



DIPLOMARBEIT

Untersuchung der Schichtbildung auf Cu-basierten Schleifringen im tribologischen Kontakt mit Kohlebürsten

Ausgeführt am
Institut für chemische Technologien und Analytik - TU Wien
Getreidemarkt 9/164-CT
1060 Wien

unter Anleitung von Ao. Prof. DI Dr. Roland Haubner

durch
Kurt Koschatzky, BSc.

Matr.Nr.:0635265

Dammgasse 7/1
2620 Wartmannstetten

Wien, November 2020

Danksagung

Die in dieser Arbeit dargestellten Forschungsergebnisse wurden bei der Firma AC2T research GmbH (Wiener Neustadt) erstellt und durch das österreichische COMET-Programm (Projekt: COMET K2 InTribology, Nr. 872176; Projektträger: AC2T research GmbH, Österreichisches Kompetenzzentrum für Tribologie) gefördert.

An dieser Stelle möchte ich mich für die Ermöglichung der Durchführung der Diplomarbeit bei der Firma AC2T research GmbH bedanken.

Ein besonderer Dank sei an dieser Stelle an Ao. Prof. DI Dr. Roland Haubner für die Betreuung dieser Arbeit über den langen Zeitraum hinweg gerichtet.

Ein großes Dankeschön gilt an dieser Stelle Fr. Dipl.-Ing. Dr.mont. Ulrike Cihak-Bayr, Hrn. Dipl.-Ing. Dr.mont. Ewald Badisch und Hrn. Dipl.-Ing. Franz Pirker für die großartige und intensive fachliche und persönliche Betreuung seitens von AC²T.

Ein weiteres Dankeschön gilt Fr. Dr. Heidrun Rosic und Fr. Mag. Alexandra Paulnsteiner für Ihren unermüdlichen Einsatz beim Korrekturlesen dieser Arbeit.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, welche mir das Studium ermöglichten und mich über die Zeit hinweg auch in schwierigeren Phasen begleitet haben und meiner Lebensgefährtin für die Geduld und die moralische Unterstützung während der Durchführung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Elektrische Maschinen sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken, um den Alltag zu erleichtern. Häufig werden Systeme verwendet, in denen die Stromübertragung vom stehenden auf den rotierenden Teil des Motors mittels Kohlebürsten erfolgt.

In solchen Systemen bildet sich in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen im Kontaktbereich zwischen den Kohlen und dem Schleifring eine Schicht mit elektrischen und tribologischen Eigenschaften aus. Aufgrund der immer höheren Anforderungen in Bezug auf Betriebsbedingungen, Lebensdauer und Zuverlässigkeit ist die Kenntnis der Auswirkung einzelner Betriebsbedingungen auf die Schichtbildung für die Weiterentwicklung solcher Systeme von essenzieller Bedeutung.

Das Ziel dieser Arbeit war, die Schichtbildung im tribologischen Kontakt von Schleifringen mit Kohlebürsten zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigten eine eindeutig geringere Langzeitstabilität vom Schleifringwerkstoff Kupfer im Vergleich zu Bronze in Kombination mit Kohlebürsten. Weiter konnte ein möglicher Mechanismus für das Versagen der Gleitschicht auf Kupfer aufgezeigt werden.

Aufgrund der Ergebnisse muss Kupfer trotz der guten elektrischen Eigenschaften für den Einsatz als Schleifringwerkstoff als nur gering eingestuft werden.

Abstract

Today, electric machines play an indispensable role in making everyday life easier. Frequently, systems are used in which the current is transferred from the stationary to the rotating part of the motor by means of carbon brushes. Depending on the operating conditions, a layer with electrical and tribological properties forms in the contact area between the carbon brushes and the slip ring. Due to the ever-increasing demands in terms of service life and reliability, a sound knowledge of the effect of individual operating conditions on the formation of the layer is essential for the further development of such systems. The aim of this thesis is to investigate the layer formation in the tribological contact of slip rings with carbon brushes. The results clearly show a lower long-term stability of copper as the slip ring material compared to bronze in combination with carbon brushes. Furthermore, a possible mechanism for the failure of the sliding layer on copper could be shown. Based on the results, copper must be classified as performing poorly despite its good electrical properties for use as slip ring material.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung.....	4
1.1. Elektromotoren im täglichen Einsatz	4
1.2. Zielsetzung der Arbeit	6
2. Literatur.....	7
2.1. Zeitgeschichtliche Entwicklung der Elektrizität.....	7
2.2. Schleifring und Kohlebürsten benötigte Systeme	8
2.3. Patinabildung auf Kupferwerkstoffen	9
2.4. Schichtbildung im Kontaktbereich der Schleifringe	11
2.4.1. Einfluss der Anpresskraft	11
2.4.2. Einfluss der Drehzahl und der Temperatur	13
2.4.3. Einfluss der Stromdichte und Spannungsabfall	13
2.4.4. Atmosphäre und Luftfeuchtigkeit	15
3. Apparaturen	18
3.1. Allgemeiner Aufbau des Prüfstandes	18
3.1.1. Aufbau industrieller Schleifringe	19
3.1.2. Beschreibung der Schleifringe	20
3.1.1. Eigenschaften und Herstellung von Kohlebürsten	21
3.1.2. Beschreibung der Kohlebürsten	23
3.1.3. Der Antrieb des Schleifrings	24
3.1.4. Montage der Schleifringe	25
3.1.5. Montage der Kohlebürsten	27
3.1.6. Anordnung der Kraftsensoren im Tribometer	29
3.1.7. Prinzip der Kraftmessung	30
3.1.8. Kraftmessung an den Schleifkohlen	31
3.2. Stromführung durch das Tribosystem	32
3.3. Atmosphärenkontrolle	33
3.4. Aerosol und Staubabfuhr	34
4. Durchführung.....	36
4.1. Probenpräparation zur metallographischen Gefügecharakterisierung.....	36
4.2. Durchführung der metallographischen Ätzung	37
4.3. Herstellung des synthetischen Meerwassers.....	38

4.3.1. Chemikalien	38
4.3.2. Bestimmung der Massenverluste der Schleifkohlen	38
4.4. Bestimmung der Ausgangstopografie von Schleifringen und Kohlen	39
4.4.1. Topographiebestimmung - Schleifringe	39
4.4.2. Topographiebestimmung – Schleifkohlen	42
4.5. Durchführung der tribologischen Versuche.....	44
4.5.1. Aufstellung der konstanten und Variablen Parameter	44
4.5.2. Aufstellung der Parameter während der einzelnen Versuche	45
4.5.3. Versuchsablauf	46
5. Analytische Methoden	47
5.1. Metallographie.....	47
5.2. Lichtmikroskopie.....	47
5.3. Rasterelektronenmikroskopie	48
5.4. EDX Analyse	48
5.5. XPS (Röntgenphotoelektronenspektroskopie)	49
6. Resultate.....	50
6.1. Gefüge der bei den Versuchen verwendeten Werkstoffe	50
6.2. Einfluss des Gleitwegs auf das tribologische System.....	52
6.2.1. Makroskopische Betrachtungen nach unterschiedlichen Gleitwegen	52
6.2.1. Abhängigkeit der Normal- und Reibkraftverläufe vom Gleitweg	54
6.2.2. Änderung der Topografie in Abhängigkeit des Gleitweges	56
6.2.3. REM Analysen der Spuren nach unterschiedlichen Gleitwegen	59
6.2.3.1. EDX Analytik der Spuren auf Kupfer und Bronze nach 1800 km Gleitweg.....	62
6.2.3.2. FIB-Schnitte der Spuren	65
6.3. Einfluss salzhaltiger Atmosphäre auf das tribologische System	68
6.3.1. Makroskopische Betrachtungen der Versuche bei Salz-haltiger Atmosphäre	68
6.3.2. Abhängigkeit der Kraftverläufe vom salzhaltiger der Atmosphäre	69
6.3.3. Änderung der Topografie der Schleifringe bei salzhaltiger Atmosphäre	71
6.3.4. REM-Aufnahmen der Versuche bei Salz-haltiger Umgebung	73
6.3.5. FIB-Schnitte	74
6.4. Einfluss der Stromstärke auf das tribologische System.....	76
6.4.1. Kraftverläufe bei geringer Stromstärke	76
6.4.2. REM-Aufnahmen der Spur bei geringer Stromstärke	78
6.4.3. Kraftverläufe bei hoher Stromstärke	80
6.4.4. REM-Aufnahmen der Spur bei hoher Stromstärke	82
6.5. XPS Analyse der Spuren	84

7.	Diskussion	90
7.1.	Makroskopische Betrachtungen	90
7.2.	Bewertung der 3D Topografie der Spuren.....	92
7.3.	Betrachtung der Kraftverläufe	93
7.4.	Betrachtung der Massenverluste der Schleifkohlen	97
7.5.	Analytische Betrachtungen der ausgebildeten Schichten	97
8.	Zusammenfassung.....	103
9.	Literaturverzeichnis	105

1. EINLEITUNG

1.1. Elektromotoren im täglichen Einsatz

In der heutigen Zeit sind elektrische Maschinen aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken nicht nur, dass sie für die Erzeugung elektrischer Energie in der Form von Generatoren im Einsatz sind, sondern auch in der Form von Motoren, wo sie elektrische Energie in Arbeit umwandeln. Somit finden sie immer häufiger Anwendung bei Komfortfunktionen im täglichen Leben und auch immer häufiger im Bereich des Individualverkehrs. Mit der Zeit haben sich unterschiedlichste Bauformen von Elektromotoren herausgebildet und finden in bestimmten Bereichen der Technik in den unterschiedlichsten Baugrößen ihre Anwendung. Allen Bauarten von Elektromotoren ist es gemein, dass es sich um Systeme handelt, in denen Ströme von stehenden Komponenten der Anlage auf rotierende Bauteile zu oder abgeleitet werden müssen. Während des Betriebs einer elektrischen Maschine, in der das System Schleifring und Schleifkohle verwendet werden, kommt es bedingt durch den Kontakt der beiden Komponenten und die hohen Umdrehungszahlen naturbedingt zum Verschleiß der beteiligten Komponenten. Schon nach kurzen Zeiträumen, erfolgt eine Schichtbildung im Kontaktbereich der Schleifkohle und des Schleifringes. Der Verschleiß ist hier nicht nur von physikalischen und chemischen Eigenschaften sowie von der Bauart und der Zusammensetzung der beteiligten Werkstoffe der Schleifkohlen und Schleifringe abhängig, sondern auch im hohen Maße von Betriebsbedingungen, unter denen der Einsatz stattfindet. Es herrscht in der Literatur der allgemeine Konsens, dass die Ausbildung einer Schicht im Kontaktbereich eine zentrale Rolle bei der Erreichung einer rentablen Lebensdauer und eines akzeptablen Wirkungsgrads eines Elektromotors oder eines Generators spielt. Die sich im Laufe des Betriebs aufbauende Schicht stellt eine neue chemisch modifizierte Oberfläche mit definierten tribologischen Eigenschaften dar. Die Eigenschaften, welche die Schicht aufweist und ob diese sich positiv oder negativ auf die Lebensdauer und die Leistung einer elektrischen Maschine auswirkt hängt von den Bedingungen des Betriebes, den Systemeigenschaften sowie die Umgebungsbedingungen ab. Schleifringe werden üblicherweise aus kupferbasierten Werkstoffen hergestellt. Im Allgemeinen vereinen Bronzen, wie z.B. CuSn8P, die geforderten Eigenschaften nach guter mechanischer, chemischer und thermischer Beständigkeit.

Elektrografit wird aufgrund der guten Schmierwirkung bei gleichzeitiger guter mechanischer Festigkeit, sehr guter elektrischer Leitfähigkeit und hoher chemischer Beständigkeit als Hauptkomponente für Kohlebürsten eingesetzt.

➤ Betriebsbedingungen:

Elektromotoren mit wenigen hundert bis mehreren tausend Umdrehungen stehen zur Verfügung. Aufgrund der immer weiter steigenden Anforderungen an Kompaktheit eines Motors bei gleichzeitiger Forderung nach höheren Leistungen und Energieeffizienz geht der Trend zu immer höheren Drehzahlen und Stromdichten.

Da der Aufbau einer Schicht im Schleifkontakt ein essenzielles Schlüsselement für die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit elektrischer Maschinen darstellt, sind Untersuchungen der Schichtbildung und deren Auswirkung beikommenden Anforderungen von großer Bedeutung.

➤ Umgebungsbedingungen:

Die umgebende Atmosphäre hat einen hohen Einfluss auf die Schichtbildung. Parameter, wie die Luftfeuchtigkeit, chemische Zusammensetzung der umgebenden Atmosphäre – z.B. hohe Salzgehalte im maritimen Bereich oder Streusalz im Winter machen Versuche unter kontrollierten Bedingungen unerlässlich um eine Funktionsfähigkeit über eine rentable Lebensdauer sicher zu stellen.

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Schichtbildung an der Oberfläche von Schleifringen bzw. Kommutatoren im Schleifkontakt mit handelsüblichen Kohlebürsten wie sie im Laufe des Betriebes eines Gleichstrommotors oder eines Generators entstehen zu untersuchen.

Zu diesem Zweck soll ein Schleifkontaktprüfstand realisiert werden, welcher die experimentelle Charakterisierung der Schichtbildung im Kontaktbereich zwischen den Schleifkohlen und dem Schleifring unter realitätsnahen und kontrollierten Betriebsbedingungen ermöglicht.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen der Einfluss bzw. die Auswirkung folgender festgelegter Einflussgrößen auf die Schichtbildung im Kontaktbereich zwischen Schleifkohlen und einem Schleifring und den darunterliegenden Werkstoff mittels eines bei AC²T konstruierten Versuchstandes auf Schleifringen, welche ebenfalls bei AC²T hergestellt wurden, gemeinsam in Kombination mit handelsüblichen Kohlebürsten erforscht werden:

- Tribologische Unterschiede zw. Salz-freier und Salz-haltiger Atmosphäre
- Variation der Stromstärke
- Gleitweg
- Konstante Umdrehungsgeschwindigkeit und konstante Last während der Versuche

Die Schichten sollen mit Analysemethoden wie Rasterelektronenmikroskopie (REM + EDX + FIB) und Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) hinsichtlich der chemischen und mechanischen Veränderungen der Werkstoffe im Bereich der Tribologischen Belastung untersucht und bewertet werden. Weiters soll die Auswirkung der Schichtbildung auf den Verschleiß der Werkstoffe, Reibkraftverläufe und der Spannungsabfall in Abhängigkeit der jeweiligen Bedingungen aufgezeigt und diskutiert werden.

2. LITERATUR

2.1. Zeitgeschichtliche Entwicklung der Elektrizität

Die Erforschung der Elektrizität und der mit ihr verbundenen Phänomene begann schon in der Zeit der alten Griechen als erste elektrische Phänomene in der Form von Wechselwirkungen zwischen Bernstein und Federn beobachtet und beschrieben wurden. Bis aber aus diesen Beobachtungen ein Konzept von elektrischen Ladungen sowie die Nutzung von Effekten, welche mit elektrischen Ladungen in Verbindung stehen sollten, entstanden, mussten noch einige hundert Jahre vergehen.

Im Jahre 1802 stellte der Italiener Gian Domenico Romagnosi in Experimenten fest, dass eine magnetische Nadel durch einen stromdurchflossenen Leiter aus ihrer Ruhelage abgelenkt wird. Die Entdeckung dieses Phänomens geriet aber in Vergessenheit und wurde von dem dänischen Physiker Hans Christian Oersted im Jahr 1820 erneut gemacht. Oersted leitete sowie Romagnosi einen Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus ab, wobei Oersted die mögliche Tragweite dieser Entdeckung erkannte und begann die Zusammenhänge weiter zu untersuchen. Kurz nach der Entdeckung von Oersted veröffentlichte der englische Naturforscher und Experimentalphysiker Michael Faraday seine Forschungsergebnisse über die elektromagnetische Rotation. Mit jenen beiden Entdeckungen wurde die Grundlage für die heutigen Elektromotoren gelegt. Im Jahr 1822 wurde einer der ersten Vorläufer eines Elektromotors von Peter Barlow in Form seines Barlow Rades erfunden. Es handelte sich um einen Homopolarmotor. Dies sind Motoren, welche mittels Gleichstroms eine Drehbewegung erzeugen.

Im Jahre 1834 entwickelte Herman Jacobi einen voll funktionsfähigen Gleichstromelektromotor welcher in Booten in verschiedenen Entwicklungsstufen zur Anwendung kam. In den USA wurde 1837 Thomas Davenport ein Patent für einen Kommutator Motor erteilt. Durch das Patent wurden die Grundlagen der elektrischen Motoren bekannt und zu anwendungstauglichen Arbeitsmaschinen weiterentwickelt. Die sogenannte Dynamomaschine - ein elektrischer Generator - wurde 1866 von Werner von Siemens als Patent angemeldet. Damit waren die Grundsteine für die heutigen Techniken, wie wir sie kennen, gelegt [1].

2.2. Schleifring und Kohlebürsten benötigende Systeme

Moderne elektrische Maschinen haben unabhängig von deren Einsatz als Generator oder als Motor die Gemeinsamkeit, dass Strom von Bauteilen mit zum Teil sehr hohen Drehzahlen aufstehende Bauteile übertragen werden muss. Aus diesem Grunde wurde schon sehr früh das System Schleifring und Kohlebürste entwickelt. Dadurch soll eine möglichst verlustfreie Stromübertragung gewährleistet werden. Aufgrund der guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften werden sehr häufig kupferbasierte Werkstoffe für die Schleifringe herangezogen wird. Der Hauptbestandteil von Kohlebürsten ist Grafit. Er stellt die elektrisch leitenden und schmierenden Eigenschaften der Kohlebürsten zur Verfügung. In Systemen, welche ohne Schleifkontakte auskommen, werden sehr leistungsstarke und kostspielige Magneten benötigt. Das macht Motoren welche Schleifkontakte nutzen trotz der Notwendigkeit eines Bürstentausches gegenüber anderen Systemen attraktiv und solche werden daher sehr häufig eingesetzt.

Elektromotoren bestehen im Wesentlichen aus einem feststehenden Bauteil dem sogenannten Stator, und einem rotierenden Teil welcher als Rotor bezeichnet wird. Da die Pole der Magnete für die Funktion des Motors umgepolt werden müssen, werden sogenannte Polwender, die auch als Kommutator bezeichnet werden eingesetzt. Der Strom wird durch Kohlebürsten auf den Kommutator übertragen. In Abbildung 1 ist als Beispiel für den prinzipiellen Aufbau eines Elektromotors ein Gleichstrommotor mit den gewendeten Polen nach einer halben Umdrehung dargestellt.

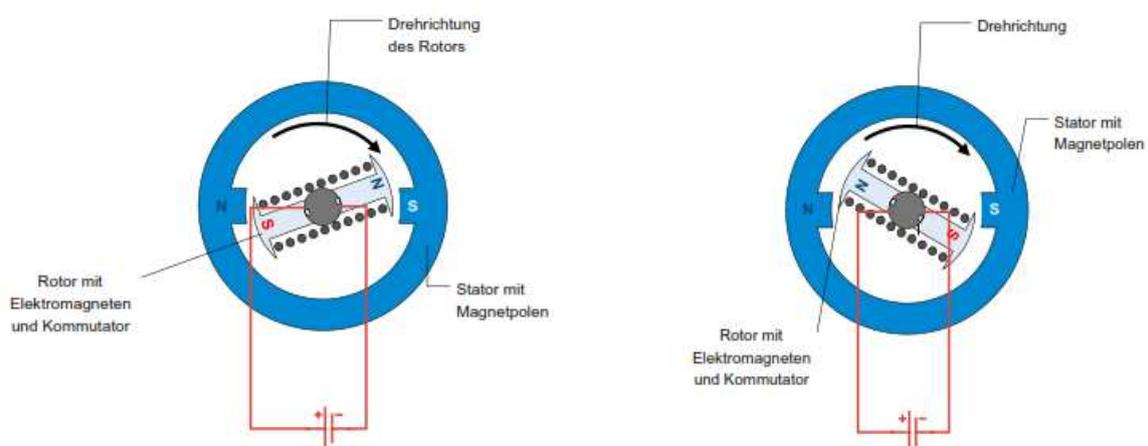


Abbildung 1: Funktionsprinzip des Gleichstrommotors [2]

Dem Drehstrommotor liegt dasselbe Funktionsprinzip wie dem Gleichstrommotor zugrunde. Der Unterschied besteht darin, dass das Magnetfeld nicht durch einen Polwender umgepolst wird, sondern, die Rotation des Magnetfeldes von Elektromagneten im Stator dafür herangezogen wird. Es werden im Stator mindestens drei Magnetspulen verbaut, wobei jede mit einer Phase des vom Netz kommenden Wechselstroms versorgt wird und welche 120° zueinander versetzt angeordnet werden. Dadurch wird ein Magnetfeld aufgebaut, welches mit der Netzfrequenz rotiert. Im Gegensatz zu Gleichstrommotoren kann der Rotor als Elektromagnet oder als Permanentmagnet ausgeführt werden. Der Vorteil eines Permanentmagneten als Rotor ist, dass keine Schleifkontakte zur Stromübertragung benötigt werden.

Der Nachteil solcher Systeme sind die hohen Kosten und die zum Teil unsichere Versorgung an Rohstoffen zur Herstellung von Magneten mit den benötigten Feldstärken. Aus diesem Grund werden Motoren, bei welchen das Magnetfeld am Rotor durch Elektromagneten erzeugt wird, für konventionelle Anwendungen häufig bevorzugt. Motoren mit Permanentmagneten werden im Falle der Mobilität nur im Hochpreissegment verbaut. Bei der Verwendung eines Elektromotors zur Energiegewinnung als Generator ist die Wahl des Systems sehr stark von den Einsatzbedingungen abhängig und muss für jedes Vorhaben neu entschieden werden [3].

2.3. Patinabildung auf Kupferwerkstoffen

Die Bildung einer Patina ist häufig Gegenstand von Untersuchungen bei der es um Korrosion bzw. Passivierung von Kupfer und Kupferwerkstoffen geht. A. Krätschmer et al. [4] führten XRD Analysen an Patinas von Kupferproben durch, welche 8 Jahre unterschiedlichen Umweltbedingungen im urbanen und ländlichen Bereich ausgesetzt waren. Aus den Analysen der Proben gingen unterschiedliche Bildungsrouten hervor, welche von der Belastung der Umwelt mit SO_2 und Chlorid in Zusammenhang stehen. Bei einer Umgebung mit viel SO_2 führte der Reaktionsweg von Cuprit (Cu_2O) über Posnjakit ($\text{CuSO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) zu Antlerit ($\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$), in Umgebungen mit einer hohen Konzentration an Chlorid bildete sich Atacamit ($\text{CuCl}(\text{OH})_3$). Es konnte gezeigt werden, dass bei allen Bildungsrouten die Bildung einer braunen bis schwarze Schicht aus Cu_2O voraus ging. Wohingegen CuO bekannt als Tenorit bei keinen der Proben aufzufinden war. Vergleichende Messungen der Schichten direkt auf dem Substrat mit Proben, welche vom Träger abgekratzt wurden, ergaben signifikante Unterschiede in den Zusammensetzungen. Krätschmer und sein Team vermuteten eine Umwandlung von Verbindungen durch die mechanische Belastung.

R. Picciochi et al. [5] setzten Bronzeplatten ein Jahr lang urbanen Umweltbedingungen aus. Zum Vergleich wurden im selben Zeitraum Bronzeplatten maritimen Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Die Forscher erhoben die SO_2 , NO_2 und die Cl^- -Konzentration an den Standorten und die Wetterdaten über den gesamten Zeitraum des Experimentes. Während des Zeitraumes wurde die Gewichtszunahme bzw.-abnahme in regelmäßigen Abständen bestimmt. Die Bronzeplatten in maritimer Umgebung zeigten höhere Korrosionsraten, was sich durch eine höhere Gewichtszunahme über den Messzeitraum zeigte. Die entstandenen Patinas zeigten im städtischen Bereich bräunlich bis grünliche Färbungen und bestanden hauptsächlich aus Oxiden und Sulfaten und hafteten fest an der Oberfläche und bildeten eine einheitliche Schicht. Die Patina im maritimen Bereich zeigte hingegen eine schlechte Haftung an der Oberfläche und eine bläulich bis grünliche Färbung die Hauptbestandteile wurden hier von Chloriden gebildet. Wie schon bei A. Krätschmer et al. [6] konnten Cuprite (Cu_2O) als Hauptkomponenten bei urbaner und maritimer Umgebung identifiziert werden. Im urbanen Bereich entstanden ebenso Sulfate wie Brochantit ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$), Posnjakit ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Im maritimen Bereich konnten hauptsächlich Chloride wie Atacamit ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) und Paratacamit ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) sowie Natriumchlorid identifiziert werden. Im Vergleich zu der Patina im städtischen Bereich zeigte die Patina im maritimen Bereich keine einheitliche Schicht mit Korrosionsprodukten an der Oberfläche, hier konnte Lochkorrosion beobachtet werden. K.P. Fitzgerald et al. [7] verglichen die Bildung von Patinas in verschiedenen Ländern. Das Erscheinungsbild der Patina zeigte sich in Abhängigkeit der jeweiligen Umweltbedingungen von bläulich bis schwarz. Die Forscher stellten, sowie auch A. Krätschmer [8], fest, dass sich auf allen Proben in einem ersten Schritt Cuprit an der Oberfläche des Kupfers bildete. Auf dieser Schicht wuchs eine Schicht aus Brochantit, welche ab einer Schichtdicke von ca. $5 \mu\text{m}$ die typische grüne Färbung ergab. Durch Analysen der Schichten mittels XRD sowie ICP konnte gezeigt werden, dass es durch einen Einbau von etwa 10w% Fe^{2+} in das Brochantitgitter zu einer braunen bis hin zu einer schwarzen Färbung der Patina kam. Weiters konnten Faktoren wie der pH-Wert des Regens, die Verweildauer der Wasserschicht an der Oberfläche des Kupfers sowie die Zufuhr an SO_2 für die Bildung einer Patina aus Brochantit identifiziert werden. Ein niedriger pH-Wert, starker Regen und kurze Trocknungszeiten erweisen sich hingegen als nachteilig. Ein Vergleich mit sehr alten Patinas aus den einzelnen Regionen (bis zu 150 Jahren) zeigte, dass Patinas erst ab einem gewissen Alter aufgrund der Porosität der Brochantitschicht zur Passivierung beitragen, da diese mit der Zeit abnimmt. Die eigentliche Passivierung wird durch die Bildung von Cu_2O erreicht.

2.4. Schichtbildung im Kontaktbereich der Schleifringe

Aufgrund der unterschiedlichen Einsatzgebiete von Schleifkontakten ist die Kenntnis der Auswirkung von Betriebsbedingungen auf die Lebensdauer und den Verschleiß von Kohlebürsten und Schleifringen von großer Bedeutung. Holm [9] konnte zeigen, dass der Bürstenverschleiß in drei unterschiedliche Anteile aufgeteilt werden kann: den rein mechanischen Verschleiß, den mechanischen Verschleiß, welcher durch Strom angetrieben wird und den rein elektrischen Verschleiß, der durch den Einfluss der Jouleschen Wärme hervorgerufen wird.

Holm [10] und Braunovic [11] teilten entstehende Kontaktpunkte in drei Kategorien ein. Die erste Kategorie – die a – Spots – sind solche, in denen festes Kupfer bzw. das Metall des Schleifringes bzw. des Kommutators in direktem Kontakt stehen. In der zweiten Kategorie steht flüssiges Metall mit der Kohlebürste in direktem Kontakt dieser wurde aufgrund der größeren Kontaktfläche als „major a – Spot“ bezeichnet. Die dritte Form der Kontakte wird als „b – Spot“ bezeichnet. Hier befindet sich die gebildete Oxidschicht mit der Kohlebürste in direktem Kontakt.

Die Unterteilung gilt als akzeptiert und gesichert. B. Fakhi und M. Dienwiebel [12] untersuchten den Einfluss der Schichtbildung auf die Lebensdauer von Gleichstrommotoren. Durch die Analyse mittels SEM und XPS, konnte gezeigt werden, dass eine Zunahme der Schichtdicke bei gleichzeitigem Anstieg des Kohlenstoffgehalts zu einem Versagen des Motors führte.

2.4.1. Einfluss der Anpresskraft

I. Yasar et al. [13] führten Untersuchungen zu den Auswirkungen der Anpresskräfte von Schleifkohlen gegen einen Schleifring aus Stahl auf den Spannungsverlauf und den Verlauf des Reibungskoeffizienten durch. Die Versuche zeigten bei geringen Anpresskräften einen hohen Reibungskoeffizienten als auch einen hohen Spannungsabfall. Die Forscher konnten dies auf eine instabile Kontaktsituation, welche zu Funkenbildung und zu der erschwerten Ausbildung einer Gleitschicht aufgrund des instabilen Kontaktes der Kohle mit dem Ring zurückführen. Bei der Erhöhung der Anpresskräfte durchlief der Reibungskoeffizient ein Minimum und stieg bei weiterer Erhöhung der Last wieder an. Der Spannungsabfall sank hingegen mit steigender Anpresskraft weiter ab. Das Minimum des COF führten die Forscher auf die Ausbildung einer raschen Schichtbildung und Gleichgewichtseinstellung zwischen Auf- und Abbau der Schicht

zurück, bei zu hohen Lasten konnte abrasiver Verschleiß festgestellt werden. Der Rückgang des Spannungsabfalls konnte auf die Verbesserung der Kontaktsituation zurückgeführt werden. Durch die Schichtbildung erhöht sich die Kontaktfläche und der Übergangswiderstand, welcher von vereinzelt Kontaktflächen erzeugt wird, wird verringert.

Es konnte gezeigt werden, dass der Reibungskoeffizient und der damit zusammenhängende Verschleiß der Bürste und des Rings ein Minimum durchläuft. Als der optimale Betriebszustand für das System ergab sich der Kreuzungspunkt des Minimums des Verlaufs des COF mit dem Verlauf des Spannungsabfalls. Die Abbildung 2 zeigt einen exemplarischen Verlauf des Verschleißes von Kohlebürsten in Abhängigkeit der Anpresskraft der Bürsten und der Strombelastung. Der Verschleiß wurde in die Teile des mechanischen und elektrischen Verschleißes aufgeschlüsselt. Im Schnittpunkt von mechanischem und elektrischem Verschleiß durchläuft der gesamte Verschleiß ein Minimum, welches den optimalen Anpressdruck der Kohlen kennzeichnet.

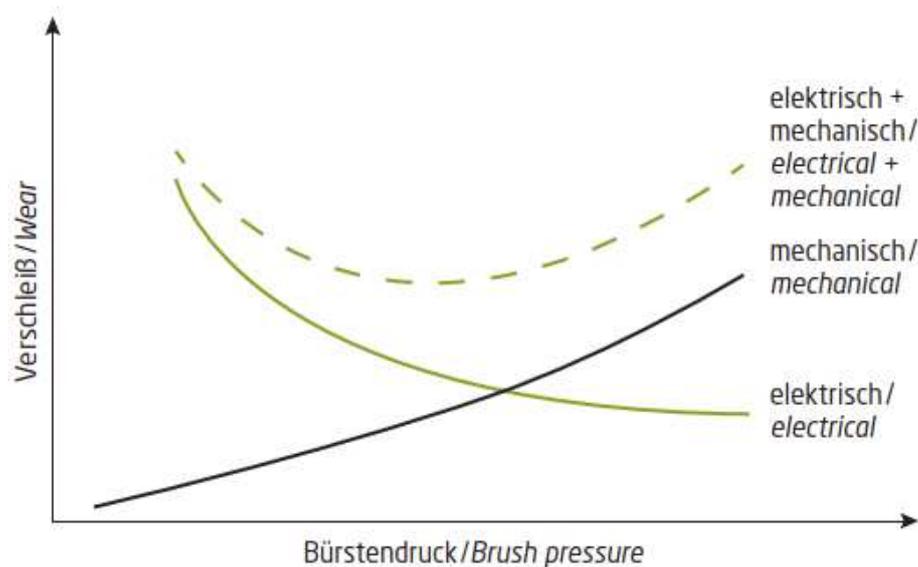


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung des mechanischen und elektrischen Verschleißes der Bürsten in Abhängigkeit der Anpresskraft der Bürsten [14].

2.4.2. Einfluss der Drehzahl und der Temperatur

Im Elektromotor kommt es durch die hohen Gleitgeschwindigkeiten und den elektrischen Strom zu einer Erhöhung der Temperatur im Kontakt zwischen Kohlebürsten und Schleifring und somit auch zu einem Verschleiß und einem Materialübertrag von den Kohlebürsten auf den Schleifkontakt. H. Zhao, G.C. Barber J. Liu [15] führten Experimente bei verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten und bei verschiedenen Stromstärken an Kohlebürsten durch.

Bei ihren Experimenten verwendeten H. Zhao, G.C. Barber J. Liu Bürsten aus Pantografen Material, welches aus 97 % Graphit und 3 % Kupfer bestand. Die von ihnen verwendeten Schleifringe bestanden aus 1045 Stahl. In einem ersten Experiment hielten sie die Geschwindigkeit des Schleifringes konstant und variierten die Anpresskräfte. Bei steigender Anpresskraft zeigte sich ein Abfall des Reibungskoeffizienten. Im zweiten Experiment ermittelten sie die Verschleißraten bei ausgewählten Lasten und Gleitgeschwindigkeiten. Der Vergleich der Verschleißraten zeigte einen proportionalen Anstieg mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit und Last. So konnte gezeigt werden, dass die Verschleißrate bei Abwesenheit von elektrischem Strom der Gleichung von Archer gehorcht. Damit konnte sie die Ergebnisse von Moshkin [16] et.al bestätigen.

Diese Zusammenhänge konnten jedoch in der Gegenwart eines elektrischen Stromes nicht mehr aufgezeigt werden. W.J. Spry et al. [17] konnten in ihren Experimenten die Temperaturabhängigkeit der Bildung von Cu_2O von der Bulktemperatur von Schleifringen bzw. Kommutatoren aufzeigen. In Verbindung mit einem Stromfluss konnte eine Oxidation bei der Anwesenheit von Feuchtigkeit und eines elektrischen Feldes nachgewiesen werden.

2.4.3. Einfluss der Stromdichte und Spannungsabfall

T.A. Dow et al. [18][19] stellten bei ihren Experimenten fest, dass zur Übertragung der aufgetragenen Stromdichte nur ein kleiner Anteil der Kontaktflächen zur Übertragung des Stromes von der Kohlebürste auf den Schleifring zur Verfügung steht. Bei hohen Gleitgeschwindigkeiten und hohen Strömen kommt es zu einem raschen Temperaturanstieg an den Kontaktstellen, was zu einer thermischen Schwächung des Werkstoffs und einen erhöhten Verschleiß im Kontakt führt. Als Ursache des Verschleißes konnte bei einer stationären Filmbildung der Abrieb des Gegenkörpers im Kontaktbereich zwischen Kohlebürste und Schleifringoberfläche identifiziert werden. Dieser wurde durch die thermische Ermüdung des Schleifringwerkstoffes hervorgerufen. In Experimenten konnte gezeigt werden, dass bei

steigenden Stromstärken und der daraus ansteigenden Temperaturen der Verschleiß der Oberflächenrauheit des Schleifringes verstärkt wurde.

Hohe Temperaturen im Kontaktbereich zwischen Schleifkohlen und Schleifringen führen zu lokalen thermischen Ausdehnungen in diesen Kontaktbereichen. Durch die thermische Ausdehnung kommt es in den angrenzenden Zonen zu einer Aufwölbung der Schleifringoberfläche, wodurch wiederum Kontaktpunkte generiert werden. Durch die zusätzlichen Kontaktpunkte wird verstärkt elektrische Wärme und Reibungswärme im Kontakt generiert, was zu einer Erhöhung der Reibkräfte im Kontaktbereich führt. Die Erhöhung der Reibkräfte führt schlussendlich zur Ablösung der Aufwölbungen im Kontakt.

Bedingt durch das Ablösen der aufgewölbten Oberfläche müssen die auftretenden Lasten durch die angrenzenden Zonen aufgenommen werden. Dies führt erneut zu einer thermischen Instabilität, wodurch von Neuem Aufwölbungen gebildet werden. Die so abgelösten Partikel führen zu einem erhöhten Verschleiß der Kohlebürsten und zu einem Anstieg der Oberflächenrauigkeit des Gegenkörpers.

Versuche von Ueno et al. [20][21] zum Einfluss der Stromdichte auf Schleifbürsten und Kommutator zeigen nach dem Start des Versuches einen raschen Anstieg des Spannungsabfalls und einen raschen Aufbau einer Schicht im Kontaktbereich. Es zeigt sich eine direkt proportionale Abhängigkeit der Bildungsgeschwindigkeit einer Oxidschicht von der aufgetragenen Stromdichte. Weiter zeigt sich bei steigenden Stromdichten eine Sättigung des Spannungsabfalls und die Einstellung des Reibungskoeffizienten bei einem konstanten Wert.

Bei der Erhöhung der Stromdichte kommt es zu einer verstärkten Ausprägung des Effektes. Die Einstellung der Sättigung von Spannungsabfall und des Reibungskoeffizienten steht somit im direkten Zusammenhang mit der Ausbildung der Oxidschicht im Kontaktbereich. Durch eine rasche Ausbildung einer Oxidschicht im Kontakt ergibt sich eine Erhöhung des Übergangswiderstands. Nimmt der Übergangswiderstand im Kontakt ein bestimmtes Ausmaß an kommt es bei steigenden Stromstärken zu einer entsprechenden Temperaturentwicklung. Erreicht die Temperatur den Erweichungspunkt des Werkstoffes des Schleifringes, kommt es zu einer teilweisen Ausweitung der Kontaktfläche zwischen Bürsten und Metall und gleichzeitig zum teilweisen Abbau der Schicht an der Oberfläche des rotierenden Gegenkörpers. Bei konstanter Stromdichte stellte sich ein Gleichgewicht zwischen Auf und Abbau der Schicht ein was sich im Messsignal als konstanter Verlauf des Reibungskoeffizienten und des Spannungsabfalls im Kontakt zeigt. In weiteren Experimenten ergab sich bei einer weiteren Steigerung der Stromdichte ein weiterer Anstieg des Verschleißes von Kohlen und Schleifring. Die Erhöhung

der Stromstärke führt aufgrund des Übergangswiderstandes im Kontakt zu der zusätzlichen Entstehung von Wärme im Kontakt. Bei entsprechend hohen Temperaturen ist die Möglichkeit zur Ausbildung einer Wassermonolage an der Oberfläche der Schleifkohlen nicht mehr gegeben. Der Verlust des Wassers an der Kontaktzone führt zu einer erhöhten Verschleißrate und einem Anstieg des Reibungskoeffizienten. Im Allgemeinen konnte bei einem Anstieg der Stromdichte ebenfalls ein gleichzeitiger Anstieg des Reibungskoeffizienten beobachtet werden. Da der Verschleiß der Systemkomponenten noch von einer Vielzahl an weiteren Faktoren wie der Zusammensetzung der Kohlebürsten, den Anpresskräfte der Kohlen, den Relativgeschwindigkeiten zwischen Schleifring und Kohlen usw. abhängen, ist die Auswirkung der Stromstärke auf die Schichtbildung und auf Verschleiß und Reibkräfte nur ein Teil vieler komplexer Zusammenhänge.

Myshkin und Konchits [22] führten Untersuchungen zur Stromdichte an Bürsten mit unterschiedlichen Anteilen an Metall im Bürstenmaterial durch. Die Versuche zeigten bei Bürsten mit niedrigem Metallgehalt und hohen Stromdichten niedrige Reibkräfte. Dieser Effekt wird als „current lubrication“ bezeichnet. Dieser Effekt zeigte sich bei Kohlebürsten mit hohen Anteilen an Metall erst ab sehr hohen Stromdichten und bei frischen und nicht eingefahrenen Oberflächen im Kontaktbereich. Aufgrund der vielseitigen Einflussfaktoren konnte der Mechanismus nicht eindeutig geklärt werden.

2.4.4. Atmosphäre und Luftfeuchtigkeit

1958 führte W. Davies [23] Experimente zu der Auswirkung der umgebenden Atmosphäre auf das System Schleifring–Schleifkohle durch. Bei Experimenten mit unterschiedlichen O_2 Partialdrücken konnten sie bei steigendem Partialdrucks des Sauerstoffes in der Testkammer ein Absinken des Reibungskoeffizienten feststellen. Als Grund für den Abfall des Reibungskoeffizienten während der Versuche erwies sich laut Davies und seinem Team die Adsorption von Sauerstoff an der Oberfläche der Schleifkohlen. Die Adsorption von Sauerstoff führt zu einer Schwächung der Valenzkräfte zwischen den Grafitkristalliten, was wiederum zu einem Abfall der Reibungskräfte führt. Die Erhöhung des Partialdrucks von O_2 auf 2 mmHg führte zu einer dickeren Schicht an der positiven bzw. stromlosen Bürste, was einen Abfall der Reibungskräfte bei einem gleichzeitigen Anstieg des Übergangswiderstandes zur Folge hatte wobei die Änderungen an der positiven Bürste eher gering ausfielen. An der negativen Bürste konnte eine viel deutliche Änderung des Übergangswiderstandes mit der Steigerung des O_2

Partialdrucks festgestellt werden. Davies und sein Team führte dieses Phänomen auf die Bildung von fadenförmigen Koheränzbrücken aus Kupfer zurück, welche von Holm [24] und von Braunovic [25] als „ordinary a-Spot“ bezeichnet wurden zurück.

Kohärenzbrücken bilden sich bei der thermischen Zersetzung der Oxide in den Kontaktpunkten und besitzen bei ihrer Entstehung eine Temperatur knapp am Schmelzpunkt des Kommutators bzw. Schleifringmaterials und ermöglichen einen direkten Kontakt von Metall und Kohlebürsten. Nach kurzer Zeit erfolgt eine Neubildung der Oxidschicht, wobei als gesichert gilt, dass das bei hohen Temperaturen gebildete Oxid andere Eigenschaften in Bezug auf Schmierwirkung und Leitfähigkeit aufweist als das Oxid, welches das bei niederen Temperaturen gebildet wurde.

Damit ergibt sich ein direkter Einfluss des Sauerstoffpartialdruckes auf die Schichtbildung und somit einen direkten Einfluss auf den Reibungskoeffizienten. Ueno und Sawa [26] führten Versuche zum Schichtaufbau an Kommutatoren bei Atmosphärendruck und bei Drücken zwischen 0,02 und 1000 Pa durch. Im Fall geringerer Drücke ergab sich ein starker Rückgang der Schichtbildung an der Oberfläche des Kommutators. Wie auch bei Davies zeigte der niedere Partialdruck des Sauerstoffs einen großen Einfluss auf die Schichtbildung und einen erhöhten Verschleiß des Kommutators und der Bürsten aufgrund der fehlenden Schmierwirkung der Oxidschicht.

In weiterführenden Experimenten untersuchten Ueno und Sawa den Einfluss der Atmosphäre auf den Spannungsabfall bei Dreiecksspannungen unterschiedlicher Frequenzen [27]. Bei den Experimenten mit höheren Umgebungsdrücken und höheren Frequenzen stellten sich tendenziell höhere Spannungsabfälle als bei geringen Umgebungsdrücken und niederen Frequenzen heraus.

Weiters ergab sich wie in den Experimenten zuvor ein Zusammenhang der Oxidschichtdicke vom Sauerstoffpartialdruck und dem Spannungsabfall im Kontakt. Bei geringen Drücken zeigte sich im Experiment ein zunehmend linearer Verlauf der Stromdichte Spannungskurven.

Die auf der Oberfläche des Schleifringes entstandene Schicht setzte sich ausschließlich aus den Komponenten der Kohlebürsten zusammen. Mit Hilfe der Experimente konnte gezeigt werden, dass der lineare Verlauf einer Stromdichte Spannungskurve auf das Fehlen einer Oxidschicht und des von ihm hervorgerufenen Spannungsabfall bzw. Übergangswiderstandes verursacht wird. Durch das Fehlen der Schicht kann nur der Einschnürungswiderstand im Kontaktbereich für den Übergangswiderstand verantwortlich sein.

Dies steht ganz im Gegensatz zum Verlauf der Kurven bei höherem Drücken bei denen ein großer Spannungsabfall und eine Sättigung der Kurve bei steigender Stromdichte festgestellt werden konnte. Bei geringerer Frequenz kommt es zu höheren Temperaturen im Kontakt und

damit zu der Ausweitung der Kontaktfläche und zu einer Verringerung des Einschnürungswiderstandes, was zu einem geringeren Spannungsabfall bei geringeren Frequenzen und niederen Drücken führt. Bei hohem Druck und hohen Frequenzen des Stroms kommt es zu einem hohen Abfall der Spannung bei steigender Stromstärke, wobei die Kurve in eine Sättigung läuft. Die Schicht an der Oberfläche des Kommutators bzw. Schleifringes wird bei steigenden Stromdichte und der damit verbundenen Temperaturerhöhung durchbrochen und nach kurzer Zeit wieder neu gebildet. Nach einiger Zeit kommt es zu einer Gleichgewichtseinstellung zwischen dem Aufbau und dem Abbau der Schicht und zu einer konstanten Schichtdicke an der Kommutator Oberfläche bzw. eines Schleifringes.

Als weiterer wesentlicher Einflussparameter auf die Schichtbildung erwies sich die relative Luftfeuchtigkeit. Als gesichert gilt, dass die Schicht am Kommutator Gleiteigenschaften aufweist, welche von der umgebenden Luftfeuchtigkeit abhängen. Bei zu hohen Temperaturen im Kontakt kann keine schmierende Wirkung durch Feuchtigkeit mehr sichergestellt werden was in einer erhöhten Verschleißrate resultierte. Lancaster et al. [28][29] führten Versuche bei unterschiedlichen Luftfeuchten durch und konnten einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt in der Umgebungsluft auf den Verlauf der Reibkraft feststellen. Bei Versuchen mit 10 % Luftfeuchte im Vergleich zu Versuchen bei 50 % Luftfeuchtigkeit, zeigte sich bei 10 % Luftfeuchte eine 2-mal so hohe Reibkraft als bei den Versuchen mit 50 % Luftfeuchte. Z.L. Hu et al. [30] konnten feststellen, dass sich bei einer Luftfeuchtigkeit von 10 % kein bzw. nur wenig Kupferoxid im Vergleich zu 50 % Luftfeuchtigkeit bildete. Z.L. Hu und sein Team leiteten einen möglichen Mechanismus zur Ausbildung von Cu_2O in der Schicht am Kommutator ab bei welchen der Wasserfilm als Katalysator bei der Bildung des Cu_2O fungiert. Aufgrund der Selbstdissoziation des Wassers, welches sich an der Oberfläche der Bürsten befindet, kommt es bei der Anwesenheit von Strom bei einem entsprechendem Potential zu einer Sauerstoffbildung im Kontaktbereich, wodurch zusätzlich zum Sauerstoff aus der Atmosphäre Sauerstoff zur Oxidation im Kontakt zur Verfügung steht und Cu zu Cu_2O oxidiert werden kann. Bei Abwesenheit von Wasser bzw. geringer Luftfeuchtigkeit konnte keine Oxidation zu Cu_2O festgestellt werden. Die Abwesenheit von Cu_2O führte zu einem höheren Verschleiß der Bürsten und des Kommutators.

3. APPARATUREN

3.1. Allgemeiner Aufbau des Prüfstandes

Die Komplexität der Zusammenhänge zwischen Betriebsbedingungen und dem Schichtaufbau im Kontaktbereich von Schleifringen und Schleifkohlen, macht es notwendig die Testbedingungen steuern und gleichzeitig überwachen zu können.

Zu diesem Zweck wurde eine Anlage angelehnt an die Anlage von H. Zhao et al. [31][32] gebaut, bei der eine Kontrolle und Messung der Anpresskräfte der Kohlen, Drehzahl des Schleifringes, Stromstärke und Luftfeuchtigkeit möglich war. Ebenso konnten auftretenden Reibkräfte und Spannungsabfälle im Kontakt gemessen werden. Zum Zweck der Atmosphärenkontrolle und einer Simulation einer maritimen Umgebung wurde der Aufbau in einen Schaltschrank aus Edelstahl mit entsprechenden Zu- und Ableitungen untergebracht. Abbildung 3 zeigt ein Schema des Versuchsaufbaus.

Der Schleifring, welcher die Probe auf deren Oberfläche die Spuren der Schleifkohlen erzeugt werden, befindet sich im Zentrum der Messkammer. Links und rechts von der Probe befinden sich die Schleifkohlen. Eine Kombination aus Kraftmessarmen und Bürstenhaltern mit integrierter Druckfeder können die Kohlen innerhalb eines bestimmten Kraftbereiches an die Oberfläche des Schleifringes angedrückt werden. Mit Hilfe eines Antriebes wird der Schleifring auf eine bestimmte Drehzahl gebracht wodurch im Kontaktbereich zwischen Kohlen und Ring die zu untersuchenden Spuren gebildet werden. Mit Hilfe einer Spannungsquelle und Lastwiderständen können innerhalb bestimmter Leistungsgrenzen unterschiedliche Stromstärken durch die Kontakte geführt werden.

Auf den genauen Aufbau und auf die Funktion der einzelnen Komponenten wird in den nachfolgenden Punkten näher eingegangen.

(c) und (d) gezeigt wird, herangezogen. Auf die genaue Beschreibung der Probenkörper wird im Punkt 3.1.2 eingegangen.



Abbildung 4: Gegenüberstellung industriell gefertigter Schleifring (a) Industriell gefertigter Schleifring in der Seitenansicht, (b) Schleifring mit Kontakten zu den jeweiligen Ringen. (c) Querschnitt durch Ring mit eingebetteten Kontakten, (d) mit Ring verlöteter Kontakt im Querschnitt.

3.1.2. Beschreibung der Schleifringe

Als Vorlage für die Prüfkörper dienten die Schleifringe wie sie in mehreren konventionellen Anwendungen vorzufinden und in Abbildung 4 dargestellt sind. Die als Vorlage dienenden Schleifringe wiesen einen inneren Durchmesser von 32,5 mm und einen äußeren Durchmesser von 35,05 mm auf.

Die Probenkörpern wurden gemäß der Konstruktionszeichnung in Abbildung 5 angefertigt.

Die Probenkörper wurden mit einem äußeren Durchmesser von 39,5 mm und einem inneren Durchmesser von 28 mm gefertigt.

Bild (a) zeigt den Prüfkörper in der Frontansicht. Für die Länge der Prüfkörper wurde eine Länge von 40 mm vorgesehen, um genügend Raum für Messungen mit seitlich versetzten Kohlebürsten

ermöglichen zu können und um gegebenen falls Unterschiede, an der positiv bzw. negativ geladenen Bürste und deren Spuren an der Probenoberfläche getrennt untersuchen zu können. Am hinteren Ende des Prüfkörpers wurde eine Nut mit einem Radius von 1,5 mm eingearbeitet. Sie dient zur Führung eines Schleifdrahtes, über welchen der Spannungsabfall direkt am Schleifkontakt gemessen wird. Es wurde ein runder Grund gewählt um hohe Stromdichten wie an einer scharfen Kerbe und Spannungen im Probenkörper vorzubeugen. Auf einer Höhe von 18,9 mm wurde eine Nut mit der Breite von 16,7 mm und 3 mm Tiefe eingearbeitet. Die Nut dient dazu, den Stromfluss von einer Bürste durch den Schleifring zu der anderen Bürste zu treiben und somit Effekte an den Kanten der Bürsten zu minimieren. Eine weitere Funktion stellt der Schutz der Kohlebürste vor dem Draht zur Messung des Spannungsabfalls dar. Springt der Draht aus der Führung rutscht dieser in die Vertiefung und verhindert somit einen größeren Schaden an der Schleifkohle und der Spur.

Die exakten Abmessungen und Lage der Vertiefungen werden in der Abbildung 5 der Bilderserie (a) bis (c) dargestellt. Im Bild (c) wird der Querschnitt des Probenkörpers gezeigt. Der Innendurchmesser wurde auf 28 mm festgelegt.

Diese Abmessung ergibt sich aufgrund, der schon im Punkt 3.1.4 beschriebenen Notwendigkeit zur elektrischen und galvanischen Trennung von Probenkörper und Welle durch eine eingepresste Lagerbuchse aus Kunststoff.

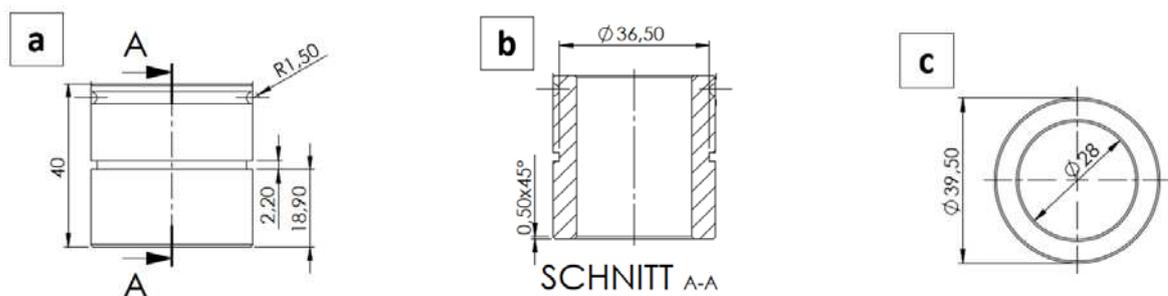


Abbildung 5: Konstruktionszeichnung der Schleifringe (a) Aufriss, (b) Querschnitt, (c) Draufsicht

3.1.1. Eigenschaften und Herstellung von Kohlebürsten

Die Hauptkomponente, aus denen Kohlebürsten hergestellt werden, wird aus Grafit gebildet. Die chemische Struktur von Grafit ermöglicht eine gute Schmierwirkung bei gleichzeitiger hoher mechanischer Festigkeit, sehr guter elektrischer Leitfähigkeit und hoher chemischer Beständigkeit.

In der Modifikation des Grafit kristallisiert der Kohlenstoff in Schichtstruktur. Innerhalb der Schichten sind die Kohlenstoffatome über kovalente Bindungen in Form von Sechsecken miteinander verbunden, wodurch ein Elektron der vier Valenzelektronen zur Ausbildung von π -Bindungen zur Verfügung steht was zu einer hohen elektrischen Leitfähigkeit innerhalb dieser Schichten führt. Die Schichten sind im Grafit durch Vander Waals Kräfte untereinander verbunden, wodurch eine leichte Trennung der Schichten voneinander ermöglicht wird [33].

Zusätzlich zu der guten elektrischen Leitfähigkeit weist Grafit eine sehr gute thermische Leitfähigkeit, chemische und thermische Beständigkeit bei einer sehr guten mechanischen Festigkeit auf. Je nach Hersteller werden unterschiedlichste Quellen zur Erzeugung des Grafit herangezogen. Es besteht die Möglichkeit den Rohstoff Grafit durch Einkauf aus verschiedenen Quellen, und mit unterschiedlichen Qualitäten auf dem Weltmarkt zu erwerben. Alternativ kann synthetischer Grafit kohlenstoffhaltigen Quellen, wie kalziniertem Petrolkoks und Steinkohleteer während der Bürstenherstellung generiert werden.

Kohlebürsten sind Sinterwerkstoffe und werden somit über eine „pulvermetallurgische“ Route hergestellt.

In einem ersten Schritt werden die benötigten Rohstoffe zerkleinert und der dabei entstehende Staub über eine Absaugung entfernt. Die zerkleinerten Rohstoffe werden in weiteren Schritten gemischt weiter zerkleinert, gemahlen und gesiebt bis die gewünschte Korngrößenverteilung erreicht wird. Durch die Einstellung der Korngrößenverteilung ist es möglich die gewünschte Qualität des entstehenden Grafit zu erreichen.

Im nächsten Schritt wird das so gewonnene Pulver über isostatisches Pressen zu einem Grünling weiterverarbeitet.

In weiterer Folge wird der gefertigte Grünling in einem Ofen gebacken. in diesem Schritt wird durch ein spezielles Temperaturprogramm der Teer in einen festen „Kohlenstoffbinder“ umgewandelt. Dieser Prozess kann je nach Verfahren und Produkt ein bis zwei Monate dauern.

Nach dem Backen folgt der Schritt der Grafitisierung. Hier wird der entstandene Kohlenstoffblock unter Luftabschluss auf eine Temperatur von ca. 3000 °C aufgeheizt, wodurch aus dem amorphen Kohlenstoff durch Rekristallisation bei der Abkühlung der Grafit bildet. In Abbildung 6 wird die Kette des Herstellungsprozesses dargestellt. Im Laufe des Prozesses werden von den Herstellern je nach Anforderung an die Kohlebürsten Zusätze, wie z.B. Metalle, zugegeben oder es erfolgt die Imprägnierung mit Metallsalzen, um die Lebensdauer der Bürsten und des Schleifringes zu verlängern. Die genaue Zusammensetzung und in welcher Stufe der Fertigung die Zuschläge eingebracht werden ist das Know-how der Hersteller [34].

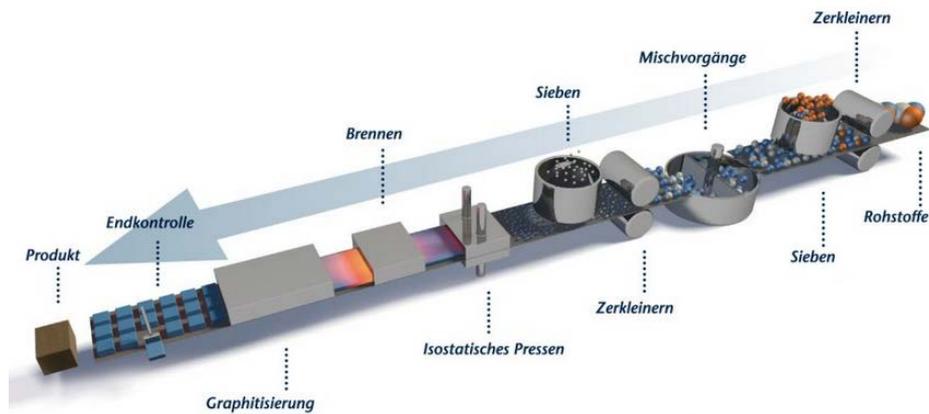


Abbildung 6: Fertigungslinie zur Herstellung des Grafits für die Kohlebürstenherstellung [35].

3.1.2. Beschreibung der Kohlebürsten

Abbildung 7 (a) zeigt exemplarisch eine Kohlebürste in der Seitenansicht mit den für diesen Kohlentyp entsprechenden Dimensionen. Die Kohlen wurden vom Hersteller auf den gewünschten Radius eingeschliffen. Bild (b) zeigt eine Stereomikroskopische Aufnahme der Kontaktfläche ebenfalls mit den entsprechenden Dimensionen. Die Rauheit der Kontaktfläche sorgt für einen verbesserten Kontakt bis zum mit dem Schleifkontakt bis zum Aufbau einer Gleitschicht. Der Schleifkontakt weist ebenfalls aus diesem Grund ein entsprechendes Rauheitsprofil auf. Welche Rauheitsprofile kombiniert werden wird empirisch ermittelt und stellt das Wissen der Hersteller dar.

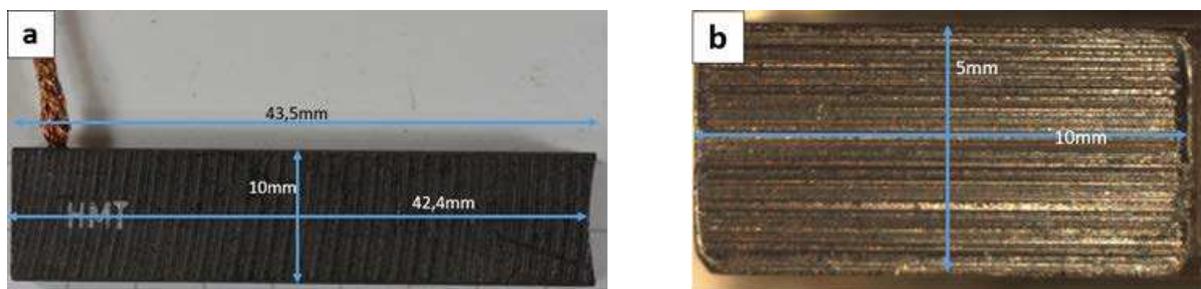


Abbildung 7: (a) Seitenansicht der Kohle mit entsprechenden Abmessungen. (b) Darstellung der eingeschliffene Kontaktfläche der Kohle mit den entsprechenden Abmessungen.

3.1.3. Der Antrieb des Schleifrings

Um eine realitätsnahe Nachstellung der Drehzahlen in modernen Elektromotoren und Generatoren mit Schleifring - Kohlebürstensystemen gewährleisten zu können wurde eine mit Wasser gekühlte Spindel von „Mechatron“ vom Typ HFS-8022 welche zwischen 4000 und 24000 U/min konstante Drehzahlen der Welle bei einer Nennleistung von 2.2 kW gewährleisten kann, ausgewählt. Dadurch sind bei der gewählten Probengröße, wie sie im Punkt 0 beschrieben wurde Mantelgeschwindigkeiten von bis zu 48 m/s erreichbar. In Bild (a) der Abbildung 8 ist die auf dem Rahmen befestigte Spindel samt der notwendigen Flüssigkeitskühlung dargestellt. Im Bild (b) ist die Spindel in ihrer Position an der Rückseite der Messkammer dargestellt. Durch die Installation der Spindel außerhalb der Testkammer kann ein korrosiver Angriff des Motors verhindert und eine Flexibilität, in der Wahl der Spindel in Bezug auf deren Leistungsfähigkeit gesichert werden.

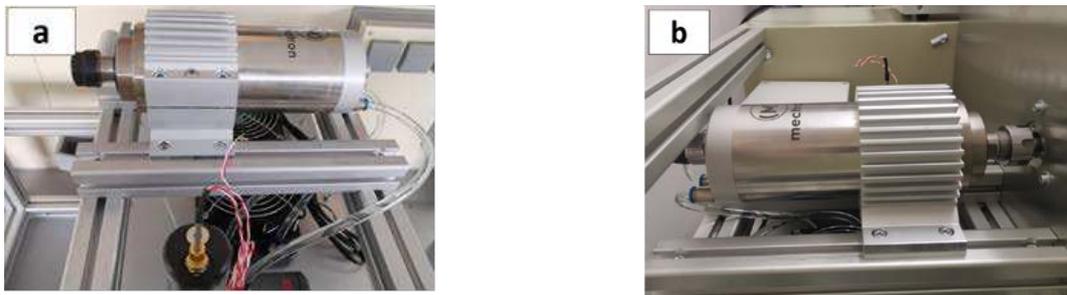


Abbildung 8: Antrieb an der Rückseite der Kammer: (a) auf Rahmen montierte Spindel mit Flüssigkeitskühlung, (b) Spindel an Rückseite der Messkammer.

In Abbildung 9 wird eine technische Zeichnung des Herstellers der Spindel gemeinsam mit den Anschlüssen für den Strom und mit der Spannzange der Spindel gezeigt. Daraus wird ersichtlich, dass nicht nur aus Gründen des Korrosionsschutzes, sondern auch aufgrund der Dimensionen der Spindel eine Positionierung außerhalb der Messkammer aus konstruktiver Sicht notwendig ist.

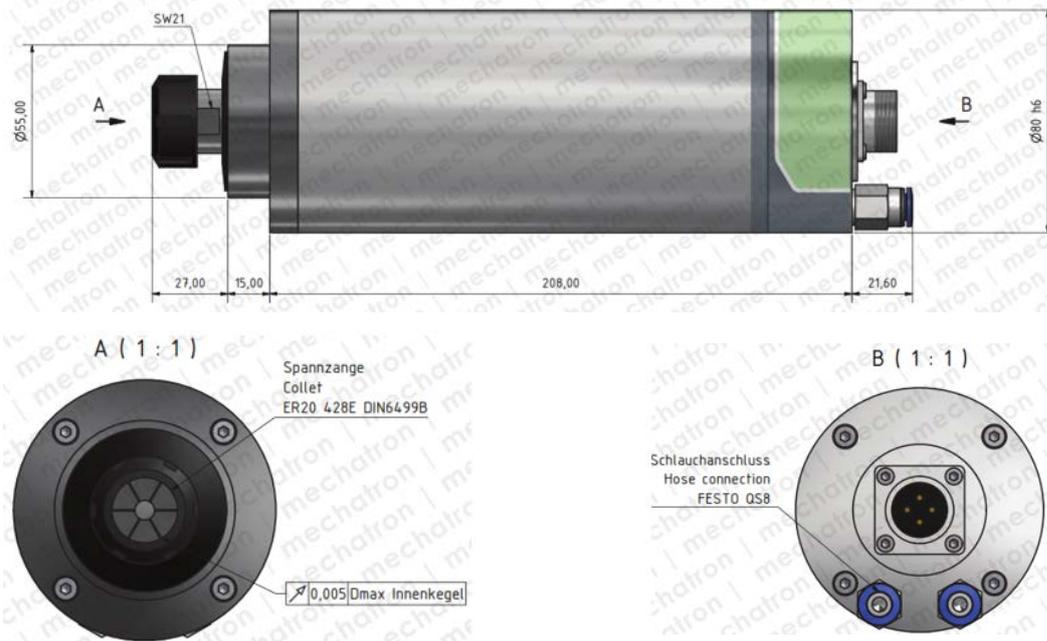


Abbildung 9: Technische Darstellung des Antriebes für den Schleifkontakt mit den entsprechenden Anschlüssen für Strom und Wasserkühlung [36].

3.1.4. Montage der Schleifringe

Der außerhalb der Kammer liegende Antrieb verfügt über ein Präzisionsspannfutter. An der Rückwand der Testkammer befindet sich ein Rollenlager was von einer Abdeckplatte vor Medien wie Salzwasser geschützt wird. Die Welle wird mit ihrem hinteren Teil Durch eine Öffnung in der Abdeckplatte in das Lager eingesetzt und außerhalb der Kammer über das Präzisionsspannfutter mit dem Antrieb verbunden. In der Bildserie der Abbildung 10 (a) bis (f) sind die einzelnen Komponenten, welche zum Einbau der Welle benötigt werden, sowie die Welle selbst im Detail dargestellt. In den Bildern (a) bis (c) der Abbildung 11 wird die Einbausituation der Probe gezeigt. Der breitere Teil der Welle ragt in die Messkammer, auf welche die eigentliche Probe in Form des Schleifringes gesteckt und mittels der Zentrierplatte fixiert wird.

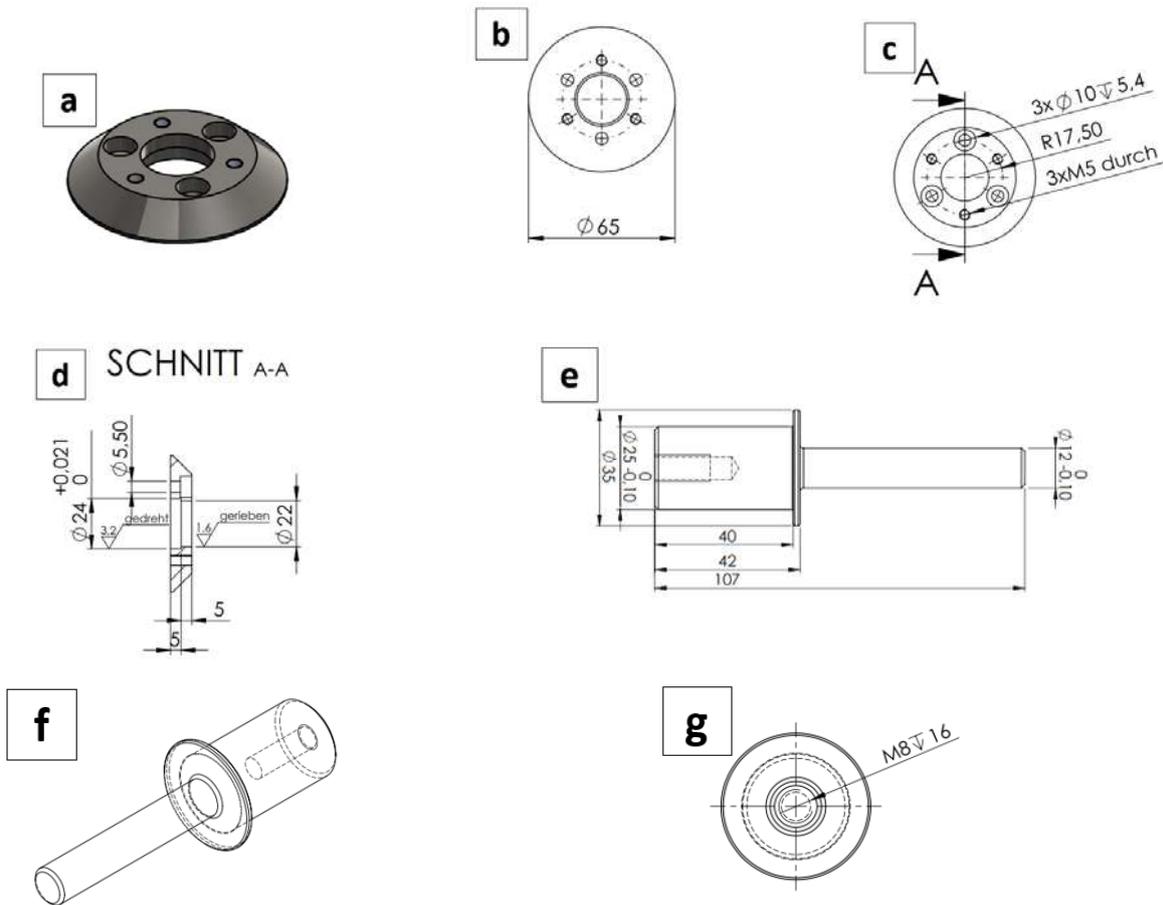


Abbildung 10: (a) Skizze der Abdeckplatte; (b) – (d) Konstruktionszeichnungen der Abdeckplatte; (e) – (f) Konstruktionszeichnung der Welle; (g) Konstruktionszeichnung der Zentrierplatte.

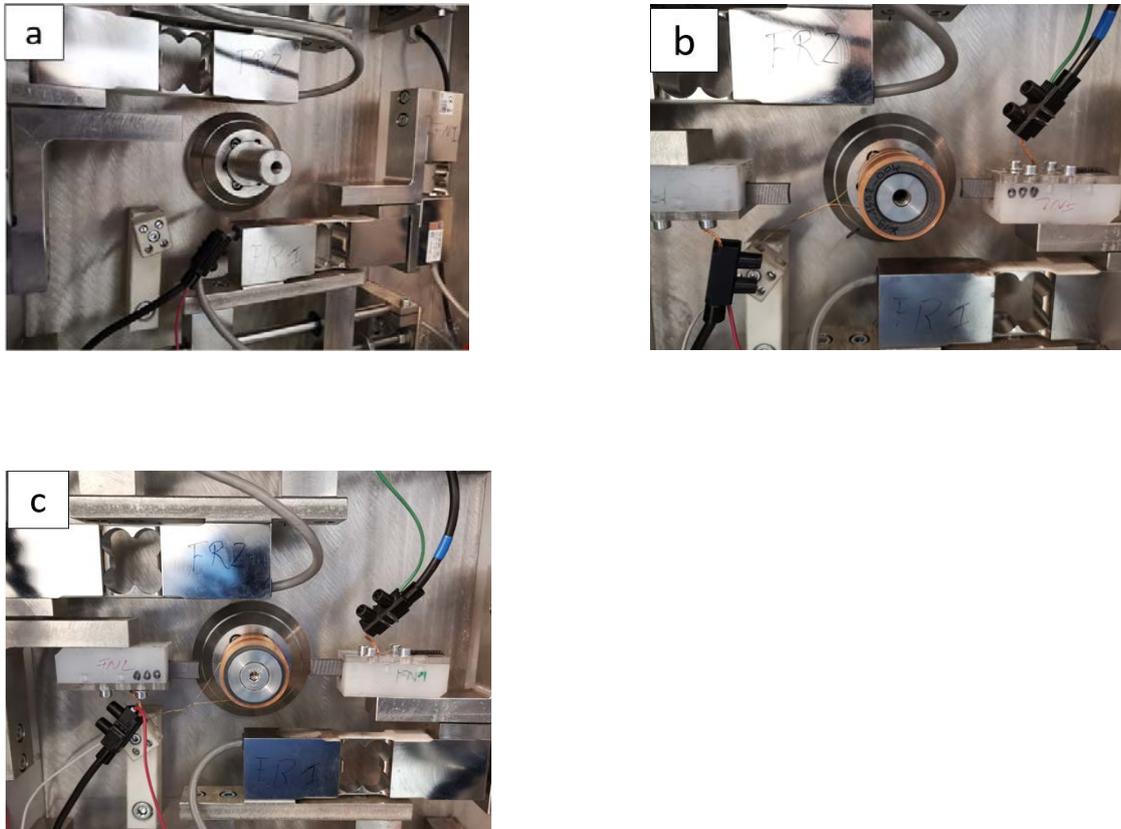


Abbildung 11: (a) Welle im Inneren der Testkammer; (b) auf Welle aufgesteckter Schleifring vor Installation der Zentrierplatte, (c) vollständig eingebaute Probe mit Deckplatte und mit flankierenden Kohlebürsten.

3.1.5. Montage der Kohlebürsten

In den Bildern (a) bis (d) der Abbildung 12 sind die Konstruktionszeichnungen der Bürstenaufnahmen gezeigt. Die Aufnahmen wurden aus dem Kunststoff POM gefertigt und aus einem Block gefräst. Der Raum, in dem sich die Kohle befindet, wurden geringfügig größer als die Kohlebürsten ausgeführt, um eine Beweglichkeit der Bürste zu gewährleisten. Am hinteren Ende des Bürstenraumes wurde in die Rückwand horizontal eine Bohrung als Führung der Druckfeder eingearbeitet.

Die Schleifkohle wird in die Vertiefung vor der Feder eingelegt und die Feder durch Zurückdrücken der Schleifkohle vorgespannt. Eine Scheibe aus Polycarbonat sorgt für die Abdeckung der Kohlebürste und verhindert ein Ausweichen der Kohlebürsten in vertikaler Richtung. In den Bildern (e) und (f) werden die Bürstenaufnahmen nach einem Versuch mit den eingebauten Bürsten gezeigt. Der Anschluss der Kohlebürsten wird durch eine Öffnung in der Mitte der Scheibe nach oben aus dem Halter geführt, wo der Anschluss an die Stromzufuhr erfolgt. Die Öffnung hat außerdem die Funktion die Kohle nach dem Verschrauben der Scheibe mit dem Kunststoffblock in ihrer Führung zu halten, indem die horizontale Wegstrecke beschränkt wird. Vier Bohrungen, welche durch den Block führen ermöglichen eine direkte Verschraubung des Kunststoffblocks auf dem Kraftarm.

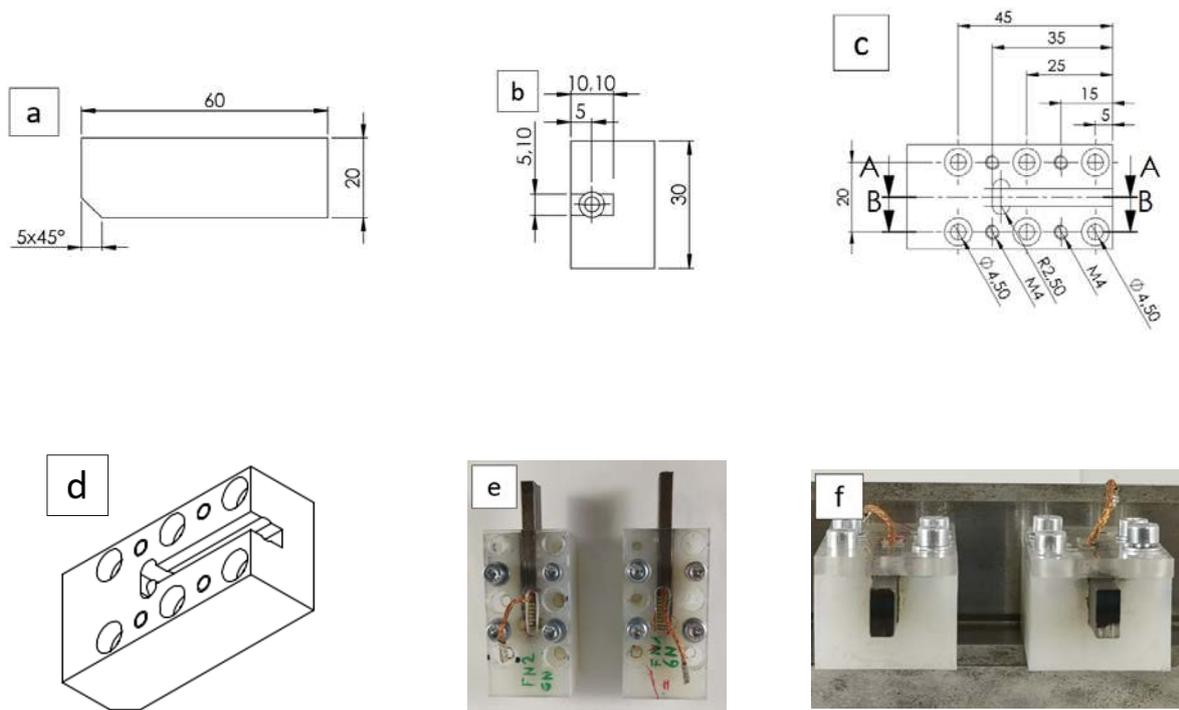


Abbildung 12: (a) bis (d) Konstruktionszeichnung der Bürstenhalter. € und (f) Bürstenhalter mit Schleifkohlen nach einem Versuch

3.1.6. Anordnung der Kraftsensoren im Tribometer

Abbildung 13 (a) zeigt die Messzelle mit den für die Messung notwendigen Einbauten. Im Zentrum der Messkammer ist, die mit der Nr. 1 gekennzeichnete Welle positioniert. Symmetrisch an den beiden Seiten befinden sich die mit der Nr. 2 gekennzeichneten Biegebalken, welche die Aufnahmen für die Halterungen der Kohlebürsten darstellen. Diese sind mit den Nummern 3 und 4 gekennzeichneten Plattformwägezellen verbunden. Die Plattformwägezellen welche mit der Nr. 3 gekennzeichnet wurden sind für die Messung der Normalkräfte und die mit der Nr. 4 gekennzeichneten Zellen für die Messung der Reibkräfte zuständig.

Biegebalken sowie die Plattformwägezellen wurden so ausgelegt, dass eine Kraftmessung in einem Bereich von 1 bis 6 N ermöglicht wird und können bei Bedarf mit einer maximalen Last von 75 N belastet werden. Dies hohe Belastungsgrenze wurde gewählt, um Beschädigungen an den Plattformwägezellen durch Lastspitzen während der Messung oder beim Einbau der Kohlebürsten zu vermeiden.

Der Aufbau wird von einer Haltekonstruktion, welche mit der Nr. 5 gekennzeichnet ist, getragen. Die Haltekonstruktion selbst ist durch ein System aus zwei Führungsstangen mit der verstärkten Rückwand der Testkammer verbunden. Eine Gewindestange ermöglicht die Feineinstellung der Kraft mit der Hilfe von zwei Schraubenmuttern.

Durch diesen Aufbau wird eine grob und eine Feineinstellung der Normalkraft bei gleichzeitiger Messung der Reibkraft ermöglicht. Ebenfalls gezeigt werden die mit den Nummern 6 und 7 gekennzeichneten Anschlüsse für die Kohlebürsten.

Bild (b) der Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt der Testkammer mit einer als Nr. 1 gekennzeichneten eingebauten Probe in der Mitte der Testkammer gemeinsam mit den beiden mit der Nr. 2 links und rechts angeordneten Probenhaltern samt Kohlebürsten. Weiters sind die Stromanschlüsse mit der dazugehörigen Polung dargestellt. Der mit der Nr. 3 gekennzeichnete Bronzedraht dient zur Messung des Spannungsverlaufes im Laufe einer Messung und wird von einer Elektroklemme aus keramischem Material gehalten.

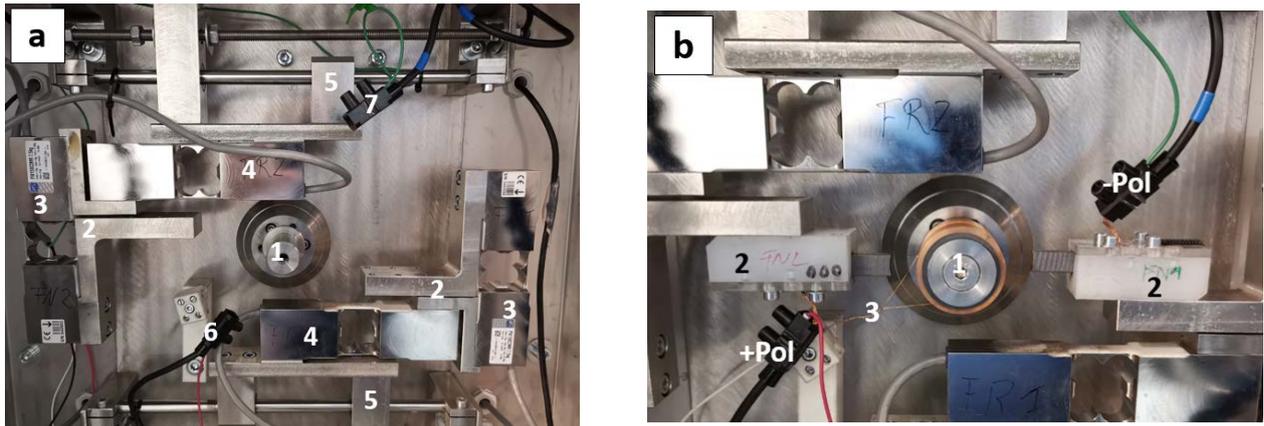


Abbildung 13: Messkammer. (a) 1. Welle; 2. Biegebalken zur Aufnahme der Kohlebürsten samt Halterung; 3. Plattformwägezellen zur Messung der Normalkräfte; 4. Plattformwägezellen zur Messung der Reibkräfte; 5. Haltekonstruktion mit Führungsstangen und Gewindestange; (b) 1, Eigebaute Probe; 2. Halterung für Kohlebürsten samt Kohlen; 3. Bronzedraht zur Messung des Spannungsverlaufes

3.1.7. Prinzip der Kraftmessung

Das Prinzip der Kraftmessung wird im Bild (a) in Abbildung 14 dargestellt. Über den mit der Nr. 1 bezeichneten Biegebalken wird die Kraft von der in Punkt 3.1.5 beschriebenen Kohlebürstenhalterung auf die Plattformwägezellen welche mit Nr. 2 bezeichnet werden übertragen. An den Plattformwägezellen befinden sich Dehnmesstreifen, welche bei der Einwirkung einer Normalkraft auf die Kohlen eine Längenänderung erfahren. Durch die Änderung der Länge ändert sich der elektrische Widerstand der Dehnmesstreifen was zu einer Änderung im Spannungssignal führt und mit Hilfe einer entsprechenden Software ausgewertet wird. An der Plattformwägezelle mit der Nr. 2 ist der Biegebalken, welcher mit Nr. 3 bezeichnet befestigt.

Dieser Biegebalken dient als Aufnahme, für die mit der als Nr. 3 bezeichneten, Plattformwägezelle. Bei Rotation der Probe kommt es zu einer Auslenkung des ersten Biegebalkens in vertikaler Richtung, was eine Dehnung bzw. Stauchung der Dehnmesstreifen der Plattformwägezellen mit der Nr. 4. hervorruft. Die resultierende Änderung der Spannung der Wägezelle wird in Form der Reibkraft ausgegeben.

Die Zellen sind ab Werk so konzipiert, dass auftretende exzentrische Kräfte gemessen werden können und die beiden Plattformwägezellen nur einen geringen Einfluss aufeinander ausüben obwohl diese miteinander in Verbindung stehen.

Bild (b) der Abbildung 14 zeigt exemplarisch einen Dehnmessstreifen. Um eine Beeinflussung der Messung durch Staub und Korrosion zu vermeiden sind die Dehnmessstreifen mit PVC ummantelt und entsprechen der IP67 Schutzklasse. Somit können diese auch bei korrosiven Bedingungen wie maritimer Umgebung eingesetzt werden.

Wird die Bürste mit einer gewünschten Kraft an den Schleifring gedrückt, wird über die Halterungen die Kraft auf die Wegezelle übertragen, wodurch durch das beschriebene Funktionsprinzip die Kraftmessung erfolgt. Die Spannungssignale können mittels einer AC²T eigenen Steuersoftware live abgegriffen und dargestellt werden.

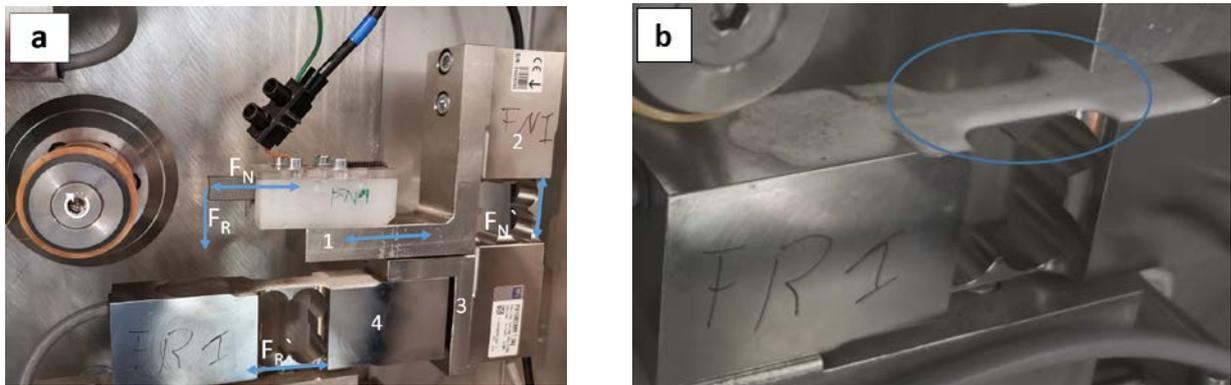


Abbildung 14: Bild (a): 1. Waagezelle für Tangentialkräfte, 2, 3. Aufnahme für Waagezellen, 4. Waagezelle zur Normalkraftmessung, 5. Querschnittsverjüngung zur exakten Dehnungsmessung. 6. Halterung für Kohlebürsten. Bild (b): Dehnmessstreifen am Biegebalken zur Kraftmessung.

3.1.8. Kraftmessung an den Schleifkohlen

Um die die Kohlebürsten mit einer definierten Last an die Schleifringe anpressen zu können und um Normalkräfte und Reibkräfte im Verlauf des Versuchs messen zu können werden die Kohlebürsten samt ihren Halterungen auf Biegebalken montiert, welche die Kräfte auf Plattformwaagezellen übertragen. Die so befestigten Schleifkohlen können mit der gewünschten Kraft an die Schleifringe angepresst und der Verlauf von Normalkräften und Reibkräften gemessen werden. Bei den Plattformwaagezellen handelt es sich um den Bautyp PW15BC3MR von HBM. Die Waagezellen sind aus Stahl der Qualität 1.4545 gefertigt und entsprechen dem IP67 Schutzstandard.

3.2. Stromführung durch das Tribosystem

Abbildung 15 zeigt die notwendigen Komponenten, welche zur Bereitstellung der ausreichenden Stromstärken für die Experimente nötig sind. Bild (a) zeigt die Spannungsquelle, welche in der Lage ist, eine maximale Spannung von 30 V und eine maximale Stromstärke von 80 A zu liefern. Bild (b) zeigt die für die Generierung der notwendigen Stromstärken benötigten Lastwiderstände. Der Widerstand jedes einzelnen Lastwiderstandes beträgt $1,5 \Omega$. Durch die Parallelschaltung der Widerstände ist es möglich hohe Ströme bei niederen Spannungen zu generieren. Die Widerstände sind in der Lage eine Wärmeleistung von 1500 W abzuführen. Die Höhe der Wärmeleistung wurde gewählt, um einer Beschädigung der Anlage durch Strom bzw. Spannungsspitzen vorzubeugen. Bild (c) zeigt die Anschlüsse der Kohlebürsten mit der jeweiligen Polung unter der Berücksichtigung der technischen Stromrichtung.

Dabei erfolgt die Stromzufuhr über die beiden schwarzen dicken Leitungen. Die jeweiligen dünnen Leitungen an den Anschlüssen dienen zur Messung des Spannungsdifferenz im Kontakt zwischen Kohlebürste und Schleifring. Ebenfalls ist der Bronzedraht zu sehen welcher als Bezugspunkt für den Spannungsabfall über die Schleifkohle dient.

Das Bild (d) der Abbildung 15 zeigt den geschlossenen Kontakt von Schleifkohlen und Schleifring.

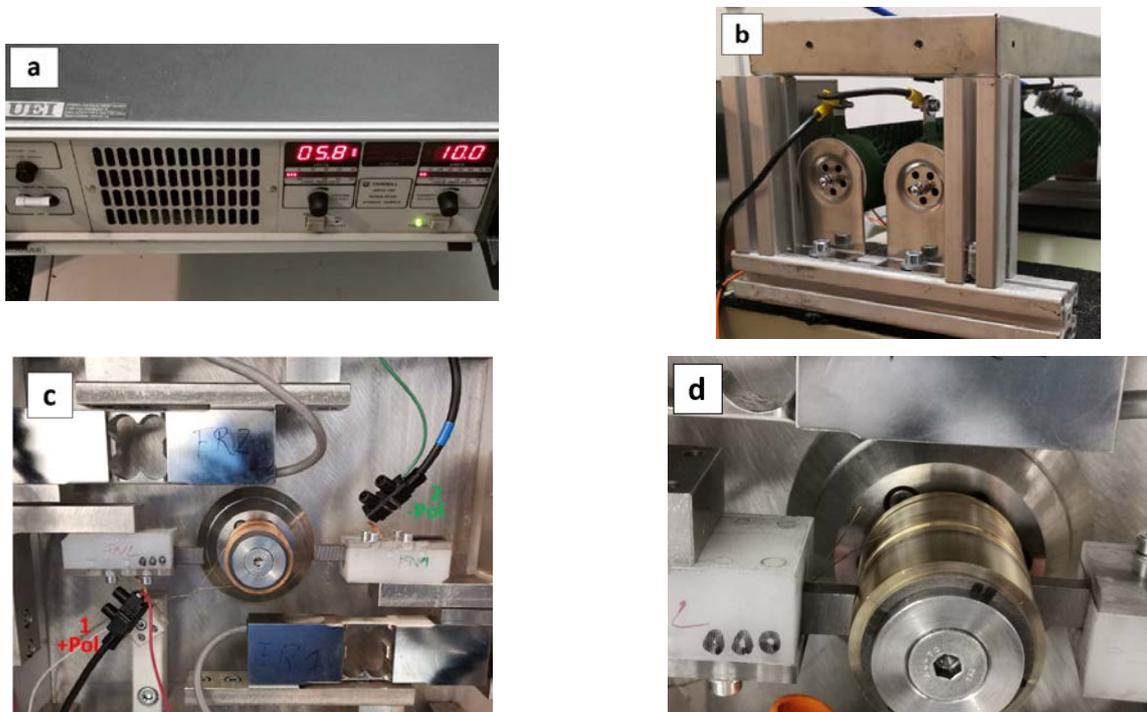


Abbildung 15: Stromversorgung der Kohlebürsten. (a) Spannungsquelle, (b) Leistungswiderstände, (c) Pole der Kohlebürsten, (d) geschlossener Kontakt

3.3. Atmosphärenkontrolle

Aufgrund des hohen Einflusses der Atmosphäre auf die Schichtbildung und den Werkstoff und speziell deren relative Luftfeuchtigkeit ist eine Kontrolle der atmosphärischen Bedingungen in der Testkammer unumgänglich.

Während der Messungen erfolgte eine aktive Kontrolle und Steuerung der Luftfeuchtigkeit in der Messkammer. Die Temperatur in der Messkammer selbst wurde gemessen konnte aber im derzeitigen Ausbaustadium nicht aktiv kontrolliert werden. Die Zusammensetzung des Aerosols welches der Befeuchtung der Atmosphäre in der Messkammer bzw. der Simulation einer maritimen Umgebung dient, wurde durch das Bereitstellen einer entsprechenden Lösung in Form von synthetischen Meerwasser nach DIN 7120 Verfahren B und für salzfreie Atmosphäre mit destillierten Wasser kontrolliert. Die Erzeugung und Zuführung des Aerosols werden in Abbildung 16 dargestellt. In Bild (a) wird der für die Aerosolerzeugung verwendete Ultraschallzerstäuber des Typs Magic-Fog der Firma Dragon mit des Typs THO060 aus der Terrarium Technik mit den notwendigen Armaturen für die Zufuhr des Aerosols gezeigt. Über die Kugelhähne, über welche die einströmende Aerosolmenge feingeregelt werden kann und die in Bild (b) gezeigten Zuleitungen, gelangt das Aerosol in die Testkammer, wo es von der in Bild (c) gezeigten Absaugung gemeinsam mit dem gebildeten Staub aus der Testkammer entfernt wird. Die Bilder (d) bis (f) der Abbildung 16 zeigen den Sensor zur Überwachung der Luftfeuchtigkeit, und dessen außerhalb der Anlage befindliches Bedienfeld. Das Bild (f) zeigt einen sogenannten Testlogger. Dieser ist an der Innenseite der Türe der Testkammer angebracht und miss unabhängig von Verdampfer die Luftfeuchtigkeit sowie die Temperatur der Testkammer und fungiert somit als zusätzliches unabhängiges Kontrollsystem für die Luftfeuchtigkeit.

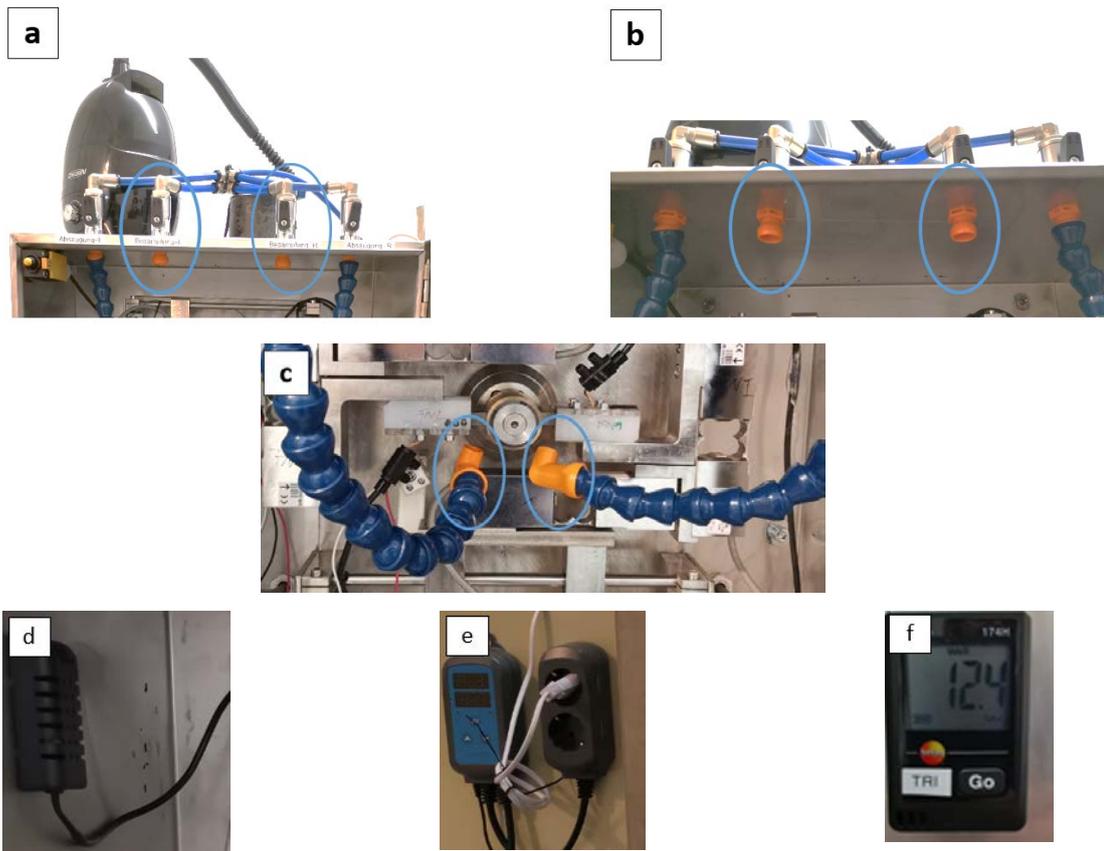


Abbildung 16: (a) Zerstäuber zur Aerosolerzeugung mit Zuleitungen und Kugelhähnen (b) Aerosolzutritt in die Testkammer. (c) Absaugung des Aerosols. (d) Feuchtigkeitssensor des Zerstäubers. (e) Steuerkonsole des Zerstäubers zur Kontrolle und Festlegung der rel. [%] Luftfeuchtigkeit. (f) Testlogger.

3.4. Aerosol und Staubabfuhr

Bei den Versuchen kommt es durch den Verschleiß der Kohlebürsten nicht nur zu der Bildung einer Schicht an der Oberfläche des Schleifringes, sondern auch zu einer Bildung von Grafitstaub. Wegen der Feinheit des Abriebs und der guten elektrischen Leitfähigkeit des Staubes musste dieser weitestgehend aus dem System entfernt werden, um Verschmutzungen der Anlage oder durch Grafit verursachte Kurzschlüsse zu vermeiden. Über denselben Weg wie die Abfuhr des Graphitstaubes erfolgte auch die Abfuhr des Aerosols. Dies war von besonderer Bedeutung bei Versuchen mit Meerwasser, um größere Schäden an der Anlage durch Korrosion aufgrund des Salzsprühnebels zu vermeiden. Abbildung 17 zeigt die zu diesem Zweck eingebaute Absauganlage. Bild (a) zeigt die mit den Nr. 1 und Nr. 2 gekennzeichneten Kugelhähne mit den

angeschlossenen Leitungen zur Absaugung. Die Kugelhähne dienen zur Steuerung der Absaugmenge an Aerosol, des Staubes und der Absaugstärke. Am Ende jedes wurde die Aerosolzufuhr ausgesetzt die Kugelhähne für die Absaugung eines Großteils des Aerosols geöffnet. Die Absaugung des Aerosols erfolgte über die gleiche Vorrichtung wie die Absaugung des Staubes. Bild (b) zeigt die mit den Nr.1 und 2 gekennzeichneten flexiblen Segmentschläuche, durch welche die Absaugung erfolgt. Diese wurden so platziert, dass die Absaugung des Abriebs so dicht wie möglich an den Bürsten erfolgte, dadurch konnte die Verteilung des Staubes in der Testkammer auf einen geringen Bereich eingeschränkt werden.

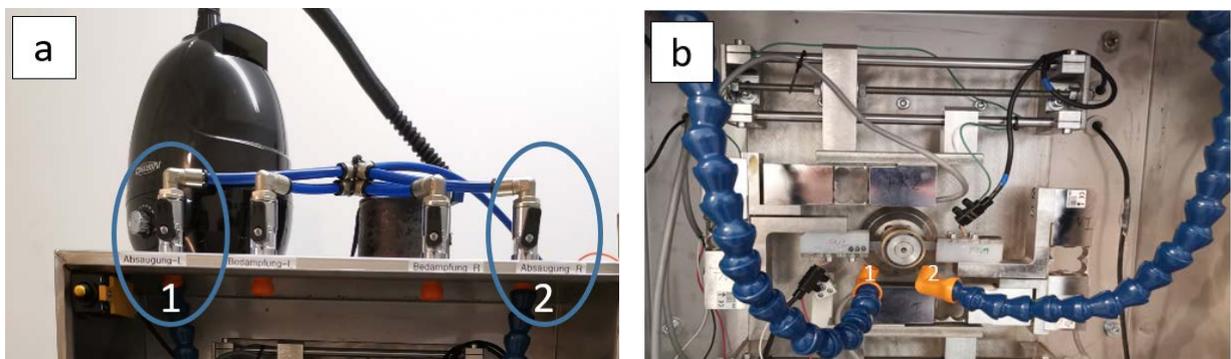


Abbildung 17: Entstaubung (a) Nr. 1, Nr. 2 Kugelhähne mit Leitungen zur Kontrolle der abgeführten Menge an Aerosol und den beim Versuch entstehenden Staub. (b) Angeschlossene flexible Arme (an Nr. 1, Nr. 2) mit abgewinkelten Enden zum direkten Auffangen und Absaugen des Schleifstaubes.

4. DURCHFÜHRUNG

4.1. Probenpräparation zur metallographischen Gefügecharakterisierung

Für diese Arbeit wurden Schleifkörper aus CuSn8P und Reinkupfer hergestellt. Weiters wurden Proben aus einem industriell gefertigten Schleifring aus CuSn8P hergestellt. Die Bronze wurde gewählt, um einen Bezug zu praxisnahen Anwendungen gewährleisten zu können. Der zweite Werkstoff wurde ausgewählt, um Unterschiede zwischen einer Legierung und einer Reinsubstanz erheben zu können. In der Abbildung 21 sind Querschliffe der Gefüge des Kupfers der Bronze und den als Referenz dienenden, industriell gefertigten Schleifring gegenübergestellt.

Die Werkstoffe, aus denen die Proben gefertigt wurden, wurden als mehrfach stranggezogene Präzisionsstange zur Verfügung gestellt.

Um einen Eindruck vom Zustand des Gefüges der Werkstoffe zu erhalten, wurde eine metallographische Untersuchung der Werkstoffe durchgeführt. Mittels einer Bandsäge wurde je eine Scheibe mit der Stärke von 10 mm abgetrennt. Diese Probenstücke wurden mit der Hilfe einer metallographischen Säge in Würfel mit einer Kantenlänge von 10 mm zersägt und in Bakelit eingebettet so, dass ein Querschliff des Gefüges entstand. Die so vorbereiteten Proben wurden im Anschluss mit Hilfe eines Polierautomaten in mehreren Schritten poliert. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden in der Tabelle 1 angeführt. Das Gefüge der Werkstoffe wurde im Anschluss durch metallographische Ätzverfahren sichtbar gemacht und unter dem Auflichtmikroskop begutachtet.

Tabelle 1: Schleif und polierstufen der metallographischen Präparation.

Schleif/Polierscheibe	Körnung [µm]	Last [N]	Zeit [min]
SiC Papier	320	20	3
SiC Papier	500	20	3
MD-Allegro	9	30	4
M-Dac	3	25	3
MD-Chem. OPS	0,25	15	3,5

4.2. Durchführung der metallographischen Ätzung

Zur Durchführung der Metallographie mussten die entsprechenden Ätzlösungen vorbereitet werden die benötigten Chemikalien sind in Tabelle 2 angegeben [37]. Die Proben aus Kupfer wurden in einem ersten Ätzschritt für 2 s einer Ätzung nach Heyn zur Sichtbarmachung der Korngrenzen unterzogen. In einem weiteren Schritt wurden die zuvor geätzten Proben mit dem Ätzreagenz nach Klemm2 vier Minuten lang geätzt. Vor und nach dem zweiten Ätzschritt wurden von den jeweiligen Aufnahmen des metallographischen Gefüges angefertigt. Hierdurch wurde die Struktur der einzelnen Körner im Detail sichtbar. Die Proben aus CuSn8P wurden einer Ätzung nach Heyn für eine Dauer von 45 s unterzogen.

Die Proben des industriell gefertigten Schleifringes wurden mit Ammoniumpersulfatlösung geätzt. Die Ergebnisse der Metallographie werden im Kapitel 6.1 diskutiert.

Tabelle 2: Chemikalien zur Herstellung der für die Metallografie notwendigen Ätzreagenzien.

Ätzlösung	Chemikalie	Menge [g]	Volumen [mL]
Heyn	H ₂ O dest.		100
	Diammoniumtetrachloro- Cuprat (II)	9	
Klemm2			
Stammlösung	H ₂ O dest.		300
	Natriumthiosulfat	1000	
Lösung Klemm2			
Ätzlösung	Stammlösung		100
	Kaliumdisulfit	5	

4.3. Herstellung des synthetischen Meerwassers

4.3.1. Chemikalien

Für die Versuche mit Meerwasser wurde ein synthetisches Meerwasser nach DIN 7120 hergestellt.

Die Einwaagen sowie die benötigten Chemikalien zur Herstellung des Meerwassers sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Einwaagen und Chemikalien zur Herstellung von synthetischem Meerwasser nach DIN 7120 (alle Chemikalien entsprechen den in der Norm geforderten Reinheitsgrad)

Chemikalie	Einwaage [soll] [g]	Einwaage [ist] [g]
NaCl	122,7	122,8
MgCl ₂ *6H ₂ O	55,5	55,5
Na ₂ SO ₄	20,45	20,5
CaCl ₂	5,8	5,8
KCl	3,45	3,5
NaHCO ₃	1,0	1,0
KBr	0,5	0,5
H ₃ BO ₃	0,15	0,15
SrCl ₂ *6H ₂ O	0,2	0,20
NaF	0,015	0,015
H ₂ O dest.	5 [L]	5 [L]

4.3.2. Bestimmung der Massenverluste der Schleifkohlen

Die Bestimmung des Verschleißes der Kohlen im Zuge wurde mittels Wägung der Kohlen vor und nach den Versuchen mittels einer Analysenwaage von Mettler Toledo durchgeführt.

Beim Ausbau der Kohlen aus dem Halter wurde darauf geachtet die Kohlen weder an der Kontaktstelle zu berühren bzw. mechanisch zu verändern. Schleifstaubabscheidungen an den Kohlen wurden aufgrund der Absaugung und der Polycarbonatabdeckung konnten nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse werden im Kapitel 6 dargestellt.

4.4. Bestimmung der Ausgangstopografie von Schleifringen und Kohlen

4.4.1. Topographiebestimmung - Schleifringe

Zur Ermittlung der topographischen Kennwerte der Schleifringe und der Kohlen wurden die Oberflächen der Schleifringe vor und nach den Versuchen gemäß DIN EN ISO 4287 mittels Alicona Infinite Focus G5 bestimmt und miteinander verglichen. Diese Methode wurde aufgrund der hohen Auflösung der Oberflächenstruktur bei einer gleichzeitig hohen Messgeschwindigkeit gewählt. Die erhobenen Parameter sind in Tabelle 4 angegeben. Die Werte wurden jeweils normal und parallel zur Laufrichtung der Oberflächenstruktur erhoben.

Tabelle 4: Übersicht ausgewählter Rauheitsparameter zur Beschreibung der Topografie nach DIN EN ISO 4287.

Parameter	Aussage	Einheit
Ra	Arithmetischer Mittenrauhwert	μm
Rq	Quadratischer Mittenrauhwert	μm
Rz	Maximale Rauheitsprofilhöhe	μm
Rsk	Schiefe	
Rku	Steilheit Kurtosis	

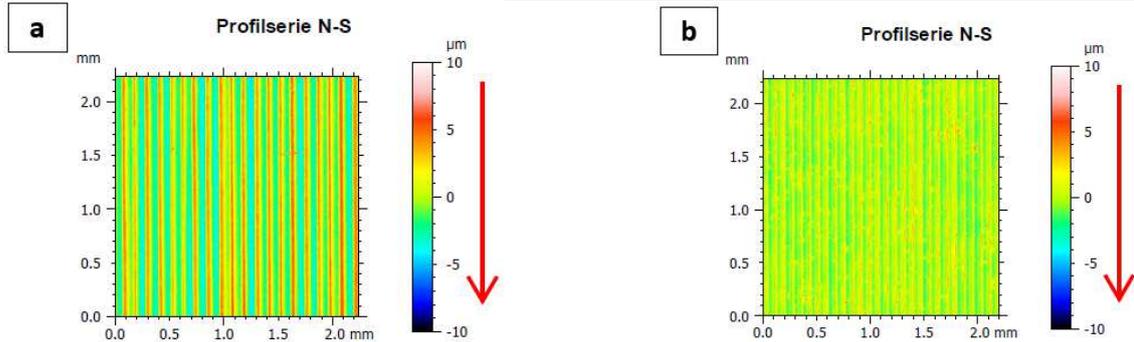
In Abbildung 18 werden exemplarisch die Ergebnisse der Topographiemessungen dargestellt. Die Bilder (a) bis (d) stellen exemplarisch die Ergebnisse der Topographiemessung eines bei AC²T gefertigten Schleifringes der Topographiemessung eines als Referenz dienenden Schleifring aus der Industrie gegenüber. Abbildung 19 (a) und (b) zeigen exemplarisch eine stereomikroskopische Aufnahme eines CuSn8P Schleifringes, wie er bei AC²T gefertigt wurde, und eines Ringes aus der Industrie. In der Mitte der Abbildung ist die Separierung zu erkennen, welche den bei AC²T gefertigten Ring wie schon beschrieben als Nut ausgeführt wurde. Die Funktionsweise des Ringes aus der Industrie wurde bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Die Kontaktzonen für die Bürsten direkt links und rechts davon.

Beim Vergleich der Oberflächen zeigt sich bei den von AC²T gefertigten Schleifringen im Allgemeinen eine rauere Oberfläche, was durch die Parameter Rq und Rz abgebildet wird. Beim

Vergleich der R_{ku} -Werte (Steilheit/- Kurtosis) zeigten sich bei beiden Ringen scharf ausgeprägte Spitzen und Täler. Der als Referenz dienende Ring zeigt in der Messung gegenüber dem gefertigten Ring einen fast doppelt so hohen R_{ku} Wert, was auf sehr scharfe Spitzen und Täler an der Oberfläche hindeutet. Die R_{sk} Werte der bei AC^2T und der industriell gefertigten Ringe zeigen beide einen positiven Wert. Nach DIN EN ISO 4287 deuten negative Werte auf plateauförmige Strukturen hin, welche aufgrund der Messdaten im gemessenen Bereich nicht zu erwarten sind. Die arithmetischen Mittenrauwerte R_a der Proben wurden aus Gründen der Vollständigkeit ebenso angegeben. Da er unempfindlich auf Spitzen und Tälern reagiert, ist die Aussagekraft begrenzt. Dennoch wurde der R_a – Wert aus Gründen der Vollständigkeit als Parameter aufgenommen.

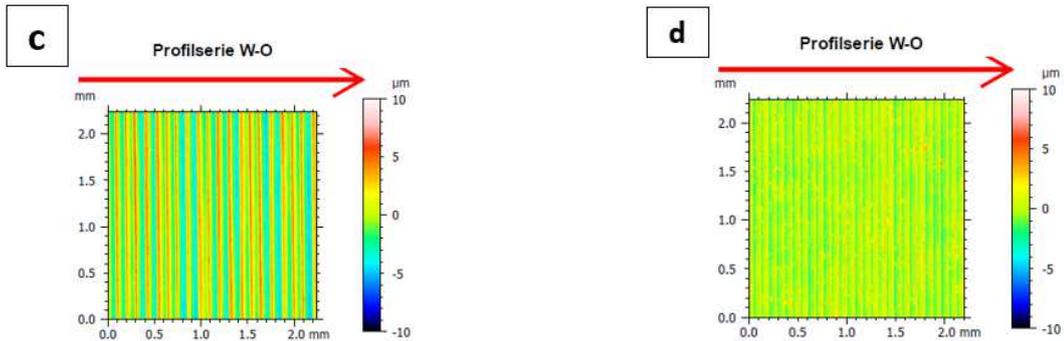
Die Oberflächenanalyse ergab sowohl bei dem gefertigten Ring als auch bei dem als Referenz dienenden Ring mit scharfen Spitzen und Tälern. Die Struktur der industriell gefertigten Ringe erweisen sich dennoch als „feiner“ als die der gefertigten Ringe. Trotz der höheren Rauheit der gefertigten Ringe wurde aufgrund des zu erwartenden beträchtlichen Mehraufwandes, für die Herstellung einer Oberfläche mit denselben Kennwerten, die beschriebene Oberfläche als Standard für die Versuche festgelegt. Alle weiteren Proben wurden somit mit demselben Verfahren hergestellt, um eine Kontinuität zu gewährleisten.

Schleifring gefertigt bei AC²T Industriell gefertigter Schleifring



Messwerte Nord - Süd Profil

Rauheitsparameter	Wert	Rauheitsparameter	Wert
Ra	0,19 µm	Ra	0,27 µm
Rq	0,76 µm	Rq	0,37 µm
Rz	1,39 µm	Rz	2,75 µm
Rsk	0,24	Rsk	1,30
Rku	4,04	Rku	7,01



Messwerte West – Ost Profil

Rauheitsparameter	Wert	Rauheitsparameter	Wert
Ra	2,07 µm	Ra	0,86 µm
Rq	4,81 µm	Rq	1,12 µm
Rz	9,19 µm	Rz	4,94 µm
Rsk	0,13 µm	Rsk	0,99 µm
Rku	1,94 µm	Rku	3,30 µm

Abbildung 18: Gegenüberstellung der Topographiemessung eines Schleifringes gefertigt bei AC²T und eines industriell gefertigten Schleifringes. (a) N – S Profil, (c) W – O Profil eines bei AC²T gefertigten Schleifringes, (b) N – S Profil, (d) W – O Profil eines industriell gefertigten Schleifringes.

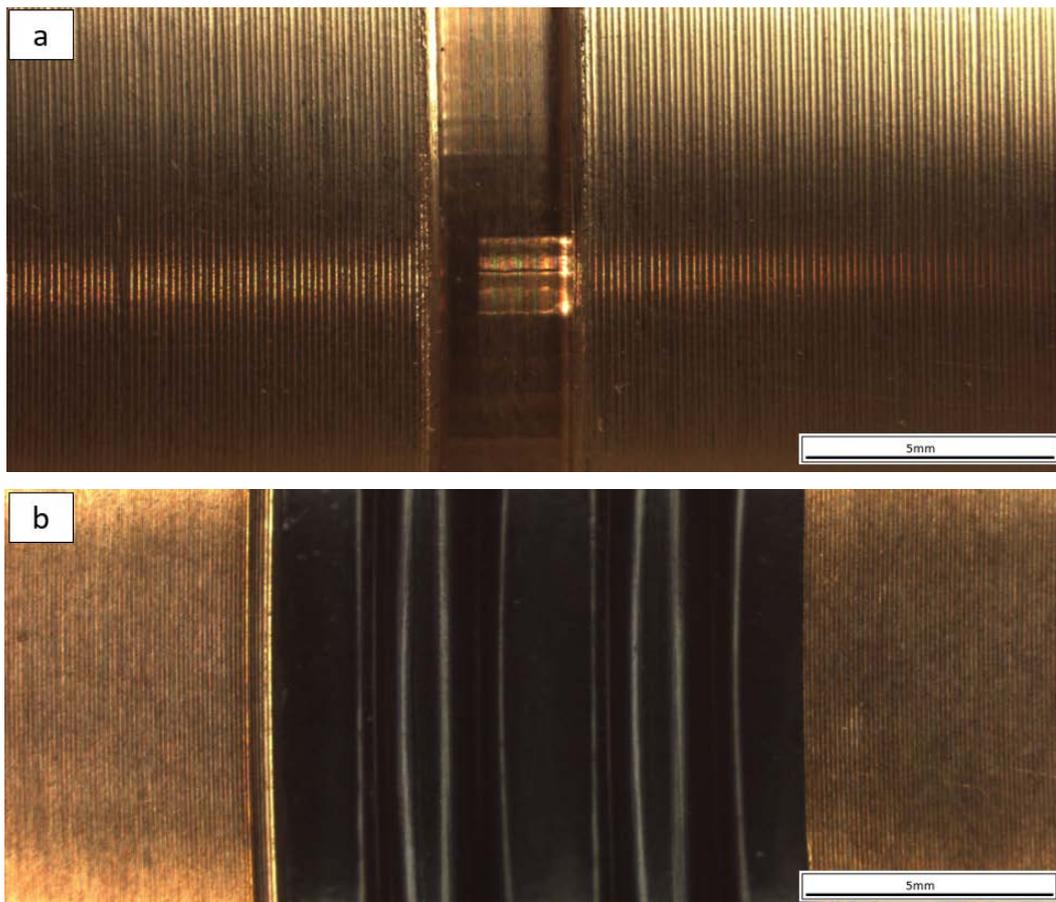


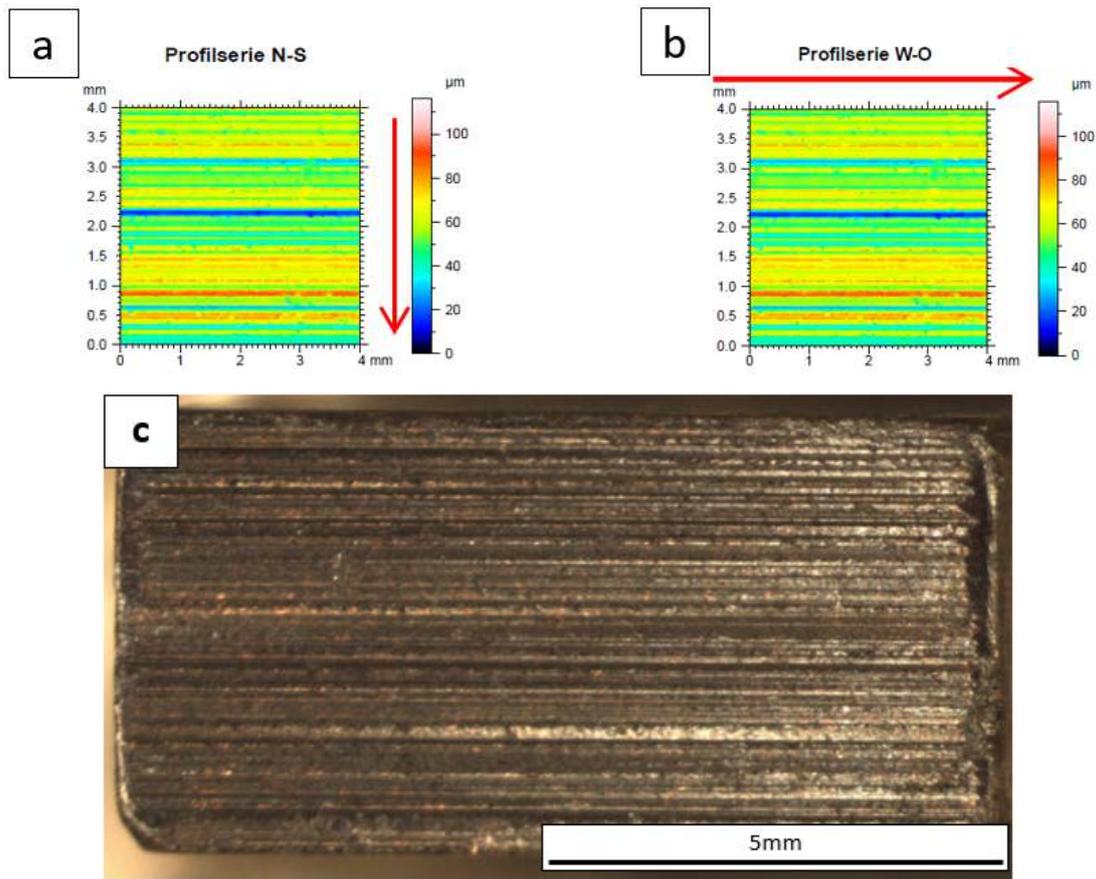
Abbildung 19: (a) Stereomikroskopische Aufnahme eines Schleifringes gefertigt bei AC²T, (b) Stereomikroskopische Aufnahme eines industriell gefertigten Schleifringes

4.4.2. Topographiebestimmung – Schleifkohlen

Die Erhebung der Rauheitsparameter der Kohlen dient hier zur Dokumentation des Unterschieds der Oberflächentopografie zwischen Schleifringen und Schleifkohlen.

Die Oberflächenbeschaffenheit der Schleifkohlen an der Kontaktfläche wurde mittels derselben Methode wie die Schleifringe bestimmt. Bild [a] und [b] der Abbildung 20 zeigen exemplarische das Ergebnis der Topographiemessung einer Schleifkohle vor ihrer Verwendung.

Die Schleifkohlen wurden vom Hersteller direkt eingeschliffen. Die Topografiedaten zeigen eine wesentlich höhere Rauheit in der Kontaktfläche als die Schleifringe. Der Rku Wert weist auf Bereiche mit scharfen Spitzen und Tälern hin wobei der negative Rsk - Wert plateauartige Strukturen kennzeichnet. Die im Bild [c] stereomikroskopische Aufnahme der Oberfläche bestätigt das Ergebnis der Messung.



Profilserie N - S

Profilserie W - O

Rauheitsparameter	Wert	Rauheitsparameter	Wert
Rq	21,40 μm	Rq	4,60 μm
Rz	44,90 μm	Rz	10,80 μm
Rsk	-0,01	Rsk	-0,44
Rku	5,90	Rku	5,90

Abbildung 20: (a), (b) Topographiemessung einer Schleifkohle vor ihrer Verwendung. (c) stereomikroskopische Darstellung der Kontaktzone einer Kohlebürste vor Gebrauch.

4.5. Durchführung der tribologischen Versuche

4.5.1. Aufstellung der konstanten und Variablen Parameter

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Parametern wurde vor dem Beginn der Versuche die zu variierenden Parameter, welche an jedem Werkstoff getestet werden sollten, festgelegt.

Die Tabelle 5 gibt eine Übersicht über die zu variierenden und konstanten Parameter im Verlauf der Versuche.

Tabelle 5: Aufstellung der konstanten und der zu prüfenden variablen Parameter.

variable Parameter	Dimension
Zeitdauer [h]	6 und 24 h
Gleitweg 6 h	447,6 km
Gleitweg 24 h	1790,5 km
rel. Luftfeuchtigkeit [%]	25 – 50
Stromstärke [A]	0 bis 10
Atmosphäre 1	Sprühnebel aus destillierten H ₂ O
Atmosphäre 2	Sprühnebel aus synthetischem Meerwasser
Werkstoffe	Cu (rein), CuSn8P
konstante Parameter	Dimension
Last [N]	5
Umdrehungszahl [U/s]	167
Umdrehungsgeschwindigkeit [m/s]	20,7

4.5.2. Aufstellung der Parameter während der einzelnen Versuche

Die Tabelle 6 zeigt die Aufstellung aller durchgeführten Versuche mit den entsprechenden konstanten und variablen Parametern welche in der Tabelle 5 beschrieben wurden.. Als praktikable Messzeiten ergaben sich die Dauer von 6 Stunden was einer Wegstecke von ca. 450 km entsprach und einer Zeitdauer von 24 Stunden was einen zurückgelegten Weg von ca. 1800 km entsprach.

Bei den gewählten Testzeiten konnte eine Kontrolle der Anlage, sowie ein direkter Ausbau der Probe und einer Unterbringung im Exsikkator direkt nach dem Versuch gewährleistet werden. Die beiden 24 h Versuche wurden aufgrund des Volumens des Zerstäubers in zwei 12 stündige Versuche unterteilt. Der Stopp ermöglichte eine Befüllung des Tanks und ebenso eine optische Kontrolle der Bürsten sowie des Ringes. Die Versuche wurden ohne einen Ausbau der Ringe oder einer Veränderung der Kontaktsituation nach der Kontrolle erneut gestartet. Die 24 h dauernden Versuche wurden an je einem Werkstoff unter denselben Versuchsbedingungen durchgeführt.

Tabelle 6: Aufstellung aller Versuche inklusive Messbedingungen

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last [N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte [%]	I[A]
V56	CuSn8P	450	5	167	25	0
V57	CuSn8P	450	5	167	25	1,5
V58	CuSn8P	450	5	167	50	1,5
V60	CuSn8P	450	5	167	50	10
V62	CuSn8P	450	5	167	25	10
V65_1	CuSn8P	1800	5	167	50	10
V65_2						
V67Salz	CuSn8P	450	5	167	50	10
V61	Cu	450	5	167	50	0
V59	Cu	450	5	167	25	1,5
V63	Cu	450	5	167	50	10
V64	Cu	450	5	167	25	10
V66_1	Cu	1800	5	167	50	10
V66_2						
V68Salz	Cu	450	5	167	50	10

4.5.3. Versuchsablauf

Die Probe wurde wie schon im Kapitel 3.1.4 erläutert in die Testkammer eingebracht und für den Versuche vorbereitet. Beim Einbau der Proben und bei der Aufbringung der Last musste darauf geachtet werden so gut als möglich eine Verspannung des Systems vor dem Start des Versuchs zu vermeiden.

Bedingt durch die gegebenen Geometrien der Schleifringe und der Kohlebürsten ist keine Planparallelität im Kontakt gegeben.

Dies führt zu einem Offset, welcher durch die raue Oberfläche der Schleifkohlen in Kombination mit dem Messaufbau erzeugt wird und somit systembedingt nicht als konstant erscheint. Versuche des Tarierens vor der Messung führte in Vorversuchen zu einem undefinierten Startpunkt, welcher einen unbekanntes Fehler zur Folge hatten und nicht reproduzierbare Messergebnisse lieferte. Aus diesem Grunde wurden anfängliche Versuche einer Offsetkorrektur eingestellt und die Messungen ohne Korrekturen durchgeführt.

5. ANALYTISCHE METHODEN

5.1. Metallographie

Die Methode der Metallographie dient der Begutachtung des Gefüges von meist metallischen Werkstoffen. Durch mehrere Bearbeitungsschritte wird der Einblick in das kristalline Gefüge einer Probe ermöglicht. Die Schritte der Präparation sind hierbei von der gewünschten Information über die Probe abhängig. Aus diesem Grunde sind die jeweiligen Schritte der Präparation je nach Werkstoff und Analysenziel auszuwählen und der Problemstellung anzupassen.

Um einen Werkstoff untersuchen zu können werden Proben, meist mit Metallographischen Trennmaschinen aus einem Bauteil oder einer Werkstoffprobe herausgetrennt und mittels einer Einbettpresse in Bakelit eingebettet. Auf diese Weise können die Proben in einem Polierautomaten mit der Hilfe verschiedenster Schleif- und Polierscheiben für die Begutachtung unter dem Mikroskop vorbereitet werden. Für einen besseren Kontrast zwischen Korngrenzen und dem Gefüge der Körner stehen diverse Ätzmittel zur Verfügung, welche für die jeweiligen Werkstoffklassen geeignet sind. Die so vorbereiteten Proben können nun unter dem Auflichtmikroskop betrachtet werden.

5.2. Lichtmikroskopie

Bei metallografischen Untersuchungen, müssen aufgrund der lichtundurchlässigen Proben Auflichtmikroskope für die Untersuchung des Gefüges herangezogen werden. Die Beleuchtung der Probe erfolgt hier indirekt oder von der Oberseite durch das Objektiv. Von der Probenoberfläche reflektiertes Licht wird wieder vom Objektiv aufgefangen.

Eine weitere Bauart ist das inverse Auflichtmikroskop. Durch die Positionierung des Objektisches oberhalb der Objektive ist es möglich größere Proben zu untersuchen. Deren Größe ist hier nur durch die Tragfähigkeit des Objektivtisches limitiert [38].

5.3. Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie beruht auf der Wechselwirkung eines Elektronenstrahls mit der Oberfläche, welcher rasterförmig über die Oberfläche geführt wird. Die Grundlagen der Wechselwirkung werden unter Punkt 5.4 näher ausgeführt. Der Unterschied zwischen Elementanalytik und dem bildgebenden Verfahren besteht in der Nutzung der entstandenen Sekundärelektronen und den von der Probenoberfläche zurück gestreuten Elektronen. Werden zur Bilderzeugung die rückgestreuten Elektronen herangezogen, spricht man von Rückstreu-Elektronenspektroskopie (RE) bzw. backscattered electron microscopy (BSE). Werden die aus der Probenoberfläche durch den Elektronenstrahl generierten Elektronen zur Bildgebung herangezogen, spricht man von Sekundärelektronenmikroskopie (SEM). Welche Messmethode zur Bildgebung herangezogen wird ist von der jeweiligen Fragestellung abhängig. Wird ein möglichst hoher Kontrast gefordert kommt die SE zur Anwendung. Die SE stammen aus den obersten Materialschichten und bilden die Topografie der Oberfläche auch bei sehr kleinen Strukturen mit einer sehr hohen Genauigkeit ab. Dabei sind die Auflösung und der Kontrast vom Neigungswinkel der Probe abhängig. Die rückgestreuten Elektronen werden zur Bildgebung herangezogen, wenn eine ungefähre Verteilung der Elemente an der Oberfläche im Vordergrund liegen. Da Elemente mit höherer Ordnungszahl in den Bildern heller erscheinen lässt sich einen Überblick über die Verteilung gewinnen. Bei Verwendung der BSE kommt es zu einer Streuung der austretenden Elektronen wodurch die Bildschärfe bei kleineren Strukturen begrenzt wird. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen. Je nach Aufgabenstellung ist der entsprechende Detektor auszuwählen [39] [40].

5.4. EDX Analyse

Die energiedispersive Röntgenspektroskopie wird hauptsächlich in der Werkstoffanalytik in Kombination mit einem Rasterelektronenmikroskop eingesetzt. Bei dieser Methode wird der Elektronenstrahl des Rasterelektronenmikroskops zur Analyse der elementaren Zusammensetzung von Strukturen an der Oberfläche einer Probe genutzt.

Trifft der Elektronenstrahl auf die Oberfläche einer zu untersuchenden Probe, kann dieser in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung sowie der Ordnungszahl der in der Probe enthaltenen Elemente mehr oder weniger tief in das Material eindringen, wobei hier gilt, dass die Eindringtiefe bei gleicher Beschleunigungsspannung mit der Ordnungszahl abnimmt. Beim

Auftreffen auf die Oberfläche der Probe bzw. auf das Substrat kommt es aufgrund von elastischen und inelastischen Wechselwirkungen zu einer Verbreiterung des Elektronenstrahls. Diese Aufweitung wird allgemein als Messbirne bezeichnet. Über die Energie des Primärstrahls lässt sich die Eindringtiefe und eine nicht gewünschte Messung tieferliegender Strukturen vermeiden [41].

5.5. XPS (Röntgenphotoelektronenspektroskopie)

Bei der XPS handelt es sich um eine analytische Methode zur Oberflächenanalyse. Bei der Methode wird im Gegensatz zu der Methode der EDX zur Anregung der Atome Röntgenstrahlung verwendet. Im Falle dieser Arbeit wurde Röntgenstrahlung der Al - K_{α} zur Anregung der Probe herangezogen. Die Methode ermöglicht die Bestimmung der elementaren Zusammensetzung dünner Schichten und die Ermittlung der Bindungszustände der Atome an der Oberfläche der zu untersuchenden Proben.

Durch die bei der XPS Analytik eingesetzte Röntgenstrahlung kommt es in einem ersten Schritt im Probenmaterial zu der Photoionisation eines Atoms der Probe. Als nachfolgender Schritt erfolgt der Transport des freigesetzten Elektrons mit einer bestimmten kinetischen Energie durch den Festkörper an die Oberfläche der Probe. Beim Transport des Elektrons kommt es zu inelastischen Stößen, wodurch ein Energieverlust stattfindet. Ebenfalls finden Streuungen an Atomkernen statt, wodurch eine Ablenkung aus der ursprünglichen Bewegungsrichtung erfolgt. An der Oberfläche der Probe erfolgt der Austritt aus dem Festkörperverbund und die Detektion. Aufgrund der Energieverluste durch die Stoßprozesse im Festkörper stammen die am Detektor ankommenden Elektronen aus den obersten Atomlagen der Probenoberfläche.

Die freigesetzten Elektronen besitzen je nach Ordnungszahl und Orbital des betreffenden Atoms eine charakteristische Bindungsenergie. Durch die Detektion der Energie und der Häufigkeit des Auftretens des Energiewertes am Detektor kann eine Quantifizierung der Oberflächenzusammensetzung erfolgen. Aufgrund der Einflüsse von benachbarten Atomen auf die Bindungsenergien können Rückschlüsse auf die Bindungszustände der einzelnen Elemente an der Oberfläche geschlossen werden [42] [43].

6. RESULTATE

6.1. Gefüge der bei den Versuchen verwendeten Werkstoffe

Um den Werkstoff der Referenz (industriell gefertigter Schleifring) aus CuSn8P und der Proben aus CuSn8P und Kupfer (99%) hinsichtlich ihres Gefüges vergleichen zu können wurden metallographische Untersuchungen an den Werkstoffen, durchgeführt.

Abbildung 21 zeigt die metallographischen Querschliffe der einzelnen Werkstoffe. Die Bilder (a) und (b) zeigen die Aufnahmen des Gefüges von reinem Kupfer nach der in Kapitel 4.2 beschriebenen Ätzung mit dem Ätzreagenz nach Heyn und Klemm2. Das Gefüge des Werkstoffes weist eine grobe Gefügestruktur und hohe Korngröße was der Temperaturbehandlung nach dem Strangziehen entspricht. Bild (b) zeigt das Ergebnis der zweiten Ätzung mit Klemm2. Durch die zweite Ätzung zeigen sich die aus dem Herstellungsprozess resultierenden Deformationen wie Zwillingsbildungen und Scherlinien. Die Bilder (c) und (d) zeigen das Gefüge der CuSn8P Bronze im Querschliff bei unterschiedlichen Vergrößerungen nach einer Ätzung mit Klemm2 für eine Dauer von 45 s, um einen ausreichend guten Überblick über das Gefüge zu gewinnen. Auch hier konnten das Gefüge und die Bronze Proben zeigen ebenso wie die Kupferproben ein deutlich deformiertes Gefüge mit Zwillingsbildung und Scherlinien. Die Phosphide, welche im Zuge der Fertigung gebildet und im Gefüge eingeschlossen wurden stellten sich in der Metallographie in der Form von grauen Punkten dar und weisen den Werkstoff als Phosphorbronze aus. Die Bilder (e) und (f) zeigen Schliffbilder von einem industriell hergestellten Schleifring aus CuSn8P, welcher als Referenzmaterial und auch später als Vorlage für die Probenkörper diente und mit Ammoniumpersulfatlösung geätzt wurde. Die Schliffe zeigen auch hier ein grobkörniges Gefüge mit Versetzungslinien und Zwillingsbildung. Auch hier sind die Einschlüsse der verschiedenen Phosphoroxide als graue Bereiche zu erkennen.

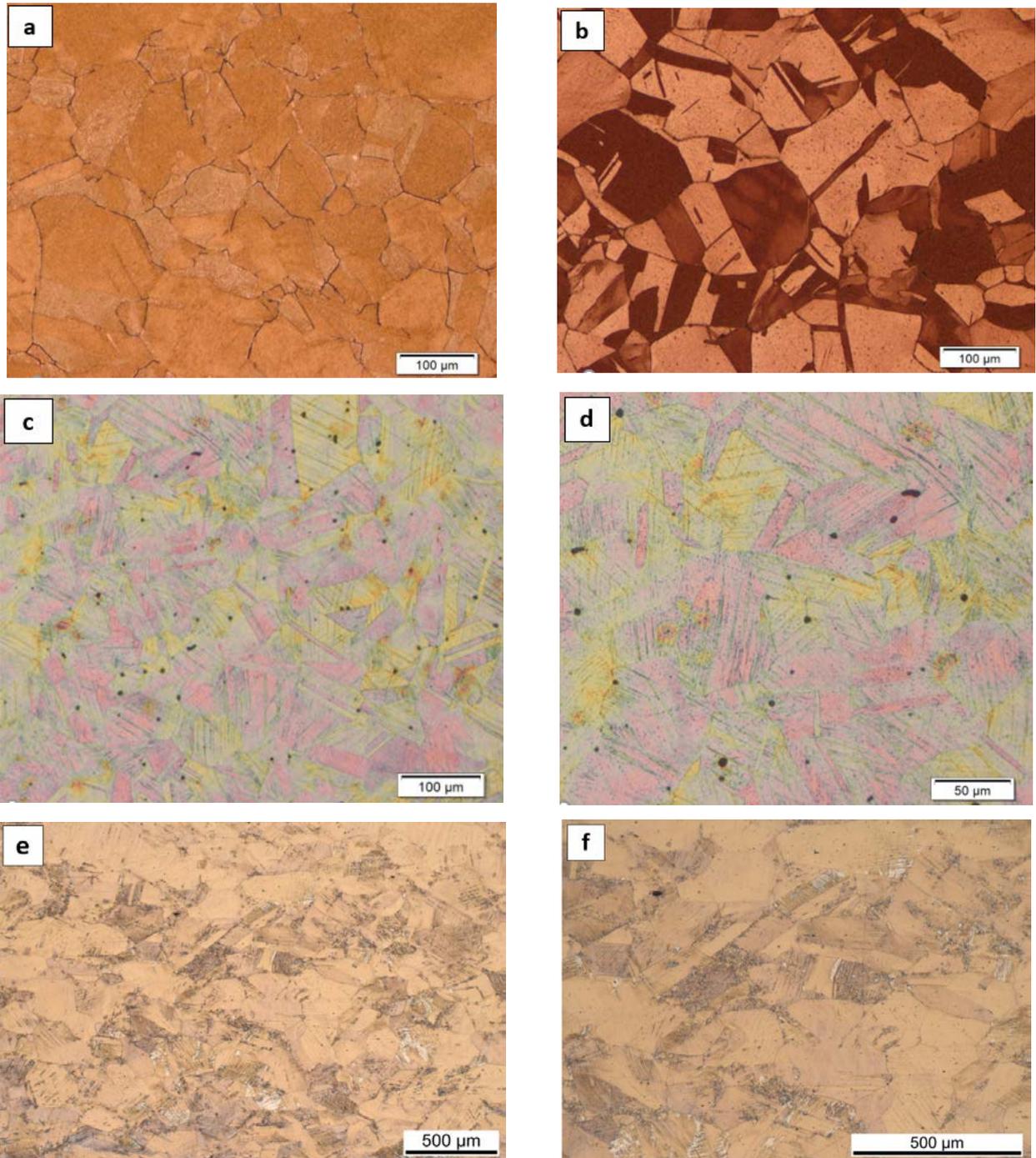


Abbildung 21: Auflichtmikroskopie der eingesetzten Werkstoffe im Vergleich mit einem gängigen Werkstoff in der Industrie. (a) Gefüge reines Kupfer nach Heyn 2 s, (b) Gefüge reines Kupfer 2 s Heyn+ 4 min Klemm2, (c) und (d) Gefüge CuSn8P Klemm2 45 s, (e), (f) Gefüge Schleifring Industrie mit Ammoniumpersulfat

6.2. Einfluss des Gleitwegs auf das tribologische System

6.2.1. Makroskopische Betrachtungen nach unterschiedlichen Gleitwegen

Um das Erscheinungsbild der Spuren und Auffälligkeiten an der Oberfläche wie z.B. Verfärbungen oder Deformationen direkt nach den Versuchen zu dokumentieren wurden Makroskopische Aufnahmen angefertigt. Die jeweiligen Versuchsbedingungen während der gegenübergestellten Versuche sind in Tabelle 7 angegeben.

Abbildung 22 zeigt in den Bildern von (a) bis (d) makroskopische Aufnahmen von Versuchen auf Bronze und Kupfer nach einem Gleitwegen von ca. 450- und 1800 km. Im Bild (a) wird die Probe aus Bronze mit dem Versuch V60 gezeigt. Die Spuren erscheinen blas und bedecken den möglichen Kontaktbereich nicht vollständig was auf unterschiedliche Kontaktsituationen an den Rändern der Mitte der Spur hindeutet. Die Spur scheint sich zu diesem Zeitpunkt noch teils in der Aufbauphase zu befinden. Der Werkstoff im Bereich der Spuren weist keine Anzeichen eines Verschleißes auf. Der Probenwerkstoff erscheint an manchen Stellen dunkler was auf die Bildung einer Cu_2O - Schicht unter den Vorherrschenden Bedingungen zurückzuführen ist. Bild (b) zeigt die Probe des Versuchs V65 nach einer Wegstrecke von 1800 km. Die Spuren sind im gesamten Kontaktbereich (über die gesamte Breite der Kohle) gleichmäßig ausgebildet was auf die Ausbildung einer intakten Gleitschicht mit entsprechender verschleißreduzierender Wirkung hindeutet. Der Schmale aufgeraute Bereich unterhalb der Spur Nr.2 ist auf das Verrutschen des Messdrahtes, welcher zur Messung des Spannungsabfalls dient zurückzuführen. Der Tribologische Versuch wurde dennoch nicht beeinflusst. Die Oberfläche des Werkstoffes erscheint außerhalb der Kontaktbereiche dunkel was auf das Anwachsen der Oxidschichtdicke zurückzuführen ist.

Bild (c) Abbildung 22 zeigt die Probe nach dem Versuch V63 mit einer Wegstrecke von 450 km. Die Spuren zeigen einen hohen Grad der Bedeckung über den gesamten Kontaktbereich was auf eine rasche Schichtbildung bzw. einen höheren Materialübertrag von der Kohle hindeutet ein Verschleiß im Kontaktbereich konnte nicht beobachtet werden. Die dunkle Färbung erhält die Probe durch die Bildung von Cu_2O unter den gegebenen Bedingungen. Das Bild (d) zeigt die Probe nach dem Versuch V66 und somit nach einem Gleitweg von 1800 km die Spuren zeigen einen guten bedeckungsgrad im Kontaktbereich. In den Spuren sind Furchen zu erkennen was auf einen erhöhten Grad des Verschleißes trotz der Spurbildung hindeutet.

Der aufgeraute Bereich unterhalb der Spur Nr.2 wurde durch den Draht, welcher zur Messung des Spannungsabfalls dient, hervorgerufen. Das tribologische Experiment wurde dadurch nicht beeinflusst.

Tabelle 7: Darstellung der Versuchsbedingungen der in Abbildung 22 gegenübergestellten Proben

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte[%]	I[A]
V60	CuSn8P	450	5	167	50	10
V65_1	CuSn8P	900	5	167	50	10
V65_2	CuSn8P	900	5	167	50	10
V63	Cu	450	5	167	50	10
V66_1	Cu	900	5	167	50	10
V66_2	Cu	900	5	167	50	10

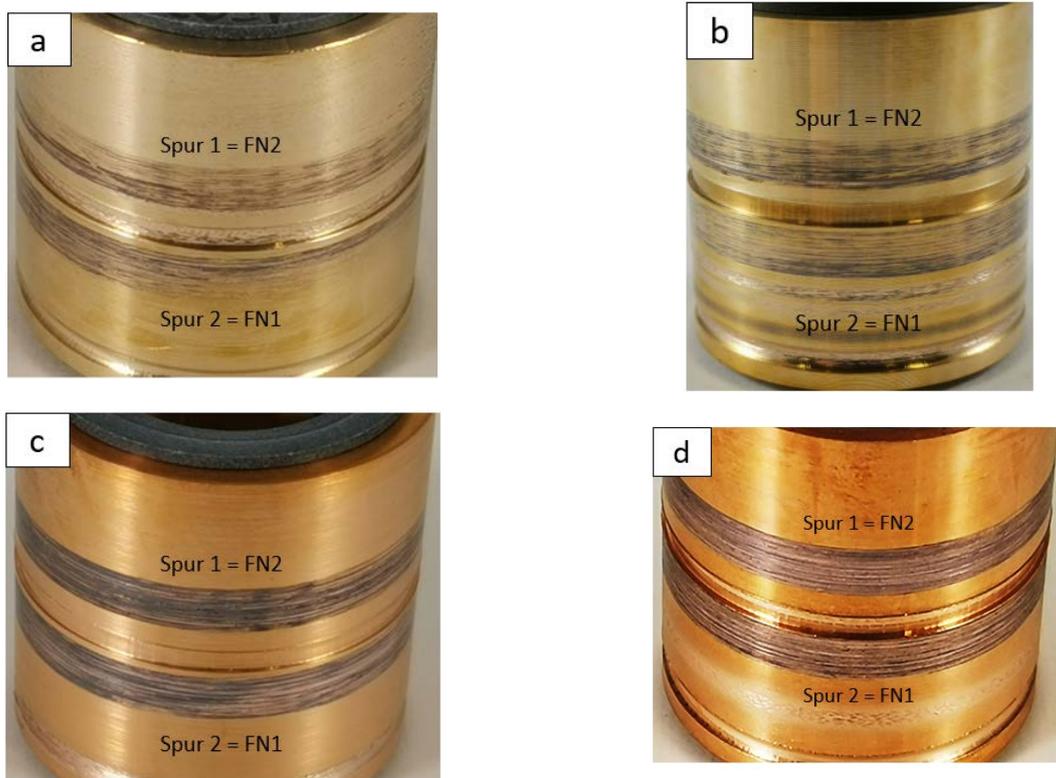


Abbildung 22: Makrobilder der Schleifringe auf (a), Bronze nach 450 km (V60), (b) Bronze nach 1800 km (V65), (c) Kupfer nach 450 km (V63), (d) Kupfer nach 1800 km (V66) Wegstrecke.

6.2.1. Abhängigkeit der Normal- und Reibkraftverläufe vom Gleitweg

Abbildung 23 zeigt die Verläufe der Normal- und Reibkräfte für die Gleitwege von 450- und 1800 km. Die Versuchsparameter der jeweiligen Versuche sind der Tabelle 8 zu entnehmen. Die 1800 km Versuche wurden aus Gründen der Praktikabilität in je zwei 900 km Versuche unterteilt. Die Bilder (a) und (b) die Normal- und Reibkraftverläufe der Versuche mit 450 km Gleitweg. Die Normalkräfte zeigen nach dem Einlauf einen konstanten Verlauf im Bereich zwischen 4 N – 5 N. Die Reibkraft zeigt über einen Großteil der Versuchsdauer eine abfallende Tendenz und stabilisiert sich gegen Ende der Versuche bei einem Niveau von knapp 1 N. Die Reibkräfte zeigen über die gesamte Versuchsdauer ein sehr ähnliches Verhalten. Die Versuche mit 1800 km zeigen bis auf den Versuch 65_2 im Einlauf eine abfallende Normalkraft mit einer dazu ansteigenden Reibkraft. Durch die geringer Normalkraft zu Beginn des Versuches stellt sich bei diesem Versuch zu Beginn eine höhere Reibkraft ein, welche sich über den gesamten Verlauf der Messung nur geringfügig ändert. Die Reibkräfte erreichen sowohl nach 450- als auch bei 1800 km im Verlauf der Messung ein Niveau von 0,6 N und verlaufen bis zum Ende der Versuche konstant. Die Kraftverläufe zeigen während der Messung geringe Schwankungen. Schwankungen dieser Größenordnung sind auf Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit und Vibrationen während des Versuches, welche durch Unwuchten der Schleifringe hervorgerufen werden zurückzuführen. Die Massenverluste der Schleifkohlen nach den unter dem Punkt 6.2.1 beschriebenen Versuchen sind in der Tabelle 9 angegeben. Der Masseverlust der Kohlebürsten ist wie zu erwarten bei längeren Gleitwegen höher als bei geringeren Gleitwegen. Die Kohlen bei den Versuchen auf Bronze zeigen einen geringeren Masseverlust als welche die gegen einen Schleifring aus Kupfer getestet wurden.

Tabelle 8: Versuchsparameter der Versuche mit unterschiedlichen Gleitwegen

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte[%]	I[A]
V60	CuSn8P	450	5	167	50	10
V65_1	CuSn8P	900	5	167	50	10
V65_2	CuSn8P	900	5	167	50	10
V63	Cu	450	5	167	50	10
V66_1	Cu	900	5	167	50	10
V66_2	Cu	900	5	167	50	10

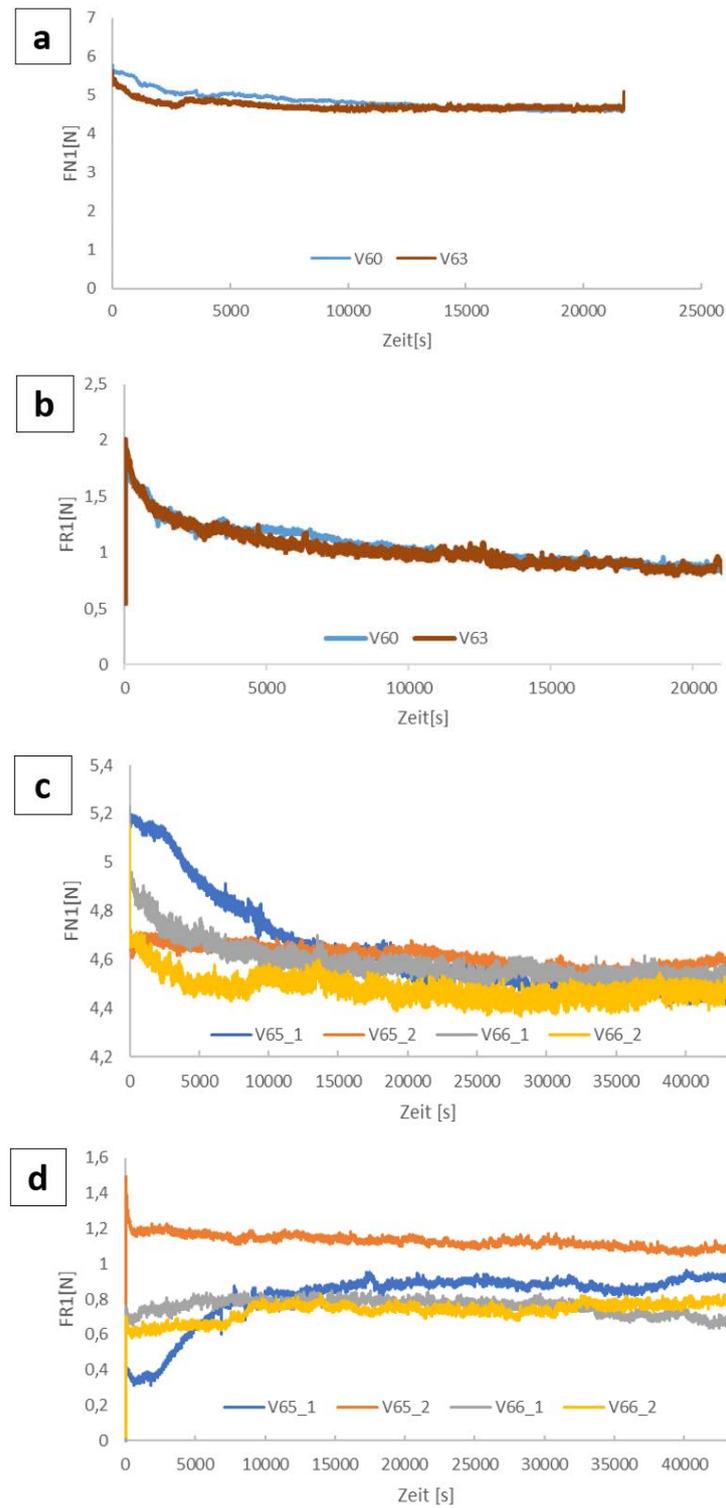


Abbildung 23: Gegenüberstellung unterschiedlicher Gleitwege auf Bronze und Kupfer. (a) F_N Verlauf auf Bronze 450 km (V60) und Kupfer 450 km (V63); (b) F_R Verlauf Bronze (V60) und Kupfer 450 km (V63); (c) F_N Verlauf auf Bronze 1800 km (V65_1 u. V65_2) und Kupfer 1800 km (V66_1 u. V66_2), (d) F_R Verlauf auf Bronze 1800 km (V65_1 u. V65_2) und Kupfer 1800 km (V66_1 u. V66_2)

Tabelle 9: Masseverluste der Kohlebürsten in Abhängigkeit des Gleitweges

Versuchs Nr.	Δm Kohlebürsten [g]	Werkstoff	Gleitweg [km]
V60	0,0162	CuSn8P	450
V65_1	0,0503	CuSn8P	1800
V65_2			
V63	0,0236	Cu	450
V66_1	0,0747	Cu	1800
V66_2			

6.2.2. Änderung der Topografie in Abhängigkeit des Gleitweges

Um die Auswirkungen der Versuchsdauer auf den Verschleiß der Ringe zu bestimmen, wurden eine 3D sowie eine 2D Topografie an den Proben nach 0 km (0 h), 450 km (6 h) und 1800 km (24 h) Gleitweg durchgeführt. Die hierzu verwendeten Proben sind in der Tabelle 10 angeführt.

Abbildung 24 zeigt die mit Alicona Infinite Focus G5 bestimmte 3D Topografie von Bronze- und Kupferproben. Die Bilder bei 0 km zeigen die Topografie vor dem Versuch. Die nachfolgenden Bilder stellen die Topografie nach 450 km und 1800 km Versuchsdauer auf Bronze und Kupfer gegenüber. Die Messung der Bronze zeigt nach der Wegstrecke von 450 km eine Erhöhung der Rauheit gegenüber dem Ausgangszustand. Nach dem Weg von 1800 km stellt sich eine Glättung der Oberfläche ein. Die Versuche auf Kupfer zeigen vor der Messung eine geringere Rauheit der Oberfläche. Die Oberfläche erfährt im Laufe der 450 km eine Einglättung. Im weiteren Verlauf erfolgt, eine einen Anstieg des Rz-Wertes auf das 4-fache des Ausgangswertes, was auf einen starken Verschleiß des Kupfers hindeutet.

Zur Verifizierung des Verschleißes wurde zusätzlich ein 2D Profil der Oberflächen zur Verschleißbestimmung aufgenommen.

Abbildung 25 und Abbildung 26 lassen die Unterschiede der Oberflächentopografie nach den jeweiligen Messzeiten erkennen. Die 2D Daten zeigen einen fortschreitenden Verschleiß der Werkstoffe bei steigendem Gleitweg. Hohe Temperaturen im Kontakt können durch thermische Ausdehnungen zu einem erhöhten Verschleiß der Oberfläche führen [44] [45].

Tabelle 10: Darstellung der Versuchsbedingungen der für die 3D und 2D Messung herangezogenen Versuche.

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte[%]	I[A]
V60	CuSn8P	450	5	167	50	10
V65_1	CuSn8P	900	5	167	50	10
V65_2	CuSn8P	900	5	167	50	10
V63	Cu	450	5	167	50	10
V66_1	Cu	900	5	167	50	10
V66_2	Cu	900	5	167	50	10

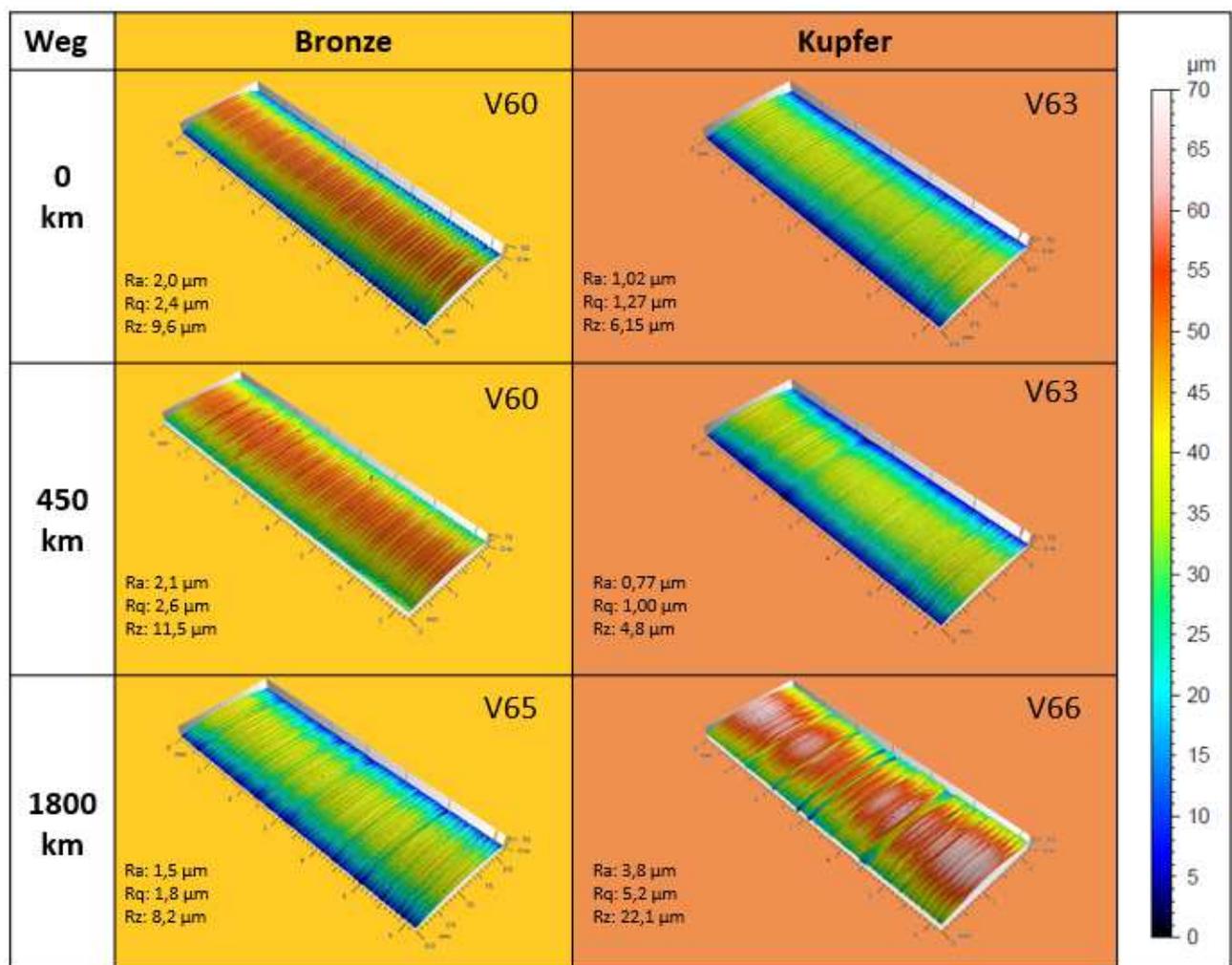


Abbildung 24: Darstellung der Ergebnisse der 3D Topografie der Versuche auf Bronze und Kupfer nach 0 km (0 h), 450 km (6 h) und 1800 km (24 h) Gleitweg.

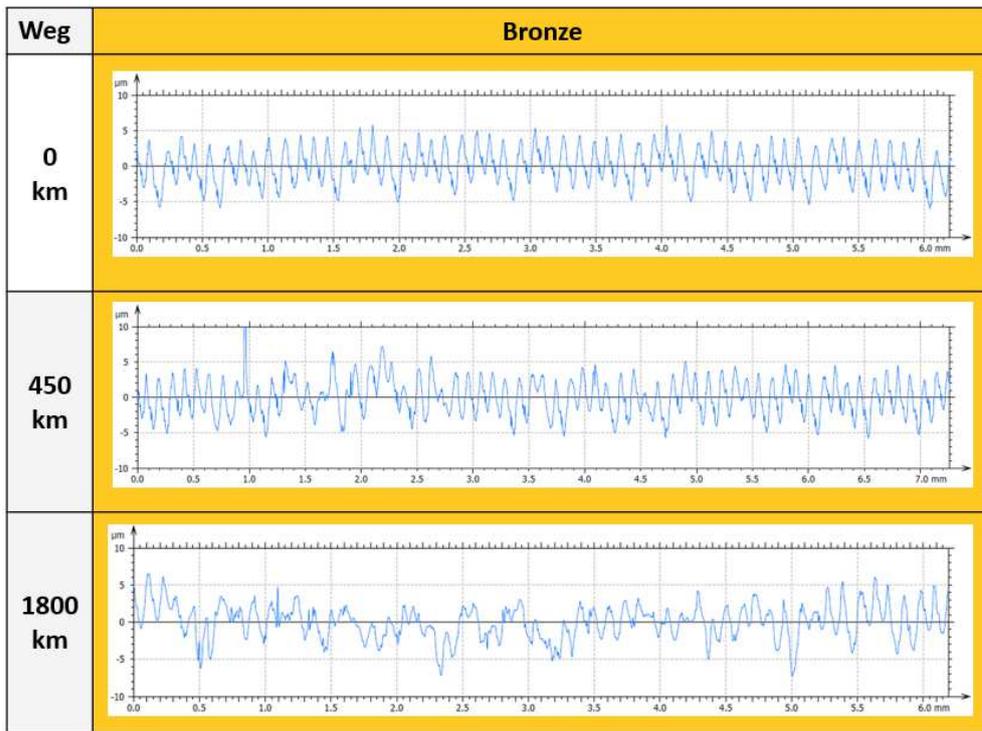


Abbildung 25: Ergebnisse der 2D Topografie auf Bronze für 0 km (V60), 450 km (V60) und 1800 km V65.

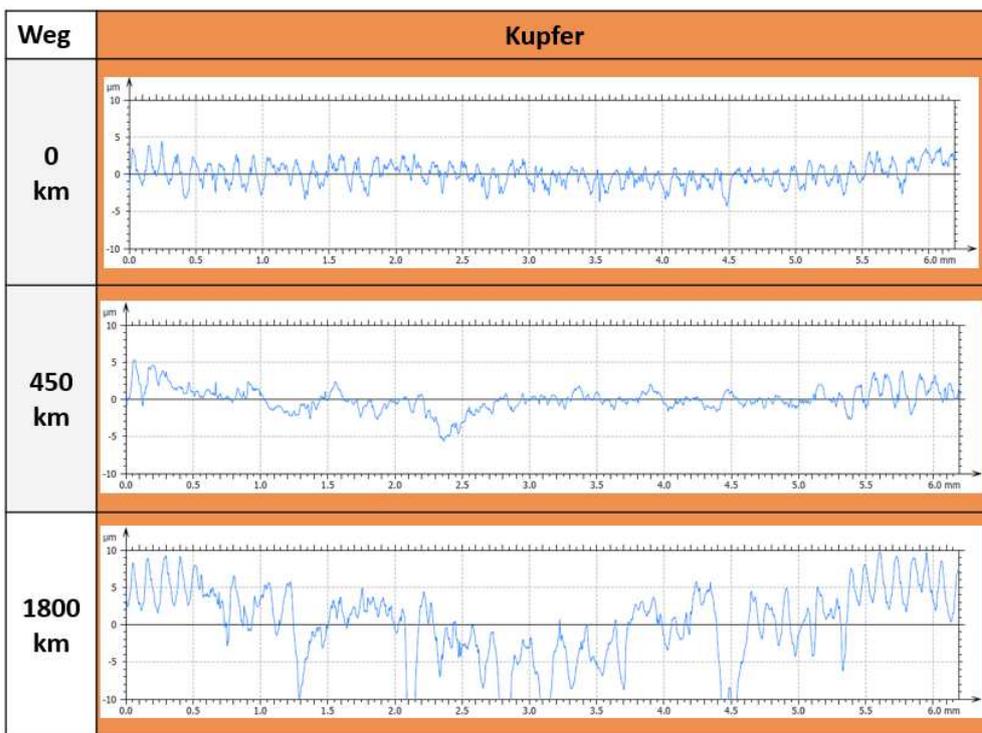


Abbildung 26: Darstellung der Ergebnisse der 2D Topografie der Versuche auf Kupfer nach 0 km (V63), 450 km (V63) und 1800 km (V66) Versuchsdauer.

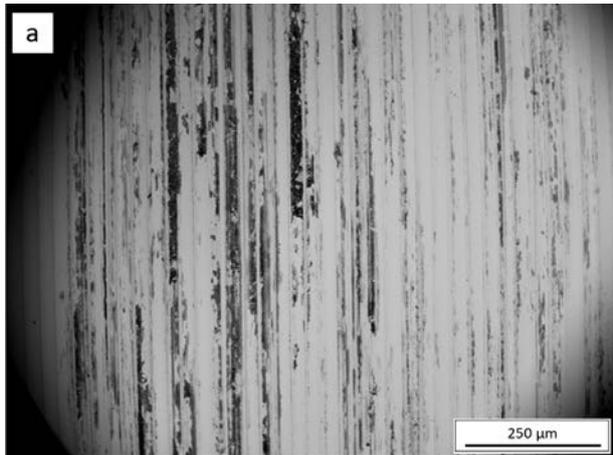
6.2.3. REM Analysen der Spuren nach unterschiedlichen Gleitwegen

Die Abbildung 27 zeigt in den Bildern (a) und (b) die Übersichtsaufnahmen der Spur auf Bronze (V60) und Kupfer (V63) nach einem Gleitweg von 450 km. Die Spur im Bild (a) zeigt eine hohe Zahl an vereinzelt Stellen mit einer Schichtbildung. Die Mehrzahl der erkennbaren Ablagerungen weisen aufgrund ihrer dunklen Erscheinung auf eine funktionsfähige Gleitschicht an diesen Stellen hin. Bild (c) zeigt einen solchen Teil einer Spur. Auf dem Grundmaterial ist eine aufgewachsene Schicht zu erkennen. Die einzelnen Partikel erscheinen zum Großteil scharfkantig und nicht abgerundet vereinzelt sind an der Oberfläche ebenso abgerundete Partikel zu erkennen. Die kleinen hell erscheinenden Partikel erscheinen scharfkantig und weisen auf einen Auswurfmechanismus an Grundmaterial hin. Die Bilder (b) und (d) zeigen eine Spur auf Kupfer im Überblick und eine Vergrößerung eines Bereichs der Spur. Es zeigen sich in der Übersicht große mit einer Schicht bedeckten zusammenhängende Regionen. Die Spur zeigt teilweise helle und dunkle Kontraste was auf eine Ungleichmäßige Schichtdicke hindeutet. Die Spur in Bild (d) zeigt einen umgeformten Bereich der Oberfläche in dem Material aus der Oberfläche vermischt mit Material aus der Kohlebürste zu erkennen ist. Links und rechts der Struktur in der Mitte des Bildes ist ein Verschmieren des Werkstoffes mit sehr feinen abgerundeten Körnern zu erkennen, Scharfkantige Partikel sind nicht zu erkennen.

Abbildung 28 zeigt in den Bildern (a) und (b) die Übersicht über die Spur auf Bronze (V65) und auf Kupfer (V66) nach einem Gleitweg von 1800 km. Die Spur in Bild (a) weist eine geringe Zahl an Stellen auf an der sich eine kontinuierliche Schicht gebildet hat, hauptsächlich sind einzelne schmale Spuren zu erkennen Die Spur in Bild (b) zeigt breite Bereiche mit einer kontinuierlichen Spur. Bild (c) zeigt einen Ausschnitt der Spur auf Bronze. Es zeigen sich Partikel unterschiedlicher Größe. Die Partikel erscheinen Teils abgerundet und zum Teil scharfkantig und liegen lose an der Oberfläche eine Abrundung der Partikel kann festgestellt werden, weiter zeigt sich im Bereich der Schicht verschmiertes und deformiertes Grundmaterial mit feinen abgerundeten Strukturen.

Die Spur in Bild (d) zeigt ein inhomogenes Bild an der Oberfläche und eine ungleichmäßige Dicke. Die Partikel erscheinen scharfkantig und nicht abgerundet. Das Grundmaterial erscheint teils verschmiert und zerrfurcht. Die Partikel an der Oberfläche und das zerrfurchte Bild der Oberfläche weisen auf einen Verschleißmechanismus mit Partikelwurf hin.

Bronze (V60)



Kupfer (V63)

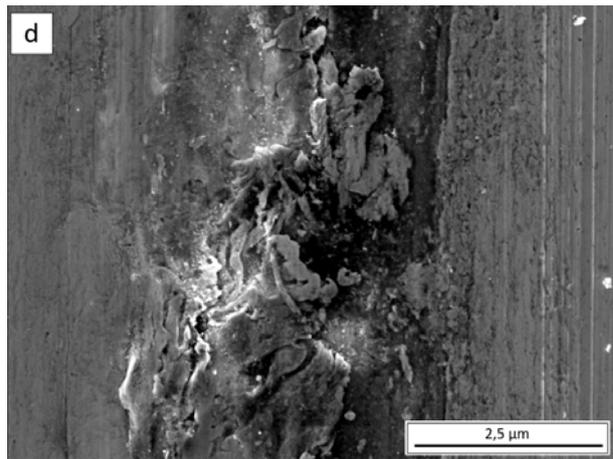
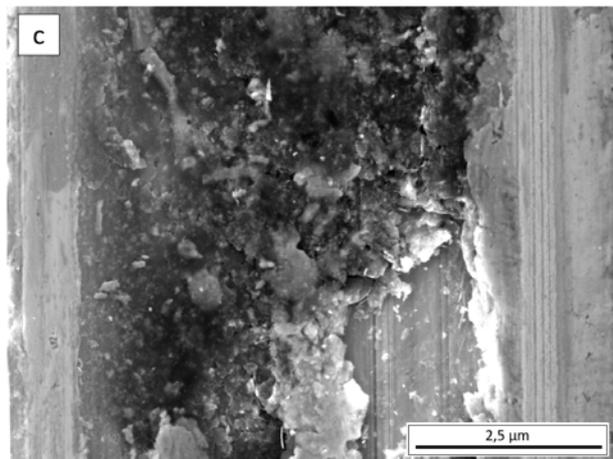
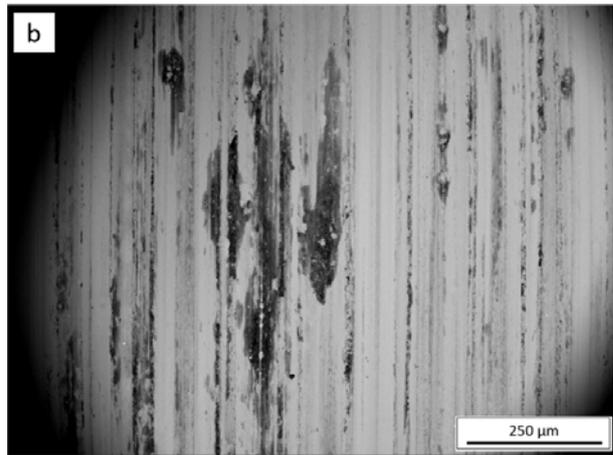
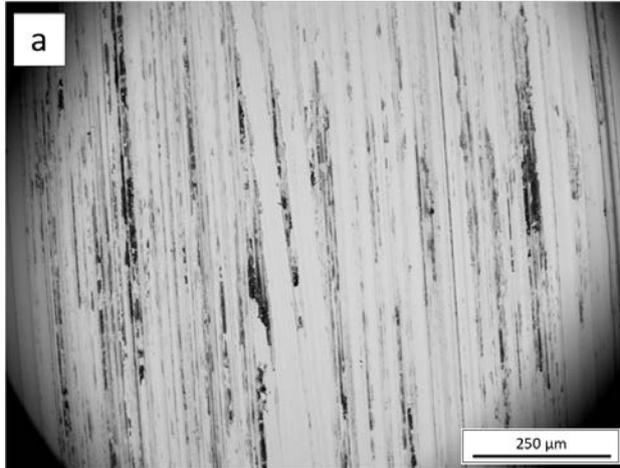
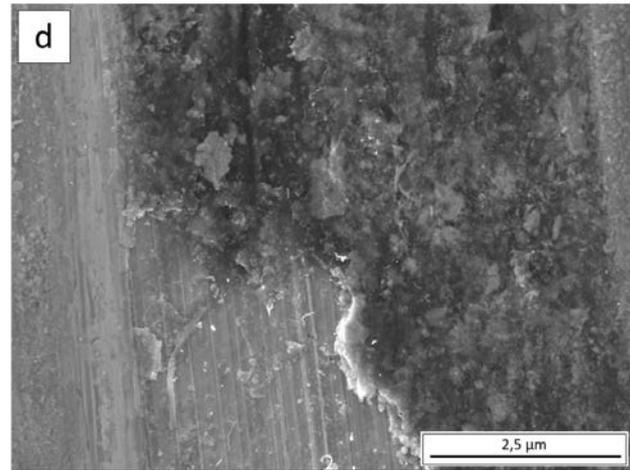
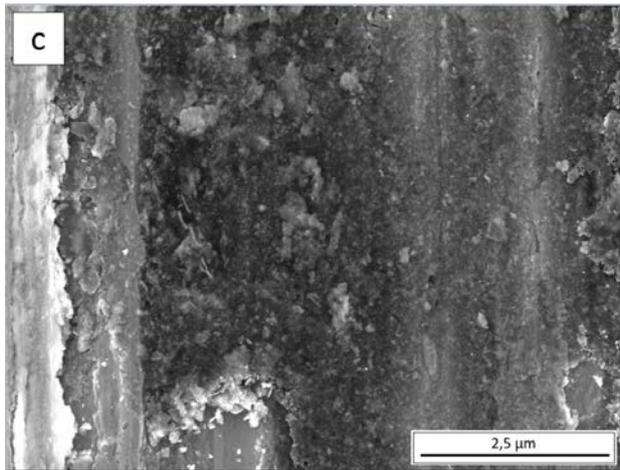
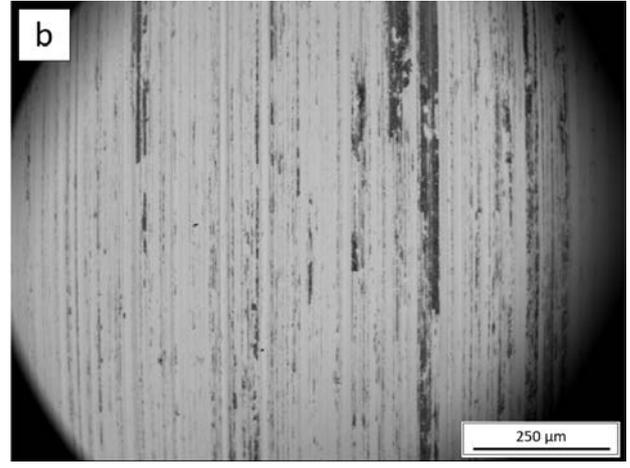


Abbildung 27: Darstellung des Einflusses des Gleitweges von 450 km (a), (c) Bronze, (b), (d) Kupfer.

Bronze (V65)



Kupfer (V66)

**Abbildung 28:** Auswirkung des Gleitweges von 1800 km auf (a), (c) Bronze; (b), (d) Kupfer

6.2.3.1. EDX Analytik der Spuren auf Kupfer und Bronze nach 1800 km Gleitweg

Die Messungen wurden im Zuge der Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt. Die Analyse der Schichten erfolgte mit einem Detektor des Typs X-Flash 6130 der Firma Bruker. Für die Messungen wurden die Versuche mit einer Wegstrecke von 1800 km auf Bronze und auf Kupfer ausgewählt.

Abbildung 29 zeigt im Bild (a) die Messpunkte für die EDX Analyse der Spur des Versuches mit einem Gleitweg von 1800 km auf Bronze. Die Bilder (b) und (c) zeigen die Ergebnisse für einzelnen Messpunkte. Kupfer und Kohlenstoff stellen die Hauptkomponenten an der Oberfläche dar. Als Spot 1 wurde ein der Oberfläche liegender Partikel aufgrund seiner auffälligen Erscheinung ausgewählt. Neben Kohlenstoff und Kupfer konnte ein Anteil von 10 Atom% Wolfram gemessen werden. Als Hauptkomponenten in Spot 2 konnten C, Cu und Sauerstoff identifiziert werden. Sie stellen die Hauptkomponenten der Bürsten und der Probe dar. Auffälligkeiten wie in Spot 1 konnten nicht festgestellt werden. In Spot 3 konnte neben den zu erwarteten Elementen wie C, Cu und O₂ ein im Vergleich zu den weiteren Messpunkten höherer Gehalt an S gemessen werden. Die Messung im hellen Bereich bei Spot 4 ergab für diesen Bereich den höchsten Gehalt an Kupfer und kann somit dem Grundmaterial zugeordnet werden.

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse der EDX Analytik der Spur auf Kupfer nach einem Versuch mit einem Gleitweg von 1800 km. Bild (a) zeigt wiederum die Position der einzelnen Messpunkte. Die Bilder (b) und (c) zeigen wiederum die Anteile der Elemente in den gemessenen Bereichen. Die Messung in Spot 1 ergab neben einem hohen Anteil an C auch einen hohen Anteil an W. Der Hauptbestandteil des Materials in Spot 2 wird von C und Cu gestellt, bei den weiteren gemessenen Elementen zeigten sich hier keine auffällig erhöhten Anteile. In Spot 3 konnte ein Verhältnis von S und W von 2:1 festgestellt werden, was auf die Anwesenheit von WS₂ als Trockenschmierstoff in der Schleifkohle hinweist. Die Messungen der beiden Elemente wurden in Bild (d) explizit dargestellt.

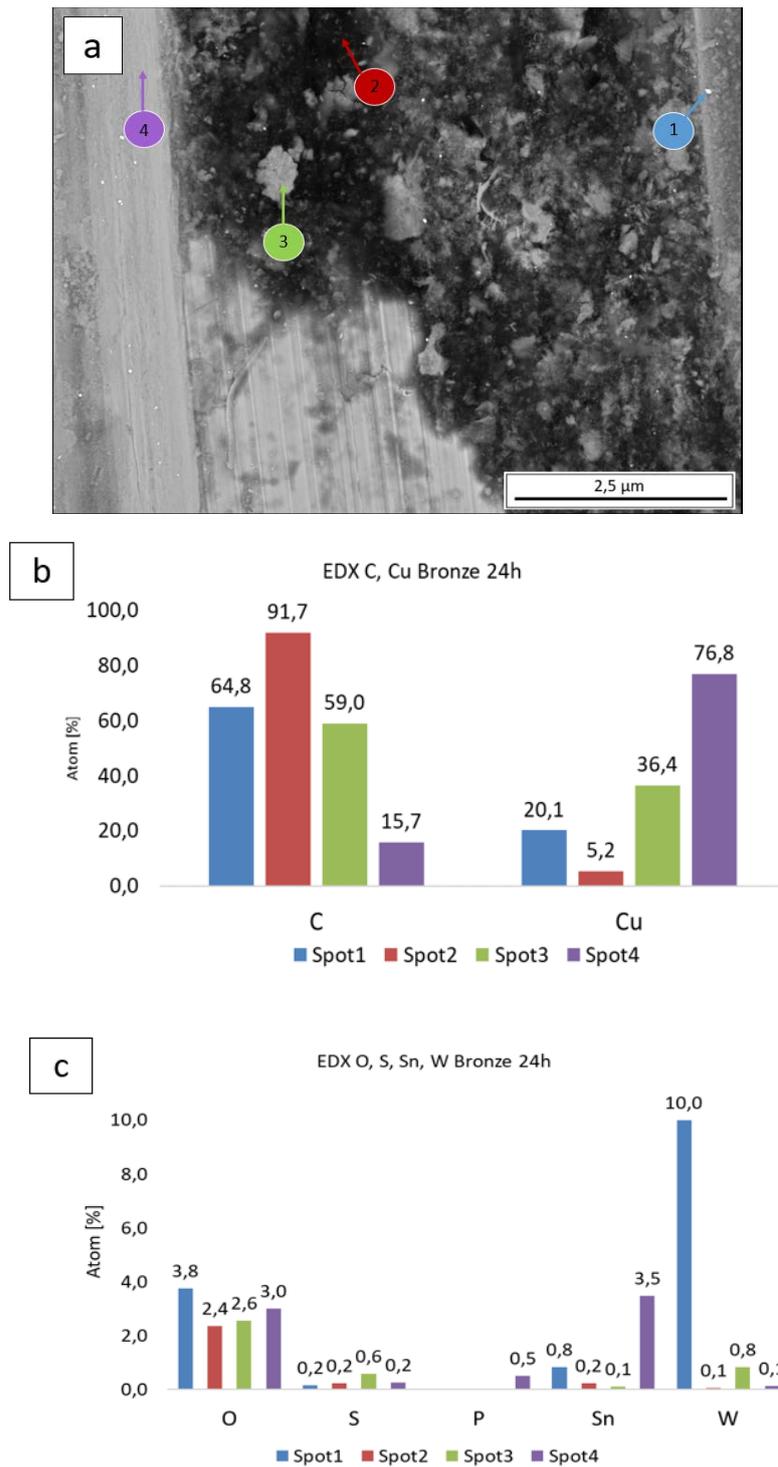


Abbildung 29: Ergebnisse der EDX Messung der Spur auf Bronze für 24 h (V65) (a) Positionsangabe Messspots, (b) Ergebnis Atom% C und Cu, (c) Ergebnis Atom % O, S, Sn, W

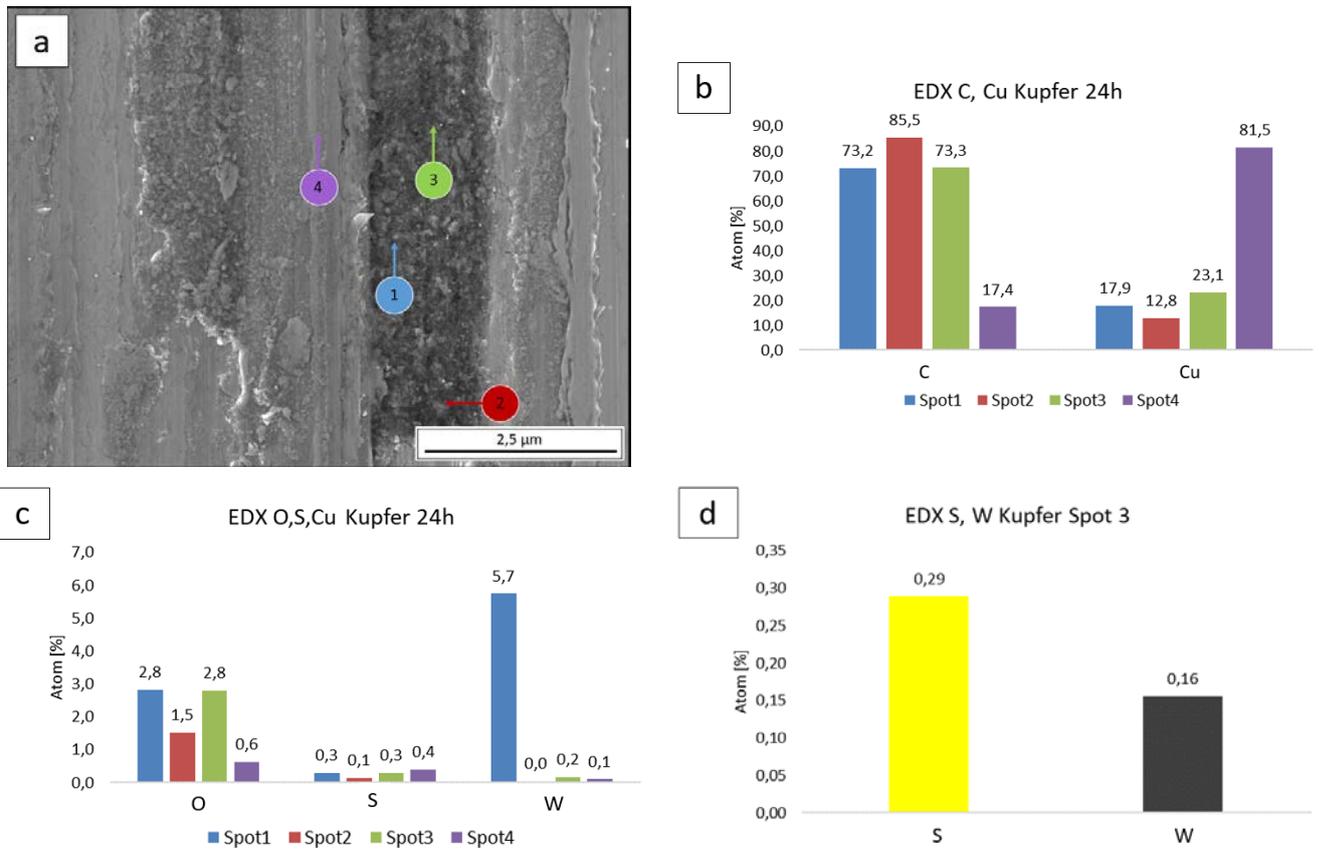


Abbildung 30: EDX Messung der Spur auf Kupfer für 24h (V66). (a) Positionsangabe Messspots, (b) Atom% C, Cu; (c) Atom % O, S, Cu; (d) Verhältnis Atom % S zu W

6.2.3.2. FIB-Schnitte der Spuren

Die Auswirkung der mechanischen Beanspruchung in der Kontaktzone und der Atmosphäre auf den Werkstoff wurde anhand der Kupferproben untersucht. Zu diesem Zweck wurden FIB-Schnitte von Spuren auf Kupferproben mit Versuchen unterschiedlicher Gleitwege (V63, V66) angefertigt. Die Versuchsbedingungen sind in der Tabelle 11 angegeben.

Abbildung 31 (a) zeigt einen FIB-Schnitt einer Kupferprobe vor der Durchführung des Versuches V63. Es zeigt sich bis in eine Tiefe von 2 μm eine sehr feine Kornstruktur, was auf einen hohen Umformungsgrad des Materials bei der Bearbeitung schließen lässt.

Unterhalb der stark verformten Schicht zeigt sich ein deutlich grobkörnigeres Gefüge mit einer Korngröße von ca. 2 μm . Bild (b) zeigt einen FIB-Schnitt nach der Durchführung von Versuch V63. Innerhalb des blau gekennzeichneten Bereiches ist die Schicht deutlich zu erkennen und weist an dieser Stelle eine Dicke von ca. 3 μm auf und zeigt stellenweise Tendenzen der Ablösung vom Untergrund. Unterhalb der gebildeten Schicht ist ein stark deformiertes Gefüge zu erkennen. Im Kontaktbereich der Schicht mit dem Metall zeigt sich eine Struktur mit sehr feinen Körnern. Ebenso sind Körner in der Größenordnung von ca. 2 μm vorzufinden, was auf ein beginnendes Kornwachstum durch den erneuten Energieeintrag hindeuten kann.

Abbildung 32 zeigt in Bild (a) den FIB-Schnitt durch die Kupferprobe vor dem Versuch mit einem Gleitweg von 1800 km. Die Probe zeigt ein sehr uneinheitliches stark deformiertes Gefüge bis in etwa eine Tiefe von 3 μm . Unterhalb dieses Bereiches ist das Ausgangsgefüge zu erkennen. Bild (b) zeigt den Schnitt durch die Spur nach dem Versuch mit einem Gleitweg von 1800 km. Die gebildete Schicht weist eine ungefähre Dicke von 1 – 2 μm auf. Direkt im Kontaktbereich zwischen Schicht und Grundmaterial zeigt sich eine Schicht aus sehr kleinen Körnern. Unterhalb dieser ist ein stark deformiertes Grundmaterial unterschiedlicher Korngrößen erkennbar.

Tabelle 11: Darstellung der Versuchsbedingungen der für die FIB- Schnitt herangezogenen Proben

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte[%]	I[A]
V63	Cu	450	5	167	50	10
V66_1	Cu	900	5	167	50	10
V66_2		900	5	167	50	10

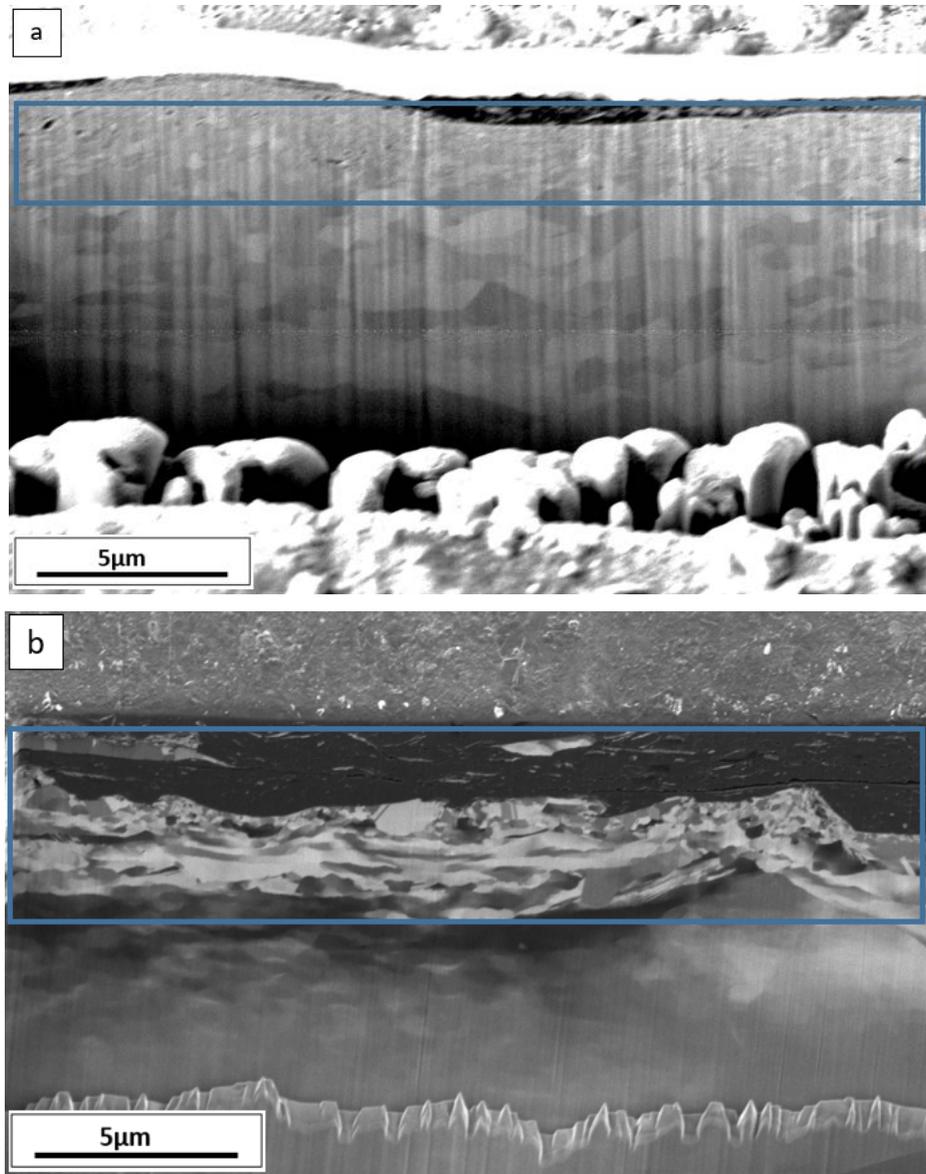


Abbildung 31: FIB–Schnitte auf Kupfer nach 450 km Gleitweg (V63). (a) Gefüge unter der Drehriefe vor dem Versuch, (b) Gefüge nach dem Versuch unter der Spur

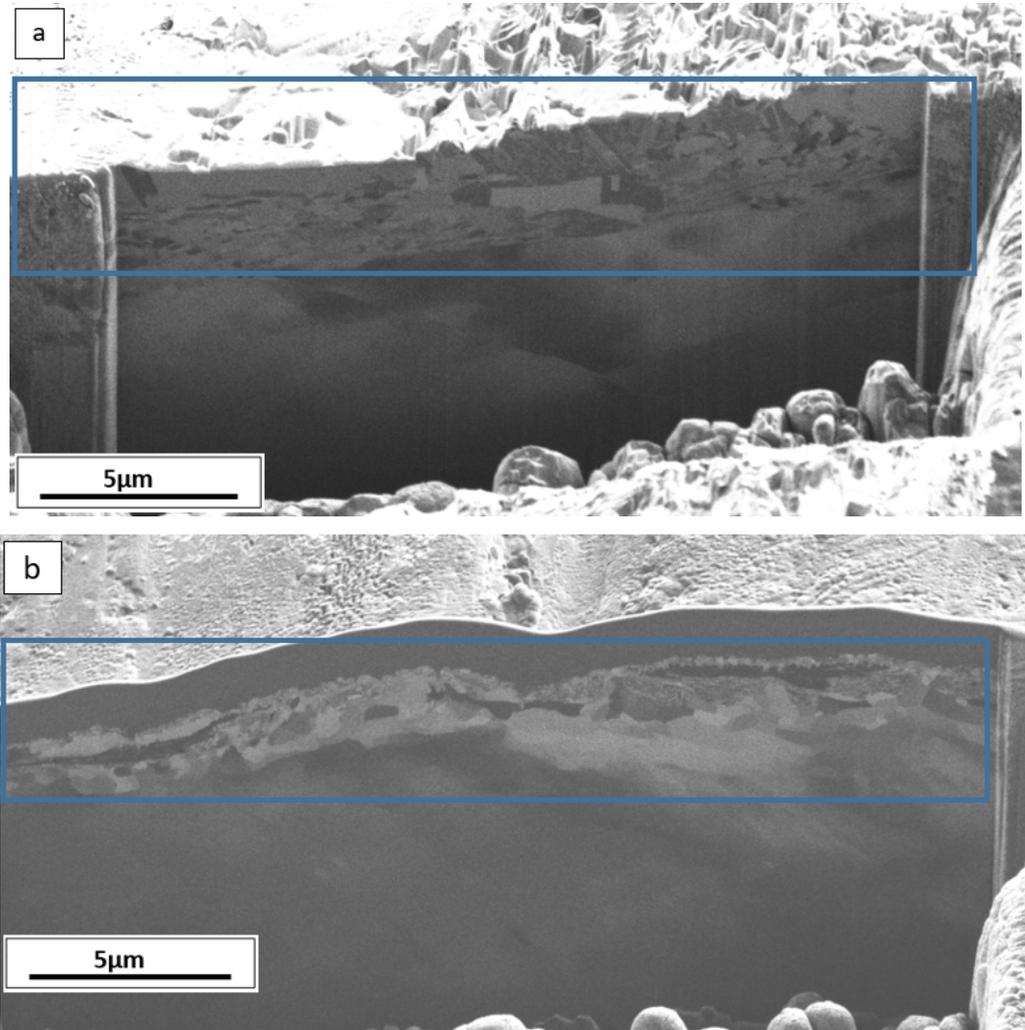


Abbildung 32: FIB–Schnitt auf Kupfer nach einem Gleitweg von 1800 km (V66). (a) Gefüge unter der Drehriefe vor dem Versuch, (b) Gefüge unter der Spur nach dem Versuch

6.3. Einfluss salzhaltiger Atmosphäre auf das tribologische System

6.3.1. Makroskopische Betrachtungen der Versuche bei Salz-haltiger Atmosphäre

Die Bilder (a) und (b) der Abbildung 33 zeigen die Versuche V67 und V68 in salzhaltiger Atmosphäre die Versuchsbedingungen zu diesen beiden Versuchen wurden bereits in der Tabelle 13 angegeben. Die in (a) gezeigte Bronzeprobe zeigt eine auffällige blaue Färbung an der Oberfläche. Die blaue Färbung weist auf die Bildung von Atacamit ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) an der Oberfläche und in den Spuren hin. Die Spuren zeigen ein helles Erscheinungsbild was auf die Kristallisation von Salzen an der Oberfläche der Probe zurückzuführen ist. Die Spuren erscheinen über die gesamte Breite gleichmäßig was auf eine stabile Kontaktsituation und Schichtbildung hindeutet. Bild (b) zeigt den auf Kupfer durchgeführten Versuch in salzhaltiger Atmosphäre. Die Probe zeigt eine dunkle Färbung der Oberfläche was auf das Aufwachsen einer dickeren Oxidschicht aus Cuprit (Cu_2O) hindeutet. Die Spuren erscheinen hell und lassen eine Furchenbildung vermuten. Das helle Erscheinungsbild der Spuren ist hier auf die Kristallisation von Salzen an der Oberfläche zurückzuführen. Die Spuren zeigen eine gleichmäßige Breite über den gesamten Kontaktbereich was auf eine stabile Kontaktsituation und Schichtbildung hindeutet.

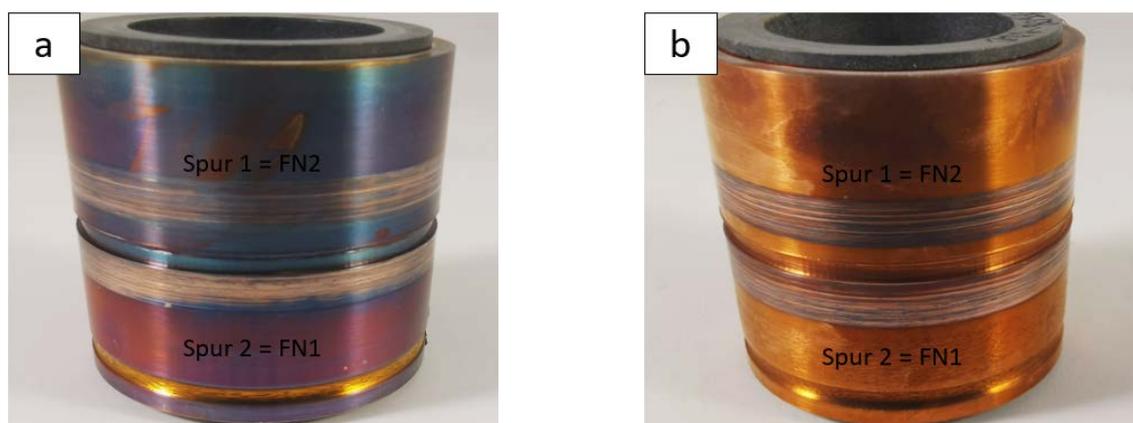


Abbildung 33: Darstellung der unter Salz-haltiger Bedingungen durchgeführten Versuche:
(a) Bronze (V67), (b) Kupfer (V68)

6.3.2. Abhängigkeit der Kraftverläufe vom salzhaltiger der Atmosphäre

Abbildung 34 zeigt im Bild (a) die Normalkraftverläufe und in Bild (b) die Reibkraftverläufe der Versuche mit synthetischem Meerwasser auf Bronze und Kupfer. Die Normalkräfte zeigen nach einer kurzen Einlaufphase von ca. 2500 s einen Verlauf mit geringen Schwankungen, die Normalkräfte zeigen während dem gesamten Versuch eine leicht abfallende Tendenz. Die Reibkräfte zeigen nach der Einlaufphase im Gegensatz zu der Normalkraft eine leicht ansteigende Tendenz über die gesamte Zeitdauer der Versuche. Die Reibkräfte erreichen am Ende des Versuchs ein Niveau von ca. 0,6 N. Schwankungen im Reibkraftverlauf resultieren aus geringfügigen Schwankungen der Luftfeuchtigkeit und aus Vibrationen während des Versuches. Der Anstieg der Reibkräfte kann auf den Abfall der Normalkraft. Die weiteren Versuchsbedingungen sind in Tabelle 12 angegeben.

Die Masseverluste der Kohlen nach den Versuchen in salzhaltiger Atmosphäre wurden direkt nach den Versuchen bestimmt.

Der Massenverlust bei dem Versuch auf einem Schleifring aus Bronze zeigte erwies sich als sehr gering. Der Massenverlust der Schleifkohle beim Versuch auf einem Kupferring zeigte einen wesentlich höheren Verschleiß. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 12: Versuchsparameter für Versuche bei feuchter Atmosphäre – Meerwasser und hohen Stromstärken

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte [%]	I[A]
V67Salz(V57)	CuSn8P	450	5	167	50	10
V68Salz(V59)	Cu	450	5	167	50	10

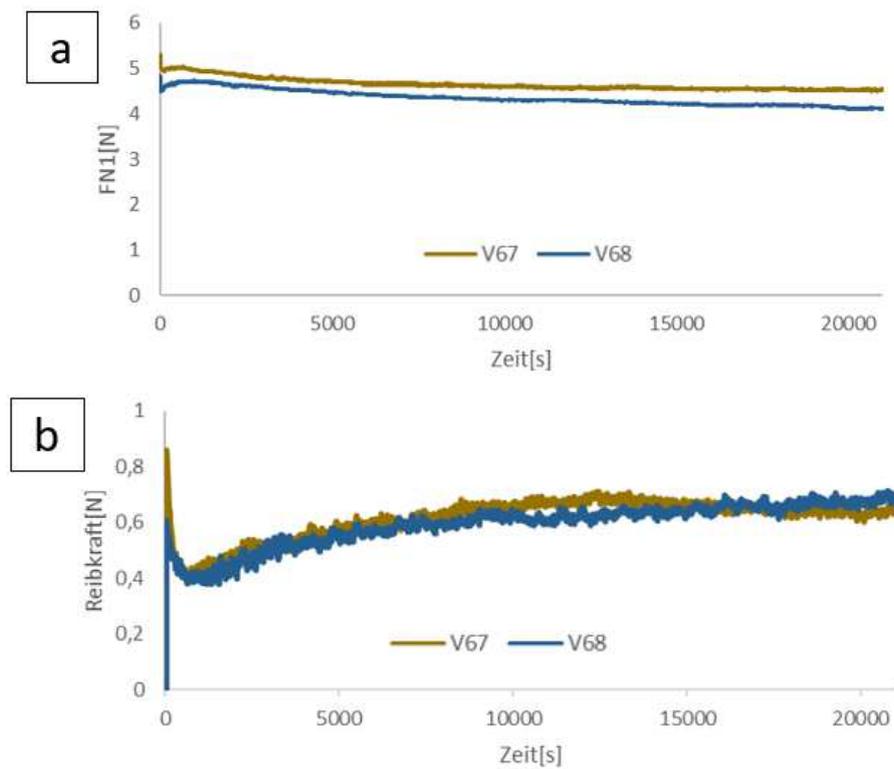


Abbildung 34: Gegenüberstellung der gemessenen Normalkräfte und Reibkräfte bei feuchter Atmosphäre (50 % rel. H), hohen Stromstärken und Meerwasser auf Bronze und Kupfer. (a) F_N Verlauf auf Bronze (V67 I = 10 A) und Kupfer (V68 I = 10 A); (b) F_R Verlauf Bronze (V67 I = 10 A), und Kupfer (V68 I = 10 A)

Tabelle 13: Ergebnisse der Bestimmung des Massenverlustes der Versuche bei salzhaltiger Atmosphäre.

Versuchs Nr.	Δm Kohlebürsten [g]	Werkstoff	Gleitweg [km]
V67Salz	0,0003	CuSn8P	450
V68Salz	0,0247	Cu	450

6.3.3. Änderung der Topografie der Schleifringe bei salzhaltiger Atmosphäre

Die Abbildung 35 zeigt die Oberflächentopografie der Proben aus Bronze und Kupfer vor und nach den Versuchen V67 und V68 im Vergleich. Die entsprechenden Versuchsparameter sind in der Tabelle 12 angegeben. Die Bronzeprobe zeigt eine geringe Erhöhung der Rauheit im Kontaktbereich der Kohlen und des Schleifrings im Vergleich zu der Messung vor dem Versuch. Die Probe aus Kupfer zeigt nach Beendigung des Versuches eine geringe Abnahme der Rauheit im Kontaktbereich der Kohlen und des Schleifrings.

Zur Verifizierung des Verschleißes wurde zusätzlich ein 2D Profil der Oberflächen zur Verschleißbestimmung aufgenommen die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt. Die Ergebnisse der 2D Messungen ergaben eine Abnahme der Rauheit an der Oberfläche der Proben beider Werkstoffe. Auf den Bronze- als auch den Kupferproben konnten Kerben in der Oberfläche nach den Versuchen festgestellt werden. Die Kupferprobe erfährt während des Versuches eine Glättung der Oberfläche bei gleichzeitig höherem Verschleiß im Vergleich zu der Probe aus Bronze.

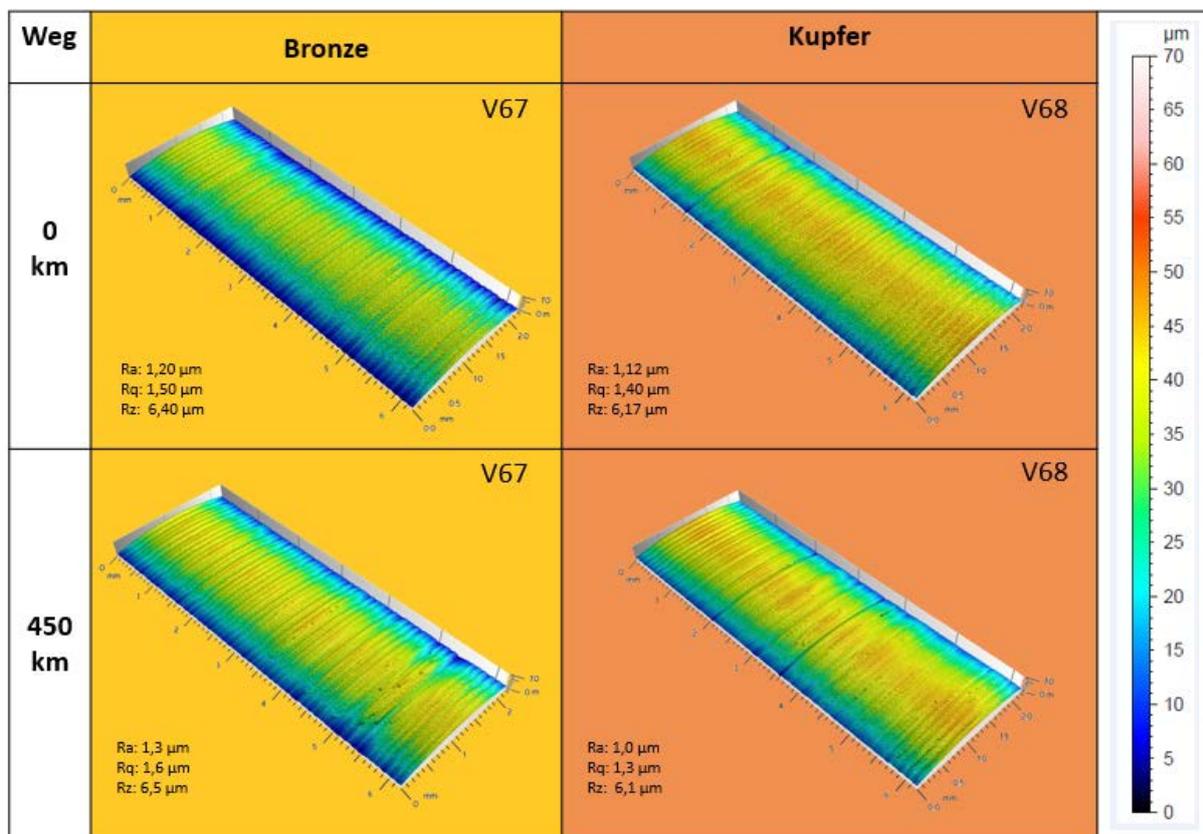


Abbildung 35: Darstellung der 3D Topografie der Versuche bei maritimer Umgebung nach 0 km, 450 km Gleitweg.

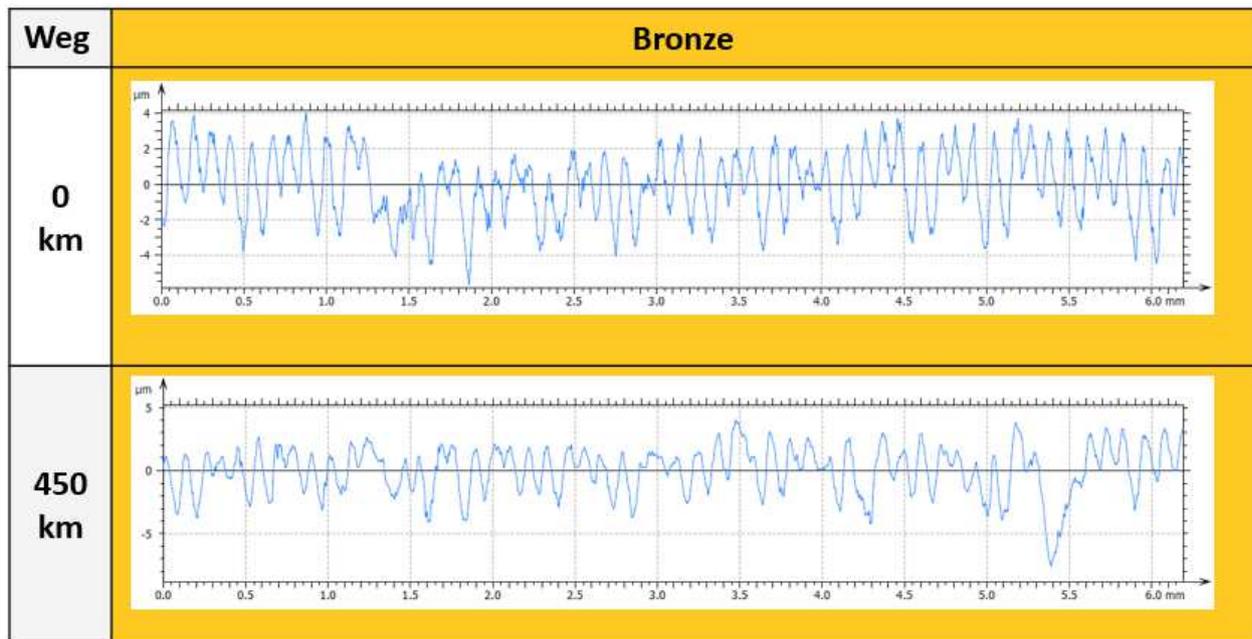


Abbildung 36: Ergebnisse der 2D Topografie auf Bronze für 0 km (V67), 450 km (V67) in salzhaltiger Atmosphäre.

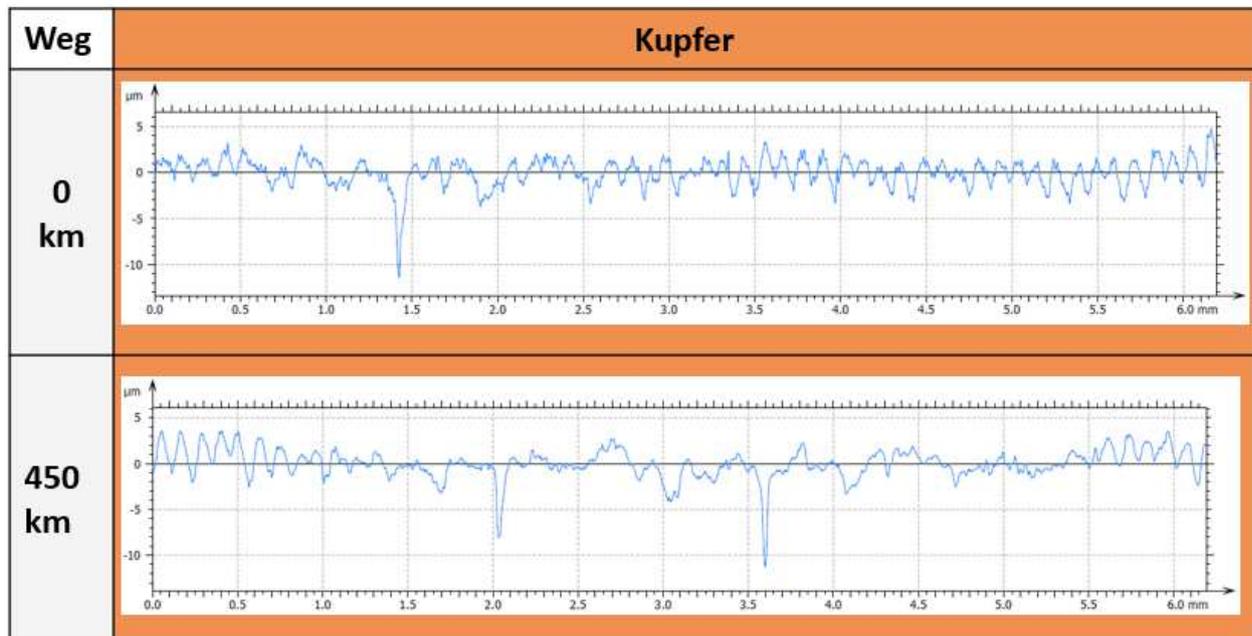
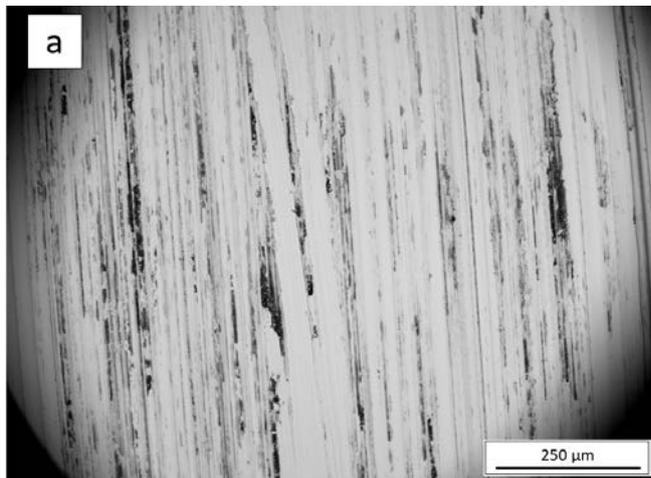


Abbildung 37: Darstellung der Ergebnisse der 2D Topografie der Versuche auf Kupfer nach 0 km (V68), 450 km (V68) in salzhaltiger Atmosphäre.

6.3.4. REM-Aufnahmen der Versuche bei Salz-haltiger Umgebung

Abbildung 38 zeigt die Übersicht über die Spur (a) Bronze (V67) und (b) Kupfer (V68). Die Versuchparameter zu den begutachteten Proben sind in Tabelle 12 angegeben. Die Spur in Bild (a) zeigt eine geringe Anzahl an bedeckten Bereichen und ein inhomogenes Bild der Spur. Bild (b) zeigt die Spur auf Kupfer, im Laufe des Versuches wurde über die Spurbreite an einigen Stellen eine deutliche Schicht ausgebildet. Die Spur in Bild (c) (V67) zeigt die Schicht auf Bronze. Die Schicht zeigt abgeflachte Strukturen und runde Partikel. Das Bild (d) (V68) zeigt eine Aufnahme der Schicht auf Kupfer. Innerhalb der Schicht erscheinen die Strukturen abgeflacht, neben der Schicht sind deutlich kleinere und scharfkantig wirkende Partikel zu erkennen. Die Spur stellt sich sehr hell und aus mehreren Lagen aufgebaut.

Bronze (V67)



Kupfer (V68)

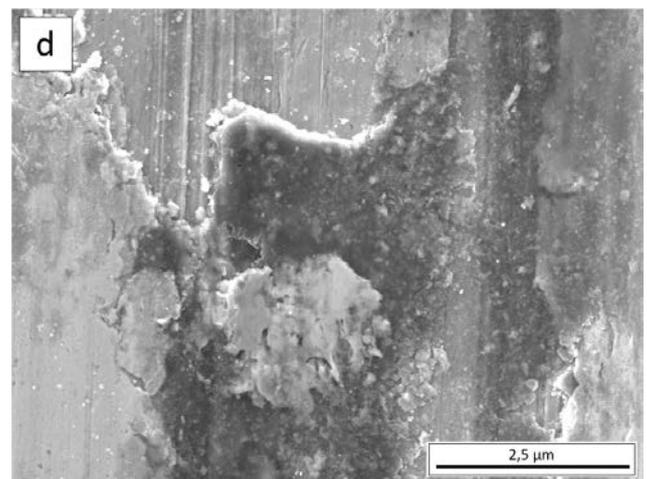
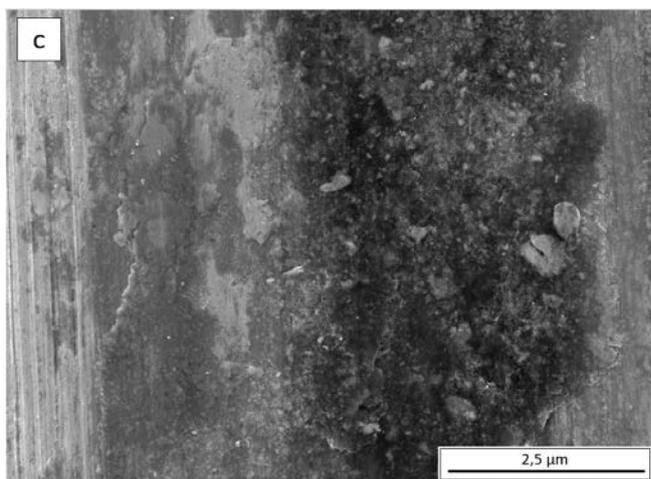
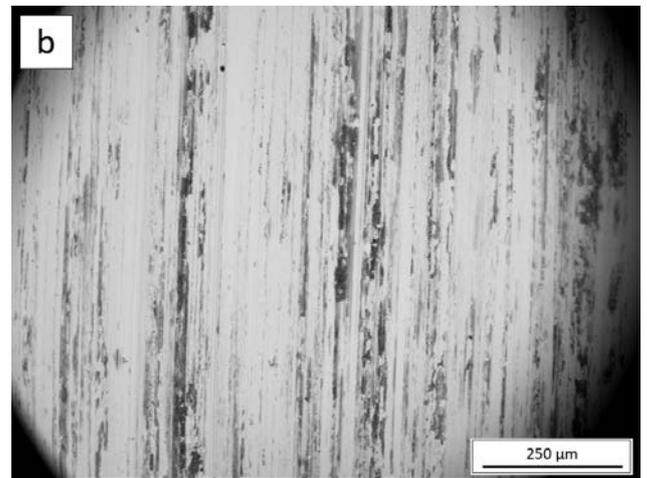


Abbildung 38: Auswirkungen von Salzwasser auf (a), (c) Bronze (V67); (b), (d) Kupfer (V68)

6.3.5. FIB-Schnitte

Der Einfluss der Atmosphäre auf das Gefüge wurde anhand der Kupferprobe mit dem Versuch V68 untersucht. Um eine Aufladung der Schicht vorzubeugen wurden die untersuchten Stellen der Probe mit Wolfram beschichtet. Die erzeugte Schicht stellt sich in den Aufnahmen als weißer Bereich an der Oberfläche der bzw. als weißer Streifen mit einer darunterliegenden einheitlichen grauen Fläche dar.

Abbildung 39 Bild (a) zeigt einen FIB-Schnitt der bearbeiteten Probenoberfläche. Das Gefüge zeigt einen hohen Grad der Verformung bis in etwa eine Tiefe von 5 μm : In einer Tiefe von 2,5 μm sind Durchmischungen der einzelnen Phasen zu erkennen. Bild (b) zeigt einen Schnitt durch die Spur nach einem Versuch in salzhaltiger Atmosphäre. An der Oberfläche ist eine gebildete Schicht mit etwa 1 μm Dicke zu erkennen. Im Kontaktbereich zwischen Schicht und Metall weist das Gefüge eine sehr geringe Korngröße auf. Unterhalb findet sich ein grobkörniges Gefüge, was auf ein mögliches Kornwachstum hinweist.

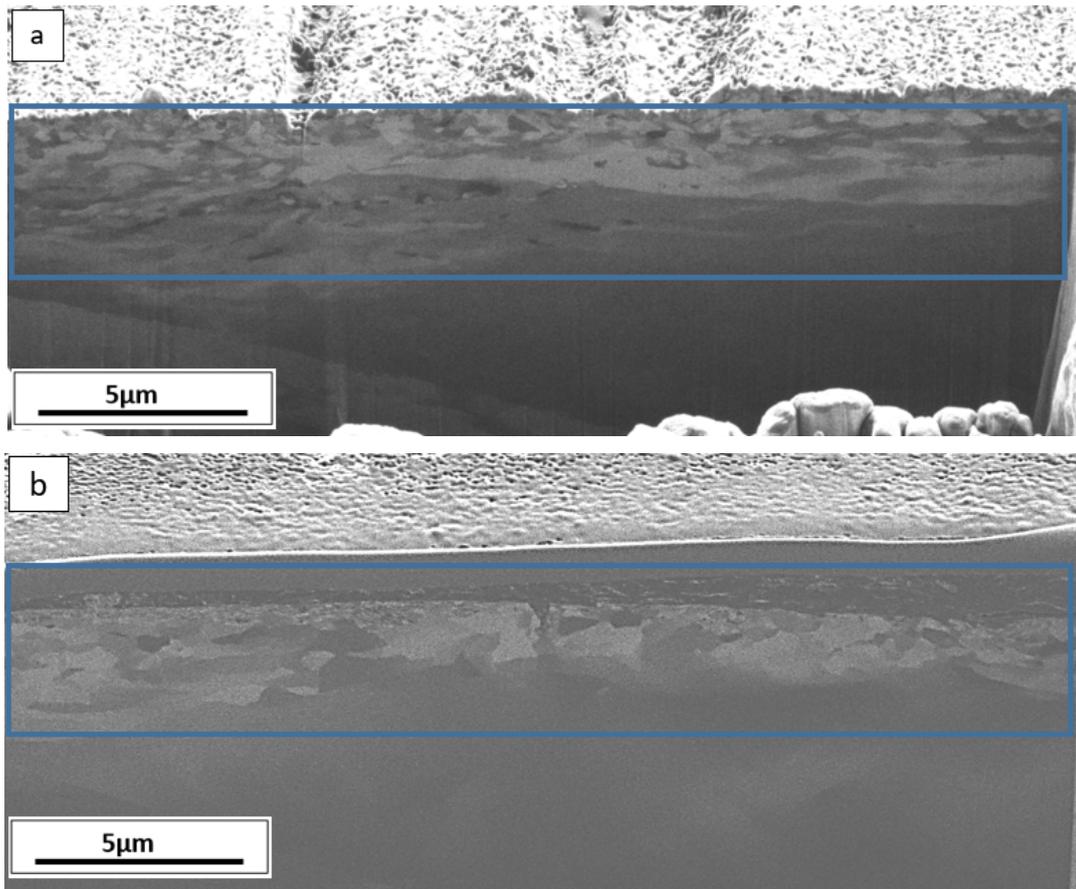


Abbildung 39: FIB–Schnitt auf Kupfer durch die Spur nach dem Versuch V68 nach 450 km Gleitweg in salzhaltiger Atmosphäre. (a) Gefüge unter Drehriefe vor dem Versuch V68, (b) Gefüge unter der Spur nach dem Versuch (V68)

6.4. Einfluss der Stromstärke auf das tribologische System

6.4.1. Kraftverläufe bei geringer Stromstärke

Abbildung 40 stellt die Versuche bei geringer Strombelastung auf Bronze und Kupfer gegenüber. Tabelle 14 zeigt die Versuchsparameter, während der beiden Versuche. Der Verlauf der Normalkraft im Versuch V58 zeigt über den Versuch hinweg eine leicht abfallende Tendenz und zeigt erst gegen Ende des Versuches eine Stabilisation. Die gemessene Reibkraft zeigt entsprechend dem Verlauf der Normalkraft auch erst gegen Ende des Versuches eine Stabilisation. Schwankungen in den jeweiligen Kraftverläufen sind auf geringe Schwankungen der Luftfeuchte sowie Vibrationen während des Versuchs zurückzuführen. Der Abfall der Normalkraft konnte auf eine ungleichmäßige Kontaktfläche der Schleifkohle zurückgeführt werden.

Die Stabilisierung der Normalkraft im Versuch V61 erfolgt nach einer kurzen Einlaufphase und zeigt über den gesamten Versuch ein stabiles Kraftniveau. Der Verlauf der Reibkraft zeigt bis zur Hälfte der Messdauer einen instabilen Kraftniveau mit Sprüngen im Kraftverlauf. Nach der Hälfte der Messdauer erfolgt eine Stabilisation der Reibkraft. Die Sprünge im Verlauf konnten auf eine instabile Kontaktsituation zwischen Kohlebürsten und Schleifringen zurückgeführt werden.

Tabelle 14: Versuchsparameter für Versuche bei feuchter Atmosphäre und geringer Stromstärke

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte [%]	I[A]
V58	CuSn8P	450	5	167	50	1,5
V61	Cu	450	5	167	50	0

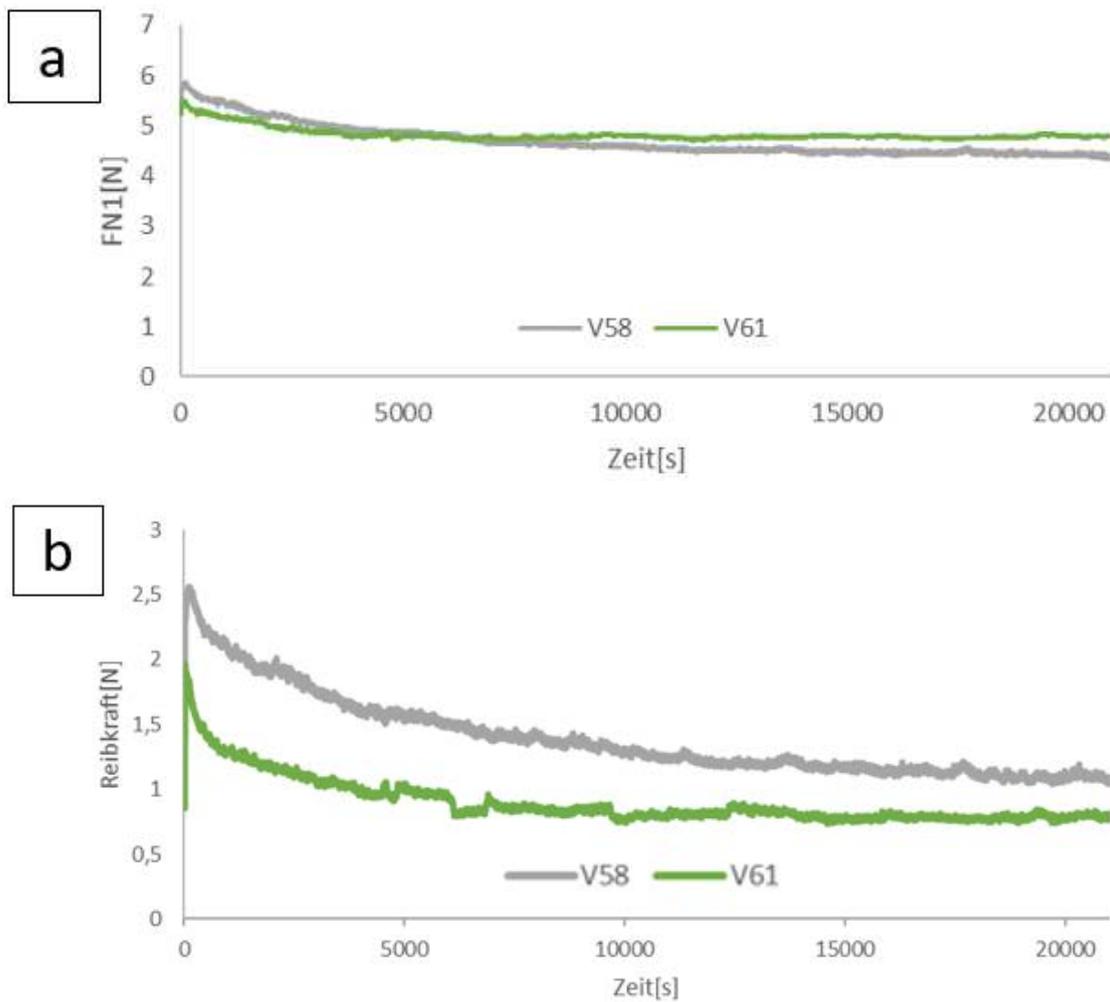


Abbildung 40: Gegenüberstellung der gemessenen Normalkräfte und Reibkräfte bei geringen Stromstärken auf Bronze und Kupfer (a) F_N Verlauf auf Bronze (V58) und Kupfer (V61); (b) F_R Verlauf Bronze (V58), und Kupfer (V61)

6.4.2. REM-Aufnahmen der Spur bei geringer Stromstärke

Die Abbildung 41 zeigt die Auswirkung einer geringen Stromstärke bzw. eines fehlenden Stromes. Die jeweiligen Versuchsbedingungen sind in Tabelle 15 dargestellt. Bild (a) zeigt eine Übersicht der Spur auf der Bronzeprobe nach Versuch V58. Die Spur zeigt über weite Bereiche eine gute Bedeckung der Oberfläche. Weiter sind Bereiche mit geringerer Ausbildung zu erkennen. Das gesamte Erscheinungsbild der Spur zeigt einen guten Kontakt der aufgerauten Kontaktfläche der Kohle und des Schleifrings. Die Struktur des Ringes sind im Kontaktbereich kaum sichtbar.

Bild (b) zeigt die Spur auf Kupfer nach dem Versuch V61. Die Spur ist nur gering ausgebildet es zeigen sich nur eine geringe Anzahl an zusammenhängenden Schichtfragmenten, die sich über den gesamten Kontaktbereich der Spur verteilen. Das Aussehen zeigt einen vollständigen Kontakt der aufgerauten Gleitfläche der Kohle mit dem Schleifring hin. Die Schicht erscheint trotz Kontakt schwach ausgeprägt. Die Oberfläche des Schleifrings zeigt geringen Verschleiß erkennbar an den intakten Oberflächenstrukturen des Schleifringes.

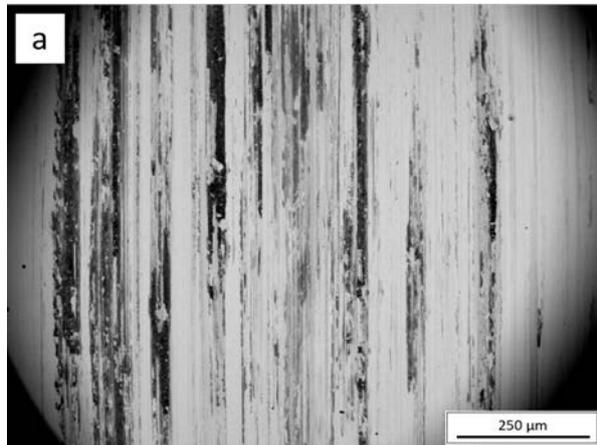
Bild (c) zeigt eine Vergrößerung der Schicht auf Bronze. In der Schicht ist aufgrund der dunklen Erscheinung ein hoher Gehalt an Kohlenstoff zu erwarten. Die helleren Bereiche zeigen in die Spur eingearbeitete Bestandteile an Oxiden des Schleifringwerkstoffs an. Die Partikel an der Oberfläche erscheinen scharfkantig und nicht abgerundet. Bild (d) zeigt eine Schicht auf Kupfer nach dem Versuch V61. Die Schicht erscheint inhomogen und zerklüftet. Es zeigt sich ein teils verschmiertes Grundmaterial, welches sich hell darstellt, vermischt mit dunkeln Anteilen, welche auf Kohlenstoff hindeuten. Die zum Teil abgeflachte Oberfläche der Schicht zeigt aufgrund hoher Temperaturen abgerundete Körner. Die Partikel an der Oberfläche erscheinen teils scharfkantig.

Die Massenverluste nach den beschriebenen Versuchen sind in Tabelle 16 dargestellt. Beim Versuch auf Kupfer weist die Schleifkohle einen höheren Masseverlust auf.

Tabelle 15: Darstellung der Versuchsbedingungen geringen Stromstärke bzw. der Abwesenheit eines Stromes.

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	$U[s^{-1}]$	rel. Luftfeuchte [%]	I[A]
V58	CuSn8P	450	5	167	50	1,5
V61	Cu	450	5	167	50	0

Bronze (V58)



Kupfer (V61)

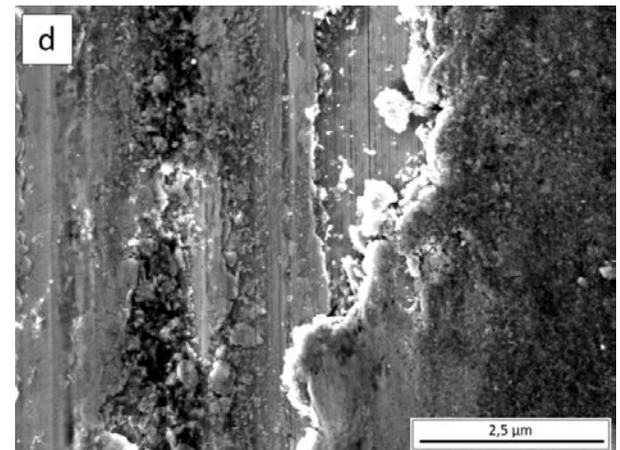
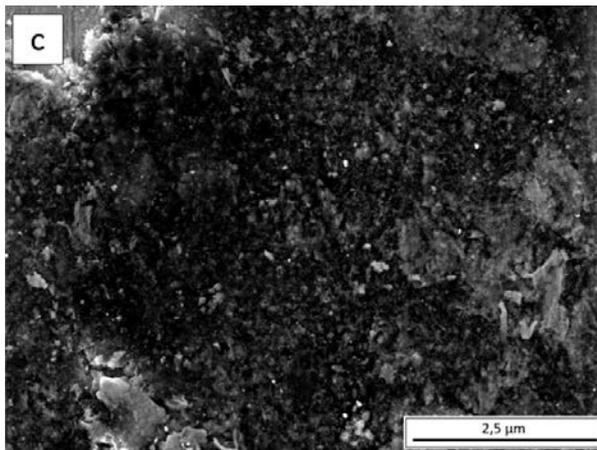
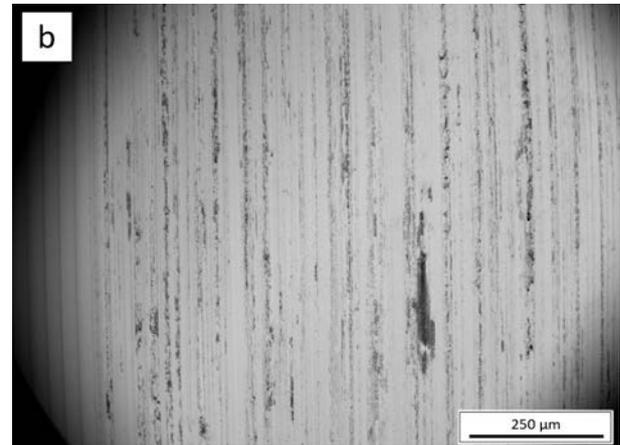


Abbildung 41: Auswirkungen geringer Stromstärken auf die Schichtbildung (a), (c) Bronze, (b), (d) Kupfer

Tabelle 16: Masseverlust der Kohlebürsten nach den Versuchen V58 und V61

Versuchs Nr.	Δm Kohlebürsten [g]	Werkstoff	Gleitweg [km]
V58	0,0174	CuSn8P	450
V61	0,0334	Cu	450

6.4.3. Kraftverläufe bei hoher Stromstärke

Abbildung 42 stellt Versuche auf Bronze und Kupfer bei hohen Stromstärken gegenüber. Die Versuchsparameter der Versuche sind in Tabelle 17 angegeben. Die Normalkräfte der beiden Versuche bewegen sich wiederum im Bereich von 4-5,5 N. Die Verläufe der Reib- und Normalkräfte zeigen gegenläufige Tendenzen, wobei die Reibkraft bei V63 ansteigt und bei V63 abfällt. Ab einer Versuchsdauer von ca. 10000 s stellt sich eine konstante Reibkraft von ca. 1 N ein. Die Schwankungen der Reibkraft und der Anstieg bei V64 ist auf die geringere Anpresskraft zu Beginn des Versuches zurückzuführen. Aus der geringen Anpresskraft resultiert eine nicht stabile Kontaktsituation zwischen Ring und Kohle (nur leichter Kontakt zwischen Kohle und Ring). Die Kontaktsituation stabilisiert sich somit erst während der laufenden Messung und führt zu einem Anstieg der Reibkraft.

Das Ergebnis der Ermittlung der Massenverluste zeigte einen höheren Masseverlust der Schleifkohle auf Kupfer als auf Bronze die entsprechenden Ergebnisse der Massenverluste sind in Tabelle 18 angegeben.

Tabelle 17: Versuchsparameter für Versuche bei trockener Atmosphäre und hoher Stromstärke

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte [%]	I[A]
V62	CuSn8P	450	5	167	25	10
V64	Cu	450	5	167	25	10

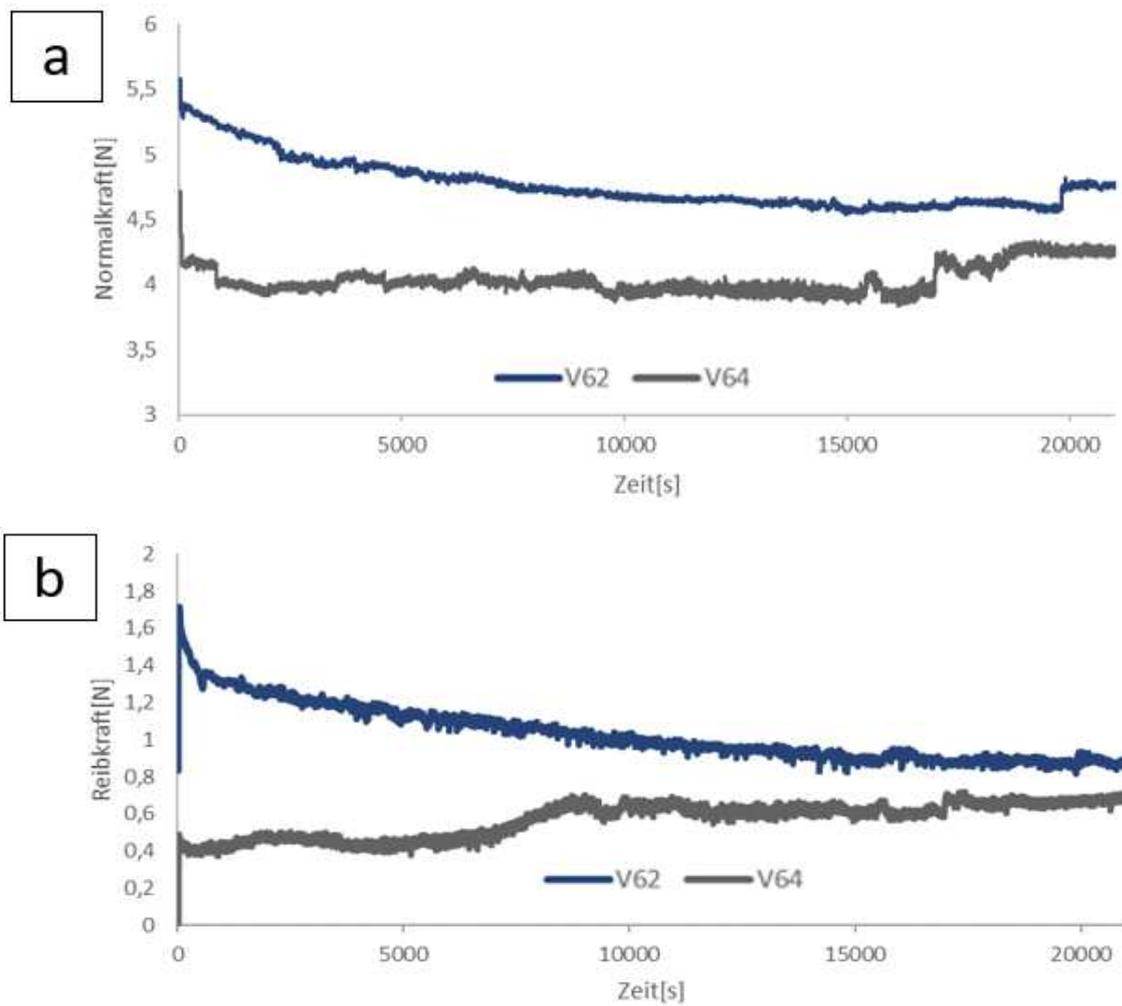


Abbildung 42: Gegenüberstellung der gemessenen Normalkräfte und Reibkräfte bei hohen Stromstärken auf Bronze und Kupfer (a) F_N Verlauf auf Bronze (V62) und Kupfer (V64); (b) F_R Verlauf Bronze (V62), und Kupfer (V64)

Tabelle 18: Massenverluste der Schleifkohlen bei hohen Stromstärken.

Versuchs Nr.	Δm Kohlebürsten [g]	Werkstoff	Gleitweg [km]
V62	0,0154	CuSn8P	450
V64	0,0377	Cu	450

6.4.4. REM-Aufnahmen der Spur bei hoher Stromstärke

Abbildung 43 zeigt die Gegenüberstellung der REM- Aufnahmen des Versuches V62 auf Bronze und nach dem Versuch V64 auf Kupfer. Die jeweiligen Versuchsbedingungen sind in der Tabelle 19 dargestellt. Bild (a) zeigt eine Übersichtsaufnahme der Spur von der Bronzeprobe nach dem Versuch V62. Die Spur zeigt bis auf wenigen Stellen eine geringe Ausprägung. Der Hauptteil der gebildeten Schicht konzentriert sich auf den mittleren Bereich der Kontaktzone zwischen Kohlebürste und Schleifring. Die Ausbildung der Schicht in der Mitte ist auf die Oberflächenstruktur der eingeschliffenen Kohlebürste zurückzuführen. Die Oberflächenstruktur des Schleifringes ist gut zu erkennen und zeigt in der Aufnahme einen geringen Verschleiß des Ringes.

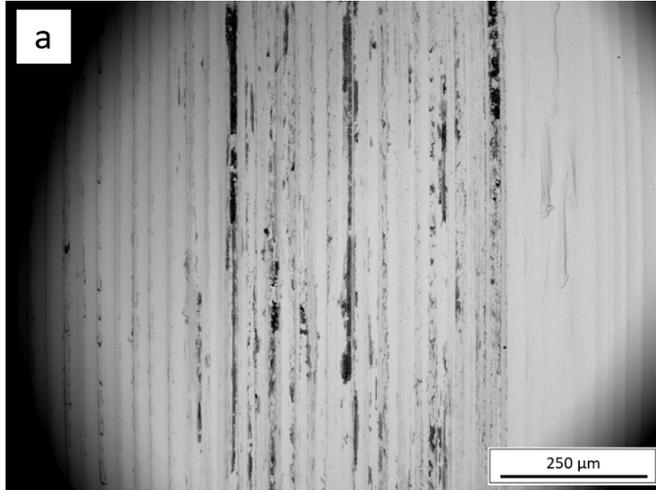
Bild (b) zeigt die Übersicht der Spur auf der Kupferprobe mit dem Versuch V64. Die Spur zeigt sich im gesamten Kontaktbereich, wobei an einigen Stellen der Oberfläche eine höhere Dichte an gebildeten Schichten zu verzeichnen ist. Die Oberflächenstruktur des Ringes zeigt einen erhöhten Verschleiß. Das Bild (c) zeigt einen Ausschnitt aus der Spur von Versuch V62. Aufgrund des hellen Erscheinungsbildes ist hier ein hoher Anteil an Grundmaterial zu erwarten. Die Schicht zeigt einen geringen Anteil an dunklen Bereichen, was das Fehlen von Kohlenstoff anzeigt und ein vermehrtes Aufkommen an Oxiden des Grundmaterials anzeigt. Das Material an der Oberfläche zeigt sich verschmiert und feinkörnig mit runden Partikeln. Scharfkantige Partikel an der Oberfläche sind im geringen Ausmaß ebenso zu verzeichnen.

Bild (d) zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Spur des Versuches V64. Die Oberfläche zeigt einen hohen Grad der Umformung. Neben dem kohlenstoffhaltigen schwarzen Bereich zeigt sich eine stark zerrüttete Oberfläche mit einem sehr hohen Deformierungsgrad. Die Partikel an der Oberfläche erscheinen scharfkantig und von geringerer Größe. Die feinen Partikel zeigen einen Auswurfmechanismus von Material aus der Ringoberfläche an.

Tabelle 19: Darstellung der Versuchsparameter bei hohen Stromstärken

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte[%]	I[A]
V62	CuSn8P	450	5	167	25	10
V64	Cu	450	5	167	25	10

Bronze (V62)



Kupfer (V64)

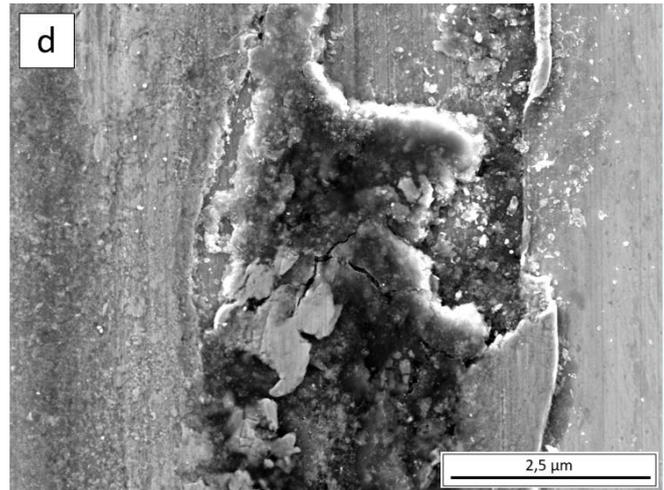
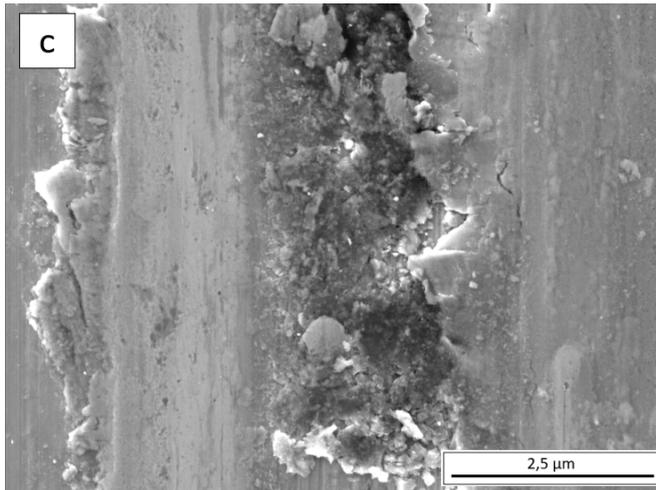
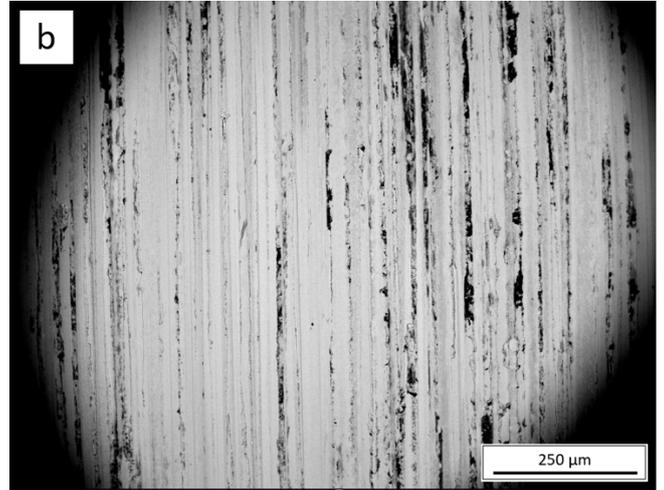


Abbildung 43: Darstellung der Spuren bei hoher Stromstärke (a), (c) Bronze und (c), (d) auf Kupfer

6.5. XPS Analyse der Spuren

Um ablaufende Stoffumwandlungen und Bindungszustände der Elemente an der Probenoberfläche untersuchen zu können, wurden XPS Analysen durchgeführt.

Die Messungen wurde mit einer ThetaProbe der Firma Thermo Fisher Scientific durchgeführt. Der Basisdruck in der Messkammer war während der Messungen kleiner 3×10^{-8} Pa. Die verwendete Strahlungsquelle war eine monochromatisierte Al - K α Röntgenquelle. Zur Identifikation der chemischen Bindungszustände wurde eine externe Datenbank [46] herangezogen.

Um den Einfluss der Werkstoffe untersuchen zu können, wurden die Versuche V 60 und V 63 aufgrund der identen Versuchsbedingungen und der konstanten Kraftverläufe ausgewählt. Die Versuchsparameter sind in der Tabelle 20 dargestellt. Abbildung 44 (a) und (b) zeigen die XPS Spektren des C1s Zustandes des Kohlenstoffs in der Spur auf Bronze und auf Kupfer. Die chemischen Zustände wurden mittels Gauß – Lorenz Peaks gefittet. Die Auswertung ergibt für die Bronze einen hohen Anteil an sp² -hybridisiertem Kohlenstoff, wohingegen an der Oberfläche der Kupferprobe hauptsächlich sp³ -hybridisierter Kohlenstoff auftritt. Sowohl auf Bronze als auch auf Kupfer liegt der Kohlenstoff zusätzlich in der Form von Carboxylgruppen vor. Abbildung 45 zeigt die Auswertung für die Bindungszustände des Kupfers in den Spuren auf (a) Bronze und (b) Kupfer. Es konnten metallische sowie einwertige Oxidationszustände (Cu⁰/Cu⁺) des Kupfers zugewiesen werden.

Tabelle 20: Darstellung der Versuchsbedingungen während der Versuche der für die XPS Analyse herangezogenen Proben.

Versuchs Nr.	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	U[s ⁻¹]	rel. Luftfeuchte[%]	I[A]
V60	CuSn8P	450	5	167	50	10
V63	Cu	450	5	167	50	10

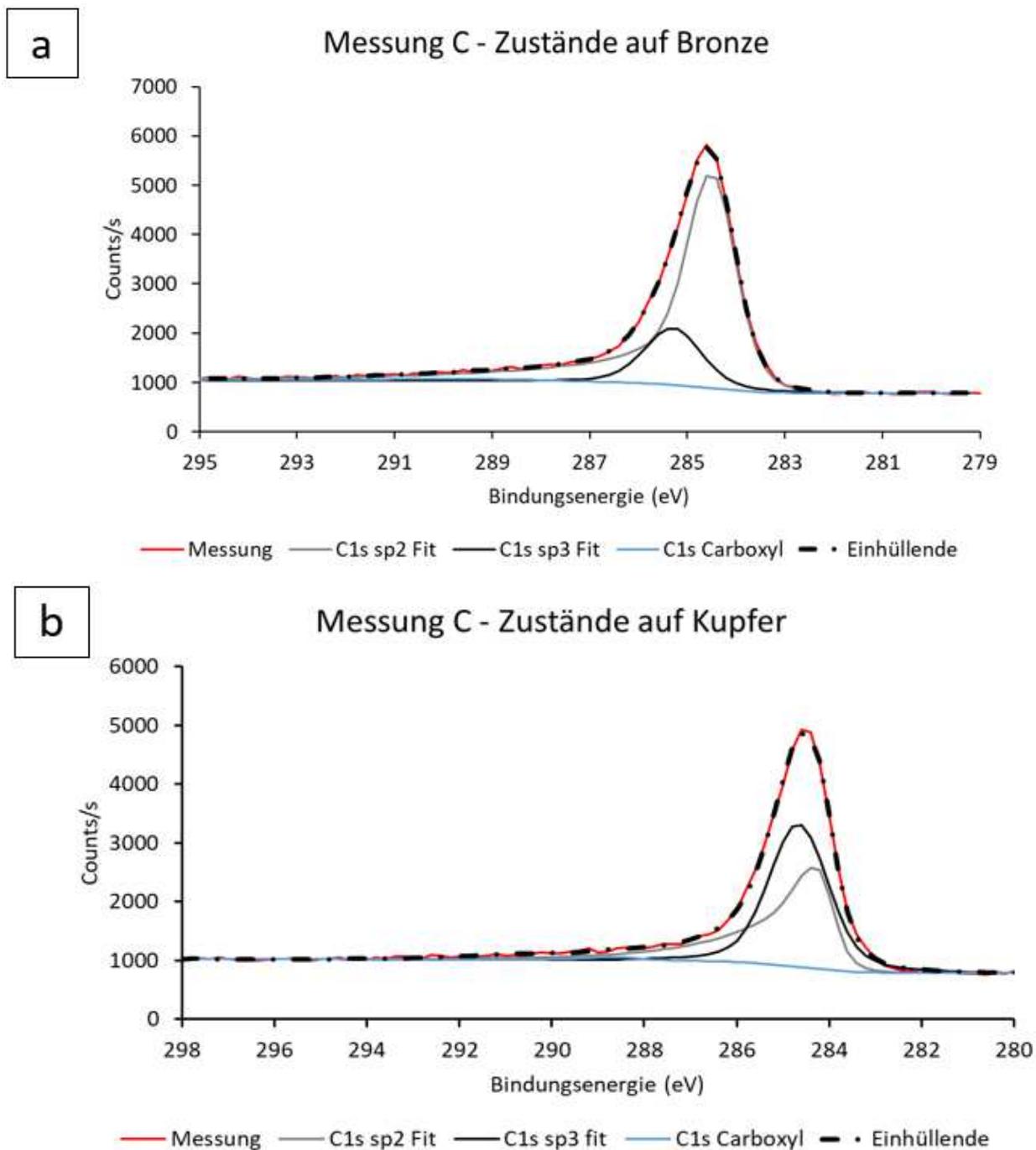


Abbildung 44: C1s Spektren auf (a) Bronze (V60), (b) Kupfer (V63) gemessenes Signal und Fits chemischer Bindungszustände des Kohlenstoffs in der Spur.

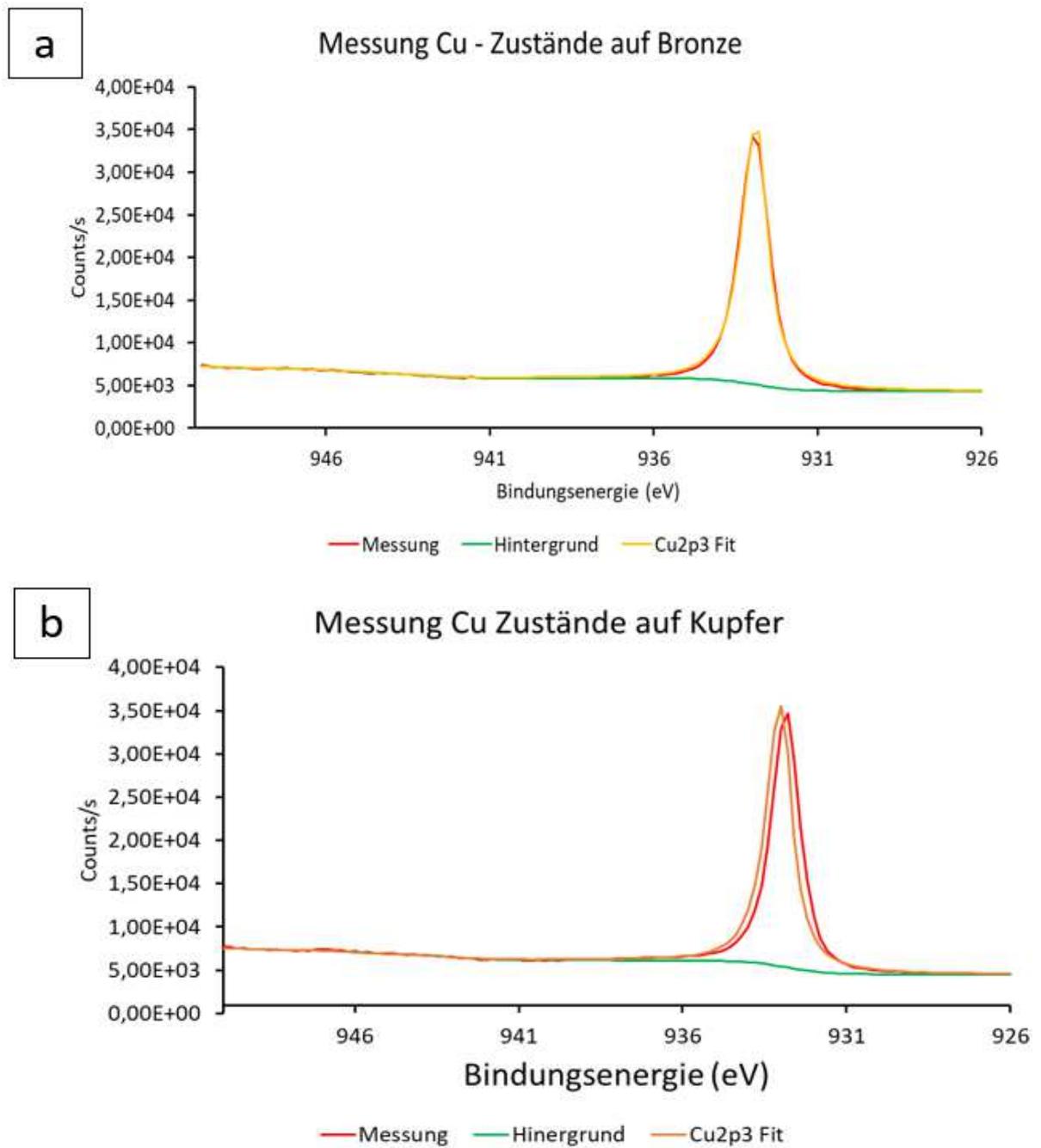


Abbildung 45: Cu2p3 Spektren auf (a) Bronze (V60), (b) Kupfer (V63) gemessenes Signal und Fits chemischer Bindungszustände des Kohlenstoffs in der Spur.

Abbildung 46 zeigt die Zustandsbestimmung von Schwefel. In der Spur auf Bronze und Kupfer sowie neben den Spuren konnte ein deutlicher Anteil des gemessenen Schwefels auf Grund stöchiometrischer Überlegungen dem Kupfer in Form von Cu_2S zugeordnet werden. Die Auswertung der Bindungsenergien des $\text{S}2\text{p}3$ Peaks auf (a) Bronze als auch auf (b) Kupfer weisen auf die Oxidationsstufe des Schwefels S^{2-} hin. In den Spuren selbst konnte kein Kupfersulfid gefunden werden. Schwefele in anderen Oxidationsstufen, wie z.B. in Form von Sulfaten konnte nicht festgestellt werden.

Abbildung 47 zeigt das XPS Spektrum von Wolfram sowie Fits zu möglichen Bindungszuständen auf (a) Bronze, (b) Kupfer. Wolfram wird dem Grafit in der Form von WS_2 als Trockenschmierstoff zugesetzt. Die Messungen zeigen, dass Wolfram in den Oxidationsstufen 0 (metallisch), +6 in Form von WO_3 und in der sulfidischen ursprünglichen Oxidationsstufe +4 als WS_2 vorliegt. In den Spuren der Bronzeproben zeigt sich im Vergleich zu Kupfer ein höherer Gehalt an WS_2 . Auf Kupfer überwiegt der metallische und oxidische Zustand des Wolframs.

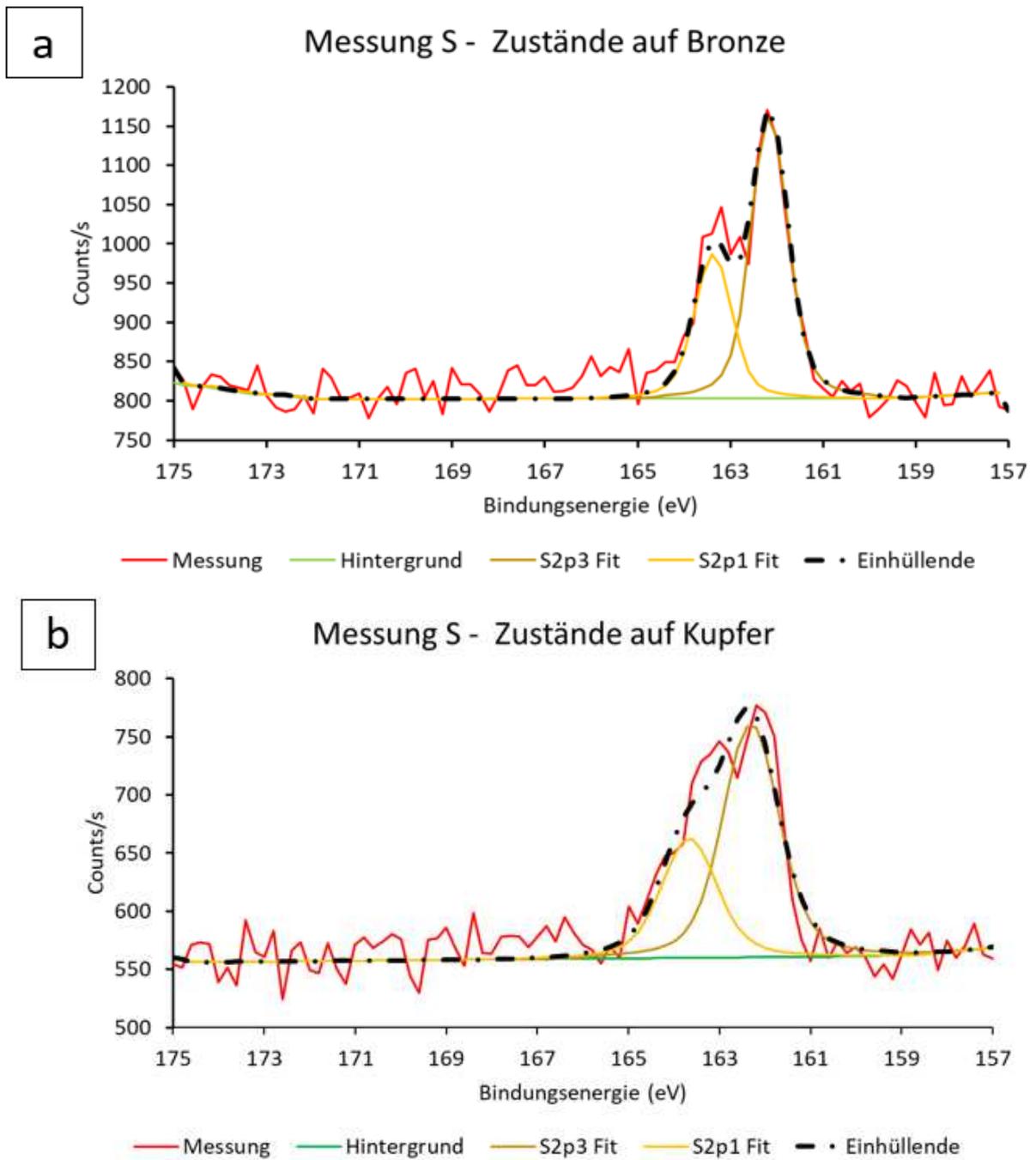


Abbildung 46: S2p3 und S2p1 Spektren (a) Bronze (V60), (b) Kupfer (V63) gemessene Signale und Fits chemischer Bindungszustände des Kohlenstoffs in der Spur.

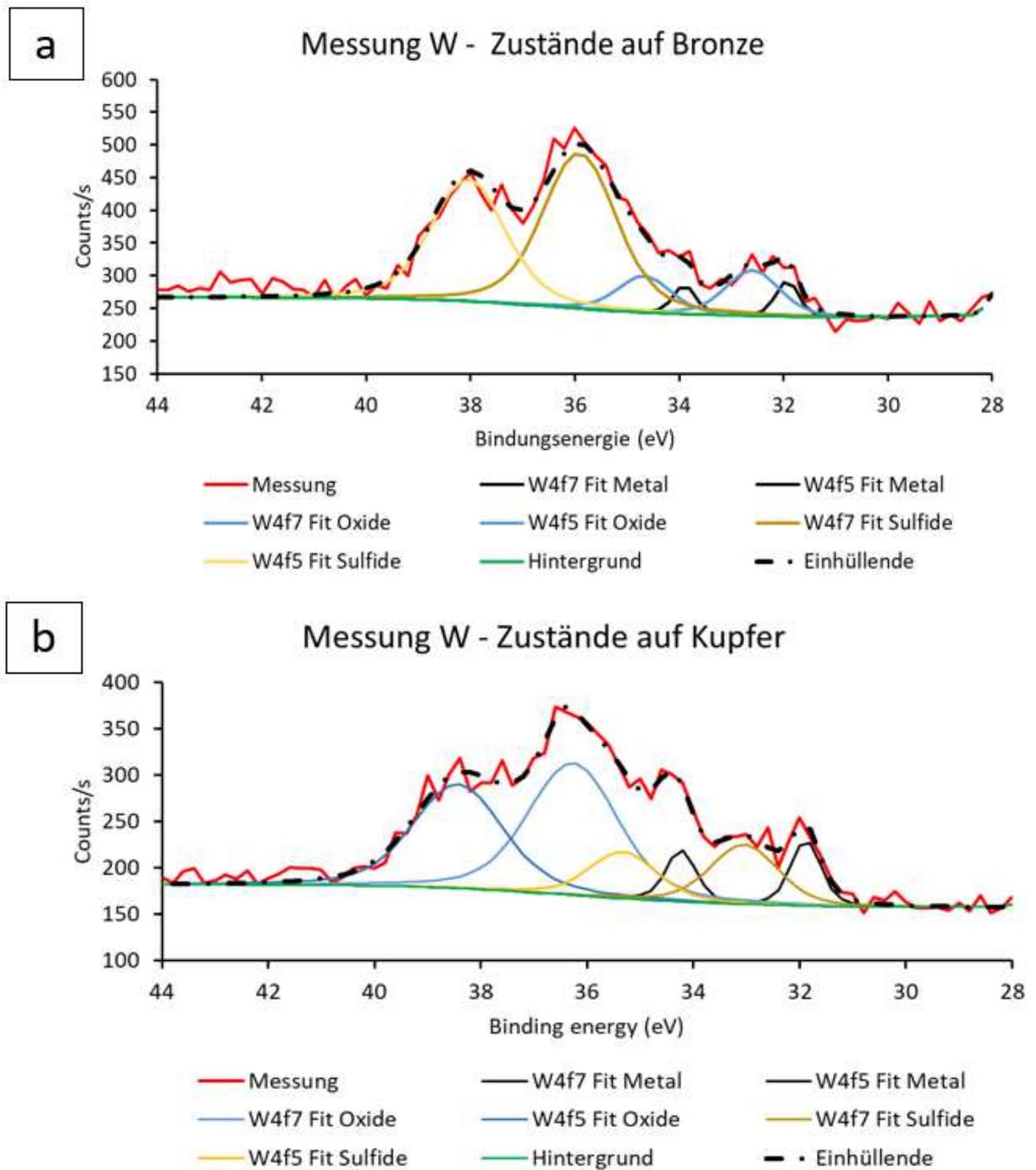


Abbildung 47: Wolfram auf (a) Bronze (V60) (b) Kupfer (V63) gemessenes Signal und Fits chemischer Bindungszustände des Kohlenstoffs in der Spur

7. DISKUSSION

7.1. Makroskopische Betrachtungen

Die Versuche auf Bronze und Kupfer, welche für die Gleitwege von 450 km und 1800 km durchgeführt wurden, wurden hinsichtlich des makroskopischen Erscheinungsbildes der Spuren und Probenoberfläche miteinander verglichen.

Die Spuren auf den Proben zeigten nach einer Wegstrecke von 450 km deutliche Unterschiede in ihrer Ausprägung. Auf Bronze erscheinen die Spuren blass und zeigen eine ungleichmäßige Schichtbildung. Die ungleichmäßige Bedeckung der Probenoberfläche kann auf die hohe Rauheit der durch den Hersteller eingeschliffenen Kohlebürsten zurückgeführt werden. Der geringe Grad an Bedeckung deutet weiter auf einen geringen Materialübertrag von der Kohlebürste auf den Schleifring hin, was auf einen geringen Verschleiß der Kohlebürste hindeutet. Im Kontaktbereich konnte mit bloßem Auge kein Verschleiß des Werkstoffes festgestellt werden.

Vergleicht man die Spuren an der Oberfläche der Bronzeproben mit den Spuren auf den Kupferproben, welche ebenfalls einen Gleitweg von 450 km im Versuch bei denselben Versuchsbedingungen zurücklegten, zeigt sich eine Schicht mit einer guten Bedeckung des gesamten Kontaktbereiches von Kohle und Schleifring. Auch hier ist im makroskopischen Maßstab kein Verschleiß mit dem bloßen Auge zu erkennen. Der hohe Grad an Bedeckung des Kontaktbereiches deutet auf einen rascheren Materialübertrag von der Bürste auf den Ring und somit auf eine raschere Schichtbildung auf Kupfer hin. Durch die rasche Ausbildung einer Gleitschicht wurde eine Verminderung des Verschleißes der Komponenten des tribologischen Systems und für die höheren Gleitwege auf Kupfer gegenüber Bronze erwartet.

Beim Vergleich der Spuren nach einem Gleitweg von 1800 km wiesen die Spuren auf Bronze einen höheren Grad der Bedeckung des Kontaktbereiches auf. Auch nach 1800 km konnte mit freiem Auge kein Verschleiß festgestellt werden. Die Spuren der Kupferproben zeigten im Vergleich zum Versuch bei geringer Wegstrecke trotz der Ausbildung einer Gleitschicht eine tiefe Riefenbildung im Kontaktbereich, welche deutlich mit freiem Auge erkannt werden konnte. Die Unterschiede im Erscheinungsbild der Spuren ließen die Theorie einer langsameren Schichtbildung auf Bronze als auf Kupfer zu. Trotz der geringeren Bildungsgeschwindigkeit der Schicht auf Bronze scheint die Schicht auf Bronze im Langstreckenversuch einen deutlich höheren Schutz gegen Verschleiß zu bieten als die auf Kupfer gebildete Schicht im Kontakt.

Im Hinblick auf die Verwendung von Schleifkontakten in salzhaltiger Umgebung wurde die Auswirkung einer salzhaltigen Umgebung auf das in dieser Arbeit betrachtete System für Bronze und Kupfer untersucht und den Ergebnissen der salzfreien Versuche gegenübergestellt.

Die Proben, welche bei salzhaltiger Atmosphäre gemessen wurden, zeigen ein stark abweichendes Aussehen im Vergleich zu jenen Proben, die bei nicht salzhaltiger Atmosphäre gemessen wurden. Die Abbildung 48 zeigt die Proben nach den Versuchen bei Salz-haltiger und Salz-freier Atmosphäre nach 450 km Gleitweg. Auch zeigen die Werkstoffe untereinander eine stark abweichende Erscheinung nach Beendigung der Versuche. Die Bronzeprobe erscheint in einer bläulich grünlichen Färbung, was ein Hinweis auf die Bildung von Sulfaten und Chloriden wie z.B. Brochantit ($\text{CuSO}_4(\text{OH})_6$), Posnjakit ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sowie Atacamit ($\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$) darstellt. Die Probe aus Kupfer zeigte nach dem Versuch eine dunklere Färbung der Oberfläche. Dies deutet auf eine verstärkte Bildung von Cuprit (Cu_2O) hin. Der große Unterschied in der Erscheinung der Proben nach dem Versuch ist auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Oxidschichten an der Metalloberfläche, bedingt durch die Werkstoffzusammensetzung, zurückzuführen. Es besteht die Möglichkeit, dass die Bildungsgeschwindigkeit der Patina durch die Entstehung joulescher Wärme während der Versuche beschleunigt wird.

Die Spuren auf beiden Werkstoffen zeigen ein helles Erscheinungsbild, welches auf die Ablagerungen von Salzen auf der gesamten Probenoberfläche zurückzuführen ist. Die Spuren der Versuche auf Bronze und auf Kupfer bei salzhaltiger Atmosphäre zeigen im Vergleich zu den Versuchen in salzfreier Atmosphäre eine gleichmäßige Ausbildung über gesamten Kontaktbereich der Schleifkohlen mit dem Schleifring. Ebenso konnte mit freiem Auge kein Verschleiß der Oberfläche festgestellt werden. Auffällig ist bei der Probe aus Bronze nicht nur die Färbung der Oberfläche, sondern auch die Ausbildung einer deckenden Schicht im Kontaktbereich. Es kann vermutet werden, dass aufgrund von hygroskopischen Salzen, welche sich ebenso im Kontaktbereich abscheiden, Wasser in den Kontakt ziehen, was zu einer verbesserten Schichtbildung und einer Verringerung des Verschleißes der Systemkomponenten auf dem Werkstoff Bronze führt.

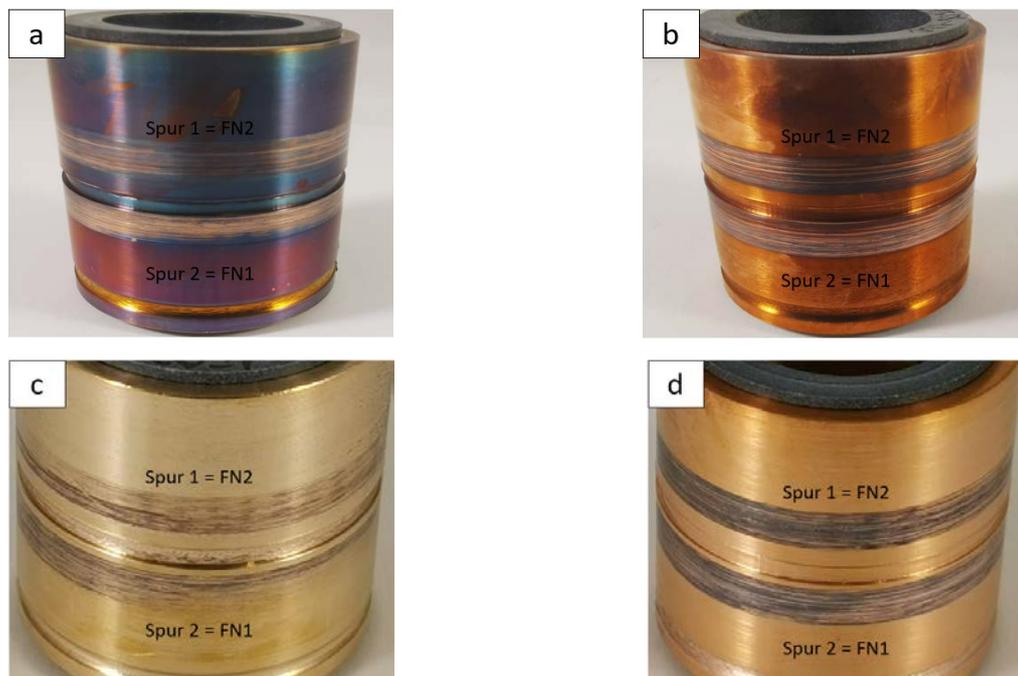


Abbildung 48: Vergleich des Erscheinungsbildes der Versuch auf Bronze und Kupfer bei Salz-freier und Salz-haltiger Atmosphäre nach 450 km Gleitweg. (a), (b) Bronze (V67) und Kupfer (V68) bei Salz-haltiger Atmosphäre, (c), (d) Bronze (V60) und Kupfer (V63) bei Salz-freier Atmosphäre.

7.2. Bewertung der 3D Topografie der Spuren

Um die im Zuge der Makroskopie dokumentierten Eindrücke und Theorien genauer zu untersuchen, wurden topographische Analysen der Spuren durchgeführt.

Die topographischen Analysen für einen Gleitweg von 450 km auf Bronze und auf Kupfer ergaben einen geringen Verschleiß im Kontaktbereich zwischen den Schleifkohlen und Schleifring bei Kupfer als bei Bronze. Dieses Ergebnis entspricht der Beobachtung einer langsameren Schichtbildung, worauf der höhere Verschleiß auf Bronze im Vergleich zu Kupfer zurückgeführt werden kann.

Die Messungen der Proben bei einem Gleitweg von 1800 km bestätigte den schon mit bloßem Auge erkennbaren höheren Verschleiß an der Oberfläche von Kupfer im Vergleich zu der Probe aus Bronze.

Ebenso bestätigte sich der Eindruck eines wesentlich höheren Verschleißes der Kupferprobe bei einer gleichzeitig deutlich schnelleren Schichtbildung im Kontakt.

Der hohe Verschleiß unter denselben Messbedingungen deutet auf ein Versagen der Verschleißverringernenden Wirkung der Schicht und auf das Einsetzen eines verschleißfördernden Mechanismus unter den gegebenen Bedingungen hin.

Sowie die Proben in salzfreier Atmosphäre hinsichtlich der Auswirkung des Gleitweges untersucht wurden, wurden die Spuren welche in salzhaltiger Atmosphäre im Kontakt mit Bronze als auch auf Kupfer gebildet wurden einer topographischen Analyse unterzogen.

Die zuvor auf der makroskopischen Ebene gewonnenen Eindrücke eines geringeren Verschleißes beider Werkstoffe im Vergleich mit den in salzfreier Umgebung durchgeführten Versuchen konnten durch die topographische Analyse bestätigt werden.

Es ist denkbar, dass durch die Ablagerung von Salz im Kontakt und durch deren hygroskopische Wirkung, Wasser in den Kontakt zwischen Schleifring und Schleifkohle transportiert wird, was die Ausbildung einer verschleißmindernden Schicht begünstigen würde.

Vergleicht man die Versuche auf Bronze und Kupfer in salzhaltiger Atmosphäre direkt miteinander, zeigt Bronze einen geringeren Verschleiß als Kupfer.

Es besteht hier die Möglichkeit der Bildung von Reaktionsprodukten aus den Bestandteilen des Meerwassers mit dem Werkstoff im Kontakt. Die etwas geringere Korrosionsbeständigkeit von Kupfer gegenüber korrosiven Medien wie Meerwasser im Vergleich zu Bronze könnte diesen unterschied im Verschleiß bewirken.

7.3. Betrachtung der Kraftverläufe

Die Versuche auf Bronze als auch Kupfer zeigten für die Gleitwege von 450 km und für 1800 km am Ende der Versuche ein ähnliches Niveau der Reibkräfte. Da die Versuche bei den 24 h (1800 km) Versuchen in zwei zwölfstündige Versuche unterteilt wurden resultieren die Unterschiede im Niveau der Kurven aus der Kontaktsituation zwischen Bürsten und Schleifring wie er sich nach dem ersten Teil der Versuche darstellte. Die hohe Reibkraft im zweiten Teil des Versuches auf Bronze wird durch die abfallende Normalkraft im ersten Teil des Versuches hervorgerufen da ein hoher Abfall der Normalkraft einen Anstieg der Reibkraft zur Folge hat.

Beim Vergleich der Versuche auf Bronze mit den Versuchen auf Kupfer konnte auf Bronze ein langsamerer Abfall der Reibkraft auf das Endniveau unter denselben Versuchsbedingungen festgestellt werden.

Die längere Zeitdauer bis zur Einstellung einer konstanten Reibkraft unterstützt die Beobachtungen einer schwächer ausgebildeten Schicht im Kontakt und eines höheren Verschleißes, welche im Zuge der makroskopischen und topographischen Untersuchungen festgestellt wurden. Geringe Schwankungen in den Reibkraftverläufen könnten auf Vibrationen im Laufe der Messung, fertigungsbedingte Unrundheiten der Schleifringe und auf geringfügige Schwankungen der Luftfeuchtigkeit zurückgeführt werden. Die Unterschiede im Einlaufverhalten am Beginn der Versuche ist durch nicht planparallele Kontaktsituationen zwischen den Bürsten und den Schleifringen bedingt durch das Zusammenwirken der Oberfläche der Schleifkohlen und der Schleifringe zu erklären.

Beim Vergleich der Reibkurven der Versuche bei salzhaltiger Atmosphäre mit den Versuchen in salzfreier Atmosphäre mit denselben Gleitwegen, konnte wie aus Abbildung 49 ersichtlich die Einstellung eines niedrigeren Reibkraftniveaus bei Salz-haltiger Atmosphäre auf Bronze als auch auf Kupfer im Vergleich zur Salz-freien Atmosphäre festgestellt werden.

Dies unterstützt die Vermutung der Bildung von Reaktionsprodukten im Kontakt. Es kann angenommen werden, dass die Korrosionsprodukte direkt nach der Bildung keinen hohen Reibwiderstand erzeugen und sich von der Oberfläche ablösen. Ein solcher Vorgang im Kontakt liefert eine mögliche Erklärung für den höheren Verschleiß von Kupfer bei einer gleichzeitigen Verringerung der Reibkraft. Der Verlauf der Normalkraft für den Versuch auf Kupfer zeigt einen leichten Abfall und die Reibkraft einen leichten Anstieg über den gesamten Versuch hinweg wohingegen der Reibkraftverlauf auf Bronze konstant erscheint.

Die Ursache für den Abfall der Normalkraft beim Versuch auf Kupfer kann ein Hinweis auf den Abtrag der Korrosionsprodukte im Kontakt bedeuten. Durch einen Abtrag fällt die Normalkraft zusehends ab, wodurch die Reibkraft ansteigt und den Abtrag beschleunigen würde.

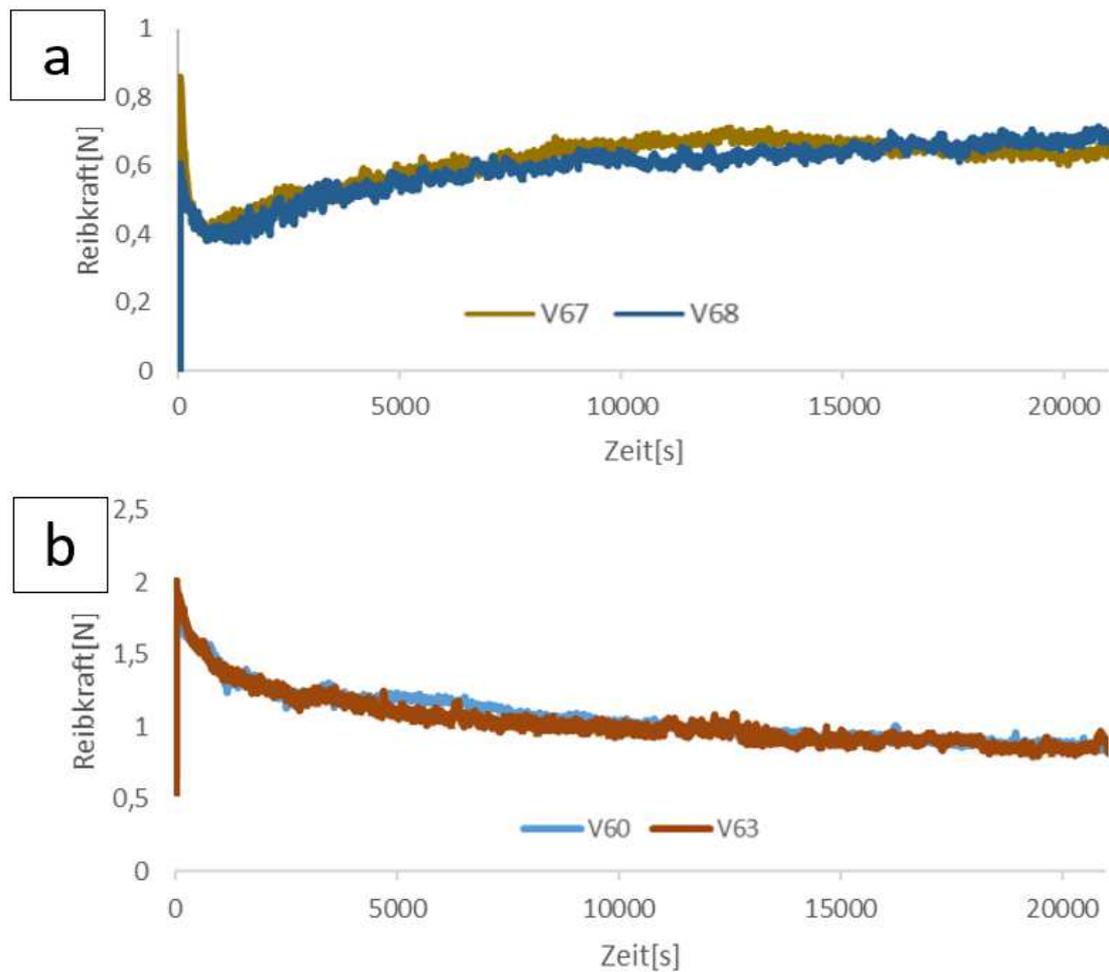


Abbildung 49: Gegenüberstellung der Reibkraftverläufe bei (a) Salz-haltiger (V67, V68) und (b) Salz-freier (V60, V63) Atmosphäre.

Bei der Begutachtung der Kraftverläufe bei hohen und geringen Strömen konnten ein geringeres Reibkraftniveau bei den Versuchen an den Kupferproben im Vergleich zu Versuchen an den Bronzeproben festgestellt werden.

Da bei den Versuchen mit geringer Stromstärke auf Bronze nur eine geringe und auf Kupfer keine Belastung mit Strom erfuhr und sich die Reibkraft beim Versuch auf Kupfer geringer als jene auf Bronze zeigt, kann Aufgrund dessen nicht von einem reibungsmindernden Effekt wie „current lubrication“ im Niederstrombereich ausgegangen werden. Hier ist die Ursache in einer rascheren Schichtbildung auf dem Werkstoff Kupfer gegenüber dem Werkstoff Bronze zu suchen.

Bei den Versuchen mit hohen Stromstärken zeigte sich erneut ein geringeres Reibkraftniveau bei dem Versuch auf Kupfer im Vergleich zu dem Versuch auf Bronze. Es konnte in der Einlaufphase ein Anstieg der Reibkraft beim Versuch auf Kupfer festgestellt werden. In diesem

Fall muss die Normalkraft beim Start der Versuche betrachtet werden. Durch das geringe Lastniveau beim Versuch mit Kupfer ist eine instabile Kontaktsituation zwischen Schleifkohle und Ring zu erwarten. Die geringere Last führt zu einem niederen Reibkraftniveau zu Beginn des Versuches und zu einem erschwerten Schichtaufbau im Kontakt. Erst wenn sich der Kontakt zwischen der Schleifkohle und dem Ring stabilisiert, kommt es zu einer Abnahme der Schwankungen und einer Gleitschichtbildung nach der Hälfte der Versuchsdauer. Da sich das Reibkraftniveau am Ende auf demselben Niveau wie bei den Versuchen bei geringen Strömen einpendelt ist hier vorerst kein reibkraftminimierender Effekt zu erwarten.

Vergleicht man die Reibkraftverläufe der Versuche auf Bronze bei geringem und hohem Stromniveau ist eine geringere Reibkraft beim Versuch mit einem hohen Stromniveau festzustellen. Hier kann ein Auftreten eines Reibkraftmindernden Effektes durch Strom vermutet werden. Durch den Abfall der Reibkraft unter die des Versuches bei geringem Strom bei einer gleichzeitig geringeren rel. Luftfeuchte von 25% ist hier eine Beeinflussung der Reibkraft durch den aufgeprägten Strom als möglich anzunehmen.

7.4. Betrachtung der Massenverluste der Schleifkohlen

Die Betrachtung der Massenverluste der Schleifkohlen ergab, wie in Tabelle 21 gezeigt einen von den Versuchsbedingungen unabhängigen höheren Massenverlust bei den Versuchen auf Kupfer im Vergleich zu den Versuchen auf Bronze. Dieses Ergebnis unterstreichen die gewonnenen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Betrachtungen, welche auf einen Verlust der verschleißmindernden Wirkung der Schicht im Kontakt hindeuten.

Tabelle 21: Massenverluste der Kohlebürsten unter den jeweiligen Versuchsbedingungen auf Bronze und Kupfer

Versuchs Nr.	Δm Kohlebürsten [g]	Werkstoff	Gleitweg [km]	Last[N]	$U[s^{-1}]$	rel. Luftfeuchte[%]	I[A]
V58	0,0174	CuSn8P	450	5	167	50	1,5
V60	0,0162	CuSn8P	450	5	167	50	10
V62	0,0154	CuSn8P	450	5	167	25	10
V65_1	0,0503	CuSn8P	1800	5	167	50	10
V65_2		CuSn8P		5	167	50	10
V67Salz(V57)	0,0003	CuSn8P	450	5	167	50	10
V61	0,0334	Cu	450	5	167	50	0
V59	0,106	Cu	450	5	167	25	1,5
V63	0,0236	Cu	450	5	167	50	10
V64	0,0377	Cu	450	5	167	25	10
V66_1	0,0747	Cu	1800	5	167	50	10
V66_2							
V68Salz(V59)	0,0247	Cu	450	5	167	50	10

7.5. Analytische Betrachtungen der ausgebildeten Schichten

Um detailliertere Informationen über den Aufbau der Spuren über deren chemische Zusammensetzung und über die chemischen Vorgänge in Zusammenhang mit den Haupteinflussparametern zu gewinnen, wurden diese unter der Anwendung der analytischen Methoden REM, EDX, FIB und XPS im Detail untersucht.

In einem ersten Schritt wurden die Proben mittel REM untersucht. Für die Spuren mit den unterschiedlichen Gleitwegen von 450 km und 1800 km auf Bronze und Kupfer ergab für die Schicht auf Bronze nach 450 km eine grobe Struktur und scharfkantige Partikel an der Oberfläche. Die scharfkantigen Partikel deuten auf einen Verschleißmechanismus durch „thermal

mounding“ hin, bei dem Partikel aus der Oberfläche gerissen werden, was zu einem erhöhten Verschleiß der Systemkomponenten führt.

Die Spur auf Kupfer nach 450 km zeigte hingegen eine Schichtbildung, bei der eine Vermischung des Schleifringwerkstoffes mit dem Material aus der Kohle mit abgerundeten Strukturen an der Oberfläche zu erkennen sind. Scharfkantige Partikel konnten nur im geringen Ausmaß beobachtet werden, was einen geringeren Verschleiß der Probe bedeutet. Die abgerundeten Strukturen weisen auf lokal geschmolzenes und wieder erstarrtes Material hin. Bei vereinzelt kleineren Kontaktpunkten kann der Übergangswiderstand des Stromes im Kontakt in Kombination mit der eingebrachten Reibenergie einen Temperaturanstieg bis zur der Schmelztemperatur des Werkstoffs bewirken.

So gebildete Spots werden als „major a-Spots“ bezeichnet und führen durch die Vergrößerung der Kontaktfläche in weiterer Folge zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit der Schicht.

Die Spuren, welche in den Versuchen mit 1800 km Gleitweg entstanden, zeigten ein entgegengesetztes Bild. Die Schicht auf Bronze zeigte einen deutlich höheren Anteil an abgerundeten und verschmierten Bereichen was auf eine funktionsfähige verschleißmindernde Schicht hinweist. Die Spur auf der Kupferprobe wies scharfkantige Partikel auf, welche durch das Auslösen von Teilen aus dem Schleifring gebildet werden. Die Befunde aus dem REM unterstreichen hier die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Analysen.

Bei der Betrachtung der Spuren der Versuche in salzhaltiger Atmosphäre zeigte sich auf Bronze eine dünne Schicht mit abgeflachten Strukturen. Die Spur erscheint in den Aufnahmen zum Großteil hell mit nur einem geringen Anteil an dunklen Strukturen. Die helle Erscheinung in der Aufnahme lassen einen hohen Anteil an Grundmaterial in der Schicht vermuten. Hier könnte es sich um Reaktionsprodukte handeln, welche sich durch die Reaktion der Salze im Kontakt mit dem Werkstoff der Proben bilden und in der Lage sind eine Verminderung der Reibkraft hervorzurufen.

Scharfkantige Strukturen wie ausgeworfene Partikel konnten nur in einem sehr geringen Ausmaß gefunden werden. Ein Verschleißmechanismus wie „thermal mounding“ ist hier nur zu Beginn des Versuches zu erwarten.

Die Spur auf Kupfer zeigt im Vergleich zu Bronze ausschließlich helle Bereiche was auch hier für eine Bildung von Reaktionsprodukten, welche zu einer Verringerung der Reibkraft führen spricht. Die Schicht zeigt mehrere Ebenen, welche aus abgelagertem Material gebildet werden. Mehrere Ebenen in der Schicht könnte durch eine erhöhte Bildungsrate von Reaktionsprodukten,

welche aus dem Werkstoff des Schleifringes und den Salzen in der Umgebung gebildet werden, hindeuten.

Ein solcher Mechanismus liefert eine mögliche Erklärung zu dem etwas höheren Verschleiß von Kupfer im Vergleich mit Bronze. Bronze zeigt eine etwas höhere Beständigkeit gegen Korrosion in salzhaltigen Umgebungen im Vergleich zu Kupfer. Durch die mechanische Belastung im Kontakt kann somit mehr Material verfrachtet werden, was ebenso zu einem höheren Verschleiß führt. Im Falle der Bildung von Reaktionsprodukten mit geringerer Härte als das Material der Kohle und des Schleifringes, so kann dies zu einer Absenkung der Reibkraft bei gleichzeitigem erhöhtem Verschleiß führen, was wiederum eine Erklärung für die abfallende Normalkraft bei den tribologischen Versuchen liefern könnte.

Die Untersuchung der Spuren, welche bei geringen Stromstärken gebildet wurden zeigten im REM ein sehr ähnliches Aussehen wie die zu Beginn beschriebene Spur bei der Betrachtung der wegabhängigen Versuche bei 450 km Gleitweg und brachten somit keine weiteren neuen Erkenntnisse. Die Versuche bei hohen Strömen hingegen zeigten eine Schichtbildung auf Bronze mit feinen Strukturen und abgerundeten Körnern, was auf höhere Temperaturen im Kontakt hindeuten könnte, welche durch den Strom hervorgerufen wurden. Bei höheren Temperaturen kommt es zu einer Erweichung des Werkstoffes, was zu einer rascheren Schichtbildung führen kann. Die Befunde im REM bestätigen die Vermutungen, welche bei der Betrachtung der Reibkraftverläufe angestellt wurden. Auf Kupfer zeigte dieser Bereich der Spur eine stark zerklüftete und „aufgerissene“ Oberfläche. Die Aufnahme bestätigt die Vermutung einer instabilen Kontaktsituation, wie sie bei der Betrachtung der Reibkraftverläufe getroffen wurde. Durch den instabilen Kontakt kommt es zu einer sehr starken mechanischen Beanspruchung der Werkstoffoberfläche durch die Kohlen was zu dem Erscheinungsbild der Spur führte.

Um einen Einfluss der mechanischen Belastung auf das Gefüge der Werkstoffe zu untersuchen, wurden FIB-Schnitte an Kupferproben von Versuchen mit unterschiedlichen Gleitwegen und in salzhaltiger Atmosphäre angefertigt und begutachtet. Es kann vermutet werden, dass durch das Einbringen mechanischer Energie bei den Versuchen mit 450 km Gleitweg eine Kornverfeinerung auftritt. Weiter gibt es Anzeichen für ein erneutes Kornwachstum bei einem Gleitweg von 1800 km. Informationen über die chemische Zusammensetzung der Spuren wurden mittels der Methoden der EDX und XPS gewonnen.

Die Messungen einzelner Strukturen in den Spuren der Proben mit 1800 km Gleitweg mittels EDX ergaben auf Bronze als auch auf Kupfer wie zu erwarten einen hohen Gehalt an Kohlenstoff, Sauerstoff sowie die entsprechenden Elemente aus den Schleifringwerkstoffen und

den Schleifkohlen. Eine Auffälligkeit stellte das Auftreten von Wolfram und Schwefel in vereinzelten Messpunkten und in einzelnen Partikeln an der Oberfläche dar (siehe 6.2.3.1). Ein Verhältnis von Wolfram und Schwefel von 1:2 konnte an mehreren Punkten der Schicht und bei Messungen an weiteren Proben festgestellt werden. Um Kontaminationen, welche von der Probenherstellung stammen konnten als Quelle für Wolfram und Schwefel auszuschließen, wurde eine frisch gefertigte Probe derselben Reinigungsprozedur wie allen Proben davor unterzogen und die Oberfläche mittels EDX untersucht. Dabei konnten keinerlei Verunreinigungen, welche die Messungen beeinträchtigen oder verfälschen würden, festgestellt werden.

Durch das Verhältnis der Elemente zueinander wurde der Trockenschmierstoff WS_2 vermutet.

Um die Bindungszustände und somit chemische Verbindungen der in der EDX gefundenen Elemente zu untersuchen und um die Vermutung des Vorhandenseins von WS_2 in der Bürste und somit in der Spur der Schleifkohle zu klären, wurde je eine Bronze- und eine Kupferprobe für die Analyse mittels XPS vorbereitet.

Die Oxidationsstufen von 0 und +1 des Kupfers konnte auf Bronze und Kupfer bestimmt werden, höhere Oxidationsstufen wurden nicht detektiert. Das Kupfer der Oxidationsstufe +1 konnte auf Bronze und Kupfer dem Oxid Cu_2O zugeordnet werden. Cu_2O wird Cuprit genannt und bildet die Basis für die weitere Ausbildung einer Patina. Die Oxidationsstufe 0 resultiert aus der Durchdringung einer sehr dünnen Oxidschicht, wodurch der Werkstoff unter der Oxidschicht gemessen wird. Elementares Kupfer an der Oberfläche ist aufgrund der Tendenz zur Passivierung der Metalle nicht zu erwarten. In den Spuren auf der Kupferprobe konnte weiter Cu^+ in sulfidischer Form als Cu_2S gefunden werden. Der Schwefel zeigte sich auf Kupfer und Bronze in sulfidischer Konfiguration, weitere Oxidationsstufen wie in Kupfersulfaten konnten nicht festgestellt werden. In den Spuren der Kupferproben wurde ein geringerer Gehalt an sulfidischen Schwefel im Vergleich zu den Bronze Proben festgestellt.

Die Messungen des Kohlenstoffes ergaben für Bronze eine sp^2 - und für Kupfer einen hohen Anteil der sp^3 - Hybridisierung.

Die sp^2 - Hybridisierung stammt von der Anwesenheit von Grafit an der Oberfläche der Bronze, während eine sp^3 - Hybridisierung auf eine Absättigung des Kohlenstoffes hindeutet und mit einem Verlust der Schmierwirkung und einer Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeit der Schicht einhergeht.

Weiters konnte in den Spuren auf Bronze die Verbindung WS_2 , welche schon in der EDX Analyse als Trockenschmierstoff vermutet wurde, bestätigt werden. WS_2 ist gleichzeitig die

Quelle des Sulfids für die Bildung des Cu_2S in den Spuren der Kupferprobe. Durch die Bildung von Cu_2S wird der Trockenschmierstoff verbraucht und steht nicht mehr weiter zur Verfügung. Ein Vergleich der Spuren auf Bronze und Kupfer ergab für Bronze einen hohen Gehalt an WS_2 in der Spur, während sich auf der Oberfläche von Kupfer beinahe ausschließlich WO_3 nachweisen ließ, was auf einen Verbrauch des Festschmierstoffes hindeutet. Die XPS Messungen von Kohlenstoff und Wolfram sind in Abbildung 50 gegenübergestellt.

Durch die chemische Umwandlung von WS_2 zu WO_3 und von Grafit in eine nicht schmierende Konfiguration kommt es zu einem erhöhten Verschleiß an den Bürsten da neues Material aus den Bürsten nachgeliefert werden muss und zu einem Verbrauch von Cu bei der Bildung von Cu_2S führt. Durch diese Mechanismen kann über einen längeren Zeitraum keine funktionsfähige Gleitschicht aufgebaut und erhalten werden. Diese Ergebnisse korrelieren mit den vorangehenden Untersuchungen und liefern eine Erklärung für die makroskopische Erscheinung der Proben und für den hohen Verschleiß der Kupferproben bei den Langzeitversuchen.

Die unterschiedlichen Analysen zeigten eine höhere Geschwindigkeit der Schichtbildung auf Kupfer gegenüber Bronze bei den Versuchen mit 450 km Wegstrecke und bis zu diesem Punkt der Experimente einen geringeren Verschleiß der Oberfläche im Vergleich zu Bronze. Versuche bei Gleitwegen von 1800 km zeigten den Aufbau einer effektiven Gleitschicht auf Bronze und einen hohen Verschleiß auf Kupfer.

Mittels analytischer Methoden konnte eine Umwandlung des Grafits und des Trockenschmierstoffes in der Spur auf Kupfer im Vergleich zur Bronze festgestellt werden. Die Umwandlung führt schon nach einem geringen Gleitweg zu einem Verlust der vor Verschleiß schützenden Eigenschaften und zu einem Verlust der Leitfähigkeit der Schicht. Die Versuche in salzhaltiger Umgebung ergaben ebenfalls einen höheren Verschleiß von Kupfer im Vergleich zu Bronze unter identen Versuchsbedingungen.

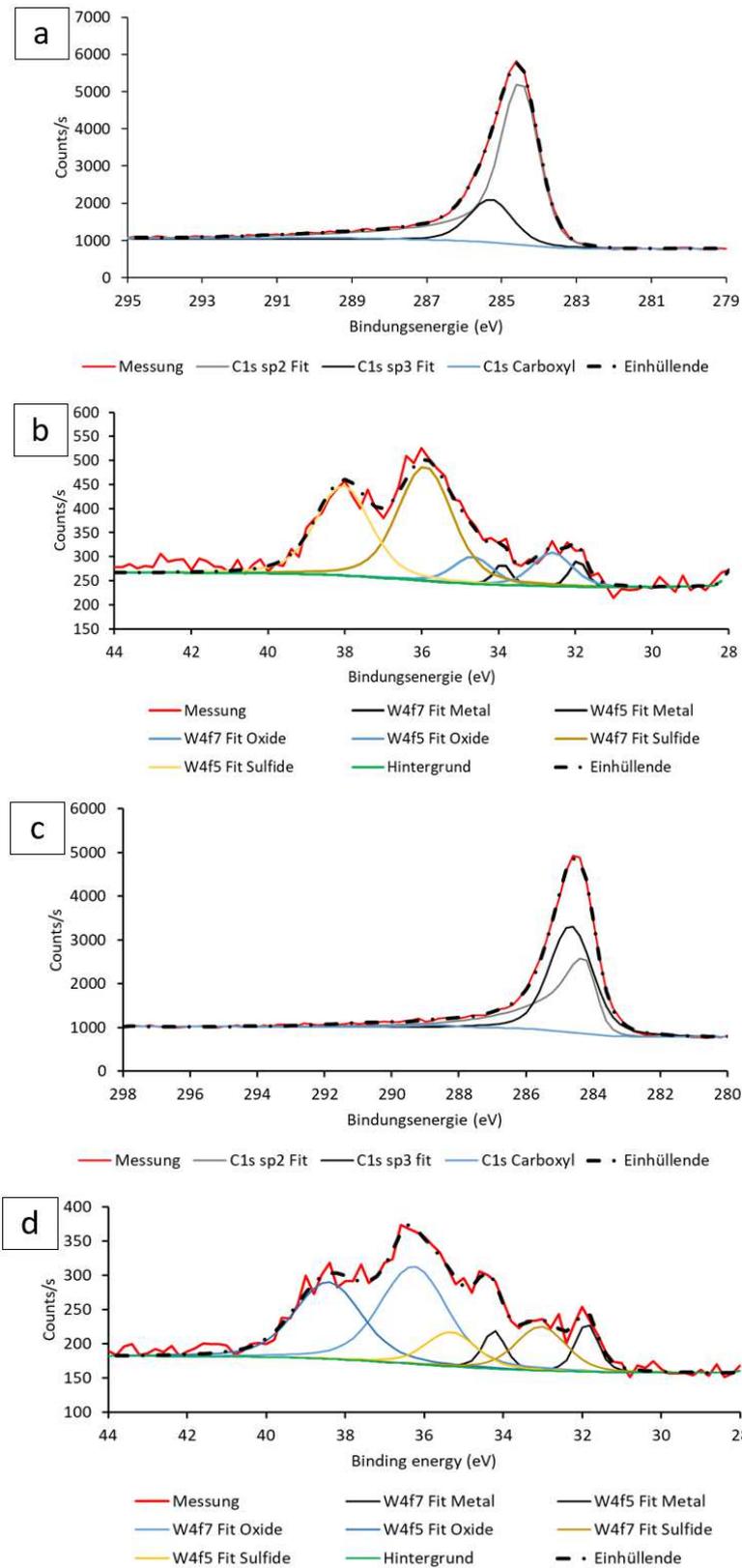


Abbildung 50: Gegenüberstellung der XPS Messung von (a) Kohlenstoff auf Bronze (V60), (b) WS_2 auf Bronze (V60), (c) Kohlenstoff auf Kupfer (V63), (d) WS_2 auf Kupfer (V63)

8. ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel dieser Arbeit war, die Schichtbildung an der Oberfläche von Schleifringen bzw. Kommutatoren im tribologischen Schleifkontakt mit handelsüblichen Kohlebürsten, wie sie im Betrieb eines Gleichstrommotors oder eines Generators entstehen, zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurde ein Versuchstand realisiert, welcher die experimentelle Charakterisierung der Schichtbildung im Kontaktbereich zwischen Schleifkohlen und Schleifring unter kontrollierten Betriebsbedingungen ermöglicht. Als wesentliche Einflussgrößen wurden Versuchsdauer, Umgebungsbedingungen und Stromstärke im Experiment systematisch variiert, und sowohl ein anwendungstypischer Schleifringwerkstoff aus Bronze als auch ein Kupferschleifring verwendet. Die Schichtbildung an den Schleifringen wurde nach der Versuchsdurchführung mittels unterschiedlicher Analysemethoden, wie Rasterelektronenmikroskopie (REM + EDX + FIB) und Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung der Tribospuren und der mechanischen Veränderung der Werkstoffe im Bereich der tribologischen Kontaktzone charakterisiert und bewertet.

Die makroskopischen Betrachtungen ergaben eine deutliche ausgeprägte Schichtbildung auf den Schleifringen aus Kupfer, wohingegen die Schichtbildung auf der Bronze weit weniger ausgeprägt war, und somit auf einen geringeren Übertrag der Kohle hindeutet. Unter den besonderen Bedingungen einer salzhaltigen Atmosphäre zeigt sich ein stark abweichendes Aussehen, verglichen mit salzfreien Bedingungen. Die bläulich/grünliche Färbung auf der Bronze deutet auf die Bildung von Sulfaten und Chloriden hin, während die dunklere Färbung auf dem Kupfer auf die verstärkte Bildung von Cuprit schließen lässt.

Im Rahmen der 3D Topographieanalyse der Schleifringoberflächen wurde festgestellt, dass an den Kupferschleifringen ein höherer Verschleißabtrag verglichen mit den Bronzeschleifringen auftritt. Der reduzierte Verschleißabtrag, welcher unter salzhaltigen Umgebungsbedingungen beobachtet wurde, kann auf die Ablagerung von Salz im tribologischen Kontakt und die daraus resultierende hygroskopische Wirkung, welche die Ausbildung einer verschleißreduzierende Schicht begünstigt, zurückgeführt werden.

Die im Versuchsstand gemessenen Kraftverläufe von Normalkraft und Reibkraft zeigen ein charakteristisches Verhalten, dass nach einem Einlaufvorgang ein konstantes Niveau erreicht wird. Im Einlaufbereich erfolgt die Oberflächenanpassung der Kohle an den Schleifring, und in weiterer Folge bildet sich die Triboschicht am Schleifring aus, was die Ausbildung eines konstanten Kräfteniveaus zur Folge hat.

Zur detaillierten Beschreibung der Schichtbildung wurden unterschiedliche analytische Methoden verwendet. Hier zeigten sich auf Kupfer und Bronze unterschiedliche Verschleißzustände. Während in den Verschleißspuren auf Bronze scharfkantige Partikel detektiert wurden, besitzt die Kupferoberfläche im tribologischen Kontakt eine Vermischung mit Kohle, jedoch ohne ausgeprägte scharfkantige Partikel.

Die chemische Analyse der ausgebildeten Schicht am Schleifringwerkstoff zeigte mittels EDX einen hohen Anteil an Sauerstoff und Kohlenstoff, sowie die Bestandteile des Schleifrings und der Kohle. Weiters konnte in der ausgebildeten Schicht an der Bronze zusätzlich Wolfram und Schwefel detektiert werden. Mittels XPS konnten die Elemente Wolfram und Schwefel dem WS_2 zugeordnet werden. WS_2 als Festschmierstoff wird oftmals dem Grafit der Schleifkohle beigefügt. In den ausgebildeten Schichten am Kupfer konnte anstelle von WS_2 beinahe ausschließlich WO_3 nachgewiesen werden, welches aus der chemischen Umwandlung von WS_2 herrührt.

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit systematisch durchgeführten tribologischen Tests und der analytischen Charakterisierung der Schichtbildung am Schleifringwerkstoff zeigte sich eine geringere Langzeitstabilität bei Kupfer im Vergleich zu Bronze im Schleifkontakt mit Kohlebürsten. Daher ist Kupfer trotz seiner guten elektrischen Eigenschaften in unlegierter Form für den Einsatz als Schleifringwerkstoff zur Fertigung von Schleifringen nur bedingt geeignet.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- 1 Albert Kloss, *Von der Elektrizität zur Elektrizität: Ein Streifzug durch die Geschichte der Elektrotechnik, Elektroenergetik und Elektronik*, 1987,
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-0348-6038-3>.
- 2 „Karle - 2015 - Elektromobilität Grundlagen und Praxis.pdf“.
- 3 Anton Karle, *Elektromobilität: Grundlagen und Praxis* (München: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser-Verlag, 2015).
- 4 A. Krätschmer, I. Odnevall Wallinder, und C. Leygraf, „The Evolution of Outdoor Copper Patina“, *Corrosion Science* 44, Nr. 3 (März 2002): 425–50, [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(01\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(01)00081-6).
- 5 R. Picciochi u. a., „Influence of the Environment on the Atmospheric Corrosion of Bronze“, *Journal of Applied Electrochemistry* 34, Nr. 10 (Oktober 2004): 989–95,
<https://doi.org/10.1023/B:JACH.0000042667.84920.e2>.
- 6 Krätschmer, Odnevall Wallinder, und Leygraf, „The Evolution of Outdoor Copper Patina“.
- 7 K.P. FitzGerald u. a., „Atmospheric Corrosion of Copper and the Colour, Structure and Composition of Natural Patinas on Copper“, *Corrosion Science* 48, Nr. 9 (September 2006): 2480–2509, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.09.011>.
- 8 Krätschmer, Odnevall Wallinder, und Leygraf, „The Evolution of Outdoor Copper Patina“.
- 9 Ragnar Holm, *Elektrische Kontakte* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1958).
- 10 Ragnar Holm, *Elektrische Kontakte* (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1958).
- 11 Milenko Braunovic, Valery V. Konchits, und Nikolai K. Myshkin, *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology*, 1. Aufl. (CRC Press, 2017),
<https://doi.org/10.1201/9780849391088>.
- 12 B. Fakih und M. Dienwiebel, „The Structure of Tribolayers at the Commutator and Brush Interface: A Case Study of Failed and Non-Failed DC Motors“, *Tribology International* 92 (Dezember 2015): 21–28, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.008>.
- 13 I. Yasar, A. Canakci, und F. Arslan, „The Effect of Brush Spring Pressure on the Wear Behaviour of Copper–Graphite Brushes with Electrical Current“, *Tribology International* 40, Nr. 9 (September 2007): 1381–86, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.03.005>.

- 14 „Schunk-Carbon-Technology-Kohlebuersten-Carbon-Brushes-DE-EN.pdf“, zugegriffen 27. September 2020, <https://www.schunk-carbontechnology.com/fileadmin/Redakteur/Mediathek/Broschueren/SchunkCarbonTechnology/HomeAppliance/Schunk-Carbon-Technology-Kohlebuersten-Carbon-Brushes-DE-EN.pdf>.
- 15 H Zhao, G.C Barber, und J Liu, „Friction and Wear in High Speed Sliding with and without Electrical Current“, *Wear* 249, Nr. 5–6 (Juni 2001): 409–14, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00545-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00545-2).
- 16 N.K. Myshkin und V.V. Konchits, „Friction and Wear of Metal-Composite Electrical Contacts“, *Wear* 158, Nr. 1–2 (Oktober 1992): 119–40, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90034-6).
- 17 W.J Spry und P.M Scherer, „Copper Oxide Film Formation at a Sliding Carbon-Copper Interface“, *Wear* 4, Nr. 2 (März 1961): 137–49, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(61\)90316-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(61)90316-7).
- 18 T.A. Dow und J.W. Kannel, „Thermomechanical Effects in High Current Density Electrical Slip Rings“, *Wear* 79, Nr. 1 (Juni 1982): 93–105, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(82\)90206-X](https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90206-X).
- 19 D.K. Lawson und T.A. Dow, „The Sparking and Wear of High Current Density Electrical Brushes“, *Wear* 102, Nr. 1–2 (März 1985): 105–25, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(85\)90094-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(85)90094-8).
- 20 Takahiro Ueno u. a., „Relationship between Contact Voltage Drop and Frictional Coefficient under High-Current Sliding Contact“, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 5, Nr. 4 (18. Juni 2010): 486–92, <https://doi.org/10.1002/tee.20562>.
- 21 „Hu et al. - 2008 - Study on surface film in the wear of electrographite brushes against copper commutators for variable current and humidity. pdf“.
- 22 N.K. Myshkin und V.V. Konchits, „Friction and Wear of Metal-Composite Electrical Contacts“, *Wear* 158, Nr. 1–2 (Oktober 1992): 119–40, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90034-6](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90034-6).
- 23 W. Davies, „The Sliding Contact of Graphite and Copper“, *Proceedings of the IEE Part C: Monographs* 105, Nr. 7 (1958): 203, <https://doi.org/10.1049/pi-c.1958.0028>.
- 24 Holm, *Elektrische Kontakte*, 1958.

- 25 Braunovic, Konchits, und Myshkin, *Electrical Contacts*.
- 26 Takahiro Ueno und Koichiro Sawa, „Characteristics of Surface Film on Slip-Ring in the Low Atmospheric Pressure“, *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES* 23, Nr. 2 (2000): 5.
- 27 Takahiro Ueno und Koichiro Sawa, „Characteristics of Surface Film on Slip-Ring in the Low Atmospheric Pressure“, *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES* 23, Nr. 2 (2000): 5.
- 28 Kevin Alewine und William Chen, „A Review of Electrical Winding Failures in Wind Turbine Generators“, *IEEE Electrical Insulation Magazine* 28, Nr. 4 (2012): 6.
- 29 Z.L. Hu, Z.H. Chen, und J.T. Xia, „Study on Surface Film in the Wear of Electrographite Brushes against Copper Commutators for Variable Current and Humidity“, *Wear* 264, Nr. 1–2 (Januar 2008): 11–17, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.034>.
- 30 Z.L. Hu, Z.H. Chen, und J.T. Xia, „Study on Surface Film in the Wear of Electrographite Brushes against Copper Commutators for Variable Current and Humidity“, *Wear* 264, Nr. 1–2 (Januar 2008): 11–17, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.034>.
- 31 Zhao, Barber, und Liu, „Friction and Wear in High Speed Sliding with and without Electrical Current“.
- 32 Wae-Gyeong Shin und Soo-Hong Lee, „An Analysis of the Main Factors on the Wear of Brushes for Automotive Small Brush-Type DC Motor“, *Journal of Mechanical Science and Technology* 24, Nr. 1 (Januar 2010): 37–41, <https://doi.org/10.1007/s12206-009-1135-4>.
- 33 „Riedel - 2010 - Allgemeine und anorganische Chemie.pdf“, o. J.
- 34 Eduard Vinaricky, *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen: Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren*, 2002, <http://link.springer.com/openurl?genre=book&isbn=978-3-642-62698-2>.
- 35 Deutschland Mersen, „<https://www.ellor.de/herstellung-von-graphit.html>“, 22.07.2020., <https://www.ellor.de/herstellung-von-graphit.html>.
- 36 Mechatron, „Datenblatt_Spindel-HFS-8022.pdf“, 2015, <https://www.mechatron-gmbh.de/>.
- 37 Günter Petzow, *Metallographisches Keramographisches Plastographisches Ätzen*, 6. Aufl., 1 (Gebrüder Bornträger Berlin Stuttgart, 2006).
- 38 Michael Volgger, „Lichtmikroskopie.pdf“, 28. Februar 2008, <https://www.univie.ac.at/mikroskopie/pdf/Lichtmikroskopie.pdf>.

- 39 Goerg H. Michler, *Kompakte Einführung in die Elektronenmikroskopie: Techniken, Stand, Anwendungen, Perspektiven, essentials* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019), <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26688-2>.
- 40 Skoog und Leary, *Instrumentelle Analytik* (Springer, o. J.), zugegriffen 10. August 2020.
- 41 Andreas Jenk, „Elektronenmikroskopie und deren spektroskopische Anwendungen.pdf“, 2019, <https://physik.uni-graz.at/~uxh/diploma/jank19.pdf>.
- 42 Michael Zier, „Untersuchungen zu Schichtwachstum und Grenzflächen an Ta-basierten Dünnschichten mittels XPS“ (2007), https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/099/39099073.pdf.
- 43 Stefan Hüfner, *Photoelectron Spectroscopy*, Bd. 82, Springer Series in Solid-State Sciences (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996), <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03209-1>.
- 44 Dow und Kannel, „Thermomechanical Effects in High Current Density Electrical Slip Rings“.
- 45 Lawson und Dow, „The Sparking and Wear of High Current Density Electrical Brushes“.
- 46 „X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) Reference Pages“, zugegriffen 10. September 2020, <http://www.xpsfitting.com/>.