Math. Phys. Paris* 10, S.161, 1785
- [24] Crimmann, P.: Grenzflächenmodifizierung und –analyse im Polypropylen-Kupfer-Verbund, Halle (Saale), 2003
- [25] Czichos, H., Habig K.H.: Tribologiehandbuch – Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 3.Auflage, Vieweg+Teubner, 2010
- [26] Deters, L., Poll, G.: Lagerung, Gleitlagerung, Wälzlager in Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2, Springer, S.69-200, 2012
- [27] Deters, L.: Grundsätzliches zu Reibung und Verschleiß in der technischen Anwendung, *Magdeburger Wissenschaftsjournal*, S.16-26, 2004
- [28] Doerner, M.F., Nix, W.D.: *J. Mater. Res.*, 1, S.601, 1986
- [29] Eggert, F.: Standardfreie Elektronenstrahl-Mikroanalyse (mit dem EDX im Rasterelektronenmikroskop): Ein Handbuch für die Praxis, Books on Demand, 2005
- [30] Eifler, W., Schlücker, E., Spicher, U., Will, G.: Küttner Kolbenmaschinen, 7. Auflage, Vieweg+Teubner, 2009
- [31] Elkoy, H.G.: Optimum carburisation on external spur gears, *Wear*, 95, S.70, 1984
- [32] Fleischer, G.: Zum energetischen Niveau von Reibpaarungen, *Schmierungstechnik*, 16 (12), S.358-363, 1985
- [33] Fougere, G.E., Weertman J.R., Siegel R.W.: On the hardening and softening of nanocrystalline materials, *Nanostr. Mater.* 3, S.379-384, 1993
- [34] Gervé, A. u. a.: Neuere Modellvorstellungen in der Tribologie – Tribomutation an Zahnflanken und anderen Maschinenteilen. Kurbericht ZF 1/93, Vorschlag für ein FVA-Forschungsvorhaben, Arbeitspapier für die ZF Zahnradfabrik Friedrichshafen AG, 1993
- [35] Godet, M.: The third-body approach: A mechanical view of wear, *Wear*, 100, S.437-452, 1984
- [36] Godet, M.: Third-bodies in tribology, *Wear*, 136, S.29-45, 1990
- [37] Godfrey, D.: Iron oxides and rust (hydrated iron oxides) in tribology, *Lubrication Engineering*, S. 33-37, 1999

- [38] Grebe, M., Feinle, P.: Reibwertuntersuchungen an Motorenölen im Mikrotribometer, Tribologie-Fachtagung 2004 „Reibung, Schmierung und Verschleiß“ in Göttingen Tagungsband II, GfT, Moers, 2004
- [39] Greenwood, J.A., Williamson, J.B.P.: Contact of nominally flat surfaces, Proc. Roy Soc. London A 295, S.300-319, 1966
- [40] Greer, A.L.: Nanostructure by nucleation, nature 368, S.688-689, 1994
- [41] Habig, K.-H.: Verschleiß und Härte von Werkstoffen, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1980
- [42] Heyd, M.: Reibleistungspotentiale an V6/V8-Ottomotoren. Diplomarbeit, Stuttgart, 2008
- [43] Hornbogen, E., Warlimont, H.: Metalle – Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen, 5. Auflage, Springer, 2006
- [44] Kehrwald, B.: Untersuchung der tribologischen Vorgänge in tribologischen Systemen während des Einlaufs. Dissertation, Karlsruhe, 1998
- [45] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren 1 –Drehen, Fräsen, Bohren, 8. Auflage, Springer, 2008
- [46] Klocke, F., König, W.: Fertigungsverfahren 2 –Schleifen, Honen, Läppen, 4. Auflage, Springer, 2005
- [47] Leidich, E., Deters, L.: Normen, Toleranzen, Passungen und Technische Oberflächen in Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, Springer, S.13-69, 2005
- [48] Lewis, C.R.: Surface finish control, Prod. Engng. 21, Nr.8, S.91-95, 1950
- [49] Mach, W.: Tribomutation bei der Endbearbeitung und ihre Auswirkungen auf das tribologische Verhalten während des Betriebs. Dissertation, Karlsruhe, 2003
- [50] Mahr GmbH: MarSurf, Oberflächenkenngrößen, Göttingen, 2008
- [51] Markmann, J.: Mikrostrukturuntersuchung an kaltgewalztem nanokristallinem Palladium. Dissertation, Karlsruhe, 2004
- [52] Martin, K.: Neuere Erkenntnisse über den Hartmetallabtrag beim Läppen, Fachberichte für die Oberflächentechnik 10, 6, S.197-202, 1972
- [53] Matthaei E.: Härteprüfung mit kleinen Prüfkräften und ihre Anwendung bei Randschichten, DGM-Informationsgesellschaft, Oberursel, 1987
- [54] Nikolova, D.: Charakterisierung und Modifizierung der Grenzflächen im Polymer-Metall-Verbund
- [55] Oliver, W.C., Pharr, G.M.: J. Mater. Res., Vol. 7, No. 6 (1992) 1564
- [56] Pauksch, E., Holsten, S., Linß, M., Tikal F.: Zerspantechnik, 12. Auflage, Vieweg+Teubner, 2008
- [57] Perssons, B.N.J.: Sliding Friction: Physical Principles and Applications, Springer, 2002

- [58] Petch, N.J.: The Cleavage Strength of Polycrystals, J. Iron & Steel Inst., 174, S.25-28, 1953
- [59] Petrow, N.: Reibung der Flüssigkeiten und Maschinen (russ.), Journal für Ingenieure (russ.), 1883
- [60] Pharr, G.M., Oliver, W.C., Brotzen, F.R.: J. Mater. Res., Vol. 7, No. 3 (1992) 613
- [61] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung, Springer, 2009
- [62] Popov, V.L., Psakhie, S.G., Gervé, A., Kehrwald, B., Shilko, E.V., Dmitriev, A.I.; Wear in combustion engines: experiment and simulation on the base of movable cellular automata method, Physical Mesomechanics 4, 4, S.71-80, 2001
- [63] Priestner, C. u. a.: Reibung im hochbelasteten Gleitlagern, MTZ, 73, S.310-315, 2012
- [64] Rabinowicz, E.: The last wear, Wear, 100, S.553-540, 1984
- [65] Reynolds, O.: On the theory of lubrication, Philos. Trans. Roy Soc. London 177, S.157-234, 1886
- [66] Sander, M.: Oberflächenmeßtechnik für den Praktiker, 2. Auflage, Feinprüf Perthen GmbH, Göttingen, 1993
- [67] Schattauer, A.: Prozessentwicklung und Charakterisierung einer anodisch - keramisierten Al-Zylinderlaufbahn unter tribologischen Aspekten zur Reduzierung der CO<sub>2</sub> - Emissionen. Dissertation, Dresden, 2009
- [68] Scherge, M., Gerve, A., Berlet, P., Kopnarski, M., Oechsner, H., Schreib, M.: Tribomutation von Werkstoffoberflächen im Motorenbau am Beispiel des Zylinderzwickels II. Abschlussbericht FVV-Forschungsvorhaben Nr. 716, Heft 811, 2005
- [69] Scherge, M., Gerve, A., Berlet, P.: Tribomutation von Werkstoffoberflächen im Motorenbau am Beispiel des Zylinderzwickels II. Abschlussbericht FVV-Forschungsvorhaben Nr. 716, 2001
- [70] Scherge, M., Linsler, D., Schlarb, T.: The running-in corridor of lubricated metal-metal contacts, Wear, 342-343, S.60-64, 2015
- [71] Scherge, M., Shakhvorostov, D., Pöhlmann, K.: Neueste Ergebnisse zu grundlegenden Verschleißmechanismen von Metallen, Jahrestagung der Gesellschaft für Tribologie, Göttingen, 2002
- [72] Schmaltz, G.: Technische Oberflächenkunde, Springer, 1936.
- [73] Schultz, M.: Quantitative energiedispersive Elektronenstrahlmikroanalyse von Herzmuskelzellen: Einfluss von Fehlermöglichkeiten bei Präparation, Messung und Auswertung der Spektren auf die Signifikanz der Messergebnisse. Dissertation, Halle (Saale), 2002
- [74] Simpfendörfer, D.: Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells beim Planläppen mit Zwangsführung, Produktionstechnik - Berlin 71, Hanser-Verlag, München, Wien, 1988
- [75] Sneddon, I.N.: Int. J. Eng. Sci. 3, S47, 1965

- [76] Stähli, A. W.: Die Lämp-Technik, Technische Rundschau 68, 13, S.1-11 u. Nr. 15, S.1-11, 1976
- [77] Steinhilper, W., Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1, 7.Auflage, Springer, 2008
- [78] Theisen, W.: Randzonenveränderung verschleißbeständiger Werkstoffe bei der spannenden und abtragenden Bearbeitung, DGM-Tagung, „Reibung und Verschleiß“, Bad Nauheim, 1996
- [79] Thiessen, P.-A., Meyer, K., Heinicke, G.: Grundlagen der Tribochemie, Abhandlungen der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Akademie-Verlag Berlin, 1967
- [80] van Basshuysen, R., Schäfer, F.: Handbuch Verbrennungsmotoren, 5. Auflage, Teubner, Wiesbaden, 2010
- [81] von Weingraber, H., Abou-Aly, M.: Handbuch Technische Oberflächen, Vieweg, Braunschweig, 1989
- [82] Wilke, V.: Laser-Scan-Mikroskopie, Physikalische Blätter Volume 39, Nr. 5, S.129, 1983
- [83] Williams, J.A.: Engineering Tribology, 2. Auflage, Oxford University Press, Oxford, 1996
- [84] Zhmud, B.: Vortrag ANS Triboconditioning, TAE 18th Colloquium Tribology, 2012
- [85] Zum Gahr, K.H.: Reibung und Verschleiß, Mechanismen- Prüftechnik- Werkstoffeigenschaften, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., 1983

## Danksagung

Meine Dissertation ist nach jahrelanger Arbeit nun vollendet. Während dieser Zeit haben mich viele Menschen begleitet und in vielfältiger Form unterstützt. Diesen Personen möchte ich hiermit meinen besonderen Dank aussprechen.

Mein Erstgutachter und betreuender Professor Herr Dr. Scherge hat mich von Anfang an mit seinen wertvollen Anregungen und Untersuchungen am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik unterstützt. Dabei konnte ich stets von einem offenen Informationsaustausch profitieren und zahlreiche Diskussionen über die durchgeführten Untersuchungen führen. Am Institut von Herrn Professor Dr. Scherge möchte ich mich ebenso bei Herrn André Blockhaus für die Durchführung von Tribometeruntersuchungen, Herrn Dr. Eberhard Nold für die XPS-Untersuchungen, Herrn Dr. Martin Dienwiebel, Herrn Dominik Linsler und Frau Angelika Brink für Informationen und Diskussionen zu vielen tribologischen Themenstellungen bedanken. Ebenso bin ich Herrn Professor Dr. Schulze für sein Zweitgutachten zu Dank verpflichtet.

Die Dissertation ist im Rahmen einer Doktorandenanstellung bei der Daimler AG in Stuttgart-Untertürkheim in der Werkstoff- und Verfahrensentwicklung entstanden. Dort konnte ich immer auf die Unterstützung vieler Kollegen zählen. Die größte Unterstützung habe ich von Herrn Dr. Reiner Heigl sowie Herrn Dr. Alvaro Fernandez bekommen. Neben vielen Gesprächen über tribotechnische Problemstellungen, haben wir auch öfters viele private Themen durchgesprochen. Zum Durchhalten der Arbeit hat mich Herr Dr. Heigl auch mit dem ein oder anderen Trainingsplan auf der Laufstrecke am Neckar bis zum Rosensteinpark motiviert oder auch mal über die Alpen mit dem Mountainbike begleitet. Vielen anderen Kollegen der Daimler AG, welche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, gilt an dieser Stelle auch ein großes Dankeschön. Dazu gehört insbesondere der Abteilungsleiter Herr Wolfgang Hansen, die Teamleiter Herr Klaus Berger, Herr Dr. Helmut Rauner und Herr Dr. Rainer Joos. Des Weiteren gilt mein Dank den Kollegen Herrn Jürgen Krieger, Herrn Falko Thomann sowie den damaligen Studenten Herrn Stephan Schart, Herrn Muhammad Arif Saeed, Herrn Christoph Seegrün, Herrn Miguel Jarysz, Herrn Florian Strunk, Herrn Alexander Nagel, Herrn Cem Murat Aydin und Herrn Martin Zettel, die mich bei der Durchführung von verfahrenstechnischen Untersuchungen unterstützt haben. Bei chemischen Fragestellungen konnte ich auf fachliche Beratung von Herrn Dr. Johann Mehlstäubl, Frau Andrea Herrmann, Herrn Richard Petermann sowie Frau Anke Müller vertrauen. Vielen Dank hierfür. Ein weiteres Dankeschön gilt Herrn Karl Filip Zimmerer und Herrn Daniel Reckinger, welche mir bei der finalen Korrekturschleife behilflich waren.

Die schriftliche Vollendung und die dazugehörigen Recherchearbeiten dieser Dissertation wurden nahezu ausschließlich zuhause durchgeführt. Dafür musste meine verständnisvolle Frau Madeleine sowie mein aktiver Sohn Lio sehr oft auf mich verzichten. Auch musste meine Frau in dieser Zeit den Haushalt hauptsächlich alleine bewältigen. Besonders wichtig waren für mich die aufbauenden Worte und der starke Rückhalt von Madeleine, welche zum

Durchhalten und Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Hierfür bin ich überaus dankbar. Zusammen sind wir die beste Familie, die ich mir denken kann. Ich freue mich bereits heute auf alle kommenden Abenteuer mit euch und unserem zukünftigen Nachwuchs.

Großen Beistand und Motivation habe ich von meinen Eltern Marianne und Willy sowie meiner Schwester Jenny mit ihrem Mann Pedro erfahren. Dabei möchte ich mich besonders für die ermutigenden Worte bedanken. Es ist toll, dass ihr alle an mich glaubt und immer für mich da seid.

Meine Familie und Freunde sind für mich das wichtigste auf der Welt!