



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Diplomarbeit

# **Einfluss von Temperatur und Luftfeuchte auf die tribologische Performance von Graphitplatten in Gleitmodulen für Bandanlagen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer  
Diplom-Ingenieurin

eingereicht an der Technischen Universität Wien,  
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

**Anelia Stefanova, BSc**

Matr.Nr.: 00926759

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Carsten Gachot**

E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung – Tribologie  
Technische Universität Wien  
Getreidemarkt 9, 1060 Wien, Österreich

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

**Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

*Eidesstattliche Erklärung*

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

# Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist es, der Einfluss von Temperatur, Luftfeuchte und Rauheit auf die tribologische Performance von Graphitplatten in Gleitmodulen für Bandanlage zu klären und zu untersuchen. Teil der Projektziele erscheint die Adaptierung eines tribotechnischen Teststands für die thermisch belastete Untersuchung des dynamischen Reibverhaltens zwischen einer Edelstahl-Ringscheibe und Graphit-Gleitsegmente, was eine vereinfachte Version eines realen Gleitmoduls darstellen soll. Wichtig dabei ist die Identifikation der tribologischen Einflussparameter, die die größte Rolle für das Graphitverhalten spielen.

Die Motivation für die Durchführung der Versuche war der starke Verschleiß, die akustische Äußerung und die Änderung der Oberflächenoptik der Graphitplatten während des Betriebs, sowie die Forderung für geringere Reibwerte im Gleitmodul. Deswegen untersucht diese Studie die Änderung der Reibungskoeffizienten und der Verschleißrate unter verschiedenen Temperaturbedingungen in trockener Umgebung im belasteten Zustand unter Berücksichtigung der Rauheit der Gegenlaufpartner. Eine Reproduzierbarkeit der Versuche wird erwünscht. Der Verglasungseffekt soll durch die vorhandene Technik detektiert werden.

Kern dieser Arbeit ist die Frage, inwieweit der Graphit als Festschmierstoff in einem Gleitkontakt unter spezifischen Umgebungsbedingungen seine Aufgabe erfüllen und schmierfähig bleiben kann. Daher sollte sein Anwendungsbereich genauer durch quantitative und qualitative Methoden untersucht und definiert werden. Profilometrie, Lichtmikroskopie und Raman-Spektroskopie sind einige der wichtigsten Methoden, um Veränderungen der Graphitproben zu erkennen.

Die vorliegende Arbeit behandelt auch die Frage, welche konstruktiven Maßnahmen die rotatorische Gleitbewegung verbessern können und deswegen wird eine Optimierung des existierenden Tribostands vorgenommen.

Da Festschmierstoffe die Reibung in Industrieanlagen reduzieren und viele Anwendungen im Maschinenbau finden, sind sie von großem Interesse, um die Lebensdauer vieler Systeme und Maschinen zu verlängern. Leider sind die Kohlenstoffverbindungen nicht ausreichend erforscht und die mit Graphit durchgeführten Studien sind begrenzt. Daher sind weitere Tests erforderlich, um mehr Erkenntnisse über die Performance dieses Materials zu gewinnen.



# Abstract

The aim of the present master thesis is to clarify and investigate the influence of temperature, humidity and roughness on the tribological performance of graphite plates in sliding modules for conveyor systems. Part of the project goals is the adaptation of a tribotechnical test stand for the thermally loaded investigation of the dynamic friction behavior between a stainless steel ring and graphite sliding segments, which is supposed to be a simplified version of a real sliding module. It is important to identify the tribological parameters that play the biggest role in graphite behavior.

The motivation for carrying out the experiments was the heavy wear, the acoustic expression and the change of the surface appearance of the graphite plates during operation, as well as the requirement for lower coefficients of friction in the sliding module. Therefore, this study investigates the change in friction coefficients and wear rate under different temperature conditions in a dry environment in the loaded state taking into account the roughness of the mating partners. A reproducibility of the experiments is desired. The changes in the surface should be detected by the existing technique.

The core of this work is the question to what extent the graphite as a solid lubricant in a sliding contact under specific environmental conditions can fulfill its task and remain lubricated. Therefore, its scope should be more closely examined and defined by quantitative and qualitative methods. Profilometry, light microscopy and Raman spectroscopy are some of the most important methods for detecting changes in graphite samples.

The present work also deals with the question of which constructive measures can improve the rotational sliding movement and therefore an optimization of the existing tribological stand is made.

Because solid lubricants reduce friction in industrial equipment and find many applications in engineering, they are of great interest to extend the life of many systems and machines. Unfortunately, the carbon compounds have not been sufficiently researched and the studies conducted with graphite are limited. Therefore, further testing is needed to gain more insight into the performance of this material.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carsten Gachot bedanken, der mich mit seinem fachkundigen Rat unterstützt und mich mit viel Engagement während meiner Arbeit begleitet hat. Ich bin ihm sehr dankbar für die Ermöglichung der Diplomarbeit, da ich im Laufe dieses Projektes sehr viele neuen Kenntnisse und wertvolle Erfahrungen gesammelt habe.

Des Weiteren möchte ich mich bei dem österreichischen Konzern Berndorf AG und der Tochtergesellschaft Berndorf Band Group für die Begleitung und Förderung während meiner fast 7-jährigen Tätigkeit im Rahmen des studienbegleitenden Programms für junge AkademikerInnen talents@berndorf bedanken, sowie für die Kooperation und die finanzielle Unterstützung meiner Forschung. Insbesondere Dank gebührt Frau Karin Moser und Frau Regine Midder für die Koordination des Projekts.

Des Weiteren möchte ich mich herzlich bei meinen Mentoren Herrn Mag. Hannes Flasch und Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Klemens Gregor Schulmeister, die für die Organisation, fachliche und persönliche Unterstützung, sowie für die Verwirklichung meiner Arbeit beigetragen haben, bedanken. Darüber hinaus möchte ich an Herrn Dr. Michael Proschek für die Gelegenheit diese Diplomarbeit im Forschungsbereich der Tribologie bei dem Unternehmen Berndorf Band Group zu erhalten, meinen Dank aussprechen. Dank gebührt auch Herrn Dipl. Ing Jean Dusabe, der mich auf diese Möglichkeit hingewiesen und mich empfohlen hat. Ebenso gilt mein Dank Herrn Dipl. Ing. Rainer Ramharter für die organisatorische und konstruktive Unterstützung, Herrn Thomas Kalcsics für die Profilometrie-Einschulung am Nanofokus, Dr. Ataollah Javidi für die Einführung in die Analyse- und Darstellungssoftware, sowie allen anderen Kollegen von Berndorf Band Group.

Teile der dargestellten Erkenntnisse wurden in Zusammenarbeit mit der AC2T research GmbH erarbeitet und durch das österreichische COMET-Programm <sup>1</sup> gefördert. Deswegen danke ich weiterhin Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Ewald Badisch und Herrn Dipl. Ing- Thomas Lebersorger für die Betreuung während der tribologischen Experimente und für deren Expertenmeinungen. Ich möchte mich auch bei allen anderen Mitarbeiter von AC2T research GmbH für die Einschulungen und die Unterstützung bei den tribologischen Versuchen bedanken.

---

<sup>1</sup>Projekt: COMET K2 XTribology, Nr. 849109; Projektträger: AC2T research GmbH, Österreichisches Kompetenzzentrum für Tribologie

Danken möchte ich außerdem allen Mitarbeitern der TU Wien für die große Hilfe bei der Durchführung von zahlreichen Messungen: Dr. Bernhard Kohlhauser für die Raman-Spektroskopie, Ing. Christian Zaruba für die Härtemessung und Dipl.-Ing. Paul Ecker für die Lichtmikroskopie. Außerdem möchte ich Michaela, Mattias und Kemo für das Korrekturlesen meiner Masterarbeit danken ohne deren Hilfe und Bemühungen diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich in schwierigen Momenten immer ermutigt und motiviert, sowie eine großartige mentale Unterstützung in dieser dynamischen und herausfordernden Phase meines Lebens geboten haben.



# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1	Allgemeine Einleitung in das Themenfeld . . . . .	1
2	Problemstellung/Forschungsfragen/Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit . . . . .	1
3	Aufbau und Struktur der Arbeit . . . . .	2
<b>II</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
1	Das Tribosystem . . . . .	4
1.1	Tribosystem- Analyse (TSA) . . . . .	4
1.2	Systembeanspruchung/Eingangsgrößen . . . . .	5
1.3	Systemstruktur . . . . .	6
1.4	Systemfunktion . . . . .	12
1.5	Unerwünschte Nebeneffekte . . . . .	13
1.6	Zusammenfassung . . . . .	14
2	Festschmierstoffe . . . . .	15
2.1	Festschmierstoffe mit Schichtgitterstruktur . . . . .	15
2.2	Graphit . . . . .	16
3	Reibung und Verschleiß . . . . .	23
3.1	Kontaktbedingungen und die Reibung . . . . .	23
3.2	Reibungsmechanismen . . . . .	28
3.3	Beanspruchungskollektiv und Verschleiß . . . . .	31
3.4	Verschleißmechanismen . . . . .	33
4	Charakterisierung der Oberfläche . . . . .	35
4.1	Oberflächenfunktion . . . . .	36
4.2	Oberflächenbeschaffenheit . . . . .	37
4.3	Analyse der Oberflächenrauheit . . . . .	38
5	Messmethoden . . . . .	44
5.1	Quantitative Bewertung/Messung der Oberflächenrauheit . . . . .	44
5.2	Härtemessung . . . . .	49
5.3	Qualitative Bewertung/ Bestimmung der chemischen Zusammensetzung . . . . .	51
5.4	Verschleißmessung . . . . .	53
5.5	Luftfeuchtigkeitregelung und -messung . . . . .	56
6	Tribometrie, Selektion eines Tribo-Tests . . . . .	61

6.1	Klassifikation . . . . .	61
6.2	Versuchsplanung . . . . .	62
6.3	TAN (Tribological Aspect Numbers) . . . . .	62
<b>III</b>	<b>Praxisteil/ Versuchsaufbau und -durchführung</b>	<b>64</b>
1	Aufbau des Versuchstandes . . . . .	64
1.1	Hochtemperatur Ring Reibung und Verschleiß Tribometer (RRT-HT) . . .	64
2	Vorbereitung der Bauteile des Tribometers . . . . .	65
3	Tribo-Paar-Vorbereitung(Probenvorbereitung) . . . . .	65
3.1	Wasserstrahlschneiden . . . . .	67
3.2	Konditionierung der Proben . . . . .	69
4	Härteprüfverfahren nach Brinell . . . . .	72
4.1	Definition und Angaben . . . . .	72
4.2	Durchführung . . . . .	73
5	Quantitative Beschreibung, Strukturelle Eigenschaften:Profilometrie . . . . .	75
5.1	NanoFocus: $\mu$ surf Konfokalmikroskop . . . . .	75
5.2	Alicona InfiniteFocus . . . . .	77
6	Qualitative Beschreibung, Chemische Eigenschaften : Raman-Spektroskopie . .	78
7	Lichtmikroskopie, Keyence . . . . .	80
7.1	Ausstattung . . . . .	80
7.2	Durchführung . . . . .	80
8	Tribometrie . . . . .	81
8.1	Tribometrische Daten und Versuchsplanung . . . . .	81
8.2	Testprinzip am Ring-Reibungs-Verschleiß Tribometer (RRV) . . . . .	82
8.3	Versuchsdurchführung . . . . .	82
<b>IV</b>	<b>Auswertung, Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>83</b>
1	Ziele der Versuchsreihe . . . . .	83
2	Probleme bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche . . . . .	83
3	Versuche in trockener Umgebung . . . . .	84
3.1	Bei Raumtemperatur . . . . .	86
3.2	Bei 150 °C . . . . .	89
3.3	Bei 250 °C . . . . .	91
3.4	Bei 400 °C . . . . .	94
3.5	Zusammenfassung . . . . .	96
4	Betrachtung der Verschleißmessmethoden und deren Ergebnisse . . . . .	99
4.1	Mittels Verschleißberechnung . . . . .	99
4.2	Mittels im Tribometer montiertes Verschleißsensors . . . . .	100
4.3	Mittels Präzisionswaage . . . . .	101
4.4	mittels Differenzmessung und Volumenmessung . . . . .	102
4.5	Zusammenfassung . . . . .	103

---

5	Analyse der Oberfläche: Raman-Spektroskopie . . . . .	104
5.1	Auswertung der Messwerte . . . . .	104
5.2	Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	106
<b>V</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>108</b>
1	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse . . . . .	108
1.1	Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von Feuchtigkeit . .	108
1.2	Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von Rauheit des Gegenlaufpartners . . . . .	108
1.3	Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von der Temperatur	110
2	Mögliche Optimierungsmaßnahmen der Versuche . . . . .	111
3	Ausblick . . . . .	112
<b>VI</b>	<b>Anhang</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>116</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>135</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>138</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>139</b>
	<b>Symbolsverzeichnis</b>	<b>140</b>

# Kapitel I

## Einleitung

### 1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Tribologie ist eine noch sehr junge Wissenschaft, die sich mit der Beschreibung von Reibungs- und Verschleißprozessen von Wirkflächen in Relativbewegung sowie der Schmierung und Entwicklung von Technologien zur Optimierung von Reibungsprozessen beschäftigt. Verbesserungen der tribologischen Performance von Komponenten können zu einem geringeren Energieverbrauch, höherer Leistung, geringeren Abgasemissionen, verbesserter Lebensdauer und geringerem Wartungsaufwand führen. Um ein optimales tribologisches Verhalten zu gewährleisten, muss zunächst auf die Materialien, Beschichtungen und Schmiermittel geachtet werden, die in den mechanischen Teilen verwendet werden.[38, 46]

### 2 Problemstellung/Forschungsfragen/Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Einsetzbarkeit von Graphitplatten im Gleitmodul einer Doppelbandpresse aus tribologischer Sicht. Die Frage nach Eigenschaften und dem Verhalten von Festschmierstoffen ist aufgrund der spezifischen Betriebssituation von besonderem Interesse. Der Einfluss der Temperatur bei minimaler oder fehlender Luftfeuchte auf die tribologische Performance von Graphitplatten in Gleitmodulen für Bandanlagen wird detaillierter betrachtet.

Ziel der Arbeit ist eine bessere Erklärung der Ergebnisse am Prüfstand und die Einflussparameter, die eine direkte Auswirkung auf die Reibung und folglich auf den Verschleiß im System haben, mittels der Ergebnisse aus den tribologischen Tests im Labor zu schaffen. Der Fokus liegt auf der Zusammenfassung, dem Testen, der Vernetzung, der Ergänzung der bereits bekannten Informationen über das Verhalten von Graphit im bestehenden Tribosystem. Dabei berücksichtigte Parameter sind Druck, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Oberflächenbeschaffenheit, Bewegungskinetik und Werkstoffpaarung (Graphitplatte/Stahlband im Realsystem).

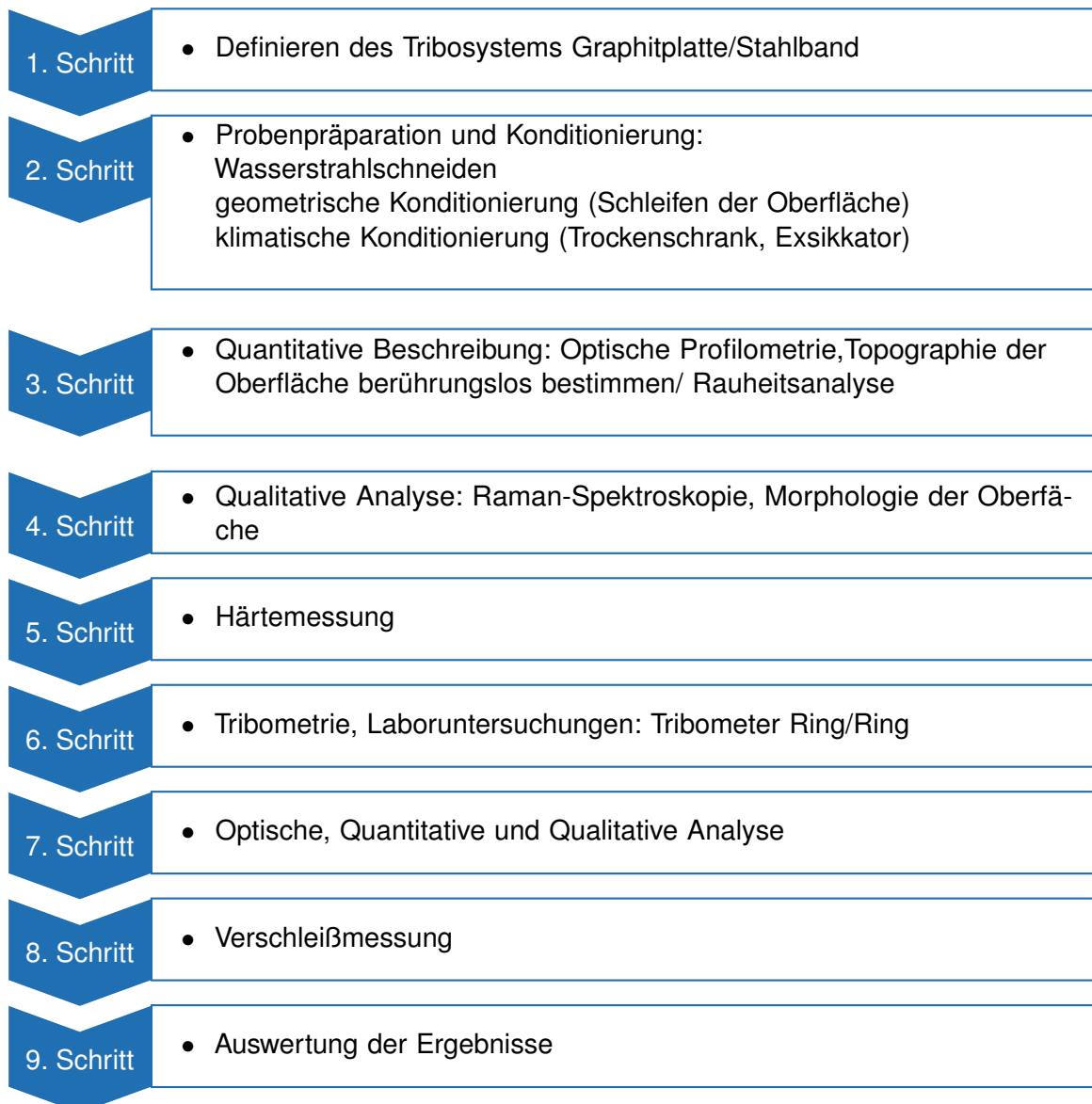
### 3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die Diplomarbeit gliedert sich in Theorie- und Praxisteil. Dabei widmet sich der erste Teil der terminologischen Klärung der in der Arbeit verwendeten Begriffe, zielgerichtet auf das Tribosystem und die Kontaktverhältnisse und die vorhandenen Messmethoden. Im Fokus des Kapitels "Theoretische Grundlagen" stehen die wesentlichen Eigenschaften, Wechselwirkungen und Struktur des tribologischen Systems und dessen Elemente. Die beschriebenen Prinzipien erscheinen als Basis der weiteren Überlegungen über die Reibung und den Verschleiß in Labor- und Betriebsbedingungen.

Darauf aufbauend, werden im Praxisteil tribologische Experimente bei geregelten Umgebungsbedingungen - kontrollierte Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Druck und Geschwindigkeit, durchgeführt und protokolliert. Zuerst wird eine optische Analyse und Charakterisierung der Ausgangsmaterialien-Graphit und Stahlmaterial mittels Lichtmikroskopie durchgeführt. Die tribologischen Untersuchungen werden in Laborbedingungen auf einem Ring/Ring-Tribometer in einem geschlossenen Tribosystem durchgeführt und dienen zur Überprüfung der Versuche einer Testanlage (offenes System) bei unkontrollierter Luftfeuchtigkeit und anderen Bewegungskinematik. Obwohl die beiden Systeme sich unterscheiden, soll die Funktion und die Kraftübertragung ähnlich erfolgen. Um die Veränderung der Gleitprobekörper zu erfassen und vollständig zu dokumentieren, werden die Proben vor und nach den Versuchen gemessen.

Die quantitative Analyse beschränkt sich dabei auf die Oberflächenuntersuchung und Messung der Rauheiten mittels optischer Profilometrie, basierend auf dem konfokalen Messprinzip. Die Härte des Werkstoffs wird mittels Härteprüfung nach Brinell bestimmt. Danach wird der Zustand des Graphits im Hinblick auf den Defektindex erfasst. Anhand der sich bewährten Methode für strukturelle Charakterisierung für kohlenstoffhaltige Stoffe - Raman-Spektroskopie werden die Graphitplatten (lateral) qualitativ untersucht. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nach Datenbanken und Softwarepaketen. Eine Verschleißmessung der Proben mittels drei unterschiedlichen Methoden ist der nächste Schritt bei der Analyse des Graphitverhaltens.

Anschließend werden die Messungen aus den Laborversuchen ausgewertet, die relevantesten Erkenntnisse über das Tribosystem aus den resultierenden Ergebnissen identifiziert und als mögliche Lösungen für eine reale Betriebssituation aufgeführt.

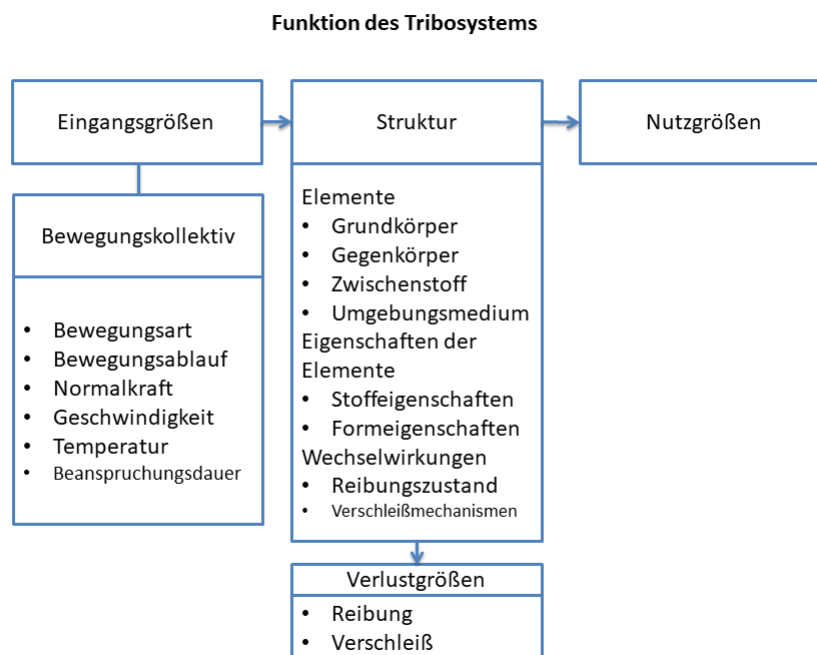
**Abb. I.1:** Vorgehensweise

# Kapitel II

## Theoretische Grundlagen

### 1 Das Tribosystem

Die Frage nach dem Reibungskoeffizienten des Materials kann nicht eindeutig beantwortet werden, weil die Reibung keine Materialeigenschaft ist, sondern eine Systemeigenschaft [11]. Dabei spielen viele Einflussfaktoren eine Rolle und wirken innerhalb vom tribologischen System zusammen. Was ist ein Tribosystem aus Sicht der Forschung und welche Variablen haben Einfluss auf dieses System wird in diesem Kapitel genauer erläutert.



**Abb. II.1:** Schematische Darstellung des tribologischen System nach Grote u. a. [85]

#### 1.1 Tribosystem- Analyse (TSA)

Nach Blau [24] ist die Tribosystem-Analyse ein Mittel, um die Betriebsbedingungen eines realen Systems leichter zu bestimmen, mit dem Ziel eine genauere Systemsimulation zu er-

möglichen. Dazu gehört eine übergreifende systematische Analyse der Betriebsumgebung der Reib-Komponenten, wobei jeder Aspekt berücksichtigt werden soll [17].

Die Problemanalyse geht den folgenden Fragen nach [24]:

1. Welche sind die physikalischen Eigenschaften des Tribosystems?
2. Ist es ein offenes oder geschlossenes Tribosystem?
3. Welche Form(en) von Reibung oder Verschleiß sind vorhanden?
4. Welche quantitativen Maßnahmen gibt es, um das Verhalten der Materialien in der vorhandenen Situation zu beschreiben?
5. Welche Materialien oder Schmierstoffe werden derzeit für diese Anwendung in Betracht gezogen?
6. Welche Zeit und Ressourcen stehen zur Verfügung, um das aktuelle Problem zu lösen?

Das Beantworten dieser sechs Fragen bringt Klarheit und könnte bei der Festlegung der Vorgehensweise und bei der Planung der Beseitigung des Problems hilfreich sein. Um Antworten auf diese Fragen geben zu können, werden zunächst die Parameter, die das System definieren, genauer erläutert:

## 1.2 Systembeanspruchung/Eingangsgrößen

Im Folgenden sind die Eingangsgrößen oder die sogenannten "operativen" Größen eines Tribosystems anzusehen, in dem die Einflussparameter Belastung, Bewegung und Temperatur maßgebend für das Beanspruchungskollektiv sind. Die bestimmten Eingangsgrößen werden transformiert und auf dieser Weise wird die Funktion des Tribosystems realisiert.[46]

### 1.2.1 Belastung

Die Belastung als Eingangsgröße kann statisch, dynamisch, intermittierend oder stoßartig auftreten. Dabei sind die Höhe, die Richtung und der zeitlicher Ablauf (konstant, periodisch, unregelmäßig) der Normalkraft zu definieren.[46]

Es sollte auch nicht unerwähnt bleiben, dass bei höherer Belastung eine elastisch-plastische Deformation der Mikroerhebungen auftritt, wobei eine Vergrößerung der wahren Kontaktfläche beobachtet wird. Die nominelle Flächenpressung bleibt dabei konstant [207, S. 8]. Die Unterschiede in der Kontaktfläche und das Coulomb'sche Gesetz werden in Kapitel 2.2 näher erläutert.

In dem Kontakt Stahlband-Graphitplatte ist der Verlauf der Belastung von großer Bedeutung. Die Kontaktpressung im System wird in einer Abhängigkeit von der Kontaktfläche bestimmt und über die Rauheit eingestellt. Der Druck beträgt 2 bar ( $F/A$  (bezogen auf die geometrische Berührfläche)) bei einem konstanten zeitlichen Ablauf.



### 1.2.2 Bewegung

Die Bewegungsart (Gleiten, Rollen, Wälzen, Stoßen, Oszillieren, Strömen), sowie die Beanspruchungsdauer (konstant, kontinuierlich, periodisch, reversierend) resultieren in verschiedenen Effekten wie Makro- und Mikroschlupf, partielles Gleiten u.a.[46] Wichtig dabei ist, dass laut des Coulomb'schen Gesetzes für Festkörperreibung die Reibung bei Gleitbewegungen im Allgemeinen nicht von der Geschwindigkeit abhängt [207, S. 7].

Im vorhandenen tribologischen System ist eine gleitende Bewegung des Stahlbandes gegenüber der befestigten Gleitplatte unter einem konstanten zeitlichen Ablauf zu beobachten.

### 1.2.3 Temperatur

Die Temperatur spielt eine wesentliche Rolle für das Verhalten des Systems. Dabei bewirkt die Temperaturerhöhung bei einer vorhandenen Relativbewegung den Verschleiß zwischen den Reibpartnern. Allgemein kann in Umgebungstemperatur, Reibungswärme, Blitztemperatur und Fremderwärmung unterschieden werden. Der zeitliche Ablauf der Beanspruchung, der konstant, periodisch oder unregelmäßig sein kann, ist nicht zu unterschätzen. [46]

Der betrachtete Temperaturbereich in der vorliegenden Arbeit beträgt Werte von ungefähr 20 °C Raumtemperatur bis 400 °C im Betriebsbedingungen. Dabei besteht aber ein wesentlicher Unterschied zwischen den direkt an der Gleitplatte gemessenen Temperaturen und diesen von dem Umgebungsmedium.

Hier sei noch einmal hervorgehoben, dass die Umgebungstemperatur die Temperatur der Raumtemperatur ist, und sich von der im Reibkontakt bildenden Reibungswärme unterscheidet. Es ist dabei zwischen Eigenerwärmung und Fremderwärmung zu unterscheiden. Unter Eigenerwärmung versteht man die Erwärmung des Materials aufgrund der Reibung, welche vor allem bei niedrigen Betriebstemperaturen einen wesentlichen Einfluss auf das System hat [116, S. 148]. Mit Fremderwärmung bezeichnet man die Beeinflussung des Werkstoffverhaltens durch Temperaturregelung mittels zusätzlicher Wärmequelle von außen [178]. Die Wechselwirkung zwischen Freisetzung der Reibungsenergie und thermischer Dehnung führt zur thermomechanischen Instabilitäten wie Popov [180] in seinem Buch „Kontaktmechanik und Reibung“ erklärt. Der Begriff Blitztemperatur definiert die örtliche Zusatz-Erwärmung, dazu führen dissipative Mikro-Kontaktprozesse [46].

## 1.3 Systemstruktur

Die Struktur der Tribosystemen besteht aus vier stofflichen Elementen - Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenkörper und Umgebungsmedium - und deren Stoff- und Formeigenschaften und Wechselwirkungen.

Bei einer Analyse des Verschleißverhaltens ist es wichtig zwischen "offenen" und "geschlossenen" Tribosystemen zu unterscheiden. Im Allgemeinen (aus Sicht der Physik) basiert die Bestimmung des Systems auf seiner Austauschbilanz mit der Umgebung [80]. Der tribologi-

sche Kontaktbereich wird mittels einer Systemgrenze von der Systemumgebung gedanklich abgeteilt [207]. Funktionsmäßig bezieht sich das Tribosystem mit einer offenen Struktur auf den Verschleiß des Grundkörpers, da im System "Werkzeug/ Werkstück" ständig neue Oberflächenbereiche des Gegenkörpers zugefügt werden, wobei der Kontakt zwischen den Oberflächen einmalig ist, beispielsweise bei den Umformungs- und Bearbeitungsvorgängen, und somit sind die Effekte auf dem Gegenkörper weniger relevant. Nach Blau [24] ist charakteristisch für die offenen Systeme, dass während des Betriebs Verunreinigungen oder chemische Stoffe in das Tribosystem eingebracht werden können. Ein geschlossenes Tribosystem ist dann zu definieren, wenn die beanspruchten Oberflächenbereiche wiederholt in Kontakt kommen oder wenn kein Stoffaustausch mit der Umgebung stattfindet. Bei einem wiederholten Kontakt zwischen den Tribopartnern ist der Verschleiß auf Grund- und Gegenkörper zu berücksichtigen, um die Funktionsfähigkeit des Systems festzustellen.[89]

In Bezug auf die verschiedenen Elemente wie Umgebungsmedium, Grund- und Gegenkörper kann das Tribosystem gleichzeitig als "offen" und "geschlossen" betrachtet werden, denn einige Systeme haben die beiden Eigenschaften [24].

### 1.3.1 Gegenkörper

Wie in [Abbildung II.1](#) gezeigt, bestimmt der Gegenkörper zusammen mit dem Grundkörper, dem Zwischenstoff, dem Umgebungsmedium und deren Wechselwirkungen und Eigenschaften die Struktur des Tribosystems. [84]

In der Oberflächentechnik wird eine Funktionstrennung zwischen der Oberfläche und dem Volumen einer Probe/ eines Bauteils gemacht. Dabei erfüllt das Volumen eine Primärfunktion und weist die folgenden Formeigenschaften auf wie Gestalt, Abmessungen, Schichtdicke u.a., sowie Stoffeigenschaften wie Härte, Festigkeit, Verformungsverhalten, Adhäsionsneigung, Gefüge u.a.

Die Oberfläche weist auch Form- und Stoffeigenschaften auf. Rauheit, Welligkeit, Traganteil, Eingriffsverhältnis u.a. sind die Formeigenschaften der Oberfläche eines Bauteils, wobei die Oberflächenbeschaffenheit im [Abschnitt 4](#) genauer behandelt wird. Die Stoffeigenschaften der Oberfläche sind Adsorption, Desorption, Reaktivität mit Additiven und Sauerstoff u.a.[207].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Charakterisierung des Grundkörpers (Gegenkörpers) durch Funktionstrennung zwischen Oberflächen- und Volumeneigenschaften erfolgt. Auf dieser Weise werden die technologischen, mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe vollständig definiert.

Es sollte auch nicht unerwähnt bleiben, dass die chemische Zusammensetzung und das Herstellungsprinzip einen Einfluss auf die Eigenschaften des Werkstoffs haben. Dabei spielen die Zusatzstoffe und Legierungselemente eine wichtige Rolle, da sie eine gewisse Wirkung haben, was zu Synergieeffekten im Bauteil führt [26]. Der Chromgehalt kann die Festigkeit, Härte, Warmfestigkeit, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit des Stahls positiv beeinflussen, aber erniedrigt gleichermaßen die Dehnung. Das Element Nickel (Ni) kann die Festigkeit, Zähigkeit, Durchhärbarkeit und Korrosionsbeständigkeit erhöhen, aber verringert die Wärmedehnung.

Das Legierungsmetall Kupfer (Cu) weist eine sehr gute Wärme- und elektrische Leitfähigkeit auf. Mit dem Titaniumzusatz (Titan als Karbidbildner) bei stabilisierten austenitischen Cr-Ni-Stähle ist eine Steigerung der Zeitstandfestigkeit zu erwarten, sowie eine Verminderung der interkristallinen Korrosion durch Bildung von TiC [103]. Es wurde festgestellt, dass umso geringer der Verschleiß ist, desto reicher ist der Stahl an Karbiden und die martensitische Grundmasse dabei bestimmt nicht den Abnutzungswiderstand [63].

Die Systemkomponente sind durch die konstruktive Gestaltung der Systemstruktur festgelegt, wobei das betreffende Bauteil und alle Systemkomponente in einer Wechselwirkung zueinander stehen. Die Systemkomponente und ihre strukturelle Einflussgrößen (Form- und Stoffeigenschaften) [207, S.5] stellen besonders wichtige Parameter dar und spielen große Rolle bei den erwarteten Reibungs- und Verschleißprozessen, die erst im [Abschnitt 3](#) genauer erläutert werden.

Neben all diesen systembedingten Faktoren sind jedoch die allgemeinen Anforderungen an die Tribo-Elemente wie der Preis der Materialien, die Verarbeitbarkeit, die technologischen Eigenschaften und nicht zuletzt die Verfügbarkeit von großer Bedeutung.

### 1.3.2 Zwischenstoff

Der Zwischenstoff ist ein weiteres Element des Tribosystems, das unter Umständen entfallen kann. Im Allgemeinen kann es Schmieröl, Schmierfett oder Festschmierstoff sein, kann aber auch aus Gasen oder Abrasivstoffe bestehen. Von besonderer Bedeutung für die vorliegende Arbeit sind die Eigenschaften der Festschmierstoffe und deren Verhalten bei Temperaturen bis 400 °C.

Der Aggregatzustand des Zwischenstoffs ist dabei besonders wichtig: fest, flüssig oder gasförmig, da die weiteren für das tribologische Verhalten wesentlichen Eigenschaften davon abhängig sind. Bei einem festen Aggregatzustand wird zwischen Form- und Stoffeigenschaften unterschieden und bei einem flüssigen und gasförmigen sind nur die Stoffeigenschaften relevant [89]. Bei Hochtemperaturanwendungen sind die flüssigen Schmierstoffe thermisch instabil und deswegen sollen die Tribosysteme "trocken" funktionieren [253].

Da die vorhandenen Betriebsbedingungen Trockenschmierung erfordern, wird das Tribosystem als ein Zwei-Körpersystem betrachtet und der Zwischenstoff wird nicht berücksichtigt. Die Verschleißschutzfunktion aufgrund des fehlenden Schmiermittels wird von dem Gegenkörper übernommen, in dem vorliegenden Fall-von der Graphitplatten als Festschmierung.

### 1.3.3 Grundkörper

Für den Grundkörper gilt die gleiche Definition wie für den Gegenkörper. Da sich der Grund- und Gegenkörperoberfläche in direkter Berührung (im ständigen Reibkontakt) befinden und nicht durch einen nichtmetallischen, flüssigen, pastösen oder gasförmigen Zwischenstoff voneinander getrennt sind, tritt Verschleiß auf. Nach einer sorgfältigen Werkstoffauswahl für die beiden

Tribo-Partner wird vorwiegend berücksichtigt, dass der Verschleiß auf dem Grundkörper stärker ist. Dies ist aus Wartungs- und Wirtschaftsgründen gezielt zu planen, so dass der Austausch verschlissener Teile nur am Gleitmodul erfolgen kann und Schäden am Edelstahlband möglichst begrenzt werden, da dies die teurere Komponente ist. Somit kann der Verschleiß beim Gegenkörper auch erwünscht sein, obwohl bei zu großem Verschleiß ist dieser Effekt nicht mehr wirtschaftlich. Solche Kombinationen werden in der Literatur als Hart-Weich-Paarungen bezeichnet - der harte Partner bleibt unbeschädigt, während der weiche verschleißt. Ab einer gewissen Temperatur ändern sich die Verschleißvorgänge, aufgrund der Änderung der Warmfestigkeit der Materialien. [222, S. 48], [46, S. 626]

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Minderung der Reibzahl im Tribo-Kontakt und einen ausreichenden Verschleißschutz des Edelstahlbandes zu erreichen. Der erwünschte Verschleißschutz ist eine der Hauptaufgaben des hierbei nicht vorhandenen Zwischenstoffs und deswegen kann diese Funktion von der Oberfläche des Gegenkörpers übernommen und erfüllt werden. Dies kann durch Anwendung von Festschmierstoffen oder tribologische Nanoskins<sup>1</sup> erreicht werden. Im Hochtemperaturbereich haben sich Lösungen wie die sogenannten "Magnéli Phasen"<sup>2</sup> als wirksam/hilfreich erwiesen, dank deren kristallographischen Scherebenen mit niedriger Scherfestigkeit und stabiles chemischen Verhaltens in Sauerstoffatmosphären [253, S. 30]. Diese Metalloxide fungieren als fester Schmierfilm [75] und sind bis 600 °C [200] beständig. Aufgrund der Werkstoffauswahl im vorliegenden Fall werden die Magnéli Phasen nicht weiter erläutert.

Trotz der Behauptung, dass der Verschleiß oft auf der weicheren Seite des Reibkontakts auftritt, wurde bewiesen, dass es zwischen Härte und Verschleiß nicht immer einen eindeutigen Zusammenhang gibt. Dies lässt sich bei Messing und Rotguss beobachten, indem durch Oxidschichtbildung der unmittelbare Kontakt der metallischen Werkstoffpaarung verhindert wird und der Verschleiß gesenkt wird [63]. Neben der Verwendung von Kupferlegierungen bei Festkörperreibung existieren weitere Möglichkeiten für Verschleißschutz im Gleitkontakt, dabei wird der Effekt der (Selbst)Schmierung von Festschmierstoffen ausgenutzt.

Aufgrund der fehlenden einheitlichen Angaben zu den Werkstoffen in den Herstellerangaben wurden die Datenblätter folgendermaßen zusammengefasst und sind im [Anhang in Tabelle VI.1](#) zu finden.

Aus den erwähnten Quellen lassen sich jedoch einige klare Beobachtungen ziehen: Aufgrund der Feuchtigkeitsabhängigkeit des Graphits ist seine Anwendung bei trockener Atmosphäre und im Vakuum nicht üblich [46]. Er ist wirksam in herkömmlichen Luftatmosphären, die Dämpfe enthalten, und bei erhöhten Temperaturen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit und aufgrund der beschränkten Ressourcen und Zeit werden die Untersuchungen nur mit den Graphitgleitkörpern aus „Graphit 4“ durchgeführt.

---

<sup>1</sup>thermo-mechanisch induzierte Ausbildung von Gleitschichten; durch Rutilbildung oder kohlenstoffhaltigen Nanokompositen [177]

<sup>2</sup>Oxiden der Elemente Molybdän, Titan, Vanadium oder Wolfram

### 1.3.4 Umgebungsmedium

Damit die tribologischen Prozesse im Gleitmodul möglichst voraussagbar sein können, ist eine richtige Festlegung des Aggregatzustandes (flüssig, gasförmig) und eine Bestimmung der Stoffeigenschaften (chemisch, physikalisch) des Umgebungsmediums notwendig. Weitere Bestimmungsfaktoren sind noch die Verträglichkeit, Feuchtigkeit u.a. Aufgrund der auftretenden chemischen Reaktionen und ihrer großen Relevanz für das Verhalten der Graphitplatten hat das Umgebungsmedium einen großen Einfluss auf das tribologische System [255].

Das reale Tribosystem im Gleitmodul ist kein isoliertes System, deswegen geht es in dem konkreten Fall um das Umgebungsmedium atmosphärische Luft. Es soll berücksichtigt werden, dass wenn das Umgebungsmedium aus einer sauerstofffreien (inerten) Atmosphäre besteht, können erhebliche Verschleißprobleme auftreten [136]<sup>3</sup>.

Dabei ist die Luftfeuchtigkeit einer der wichtigsten Faktoren für die optimale Schmierwirkung des Graphits wie im Abschnitt über die [Graphiteigenschaften](#) erwähnt.

Das System des Gleitmoduls gilt als "offen" in dem vorliegenden Fall, da dieses nicht isoliert ist und nicht von der Luftatmosphäre getrennt ist. [157, S.17].<sup>4</sup>

### 1.3.5 Systemeigenschaften: Reibung und Verschleiß (Verlustgrößen)

Der Verschleiß ist eine Konsequenz der Reibung und entsteht an den Kontaktstellen. Da die Bewegungsreibung durch den Verlust an mechanische Energie charakterisiert wird, findet eine Energieumwandlung als Folge statt. Ein Teil der Reibenergie kann als Verschleiß wirksam werden [207]. Reibung und Verschleiß erscheinen als Funktionen des Beanspruchungskollektivs und der Systemstruktur und werden als Verlustgrößen des Tribosystems definiert [211].

- Die folgenden Arten von Reibung zwischen Grund- und Gegenkörper können im System auftreten [84]:

- Rollreibung
- Wälzreibung
- Bohrreibung
- Seilreibung
- Gleitreibung
- (Haften)

Mischformen:

- Gleit-Bohrreibung
- Gleit-Rollreibung
- Roll-Bohrreibung

<sup>3</sup>Oxidschichtbildung aufgrund der Sauerstoff-Verbindungen [136].

<sup>4</sup>Solche Tribosystem werden nach Bartz u. a. [10] bezüglich der Triboelemente Grund- und Gegenkörper als "geschlossen" definiert, da die Oberflächenzonen der beiden Tribopartner wiederholt in Kontakt kommen und das Verhalten beider Partner untersucht wird.

In dem vorliegenden Fall wird hauptsächlich die Gleitreibung zwischen der Graphitplatte und dem Edelstahlband beobachtet, deswegen wird diese besondere Form der Reibung genauer erklärt. Dabei soll aber das Haften auch erwähnt werden, da dieses eine wesentliche Rolle für den Stick-Slip-Effekt hat.

Die Gleitreibung beruht auf der Beschaffenheit der Kontaktfläche der beiden Tribopartner und liegt genau dann vor, wenn diese aufeinander gleiten. Nach Czichos u. a. [46] werden bei dieser Reibungsart die größten Tribobeanspruchungen in der Kontaktzone bezüglich thermischer Vorgänge und Verschleißrate im Vergleich mit den anderen Reibungsarten beobachtet. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Spezialfall der trockenen Gleitreibung oder genauer Festkörpergleitreibung im Betracht gezogen. Im Allgemeinen ist die Festkörperreibung ein Reibungszustand und wird durch Reibung bei unmittelbarem Kontakt der Reibpartner definiert [89]. *Leonardo da Vinci* (1470) hat die ersten systematischen Studien in diesem Bereich durchgeführt. Weiters haben *Amontons* (1699) und *Coulomb* (1785) die gefundenen Zusammenhänge bestätigt und weiterentwickelt. Erst im 20. Jahrhundert haben *Kragelskij* (1939), *Bowden* (1943) u.a. festgestellt, dass die Deformation und die Adhäsion die Hauptursache für die Festkörperreibung sind [9]. In dem Fall von Festkörperreibung oder Trockenreibung in Gegenwart von Gleitbewegung sollen reibungsarme Werkstoffpaarungen verwendet werden. Die Grenzschichten, die sich an der Oberfläche der Tribopartner ausbilden, haben bestimmte Eigenschaften und Struktur, die das Reibungs- und Verschleißverhalten bei Festkörperreibung beeinflussen.

- Die folgenden Reibungszustände sind grundsätzlich zu unterscheiden:
  - Festkörperreibung
  - Grenzreibung
  - Mischreibung
  - Flüssigkeitsreibung
  - Gasreibung

Die Bereiche der Grenz-, Misch- und Flüssigkeitsreibung sind genauer in dem Stribeck-Diagramm (Professor Richard Stribeck (1861–1950)[214]) dargestellt, was aber nicht weiter betrachtet wird, aufgrund der Ölfreiheit des Systems.

Die Schmierungskonzepten werden als Konzepte zur Reibungsminderung und zum Verschleißschutz interpretiert. Da in der vorhandenen Situation keine flüssigen Schmierstoffe verwendet werden, soll ihre Funktion und Aufgaben von anderen Ersatzmechanismen übernommen werden.

Heutzutage wurde in manchen Studien bewiesen, dass die Reibungszahlen beim Trockenlauf bis auf Werte von 0,02 bis 0,03 gesenkt werden können [35]

Die Reduzierung der Trockenreibung im Gleitmodul wird in der vorliegenden Arbeit durch Festschmierstoffe und genauer mittels Graphit optimiert.

### 1.3.6 Wechselwirkungen

Es gibt zwei Gruppen von Wechselwirkungen in der realen Kontaktfläche des Tribosystems, die grundsätzlich zu unterscheiden sind - atomar/molekular und mechanisch. Diese Definition stammt von Kragelskij [125] und besagt, dass die Reibung eine „Doppelnatur“ aufweist, welche auf die vorher erwähnten Arten der Wechselwirkungen beruht – atomar wie z.B. Adhäsion oder mechanisch bei Furchung, Hysterese oder Deformation. Die Reibungsmechanismen werden genauer im [Abschnitt 3](#) betrachtet.

Nach DIN 50323 [168] treten die Grenzschichtwechselwirkungen zwischen Festkörpern, aber auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen auf, wobei es auch nicht unerwähnt bleiben sollte, dass die Grenzschichten sich nicht selten fundamental vom unveränderten Grundwerkstoff unterscheiden, da dort die Energieumsetzungsprozesse in Form von Reibung ablaufen.

Die physikalischen und chemischen Wechselwirkungen, die beim Verschleißverlauf stattfinden, sind nicht nur von den Material- und Oberflächeneigenschaften der Tribopartner abhängig, sondern von diversen Einflüssen der Kinematik der Bewegung, des Umgebungsmediums u.a.. Die verschleißführenden Wechselwirkungen zwischen den Elementen unter dem Einfluss des Beanspruchungskollektivs des Tribosystems sind von der Gesellschaft für Tribologie [225] im Arbeitsblatt 7 genauer erklärt worden, indem am relevantesten der Kontakt- (trocken, rau oder glatt u.a.) und Reibungszustand sind, sowie die Verschleißmechanismen. Dabei sind die Adhäsion, Abrasion, elastischplastische Deformation und Bruchvorgänge entscheidend für die Veränderung der Grenzschichten im Reibkontakt. [207]

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass bei den Tribowerkstoffen keine Klassifizierung nach „Verschleißfestigkeit“ existiert, weil die Verschleißkenngrößen systemabhängig sind. Außerdem sind die Oberflächenvorgänge schwierig und oftmals gar nicht möglich zu bestimmen.

Die Wechselwirkungen beim vorhandenen Tribosystem beziehen sich auf die Kombination Graphit/Stahlband im Gleitkontakt, wobei der Graphit eine Art von Spur (Transferfilm) auf dem Stahlband hinterlässt. Die Übertragung der Festschmierstoffe auf den Gegenkörper wird als Transferfilm-Ausbildung bezeichnet. Dieser Vorgang verläuft bei tribologischer Beanspruchung und führt zu einer Reduzierung der Scherkräfte und dadurch zur Verringerung der Reibwerten. [6]

## 1.4 Systemfunktion

Nach Czichos u. a. [46], sowie nach dem neuesten Stand der Technik, ist die Systemfunktion von mehreren Parametern abhängig. Die tribologischen Systeme unterscheiden sich, wobei die für den Maschinenbau oder die Feinmechanik charakteristischen tribologischen Energietransformationssysteme folgende Funktionen haben:

- Bewegungsübertragung (Führungen, Gelenke, Lager)
- Bewegungshemmung (Bremsen)
- Kraftübertragung (Kupplungen)

- Energieübertragung (Getriebe)

Es existieren auch andere Arten von tribologischen Systemen wie z. B. die informationsumsetzenden tribologischen Systeme, die bei den Speichertechnologien oder bei der Signalübertragung Anwendung finden oder die stoffumsetzenden tribologischen Systeme bei der Produktionstechnik oder im Transportwesen.

Der Hauptzweck des bestehenden tribologischen Systems ist die Fähigkeit, den Druck von den Graphitplatten auf das sich bewegende Edelstahlband zu übertragen. Die stoffumsetzende tribologische Funktion des Gleitmoduls der Doppelbandpresse wird nicht berücksichtigt, da das Tribokontakt Produkt/Edelstahlband nicht innerhalb der Systemgrenze liegt und daher nicht Gegenstand dieser wissenschaftlichen Arbeit ist.

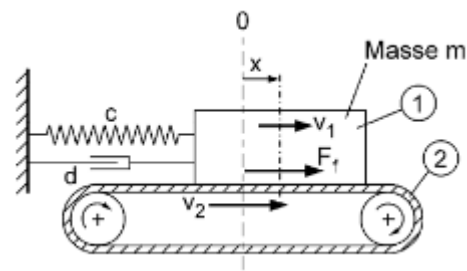
## 1.5 Unerwünschte Nebeneffekte

### Stick-Slip Effekt

Die Bezeichnung Stick-Slip-Effekt stammt aus dem Englischen und bedeutet Haft-Gleit-Effekt. Wenn der kinetische Reibungskoeffizient geringer ist als der Statische, tritt eine Stick-Slip-Bewegung auf, bei der die Gleitflächen regelmäßig zwischen Haften und Gleiten wechseln [30]. Dieses physikalische Phänomen erscheint oft aufgrund der mangelnder Schmierwirkung und tritt durch Rückgleiten zweier sich relativ zu einander bewegender Komponenten auf, was zu störenden Vibrationen führen kann. Der Übergang zwischen Haften und Gleiten löst Schwingungsimpulse aus. Somit kann das Auftreten von Geräuschen in Abhängigkeit von der Eigenresonanz der Bauteile erklärt werden. [149, 257]

Es bieten sich aktive und auch reaktive Methoden, um den Stick-Slip-Effekt zu vermeiden. Durch die reaktiven Methoden werden die Folgen beeinflusst/behandelt, wenn das Problem zu spät erkannt wird und Konzeptänderungen der Konstruktion nicht mehr möglich sind, während bei den aktiven Maßnahmen, die auch kostengünstiger sind, das Wissen über den Kontaktbereich angewendet werden als Prävention der möglichen Folgen, wobei das kritische Phänomen durch „intelligent“ Werkstoffpaarungen, durch Verringerung der Flächenpressung, durch glattere Oberflächen oder durch Wahl eines geeigneten Schmierstoffs vermieden wird. Die polaren Eigenschaften der Mehrzwecköle haben sich als eine wirksame Lösung des Problems erwiesen [239]. Da das System in der bestehenden Situation jedoch als ölfrei gilt, werden die letzterwähnten Informationen über den flüssigen Schmierstoff vernachlässigt. Es ist wichtig anzumerken, dass die Untersuchung der Stick-Slip-Effekte nicht das Ziel dieser Arbeit ist, deswegen werden nur als Nebeneffekt erwähnt.





**Abb. II.2:** Stick-Slip-Effekt, Quelle: Steinhilper u. a. [211]

## 1.6 Zusammenfassung

Die Systemstruktur beinhaltet die Systemelemente Graphitplatte und Stahlband als Grund- und Gegenkörper, keinen vorhandenen Zwischenstoff wie Wasser, Schmutz oder Schmiermittel im Idealfall und beim Band-Graphitplatte-System das Umgebungsmedium Luft. Wichtige Rolle dabei spielt das Materialverhalten und die Geometrie, sowie alle Eigenschaften und Wechselwirkungen der Systemelemente, welche für die Kontaktmechanik und für die ablaufenden Tribo-Prozesse entscheidend sind. Bei der Funktionserfüllung entstehen auch Ausgangsgrößen, die als Verlustgrößen im Rahmen dieser systemanalytischen Erklärung betrachtet werden - die Reibung und der Verschleiß. Eine detaillierte Betrachtung dieser systemabhängigen Eigenschaften erfolgt im nachfolgenden [Abschnitt 3](#).

## 2 Festschmierstoffe

Allgemein werden die Festschmierstoffe für Trockenschmierung (bei Forderung nach Ölfreiheit) unter extremen Bedingungen eingesetzt - Hoch- und Niedrigtemperaturen, Vakuum, Strahlung, hohen Kontaktdrücken [241], sowie bei niedrigen Gleitgeschwindigkeiten [155, S.25]. Feste Schmierstoffe sind dort anzuwenden, wo keine Kontamination mit flüssigen oder pastösen Schmierstoffen auftreten darf [27]. Die Verwendung erfolgt direkt als Pulver, als Zusatz in Suspensionen, in Pasten, in Schmierfetten, in Metallfilmen, in Gleitlacken oder in Reibbelägen. Die bekanntesten Vertreter der Festschmierstoffe sind Molybdändisulfid ( $MoS_2$ ), Graphit und Polytetrafluorethylen (PTFE) [250].

In dem Buch von Habig [89] hat sich die Einteilung nach den folgenden drei Gruppen bewährt: Die erste Gruppe sind Verbindungen mit Schichtgitter wie Graphit, Graphitfluorid u.a. Der Vorteil dieser Festschmierstoffe ist ihre Kristallstruktur. Die Schmierfähigkeit ist von den schwachen Bindungskräften des kristallinen Aufbaus in den Molekülgittern abhängig [241, S.143]. Die zweite Gruppe besteht aus weichen Metallverbindungen ohne Schichtgitter wie Oxide und Fluoride und die letzte Gruppe beinhaltet organische Verbindungen mit dem typischen Vertreter PTFE, inzwischen besser bekannt unter dem Handelsnamen TEFLON®. Die Festschmierstoffe eignen sich gut für Anwendungszwecke, die chemische Beständigkeit, Oxidationsbeständigkeit und günstiges Reibungsverhalten erfordern. Noch dazu können diese miteinander kombiniert oder allein verwendet werden. Zusätzlich existiert die Möglichkeit die Festschmiermittel mit viskoelastischen Flüssigkeiten zu kombinieren (wie Metallphosphaten, -boraten und -silikaten), welche die Bindungsfunktion bei Hochtemperaturen übernehmen. Durch die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten kommt es zu Synergieeffekten. Die Funktion der Festschmierstoffe hängt aber nicht nur von den gerade erwähnten Kombinationen, sondern auch von den Umgebungsbedingungen wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Strahlung und Atmosphäre ab. Es sollte auch nicht unerwähnt bleiben, dass im Betrieb die Festschmierstoffe kontinuierlich verschleifen, deswegen weisen diese eine begrenzte (von dem Schmierstoffvolumen abhängige) Lebensdauer auf [27].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Festschmierstoffe Anwendung als Reinstoffe, Verbindungen oder Gemische finden, um Reibung und Verschleiß zwischen den beiden Reibpartnern zu verringern. An das Schmiermittel wird im vorhandenen Fall als Hauptanforderung die Bedingung gestellt, dass die tribologischen Eigenschaften auch bei Temperaturen von 400 °C beibehalten werden sollen.

Im Folgenden wird die für die Anwendung in Gleitkontakt besonders wichtige Gruppe der Festschmierstoffe mit Schichtgitterstruktur behandelt.

### 2.1 Festschmierstoffe mit Schichtgitterstruktur

Aufgrund der Kristallstruktur der Festschmierstoffe mit Schichtgitter kommt es bei einer tribologischen Belastung zu einer Relativbewegung der sogenannten Basalebenen (Gleitebenen). Diese Netzebenen können aufeinander abgleiten wegen der geringen Nebervalenzkräfte [27]. Wenn

zwischen den Schichtlamellen innerhalb der Gleitebenen geringe Haftung vorhanden ist und die Kraft von der Schicht senkrecht zu ihrer Erstreckung aufgenommen wird, sind die Reibwerte und der Verschleiß in der Kontaktzone geringer, dadurch ist das Material als Festschmierstoff besser geeignet.[21]

Typische Beispiele für Werkstoffe, die zur Gruppe der Schichtgitter-Festschmierstoffe gehören sind hexagonales Bornitrid, Molybdändisulfid ( $MoS_2$ ), Graphit u.a.

Auf der Suche nach Werkstoffpaarungen mit geringer Reibung wurde im Endeffekt die Paarung Graphit/Stahl ausgewählt, deswegen wird die vorliegende Arbeit auf die Struktur und das Verhalten vom Graphit beschränkt.

## 2.2 Graphit

Aufgrund seiner Preisgünstigkeit und seinem breiten Anwendungsspektrum ist der Festschmierstoff Graphit im Vergleich mit  $MoS_2$  zu bevorzugen.

**a Aufbau des Graphits** Graphit ist modifizierter Kohlenstoff, der entweder natürlich oder synthetisch gewonnen bzw. hergestellt werden kann [82]. Das außergewöhnliche physikalische und chemische Verhalten des Graphits ergibt sich aus den einzigartigen Eigenschaften des Kohlenstoffs. Seine Verbindungen, Ketten und Netzen sind zugleich stark, flexibel und unterliegen gleichzeitig einem raschen Wandel [40]. Mit seinen vier Valenzelektronen, sechs Protonen und sechs Elektronen in der Atomhülle kann Kohlenstoff Millionen verschiedener Kombinationen von Verbindungen und Isomeren erzeugen[77] .

Im Graphit sind die einzelnen Schichten noch als Graphene bekannt und sind nur atomar dick. Diese schichtartige Struktur ist als „Deck of playing cards“ bekannt [43, S.43]. Es lassen sich zwei polytype Graphit-Strukturen unterscheiden, nämlich  $\alpha$ -Graphit (2H) und  $\beta$ -Graphit (3R). Die 2H-Modifikation des Graphits hat eine hexagonale Kristallstruktur und erfolgt in einer Zweierperiode. Während die  $\alpha$ -Graphit eine ABAB-Schichtenfolge besitzt, weist  $\beta$ -Graphit ABCABC-Stapelfolge der Schichten auf. Bei Graphit-3R ist das Kristallsystem trigonal, oder auch als rhomboedrisch bekannt. Synthetischer Graphit kristallisiert nur in der hexagonalen  $\alpha$ -Modifikation. Seine parallele Netzebenen aus Kohlenstoffatomen weisen eine hexagonale Symmetrie auf und sind durch kovalente Bindungen verankert. Im Unterschied zum synthetischen Graphit weist der natürliche Graphit bis zu 30 % rhombische  $\beta$ -Modifikation. Oberhalb von 1025 °C erfolgt eine Umwandlung vom rhomboedrischen Graphit in  $\alpha$ -Graphit [29, S.202]; [127]. Zwei Arten von künstlichen Graphit sind bekannt: Hartbrandkohle und Elektrographit, wobei der Elektrographit durch Erhitzen der Hartbrandkohle auf 2800 °C hergestellt wird. Andere Erscheinungen dieses Werkstoffs sind Ruß und Fullerene, welche als allotrope Modifikation<sup>5</sup> des Kohlenstoffs erscheinen [69].

Aufgrund seiner Schichtstruktur besitzt der Graphit starke Anisotropie der chemischen und physikalischen Eigenschaften wie z.B. der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit, Graphit

<sup>5</sup>wenn ein chemisches Element im gleichen Aggregatzustand in zwei oder mehr Strukturformen auftritt [187]

zeigt auch geringere Härte, die seine Schmiereigenschaften erklärt. Das Kohlenstoff-Atom des Graphits weist einen  $sp^2$ -Hybridisierungszustand auf, dadurch wird die Beweglichkeit der Elektronen bewirkt (delokalisierte p-Elektronen), was die elektrische Leitfähigkeit und den metallischen Glanz des Werkstoffs positiv beeinflusst [69]. Wegen der starken metallischen Bindungen und der Freibeweglichkeit der Elektronen innerhalb der Schicht fließt der elektrische Strom entlang der Basalebene (Graphenebenen). Die schwachen Van-der-Waals-Anziehungskräfte sind hingegen der Grund, warum Graphit senkrecht zu den Schichten eine isolierende Wirkung aufweist. Bei Kristallanisotropie werden in jede Richtung verschiedene mechanische Eigenschaften gemessen, deswegen existieren für die technische Anwendung günstige und ungünstige Orientierungen im Werkstoff zur Richtung der Beanspruchung [104]. Deswegen besitzen die technischen Graphite eine nahezu homogene elektrische und thermische Leitfähigkeit und isotrope mechanische Eigenschaften, da die ungeordneten Bereiche des Graphit isotrop sind [131].

Wegen seiner geringen Härte wird der Graphit in Schmiermittel eingesetzt [33]. Die miteinander über schwache Van-der-Waals-Kräfte verbundenen Gleitebenen führen zur einer Relativverschiebung der Basalebene, wie vorher erwähnt, welche seine guten Schmiereigenschaften bewirkt. Die Struktur des Graphits ist nicht der einzige Faktor, der für die Schmierwirkung bestimmend ist, sondern auch der Einfluss des Umgebungsmediums, hauptsächlich der Feuchtigkeit, sonst kommt die Schmierfähigkeit praktisch zum Erliegen [52, 201].

**b Tribologische Eigenschaften des Graphits** Die Wechselwirkungen mit der Umgebung, sowie der gleitenden Gegenkörper und die Graphitform (Pulver, dünne Schicht, Reinheit und Kristallordnung) haben einen großen Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften des Graphits. Die Luftfeuchtigkeit ist von besonderer Bedeutung für das optimale Tribo-Verhalten des Werkstoffs. Nach El Mansori u. a. [62] wurde es gezeigt, dass, wenn Metall auf Graphit in Luftumgebung gleitet, wird der Graphit auf die Metalloberfläche übertragen, während im Vakuum Metall auf die Graphitoberfläche übertragen wird, wobei Reibungswerte höher als 0,8 registriert wurden [31, 194]. Bei Hochtemperaturanwendungen existiert die Gefahr, dass die im Graphitgitter kondensierten Gase verdampfen und somit verliert der Graphit seine Schmierwirkung [235]. Die kondensierbaren Substanzen (Wasserdampf  $H_2O$ ,  $O_2$  u.a.) werden zwischen den Schichten vom Graphit-Gitter eingelagert, wobei der Abstand zwischen den Kohlenstoffschichten, der in der Regel 0,335 nm [131] beträgt, unverändert bleibt. Dies haben die Röntgenbeugungsergebnisse von Yen u. a. [256] gezeigt und genauer, dass sich innerhalb der Grenzen der experimentellen Fehler keine Änderung des Abstands der Zwischenschicht von Graphitbasalebene in der Nähe der Oberfläche ergibt, wenn die entgaste Graphitprobe der Luftfeuchtigkeit der Umgebung ausgesetzt ist. Aufgrund ihrer Experimente stellen die Forscher fest, dass nur sehr geringe Menge an Wasser zwischen die obersten Graphenebenen eindringen kann (höchstens 5 % einer Monolage). Das könnte aber nicht eindeutig bestätigen, dass der Graphit ein gutes Schmiermittel ist. Die Analyse ergibt aber auch, dass sich ein dünner Wasserfilm auf der Oberfläche des Graphitkristalls legt, was der Grund für die Schmiereigenschaften des Graphits sein könnte.

Die Experimente von Bowden u. a. [31] zeigten, dass eine Metalloxidschicht dazu neigt, den übertragenen Graphit an das Metall zu binden, was zu einem glatten Transferfilm führt. Diese Beobachtungen sprechen dafür, dass die geringe Reibung nur dann erhalten sein kann, wenn Graphit über Graphit gleitet (siehe „Superlubrizität“).

In anderer Atmosphäre kann es zu unerwünschten Effekten kommen, wie zum einen raschen Anstieg des Reibwerts und des Verschleißes, was beim Einsatz des Graphits in Argon- oder Stickstoff-Atmosphäre von Bobzin [27, S. 55] beobachtet wurde. Daraus kann man folgern, dass nicht nur der Aufbau, aber auch die Umgebungsatmosphäre einen großen Einfluss auf die Schmierwirkung des Graphits hat. [21, 27]

In der Literatur sind verschiedene Informationen über die kritische Temperatur, die wesentliche Bedeutung für das tribologische Verhalten des Graphits hat, angegeben. Laut Bobzin [27] kann der Graphit temperaturbeständig an Luft bis max. 500 °C sein. Bartz u. a. [10] behaupten, dass der Graphit bei einer Temperatur von über 450 °C sehr leicht zu Kohlenoxid oder Kohlendioxid verbrennen kann und folglich seine Schmierwirkung verlieren kann. Laut Franke [71] kann der Graphit bis ungefähr  $T = 400$  °C als Festschmierstoff benutzt werden. Niemann [161] stellt die Variante dar, Graphit bei geringen Geschwindigkeiten oder bei Temperaturen bis 300 °C als Trockenschmiermittel anzuwenden, wenn die anderen Schmierstoffe versagen oder wenn eine absolute Ölfreiheit gefordert wird. Wie Lancaster [138] mittels seiner Ring/Block-Experimente zeigt, ist die Temperatur des Reibkontakts, bei welcher eine wesentliche Zunahme der Reibzahl und des Verschleißes stattfindet, ungefähr im Bereich 150-180 °C [235, S. 39]. Aufgrund der unterschiedlichen Annahmen, werden Experimenten mit Variation der Umgebungstemperatur durchgeführt, die ausführlich im [Kapitel III](#) beschrieben werden.

Wenn in trockener Atmosphäre der Einsatz von Graphit unmöglich ist, bietet sich die synthetische Methode der Fluorierung an [17]. Der Graphitfluorid weist eine  $sp^3$ -Hybridisierung der Kohlenstoffatome auf [235, S. 46]. Durch die Graphitfluorierung erhöht sich der Abstand der Kohlenstoffatome zueinander (580 – 615 pm), somit werden die Eigenschaften des Stoffs weniger umgebungsabhängig. Dies liefert eine verbesserte Schmierung bei trockener Umgebung und Temperatur bis 480 °C und einen Reibwert von ungefähr 0,1 [27]. Obwohl laut Bartz u. a. [10] die Schmierfähigkeit des fluorierten Graphits nur bis 400 °C ist, weil es sich ab 420 °C zu fluorierten Kohlenstoffverbindungen und zu Kohlenstoff zersetzt. Laut anderer Quellen findet der Beginn der Zersetzung erst ab 600 °C statt [236]. Der Nachteil der Graphitfluorierung ist der hohe Preis.

Das Verschleiß- und Reibverhalten der Graphitoberfläche sind Funktionen der folgenden Haupteinflussfaktoren [235, S. 38]:

- Temperatur
- Geschwindigkeit
- Belastung
- Umgebungsmedium
- Oberflächenrauigkeit
- Filmbildung

- Kontaktfläche

Wichtig zu erwähnen ist, dass die Graphit- Schmierschicht sich leichter auf der Gleitoberfläche bilden kann, wenn die Geschwindigkeit niedriger ist als der kritische Wert [144]. Aufgrund des Einflusses dieser Faktoren auf der Graphitoberfläche werden verschiedene Auswirkungen/Effekte beobachtet:

**c Herstellungsverfahren, Graphitbearbeitung** Durch die Bearbeitung des Graphits werden Eigenschaften wie Selbstschmierung, Wasserresistenz (keine Aufnahme von Feuchtigkeit) und ein homogenes Gefüge erreicht. Die fehlende Verformung (keine Schrumpf- oder Platzgefahr), Korrosions- und die Hochtemperaturbeständigkeit und leichte Bearbeitbarkeit sind weitere Vorteile des Graphits [14].

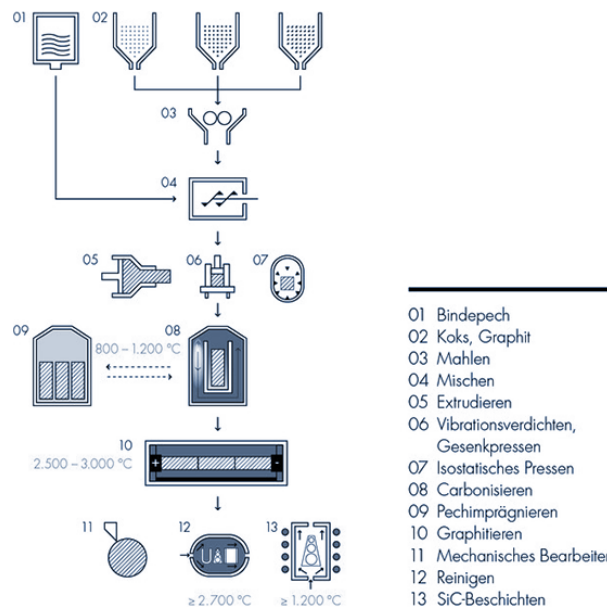
Der Herstellungsprozess des Graphits wird in mehreren Schritten durchgeführt, wie z.B. Materialaufbereitung, Formen, Sintern und schließlich Graphitbildung. Der Teersplitt, Ruß, Naturgraphit und Graphitabfälle werden vermischt und nach Korngröße sortiert. Die unterschiedliche Produktionsarten vom feinkornigen Graphit unterscheiden sich nach Formgebungsprozess :

**Extrusion** Mittels dieses Verfahrens wird die dickflüssige Masse aus Naturgraphit und Zusätze durch die Öffnung einer Matrize in der Kokille gepresst. Dadurch werden unterschiedliche Formen und Größen mit konstantem Querschnitt gefertigt. Ein Merkmal der extrudierten Graphitwerkstoffe ist, dass diese Isotropie aufweisen- die Eigenschaften sind richtungsabhängig. [228]

**Gesenkpressen** Bei diesem Fertigungsverfahren wird der Werkstoff durch Aufeinanderpressen zweier Gesenke formiert. Die Einwirkung des auf den Werkstoff einwirkenden hohen Druckes macht das Pressstück vollständig dicht.[39]

**Vibrationsverdichten** Dieses diskontinuierliche Formgebungsverfahren für großformatige Produkte. Die pastöse Masse wird in eine Form gefüllt und mit einer Schwermetallplatte überzogen. Anschließend wird das Material durch Rütteln der Form verdichtet. Die Formkörper weisen im Vergleich zu extrudierten Werkstoffen eine höhere Isotropie auf.

**isostatisches Pressen** Durch diese Pulververdichtungsmethode werden Materialien mit gleichmäßiger anisotropen Struktur hergestellt. Ein flexiblen Form wird in ein unter Druck stehendes flüssiges Medium eingetaucht. Durch die aus mehreren Richtungen ausgeübte identische Druckbeanspruchung und bei Raumtemperatur wird der Prozessablauf durchgeführt. Vorteilhaft ist die höhere Volumendichte, isotropes Eigenschaftsprofil, geringere Porosität und eine höhere Festigkeit.[202, 242]



**Abb. II.3:** Herstellung von Feinkorngraphit [202]

Nachdem folgt Pechimpregnieren, Sintern(Karbonisieren bei 1000 °C,folgt Porenbildung) und Graphitieren (bei 3000°C, Bindematerialreste werden beseitigt,amorpher Kohlenstoff wird zum polykristallinen Graphit umgewandelt ). [242]

#### d Effekte und weitere Eigenschaften des Graphits

**Dusting** Eine kontinuierliche Zunahme des Reibwerts wird bei Erhöhung der Temperatur der Umgebungsatmosphäre in einem bestimmten (Temperatur)Bereich beobachtet. Dieser Bereich der Erhöhung der Reibung und auch des Verschleißes ist als *Dusting* bekannt[205]. Lancaster u. a. [136] widmen sich der Untersuchung von Graphiteigenschaften unter der Berücksichtigung der vorher erwähnten Einflussfaktoren: Belastung, Gleitgeschwindigkeit und Temperatur. Aufgrund der durchgeführten Messungen machen die Forscher die folgenden wichtigen Schlussfolgerungen: Der Beginn von *Dusting* (Staubbildung) in einer Vielzahl von Gasen und Dämpfen wird durch das Erreichen einer kritischen Temperatur an den Rauheitsspitzen der Kontaktzone eingeleitet. Die Faktoren - Last, Geschwindigkeit und Umgebungstemperatur - sind nur insoweit wichtig, als sie diese Temperatur beeinflussen. Die Höhe der kritischen Kontakttemperatur hängt auch von der Art des Dampfes und dessen Partialdruck ab. Bei Versuchen mit n-Paraffinen und Alkoholen steigt die Temperatur mit der Molekülgröße (Kettenlänge) und mit dem Druck an. Es wird behauptet, dass adsorbierter Dampf auf den Basalebene als ein "Reservoir" fungiert, von dem Moleküle wandern, um frisch exponierte Randstellen während des normalen, verschleißarmen Bereichs zu neutralisieren. Der Übergang zu *Dusting* tritt auf, wenn die Grundflächenabdeckung unter einen kritischen Wert fällt. Diese Ergebnisse stimmen im Allgemeinen

mit den früheren Messungen über Dusting von Graphit gegen Kupfer von H. Savage [88] überein, wobei der „Verschleißstaub„ von ungeschmiertem Graphit bei Raumtemperatur eine einzigartige Adsorptionskraft zeigte.

Nach Bartz u. a. [10] schmiert Graphit sehr gut in feuchter Luft sowie in CO<sub>2</sub>-Atmosphäre. Dies erfolgt aber bis zu einer kritischen Temperatur, oberhalb derer die Versorgung mit adsorbierten Gasmolekülen, die auch den Gleitfilm auf der Graphenebenen bilden, ungenügend erscheint und folglich steigt der Verschleiß. Bei der Überschreitung der kritischen Temperatur hat die Oberflächenrauigkeit eine wesentliche Rolle und nicht nur die vorhandene Umgebungstemperatur, Relativgeschwindigkeit und Belastung [27, 235].

**Moiré-Streifen** Die verkippten Stapel überlagern sich und erzeugen Moiré-Streifen (Moiré-Effekt bei Überlagerung zweier Punktmuster gleicher Teilung, gegeneinander verdreht)[147]

**Superlubrizität (Supraschmierfähigkeit, strukturelle Lubrizität)** ist ein Bewegungsregime des Graphits, in dem die Reibung (fast) verschwindet und eine infinitesimale Kraft genügend ist, um den Körper in Bewegung zu setzen. Dieses Phänomen ist noch als Supergleiten (eng. Superlubricity nach Hirano u. a. [98]) bekannt und beruht auf dem "atomar dichten" trockenen Gleitkontakt<sup>6</sup> zwischen zwei Oberflächen mit kristalliner Struktur oder einfacher: zwei periodische Oberflächen, die verschiedene Gitterperioden aufweisen, wobei dies nicht nur für kristalline Oberflächen gilt, sondern auch für makroskopisch strukturierte Flächen (z.B. Gummisohle gegen Stahlplatte) [180]. Für die Tribopaarung Graphit gegen Graphit wurde dieser Effekt von Dienwiebel u. a. [52] nachgewiesen. Wichtig ist die elastische Stabilität im Kontakt. Es lässt sich noch erwähnen, dass bei Superlubrizität kein Haften auftritt. Das Besondere bei dieser Art von Gleiten ist die makroskopische Energieerhaltung<sup>7</sup> des Körpers. Wenn der Reibkoeffizient mit der Vergrößerung der realen Kontaktfläche verschwindet, bedeutet das, dass der Kontakt superlubrisch<sup>8</sup> ist [159]. Damit ein System als superlubrisch bezeichnet wird, gibt es aber auch weitere Anforderungen: Nach Erdemir u. a. [64] werden hohe Härte und niedrige Kontaktdrücke verlangt. Dieses Phänomen kann leider nicht in Betriebsbedingungen beobachtet werden, weil die Oberflächen nicht perfekt sauber sind. Dabei sollen keine Oberflächenverunreinigungen, Kaltverschweißen oder chemische Reaktionen zwischen den Reibpartnern vorhanden sein. Noch dazu konnte dieser Effekt für größere Kontaktflächen (im Nano- oder Mikrobereich) nicht bestätigt werden. [101, 191]

**Strukturierung der Oberfläche** Unterschiedliche Studien [183, 220, 258] zeigen, dass die mit Hilfe vom Laser strukturierten Oberflächen in magnetischen Speichermedien bessere

<sup>6</sup>auch inkommensurabler Gleitkontakt [158], Inkommensurabilität in einem Kristallgitter tritt bei Festkörpern dann auf, wenn Periodenlängen der Wechsekwirkungen unterschiedlich sind. Die irrationale Periodenverhältnisse sind inkommensurabel

<sup>7</sup>Die Bewegung verursacht aber Änderungen in den niedrig- und hochenergetischen Stellen, die zu einer anderen Verteilung der Atome führen

<sup>8</sup>Nach der Entdeckung von Hirano u. a. [98] wurden viele typischen Materialien mit Superschmiereigenschaften wie Graphit, DLC, Fullerenartigem Kohlenstoff, MoS<sub>2</sub> und Graphen gefunden.[254]



Eigenschaften aufweisen, wenn es um Trockenreibung geht. So können die Kontaktfläche und die resultierenden Reibungseigenschaften gezielt durch Laserstrukturierung beeinflusst werden. Daraus folgt eine Optimierung der Reibwerte unter trockener Reibung. Die Verringerung der Kontaktfläche führt zur einer Reduktion der Adhäsion. Die Verschleißpartikel werden in den Kanälen (Riefen) der eingebrachten Strukturgeometrie gespeichert und die Reibwerte werden von der relativen Orientierung der Oberflächen zueinander beeinflusst, dadurch wird der Reibanisotropie-Phänomen beobachtet [41].

**Transferfilm** Der Kohlenstoffgraphit verschleißt nicht nur durch Adhäsion sondern auch durch Abrasion. Da der Gegengleitpartner eine höhere Härte aufweist, wird den Materialabtrag infolge des Gleitens des Graphits auf das härtere Gegenkörper übertragen. Dies ermöglicht die Schmierfunktion des Graphits. Dabei spielt die Rauheit des Gegengleitpartners eine wesentliche Rolle für die Verschleissgeschwindigkeit des Graphits und für die Bildung des Transferfilms. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist eine Graphit-Graphit-Tribo-Paarung mit minimalem Verschleiß (erst nach dem Einlaufen) und Erneuerung des Transferfilmes. [81, S. 119]

Es ist aber zu betonen, dass nach El Mansori u. a. [62], wenn Metall in Luftatmosphäre auf Graphit gleitet, der Graphit auf die Metalloberfläche übertragen wird, während im Vakuum Metall auf die Graphitoberfläche übertragen wird. Eine Metalloxidschicht bindet den übertragenen Graphit an das Metall und dies führt zu einem glatten Transferfilm.

**Umwandlung von Graphit** Die Umwandlung von Graphit- in Diamantstruktur kann bei etwa 1500-2000 °C und 70-120 kbar unter Luftausschluss erfolgen und durch die Anwesenheit eines metallischen Katalysators<sup>9</sup> unterstützt (beschleunigt) werden [83].

Nach den technischen Angaben der Katalogen für *Kohlenstoff-Graphit-Produkte* [124] charakterisieren sich die Graphiterzeugnisse durch eine "hervorragende Selbstschmierung", gute Stabilität über einen großen Temperaturbereich, Elastizität, Kompressions-Rückfederungseigenschaften, hervorragende chemische Beständigkeit, exzellente Wärme- und elektrische Leitfähigkeit, sowie herausragende Wärme- und chemische Beständigkeit. Dabei sind praktisch unveränderbaren Gleiteigenschaften vorhanden. Ob das tatsächlich so ist, wird sich durch die Versuche im [Kapitel III](#) zeigen.

---

<sup>9</sup>Mitwirkung geschmolzener Metalle/ Übergangsmetall-Katalysatoren wie Fe, Co, Ni, Mn, Pt u.a. bzw.

## 3 Reibung und Verschleiß

Die Reibung und der Verschleiß sind Verlustgrößen im tribologischen System, wobei diese, wie schon vorher angesprochen, keine Werkstoffeigenschaften sind, sondern Systemeigenschaften und nicht obligatorisch verkoppelt. Im Allgemeinen wird angenommen, dass der Verschleiß eine Konsequenz der Reibung ist und als Folge der Kontaktberührung betrachtet wird, da dieser an der Kontaktstellen entsteht. Die beiden Erscheinungen werden schlussendlich als Funktion des Beanspruchungskollektivs und der Systemstruktur betrachtet [207].

### 3.1 Kontaktbedingungen und die Reibung

Die Reibung ist ein sehr komplexer Prozess, der in drei Phasen der Energieumwandlung eingeteilt werden kann und nämlich Energieeinleitung, Energieumsetzung und Energiedissipation [46]. Nach Philippovich [179] wird die Reibungskraft als Bewegungswiderstand und die Reibung als Erscheinung und eine skalenabhängige Systemeigenschaft definiert.

Mit der Definition von belastbaren quantitativen Reibungsgesetzen des französischen Physikers *Guillaume Amontons* (1663–1705) wurde die Basis des empirischen Verständnisses der Tribologie gelegt, obwohl der eigentliche Entdecker, der die erste systematische Studie der Reibung in seinem Codex-Madrid I (1495) dokumentiert hat, *Leonardo da Vinci* (1452–1519) war [23, 180]:

1. Gesetz:

Die Reibungskraft ist proportional der angelegten Normalkraft  $N$  (Anpresskraft) zwischen den Reibflächen.

$$F_R = \mu \cdot N \quad (II.1)$$

$\mu$  - Proportionalitätsfaktor, bekannt als Reibungskoeffizient

$F_R$  - Reibungskraft

$N$  - Normalkraft =  $m \cdot g$

Der Reibungskoeffizient sei proportional der Normalkraft. Dieser linearen Zusammenhang zwischen der Reibungskraft und der Belastung ist nur in einem bestimmten Kraftbereich gültig, wenn die Normalkräfte nicht zu klein und nicht zu groß sind [180, S. 142].

Zu beachten ist, dass das erste Gesetz (Amontons'sches Gesetz) das Verhalten der meisten Metalle (im ungeschmierten und geschmierten Zustand) beschreibt, jedoch nicht das Verhalten

der Mehrheit der Polymere, Glasperlen [227, S. A45], Fette, weichen Metalle wie Indium und Blei<sup>10</sup> und folglich auch Festschmierstoffe<sup>11</sup>. [30]

Die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Anpresskraft ist ungünstig im Fall, dass die reale Kontaktfläche vergleichbar mit der geometrischer Kontaktfläche wird [180]. Infolgedessen gilt dann das Amontons'sche Gesetz nicht, weil die Reibungszahl mit der zunehmenden Belastung abnimmt und keine Proportionalität der Reibungskraft zur Normalkraft mehr herrscht. Nach Bowden u. a. [30, S. 120] bleiben die Oberflächen der Kontaktpartner nach Verminderung der aufgebrachtten Belastung aneinander haften. Trotz der fehlenden Anpresskraft bleibt die Tangentialkraft, die zum Weitergleiten notwendig ist, groß. Die Forscher beschreiben zwei Fälle, wo diese Zusammenhänge beobachtet werden:

- Bei einer Verhinderung der Ausdehnung der Berührungsfläche im Verhältnis zur Erhöhung der Normalkraft
  - Bei dünnen festen metallischen Schichten (künstliche Methode)
  - Bei Oxidfilmen (ähnlicher Effekt)
- Beim Gleiten weicher Metalle auf harten Metall

Die Beziehung zwischen dem Reibkoeffizienten  $\mu$  und der Belastung ist gegeben durch [16, S. 209]:

$$\mu = k \cdot W^{-1/3} \quad (\text{II.2})$$

W - Anpresskraft

k- Konstante

Dabei ist diese Relation mit dem Hertz'schen Kontaktmodell<sup>12</sup> übereinstimmend [59, 65]. Die Potenz mit einer Größe von minus 1/3 beruht auf dem Adhäsionsmechanismus. In der Kontaktstelle tritt elastische Deformation auf. Die im Gleitkontakt entstehende Reibungsenergie wird durch Scherung an der Grenzfläche abgebaut. Im Gegenteil zu dem elastischen Kontakt, steigt beim plastischen Kontakt der Reibungskoeffizient mit der zunehmenden Belastung an. Beim elastischen Kontakt wird das genaue entgegengesetzte Reibungsverhalten beobachtet. Zum Beispiel wird im Kunststoffkontakt Reibungsenergie während des Gleitens durch Abscheren an der Grenzfläche und durch plastische Verformung des weichen Materials abgeleitet [153]. Dieses last-/ kontaktdruckabhängige Reibungsverhalten ermöglicht die Ableitung des Reibungskoeffizienten direkt aus dem Konstruktionskonzept (z. B. die Konstruktionsparameter der Komponenten). Dadurch kann ein besseres Verständnis der mechanischen Faktoren (z.B.

<sup>10</sup>Nach Bowden u. a. [30, S. 120] versagt das Amontons'sche Gesetz "durch die Anwendung dünner metallischen Schichten..beim Gleiten weicher Metalle wie Indium oder Blei auf einem harten Metall..."

<sup>11</sup>Das Reibungsverhalten aller diesen Werkstoffe kann auf ähnlichen Prinzipien basieren, aber die Schmierwirkung der Festschmierstoffe unterscheidet sich dabei grundsätzlich von der Schmierwirkung der fluidischen Schmierstoffen und pastösen Schmierstoffen

<sup>12</sup>Heinrich Hertz untersuchte im Jahr 1882 das Problem der klassischen Kontaktmechanik des Kontaktes zwischen zwei elastischen Körpern mit gekrümmten Oberflächen.

Belastung), die die Reibung steuern, ermittelt werden, um die Wirkung von Festschmierstoffen zu verbessern.[154]

Nach Miyoshi [154] existieren ähnliche elastischen Kontakt- und Reibungseigenschaften für das  $MoS_x$ -Film/Edelstahl-System, für Polymere [31, 32], Diamant [31] und Keramiken [152] sowie für Festschmierstoffe, dünne Metallschichten[31] wie Sputter Molybdändisulfid- und Ionenstrahl-abgelagerte Bornitrid-Beschichtungen. Nach Birkhofer u. a. [21, S. 41] beruht das nichtlineare Zusammenhang zwischen Anpresskraft und Reibwert nicht auf der Abhängigkeit des  $MoS_2$ -Reibverhaltens von der Belastung, sondern auf der Nichtlinearität der Abplattung des Gegenstücks im Hertz'schen Kontakt. Bei Erhöhung der Normalkraft wird sich die spezifische Verschleißrate nur gering erhöhen und hängt in erster Näherung linear vom Gleit-/Verschleißweg.

Die Ergebnissen aus diesen umfangreicheren Studien lassen sich wie folgt zusammenfassen: Da in der vorliegenden betriebsabhängigen Situation basierender auf Graphit-Festschmierstoff ( Verbindungen mit Schichtgitter) , wird sein Reibverhalten von dem durch das Gesetz von Amontons vorgesehenen abweichen.

#### 2. Gesetz:

Die Reibkraft ist abhängig nur von der realen Kontaktfläche und nicht von der scheinbaren (geometrischen) Kontaktfläche.

Nach dem 2. Amontons'schen Gesetz wird besagt, dass die wahre Berührungsfläche viel kleiner ist als die geometrische (scheinbare) Kontaktfläche wegen des Rauheitsprofils. Der 3. Reibgesetz ist noch als das Coulomb'sche Reibungsgesetz bekannt und lautet:

#### 3. Gesetz:

Die Reibungskraft  $F_R$  (die kinetische/die Gleitreibungskraft) hängt nicht von der Geschwindigkeit ab, wenn die Geschwindigkeit nicht zu groß bzw. zu klein wird.

Daraus folgt, dass die Reibungszahl unabhängig von der Relativgeschwindigkeit ist. Dieses Amontons-Coulomb'sche Gesetz <sup>13</sup> beschreibt aber nur am Rande die Zusammenhänge im realen Gleitreibungskontakt. Laut Popov [180, S. 143] erscheint die lineare Abhängigkeit der Reibungskraft von der Geschwindigkeit der Grund für die Reibungsinstabilitäten beim stationären Gleiten. Als Beispiel für die kontroverse Gültigkeit dieses Gesetzes lässt sich erwähnen, dass nach Sikorski [203] und Takagi u. a. [219] bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten Reibungszahlen bis  $\mu=100$  auftreten können, daraus resultiert starke plastischen Deformation der Gleitpartner. In dem Fall tritt kein richtiges Gleiten mehr [231, S. 192].

Die Coulomb'sche Reibung ist heutzutage als trockene oder Festkörperreibung bezeichnet [163, S. 62]. Die Untersuchungen des französischen Physikers Charles-Augustin de Coulomb (1736- 1806) zu den Auswirkungen der Kontaktgeometrie (Reibungswinkel), der Oberflächenbeschaffenheit, der Normalkraft (Belastung) und der Zeitdauer des Tribo-Kontakts dienen als Grundlage für Materialien für reibungskritische Anwendungen. [23]

<sup>13</sup>Vinaricky u. a. [231, S. 192]

Coulomb stellte quantitativ seine Erkenntnisse über den Unterschied zwischen der Haft- und Gleitkraft in seinem Buch „Théorie des Machines Simples“ (1781)[44] dar [118]. Zu den Coulombgesetzen gehört noch die Aussage, dass die Haftkraft  $F_H$  einen Maximalwert hat, ausgedrückt durch die Haftungsahl <sup>14</sup>  $\mu_0$ :

$$F_H \leq \mu_0 \cdot N \quad (\text{II.3})$$

$\mu_0$ -Haftungskoeffizient; statischer Reibungskoeffizient

$F_H$ - Haftkraft

$N$  - Normalkraft

wobei die maximale Haftkraft bei  $F_H = \mu_0 \cdot N$  auftritt, indem diese überwunden werden muss, bevor sich der Körper in Bewegung setzen kann. Folglich ist die minimal notwendige Kraft für Bewegungserhaltung die Gleitreibungskraft  $F_R$ , wobei diese nach *Coulomb* nicht von der Kontaktfläche und Oberflächenrauigkeit abhängig ist [180, S. 132]. Der Haftungskoeffizient  $\mu_0$  ist näherungsweise gleich, aber auch meist höher als der Gleitreibungskoeffizient  $\mu$ <sup>15</sup>. [216, S. 257][180, S. 133]. Nur die Richtung der Bewegung (Geschwindigkeitsvorzeichen) ist relevant für die Bestimmung des Vorzeichens der Reibkraft, sonst werden diese als konstant gegenüber die unterschiedlichen Geschwindigkeiten angesehen, wie vorher schon erwähnt (3. Gesetz) [112]:

$$F_R = k_0 \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad (\text{II.4})$$

$k_0 = \mu \cdot N$  besitzt kein Vorzeichen

Die Coloumbsche Gesetze beschreiben die äußere Reibung. Es existieren aber andere Gesetze und Zusammenhänge, die die innere Reibung (in Flüssigkeit oder Gas) definieren und genauer nach Stokes<sup>16</sup> und Newton<sup>17</sup>. Es ist noch zu betonen, dass das Newtonsche Reibungsgesetz nicht für alle Flüssigkeiten (bezogen auf das Zwischenkörper im Tribosystem - das Schmiermittel) gültig ist. Manche Fluide werden als *nichtnewtonsche Substanzen* bezeichnet und dies gilt für die Schmierfette zum Beispiel [94, S. 121].

Nach Krause und Scholten (1979)<sup>18</sup> [155, S. 7] sind die bekannten Coulomb'schen Gesetze nicht mehr relevant, weil die Reibungskoeffizienten vom ganzen Beanspruchungskollektiv abhängig sind:  $\mu_g = f(F_N, F_R, v_G, T_B, 0, \nu)$

In der vorliegenden Arbeit ist die Kontaktgeometrie im Idealfall Fläche auf Fläche, abgesehen von der Mikrorauigkeiten, der Welligkeit des Stahlbandes und dem unregelmäßigen Verschleiß

<sup>14</sup>Wittel u. a. [250]

<sup>15</sup>auch kinetische Reibungskoeffizient

<sup>16</sup>George Gabriel Stokes, irischer Mathematiker und Physiker (1819-1903): Das Gesetz von Stokes beschreibt die Linearität zwischen Reibungskraft und Strömungsgeschwindigkeit bei laminarer Strömung für Newtonsche Fluide [132, S.20]

<sup>17</sup>Newton'sches Reibungsgesetz der viskosen Strömung [94, S. 120]

<sup>18</sup>Krause H, Scholten J (1979) Verschleiß – Grundlagen und systematische Behandlung. VDI-Z21 Nr 15/16: 799–805; Nr. 23/24: 1221–1229

des Gleitkörpers. Die Relativbewegung des Stahlbandes zu der Graphitplatte bestimmt die Richtung und folglich der Vorzeichen der Reibungskraft.

### 3.1.1 Mechanische Faktoren

Damit die Reibung richtig bestimmt werden kann, sollen die folgenden Faktoren nach Blau [23, S. 270] geklärt werden:

- Kontaktgeometrie: Makro-, Mikro-, Nano- Last und Kontaktdruckverteilung auf verschiedenen Skalen
- Beanspruchungsgeschichte
- Systemdynamik:
  - Schwingungen
  - Steifigkeit
  - Dämpfung
  - Hysterese
- Bewegungsart und Geschwindigkeitsprofil

### 3.1.2 Werkstoffpaarung

Durch die Wahl einer reibungsarmen tribologischen Paarung werden zwei der Elementen des Tribosystems (Grund- und Gegenkörper) bestimmt und somit hat einen wesentlichen Einfluss auf die Minimierung der Reibungsverluste im Gleitmodul [23, S. 270]. Für eine optimale Materialauswahl werden die chemische Zusammensetzung und Rauheit der Materialien, sowie die Mikrostruktur und die mikrostrukturellen Merkmale in Bezug auf die Größe des Tribokontakts und die elastischen und plastischen mechanischen Eigenschaften berücksichtigt. Weitere wichtigen Faktoren sind die Eigenschaftsgradienten, die thermophysikalische Eigenschaften: Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung usw. Die Oberflächenbearbeitung und Oberflächenfinish sollen auch nicht außer Acht bleiben, sowie die Eigenspannungen.

### 3.1.3 Thermische Auswirkungen

Die thermischen Auswirkungen spielen eine wichtige Rolle für das Verhalten der Triboelementen im Reibkontakt und für die daraus resultierenden Reibungskoeffizienten. Dabei soll die Reibungswärme, die externen Wärmequellen, die thermoelastische Instabilität, die thermisch induzierten Phasenumwandlungen: Erweichen, Schmelzen, sowie die tribochemische Aktivierung, der Thermoschock bei zyklischer Belastung im Betracht gezogen werden [23, S. 270],[34].

### 3.1.4 Schmierung

Die Schmierung ist auch ein wichtiger Faktor in Kombination mit den Kontaktbedingungen und kann stark die Reibung beeinflussen, wobei in der vorliegenden Fall die Funktion des Schmiermittels von der Gegenkörper (Graphitplatten) übernommen wird. Zu berücksichtigen

dabei sind vor allem die Eigenschaften der Festschmierstoffe und die Tribochemie im Gleitkontakt [23, S. 270 ].

### 3.1.5 Tribochemie

Die chemische Reaktionen, die im Reibkontakt wegen mechanischer Energieformen auftreten, werden von der Mechanochemie, genauer von ihr Teilgebiet -die Tribochemie, beschrieben [189]. Die folgende wichtigen Faktoren können potenziell zur erhöhten Reibung führen, wenn diese nicht richtig angepasst werden [23, S. 270]:

- Relative Luftfeuchtigkeit
- Oberflächenreaktivität / Katalyse
- Sauberkeit
- Umgebungseinflüsse
- Tribopolymerisation
- Reibungspolymerbildung
- Oxide und Anlauffilme

### 3.1.6 Drittkörper

Die Partikel, die außerhalb von Gleitpartner fungieren, können stark den Abrieb beeinflussen. Unter dem Einwirken von Drittkörpern können die Oberflächenschichten beschädigt werden [185]. Dabei sind die folgenden Faktoren und ihre Bestimmung von großer Bedeutung [23, S. 270]:

- Partikelbildung und -transfer
- Mechanik und Schmierfähigkeit triboformierter Schichten (Tribomaterialien)
- Verschleißpartikelkonzentration und -agglomeration
- Größen, Formen und Morphologie von Partikeln (aufgrund der Kontaktfläche verursachen die eckigen Partikeln höhere Reibung als die runden [60])
- Externe Verunreinigungen
- Transport von Drittkörpern in und aus dem Kontakt

## 3.2 Reibungsmechanismen

Die Reibungsmechanismen nach Czichos u. a. [46] können allgemein in vier Gruppen aufgeteilt werden: Adhäsion und Scheren adhäsiver Bindungen, plastische Deformation, Furchung und elastische Hysterese und Dämpfung. Häufig treten unterschiedliche Reibungsmechanismen gleichzeitig auf. Welche Reibungsmechanismen hauptsächlich wirken, hängt vom Reibungszustand ab.[51]

### 3.2.1 Adhäsion

Nach Steinhilper u. a. [211] stellt die Adhäsion einen atomar (oder molekular) bedingten Reibungsmechanismus dar. Die physikalische Ursache für die Adhäsionskräfte bezüglich der Reibung beruht darauf, dass die Adhäsionsbindungen neu gebildet und dann bei Relativbewegung in der wahren Kontaktfläche wieder getrennt werden. Dadurch entsteht ein Energieverlust (Verlust der kinetischen Energie). Die spezifische Adhäsion basiert auf der Wirkung von „Van-der-Walls-Kräften“ und bei der mechanischen Adhäsion handelt es sich um die formschlüssige Verbindung der beiden Reibpartner [22]. Die Gleituntersuchungen können mittels Rasterkraftmikroskopie durchgeführt werden [17].

Wegen der Scherung von adhäsiven Bindungen variieren die atomaren Normalkräfte stark. Dies gilt für Polymeroberflächen mit Flüssigkeitsfilmen [120] und im begrenzten Umfang dieser wissenschaftlichen Arbeit kann das Thema nicht weiter vertieft werden.

Die Reibungskraft im Grenzflächengebiet wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$F_R = \tau_{s1,2} \cdot A_R \quad (II.5)$$

$\tau_{s1,2}$  bezeichnet dabei die Scherfestigkeit. Für die wahre (reelle) Kontaktfläche  $A_R$  gilt:

$$A_R = \frac{F_N}{p} = \frac{\text{Normalkraft}}{\text{Fließdruck}} \quad (II.6)$$

Diese Gleichung gilt für metallische Kontaktpartner bei plastischen Kontaktdeformation. Der Fließdruck  $p$  bezieht sich auf den weicheren Reibpartner. Mit dem makroskopisch-empirische Reibungsgesetz nach Amontons-Coulumb (1699, 1785) resultiert für die Adhäsionskomponente der Reibungszahl:

$$f_a = \frac{F_R}{F_N} = \frac{\tau_{s1,2}}{p} \quad (II.7)$$

Laut Bowden u. a. [31] haben verschiedene Untersuchungen an metallischen Werkstoffen gezeigt, dass die Scherfestigkeit ( $\tau_{s1,2}$ ) in einem Verhältnis von etwa 1 : 5 zum Fließdruck ( $p$ ) steht. Daraus resultiert eine Reibungszahl von ungefähr 0,2. Leider ist diese beispielsweise im Bereich der Festkörperreibung viel höher. Dieses Adhäsionsmodell gilt als einfach, aber grundlegend für die Erweiterung durch die grenzflächenenergetische Theorie von Rabinowicz [182] und das bruchmechanische Modell von Marx u. a. [148].

Da die Adhäsionskomponente von mehreren Einflussfaktoren abhängig ist, kann diese als ein Stufenprozess betrachtet werden [46]: Als erster Schritt werden die Makro-Kontaktflächen unter Berücksichtigung des Einflusses des Formänderungsvermögens der Kontaktpartner gebildet. Weiters werden Adhäsionsbindungen ausgebildet, wobei die Elektronenstrukturen, Oberflächenschichten, freien Oberflächenenergien, Zwischenstoffe und Umgebungsmedien Auswirkungen auf den Prozessablauf haben.



### 3.2.2 Plastische Deformation

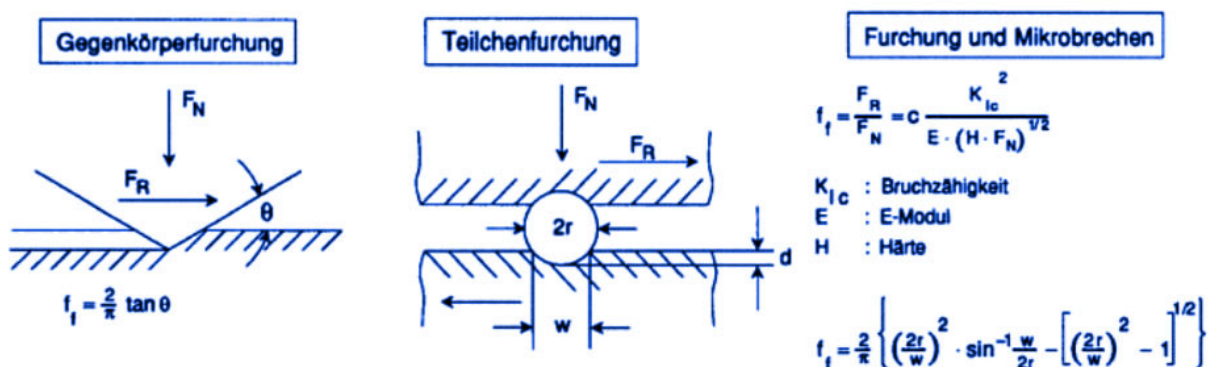
Weitere Energieverluste treten bei plastischen Kontaktdeformationen der Mikrokontaktfläche durch dissipative Prozesse, wobei die Kontaktdeformation aufgrund der tangentialen Relativbewegung und des Kontakts der beiden Tribopartner auftritt[87], folglich entsteht Reibung.

Beim Mechanismus der elastischen Kontaktdeformation ist eine nicht bleibende Verformung der Rauheitshügel in den Bereichen der Mikrokontakten vorhanden, somit kommen diese in den Ursprungszustand wieder zurück, deswegen bauen sich Spannungs- und Schwingungsfelder ständig auf und ab. Dies verursacht die schon erwähnten Energieverlusten [46, 140].

### 3.2.3 Furchung

Da die beiden Reibpartner unterschiedliche Härte haben, dringen die härteren Oberflächenrauheitshügel in den weicheren Mikroerhebungen ein. Dieser Mechanismus funktioniert ähnlich wie bei plastischer Deformation, da der Kontakt der Oberflächen und die Tangentialverschiebung wesentlich sind, damit Furchung auftreten kann. Nach Gümbel [87] resultiert dies in einer Reibungskomponente des Widerstandes des Werkstoffs gegenüber der Furchung.

Die verursachte durch Furchung Reibungskomponente kann entweder durch Gegenkörperfurchung (Furchung durch Rauheitshügel des Gegenkörpers) oder durch Teilchenfurchung (durch Verschleißpartikeln) entstehen. In einem weiteren Modell der Deformationskomponente der Reibung bei der Furchung spröder Materialien werden die Miktobruchvorgänge untersucht, wobei die Bruchzähigkeit, der E-Modul, so wie die Härte der Materialien einen Einfluss auf den Mechanismus aufweisen [259]. Die Analyse der abrasive Beanspruchung durch Verschleißpartikeln an Eisen- und Stahl-Gleitpaarungen von Sin u. a. [206] ergab eine mittlere Reibungszahl für die Furchungskomponente von ungefähr 0,2 . Dadurch wird klar, dass die eingebettete Verschleißpartikel als Zusatz zu den wichtigen Materialkenngrößen der beiden Tribo-Partner eine wesentliche Rolle für das Deformationsverhalten spielen.



**Abb. II.4:** Furchung nach Czichos u. a. [46]

### 3.2.4 Elastische Hysterese und Dämpfung

Als Folge der plastischen Deformation bei duktilen und verformungsfähigen Werkstoffen wie Stahl und Aluminium treten Schwingungen auf und dadurch Energiedissipation, die eine dämpfende Wirkung auf die Schwingungen ausübt. Diese Dämpfung des Materials ist noch als Struktur- oder Hysteresis-Dämpfung bekannt [212]. Anders gesagt ist die elastische Hysterese ein Reibungsmechanismus, der auf innerer Reibung beruht und eine Dämpfung hat [211]. Da die Wirkung der Reibungsmechanismen auf Reibungsenergie basiert, drückt sich diese in einem Energieverlust aus. Die Energiedissipation im System ist eine Umwandlung der mechanischen Bewegungsenergie in anderen Energieformen (in Wärme [11]).

### 3.3 Beanspruchungskollektiv und Verschleiß

Nach Kuhn [130] wurde allgemein der Verschleiß folgendermaßen definiert :

"Verschleiß ist eine infolge einwirkender Reibungsenergie auftretende Produktion von Irreversibilität und umfasst alle Elemente eines tribologischen Systems."<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Kuhn [130, S. 139]

Der Verschleiß entsteht infolge mechanischer Beanspruchung im System und stellt Oberflächenveränderung des Bauteils dar [145] oder laut Kuhn [130]:

"Verschleiß ist eine infolge Reibung eintretende bleibende Form-, Größen und/oder Stoffänderung der die Oberfläche von Festkörpern bildenden Stoffbereiche".

Bei dem tribologischen Verschleiß lassen sich zwei Arten unterscheiden:

- Festkörperverschleiß
  - Abtrag
  - Auftrag
  - Formänderung
  - Stoffänderung
- Schmierstoffverschleiß
  - Rheologischer Verschleiß <sup>19</sup>

Der bezeichnete als „Verschleiß“ Massenverlust kann qualitativ und quantitativ beschrieben werden, wobei die qualitative Beschreibung Mechanismen und Erscheinungsbilder umfasst und die quantitative - Verschleißmessgrößen (siehe Abschnitt [Verschleißmessung](#)). Dabei haben die

<sup>19</sup>Infolge tribologischer Beanspruchung eintretende irreversible Eigenschaftsänderung beanspruchter Stoffbereiche eines strukturviskosen Schmierstoffes." [130, S. 150]

Randbedingungen (Parameter, Kriterien) unterschiedlich großen Einfluss auf die Verschleißvorgänge [4, S. 123].

Damit diese Funktionsminderung (Verschleiß) von Bauteilen nachvollziehbar wird, lassen sich allgemein nach Verschleißmechanismen und Verschleißarten klassifizieren, die die zugrunde liegenden Ursachen des Verschleißes beschreiben. Dabei sind die Verschleißmechanismen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktion zu unterscheiden. Diese sind durch die Kinematik und die Art der tribologischen Struktur gekennzeichnet [207]. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Belastung, Bewegungsart und Temperatur Haupteinfluss auf den Verschleiß haben.

Folglich werden die Verschleißvorgänge in verschiedene technischen Verschleißarten eingeteilt [46, 109]:

- Gleitverschleiß
- Wälzverschleiß
- Prallverschleiß
- Schwingungsverschleiß
  - quasistatischer Tribokontakt
  - dynamischer Tribokontakt
- Furchungsverschleiß (Gegenkörperfurchung)
- Erosion
  - Hydroerosivverschleiß (Hydroabrasivverschleiß)
  - Strahlverschleiß
  - Kavitationserosion
  - Tropfenschlagerosion
  - Flüssigkeitserosion
  - Gaserosion
- Kavitation

Die Art der tribologischen Beanspruchung, sowohl als auch die beteiligten Stoffe spielen eine wichtige Rolle für die obige Gliederung. Die aufgelisteten Verschleißarten können nach Verschleißerscheinungsformen unterteilt werden. Wenn das System als „geschlossen“ definiert ist, treten nach der klassischen Wissenschaft meist Gleit-, Wälz- und Schwingungsverschleiß auf. Zu den Verschleißarten in „offenen“ Systemen gehören Abrasivverschleiß (Abrasiv-Gleitverschleiß, Drittkörper-Abrasivverschleiß - gleitend, wälzend, stoßend) und Erosion (Strömungsverschleiß). [207]. Es ist wichtig zu erwähnen, dass der Abrasivverschleiß und die Erosion nicht immer klar voneinander unterschieden werden können. Meistens wird der abrasive Verschleiß noch als Furchverschleiß bezeichnet [230]. Aufgrund der tribologischen Beanspruchung tritt dabei Überlagerung mehrerer Prozesse auf.

### 3.4 Verschleißmechanismen

Nach *DIN 50320:1979-12 Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes (Achtung:Dokument zurückgezogen)* [54] wird der Verschleiß hauptsächlich durch vier unterschiedliche Verschleißmechanismen bewirkt:

#### 3.4.1 Adhäsion

Dieser Verschleißmechanismus entsteht durch stoffliche atomare und molekulare Wechselwirkungen [100]. Aufgrund der Unebenheit der technischen Oberflächen, erfolgt die Kraftübertragung örtlich an einzelnen Kontaktstellen, was zu Normal- und Schubspannungen führt. Die daraus resultierende elastisch-plastische Verformung verursacht die Zerstörung von Adsorptions- und Reaktionsschichten der Tribo-Oberfläche [207]. Weiters entstehen lokale Grenzflächenbindungen [45], die oft bei metallischen Tribo-Partnern als "Kahlverschweißungen" bezeichnet werden. Diese Grenzflächenbindungen können härter als der ursprüngliche Werkstoff der Paarung sein. Somit definiert der Begriff Adhäsion die Haftbrücken-Bildung zwischen den Tribo-Partnern.

Donald H. Buckley [37] behauptet in seinem Buch „Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication“, dass „ein Materialübertrag von dem kohäsiv schwächer gebundenen Partner zu dem kohäsiv stärker gebundenen Partner“ bei metallischen Kontakten (unterschiedlicher Metalle) stattfindet.[46]

Folgende Ergebnisse stellt Sikorski [204] in seiner Studie über die Adhäsion bei Metallen und deren Einflussfaktoren dar: Die Metalle mit kubisch-flächenzentriertem Gitter haben mehr Gleitmöglichkeiten im Kristall als die kubisch-raumzentrierten und hexagonalen Metalle, deswegen besitzen gleiche Paarungen aus kubisch-flächenzentrierten Metallen <sup>20</sup> eine deutlich höhere Adhäsionsneigung als die Tribo-Partner aus Metallen mit einem kubisch raumzentrierten Gitter <sup>21</sup> und hexagonalen Metallen <sup>22</sup>. Daraus kann man folgern, dass aufgrund der gezeigten unterschiedlichen Eigenschaften der Metalle je nach Gittertyp, sich eine unterschiedliche Verformbarkeit ergibt.

Die charakteristischen Merkmale sind Fresser, Löcher, Kuppen, Schuppen und Materialübertrag [54].

#### 3.4.2 Abrasion

Die harten Partikel im Zwischenstoff und die Rauheitshügel des Gegenkörpers verursachen Ritzungen und Mikrozerspannung - bekannt als Abrasion. Die Rauheitsspitzen des härteren Körpers dringen in den weicheren Körper. In Kombination mit einer Relativbewegung entsteht Verschleiß [46, S. 122].

<sup>20</sup>wie Aluminium, Gold, Silber, Kupfer, Platin und Nickel

<sup>21</sup>wie Eisen, Molybdän, Wolfram

<sup>22</sup>wie Magnesium, Zink, Cadmium, Cobalt, Beryllium

Daraus ergeben sich die folgenden Merkmale [54],[126, S. 78]: Kratzer, Riefen, Mulden, Wellen

### 3.4.3 Oberflächenzerrüttung

Dieser Schädigungsmechanismus entsteht durch wechselnde tangentialen Scherkräfte und Schlagbeanspruchung. Infolge von zyklischen Zug-Druck-Bearbeitungen in den Mikrokontakten vom Grund- und Gegenkörper und wiederholtem Schlag kommt es zu Öffnung von Korngrenzen, was zu unsichtbaren Rissen, Risswachstum, Verschleißpartikeln, Grübchen und Werkstoffermüdung führen kann [223], [37]. Der Verschleißmechanismus einer Oberflächenzerrüttung kann in Hertz'schen Kontakten besonders stark ausgeprägt sein (Zahnradpaarungen, Wälzlager)[45],[36]. Die an den zyklisch beanspruchten Gleitkontakten beobachteten Verschleißerscheinungsformen sehen wie „Schwingungslinien“ oder „Rastlinien“ aus.

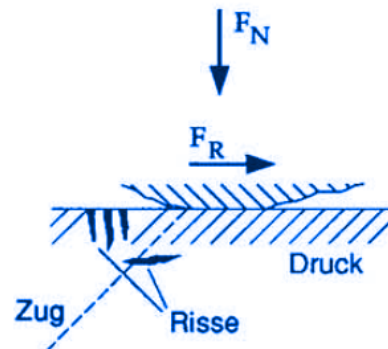


Abb. II.5: Oberflächenzerrüttung nach Czichos [45]

### 3.4.4 Tribochemische Reaktion

Die Bestandteile des tribologischen Systems - Zwischenstoff und Umgebungsmedium, führen zusammen mit den System-Bearbeitungen zu tribochemischen Reaktionen von beiden Tribo-Partnern. Das vorhandene Umgebungsmedium ist verantwortlich für die chemische Reaktion der beanspruchten Oberflächen und in Kombination mit einer Relativbewegung im System entstehen Reaktionsprodukte, die folglich abgerieben werden [70]. Deswegen wird dieser Verschleißmechanismus auch Reaktionsschichtverschleiß genannt. Infolge der Temperaturerhöhung durch Reibung und Gitterfehler werden die tribochemischen Reaktionen beschleunigt. Dies verursacht vor allem eine Änderung der Eigenschaften der äußeren Grenzschichten beider Tribo-Partner (z. B. Festigkeit der Werkstoffoberflächen). Der Verschleißbetrag variiert fallabhängig und kann erhöht, aber auch erniedrigt werden. Nach Lancaster [137] stellt die Luftfeuchtigkeit des Umgebungsmediums einen außerordentlich wichtigen Einflussparameter dar. Wegen der thermischen Wirkung und mechanischer Aktivierung können bei metallischen Kontaktpartnern Oxidinseln an den angrenzenden an die Mikrokontaktpunkte Oberflächenbereiche aufwachsen. Die mechanischen Spannungen können nicht vollständig bei der plastische Deformation abgebaut, deswegen folgt sprödes Ausbrechen, das zum Entstehen von Partikeln führt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Tribooxidation[9] das Entstehen von Oxidschichten im Reibungsprozess bezeichnet.

In diesem Fall werden gemäß DIN 50320[54] die zu unterscheidenden Reaktionsprodukte als Partikel und Schichten definiert. Eine der Maßnahmen, um tribochemische Reaktionen einzuschränken, ist der Einsatz von Graphit als Reduktionsmittel [10],[215, S. 119].

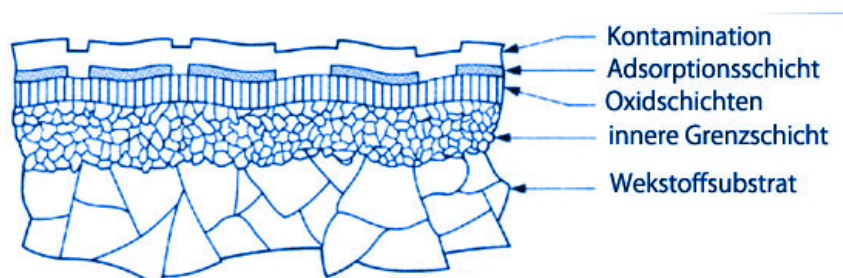
## 4 Charakterisierung der Oberfläche

Die Oberfläche eines Bauteils weist komplexe Struktur und Eigenschaften auf, die von der chemischen Zusammensetzung, von der Umgebungsbedingungen und von der Oberflächenvorbehandlung abhängig sind [17]. Die Oberflächeneigenschaften sind entscheidend für die Wechselwirkungen mit den anderen Triboelementen, weil diese die reale Kontaktfläche, Reibung, Abnutzung und Schmierwirkung beeinflussen.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Tribopartner hat einen wesentlichen Einfluss auf die Reibung. Wenn die Oberfläche mikroskopisch untersucht wird, kann eine Rauigkeit beobachtet werden, wobei diese eine entscheidende Rolle für das ineinander „Verhaken“ der jeweiligen Rauheitsspitzen spielt. Dadurch lässt sich die wahre Kontaktfläche von der scheinbaren Kontaktfläche unterscheiden [180, S. 6]. Noch dazu kann die Rauigkeit der Oberflächen die Adhäsion deutlich verringern. Es lässt sich noch erwähnen, dass für eine Relativbewegung zwischen den Tribopartnern mit rauen Oberflächen große tangentielle Kräfte erforderlich werden. Je glatter die Kontaktflächen, desto geringer der Widerstand und folglich die notwendigen Bewegungskräfte [8, S. 42].

**Aufbau technischer Oberflächen** Die technischen Oberflächen setzen sich aus drei Bereiche zusammen [46, S. 20]:

- Grundwerkstoff/Werkstoffsubstrat:
- innere Grenzschicht - besteht aus Verformungs- und Verfestigungsbereich
- äußere Grenzschicht - besteht aus Oxidschichten, Adsorptionsschichten und Verunreinigungen



**Abb. II.6:** Oberflächenschichten nach Czichos u. a. [48]

Die Oberfläche besteht aus mehreren Zonen mit unterschiedlichen physikochemischen Eigenschaften. Infolge des Umformungsprozesses in Metallen und Legierungen entsteht eine

Zone aus kaltverfestigtem oder verformtem Material, auf deren Oberseite sich ein Bereich mikrokristalliner oder amorpher Struktur befindet, der als Zwischenschicht bezeichnet wird.

Die meisten Oberflächen sind chemisch reaktiv. Bei vielen Nichtmetallen, Metallen und Legierungen bildet sich durch den Kontakt mit der Umgebungsluft eine sehr dünne Oxidschicht, die den Materialkern vor Korrosion schützt. Neben dem chemischen Korrosionsfilm existieren auch adsorbierte Schichten, die entweder durch Physisorption<sup>23</sup> (Physikalische Adsorption) oder Chemisorption<sup>24</sup> (Chemische Adsorption) von Sauerstoff, Wasserdampf und Kohlenwasserstoffen aus der Umgebung entstehen. Gelegentlich wird ein fettiger (öliger) Film aus der Umgebung erhalten. Diese Filme entstehen auf metallischen und nichtmetallischen Oberflächen.[16, 27]

Dabei werden abhängig von der Reaktivität des Substrats (Grundwerkstoffs) und von der Bindungsart folgende Effekte beobachtet [46]:

- bei metallischer Bindung -Oxidschichtbildung + Physisorption /Chemisorption
- bei ionischer Bindung - Chemisorption
- bei kovalenter Bindung - Chemisorption
- bei Van-der-Waals-Bindung -Physisorption

Die Wirkung adsorbierter Filme ist signifikant für die Oberflächenwechselwirkungen. Manchmal verschleiben die Filme in der Einlaufphase und haben anschließend keine Wirkung. Der Wirkmechanismus von feinem öligen oder seifigen Film, falls vorhanden, ist ausgeprägter - diese Schmierschicht verringert die Folgen der Oberflächenwechselwirkungen.[17]

#### 4.1 Oberflächenfunktion

Weitere Begriffe, die bei der Oberflächencharakterisierung von Bedeutung sind, erscheinen die *Struktur* und das *Gefüge*. Dabei bezeichnet der Begriff „Struktur“ die Beschaffenheit der Werkstoffoberfläche, Tiefe und Eigenschaften der verfestigten Schicht. Die Struktur hängt von der Zusammensetzung und Verarbeitungshistorie (des Metalls) ab [113, S. 239]. Durch die spezifische Anordnung der Atome der geometrischen Struktur einer Oberfläche werden praktisch alle ihre Eigenschaften direkt beeinflusst [66, S. 67]. Die Änderung der Struktur erfolgt z. B. durch Umformung [241, S. 104]. In der Literatur spricht man von einem zweidimensionalen Netz (Gitter)<sup>25</sup> der Oberflächenstruktur [106, S. 76]. Diese erscheinen als Bestandteil aller dreidimensionalen Gittertypen.

Der Begriff *Gefüge* oder die Mikrostruktur kann unabhängig vom Werkstoff (Metall, Keramik oder Polymer) nach Worch u. a. [252] folgendermaßen definiert werden: „Der Begriff Gefüge kennzeichnet die Beschaffenheit der Gesamtheit jener Teilvolumina, von denen jedes hinsichtlich seiner Zusammensetzung und der räumlichen Anordnung seiner Bausteine in Bezug auf ein in

<sup>23</sup> eine Form der Adsorption, wobei ein adsorbiertes Molekül durch Van-der-Waals-Kräfte auf einem Substrat gebunden wird(Wiki)

<sup>24</sup> „Anlagerung von Atomen oder Molekülen an der Oberfläche eines Festkörpers unter Bildung einer chemischen Bindung zwischen dem Adsorbens und den adsorbierenden Teilchen. Die Chemisorption hat Bedeutung für die heterogene Katalyse...“ [42]

<sup>25</sup> Bravaisgitter/Bravais-Netze, Einheitszelle/ Einheitsmasche, Punkte und Geraden im Gitter, Gitterebenen, Überstrukture

den Werkstoff gelegtes ortsfestes Achsenkreuz in erster Näherung homogen ist. [...]. Das Gefüge ist durch die Art, Form, Größe, Verteilung und Orientierung der Gefügebestandteile charakterisiert.“ Bei den metallischen Werkstoffen wird nach Primär- und Sekundärgefüge unterscheiden [146, S. 104]. Die Änderung des Gefüges erfolgt beispielsweise durch Wärmebehandlung, wie in der Norm DIN 17014[53] beschrieben.

In Abhängigkeit von den technischen Anwendungen sollen die technischen Oberflächen eine Vielzahl von unterschiedlichen Funktionen erfüllen. Neben der mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften der Materialien, weisen diese einen Barriereeffekt gegen Hitze, Diffusion, Licht, elektrischen Strom, Korrosion und Verschleiß auf. Die funktionellen Beschichtungen können beispielsweise als Leiter, zur Stromerzeugung, sowie als Informationsspeicher dienen. Dabei bestimmen ihre Eigenschaften die Benetzung von Flüssigkeiten bei Kontakt mit der Oberfläche von Festkörpern, das Reibungsverhalten, die Haptik u. a. [28, S. 115-116]

Die Bauteiloberfläche dient allgemein zum Trennen des Objekts von seiner Umgebung. In der vorliegenden Situation ist das umgebende Medium gasförmig - Luft. Die maßgebliche Forderung an die Oberfläche ist, dass diese möglichst kostengünstig ist, damit die verschlissene Maschinenteile auf bestimmten Zeitintervallen oder nach Abnutzungsgrad getauscht werden können. Daher soll der Abrieb auf der günstigeren Seite sein. Weiters wird einen geringeren Reibwert gefördert, damit die Funktion der Tribo-Oberfläche erfüllt wird. Dabei sollen die Eigenschaften der Oberfläche möglichst genau definiert werden, damit die vorgesehene Funktion optimal erfüllt wird.

## 4.2 Oberflächenbeschaffenheit

Die fast<sup>26</sup> vollständige Definition einer technischen Oberfläche erfolgt mittels bestimmter Messmethoden. In der vorliegenden Arbeit besteht die Beschreibungsmatrix der vorhandenen Graphitplattenoberfläche und Stahlbandoberfläche aus der Morphologie- und Topographiemessungen.

**Topographie** ist die quantitative Beschreibung der Oberfläche unter rein geometrischen Gesichtspunkten [93, S. 56], wobei es nach Makro- und Mikrotopographie (Rauheiten, Spuren, Riefen, Textur- und Strukturwerte) unterscheiden wird. Die Vermessung erfolgt lateral sowie vertikal mittels eines Profilometers. Die makroskopische Darstellung der scheinbaren Topographie erfolgt z. B. anhand Rauheitsmessung nach DIN EN ISO 4287 [56] oder der flächenhaften Rauheitsmessung nach DIN 25178 [2].

**Morphologie** wird durch die qualitative laterale Charakterisierung der Oberfläche definiert. Die Messungen werden beispielsweise mittels Rasterelektronenmikroskopie REM durchgeführt, damit die Änderungen in der Oberfläche durch Verschleißprozesse oder Korrosionsvorgänge u.

<sup>26</sup>für die fast vollständige Kennzeichnung der technischen Oberflächen werden Messungen aus den Bereichen Morphologie, Topographie, elektrischem Ladungszustand, und Energieniveau benötigt. Wegen der mehreren Anforderungskriterien ist eine allgemein gültige Formulierung der Oberflächenbeschreibung nicht realistisch [93, S. 56]



a. untersucht wird [85, E 31].

Die Feststoffoberflächen enthalten unabhängig von ihrer Entstehungsart Abweichungen vom vorgeschriebene geometrische Form - Differenz zwischen Nominalmaß und Istmaß [18–20, 221, 247]. Das Spektrum von Abweichungsformen ist breit - von Formabweichungen bis Abweichungen molekularer und atomarer Ebene.

### 4.3 Analyse der Oberflächenrauheit

Die Oberflächengüte weist Abweichungen von der Nennoberfläche auf, wobei diese die dreidimensionale Topographie der Oberfläche darstellen. Die Gestaltabweichung ergibt sich aus der Ist-Oberfläche minus geometrischer Oberfläche. Zu der Bestandteile der Oberfläche (Oberflächenattribute) gehören die Rauigkeit, Welligkeit, Rillenrichtung und Oberflächendefekte.[17]

Die Mikro- und Nanorauhigkeit werden in Wellen unterschiedlicher Wellenlängen aufgeteilt, gekennzeichnet durch Spitzen (lokale Maxima) und Tiefen (lokale Minima) unterschiedlicher Amplituden. Die Wellenlänge nimmt mit der Ordnung der Gestaltabweichungen ab.

#### 4.3.1 Welligkeit

Nach DIN 4760 [170] ist die Welligkeit als eine Oberflächenunregelmäßigkeit 2.Ordnung definiert und wird als Makrorauigkeit bezeichnet aufgrund der längeren Wellenlängen. Diese Art von Abweichung entsteht durch Schwingungen der Werkzeugmaschinen, andere Gründe dafür sind: Maschinen- oder Werkstückablenkungen, Vibrationen, Rattern, Wärmebehandlungen oder Verzerrungen

Das ungefilterte Primärprofil (P-Profil) stellt das tatsächlich gemessene Oberflächenprofil dar und wird in Rauheit (R-Profil) und Welligkeit (W-Profil) aufgegliedert. Die Trennung der Profile kann mit einem Gauß-Filter, der in DIN EN ISO 11562:1998 [129] genormt ist, erfolgen. Die Grenzwellenlänge  $\lambda_c$  (Nesting-Index) legt die Grenze, an der die Welligkeit in Rauheit übergeht, fest [111].

#### 4.3.2 Rillenrichtung

Das Relief weist eine Rillenrichtung<sup>27</sup> (engl. Lay) auf, welche die Hauptrichtung des vorherrschenden Oberflächenmusters ist, die normalerweise durch das Herstellungsverfahren bestimmt wird (DIN EN ISO 1302 [171]). Nach DIN 4761 (ersetzt durch DIN EN ISO 8785:1999-10[173]) existieren rillige und nichtrillige Oberflächen.

#### 4.3.3 Oberflächendefekte

Die Oberflächenfehler(engl. Flaws) sind unbeabsichtigte, unerwartete und unerwünschte Merkmale in der Textur. Zusätzlich kann die Oberfläche grobe Abweichungen von der nominalen

<sup>27</sup>Rillen- eine regelmäßige oder unregelmäßige Vertiefung oder Spur auf der Oberfläche (DIN 4761)

Form der Wellenlänge, die als Formfehler bekannt ist. Vor allem sind die Oberflächeneffekte unerwünscht und werden durch Oberflächenbeschichtungen abgedeckt.

#### 4.3.4 „Typologie“ der Oberflächen

Die Feststoffoberfläche wird als inhomogen oder homogen betrachtet, wobei die homogenen Texturen als deterministisch oder stochastisch (mit zufälliger Anordnung) bezeichnet werden. Die deterministische Oberflächenstrukturierung wird leicht durch empirischen und analytischen Methoden untersucht. Die meisten technischen Oberflächen weisen aber ein zufälliges Muster auf, welche durch das Bearbeitungsverfahren (von der Art der Verarbeitungsmethode abhängig) bestimmt wird: entweder isotrop oder anisotrop, gaußförmig oder nicht gaußförmig [17, Abschnitt 2.2]. Oberflächen, die durch kumulative Prozesse<sup>28</sup> entstehen, werden durch die Gaußsche Form geregelt, was eine direkte Folge des zentralen Grenzwertsatzes der statistischen Theorie ist. Solche Verfahren wie Drehen und Formen oder Prozesse wie Schleifen und Mahlen führen in der Regel zu anisotropen und nicht-Gaußschen Oberflächen. Die Gaußsche (Normal-) Verteilung ist zu einer der Hauptstützen der Oberflächenklassifizierung geworden.

#### 4.3.5 Oberflächenrauheit und Rauheitsparameter (Oberflächenkenngrößen)

Die Rauheit ist eine Gestaltabweichung ab 3. Ordnung bis 5. Ordnung nach DIN 4761[167]. Neben den räumlichen, strukturorientierten, funktionsorientierten und den hybriden Parametern sind auch die Amplitudenparameter (Höhen-Parameter)[56] definiert.

Die Kenngrößen **P** (Primärprofil), **R** (Rauheitsprofil) und **W** (Welligkeitsprofil) sind geometrische Kenngrößen in Bezug zur Profilspitze  $Z_p$ , zum Profiltal  $Z_v$ , sowie Summe aus der Höhe der beiden innerhalb einer Einzelmessstrecke  $Z_t$ . [145].

- Der arithmetische Mittelwert der Beträge aller Profilwerte (der Ordinatenwerte des Rauheitsprofils innerhalb der Einzelmessstrecke  $l_r$ )  $R_a$  ergibt die mittlere Abweichung (den mittleren Abstand) eines Messpunktes zur Mittellinie[110]. Die Angabe des arithmetischen Mittelwerts ist aber ungenügend, weil dieser Linienrauheitsparameter keine Information über die Form des Profils liefert.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx \quad (11.8)$$

Wenn eine Oberfläche zufällig verteilte Strukturelemente aufweist, reicht ein zweidimensionaler Schnitt nicht mehr aus, damit die Oberfläche vollständig beschrieben wird. Grund dafür ist die Tatsache, dass der Schnitt nicht speziell bezüglich der Strukturelemente positioniert werden kann. Größere Relevanz für die Oberflächenbestimmung hat die Abtastung der Flächenbereiche, da dank dieser Erweiterung des 2D-Linienrauheitsparameter

<sup>28</sup>wie Kugelstrahlen (Peening), Elektropolieren und Läppen

eine 3D-Analyse der Oberfläche resultiert. Nach DIN 25178 [2] werden die Senkrechtenkenngrößen von der linienhaften auf die flächenhafte Auswertung übertragen [248]. Da viele Eigenschaften einer Oberfläche erst über die flächenhafte Betrachtung beschrieben werden können, sind weitere Kenngrößen erforderlich und genauer die S-Parameter.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \quad (\text{II.9})$$

- quadratischer Mittelwert der Profilorinaten (RMS) oder der Profilabweichung  $R_q$  ist ähnlich definiert wie  $R_a$ , weist aber erhöhte Empfindlichkeit für einzelne Spitzen und Riefen auf [110].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n y_i^2} \quad (\text{II.10})$$

Nach „25178-2 (2012) Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft-Teil 2: Begriffe und Oberflächenkenngrößen“ [2] ist die mittlere quadratische Höhe der Ordinatenwerte innerhalb des Definitionsbereiches (A):

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z(x, y)^2 dx dy} \quad (\text{II.11})$$

- Gesamthöhe des Profils  $R_t$  ist die Summe aus der Höhe der größten Profilspitze  $Z_p$  und der Tiefe des tiefsten Profiltales  $Z_v$  innerhalb der Gesamtmessstrecke.
- Maximale Höhe der Oberflächentextur  $R_z$  ist die Summe aus der Höhe der größten Profilspitze  $Z_p$  und der Tiefe des größten Profiltales  $Z_v$  innerhalb einer Einzelmessstrecke.
- $R_p$  beschreibt die Höhe der größten Profilspitze  $Z_p$  und  $R_v$  die Tiefe des größten Profiltales  $Z_v$  innerhalb der Einzelmessstrecke.
- Die Schiefe  $R_{sk}$  (engl.: Skewness) des Profils verwendet die 3. Potenz des Quadratischen Mittenrauwerts und so wird die Einzelmessstrecke als einheitenfreien Wert in dritter Potenz angezeigt. Diese Kenngröße wird für die Messung der Symmetrie des Profils um die Mittellinie verwendet.

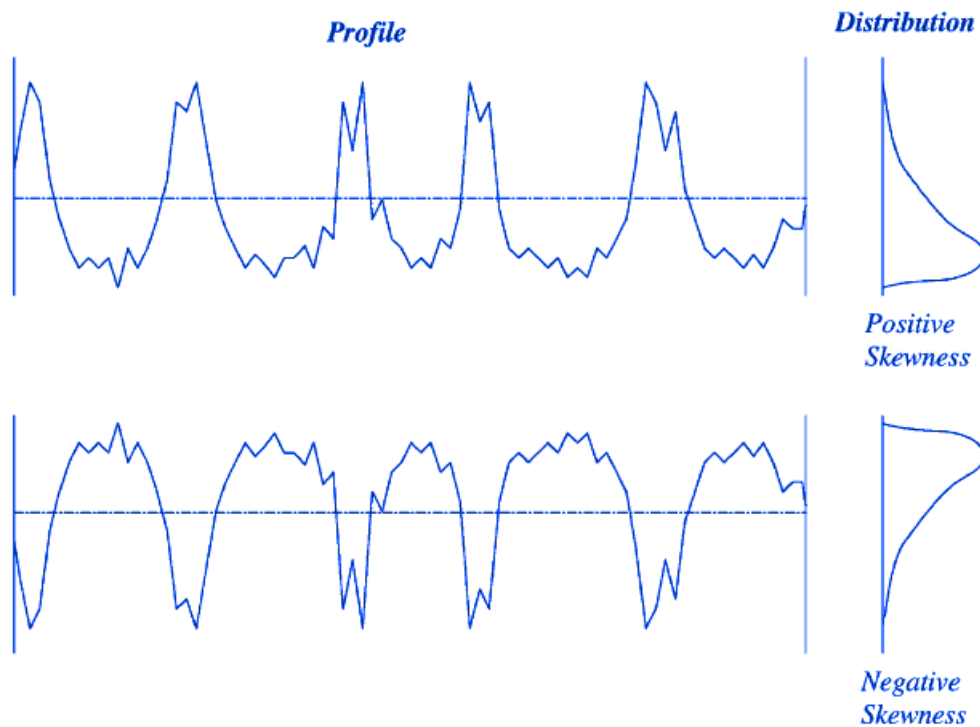
$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{\infty} y^3 p(y) dy = \frac{1}{N R_q^3} \sum_1^n Y_i^3 \quad (\text{II.12})$$

Und nach DIN 25178 [2]:

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left( \frac{1}{A} \iint_A z(x, y)^3 dx dy \right) \quad (\text{II.13})$$

Dabei ist das Folgende zu berücksichtigen:

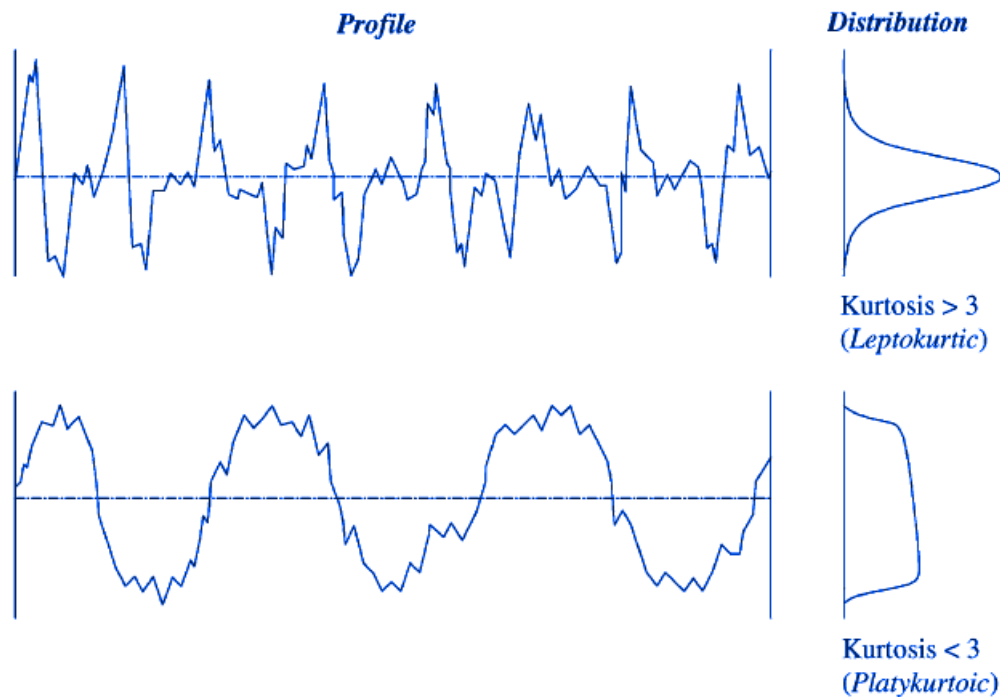
- $S_{sk} < 0$ : Die Höhenverteilung ist oberhalb der mittleren Ebene geneigt.



**Abb. II.7:** Schiefe des Profils nach Gadelmawla u. a. [73]

- $S_{sk}=0$ : Die Höhenverteilung (Spitzen und Vertiefungen) ist symmetrisch zur mittleren Ebene.
- $S_{sk}>0$ : Die Höhenverteilung ist unterhalb der mittleren Ebene geneigt.
- $R_{ku}$  Wölbung, Steilheit, Kyrtnosis, Kurtosis oder auch Kurtose, nach DIN 4287 [56] definiert die Steilheit des Profils und verwendet die 4. Potenz des Quadratischen Mittenrauwerts.

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{\infty} y^4 p(y) dy = \frac{1}{NR_q^4} \sum_1^n Y_i^4 \quad (\text{II.14})$$



**Abb. II.8:** Steilheit des Profils nach Gademawla u. a. [73]

Nach DIN 25178 [2] ist die Kurtosis  $S_{ku}$  der skalenbegrenzten Oberfläche, wobei  $S_q$  innerhalb des Definitionsbereiches (A) sich befindet:

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left( \frac{1}{A} \iint_A (x, y)^4 dx dy \right) \quad (\text{II.15})$$

Je nach Wert der Kurtosis unterscheiden sich 3 Varianten:

- $S_{ku} < 3$ : Die Höhenverteilung ist oberhalb der mittleren Ebene geneigt.
- $S_{ku} = 3$ : Die Höhenverteilung entspricht der Normalverteilung. (Vorstehende Teile und eingedellte Teile existieren nebeneinander.)
- $S_{ku} > 3$ : Die Höhenverteilung ist steilgipflig/leptokurtisch..

Als wichtige räumlichen Kenngrößen erscheinen die statistische Parameter.

- Autokorrelationsfunktion **ACF**

Die Entwicklung von räumlichen Parametern beinhaltet die Verwendung der mathematischen Technik der Autokorrelationsfunktion (**ACF**), welche eine weitere Kenngröße eines Oberflächenprofils darstellt. Die Autokorrelationsfunktion liefert grundlegende Informationen über die Beziehung zwischen der Wellenlänge und den Amplitudeneigenschaften der Oberfläche. **ACF** beschreibt die allgemeine Abhängigkeit des Wertes der Daten an einer Position von ihren Werten an einer anderen Position (auf Verschiebungsdistanz  $\delta x$ ) und genauer kann als quantitatives Maß für die Ähnlichkeit zwischen einer lateral ver-

schobenen und unverschobenen Version des Profils betrachtet werden [73]. Die diskrete mathematische Funktion im Falle eines Linienprofils lautet:

$$ACF(\delta x) = \frac{1}{L} \int_0^L y(x)y(x + \delta x)dx = \frac{1}{N-1} \sum_1^N y_i y_{i+1} \quad (II.16)$$

L- Länge des Profils

$\delta x$  - die Verschiebungsdistanz (eng. the shift distance)

$y_i$  - Höhe des Profils im Punkt i

Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Funktion  $y(x)$  und ihre Kopie  $y(x+\delta x)$  gezeigt, wobei  $y(x+\delta x)$  die verschobene Version darstellt. Eine unverschobene Funktion ( $\delta x=0$ ) ist mit sich selbst am ähnlichsten und daraus folgt, dass die Autokorrelation für sie den höchsten Wert hat. Mittels ACF wird einen besseren Vergleich der Wellenlängeninformationen in verschiedenen Profilen ermöglicht.

- PSD (eng. power spectral density) Spektrale Leistungsdichte

Die Fouriertransformation der Autokorrelationsfunktion ergibt die spektrale Leistungsdichte [139]. PSD ist eine wichtige Funktion zur Charakterisierung sowohl der Rauheitsamplituden als auch des Abstandes. Mittels *Power Spectral Density* kann ein Profil ohne Informationsverlust im Detail beschrieben werden. Der Oberflächenprofil wird in Form einer spektralen Leistungsdichte über der Ortsfrequenz aufgetragen. Die niedrigen Ortsfrequenzen bezeichnen die Form und die höheren Ortsfrequenzen die Rauheit. Die Berechnung der PSD kann entweder eindimensional aus den erfassten Profildaten oder zweidimensional aus flächenbezogenen Daten erfolgen [119, S. 31]. Für ein 2D-Oberflächenprofil gilt die folgende Formel[73]:

$$PSD = \frac{1}{L} \left| \int_0^L y(x) \exp(-i2\pi f x) dx \right|^2 = \frac{1}{N-1} \left[ \sum_{i=0}^{N-1} y_i e^{-j2\pi \beta i/N} \right]^2 \quad (II.17)$$

$\beta$ - Korrelationslänge

Wobei:

= $\infty$  periodische Welligkeit

=0 zufällige Wellenform

Aus den erwähnten Kenngrößen zur Charakterisierung und Beschreibung der Oberflächentopographie erscheinen der quadratische Mittelwert, die Kurtosis und die Schiefe als die relevantesten Parameter. Insbesondere die flächenbezogene Auswertung spielt für die Definition der Funktionalität und der Veränderung der Graphitoberfläche während der geplanten Experimente eine sehr wichtige Rolle. Die Autokorrelation und die spektrale Leistungsdichte wurden aufgrund der begrenzten Softwareressourcen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

## 5 Messmethoden

Im Allgemeinen lassen sich die Messmethoden nach Auflösung (Mikro/Nanoskala), so wie nach Art der Untersuchung- optisch, mechanisch, elektronisch- unterscheiden. Beim Messen lässt sich eine quantitative Aussage über die physikalischen Größen ermitteln, um mittels einer Messeinrichtung ein realer Messwert festzustellen.

### 5.1 Quantitative Bewertung/Messung der Oberflächenrauheit

Bei der Beurteilung des Oberflächenfeingestalts wird zwischen Beurteilung der Oberflächentopographie mit mikroskopischen Methoden und Messgeräten zur Oberflächencharakterisierung unterschieden. Typische Vertreter der ersten Gruppe von Beurteilungsmethoden sind die Rasterelektronenmikroskopie und die Atomkraftmikroskopie. Diese Technik dient zur Erzeugung von Abbildungen der Objektoberfläche mit hoher Schärfentiefe. Die zweite Gruppe von messtechnischen Verfahren umfasst zwei Hauptarten von Prüfmethoden und genauer: taktil und berührungslos.[114, S. 63-64]

Eine Beurteilung der Charakteristiken von technischen Oberflächen erfordert deren Vermessung, durch berührende (Tastschnitt) oder berührungslose Verfahren. Die berührenden/ taktilen Methoden funktionieren durch Abfahren der Oberfläche mit einer Nadel (Tastspitze aus Diamant), wobei das Prüfstück Punkt für Punkt abgetastet wird. Dabei kann die Geometrie der Tastspitze die Amplituden der Abtastung und dadurch auch die Messergebnisse (was zu Unterschieden bei den Messwerten der verschiedenen Geräten führen kann) beeinflussen. Dieses Standardmessverfahren verlangt aber eine stabile Werkstoffoberfläche, damit keine Verformung verursacht wird. Deswegen sind die optischen berührungslosen Messmethoden passender für die vorhandene Situation, da durch die taktilen Methoden die Oberfläche von der Graphitplatten verletzt werden kann. Ein weiterer Vorteil der optischen Messgeräte ist die wesentlich bessere Oberflächenauflösung. [145]

Laut Bhushan [17] werden die Messmethoden der Oberflächenrauigkeit in sechs Kategorien von auf physikalischen Prinzipien basierten Hauptverfahren aufgeteilt:

- Taktile Methoden
- Optische Methoden
- Rastersondenmikroskopie (Scanning Probe Microscopy SPM)-AFM, SNOM, STM
- Fluid-Methoden
- Elektrische Methoden
- Elektronmikroskopie - Reflexion, BSE, Stereomikroskopie

Nach DIN 4288[172] sind die Regeln und Verfahren zur Prüfung mittels Tastschnittgeräte beschrieben und erklärt worden. Wenn die Kenngrößen des Rauheitsprofils gemessen

werden, muss die Probe richtig positioniert sein, indem die Richtung des Abtastens rechtwinklig zur Rillenrichtung ist. Eine beliebige Tastrichtung darf nur im Fall eines ungeordneten Verlaufs der Oberflächenrillenrichtung gewählt werden. Die untersuchten Oberflächenzonen befinden sich an den Stellen, wo nach einer Augenscheinprüfung kritische Werte erwartet werden. Eine gleichmäßige Verteilung der Messungen wird über diesen Teil der Oberfläche durchgeführt, um die Ergebnisse voneinander zu differenzieren. Wichtig dabei ist die Bestimmung des Rauheitsprofils und dessen Periodizität (periodisch oder aperiodisch) und je nachdem wird daraus folgendem Verfahren angewendet, daraus lassen sich die Werte der Rauheitskenngrößen festlegen.

Als besonders geeignet für Verschleißmessungen haben sich die Methoden der Konfokalmikroskopie, der Weißlichtinterferometrie und der Mikrostreifenprojektion erwiesen [114].

In der vorliegenden Arbeit werden die bekanntesten topometrischen Methoden für die quantitative Bewertung der Proben - Interferenzmikroskopie (Weißlichtinterferometer) und die konfokale Mikroskopie-, sowie die nicht so populäre Methode der Fokusvariation [1] und ihre unterschiedlichen physikalischen Prinzipien genauer betrachtet.

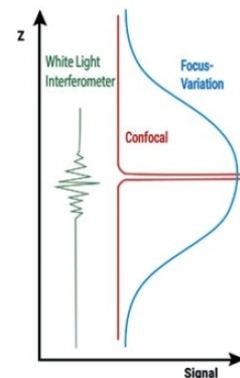
### 5.1.1 Weißlichtinterferometrie (WLI)

**Aufbau** Der Weißlichtinterferometer besteht aus einer Weißlichtquelle (Halogenlampe oder LED), einer Referenzfläche, einer CCD-Kamera (Kamera mit Objektivsystem), welche als Detektor dient und einem Strahlteiler (Teilspegel). Dies sind die Standardelemente eines Michelson-Interferometer/Twyman-Green-Interferometer. [12]

**Prinzip** Die optische berührungslose Messmethode Weißlichtinterferometrie basiert auf der Interferenz des polychromatischen Lichts mit partieller Kohärenz oder noch als Weißlicht bekannt. Dadurch entstehen 3D-Profilmessungen von Strukturen. Der Lichtstrahl hat eine Kohärenzlänge von wenigen Mikrometern und wird mittels eines Strahlteilers getrennt.[199]

**Vor- und Nachteile** Vorteile von der Weißlichtinterferometrie sind, dass die Vermessungen mit einer extrem hohen Genauigkeit und ohne Abschattungen automatisch durchgeführt werden können. Dabei sind auch Rauheitsuntersuchungen möglich. Bei diesem Messverfahren gibt es keine gefährliche Strahlung.

Nachteilig bei dieser Messmethode ist, dass aufgrund der Größe des Messflecks großflächige Vermessungen als nicht wirtschaftlich gelten. Noch dazu wegen der diffusen Streuung



**Abb. II.9:** WLI-, Konfokal- und Fokusvariationsignal, Quelle:[251]



ist die Weißlichtinterferometrie nicht für alle Oberflächen geeignet. Damit die Messmethode durchgeführt werden kann, ist eine Schwingungsisolierung erforderlich. [199]

**Auflösung** Die Weißlichtmikroskopie erlaubt eine laterale Auflösung bis  $0,5\ \mu\text{m}$  und eine vertikale Auflösung bis  $0,1\ \text{nm}$  (im PSI (phase shifting interferometric)-Modus) [213, S. 49]

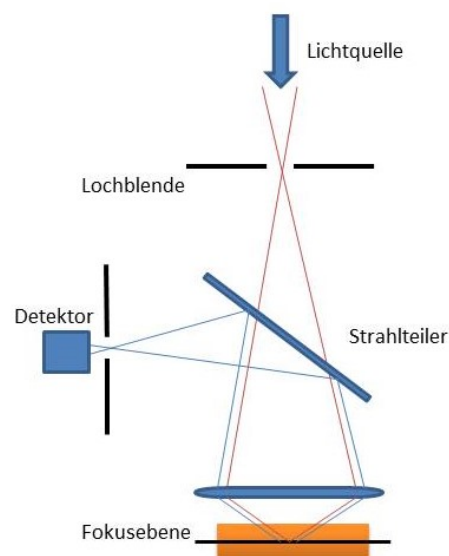
**Anwendung** Sowohl Rauheitsmessung einer bearbeiteten metallische Oberfläche als auch Analyse der Topographie von dreidimensional gefertigten Proben kann mittels WLI erfolgen, da mit diesem Messverfahren Mikrogeometrien untersucht werden können. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass dank WLI Glasoberflächen vermessen werden können [58]. Der Weißlichtinterferometer kann als eine Erweiterung der Standardmikroskope verwendet werden, um die rein visuelle Überprüfung von dreidimensionalen Messungen zu begleiten. Das Verfahren eignet sich gut für weiche Materialien, wie in dem vorliegenden Fall-Graphit, wo die taktilen Messmethoden eine Beschädigung der Oberfläche verursachen können. [199]

### 5.1.2 Konfokal-Mikroskopie

**Aufbau** Einige der wichtigsten Komponente neben dem Blendepaar des Konfokalmikroskopes sind der Strahlteiler (oder noch als Dichroitischer Spiegel bekannt), Linsen, Detektor, Lichtquelle u.a.

**Prinzip** Die Konfokalmikroskopie ist eine spezielle Art der Lichtmikroskopie, bei welcher das Arbeitsprinzip auf der konjugierten Anordnung einer Beleuchtungs- und Detektor-Lochblende beruht [238]. Die Konfokalmikroskopie gilt als berührungsloses Messverfahren [199].

Im Gegenteil zu der üblichen Lichtmikroskopie, bei der das Präparat zur Gänze beleuchtet wird, zeigt die Konfokalmikroskopie eine deutlich schärfere Abbildung des Objekts aufgrund eines kleineren fokalen Lichtfleckes, wodurch das in den umliegenden Bereichen entstehende Streulicht minimiert wird. Das Objekt wird streifenweise abgetastet und eine Punkt-zu-Punkt Abbildung wird erzeugt. Dabei lassen sich Strukturen mit einer Genauigkeit von  $0,001\ \text{mm}$  dargestellt werden [199].



**Abb. II.10:** Konfokalmikroskop Prinzip

Das Besondere bei allen Konfokalmikroskopen ist die zusätzliche Detektor-Blende, in der hinteren Brennebene, die noch als „Pinhole“ bekannt ist. Dadurch wird das *Out of Focus* – Licht (Streulicht), welches nicht aus der Fokusebene stammt, blockiert und folglich auch die unspezifische Aufhellung des Bildhintergrundes bewirkt. Auf diese Weise werden die unscharfe Bildinformationen aus deren Fokusebenen reduziert und wird eine gute Auflösung des gesamten Bildes erreicht. [232]

Heutzutage existieren bei der Konfokalmikroskopie verschiedene Varianten [95], wie z.B.:

- punkthafte Antastung: Diese Bauform ist als CLSM (confocal laser scanning microscopy) bekannt. Der Funktionsprinzip basiert auf Abrastern des Präparats durch fokussierter Laserstrahl.
- linienhafte Antastung: Der wesentliche Vorteil ist dabei die Geschwindigkeit des Scannens mit einem ausreichenden Kontrast der Abbildung. Bei dem Linien-scanner wird eine ganze Bildzeile auf einmal abgerastert. Das „Pinhole“ wird durch Schlitzblende ersetzt.
- konfokale Mikroskope mit rotierender Scheibe: Die Methode funktioniert durch Abrastern mit vielen fokussierten Lichtstrahlen. Dabei wird eine breitbandigere Lichtquelle (Laser, Bogenlampen und Leuchtdioden) verwendet. Anstatt der konfokalen Blenden enthält diese Bauart die sogenannten Nipkow-Scheiben. Hierdurch entfällt das laterale Scannen der Probe.

Das konfokalen Messverfahren kann entweder im Reflexionsmodus oder im Fluoreszenzmodus erfolgen [49].

Zusätzlich soll noch die konfokale Weißlichtmikroskopie erwähnt werden, bei der anstatt einen Laser weißes Licht verwendet wird. Auf dieser Weise werden auch Farbbildungen mit einem konfokalen Mikroskop ermöglicht.

**Vor- und Nachteile** Die Vorteile dieser Methode sind die Möglichkeit, virtuelle optischen Schnitte mit Detailinformationen auch in axialer Richtung (erlaubt Schnitte in alle 3 Raumrichtungen) sowie eine 3D-Rekonstruktion des Objektes durchzuführen [186]. Zusammenfassend erscheint die konfokale Mikroskopie die Verbesserung der Lichtmikroskopie unter Verwendung einer konfokalen Blende. Der Nachteil besteht darin, dass je hohe die Vertikalauflösung ist, desto geringer der Vertikalmessbereich wird und umgekehrt. Dank der piezoelektrischen Verschiebung des Messobjektes in Richtung der optischen Achse kann eine Überwindung des sonst durch die Schärfentiefe eingeschränkten Messbereichs erreicht werden [197]. Die Methode ist sehr sensibel gegen Umwelteinflüssen wie Schwingungen, deswegen aufgrund der Verstärkung der vertikalen Auflösung, wird eine hohe Schwingungsschutz erforderlich [114].

**Auflösung** Die konfokale Messtechnik ermöglicht eine nanometergenaue Messung [156]. Die Auflösungen liegen lateral je nach Vergrößerung bei 0,5-5  $\mu\text{m}$  und vertikal bei 0,01 bis 1  $\mu\text{m}$ . [12]

**Anwendung** Die konfokale 3D-Mikroskopie kann in der Qualitätssicherung von Werkzeugen eine Anwendung finden, wodurch eine sichere Verschleiß- und Gütebeurteilung ermöglicht wird [13].

### 5.1.3 Fokus-Variation

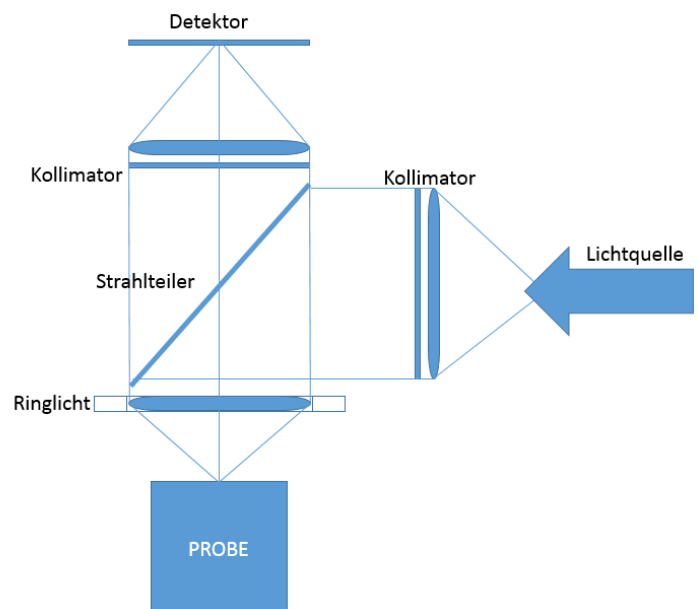
**Aufbau** Die Bestandteile eines Messsystems mit Fokus-Variation sind: Sensorkopf mit polychromatische Lichtquelle (weißes LED), Optik, Objektivrevolver, z-Tisch, x/y-Tisch, Passives Vibrationsabsorptionssystem [5] Das Verfahren arbeitet ähnlich wie die Konfokal-Mikroskopie, jedoch ohne Blenden im Strahlengang.

**Messprinzip** Nach DIN EN ISO 25178-6 [1] wird die fokusvariierende Mikroskopie folgendermaßen definiert:

"Methode zur Messung des Oberflächenprofils, bei der die Schärfe des Bildes der Oberfläche (oder eine andere Eigenschaft des reflektierten Lichts im optimalen Brennpunkt) in einem optischen Mikroskop dazu verwendet wird, die Höhe in jedem Punkt auf der Oberfläche zu ermitteln."

Der basierende auf Fokus-Variation Prinzip der Messung erfolgt berührungslos, optisch und dreidimensional. Die geringe Tiefenschärfe der Optik wird angewendet, damit die Tiefeninformation einer Oberfläche abgeleitet werden können. Dazu wird die Abhängigkeit der Schärfenvariation von der Oberflächentopografie relativ zum Abstand der Optik analysiert [5]. Auf dieser Weise werden die Ebenen mit unterschiedlicher Position des Fokuses erfasst und dadurch wird die Schärfe der Bilder erhalten.[184]

**Vor- und Nachteile** Der Vorteil der Fokus-Variation besteht darin, dass sie dank fehlender Abschattung für Proben mit steilen Flanken verwendet werden kann. Das Ringlicht verlängert die Beleuchtungsapertur. Die Durchführung von Messungen der rauen Oberflächen ist realisierbar. Die hohe Mess- und Wiederholgenauigkeit spielt eine wichtige Rolle bei den Endergebnissen. Das Messsystem



**Abb. II.11:** Fokus-Variation-Messaufbau

liefert Farbinformationen und ist unempfindlich gegenüber stark variierenden Reflexionsbedingungen. Nachteile sind dabei der relativ geringe Abstand zum Messobjekt und die nicht absolute Messung. Noch dazu sind zu vielen beweglichen Komponenten vorhanden, was ungünstig erscheint.[199]

**Auflösung** Das Messsystem ist flächenbezogen und extrahiert zwischen 2 und 200 Millionen Messpunkten. Der laterale Messbereich (X, Y) liegt zwischen  $0,14 \times 0,1 \text{ mm}^2$  und  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . In Abhängigkeit von dem Objektiv beträgt eine maximale Scanhöhe (Z) von 3,2 mm bis 22 mm [184]. Durch optimierten Hardware- und Softwarekomponenten kann eine laterale Auflösung von 500 nm und eine vertikale Auflösung bis zu 10 nm erreicht werden.[12]

**Anwendung** Diese Methode wird in der optischen Oberflächenmesstechnik und bei der Untersuchung komplexer geometrischer Komponenten eingesetzt. Dadurch können Form-, Willigkeit-, Rauheits-, Flächen- und Volumenvermessungen an den Proben vorgenommen werden. Die Methode der Fokus-Variation findet Einsatz in der Forschung und Entwicklung, sowie in der industriellen Qualitätssicherung wie Werkzeugmesstechnik oder Mikroproduktion. Das Messsystem ist auch in laufende Produktion integrierbar. [184]

## 5.2 Härtemessung

Die Härte gilt als eine „einfache“ [188] Werkstoffkenngröße, da dieser Begriff eine mechanische Material- und nicht eine Systemeigenschaft bezeichnet. Die Werkstoffeigenschaft beruht auf die Kombination aus Streckgrenze und Anfangsverfestigung des Materials. Auf Basis dieser Kenngröße werden häufig Vergleichsmessungen durchgeführt [105], deshalb gehört die Härtemessung zu den häufig verwendeten Materialprüfmethoden. Nach Schmidt u. a. [196] kann die Härte aber nicht eindeutig das mechanische Verhalten bestimmen, aufgrund ihrer zahlreichen Wechselbeziehungen mit der Festigkeit oder dem Verschleißwiderstand. Ein Hauptvorteil der Härtemessung ist, dass sie ohne besondere Testtechnik und Probenvorbereitung leicht durchgeführt werden kann.

Dabei lassen sich drei Arten von Härtemessverfahren abgrenzen: quasistatisches, dynamisches und Ritz- Verfahren. Die klassischen Verfahren nach Brinell, Vickers und Rockwell sind quasistatische Methoden und sind international genormt[196]. Das Prüfverfahren beruht allgemein auf die Messung der Eindringhärte (des entgegengesetzten mechanischen Widerstands) aus dem Eindruck eines harten Prüfkörpers mit bestimmter geometrischen Form unter einer vordefinierten Last senkrecht zur Prüfstückoberfläche [96]. Die Eigenschaften<sup>29</sup> des Prüfstücks haben einen Einfluss auf die Härteprüfung und sollen deswegen berücksichtigt werden. Die erwartende Härte bestimmt die Auswahl des Eindringkörpers (z. B. Kugeldurchmesser) und der

<sup>29</sup>die Oberfläche, die Masse, die Geometrie, Schwingungen im System, magnetische Eigenschaften, die Temperatur, die Einwirkdauer (Aufbringzeit+Lasteinwirkzeit) u. a. [91]

Prüfkraft. Die Einsatzgrenzen der verschiedenen Härteprüfverfahren sind unterschiedlich wie folgt:

### Verfahren

- nach Brinell DIN EN ISO 6506 [165]

Wichtige Parameter sind dabei der Kugeldurchmesser vom Prüfkörper (Hartmetallkugel), die Prüfkraft, die Bestimmung der Mittelwert aus (z. B. drei) Messungen und die Standardabweichung. Die verwendete dabei Formel für die Berechnung der Brinellhärte lautet:

$$HB = \frac{\text{Prüfkraft}}{\text{Eindruckoberfläche}} = \frac{2F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{II.18})$$

Zu berücksichtigen sind die werkstoffbedingte (im Fall einer elastischen Rückstellung)/ versuchsbedingte elastische Verformung der Eindruckkugel und die Beobachtungsfehler (überschreiten der Vorlast, ungenaue Nullstellung, Ablesen der falschen Skala u. a.), die nach Tabor [218], Nitsche [162] und Norm [165] angegeben sind. Die häufig verwendete Abkürzung HBW steht für Härte Brinell Wolframcarbid, wobei Wolframcarbid das Material bezeichnet, aus dem die Kugel hergestellt ist[165].

- nach Vickers DIN EN ISO 6507 [164]

Das Eindruckkörper ist in Form einer geraden Pyramide mit quadratischer Grundfläche, 136° Winkel zwischen den gegenüberliegenden Seiten. Wichtig dabei ist die Prüfkraft, die senkrecht in die Oberfläche gedrückt wird und aus dem Prüfeindruck durch den Mittelwert der Diagonalen wird die Vickershärte (HV) berechnet. Die normativ festgelegte Einwirkdauer beträgt 10 bis 15 s. Als Vorteil des Verfahrens ergibt sich sein Anwendungsspektrum: sowohl für härteste als auch für sehr weiche Materialien und die Möglichkeit zum Ausmessen sehr dünner Werkstoffschichten. Die Formel für die Berechnung der Vickershärte lautet:

$$HV = \frac{0,1891 * F}{d^2} \quad (\text{II.19})$$

Die Fehlermöglichkeiten bei der Messdurchführung nach Vickers sollen sowohl berücksichtigt werden. Es kann zum Einsinken der Eindruckränder bei nicht verfestigten Werkstoffen und zu einer Wallbildung des Eindrucks bei stark kaltverfestigten Proben kommen. Weitere Erklärung des Verfahrens findet sich bei Nitsche [162],[229]

- nach Rockwell DIN EN ISO 6508 [166]

Es gibt unterschiedliche Skalen nach welcher das Eindruckkörper bestimmt wird:

- A, C und D: Diamantkegel mit 120° Spitzenwinkel
- B, E–H und K: Sinterhartmetallkugel
- N: Diamantkegel mit 120° Spitzenwinkel mit einer Kugelkalotte als Spitze ( $r = 0,2 \text{ mm}$ )
- T: Stahl- oder Hartmetallkugel mit 1,5875 mm Durchmesser

Es ist zu beachten, dass Kontamination der Probe oder des Eindringkörpers einen großen Fehler zur Folge haben können. Eine spätere Nachkontrolle der Messungen mit optischer Messwerterfassung<sup>30</sup> ist nicht mehr möglich [162]. Außerdem können Randeinsenkungen oder -erhebungen nicht berücksichtigt werden [218].

**Protokollieren der Härtemessung** Bei der Protokollierung der Messung wäre ratsam, gewisse Beschreibung einzuhalten, damit der Prozess reproduzierbar sein könnte. Dabei soll die folgende Dokumentation vorhanden sein: Der Prüfobjekt soll definiert werden – Größe/Abmessung/Masse, Werkstoff, falls vorhanden auch sein Wärmebehandlungszustand, Grundwerkstoff, Schweißnaht, Oberflächenzustand. Das Prüfgerät oder genauer gesagt das Prüfprinzip nach Norm und die verwendete Prüfsonde(Eindringkörper) sind zu erwähnen. Dabei soll auch die Prüflast und die Lasteinwirkzeit dokumentiert werden. Die Prüfergebnisse und der Prüfer sind auch wesentlich für die Durchführung des Messverfahrens.[164–166]

### 5.3 Qualitative Bewertung/ Bestimmung der chemischen Zusammensetzung

#### 5.3.1 Raman-Spektroskopie

**Messprinzip** Die Raman-Spektroskopie ist eine analytische Messmethode (Schwingungsspektroskopie<sup>31</sup>) und basiert auf dem Emissionsspektrum, welches von der Probe ausgestrahlt wird.

Dabei wird eine monochromatische Lichtquelle (Laser) und mehrere Monochromatoren für die spektrale Trennung der Linien benötigt. Jede Moleküle von der Probe emittiert unterschiedlich die Photonen. Die Raman-Methode funktioniert mit unelastischer Streuung des Lichtes, die durch die zeitliche Änderung der Polarisierbarkeit von Molekülen hervorgerufen wird - „Stokes-Seite“ und „Anti-Stokes-Seite“ des Spektrums. Allgemein werden die Photonen mit einer niedrigeren Energie als diese von der Quelle als Stokes-Linien bezeichnet und die Photonen, die höheres Energieniveau als die ursprüngliche Quelle aufweisen, werden als Anti-Stokes-Emissionen bezeichnet. Durch elastische Stöße der Lichtquanten mit den Molekülen der Probe entsteht die Rayleigh-Streuung, welche nicht relevant für die Raman-Spektroskopie erscheint [74, 97].

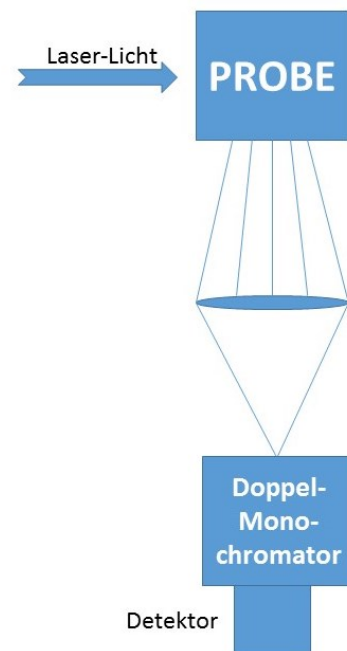


Abb. II.12: Raman-Messmethode

<sup>30</sup>im Gegensatz zu den übrigen Prüfverfahren

<sup>31</sup>Die Schwingungsspektroskopie ist klassifiziert als analytische Messmethode und beschäftigt sich mit Zustandsänderung (Anregung der Normalschwingungen) eines Moleküls durch die Absorption von Lichtquanten der Energie; Teilbereich der Molekülspektroskopie.[190]

Im Gegensatz zur elastischen Streuung ist die Raman-Streuung nicht mit dem Primärlicht kohärent. Die die inelastische Streuung charakterisierenden Frequenzverschiebungen sind von den Moleküleigenschaften der Messstelle stark abhängig und nicht von der Frequenz des Primärlichts.[90]

Die Intensität und die Frequenz der anregenden Laserstrahlung haben direkten Einfluss auf die Intensitäten der Raman-Linien. Die Intensität der Raman-Banden ist proportional der Anzahl streuender Moleküle.[151, 174, 175]

$$I \sim \nu^4 * I_0 * N * \left(\frac{\delta g}{\delta q}\right) \quad (\text{II.20})$$

wobei:

$N$  - Anzahl der streuenden Moleküle

$I_0$  - Intensität der anregenden Laserstrahlung

$\nu$  - Frequenz der anregenden Laserstrahlung

$\frac{\delta g}{\delta q}$  - Änderung der Polarisierbarkeit

Die Raman-Verschiebung [ $cm^{-1}$ ] wird durch die Wellenzahl angezeigt, wobei die Wellenzahl  $\tilde{\nu}$  den reziproken Wert der Wellenlänge  $\lambda$  bezeichnet

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} \quad (\text{II.21})$$

wo  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $\nu$  die Frequenz der Photonen ist.

Bei einer Anregungswellenlänge  $x$  (in nm) wird beispielsweise ein Raman-Peak von  $y$  (in nm) erhalten. Die Raman-Verschiebung [ $cm^{-1}$ ] (Wellenzahl) wird durch Umwandlung der Wellenlängen wie folgt bestimmt [151, 175]:

$$\tilde{\nu} = \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y}\right) \quad (\text{II.22})$$

Die Kohlenstoffmodifikationen haben mehrere Banden im Spektrum. Während bei dem Diamanten ein scharfer Peak bei ca.  $1332 \text{ cm}^{-1}$  auftritt, erscheint im Raman-Spektrum bei dem Graphit ein Peak bei  $1580 \text{ cm}^{-1}$ , der sogenannte G-Peak. Der Grund dafür ist, dass Graphit aus  $sp^2$ -gebundenem Kohlenstoff in planaren Schichten besteht, in denen die Bindungsenergie der  $sp^2$ -Bindungen höher ist als die  $sp^3$ -Bindungen von Diamant. Die Bande bei  $2700 \text{ cm}^{-1}$  ist als G'-Band oder 2D-Band bekannt. Die D-Bande oder Defekt-Bande erscheint in  $sp^2$ -hybridisierten Kohlenstoffmaterialien. Basierend auf dem Verhältnis der D- und G-Banden wird eine Schätzung der Defektdichte erhalten. Für die Materialien, wie pyrolytischer Graphit, handelsübliche Graphite, Aktivkohle, Lampenruß und Glaskohlenstoff, wird bei  $1350 \text{ cm}^{-1}$  die D-Bande nachgewiesen.[128, 226]

Die Form eines Raman-Peaks ist genauso wichtig wie seine Position, da dies die molekulare Struktur des Materials. Die Breite des Peaks zeigt den Kristallgehalt und die Höhe die Sub-

stanzkonzentration. Wenn eine Verschiebung des Peaks beobachtet wird, kann das als eine Auswirkung durch mechanische Beanspruchung der Stelle bezeichnet werden [193, S. 52]. Eine Dehnung führt zu einer Verschiebung der Position der Probe hin zu kleineren Wellenzahlen, eine Stauchung bewirkt den gegenteiligen Effekt. [246]

**Vor- und Nachteile** Bei der Raman-Spektroskopie ist die Messung der Proben in den drei Aggregatzuständen (Gase, Flüssigkeiten und Festkörper) durchführbar. Der Vorteil dabei ist, dass die Messmethode völlig zerstörungsfrei, ohne aufwendige Probenvorbereitung und nicht invasiv ist. Aufgrund der schwachen Raman-Streuung des Wassers, kann das Fluid als Hilfs- und Lösungsmittel eingesetzt werden. Der Durchmesser der Laserlichtquelle ( $\leq 1$  mm) ist mit solchen Dimensionen, dass die Durchführung der spektroskopischen Untersuchung mit kleinster Probenmengen möglich ist [122]. Die Raman-Experimente sind einfach durchführbar und bedürfen keines gesondert geschulten Personals. Die Messzeit ist relativ kurz, was eine schnelle Rückmeldung ermöglicht und vorteilhaft bei einer online-Überwachung erscheint. Die Ergebnisse der Raman-Spektroskopie zeigen eine gute Reproduzierbarkeit [67].

Der Nachteil von Raman-Spektroskopie ist jedoch die Tatsache, dass wenn die Anregungswellenlänge der Absorptionsbanden der Probe/ des Lösungsmittels im Bereich des Lasers liegt, werden die Proben durch die intensive Laserstrahlung aufgeheizt, aber normalerweise gilt die Methode als zerstörungsfrei, deswegen sollten die Proben nicht chemisch verändert [92, 141].

**Typische Anwendung** Damit die Oberfläche der Graphitplatten untersucht werden kann, wird eine passende qualitative Messmethode benötigt, um die chemische Zusammensetzung und Veränderungen der Proben vor und nach der tribologischen Versuche festzustellen. Bei der Betrachtung der Einsatzgebiete der Raman-Spektroskopie stützt sich Fechner [67] auf die Arbeit von Williams u. a. [249], indem er betont, dass die Raman-Spektroskopie eine gute Methode zur Untersuchung von Kohlenstoffverbindungen ist. Da diese Methode molekülspezifisch ist, können alle unterschiedlichen Modifikationen der Kohlenstoffverbindungen wie Diamant, Graphit und Ruß charakterisiert werden. Nach Nalpantidis [160, S. 54] sind viele weitere Publikationen zum Thema Raman-spektroskopische Untersuchungen an Graphit referenziert. Im Allgemeinen können durch Kombinieren der Raman-Mikroskopie mit anderen Oberflächenabbildungstechniken die chemische Zusammensetzung und die Morphologie einer Probe korreliert werden.

## 5.4 Verschleißmessung

Nach Definition ist der „Abrieb“ Massen- oder Volumenverlust (pro Gleitstrecke oder -zeit) eines Werkstücks. Dabei wirken entweder ein Verschleißmechanismus allein oder eine Kombination mehrerer Verschleißmechanismen, die eine kontinuierliche Entfernung von Material aus festen Oberflächen über eine längere Gleitdistanz bewirken und sind im Zusammenhang mit der Reibungskraft, die der Bewegung entgegenwirkt. [17]



**a Verfahren** Herkömmliche Techniken der Verschleißmessung umfassen die Verwendung einer Präzisionswaage (Ultramikro- und Mikrowaagen, Analysenwaagen) zur Messung des Gewichtsverlustes, Profilometrie oder die Verwendung eines Mikroskops zur Messung der Verschleißtiefe oder Querschnittsfläche einer Verschleißspur, um den Verschleißvolumenverlust zu bestimmen. [142]

Die Waagen werden in verschiedene Klassen gegliedert, wobei es sich nach kleinste Dezimalstelle der Anzeige und Höchstlast unterscheiden lässt: [123, S. 141]:

- Bei den Makrowaagen ist der Teilungswert meist 0,1 mg und die Höchstlast ist über 100 g;
- Bei den Halbmikrowaagen ist die Höchstlast meist 50 g bis 100 g und der Teilungswert beträgt normalerweise 0,01 mg;
- Mikrowaagen: Höchstlast meist 5 g bis 50 g, Teilungswert meist 0,001 mg;
- Ultra-Mikrowaagen: Höchstlast meist kleiner als 5 g, Teilungswert meist 0,0001 mg.

Es ist wichtig, den Wägebereich und die Ablesbarkeit der Waage zu berücksichtigen.

**Massenverlust** Die Massenverlustmessung mit einer Laborwaage ist eine bequeme Methode zur Verschleißmessung, insbesondere wenn die verschlissene Oberfläche unregelmäßig und unsymmetrisch ist. Die zu messende Probe wird sorgfältig gereinigt und das Gewicht vor und nach einem Verschleißtest gemessen. Der Gewichtsunterschied vor und nach dem Test stellt den Gewichtsverlust dar, der durch den Verschleiß verursacht wird. Die Einheit kann in Gramm oder Milligramm sein.[142]

Verschleißmasse	Verschleißrate
$\mu\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{m}$
$\text{g}$	$\mu\text{g}/\text{N}$
	$\mu\text{g}/\text{Nm}$

**Tab. II.1:** Massenverlust

**Volumenverlust** Die Messmethode erfolgt durch eine direkte Messung mit einer Präzisionswaage, wobei die gesuchte Masse aus dem Volumenverlust mittels der bekannten Materialdichte berechnet wird [142].

Das Verschleißvolumen wird normalerweise aus der Tiefe, Länge, Breite entsprechend der Geometrie der Verschleißspur berechnet. Ein Oberflächenprofilometer, z. B. ein Stifttyp oder manchmal ein Mikroskop mit Skala wird für die Messung verwendet. Die Berichtseinheit für den Verschleißvolumenverlust ist  $\text{mm}^3$  oder  $\mu\text{m}^3$ . Der Verschleißvolumenverlust ermöglicht einen besseren Verschleißvergleich zwischen Materialien mit unterschiedlichen Dichten. Es ist jedoch nicht einfach, den Volumenverlust zu messen, wenn eine Verschleißspur unregelmäßig ist. In diesem Fall kann der Massenverlust zuerst gemessen werden und der Volumenverlust wird berechnet, wenn die Materialien einheitlich sind und ihre Dichte bekannt ist.

Verschleißvolumen	Verschleißrate
$\text{mm}^3$	$\text{mm}^3/\text{m}$
	$\text{mm}^3/\text{N}$
	$\text{mm}^3/\text{Nm}$

**Tab. II.2:** Volumenverlust

Oberflächenprofilometrie oder Mikroskopietechniken können für die Messung verwendet werden, wenn es um die Berechnung aus Tiefe, Breite, Verschleißprofil und / oder anderen Messdaten einer Verschleißspur geht. Eine zweite Möglichkeit ist die Berechnung aus dem Masseverlust für Material mit einer bekannten Dichte, wie schon erwähnt[142].

**Linearer Dimensionsverlust** Die Messung des Verschleißes durch lineare Dimensionsänderung ist in vielen technischen Situationen sehr nützlich, in denen bestimmte Abmessungen wie Länge, Dicke oder Durchmesser für die normale Funktion des Systems wichtiger sind. Ein Oberflächenprofilometer, z. B. ein Mikrometer oder ein Mikroskop können verwendet werden. Die Einheit für den linearen Abmessungsverlust kann  $\mu m$  oder mm sein. [142].

Verschleiß	Verschleißrate
<i>mmg</i>	<i>mm/Jahr</i>
<b>g</b>	<i>mm/Std</i>

**Tab. II.3:** Linearer Dimensionsverlust

**b Verschleißmessgrößen** Nach Tribologie [225, S. 33] ist betont, dass die Verschleißmessgrößen keine Werkstoff-, sondern Systemkenngrößen sind und deswegen ist die Angabe von Zahlenwerten dieser Messgrößen dann wichtig, wenn die Systemstruktur und das Beanspruchungskollektiv bestimmt sind. Die Unterscheidung von Verschleißmessgrößen erfolgt nach Bobzin [27, S. 59] und Bartz u. a. [10, S. 831] durch:

- direkte Verschleißmessgrößen: Diese beschreiben die Gestalt- oder Massenänderung einer tribologischen Komponente
  - Linearer Verschleißbetrag
  - Planimetrischer Verschleißbetrag
  - Volumetrischer Verschleißbetrag
  - Massenmäßiger Verschleißbetrag
  - Relativer Verschleißbetrag: Verhältnis der Verschleißbeträge eines verschleißenden Körpers und eines unter gleichen Bedingungen verschleißenden Referenzkörpers
  - Verschleißwiderstand: Reziprokwert des Verschleißwertes
  - Relativer Verschleißwiderstand
  - Verschleißgeschwindigkeit
  - Verschleiß-Weg- Verhältnis
- bezogene Verschleißmessgrößen: direkte Messgröße auf eine Bezugsgröße normiert (Verschleißrate)
  - Verschleiß/Durchsatzverhältnis
- indirekte Verschleißmessgrößen: Angabe über Verlust der Funktionsfähigkeit eines Tribosystems bezogen auf Dauer oder Durchsatz
  - verschleißbedingte Gebrauchsdauer
  - Gesamtgebrauchsdauer

– verschleißbedingte Durchsatzmenge

## 5.5 Luftfeuchtigkeitregelung und -messung

Ganz wichtig erscheint der Witterungseinfluss auf die tribologischen Systeme, insbesondere bei einem Reibpartner aus Graphit. Unterschiede in der Luftfeuchtigkeit zwischen verschiedenen Teilen der Welt können einen aussagekräftigen Vergleich der im Labor erzielten Ergebnisse verhindern. Daher sollten die Umgebungsbedingungen und insbesondere die Luftfeuchtigkeit während der Versuche berücksichtigt werden.

Dabei lässt sich zwischen relativer und absoluter Luftfeuchtigkeit unterscheiden. Die Masse des Wasserdampfs (Wassergehalt oder Dampfmenge in der Luft) in einem bestimmten Luftvolumen wird durch die absolute Luftfeuchtigkeit definiert. Während die relative Luftfeuchte die Menge an Wasserdampf ist, die in der Luft enthalten ist, bezogen auf dem Sättigungsdampfdruck bei der jeweiligen Temperatur.[94, S. 208] Der höchste mögliche Wert für  $\varphi$  ist 1,00, da der Wasserdampfpartialdruck  $e$  den Sättigungsdampfdruck  $E$  nie überschreiten kann und bedeutet, dass nicht mehr Wasserdampf in der Luft aufgenommen werden kann. Durch die folgende Formel wird die relative Luftfeuchtigkeit berechnet:

$$\varphi = \frac{e}{E} \cdot 100 \% \approx \frac{\mu}{\mu_s} \cdot 100 \% \approx \frac{\rho_w}{\rho_{w,max}} \cdot 100 \% \approx \frac{s}{S} \cdot 100 \% \quad (\text{II.23})$$

$\varphi$  = Relative Feuchte (-)

$e$  = Partialdruck Wasserdampf (Pa)

$E$  = Sättigungsdampfdruck von Wasserdampf (Pa)

$\mu$  – Mischungsverhältnis

$\mu_s$  – Mischungsverhältnis bei Sättigung

$\rho_w$  – absolute Luftfeuchtigkeit

$\rho_{w,max}$  – maximale absolute Luftfeuchtigkeit

$s$  – spezifische Luftfeuchtigkeit

$S$  – Sättigungsfeuchtigkeit

Nach Stachowiak u. a. [208] ist ein anderer Aspekt von Feuchtigkeitsmessungen diskutiert und genauer: die Feuchtigkeitsabweichungen des gemessenen in der Nähe des Tribokontakts Messwertes von dem Umgebungswert. Die infolge der Reibung erzeugte Wärme senkt normalerweise die relative Luftfeuchtigkeit um die Testprobe. Daher gibt es anscheinend keine Berichte über Feuchtigkeitsschwankungen zwischen einem dynamischen Kontakt und seiner Umgebung.

Zur weiterführenden Literatur kann das Buch von [198] eingesehen werden, in dem weitere Formeln zur Berechnung mit höheren Genauigkeiten (Realgaskorrektur) und mit der Berücksichtigung des enhancement-Faktors anhand der Approximationen nach Glück gefunden werden können. Diese Berechnung wird in der bestehenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist ein Maß dafür, wie viel Wasserdampf in der Raumluft enthalten ist. Ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt, beträgt der Wert 100 %, bei völlig trockener Luft 0 %. In der vorliegenden Arbeit wurde angenommen, dass der Wert ein wesentliches Kriterium für die Schmierwirkung des Graphits ist.

In der Praxis ist die Luftfeuchtigkeit allerdings relativ schwierig einzustellen, wenn der Prüfraum nicht über eine entsprechende Feuchtigkeits-Ausrüstung verfügt. Im Allgemeinen funktioniert dies durch Verdampfen<sup>32</sup>, Verdunsten<sup>33</sup> oder Zerstäuben.

Es existieren zwei Arten von Luftfeuchtigkeitsregelung und genauer: Isotherme und Adiabate Systeme für Regelung der Luftfeuchtigkeit im Prüfraum. Adiabatische Verfahren mit Sprüh-(Düsen-Luftbefeuchtung) oder Verdampfungswasser (Dampfluftbefeuchter) führen zur Abkühlung der Luft. Ein charakteristisches Merkmal der isothermen Befeuchtung der Luft ist der Prozessablauf bei konstanter Temperatur. Gesättigter Dampf wird direkt der Luft zugeführt, wobei eine externe Wärmequelle für seine Produktion benötigt wird [107]. Bei dieser Art der Befeuchtung erhöht sich die Enthalpie der Mischung von Luft und nassem Dampf aufgrund erhöhter latenter Wärme. Zur gleichen Zeit, wenn die absolute Feuchtigkeit (und die relative Feuchtigkeit) ansteigt, bleibt die Lufttemperatur konstant. Die adiabate Kühlung erfolgt hingegen bei konstanter Enthalpie [117, S. 236]. Der Phasenübergang vom flüssigen in den dampfförmigen Zustand erfolgt durch die Verdampfung des Wassers, wobei die benötigte Wärme (latente Wärme) der Luft entnommen wird und dadurch kühlt sich diese ab [198, S. 1205]. Die Einstellung verschiedener relativer Feuchten kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen. Mittels wässriger Schwefelsäurelösungen oder gesättigter Salzlösungen kann die relative Feuchte auch in geschlossenen Gefäßen wie Klimakammer eingestellt werden. Der Wasserdampfdruck wird bei beiden Varianten über die Lösung reduziert. Wenn Schwefelsäurelösungen verwendet werden, stellt sich mittels sukzessiver „Verdünnung“ des Wassers mit der Säure eine kontinuierliche Feuchtereihe ein [76, S. 113]. Hier werden die Methoden genauer beschrieben:

**gesättigte Salzlösung** Die Einstellung der relativen Luftfeuchtigkeit kann durch Einbringen gesättigter Salzlösungen in das abgeschlossene Messvolumen erfolgen, wobei 4 bis 72 Stunden erforderlich sind, um einen definierten Wert der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig von der Salzlösung einzustellen. Bei der Auflösung des Salzes, wird die relative Feuchtigkeit über der Lösung niedriger. [121, S. 80],[135]

Die relative Feuchte über Schwefelsäurelösungen oder gesättigten Salzlösungen weist eine sehr geringe Abhängigkeit von der Temperatur. Wenn Salzlösungen verwendet werden, sinkt meistens die relative Feuchte. Sehr starke Temperaturabhängigkeit ist nur bei Calciumchloridhexahydrat zu beobachten. [76, S.114]

<sup>32</sup>Verdampfen den Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand bei Siedetemperatur

<sup>33</sup>Verdunsten bezeichnet den Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand unterhalb der Siedetemperatur

**wässrige Schwefelsäurelösungen** Wenn Säurelösung verwendet wird, bewirkt diese die Zunahme der Temperatur und die relative Feuchtigkeit steigt. Nachteilhaft ist allerdings, dass ihre Konzentration sich im Kontakt mit einem größeren Luftvolumen leicht ändern kann. Wenn die Konzentrationen oberhalb 85 % ist, soll der Dampfdruck der Säure nicht mehr vernachlässigt werden, weil dies eine störende Auswirkung wegen Adsorption der Schwefelsäuredämpfe haben kann. Wenn weniger als 5 % Feuchtigkeit eingestellt wird, ist es schwierig, absolute Genauigkeit zu erreichen.[76, S.114]

### 5.5.1 Methoden zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit

Im Allgemeinen ist die Feuchtigkeitsmessung und Kontrolle von erstrandiger Bedeutung, da die Luftfeuchte in der Umgebung als Triboelement einen starken Einfluss auf die Reibungs- und Verschleißprozesse hat. Die richtige Messmethode ist Voraussetzung für eine sinnvolle Anpassung und Kontrolle der relativen Luftfeuchtigkeit im Prüfraum. Dabei werden verschiedene Verfahren zur Messung der relative Wasserdampfgehalt der Luft angewandt. Im Alltag kommen aber vor allem Absorptionshygrometer zum Einsatz, während bei tribologischer Studien zur Messung der Feuchtigkeit herkömmliche Thermohygrometer (Feucht- und Trockenthermometer<sup>34</sup>) eingesetzt werden [133, 134]. Heutzutage existieren viele Messverfahren für die Feuchtigkeit. Es werden zwei große Gruppen unterschieden, und zwar direkte und indirekte Messmethoden. Nach Weber [237] sind mehrere Möglichkeiten aufgelistet, durch welche die relative Feuchte bestimmt werden kann, wie z. B.: kapazitive Sensoren, Faserhygrometer, Hygrogeber, Hygrostaten, Hygrographen, resistive Sensoren und keramische Sensoren. Schon *Leonardo da Vinci* entwickelte Hygrometer [181]. Im Folgenden werden nur manche von diesen kurz erläutert:

**Taupunktmethode** mittels Taupunktspiegelhygrometer

Diese Methode beruht auf dem Vergleich der Temperatur an zwei Messpunkten. Einer der beiden Messpunkte wird durch die tatsächliche Raumtemperatur bestimmt. Der andere Messpunkt stellt ein Spiegel dar, welcher abgekühlt wird, bis eine Feuchtigkeit entsteht. Mittels einer Dampfsättigungskurve wird die absolute Luftfeuchte für die Temperatur im gemessenen Raum ermittelt. Mithilfe der Formel für die relative Luftfeuchte kann diese genau berechnet werden[94]. Das Hygrometer basiert auf dem Taupunkt. Der Taupunkt ist die Temperatur der feuchten Luft, auf die Luft abgekühlt werden muss, bis sie mit Wasserdampf gesättigt wird, sodass dieser anfangen kann, zu kondensieren oder als Tau abzuscheiden. Die relative Luftfeuchtigkeit beim Taupunkt ist 100 %, was bedeutet, dass die Sättigungsmenge erreicht ist [79]. Die Vor- und Nachteile dieser Methode können in der folgenden Auflistung nach Fa.Testo[150] gesehen werden:

---

<sup>34</sup>dry and wet bulb thermometer

**Vorteile**

- Sehr genaue Methode (bis zu  $\pm 0,1$  °Ctd)
- weiter Messbereich
- Stabilität der Messung auf Dauer
- kürzeste Reaktionszeiten
- zuverlässig
- Präzision der Laborreferenz

**Nachteile**

- Sehr hohe Genauigkeit der Temperaturmessung erforderlich
- Größere Tischgeräte
- Wartungszeit
- teuer

**Hygroskopie** mittels Absorptionshygrometer

Dieses Verfahren ist im Vergleich zum Taupunktverfahren viel einfacher und wird unter Verwendung von mechanischen oder elektrischen Hygrometern durchgeführt, die auf einem hydrophilen Material wie einem Haar- oder Faserhygrometer basieren [240, S. 445]. Die Messwerte werden heutzutage von modernen Absorptionshygrometern über einen digitalen Sensor bestimmt und basieren auf der Änderung des elektrischen Widerstands oder der elektrischen Kapazität einer Schicht aus einem hygroskopischen Kunststoffpolymer [86]. Die Vor- und Nachteile dieser Methode können in der folgenden Auflistung nach Fa. Testo [150] gesehen werden:

**Vorteile**

- Stromzufuhr nicht notwendig
- unmittelbare Angabe
- günstige Anwendungen

**Nachteile**

- lange Wartungszeit
- Regenerierung (oft)
- Hysterese
- Einsetzbarkeit im Bereich 15 % - 85 %rF bis einer Temperatur von 50 °C
- ungenau
- langsame Messung
- Empfindlichkeit gegen Kontamination
- transportempfindlich

**Psychrometer** Die Genauigkeit des psychrometrischen Messverfahrens ist sehr hoch, deshalb findet es oft eine Anwendung bei Wetterstationen und Referenzgeräten [94]. Das Psychrometer besteht aus zwei Messgeräten zur Bestimmung der Temperatur (aus zwei Thermometern). Das sogenannte Feuchtthermometer, ist mit feuchtem Material umwickelt, das andere Thermometer - das Trockenthermometer - nicht. Durch die Verdunstung der Feuchtigkeit des Materials wird dem feuchten Thermometer Wärme entzogen. Folglich wird das Feuchtthermometer eine niedrigere Temperatur anzeigen als das trockene Thermometer. Dabei wird die Temperaturdifferenz gemessen und Psychrometerformeln oder -diagramme werden verwendet, um die relative Luftfeuchtigkeit und andere Parameter zu bestimmen [86, 143]. Die positiven und

negativen Seiten dieser Methode sind in der folgenden Liste gemäß dem Katalog von Fa. Testo [150] zu sehen:

**Vorteile**

- Anerkannte Methode
- Genau bis  $\pm 2$  %rF möglich
- Unempfindlich gegen aggressive Medien

**Nachteile**

- Hoher Wartungsaufwand
- Konstante Luftströmung erforderlich
- ungeeignet für Dauermessung ,Maximale Messdauer 12 min
- Sehr hohe Ungenauigkeiten
- Ablesung der Messung erst nach ca. 2 min möglich
- Vor jeder Messung muss die Temperatur an die Umgebungstemperatur angeglichen werden

**weitere Messmethoden** Weitere Messmöglichkeiten sind mittels Infrarotabsorption oder Feuchtesensoren (z.B. Polymersensoren). Bei den Feuchtesensoren ist die Temperaturbeständigkeit und die Genauigkeit zu berücksichtigen. Die Sensoren müssen periodisch kalibriert werden, um sicherzustellen, dass sie nach ihren Spezifikationen arbeiten. [237]

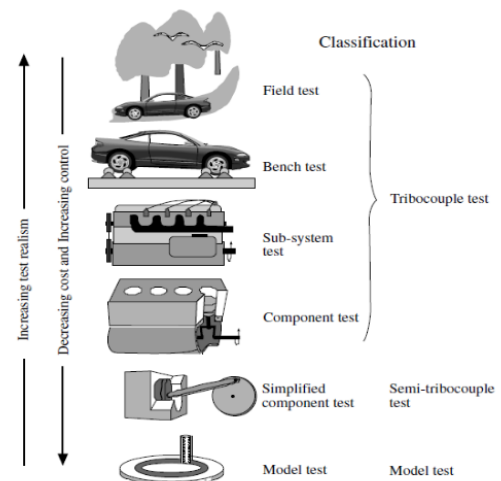
## 6 Tribometrie, Selektion eines Tribo-Tests

Die Gründe für die Durchführung eines Tribotests können sehr unterschiedlich sein, z. B. die Notwendigkeit einer guten Materialklassifizierung für vorhandene Geräte, die Auswahl von Materialien für neue Anwendungen oder, wie im vorliegenden Fall, das Ziel, das Verhalten der Graphit-Stahl-Tribokombination besser zu verstehen. Andere Gründe für die Tribotests scheinen die Bestimmung der Reibungs- und Verschleißigenschaften der verwendeten Materialien und die Untersuchung der Verschleißmechanismen bei ausgewählten tribologischen Anwendungen zu sein.[17]

### 6.1 Klassifikation

In der Regel ist es aus Kosten- und Zeitgründen nicht möglich, tribologische Untersuchungen von Bauteilen in einer Anlage direkt im Betrieb vor Ort durchzuführen. Deshalb werden tribologische Prüfungen in unterschiedlichen Kategorien durchgeführt [17, 55] :

1. Feldversuch (Praxistest)
2. Prüfstandversuch
3. Baugruppen- bzw. Bauteilversuch (Aggregatversuch)
4. Modellversuch am verkleinerten Aggregat
5. Modellversuch mit einfachen Bauteilen (Beanspruchungsähnlicher Versuch mit Probekörpern)
6. Modellversuch mit einfachen Proben



**Abb. II.13:** Übersicht der tribologischen Prüfkatgorien der DIN 50322[55] nach Bhushan [17]

Die Tribopartner im Tribo-Testsystem können je nach Typ im Allgemeinen unterschiedliche Formen haben wie Kugel, Stift, Prisma, Scheibe, Pyramide, Welle und Zylinder. Die Bewegungsart liegt im Bereich der Kinematik und ist von erstrangiger Bedeutung bei der Bestimmung der Tests. Ihre Interpretation hat entscheidende Rolle für die richtige Unterscheidung und Einstufung der Tribotests. Es besteht ein Unterschied zwischen rotierenden, bohrenden, oszillierenden, rollenden, gleitenden oder schlagenden Bewegungen, welche schon in [Unterunterabschnitt 1.2.2](#) erläutert wurden. Nach Bobzin u. a. [28, S. 19-20] ist die Tribokontaktfläche auch von großer Bedeutung und wird als symmetrisch oder asymmetrisch, konform oder kontraform definiert. Dabei ist der konforme Kontakt noch als Flächenkontakt zu bezeichnen, während der kontraforme Kontakt entweder als linien- oder punktförmiger betrachtet werden kann.



## 6.2 Versuchsplanung

Bei der Planung der Triboversuche soll zunächst der Hauptgrund für die Implementierung geklärt werden. Die Planungsphase hat eine erstrangige Bedeutung, um zukünftige Verschwendungen minimiert zu werden und aussagekräftige und reproduzierbare Endergebnisse erreicht zu werden. Dabei sollten solche Bedingungen in der Anwendung ausgewählt werden, die sich aus der realen Praxis ableiten und dadurch werden möglichst realistische Tests durchgeführt. Darüber hinaus ist es wichtig, die richtigen Referenzmaterialien im richtigen Form auszuwählen. Es soll sichergestellt werden, dass die richtigen Oberflächenschäden der und der korrekte Verschleißmechanismus im Versuch nachgeahmt werden. [17]

## 6.3 TAN (Tribological Aspect Numbers)

Eine Möglichkeit ist, den TAN-Ansatz zu verwenden, um den betrachteten tribologischen Zustand zu isolieren und dann den Prüfstandtest auszuwählen, der die gleiche TAN aufweist. Die TAN ist eine vierstellige Nummer, die eine tribologische Bedingung kennzeichnet. Die erste Ziffer identifiziert die Geschwindigkeits- oder Bewegungskennlinie. Die Kontaktfläche wird durch die zweite Ziffer identifiziert. Durch die dritte Ziffer wird die Art der Pressung (des Druck) angegeben. Und schließlich identifiziert die vierte Ziffer den Eintrittswinkel des Schmiermittels.[72, 192, 224]

Kontaktgeschwindigkeit	Kontaktfläche	Pressung	Winkel[°]
1) Unidirektional	1)Punkt/ Punkt	1) Unidirektional	1) 0
2) Zyklisch	2)Linie/ Linie	2) Hochfrequent	2) 75<...<90
3) Rollend/Rutschend	3)Punkt/ Fläche	3) Zyklisch	2) 65<...<75
4) Fretting	4) Linie/ Fläche		4) 40<...<55
	5)Fläche/ Fläche		5) 15<...<25
	6)Fläche/ Groß- Fläche		6) 10<...<15
	7)Offene,fixe Fläche		7) <2...<10
	8)Offene,variable Fläche		8) <2...<10

**Tab. II.4:** TAN, Quelle: in Anlehnung an Ruff u. a. [192], vgl. Blau [23]

Ein TAN Beispiel nach Ruff u. a. [192] für bestimmte Tribotests lautet:

-Ball/Disk „1318“: Kontraformer Kontakt der Ball-Disk-Tribopaarung mit unidirektionaler Kontaktgeschwindigkeit und Pressung, wobei der Eintrittswinkel des Schmiermittels im Bereich von 2 ° bis 10 ° liegt.

Vor dem Anfang der Versuche ist es wichtig auch die richtige Bewertung des Verschleißes durchzuführen und die lebenslimitierenden Oberflächenschäden zu identifizieren. Dabei werden funktionsfähige noch nicht ausgefallene Komponenten untersucht und mit nicht abgenutzten (neuen) Oberflächen verglichen. Die gute Dokumentation, Beschreibung und Vertiefung sind

Voraussetzung für eine präzise statistische Auswertung der Versuche. Es wäre optimal, wenn auch die Gegenoberfläche, den Abrieb und die Partikeln untersucht zu werden. [17]

Das Tribometer ist ein Prüfgerät zur Untersuchung von Reibung und Verschleiß. Heutzutage können kontinuierliche Messungen von Reibungskraft, Verschleißabtrag, Temperatur u.a. durchgeführt werden. Durch eine Vereinfachung der Realitätsbedingungen werden die Untersuchungen mit Modell-Prüfkörpern gemacht. [10]

Im Rahmen dieser Arbeit fanden geeignete Untersuchungen der Testkategorie 6 am sogenannten Ring-Reibungstribometer statt. Diese werden ausführlicher in [Kapitel III](#) beschrieben. Das geschlossene Tribosystem charakterisiert sich mit einer rotierenden, gleitenden Bewegung mit einem quasikonformen Kontakt. Die untersuchten Graphitsegmente werden gegen einen rotierenden Stahlring gedrückt und in Bewegung gesetzt.

# Kapitel III

## Praxisteil/ Versuchsaufbau und -durchführung

Die Hauptvoraussetzung für die optimale Funktion des Gleitmoduls bleibt die Reibzahlminderung und die Begrenzung des Materialverlusts bei der Gleitplatten. Durch tribometrische Versuche können den exakten Reibungskoeffizienten in einer präzisen und vereinfachten Umgebung erreichen. Da verschiedene Faktoren (wie äußere Bedingungen, Gleitgeschwindigkeit, Oberflächenbeschaffenheit der Reibflächen, Flächenpressung [244] ) die Reibungszahl für trockene gleitende Reibung bestimmen, müssen die geplanten Versuche unter denselben oder ähnlichen Bedingungen durchgeführt werden, wie bei der ursprünglichen Ermittlung, um möglichst realistische Ergebnisse zu bekommen.

### 1 Aufbau des Versuchstandes

#### 1.1 Hochtemperatur Ring Reibung und Verschleiß Tribometer (RRT-HT)

Damit die Möglichkeiten und die Grenzen der tribologischen Einsetzbarkeit des Graphits untersucht werden konnten, wurde als Versuchsstand ein Ring-Reibung- und-Verschleiß Hochtemperatur Tribometer des österreichischen Exzellenzzentrum für Tribologie *AC2T Research GmbH* verwendet. Die Kategorie des Tribometers ist mit 5 oder 6 nach *DIN 50322:1986-03 Verschleiß; Kategorien der Verschleißprüfung* [55] einzustufen: „Modellversuch mit einfachen Bauteilen“. Da die verschiedenen Stufen der Vereinfachung des Tribosystems unterschiedliche Ergebnisse liefern, können aus den Versuchen nur bestimmte Tendenzen erkannt und definiert werden. Keine vollständige Wiederholung der gemessenen Werten kann erreicht werden. Das Tribometer besteht aus einem oberen und unteren Halter jeweils für die Stahlscheibe und für die drei Graphitproben. Es wurde zusätzlich eine Kraftmessdose montiert, um die Größe der Normalkraft verfolgbar zu machen.



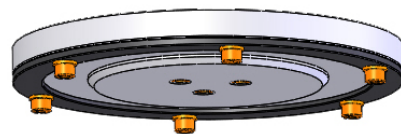
**Abb. III.1:** Ring-Reibung- und-Verschleiß Hochtemperatur Tribometer (RRT-HT Tribometer)

Wichtige Elemente des Aufbaus des Versuchsstandes:

- Ring-Reibung-und-Verschleiß Hochtemperatur Tribometer mit Möglichkeit für Einbau von verschiedenen Halterkombinationen wie Ring/Ring oder Kugel/Scheibe
- Kraftmessdose für die Normalkraft
- Hebel für die Anpassung der Normalkraft mittels Totgewicht
- Thermosensor im Tribometer
- Verschleißsensor
- Computer mit Software: *AC<sup>2</sup>T* TriboSoft®

## 2 Vorbereitung der Bauteile des Tribometers

Aufgrund der hohen Anforderungen für Planheit des Gegenlaufpartners wurde der Tribostand umgebaut. Der obere Halter wurde durch zusätzliche Teile angepasst. Die Innenzentrierung mit dem Stahlscheibe-Probenhalter sind auf die neue Dicke der Stahlscheiben angepasst worden, wobei einen Außenring zur zusätzlichen Sicherheit der Ebenheit des Stahlrings hinzugefügt wurde. Eine feinere Anpassung der neuen Tribometer-Teile wurde nach der ersten Montage durchgeführt. Die seitlichen Flächen der Langlöcher für Mitnehmer sollten leicht nachbearbeitet werden. Grund dafür war die Verformung des Tribometers durch langjährigen Betrieb unter Hochtemperaturbedingungen. Der neue obere Halter wurde jedoch nur bis zu einer Temperatur von 250 °C verwendet, da die Bauteile von allgemeinen Baustahl St37 möglicherweise oxidieren werden. Bei den 400 °C-Versuchen wurde die Standardkombination aus Komponenten des österreichischen Exzellenzzentrum für Tribologie *AC<sup>2</sup>T* verwendet. Weitere Informationen über den Triboteststand in [Unterabschnitt 8.2](#).



**Abb. III.2:** oberer Halter, neu, Konstruktion und Fertigung: Berndorf Band Group

## 3 Tribo-Paar-Vorbereitung(Probenvorbereitung)

**Stahlringe als Gegenkörper:** In der [Tabelle VI.2](#) ist die detaillierte Information über die möglichen Gegenlaufpartner-Werkstoffe (Bandmaterial) von Berndorf Band für die Edelstahlscheibe und deren physikalische und chemische Eigenschaften dargestellt.

Am Anfang wurde eine Entscheidung für die Materialauswahl aufgrund der Notwendigkeit für maximale Ähnlichkeit mit dem realen System getroffen. Die Edelstahlscheiben sollten aus

der Edelstahl-Eigenmarke von Berndorf Band NICRO 52.6 hergestellt werden. Dieser ausscheidungsgehärtete Edelstahl verbindet hohe Festigkeit mit der durch spezielle Wärmebehandlung erzielten sehr gute Zähigkeit. Die Wärmebehandlung wird vom Unternehmen selbst durchgeführt, wodurch äußerst genaue Parameter für die oben genannten Materialeigenschaften bestimmt werden können [102].

Aufgrund der Voraussetzung für Ebenheit der Stahlringe wurde schließlich beschlossen, dass anstelle des Bandmaterials werden die Gegenlaufpartner aus Flachmaterial hergestellt. Dadurch wurde maximale Genauigkeit und Gleichmäßigkeit der gefertigten Stahlscheiben bei gleichem Verhalten im Tribosystem garantiert. Die genaue Materialbezeichnung lautet nichtrostender austenitischer Edelstahl mit der Materialbezeichnung 1.4301, X5CrNi18-10 [210] mit maximaler Betriebstemperatur bis 600 °C. Dabei wurden 61 Stück Edelstahlscheiben mit folgenden Abmaßen bestellt:

- Außendurchmesser: 169,8 mm
- Innendurchmesser: 100,2 mm
- Dicke: 1,5 mm

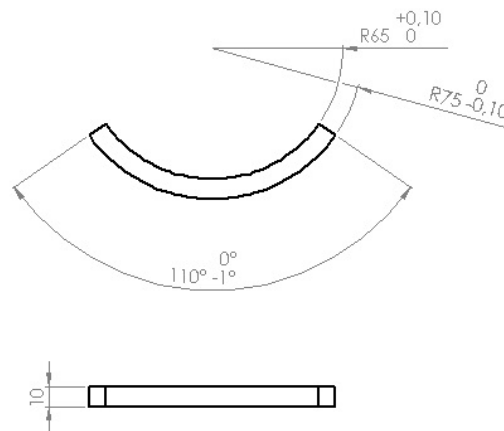
Die Stahlscheiben waren mit unterschiedlicher Oberflächenrauheit und mit einem Rundschliff vorgesehen. Der Rundschliff wurde später manuell gefertigt. Dabei könnten die beiden Arten des Rundschliffs als grob und fein definiert werden. Die Gegenlaufpartner mit einem groben Schliff weisen eine Rauheit von Rz 5 bis 7 und diese mit einem feinen Rundschliff- Werte von Rz 3 bis 7 auf.

**Graphitsegmente als Grundkörper:** Die Grundkörper wurden aus Feinkorngraphit (siehe [Tabelle VI.1 Graphit 4](#)) hergestellt. Typische Eigenschaften des Materials laut Katalogangaben [202] sind:

- Hochfest
- Hochdicht
- Isotrop (Unabhängigkeit der Eigenschaft von der Richtung)
- Wenig benetzbar
- imprägniert

Laut Produzenten gewährleistet die Salzimprägnierung den Oxidationsschutz, reduziert die offene Porosität und verringert dadurch die Wasseraufnahme. Daraus lässt sich jedoch keine Verschleißminderung ableiten.

**a Abmessungen der Graphitsegmente** Die Proben sollen folgende Abmessungen haben:



**Abb. III.3:** Graphitsegment

### 3.1 Wasserstrahlschneiden

Das Verfahren des Wasserstrahlschneidens wurde deswegen ausgewählt, weil die anderen abtragenden Verfahren ungünstigere Auswirkung auf das zu prüfende Material aufweisen. Fertigungsverfahren wie Drahterodieren oder Laserschneiden können die Oberfläche der Graphitsegmente stark durch Schmiermittel kontaminieren oder aufgrund des Temperatureinflusses und der gleichzeitig wirkenden mechanischen Spannungen Änderungen der Materialeigenschaften hervorrufen [47]. Es wird nach zwei unterschiedlichen Arten von Wasserstrahlverfahren unterschieden und genauer: mit und ohne Abrasivmittel. Bei der ausgewählten Methode zum Schneiden der Graphitsegmente wird Abrasivmittel mit einer Körnung von 120 Mesh (0,125 mm) verwendet. Dies stellt sehr feinen Sand dar.

Die Wasserstrahlschneidanlage Tecnocut (Italien) ist über CNC und über die CAM-Software TecnoCAM gesteuert.

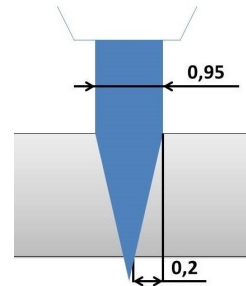
#### 3.1.1 Ausstattung und Prinzip

Die wichtigsten Elemente der Wasserstrahlanlage sind:

- Hochdruckpumpe mit Druckübersetzer: liefert den Volumenstrom bei dem notwendigen Betriebsdruck
- Schneidkopf: Bildung des Wasserabrasivstrahls
- Führungssystem: Steuerung des Schneidvorschubs
- Strahlfänger: Abbau der Strahlrestenergie

Die Wasserdüse erzeugt den kegelförmigen Wasserstrahl mit einem Druck von maximal 4250 bar, wobei eine Umwandlung des statischen Drucks in Bewegungsenergie stattfindet. Beim Wasserabrasivstrahl kommt zusätzlich eine Mischkammer mit Fokussierrohr hinzu. Der Abrasivmittel

wird angesaugt (Strömung nach Bernoulli, Venturi-Effekt -> Unterdruck) in der Mischkammer und der Wasserabrasivstrahl wird im Fokussierrohr beschleunigt. [243] Dieses „Werkzeug“ hat eine geometrisch unbestimmte Schneide, wobei die V-förmige Schnittfuge aus den Wechselwirkungen vom Werkzeug und Werkstoff resultiert. Die dadurch erzeugte Schnittfläche weist einen Neigungswinkel zur Senkrechten von  $0,5 - 2,0^\circ$  auf.[7, S. 199]. Dabei soll der Winkelfehler des Wasserstrahls berücksichtigt werden. Bei einer Dicke der Platte von 10 mm tritt eine Konizität von 0,2 mm laut der Software Tecnocut CAM auf.



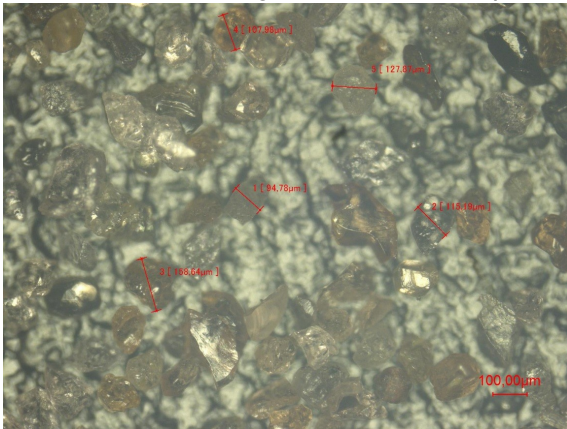
**Abb. III.4:** Wasserstrahldurchmesser und Konizität

Vorteilhaft bei der Methode Wasserstrahlschneiden ist die Abwesenheit von Wärmezonen, Gefügeänderungen, Materialeinschränkungen u.a. Als Nachteil wird der direkte Wasserkontakt (kein Problem für den Graphit) und die mit der gewünschten Präzision der Herstellung (zur Verringerung der Strahlablenkung) verbundene geringe Schnittgeschwindigkeit angeführt. Maßgenauigkeiten besser als 0,1 mm sind nur schwer erreichbar [7, 234].

### 3.1.2 Durchführung

Die ersten 72 Segmenten wurden mit einer Geschwindigkeit von 200 mm/min aus 3 Graphitplatten zugeschnitten. Wie langsamer geschnitten wird, desto genauer, aber auch desto höher der Preis der Erzeugnisse. Aufgrund der zu hohen Geschwindigkeit folgte eine größere Formabweichung, deswegen stecken die Segmente im Tribohalter fest. Das Verklemmen der Proben in der Halterung ist wegen des ungünstigen späteren Laufverhaltens unerwünscht. Es ist ein gewisses Spiel erforderlich, die Proben sollten locker an ihren Stellen positioniert sein. Aus diesem Grund sollte jedes einzelne Graphitsegment später manuell durch Schleifen angepasst werden, um eine optimale Form zu erreichen. Die Proben wurden nacheinander aus der Platte zugeschnitten. Dabei wurden viele Oberflächendefekte (abgebrochene Kanten, Löcher) festgestellt- fast immer auf der unteren Seite der Graphitsegmente, die vor dem Zuschneiden nicht vorhanden waren. Als Annahmen zu den möglichen Ursachen wurden die Einwirkung des Wassers, das Brechen des spröden Materials oder innere Inhomogenitäten im Material bei der Fertigung betrachtet. Es hat sich herausgestellt, dass die eigentliche Ursache für die beschädigte Oberfläche der Proben war der Kavitationsverschleiß - eine Art mikroskopischer Dampfschlag. Ein Nachteil dieses Verfahrens wäre, wenn eine Kontamination der Probenoberflächen festgestellt würde, da dies einen direkten Einfluss auf das spätere Reibungs- und Verschleißverhalten haben könnte. Da die Graphitplatten im direkten Kontakt mit dem schmutzigen Wasser waren, könnte dies nicht vermieden werden. Der Graphit ist sehr porös, hat aber eine Imprägnierung. Die mögliche Verschmutzung durch Sand wurde aber mikroskopisch bei der gleichen Vergrößerung untersucht.

Auf den folgenden Abbildungen ist ein Vergleich zwischen dem verwendeten Abrasivmittel und der wasserstrahlzugeschrittenen Graphitoberfläche:



**Abb. III.5:** Abrasivmittel 120 Mesh, Korngrößen, x200 Vergrößerung



**Abb. III.6:** Graphitsegment, dritte Graphitplatte, x200 Vergrößerung

Bei dieser optischen Prüfung wurden keine Sandpartikel auf der Oberfläche der Graphitsegmente detektiert. Die Messungen wurden mit dem Keyence VHX 1000-Mikroskop unter Laborbedingungen von Berndorf Band durchgeführt.

Da die Segmente für unterschiedliche Arten von Messungen dienen sollten, war die zugeschnittene Anzahl an Proben nicht ausreichend. Es wurden weitere 78 Segmente aus neuen 3 Graphitplatten zugeschnitten. Dabei wurde eine Geschwindigkeit von 100 mm/min ausgewählt. Folglich waren die Formabweichungen geringer und die Proben haben perfekt im Tribohalter gepasst. Dieses Mal wurden auch den Schneidvorgang und die Zeichnungen in TecnoCAM so verbessert, dass mehrere Proben pro Platte zugeschnitten wurden - 26 Proben pro Platte. Wichtig dabei war, dass der Einstich außerhalb der geschlossenen Schnittlinie positioniert werden sollte, weil wenn es umgekehrt war, hat dies zu fehlerhaft zugeschnittene Segmenten geführt- abgebrochene Kanten, die diesmal nicht durch Kavitation verursacht worden waren. Eine weitere Ursache für die beschädigten beim Wasserstahlschneiden Proben war das Kippen der Segmente beim Schneiden durch unvollständiges Gitter (Werkstückhalterung/-grundlage). Da durch das Wasserstahlschneiden oft nicht nur das gewünschte Werkstück zugeschnitten wird, sondern auch die Gitter-Grundlage. Das Problem mit dem Kippen der Segmente wurde durch Gittertausch gelöst. Es ist keine Kontamination der Oberfläche durch Sand festgestellt worden. Dies wurde, wie bereits erwähnt, mikroskopisch festgestellt.

### 3.2 Konditionierung der Proben

Die Reibungskoeffizienten nach der Einlaufphase haben ein unterschiedliches Verhalten als die Anfangsreibwerte, deswegen wird für die Bestimmung der mittleren Reibwerte die Einlaufphase normalerweise nicht berücksichtigt. Diese wissenschaftliche Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung des langfristig einstellbaren konstanten Verhaltens des Graphits bei den vorhandenen Bedingungen. Es ist daher beabsichtigt, eine längere Einlaufphase mittels geometrischer

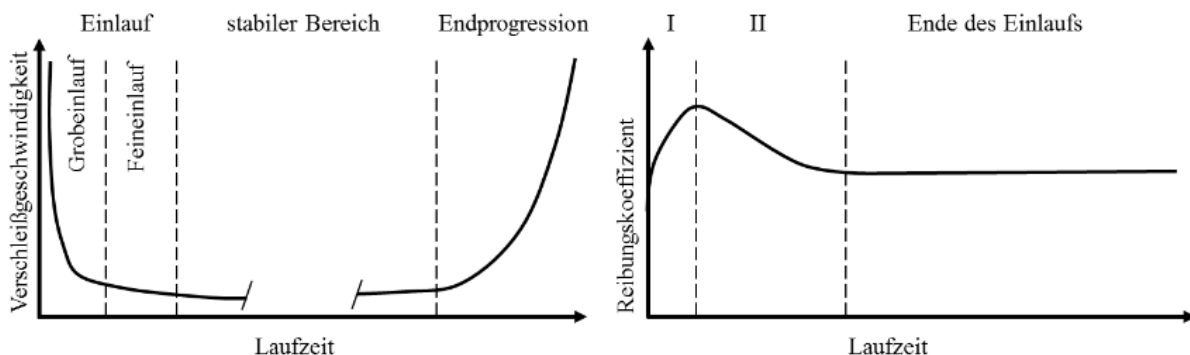


Konditionierung zu überspringen, sodass projektrelevante und realitätsnahe Aussagen während der kurzen Zeit der Experimente erhalten werden können. Auf dieser Weise wird die Versuchsdauer verringert. Die konditionierte Oberfläche der Graphitsegmente wurde mittels Schleifen im Tribometer erstellt. Direkt vor der Versuch werden die Graphitsegmente in einem Trockenschrank klimatisch konditioniert. Dadurch werden die optimalen gleiche Anfangsbedingungen für die Versuche garantiert.

### 3.2.1 Geometrische Oberflächenkonditionierung

Viele aktuellen wissenschaftlichen Studien beweisen die Möglichkeiten und die Bedeutung einer effektiven Konditionierung für die tribologischen Kontakte und zur Minimierung von Reibungs- und Verschleißprozessen bzw. eine Leistungssteigerung von tribologisch beanspruchten Komponenten. Der erste Schritt der Probenpräparation umfasst das geometrische Konditionieren der Oberfläche der Graphitsegmente mittels SiC-haltiges Schleifpapiers mit der Körnung P220, weil dadurch eine vordefinierte Rauheit der Graphitoberfläche eingestellt wird. Die Oberfläche des Gegenlaufpartners ist auch rau, aufgrund des vorgesehenen Rundschliff. Folglich wird eine kürzere Einlaufphase vom Triboversuch erreicht.

Beim Einlaufvorgang (Run-In) tritt eine Änderung, die so genannte Tribomutation, des oberflächennahen Bereiches (unter der Oberfläche der Reibpartner) des Materials im Tribokontakt durch eingebrachte Reibungsenergie ein. Im Allgemeinen wird dieser Effekt als nanotribologischer Vorgang definiert. Dabei werden Änderungen in der chemischen Zusammensetzung, Struktur, Gefüge, Schallemissionen, Temperaturfeld und Mikrorauheit beobachtet. Dieser Begriff wurde von Gervé [78] eingeführt, um die zeitlich veränderliche Reibungs- und Verschleißprozesse des Tribosystems zu beschreiben. Dadurch werden das Reibungs- und Verschleißgeschwindigkeit beeinflusst. Nach dem Run-In-Zeitintervall stellt sich einen konstanten Reibkoeffizient und tribologische Eigenschaften ein. Auf dieser Weise wird einen Gleichgewichtszustand im System erreicht (die Reibungszahlen erreichen ihren stationären Wert).[50, 191]



**Abb. III.7:** Verschleißgeschwindigkeit nach Volz [233] und Reibungskoeffizient (Phase I- Anstieg der Reibung, Phase II- Abstieg der Reibung) beim Einlaufprozess eines Zylinderlaufbahn-Kolbenring-Systems nach Blau [25]

Aus der Badewannenkurve in [Abbildung III.7](#) (aus der Motorenindustrie) ist zu erkennen, dass die Verschleißgeschwindigkeit mit zunehmender Kontaktfläche über die Zeit abnimmt. Eine Glättung der Rauheitsspitzen tritt im Tribokontakt auf und dadurch einen größeren Traganteil als Folge der Ausbildung von makroskopischen Oberflächenbereichen mit steigender mechanischer Beanspruchung, was den Grobeinlauf charakterisiert. Verschiedene Studien beschreiben den Einlaufvorgang mit einer Verringerung der Rauheit der beiden Tribo-Partner, wobei die Rauheitswerte gegen eine konstante Betriebsrauigkeit nach dem Feineinlauf konvergieren, bis ein stabiler Bereich erreicht wird [[50](#), [233](#)]. Die stationären Rauigkeiten hängen aber nicht von den Anfangswerten ab, sondern werden durch das Beanspruchungskollektiv und die Struktur des Tribosystems beeinflusst [[50](#), [115](#), [176](#)]. Nach dem zweiten Bereich der Verschleißkurve folgt die Endprogression, die aber keine Rolle für die gegenwärtigen Versuche spielt und wird nicht weiter diskutiert.

Der zeitabhängige Verlauf der Reibungskurve während der Einlaufphase ist auch in [Abbildung III.7](#) rechts zu sehen, wobei der erste Anstieg (Phase I) des Reibungskoeffizienten auf die Adhäsionsprozesse und die Entfernung von Oberflächenkontaminationen zurückzuführen ist, sowie auf die schon erwähnte Vergrößerung der Kontaktfläche. In Phase 2 erfolgt die Bildung einer Tribo-Reaktionsschicht und Abstieg der Reibung. Die Erreichung eines stabilen Zustandes des Einlaufs ist durch Tribomutation und Grenzschichtbildung abgeschlossen.[[176](#), [245](#)].

Im Diagramm nach Blau [[25](#)] werden die unterschiedlichen Einlaufverhalten bei Metal-Metal-Paarungen in Betracht gezogen, wobei die vorher angezeigte und diskutierte Reibkurve Variante „b“ entspricht, aus den gezeigten in [Abbildung VI.1](#) (im Anhang zu finden) Verhalten und scheint den beobachteten Ergebnissen tribometrischer Experimente am nächsten zu sein (siehe [Kapitel IV](#) ).

**Durchführung** Bei der Durchführung der geometrischen Konditionierung wurden folgende Schritte ausgeführt: Zunächst wurde die geeignete Form des P220-Schleifpapiers ausgeschnitten und auf dem oberen Halter befestigt. Die Graphitsegmente wurden in der unteren Halterung positioniert und die Halterung wurde montiert. Dann wurde der obere Halter im Tribometer montiert. Der Verlauf wurde gestartet und die Graphitsegmente wurden mit dem Schleifpapier vorgeschliffen. Auf dieser Weise wurden alle (3 Segmente\*24 Verläufe =) 72 Proben für die Versuche geometrisch vorkonditioniert.

Die geometrische Probenpräparation dauerte 10 s pro Verlauf mit einer Drehzahl von 22 U/min und 1 kg Totgewicht am Hebel des Tribometers. Die Oberfläche der Proben nach der Konditionierung weist eine mittlere Rauheit von Rz 20,64 auf und hat eine Form mit leicht konvexer Wölbung bekommen, welche auch für die späteren Messungen relevant ist. Im folgenden Kapitel IV werden diese Informationen noch genauer besprochen.

### 3.2.2 Klimatische Oberflächenkonditionierung

Grund für die Durchführung der klimatischen Oberflächenkonditionierung war die Beseitigung der organischen Rückstände, die eine Auswirkung auf die Reibung und Verschleißes im Tribokontakt haben könnten, sowie die Entziehung der Luftfeuchtigkeit aus dem porösen Material.

Die Anfangsidee für die Präparation der Graphitsegmente war durch Lagerung der Proben in einem Trockenschrank und anschließend in einer luftdichten Box oder Exsikkator. Die optimalen Lagerungsbedingungen lassen sich durch eine trockene, dunkle, luftdichte und kühle Umgebung beschreiben. Später wurde die Entscheidung getroffen, die klimatische Oberflächenkonditionierung direkt vor den tribometrischen Versuchen durchzuführen, damit Probleme wie Undichtheit des Exsikkators oder nicht optimale Qualität des Trocknungsmittels zu vermeiden. Die klimatische Konditionierung wurde nur vor den Raumtemperaturtests durchgeführt. Folglich wurden die Proben in der Tribokammer in einer trockenen Atmosphäre getestet, die durch Druckluft eingestellt wurde.

Die Graphitproben werden innerhalb einer Stunde bei einer Temperatur von 120 °C im Trockenschrank vorbereitet. Zweck des Verfahrens ist es, eine Oberflächenkontamination mit Kohlenwasserstoffen zu vermeiden. Nach der thermischen Reinigung und Trocknung wurden die Graphitsegmente direkt im Exsikkator gelegt und für eine maximale Zeit von 24 Stunden gelagert. Wichtige Komponenten für die Lagerung der Graphitsegmente sind wie folgt:

- Exsikkator
- Schliiffett
- Trocknungsmittel: Kieselgel, Kieselsäuregel oder Silikagel
- Siebplatte aus Keramik oder Kunststoff

Wichtig bei der Nutzung des Exsikkators war die Qualität und die Vorbereitung des Trocknungsmittels, welche je nach Farbe unterschieden sein könnte: blau für Kieselgel mit blauem Indikator (Cobaltdichlorid) im trockenen Zustand oder im feuchten Zustand-lilafarbig. Wesentlich bei der Arbeit mit dem Trockenschrank waren die Sicherheitsmaßnahmen und die passende Laborvorbereitung, -ausrüstung (Handschuhe, Petrischale) und Einschulung bei *AC<sup>2</sup>T Research GmbH*.

## 4 Härteprüfverfahren nach Brinell

### 4.1 Definition und Angaben

Laut der Angaben im Anhang über Graphit 4 beträgt die Härte des Probenwerkstoffs einen Wert von 90 nach Rockwell Prüfverfahren Typ B (Abkürzung: HRB). Andere Härtemessung, stammend aus dem Österreichischen Exzellenzzentrum für Tribologie *AC<sup>2</sup>T*, beträgt ca. 24 HBW 2,5/ 294 N für das gleiche Material. Aufgrund der Unmöglichkeit laut DIN EN ISO 18265

[169] die Messwerte in alle geläufigen Härteskalen umzurechnen, wurde eine dritte Härteprüfung durchgeführt.

Die Härteprüfung nach Vickers hat sich als kein passendes Prüfverfahren für Graphit gezeigt. Es wurden verschiedenen Belastungsstufen (1; 10 HV) ausprobiert, leider könnte der Abdruck mit den vorhandenen Lichtmikroskopen nicht bewertet werden. Der Grund dafür war die geringe Lichtreflexion, aufgrund der Porosität des Materials.

Bei der Durchführung der Härtemessung nach Brinell wird einen harten Prüfkörper mit Stahlkugel in die Oberfläche des zu prüfenden Werkstücks eingedrückt. Anschließend wird der Durchmesser des entstandenen Eindrucks gemessen. Über die genormte Formel kann die Brinellhärte des Werkstücks berechnet werden. Das Verfahren ist für weichen bis mittelharten Metallen passend und deswegen wurde für die Härtemessung der Graphitsegmente ausgewählt und angewendet. Die verwendete Formeln nach Norm [165] sind:

$$HBW = \frac{0,102 * 2 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (III.1)$$

Mittels HBW wird die Brinellhärte in Abhängigkeit von der ausgeübte Kraft  $F$ , dem Durchmesser des Metallkugels  $D$  und dem mittleren Durchmesser  $d$  des Eindrucks berechnet:

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

wobei  $0,102 * F/D^2$  die Beanspruchungsgrad bezeichnet. Die Konstante 0,102 ist der Umrechnungsfaktor von kilopond (kgF) in Newton.

Für die Berechnung der Härte ist das arithmetische Mittel aller Messwerte zu verwenden.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (III.3)$$

Die Stichprobenvarianz berechnet sich durch

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (III.4)$$

der mittleren quadratischen Abweichung vom arithmetischen Mittel, folgt die Standardabweichung  $s_h$  aufgrund der inhomogenen Härteverteilung auf dem Prüfkörper:

$$s_h = \sqrt{s^2(x)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (III.5)$$

## 4.2 Durchführung

Die Härteprüfungen wurden im Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie an der Technische Universität Wien durchgeführt. Um den Härte-Mittelwert zu berechnen,

wurde die Härte an 3 Stellen gemessen. Die Härtemessung diente, wie schon erwähnt, um die Überprüfung der vorgegebenen Werte zu ermöglichen.

Die Versuche wurden an der Digital Micro Kleinkraft Härteprüfmaschine M1C 010 der Firma EMCO-Test nach HBW 2,5 durchgeführt. Am Anfang wurde die Probe auf den motorischen Kreuztisch positioniert. Nach der richtigen Einstellung der Höhe des Prüftisches wurde über das eingebaute Mikroskop mit hochauflösender Kamera ein scharfes Bild automatisch fokussiert.

Die folgenden drei Härtemessungen wurden durchgeführt :

- HBW 1/30 kgf ; normgerecht
- HBW 2,5/30 kgf ; wie bei *AC<sup>2</sup>T* Research GmbH
- HBW 2,5/31,25 kgf ; normgerecht

Nach einer Belastungszeit von 10 Sekunden wurde die plastische Verformung im Werkstück durchgeführt. Die Prüfkraft sollte so gewählt werden, dass der Eindruckdurchmesser  $d$  nach Norm Werte zwischen  $0,24 \cdot D$  und  $0,6 \cdot D$  betragen kann. Der entstandene Eindruckdurchmesser wurde mittels Digitalmikroskops der Modellreihe VHX-6000 der Marke Keyence optisch gemessen und daraus die Oberfläche des Eindrucks bestimmt. Die Abmessung des kreisförmigen Eindruckes dient zur Bestimmung der Brinellhärte.

Mit 1 mm-Durchmesser-Kugel erfolgte die Messung nicht. Der Grund dafür ist das zu tiefe Eindringen des Prüfkörpers und die zu große plastische Verformung der Probe. Der Kugeleindruck ist nicht normgerecht/ liegt nicht innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen.

Da die Oberfläche bei den ersten Messungen nur maschinell bearbeitet und zu rau war, könnte die Kugel nicht komplett versenken. Deswegen sollte ein weiteres manuelles Schleifen durch Siliziumcarbid-Schleifpapier mit einer Körnung P 2000 und P 4000 durchgeführt werden. Nach der Oberflächenvorbereitung reflektierte das Material das Licht besser.

Schließlich wurden die Mittelwerte und die Standardabweichungen aus der Messungen berechnet.

Messung	Kraft kgf	Mittelwert	Standardabw. der Stichprobe	Standardabw. der Grundgesamtheit
1	30	33,666	0,577	0,471
2	30	31,666	0,577	0,471
3	31,25	33	0	0

**Tab. III.1:** Härtemessung nach Brinell, Mittelwert, Standardabweichung der Stichprobe und der Grundgesamtheit

Im Endeffekt lässt sich schließen, dass die gemessene Härte des Graphitsegments 33 HBW 2,5/ 306,5 beträgt, wobei diese von der manuell geschliffenen Oberfläche der Probe unter der genormten Last von 31,25 kgf ermittelt wurde. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt einen Unterschied zwischen den Messwerten am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie und diesen, die aus dem *AC<sup>2</sup>T* Research GmbH - Bericht stammen. Laut der

durchgeführten bei  $AC^2T$  Research GmbH Messungen wurde die Härteprüfung nach Brinell mit einem Kugeldurchmesser 2,5 mm, Prüfkraft 294 N realisiert und beträgt 24 HBW 2,5/ 294. Die am Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie ermittelte Härte beträgt 31,6 HBW 2,5/ 294,2. Wenn eine oder mehrere Bedingungen bei der Durchführung der Härteprüfung nicht erfüllt waren, könnte dies zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen. Solche unerwünschten Einflüsse können wegen der Oberfläche der Probe, wie der Oberflächenkrümmung u. a. auftreten, wie bereits im theoretischen Teil erwähnt.

## 5 Quantitative Beschreibung, Strukturelle Eigenschaften:Profilometrie

### 5.1 NanoFocus: $\mu$ surf Konfokalmikroskop

Die verwendete konfokale Technik ist das Mikroskop  $\mu$ -Surf mobile der Firma NanoFocus AG. Das Besondere bei der Funktionsweise erscheint die rotierende Nipkow-Scheibe (Multi-Pinhole-Disc), die eine schnelle laterale Aufnahme des Prüflings ermöglicht. Die Lichtquelle ist LED mit grünem Licht und mit einem Fundament mit Piezosystem.

Bezeichnung	1600	800	320
Vergrößerung	10	20	50
Messfeld [ $\mu\text{m}$ ] $\times$ [ $\mu\text{m}$ ]	1600 $\times$ 1600	800 $\times$ 800	320 $\times$ 320
Numerische Aparatur	0,3	0,4;0,45;0,6	0,5; 0,8; 0,95
Arbeitsabstand [mm]	11	12,1; 3,1; 0,9	10,9; 1,0; 0,3
Auflösung in z-Richtung [ $\mu\text{m}$ ]	20	6;5;4	4;2;2
Auflösung in x,y-Richtung [ $\mu\text{m}$ ]	3,1	1,6	0,7

**Tab. III.2:** Technische Information  $\mu$ surf mobile Konfokalmikroskop, Physikalische Parameter. Quelle: Bedienungsanleitung  $\mu$ surf mobile

Durch optisches Abtasten der Probenoberfläche resultieren die lateralen und vertikalen Daten, die dann als 3D-Abbildung erscheinen und gespeichert werden können. Die maximalen gemessenen Lichtintensitäten werden definiert und daraus resultiert die Profilform. Die verwendete Software ist  *$\mu$ softmetrology* und  *$\mu$ softanalysis*, wobei die Mountains-Software für die Analyse aufgrund seiner Kompatibilität verwendet wird. Die Profile der Graphitsegmente wurden stichprobenartig gemessen, um eine Übersicht der Rauheiten zu verschaffen.

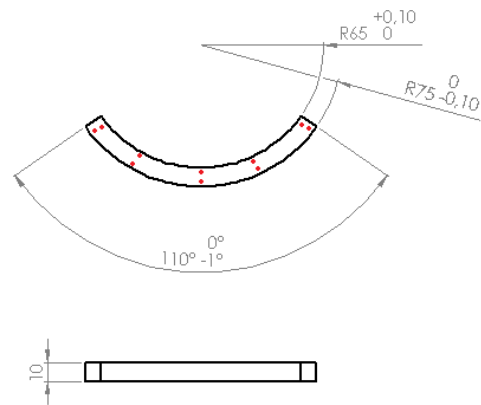
### Durchführung

Erstens wurden die nicht bearbeiteten Graphitsegmente auf Ebenheit profilometrisch untersucht. Möglicherweise wurde bei der Herstellung von Graphitplatten eine gewisse Schrägheit der

Oberfläche fälschlicherweise zugelassen und das könnte ein Problem beim Kontaktverhalten im Tribosystem verursachen. Deswegen wurde die Planheit der ursprünglichen Proben mittels Stitchen (Abrastern) mit größerer Schrittweite an 5 Stellen untersucht. Die Messungen wurden mit einer 10-fache Vergrößerung durchgeführt. Die Probe wurde zweimal am selben Punkt mittels Stitchen gemessen, jedoch in zwei entgegengesetzten Richtungen. Dadurch wurden Abweichungen von der Planheit überprüft und als vorhanden befunden, jedoch immer bei derselben Steigung von  $\approx 2\%$ .



**Abb. III.8:** Objektiv, 10x verwendet



**Abb. III.9:** Graphitsegment, gemessene Stellen

Messstelle	Steigung in Grad °	Steigung in %
1	1,14	2
2	1,29	2,26
3	1,2	2,09
4	1,12	1,96
5	1,04	1,82
Mittelwert	1,158	2,026
Standartabw	0,093	0,163

**Tab. III.3:** Ebenheitsmessungen, 5 Stellen

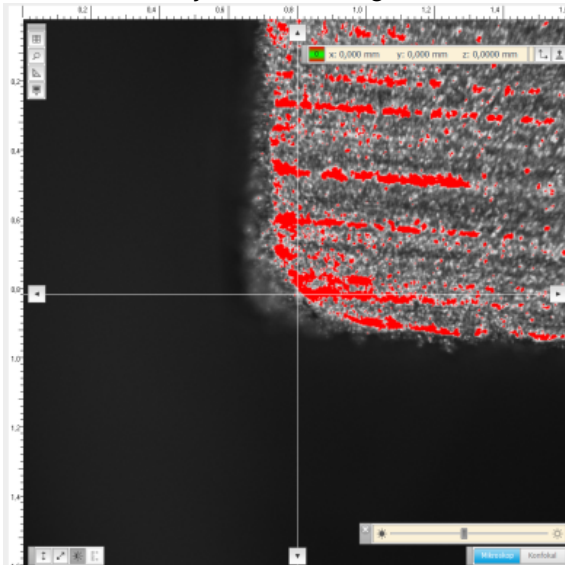
Die Stelle 1 wurde auch in die beiden Richtungen gemessen:

Messstelle	Steigung in Grad °	Steigung in Prozent %
Messung 1, Stelle 1	1,11	1,94
Messung 2, Stelle 1	1,14	2

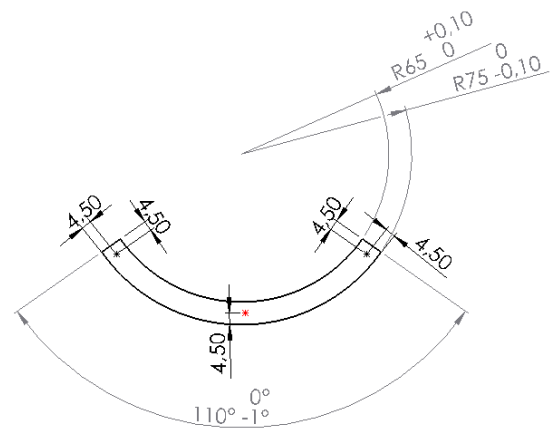
**Tab. III.4:** Ebenheitsmessungen, Stelle 1

Die gemessene Steigung ist in beiden Richtungen nahezu gleich. Dies ist ein Beweis dafür, dass die beobachtete Schiefe der Oberfläche eher auf die Unebenheit der Unterlage/ Platte der Vibrationsisolation als auf die Probe zurückzuführen ist.

Die geometrisch konditionierte Proben und die gelaufenen Proben wurden stichprobenartig vermessen (1 Stelle/Strecke pro Probe). Die ganze Breite (10 mm) der Segmente wurde vermessen. Dabei erfolgt dies entweder in der Mitte oder an den jeweiligen Rändern. Die Abstände bzw. Koordinaten wurden dann immer gleich gewählt: bei der Mitte und beim Rand/Rändern wurde ein bestimmter Abstand von der Kante gewählt (x: 4,5 mm ; y: 4,5 mm) und dieser wurde dann auch bei jeder Messung beibehalten.



**Abb. III.10:** Graphitsegment, Nanofokus



**Abb. III.11:** Graphitsegment, Ränder

Die berücksichtigten bei der Messung Parameter sind die linien- und flächenbezogenen Werte RMS, Schiefe und Kurtosis. Während der Vermessung wurden die Proben nummeriert, da die früheren Vorbereitungsschritte dies nicht erfordert haben aufgrund der gleichen Vorbereitung. Relevant war dabei jedoch die bestehende Bezeichnung bezogen auf die Position der Probe im Tribometer (I, II, III) und die konditionierte Fläche. Von größerer Bedeutung sind die Einstellungen zwischen den Proben. Diese sollen konstant und damit konsistent gehalten werden. Alle Messergebnisse wurden protokolliert. Aus den gemessenen Stellen wurden nur die mittleren Bereiche der abgerasterten Strecken mit einer Länge von ca. 5,6 mm zur weiteren Auswertung bezogen.

## 5.2 Alicona InfiniteFocus

Mit Alicona InfiniteFocus G5 wurden zusätzliche profilometrische 3D-Oberflächenmessung durchgeführt, mit dem Unterschied, dass die Untersuchung mittels Fokus-Variation statt mit konfokaler Messung durchgeführt wurde.

Weiters sind die wichtigsten technische Information des Geräts aufgelistet [108]:

- Messverfahren: Fokus-Variation
- Objektive: 5x, 10x, 20x, 50x, 100x
- Laterale Auflösung: 0,44  $\mu\text{m}$  (bei 100x)
- Vertikale Auflösung: 10 nm (bei 100x)



- Arbeitsabstand 4,5 mm (bei 100x)
- Messbare Höhe 4 mm (max. bei 100x)
- Messbarer Flankenwinkel  $87^\circ$
- Probenführung: Motorisierter Probentisch mit 3 translatorischen Achsen
- Licht/Lichtquelle: LED
- Koaxiallicht sowie LED Ringlicht mit segmentweiser Ansteuerung des Lichts (24 Segmente).

Das Gerät kombiniert optische Mikrokoordinatenmesstechnik mit Rauheitsmessung in einem System. Es wurde eine zehnfache Objektivvergrößerung bei den Messungen angewendet.

Dabei wurde die Software: Alicona-MeasureSuite 5.3.1. verwendet.

### Durchführung

Jede einzelne Probe wurde mittig vermessen, wobei die Messposition später nach den Tests klar erkennbar bleiben sollte. Mittels einer Feile wurde die mittige Markierung der Graphitsegmente durchgeführt. Die eingedruckten seitlichen dreieckigen Kerben dienen als Hilfe für die Bestimmung der Messstrecke. Für die Erreichung eines genügenden Abstandes zwischen den motorisierten Probentisch und das Objektiv wurde eine zusätzliche Distanzplatte montiert. Alle 24 Segmente des Ringlichts waren aktiv, wobei die Helligkeit auf 12 ms, der Kontrast auf 0,4 und die Intensität auf 1 eingestellt wurde. Wichtige Angaben für die Stitching waren die vertikale Auflösung von 190 nm und die laterale Auflösung von  $3,91 \mu\text{m}$ , wobei die abgetastete Strecke 7 Schritte mal 1,623 mm betrug.

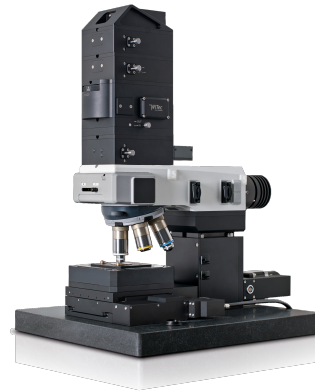
Zuerst wurde die Vermessung von allen Referenzproben durchgeführt und nach den Versuchen wurden Wiederholungsmessungen an der gleichen Messpositionen aber bei den gelaufenen Proben gemacht, damit eine Differenz zwischen den beiden Profilen generiert sein könnte. Um die genaue Differenzmessung sicherzustellen, die bei der Bestimmung des Verschleißes eine wichtige Rolle spielt, ist es erforderlich, das Referenzprofil und den markierten Messpunkt zu kennen. Die Differenzmessung wird verwendet, um den Unterschied zwischen zwei Datensätze zu berechnen. Später können die resultierenden Differenzmodelle interpretiert und für die Volumenmessung weiter verwendet werden. Dies führt zu einer Bewertung des Verschleißes nach dieser Methode.

## 6 Qualitative Beschreibung, Chemische Eigenschaften : Raman-Spektroskopie

Die spektroskopischen Analysen sollen Auskunft über die atomare Zusammensetzung der Oberfläche der Graphitsegmente vor und nach den Versuchen geben, da das Ziel dieser Arbeit ist es, die Einsetzbarkeit und ein besseres Verständnis für das Verhalten des Graphits zu erstellen.

### 6.0.1 Ausstattung und Prinzip

Die Untersuchungen zur Analyse der Graphitproben aus den tribotechnischen Versuchen wurden an einem Raman-Spektrometer alpha 300R (WITec GmbH) durchgeführt. Das Spektrometer wird in Kombination mit einem konfokalen Mikroskop (konfokales Raman-Imaging) verwendet, was eine sehr gute Geschwindigkeit, Empfindlichkeit und spektrale und räumliche Auflösung erlaubt. Die Messungen wurden an der Technischen Universität Wien durchgeführt. Die Vorteile dieses Geräts liegen hauptsächlich in der spektralen Bildgebung und chemischen Charakterisierung, aufgrund der Aufnahme eines vollständigen Raman-Spektrums an jedem Bildpunkt. Die Steuerung des Gerätes und des Messprozesses zur Datenauswertung und -verarbeitung erfolgt über die WITec Software. Mittels Raman-Spektroskopie werden die Defekterscheinungen analysiert. Die erhaltenen Ergebnisse werden im nächsten Kapitel genauer beschrieben und diskutiert. Das Spektrometer ist mit einem konfokalen Mikroskop, Spektrograph f/4 und mit Videosystem: Okular-Farbbild-Videokamera (CCD Detektor) ausgerüstet.



**Abb. III.12:** Raman-Gerät

### 6.0.2 Allgemeine Information über die Auswertung der Raman-Daten

Aus der Position, Polarisierbarkeit, Breite, Intensität (Höhe) und aus den charakteristischen Frequenzen des Peaks können wichtige Informationen über die Änderung der Gefüge ermittelt werden wie z.Bsp: mechanische Beanspruchung, Spannungen, Phasenübergang, Kristallorientierung und -qualität, Symmetrie, Konzentration, Materialanteil und -definition und weitere chemischen Analysen. Hier konzentrieren wir uns auf die wichtigsten Parameter, nämlich die Intensität der D-<sup>1</sup>, G-<sup>2</sup> und G'-<sup>3</sup> Banden sowie das Defektverhältnis  $I_D / I_G$  und das Reinheitsverhältnis  $I_{G'} / I_D$ . Ein wichtiger Faktor ist auch die Position (Raman-Verschiebung) des G-Peaks.

### 6.0.3 Durchführung

Die Laserleistung an der Probe betrug 6 mW, wobei die Messungen mit einem 633 nm Laser erfolgten. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der Laserleistung, der Probenpositionierung und dem detektierten Signal - je niedriger die Laserleistung ist, desto niedriger ist das Signal. Die Messpunkte haben einen Durchmesser von 1  $\mu\text{m}$ . Das verwendete verfügbare Gitter

<sup>1</sup> „Disordered“ Graphite-Peak nicht zutreffende Bezeichnung laut Wilhelm Kulisch, Nanotechnologie für Einsteiger, da der D-Peak durch nanokristallinen Graphit hervorgerufen wird. Auch als Diamond-Peak zu treffen

<sup>2</sup> Graphit-Peak

<sup>3</sup> 2D: Doppelte Raman-Verschiebung wie D

besitzt ein Grating von 600 g/mm. Der Wellenzahlbereich beträgt 160 bis 2800 1/cm. Die Proben wurden mit 20-facher Vergrößerung mittels Raman-Mikroskops aufgenommen. Es wurden mehrere Messungen (ab 5) pro Messstelle durchgeführt. Der feinkörnige isostatischgepresste Graphit wurde in 5 Hauptzustände vermessen und genauer:

- Maschinell geschliffene Probe (REF)
- Geometrisch Konditionierte Probe (KOND)
- Probe nach den Raumtemperaturversuchen (RT)
- Probe nach den 150 °C-Versuchen (150 °C)
- Probe nach den 250 °C-Versuchen (250 °C)
- Probe nach den 400 °C- Versuchen (400 °C)

## 7 Lichtmikroskopie, Keyence

### 7.1 Ausstattung

Ziel der Untersuchungen mittels Lichtmikroskopie ist die Mikrostruktur der Graphitoberfläche besser zu definieren. Grund für die Messung ist eine genauere visuelle Darstellung und qualitative Charakterisierung der Kontaktzonen. Die Lichtmikroskopie ermöglicht die Wiedergabe von Details, die für das menschliche Auge nicht sichtbar sind.

Das verwendete Mikroskop mit digitaler Bildverarbeitung VHX 6000 von Keyence ermöglicht die Durchführung von berührungslosen und zerstörungsfreien mikroskopischen Analysen. Weitere Vorteile dieser Messtechnik sind die leistungsstarke Kamera, Stativ, motorbetriebenen XY-Objektstisch und die verschiedenen Objektive. Eine 0,1 bis 5.000-fache Vergrößerung mit großer Tiefenschärfe ist dabei möglich. Ein weiterer Vorteil ist die freie Winkelbetrachtung bis zu 90 Grad.

### 7.2 Durchführung

Zur optimalen Visualisierung der Oberfläche wurden die Proben bei der Lichtmikroskopie von unten beleuchtet. Für das Durchlicht wird ein Lichtleiter verwendet, der unter dem Objektstisch endet. Aufgrund der Porosität und der geringen Lichtreflexion des Materials war bei der lichtmikroskopischen Untersuchung der Oberfläche der Segmente genügende Beleuchtung notwendig.

Die Schwierigkeit bestand in der Anpassung des Lichts aufgrund der unterschiedlichen Lichtreflexionen je nach Bereich. Die geglätteten verschlissenen Bereiche reflektieren das Licht stärker, während die Bereiche, die während des Tests nicht miteinander in Kontakt standen, besser beleuchtet werden sollen.

Ziel für die mikroskopische Überprüfung, welche zur Schadensanalyse dienen könnte, war die Probenzustände nach den Raumtemperatur-, 150 °C-, 250 °C und 400 °C Test zu dokumentieren.

Das Ziel der mikroskopischen Untersuchung, die zur Schadensanalyse herangezogen werden konnte, bestand darin, die Proben nach den Tests bei Raumtemperatur, 150 °C, 250 °C und 400 °C zu dokumentieren.

## 8 Tribometrie

### 8.1 Tribometrische Daten und Versuchsplanung

#### Hauptparameter

- Druck: 2 bar
- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit <10 % (trocken)
- Rauheit
- Gleitgeschwindigkeit: 5 m/min
- Untersuchungsdauer: 16 Std.

#### Konfiguration

- 3 Graphitsegmente im Kreisring angeordnet
- Edelstahlscheibe als Gegenlaufpartner

#### Variation der Parameter

- Temperatur
  - RT
  - 150 °C
  - 250 °C
  - 400 °C
- Rauheit des Gegenlaufpartners
  - $Rz \approx 3-5 \mu m$  (fein)
  - $Rz \approx 5-7 \mu m$  (grob)

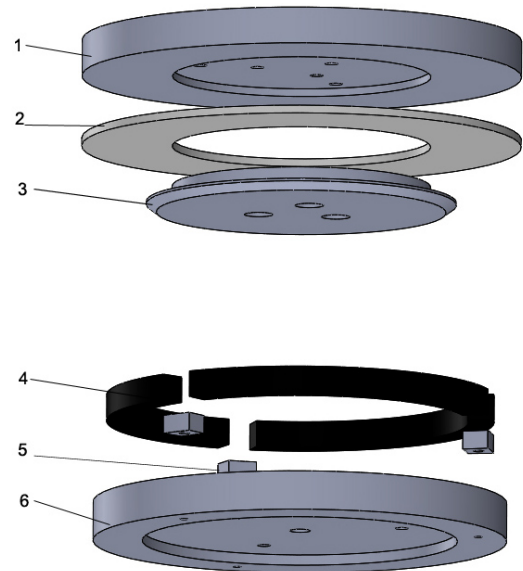
## 8.2 Testprinzip am Ring-Reibungs-Verschleiß Tribometer (RRV)

Die Versuche werden an einem Ring-Ring-Tribometer durchgeführt, wie schon erwähnt. Mittels dieses Laborgeräts werden die Reibungs- und Verschleißigenschaften im Ring/Ring-Kontakt untersucht, wobei das Reibverhalten besonders berücksichtigt wird.

Dabei werden drei Graphitsegmente in dem oberen Probenhalter, der geringe Toleranzen aufweist, montiert/ befestigt und durch Zwischenelemente positioniert.

Elemente des Tribometers:

1. Probenhalter Edelstahlscheibe
2. Edelstahlscheibe
3. Probenhalter Edelstahlscheibe innen
4. Graphitsegment x 3
5. Zwischenelement x 3
6. Probenhalter Graphitsegment



**Abb. III.13:** Aufbau des RRVHT-Tribometers.  
Quelle: selbst gezeichnet nach Unterlagen von AC2T Research GmbH

## 8.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdauer beträgt 16 Stunden, wobei insgesamt 24 Versuche geplant sind. Dabei wird die trockene Luftumgebung berücksichtigt, so wie die Variation der Temperatur. Wie schon erwähnt, nur bei den Raumtemperaturversuchen wird Druckluft für die Einstellung der relativen Luftfeuchte im Kammer verwendet. Die Luftfeuchtigkeit wurde mittels *testo 175 H1 - Datenlogger Temperatur und Feuchte* gemessen. Bei den Tests bei Temperaturen höher als 100°C stellt sich die trockene Umgebung automatisch ein.

Zuerst wurde der obere Halter mit dem Stahlring im Tribometer montiert, dann der untere mit den bereits positionierten Graphitsegmenten.

Der Hebel wird mit dem vorgesehenen Eigengewicht belastet. Dadurch wird die ausgeübte Normalkraft reguliert und folglich sind die Tribo-Halter fixiert und im Kontakt. Durch die Temperaturmessung in der Nähe des Tribokontakts wird das Thermoelement seitlich am unteren Tribohalter positioniert.

Der Verlauf wird erst dann gestartet, wenn die notwendige Testtemperatur erreicht wird (bei den RT-Tests gleich). Die Drehrichtung ist unidirektional, wobei die vorgegebene Geschwindigkeit 5 m/ min beträgt und ist bezogen auf den Mittelradius von 70 mm. Nach 16 Stunden schaltet sich das Tribometer automatisch aus.

# Kapitel IV

## Auswertung, Ergebnisse und Diskussion

### 1 Ziele der Versuchsreihe

Die Experimente untersuchen das Verhalten von Graphit bei verschiedenen Temperaturen und Rauheiten des Gegenlaufpartners und unter Berücksichtigung des Feuchtigkeitsniveaus. Die 24 Tribotests erfassen die Auswirkungen der Einflussparameter auf den Graphit in trockener Atmosphäre. Ziel der Versuchsreihen war die Beobachtung und der Vergleich der unterschiedlichen Reibungs- und Verschleißeffekte des untersuchten Graphits unter den oben genannten Bedingungen sowie die Bestimmung der Grenzen und der Möglichkeiten dieses Produkts in Kombination mit Stahlringen als Gegenlaufpartner. Außerdem sollen die Oberflächenänderungen (wie z. B. den intern noch bekannten Verglasungseffekt- glänzende Oberflächenbereiche) durch die vorhandene Technik detektiert und erklärt werden.

### 2 Probleme bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche

Wesentliches Problem aus technischer Seite war die Fertigung der Gegenlaufpartner und genauer die Ebenheit der Stahlringe. Die Stahlscheiben waren mit einem Rundschliff vorgesehen, der manuell erzeugt wurde. Die Überlegungen am Anfang waren, dass die Dicke der Stahlscheiben 3,5 mm betragen würde. Die Gegenlaufpartner waren aber nicht optimal gefertigt, aufgrund der eingebrachten durch die Fertigung Spannungen und deswegen auch unplan hergestellt. Dies hat zum eiernden Laufverhalten während der Tribotests geführt. Bei der Herstellung (Ausschneiden plus manuelle Schliffherstellung) der Stahlringe traten Druckkräfte auf, die plastische Verformung verursachten. Im Idealfall sollten die Flächen der Tribopartner immer parallel zueinander sein, damit unerwünschte Stöße während des Versuchs wegen einer ungleichmäßigen Bewegung vermieden werden. Aufgrund der Tatsache, dass bei der 3,5 mm-dicken Stahlringen irreversiblen Formabweichungen auftreten, wurde die Entscheidung getroffen, dass die Gegenlaufpartner nicht aus Bandmaterial und mit einer Dicke von 1,5 mm produziert werden.

Der Umbau des Tribo-Teststandes führte aufgrund der Wartezeit für die Produktion der neuen Komponenten zu einer Verzögerung des Beginns der Versuche. Eine weitere Herausforderung war die Besorgung von Probenmaterial und insbesondere der Graphitplatten, aus denen die Graphitsegmente zugeschnitten werden sollten.

Andere Gründe für die Verzögerung der Versuche waren aus finanziellen, bürokratischen Gründen sowie Unstimmigkeiten bei der Planung der Tests mit der Variation der Luftfeuchtigkeit, die letztendlich nicht stattfanden.

### 3 Versuche in trockener Umgebung

Die Daten stammen aus den bei AC2T research GmbH durchgeführten Tribotests bei den vorher bestimmten Testbedingungen: Pressung von 2 bar und Gleitgeschwindigkeit von 5 m/min, mit der Variation der Temperatur je nach Versuch (RT, 150 °C, 250 °C, 400 °C). Auf der X-Achse der folgenden Diagramme ist die Zeitdauer des Versuchs und auf der Y-Achse sind die Werte der Reibkoeffizienten aufgetragen. Die Luftfeuchtigkeit wurde nur bei den Raumtemperaturtests berücksichtigt und durch Druckluft auf ca. 10 % abgesenkt, da dies einen direkten Einfluss auf das Graphitverhalten hat. Bei den weiteren Versuchen wurde die Absorption von Wasserdampf wegen der hohen Temperaturen von über 100 °C nicht mehr so relevant, aufgrund der eingestellten trockenen Umgebung. Das Ziel ist möglichst konstante Ausgangsbedingungen geschafft zu werden, damit die Ergebnisse vergleichbar und nicht verfälscht sein können.

Die Rauheiten der Gleitflächen der Graphitsegmente wurde mit Hilfe der konfokalen Profilometrie charakterisiert (Nanofokus, beschrieben im vorigen Kapitel). Es wurde angenommen, dass die Rauheit der Stahlscheiben (Gegenlaufpartner) die Auswirkungen auf die Tribo-Paarung und insbesondere das Graphitverhalten entscheidend beeinflusste. Deswegen wurden die Gegenlaufpartner mit zwei unterschiedlichen Rauheiten ( $R_z$ ) des Rundschliffs hergestellt und als „fein“ und „grob“ bezeichnet. Die folgende Auswertung zeigt, ob dies wirklich eine so wichtige Rolle für die Graphiteigenschaften spielt und ob dies zu erheblichen Unterschieden im eingestellten Rauheitsprofil der Graphitsegmente führt. Dabei sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass die Anpassung des Rauheitsprofils stärker vom gesamten Lastkollektiv (Druck, Geschwindigkeit u. a.) abhängt als von der Topographie der beiden Tribopartner. Da sich unter konstanten Bedingungen über die Zeit ein stationärer Zustand einstellt, erfolgt eine möglichst große Anpassung im mikrogeometrischen Bereich, die aufeinander abgleitenden Rauigkeitsspitzen verzahnen ineinander. Dadurch wird die Rauheit etwas abgebaut und bessere Adaption der aufeinander gleitenden Oberflächen erreicht. Es wird behauptet, dass bei den raueren Oberflächen, wie vorher erwähnt, die sogenannte Run-In-Phase beobachtet wird und schon am Anfang ein relativ starker Verschleiß auftritt.[61, 195]

Nach *Stahl und Eisen* [209] nimmt die Rauheit der Bauteile während eines Einlaufvorganges dann ab, wenn ihre Rauheit zum Beginn größer war als die typische Betriebsrauheit nach dem Einlaufende. Bei den Metallen ist auch einen ausgeprägten Spiegeleffekt bei geringerer Rauheit folglich zu beobachten[217].

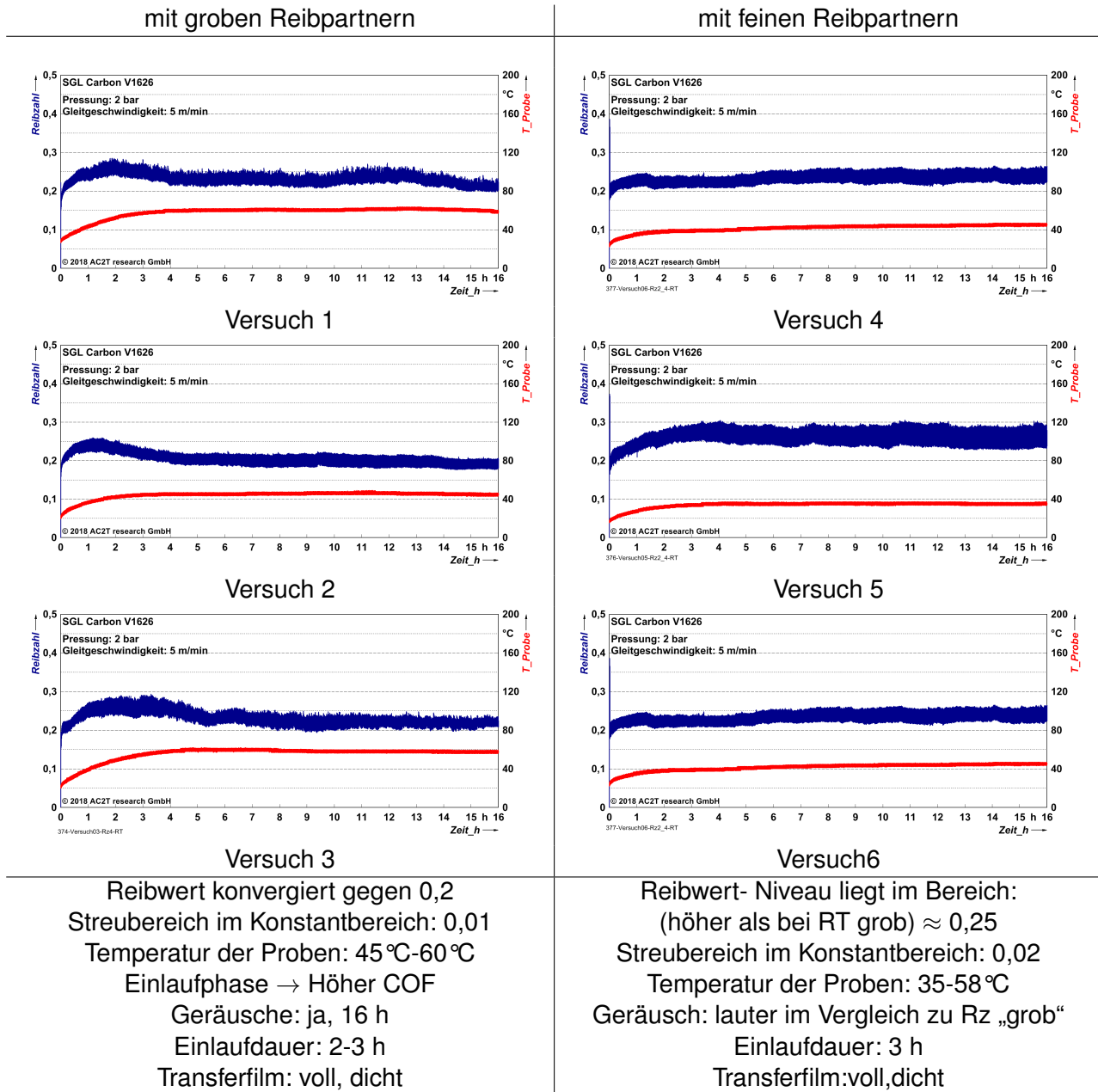
Nach der Run-In-Phase ändern sich, die von der Rauheit und Welligkeit erreichten konstanten Werte während der Betriebsdauer nicht mehr. Nach dem 16-stündigen Test haben die Graphitsegmente die eingestellte Betriebsrauigkeit ermittelt und diese wurde dann berührungslos

gemessen. Die Quelle der Diagramme sind die Messdaten aus der Profilometrie und die daraus resultierenden Durchschnittswerte der Rauheit der verschiedenen Tests. Dabei wurden die linien- und flächenbezogenen Oberflächenparameter ermittelt. Die dreidimensionalen Parameter sind aussagekräftiger, da diese auf die ganze gemessene durch Stitchen Fläche bezogen sind. Die Werte beziehen sich auf den mittleren Bereich der Graphitsegmente mit einer Länge von ca. 5,6 mm. Die wichtigsten Parameter für die Oberflächendefinition,-vergleich und -analyse in der bestehenden Situation sind  $R_q$  (der quadratische Mittelwert, RMS),  $R_{sk}$  (Schiefe/engl.: Skewness) und  $R_{ku}$  (Kurtosis) nach ISO 4287 [56] sowie  $S_q$ ,  $S_{sk}$  und  $S_{ku}$  nach ISO 25178 [57].



### 3.1 Bei Raumtemperatur

#### 3.1.1 Reibungskurven



**Tab. IV.1:** Versuche bei Raumtemperatur

Die getesteten Graphitsegmente zeigen einen konstanten Reibzahlverlauf, wobei die Reibzahlen der Einlaufphase leicht höher im Vergleich zum konstanten Bereich sind (max ca. 0,27 (grob) und 0,35 (fein) ). Die Ergebnisse aus den Versuchen bei Raumtemperatur liefern Information über die gegen 0,2 konvergierenden Reibungskoeffizienten, wobei je nach Gegenlaufpartnerkombination leichte Unterschiede zu beobachten sind. Bei den Versuchen mit einem feineren Stahlring sind die Reibungszahlen um 25 % höher,  $\mu$  beträgt 0,25. Interessant ist dabei die

Temperaturentwicklung und genauer: bei den Tests mit einem feinen Gegenkörper, trotz der höheren Reibwerte, ist die eingestellte mittlere Temperatur um 10 °C niedriger (43 °C). Die Einlaufphasen dauern ungefähr 2-3 Stunden, sind aber nicht klar vom Rest der Kurve abzutrennen. Die Streuung der Reibkoeffizienten ist 0,01 im konstanten Bereich. Die akustische Äußerung während der 16-stündigen Versuche war relativ stark, besonders bei den Tests mit einem feineren Reibpartner. Die Periodizität der Geräusche entsprach der Umdrehungsfrequenz. Visuell nach den Versuchen zeigen die Graphitproben geringer Verschleißabtrag. Die Rauheitstäler vom Konditionieren sind auch nach den 16-stündigen Versuchen erkennbar, infolge des nicht vollständigen Kontakts im Gleitpaar. Der Transferfilm sieht dicht und vollständig aus. Das „Verglasen“ (glänzende Oberflächenbereiche) der Oberfläche der Proben tritt hier schon auf und es kann sein, dass es um eine starke Verdichtung und Aufglättung der Graphitsegmente während des Versuchs geht, was später mittels Raman-Spektroskopie untersucht wurde.

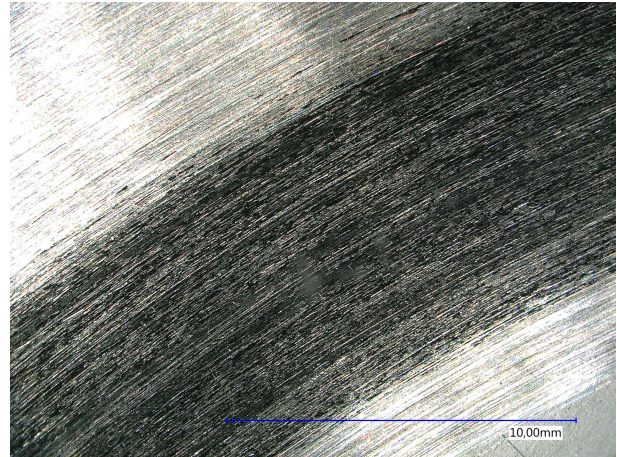


Abb. IV.1: Lichtmikroskopische Aufnahme, Transferfilm nach RT-Test

### 3.1.2 Vergleich des Oberflächenzustandes vor und nach dem Versuch (Änderung der Rauheitsparameter)

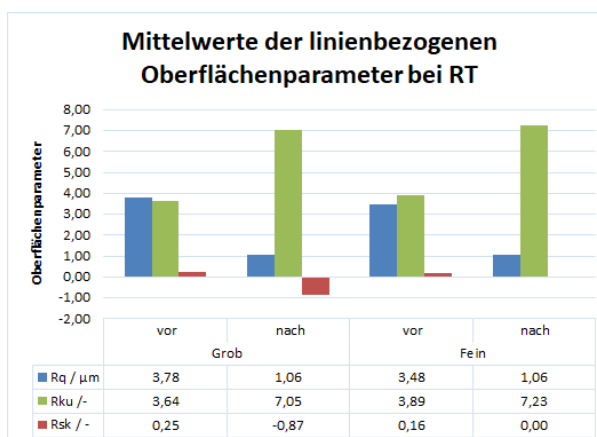


Abb. IV.2: 2D-Parameter bei RT

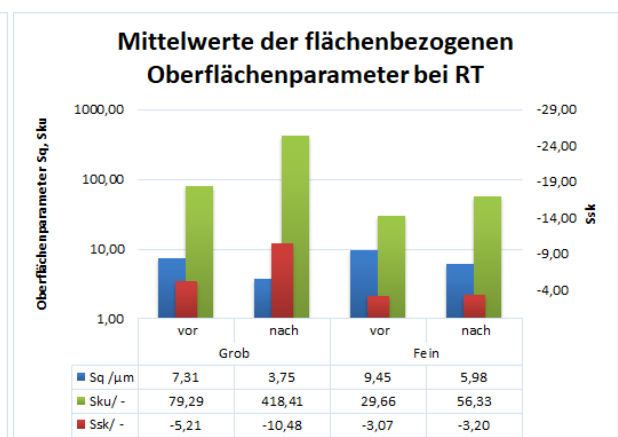
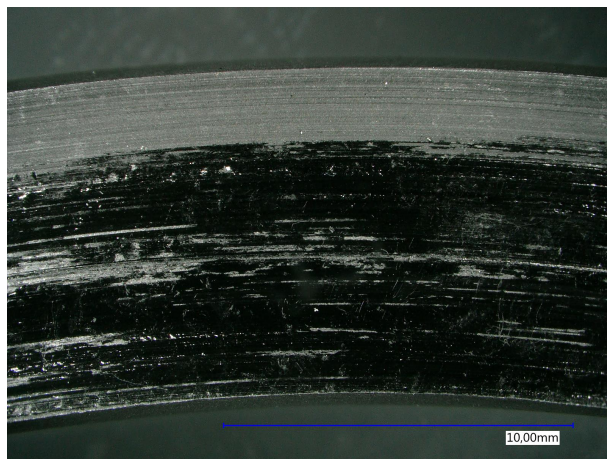


Abb. IV.3: 3D-Parameter bei RT

Im Hinblick auf die zweidimensionalen Oberflächenparameter und deren Änderung nach den Raumtemperaturexperimenten können folgende Beobachtungen gemacht werden: Der quadratische Mittelwert der Profilabweichung berechnet sich entlang der Einzelmessstrecke und reagiert jedoch empfindlicher auf einzelne Peaks und Täler, wie schon im theoretischen Teil erwähnt.

Daher erscheint dieser als relevanter Vergleichsfaktor, da der arithmetische Mittelrauwert  $R_a$  nicht zwischen Spitzen und Riefen unterscheiden kann, ebenso wenig kann er verschiedene Profilformen erkennen. Der quadratische Mittelwert der linienbezogenen Oberflächenparameter nimmt um ca. 70 % ab ( $R_{q,vor} > R_{q,nach}$ ). Bei dem dreidimensionalen Parameter aus den Versuchen bei Raumtemperatur in Kombination mit einem „feinen“ Gegenlaufpartner ist den ähnlichen Zustand zu sehen.  $S_{q,vor}$  –Mittelwert ist höher als  $S_{q,nach}$ . Die Abnahme ist um ca. 36 %. Im Unterschied dazu, ist der Anteil der  $S_q$  bei den Versuchen in Kombination mit einem Gegenkörper mit rauerer/gröberer Oberfläche um fast 50 % gesunken. Der 2D quadratische Mittelwert der Profilabweichung aller geometrisch konditionierten Proben vor den Tests beträgt  $3,63 \mu\text{m}$  und nach den Raumtemperaturtests  $1,06 \mu\text{m}$ . Der quadratische Mittelwert der Ordinatenwerte innerhalb des Definitionsbereichs der Referenzproben, welcher auch der Standardabweichung der Höhen auf Flächen entspricht, beträgt  $8,38$  und nach den RT-Tests der Gesamtmittelwert von  $S_q$  beträgt  $4,86$ . Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die  $R_q$  und  $S_q$ -Werte senken, die Oberfläche wird glatter, da die Rauheitsspitzen nach der Einlaufphase abgetragen werden.

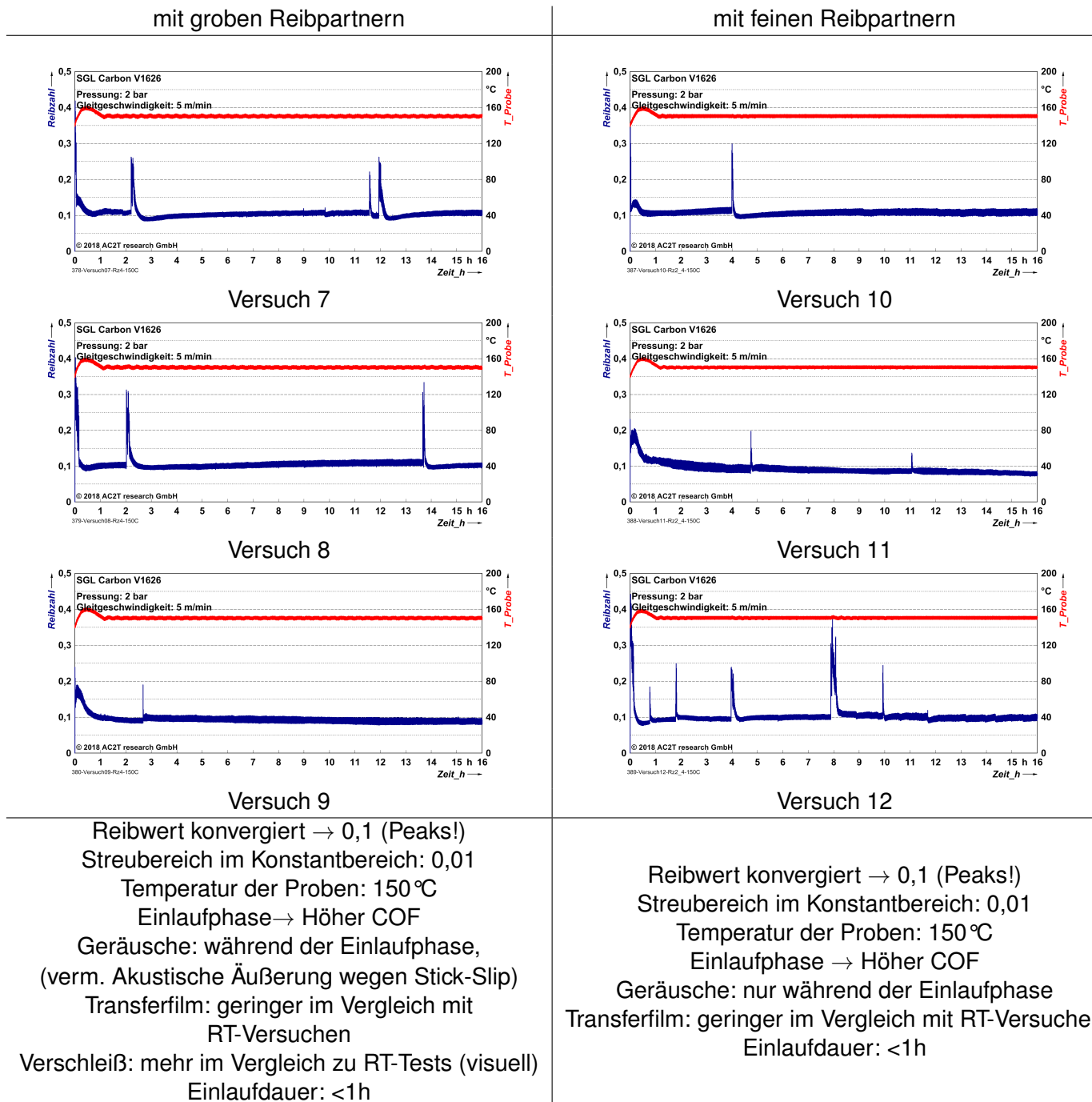
Eine bessere Vorstellung für die Änderung des Profils wird von dem Parametervergleich der Schiefe und der Steilheit (Kurtosis) bekommen. Der Gesamtmittelwert der Schiefe hat sich von  $0,2 R_{sk,vor}$  auf  $-0,44 R_{sk,nach}$  verringert. Im Gegensatz zum  $R_a$  gibt dieser Parameter jedoch keine Informationen in Bezug auf die absolute Höhe des Profils, ist aber von Bedeutung, wenn Kontakt- oder Schmierfunktionen erforderlich sind. Dies wird durch die Asymmetrie der Amplitudendichtekurve gezeigt. Eine negative Schiefe kennzeichnet eine Oberfläche mit gutem Tragverhalten, was in der aktuellen Situation beobachtet werden kann. Bei den flächenbezogenen Parametern wird das Gleiche festgestellt:  $S_{sk,vor} > S_{sk,nach}$ , wobei nach dem Versuch der Gesamtmittelwert (von ca. -7) negativ ist. Das zeigt eindeutig, dass die Höhenverteilung oberhalb der mittleren Ebene geneigt ist. Wird je nach Rundschliff zwischen den beiden Gegenlaufpartner unterschieden, ist die Schiefe beim Versuch mit dem „gröbere“ Reibungspartner deutlich ausgeprägter. Die Kurtosis der vor und nach den Versuchen gemessenen Profile weist höhere als 3 ( $R_{ku}, S_{ku}$ -Werte), deswegen ist die Höhenverteilung steilgipfelig oder genauer: das Profil besitzt keine abgeflachte Spitzen und Täler. Die Form der Kurtosis ist vor und nach dem Versuch leptokurtisch aufgrund der gemessenen und automatisch berechneten Werte.



**Abb. IV.4:** Lichtmikroskopische Aufnahme, Graphitprobe nach RT-Test

## 3.2 Bei 150 °C

## 3.2.1 Reibungskurven



Tab. IV.2: Versuche bei 150 °C

Die Ergebnisse der Tribotests bei 150 °C zeigen deutlich kürzere Einlaufphasen von weniger als einer Stunde im Vergleich zu den Raumtemperatur-Tests. Bei den 16-Stunden-Tests wurden niedrige Reibungskoeffizienten von 0,1 mit Reibungsinhomogenitäten beobachtet. Der getes-

tete Graphit zeigt Reibzahlpeaks, welche auf einen veränderten Reibungszustand hindeuten. Die Reibungsinstabilitäten von  $\mu > 0,1$  in unregelmäßigen Abständen sind zu beobachten, weil Schichten abgetragen werden, Schwingungen oder Stick-Slip-Effekte auftreten können. Diese führen zur akustischen Emission bei Reibung und zur Änderung der Rauheit von den Oberflächen der Graphitsegmente. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den 150 °C-Experimenten mit groben und feinen Reibungspartnern festgestellt. Der visuell sichtbare Abrieb nach diesen Experimenten ist mehr im Vergleich zu den Raumtemperaturtests.

### 3.2.2 Vergleich des Oberflächenzustandes vor und nach dem Versuch (Änderung der Rauheitsparameter)

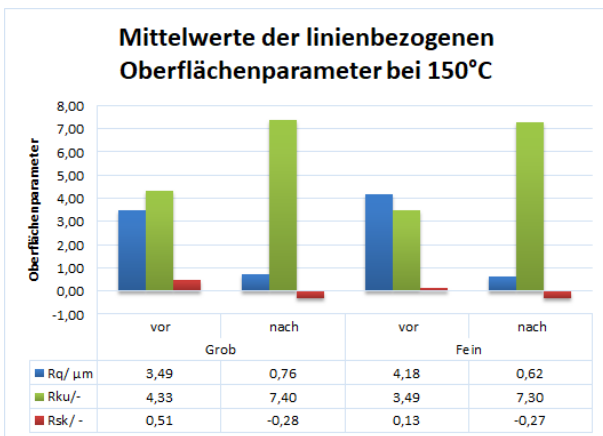


Abb. IV.5: 2D-Parameter bei 150 °C

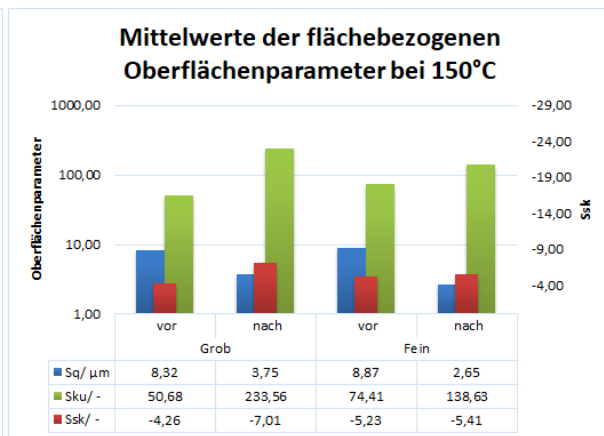


Abb. IV.6: 3D-Parameter bei 150 °C

$R_q$  nach dem Versuchen bei 150 °C ist im Vergleich zu den RT-Experimenten noch geringer geworden. Es ist zu konstatieren, dass einen stärkeren Abfall des quadratischen Mittelwerts mit den feineren Reibpartnern stattfindet. Für die flächenbezogenen Parameter gilt das Gleiche ( $S_{q,vor} > S_{q,nach}$ ). Die 2D-Schiefe vor den Versuchen ist positiv, wohingegen die Schiefe des gelaufenen Profils negativ ist ( $R_{sk,vor} > R_{sk,nach}$ ). Dabei wird ein Übergang von einem hohen Profilspitzenanteil zu einem Profil mit besserer Tragfähigkeit und schräger nach oben verlagertes Verteilung. Die Kurtosis steigt definitiv nach den Tribo-Versuchen bei 150 °C ( $R_{ku,vor} < R_{ku,nach}$ ). Die Kombination mit einem größeren Reibpartner zeigt im Vergleich zu den Testergebnissen bei Raumtemperatur geringere flächenbezogene Werte. Die

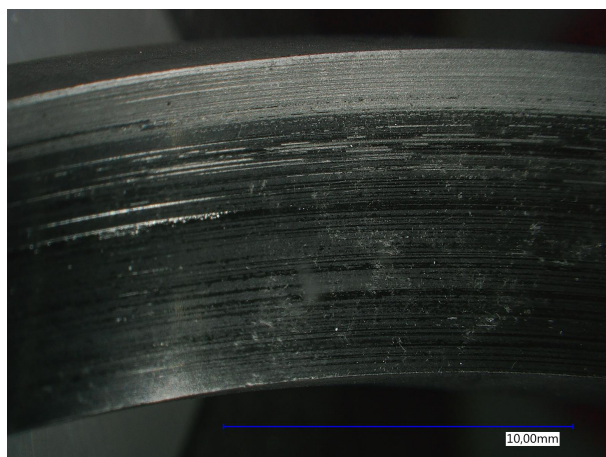
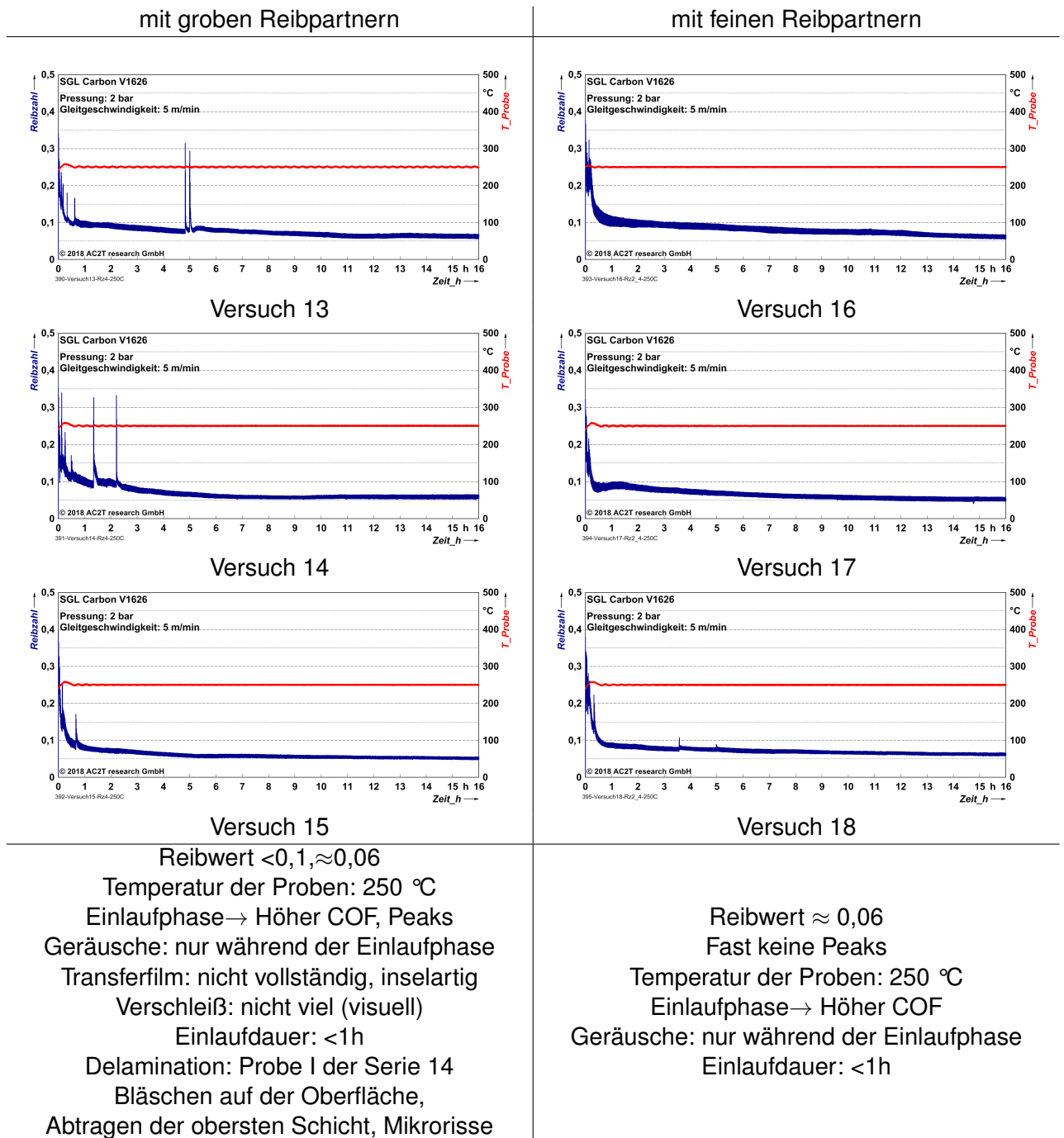


Abb. IV.7: Lichtmikroskopische Aufnahme, Graphitprobe nach 150 °C-Test

Tendenz bleibt dabei unverändert, da die Kurtosis leptokurtisch ist (die Höhenverteilung ist steilgipfelig).

### 3.3 Bei 250 °C

#### 3.3.1 Reibungskurven



Tab. IV.3: Versuche bei 250 °C

Das Reibzahlverhalten bei 250 °C nach der kurzen Einlaufdauer (von weniger als eine Stunde) zeigt stabile Werte, wobei das Niveau bei einem Wert von ungefähr 0,06 liegt. Die begleitenden von höheren Reibzahlen akustischen Emissionen, waren nur während der Einlaufphase ausgeprägter. Reibungsspitzen sind während der Einlaufphase oder kurz danach mit einer Peakhöhe von bis zu  $\mu=0,3$  zu beobachten, wobei deren Auftreten ist viel seltener als bei den Versuchen bei 150 °C. Der visuelle Verschleißabtrag war weniger im Vergleich zu den Tests bei tieferen Temperaturen. Von besonderer Bedeutung bei den 250 °C-Tests in Kombination mit einem groben Gegenlaufpartner ist das Auftreten und Konstatieren von Delamination der Oberflächengraphitschichten. Dies liegt daran, dass der Graphit eine Schichtstruktur hat und Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Schichten überwunden werden, wodurch die individuellen Schichten voneinander exfoliiert werden (abgelöst). Auf der Oberfläche der Serie 14, Probe 1 wurden Bläschen und Mikrorisse als Beweis für die Enthftung der Schichten festgestellt.

### 3.3.2 Vergleich des Oberflächenzustandes vor und nach dem Versuch (Änderung der Rauheitsparameter)

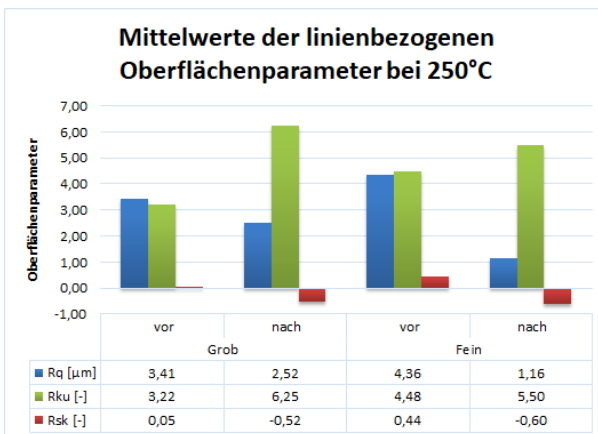


Abb. IV.8: 2D-Parameter bei 250 °C

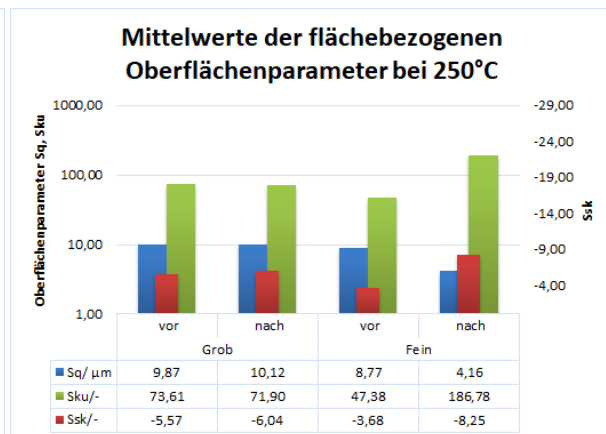
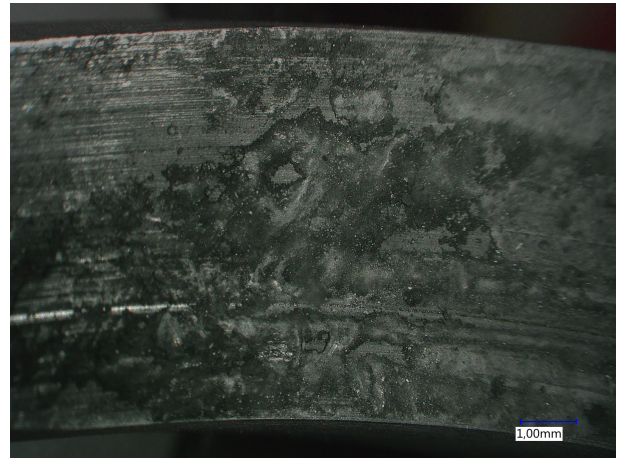


Abb. IV.9: 3D-Parameter bei 250 °C

Die  $R_q$ -Werte nach den Experimenten bei 250 °C sind im Vergleich zu den  $R_q$ -Werten bei 150 °C höher (entsprechend den  $R_z$ -Werten, die nicht Teil des Diagramms sind, bestätigt sich die Tatsache, dass die Oberflächenprofile rauer geworden sind), aber im Allgemeinen ist eine ähnliche Tendenz zu erkennen: Glättung der Rauheitspeaks im Verlauf der 16-stündigen Experimente. Besonders auffallend ist aber, dass die dreidimensionalen Parameter für die Profilabweichung  $S_q$  widersprüchliches Verhalten zeigen. Bei den Experimenten mit einem Gegenlaufpartner mit feinerem Rundschliff ist eine Abnahme der  $S_q$ -Werte zu beobachten, im Unterschied zum „groben“ Reibpartner, wo es einen leichten Anstieg gibt. Die Ursache dafür sind die Messwerte der Graphitserie 14, bei welcher starke Beschädigung der Graphitoberfläche und Delamination der Schichten beobachtet wurde wie in [Abbildung IV.10](#) zu sehen ist. Dies hat die Mittelwerte der Oberflächenparameter stark beeinflusst.

Bei der Schiefe wird keine signifikante Änderung der Oberflächenparameter festgestellt, außer bei den 3D-Parameter der Versuche mit einem feinen Gegenlaufpartner. Da diese Werte Aussagen über den Neigungsgrad der Rauheit geben, findet hier wieder eine gute Tragfähigkeit statt. Da  $R_{sk}$  vor dem Test ungefähr gleich 0 ist, sind die Spitzen und die Vertiefungen symmetrisch zur mittleren Ebene verteilt. Nach dem Versuch ist  $R_{sk}$  leicht negativ und folgend oberhalb der mittleren Ebene geneigt. Bei den Proben, die gegen einen Gegenlaufpartner mit gröberer Rauigkeit gleiten, wird das Gleiche beobachtet. Die flächenbezogenen Parameter bleiben negativ vor und nach den Versuchen. Die Kurtosis ist vor und nach den Experimenten positiv und größer 3. Wobei die Spitzigkeit des Profils nach den Versuchen ausgeprägter ist. Nach den Experimenten mit den „feinen“ Reibpartnern können im Gegensatz zu den 3D-Ergebnissen ( $S_{ku}$ ) aus den Tests mit groboberflächigen Gegenkörpern, wo die Kurtosis fast unverändert (nur mit einer leichten Abnahme) bleibt, deutlich höhere flächenbezogene Werte beobachtet werden.

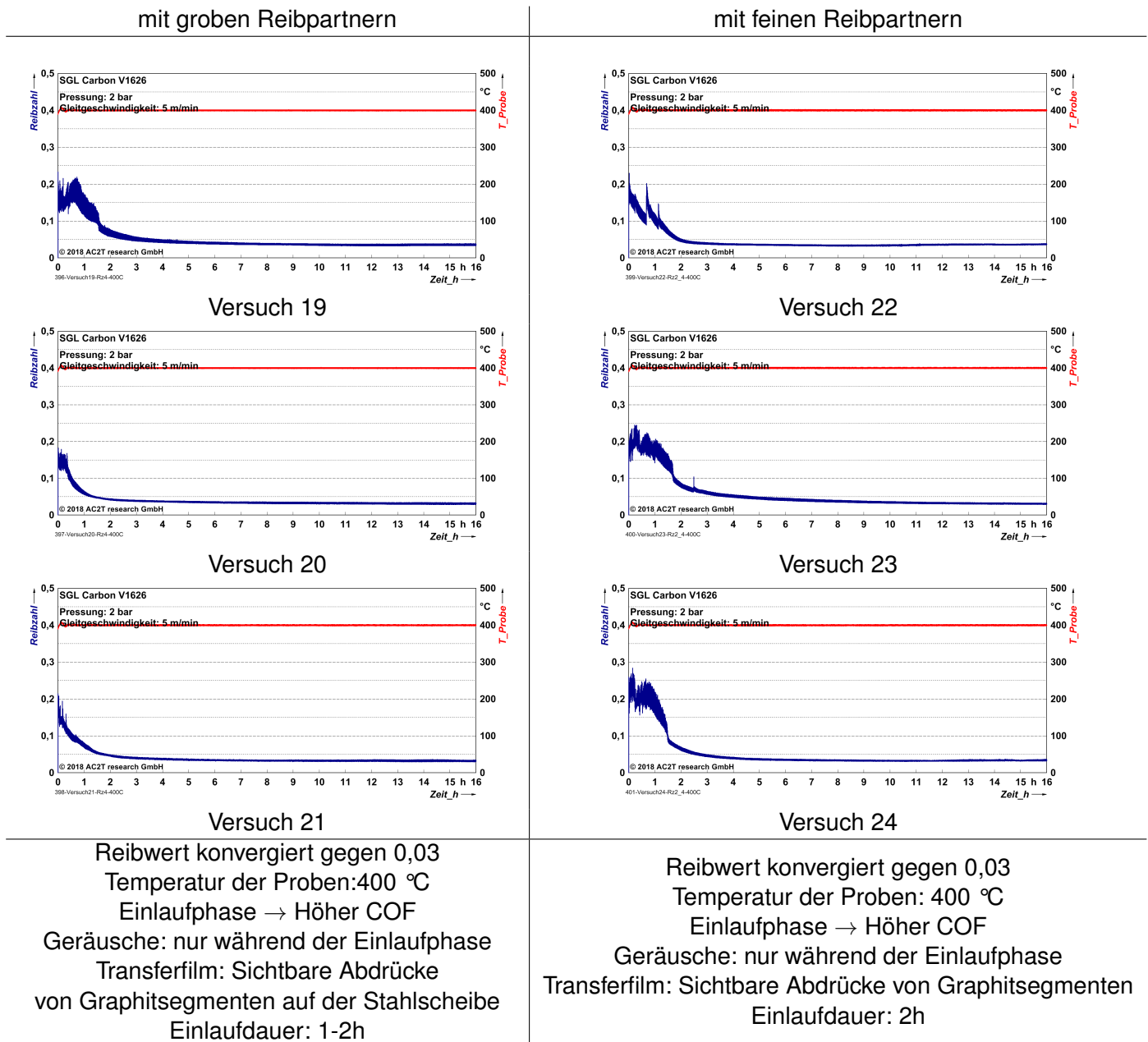


**Abb. IV.10:** Lichtmikroskopische Aufnahme, Serie 14, Graphitprobe nach 250 °C-Test



### 3.4 Bei 400 °C

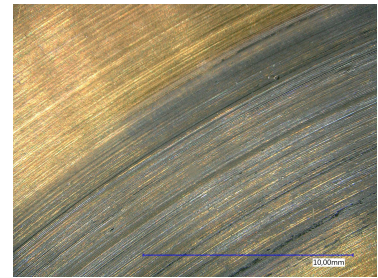
#### 3.4.1 Reibungskurven



**Tab. IV.4:** Versuche bei 400 °C

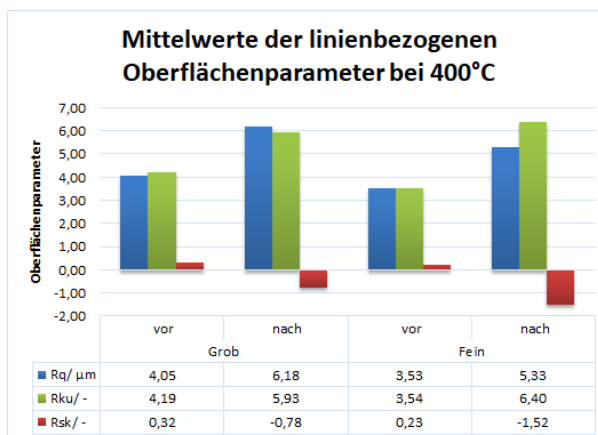
Trotz der unterschiedlichen Form und Dauer der Einlaufphasen der Versuche bei 400 °C ist es festzustellen, dass die eingestellten Reibungszahlen im konstanten Bereich bei 0,03 liegen. Die Einlaufphasen der Versuche mit einem groben Gegenlaufpartner zeigen leicht niedrigere Reibungskoeffizienten bis ca. 0,2 und dauern bis 2 Std., während die Versuchen in Kombination mit einem feineren Gegenkörper höhere  $\mu$  zeigen, ungefähr bis 0,3.

Die akustische Äußerung tritt wieder vorwiegend während der Einlaufphase auf. Es ist zu betonen, dass die Graphitsegmente deutliche Abdrücke auf den Stahlringen hinterließen, da der Hebel des Tribometers bereits vor dem Vorheizen der Kammer belastet wurde. Die Graphitsegmente waren im Kontakt mit dem Gegenlaufpartner bis zum vollständigen Erreichen der Soll-Temperatur und des Einschaltens des Motors (Start des Versuchs). Das Experiment 21 wurde mit einer späteren Belastung des Hebels durchgeführt, es folgten jedoch keine signifikanten oder messbaren Änderungen in den Ergebnissen.

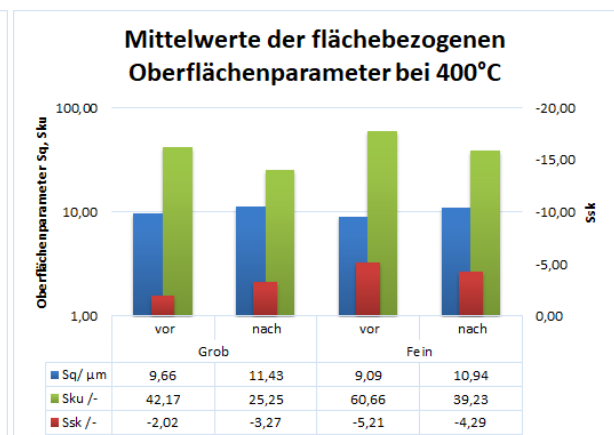


**Abb. IV.11:** Lichtmikroskopische Aufnahme, Transferfilm nach 400 °C-Test

### 3.4.2 Vergleich des Oberflächenzustandes vor und nach dem Versuch (Änderung der Rauheitsparameter)

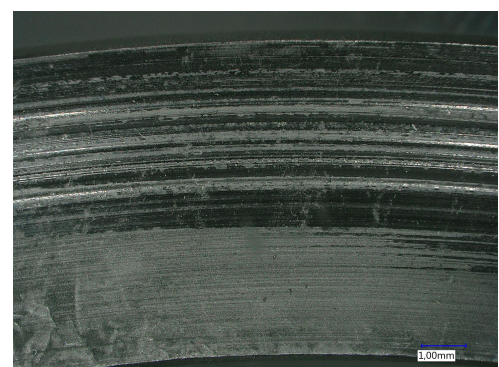


**Abb. IV.12:** 2D-Parameter bei 400 °C



**Abb. IV.13:** 3D-Parameter bei 400 °C

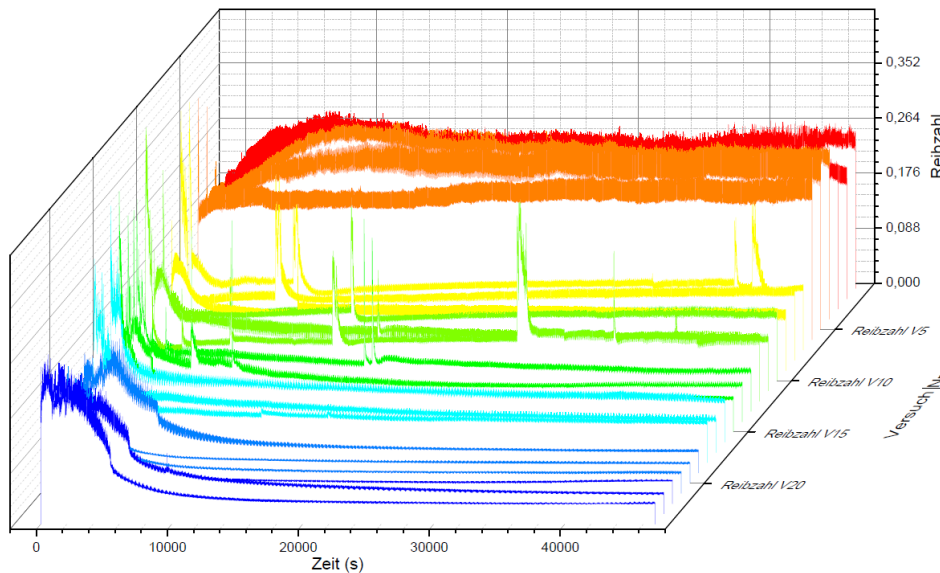
Im Unterschied zu den anderen Tests bei tieferen Temperaturen, sind die Werte des quadratischen Mittelwerts vor dem Versuch bei 400 °C geringer als die nach dem Versuch gemessenen Werte. Die dreidimensionalen Parameter der Schiefe zeigen ein ungleichmäßiges Verhalten je nach Reibpartner. Die Werte bleiben kleiner als 0, was als gutes Tragverhalten des Profils interpretiert werden kann. Signifikante Unterschiede zwischen den Tests in Abhängigkeit von den Reibungspartnern können aufgrund der alternierenden (abwechslenden) und instabilen Tendenz der Ergebnisse nicht festgestellt werden. Aus der visuellen mikroskopischen Betrachtung sowie aus der profilometrischen Untersuchung ist ersichtlich, dass die Verschleißspuren deutlich tiefer und breiter geworden sind.



**Abb. IV.14:** Lichtmikroskopische Aufnahme, Graphitprobe nach 400 °C-Test

### 3.5 Zusammenfassung

#### 3.5.1 Reibungskurven



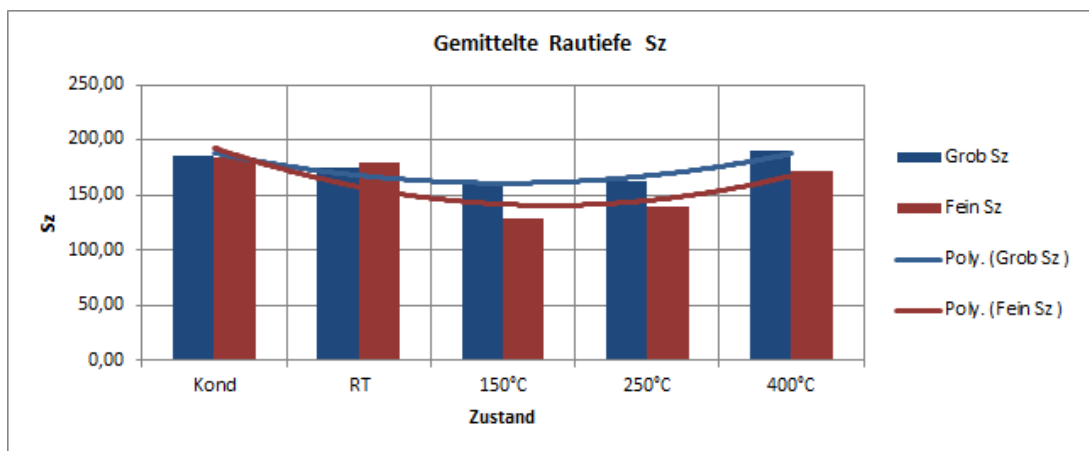
**Abb. IV.15:** Vergleich aller Reibungskoeffizienten

Die Experimente haben sehr reproduzierbare Ergebnisse geliefert. Die Grafik zeigt deutlich die kontinuierliche Abnahme der Reibungskoeffizienten zwischen den Graphitsegmenten und dem Stahlring innerhalb des tribotechnischen Systems mit der Temperaturerhöhung. Während der Einlaufphase wurden signifikant höhere Reibungskoeffizienten beobachtet, die während des Experiments auf konstante Werte eingestellt wurden. Die höchsten Reibwerte wurden bei den Raumtemperaturtests festgestellt und liegen im konstanten Bereich von 0,2 bis 0,25, während die geringsten Reibwerte bei 400 °C konstatiert wurden. Daraus folgt, dass bei den Experimenten im untersuchten Temperaturbereich und in trockener Luft mit der Zunahme der Temperatur ein Rückgang der Reibwerte auftritt. Andererseits nahm der Verschleiß mit abnehmender Reibungszahl zu. Die kürzeste Einlaufdauer wurde bei den 150 °C-Tests festgestellt und die längsten Run-In-Phasen haben bei den Raumtemperatur-Versuchen stattgefunden. Daraus folgt, dass die höheren Temperaturen (150 °C-250 °C) den Einlauf und die Einstellung des neuen stationären Zustands beschleunigen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Einlaufphase sich umso mehr verlängert, je näher die Temperatur an die Oxidationsgrenze des Graphits ansteigt, unter der Voraussetzung, dass die anderen Parameter konstant bleiben. Dies ist auf den Verlust der selbstschmierenden Eigenschaften des Graphits zurückzuführen.

Die Reibzahlinhomogenitäten während des Verlaufs sind vorwiegend bei 150 °C und 250 °C und möglicherweise aufgrund von Stick-Slip-Effekte (Haft-Gleit-Phänomen) entstanden, was aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht wird.

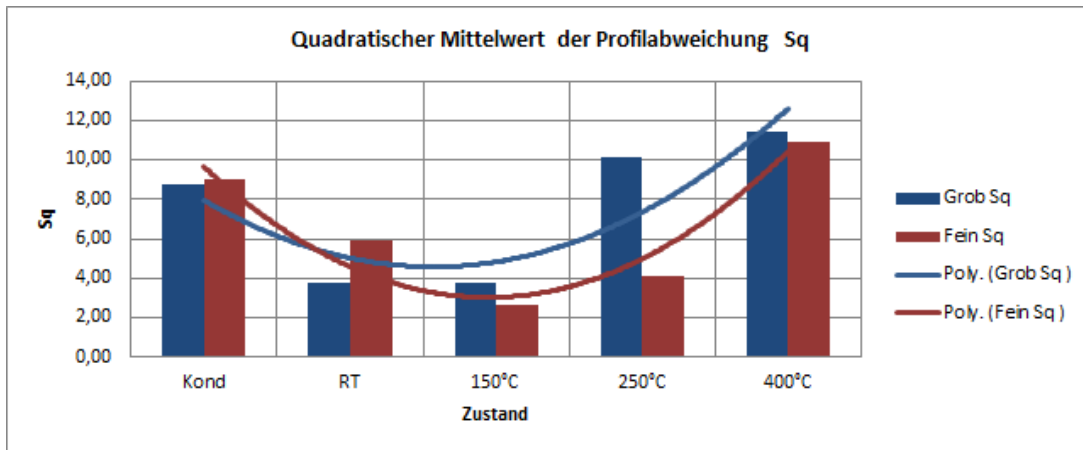
### 3.5.2 Änderung der Rauheitsparameter

Die Ergebnisse aller Messungen haben die zuvor erwähnte Information und Behauptungen nicht vollständig bestätigt. Nach den Tests besitzen die Proben nicht obligatorisch eine geringere Rauheit als die konditionierten Graphitsegmente. Die folgenden Beispiele zeigen die polynomi- sche Trendlinie zweiter Ordnung (mit einem Extremum), mit deren Hilfe das Verhältnis zwischen der thermischen Auswirkung und den flächenbezogenen Oberflächenparametern angezeigt wird. Zur besseren Darstellung (und zum besseren Verständnis) der Problematik werden in den folgenden Säulendiagrammen nur die flächenbezogenen Oberflächenparameter angezeigt, da sie wesentlich aussagekräftiger sind.



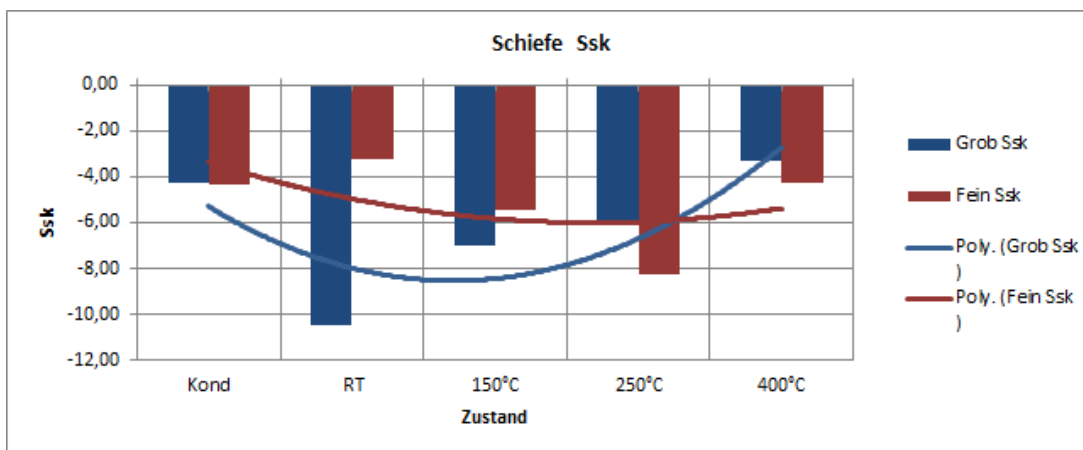
**Abb. IV.16:** gemittelte Rautiefe

Bei den nicht so empfindlichen Rauheitsparametern der gemittelten Rautiefe zeigt sich, dass der Verlauf der Trendlinie eine leichte Abnahme der Werte nach den Versuchen bei 150 °C und 250 °C und wieder eine Zunahme bei 400 °C aufweist. Wie bei vielen tribologischen Systemen reicht es nicht aus, die Oberfläche nur mit einem Merkmal (mit der gemittelten Rautiefe) zu charakterisieren, deswegen spielen bei dieser Auswertung auch der quadratische Mittelwert, die Schiefe und die Kurtosis eine wesentliche Rolle für die richtige Definition und Analyse der Profile.



**Abb. IV.17:** quadratische Mittelwert

Wie im Diagramm zu sehen ist, stellen sich die niedrigsten Werte des quadratischen Mittelwerts nach den RT, 150 °C und 250 °C -Versuchen ein. Dabei ist aber anfallend, dass die Tests einen deutlichen Anstieg der Werte nach den 400 °C- Versuchen aufweisen.



**Abb. IV.18:** Schiefe

Eine symmetrische Höhenverteilung mit so vielen Spitzen wie Tälern ist bei der Schiefe mit einem Nullwert zu beobachten, während bei Profilen mit großen Spitzen oder tiefen Kratzern eine negative Schiefe vorliegt und die Höhenverteilung oberhalb der mittleren Ebene geneigt ist, was in diesem Fall klar zu erkennen ist. Die Extremstelle der Trendlinie der flächenbezogenen Parameter  $S_{sk}$  ist bei den Raumtemperaturtests in Kombination mit einem groben Gegenlaufpartner zu finden, während bei den 250 °C-Test die höchsten Werte der Schiefe der Kombination mit einem feinen Gegenlaufpartner erscheinen. Fast unveränderte Schiefe im Vergleich mit dieser der konditionierten Proben wird nach den Versuchen bei 400 °C festgestellt, wobei bei den Versuchen mit einem groben Stahlring leicht höhere Werte zu erkennen sind.

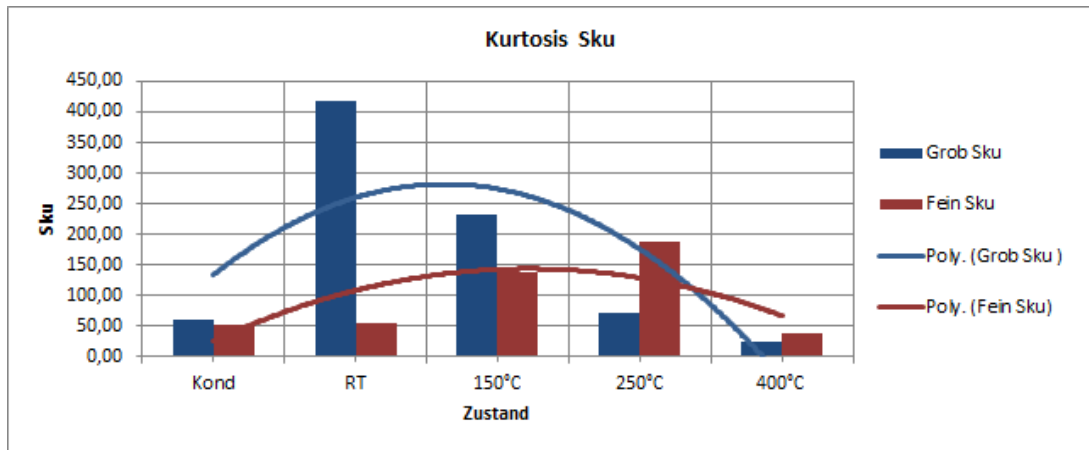


Abb. IV.19: Kurtose

Die Kurtosis beschreibt die Steilheit, die Art und Stärke der Asymmetrie einer Wahrscheinlichkeitsverteilung des Profils. Die größte Kurtosis erscheint nach den Raumtemperatur-Tests mit einem groben Gegenlaufpartner und die niedrigste nach den 400 °C-Versuchen. Bei einer Kurtosis größer als 3 weist das Profil relativ viele hohe Spitzen und tiefe Täler auf, was die Situation bei allen Proben darstellt. Bei 150 °C haben die Versuche mit den groben Gegenkörpern höhere Kurtosis gezeigt, während die polynomischen konkaven Trendlinien 2. Ordnung deutlich höhere Werte der Kurtosis bei den 250 °C-Versuchen in Kombination mit einem Gegenlaufpartner mit feinem Rundschliff zeigen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Extremwerte hauptsächlich bei Raumtemperatur-, 150 °C und 250 °C erscheinen. Es ist zu konstatieren, dass die Proben bei 400 °C ähnliche Werte wie die geometrisch konditionierten Proben zeigen. Die höchste Kurtosis (Verteilung ist sehr steilgipfelig) wird bei Raumtemperatur und die geringste bei 400 °C (wo auch die besten (niedrigsten) Reibzahlen festgestellt sind) beobachtet. Die Mindestwerte der Schiefe werden bei den groben Gegenlaufpartnern und nach den Raumtemperatur-, 150 °C, 250 °C-Tests festgestellt. Daraus folgt, dass die Flächen sehr gutes Kontaktverhalten aufweisen. Je nach Paarungspartner-Kombination gibt es aufgrund des unterschiedlichen Rundschliffs einen geringfügigen Unterschied, wobei die Trendlinie der Kombination mit einem groben Stahlring aufgrund der höheren Werte ein mehr ausgeprägtes Verhalten zeigt.

## 4 Betrachtung der Verschleißmessmethoden und deren Ergebnisse

### 4.1 Mittels Verschleißberechnung

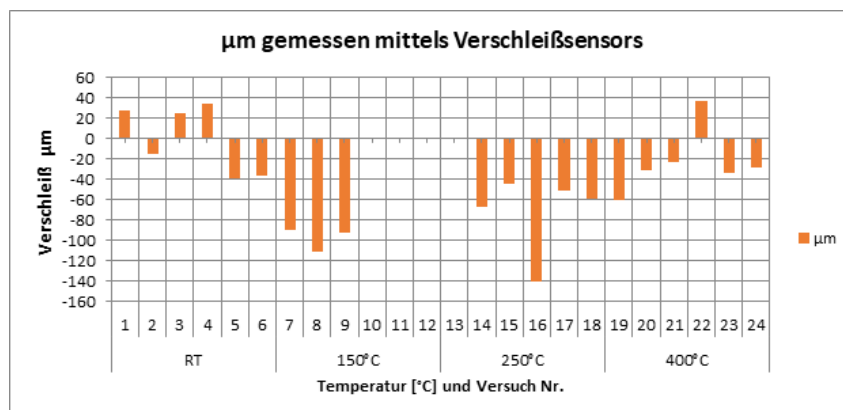
Die Verschleißberechnung basiert auf Dichte- $(kg/m^3)$ , Flächen- $(m_2)$  und Gewichtsdaten (kg).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{(A * h)} \rightarrow h = \frac{m}{(\rho * A)} \quad (IV.1)$$

Eine der Möglichkeiten zur Berechnung des Verschleißes wäre durch eine konstante Kontaktfläche und die genaue Kenntnis über die während des Versuchs entfernte Materialmenge gemäß der Formel:  $h = m/(\rho * A)$ . Die Dichte des Graphits ist nach Katalogen des Herstellers zu entnehmen. Tatsache ist, dass die Gewichtsmessungen aufgrund der Luftfeuchtigkeit ungenau sind. Die Kontaktfläche kann auch nicht als konstanter Parameter angenommen werden, da ihre Größe variiert, je nachdem ob man die reale oder die scheinbare Kontaktfläche betrachtet. Außerdem ist die Oberfläche konvex und wird während des Experiments abgeflacht und geglättet, wodurch die Kontaktfläche vergrößert wird. Zweitens hat die Kontaktseite aufgrund des Wasserstrahlschneidens und der dadurch verursachten Konizität eine kleinere Fläche als die Grundfläche der Graphitsegmente. Daraus kann geschlossen werden, dass die einzige zuverlässige Größe die Dichte erscheint. Dies reicht jedoch nicht aus, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erzielen.

#### 4.2 Mittels im Tribometer montiertes Verschleißsensors

Der Sensor ist ein Wegaufnehmer und misst den Abstand zwischen einem Objekt und einem Bezugspunkt im Bereich  $\pm 5$  mm. Äußerst wichtig dabei ist die richtige Einstellung des Sensors vor dem Beginn des Versuchs, damit die gemessenen Werte innerhalb des Messbereiches liegen. Das Endergebnis scheint aufgrund des Vergleichs mit der profilometrischen Methode der Verschleißmessung für die bestehende Situation nicht konsistent zu sein. Dies ist auf die Wärmeausdehnung der Bauteile in der Vorrichtung wegen Temperaturempfindlichkeit und thermischer Expansion der Materialien zurückzuführen, die ebenfalls mitgemessen wird. Dadurch sind die gemessenen Werte für eine aussagekräftige Verschleißmessung nicht relevant.

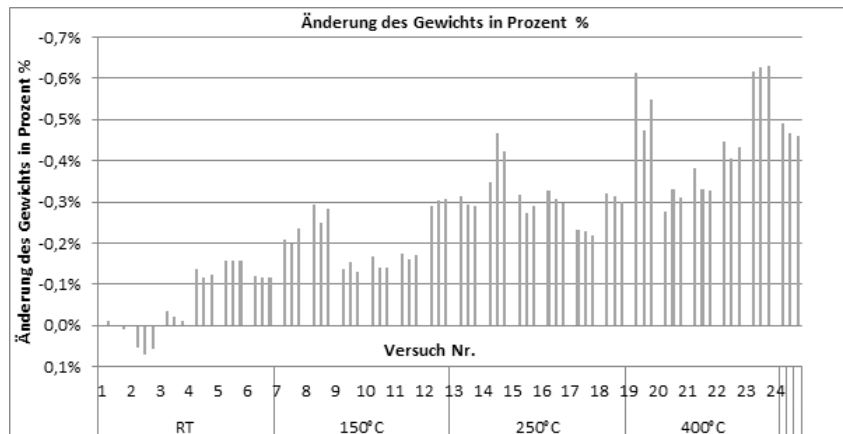


**Abb. IV.20:** Mit dem Verschleißsensor gemessene Werte, genauer dokumentiert in [Tabelle VI.3](#)

Durch die starke Streuung von fast 48 und den Mittelwert von  $-40 \mu m$  zeigen sich keine eindeutigen Ergebnissen, sowohl auch keine Konkatenation. Aus den ersten 4 Versuchen ist ersichtlich, dass die Fluktuation der Werte keiner Tendenz folgt. Nach dem sechsten Test zeigen die Werte bei  $150^\circ C$  einen signifikanten Anstieg, gefolgt von einer Abnahme der Ergebnisse bei  $250^\circ C$ -Tests. Dies ist aufgrund der Störgrößen wie Dehnung innerhalb des Geräts wegen

Temperaturempfindlichkeit und thermische Expansion der Materialien Der Absolutwert der Messwerte nimmt mit zunehmender Temperatur weiter ab, was den folgenden profilometrischen Messungen widerspricht:

### 4.3 Mittels Präzisionswaage



**Abb. IV.21:** Änderung des Gewichts der Proben gemessen mittels Laborwaage

Die Messungen wurden mit der *Excellence Level Analysenwaage Mettler Toledo XS204* durchgeführt.

Höchstlast	220 g
Ablesbarkeit	0,1 mg
Wiederholbarkeit(Prüfgewicht)	0,07 mg (10 g)
Mindesteinwaage (USP, 0,1%, typisch)	82 mg
Justierung	Intern / FACT
Abmessungen der Waagschale (BxT)	73 mm x 78 mm
Gesetzliche oder gewerbliche Bestimmungen	Nein
Stabilisierungszeit	1,5 s
Wiederholbarkeit (typisch)	0,04 mg
Linearität ±	0,2 mg
Abmessungen (TxHxB)	453 mm x 322 mm x 263 mm
Artikelnummer	11106003



**Abb. IV.22:** Analysenwaage Mettler Toledo XS204

Die Genauigkeit der Waage wird durch die Wiederholgenauigkeit (Prüfmaß) und die Linearität (Richtigkeitsmaß) quantifiziert. Das Präzisionsmaß zeigt die Fähigkeit einer Waage, unter denselben Bedingungen konstante Werte anzuzeigen, wenn dieselbe Probe mehrmals gewogen wird. Mit einem Prüfgewicht von 10 g ist die Wiederholbarkeit der Analysewaage 0,07 mg (üblicherweise als Standardabweichung angegeben). Je kleiner der Wert, umso besser das Präzisionsmaß. Die Gewichtsunterschiede der abgewogenen Proben von etwa 23 g sind im Bereich von 17 mg bis 145 mg, was völlig im Messbereich der Waage liegt.



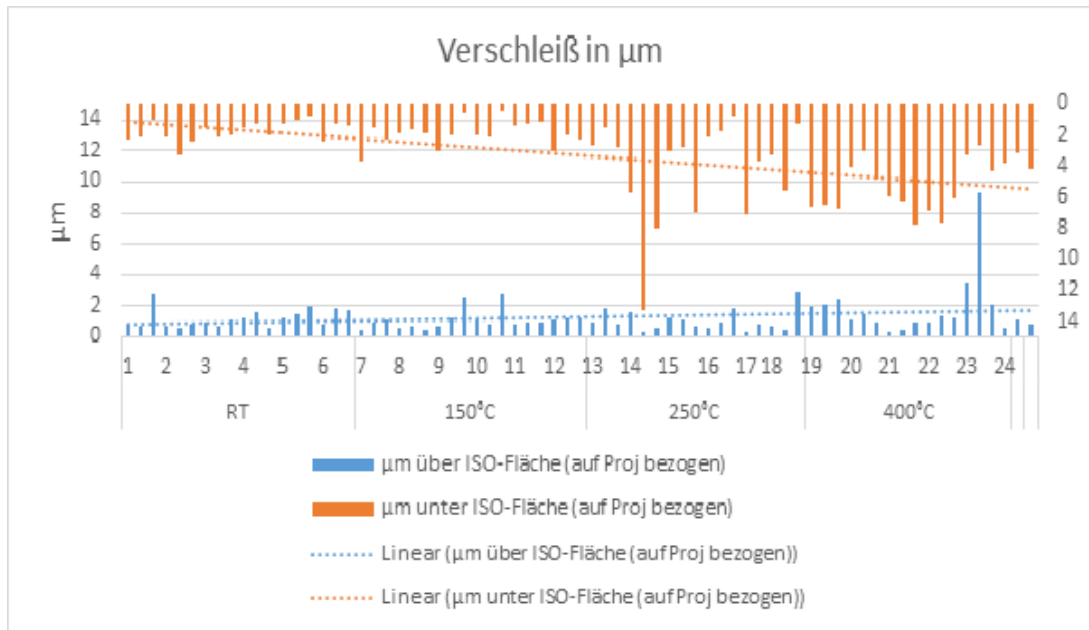
Es scheint, als ob eine Zunahme des Gewichtsverlusts beobachtet wird. Tatsache ist jedoch, dass dieser Unterschied weniger als 1 % beträgt und sehr stark von Umgebungseinflüssen wie die Luftfeuchtigkeit bewirkt wird.

Dies ist bewiesen durch die Gewichtszunahme der Proben nach den ersten Versuchen (Nr. 2 und 3). Logischer wäre, wenn das Gewicht unverändert oder kleiner als das Gewicht der Referenzproben wird, anstatt dessen wird eine mittlere Gewichtszunahme um 0,04 %, aufgrund der Störgröße der Luftfeuchtigkeit. Der Grund hierfür liegt darin begründet, dass in den ersten RT-Versuchen die prozentuale Gewichtsänderung nicht auf dem Ausgangsgewicht der Referenzproben, sondern auf dem Gewicht der klimatisch konditionierten Proben nach dem Trockenschrank beruhte. Dabei nimmt das Probengewicht ab, aufgrund der Trocknung der Proben. Aufgrund des Absorptionsvermögens für Gase und Wasserdampf des porösen Graphitmaterials wird nach den Triboversuchen wieder die verlorene Luftfeuchtigkeit aus der Luftumgebung aufgenommen [3]. Abschließend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse der Messungen keinem eindeutigen Trend folgten, trotz der prozentualen Gewichtszunahme.

#### 4.4 mittels Differenzmessung und Volumenmessung

Nach Auswertung der aus der 3D- Oberflächenmessung mit *Alicona Infinitefocus G5* stammenden Ergebnisse durch den Vergleich der Referenzproben mit den gelaufenen Proben ergibt sich ein Anstieg des Abriebs/ Materialübertrags über die Referenzfläche. Der durchschnittliche Wert der Verschleißhöhe über der Bezugsfläche beträgt 1,27  $\mu\text{m}$ . Die zunehmende Tendenz ist nicht wirklich relevant, da aufgrund des ständigen Kontakts mit dem Gegenlaufpartner eine kontinuierliche Deformation kontaktierender Rauheitserhebungen folgt. Auf der Oberfläche der Segmente können durch Zerstörung von Grenzflächenverbindungen oder Schichtablösung und Oberflächenabrieb nicht so viele Materialüberlagerungen in Art von Erhebungen aufgebracht werden. Nicht nur theoretisch bewiesen, aber auch praktisch während der Durchführung der Experimente bestätigt ist die Abtrennung übertragender Materialfragmente in Form von Verschleißpartikeln, welche aber in vorhandenen Fall leicht aus dem Tribokontakt entfernt werden. Im Betriebszustand könnte dies im Gegensatz zum Tribomodel zu negativen weiteren Auswirkungen führen. Gleichzeitig zeigt die exponentielle Trendlinie eine Zunahme der Verschleißtiefe unter die Referenzfläche mit dem Temperaturanstieg. Der Mittelwert der Verschleißhöhe unter der Referenzfläche beträgt 3.24  $\mu\text{m}$ , wobei bei den Raumtemperatur-Versuchen die kleinsten durchschnittlichen Werte von 1.75  $\mu\text{m}$  ermittelt werden und die höchste nach den Tests bei 400 °C – 5.2  $\mu\text{m}$ . Die Differenz- und Volumenmessungen zeigen realistische Ergebnisse, können jedoch nicht als absolut vertrauenswürdig angesehen werden. Der Grund dafür ist die Graphitstruktur und die schwache Van-Der-Waals- Anziehungskräfte zwischen den Schichten, was zu einer leichteren Verschiebung der Partikeln und Mikroänderung der Anhäufungen an der Oberfläche führt. Der Graphit mit seiner Stapelstruktur kann nicht mit den Metalloberflächen verglichen werden, bei denen die Markierungen der Proben unverändert bleiben. Diese Eigenschaft des Graphits hat einen negativen Einfluss auf die Präzision der Messergebnisse. Aus den profilome-

trischen Daten sollten möglichst viele gleiche Punkte aus den Referenz- und Laufproben manuell ausgewählt werden. Durch Überlappung und eine automatische feinere Ausrichtung ergibt sich das Differenzmodell, was anschließend durch Volumenmessung zu den Verschleißwerten eines bestimmten Bereichs führt. Wenn nicht dieselben Stellen für die Messungen verwendet werden, besteht die Möglichkeit, dass die Ergebnisse durch eine geringfügige Verschiebung verfälscht werden.



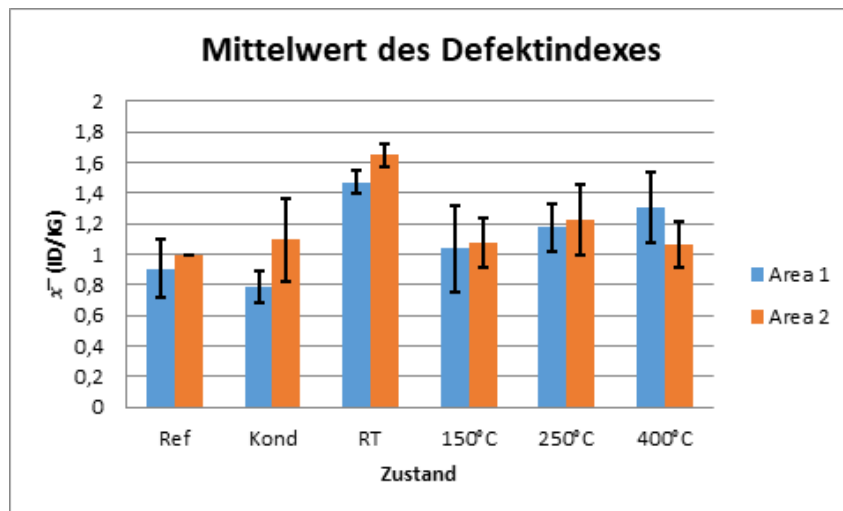
**Abb. IV.23:** Verschleiß gemessen mittels Alicona

#### 4.5 Zusammenfassung

Unter den bewährten Methoden gibt es keine, die 100 % sichere und quantifizierbare Ergebnisse liefert. Dies ist auf die mehreren Störgrößen und Ungenauigkeiten bei der Messung zurückzuführen. Die Verschleißrate ist schwer zu quantifizieren und steigt mit der Temperatur an. Die vorhandenen Riefen in Bewegungsrichtung sind ein Beweis dafür und eine Folge der Abrasion im System. Die Mikrorauheiten des härteren Gegenpartners pflügen durch die weichere Graphitoberfläche. Infolgedessen ändern sich die Masse und die Gestalt der Proben. Die Verschleißmessung bestätigt die theoretische Annahme, dass der Massenverlust nicht obligatorisch proportional mit der Reibung steigt. Bei den höheren Temperaturen wurden deutlich bessere Reibungskoeffizienten ermittelt, als bei tieferen. Der umgekehrte Befund wurde anhand der profilometrischen Messung sowie den Wägungen der Proben festgestellt. Je höher die Temperatur, desto stärker der Verschleiß der Graphitsegmenten, obwohl die Reibung mit steigender Temperatur abnimmt.

## 5 Analyse der Oberfläche: Raman-Spektroskopie

### 5.1 Auswertung der Messwerte



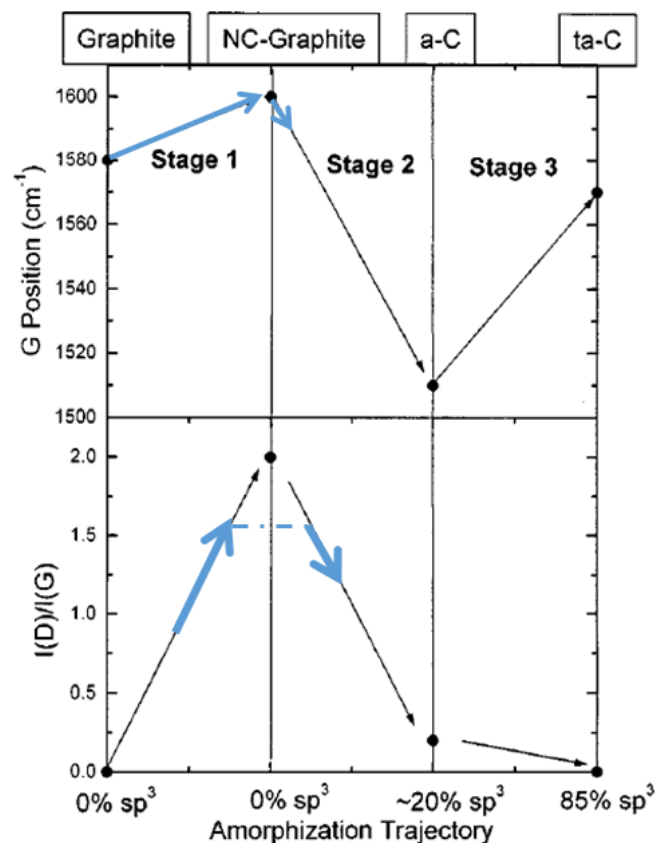
**Abb. IV.24:** Mittelwert des Defektindex

Im Diagramm sind die Mittelwerte des Verhältnisses der Intensität von D-Raman-Peak und G-Raman-Peak ( $I_D/I_G$ ) des Kohlenstoffs bei den unterschiedlichen Zuständen der Proben (vor und nach den Versuchen) zu sehen. Durch die Änderung dieses Verhältnisses wird die Defektsituation in der Mikrostruktur untersucht. Die Daten stammen aus der Raman-Messungen, durchgeführt an der Technischen Universität Wien. Die Fehlerindikatoren der Messstellen zeigen die Standardabweichungen (der Stichprobe) der Defektverhältnisse bei jedem Zustand. Als Haupttendenz lässt sich erkennen, dass sich die Defektsituation nach den Versuchen bei Raumtemperatur signifikanter ändert. Im Vergleich zu den anderen Zuständen der Graphitsegmente zeigen die Defektindexe (bei RT) einen deutlichen Anstieg. Ein Grund dafür könnte sein, dass die niedrigen Temperaturen keine strukturellen Ausheilungseffekte zulassen, die an den Proben nach den Versuchen bei höheren Temperaturen gemäß den Daten auftraten. Im Unterschied zu den Referenzproben ist der Gesamtmittelwert des Defektindex bei Raumtemperatur um 61.26 % gestiegen. Verglichen mit den Versuchen bei 150 °C hat sich dieses Verhältnis nur um 9.3 % gesteigert (Vergleich Ref/Run bei 150 °C). Mit dem weiteren Anstieg der Temperatur ist kein signifikanter Unterschied des Defektindex zu beobachten. Bei höheren Temperaturen oxidiert der Graphit, durchläuft jedoch weitere thermische Prozesse, die zur Ausheilung der Mikrostruktur führen. [99].

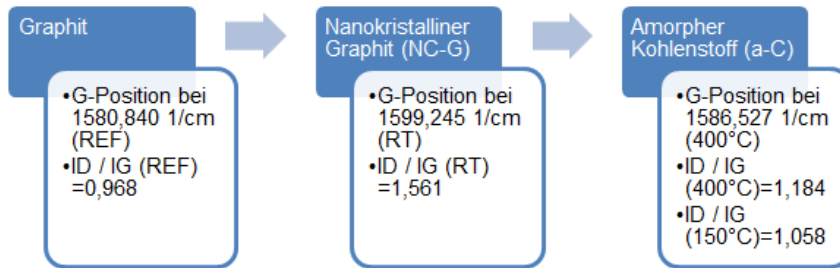
Nach Bernard u. a. [15] wurde gezeigt, dass es zwei wesentliche Regime gibt, die unterschieden werden müssen: erstens Pyrolyse, bei der das D / G-Verhältnis mit der Temperatur steigt, gefolgt von Graphitisierung, während das D / G-Verhältnis mit der Temperatur abnimmt. Dabei nehmen zuerst die D-Bänder mit der Temperatur zu und dann ab, wenn die Temperatur weiter

steigt. Abhängig vom Material (graphitierbar oder nicht) und von der Temperatur der Behandlung kann ein gleiches D / G-Intensitätsverhältnis unterschiedliche Bedeutungen haben.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Abschätzung der Raman-Messung ist die Position des G-Peaks, wobei die Messdaten der Referenzproben einen Mittelwert der G-Position von  $1580,840 \text{ cm}^{-1}$  und der gelaufenen Proben bei Raumtemperatur von  $1599,245 \text{ cm}^{-1}$  zeigen, was dem Modell von Ferrari u. a. [68] entspricht. Es wurden drei Phasen betrachtet und genauer: der Übergang von Graphit über nanokristallines Graphit zu einer amorphen Struktur und schließlich ta-C als Funktion der G-Band-Mittelposition und des  $I_D/I_G$ -Verhältnisses. Der Übergang der G-Position der Referenzprobe zu RT-Proben ist konsistent mit dem im gezeigten Modell von Graphit zu nanokristallinem Graphit. Mit der Temperaturentwicklung nehmen die Werte der G-Position wieder auf etwa  $1586,527 \text{ cm}^{-1}$  (bei  $400 \text{ °C}$ ) ab, was den Beginn der zweiten Phase und einen anfänglichen Übergang zu amorphem Kohlenstoff bestimmt (dazu genauer [Abbildung IV.25](#) und [Abbildung IV.26](#) ).

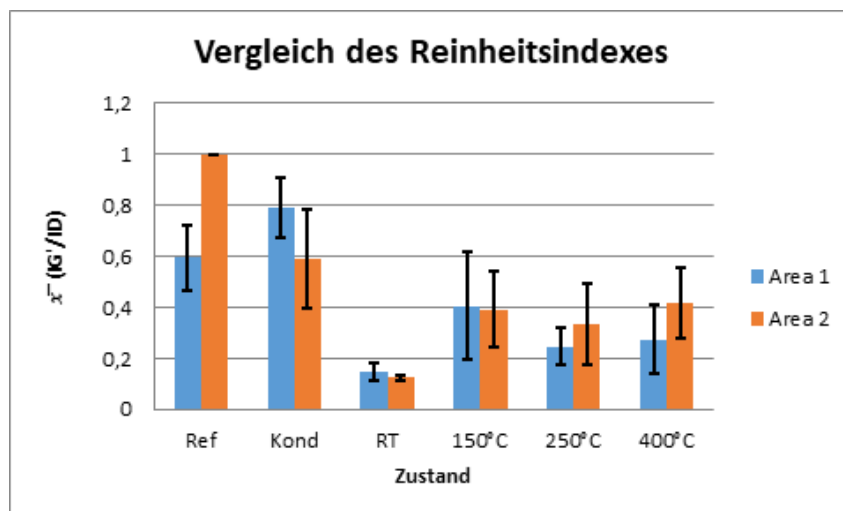


**Abb. IV.25:** Trajektorie der Amorphisation nach Ferrari u. a. [68] mit Ergänzung der vorhandenen Situation



**Abb. IV.26:** Umwandlung des Graphits

Der nanokristalline Graphit kann für die glänzende Oberfläche der Proben verantwortlich sein. Aufgrund der ultrafeinen Partikel, die durch den gerichteten Einfluss des Drucks während der Kompaktierung des Graphits gebildet werden, wird das Licht auf andere Weise gestreut, und es wird ein Glanzeffekt beobachtet.



**Abb. IV.27:** Mittelwert des Reinheitsindex

Das Balkendiagramm zeigt die aus den Raman-Messungen berechneten Änderungen des  $I_{G'}/I_D$ -Verhältnisses für jeden Zustand der Proben in Abhängigkeit vom Messbereich (Area 1 und Area 2). Ein deutlicher Abfall des Reinheitsindexes ist mit der Steigerung der Temperatur zu sehen. Aus dem präsentierten Datenmaterial lässt sich ersehen, dass das Graphitmaterial mit dem Temperaturanstieg degradiert. Dabei treten aber auch temperaturbedingte Ausheilungseffekte auf, wie zuvor erwähnt wurde.

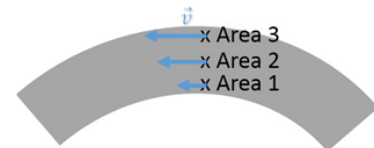
## 5.2 Geschwindigkeitsverteilung

Es fällt auf, wie in [Abbildung IV.28](#) gezeigt, dass sich die Werte der Position (Area) 2 von denen der Position (Area) 1 unterscheiden, was auf die ortsabhängige Geschwindigkeitsverteilung zurückzuführen ist. Die Position 3 wurde nicht berücksichtigt, da sie sich wie die Position 1 am Rand des Verschleißspures sich befindet. Es kann auch zu Schwankungen der (Blitz-)

Kontakttemperatur kommen. Bei der kreisförmigen Bewegung im Tribosystem ist die Bewegung der Laufpartner auf einer Kreisbahn festzustellen. Entlang der Kreisbahn legen die unterschiedlichen Punkte der Graphitproben im inneren, mittleren und äußeren Bereich unterschiedlich weite Strecken zurück. Da die Kreisbewegung gleichmäßig ist, bleibt die Winkelgeschwindigkeit konstant.

Die Drehrichtung bleibt ebenfalls unverändert, also unidirektional, und zwar senkrecht zur Drehebene. Die vorgegebene Bahngeschwindigkeit der Rotation des oberen Halters im Tribometer für die Versuche beträgt 5 m/min und ist gleich dem Produkt aus seiner Winkelgeschwindigkeit und dem Radius der Kreisbahn. Aufgrund der Geschwindigkeit auf der Mittelspur der Graphitprobe, basierend auf dem mittleren Durchmesser von 70

mm, wird die Drehzahl von 11,36 U / min und die konstante Winkelgeschwindigkeit berechnet. Daraus lässt sich den Geschwindigkeitsverlauf ermitteln. Die Geschwindigkeit auf der Innenspur ist geringer ( $\vec{v}(r) = \vec{\omega} \times \vec{r} = (\vec{v}_1) = 4,821m/min$ ) im Vergleich zu dieser auf der Mittelspur. Abschließend kann festgestellt werden, dass die Defektsituation sich in geringen Grenzen, abhängig von der Geschwindigkeit, unterscheidet, aber keine signifikanten Änderungen der Graphitstruktur verursacht.



**Abb. IV.28:** Geschwindigkeitsprofil

# Kapitel V

## Zusammenfassung und Ausblick

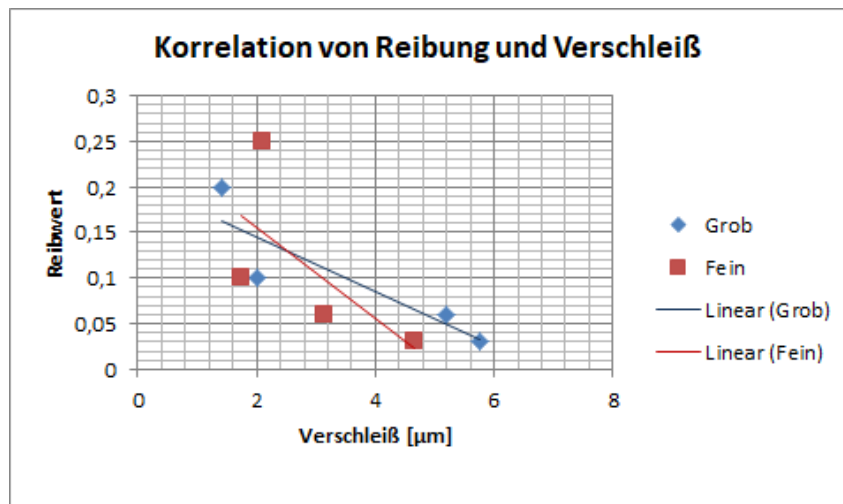
### 1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

#### 1.1 Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von Feuchtigkeit

In oxidierender oder feuchter Umgebung sind die Schmiereigenschaften des Graphits im Vergleich zu trockener Luft viel besser, wie viele Studien zeigen. Deswegen war auch das Ziel dieser Arbeit, die Extremwerte des Verschleißes und der Reibung in dem untersuchten Temperaturbereich und in den kontrollierten ungünstigen für den Graphit Bedingungen zu ermitteln. Die Reibungs- und Verschleißeffekte in der Graphit/Stahl-Tribopaarung wurden in trockener Umgebung untersucht, unter der Berücksichtigung der spezifischen Art der Bewegungskinematik und der abgeleiteten Eigenschaften des Realsystems.

#### 1.2 Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von Rauheit des Gegenlaufpartners

Bei relativer Bewegung zweier Objekte zueinander überall, wo Reibung auftritt, entsteht Verlust von Material, der als Verschleiß definiert wird. Dies bedeutet aber nicht, dass mit dem Anstieg der Reibzahlen einen Anstieg des Verschleißes beobachtet wird. Wie schon bekannt, erscheint der Verschleiß als eine Konsequenz der Reibung und entsteht an den Kontaktstellen. Weil es keinen allgemeinen Zusammenhang zwischen den beiden Systemeigenschaften gibt, liegt die Herausforderung darin, das Verhalten der Graphits- Stahl-Paarung bei konstanten Einflussparameter gut zu kennen und in optimalen Betriebsbedingungen später anzuwenden, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. In [Abbildung V.1](#) „Korrelation von Reibung und Verschleiß“ ist die allgemeine Relation der gemessenen Werte der Versuche ersichtlich. Die auf der X-Achse aufgetragenen Verschleißwerte stammen aus den profilometrischen Messungen mit Alicona unterhalb der Referenzfläche (Verschleißtiefe), da diese am aussagekräftigsten erscheinen. Der mit der Temperatur ansteigende Materialverlust durch Verschleiß wurde auch durch Abwägen mit Präzisionswaage bestätigt.



**Abb. V.1:** Korrelation zwischen Reibungskoeffizienten und Verschleißrate

Aus dem Punktdiagramm ist ersichtlich, dass der Verschleiß umso größer wird, je niedriger die Reibungskoeffizienten sind, angegeben in  $\mu\text{m}$  pro Test mit einer Dauer von 16 Stunden und einer Laufstrecke von 4800 m. Bei einer konstanten Gleitgeschwindigkeit und Druck im tribotechnischen System wird nur die Temperatur je nach Versuch variiert. Die Reibungskoeffizienten verringern sich trotz des Mangels an Luftfeuchtigkeit, die für die Schmiereigenschaften von Graphit wesentlich ist, bei höheren Temperaturen (Nahe der Oxidationsgrenze) und mit deren Erhöhung im untersuchten Temperaturbereich.

Den linearen Trendlinien zeigen die unterschiedlichen Abhängigkeiten der Reibung und des Verschleißes je nach Gegenlaufpartnerschliff. Auf dieser Weise kann eine direkte Betrachtung des Einflusses der Rauheit auf das Verhalten der Systemeigenschaften des Graphits gemacht werden. Es ist zu ergänzen, dass die Trendlinie des Reibpartners mit einem feinen Schliff steiler ist. Diese Entwicklung ist auf die geringeren Mengen an Verschleiß bei den gleichen Reibzahlen wie bei den Experimenten mit einem groben Stahlring zurückzuführen.

Die Grafik zeigt deutlich den kontinuierlichen Anstieg der Verschleißrate unabhängig von der Reibpartner-Kombination. Bei den Raumtemperaturversuchen wurden mit den feineren Gegenkörpern etwas höhere Reibungszahlen von fast 0,26 im Konstantbereich ermittelt. Bei der Erhöhung der Testtemperatur diese Werte nehmen ab. Die Zunahme des Reibungskoeffizienten in dem konstanten Bereich der Raumtemperaturtests mit einem feineren Gegenlaufpartner im Vergleich zu einem gröberem Stahlring beträgt fast 16 % und bei 400 °C - etwa 4 %. Dies ist ein Beweis dafür, dass es mit der Erhöhung der Temperatur zu geringeren Unterschieden in den Reibungsprozessen und zu einer abnehmenden Bedeutung der Rauheit des viel härteren Gegenlaufpartners kommt.

Die Abhängigkeit des Verschleißes von der Rauheit des Gegenlaufpartners ist vorhanden, wobei die Verschleißrate bei höheren Temperaturen und in Kombination mit einer gröberem Oberfläche um fast 66% nach den 250 °C-Tests und um 23 % bei den 400 °C-Tests höher ist und



beträgt Werte bis 5,7  $\mu\text{m}$  pro Versuch. Bei Raumtemperatur und 150  $^{\circ}\text{C}$  sind die Verschleißraten ähnlich und betragen ca. 1,8  $\mu\text{m}$  pro Versuch.

Je nachdem, was das Endziel ist, kann entschieden werden, was im Betrieb optimaler wäre. Die Kombination mit einem gröberen Reibpartner sorgt für weniger Reibung bei höherem Verschleiß, während ein feineres Gegenstück weniger Materialverlust ermöglicht, jedoch etwas höhere Reibungskoeffizienten im System verursacht.

### 1.3 Abhängigkeit des Verschleißes und der Reibungszahl von der Temperatur

Die Daten in den Diagrammen stammen von der ermittelte im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit Messergebnissen. Mit dem Temperaturanstieg neigt die durchschnittliche Abnutzungsrate (pro Experiment: Dauer 16 Stunden, 4800 m Weg) dazu, zuzunehmen. Wie bereits erwähnt, sind hier die Unterschiede zwischen den Reibpartnerkombinationen noch genauer zu erkennen. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass die gröberen Reibungspartner mehr Materialverlust verursachen. Die lineare Trendlinie zeigt die Gesamttendenz in dieser Korrelation und dient als Hilfsmittel bei der Analyse. Da der Verschleiß stark von der Gleitgeschwindigkeit der Relativbewegung abhängt, wurde bei den durchgeführten Versuchen nur eine konstante Geschwindigkeit von 5 m / min verwendet, sowie einen konstanten Druck von 2 bar (die reale Flächenpressung war aufgrund der Zunahme der realen Kontaktfläche während der Testdauer nicht konstant). Die relative Luftfeuchtigkeit, die weniger als 10 % betrug, sollte nicht extra geregelt werden, außer bei den Raumtemperaturtests, bei denen die Temperaturen nicht ausreichten, um die gewünschte trockene Umgebung einzustellen.

Das in der Literatur beschriebene Phänomen Graphit- „Dusting“ konnte bei diesen Versuchen nicht beobachtet werden, da der Temperaturbereich von 150  $^{\circ}\text{C}$  bis 180  $^{\circ}\text{C}$ , in dem eine wesentliche Erhöhung des Reibungskoeffizienten und des Verschleißes auftreten sollte, nicht genau untersucht wurde. Im Allgemeinen nehmen jedoch die Verschleißraten mit zunehmender Temperatur zu, ohne dass ein Anstieg des Reibungskoeffizienten beobachtet zu werden.

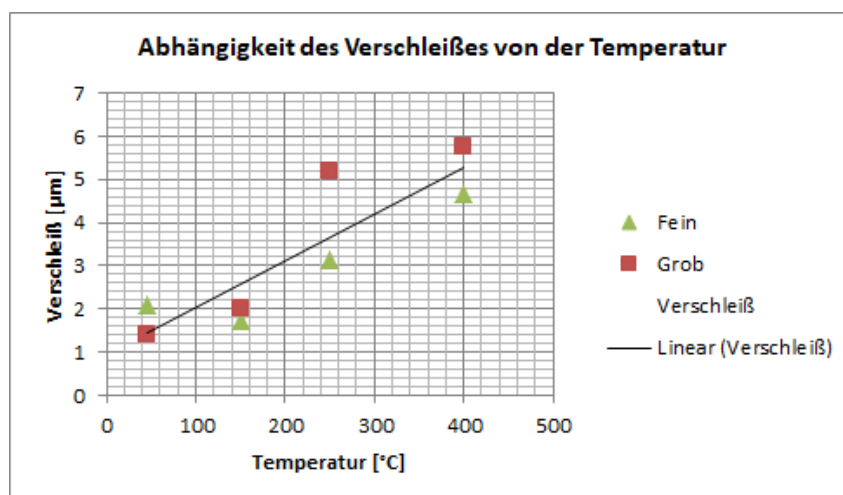


Abb. V.2: Abhängigkeit des Verschleißes von der Temperatur

Die Reibungskoeffizienten hängen stark von der Normalkraft ab. Diese wurde aber in den durchgeführten Experimenten auf einem konstanten Niveau von etwa 839 N gehalten. Die tatsächliche Kontaktfläche ändert sich jedoch. Signifikant große Unterschiede in den Reibwerten infolge der Kombination von den unterschiedlich rauen Gegenpartnern sind hauptsächlich bei Raumtemperaturversuchen zu beobachten.

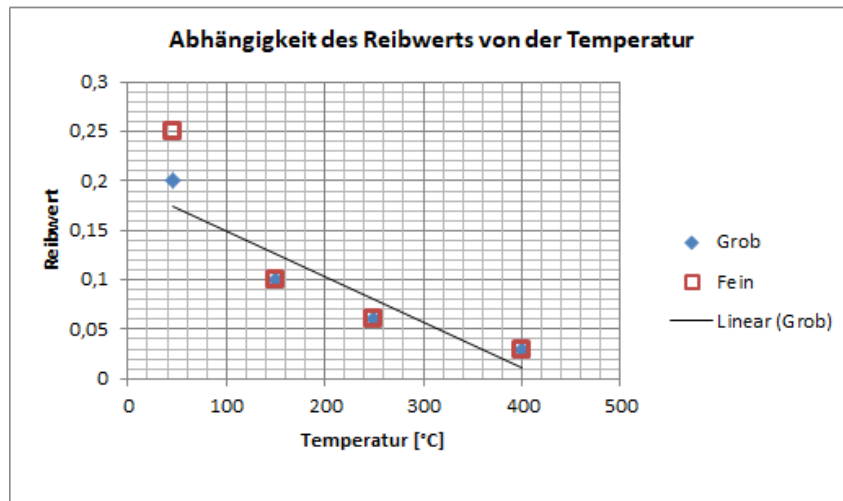


Abb. V.3: Abhängigkeit des Reibwerts von der Temperatur

## 2 Mögliche Optimierungsmaßnahmen der Versuche

Da diese Arbeit die Möglichkeiten und Grenzen der tribologischen Anwendbarkeit von Graphitplatten in Gleitmodulen im Laborumfeld genauer betrachtet, könnten die Ergebnisse zu einer möglichen Optimierung des realen Prüfstandes von *Berndorf Band Group* führen. Eine Ergänzung der Testmatrix durch die Variation der Luftfeuchtigkeit könnte als mögliche Erweiterung und Verbesserung der Versuchsergebnisse sein, wobei die restlichen vordefinierten Einflussparameter erhalten bleiben sollen. Interessant wäre, wenn die Reibzahlinstabilitäten genauer untersucht würden und die Tests länger gedauert hätten. Auf dieser Weise könnten mehr Informationen über weitere unerwarteten Effekten und Präzisierung der Werte bereitgestellt werden. Die nähere Untersuchung des Transferfilms könnte auch von Interesse sein. Der informative Wert der Experimente könnte durch die Wahl anderer Rauigkeiten der Gegenlaufpartner verbessert werden, um größere Unterschiede in den Ergebnissen zu erzielen und eine klare Abgrenzung dieser Ergebnisse zu erreichen. Der Rundschliff ist eine passende Entscheidung und könnte beibehalten werden. Es wäre wünschenswert, die Berechnung und Einstellung des konstanten Drucks zu optimieren. Aufgrund der unebenen vorkonditionierten konvexen Oberfläche der Graphitsegmente scheint das Druckniveau / die Flächenpressung während der Einlaufphase viel höher zu sein. Durch die Anpassung der Oberflächentopographie nimmt die Flächenpressung während des Tests ab und erreicht den gewünschten Wert erst nach vollständigem Kontakt im Tribopaar.

### 3 Ausblick

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, eine bessere Vorstellung von den Möglichkeiten und Grenzen der tribologischen Anwendbarkeit von Graphitplatten zu vermitteln. Je nach Art wurden die Versuche bei vier unterschiedlichen Temperaturen und in Kombination von zwei unterschiedlich rauen Gegenlaufpartnern aus Stahl durchgeführt, unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit. Es war wichtig, dass die Tests unter trockenen Umgebungsbedingungen stattgefunden haben. Alle weiteren relevante Einflussparameter wurden konstant gehalten. Für die Raumtemperaturversuche wurde der Versuchsaufbau angepasst. Mittels Druckluft wurde die erwünschte relative Luftfeuchte in der Kammer eingestellt. Außerdem wurde die Lösung zur Unterdrückung der unregelmäßigen Rotationsbewegung der Stahlscheibe als Gegenkörper im Tribosystem vorgestellt. Diese Anpassung des Tribometers war mit den Tribohaltern verbunden. Ein zusätzlicher Außenring wurde hinzugefügt, um die größtmögliche Ebenheit der Stahlscheiben zu gewährleisten. Neben den tribologischen Versuchen am Laborprüfstand wurden weitere wichtige Messverfahren eingesetzt wie Profilometrie der Oberflächen der Graphitsegmente, Raman-Spektroskopie aller Zustände der Graphitproben, Lichtmikroskopie, Härteprüfung des untersuchten Ausgangsmaterials, Wägung der Proben und Verschleißmessung mittels Fokus-Variation. Bei der konfokalen Profilometrie wurden die Proben vor und nach den Experimenten stichprobenartig gemessen, um eine gute statistische Darstellung der Ergebnisse zu ermitteln und eine aussagekräftige Bewertung zu erhalten. Die eingestellte Rauheit infolge des Lastkollektivs ist nach den Tests nicht unbedingt geringer.

Es wurde behauptet, dass in dem Phänomen „Verglasung“ die Ursache für den Unterschied zwischen den Laborergebnissen über den Reibwert vom Graphit und Ergebnissen von realer Testanlage liegen könnte. Eine Begutachtung der gebrauchten Graphitproben von den durchgeführten Laborversuchen hat gezeigt, dass das Phänomen „Verglasung“ dabei ebenfalls auftritt, da es sich um eine starke Verdichtung und Aufglättung der Graphitoberfläche handelt, was auch durch die Aufnahmen der Lichtmikroskopie beobachtet wurde und in direkten Zusammenhang mit der Umwandlung des Graphits sein könnte, welche bei der Raman-Messungen festgestellt wurde. Das Verhältnis der Intensität des D-Raman-Peaks und des G-Raman-Peaks ( $I_D/I_G$ ) aus der Raman-Spektroskopie wurde zur Charakterisierung der Strukturänderungen der Graphitsegmente angewendet. Es wurde eine Umwandlung des Graphits in nanokristallinem Graphit und teilweise in amorphem Kohlenstoff, abhängig von dem Temperaturregime, beobachtet, was der Grund für die glänzende Oberfläche der Kontaktstellen der Graphitsegmente sein könnte.

Die Messdaten aus den Tribotests und aus der Verschleißmessung haben gezeigt, dass mit der Anstieg der Temperatur eine Zunahme des Verschleißes und Abnahme der Reibzahlen stattfindet, wobei die Kombination mit einem feineren Gegenlaufpartner der Materialverlust bei höheren Temperaturen besser reduziert, aber die Reibungskoeffizienten erhöht.

# Kapitel VI

## Anhang

	Graphit 1	Graphit 2	Graphit 3	Graphit 4
Dichte $kg/dm^3$	1,62	1,77	1,8	1,85
Druckfestigkeit $N/mm^2$		90	125	150
Biegefestigkeit $N/mm^2$	24	47	55	58
Härte	110 HR 10/40	80 HRB 10/100		90 HRB
Ausdehnungskoeff. $10^{-6}.K$		2,9	4	4
Biege E-Modul $N/mm^2$ bei 20 °C		7.38	12.00	13.00
Reibzahl $\mu$	0,15	0,1	0,1	
Wärmeleitzahl $W/m^{\circ}K$ bei 20°C		90	50	73

**Tab. VI.1:** Physikalische und mechanische Eigenschaften der Graphitgleitkörper, Quelle: Berndorf Band und AC2T

Type	NICRO 52	NICRO 52.6	NICRO 62.5
Chem. Zusammensetzung	CrNiCuTi -15-7	CrNiCu -15 -7	CrNiCu -15-5
Zugfestigkeit (20°C) $N/mm^2$	1150	1550	1450
$R_{p0,2}$ (20°C) $N/mm^2$	1100	1500	1410
Härte			
HRC	37	48	46
HV	36	48	46
Elongation 50mm (Thermische Längenausdehnung) %	8	6	8
Schweißfaktor	0.95	0.80	0.75
Ermüdungsfestigkeit unter umgekehrter Biegespannung (20°C) $N/mm^2$	500	700	650
E-Modul $N/mm^2$			
bei 20°C	200 000	200 000	200 000
bei 200°C	188 000	188 000	-
Dichte $kg/dm^3$	7.74	7.74	7.8
Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient $10^{-6}/m^{\circ}C$			
bei 20-100°C	10.9	10.9	10.8
bei 20-200°C	11.5	11.5	10.8
bei 20-300°C	11.7	11.7	11.3
Spezifische Wärmekapazität $J/g^{\circ}C$	0.50	0.50	0.42
Wärmeleitfähigkeit (20°C) $W/m^{\circ}C$	16	16	16
Spezifischer Widerstand $\Omega * mm^2/m$	0.80	0.80	0.77
Zugfestigkeit bei max. zul. Betriebstemperatur $N/mm^2$	900	1250	1160
$R_{p0,2}$ bei max. zul. Betriebstemperatur $N/mm^2$	830	1180	1130

Tab. VI.2: Physikalische und mechanische Eigenschaften der Stähle, Quelle: Berndorf Band

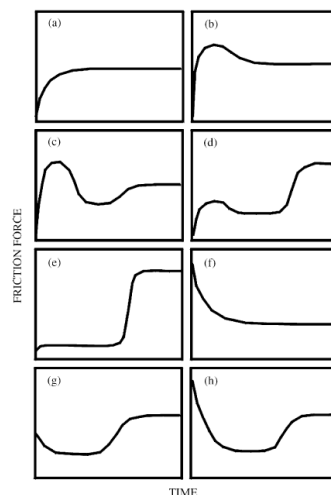


Abb. VI.1: Reibkurven der Einlaufphase. Quelle: Blau [25]

Versuch	Anfang des Versuchs mm	Ende des Versuchs mm	mm	$\mu\text{m}$
1	-0,001985	0,025547	0,028	27,532
2	0,07704	0,061617	-0,015	-15,423
3	-0,00856	0,016235	0,025	24,795
4	0,021716	0,056231	0,035	34,515
5	-0,000414	-0,039381	-0,039	-38,967
6	0,007623	-0,029351	-0,037	-36,974
7	0,395206	0,304895	-0,09	-90,311
8	0,525247	0,414341	-0,111	-110,906
9	0,496258	0,403309	-0,093	-92,949
10	-5,000184	-5,000002	-	-
11	-5,000293	-5,000154	-	-
12	-5,000163	-5,000242	-	-
13	-5,000246	-5,000112	-	-
14	0,706328	0,63978	-0,067	-67
15	0,673511	0,62941	-0,044	-44,101
16	0,790375	0,649355	-0,141	-141,02
17	0,630245	0,579184	-0,051	-51,061
18	0,701237	0,64219	-0,059	-59,047
19	1,276241	1,21608	-0,06	-60,161
20	1,2504	1,219286	-0,031	-31,114
21	1,237353	1,213917	-0,023	-23,436
22	1,177679	1,214426	0,037	36,747
23	1,268483	1,23427	-0,034	-34,213
24	1,315398	1,286397	-0,029	-29,001

**Tab. VI.3:** Messdaten des Verschleißsensors

# Literaturverzeichnis

- [1] I. 2.-6. 2010. *Geometrical product specifications (GPS)—surface texture: areal—classification of methods for measuring surface texture*. 2010.
- [2] „25178-2 (2012) Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft-Teil 2: Begriffe und Oberflächenkenngößen“. In: *Beuth, Berlin Google Scholar* (2012).
- [3] E. Abderhalden. *Kohlenstoff, Kohlenwasserstoffe, Alkohole der Aliphatischen Reihe, Phenole*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642513282. URL: <https://books.google.at/books?id=5KKmBgAAQBAJ>.
- [4] A. Ahgary. *Eine Analyse der Verschleißmechanismen in der Anwendung der Hüftgelenkendoprothetik unter realistischen Randbedingungen*. Diplom.de, 2002. ISBN: 9783832460310. URL: <https://books.google.at/books?id=XUt6AQAAQBAJ>.
- [5] *Alicona.com*. URL: <https://www.alicon.com/de/> (besucht am 28.01.2019).
- [6] *Anti-Friction Coatings*. URL: [https://www.bechem.de/fileadmin/downloads/BECHEM\\_Anti-Friction\\_Coatings\\_de.pdf](https://www.bechem.de/fileadmin/downloads/BECHEM_Anti-Friction_Coatings_de.pdf) (besucht am 17.03.2019).
- [7] B. Awiszus, J. Bast, H. Dürr und K.-J. Matthes. *Grundlagen der Fertigungstechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016.
- [8] H. Bannwarth, B. Kremer und A. Schulz. *Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie: Vom Atom bis zur Atmung - für Biologen, Mediziner und Pharmazeuten*. Bachelor. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642366352. URL: <https://books.google.at/books?id=DjoiBAAAQBAJ>.
- [9] D. Bartel. *Simulation von Tribosystemen*. Vieweg + Teubner research. Vieweg+Teubner Verlag, 2010. ISBN: 9783834812414. URL: <https://books.google.at/books?id=BSHA2vdl7UEC>.
- [10] W. Bartz und H. Blanke. *Expert Praxislexikon Tribologie Plus: 2010 Begriffe für Studium und Beruf*. Expert-Verlag, 2000. ISBN: 9783816906919. URL: [https://books.google.at/books?id=YbizkDYQk%5C\\_kC](https://books.google.at/books?id=YbizkDYQk%5C_kC).
- [11] R. van Basshuysen und F. Schäfer. *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. ISBN: 9783658109028. URL: <https://books.google.bg/books?id=Bzq4DgAAQBAJ>.
- [12] N. Bauer und F.-G. zur Förderung der Angewandten Forschung. *Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung: Qualitätssicherung in der Praxis*. Fraunhofer-IRB-Verlag, 2007. ISBN: 9783816773863. URL: <https://books.google.at/books?id=ZmBvhgYUg0AC>.

- 
- [13] N. Bauer und F.-A. Vision. *Leitfaden zur Inspektion von Oberflächen mit Bildverarbeitung*. Fraunhofer-Allianz Vision, 2006. ISBN: 9783816770619. URL: <https://books.google.at/books?id=bw5GTLzKKc0C>.
- [14] *Bearbeitbarer Graphit*. URL: <http://www.final-materials.com/werkstoffe/produkte/bearbeitbarer-graphit-99.html> (besucht am 13. 08. 2018).
- [15] S. Bernard, O. Beyssac, K. Benzerara, N. Findling, G. Tzvetkov und G. Brown Jr. „XANES, Raman and XRD study of anthracene-based cokes and saccharose-based chars submitted to high-temperature pyrolysis“. In: *Carbon* 48.9 (2010), S. 2506–2516.
- [16] B. Bhushan. *Introduction to Tribology*. Tribology in Practice Series. Wiley, 2013. ISBN: 9781118403228. URL: <https://books.google.at/books?id=DJDv5jVwC2UC>.
- [17] B. Bhushan. *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. Mechanics & Materials Science. CRC Press, 2000. ISBN: 9780849377877. URL: <https://books.google.at/books?id=h6X0NM7ME8IC>.
- [18] B. Bhushan. *Handbook of micro/nano tribology*. CRC press, 1998.
- [19] B. Bhushan. *Principles and applications of tribology*. John Wiley & Sons, 2013.
- [20] B. Bhushan. *Tribology and mechanics of magnetic storage devices*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [21] H. Birkhofer und T. Kümmerle. *Feststoffgeschmierte Wälzlager: Einsatz, Grundlagen und Auslegung*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 9783642167973. URL: [https://books.google.at/books?id=-MdSPBoq%5C\\_BMC](https://books.google.at/books?id=-MdSPBoq%5C_BMC).
- [22] M. Blattmeier. *Strukturanalyse von lasergesinterten Schichtverbunden mit werkstoffmechanischen Methoden*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012. ISBN: 9783834825018. URL: <https://books.google.bg/books?id=cYYkBAAAQBAJ>.
- [23] P. Blau. *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications, Second Edition*. Mechanical Engineering. CRC Press, 2008. ISBN: 9781420054101. URL: <https://books.google.at/books?id=5plpV1LY5HMC>.
- [24] P. Blau. *Tribosystem Analysis: A Practical Approach to the Diagnosis of Wear Problems*. CRC Press, 2017. ISBN: 9781498700511. URL: <https://books.google.at/books?id=qRdjDAAAQBAJ>.
- [25] P. J. Blau. „On the nature of running-in“. In: *Tribology international* 38.11-12 (2005), S. 1007–1012.
- [26] W. Bleck und E. Moeller. *Handbuch Stahl: Auswahl, Verarbeitung, Anwendung*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017. ISBN: 9783446449626. URL: <https://books.google.at/books?id=uqg7DwAAQBAJ>.
- [27] K. Bobzin. *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*. Wiley, 2013. ISBN: 9783527681495. URL: <https://books.google.at/books?id=NREFAQAAQBAJ>.



- [28] K. Bobzin und T. Bartels. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. Wiley, 2011. ISBN: 9783527632596. URL: <https://books.google.at/books?id=m-iWM8Umr98C>.
- [29] W. Borchardt-Ott. *Kristallographie: Eine Einführung für Naturwissenschaftler*. Heidelberger Taschenbücher. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783662082263. URL: <https://books.google.at/books?id=oDezBgAAQBAJ>.
- [30] F. Bowden, E. Freitag und D. Tabor. *Reibung und Schmierung fester Körper*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642927546. URL: <https://books.google.at/books?id=QRygBgAAQBAJ>.
- [31] F. P. Bowden und D. Tabor. *The friction and lubrication of solids*. The international series of monographs on physics. Oxford [u.a.]: Clarendon Press, 1964.
- [32] R. C. Bowers. „Coefficient of Friction of High Polymers as a Function of Pressure“. In: (1971). ISSN: 0021-8979.
- [33] H. Briehl. *Chemie der Werkstoffe*. SpringerLink : Bücher. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 9783658062255. URL: <https://books.google.at/books?id=px0gBAAAQBAJ>.
- [34] J. Broichhausen. *Methodische Analyse betriebsbeanspruchter Reibpartner mit charakteristischen Verschleißerscheinungen zwecks Erweiterung der Erkenntnisse über die Verschleißmechanismen metallischer Werkstoffe*. Bd. 2758. Springer-Verlag, 2013.
- [35] E. Broszeit, O. Zwirlein und J. Adelman. „How to reduce friction coefficients in the millirange by solid lubrication“. In: *Int. Tribology Conference* (1995).
- [36] E. Broszeit, O. Zwirlein und J. Adelman. „Werkstoffanstrengung im Hertzschen Kontakt – Einfluß von Reibung und Eigenspannungen“. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 13.12 (1982), S. 423–429. ISSN: 1521-4052. DOI: [10.1002/mawe.19820131207](https://doi.org/10.1002/mawe.19820131207). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/mawe.19820131207>.
- [37] D. Buckley. *Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication*. Tribology series. Elsevier Science, 1981. ISBN: 9780080875699. URL: <https://books.google.bg/books?id=62WYwqySS2QC>.
- [38] W. Bunk, J. Hansen und M. Geyer. *Tribologie Reibung· Verschleiß· Schmierung*. Bd. 1. Springer-Verlag, 2013.
- [39] A. Burkhardt. *Technologie der zinklegierungen*. Bd. 1. Springer-Verlag, 2013.
- [40] W. D. Callister und D. G. Rethwisch. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik: Eine Einführung*. John Wiley & Sons, 2012.
- [41] R. Carpick, D. Sasaki und A. Burns. „Large friction anisotropy of a polydiacetylene monolayer“. In: *Tribology Letters* 7.2-3 (1999), S. 79–85.
- [42] *Chemisorption*. URL: <https://www.wissen.de/lexikon/chemisorption> (besucht am 04.04.2019).

- 
- [43] F. Clauss. *Solid Lubricants and Self-Lubricating Solids*. Elsevier Science, 2012. ISBN: 9780323158220. URL: <https://books.google.at/books?id=5mYSKeb7c68C>.
- [44] C. Coulomb. „Théorie des Machines Simples. Memoires de mathematique et de physique de l'Academie des sciences. t. 10“. In: (1785).
- [45] H. Czichos. *Reibung und Verschleiss von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen*. Expert-Verlag, 1982. ISBN: 9783885087526. URL: <https://books.google.bg/books?id=Bz9cAAAACAAJ>.
- [46] H. Czichos, K. Habig, J. Celis, R. Cowan, K. Gerschwiler, A. Fischer, E. Santner und M. Woydt. *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010. ISBN: 9783834800176. URL: <https://books.google.at/books?id=MO27fNahUEsC>.
- [47] H. Czichos. *Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*. Springer-Verlag, 2013.
- [48] H. Czichos, B. Skrotzki und F.-G. Simon. *Das Ingenieurwissen: Werkstoffe*. Springer, 2013.
- [49] C. Derks. *Konfokale Mikroskopie*. Universität Osnabrück, 2007. URL: <https://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/anleitungen/b501.pdf>.
- [50] I. L. Deters. „Tribologische Optimierung von Zylinderlaufflächen in Verbrennungsmotoren aus fertigungstechnischer Sicht“. In: (2014).
- [51] L. Deters. „Grundsätzliches zu Reibung und Verschleiß in der technischen Anwendung“. In: *Maschinenbau, Magdeburger Wissenschaftssommer* (2004).
- [52] M. Dienwiebel, G. S. Verhoeven, N. Pradeep, J. W. M. Frenken, J. A. Heimberg und H. W. Zandbergen. „Superlubricity of Graphite“. In: *Phys. Rev. Lett.* 92 (12 März 2004), S. 126101. DOI: [10.1103/PhysRevLett.92.126101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.126101). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.92.126101>.
- [53] *DIN 17014-1:1988-08 Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen; Begriffe (Achtung:Dokument zurückgezogen)*. Aug. 1988. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-17014-1/3106546>.
- [54] *DIN 50320:1979-12 Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes (Achtung:Dokument zurückgezogen)*. Dez. 1979. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-50320/1647273>.
- [55] *DIN 50322:1986-03 Verschleiß; Kategorien der Verschleißprüfung*. März 1986. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-50322/2959116>.
- [56] *DIN EN ISO 4287:2010-07 Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009*. Juli 2010. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-4287/129356592>.

- [57] E. I. DIN. „25178-6, 2010-06“. In: *Geometrische Produktspezifikation (GPS)–Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft–Teil 6* (), S. 25178–6.
- [58] H. Duelli. *Weißlichtinterferometer*. URL: [https://www.fhv.at/fileadmin/user\\_upload/fhv/files/forschung/mikrotechnik/Infoblatt\\_Weisslichtinterferometrie.pdf](https://www.fhv.at/fileadmin/user_upload/fhv/files/forschung/mikrotechnik/Infoblatt_Weisslichtinterferometrie.pdf) (besucht am 25. 01. 2018).
- [59] T. E. S. El Shafei, R. D. Arnell und J. Halling. „An Experimental Study of the Hertzian Contact of Surfaces Covered by Soft Metal Films“. In: 26 (Okt. 1983), S. 481–486.
- [60] S. J. Eder, G. Feldbauer, D. Bianchi, U. Cihak-Bayr, G. Betz und A. Vernes. „Applicability of Macroscopic Wear and Friction Laws on the Atomic Length Scale“. In: *Phys. Rev. Lett.* 115 (2 Juli 2015), S. 025502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.025502. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.115.025502>.
- [61] *EINFLUSS DER OBERFLÄCHENGÜTE DES SUBSTRATS AUF REIBUNG UND VERSCHLEISSVERHALTEN BESCHICHTETER KOLBENBOLZEN – TEIL 5*. URL: [https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2014/08/26\\_kommer\\_kolbenbolzen\\_teil5\\_08j2014/26\\_kommer\\_kolbenbolzen\\_teil5\\_08j2014.php](https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2014/08/26_kommer_kolbenbolzen_teil5_08j2014/26_kommer_kolbenbolzen_teil5_08j2014.php) (besucht am 22. 03. 2019).
- [62] M. El Mansori, M. Schmitt und D. Paulmier. „Role of transferred layers in friction and wear for magnetized dry frictional applications“. In: *Surface and Coatings Technology* 108 (1998), S. 479–483.
- [63] C. Englisch. *Verschleiß, Betriebszahlen und Wirtschaftlichkeit von Verbrennungskraftmaschinen*. Die Verbrennungskraftmaschine. Springer Vienna, 2013. ISBN: 9783709153895. URL: <https://books.google.at/books?id=9hrNBgAAQBAJ>.
- [64] A. Erdemir und J. Martin. *Superlubricity*. Elsevier Science, 2007. ISBN: 9780080525303. URL: <https://books.google.at/books?id=q1mGFiGoMzIC>.
- [65] B. J. B. ; D. C. B. Evans. „The shear properties of Langmuir—Blodgett layers“. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 380.1779 (1982), S. 389–407. ISSN: 0080-4630. DOI: 10.1098/rspa.1982.0048. eprint: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/380/1779/389.full.pdf>. URL: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/380/1779/389>.
- [66] T. Fauster, L. Hammer, K. Heinz und A. Schneider. *Oberflächenphysik: Grundlagen und Methoden*. De Gruyter, 2013. ISBN: 9783486856200. URL: <https://books.google.at/books?id=-XjpBQAAQBAJ>.
- [67] P. M. Fechner. „Raman-Spektroskopie und atmosphärische Rasterelektronenmikroskopie-Charakterisierung pharmazeutischer Hilfsstoffe“. In: *Doktorarbeit, Universität Halle* (2005).
- [68] A. C. Ferrari und J. Robertson. „Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon“. In: *Physical review B* 61.20 (2000), S. 14095.
- [69] J. Fessmann und H. Orth. *Angewandte Chemie und Umwelttechnik für Ingenieure: Handbuch für Studium und betriebliche Praxis*. ecomed Sicherheit. ecomed, 2002. ISBN: 9783609683522. URL: <https://books.google.at/books?id=bA36RgqcJ4kC>.

- 
- [70] M. Fink und U. Hofmann. „Zur Theorie der Reiboxydation“. In: *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 6.4 (1932), S. 161–164. ISSN: 1869-344X. DOI: [10.1002/srin.193200333](https://doi.org/10.1002/srin.193200333). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/srin.193200333>.
- [71] W. Franke. *Schmierstoffe und ihre Anwendung*. C. Hanser, 1971. ISBN: 9783446100275. URL: <https://books.google.at/books?id=PajkAAAAMAAJ>.
- [72] *Fuels and Lubricants Handbook*. URL: [https://books.google.at/books?id=J%5C\\_AkNu-Y1wQC](https://books.google.at/books?id=J%5C_AkNu-Y1wQC).
- [73] E. Gadelmawla, M. Koura, T. Maksoud, I. Elewa und H. Soliman. „Roughness parameters“. In: *Journal of Materials Processing Technology* 123.1 (2002), S. 133–145.
- [74] H. Ganzler und H. Gremlich. *IR-Spektroskopie: Eine Einführung*. Wiley, 2012. ISBN: 9783527662876. URL: <https://books.google.at/books?id=wuACKxcRXSEC>.
- [75] H. Gasthuber und M. Woydt. *Reibungsbelastetes Bauteil eines Verbrennungsmotors*. DE Patent 19,548,718. 1997. URL: <https://www.google.ch/patents/DE19548718C1?cl=de>.
- [76] F. Geiss. *Die Parameter der Dünnschichtchromatographie: Eine Moderne Einführung in Grundlagen und Praxis*. Springer-Verlag, 2013.
- [77] T. Gerthsen. *Chemie für den Maschinenbau*. Bd. 1. KIT Scientific Publishing, 2006.
- [78] A. Gervé. „Improvement of tribological properties by ion implantation“. In: *Surface and Coatings Technology* 60.1-3 (1993), S. 521–524.
- [79] H.-J. Gevatter und U. Grünhaupt. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer-Verlag, 2013.
- [80] D. Giancoli. *Physik: Lehr- und Übungsbuch*. Pearson Studium - Physik. Pearson Studium, 2010. ISBN: 9783868940237. URL: <https://books.google.at/books?id=blIf3HCpDy8C>.
- [81] W. Glaeser. *Materials for tribology*. Bd. 20. Elsevier, 1992.
- [82] J. Götze und M. Göbbels. „Kristallzüchtung“. In: *Einführung in die Angewandte Mineralogie*. Springer, 2017, S. 179–192.
- [83] H. Grining. *Surface Grinding of Intermetallic Titanium Aluminides*. Apprimus Wissenschaftsverlag, 2014. ISBN: 9783863592820. URL: <https://books.google.at/books?id=iE8rDwAAQBAJ>.
- [84] K. Grote und E. Antonsson. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*. Springer Handbook of Mechanical Engineering. Springer, 2009. ISBN: 9783540491316. URL: <https://books.google.at/%20books?id=9T5kd-ewRE8C>.
- [85] K. Grote und J. Feldhusen. *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN: 9783642173066. URL: <https://books.google.at/books?id=o41HW8AvXVgC>.

- [86] P. Grunau. *Meteorologie für den Nautiker: Eine Betrachtung über die wesentlichen Aspekte der Klimatologie, Meteorologie, Laderaum-Meteorologie, sowie der meteorologischen Navigation*. Books on Demand, 2012. ISBN: 9783844898705. URL: <https://books.google.at/books?id=rR4IAQAAQBAJ>.
- [87] L. Gümbel. *Reibung und Schmierung im Maschinenbau*. Berlin: Krayn, , 1925. URL: <https://www.zvab.com/erstausgabe/Reibung-Schmierung-Maschinenbau-Nachla%C3%9F-bearbeitet-Everling/19797308616/buch>.
- [88] R. H. Savage. „Graphite Lubrication“. In: 19 (Feb. 1948), S. 1–10.
- [89] K. Habig. *Tribologisches Verhalten keramischer Werkstoffe: Grundlagen und Anwendungen*. Kontakt und Studium. Expert-Verlag, 1993. ISBN: 9783816908975. URL: <https://books.google.at/books?id=YJcjLlxbwjoC>.
- [90] H. Haken und H. C. Wolf. *Molekülphysik und Quantenchemie: Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen*. Springer-Verlag, 2013.
- [91] *Härteprüfung an metallischen Werkstoffen*. URL: <https://www.gerhard-mann-online.de/technische-informationen/> (besucht am 05.04.2019).
- [92] P. Hendra. „The problem of sample heating in FT Raman Spectroscopy“. In: *The Internet Journal of Vibrational Spectroscopy* 4.3 (2000), S. 2.
- [93] G. Henkel, B. Henkel und J. Rau. *Topographie und Morphologie funktionaler Edelstahlberflächen*. Bd. 691. expert verlag, 2008.
- [94] E. Hering, R. Martin und M. Stohrer. *Physik für Ingenieure*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783662093160. URL: <https://books.google.at/books?id=2FqCBwAAQBAJ>.
- [95] D. Hernandez. *Advanced Optical Instruments and Techniques*. Optical Science and Engineering. CRC Press, 2017. ISBN: 9781351646277. URL: <https://books.google.at/books?id=ogZADwAAQBAJ>.
- [96] K. Herrmann. *Härteprüfung an Metallen und Kunststoffen: Grundlagen und überblick zu modernen Verfahren ; mit 66 Tabellen*. Reihe Technik. expert-Verlag, 2007. ISBN: 9783816925507. URL: <https://books.google.at/books?id=DiRuHrAwO0C>.
- [97] M. Hesse, H. Meier und B. Zeeh. *Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie*. Thieme, 2005. ISBN: 9783135761077. URL: <https://books.google.at/books?id=kUsilB4itdwC>.
- [98] M. Hirano und K. Shinjo. „Atomistic locking and friction“. In: *Phys. Rev. B* 41 (17 1990), S. 11837–11851. DOI: [10.1103/PhysRevB.41.11837](https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.41.11837). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.41.11837>.
- [99] K. Hofmann und U. Hofmann. *Anorganische Chemie*. Vieweg, 1963. URL: <https://books.google.at/books?id=PXYjuQEACAAJ>.

- 
- [100] R. Holm. *Electric Contacts*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1967. ISBN: 978-3-540-03875-7. URL: <http://www.springer.com/in/book/9783540038757>.
- [101] H. Hölscher, A. Schirmeisen und U. D. Schwarz. „Principles of atomic friction: from sticking atoms to superlubric sliding“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 366.1869 (2007), S. 1383–1404.
- [102] *Homepage*. URL: <https://www.berndorfband-group.com/> (besucht am 22. 03. 2019).
- [103] R. Hopp. *Grundlagen der Chemischen Technologie: für Studium und Berufsbildung*. Wiley, 2008. ISBN: 9783527625062. URL: <https://books.google.at/books?id=2S0ZuBOhsVoC>.
- [104] E. Hornbogen, G. Eggeler und E. Werner. *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN: 9783642538674. URL: <https://books.google.at/books?id=baosDwAAQBAJ>.
- [105] E. Hornbogen, T. Ricker und H. Warlimont. *Metallkunde: Aufbau und Eigenschaften von Metallen und Legierungen*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783662221556. URL: <https://books.google.at/books?id=-DmuBgAAQBAJ>.
- [106] S. Hunklinger. *Festkörperphysik*. Oldenbourg Verlag, 2009.
- [107] *Industrielle Luftbefeuchtungs-Technologien*. URL: <http://www.engineering-review.bg/bg/industrialni-sistemi-za-ovlazhnyavane-na-vazduha/2/2505/> (besucht am 30. 03. 2018).
- [108] *InfiniteFocus G5*. URL: [https://www.dgm.de/fileadmin/Newsletter/2017-DGM-NL/2017-DGM-NL-04/2017\\_04\\_G5\\_Flyer.pdf](https://www.dgm.de/fileadmin/Newsletter/2017-DGM-NL/2017-DGM-NL-04/2017_04_G5_Flyer.pdf) (besucht am 22. 03. 2019).
- [109] X. Jiang. *Grundlagen der Oberflächentechnik*. URL: [http://www.mb.uni-siegen.de/lot/studium/lehrveranstaltungen/go/got\\_kap\\_4](http://www.mb.uni-siegen.de/lot/studium/lehrveranstaltungen/go/got_kap_4) (besucht am 28. 12. 2017).
- [110] S. Jung. „Oberflächenbeurteilung-Rauheitsmessung“. In: *Stuttgart: Institut für Maschinenelemente Uni Stuttgart* (2011).
- [111] S. Jung. „Oberflächenbeurteilung-Rauheitsmessung; Spezialisierungsfachversuch und Hauptfachversuch“. In: (2012). URL: [http://www.ima.uni-stuttgart.de/pdf/studium/bachelor/dt/spezialisierungsfachversuche/HFV\\_Oberflaechenbeurteilung\\_2012.pdf](http://www.ima.uni-stuttgart.de/pdf/studium/bachelor/dt/spezialisierungsfachversuche/HFV_Oberflaechenbeurteilung_2012.pdf).
- [112] R. Jürgler. *Maschinendynamik*. 3., neubearb. Aufl. Engineering online library. Berlin [u.a.]: Springer.
- [113] S. Kalpakjian, S. R. Schmid und E. Werner. *Werkstofftechnik*. Pearson Deutschland GmbH, 2011.
- [114] N. Kanani. *Moderne Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge*. Reihe Technik. expert-Verlag, 2007. ISBN: 9783816926535. URL: <https://books.google.at/books?id=QVSKUZvllcUC>.
- [115] B. Kehrwald. *Untersuchung der Vorgänge in tribologischen Systemen während des Einlaufs*. na, 1998.

- [116] P. Kern. *Elastomerreibung und Kraftuebertragung beim Abscheren von aktiv betriebenen Vakuumgreifern auf rauen Oberflaechen*: Karlsruher Reihe Technologie und Management im Baubetrieb / Institut fuer Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut fuer Technologie (KIT). Karlsruher Institut für Technologie, 2017. ISBN: 9783731506430. URL: <https://books.google.at/books?id=8dAkDwAAQBAJ>.
- [117] *Ki - Klima und Kälte Ingenieur*. 2. C. F. Müller Grossdruckerei und Verlag., 1974. URL: <https://books.google.at/books?id=afEhAAAAMAAJ>.
- [118] N. Kikuchi und J. Oden. *Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods*. Studies in Applied Mathematics. Society for Industrial und Applied Mathematics, 1988. ISBN: 9780898714685. URL: <https://books.google.at/books?id=4Uundlf587sC>.
- [119] S. Kißling. *Chemische und elektrochemische Methoden zur Oberflächenbearbeitung von galvanogeformten Nickel-Mikrostrukturen*. Schriften des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie. Scientific Publ., 2010. ISBN: 9783866445482. URL: <https://books.google.at/books?id=5cCys1uvUFUC>.
- [120] J. Klein und S. Perahia Dvora Warburg. *Forces between polymer-bearing surfaces undergoing shear*. Nature Publishing Group, 1991. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/352143a0>.
- [121] T. Kleine-Ostmann. *Markerfreie Analytik biologischer Moleküle: THz-Spektroskopie und Leitfähigkeitsuntersuchungen*. Cuvillier Verlag, 2005.
- [122] T. Kloprogge, R. Frost und D. Lack. „Non-destructive identification of minerals by Raman microscopy“. In: *Chemistry in Australia* 66.1 (1999), S. 40–44.
- [123] M. Kochsiek. *Handbuch des Wägens*. Springer-Verlag, 2013.
- [124] *Kohlenstoff-Graphit-Produkte*. URL: [http://www.tteurope.it/pdf\\_pro/toyo-tanso\\_g-catalog\\_de.pdf](http://www.tteurope.it/pdf_pro/toyo-tanso_g-catalog_de.pdf) (besucht am 01.03.2018).
- [125] J. Kragelskij. *Reibung und Verschleiß*. VEB Verlag Technik Berlin, 1971.
- [126] H. Krause. *Untersuchungen über den Einfluss von Werkstoffgefüge und Reaktionsschichten auf das Wälzreibungs- und Verschleissverhalten vergüteter Stähle*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2013. ISBN: 9783322876935. URL: <https://books.google.at/books?id=Ps6eBgAAQBAJ>.
- [127] A. Krüger. *Neue Kohlenstoffmaterialien: Eine Einführung*. Teubner Studienbücher Chemie. Vieweg+Teubner Verlag, 2007. ISBN: 9783835190986. URL: <https://books.google.at/books?id=9AhvK8qXJ28C>.
- [128] A. Krüger. *Neue Kohlenstoffmaterialien: Eine Einführung*. Springer-Verlag, 2007.
- [129] M. Krystek. *Die digitale Implementierung des Profilters nach DIN EN ISO 11562*. Beuth Verlag, 2004.

- 
- [130] E. Kuhn. *Zur Tribologie der Schmierfette: eine energetische Betrachtungsweise des Reibungs- und Verschleißprozesses*. Reihe Technik. expert-Verlag, 2009. ISBN: 9783816928690. URL: [https://books.google.at/books?id=InvSfpTR8%5C\\_8C](https://books.google.at/books?id=InvSfpTR8%5C_8C).
- [131] W. Kulisch. *Nanotechnologie für Einsteiger: Herstellung und Eigenschaften von Kohlenstoff-Nanostrukturen*. Verdammt clever! Wiley, 2016. ISBN: 9783527695331. URL: <https://books.google.at/books?id=DPp1DQAAQBAJ>.
- [132] P. Kurzweil, B. Frenzel und F. Gebhard. *Physik Formelsammlung: Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Studium Technik. Vieweg+Teubner Verlag, 2007. ISBN: 9783834802514. URL: <https://books.google.at/books?id=t85jJjtvYAC>.
- [133] M. Kutz. *Handbook of Measurement in Science and Engineering*. 2. Wiley, 2015. ISBN: 9781118453278. URL: <https://books.google.at/books?id=zWFcCwAAQBAJ>.
- [134] M. Kutz. *Mechanical Engineers' Handbook, Volume 1: Materials and Engineering Mechanics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [135] A. Kutzelnigg u. a. „Einstellung der relativen Feuchte mit Hilfe von gesättigten Salzlösungen“. In: *Werkstoffe u Korrosion* 14 (1963), S. 181–186.
- [136] J. K. Lancaster und J. R. Pritchard. „The influence of environment and pressure on the transition to dusting wear of graphite“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 14.4 (1981), S. 747. URL: <http://stacks.iop.org/0022-3727/14/i=4/a=027>.
- [137] J. Lancaster. „A review of the influence of environmental humidity and water on friction, lubrication and wear“. In: 23 (Dez. 1990), S. 371–389.
- [138] J. Lancaster. „Instabilities in the frictional behaviour of carbons and graphites“. In: *Wear* 34.3 (1975), S. 275–290. ISSN: 0043-1648. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(75\)90096-4](https://doi.org/10.1016/0043-1648(75)90096-4). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164875900964>.
- [139] M. Leidner. „Kontaktphysikalische Simulation von Schichtsystemen“. Diss. Technische Universität, 2009.
- [140] I. Lenke. *Tribologie, Reibung und Verschleiß (Grundlagen)*. 2000. URL: <http://www.keramverband.de/keramik/pdf/00/2000kap5.pdf>.
- [141] I. W. Levin und E. N. Lewis. „Fourier transform Raman spectroscopy of biological materials“. In: *Analytical chemistry* 62.21 (1990), 1101A–1111A.
- [142] C. X. Li. *Wear Testing and Wear Measurement, The University of Birmingham, UK*. URL: [http://emrtk.uni-miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz\\_ananyagtech/1\\_konzultacio\\_elemei/wear\\_testing\\_measurement.htm](http://emrtk.uni-miskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_ananyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_testing_measurement.htm) (besucht am 07.03.2018).
- [143] G. H. Liljequist und K. Cihak. *Allgemeine Meteorologie*. Springer-Verlag, 2013.
- [144] W. Ma und J. Lu. „Effect of sliding speed on surface modification and tribological behavior of copper–graphite composite“. In: *Tribology Letters* 41.2 (2011), S. 363–370.



- [145] E. Macherauch und H. Zoch. *Praktikum in Werkstoffkunde: 95 ausführliche Versuche aus wichtigen Gebieten der Werkstofftechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 9783658050382. URL: <https://books.google.at/books?id=Gla-BAAAQBAJ>.
- [146] E. Macherauch. „Praktikum in Werkstoffkunde Skriptum für Ingenieure, Metall- und Werkstoffkundler, Werkstoffwissenschaftler, Eisenhüttenleute, Fertigungs- und Umformtechniker“. In: (2013).
- [147] H. Marsh und F. Rodriguez-Reinoso. *Sciences of Carbon Materials*. Publicaciones de la Universidad de Alicante. Universidad de Alicante, 2000. ISBN: 9788479085445. URL: [https://books.google.at/books?id=%5C\\_84OAQAAMAAJ](https://books.google.at/books?id=%5C_84OAQAAMAAJ).
- [148] U. Marx und H. Feller. „CORRELATION OF TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL DATA ILLUSTRATED AT THE EXAMPLE OF GOLD, GOLD-TANTALUM ALLOYS AND NICKEL. 3. TRIBOLOGICAL THEORIES AND THEIR RANGE OF VALIDITY“. In: *Metall* 33.4 (1979), S. 380–383.
- [149] P. Menezes, M. Nosonovsky, S. Ingole, S. Kailas und M. Lovell. *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*. SpringerLink : Bücher. Springer New York, 2013. ISBN: 9781461419457. URL: <https://books.google.at/books?id=1Pe6BAAAQBAJ>.
- [150] *Messgröße Feuchte*. URL: [http://download.testotis.de/files/E\\_Mailings/VCM/Newsletter\\_08\\_2018/know\\_how.pdf](http://download.testotis.de/files/E_Mailings/VCM/Newsletter_08_2018/know_how.pdf) (besucht am 21. 03. 2019).
- [151] *Methoden zur Beobachtung von Molekülschwingungen*. URL: [http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/ir\\_spek/methoden.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/ir\\_spek/schwspek/methoden/raman\\_spek/ir4\\_2\\_4/intensitaet\\_m29ht1100.vscml.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/ir_spek/methoden.vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/ir_spek/schwspek/methoden/raman_spek/ir4_2_4/intensitaet_m29ht1100.vscml.html) (besucht am 20. 03. 2019).
- [152] K. Miyoshi. „Adhesion, friction and micromechanical properties of ceramics“. In: *Surface and Coatings Technology* 36.1 (1988), S. 487–501. ISSN: 0257-8972. DOI: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(88\)90177-6](https://doi.org/10.1016/0257-8972(88)90177-6). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0257897288901776>.
- [153] K. Miyoshi. „Solid Lubrication Fundamentals and Applications. Chapter 5; Abrasion: Plowing and Cutting“. In: *NASA Glenn Research Center; Cleveland, OH, United States* (2001). URL: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20010093220>.
- [154] K. Miyoshi. „Solid Lubrication Fundamentals and Applications. Chapter 6“. In: *NASA Glenn Research Center; Cleveland, OH, United States* (Dez. 2000), S. 20–21. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010017158.pdf>.
- [155] U. Möller und J. Nassar. *Schmierstoffe im Betrieb*. Schmierstoffe im Betrieb 2. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642563799. URL: <https://books.google.at/books?id=tB8dBgAAQBAJ>.
- [156] *msurf mobile*. URL: <https://www.nanofocus.de/produkte/usurf/msurf-mobile/> (besucht am 17. 04. 2018).

- 
- [157] H. Murrenhoff. *Umweltverträgliche Tribosysteme: Die Vision einer umweltfreundlichen Werkzeugmaschine*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 9783642049972. URL: <https://books.google.at/books?id=D6O84SRVpc8C>.
- [158] M. H. Muser. „Der mikroskopische Ursprung der Reibung“. In: *Physik Journal* 2.9 (2003), S. 43–48.
- [159] M. H. Muser, L. Wenning und M. O. Robbins. „Simple Microscopic Theory of Amontons’s Laws for Static Friction“. In: *Phys. Rev. Lett.* 86 (7 2001), S. 1295–1298. DOI: [10.1103/PhysRevLett.86.1295](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.1295). URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.86.1295>.
- [160] K. Nalpantidis. *Qualitative und quantitative Bestimmung von Russaerosolen und anderen Feinstäuben auf Basis der Raman-Spektroskopie*. Logos Verlag Berlin GmbH, 2009.
- [161] G. Niemann. *Maschinenelemente Entwerfen, Berechnen und Gestalten im Maschinenbau: Grundlagen, Verbindungen, Lager Wellen und Zubehör*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783662383629. URL: <https://books.google.at/books?id=21SQBwAAQBAJ>.
- [162] K. Nitsche. *Werkstoffprüfung von Metallen, Band 1: Mechanische Prüfverfahren*. 1963.
- [163] R. Nollau. *Modellierung und Simulation technischer Systeme: Eine praxisnahe Einführung*. Springer, 2009. ISBN: 9783540891208. URL: <https://books.google.at/books?id=2nJTDMEpwSQC>.
- [164] D. Norm. *DIN EN ISO 6507-1 Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2018)*. 2018.
- [165] D. Norm. *EN ISO 6506-1 Metallische Werkstoffe—Härteprüfung nach Brinell—Teil 1 Prüfverfahren*. 2006.
- [166] D. Norm. *EN ISO 6508-1 Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell - Teil 1: Prüfverfahren*. 2016.
- [167] D. D. I. für Normung. *DIN 4761:1978-12 Oberflächencharakter; Geometrische Oberflächentextur-Merkmale, Begriffe, Kurzzeichen*. 1978. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-4761/725613>.
- [168] D. D. I. für Normung. *DIN 50323-2:1995-08 [ACHTUNG: DOKUMENT ZURÜCKGEZOGEN]: Tribologie; Reibung; Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen*. 1995. URL: <https://books.google.at/books?id=fawtngEACAAJ>.
- [169] D. D. I. für Normung. *DIN EN ISO 18265:2014-02, Metallische Werkstoffe - Umwertung von Härtewerten*. 2014. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-18265/185947226>.
- [170] D. D. I. für Normung. *Form deviations: concepts, classification system : DIN 4760*. 1982. URL: <https://books.google.at/books?id=fawtngEACAAJ>.

- [171] D. D. I. für Normung. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Angabe der Oberflächenbeschaffenheit in der technischen Produktdokumentation (ISO 1302:2002); Deutsche Fassung EN ISO 1302:2002*. 2002. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-1302/45862286>.
- [172] D. D. I. für Normung. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*. 1998. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-4288/3361754>.
- [173] D. D. I. für Normung. *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenunvollkommenheiten - Begriffe, Definitionen und Kenngrößen (ISO 8785:1998); Deutsche Fassung EN ISO 8785:1999*. 1999. URL: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-8785/8726211>.
- [174] W. Otting. *Der Raman-Effekt und seine analytische Anwendung*. Anleitungen für die chemische Laboratoriumspraxis. Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN: 9783642945878. URL: <https://books.google.at/books?id=Q2aoBgAAQBAJ>.
- [175] M. Otto. *Analytische chemie*. John Wiley & Sons, 2011.
- [176] E. A. Özdeniz. „Entwicklung korrosions- und verschleißbeständiger thermisch gespritzter Zylinderlaufbahnen für Verbrennungsmotoren“. In: (2015).
- [177] E. Paucksch, S. Holsten, M. Linss und F. Tikal. *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. Springer-Verlag, 2008.
- [178] S. Paul und R. Paul. *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik 1: Gleichstromnetzwerke und ihre Anwendungen*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 9783540690788. URL: <https://books.google.at/books?id=1bEfBAAAQBAJ>.
- [179] A. Philippovich. *Chemisch-physikalische Grundlagen der Verwendung von Erdöl und seinen Produkten*. Springer Vienna, 2013. ISBN: 9783709178966. URL: [https://books.google.at/books?id=NO%5C\\_LBgAAQBAJ](https://books.google.at/books?id=NO%5C_LBgAAQBAJ).
- [180] V. Popov. *Kontaktmechanik und Reibung*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN: 9783642133022. URL: <https://books.google.at/books?id=M97c-caBBtQC>.
- [181] P. Profos. *Handbuch der industriellen Messtechnik*. Vulkan-Verlag, 1974.
- [182] E. Rabinowicz. „Friction and wear of materials“. In: *Wiley, New York* (1965).
- [183] B. Raeymaekers, I. Etsion und F. E. Talke. „Enhancing tribological performance of the magnetic tape/guide interface by laser surface texturing“. In: *Tribology Letters* 27.1 (2007), S. 89.
- [184] M. Rahlves, J. Seewig u. a. *Optisches Messen technischer Oberflächen: Messprinzipien und Begriffe*. Beuth Verlag, 2009.
- [185] M. T. Raimondi und R. Pietrabissa. „The in-vivo wear performance of prosthetic femoral heads with titanium nitride coating“. In: *Biomaterials* 21.9 (2000), S. 907–913.
- [186] *Rasterkraftmikroskopie - AFM*. URL: <https://frtmetrology.com/konfokalmikroskopie/> (besucht am 21.02.2018).

- 
- [187] G. Rau und R. Ströbel. *Die Metalle: Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen*. Bd. 1. Verlag Neuer Merkur GmbH, 1999.
- [188] N. Reif. *Zentralschmieranlagen. Allgemeines, Beschreibung einzelner Komponenten und Marktbeispiele*. GRIN Verlag, 2017. ISBN: 9783668437081. URL: <https://books.google.at/books?id=OT68DgAAQBAJ>.
- [189] A. Reis. „Handbuch der allgemeinen Chemie. Herausgegeben von Wilhelm Ostwald und Carl Drucker Bd. I: Die chemische Literatur und die Organisation der Wissenschaft. Von Wilhelm Ostwald. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H., Leipzig. 1919. 120 Seiten“. In: *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie* 25.21-22 (1919), S. 371–372. ISSN: 0005-9021. DOI: [10.1002/bbpc.19190252109](https://doi.org/10.1002/bbpc.19190252109). URL: <http://dx.doi.org/10.1002/bbpc.19190252109>.
- [190] E. Riedel. *Anorganische chemie*. Walter de Gruyter, 2011.
- [191] A. Rosenkranz. „Tribologie an Oberflächen mit maßgeschneidertem topographischem Design“. In: (2015).
- [192] A. Ruff und R. Bayer. *Tribology: Wear Test Selection for Design and Application*. ASTM STP 1199. ASTM, 1993. ISBN: 9780803118560. URL: <https://books.google.at/books?id=rK2JOf88fqkC>.
- [193] J. Salem, G. Hilmas, W. Fahrenholtz, T. Ohji und A. Wereszczak. *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites IV*. Ceramic Engineering and Science Proceedings. Wiley, 2009. ISBN: 9780470456354. URL: <https://books.google.at/books?id=FhWJBJ-oYiMC>.
- [194] R. H. Savage und D. Schaefer. „Vapor lubrication of graphite sliding contacts“. In: *Journal of Applied Physics* 27.2 (1956), S. 136–138.
- [195] B. Schlecht. *Maschinenelemente 2*. Ing. Maschinenbau. Pearson Studium, 2010. ISBN: 9783827371461. URL: <https://books.google.at/books?id=dZAr6Olw2Z0C>.
- [196] W. Schmidt und H. Dietrich. *Praxis der mechanischen Werkstoffprüfung: was nicht in Normen und Lehrbüchern steht ; mit 4 Tabellen und 152 Literaturstellen*. Kontakt & Studium. expert-Verlag, 1999. ISBN: 9783816916123. URL: <https://books.google.at/books?id=VXryPHmDgpgC>.
- [197] T. Schnettker. *Bewertung von Schleifmitteln auf Unterlage für die Holzbearbeitung*. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. Vulkan-Verlag, 2006. ISBN: 9783802786921. URL: [https://books.google.at/books?id=GEyWdZSe%5C\\_jEC](https://books.google.at/books?id=GEyWdZSe%5C_jEC).
- [198] E. Schramek und H. Recknagel. *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 07/08*. 73. Oldenbourg Industrieverlag, 2007. ISBN: 9783835631045. URL: <https://books.google.at/books?id=KPotGhy-GUgC>.

- [199] M. Schuth und W. Buerakov. *Handbuch Optische Messtechnik: Praktische Anwendungen für Entwicklung, Versuch, Fertigung und Qualitätssicherung*. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017. ISBN: 9783446455634. URL: <https://books.google.at/books?id=0BBBDwAAQBAJ>.
- [200] I. Shabalín. *Ultra-High Temperature Materials I: Carbon (Graphene/Graphite) and Refractory Metals*. Springer Netherlands, 2014. ISBN: 9789400775879. URL: <https://books.google.at/books?id=QdgsBAAAQBAJ>.
- [201] H. Sicius. *Kohlenstoffgruppe: Elemente der vierten Hauptgruppe: Eine Reise durch das Periodensystem*. essentials. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. ISBN: 9783658111663. URL: <https://books.google.at/books?id=FQaVCgAAQBAJ>.
- [202] *SIGRAFINE® isostatischer Graphit*. URL: [http://www.sglgroup.com/cms/de/Unternehmen/Geschaeftsbereiche/Graphite-Materials-and-Systems/Feinkorngraphit/index.html?\\_\\_locale=de](http://www.sglgroup.com/cms/de/Unternehmen/Geschaeftsbereiche/Graphite-Materials-and-Systems/Feinkorngraphit/index.html?__locale=de) (besucht am 29. 03. 2018).
- [203] M. E. Sikorski. „Correlation of the Coefficient of Adhesion with Various Physical and Mechanical Properties of Metals“. In: *Trans. ASME, D* 85 (1963), S. 279. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10019035707/en/>.
- [204] M. Sikorski. „The adhesion of metals and factors that influence it“. In: *Wear* 7.2 (1964), S. 144–162. ISSN: 0043-1648. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(64\)90050-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(64)90050-X). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/004316486490050X>.
- [205] R. Sims. „Wear of carbon brushes at high altitudes“. In: 1953 (Juli 1954), S. 217–222.
- [206] H. Sin, N. Saka und N. Suh. „Abrasive wear mechanisms and the grit size effect“. In: *Wear* 55.1 (1979), S. 163–190. ISSN: 0043-1648. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(79\)90188-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(79)90188-1). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164879901881>.
- [207] K. Sommer, R. Heinz und J. Schöfer. *Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN: 9783834824646. URL: <https://books.google.at/books?id=Pc4IBAAAQBAJ>.
- [208] G. Stachowiak und A. W. Batchelor. *Experimental methods in tribology*. Bd. 44. Elsevier, 2004.
- [209] *Stahl und Eisen*. A. Bagel, 1987. URL: <https://books.google.at/books?id=OKpRx4Kya5AC>.
- [210] *Stahlbezeichnung 1.4301*. URL: <http://www.thyssenkrupp.at/files/rohre/Werkstoffdatenblaetter/1.4301.pdf> (besucht am 22. 03. 2019).
- [211] W. Steinhilper, A. Albers, L. Deters, H. Schulz, E. Leidich, H. Linke, P. Poll und J. Wallaschek. *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 2006. ISBN: 9783540296300. URL: <https://books.google.at/books?id=E7ojBAAAQBAJ>.

- 
- [212] U. Stelzmann und G. Müller. *FEM für Praktiker: Strukturodynamik : Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Strukturodynamik - Lösungen mit dem FE-Programm ANSYS 9/10 ; mit zahlreichen Beispielen auf CD-ROM / Ulrich Stelzmann ...* Edition expertsoft. Expert-Verlag, 2008. ISBN: 9783816928423. URL: <https://books.google.bg/books?id=EdTJ86wdIPMC>.
- [213] S. Stolz. *Flüssigprozessierbare Elektroneninjektionsmaterialien in organischen Leuchtdioden*. BoD–Books on Demand, 2017.
- [214] R. Stribeck. „Die wesentlichen eigenschaften der Gleit-und Rollenlager“. In: *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure* 46 (1902), 1341–1348, 1432–1438 und 1463–1470.
- [215] M. Strunz. *Instandhaltung: Grundlagen - Strategien - Werkstätten*. SpringerLink : Bücher. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN: 9783642273902. URL: <https://books.google.at/books?id=aqnHx1mztd0C>.
- [216] I. Szabó. *Einführung in die technische Mechanik*. Springer, 1956. URL: <https://books.google.at/books?id=nuPPAAAAMAAJ>.
- [217] S. Szyminski. „Oberflächenrauheit“. In: *Toleranzen und Passungen*. Springer, 1993, S. 91–110.
- [218] D. Tabor. „The Hardness of Metals Oxford University Press“. In: *New York* (1951).
- [219] R. Takagi und Y. Tsuya. „Static friction between clean copper single crystal surfaces“. In: *Wear* 4.3 (1961), S. 216–227. ISSN: 0043-1648. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(61\)90123-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(61)90123-5). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043164861901235>.
- [220] F. E. Talke. „An overview of current tribology problems in magnetic disk recording technology“. In: *Tribology Series*. Bd. 38. Elsevier, 2000, S. 15–24.
- [221] T. Thomas. *Rough Surfaces*. Imperial College Press, 1999. ISBN: 9781860941009. URL: <https://books.google.at/books?id=ObqwaFjtSvwC>.
- [222] W. Tietze. *Taschenbuch Dichtungstechnik*. Vulkan-Verlag, 2005. ISBN: 9783802727351. URL: <https://books.google.at/books?id=nMIzt1gPCN8C>.
- [223] H. Tönshoff. *Werkzeuge für die moderne Fertigung: Möglichkeiten zur Rationalisierung in der spanenden Fertigung*. Kontakt & Studium. Expert-Verlag, 1993. ISBN: 9783816907664. URL: <https://books.google.bg/books?id=6h3kd5zla4QC>.
- [224] G. E. Totten, L. D. Wedeven, M. Anderson und J. R. Dickey. „Bench testing of industrial fluid lubrication and wear properties used in machinery applications“. In: ASTM. 2001.
- [225] G. für Tribologie. *GfT Arbeitsblatt 7 : Verschleiß, Reibung-DEFINITIONEN, BEGRIFFE, PRÜFUNG*. 2002. URL: [https://neu.gft-ev.de/wp-content/uploads/2002\\_AB\\_7\\_Tribologie.pdf](https://neu.gft-ev.de/wp-content/uploads/2002_AB_7_Tribologie.pdf) (besucht am 02.03.2017).
- [226] F. Tuinstra und J. L. Koenig. „Raman spectrum of graphite“. In: *The Journal of Chemical Physics* 53.3 (1970), S. 1126–1130.

- [227] U. Tuzun und O. R. Walton. „Micro-Mechanical modelling of load dependent friction in contacts of elastic spheres“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 25.1A (1992), A44. URL: <http://stacks.iop.org/0022-3727/25/i=1A/a=009>.
- [228] *Verfahren zur Herstellung*. URL: <https://www.gab-neumann.com/Verfahren-zur-Herstellung-von-impr%C3%A4gniertem-Graphit> (besucht am 14. 08. 2018).
- [229] *Vergleichende Untersuchungen zur Härte von Aufbrennlegierungen und die klinische Relevanz von Härteangaben*. URL: [http://www.strickling.net/diss2\\_1.htm#2.3](http://www.strickling.net/diss2_1.htm#2.3). (besucht am 10. 03. 2018).
- [230] *Verschleiß*. URL: [http://www.chemie.de/lexikon/Verschlei%C3%9F.html#Einflussgr.C3.B6.C3.9Fen\\_auf\\_Verschlei.C3.9F](http://www.chemie.de/lexikon/Verschlei%C3%9F.html#Einflussgr.C3.B6.C3.9Fen_auf_Verschlei.C3.9F) (besucht am 11. 01. 2018).
- [231] E. Vinaricky, K. Schröder und J. Weiser. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren*. Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN: 9783642454271. URL: <https://books.google.at/books?id=Fit6DAAAQBAJ>.
- [232] M. Volgger. *Lichtmikroskopie - Theorie und Anwendung*. Einrichtung Cell Imaging und Ultrastrukturforschung - Universität Wien, 2008. URL: <http://www.univie.ac.at/mikroskopie/>.
- [233] J. Volz. „Erstellung optimierter Einlaufprogramme von Dieselmotoren.(Ein System unter Anwendung von Radionukliden.)“ In: (1977).
- [234] *Vor- und Nachteile des Wasserstrahlschneidens*. URL: <https://www.schneidforum.de/schneidwissen/wasserstrahlschneiden/vorteile-nachteile.html> (besucht am 29. 03. 2018).
- [235] R. Wäsche und K. Habig. *Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung: Literaturübersicht*. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin, West. Wirtschaftsverl. NW, Verlag für Neue Wiss., 1989. ISBN: 9783883148892. URL: <https://books.google.at/books?id=TIrAAAACAAJ>.
- [236] N. Watanabe, S. Koyama und H. Imoto. „Thermal decomposition of graphite fluoride. I. Decomposition products of graphite fluoride, (CF)<sub>n</sub> in a vacuum“. In: 53 (Okt. 1980), S. 2731–2734.
- [237] D. Weber. *Technische Feuchtemessung: in Gasen und Festkörpern*. Vulkan-Verlag GmbH, 2002.
- [238] K. Weinert. *Spanende Fertigung: Prozesse, Innovationen, Werkstoffe*. Spanende Fertigung: Prozesse, Innovationen, Werkstoffe 10. Vulkan-Verlag, 2005. ISBN: 9783802729355. URL: <https://books.google.at/books?id=17SE3jnjq-C8C>.
- [239] H. von Weingraber und M. Abou-Aly. *Handbuch Technische Oberflächen: Typologie, Messung und Gebrauchsverhalten*. Vieweg+Teubner Verlag, 2013. ISBN: 9783322831019. URL: <https://books.google.at/books?id=xgibBgAAQBAJ>.
- [240] B. Weinstein. *Handbuch der Physikalischen Maassbestimmungen: Zweiter Band: Einheiten und Dimensionen, Messungen für Längen, Massen, Volumina und Dichtigkeiten*. Springer-Verlag, 2013.

- 
- [241] W. Weißbach, U. Bleyer und M. Bosse. *Aufgabensammlung Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. Viewegs Fachbücher der Technik. Vieweg+Teubner Verlag, 2013. ISBN: 9783322919144. URL: <https://books.google.at/books?id=HPbMBgAAQBAJ>.
- [242] *Werkstoffe*. URL: <http://www.topgrafit.eu/graphitbearbeitung/werkstoffe/> (besucht am 29.03.2018).
- [243] *Werkstoffe*. URL: <http://www.maximator-jet.de/de/wasserstrahltechnik/wasserstrahlschneiden> (besucht am 29.03.2018).
- [244] O. Werner, W. Böhm, G. Schikorr, B. Schulze, B. Jolitz, I. Schikorr, E. Deiß, K. Albers, E. Link, O. Jacobi u. a. *Metalle und Metallkonstruktionen*. Springer Vienna, 2013. ISBN: 9783709159460. URL: <https://books.google.at/books?id=khiABwAAQBAJ>.
- [245] T. Weyhmüller. „Fertigungstechnische und tribologische Wirkmechanismen beim Polymerlappen am Beispiel der Werkstoffpaarung einer Nockenwellenlagerung“. In: (2016).
- [246] *What is Raman Spectroscopy?* URL: <https://www.nanophoton.net/raman/raman-spectroscopy.html> (besucht am 20.03.2019).
- [247] D. J. Whitehouse. *Handbook of surface metrology*. CRC Press, 1994.
- [248] C. Wiehr und J. Seewig. „3D-Kenngrößen nach ISO 25178“. In: *Fortschritte in der Metallographie. Vortragstexte der 45* (), S. 3–8.
- [249] A. Williams, H. Edwards und B. Barry. „Fourier transform Raman spectroscopy a novel application for examining human stratum corneum“. In: *International journal of pharmaceuticals* 81.2-3 (1992), R11–R14.
- [250] H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch und J. Voßiek. *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch*. Vieweg+Teubner Verlag, 2009. ISBN: 9783834899989. URL: <https://books.google.at/books?id=kUqdFP4HXvwC>.
- [251] *WLI, Konfokal und Fokusvariationsignal*. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13893> (besucht am 18.03.2019).
- [252] H. Worch, W. Pompe und W. Schatt. *Werkstoffwissenschaft*. John Wiley & Sons, 2011.
- [253] M. Woydt. *Tribologie keramischer Werkstoffe: Grundlagen - Werkstoffneuentwicklungen - industrielle Anwendungsbeispiele ; mit 38 Tabellen und 119 Literaturstellen*. Kontakt & Studium. expert-Verlag, 2001. ISBN: 9783816917441. URL: <https://books.google.at/books?id=RCt1PpwmWMEC>.
- [254] J. Xu und J. Li. „New achievements in superlubricity from international workshop on superlubricity: fundamental and applications“. In: *Friction* 3.4 (Dez. 2015), S. 344–351. ISSN: 2223-7704. DOI: [10.1007/s40544-015-0100-8](https://doi.org/10.1007/s40544-015-0100-8). URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0100-8>.
- [255] B. K. Yen. „Roles of oxygen in lubrication and wear of graphite in “dusting” and ambient conditions“. In: *Journal of Materials Science Letters* 14.21 (Jän. 1995), S. 1481–1483. ISSN: 1573-4811. DOI: [10.1007/BF00633136](https://doi.org/10.1007/BF00633136). URL: <https://doi.org/10.1007/BF00633136>.



- [256] B. Yen, B. Schwickert und M. Toney. „ORIGIN OF LOW-FRICTION BEHAVIOR IN GRAPHITE INVESTIGATED BY SURFACE X-RAY DIFFRACTION“. In: *Applied Physics Letters*, 2004, Vol.84(23) (). Journal Article. ISSN: 0003-6951.
- [257] P. Zeller, E. Andreas, H. Fastl, S. Kerber, J. Hobelsberger, R. Jebasinski, D. de Klerk, T. Moosmayr und E. Saemann. *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg+Teubner Verlag, 2013. ISBN: 9783834886576. URL: <https://books.google.at/books?id=cj8pBAAQBAJ>.
- [258] L. Zhou, K. Kato, G. Vurens und F. Talke. „The effect of slider surface texture on flyability and lubricant migration under near contact conditions“. In: *Tribology international* 36.4-6 (2003), S. 269–277.
- [259] K. ZumGahr. *Abrasiver Verschleiß metallischer Werkstoffe*. (Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften : 5). VDI-Verlag, 1981. URL: [https://books.google.bg/books?id=vx%5C\\_SMgAACAAJ](https://books.google.bg/books?id=vx%5C_SMgAACAAJ).

# Abbildungsverzeichnis

I.1	Vorgehensweise	3
II.1	Schematische Darstellung des tribologischen System nach Grote u. a. [85]	4
II.2	Stick-Slip-Effekt,Quelle: Steinhilper u. a. [211]	14
II.3	Herstellung von Feinkorngraphit [202]	20
II.4	Furchung nach Czichos u. a. [46]	30
II.5	Oberflächenzerrüttung nach Czichos [45]	34
II.6	Oberflächenschichten nach Czichos u. a. [48]	35
II.7	Schiefe des Profils nach Gademawla u. a. [73]	41
II.8	Steilheit des Profils nach Gademawla u. a. [73]	42
II.9	Weisslichtinterferometrie, Konfokalmikroskopie, Fokusvariation	45
II.10	Konfokalmikroskop Prinzip	46
II.11	Fokus-Variation-Messaufbau	48
II.12	Raman-Messmethode	51
II.13	Übersicht der tribologischen Prüfkategorien der DIN 50322[55] nach Bhushan [17]	61
III.1	Ring-Reibung-und-Verschleiß Hochtemperatur Tribometer (RRT-HT Tribometer)	64
III.2	oberer Halter, neu, Konstruktion und Fertigung: Berndorf Band Group	65
III.3	Graphitsegment	67
III.4	Wasserstrahldurchmesser und Konizität	68
III.5	Abrasivmittel 120 Mesh, Korngrößen, x200 Vergrößerung	69
III.6	Graphitsegment, dritte Graphitplatte, x200 Vergrößerung	69
III.7	Verschleißgeschwindigkeit nach Volz [233] und Reibungskoeffizient (Phase I- Anstieg der Reibung, Phase II- Abstieg der Reibung) beim Einlaufprozess eines Zylinderlaufbahn-Kolbenring-Systems nach Blau [25]	70
III.8	Objektiv,10x verwendet	76
III.9	Graphitsegment, gemessene Stellen	76
III.10	Graphitsegment, Nanofokus	77
III.11	Graphitsegment, Ränder	77
III.12	Raman-Gerät	79
III.13	Aufbau des RRVHT-Tribometers. Quelle: selbst gezeichnet nach Unterlagen von AC2T Research GmbH	82

---

IV.1	Lichtmikroskopische Aufnahme, Transferfilm nach RT-Test . . . . .	87
IV.2	2D-Parameter bei RT . . . . .	87
IV.3	3D-Parameter bei RT . . . . .	87
IV.4	Lichtmikroskopische Aufnahme, Graphitprobe nach RT-Test . . . . .	88
IV.5	2D-Parameter bei 150 °C . . . . .	90
IV.6	3D-Parameter bei 150 °C . . . . .	90
IV.7	Lichtmikroskopische Aufnahme, Graphitprobe nach 150 °C-Test . . . . .	90
IV.8	2D-Parameter bei 250 °C . . . . .	92
IV.9	3D-Parameter bei 250 °C . . . . .	92
IV.10	Lichtmikroskopische Aufnahme, Serie 14, Graphitprobe nach 250 °C-Test . . . . .	93
IV.11	Lichtmikroskopische Aufnahme, Transferfilm nach 400 °C-Test . . . . .	95
IV.12	2D-Parameter bei 400 °C . . . . .	95
IV.13	3D-Parameter bei 400 °C . . . . .	95
IV.14	Lichtmikroskopische Aufnahme, Graphitprobe nach 400 °C-Test . . . . .	95
IV.15	RT3D . . . . .	96
IV.28	Geschwindigkeitsprofil . . . . .	107
VI.1	Reibkurven der Einlaufphase. Quelle: Blau [25] . . . . .	114

# Formelverzeichnis

II.1	Mechanik der festen Koerper . . . . .	23
II.2	Nichtlinearitaet zwischen Anpresskraft und Reibwert . . . . .	24
II.3	Haftreibung . . . . .	26
II.4	Coulomb'sche Reibung/trockene Reibung . . . . .	26
II.5	Reibungskraft im Grenzflaechenkontakt . . . . .	29
II.6	Ist-Kontaktfaeche . . . . .	29
II.7	Einfachstes Adhaesionsmodell . . . . .	29
II.8	arithmetischer Mittelwert . . . . .	39
II.9	arithmetischer Mittelwert 1 . . . . .	40
II.10	quadratischer Mittelwert . . . . .	40
II.11	quadratischer Mittelwert 1 . . . . .	40
II.12	Schiefe, linienbezogen . . . . .	40
II.13	Schiefe, flaechenbezogen . . . . .	40
II.14	Kurtosis . . . . .	41
II.15	Kurtosis 1 . . . . .	42
II.16	ACF . . . . .	43
II.17	PSD . . . . .	43
II.18	Haertep ruefung nach Brinell . . . . .	50
II.19	Haertep ruefung nach Vickers . . . . .	50
II.20	Intensitaet der Raman-Linien . . . . .	52
II.21	Wellenzahl . . . . .	52
II.22	Wellenzahl berechnen . . . . .	52
II.23	relative Feuchte . . . . .	56
III.1	Haertemessung nach Brinell, DIN ISO 6506 . . . . .	73
III.2	Mittlerer Durchmesser des Eindruckes, DIN ISO 6506 . . . . .	73
III.3	arithmetische Mittelwert, DIN ISO 6506 . . . . .	73
IV.1	Verschleissberechnung . . . . .	99

# Tabellenverzeichnis

II.1	Massenverlust . . . . .	54
II.2	Volumenverlust . . . . .	54
II.3	Linearer Dimensionsverlust . . . . .	55
II.4	TAN, Quelle: in Anlehnung an Ruff u. a. [192], vgl. Blau [23] . . . . .	62
III.1	Härtemessung nach Brinell, Mittelwert, Standardabweichung der Stichprobe und der Grundgesamtheit . . . . .	74
III.2	Technische Information $\mu$ surf mobile Konfokalmikroskop, Physikalische Parameter. Quelle: Bedienungsanleitung $\mu$ surf mobile . . . . .	75
III.3	Ebenheitsmessungen, 5 Stellen . . . . .	76
III.4	Ebenheitsmessungen, Stelle 1 . . . . .	76
IV.1	Versuche bei Raumtemperatur . . . . .	86
IV.2	Versuche bei 150 °C . . . . .	89
IV.3	Versuche bei 250 °C . . . . .	91
IV.4	Versuche bei 400 °C . . . . .	94
VI.1	Physikalische und mechanische Eigenschaften der Graphitgleitkörper, Quelle: Berndorf Band und AC2T . . . . .	113
VI.2	Physikalische und mechanische Eigenschaften der Stähle, Quelle: Berndorf Band	114
VI.3	Messdaten des Verschleißsensors . . . . .	115

# Abkürzungsverzeichnis

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AFM	engl.: Atomic force microscopy
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CCD	engl.: charge-coupled device
CNC	engl.: Computerized Numerical Control
COF	engl.: Coefficient Of Friction
HBW	Härteprüfung nach Brinell, Wolframkarbideindringkörper
HRB	Härteprüfung nach Rockwell, Skala B
HV	Härteprüfung nach Vickers
LED	Licht emittierende Diode
$MoS_2$	Molybdändisulfid
PTFE	Polytetrafluorethylen
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RMS	engl.:Root Mean Square
RRV	Ring-Reibung-und-Verschleiß-Tribometer
RT	Raumtemperatur
SNOM	engl.: Scanning Near-field Optical Microscopy
SPM	engl.:Scanning Probe Microscopy
STM	engl.:Scanning Tunneling Microscopy
TSA	Tribosystem- Analyse
WLI	Weißlichtinterferometrie
z.B.	zum Beispiel

# Symbolsverzeichnis

$R_a$	arithmetischer Mittelwert der Profilordinaten	$\mu m$
$R_p$	Höhe der Profilspitze	$\mu m$
$R_q$	quadratischer Mittelwert der Profilordinaten	$\mu m$
$R_t$	Gesamthöhe des Profils	$\mu m$
$R_v$	Höhe der Profilspitze	$\mu m$
$R_z$	größte Höhendifferenz des Profils	$\mu m$
$R_{ku}$	Kurtosis	-
$R_{sk}$	Schiefe	-
$S_q$	quadratischer Mittelwert der Profilordinaten, DIN 25178	$\mu m$
$S_{ku}$	3D-Kurtosis, DIN 25178	-
$S_{sk}$	3D-Schiefe, DIN 25178	-
$Z_p$	Höhe der Profilspitze	$\mu m$
$Z_t$	Summe aus Profiltiefe und Profilspitze	$\mu m$
$Z_v$	Tiefe des Profiltals	$\mu m$
$\lambda c$	Nesting Index	-
$\tau_{s1,2}$	Scherfestigkeit	$N/mm^2$
ACF	Autokorrelationsfunktion	
P	Primärprofil	-
p	Fließdruck	bar
PSD	engl. Power Spectral Density; dt. Leistungsdichtespektrum	
R	Rauheitsprofil	-
W	Welligkeitsprofil	-