



Montanuniversität Leoben – University of Leoben

Department Metallurgie – Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie – Nonferrous Metallurgy



# MASTERARBEIT

Thema:

## **Gewindeoptimierung einer Titanradnabe in Kombination mit einer Stahlradmutter für Formel-1-Anwendungen**



Ersteller:

**Marco Micelli**

Betreuer:

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Helmut Antrekowitsch**

**Dipl.-Ing. Dr.mont. Katharina Faerber**

Leoben, Oktober 2017

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

---

Marco Micelli

Leoben, Oktober 2017

### *Kurzfassung*

Ziel dieser Masterarbeit war die Suche nach einer verschleißreduzierenden Maßnahme für das Gewinde einer Titanradnabe, um die Lebensdauer von Titanradnaben in Kombination mit Stahlradmuttern zu verlängern.

Es erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche bezüglich einer Materialverschleißreduzierung. Grundsätzlich kamen drei unterschiedliche Verfahrensansätze zur Anwendung und deren Potenziale konnten gegenübergestellt werden. Nach gründlicher Recherche und mit Hilfe einer Nutzwertanalyse fand die Auswahl von fünf Varianten für diverse Untersuchungen statt. In erster Linie dienten die Untersuchungen zur Informationssammlung bezüglich Schichthaftung, Lebensdauer und Belastbarkeit. Der finale Test, um die Lebensdauer des Gewindes in Form eines Radwechsels praxisnahe am Prüfstand der Pankl Systems AG nachzustellen, erfolgte mit einer Referenz-Radnabe aus Titan und der Variante, die am meisten Potenzial in den vorherigen Untersuchungen zeigte.

Abschließend wurden alle Ergebnisse, die aus den Prüfstandsversuchen hervorgehen, auf ihr Potenzial zur Marktreife bewertet.

### *Abstract*

The aim of this thesis was the search for a suitable and wear reducing measure for the thread of a titanium hub, which extends the life of titanium wheel hubs in combination with steel wheel nuts.

An extensive literature review regarding material wear reduction was carried out. Basically, three different methodical approaches were used and their potential has been compared with the others. After thorough research and by means of a cost-benefit analysis five variants were selected for various preliminary testing methods. Essentially, the preliminary gathering serves as information of ply adhesion, durability and loading capacity. The final test to realistically validate the life of the thread in the form of a wheel change on the test bench of Pankl Systems AG, was a reference hub made of titanium and the variant that showed the highest potential in the preliminary tests carried out.

Finally, all results that emerge from the bench tests have been evaluated for their potential to for marketability.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG, ZIELSETZUNG UND LÖSUNGSWEG</b> .....	<b>2</b>
2.1	Problemstellung .....	2
2.2	Zielsetzung .....	2
2.3	Lösungsweg .....	2
<b>3</b>	<b>STAND DER TECHNIK</b> .....	<b>5</b>
3.1	Aktueller Stand der Fertigung von Titanradnaben .....	5
3.2	Wärmebehandlung .....	7
3.2.1	Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern .....	8
3.2.2	Nitrieren .....	9
3.2.3	Borieren .....	10
3.3	Beschichtung .....	10
3.3.1	PVD-Prozess .....	11
3.3.2	CVD-Prozess .....	12
3.3.3	PACVD-Prozess .....	13
3.3.4	Thermisches Spritzen .....	13
3.3.5	Galvanotechnik .....	15
3.4	Schweißen .....	16
3.4.1	Auftragsschweißen .....	17
3.4.2	Selektives Laserschmelzen .....	18
3.5	Beanspruchungen, Defekte und Schmiermittel .....	19
3.5.1	Beanspruchungen .....	19
3.5.2	Schlag- und Schwingungsreibverschleiß .....	19
3.5.3	Schmierstoffe .....	20
<b>4</b>	<b>EXPERIMENTELLE METHODEN</b> .....	<b>22</b>
4.1	Varianten und Versuche .....	22
4.2	Test A: Herstellung der Probescheibe .....	23
4.3	Test B Impacttest .....	24
4.4	Test C: Scratchtest .....	26
4.5	Test D: Prüfstandsversuche .....	27
4.6	Rasterelektronenmikroskopie .....	30

---

<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE</b> .....	<b>33</b>
5.1	Test B: Impacttest.....	33
5.1.1	Impact-REM-Auswertung.....	33
5.1.2	Impacttiefe .....	37
5.2	Test C: Scratchtest .....	41
5.3	Test D: Prüfstandversuche .....	46
5.4	Auswertung der Oberflächenrauigkeit.....	55
<b>6</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE</b> .....	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b> .....	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>60</b>
<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>62</b>
<b>10</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>64</b>
<b>11</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>65</b>
11.1	Vorversuch Variante 14: Auswertung.....	65
11.2	REM-Auswertung beim Impacttest.....	69
11.3	REM-Auswertung beim Scratchtest .....	80

# 1 Einleitung

Die Fa. Pankl Racing Systems AG ist seit der Gründung im Jahre 1985 Weltmarktführer als Lieferant für den Rennsport. An verschiedenen Standorten in Österreich und weltweit werden sowohl Antriebselemente als auch Motorkomponenten produziert. Radträger, Radnaben, Antriebswellen, Pleuel und Kolben sind typische Bauteile, die für diverse Rennsportserien, von der Formel 1 bis hin zur DTM oder der „Le Mans“-Serie, produziert werden. Neue innovative Entwicklungen sind notwendig, um sich von Mitbewerbern abzuheben und einen Know-How-Vorsprung zu behalten bzw. auszubauen.

Die Forschung und Entwicklung trägt einen großen Teil dazu bei, dass die Fa. Pankl weiterhin Weltmarktführer in diesen Segmenten des Motorsports bleibt. Auch die Firmenphilosophie der Pankl Racing Systems AG „High Tech, High Speed, High Quality“ zeigt, dass Teile in kürzester Zeit entwickelt, gefertigt und dem Kunden ausgeliefert werden. Neue, innovative Entwicklungen sind ein Teil der Firmenidentifikation.

Bei diesem Projekt handelt es sich um die Entwicklung einer verschleißbeständigen Schutzschicht für das Gewinde einer Titanradnabe für die Anwendung mit Stahlmutter. Zurzeit werden hauptsächlich Stahlradnaben verwendet. Um Gewicht einzusparen ist es das zukünftige Ziel, Titanradnaben mit dieser neu entwickelten Schicht zu verwenden. Aufgrund der unterschiedlichen Belastungen, die das Gewinde beanspruchen, muss eine Schicht entwickelt werden, die sowohl schlagenden Beanspruchungen (Abrasion, Impact Loads) am Gewindestart als auch sogenanntem „Fretting“ (Fressen) an den Gewindeflanken stand hält. Auch das Grundmaterial darf nicht nachteilig beeinflusst werden.

## 2 Problemstellung, Zielsetzung und Lösungsweg

### 2.1 Problemstellung

Bei der Kombination Titanradnabe/Stahlmutter ist der Härteunterschied zwischen Titan und Stahl problematisch. Aufgrund der höheren Härte des Stahls verlagert sich der Verschleiß auf die weichere Komponente, das Titan. Momentan werden bei Titanradnaben als Gegenkomponente Aluminiumradmuttern verwendet, bei Stahlradnaben hingegen Stahlradmuttern. Aluminium ist weicher als Titan, daher verschleißt bei dieser Kombination die Mutter, Aluminium hat gerade im vorliegenden Anwendungsfall jedoch einige Nachteile. Aufgrund von Vorteilen der Stahlradmuttern werden diese auch bei Titanradnaben zukünftig vermehrt zum Einsatz kommen.

### 2.2 Zielsetzung

Ziel ist es, eine dementsprechend verschleißresistente Schicht zu entwickeln, um primär das Gewinde der Radnabe zu schützen, das heißt den Verschleiß auf die Mutter zu übertragen. Im Rennsport stellt die Mutter ein Verschleißteil dar und wird regelmäßig getauscht.

Es gibt viele Möglichkeiten ein Gewinde verschleißfester zu machen. In diesem Projekt wurden drei generelle Grundvarianten definiert:

- Wärmebehandlungen bzw. Diffusionsvorgänge
- Beschichtungen
- Schweißmethoden

### 2.3 Lösungsweg

Wärmebehandlungen können einerseits eine Gefügeumwandlung über die gesamte Bauteilwandstärke bewirken oder andererseits eine Umwandlung hauptsächlich an der Oberfläche. In dieser Arbeit wird insbesondere die Oberflächenumwandlung betrachtet (Diffusionsvorgänge). Hierzu zählen Verfahren wie z.B. Nitrieren, Borieren, etc. Hierbei ist die Gefahr des Kernhärteverlustes durch die hohen Prozesstemperaturen zu beachten.

Beschichtungsprozesse sind breit gefächert und finden in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung. Speziell in diesem Projekt wird das Augenmerk darauf gelegt, eine vergleichsweise dickere Schicht zu entwickeln, die auch dementsprechend hart ist und an

die Steifigkeit des Substrates angepasst ist. Allerdings kann bei harten und dünnen Schichten, welche durch eine schlagende Belastung beansprucht werden, ein Abplatzen dieser Schicht erfolgen. Die Idee einer verschleißbeständigen Multilayerschicht (mehrere unterschiedliche Schichten übereinander) wird daher in dieser Arbeit intensiv verfolgt.

Die dritte Variante mit der sich dieses Projekt beschäftigt sind mögliche Schweißverfahren. Dabei sollte auf dem Titgrundwerkstoff, wenn möglich, ein Stahl oder Hartmetallwerkstoff aufgeschweißt werden. Das größte Problem bei der Schweißverbindung Stahl/Titan ist die Bildung von intermetallischen Phasen und die dadurch resultierende spröde Schweißnaht. Deswegen wird bei dieser Recherche nach einem geeigneten metallischen Partner für das Titan gesucht, welcher gut für die Schweißung geeignet ist und auch dementsprechend härter als das Titan ist.

Um die Vielzahl an möglichen verschleißreduzierenden Maßnahmen miteinander vergleichen und für Versuche auswählen zu können wurde eine Nutzwertanalyse erstellt. Tabelle 2.1 definiert das diesbezügliche Benotungssystem. In Abbildung 2.1 ist die Nutzwertanalyse ersichtlich.

Tabelle 2.1: Definition der Beurteilung für die Nutzwertanalyse

0 ... wird nicht erfüllt
1 ... wird kaum erfüllt
2 ... wird teilweise erfüllt
3 ... wird gut erfüllt
4 ... wird sehr gut erfüllt
5 ... wird vollkommen erfüllt

Nr.	Beschreibung der Eigenschaft	Gewichtung in %	Referenz			Beschichtungen						Schweißen						Wärmebehandlung/Diffusionsvorgänge				Material																
			VARIANTE 1	VARIANTE 2	VARIANTE 3	VARIANTE 4	VARIANTE 5	VARIANTE 6	VARIANTE 7	VARIANTE 8	VARIANTE 9	VARIANTE 10	VARIANTE 11	VARIANTE 12	VARIANTE 13	VARIANTE 14	VARIANTE 15	VARIANTE 16																				
			Stahl	Titan	PVD C/CN	PACVD DLC	Detonationskanone	galvanische Beschichtung	Auftragschweißen	SLM	thermisches Spritzen	Laserschweißen	Reibschweißen	Diffusionschweißen	Plasma-nitrieren 01	Plasma-nitrieren 02	Borieren	verbessertes Material																				
1	zul. Gesamtgewicht / Leichtbau	0	0,0	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3	5	1,3											
2	dynamische Belastbarkeit	10%	4	0,4	2	0,2	3	0,3	2	0,2	3	0,3	4	0,4	3	0,3	4	0,4	3	0,3	2	0,2	3	0,3	2	0,2	3	0,3	2	0,2								
3	große Schichtdicke	10%	0	0,0	0	0,0	2	0,2	1	0,1	4	0,4	5	0,5	5	0,5	5	0,5	4	0,4	4	0,4	2	0,2	3	0,3	1	0,1	3	0,3	2	0,2						
4	niedrige Herstellkosten	5%	5	0,3	2	0,1	2	0,1	3	0,2	2	0,1	2	0,1	2	0,1	1	0,1	2	0,1	2	0,1	0	0,0	1	0,1	4	0,2	2	0,1	4	0,2	2	0,1				
5	kurze Verfahrensdauer + Lieferranz	5%	5	0,3	4	0,2	3	0,2	3	0,2	2	0,1	2	0,1	2	0,1	2	0,1	1	0,1	1	0,1	2	0,1	1	0,1	2	0,1	3	0,2	2	0,1	1	0,1				
6	gute Genauigkeit, Toleranzen	5%	4	0,2	2	0,1	3	0,2	3	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	3	0,2	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	3	0,2		
7	niedrige Fehleranfälligkeit	5%	3	0,2	2	0,1	3	0,2	3	0,2	4	0,2	3	0,2	4	0,2	3	0,2	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	3	0,2		
8	gute Fertigbarkeit	5%	4	0,2	3	0,2	3	0,2	3	0,2	4	0,2	2	0,1	4	0,2	2	0,1	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,1	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1	0,1		
9	hohe Kernfestigkeit	5%	4	0,2	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	2	0,1	4	0,2	2	0,1	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	2	0,1
10	hohe Oberflächenhärte	5%	4	0,2	2	0,1	5	0,3	5	0,3	5	0,3	5	0,3	5	0,3	4	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	3	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	5	0,3	2	0,1
11	hohe Verschleißbeständigkeit	5%	3	0,2	2	0,1	3	0,2	3	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	3	0,2	3	0,2	3	0,2	2	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	5	0,3	2	0,1
12	robustes Design	5%	4	0,2	2	0,1	2	0,1	2	0,1	2	0,1	2	0,1	3	0,2	2	0,1	4	0,2	2	0,1	4	0,2	2	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	4	0,2	4	0,2	3	0,2
13	einfache Nachbearbeitung	5%	4	0,2	1	0,1	3	0,2	2	0,1	4	0,2	4	0,2	4	0,2	4	0,2	1	0,1	1	0,1	1	0,1	1	0,1	2	0,1	1	0,1	2	0,1	2	0,1	4	0,2		
14	Erfahrung mit Werkstoff	3%	5	0,2	2	0,1	4	0,1	4	0,1	4	0,1	4	0,1	4	0,1	4	0,1	1	0,0	0	0,0	1	0,0	1	0,0	1	0,0	1	0,0	1	0,0	2	0,1	2	0,1	3	0,1
15	Erfahrung mit Gewinde	2%	4	0,1	2	0,0	1	0,0	1	0,0	2	0,0	1	0,0	2	0,0	1	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Summe aller gewichteten Eigenschaften:		5	2,6	2,6	3,3	3,1	3,8	3,6	3,2	2,5	2,3	2,0	2,1	3,3	3,0	2,6																						
Summe aller gewichteten Eigenschaften:		100%	53%	52%	66%	62%	76%	73%	64%	49%	46%	40%	42%	65%	59%	53%																						
Rangfolge der Lösungsvarianten:		-	9	11	3	7	1	2	6	12	13	16	15	4	8	9																						

Abbildung 2.1: Nutzwertanalyse möglicher verschleißminimierender Verfahren

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Aktueller Stand der Fertigung von Titanradnaben

Das Projekt Titanradnabe mit Stahlmutter war in den letzten Jahren schon ein wichtiges Thema bei der Fa. Pankl, allerdings konnten hier keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Es wurden zwei Verfahren getestet:

- Plasmanitrieren
- Keramische Beschichtung (plasmaphysikalisch aufgebracht)

Das Problem beim Plasmanitrieren sind die hohen Temperaturen, welche erreicht werden müssen, damit der Stickstoff dementsprechend tief (50–150 µm) in das Titan eindiffundieren kann. Durch die hohen Werte (> 800 °C bis ca. 1000 °C sind nötig) und die lange Behandlungszeit (> 14 Std.) fällt die Kernhärte um ca. 10 % ab. Des Weiteren tritt ein extremer Verzug auf, welcher nach dem Nitrierprozess nicht mehr bearbeitet werden kann. Daher wurden bei den vergangenen Versuchen Temperaturen von max. 740°C verwendet. Aufgrund der zu geringen Schichtdicken (5–10 µm), die erreichbar waren, konnte das Gewinde den Belastungen nicht standhalten und zeigte enormen Verschleiß. Darüber hinaus ist auch der Kernhärteabfall nicht akzeptabel.

Die keramische Beschichtung entsteht im Elektrolyt, wobei die Metalloberfläche in einer Plasmaentladung zu einer dichten, atomar haftenden Schicht umgewandelt wird. Es werden Härtewerte bis zu 2000 HV erreicht und Schichtdicken, je nach Verwendungszweck, von 10–200 µm aufgebaut. Zusätzlich wurde auf diese keramische Beschichtung eine WS<sub>2</sub>-Schicht aufgebracht. Diese dient primär zur Verringerung des Reibwertes und zur besseren Schmierung im Kontaktbereich Radnabe/Radmutter.

Heutzutage wird im Rennsport vermehrt darauf geachtet, die Lebensdauer der Bauteile zu erhöhen und dadurch Kosten zu sparen. Am Gewinde einer Radnabe treten durch den extrem schnellen Boxenstopp (< 3 s) enorme Kräfte auf, die dafür verantwortlich sind, dass sogar die Spitze eines Gewindegangs abreißt (siehe Abbildung 3.1).

Bei der Verwendung von verschleißreduzierenden Maßnahmen ist zu beachten, dass diese Verfahren für den Werkstoff und die Bauteilgeometrie geeignet sein müssen, zum Beispiel sind bei einem endkonturnahen Bauteil Diffusionsprozesse schwierig umsetzbar, da die hohen Behandlungstemperaturen einen Verzug verursachen, der nicht mehr kompensiert werden kann.

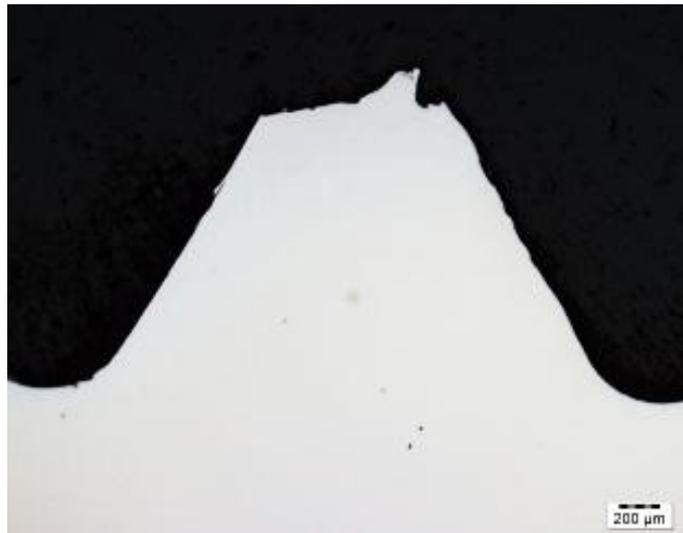


Abbildung 3.1: Abbruch Gewindespitze bei Radnabe (plasmanitriert)

Wärmebehandlungen über die gesamte Bauteilwandstärke (also durchhärtende WBHs) sind nicht ausreichend, da die Härtesteigerungen zu gering sind, um mit der Härte von Stahl zu konkurrieren. Zum Vergleich hat ein ausgehärteter hochfester Stahl, wie er für Radmutter verwendet wird, einen Wert von 550–650 HV und ein wärmebehandelter Titanwerkstoff erreicht ca. 400 HV.

Bei Schweißverbindungen liegt das Problem generell in der Bildung von intermetallischen Phasen von Titan und Eisen, was zu einer spröden Schweißnaht führt. Daher muss darauf geachtet werden, einen passenden Werkstoffpartner für das Titan zu finden. Hier würden sich Nickel- oder Cobalt-Basislegierungen mit entsprechend hoher Härte anbieten. Die gleiche Herausforderung ist auch bei Auftragsschweißungen zu lösen, der Werkstoff muss kompatibel mit Titan und dementsprechend härter sein.

Bei Beschichtungen sind die größten Probleme die Schichtdicke und die Oberflächenhärte. Aufgrund der Kombination einer sehr dünnen Schicht ( $< 10 \mu\text{m}$ ) mit einer sehr hohen Härte ( $> 1000 \text{ HV}$ ) können diese Schichten bei schlagenden Belastungen abplatzen. Dieser „Eierschaleneffekt“<sup>[26]</sup> ist unerwünscht und kann nur durch einen entsprechend flachen Härtegradienten vom Grundwerkstoff zur Schicht mittels angepasster Schichtsteifigkeiten und aufgrund maximaler Schichthaftung vermieden werden. Die Idee einer Multilayerschicht ist daher eine geeignete Variante diesem Effekt entgegenzuwirken. Durch das abwechselnde Auftragen einer harten und einer weichen Schicht kommt es zu einer teilweisen Absorption der einwirkenden Kräfte und der Grundwerkstoff wird dadurch geringer beansprucht.

## 3.2 Wärmebehandlung

Eine Wärmebehandlung ist ein thermisches Verfahren zur Verbesserung mechanischer Eigenschaften. Titan und Titanlegierungen werden zu folgenden Zwecken wärmebehandelt [22] [13].

- Reduktion der Eigenspannung, die während der Herstellung entsteht
- Produktion einer für die Anwendung optimierten Kombination aus Duktilität, Zerspanbarkeit, Formbeständigkeit und Stabilität des Gefüges
- Erhöhung der Härte anhand eines Prozesses mit angepassten Prozessparametern
- Optimierung spezieller für die Anwendung angepasster Eigenschaften (Bruchzähigkeit, Dauerfestigkeit und Hochtemperaturkriechfestigkeit)

Aufgrund dieser Anforderungen werden für Titan und Titanlegierungen drei Wärmebehandlungen definiert [8] [22]:

- Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern
- Spannungsarmglühen
- Diffusionsprozesse (Nitrieren, Borieren)

Die Temperatur und die Zeitschiene der jeweiligen Behandlungen sind ein wichtiger Faktor, um geeignete, für die Verwendung optimale, mechanische Kennwerte zu erzielen. Auch die chemische Zusammensetzung der Titanlegierungen bestimmen wesentlich die Prozessparameter, Temperatur und Zeit. Tabelle 3.1 gibt einen Überblick von den Einflussgrößen der verschiedenen Wärmebehandlungen für den Titanwerkstoff Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo [8].

Tabelle 3.1: Wärmebehandlungsparameter für Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo [8]

Wärmebehandlung	Temperatur [°C]	Zeit [h]	Abschrecken/Abkühlung
Lösungsglühen	812–925	1	Wasser-/Ölabschreckung
Auslagern	580–605	4–8	Luftgekühlt
Spannungsarmglühen	595–705	0,25–4	Luft od. langsame Abkühlung
Anlassen	Keine Verwendung im angelassenen Zustand		

### 3.2.1 Lösungsglügen, Abschrecken und Auslagern

Titan ist ein allotropes Material. Es besitzt zwei Gefügestrukturen, das  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Gefüge. Der  $\alpha$ -Kristall ist hexagonal und wandelt sich oberhalb von 855 °C in den kubischraumzentrierten  $\beta$ -Kristall um. Die chemische Zusammensetzung von Titanlegierungen ist für das Verhalten bei der  $\alpha$ - $\beta$ -Umwandlung ausschlaggebend. Sn und Zr ergeben zum Beispiel eine Mischkristallverfestigung ohne Veränderung der Übergangstemperatur, während Al, O und H ( $\alpha$ -Stabilisierer) diese Temperatur erhöhen und V, Mo und Nb ( $\beta$ -Stabilisierer) sie herabsetzen. Mn, Cr und Fe verursachen eutektoide Reaktionen, die den  $\alpha$ - $\beta$ -Übergang zu niedrigeren Temperaturen verschieben und die Existenz einer Zweiphasenstruktur bei Raumtemperatur zur Folge haben <sup>[13]</sup>. Abbildung 3.2 zeigt den Einfluss dieser Legierungselemente auf die Umwandlungstemperatur der  $\alpha$ - $\beta$ -Umwandlung <sup>[21]</sup>.

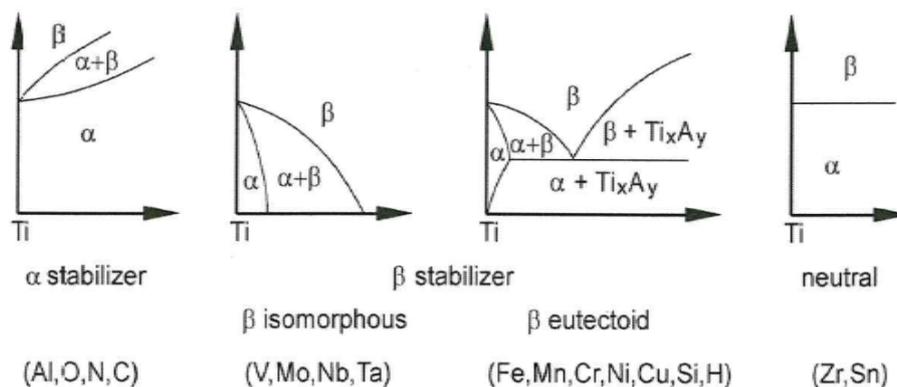


Abbildung 3.2: Einfluss von Legierungselementen bei der  $\alpha$ - $\beta$ -Umwandlung <sup>[21]</sup>

Durch Lösungsglügen, Abschrecken und anschließendes Auslagern lassen sich unterschiedliche Härtegrade bei  $\alpha$ - $\beta$ - oder  $\beta$ -Legierungen erreichen. Dabei muss auf die Instabilität der Hochtemperatur  $\beta$ -Phase bei Raumtemperatur geachtet werden. Die Erwärmung einer  $\alpha$ - $\beta$ -Legierung auf Lösungsglüh-temperatur erzeugt eine höhere Rate von  $\beta$ -Kristallen, die beim anschließenden Auslagern der metastabilen Legierung einen Härteanstieg verursachen. Die Lösungsglüh-temperatur erfordert Werte knapp unter oder über der  $\beta$ -Umwandlung und hängt vom Legierungstyp und dem späteren Anwendungsbereich ab <sup>[13]</sup>.

Die Abkühlrate spielt eine entscheidende Rolle bei der Härtung. Ist sie zu niedrig, so führt die Ausscheidung des  $\beta$ -Kristalls zu einem geringeren Härteanstieg. Eine hohe Abkühlrate verursacht einen starken Verzug. Man unterscheidet beim Abschrecken zwischen Wasser-

und Luftkühlung.  $\beta$ -Legierungen werden in der Regel mit Luft und bei  $\alpha$ - $\beta$ -Werkstoffen meist mit Wasser abgekühlt. Dabei soll sich möglichst viel  $\beta$ -Phase ausscheiden, sowohl an der Oberfläche als auch im Zentrum des Werkstückes <sup>[13]</sup>.

Beim letzten Schritt der Wärmebehandlung, dem Auslagern, wird der Werkstoff je nach Legierungstyp und Anwendungsbereich auf moderate Temperaturen gebracht. Die Ausscheidung der nach dem Abkühlen verbliebenen  $\beta$ -Phase bewirkt eine Stabilisierung des Gefüges. Dabei wird die erforderliche Härte erreicht und die Wärmebehandlung ist abgeschlossen <sup>[13]</sup>.

### 3.2.2 Nitrieren

Das Nitrieren ist ein thermochemisches Verfahren zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit an der Oberfläche von beanspruchten Metallbauteilen. Grundsätzlich wird zwischen Gas- und Plasmanitrieren unterschieden. Hingegen bei zusätzlicher Beimengung von Kohlenstoff wird vom Nitrocarburieren gesprochen. Aufgrund der Einwirkung von Wärme und der darauffolgenden chemischen Reaktion an der Oberfläche, diffundiert der Stickstoff in den Werkstoff hinein und bildet Nitride aus. Dies führt zu einer erhöhten Oberflächenhärte und einer deutlich verbesserten Beständigkeit gegen Verschleiß. Die vorhandenen Temperaturen bei einem Standardnitrierprozess befinden sich im Bereich zwischen Lösungsglühen und Auslagern. Der genaue Wert hängt wesentlich von der Dauer des Nitrierprozesses ab. Je höher dieser ist desto schneller diffundiert der Stickstoff in das Werkstück. In Abbildung 3.3 ist eine Nitrierschicht in einem Gefügebild zu sehen <sup>[14][15]</sup>.



Abbildung 3.3: Aufbau einer Nitrierschicht bei einer Titanlegierung<sup>[15]</sup>

### 3.2.3 Borieren

Analog zum Nitrieren (Kapitel 3.2.2) ist das Borieren ein thermochemisches Verfahren, bei dem das Bor in die Oberfläche des Werkstückes eindiffundiert und intermetallische Phasen bildet, sogenannte Boride. Aufgrund der hohen Härtewerte, die erreicht werden können, eignet sich das Borieren sehr gut zur Verbesserung der Verschleißigenschaften. Analog zum Nitrieren hängt die Schichtdicke von Behandlungsdauer, Temperatur und Zusammensetzung der jeweiligen Legierungen ab. Dabei werden Schichtdicken von 10–800  $\mu\text{m}$  erreicht. Dieser Prozess erfolgt entweder in pulverförmigen oder granulierten Gemischen. Meistens bestehen sie aus Borcarbid ( $\text{B}_4\text{C}$ ), das als borabgebende Substanz fungiert. Die Boriertemperaturen liegen zwischen 800–1050  $^\circ\text{C}$ . Der Prozess wird dabei in elektrisch beheizten Kammeröfen unter Normalatmosphärendruck gefahren<sup>[23]</sup>.

## 3.3 Beschichtung

Die Oberfläche eines Materials ist verschiedenen Beanspruchungen ausgesetzt. Nicht nur Korrosion und Verschleiß treten dabei auf, sondern auch durch Licht verursachte elektrische und magnetische Wechselwirkungen. Aufgrund der verschiedenen Anforderungen an das Eigenschaftsprofil eines Materials, wie z.B. hohe Festigkeit in Verbindung mit großer Zähigkeit, werden Verbundwerkstoffe verwendet. Diese bestehen aus zwei oder mehreren Materialien, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Dabei haben die oberflächennahen Materialien meist eine hohe Härte, die den darunterliegenden weichen Grundwerkstoff schützen soll<sup>[1]</sup>.

Grundsätzlich lassen sich Beschichtungen folgendermaßen einteilen <sup>[1]</sup>:

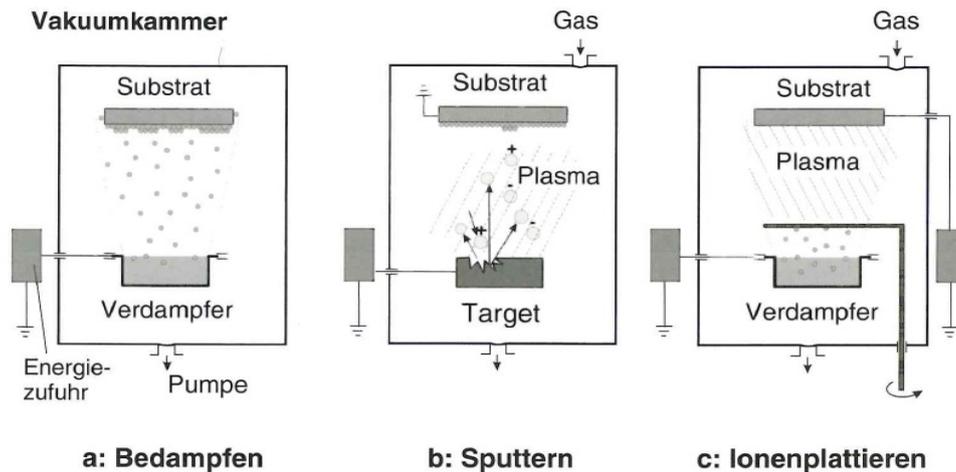
- Schichtmaterial wird atomar zugeführt (PVD-, CVD-, PACVD-Prozess, Plasmapolymersation und elektrochemische Abscheidung → Galvanisieren)
- Schichtmaterial wird in Form von flüssigen oder festen Partikeln aufgetragen (thermisches Spritzverfahren, Auftragsschweißen)
- Schichtmaterial wird als kompaktes Material im flüssigen oder festen Zustand aufgetragen (Plattieren, Abscheidung aus der metallischen Schmelze)

### 3.3.1 PVD-Prozess

Unter PVD (physical vapor desposition) versteht man die physikalische Abscheidung eines Schichtmaterials aus der Gasphase. Hierfür wird ein reaktives Gas in eine Vakuumkammer eingelassen, welches sich mit dem Beschichtungsmaterial chemisch verbindet und sich als Schicht an der Oberfläche abscheidet. Der PVD-Prozess wird in drei verschiedene Verfahren eingeteilt (Abbildung 3.4) <sup>[1]</sup>:

- Bedampfen:  
Atome oder Moleküle werden im Hochvakuum ( $< 10^{-8}$  bar) verdampft und scheiden sich als Schicht auf dem Substrat ab. Dabei fliegen die Schichtpartikel geradlinig und ohne Kollision von der Quelle zum Substrat.
- Sputtern:  
Atome werden mit Ionen beschossen, lösen sich vom Festkörper und gehen in die Gasphase über. Im Vergleich zum Bedampfen wird das Material nicht thermisch verdampft, sondern durch Impulsübertragung der energiereichen Ionen <sup>[1][3]</sup>.
- Ionenplattieren:  
Atome die sich am Substrat abscheiden werden ionisiert und durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Die Energie der Teilchen erhöht sich, dies wirkt sich auf die Schicht- und Wachstumseigenschaften positiv aus <sup>[1][3]</sup>.

Ziel beim PVD-Prozess ist die Herstellung von dünnen Schichten von Bauelementen die optisch, optoelektronisch, mikroelektronisch und magnetisch, tribologisch, korrosiv beansprucht werden <sup>[1]</sup>.

Abbildung 3.4: Die drei verschiedenen Verfahren des PVD-Prozesses <sup>[28]</sup>

### 3.3.2 CVD-Prozess

Im Gegensatz zum PVD-Prozess scheidet sich beim CVD-Prozess (chemical vapor deposition) das Schichtmaterial chemisch aus der Dampfphase ab. Die chemischen Reaktionen laufen bei Drücken zwischen 0,01–1 bar und bei Temperaturen zwischen 200–2000 °C ab. Es werden generell vier Reaktionstypen unterschieden <sup>[1]</sup>:

- Chemosynthese:  
Reaktion von hauptsächlich Halogeniden durch Zufuhr von reduzierenden oder oxidierenden Gasen
- Pyrolyse:  
Thermische Zersetzung am beheizten Substrat (Hydride, Iodide, Carbonyle)
- Disproportionierung:  
Zerfall von im Gleichgewicht befindlichen Gas durch Temperatursenkung in verschiedenen Phasen (gasförmig-fest, gasförmig-flüssig)
- Photopolymerisation:  
UV-Bestrahlung des Substrates

Dabei können viele Metalle, Carbide, Nitride etc. auf Substraten aus Metall oder Metalllegierungen als Schicht abgeschieden werden. Das CVD-Verfahren wird hauptsächlich für Bauteile im Bereich des Maschinen- und Apparatebaues angewandt <sup>[1]</sup>.

### 3.3.3 PACVD-Prozess

Im Vergleich zum konventionellen CVD-Prozess erfolgt beim PACVD-Prozess (plasma assisted chemical vapour desposition) eine plasmaaktivierende Unterstützung. Die Reaktion wird durch eine zusätzliche Niederdruck-Glimmentladung begünstigt, da in diesem nichtisothermen Plasma die Temperaturen von Neutralgas und seiner Anregung zwei unabhängig voneinander variierbarer Parameter sind. Dadurch ist die innere Energie viel höher als jene des Gases im thermodynamischen Gleichgewicht bei gleicher Temperatur und es laufen chemische Reaktionen ab, die sonst nur bei höheren Temperaturen möglich sind <sup>[7]</sup>.

Das Verfahren arbeitet mit Drücken von  $5 \times 10^{-4} - 10^{-3}$  bar und Temperaturen von 400–600 °C. Der Schichtdickenzuwachs hängt von der Wahl der Parameter ab und liegt zwischen 0,5–10 µm/h <sup>[7]</sup>.

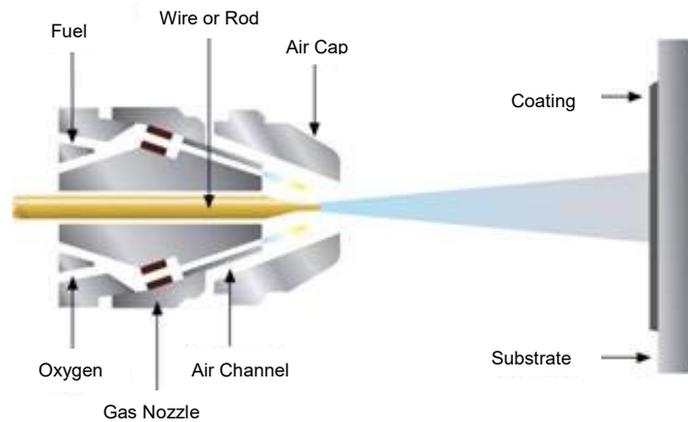
Die erzeugten Schichten besitzen ein dichtes, kolumnares Gefüge. Die gleichmäßige Beschaffenheit der Oberfläche ermöglicht das Beschichten von Umformwerkzeugen, ohne dass eine polierende Nachbearbeitung erforderlich ist <sup>[7]</sup>.

### 3.3.4 Thermisches Spritzen

Grundsätzlich werden beim thermischen Spritzen Werkzeuge mit Metallen, keramischen Stoffen und Sonderwerkstoffen beschichtet. Dabei liegen diese Beschichtungsmaterialien, je nach Beschichtungsverfahren, entweder als Pulver oder Draht vor. Die Beschichtungsstoffe werden durch eine Wärmequelle aufgeheizt und danach als Tröpfchen an der Oberfläche abgeschieden. Grund für die gute Schichthftung sind hauptsächlich mechanische Verklammerungen und teilweise lokal auftretende „Van der Waals“- oder chemische Bindungen <sup>[1][7]</sup>.

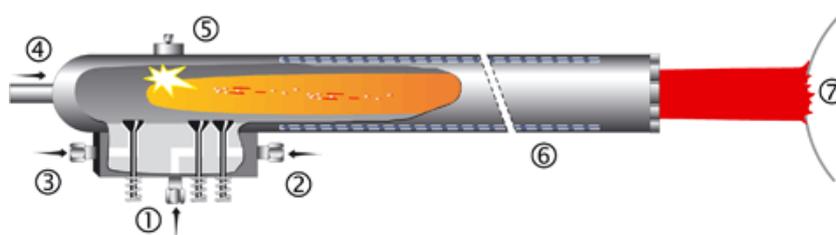
Folgende Verfahren werden dem thermischen Spritzen zugeordnet <sup>[1]</sup>:

- Flammspritzverfahren (Abbildung 3.5)
- Detonationsspritzverfahren (Abbildung 3.6)
- Lichtbogenspritzverfahren
- Plasmaspritzverfahren
- Vakuum-Plasmaspritzverfahren

Abbildung 3.5: Darstellung des Flamspritzverfahrens <sup>[4]</sup>

Die Verwendung eines geeigneten Spritzwerkstoffes hängt von zwei essentiellen Faktoren ab. Zum einen muss der Werkstoff schmelzbar sein und darf sich im geschmolzenen Zustand nicht zersetzen oder chemisch verbinden. Zum anderen müssen die Materialien für das jeweilige Verfahren in geeigneter Form vorliegen. Es lassen sich nahezu alle Werkstoffe mit dieser Technologie des thermischen Spritzens herstellen. Limitierend ist im Wesentlichen die Werkstoffverfügbarkeit als Pulver. Die Korngröße bei Pulvern variiert dabei zwischen 5–50 µm. Der Vorteil von diesem Verfahren liegt in der geringen thermischen Belastung des Bauteils und im Vergleich zu anderen Beschichtungen hohen Schichtdicke (20 µm bis mehrere mm) <sup>[1][7]</sup>.

Abbildung 3.6 zeigt eine schematische Darstellung einer Detonationskanone (D-Gun), wie sie hauptsächlich Anwendung findet. Bei diesem Spritzverfahren wird das Pulvermaterial in ein wassergekühltes Rohr mit einem Trägergas eingeleitet und anschließend gezündet. Dadurch erfolgt eine Beschleunigung des Pulvers auf ca. 800 m/s und es erwärmt sich über die Schmelztemperatur. Nachdem das Pulvermaterial das Rohr verlassen hat, folgt eine Stickstoff-Schockwelle, die das Rohr reinigt. Dieser abwechselnde Vorgang zwischen Beschuss und Reinigung wird ca. 4–8 Mal pro Sekunde wiederholt.

Abbildung 3.6: Darstellung des D-Gun-Verfahrens: (1) Acetylen, (2) Sauerstoff, (3) Stickstoff, (4) Spritzpulver, (5) Zündeinrichtung, (6) Austrittsrohr mit Wasserkühlung, (7) Werkstück <sup>[6]</sup>

Durch diese hohen Geschwindigkeiten liegt der Vorteil des Detonationsspritzverfahrens in der guten Haftfestigkeit und niedrigen Porosität der Schicht. Demgegenüber steht als Nachteil die geringe Depositionsrate im Vergleich zu den anderen Spritzverfahren <sup>[1]</sup>.

### **Eigenschaften**

Beim thermischen Spritzen lassen sich die Eigenschaften auf die jeweilige Anwendung anpassen. Das heißt, die Oberfläche kann sehr weich oder sehr hart sein oder durch zum Beispiel Mischen von Metall und Keramik können Eigenschaften eines Hartmetalls erreicht werden, welches eine gute Zähigkeit bei hoher Härte besitzt <sup>[7]</sup>.

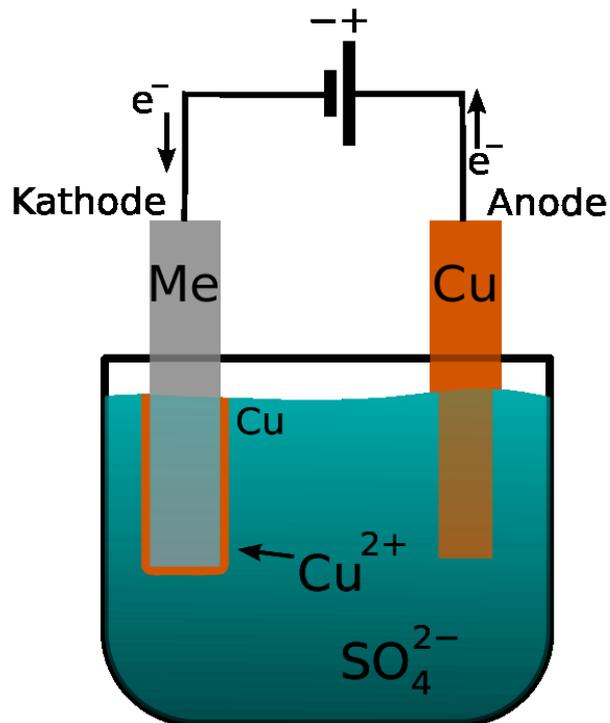
Hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit besitzen die erzeugten Schichten Rauhtiefen von 5–30 µm und müssen nachbearbeitet werden. Meist erfolgt dies durch Schleifen und Polieren, da bei vielen Anwendungen eine gleichmäßige Schichtdicke gefordert wird <sup>[5] [7]</sup>.

Die Packungsdichte hängt von dem jeweiligen Spritzverfahren ab. Grundsätzlich werden dichtere Schichten mithilfe von feinkörnigen Pulvern, duktilen Spritzmaterialien und hoher Partikelgeschwindigkeit erreicht. Andere Maßnahmen für eine dichte Schicht sind thermische Nachbehandlungen, Imprägnieren und Vakuum-Plasmaspritzen <sup>[1]</sup>.

### **3.3.5 Galvanotechnik**

Bei der Galvanotechnik werden metallische Niederschläge auf Substrate mittels elektrochemischer Abscheidung aufgebracht. Dabei wird Strom in einem elektrolytischen Bad angelegt, um Metallionen, die sich am Pluspol (Anode) befinden, auf ein zu beschichtendes Werkstück, das am Minuspol (Kathode) angeordnet ist, aufzutragen. Die Metallionen lösen sich dabei von der Verbrauchselektrode und lagern sich durch Reduktion am Werkstück ab. Je länger sich dieses im Bad befindet und je höher der elektrische Strom ist, der durch das Bad fließt, desto stärker bzw. dicker wird die Schicht. Um Konversationsschichten erfolgreich abzuscheiden, muss das Werkstück vorbehandelt werden <sup>[30]</sup>. Abbildung 3.7 zeigt den schematischen Aufbau einer galvanischen Beschichtung.

Die Galvanotechnik unterscheidet sich in dekorativ und funktional. Während bei der dekorativen Galvanotechnik-Werkstücke vorwiegend verschönert werden und nur gewisse technische Mindesteigenschaften besitzen, dient die funktionelle Galvanotechnik generell dem Korrosions- und Verschleißschutz bzw. der Katalyse oder der Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit <sup>[30]</sup>.

Abbildung 3.7: Aufbau einer galvanischen Beschichtung <sup>[31]</sup>

### 3.4 Schweißen

Laut Normen EN 14610 und DIN 1910-100 definiert man Schweißen als „das unlösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme und/oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoff“ <sup>[9] [10]</sup>. Daher werden die Schweißverfahren grundsätzlich in zwei Verfahrensgruppen eingeteilt. Zum einen in Schmelzschweißprozesse, die mit Wärme arbeiten, und zum anderen in Pressschweißtechnik, welche entweder mit Druck oder Wärme und Druck arbeiten. Man kann diese Schweißverfahren auch nach Anwendung, Zweck, Mechanisierung und Automatisierung unterteilen. Das Pressschweißen erfolgt unter Einsatz von eventuell Druck oder hoher Flächenpressung ohne oder mit Schweißzusatz. Örtlich begrenztes Erwärmen – auch bis zum Schmelzen – ermöglicht oder erleichtert das Schweißen. Das Schmelzschweißen ist ein Fügen bei örtlich begrenztem Schmelzfluss ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz <sup>[11]</sup>.

Ein wichtiges Kriterium für Schweißverfahren ist die Schweißbarkeit der Materialien, die nach der Norm DIN 8528 gegliedert sind in <sup>[11]</sup>.

- Schweißeignung:  
abhängig von chemischer Zusammensetzung, metallurgischen und physikalischen Eigenschaften
- Schweißsicherheit:  
abhängig von konstruktiver Gestaltung und Beanspruchungszustand
- Schweißmöglichkeit:  
abhängig von der Vorbereitung zum Schweißen, der Ausführung der Schweißarbeiten und der Nachbearbeitung

### 3.4.1 Auftragsschweißen

Das Auftragsschweißen ist genau genommen ein Beschichtungsverfahren, allerdings unter Zuhilfenahme schweißtechnischer Methoden, weshalb es in diesem Kapitel erläutert wird. Grundsätzlich unterscheidet sich das Auftragsschweißen, im Vergleich zum thermischen Spritzen, durch das Schmelzen einer dünnen Oberflächenschicht des Werkstückes, welches sich anschließend mit dem Schichtwerkstoff vermischt. In Abbildung 3.8 ist eine schematische Darstellung des Auftragsschweißens mit einem Laser ersichtlich. Um möglichst dicke Schichten zu erreichen, wird die Auftragsschicht schichtweise auf den Grundwerkstoff aufgebracht. Dabei kann das Schichtmaterial entweder als Draht, Pulver oder Fülldraht verarbeitet werden. Die jeweilige Verfahrensrouten ist ausschlaggebend, welche Form verwendet wird. Als Energiequellen dienen sowohl Flammen, als auch Lichtbogen und Plasmastrahl <sup>[1][11]</sup>.

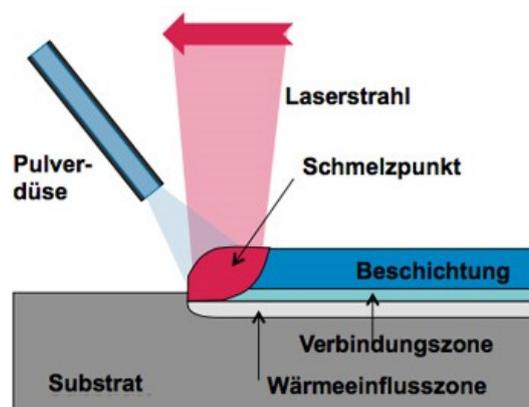


Abbildung 3.8: Prinzip des Laserauftragsschweißens <sup>[12]</sup>

Die verwendeten Schweißzusätze können dabei in ihrer chemischen Zusammensetzung dem Grundwerkstoff entsprechen (artgleicher Schweißzusatz) oder sich davon unterscheiden (artfremder Schweißzusatz). Letztere werden entweder zum Panzern, Plattieren oder Puffern verwendet. Unter Panzern versteht man das Herstellen einer verschleißbeständigen Auftragsschicht. Im Vergleich dazu ist beim Plattieren die Erzeugung von Auftragschweißschichten mit erhöhter Beständigkeit gegen Korrosion und thermischer Beanspruchung das Ziel. Als Pufferschicht bezeichnet man jene Schichten, die eine Verbindung zwischen artfremden Werkstoffen herstellen <sup>[11]</sup>.

### 3.4.2 Selektives Laserschmelzen

Das selektive Laserschmelzen (selective laser melting, SLM) ist ein generatives Fertigungsverfahren, bei dem der zu verarbeitende Werkstoff in Pulverform in dünnen Schichten aufgebracht wird. Dabei erfolgt mittels Laserstrahlung ein lokal vollständiges Aufschmelzen des pulverförmigen Materials und es bildet sich nach der Erstarrung eine feste Materialschicht. Anschließend wird die Grundplatte um jenen Betrag der Schichtdicke abgesenkt und der Vorgang wiederholt sich wiederum. Typische Schichtdicken liegen zwischen 20–100  $\mu\text{m}$  <sup>[24]</sup>.

Um die Kontaminierung des Werkstoffs mit Sauerstoff zu vermeiden, findet der Prozess unter Schutzgasatmosphäre statt. Dabei wird in der Regel Argon aber auch Stickstoff verwendet. Das SLM zählt zu der Gruppe der Strahlschmelzverfahren <sup>[24]</sup>. Abbildung 3.9 zeigt die Technologie des SLM-Prozesses.

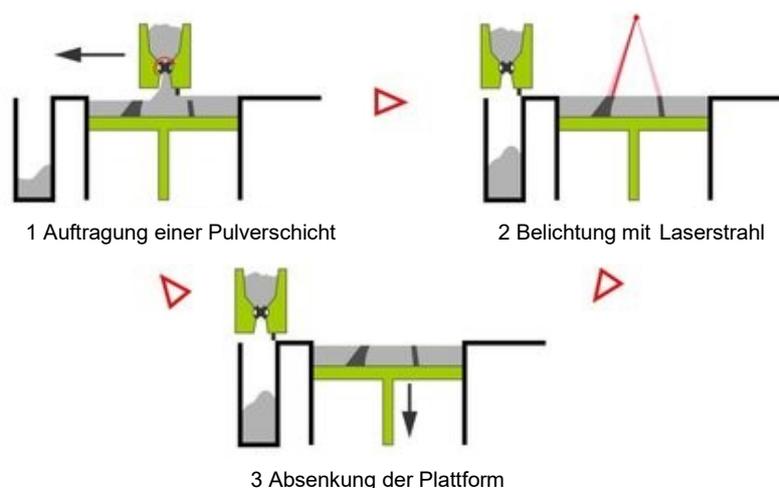


Abbildung 3.9: Schematischer Verfahrensablauf beim SLM <sup>[25]</sup>

Der Unterschied zum SLM ist beim selektiven Lasersintern (SLS) der Aufbau der Schicht durch Sintern. Die Pulverkörner werden dabei nur partiell aufgeschmolzen. Ansonsten ähneln sich beide Fertigungsverfahren <sup>[24]</sup>.

## **3.5 Beanspruchungen, Defekte und Schmiermittel**

In den nachfolgenden Kapiteln werden, für den Motorsport typische, Themen erläutert, welche auch für diese Arbeit relevant sind.

### **3.5.1 Beanspruchungen**

Die Oberfläche kann durch folgende Hauptbeanspruchungen beschädigt werden <sup>[18]</sup>:

- Mechanisch
- Chemisch
- Thermisch

Da es sich bei dieser Diplomarbeit hauptsächlich um mechanische Beanspruchungen handelt, insbesondere um den Verschleiß, wird speziell auf diese Form der Beanspruchung eingegangen.

Unter Verschleiß versteht man die unerwünschte Abtragung von Festkörperoberflächen im Betrieb. Man unterscheidet zwischen Gleit-, Wälz-, Schlag-, Schwingungsreib- (Fretting), Erosions-, Tropfenschlag- und Kavitationsverschleiß <sup>[18]</sup>.

In dieser Arbeit werden jene Verschleißarten näher beschrieben, die in der Anwendung auftreten. Diese sind Schlag-, Schwingungsreib- und Gleitverschleiß.

### **3.5.2 Schlag- und Schwingungsreibverschleiß**

Beim Schlagverschleiß werden zwei Teile wiederholt senkrecht aneinander geschlagen. Dadurch entstehen Hämmerspuren und Kerben. Der Vorgang ist mit plastischer Verformung und mit Reibverschleiß in mikroskopisch kleinen Bereichen verbunden und folgt damit weitgehend den Erscheinungen des Fretting <sup>[18]</sup>.

Fretting kann auftreten, wenn sich zwei Metallflächen unter dem Einfluss einer Normalkraft oszillierend gegeneinander bewegen. Dabei ist Fretting das Ergebnis mehrerer gleichzeitig

ablaufender Schadensmechanismen <sup>[19]</sup>. Der primäre Vorgang wird durch die Entstehung metallischer Verschleißpartikel durch Abrasion, Schwingbruch und Materialübertragung bestimmt. Dabei reagieren die entstandenen Partikel sofort mit dem umgebenden Medium und werden ganz oder teilweise chemisch verändert. Das Medium kann z.B. ein Schmiermittel, Luft oder Wasser sein. Aufgrund der oszillierenden Bewegung können die entstandenen Partikel aus dem Kontaktpalt nicht entweichen. Sie werden gemahlen, chemisch weiter verändert, versintert, verdichtet und schließlich in die Metalloberfläche plastisch eingedrückt. Es kommt zu einer Veränderung der Berührungsfläche, was wiederum die Druckverhältnisse im Tribokontakt verändert. Schmiermittel sind sowohl an der chemischen Reaktion frisch entstandener metallischer Partikeln, als auch an der Veränderung der plastischen Verformbarkeit des Grundwerkstoffes beteiligt <sup>[18]</sup>.

Die plastische Verformung bei Schwingungsreibverschleiß bedeutet nicht nur eine Beschädigung der Oberfläche, sondern kann auch zu Schwingbrüchen in der Tiefe des Werkstoffes führen <sup>[18]</sup>.

### **3.5.3 Schmierstoffe**

Schmierstoffe dienen zur Reibungs- und Verschleißminderung in tribologischen Systemen und kommen in verschiedenen Aggregatzuständen als Schmieröle, Schmierfette oder Festschmierstoffe zum Einsatz <sup>[26]</sup>.

Festschmierstoffe werden in folgende Gruppen unterteilt <sup>[26]</sup>:

- Verbindungen mit Schichtgitterstruktur → Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ ), Graphit
- Oxidische und fluoridische Verbindungen der Übergangs- und Erdalkalimetalle → Bleioxid, Molybdänoxid, Wolframoxid, etc.
- Weiche Metalle → Blei, Indium, Silber, Zink
- Polymere → Polymid

#### **Festschmierstoff Molybdänsulfid**

Für die Prüfstandsversuche wurde ein  $\text{MoS}_2$ -Schmierstoff zur Verminderung von Reibung und Verschleiß verwendet.

Der Schmierstoff erleichtert die Montage und Demontage und verhindert Korrosion und Festfressen (Seizing). Dieser schützt vor Einlauf- und verringert die Gefahr von Oberflächenschäden. Weitere Eigenschaften der MoS<sub>2</sub>-Paste sind:

- Wasser- und korrosionsbeständig
- Hohes Druckaufnahmevermögen
- Abnehmender Reibungskoeffizient mit steigendem Druck
- Vermindert die Gefahr von Passungsrost (Tribokorrosion)
- Notlaufschmierung

Zu den Einsatzgebieten zählen alle Wellen-Naben-Verbindungen (Wälzlager, Flansche, Räder, etc.), wenn bei hohem Druck der Reibwert vermindert und das Festfressen vermieden werden soll. Des Weiteren dient MoS<sub>2</sub> zur Verbesserung der Einlaufbedingungen von Getrieben, Gelenken, Kupplungen, etc. Die Paste wird entweder mit einem Pinsel, einem Lappen oder einer Bürste dünn und gleichmäßig auf die zuvor gereinigten Flächen aufgetragen und es müssen Überschüsse vermieden werden.

## 4 Experimentelle Methoden

Im Rahmen der praktischen Untersuchungen erfolgten im Wesentlichen die Auswertung der Nutzwertanalyse, die Herstellung von Probescheiben für die Vorversuche und anschließend die Herstellung von Testradnaben für die Prüfstandsversuche.

### 4.1 Varianten und Versuche

Auf Basis der Nutzwertanalyse (siehe auch Abbildung 2.1) wurden die vielversprechendsten Varianten ausgewählt, welche in dieser Arbeit praktisch untersucht werden:

- Variante 3
- Variante 4
- Variante 5
- Variante 6
- Variante 14

Sowie die Referenzvarianten:

- Variante 1
- Variante 2

Es wurden folgende praktische Versuche durchgeführt:

- Test A: Herstellung einer Probescheibe mit verschleißresistenter Schicht
- Test B: Impacttest an Probescheibe
- Test C: Scratchtest an Probescheibe
- Test D: Prüfstandsversuche an Radnabe

Ziel der Tests A–C war es ein umfangreiches Bild über die Schichten in Bezug auf Abplatzungen, Verformungen, Haftungen und sonstige Interaktionen mit Grundwerkstoff zu erhalten. Die Ergebnisse dienen zur Auswahl der besten Verfahren für Test 4.

In weiterer Folge werden die Varianten nur noch mit Probe 1–6 bezeichnet. Die Aufschlüsselung der Zugehörigkeit ist folgende:

- Probe 1 → Variante 1
- Probe 2 → Variante 2
- Probe 3 → Variante 3
- Probe 4 → Variante 4
- Probe 5 → Variante 5
- Probe 6 → Variante 6

## 4.2 Test A: Herstellung der Probescheibe

Es erfolgte die Fertigung von Probescheiben (in Abbildung 4.1 ersichtlich) mit einem Durchmesser von 62 mm und einer Dicke von 8 mm. Diese wurden mit verschleißresistenten Schichten behandelt (Auswahl siehe Kapitel 4.1) und anschließend mittels Impact- (Kapitel 4.3) und Scratchtest (Kapitel 4.4) geprüft.



Abbildung 4.1: Darstellung der Probescheiben für den Impact- und Scratchtest

Bei Proben 1 und 3 fand der Beschichtungsprozess mittels PVD- bzw. PACVD-Verfahren statt. Die theoretischen Grundlagen zu diesen Technologien sind in Kapitel 3.3.1 und 3.3.3 bereits ausführlich erläutert worden. Bei Probe 2 erfolgte die Beschichtung mit einer Detonationskanone (Kapitel 3.3.4) und bei Probe 4 mittels Galvanotechnik (Multilayer Kapitel 3.3.5). Bei der Probe 5 kam eine Nitrierbehandlung zur Anwendung.

Es erfolgte ein Vorversuch an einer Probescheibe, bei dem die Nitrierhärte tiefe bestimmt wurde (Variante 14). Der Untersuchungsbericht sowie die Ergebnisse inklusive Bilder und Härtemessungen sind im Anhang (Kapitel 11.1) ersichtlich und werden im Zuge dieser Diplomarbeit nicht weiter näher erläutert, da die Oberflächenbehandlung zwar zu einer erhöhten Härte an der Oberfläche, jedoch einem Härte- und damit Festigkeitsabfall im Kern führte.

Bei Probe 6 handelt es sich um die Referenzvariante aus Titan. Diese ist mit einer dünnen, reibungsmindernden und schmierenden Wolframdisulfidschicht ( $WS_2$ ) behandelt worden.

### 4.3 Test B Impacttest

Abbildung 4.2 zeigt einen Impacttester wie er für diese Arbeit verwendet wurde. Technische Daten <sup>[16]</sup>:

- Max. Last: 5 kN
- Frequenz: 20–100 Hz
- Kugeldurchmesser Standard: 5 mm
- Kugelmateriale: Stahl, Hartmetalle, Saphir je nach Anwendungsgebiet
- Abhebender und nichtabhebender (schwellender) Betrieb möglich

Für diese Versuche wurde eine Maximallast von 2,5 kN erreicht. Der Gegenkörper war eine WC-Kugel mit einem Durchmesser von 3 mm. Die Frequenz im abhebenden Betrieb betrug ca. 100 Hz und die Amplitude pendelte sich zwischen 220–240  $\mu\text{m}$  ein.



Abbildung 4.2: Hochfrequenzpulsator Amsler HFP 5100 der Fa. Zwick <sup>[16]</sup>

Der Impacttest dient zur Ermittlung der Schichthaftung und des Ermüdungsverhalten von Beschichtungen auf schlagende Beanspruchung. Bei diesem Prüfverfahren wird eine Kugel mit definierten Parametern (Last, Frequenz, Zyklanzahl) auf die Oberfläche der Schicht geschlagen. Diese Technologie kann Prüfungen mit bis zu einer Million Zyklen durchführen, um die Dauerfestigkeit der Beschichtung zu bestimmen. Die visuelle Auswertung des Schadensbilds (Abplatzungen, Verformungen und Risse) erfolgt sowohl am REM, als auch am Lichtmikroskop in Form von Gefügebildern.

Da dieses Testverfahren erst vor kurzer Zeit entwickelt wurde, gibt es noch keine Norm, die diese Prüfung standardisiert. Abbildung 4.3 gibt einen Überblick von der Probenaufspannung für die Impacttests.

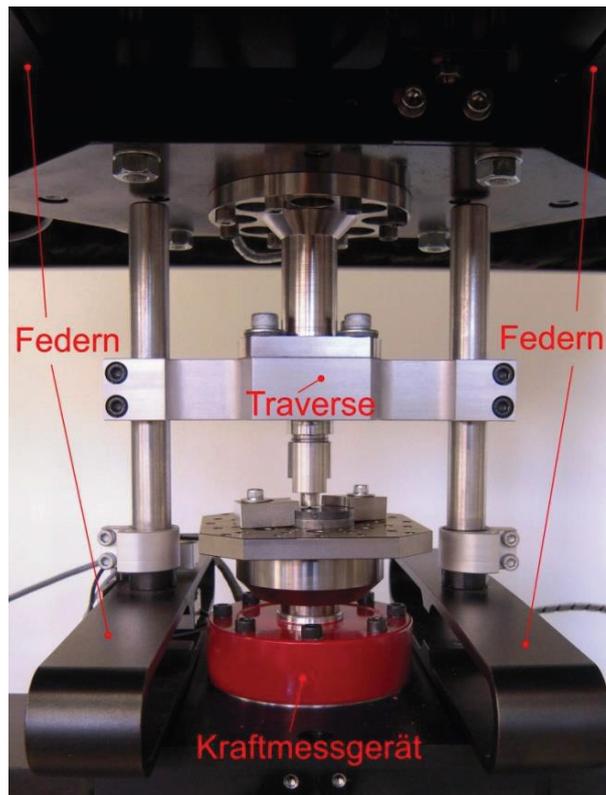


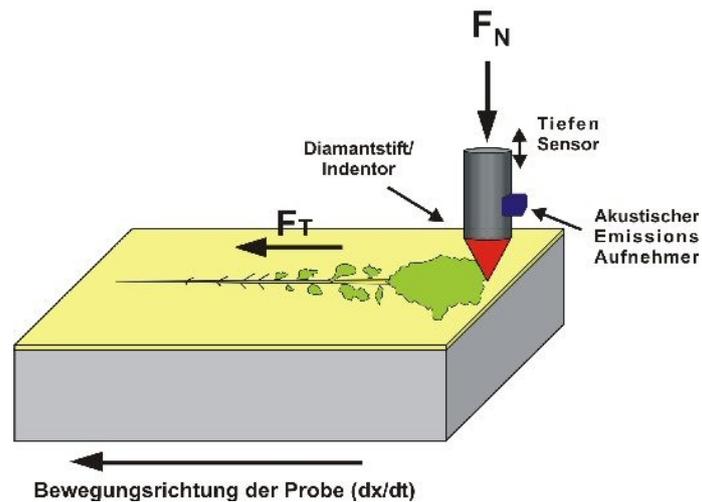
Abbildung 4.3: Probenaufspannung für Impacttest. <sup>[16]</sup>

### Auswertung der Impacttests

Die Auswertung der Vorversuche ist in Kapitel 5.1 ersichtlich. Bei den Proben erfolgte zuerst eine Untersuchung im REM, um Defekte oder Abplatzungen zu charakterisieren. Anschließend fand eine zerstörende Prüfung und das Einbetten der Probescheiben statt. Die Untersuchung der Gefügebilder, die Ermittlung der Schichtdicke, sowie das Messen der Impacttiefe erfolgten am Lichtmikroskop.

## 4.4 Test C: Scratchtest

Beim Scratchtest wird auf einer 5 mm langen Strecke, mit konstanter Geschwindigkeit, eine ansteigende Last aufgebracht, um die Schichthftung zu testen. Während dieser Ritzprüfung können verschiedene Schichtdefekte wie Risse oder Abplatzungen beobachtet werden. Dabei wird die kritische Last ermittelt, bei der erste Abplatzungen auftreten. Zusätzlich werden Reibungskräfte und akustische Emissionen registriert, welche die Interpretation der Ergebnisse unterstützen. Abbildung 4.4 zeigt das Prinzip eines Scratchtests.

Abbildung 4.4: Prinzip des Scratchtests <sup>[17]</sup>

### Auswertung der Scratchtests

Analog zum Impacttest werden Informationen über die Eigenschaften der Schichten erhalten, die für die Auswahl der bestgeeignetsten Verfahren für die Prüfstandtests eine Entscheidungsgrundlage bieten. Die Auswertung der Scratchtests erfolgte am externen Prüfinstitut und ist in Kapitel 5.1 ersichtlich. Die Überprüfung wurde gemäß DIN EN 1071-3 (Haftungsprüfung für keramische Schichten) durchgeführt. Der Prüfkörper ist ein konischer Diamantindenter (Rockwell C Diamant), der eine Spitze mit einem Krümmungsradius von 200  $\mu\text{m}$  besitzt.

## 4.5 Test D: Prüfstandsversuche

Nach der Auswertung der Vorversuche wurden am Prüfstand Radwechselversuche durchgeführt, die einen Boxenstopp realistisch und reproduzierbar nachstellen. Dabei wird primär der Verschleiß am Gewinde beobachtet und dokumentiert. Die zu erreichende Lebensdauer des Gewindes wurde mit mindestens 150 Anzügen der Radmutter an der Radnabe (= Radwechsel) definiert.

Versuchsablauf:

- Die Experimente werden mit entsprechender Sicherheitsausrüstung durchgeführt und es müssen mindestens zwei Personen vor Ort sein.
- Vor Teststart und nach jeder Reinigung wird die Radnabe mit einer  $\text{MoS}_2$ -Paste geschmiert (siehe Kapitel 3.5.3.1).

- Die ersten zehn Anzüge werden mit einem Drehmomentschlüssel (Vortest) bei 1000 Nm durchgeführt, danach wird das Gewinde unter dem Mikroskop begutachtet und die Vorspannkraft mit dem Anzugsmoment verglichen.
- Synchrone Aufzeichnung von Schlagschraubermoment und Vorspannung.
- Die 1. Reinigung erfolgt nach fünf Anzügen, die 2. nach zehn und danach findet immer eine Reinigung jeweils nach 15 Anzügen, inklusive Begutachtung unter dem Mikroskop statt.
- Der Gasflaschendruck für den Schlagschrauber muss höher als 100 bar sein und wird nach jeder Reinigung dokumentiert.
- Rauigkeitsmessungen werden im Neuzustand, nach dem Vortest, nach 45 Anzügen und am Schluss durchgeführt.
- Es werden zwei Varianten miteinander verglichen. Ein Referenzbauteil und jene Variante, die bei den Vortests am besten abgeschnitten hat.

Für die Bewertung des Gewindes nach jeder Reinigung wird eine Skala von 1 (Neuzustand) bis 10 (gänzlich verschlissen) verwendet. Für den Radwechsel wurde mit einem Schlagschrauber DP 4000 TS Model von Paoli Pit Stop gearbeitet. Der Aufbau ist in Abbildung 4.5 dargestellt.



Abbildung 4.5: Prinzipieller Aufbau für den Prüfstandtest

Zur Befestigung der Radnabe mit der Radmutter wurde eine Zentralverschraubung verwendet, um den simulierten Rädertausch möglichst rasch durchzuführen. Das Rad wird mit dieser Zentralverschraubung über die Radnabe mittenzentriert. In Abbildung 4.6 ist eine detaillierte Ansicht einer solchen Zentralverschraubung bei der Vorderachse in der Formel 1 ersichtlich <sup>[32]</sup>.

- 1: Zentralmutter
- 2: Sicherungskugel
- 3: Sicherungsschieber
- 4: Rad
- 5: Bremsscheibentopf
- 6: Mitnehmerbolzen
- 7: Radnabe

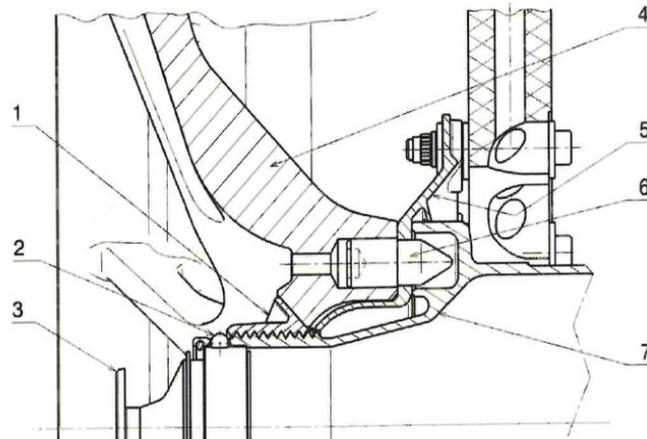


Abbildung 4.6: Zentralverschraubung in der Formel 1 <sup>[32]</sup>

Bei Zentralverschraubungen bestehen die Radmutter meist aus Stahl. Seltener finden im Motorsport Aluminiummutter Anwendung. Aufgrund der hohen Festigkeit und Verschleißbeständigkeit bietet Stahl den Vorteil, Gewicht einzusparen und bei den Druckluftschraubern können diese Radmutter mit Magneteinsätzen gehalten werden. Dadurch wird die Zeit für den Radwechsel deutlich vermindert <sup>[32]</sup>.

Die Radmutter müssen eine hohe Vorspannung aufweisen, damit sie sich beim starken Bremsen durch ihre Trägheit nicht selbst lösen. Das Ende der Radnabe erhält kein Gewinde, damit beim hektischen Radwechsel im Renneinsatz die Radmutter mühelos aufgesetzt und geführt werden kann, bis der erste Gewindegang greift <sup>[32]</sup>.

## Auswertung der Prüfstandsversuche

Die Auswertung der Prüfstandsversuche beinhaltet neben der Dokumentation während der Anzugsversuche auch eine optische Prüfung am Lichtmikroskop (LIMI). Damit die Gewindegänge nach den Anzugsversuchen untersucht und beurteilt werden können, wurden die am stärksten beanspruchten Stellen des Gewindes repräsentativ am LIMI untersucht und je nach Verschleiß bewertet.

## 4.6 Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie (REM) dient zur Untersuchung und Beurteilung von Brüchen und beschädigten Oberflächen. Dabei können bei niedrigsten Vergrößerungen (20-fach) Überblicke von größeren Bereichen wiedergegeben werden, andererseits aber auch Detailansichten mit bis zu 200.000-facher Vergrößerung. Sie eignet sich zur Auffindung charakteristischer Merkmale von Schäden, die zu diesem Zweck jedoch gut erhalten sein müssen <sup>[18]</sup>. Abbildung 4.7 zeigt den schematischen Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops.

Bei der Rasterelektronenmikroskopie rastert ein feingebündelter Elektronenstrahl (Primärstrahl) die Probe Zeile für Zeile ab. Beim Auftreffen dieses Elektronenstrahls auf einen Punkt der Probe emittiert dieser Sekundärelektronen (secundar electrons → SE) und rückgestreute Elektronen (back scattered electrons → BSE). Diese werden von einem Elektronendetektor erfasst und der Signalverstärker setzt die herausgelösten Sekundärelektronen synchron auf dem Bildschirm zusammen. Bei hoher Elektronenausbeute ergeben sich helle Bildpunkte, bei geringen dementsprechend dunkle. Dazwischenliegende Werte führen zu einem fein abgestuften Grauton. Aufgrund des feingebündelten Elektronenstrahls können sowohl auf hohen, wie auch auf tiefen Stellen der Probe gleich viele und kleine Punkte zur Elektronenemission angeregt werden. Dadurch ist eine ausgezeichnete Tiefenschärfe erzielbar <sup>[18]</sup> <sup>[20]</sup>. Abbildung 4.7 zeigt diesen Aufbau schematisch.

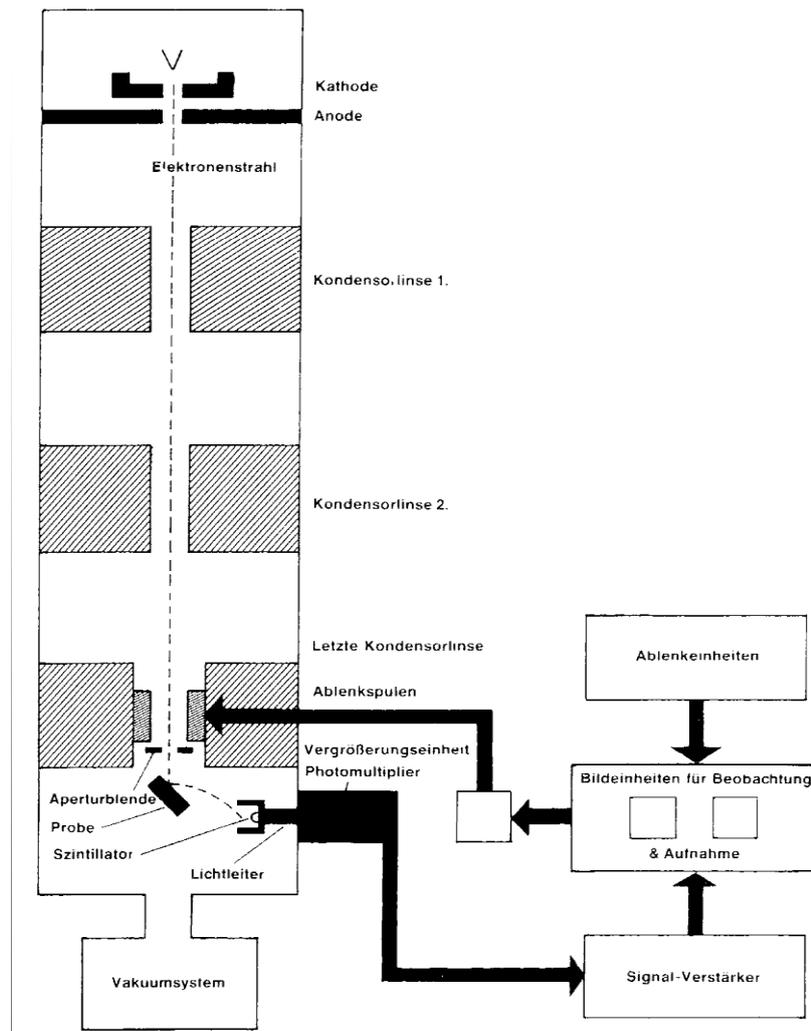


Abbildung 4.7: Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops <sup>[18]</sup>

Die Auflösung beim Rasterelektronenmikroskop wird vom Durchmesser der Emissionsfläche der Sekundärelektronen am Objekt bestimmt, wodurch sich damit hohe Auflösungen erreichen lassen. Werden hingegen Rückstreuelektronen, Augerelektronen oder Röntgenquanten verwendet, erzielt man deutlich niedrigere Auflösungen <sup>[18]</sup>. In Abbildung 4.8 sind die unterschiedlichen Wechselwirkungen ersichtlich.

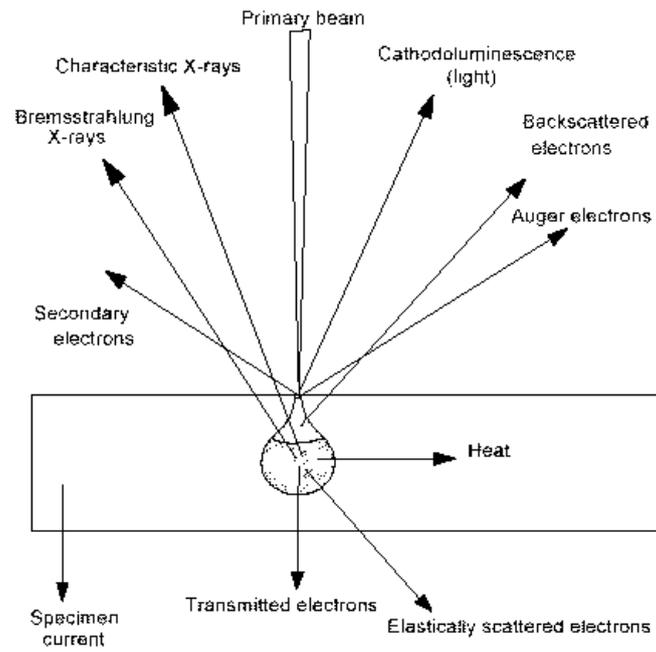


Abbildung 4.8: Wechselwirkungsprozesse von Elektronen an der Oberfläche eines Festkörpers <sup>[29]</sup>

## 5 Ergebnisse

Die folgenden Kapitel zeigen die Untersuchungsergebnisse aus den jeweiligen Versuchen (Impact- und Scratchtest sowie Prüfstandsversuche).

Bei den Tests B und C wurden Ermüdungsverhalten und Haftung der Schicht getestet. Durch diese Ergebnisse konnte die Auswahl der möglichen Verfahren für die Prüfstandsversuche eingegrenzt werden.

### 5.1 Test B: Impacttest

Die Ergebnisse des Impacttests zeigen hauptsächlich das Rissverhalten der Beschichtung und in weiterer Folge die Weitergabe der Energie an den Grundwerkstoff, in Form der Tiefenmessung.

#### 5.1.1 Impact-REM-Auswertung

Die Abbildungen 5.1–5.4 zeigen die Impacts mit 1000 Zyklen der Proben 3–6 am REM bei 150-facher Vergrößerung. Die Probe 4 wurde mit einem BSE-Detektor (back scattered electrons) aufgenommen und Probe 3, 5 und 6 mit einem SE-Detektor (secundar electrons).

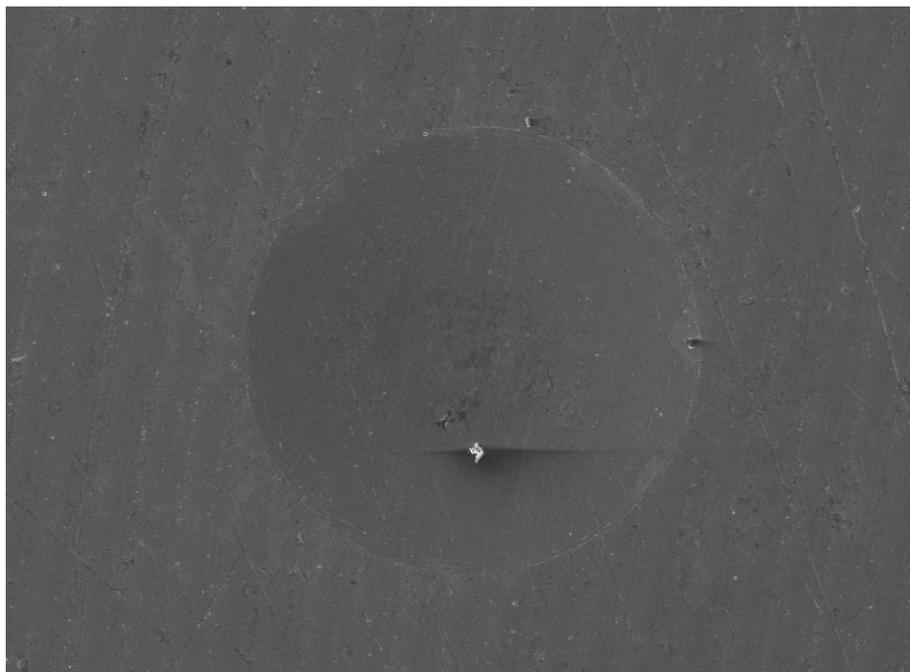


Abbildung 5.1: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

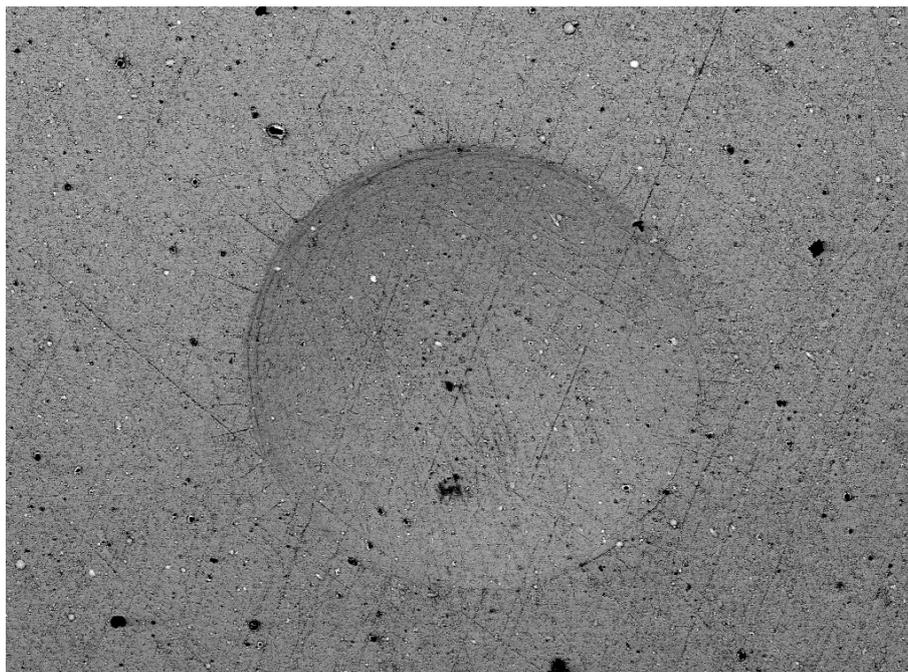


Abbildung 5.2: Darstellung des Eindrucks der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

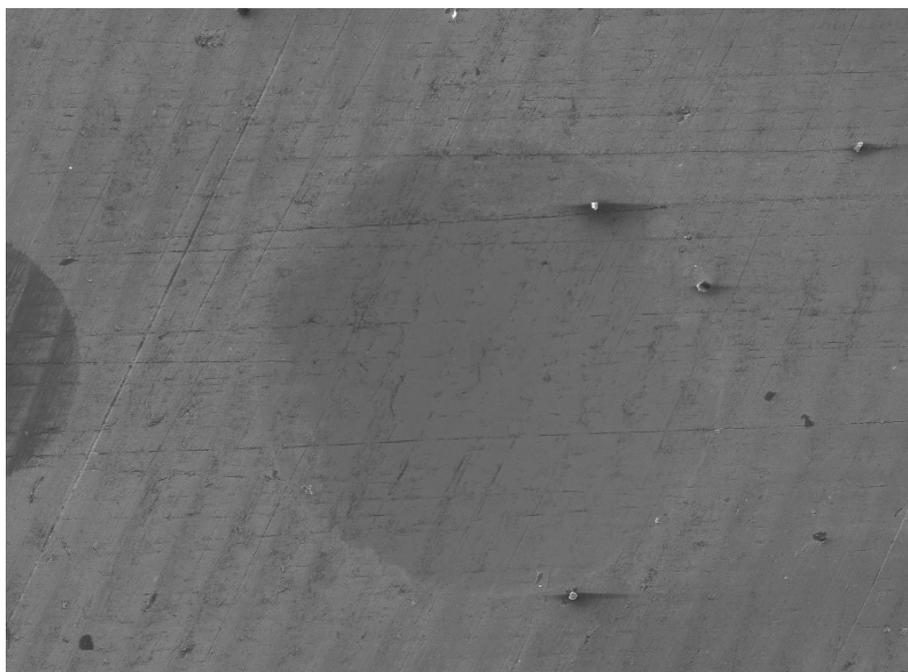


Abbildung 5.3: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

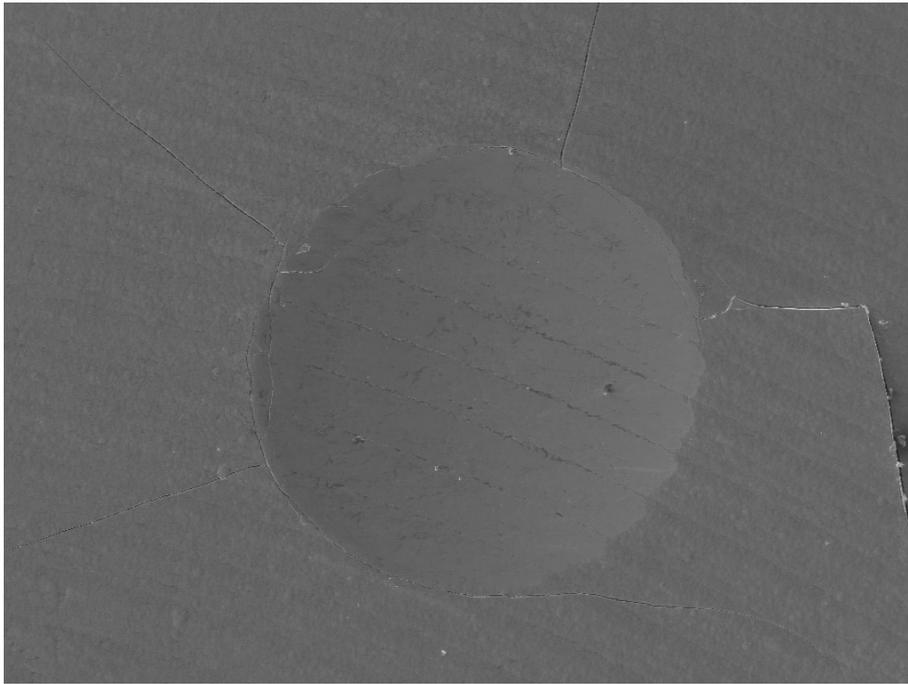


Abbildung 5.4: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

In den Abbildungen 5.5–5.8 sind Detailansichten der verschiedenen Proben zu sehen. Dabei wurden die Impacts mit 1000 Zyklen mittels mit BSE- und SE-Detektoren bei 300-facher Vergrößerung aufgenommen.

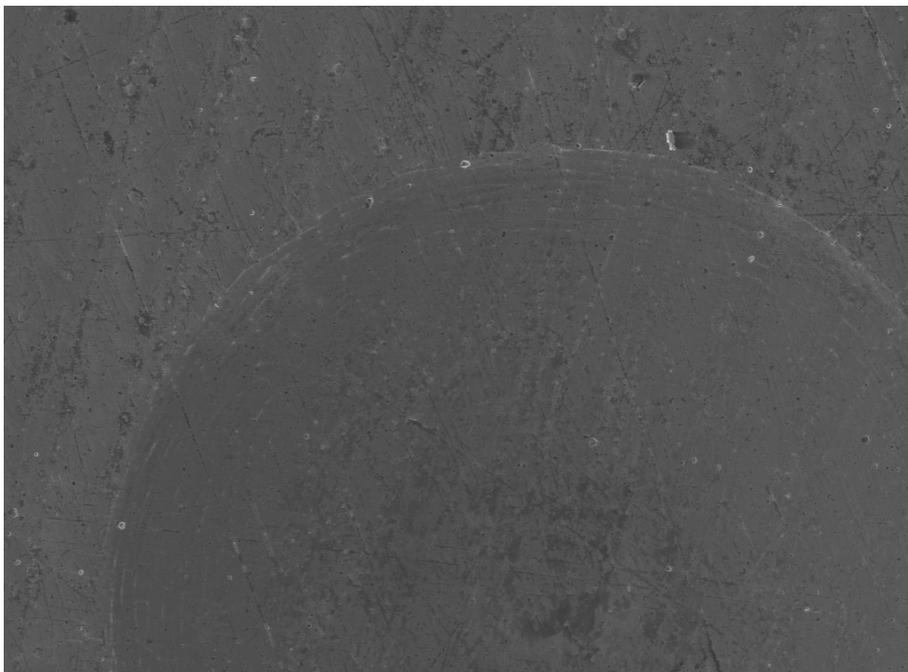


Abbildung 5.5: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

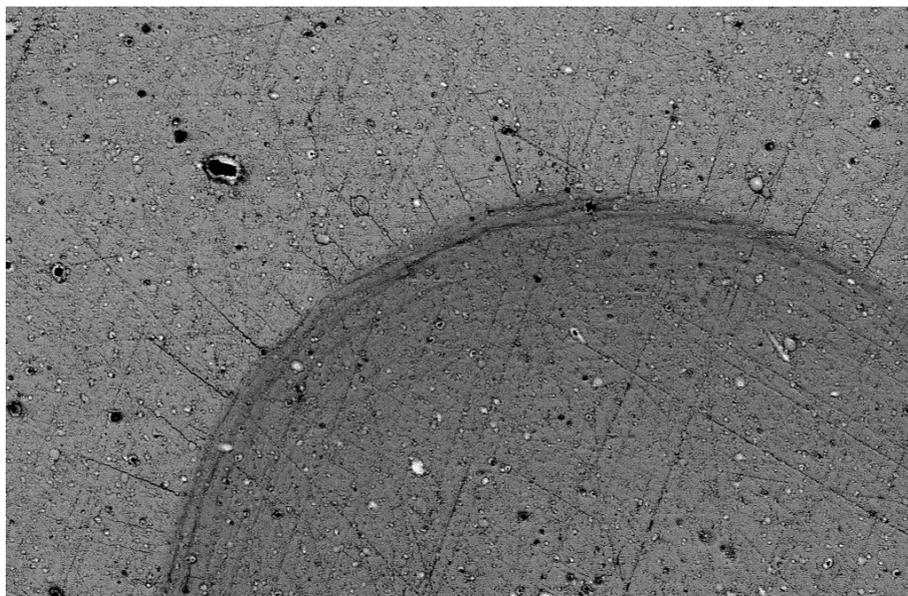


Abbildung 5.6: Darstellung des Eindrucks der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

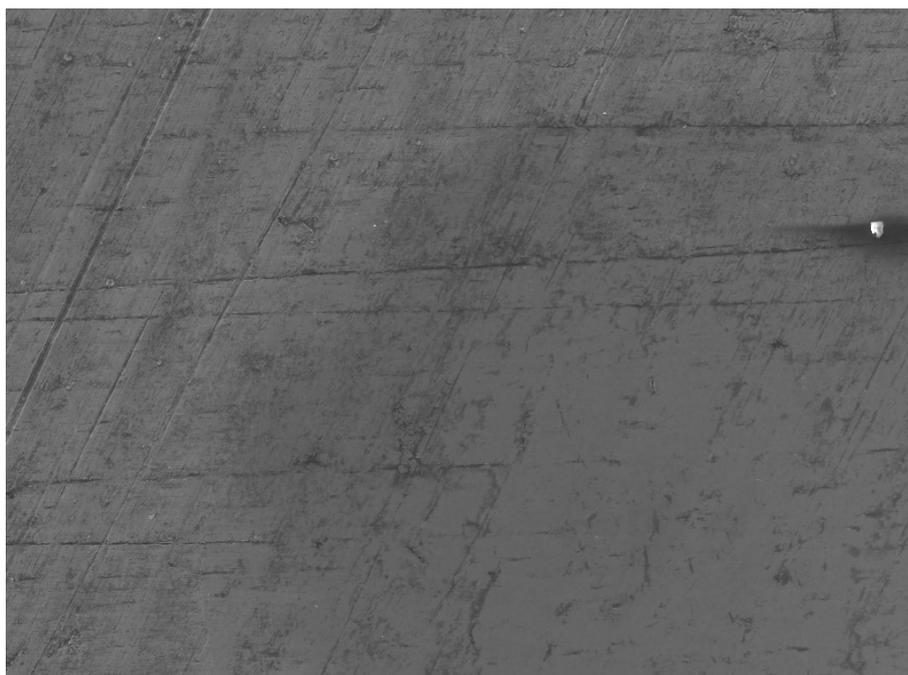


Abbildung 5.7: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

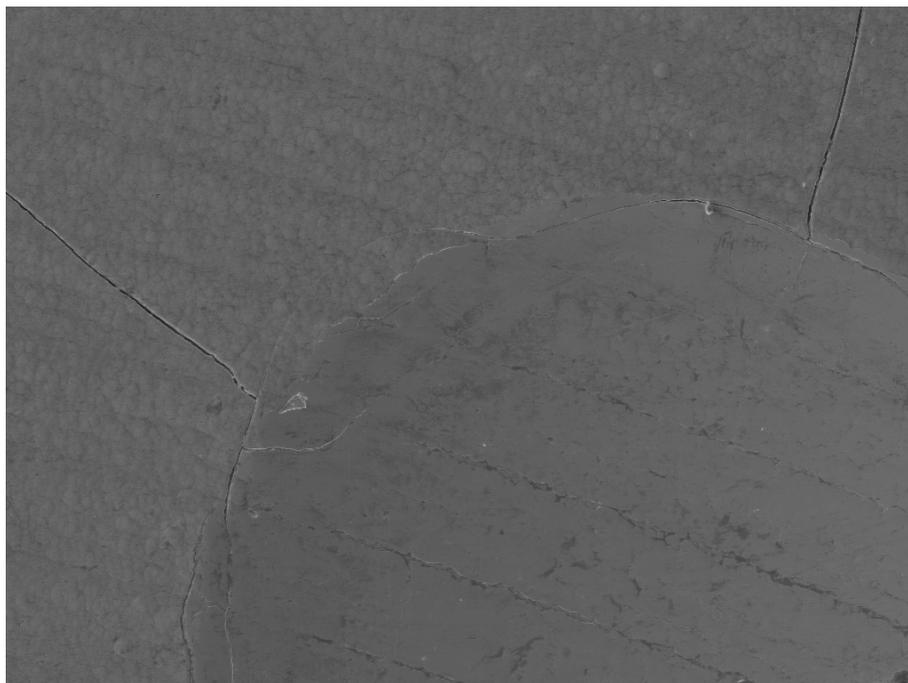


Abbildung 5.8: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

Die dargestellten Bilder sind repräsentativ für die Untersuchung am REM und zeigen eindeutig die Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren. Es sind bei den Proben 3 und 4 deutlich viele und kleine Risse zu erkennen. Der Grund liegt bei den dünnen und harten Schichten, die dieser Belastung (Impact) nicht Stand halten konnten. Bei den Proben 5 und 6 wurden deutlich bessere Ergebnisse erzielt. Bei Probe 5 treten keine Risse auf und auch die Auswertung des Scratchtests (Kapitel 5.3) wies keine kritische Last auf, bei der es zu Abplatzungen gekommen wäre. Bei Probe 6 wurden wenige Risse detektiert, allerdings sehr große im Vergleich zu den Proben 3 und 4. Aufgrund der relativ dicken Schicht von Probe 6 im Vergleich zu den Proben 3–5, welche mittels Detonationskanone, PVC- und PACVD-Technologien beschichtet wurden, fand diese Einsatz bei den Prüfstandsversuchen.

Alle weiteren Detailansichten mit verschiedenen Vergrößerungen und Detektoren sind im Anhang (Kapitel 11.2) ersichtlich.

### 5.1.2 Impacttiefe

Es wurden Schliffproben gefertigt, um die jeweiligen Schichten am LIM1 zu untersuchen. Die Herausforderung bei dieser Präparation bestand darin, genau den Mittelpunkt des Eindrucks zu treffen, damit eine Tiefenmessung an der tiefsten Stelle durchgeführt werden konnte.

In den Abbildungen 5.9–5.13 sind die Tiefenmessungen der Belastung der Proben 1–5, die mit 1000 Zyklen durchgeführt wurden, ersichtlich. Im Anhang (Kapitel 11.3) befinden sich weitere Gefügebilder, welche am LIM1 aufgenommen wurden.

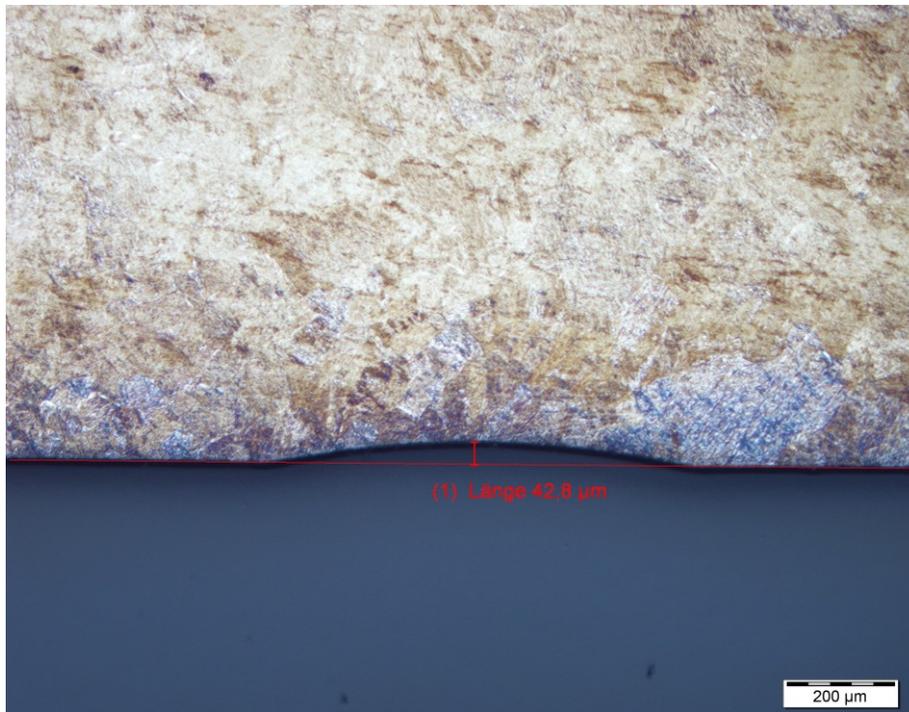


Abbildung 5.9: Darstellung der Probe 1 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung

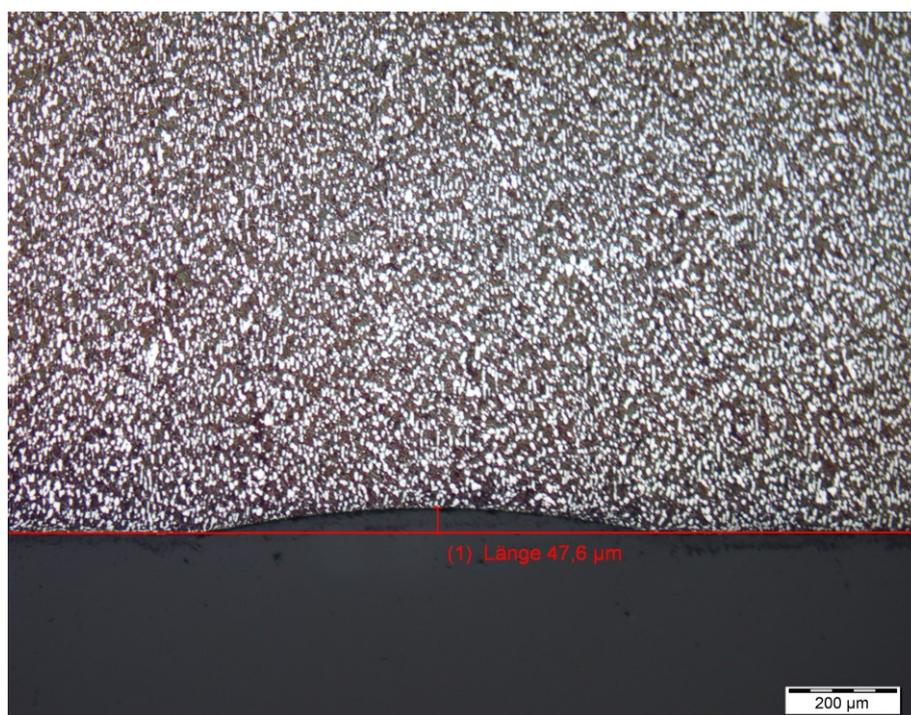


Abbildung 5.10: Darstellung der Probe 2 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung

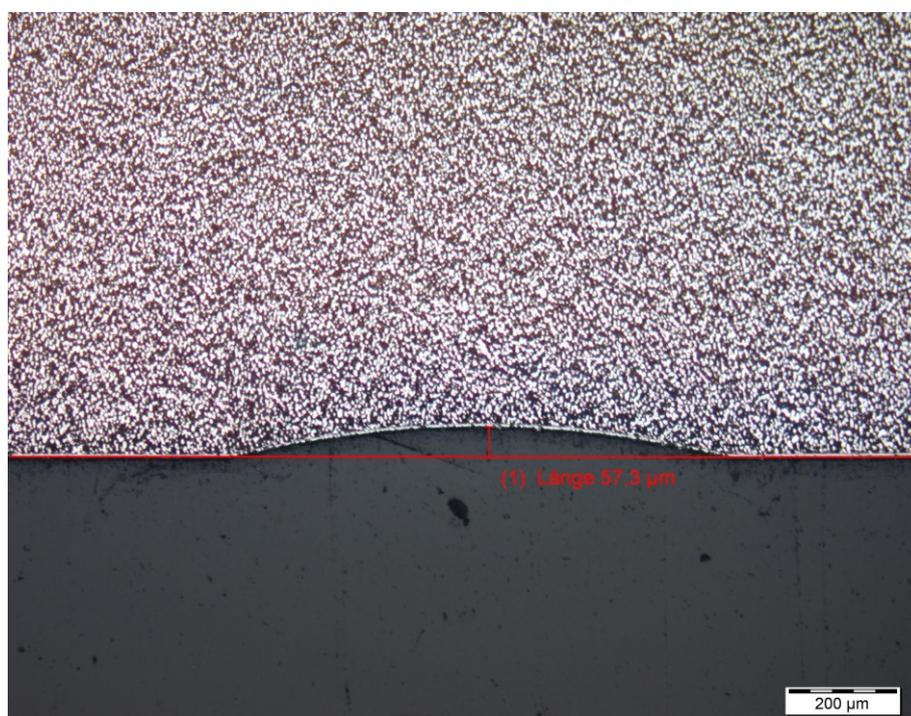


Abbildung 5.11: Darstellung der Probe 3 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung

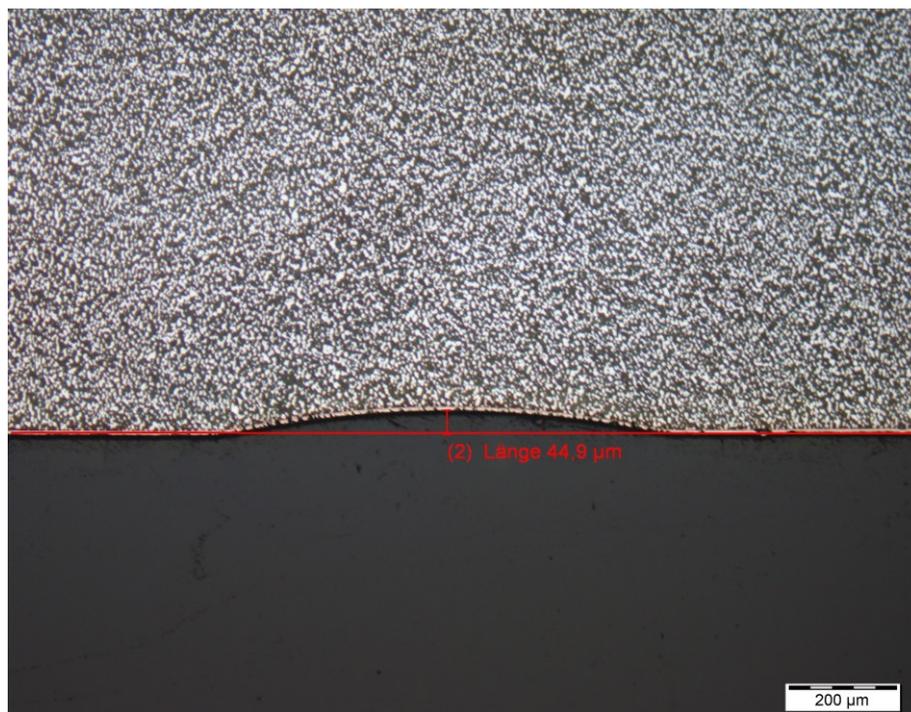


Abbildung 5.12: Darstellung der Probe 4 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung

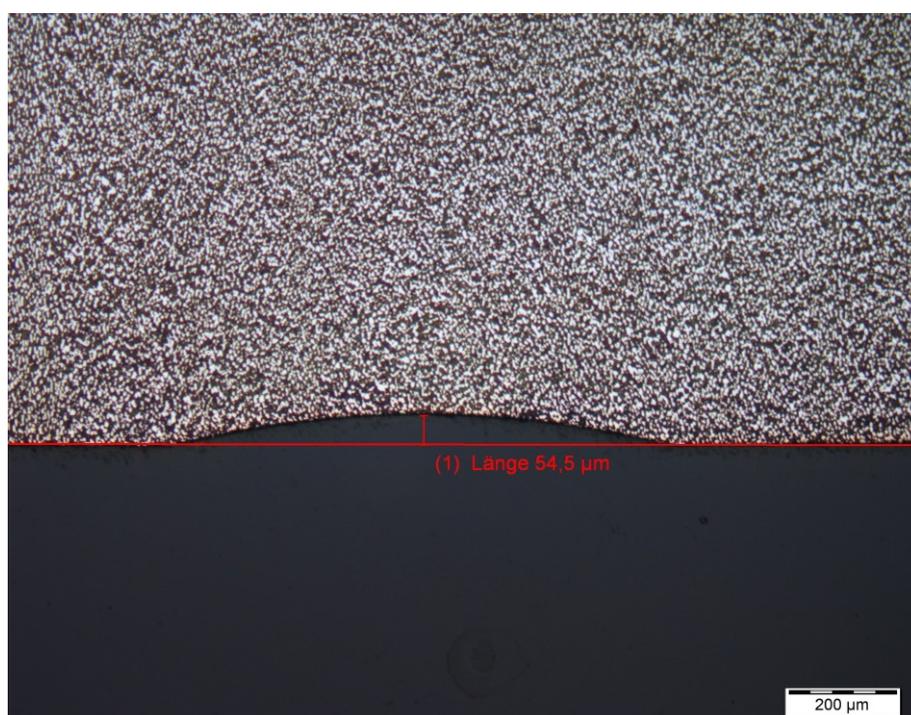


Abbildung 5.13: Darstellung der Probe 5 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung

Wie die Ergebnisse zeigen, schwankt die Messung der jeweiligen Proben und es ist davon auszugehen, dass aufgrund der geringen Größe der Belastung nicht immer die Mitte getroffen wurde. Die Resultate können daher nicht absolut gewertet werden. Tabelle 5.1 stellt die Auswertungen der Impacttiefe dar.

Tabelle 5.1: Impacttiefe der einzelnen Proben.

Probe	Impacttiefe
1	42,8 $\mu\text{m}$
2	47,6 $\mu\text{m}$
3	57,3 $\mu\text{m}$
4	44,9 $\mu\text{m}$
5	54,5 $\mu\text{m}$

## 5.2 Test C: Scratchtest

Für die Charakterisierung der Schichthaftung wurden Scratchtests durchgeführt. In den Abbildungen 5.14–5.17 der Proben 3 und 4 sind die Abplatzungen bzw. Defekte in den Schichten zu erkennen. Dies lässt sich auf eine unzureichende Schichthaftung für den vorliegenden Anwendungsfall schließen. Alle Aufnahmen wurden mit dem SE-Detektor aufgenommen.

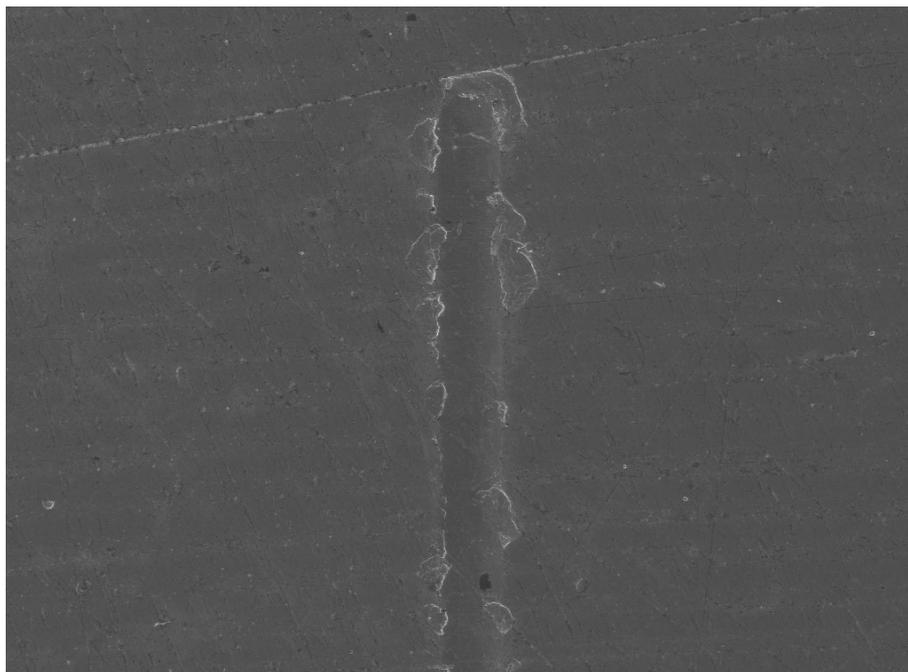


Abbildung 5.14: Darstellung des Defekts der Probe 3 im REM mit 150-facher Vergrößerung

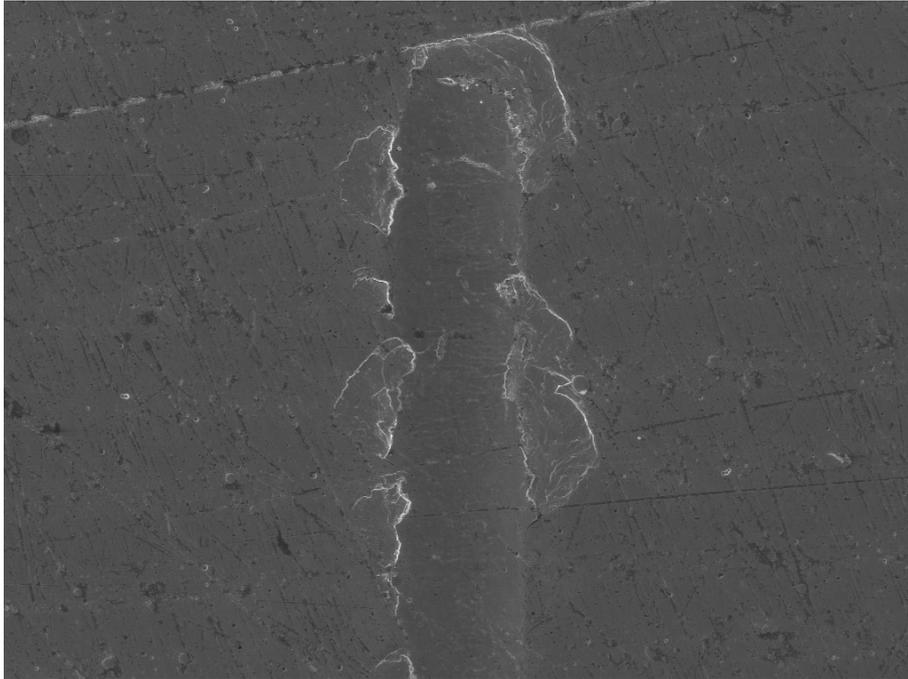


Abbildung 5.15: Darstellung des Defekts der Probe 3 im REM mit 300-facher Vergrößerung

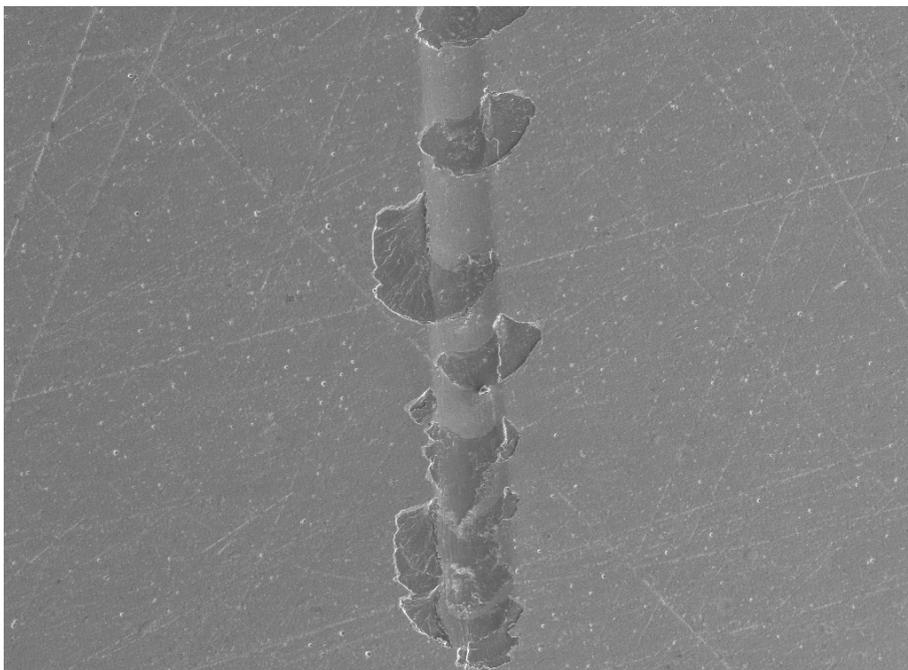


Abbildung 5.16: Darstellung des Defekts der Probe 4 im REM mit 150-facher Vergrößerung

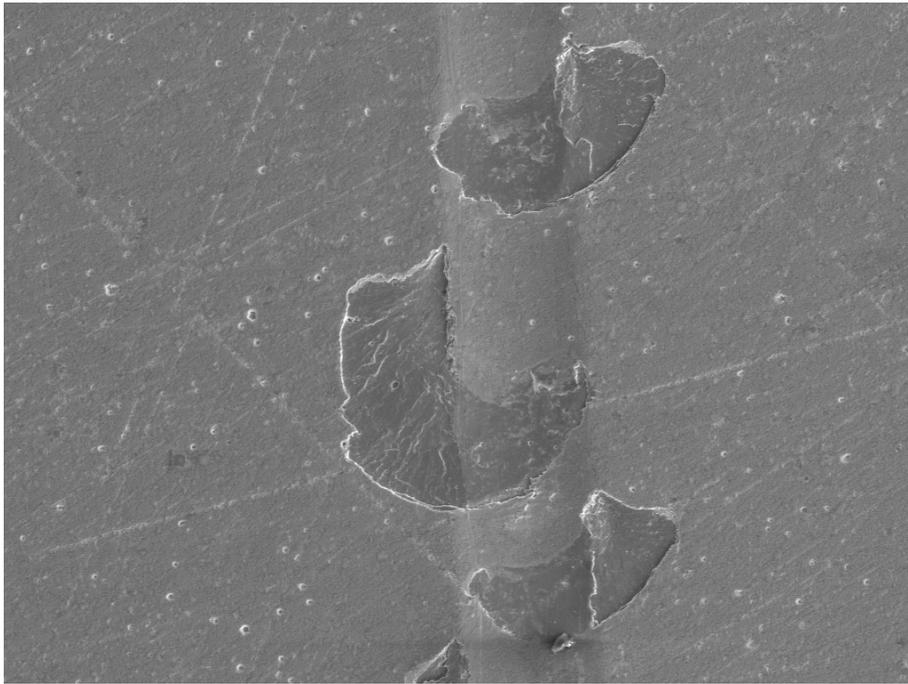


Abbildung 5.17: Darstellung des Defekts der Probe 4 im REM mit 300-facher Vergrößerung

Aufgrund der dünnen Schichten bei Probe 3 und 4 und des weichen Grundmaterials war es möglich Abplatzungen zu detektieren und kritische Lasten zu ermitteln. Dadurch konnten bestimmte Grundkriterien für weiterfolgende Untersuchungen nicht erfüllt werden und diese Varianten wurden somit nicht weiter verfolgt.

In den Abbildungen 5.18–5.21 der Proben 5 und 6 sind keine Risse oder Abplatzungen zu sehen.



Abbildung 5.18: Darstellung des Defekts der Probe 5 im REM mit 150-facher Vergrößerung

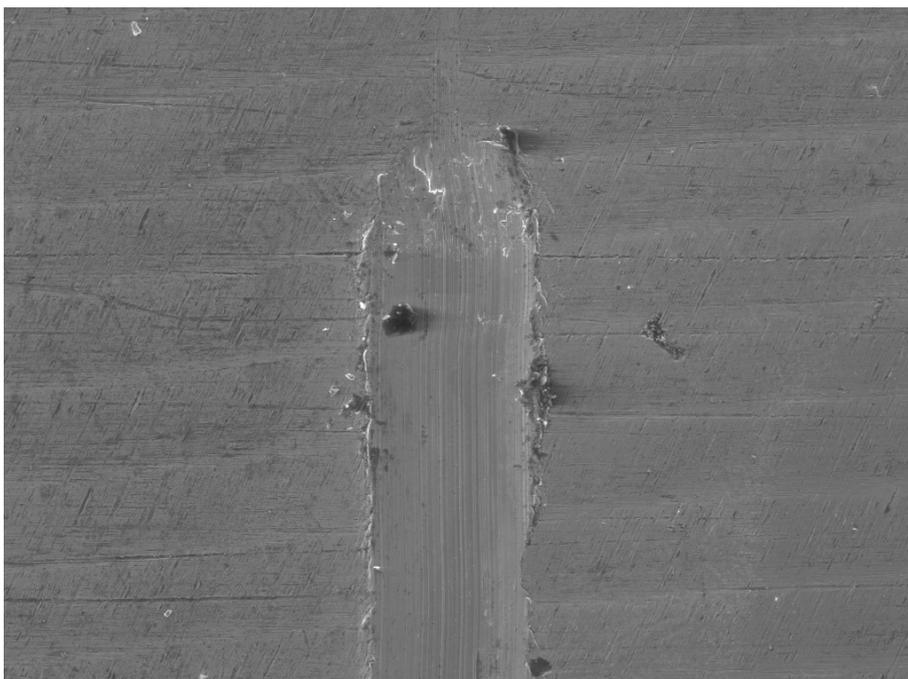


Abbildung 5.19: Darstellung des Defekts der Probe im REM mit 300-facher Vergrößerung

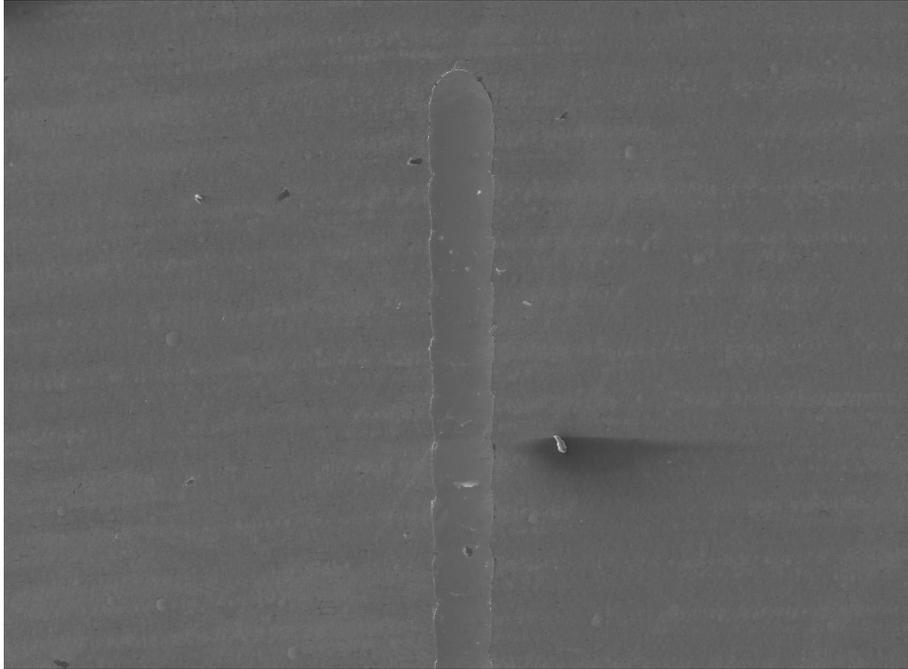


Abbildung 5.20: Darstellung des Defekts der Probe 6 im REM mit 150-facher Vergrößerung

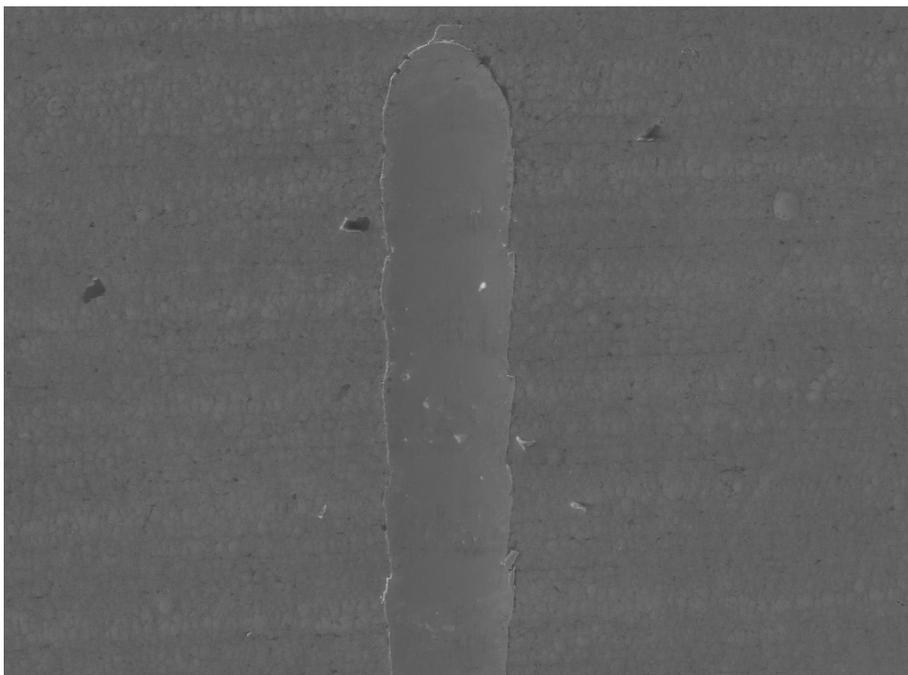


Abbildung 5.21: Darstellung des Defekts der Probe im REM mit 300-facher Vergrößerung

Die Auswertung der Impact- und Scratchtests zeigten eindeutig, dass sich Probe 6 am ehesten für die folgenden Prüfstandsversuche eignet. Aufgrund von Nichtabplatzungen beim Scratchtest und Rissverhalten bei den Impacttests (siehe Abbildungen 5.8 und 5.21). Bei den anderen Proben sind deutliche Abplatzungen (Scratchtest) und ausgeprägte Risse erkennbar.

### 5.3 Test D: Prüfstandversuche

Auf Basis der Ergebnisse von Impact- und Scratchtest wurde die Probe 6 als jene mit dem größten Potenzial ausgewählt. Die nachfolgenden Prüfstandsuntersuchungen fanden daher an dieser sowie an einer Titan-Referenzprobe (Probe 2) statt.

Die ersten Anzugsversuche erfolgten mit einem Drehmomentschlüssel, insgesamt zehn Anzüge pro Variante. Dabei wurde ein Anzugsmoment von 900 Nm erreicht. Anschließend fanden die Reinigung der Testteile und die Begutachtung am LIM1 statt. Abbildung 5.22 zeigt den Verschleiß an den Gewindeflanken bei Probe 2 (im Bild oben) und der beschichteten Probe 6 (im Bild unten).

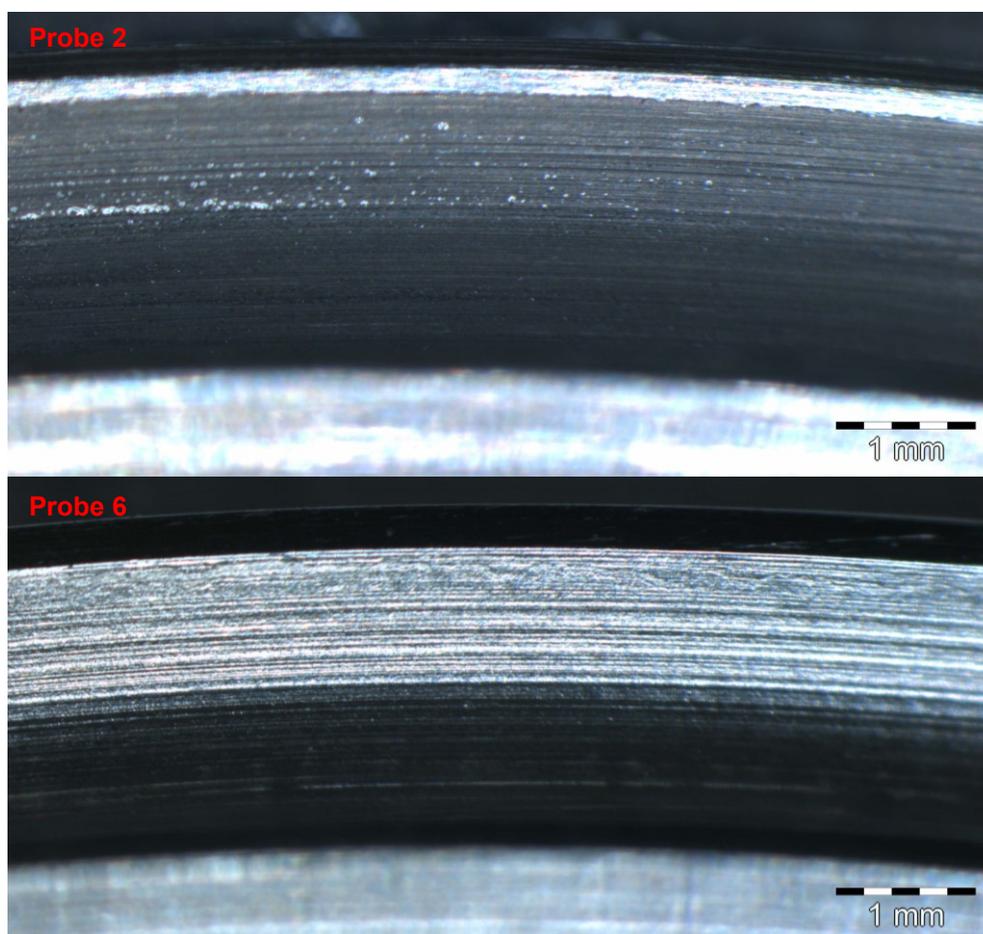


Abbildung 5.22: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei zehn Anzügen mit dem Drehmomentschlüssel, Probe 2 und Probe 6

Diese Abbildung soll zeigen, dass durch Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel, es zu keiner signifikanten Beschädigung des Gewindes kommt.

Anschließend erfolgten die ersten fünf Anzüge mit dem Schlagschrauber, bevor die Testteile wieder gereinigt und am LIM1 begutachtet wurden. Das Mindestanzugsmoment von 900 Nm konnte bei allen Anzugsversuchen mit dem Schlagschrauber erreicht werden. Die Ergebnisse der Aufzeichnungen von Vorspannkraft und Anzugsmoment sind im Anhang (Kapitel 11.4) ersichtlich. Abbildung 5.23 zeigt die Gewindeflanke nach fünf Anzügen mit dem Schlagschrauber (oberes Bild Probe 2 und unteres Bild Probe 6).

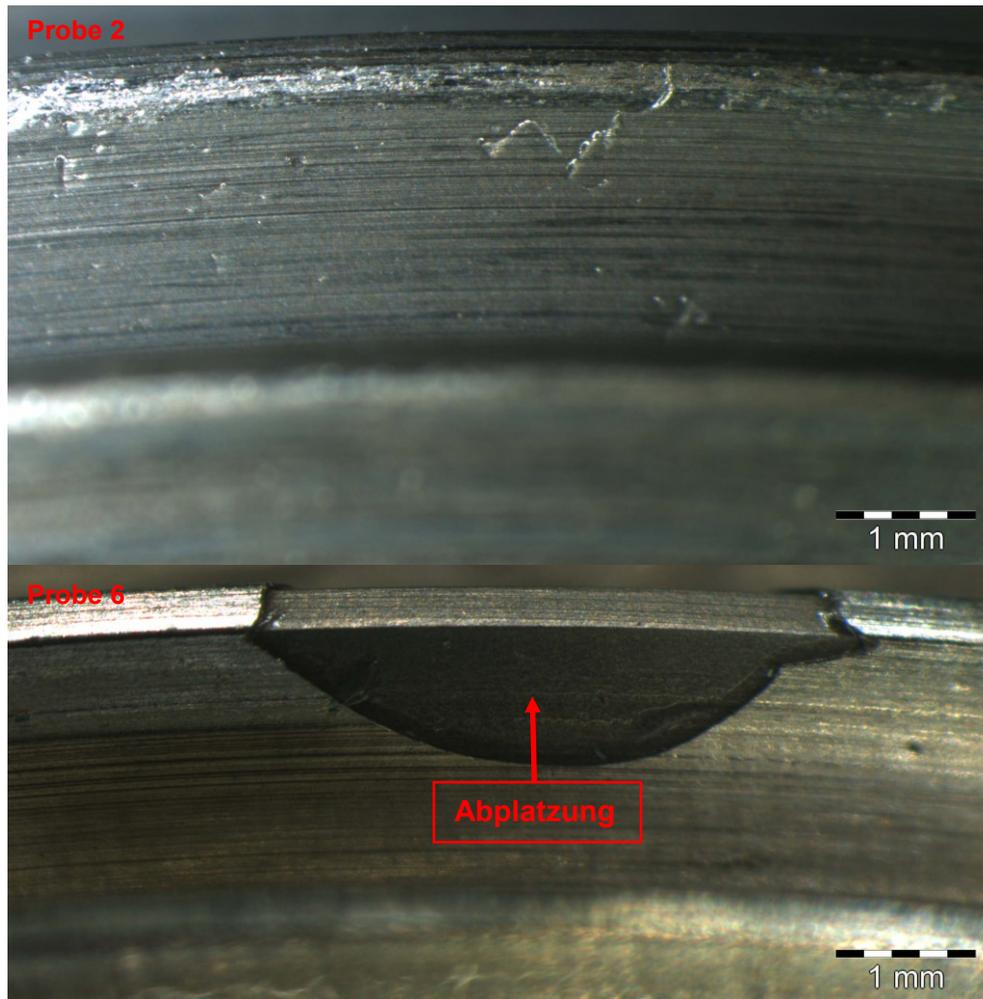


Abbildung 5.23: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken, fünf Anzüge Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6

Es ist deutlich ersichtlich, dass schon nach fünf Anzügen ein Teil der Schicht von Probe 6 abgeplatzt ist. Eine Detailansicht dieser Abplatzung ist in Abbildung 5.24 ersichtlich.

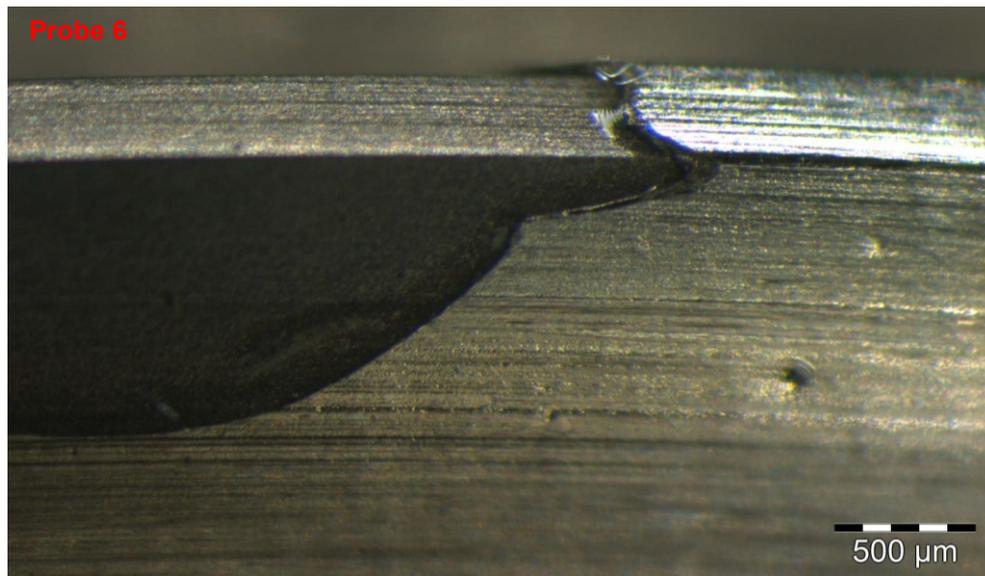


Abbildung 5.24: Detailansicht der Abplatzung von Probe 6

In weiterer Folge wurde zehn Mal pro Probe mit dem Schlagschrauber angezogen. Danach erfolgte wiederum die Reinigung und Begutachtung der Gewindeflanken (Abbildung 5.25 und 5.26). Abbildung 5.25 zeigt eine Übersicht der Gewindegänge von Probe 4.



Abbildung 5.25: Übersicht der Gewindegänge von Probe 6 bei 15 Anzügen mit einem Schlagschrauber

Es sind deutliche Abplatzungen der Schicht bei Probe 6 zu erkennen, wobei noch kein/kaum Verschleiß am Grundwerkstoff vorliegt. Einen Vergleich der beiden Proben 2 und 6 nach 15 Anzügen mit dem Schlagschrauber zeigt Abbildung 5.26.

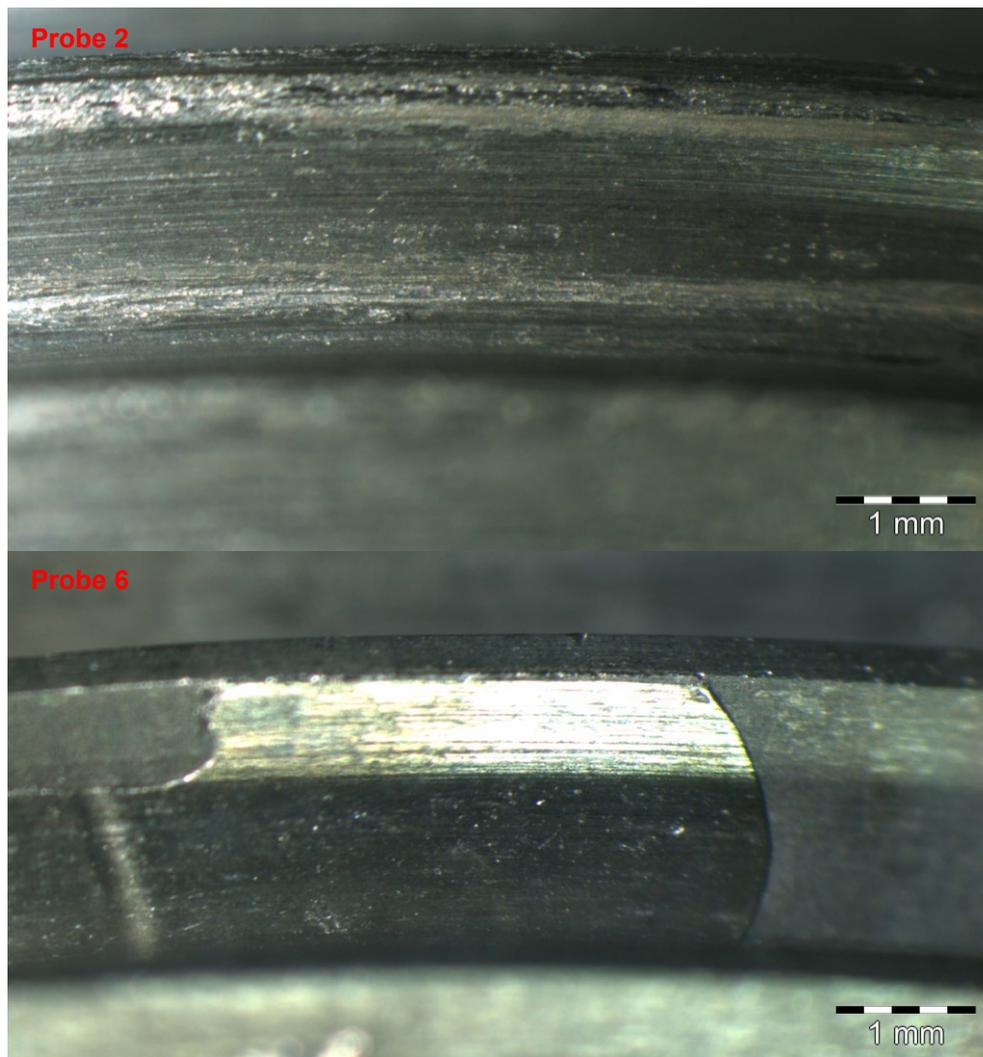


Abbildung 5.26: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 15 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6

Nach den ersten 15 Anzügen mit dem Schlagschrauber wurde das Anzugsintervall auf 15 erhöht, bevor die nächste Reinigung und Begutachtung vorgenommen wurde. Abbildung 5.27 zeigt den Verschleiß der Gewinde nach 30 Anzügen mit dem Schlagschrauber und Abbildung 5.28 den Verschleiß nach 45 Anzügen.

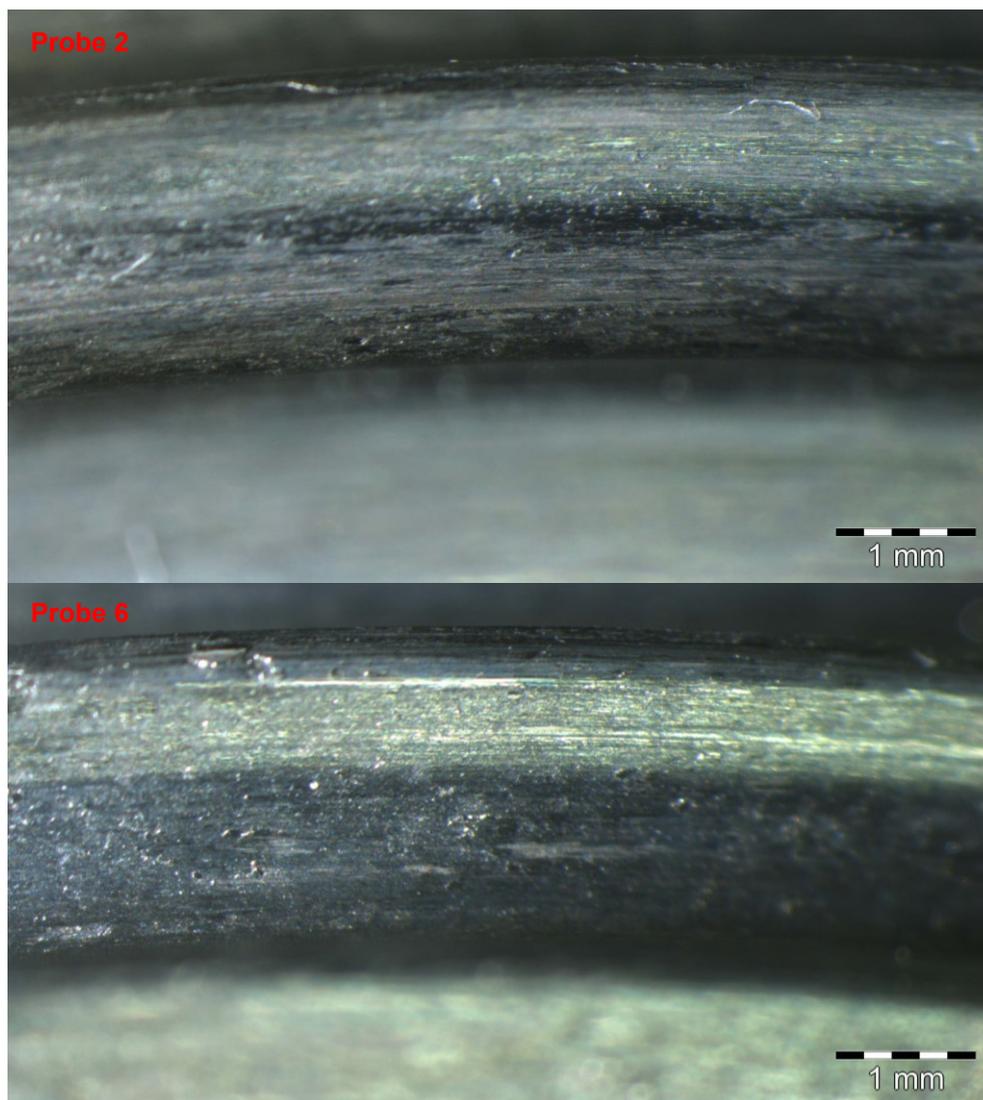


Abbildung 5.27: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 30 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6

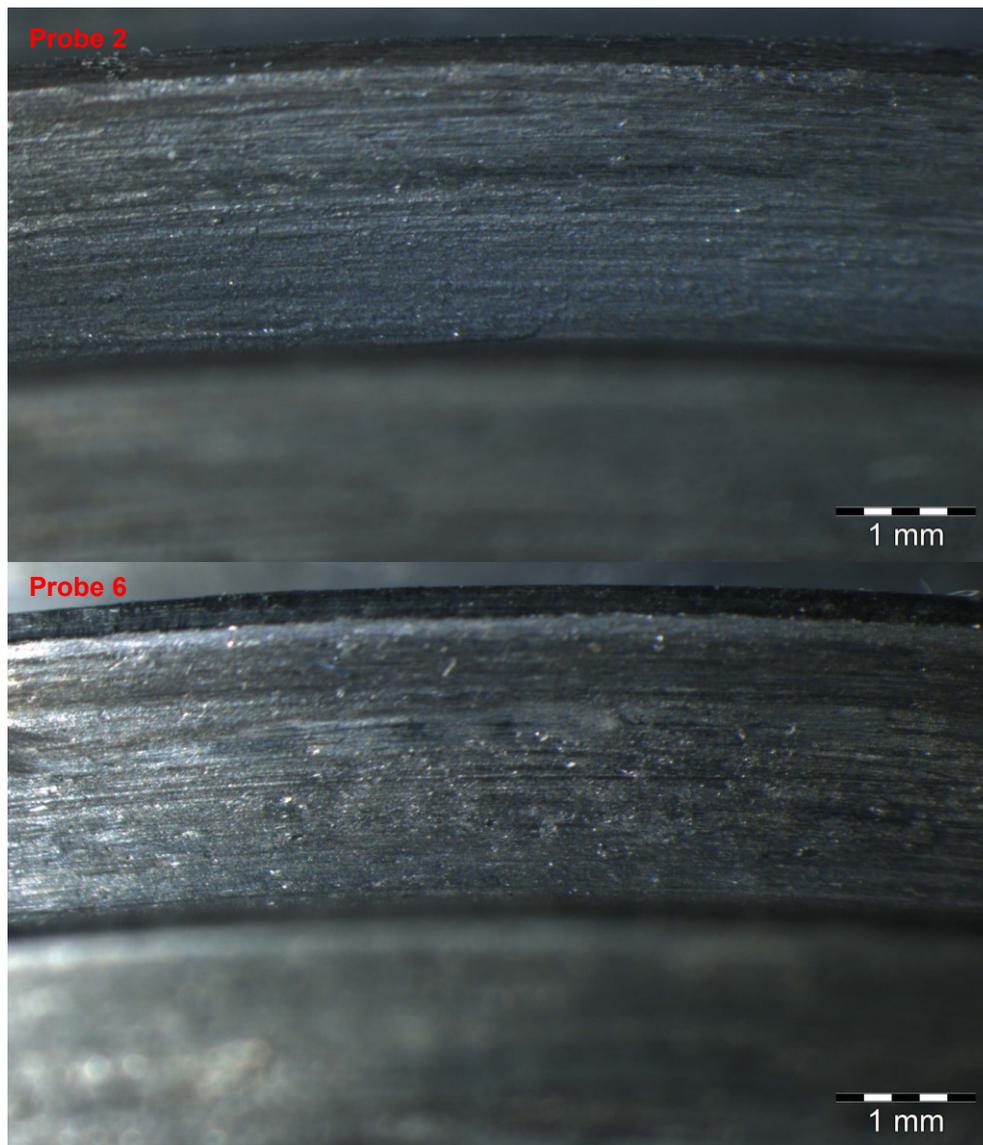


Abbildung 5.28: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 45 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6

In Abbildung 5.29 ist der Verschleiß nach 60 Anzügen mit dem Schlagschrauber ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass die Schicht bei Probe 6 zu circa 80 % abgeplatzt ist. Bei den letzten zwei Gewindegängen wurde keine Schichtabplatzungen festgestellt. Dies zeigt deutlich, dass die Beanspruchungen der letzten zwei Gewindegänge nicht so hoch sind wie am Gewindestart.

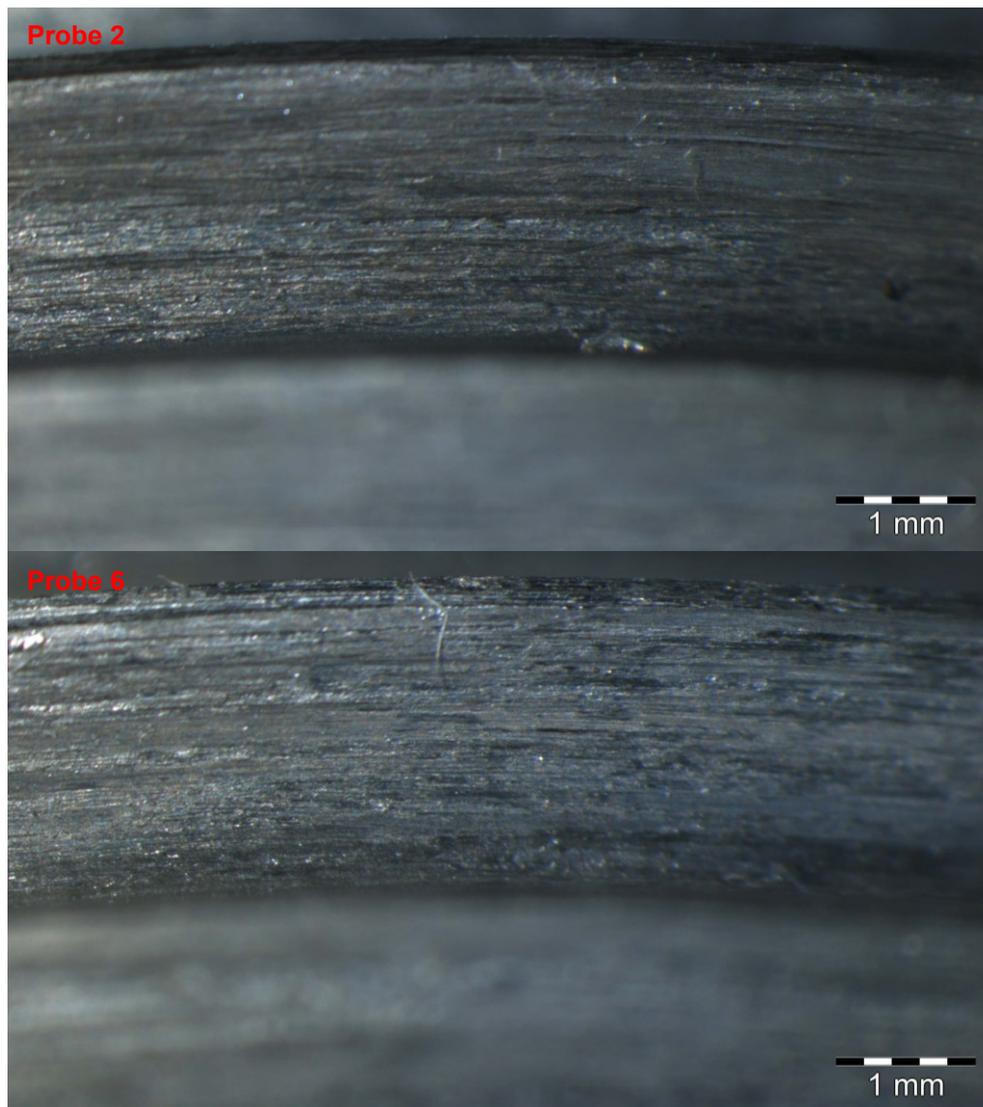


Abbildung 5.29: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken, 60 Anzüge Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6

Nach 60 Anzügen kam es zu einer Erhöhung des Intervalls von 15 auf 30 Anzüge. Grund dafür waren keine erkennbaren signifikanten Unterschiede der Verschleißbilder. Abbildung 5.31 zeigt den Verschleiß nach 90 Anzügen mit dem Schlagschrauber.

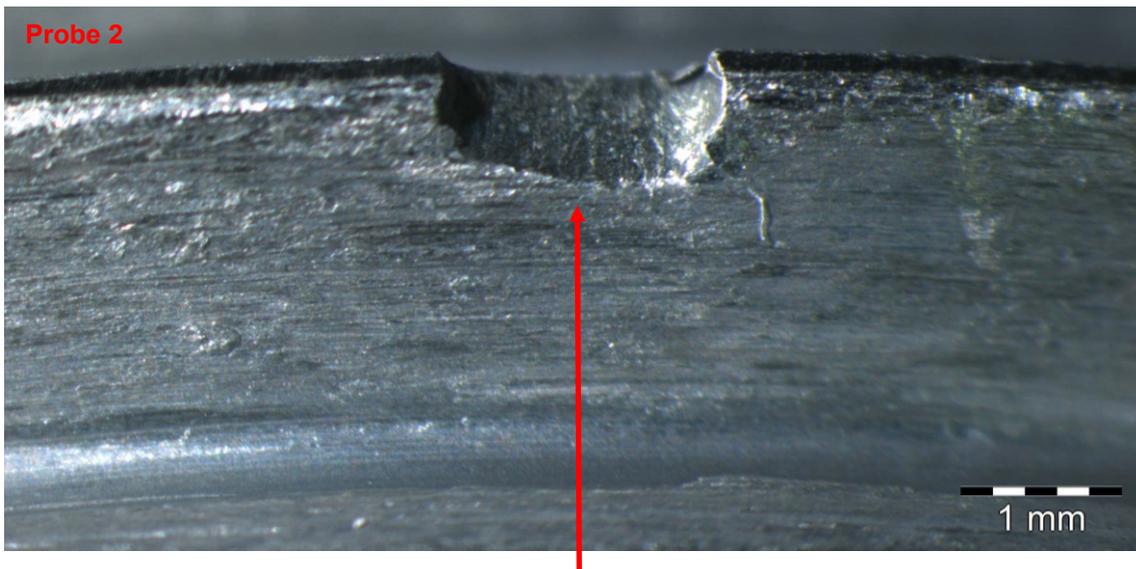


Abbildung 5.30: Detailansicht des Gewindespitzenabbruchs im ersten Gewindegang bei Probe 2

Bei 90 Anzügen wurde das erste Mal bei Probe 2 ein Abbruch der Gewindespitze festgestellt (Abbildung 5.30). Bei Probe 6 konnten keine Abbrüche des Gewindes detektiert werden.



Abbildung 5.31: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 90 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6

Die letzten 60 Anzüge wurden ohne ein Begutachtungs- oder Reinigungsintervall durchgeführt und anschließend beurteilt. In Abbildung 5.32 sind die Verschleißbilder der beiden Varianten ersichtlich.

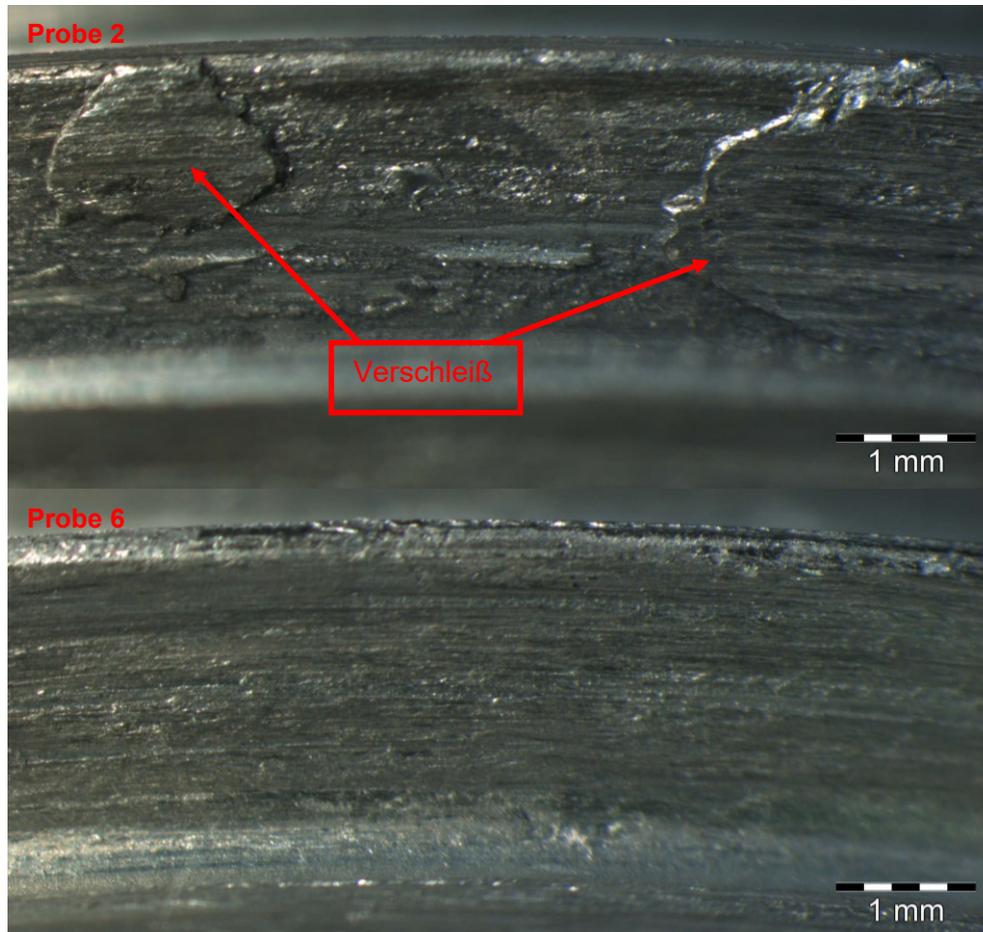


Abbildung 5.32: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 150 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6

In Abbildung 5.32 ist deutlich der Verschleißunterschied zu erkennen. An der Probe 2 wurden visuell Fremdpartikel beobachtet, die aus Materialabtrag stammen. Eine Detailansicht des Gewindegangs bei Probe 2 zeigt deutlich, wie sich die Stahlmutter in das Titanmaterial gefressen hat (Abbildung 5.33).

Probe 6 weist nach 150 Anzügen zwar auch Verschleißerscheinungen auf, jedoch deutlich weniger als Probe 2. Es kam zu keinen Grundmaterialausbrüchen bzw. Gewindespitzenabbrüchen.



Abbildung 5.33: Darstellung des Gewindespitzenabbruches infolge der hohen Beanspruchung nach 150 Anzügen

Die Ergebnisse der Anzugsversuche haben gezeigt, dass bei Probe 6 die ersten Abplatzungen der Schicht deutlich früher als erwartet passiert sind. Jedoch liefert Probe 6 im Vergleich zu Probe 2 bessere Endergebnisse bei Betrachtung des Gewindes. Nicht nur die Oberflächenrauigkeit ist besser, auch der Materialabtrag an den Gewindeflanken war bei Probe 6 vorteilhafter als bei Probe 2.

Ein Abbruch der Gewindespitzen konnte nur bei Probe 2 festgestellt werden. Auch Fremdpartikel an den Gewindegängen, welche die Rauigkeit der Oberfläche erhöhen, sind bei Probe 2 deutlich zu erkennen, was sich wiederum negativ auf die Vorspannkraft und das Anzugsmoment auswirkt. Je rauer eine Oberfläche, desto größer ist die benötigte Vorspannkraft.

## 5.4 Auswertung der Oberflächenrauigkeit

Es wurde an den Testteilen Rauigkeits- und Konturmessungen der Gewindeflanken durchgeführt, um Auskunft über die Oberflächenbeschaffenheit der Gewindeflanken zu bekommen. Diese erfolgten nach dem Anzug mittels Drehmomentschlüssel sowie nach 15, 45 und 150 Anzügen.

Es konnte ein deutlicher Materialabtrag an den Gewindeflanken festgestellt werden. Jene Gewindegänge, die den höchsten Beanspruchungen ausgesetzt waren (Gewindegang 1–4), zeigten hierbei deutliche Ergebnisse im Vergleich zu den weniger beanspruchten Gewindegängen (5–6). In Tabelle 5.1 sind die Rauigkeitswerte ersichtlich.

Tabelle 5.1: Rauigkeitswerte der Gewindeflanken nach den verschiedenen Begutachtungen

		Probe 2		Probe 6	
		Ra [µm]	Rz [µm]	Ra [µm]	Rz [µm]
<b>Vorbegutachtung</b>	Wert 1	0,25	1,33	0,21	1,01
	Wert 2	0,29	1,49	0,16	0,75
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,27</b>	<b>1,41</b>	<b>0,185</b>	<b>0,88</b>
<b>Drehmomentschlüssel</b>	Wert 1	0,15	0,74	0,20	0,96
	Wert 2	0,18	1,07	0,20	0,98
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,165</b>	<b>0,905</b>	<b>0,20</b>	<b>0,97</b>
<b>15 Anzüge Schlagschrauber</b>	Wert 1	0,14	0,83	0,14	0,72
	Wert 2	0,33	1,63	0,21	0,94
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,235</b>	<b>1,23</b>	<b>0,175</b>	<b>0,83</b>
<b>45 Anzüge Schlagschrauber</b>	Wert 1	0,40	2,06	0,44	1,93
	Wert 2	0,49	2,24	0,51	2,48
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,445</b>	<b>2,15</b>	<b>0,475</b>	<b>2,155</b>
<b>150 Anzüge Schlagschrauber</b>	Wert 1	1,27	6,00	1,23	6,11
	Wert 2	1,15	6,13	1,33	6,62
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,21</b>	<b>6,065</b>	<b>1,28</b>	<b>6,365</b>

Es ist zu erkennen, dass sich die Oberflächenrauigkeit an den Gewindeflanken aufgrund des Materialabtrages vergrößert bzw. verschlechtert. Deswegen muss ein höheres Anzugsmoment verwendet werden, um die Felge optimal vorspannen zu können. Durch die erhöhte Reibung wird der Anzug dementsprechend zeitlich verzögert. Inwiefern sich diese Werte in der Praxis auswirken, müsste in Zusammenarbeit mit einem Team aus der Formel 1 untersucht werden.

## 6 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vorversuche spiegeln das Ranking der Verfahren aus der Nutzwertanalyse wider. Aufgrund der zu dünnen Schicht bei Probe 3 und 4 war deutlich ersichtlich, dass es bei schlagenden Belastungen zu Rissen bzw. Abplatzungen kommt. Auch die Scratchtests zeigten, dass dünne Schichten für solche Beanspruchungen nicht gut geeignet sind. Bei deutlich dickeren Werten konnten, wie bei den Proben 2 und 4, keine Abplatzungen detektiert werden. Als bestgeeignetstes Verfahren kristallisierte sich eine galvanische Beschichtung, Probe 4, heraus. In praxisnahen Prüfstandtests wurde diese Variante gegen eine unbeschichtete Titan-Referenzvariante, Probe 6, getestet.

Die Prüfstandversuche zeigten deutlich, welche enormen Kräfte auf das Gewinde wirkten. Schon nach einigen Anzügen brachen Teile der Schicht von Probe 4 ab. Allerdings wurde durch die Beschichtung ein Hinauszögern des Verschleißes, der direkt das Gewinde angreift, um ca. 50 Anzüge erreicht. Grund für die frühen Abplatzungen der Schicht am Gewinde war eine schlechte Schichthftung am Grundwerkstoff. Aufgrund der geringen Erfahrung des externen Beschichters mit diesem Werkstoff konnte keine optimale Vorbehandlung erreicht werden, um eine gute Schichthftung zu gewährleisten. Durch die nicht ausreichende Vorbehandlung verminderte sich der erreichte Erfolg, gemessen am Verschleiß der Radnabe. In Rücksprache mit dem Beschichter wurden Potenziale aufgezeigt, um die Vorbehandlung zu optimieren und eine bessere Schichthftung zu erreichen. Neben der Weiterentwicklung dieser Schicht ist eine weitere Verfolgung von Variante 5 (Detonationskanone), welche bei den Vortests und der Nutzwertanalyse sehr gute Ergebnisse lieferte, in diesem Zusammenhang zu erwähnen.

Es ist auch die positive Wirkung des Schmiermittels MoS<sub>2</sub>, welches die Reibung deutlich herabsetzt, zu erwähnen. Aufgrund dessen wurde der Anzug erleichtert und es trat kaum ein Verkanten der beiden Gewindepartner (Radnabe und Radmutter) auf.

Am geplanten Ende der Versuche, nach 150 Anzügen, wurden an der Probe 6 Abbrüche an den Gewindespitzen (Grundmaterial) festgestellt. Im Vergleich dazu traten bei Probe 4 keine Grundmaterialausbrüche auf.

Die verschiedenen Prozessrouten, die betrachtet wurden, haben großes Potenzial, allerdings ist ihre Umsetzung zum jetzigen Zeitpunkt nur teilweise realisierbar. Bei Diffusionsprozessen (Plasmanitrieren, Borieren, etc.) ist der Abfall der Kernhärte sowie der Verzug am Bauteil zu groß, da für diese Verfahren hohe Temperaturen erforderlich sind, um eine entsprechende Schicht aufbauen zu können. Bei niedrigeren Prozesstemperaturen wird nicht die erforderliche Schichtdicke erreicht.

Das Problem bei Schweißverbindungen liegt in der Bildung von intermetallischen Phasen in der Schweißnaht, welche sehr spröde sind. Das Finden eines idealen Partners für Titan zeigte sich dahingehend schwierig, da kein Lohnschweißer Erfahrung mit der Kombination Titan/Stahl, stahlähnlichen Werkstoffen sowie Werkstoffen ähnlicher Härte wie Stahl hat. Es wurden auch alternative Schweißverfahren (Laserschweißen, selektives Laserschmelzen, Reibschweißen, etc.) in Betracht gezogen, jedoch gibt es auch hier keine praktische Erfahrung. Eine schweißtechnische Lösung kann aufgrund des Umfangs nur im Rahmen einer eigenen wissenschaftlichen Arbeit entwickelt werden.

Als prozesssicherste Variante stellten sich in dieser Arbeit Beschichtungsverfahren heraus. Daher wurden mögliche Technologien im Detail untersucht und bewertet. Neben bekannten Beschichtungsprozessen besteht aber auch ein großer Bedarf hinsichtlich einer Weiterentwicklung, da sich bei den Experimenten gezeigt hat, dass Optimierungen der Schichtsysteme sinnvoll wäre.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Um den Verschleiß an Gewinden von Titanradnaben im Rennsport zu reduzieren, wurde eine Nutzwertanalyse durchgeführt und auf deren Basis geeignete Verfahren ausgewählt. Im Rahmen von Vortests erfolgte die Überprüfung auf ihre Eignung hinsichtlich der Schichthaftung bzw. des Abplatz- und Ermüdungsverhaltens.

Ein wichtiger Punkt, der abschließend in den Ergebnissen gezeigt wurde, ist die Veränderung der Oberflächenrauigkeit. Dadurch wird die Reibung zwischen beiden Partnern deutlich verschlechtert. Dies hat zur Folge, dass ein höheres Anzugsmoment benötigt wird, um die Radmutter optimal an der Radnabe zu befestigen. Aufgrund dessen ist es schwierig, eine Aussage zu treffen, ob bei gleichbleibendem Anzugsmoment die Radmutter sicher befestigt werden kann, ohne sich dabei durch Eigenvibrationen selbst zu lösen.

Mit dieser Arbeit wurde ein wesentlicher Grundstein für die zukünftige Marktreife gelegt. Einerseits brachte sie eine umfassende Recherche zum Stand der Technik und der möglichen Beschichtungsverfahren. Andererseits zeigte sie, dass eine Verbesserung des Verschleißverhaltens durch Beschichten möglich ist, und in nächsten Schritten dies in Richtung Marktreife geführt werden kann.

Nachfolgende Aufzählung der wesentlichen Punkte gibt eine Zusammenfassung der zukünftig möglichen Verbesserungen wieder:

- Die Schicht bei Probe 6 platzte früher ab als angenommen, das Ziel von 150 Anzügen wurde erreicht ohne Abbrüche an Gewindespitzen oder Grundmaterialausbrüchen.
- Probe 2 (Referenz) erreichte 150 Anzüge, allerdings mit Abbrüchen der Gewindespitzen und deutlich mehr Materialabtrag an den Gewindeflanken.
- Positive Beeinflussung durch das Schmiermittel MoS<sub>2</sub>.
- Es ist großes Potenzial hinsichtlich der besseren Schichthaftung bei Probe 6 (Multilayerschicht) vorhanden.
- Alternativ könnte Variante 5 getestet und mit verbesserter Probe 4.1 verglichen werden.
- Prozessalternativen (Diffusionsverfahren, Schweißverbindungen) in Form weiterer wissenschaftlicher Arbeiten sind möglich, da auf jeden Fall Potenzial vorhanden ist.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Haefer René A.: Oberflächen- und Dünnschicht-Technologie, Beschichtungen von Oberflächen. Springer-Verlag, 1987.
- [2] Wikipedia: Sputtern. Online im Internet: <http://de.wikipedia.org/wiki/Sputtern>, Abruf: 12.08.2014.
- [3] Hasted, J.B.: Physics of atomic collisions. London: Butterworth 1964.
- [4] Bühler AG: Flammsspritzverfahren: <http://www.buehrer-ag.ch/flammsspritzen.html>, Abruf 18.08.2014.
- [5] Jodoin, N.; Nadeau, M.: Proc. 9th Int. Thermal Spraying Conf. (1980), 53.
- [6] GTS: Was ist thermisches Spritzen?. Online im Internet: [http://www.gts-ev.de/html\\_d/ts-info.htm](http://www.gts-ev.de/html_d/ts-info.htm), Abruf: 18.08.2014.
- [7] Bach W., Duda T.; Moderne Beschichtungsverfahren. Wiley-VCH Verlag GmbH Weinheim, 2000, 217f.
- [8] Boyer R., Welsch G., Collings E.W.; Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, 1994.
- [9] DIN EN 14610:2005-02 Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe für Metallschweißprozesse
- [10] DIN 1910-100: 2008-02: Schweißen und verwandte Prozesse – Begriffe – Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005.
- [11] Matthes K.J., Richter E.: Schweißtechnik, Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Carl Hanser Verlag München, 2008.
- [12] Laserline: Anwendungen, Verfahrensprinzip Auftragsschweißen. Online im Internet: <http://www.laserline.de/verfahrensprinzip-auftragsschweissen.html>, Abruf: 28.08.2014.
- [13] Online: Der Werkstoff Titan – Wärmebehandlungsmöglichkeiten: <http://www.sgersing.de/pdf/SFT051.pdf>, Abruf: 01.09.2014.
- [14] Chatterjee-Fischer R.: Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, Nitrieren und Nitrocarburieren. Expert Verlag, ISBN 3-8169-1092.
- [15] Wikipedia: Nitrieren, Aufbau Nitrierschicht. Online im Internet: [http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Aufbau\\_Nitrierschicht.png](http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Aufbau_Nitrierschicht.png), Abruf: 04.09.2014.
- [16] Fa. Zwick GmbH & Co. KG; August-Nagel-Straße 11, 89079 Ulm Deutschland.
- [17] Online: Verschleißprüfung, Scratchtest: [https://www.tu-chemnitz.de/mb/lvw/forschung/ta38\\_scratch.php](https://www.tu-chemnitz.de/mb/lvw/forschung/ta38_scratch.php), Abruf: 06.10.2014.
- [18] Neidel A. et al.: Handbuch Metallschäden, REM-Atlas und Fallbeispiele zur Ursachenanalyse und Vermeidung, 2. Überarbeitete Auflage, 2012 Carl Hanser Verlag München Wien; 31.

- [19] Dyber P.: Vortrag über Reibvibration, Technische Akademie Esslingen, 1978.
- [20] Bargel H.: Werkstoffkunde, 10. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008, 137–139.
- [21] Lütjering G., Williams J.C.: Titanium, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer Verlag, Berlin, 2007, 25.
- [22] Donachie M. J.: Titanium: A Technical Guide, 2<sup>nd</sup> Edition, ASM International, 1988, 57–73.
- [23] Hasse S.: Giesserei Lexikon, 19. Auflage, Schiele & Schön GmbH Fachverlag, 2007, 159.
- [24] Kruth J.-P.: Binding Mechanisms in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting, In: Rapid prototyping journal, 2005, 26–36.
- [25] Online: Leibniz-Gemeinschaft: <http://www.leibniz-transfer.de/einrichtungen/mathematik-natur-und-ingenieurwissenschaften/leibniz-institut-fuer-festkoerper-und-werkstoffforschung-dresden-ifw/3dlaserstrahlschmelzen/>, Abruf: 07.11.2014.
- [26] Czichos H., Habig K.-H.: Tribologie Handbuch, Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, 3. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden, 2010, 389, 422–435.
- [27] Buckley D.H.: Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication. Amsterdam, Oxford, New York: Elsevier 1981.
- [28] Heinrich H., Möhwald K., Steffens H.-D.: Grundlagen zum PVD-Verfahren, Metall 3, 1990, 279–283.
- [29] Online: Abbildung zu Wechselwirkungsprozessen bei REM; [http://www.chemie.uni-jena.de/institute/glaschemie/Anleitung\\_REM.pdf](http://www.chemie.uni-jena.de/institute/glaschemie/Anleitung_REM.pdf), Abruf: 03.12.2014.
- [30] Zielonka A., Jehn H.A. und 8 Mitautoren: Galvanische Schichten, Abscheidung, Eigenschaften, Anlagentechnik, Qualitätssicherung, Messmethoden, Umweltaspekte; 3. Neubearbeitete und erweiterte Auflage; Expert Verlag Renningen; 1–10.
- [31] Wikipedia: Abbildung zur galvanischen Beschichtung: [http://de.wikipedia.org/wiki/Galvanotechnik#mediaviewer/File:GalvanostegiePrinzipski\\_zzeTy.svg](http://de.wikipedia.org/wiki/Galvanotechnik#mediaviewer/File:GalvanostegiePrinzipski_zzeTy.svg); Abruf: 09.12.2014.
- [32] Trzesniowski M.: Rennwagentechnik, Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme; 1. Auflage; Vieweg und Teubner Fachverlag, Wiesbaden 2008; 233–240.

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Nutzwertanalyse möglicher verschleißminimierender Verfahren .....	4
Abbildung 3.1: Abbruch Gewindespitze bei Radnabe (plasmanitriert).....	6
Abbildung 3.2: Einfluss von Legierungselementen bei der $\alpha$ - $\beta$ Umwandlung <sup>[21]</sup> .....	8
Abbildung 3.3: Aufbau einer Nitrierschicht bei einer Titanlegierung <sup>[15]</sup> .....	10
Abbildung 3.4: Die drei verschiedenen Verfahren des PVD-Prozesses <sup>[28]</sup> .....	12
Abbildung 3.5: Darstellung des Flamspritzenverfahrens <sup>[4]</sup> .....	14
Abbildung 3.6: Darstellung des D-Gun-Verfahrens: (1) Acetylen, (2) Sauerstoff, (3) Stickstoff, (4)Spritzpulver, (5) Zündeinrichtung, (6) Austrittsrohr mit Wasserkühlung, (7) Werkstück <sup>[6]</sup> .....	14
Abbildung 3.7: Aufbau einer galvanischen Beschichtung <sup>[31]</sup> .....	16
Abbildung 3.8: Prinzip des Laserauftragsschweißens <sup>[12]</sup> .....	17
Abbildung 3.9: Schematischer Verfahrensablauf beim SLM <sup>[25]</sup> .....	18
Abbildung 4.1: Darstellung der Probescheiben für den Impact- und Scratchtest.....	23
Abbildung 4.2: Hochfrequenzpulsator Amsler HFP 5100 der Fa. Zwick <sup>[16]</sup> .....	25
Abbildung 4.3: Probenaufspannung für Impacttest. <sup>[16]</sup> .....	26
Abbildung 4.4: Prinzip des Scratchtests <sup>[17]</sup> .....	27
Abbildung 4.5: Prinzipieller Aufbau für den Prüfstandtest .....	28
Abbildung 4.6: Zentralverschraubung in der Formel 1 <sup>[32]</sup> .....	29
Abbildung 4.7: Schematischer Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops <sup>[18]</sup> .....	31
Abbildung 4.8: Wechselwirkungsprozesse von Elektronen an der Oberfläche eines Festkörpers <sup>[29]</sup> .....	32
Abbildung 5.1: Darstellung der Probe 3 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen.....	33
Abbildung 5.2: Darstellung der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen .....	34
Abbildung 5.3: Darstellung der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen.....	34
Abbildung 5.4: Darstellung der Probe 6 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen.....	35
Abbildung 5.5: Darstellung der Probe 3 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen.....	35
Abbildung 5.6: Darstellung der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen .....	36
Abbildung 5.7: Darstellung der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen.....	36
Abbildung 5.8: Darstellung der Probe 6 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen.....	37
Abbildung 5.9: Darstellung der Probe 1 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung .....	38
Abbildung 5.10: Darstellung der Probe 2 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung .....	39
Abbildung 5.11: Darstellung der Probe 3 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung .....	39

---

Abbildung 5.12: Darstellung der Probe 4 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung .....	40
Abbildung 5.13: Darstellung der Probe 5 im Lichtmikroskop, 1000 Zyklen, mit einer Tiefenmessung der Belastung .....	40
Abbildung 5.14: Darstellung der Probe 3 im REM mit 150-facher Vergrößerung .....	41
Abbildung 5.15: Darstellung der Probe 3 im REM mit 300-facher Vergrößerung .....	42
Abbildung 5.16: Darstellung der Probe 4 im REM mit 150-facher Vergrößerung .....	42
Abbildung 5.17: Darstellung der Probe 4 im REM mit 300-facher Vergrößerung .....	43
Abbildung 5.18: Darstellung der Probe 5 im REM mit 150-facher Vergrößerung .....	44
Abbildung 5.19: Darstellung der Probe im REM mit 300-facher Vergrößerung .....	44
Abbildung 5.20: Darstellung der Probe 6 im REM mit 150-facher Vergrößerung .....	45
Abbildung 5.21: Darstellung der Probe im REM mit 300-facher Vergrößerung .....	45
Abbildung 5.22: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei zehn Anzügen mit dem Drehmomentschlüssel, Probe 2 und Probe 6 .....	46
Abbildung 5.23: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken, fünf Anzüge Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6 .....	47
Abbildung 5.24: Detailansicht der Abplatzung von Probe 6 .....	48
Abbildung 5.25: Übersicht der Gewindegänge von Probe 6 bei 15 Anzügen mit einem Schlagschrauber .....	48
Abbildung 5.26: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 15 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6 .....	49
Abbildung 5.27: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 30 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6 .....	50
Abbildung 5.28: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 45 Anzüge mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6 .....	51
Abbildung 5.29: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken, 60 Anzüge Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6 .....	52
Abbildung 5.30: Detailansicht des Gewindespitzenabbruchs im ersten Gewindegang bei Probe 2 .....	53
Abbildung 5.31: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 90 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6 .....	53
Abbildung 5.32: Darstellung des Verschleißes an den Gewindeflanken bei 150 Anzügen mit einem Schlagschrauber, Probe 2 und Probe 6 .....	54
Abbildung 5.33: Darstellung des Gewindespitzenabbruches infolge der hohen Beanspruchung nach 150 Anzügen .....	55

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Definition der Beurteilung für die Nutzwertanalyse .....	3
Tabelle 3.1: Wärmebehandlungsparameter für Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo <sup>[8]</sup> .....	7
Tabelle 5.1: Impacttiefe der einzelnen Proben.....	41

## 11 Anhang

### 11.1 Vorversuch Variante 14: Auswertung



Abbildung 11.1: Darstellung der Probescheibe (plasmanitriert) mit den Positionen für die Mikrohärteprüfung

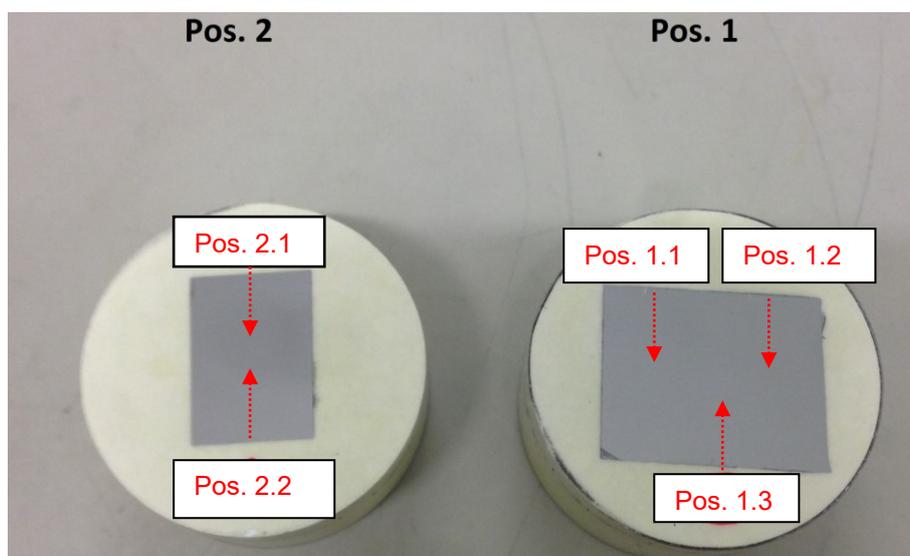


Abbildung 11.2: Darstellung der Probeansichten (eingebettet)

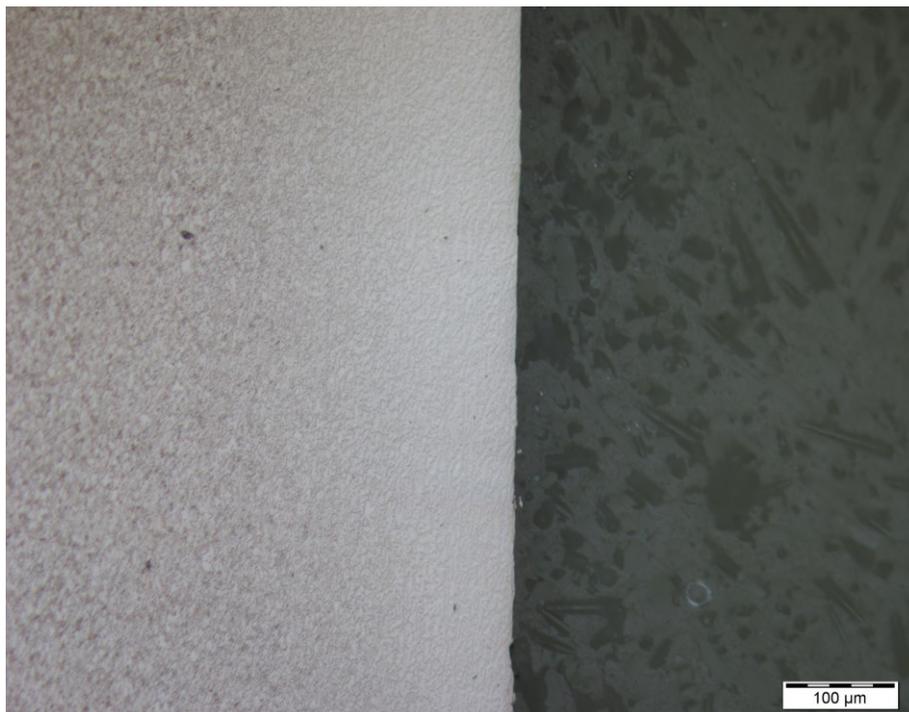


Abbildung 11.3: Darstellung Pos.1.1 mit 20-facher Vergrößerung im LIM1 von Variante 14



Abbildung 11.4: Darstellung Pos. 2.1 mit 50-facher Vergrößerung am LIM1 von Variante 14



Abbildung 11.5: Darstellung Pos. 2.2 mit 50-facher Vergrößerung am LIM1 von Variante 14

Tabelle 11.1: Mikrohärteprüfung aller 5 Positionen von Variante 14, HV 1

Länge [mm]	Pos. 1.1	Pos. 1.2	Pos. 1.3	Pos. 2.1	Pos. 2.2
<b>0,05</b>	357,3	335,7	337,8	364,8	343,9
<b>0,1</b>	359,8	367,3	344,5	362,5	332,3
<b>0,15</b>	343,0	347,2	352,4	351,8	348,7
<b>0,2</b>	350,6	348,1	348,8	344,6	351,0
<b>0,25</b>	344,9	341,9	362,3	348,6	350,6
<b>0,3</b>	352,2	348,6	351,5	343,6	352,3
<b>0,35</b>	347,9	346,1	355,9	351,9	353,4
<b>0,4</b>	352,2	349,6	348,6	348,7	350,5
<b>0,45</b>	349,5	342,1	357,6	346,6	354,8
<b>0,5</b>	347,7	349,8	354,1	345,9	350,6
<b>0,55</b>	347,5	345,6	349,2	348,2	354,6
<b>0,6</b>	347,0	353,5	363,1	343,1	349,8
<b>0,65</b>	345,6	344,6	350,2	344,0	351,1
<b>0,7</b>	350,8	350,7	360,5	344,5	347,4
<b>0,75</b>	356,4	344,8	351,7	352,8	352,4
<b>0,8</b>	354,1	361,4	354,2	343,4	348,6

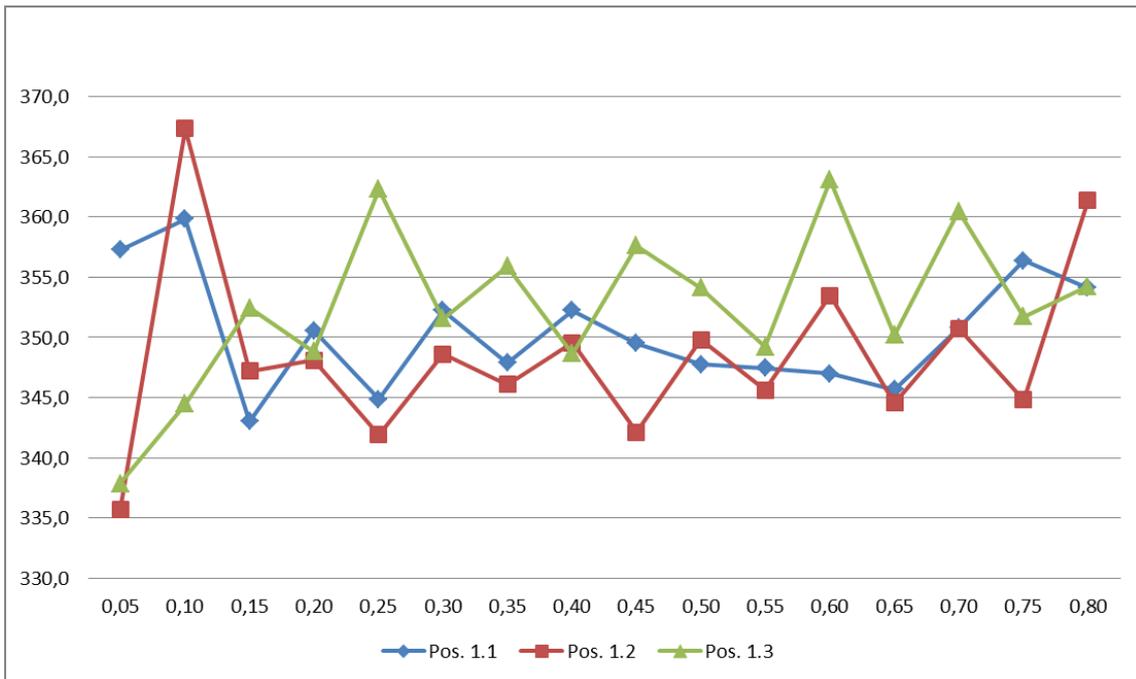


Abbildung 11.6: Darstellung des Härteverlaufes von Pos. 1.1–1.3

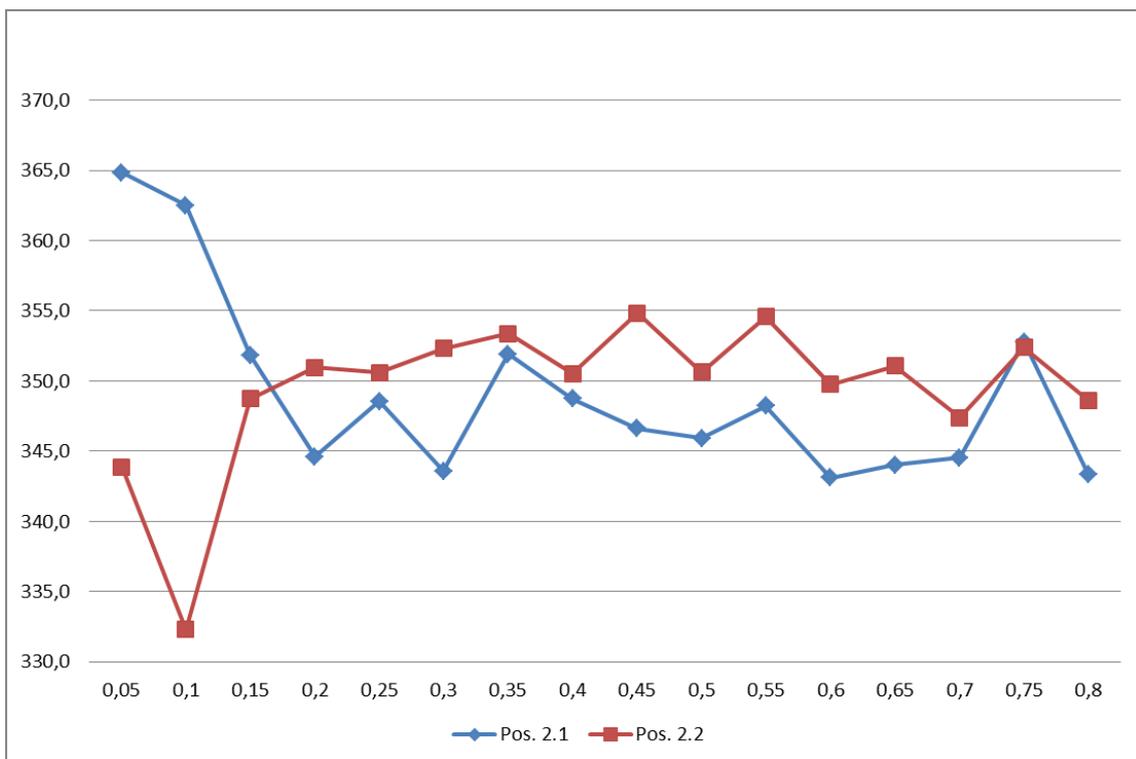


Abbildung 11.7: Darstellung des Härteverlaufes von Pos. 2.1 und 2.2

## 11.2 REM-Auswertung beim Impacttest

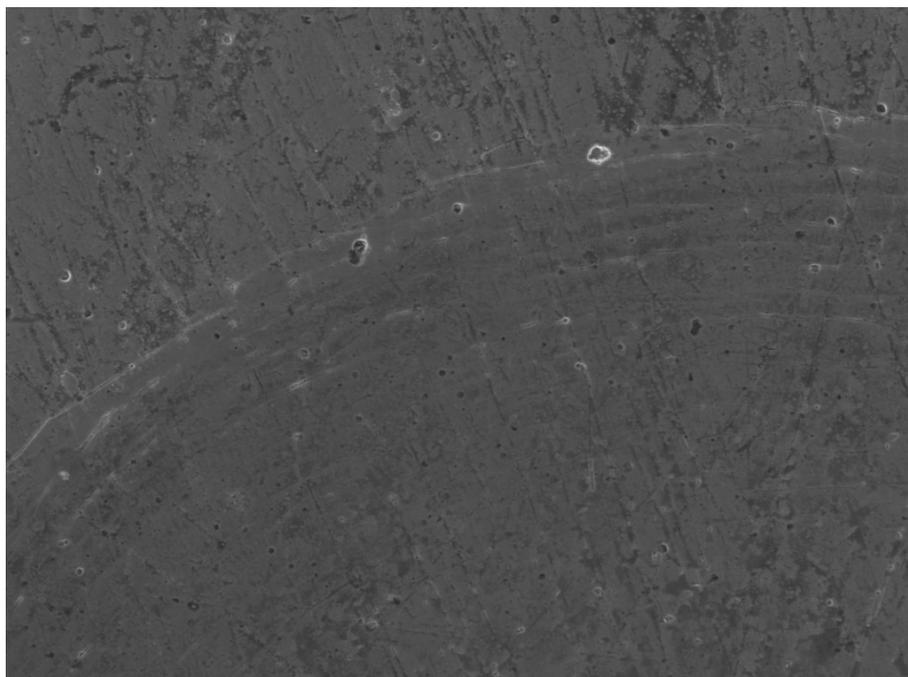


Abbildung 11.8: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

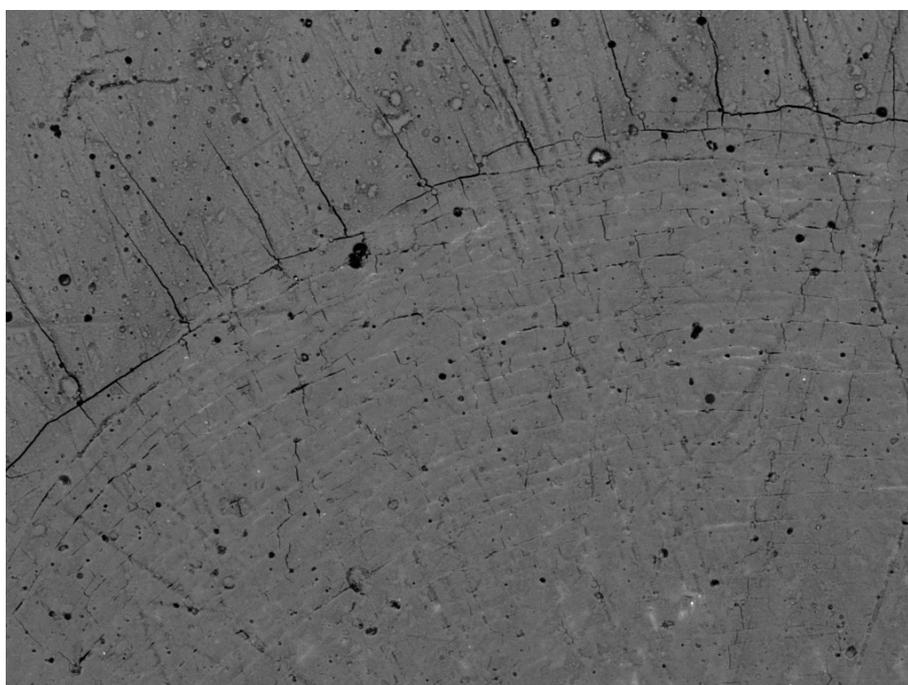


Abbildung 11.9: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

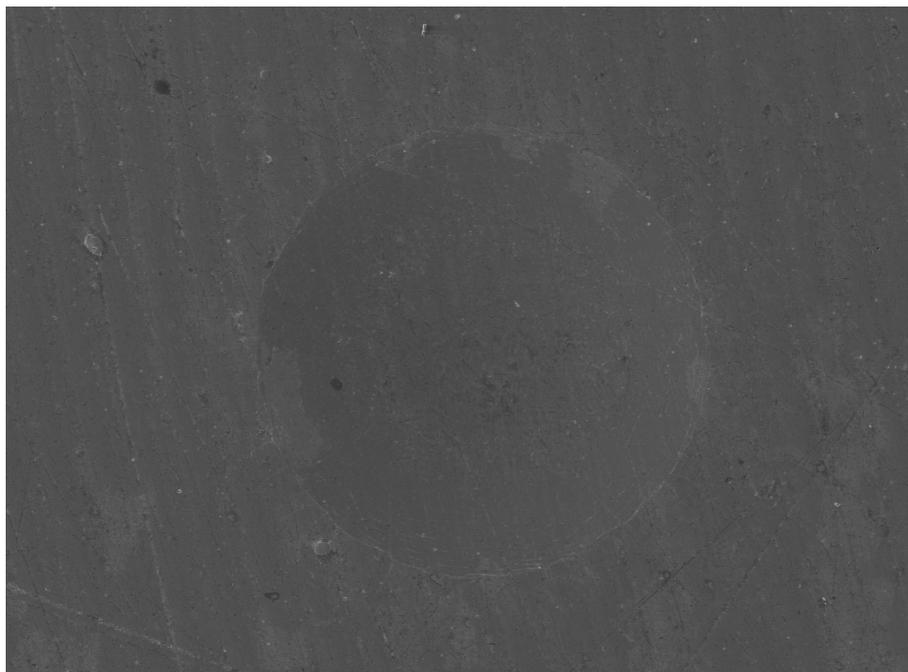


Abbildung 11.10: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

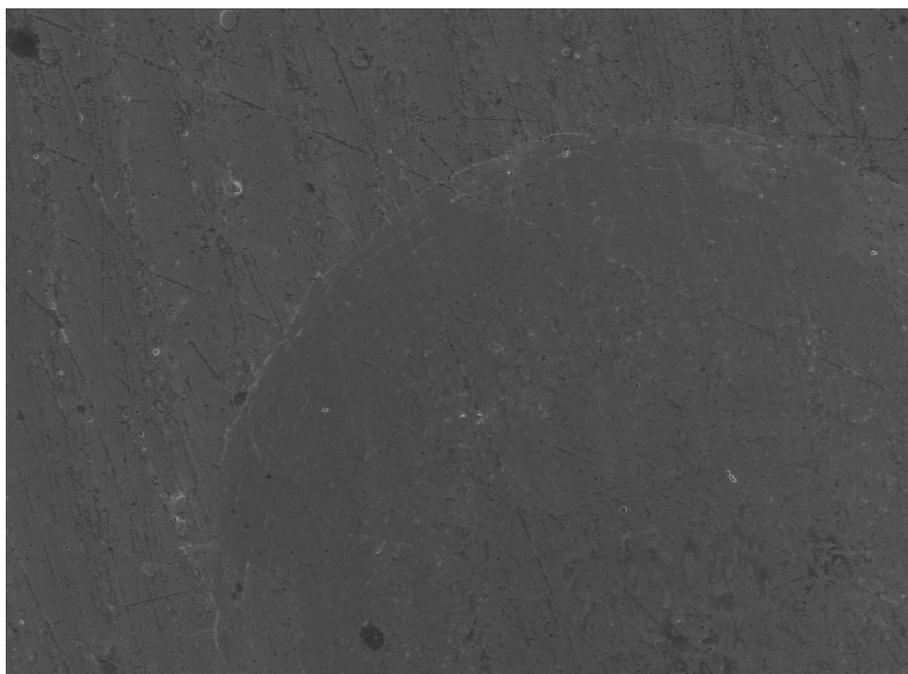


Abbildung 11.11: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

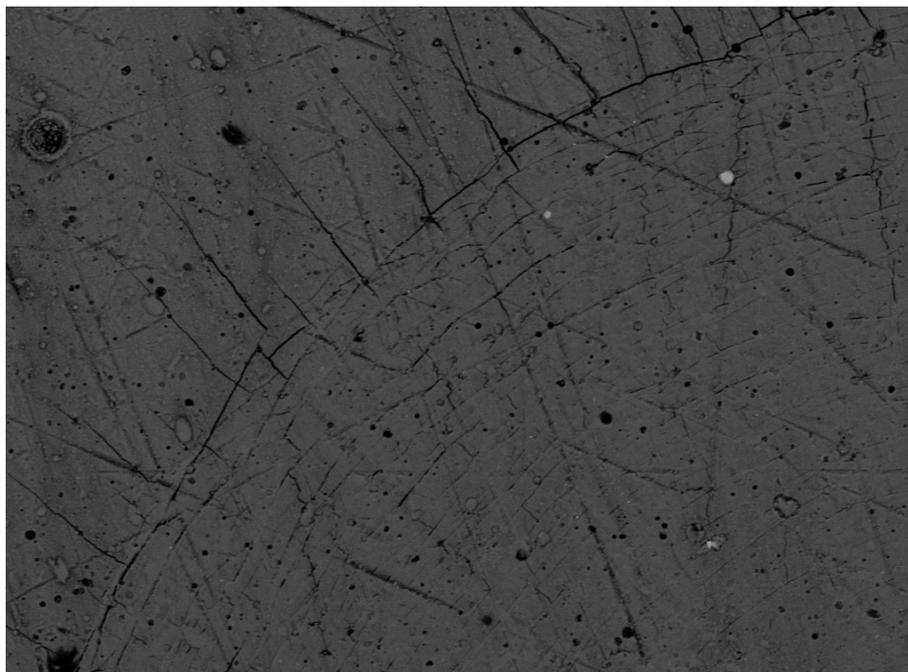


Abbildung 11.12: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

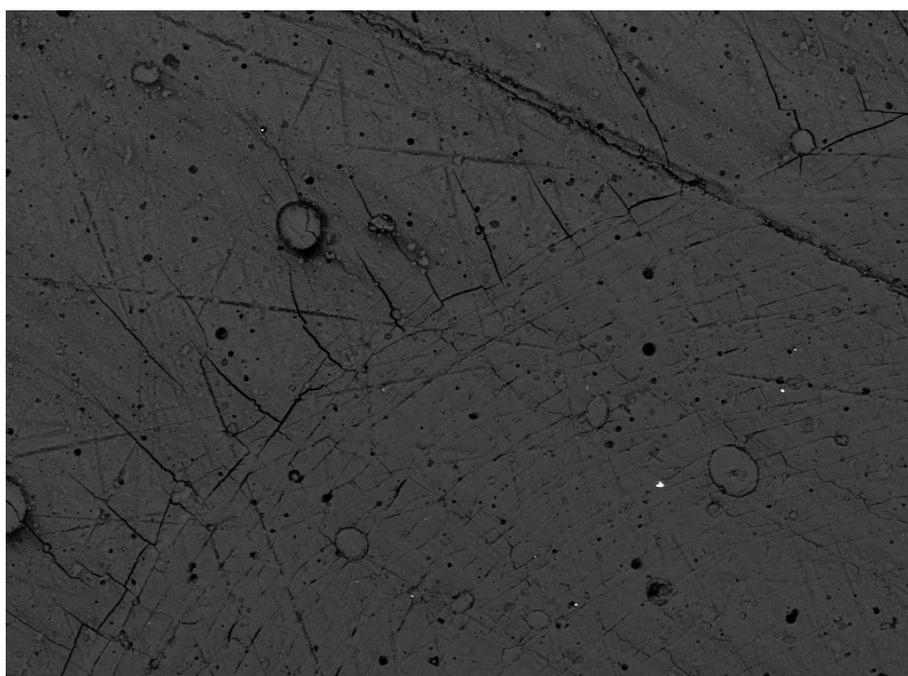


Abbildung 11.13: Darstellung des Eindrucks der Probe 3 im REM mit BSE-Detektor, 10000 Zyklen

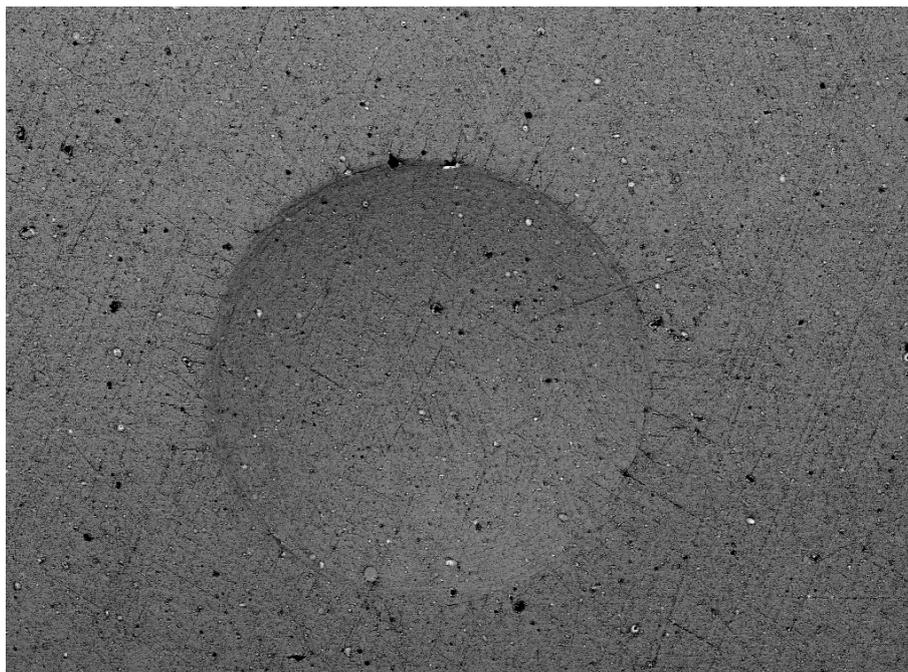


Abbildung 11.14: Darstellung des Eindrucks der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

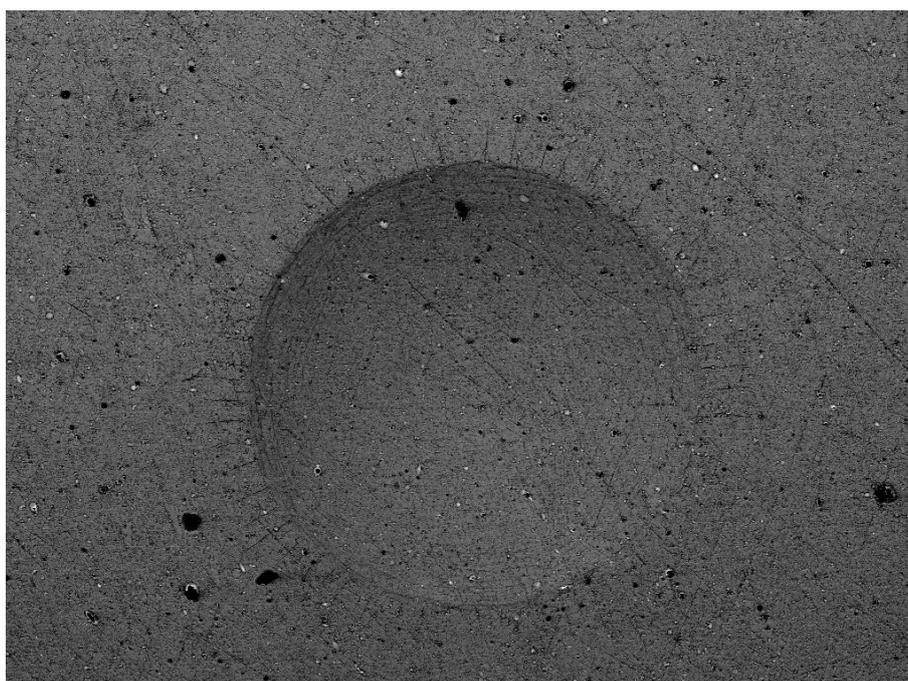


Abbildung 11.15: Darstellung des Eindrucks der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

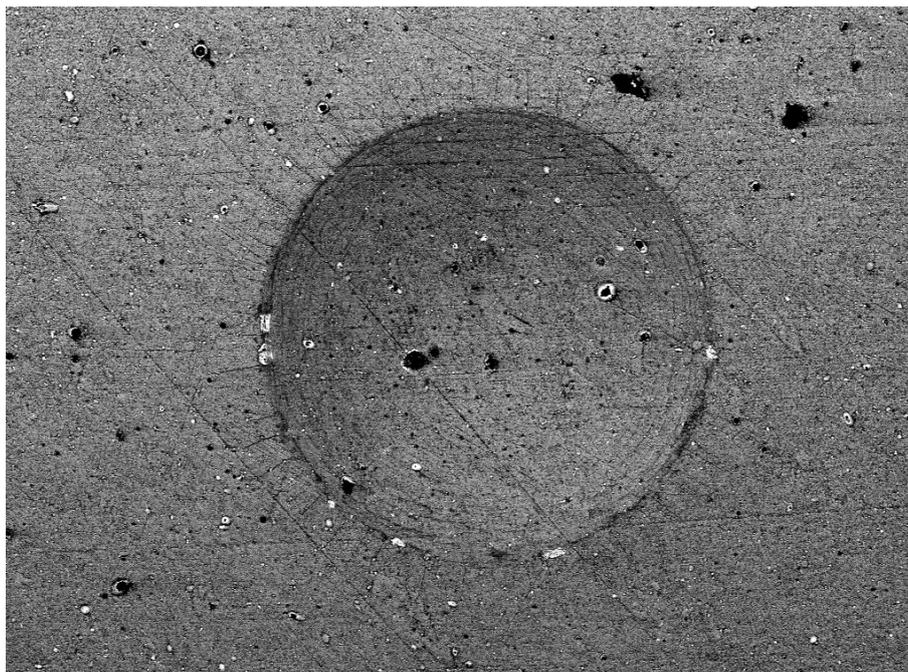


Abbildung 11.16: Darstellung des Eindrucks der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor, 10000 Zyklen

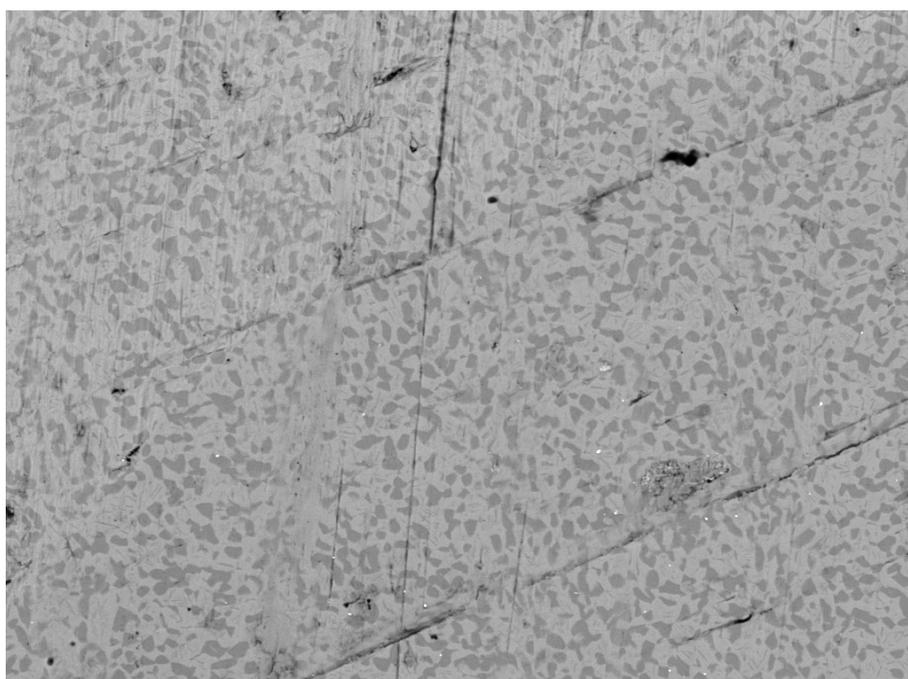


Abbildung 11.17: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

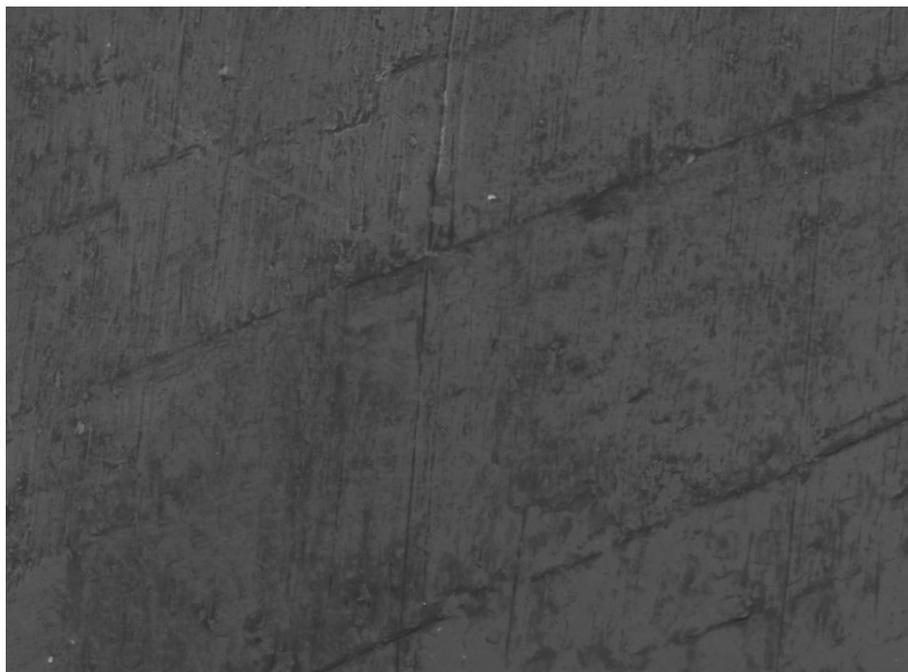


Abbildung 11.18: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen



Abbildung 11.19: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen



Abbildung 11.20: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 1000 Zyklen

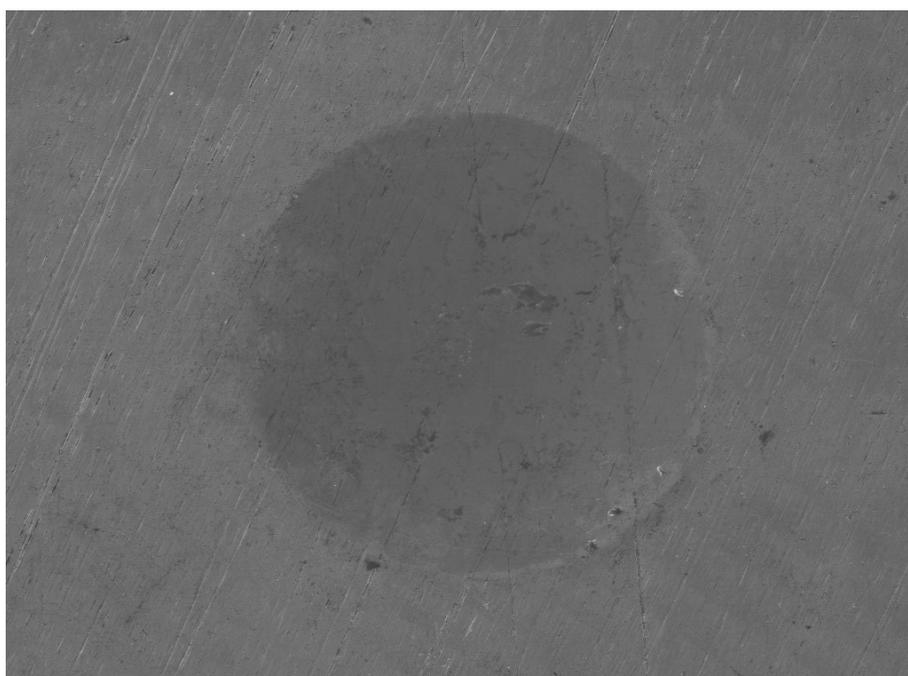


Abbildung 11.21: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 10000 Zyklen



Abbildung 11.22: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 10000 Zyklen

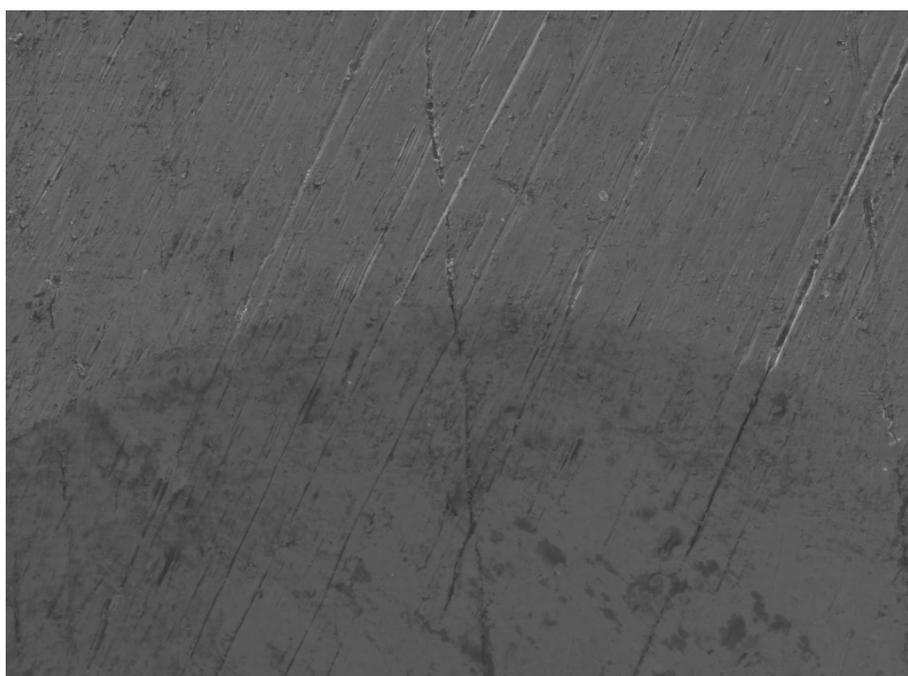


Abbildung 11.23: Darstellung des Eindrucks der Probe 5 im REM mit SE-Detektor, 10000 Zyklen

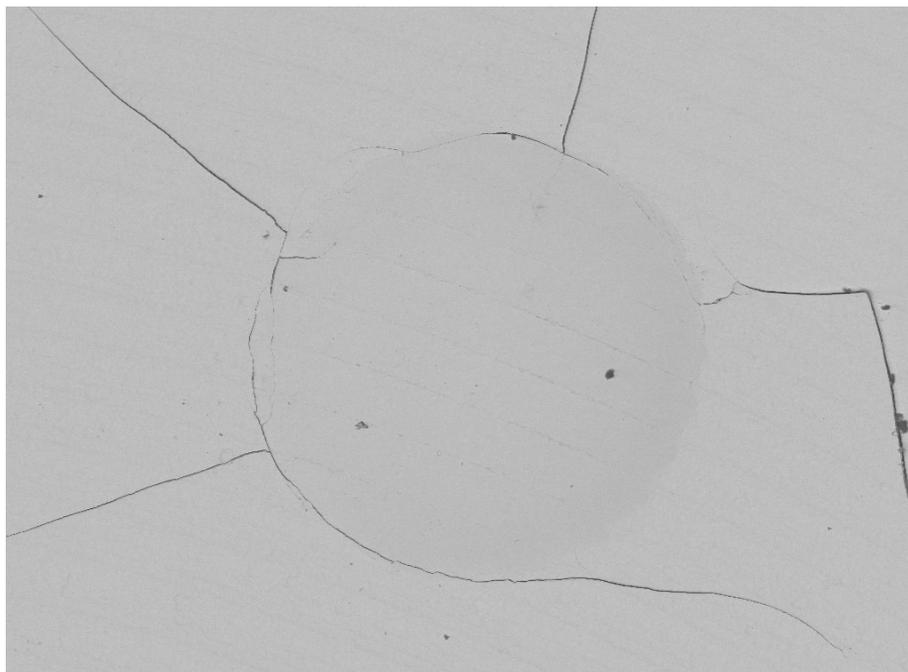


Abbildung 11.24: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

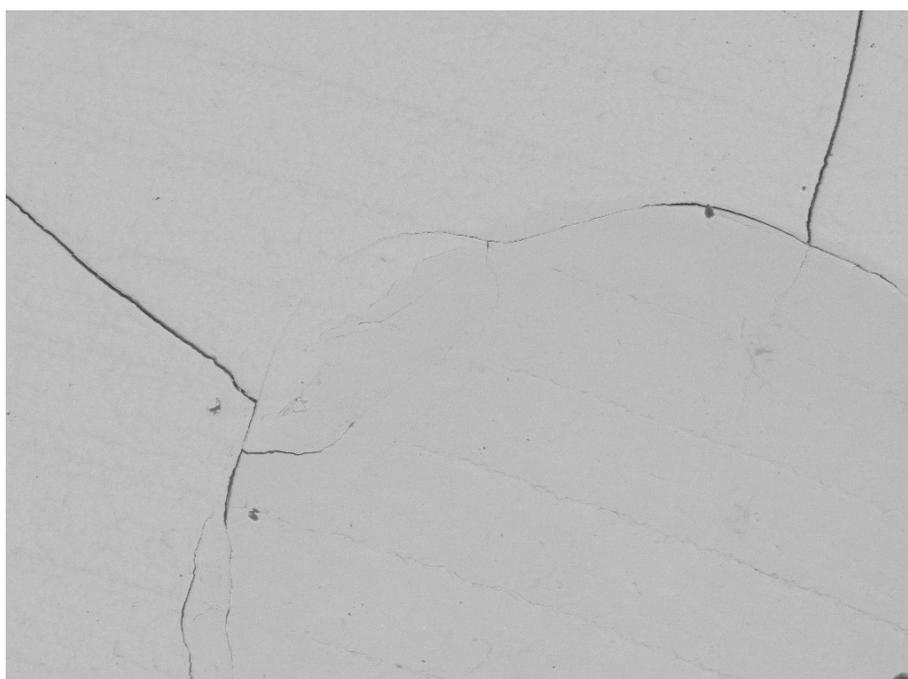


Abbildung 11.25: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit BSE-Detektor, 1000 Zyklen

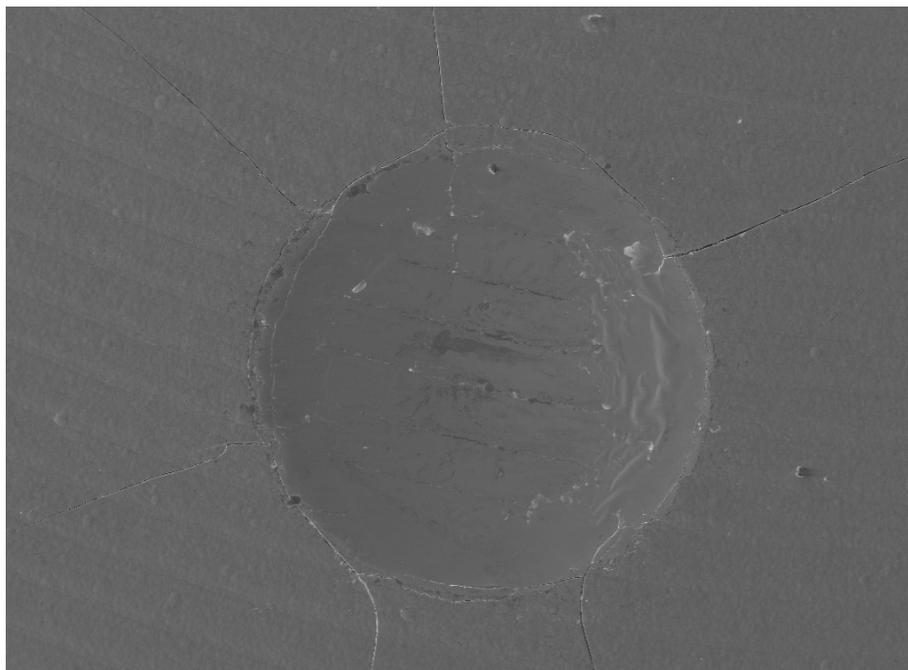


Abbildung 11.26: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit SE-Detektor, 10000 Zyklen

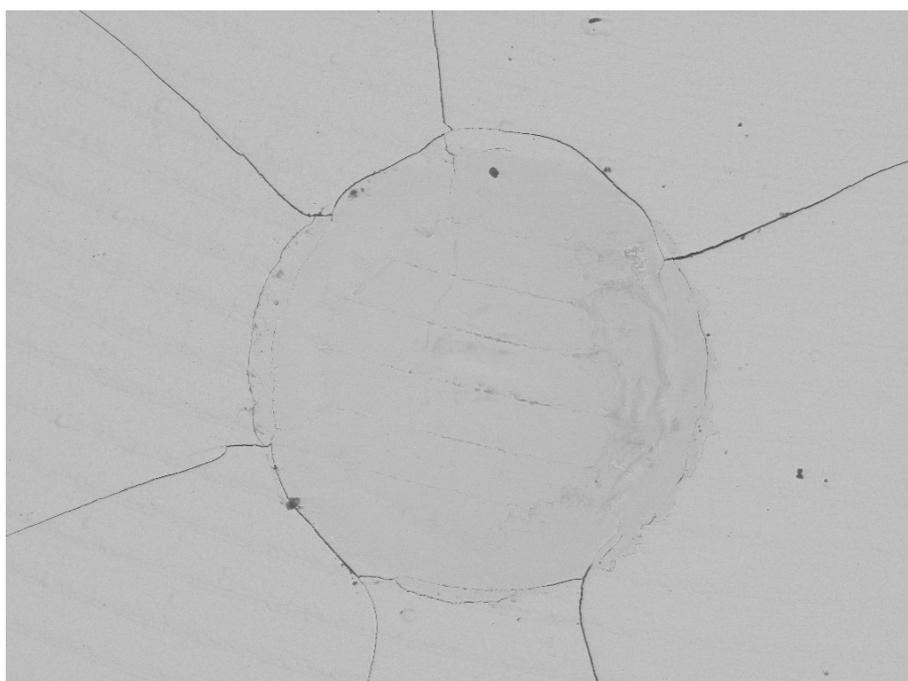


Abbildung 11.27: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit BSE-Detektor, 10000 Zyklen

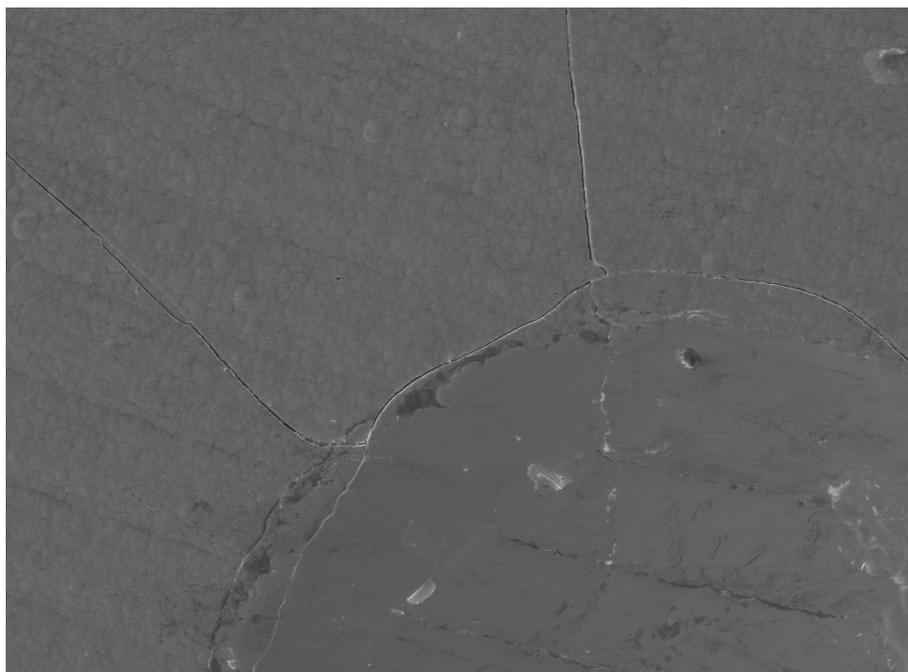


Abbildung 11.28: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit BSE-Detektor, 10000 Zyklen

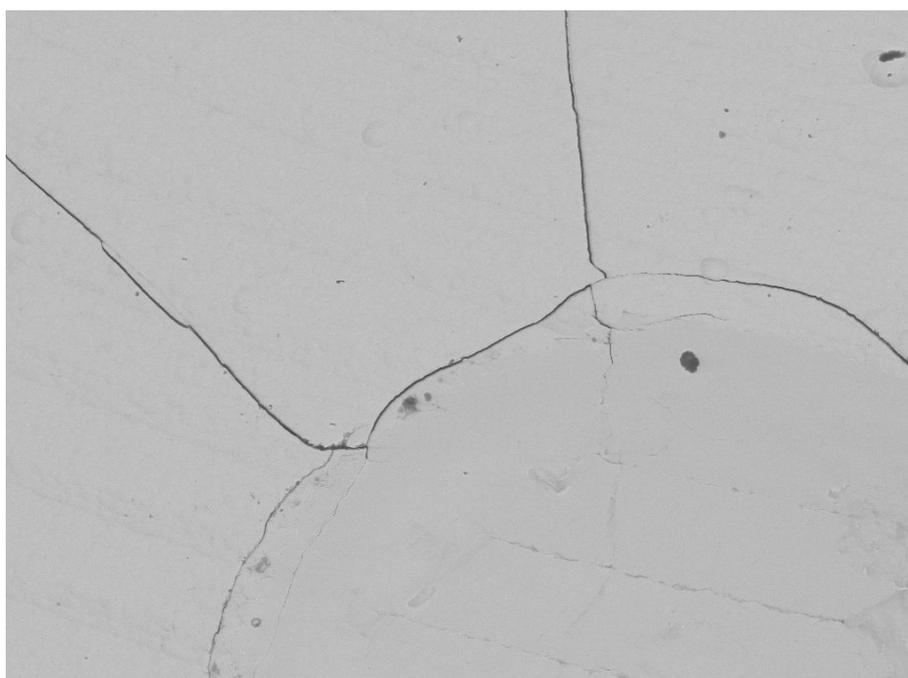


Abbildung 11.29: Darstellung des Eindrucks der Probe 6 im REM mit BSE-Detektor, 10000 Zyklen

### 11.3 REM-Auswertung beim Scratchtest

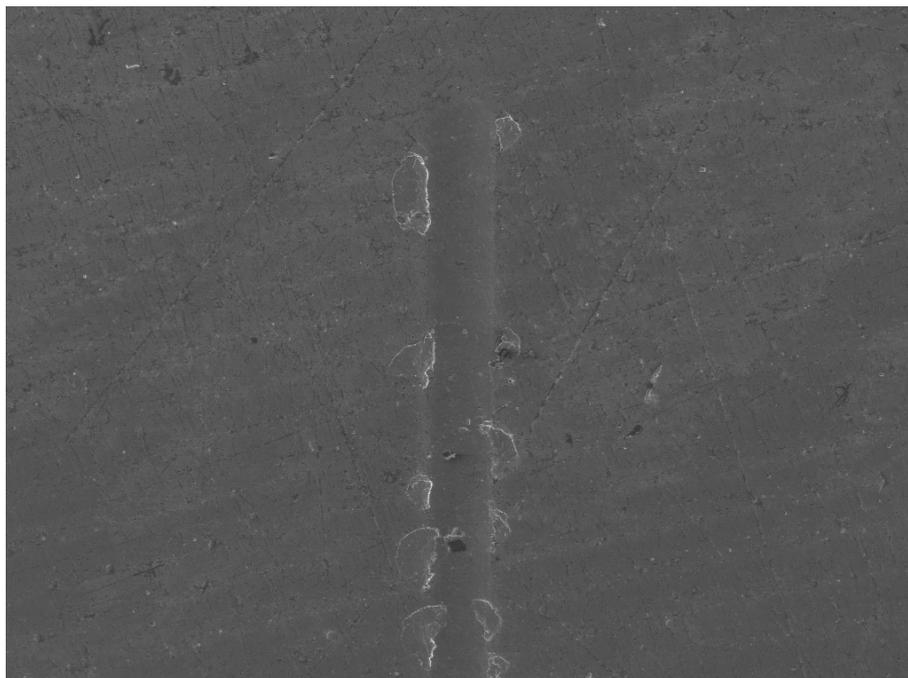


Abbildung 11.30: Darstellung des Defekts der Probe 3 im REM mit SE-Detektor

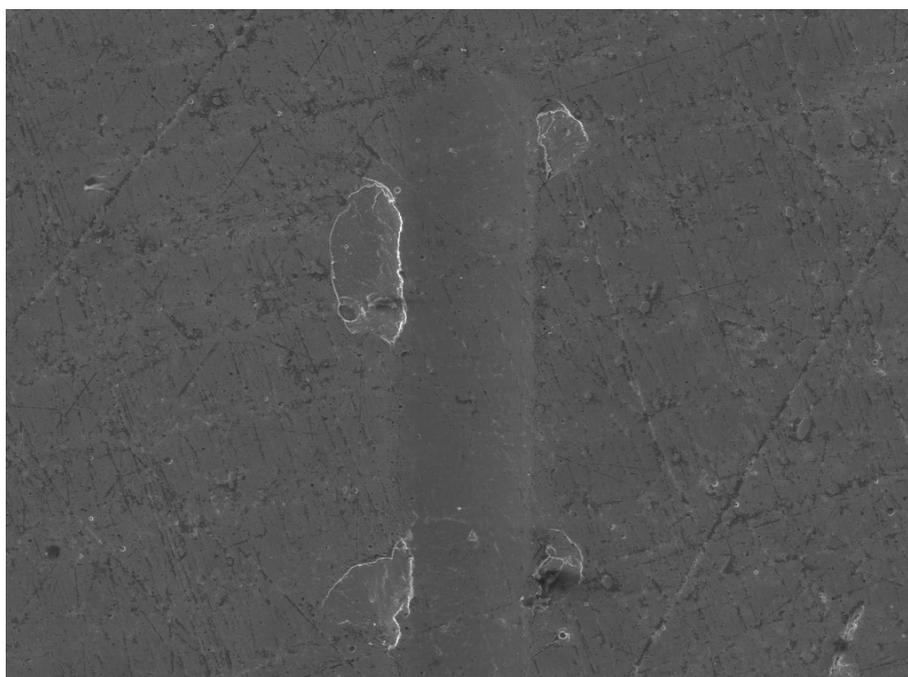


Abbildung 11.31: Darstellung des Defekts der Probe 3 im REM mit SE-Detektor

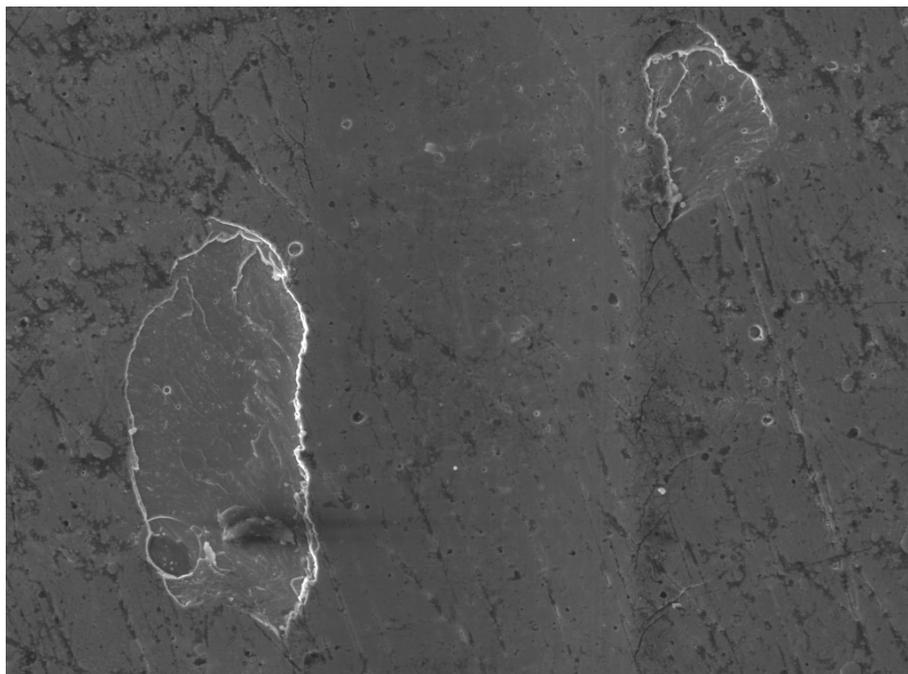


Abbildung 11.32: Darstellung Detailansicht des Defekts der Probe 3 im REM mit SE-Detektor

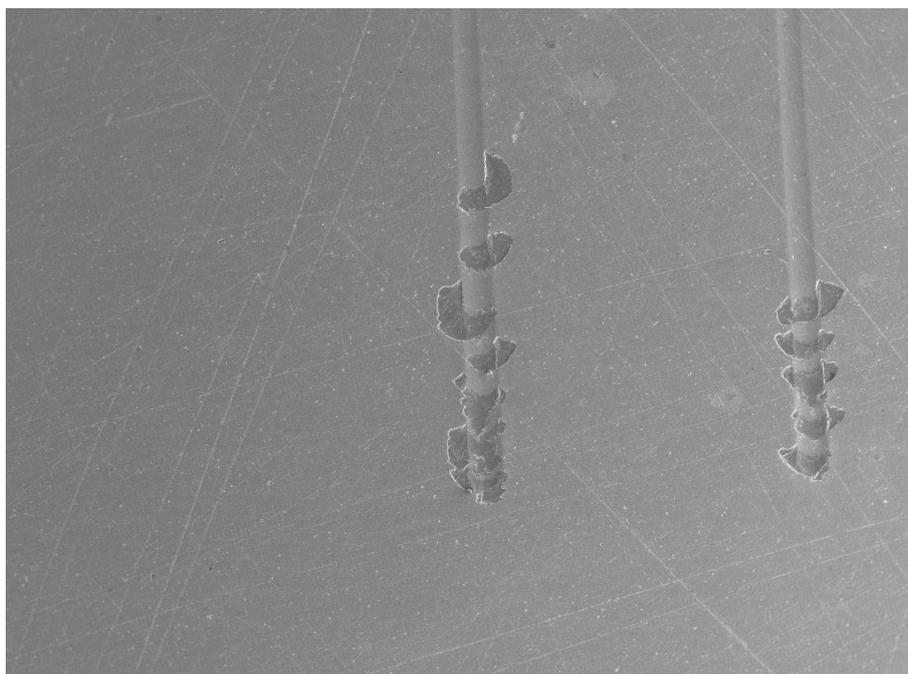


Abbildung 11.33: Darstellung des Defekts der Probe 4 im REM mit SE-Detektor

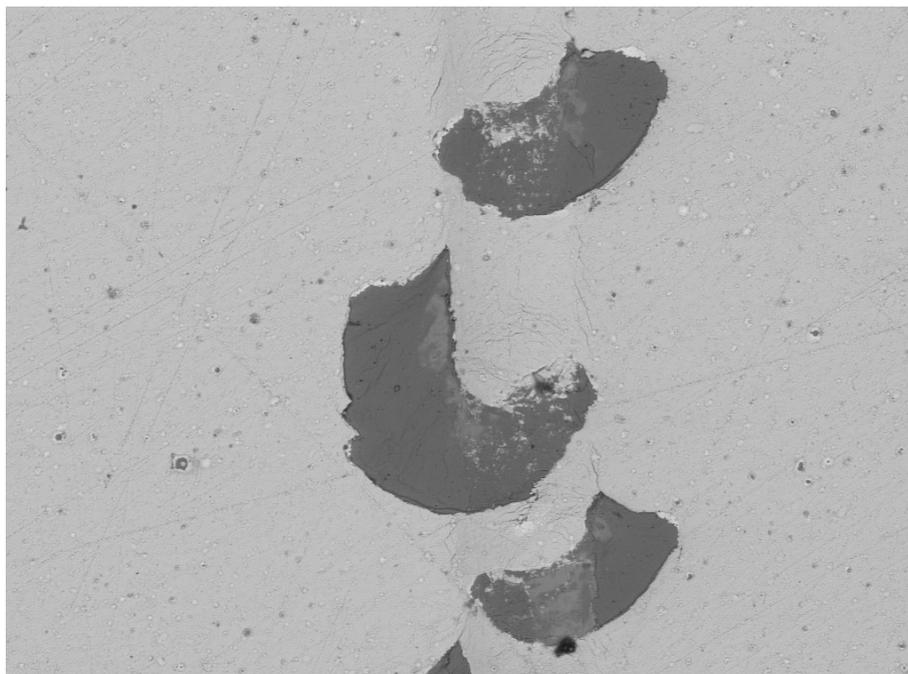


Abbildung 11.34: Darstellung des Defekts der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor

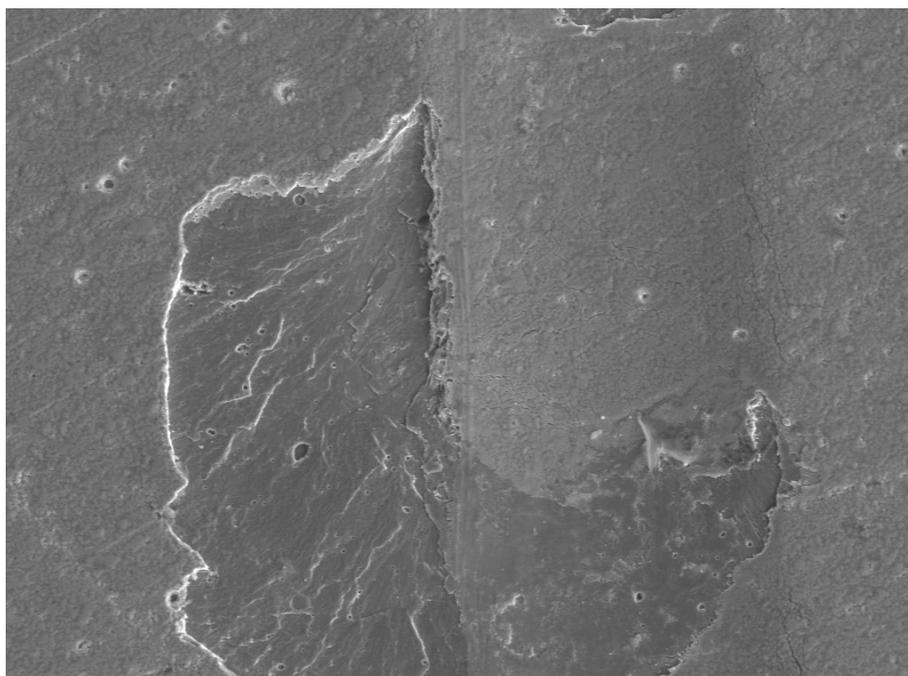


Abbildung 11.35: Darstellung Detailansicht des Defekts der Probe 4 im REM mit SE-Detektor

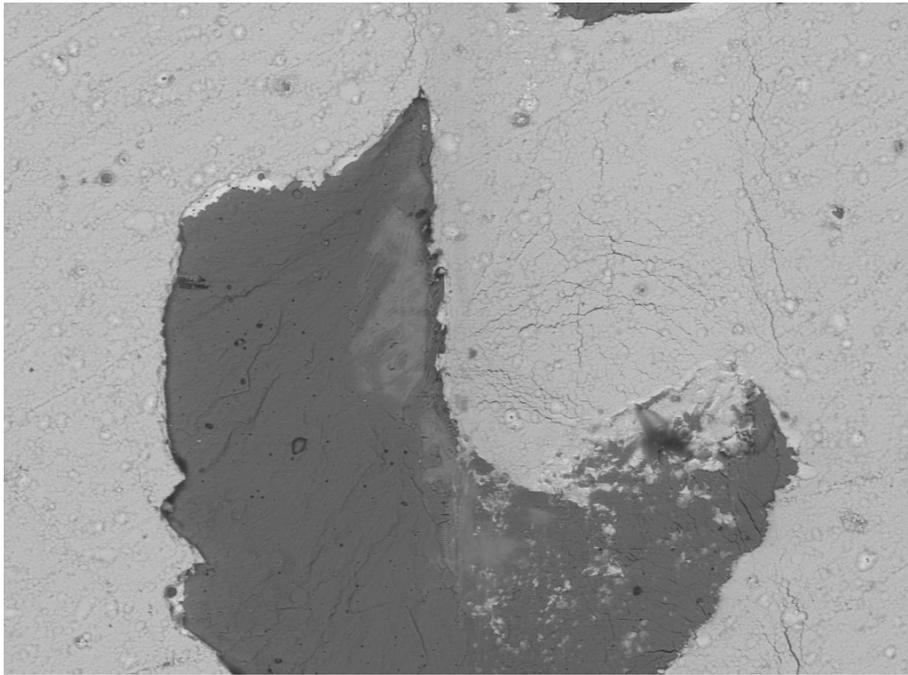


Abbildung 11.36: Darstellung des Defekts der Probe 4 im REM mit BSE-Detektor

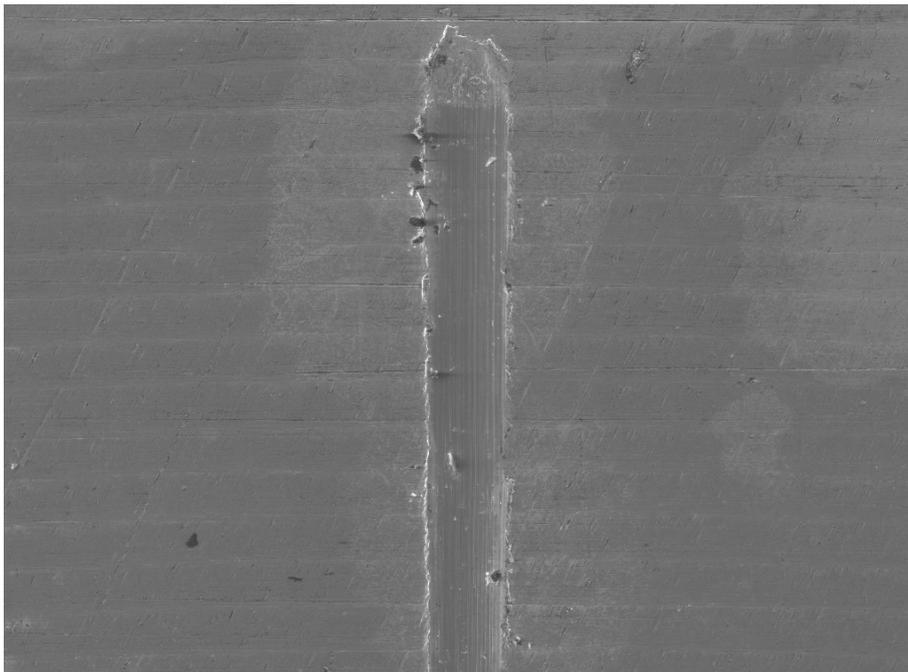


Abbildung 11.37: Darstellung des Defekts der Probe 5 im REM mit SE-Detektor

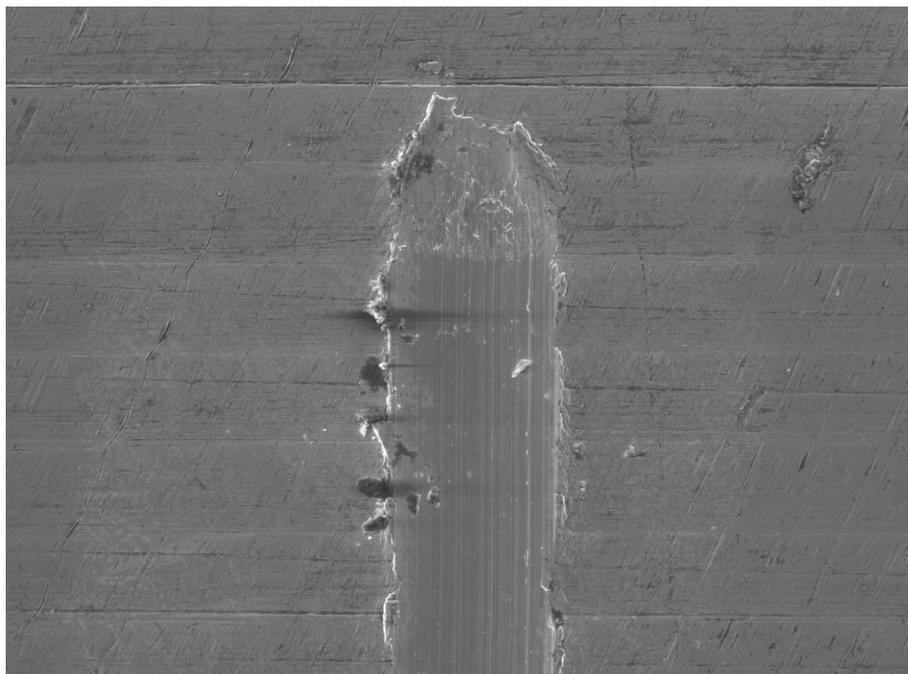


Abbildung 11.38: Darstellung des Defekts der Probe 5 im REM mit SE-Detektor

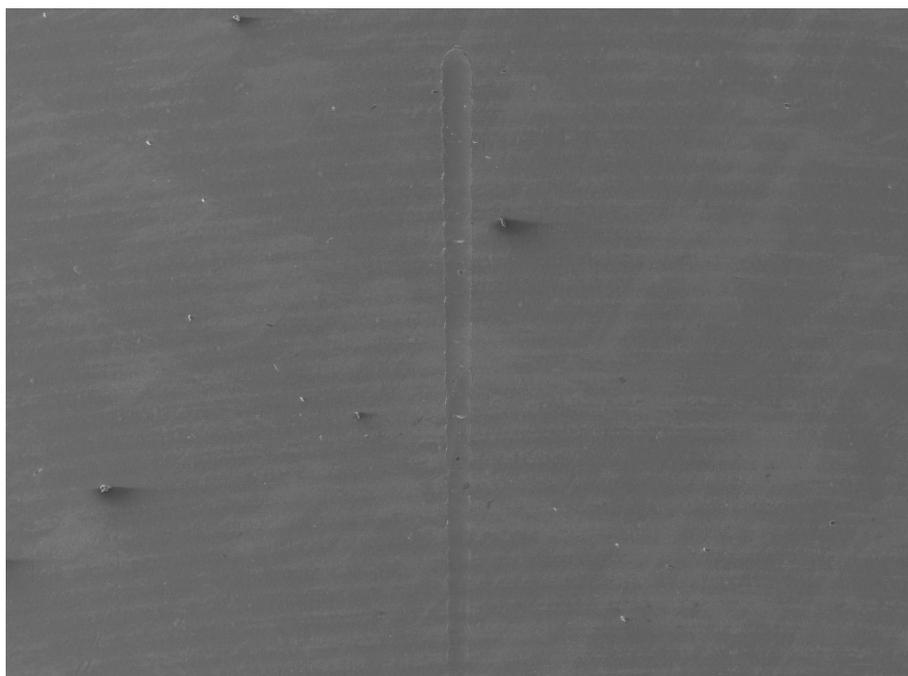


Abbildung 11.39: Darstellung des Defekts der Probe 6 im REM mit SE-Detektor