



Montanuniversität Leoben – University of Leoben

Department Metallurgie – Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie – Nonferrous Metallurgy



# Dissertation

Thema:

## Zerspanen und Eloxieren von Recyclingaluminium



Ersteller:

Dipl.-Ing. Carina Maria Schlögl

Betreuer:

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

Leoben, Oktober 2015

# 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.

## Affidavit

I declare in lieu oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself using only literature cited in this volume.

22.10. 2015

---

Datum

---

Carina Maria Schlögl

# Danksagung

Allen voran gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Helmut Antrekowitsch für die Möglichkeit der Verfassung einer Dissertation am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie sowie eine Vielzahl an Projekten, Diskussionen und Gesprächen, die sowohl meine Sichtweise auf viele Bereiche der Metallurgie als auch mein Herangehen an Herausforderungen dauerhaft geprägt haben.

Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern im Technikums- und Laborbereich für die umfangreiche Hilfestellung bei dem Aufbau der Laboreloxieranlage, der Herstellung von unterschiedlichsten Legierungen und natürlich den Zerspanungsarbeiten.

Außerdem gilt mein Dank meinen studentischen Mitarbeitern, allen voran Frau Susanna Renhart und Herrn Franz Waldsam, die mich fast während meiner gesamten Dissertationszeit unterstützt haben und mit denen ich stetes hochinteressante und zielführende Fachgespräche führen konnte.

Auch möchte ich mich bei Frau Claudia Hackl und Frau Verena Zirngast bedanken. Ohne ihre administrative Hilfestellung in Bereichen des Projektmanagement hätte sich vieles nicht bewerkstelligen lassen.

Ohne Frage möchte ich auch allen anderen Mitarbeitern am Lehrstuhl aufs Herzlichste für ihre Unterstützung und das warme und lebendige Umfeld während meiner Jahre auf der Nichteisenmetallurgie danken.

Meine entschiedensten Dankesworte möchte ich sowohl an meine Familie als auch meinen Freund Philipp senden. Ihre Unterstützung, ihre Liebe und ihr in mich gesetztes Vertrauen ist das Fundament meines Erfolges und erfüllt mich Tag für Tag mit Stolz.

Leoben, Oktober 2015

Carina Maria Schlögl

# Kurzfassung

Das Recycling von Aluminiumschrotten ist sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll. Neben dem hohen Energieeinsparungspotenzial gegenüber der Primärproduktion (ca. 95 %) und einer Verminderung von Deponieabfällen, generiert die Wiederverwertung von Aluminiumprodukten einen nachhaltig wirkenden, im steten Wachstum begriffenen Industriezweig, der auch an Standorten mit hohen Energie- und Personalkosten gewinnbringend agiert. Prinzipiell ist das Metall Aluminium bei sortenreiner Erfassung ohne Einbußen in der Qualität rezyklierbar. Diese Aussage ist allerdings nur bedingt gültig und bezieht sich ausschließlich auf wenig kontaminierte, sortenreine Schrotte. Bei den breiten Spektren der Aluminiumlegierungssysteme und der hohen Anzahl von unterschiedlichsten Einsatzgebieten, können in Sekundärlegierungen eine Vielzahl von Legierungs- und Verunreinigungselementen auftreten und interagieren. Diese sind nach dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit oft nicht vollständig aus der Schmelze entfernbar und beeinflussen das Zerspanungs- und/oder Eloxierverhalten der Sekundärwerkstoffe maßgeblich. Zielsetzung dieser Arbeit ist, das grundlegende Wissen über Einflussnahme und gegebenenfalls vorherrschenden Wechselwirkungen von Legierungs- und Verunreinigungselementen in Aluminiumlegierungen zu erweitern. Zur Untersuchung herangezogen werden dabei aus unterschiedlichsten Recyclingprozessen stammende Knetlegierungen, deren Elementgehalte innerhalb der gültigen Normen variieren. Aufbauend auf statistisch erstellten Versuchsplänen, erfolgen Parameterstudien zur Optimierung der unterschiedlichen Zerspanungsprozesse (z. B. Bohren, Drehen, Fräsen). Die Prozessparameterführung (Zerspanungsgeschwindigkeit, Werkstückgeometrie, Kühl- und Schmiermitteleinsatz, Temperatur, Art des Zerspanungswerkzeuges, etc.) ergibt sich dabei aus der Zielsetzung, im ökonomischen Rahmen hochqualitative Werkstückoberflächen zu produzieren. Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit den Eloxieereigenschaften der zuvor zerspannten Werkstücke. Für ein hochqualitatives Oberflächenfinish ist sowohl die Ausgangsoberfläche als auch die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes von Bedeutung. Hinzu kommen noch die Einflussfaktoren der Prozessführung (Säurezusammensetzung, Stromverlauf, Betriebstemperatur, etc.) und der innerbetrieblichen Logistik (Zwischenlagerung, Aufhängungen, etc.). Zur Abbildung des industriellen Eloxierprozesses erfolgte am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie die Inbetriebnahme einer Versuchsanlage mit fünfzehn Behandlungsbecken und einem Gesamtfassungsvermögen an unterschiedlichen Elektrolyten von ca. 1.000 Litern.

# Abstract

The recycling of aluminum scrap makes sense from both an ecological and an economical point of view. In addition to its enormous potential for energy conservation in comparison with primary production (95 %) and the decrease in landfill waste, the recycling of aluminum offers a sustainable and steadily growing industrial branch. Aluminum recyclers can therefore operate successfully in countries where there are high energy and labor costs. In principle, aluminum can be recycled without quality losses, if the scrap is sorted and has a high quality. Depending on the wide range of aluminum alloying systems and the substantial number of different fields of usage, secondary alloys can contain a high number of alloying elements and impurities. From an economic standpoint, it is impossible to remove these elements completely. These elements could, however, influence the cutting and anodizing abilities of the material. Therefore the aim of this work is to extend the basic knowledge about these influences and the occurrence of interactions between alloying elements and impurities. For that reason, alloys produced from different recycling processes with different amounts of elements based on given standard limits, were analyzed. By using the software Modde for experimental design, the best processing parameters from different cutting procedures (e. g. cutting speed, usage of lubricants, etc.) are investigated. The experimental set-up was chosen to generate high surface qualities at low process costs. In the second part of the thesis, the anodizing behavior of different alloys is analyzed. For a high quality surface finish, the base surface and chemical composition of a work piece is essential. Additionally, influencing factors from the anodizing process (concentration of electrolytes, current density, temperature, etc.) and logistics (storage, mounting, etc.) are given. In order to represent industrial processes, a pilot anodizing plant with 15 tanks and a final volume capacity of nearly 1000 liters was put into operation.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>RECYCLING VON ALUMINIUM</b> .....	<b>3</b>
2.1	Sekundäraluminiumproduktion.....	3
2.2	Recyclingquoten und Nachhaltigkeit.....	5
2.3	Schrottarten.....	6
2.4	Typische Verunreinigungen in Sekundärlegierungen.....	7
<b>3</b>	<b>ZERSPANUNG</b> .....	<b>10</b>
3.1	Wichtige Begriffe aus der Zerspanungstechnik.....	10
3.2	Spanbildung.....	11
3.3	Aufbauschneiden.....	13
3.4	Scheinspanbildung.....	15
3.5	Beurteilung der Zerspanbarkeit.....	15
3.6	Zerspanungsverfahren.....	20
3.7	Schneidwerkstoff.....	21
3.8	Schmier- und Kühlstoffe.....	24
<b>4</b>	<b>ELOXIEREN</b> .....	<b>25</b>
4.1	Grundprinzip der Anodisation.....	26
4.2	Einflussfaktoren.....	28
4.2.1	Prozessparameter.....	28
4.2.2	Die chemische Vorbehandlung.....	32
4.2.3	Einfluss von Legierungs- und Verunreinigungselementen.....	34
4.2.3.1	Anreicherungsschichten.....	34
4.2.3.2	Sekundärphasen.....	36
4.2.3.3	Auswirkungen weiterer häufiger Legierungselemente.....	40
4.2.4	Eigenspannungen in der Oxidschicht.....	41
4.3	Der Eloxierprozess.....	41
<b>5</b>	<b>AUFBAU EINER LABORVERSUCHSANLAGE</b> .....	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>ZERSPANUNGSVERSUCHE</b> .....	<b>49</b>
6.1	Fräsen.....	49

6.2	Bohren.....	57
6.3	Drehen.....	59
<b>7</b>	<b>ELOXIERVERSUCHE.....</b>	<b>61</b>
7.1	Analyse unterschiedliche Vorbehandlungen .....	62
7.2	Eloxieren von Recyclinglegierungen .....	64
7.3	Eloxieren von 1050-Legierungen .....	74
7.4	Eloxieren der Legierungsklasse 2000 .....	79
7.5	Eloxieren von Legierungen der Serie 5000 .....	87
7.6	Eloxieren von Legierungen der Serie 6000 .....	91
<b>8</b>	<b>AUSWERTUNG UND DISKUSSION .....</b>	<b>94</b>
<b>9</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>120</b>
<b>10</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>123</b>
<b>11</b>	<b>AUSBLICK.....</b>	<b>125</b>
<b>12</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>126</b>
<b>13</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>135</b>
<b>14</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>140</b>
<b>15</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>I</b>
<b>16</b>	<b>BETRIEBSANLEITUNG .....</b>	<b>LV</b>

# 1 Einleitung

Die Argumente für eine Rückgewinnung von Aluminium aus gebrauchten Produkten, Reststoffen und Rückständen sind vielfältig. Neben der augenscheinlichen Schonung von Ressourcen und Verminderung von Deponieabfällen, bietet die Sekundäraluminiumherstellung enorme ökologische sowie ökonomische Vorteile. Die derzeit gängigen Verfahren zur primären Aluminiumgewinnung aus Bauxit benötigen große Mengen an Energie und produzieren umweltschädliche Nebenprodukte (z. B. Rotschlamm). Zudem ist die Primär- gewinnung von Aluminium aktuell für rund 1 % [1] der weltweit produzierten Treibhausgase verantwortlich. Dem gegenüber steht die Sekundärmetallerzeugung mit einem Energieein- sparungspotenzial von 95 % [1,2]. Hinzu kommen ein verminderter Verbrauch von Wasser, weniger Emissionen und eine Abnahme von Rest- und Abfallstoffen. Der Vergleich des CO<sub>2</sub>- Fußabdruckes zeigt bei der Primärproduktion, abhängig vom jeweiligen Aufbereitungs- verfahren und den eingesetzten Erzen, rund 5,9-22,5 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro kg Al [1]. Demgegenüber steht die Sekundärproduktion mit einem zwischen 18,1 und 8,4 kg liegenden CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro t Al [1]. Nicht zuletzt hat die Sekundärproduktionsschiene auch eine politische Relevanz, da ihre Hütten in Ländern mit hohem Lohnniveau und teurem Strom, beispielsweise Österreich und Deutschland, gewinnbringend betrieben werden können und somit eine gewisse Unabhängigkeit vom internationalen Rohstoffhandel bieten. [1-4]

Sekundär gewonnenes Aluminium weist neben den Hauptlegierungselementen Kupfer, Mangan, Zink und Magnesium auch Elemente auf, die spezifisch für Recyclingprodukte sind. Dazu zählen unter anderem Eisen, Silizium, Zinn, Bismut, Blei, Natrium, Kalzium und Phosphor. Kommen Speziallegierungsschrotte zum Einsatz, können auch Lithium, Scandium, Tantal etc. im Rezyklat enthalten sein [5]. Selbst in den engen Legierungs- toleranzen der Knetwerkstoffe kann es zu deutlichen Streuungen oder signifikanten Wechselwirkungen dieser Stoffe kommen. Solche Konzentrationsmodifikationen beeinflus- sen Korrosionsbeständigkeit, Schichthomogenität sowie Farbe und Gleichmäßigkeit der Eloxierschichten [6-8]. Durch Wechselwirkungen kann es zudem zur Ausbildung von niedrigschmelzenden Eutektika oder intermetallischen Phasen kommen, die wiederum die Zerspanungs- und Eloxierereigenschaften des Werkstoffs modifizieren [9,10]. Die Vielzahl der Konzentrationsvariationen, die Tatsache dass sich manche Elemente positiv auf die Zerspanungseigenschaften und negativ auf die Eloxierbarkeit auswirken, die starke Einflussnahme der Bearbeitungsparameter sowie die Forderung nach reproduzierbaren, hochqualitativen Endprodukten verlangen nach einer systematischen Darstellung der Zusammenhänge. Ziel dieser Arbeit ist es, dass gegebene Grundlagenwissen über die Auswirkungen der Legierungs- und Verunreinigungselemente in sekundär gewonnen Aluminiumknetlegierungen auf deren Zerspanungs- und Eloxierverhalten zu charakterisieren.



Zudem sollen weitere Zusammenhänge zwischen den drei Prozessschritten Recycling, Zerspanen und Eloxieren (siehe Abbildung 1-1) untersucht werden. Im ersten, theoretischen Teil wird dabei der Recyclingzyklus des Aluminiums beschrieben, spezifische Elemente benannt und deren bekannten Eigenschaften dargestellt. Im zweiten Abschnitt erfolgt die praktische Bewertung der Zerspanungseigenschaften von gängigen Aluminiumknetlegierungen. Dabei liegen die Betrachtungsschwerpunkte einerseits auf elementspezifischen Variationen der Oberflächengüte und andererseits auf der Optimierung von Zerspanungsparametern in Bezugnahme auf die speziellen Anforderungen der Sekundärlegierungen. Im dritten Abschnitt schließt die Betrachtung der Elementeinflüsse mit ihrer Umlegung auf das Eloxierverhalten von Sekundäraluminiumknetlegierungen.

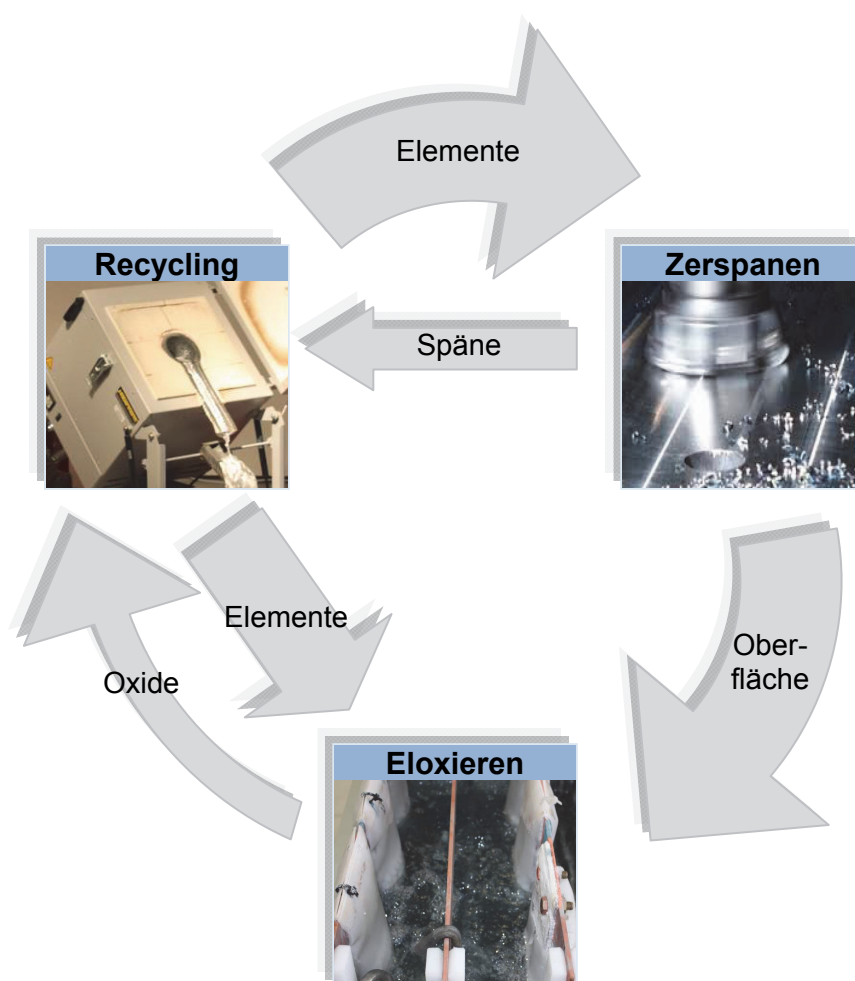


Abbildung 1-1: Prinzipielle Darstellung der Zusammenhänge zwischen den drei in dieser Dissertation betrachteten Prozessschritten Recycling, Zerspanung und Eloxierung

## 2 Recycling von Aluminium

Das Metallrecycling rückt durch gesetzliche Rahmenbedingungen und hohe Kosteneinsparungspotenziale immer mehr in den Fokus der produzierenden Industriezweige. Beispielsweise hat die *Directive on End-of Life Vehicle 2000/53/EC* [11] eine detaillierte Gesetzesvorlage zu Recyclingquoten und Sammlungssystemen geliefert. In Verbindung mit dem steten Anstieg des Aluminiumverbrauchs im gesetzlich stark reglementierten Automobilsektor, steigt auch die Nachfrage bezüglich unterschiedlichster Aluminiumschrotte kontinuierlich. Im Jahr 2014 konnten aufgrund der hohen Schrottnachfrage sogar zeitweise Versorgungsengpässe und ein dementsprechend hohes Preisniveau verzeichnet werden. Eine Deckung des Aluminiumbedarfs über das Recycling alleine ist ohnehin nicht möglich. So wurden beispielsweise im Jahr 2013 über 56 Mt Aluminiumprodukte erzeugt, während zum gleichen Zeitpunkt nur 9 Mt gesammelte Schrotte bei der Sekundärproduktion zum Einsatz kamen. Diese Differenz beruht auf der oftmals langen Lebensdauer von Aluminiumprodukten und einem ständig steigenden Bedarf. [1,2,106]

### 2.1 Sekundäraluminiumproduktion

Die Sekundäraluminiumerzeuger gliedern sich in Refiner und Remelter (siehe Abbildung 2-1). Erstere behandeln Gusswerkstoffe oder höher verunreinigte Aluminiumschrotte und mischen diese mit primären Material oder hochreinen Schrotten. Zweitere führen Umschmelzwerke, in denen sortenreine oder nur leicht verunreinigte Schrotte Verwertung finden. Bei der Sekundärproduktion von Aluminium gelten allgemein Salzbadtrommelöfen als Standardaggregate. Technische Weiterentwicklungen führten dabei allerdings zur Implementierung von salzfreien oder -armen Technologien, wie sogenannte „open-well“-Mehrkammer- oder Kipptrommelöfen. Drehtrommelöfen finden vor allem bei der Verarbeitung von stark verunreinigten Schrotten Anwendung. Salzfremde Herdöfen dienen lediglich zur Aufarbeitung weniger kontaminierter Einsatzstoffe oder zum Warmhalten der Schmelzen in Gießereibetrieben. Remelter verwenden fast ausschließlich Herdöfen in „side-well“- oder „closed-well“-Bauweise. Für die Wahl des geeigneten Aggregates ist dabei der Oxidanteil des Einsatzmaterials ausschlaggebend. Zwei-Kammern-Herdöfen ermöglichen die Verwertung dünnwandiger Schrotte mit hohen Gehalten an organischen Verunreinigungen. In „side-well“-Öfen kann beispielsweise die Chagierung von Spänen direkt ins Bad erfolgen, wodurch schnelles Aufschmelzen und geringere Oxidationsraten gegeben sind. [4,12,13]

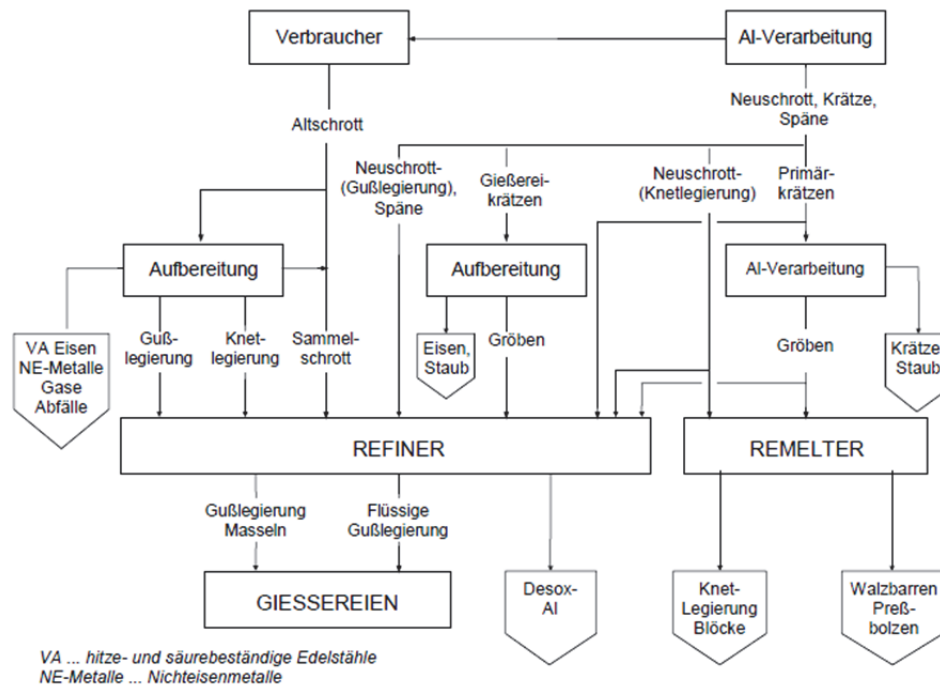


Abbildung 2-1: Prinzipskizze der unterschiedlichen Routen in der Sekundäraluminiumproduktion [13]

Das in den Öfen eingesetzte Salz hat dabei drei Aufgaben. Erstens soll es eingetragene sowie entstehende Oxide und sonstige anorganische Beimengungen aufnehmen, zweitens reißt es die Oxidschicht dünnwandiger Materialien auf und drittens dient es zum Schutz der flüssigen Metallschmelze vor erneuter Aufoxidation. Das Salzgemisch muss dabei eine geringere Dichte sowie eine niedrigere Schmelztemperatur als das Aluminiumbad aufweisen. Die gängigste Salzmischung besteht aus 70 % NaCl und 30 % KCl. Eine Zugabe von Fluor, beispielsweise in Form von Fluorapat ( $\text{CaF}_2$ ) oder Kryolith ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), führt zu einer besseren Koaleszenzwirkung in der Salzschlacke und somit zu einer gesteigerten Effizienz. Die Raffination von Aluminium hat die Zielsetzung die Aluminiumschmelze möglichst von Verunreinigungen zu befreien. In Tabelle 2-1 sind die wichtigsten Raffinationsverfahren aufgelistet. [4,13,14]

Tabelle 2-1: Raffinationsmöglichkeiten der Aluminiumschmelze [13]

Raffinationsmöglichkeit	Wirkung
Schmelzen unter Salz	Entfernung von Oxiden
Chlorierung	$\text{H}_2$ , Alkali- u. Erdalkalimetalle
Spülgasbehandlung	$\text{H}_2$ , Flotation von nichtmetallischen Einschlüssen
Salzraffination	Entfernung von Li, Na, Ca, Sr, Oxiden
Verdünnen	Zusatz von Hüttenaluminium
Filtration, Sedimentation	Entfernung von intermetallischen Partikeln

## 2.2 Recyclingquoten und Nachhaltigkeit

Aluminium besitzt laut Rombach [2] im Gegensatz zu Kupfer und Blei eine relativ geringe Recyclingrate von ca. 22 %. Dieser Wert basiert auf den Daten der Schrottsammlung und resultiert aus den sehr breiten Anwendungsfeldern des Metalls und der langen Lebensdauer einiger aluminiumbasierender Produkte. Im Vergleich dazu weist das edle und relativ teure Verbrauchsmetall Kupfer eine Recyclingrate von 37 % auf. Blei schafft es durch seinen fast ausschließlichen Einsatz in Autobatterien auf 57 %. Andere Berechnungsmodelle gehen von einer europaweiten Aluminiumrecyclingrate von rund 70 % aus. [2,15]

Recyclingquoten und -anteile rücken immer mehr in das öffentliche Bewusstsein. Zudem geben Gesetztestexte sehr genaue Angaben für unterschiedliche Industrien vor. So ist beispielsweise unter [11] für das Jahr 2015 eine 85-%ige Wiederverwertungs- und Recyclingquote für Fahrzeuge vorgesehen. Nicht alle stehen diesen Vorgaben uneingeschränkt positiv gegenüber. Befürchtungen in die Richtung, dass strenge Reglementierungen zur Verzerrungen der Sachlage führen und eine Überschätzung der Schrottresourcen bzw. eine Unterschätzung der Produktlebensdauer zu erwarten sind. Der GDA (Gesamtverband der Aluminiumindustrie) weist unter [15] darauf hin, dass die Titulierung „100 % Recykatgehalt“ keinen Gradmesser für Nachhaltigkeit darstellt. Da der aktuelle Aluminiumbedarf, wie zuvor erwähnt, unmöglich über die Sekundärroute zu decken ist, könnte durch solche Vorgaben extreme Marktverschiebungen entstehen, Schrotte beliebig und unvorteilhaft vermischt werden und so das „down-cycling“ hochwertiger Knetlegierungsschrotte noch weiter ansteigen. [2,15-17]

Eine Fallstudie unter [16] zeigt, welche Einschränkungen sich hinsichtlich eingesetzter Schrotte und Ziellegierungen ergeben können. Der verwendete Ansatz zielt dabei auf den geringstmöglichen Qualitätsverlust durch „down-cycling“ ab, außerdem soll der Bedarf an Primäraluminium minimal ausfallen. Abbildung 2-2 stellt die Verknüpfung zwischen dem verschiedenen eingesetzten Schrotten und den ausgewählten Ziellegierungen her. Dabei ergeben sich vollkommen unterschiedliche Prozentgehalte, welche die Einsatzbarkeit des jeweiligen Schrottes in der Ziellegierung aufzeigen. Ein Optimum ergibt sich bei der Verwendung von Verpackungsmaterialien in der Herstellung einer AA3014-Legierung. Dies basiert auf der hohen Mn-Toleranz der 3xxx-Serie. Neben dem Begriff des „down-cycling“ beschreibt Paraskevas [16] die sogenannte Materialhygiene. Dabei geht es um all jene Bemühungen bezüglich des Recyclings, die einen optimalen Einsatz von Vorstoffen hin zu möglichst reinen Produkten mit minimaler Degradierung der Qualität nach sich ziehen. Die Thermodynamik bestimmt dabei welche Stoffe aus der Aluminiumschmelze entfernt werden können oder im Endprodukt als Verunreinigung vorliegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass basierend auf den sehr unedlen Charakter des Aluminiums, nur beschränkte Raffinationsmöglichkeiten (siehe Tabelle 2-1) praktikabel sind. Zudem ist der Materialverlust während

dem Recycling zu berücksichtigen. Dazu gehören der Schwund während der Trennungsvorgänge (z. B. Schreddern) oder die Oxidationsverluste beim Umschmelzen. Zurzeit sorgt in manchen Fällen die hohe Nachfrage nach Gusslegierungen für ein intensives „down-cycling“ von allen möglichen Aluminiumschrotten. Schätzungen ergeben, dass pro Jahr rund 6,1 Mt Knetlegierungsschrotte [16] auf diesen Weg verloren gehen. Dem gegenüber steht ein insgesamt wesentlich höherer Bedarf an Knetwerkstoffen. Zudem gehen 73 % [16] der in Europa eingesetzten Gusslegierungen in den Fahrzeugbau. Die vermehrte Einführung des Elektroautos könnte beispielsweise den Bedarf an Gussaluminium weiter senken. Daher zeigen Prognosen eine stete Abnahme des Recyclings von hochsiliziumhaltigen Legierung. [5,15]

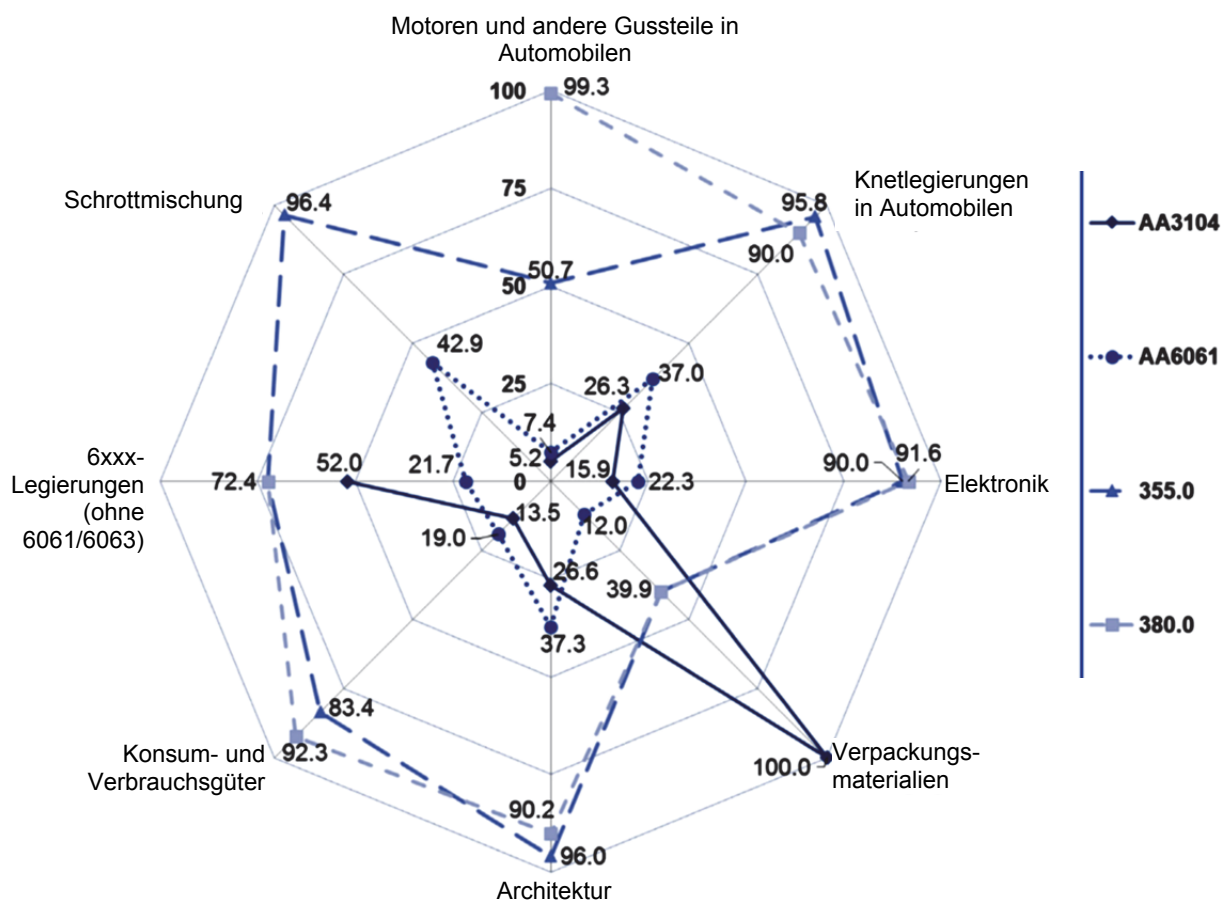


Abbildung 2-2: Darstellung des berechneten maximalen Schrotteinsatzes für die jeweilige Ziellegierung [16]

## 2.3 Schrottarten

Die Einteilung der Aluminiumschrotte basiert laut VDS (Verein deutscher Schmelzhütten e. V.) auf der grundlegenden Gliederung in [4]:

- Neuschrotte
- Späne

- Altschrotte
- Skimmings/Krätzen
- Vorschmolze

Das Spektrum der Neuschrotte umfasst sortenreine, stückige Reststoffe bis hin zu stark verunreinigten Spänen. Erstere entstehen durch Rücklauf von fehlerhaften Gussbauteilen oder Halbzeugen. Zweitere sind stark mit Schmiermittel und anderen Emulsionen verunreinigt. In den meisten Betrieben erfolgt ein internes Recycling, wobei es zu einer direkten Chargierung mit dem Neuschrott kommt. Dieses Vorgehen ist aber nur bei sauberen, stückigen Schrotten zu empfehlen. [13]

Späne sind anhand ihres Feuchtigkeitsgehaltes, Oxidanteils, Eisenverunreinigungsgrades, ihrer Sortenreinheit und dem Ausgangslegierungstyp zu unterscheiden. Ein Erhitzen auf über 750 °C ermöglicht es organische Rückstände zu entfernen, bringt aber verschiedene Nachteile mit sich. Eine geringe Metallausbeute, hohe Energiekosten, Rauch- und Gasentwicklung, niedrigere Qualität des Endproduktes durch nichtmetallische Einschlüsse, Gasporen und herabgesetzte mechanische Eigenschaften sind mitunter zu erwarten. Beim Aufschmelzen der Späne unter einem Salzbad kann es zu einem Metallverlust von bis zu 50 % kommen. Um dem entgegenzuwirken erfolgt oftmals eine Brikettierung, wodurch ein Aufschwimmen der Feinfraktion und eine fortwährende Oxidation des selbigen verhindert wird. Die Bezeichnung Altschrotte bezieht sich auf Aluminiumprodukte, welche bereits einen Lebenszyklus durchlaufen haben. Dabei sind vor allem vorhandene Verunreinigungen und die große Legierungsvielfalt problematisch. Aluminiumkrätze ist ein Abfallprodukt von Schmelzbetrieben und kann bei unsachgemäßer Handhabung zu erheblichen Metallverlusten führen. Das Auspressen der Krätze gehört daher heute zum Stand der Technik. Auch Aschen, Abhübe, Abzüge und Ofenschlacken sind Reststoffe der Produktion und sollten, wenn möglich, verwertet werden. Vorschmolz besteht aus inhomogenen, verunreinigten Schrotten, die zusammengeschmolzen als Vormaterial für Umschmelzlegierungen dienen. [4,13,18,19]

Im Anhang befindet sich eine Übersicht aus der Europäischen Aluminiumschrottnorm, welche unter anderem die anfallenden Schrotte charakterisiert und ihre potenzielle Legierungsgehalte anführt.

## **2.4 Typische Verunreinigungen in Sekundärlegierungen**

Fast alle Legierungs- und Verunreinigungsmetalle, allen voran Silizium, Kupfer, Zink, Mangan, Eisen, Blei, Titan und Chrom können nicht aus der Aluminiumschmelze entfernt werden und reichern sich deshalb während jedes Recyclingzyklus weiter an. Nur bestimmte nichtmetallische Verunreinigungen (z. B. Wasserstoff, Oxide, Nitride, etc.) und einige wenige

Legierungselemente (z. B. Magnesium, Zink, Lithium) sind durch Chlorierung bzw. Vakuumdestillation aus der Schmelze zu entfernen. Eine Unterteilung der unterschiedlichsten, in Aluminiumlegierungen vorkommenden, Elemente ist unter Tabelle 2-2 ersichtlich. Begleitelemente, die unweigerlich bei der Verarbeitung von Schrotten anfallen (z. B. Cu, Zn, Bi, Cr, Ni, Sb, Sn, etc.) können selbst in kleinen Mengen die finalen Werkstoffeigenschaften beeinflussen und müssen daher je nach Recyclinglegierung unter dem jeweiligen Höchstgehalt (meist 0,05 %) bleiben. [10,17,20,21]

Tabelle 2-2: Prinzipielle Unterteilung der Aluminiumlegierungselemente [13]

<b>Hauptlegierungselemente</b>	Cu, Si, Mg, Zn, Mn
<b>Nebenlegierungselemente</b>	Fe, Cr, Ti
<b>Sonderlegierungselemente</b>	Ni, Co, Ag, Li, V, Zr, Sn, Pb, Bi
<b>Spurenzusätze</b>	Be, B, Na, Sr, Sb

Eisen gehört in den meisten Fällen zu den unerwünschten Verunreinigungen. Eine Ausnahme bilden dabei bestimmte Gusslegierungen, die bis zu 1,3 Gew.-% Fe [4] aufweisen. Eine Eisenverunreinigung der Schmelze ist auf mehreren Wegen möglich. Einerseits kommt es immer wieder zu Anhaftungen von eisenhaltigen Bestandteilen an Aluminiumschrotten, welche bei der Magnetabscheidung nicht trennbar sind und daher in den Prozess eingeschleust werden. Andererseits ist ein Verschleiß von Aggregaten nicht vollständig zu vermeiden. Zudem findet man Eisen, abhängig vom eingesetzten Erz, auch im Primärprodukt. Anhaftender Edelstahl verursacht zusätzlich eine Anreicherung von Chrom und Nickel in der Schmelze. Nadel- oder plattenförmigen Eisenaluminide können die Duktilität als auch den Risswiderstand des Materials deutlich senken. Ni sorgt für einen Abfall der Duktilität und Festigkeit bei normalen Temperaturen, im Hochtemperaturbereich bietet es jedoch auch Vorteile. [2,4,13,22]

Zinn gelangt vor allem als Lagerwerkstoff in die Schmelze und kann bei Gussteilen ab einem Gehalt von 0,1 Gew.-% zu erheblichen Qualitätseinbußen führen. [13]

Titan ist ein typischer Kornfeiner für Gusslegierungen. Schon geringe Mengen an Titan und Vanadium können die elektrische Leitfähigkeit von Reinaluminium beeinträchtigen. [10,13] Blei gilt vor allem für die Zerspanung als sehr guter Legierungszusatz, ist aber aufgrund seiner gesundheitsschädlichen Eigenschaften gesetzlich limitiert. [11,16]

Antimon, Wismut, Lithium und Selen zählen zu den Fremdelementen. Sb kommt noch in einigen Gusslegierungen als Veredelungsreagenz zum Einsatz. Wismut stammt meist aus Automatenlegierungsschrotten. Lithium kommt vor allem in ultraleichten Luftfahrtlegierungen zur Anwendung. Selen ist primär in Beschichtungen von Aluminiumbauteilen und in Kopiergerätschrotten vorhanden. [10,13]

Zusätzlich können auch keramische Materialien wie Aluminiumoxide, Siliziumkarbide, Bor-nitride und andere Substanzen aus unkonventionellen Verbundlegierungen (z. B. wiskerverstärkte Aluminiumstäben) im Recyclingprodukt auftauchen. [2,23]

Bor findet in manchen Gießereien Einsatz, um die Schmelze von Titan und Vanadium zu befreien. Titan- und Vanadiumdiborid sedimentieren auf Grund ihrer höheren Dichte und sind in der Aluminiumschmelze nicht löslich. [10]

Alkali- und Erdalkalimetalle erweisen sich im Gefüge von Aluminiumlegierungen als besonders schädlich, da sie die Warmumformbarkeit und die Oberflächenqualität des Endprodukts stark herabsetzen. Eine Spülgasbehandlung mit Chlor kann ihren Gehalt jedoch minimieren. Ein Selbstreinigungseffekt entsteht, wenn Schmelzen in keramischen Tiegeln vorliegen, da beispielsweise das Natrium in die Ofen-, Rinnen- und Tiegelauskleidungen diffundiert. [10,13,24]

Chrom setzt die Rekristallisationstemperatur der Aluminiumlegierung herab, aber der Gehalt sollte trotzdem minimal sein, da es zur Ausbildung von ungleichmäßigen, verzahnten Chromphasen kommen kann. [2]

Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) gehört zu den häufigsten Einschlüssen in Legierungen. Bei den normalerweise üblichen Temperaturen im Schmelzbad kommt es zur Ausbildung von  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , einem Spinelltyp mit kubischem Kristallgitter. Die drei Hauptmechanismen bei der Ausbildung von Aluminiumoxid sind die Reaktion mit Luftsauerstoff, Luftfeuchtigkeit und Metalloxiden. Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ) hat eine kubischflächenzentrierte Struktur und bildet sich unter denselben Reaktionsmechanismen wie Aluminiumoxid, lediglich mit einer größeren Triebkraft. Die Folgereaktion zu Spinell ist die häufigste Ursache für den Eintrag von nichtmetallischen Einschlüssen in Aluminiumlegierungen. Karbide (z. B.  $\text{Al}_4\text{C}_3$ ) gelten als Begleitelemente von Primäraluminium. Sie bilden sich beim Hall-Héroult-Prozess und können bei der Schmelzeraffination (z. B. Spülgasbehandlung, Filtrierung) fast vollständig entfernt werden. Andere Quellen für den Eintrag von Kohlenstoffverbindungen sind Reaktionen mit Öl bzw. organischen Verunreinigungen aus Schrotten, Siliziumkarbid aus den Heizelementen oder der Feuerfestauskleidung und Graphitelementen. Silikate ( $\text{SiO}_2$ ) treten meist als kleine Partikel ( $< 5 \mu\text{m}$ ) auf und werden oft bei der Chargierung in die Schmelze eingetragen. Sie stammen aus Auswaschungen der Feuerfestausmauerung und gelten aufgrund ihrer geringen Größe als unterkritische Einschlüsse, zudem ist durch ihre Kugelform eine Agglomeration so gut wie ausgeschlossen. [10,21,25]

Salze oder Chloride (z. B.  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{MgCl}_2$ ) gehören zu den gefährlichen Einschlüssen und bleiben in den üblichen Schmelztemperaturbereichen flüssig, können also nicht abgefiltert werden. Ihre Dichte liegt zwischen  $2,0$  und  $2,16 \text{ g/cm}^3$  und schwimmen daher auf der Schmelze. Zu den chloraffinen Elementen in der Schmelze zählen Aluminium, Magnesium, Natrium, Kalium, Strontium und Kalzium. Aufgrund des Mengenverhältnisses kommt es



üblicherweise zur Ausbildung von Aluminiumchloriden, die bei Gelegenheit mit Elementen mit höherer Chloraffinität weiterreagieren. Zudem sind auch Mischchloride möglich, diese weisen aber nur eine begrenzte Beständigkeit bzw. Lebensdauer auf. Titanborid-Agglomerate ( $TiB_2$ ) gelten in Aluminiumlegierungen als kritische intermetallische Einschlüsse, da sie die Bruchzähigkeit des Werkstoffes drastisch herabsetzen und sind wesentliche Komponenten der Kornfeinerung. Durch ihre Neigung zur Agglomeration und ihrer hohen Dichte kommt es zur Sedimentation in der Schmelze. Zum Teil ist ihre Entfernung durch Flotation möglich. Die Ausbildung von Agglomeraten wird vor allem durch die Anwesenheit von  $Al_3Ti$  und Kalium begünstigt. Kornfeiner aus  $AlTiC$  weisen eine geringere Tendenz zur Vergrößerung auf. Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit den häufigsten Partikeln in Aluminiumschmelzen und entsprechenden Informationen zu ihrer durchschnittlichen Größe und Entstehung. [21]

### **3 Zerspanung**

Der technologische Begriff Zerspanbarkeit ist keiner einzelnen Werkstoffkenngröße oder bestimmten technischen Wirkpartnern zuzuordnen, sondern umfasst eine Vielzahl differenziell zu betrachtender, quantitativ oder qualitativ zu bewertender Eigenschaften. Allein die Tatsache, dass Untersuchungsergebnisse aus der drehenden Bearbeitung nicht ohne weiteres für Fräsvorgänge übernommen werden können, zeigt die Komplexitäten und Sensibilität dieser Zielgröße. Jede Aussage bezüglich der Spanbarkeit eines Metalls muss daher ausnahmslos im Kontext des angewendeten Bearbeitungsverfahrens gelten und sollte auf vielseitigem Wege bezüglich allgemein gültigen Gegebenheiten und grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten Untersuchung finden. Grundsätzlich bekannt ist, dass für jede Materialpaarung in allen Schnittverfahren ein Optimum an Zerspanungsparametern besteht. Erfolgt eine gekonnte Kombination der variierbaren Einflussgrößen (z. B. Spanwinkel, Vorschub, Schnitttiefe, Schmiermitteleinsatz, etc.), entsteht eine möglichst glatte, formgenaue Oberfläche unter effizientem Einsatz von Hilfsstoffen und Energie.

#### **3.1 Wichtige Begriffe aus der Zerspanungstechnik**

Die spanenden Herstellungsverfahren unterteilen sich nach DIN 8589 [26] in Zerspanung mit geometrisch bestimmten und mit geometrisch unbestimmten Schneiden. Beim ersten Fall sind Schneidenanzahl, die Form der Schneidkeile und ihre Lage zum Werkstück bekannt und beschreibbar. Zweiteres ist mittels statistischen Kenngrößen definiert. Als Schneiden dienen dabei die Flächen oder Kanten einer Schleif- bzw. Läppmaschine, woraus sich eine Unbestimmtheit bezüglich des Schneidwinkels ergibt. Zu den geometrisch bestimmten Verfahren zählen Drehen, Bohren, Senken, Reiben, Fräsen und eine Reihe anderer

Prozeduren. Die unbestimmten Methoden dienen meist zum flächigen Abtragen von Material oder zur Feinbearbeitung (z. B. Polieren, Schleifen, Raspeln, Meißeln, ...). [27,28]

Die Bewegungsvorgänge beim Zerspanen teilen sich in unterschiedliche Einzelkomponenten auf, dabei beschreibt die Schnittbewegung die relative Verschiebung zwischen Werkstück und Schneidzeug. Die Vorschubbewegung ( $f$ ) ermöglicht einen stetigen Materialabtrag und definiert die Vorschubgeschwindigkeit ( $v_f$ ). Diese ist entlang des Weges, den das Werkzeug in Vorschubrichtung zurücklegt, ausgerichtet und hat die Einheit mm/Minute. Die eigentliche Wirkbewegung setzt sich aus beiden Bewegungskomponenten zusammen. Für eine einwandfreie Prozessführung sind neben den Hauptbewegungen auch noch einzelne Nebenschritte notwendig (z. B. Zustell- und Anstellbewegung). [27-29]

Weiters findet die Beschreibung des Zerspanungsprozesses über mehrere Winkel in der Arbeitsebene statt. Der Vorschubrichtungswinkel ( $\varphi$ ) liegt dabei zwischen der Vorschub- und der Schnittrichtung. Beim Fräsen ändert sich dieser kontinuierlich während beim Drehen immer konstant  $90^\circ$  vorliegen. Der sogenannte Wirkrichtungswinkel ( $\eta$ ) bezeichnet den Bogen zwischen Wirk- und Schnittrichtung. Der Spanwinkel ( $\mu$ ) kann sowohl einen positiven als auch negativen Wert annehmen. Er beeinflusst die Größe der Schnittkraft maßgeblich und modifiziert die Spanbildung an der Oberfläche über die Materialstauchung. Ein negativer Spanwinkel ist vor allem bei der Zerspanung mittels Hartmetall- oder Keramikschniden von Bedeutung. Der Vorteil liegt dabei in der kontinuierlichen Richtungsänderung der Zerspanungskraft. Dadurch kommt es zu einer Richtungsumkehr der Spannungen im Spangrund (von Zug- zu Druckbelastungen). Im zweiten Fall können stoßempfindliche Werkstoffe wesentlich besser umgehen als mit Zugbelastungen. Je spröder ein Werkzeugmaterial ist, desto negativer sollte also der Spanwinkel ausfallen. Der signifikante Nachteil des negativen Spanwinkels besteht in der wesentlich höheren Krafterwendung bei gleicher Zerspanungsleistung. Weitere Winkel, die in der Literatur angeführt sind (z. B. Keilwinkel), beziehen sich ausschließlich auf die Werkzeuggeometrie. [27,28,30]

## 3.2 Spanbildung

Beim Zerspanungsvorgang dehnt das eindringende Werkzeug das Metall zuerst elastisch, bis dieses nach Überschreiten des Schubwiderstandes (Fließgrenze) entlang der Schneidkeilkante abschert. Dabei können aufgrund der auftretenden Reibung große Wärmemengen entstehen. Die Spanabnahme erfolgt durch eine bleibende plastische Verformung des Werkstücks an der Spanspitze (siehe Abbildung 3-1), dabei bewegen sich die Versetzungen des Metallgitters unter Einwirkung der durch das Werkzeug aufgebrachten Schubspannung. Fremdatome, Fehlstellen und andere versetzungsbewegungsbehindernde Faktoren erhöhen den Verformungswiderstand und es kommt zu einer Aufstauung bzw. Rissinitiierung.

Dementsprechend bilden sich abhängig von den Werkstoffeigenschaften und den Zerspanungsbedingungen unterschiedliche Spanformen aus. [27,28]

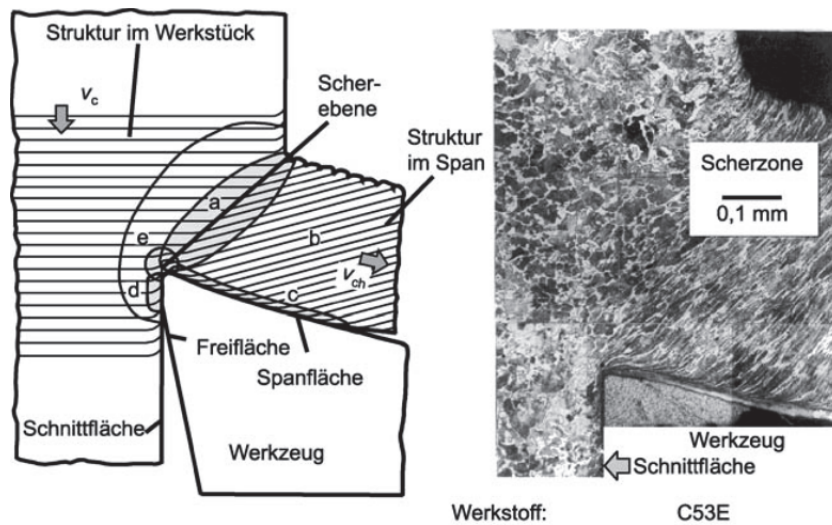


Abbildung 3-1: Bildung eines Spans (rechts), Prinzipskizze (links) Realaufnahme [29]

Die Form der anfallenden Späne ist dabei sowohl für den Werkzeugverschleiß, die entstehende Oberfläche als auch die Betriebssicherheit von Bedeutung. Die wichtigsten Spanformen sind unter Tabelle 3-1 dargestellt. Prinzipiell gelten kurze, leicht abtransportierende Späne (z. B. Spiral- oder kurze Wendelspäne) als Optimum. Lange Band- oder Wirrspäne können zu Problemen in der Handhabung führen. [29,30]

Tabelle 3-1: Die wichtigsten Spanformen im Überblick [29,31]

Band-span	Wirrspan	Flach-wendel-span	Schräg-wendel-span	Lange zylind. Wendel-späne	Spiral-wendel-späne	Spiral-späne	Span-locken	Bröckel-späne

Fließspäne entstehen bei kontinuierlichem Materialabtrag und gleichmäßigem Abgleiten des Spans. Voraussetzungen dabei sind ein homogenes Gefüge und hohe Duktilität des Grundwerkstoffs. Begünstigt wird der Vorgang durch große Schnittgeschwindigkeiten, niedrige Spanflächenreibung, positiven Spanwinkel und geringe Spanungsdicken. Die Lamellenspanbildung beruht auf einer gleichmäßigen Formänderungsschwankung, die sichtbare Scher-

bänder erzeugt und vorwiegend bei gut verformbaren Werkstoffen mit hohen Festigkeitswerten auftritt. Die Scherspannbildung geht mit negativen Spanwinkeln, geringen Schnittgeschwindigkeiten und größeren Spandicken einher. Die anfallenden Späne kennzeichnen sich durch deutliche Unterschiede in der Verformungstextur. Reißspäne entstehen vor allem bei wenig plastisch verformbaren oder stark inhomogenen Werkstoffen. Dabei reißen nahezu unverformte Teile aus dem Werkstoffkontinuum heraus, sodass die Oberflächengüte mehr durch den diesen Vorgang als durch die Schneidengeometrie bestimmt ist. [27,30]

### 3.3 Aufbauschneiden

Bei der Ausbildung von Fließspänen kann es zu dem sogenannten Aufbauschneiden kommen. Dabei entsteht eine stark verformte und kaltverfestigte Materialablagerung am Schneidwerkzeug, welche einen zwei- bis dreimal höheren Festigkeitswert als der zu bearbeitende Werkstoff aufweist und die Schneidfunktion übernimmt. Dadurch verändern sich wiederum die Werkzeuggeometrie und somit auch die finale Oberflächenrauigkeit des Werkstücks. Beim Abwandern der Aufbauschneiden kann es zum Mitreißen von Werkzeugpartikeln, zum Ablagern von kaltverfestigten Materialien, zu periodisch veränderter Werkzeuggeometrie und somit zur Absenkung der Oberflächengüte des finalen Werkstückes kommen. [27,32-34]

Voraussetzungen für die Ausbildung einer Aufbauschneide und dem damit einhergehenden adhäsiven Werkzeugverschleiß sind nach Tönshoff [36] folgende Kriterien:

- Kaltverfestigungspotenzial des Grundwerkstoffs
- Stabile, weitgehend stationäre Spanbildung
- Ausbildung einer Stauzone im Stofffluss vor der Schneidkante
- Temperaturen in der Spanzone, die unter der Rekristallisationstemperatur des Grundwerkstoffs liegen.

Aufbauschneiden sind somit ein Phänomen, das vor allem bei Aluminiumwerkstoffen auftritt. Ihnen kann durch erhöhte Schnittgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 3-2) und damit einhergehenden höheren Temperaturen entgegengewirkt werden. [27,33,34]

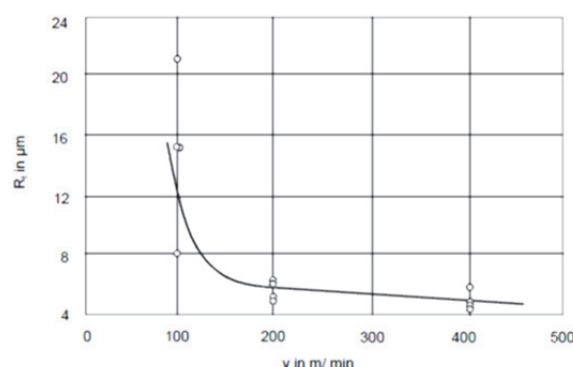


Abbildung 3-2: Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauigkeit und der Schnittgeschwindigkeit[32]

Oishi et al. [33] vergleicht in seiner Arbeit die Oberflächengüte unterschiedlich ausgelagerter AW2014-Legierungen. Der kaltausgelagerte Werkstoff zeigt dabei eine sogenannte kritische Geschwindigkeit, unter der mit Aufbauschneiden zu rechnen ist. Im härteren T6-Zustand ergab sich wiederum bei keiner der verwendeten Geschwindigkeitsvarianten eine Neigung zu Aufbauschneiden (siehe Abbildung 3-3). [33]

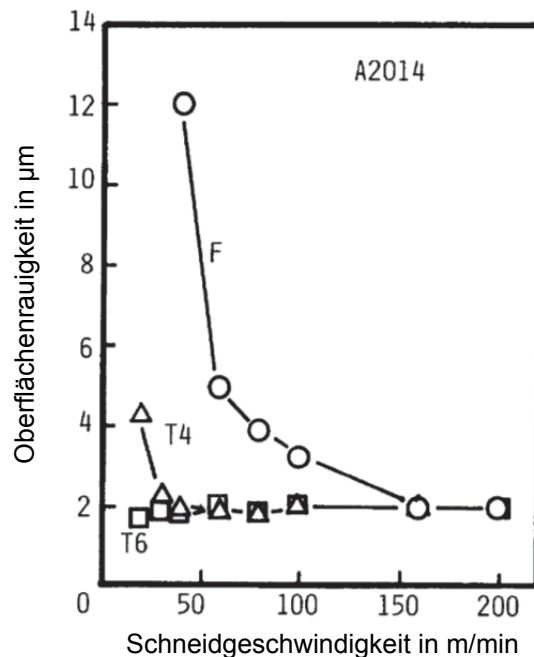


Abbildung 3-3: Oberflächenrauigkeit und Schnittgeschwindigkeit bei der Zerspanung einer AW2014-Legierung mit Diamantwerkzeug [33]

Die Ergebnisse von Yousefi et al. [37] bestätigten größtenteils eine Abnahme der Oberflächenrauigkeit mit der Schnittgeschwindigkeit. Eine Ausnahme bildet der Bereich von 100-200 m/s. Dort ergab sich ein seitliches Fließen des Grundmaterials entgegen der Vorschubrichtung (siehe Abbildung 3-4). Zudem hatten laut Yousefi einige der Späne Aufschmelzungen auf der Rückseite. Verklebungen an der Freifläche des Werkzeuges zeigten sich dabei verantwortlich für diese Oberflächenverschlechterung. Ursache für die Eingrenzung des Effektes waren laut Yousefi die zu geringen Temperaturen unter 100 m/s Schnittgeschwindigkeit und zu kurze Kontaktzeiten bei über 200 m/s.

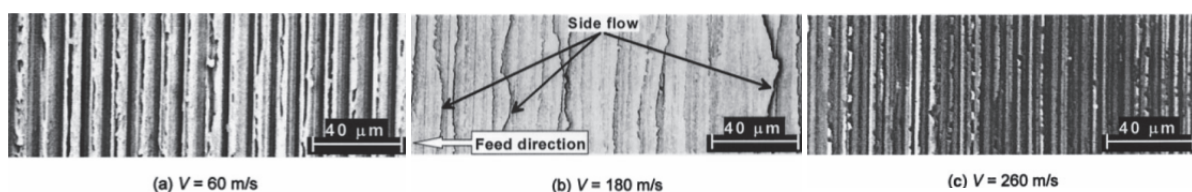


Abbildung 3-4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der unterschiedlichen Schneidoberflächen nach der Zerspanung mit verschiedenen Schneidgeschwindigkeiten [37]

### 3.4 Scheinspanbildung

Zur Scheinspanbildung kommt es vor allem bei großen Schnittgeschwindigkeiten oder starkem Werkzeugverschleiß und den einhergehenden hohen Temperaturen in der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Grundmaterial. Dabei gerät der Werkstoff in einen Art teigigem Zustand und das Material drückt aus der Kontaktzone heraus. Es entsteht ein langsam wachsendes, spanähnliches Gebilde, das fest an der Werkzeugkante haftet (siehe Abbildung 3-5). Dort wo der sogenannte Scheinspan mit dem Werkstück in Berührung kommt, sinkt die Oberflächengüte dramatisch ab. Als wirksamste Gegenmaßnahme gilt eine effektive Kühlschmierung. [30]



Abbildung 3-5: Scheinspan an einer Werkzeugfreikante nach der Zerspanung von Aluminium mit sehr hohen Geschwindigkeiten [30]

### 3.5 Beurteilung der Zerspanbarkeit

Der technologische Begriff Zerspanbarkeit ist, wie bereits zuvor erwähnt, keiner einzelnen Werkstoffkenngröße zuzuordnen, vielmehr umfasst er eine Vielzahl möglicher Bewertungskriterien, deren Aussagekraft von unterschiedlichsten Faktoren und dem betrachteten Zerspanungsprozess abhängt. Zu den wichtigsten Zielgrößen zählen dabei die Oberflächengüte des Werkstücks und die Standzeit bzw. der Verschleiß des Werkzeuges. Zudem ist aus ökonomischer Sicht eine Kontrolle der Schnittkraft sinnvoll. Die Spananalyse gibt Aufschluss bezüglich der Arbeitssicherheit, hilft mit dem großen Mengen an anfallenden Spänen umzugehen und zeigt Korrelation mit der Oberflächenqualität. Lange Späne (z. B. Band-, Wirt- und Flachwendelspäne) sind ungünstig und können zu Personen- und Anlagenschaden führen. Sehr kurze Späne (z. B. Bröckel- oder Spiralspäne) erweisen sich auch oftmals als problematisch, da sie herumfliegen und somit eine Gefahr für das Bedienpersonal darstellen. Reines Aluminium und alle weicheren Legierungstypen bilden sehr lange, ununterbrochene Späne. Bei diesen Materialien sind spezielle Vorrichtungen am Werkzeug notwendig, um Spanbruch zu gewährleisten. Hochfeste Knetwerkstoffe weisen normalerweise optimale Spanformen auf. Untereutektische Gusslegierungen mit einem Siliziumgehalt unter 12 % bilden ebenfalls kurze Wendel- oder Spiralspäne, welche leicht aus der Schneidzone zu entfernen sind. Eutektische Gusslegierungen neigen schon eher zu längeren Spanformen.

Übereutektische Werkstoffe ( $Si > 12 \%$ ) ergeben wiederum sehr kurze Bröckelspäne, welche schwieriger aus der Schneidzone zu entfernen sind, zudem wirken die Si-Partikel stark verschleißfördernd auf das Werkzeug. [28,30,32]

Sogenannte spanbrechende Phasen können die Bildung langer Spanformen verhindern. Dafür sind zwei unterschiedliche Gefügetypen des Werkstoffs bekannt. Weit verbreitet ist die Variante mit weichen Gefügebestandteilen in harter Grundmatrix. Im zweiten Fall befinden sich harte Phasen (z. B. Siliziumpartikel in Gusslegierungen) in einer weichen Matrix. Dabei ist die Spantrennung optimal aber die Maschinenstandzeit limitiert. Die erste Variante kommt vor allem in Aluminiumautomatenlegierungen zum Tragen. Ihre weichen Bestandteile sind dabei meist in Aluminium unlösliche Elemente wie Blei, Bismut oder Zinn. Sie helfen aufgrund ihres niedrigen Schmelzpunktes den Span zu brechen und bilden zudem eine schützende Gleitschicht zwischen Werkstück und -zeug. [9,30]

Die Oberfläche des zerspannten Körpers setzt sich aus Rillen und Riefen zusammen. Diese haben naturgemäß die Negativform der Schneidkante. Wobei die feinen Riefen vor allem durch Ungleichmäßigkeiten und Verschleißspuren auf der Schneide entstehen. Zusätzlich kann es durch Gefügequetschungen, Verfestigungen, Vorschubkammschuppen, Rissen, Ablösungen und Reste von Aufbauschneiden zu überlagernden Rauigkeitsprofilen kommen. Die angeführten Erscheinungen können die Oberflächengüte mehr oder weniger stark herabsetzen. Duktilen Werkstoffen neigen eher zu Fließ- und Verfestigungserscheinungen. Spröde Materialien zeigen oftmals Ausbrüche und Risse. Als wichtigstes Bewertungskriterium für die Oberflächengüte gilt die gemittelte Rautiefe. Die einfache und fertigungsnahe Kontrolle dieses Kennwertes (z. B. mittels Tastverfahren) und die Vielzahl von Vorteilen durch eine optimierte Oberflächenrauigkeit (z. B. Dauerfestigkeitssteigerung) machen ihn zu einem Schlüsselfaktor in der Fertigung. Die häufig genannte kinematische Rauheit beschreibt einen theoretischen Faktor und bildet sich durch die Relativbewegung von Werkstück zu Werkzeug. Die daraus entstehende theoretische Rautiefe ( $R_t$ ) errechnet sich aus dem Vorschub ( $s$ ) und dem Eckradius ( $r$ ) des Werkzeugs (siehe Formel 1). [27,30,35]

$$R_t = \frac{s^2}{8 \cdot r} \quad (1)$$

Weiters kommt die Schnittflächenrauheit hinzu, welche sich durch die Abtrennbewegung des Spans ergibt. Dabei kommt es vor der Schneidkante zur Ausbildung einer sogenannten Stauzone (siehe Abbildung 3-6). Deren Form ist von den Parametern Schneidkanten-geometrie, Schnittgeschwindigkeit und Werkzeugwerkstoff abhängig. Die eigentliche Trennung von Span und Grundmaterial erfolgt dabei unmittelbar vor besagter Stauzone. Ob sich dabei eine rauere oder glattere Schnittfläche einstellt, ist von den oben genannten Faktoren abhängig. Kommt es zum Mitreißen von Substanz aus der Stauzone, ist in jedem

Fall mit einer rauen Schnittfläche zu rechnen. Neben einer sauberen, von Materialanhaftungen und Verschleißspuren freien Werkzeugschneide, wirken relativ hohe Schnittgeschwindigkeiten einem unerwünschten Abwandern des Stauzonematerials entgegen. [30]

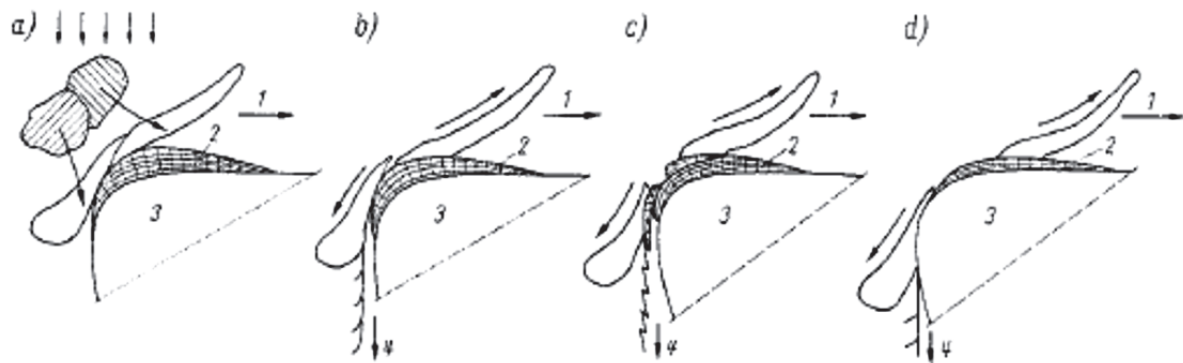


Abbildung 3-6: Schematische Darstellung der Vorgänge bei der Entstehung der Schnittflächenrauheit. Beschreibung: (1) Span (2) Stauzone (3) Schneide (4) entstehende Schnittfläche; (a) Bildung der Stauzone (b) Trennvorgang (c) Abwandern von Teilen der Stauzone bei geringer Schnittgeschwindigkeit (d) Glätten der Schnittfläche durch die Schneide [30]

Der dritte Anteil der realen Rauigkeit kann unter dem Begriff der Störeinflüsse zusammengefasst werden. Dazu zählen z. B. die Stabilität des Systems, der Schneidkantenverschleiß oder ungünstige Spanformen. Beim Vergleich der einzelnen Rauigkeitsanteile zeigt sich, dass im Bereich der großen Vorschübe (Schruppbearbeitung) die kinematische Rauigkeit bestimmend ist. Bei kleinen Vorschüben dominieren die Effekte aus den Störeinflüssen und/oder der Schnittflächenrauheit. Generell ist die theoretische Rauigkeit im Zerspanungsbetrieb nicht oder nur sehr selten zu erreichen. Bei Gusswerkstoffen gilt z. B. ein  $R_a$ -Wert weniger als dem Zehnfachen der kinematischen Rauigkeit bereits als brauchbares Ergebnis. Wie bereits zuvor erwähnt, existiert ein Zusammenhang zwischen Oberflächenrauigkeit und Schnittgeschwindigkeit. Die resultierende, werkstoffabhängige Kurve (siehe Abbildung 3-7) ist in vier Bereiche zu unterteilen, wobei jeder dieser Abschnitte von einem bestimmten dominierenden, oberflächenrauigkeitsbestimmenden Vorgang geprägt ist. Im ersten Segment kommt es aufgrund der geringen Schnittgeschwindigkeiten zu einer Aufbauschneidenbildung. Durch die höheren Bearbeitungsgeschwindigkeiten im zweiten Bereich geht die Neigung zur Aufbauschneidenbildung verloren und die Rautiefe nimmt dementsprechend ab. Im erhöhten Geschwindigkeitsfeld (III) wächst die Störintensität proportional. Dabei überwiegen die negativen Einflüsse (z. B. Verschleiß, Systemoszillationen). Der letzte Bereich ist durch die Ausbildung von Scheinspänen geprägt. Durch dieses Phänomen ist die Obergrenze der Schnittgeschwindigkeit vorgegeben. [28,30]



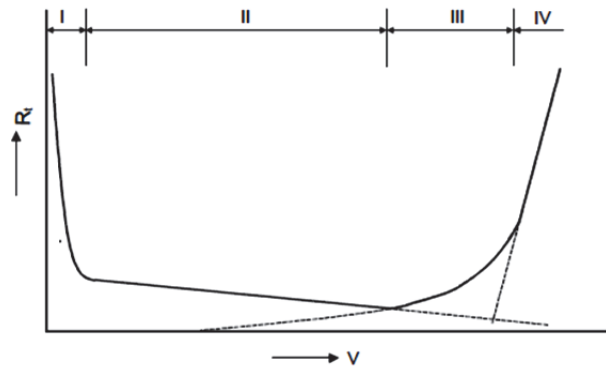


Abbildung 3-7: Korrelation zwischen Oberflächenqualität und Schnittgeschwindigkeit (I) Bereich der Aufbauschneidenbildung (II) Abnahme der Rauigkeit durch erhöhte Temperaturen in der Schnittzone (III) externe Einflüsse wie Rattern und Instabilitäten (IV) Scheinspannbildung [30]

Zusätzlich zu der veränderten Oberflächenstruktur kommt es während des Zerspanungsvorganges durch die Kräfteinbringung zu einer Veränderung von mechanischen Eigenschaften in der Grenzzone. Eine erhöhte Härte, Gefügeveränderungen und Eigenspannungen in der Randschicht sind zu erwarten. Durch die Verfestigung und die eingebrachten Druckeigenspannungen kommt es allerdings nur selten zu einer Verschlechterung der Werkstückqualität. Lediglich Zugeigenspannungen, die durch eine Aufwärmung des Grundmaterials entstehen, können zu einer Senkung der mechanischen Kennwerte führen. [27,30]

Die zuvor genannte Werkzeugstandzeit korreliert naturgemäß mit den unterschiedlichen Verschleißerscheinungen. Die verschleißende Wirkung auf das Werkzeug setzt sich aus Adhäsion, Abrasion, Oxidation, Diffusion, Oberflächenzerrüttung und eingebrachte thermische Spannungen zusammen (siehe Abbildung 3-8). [30]

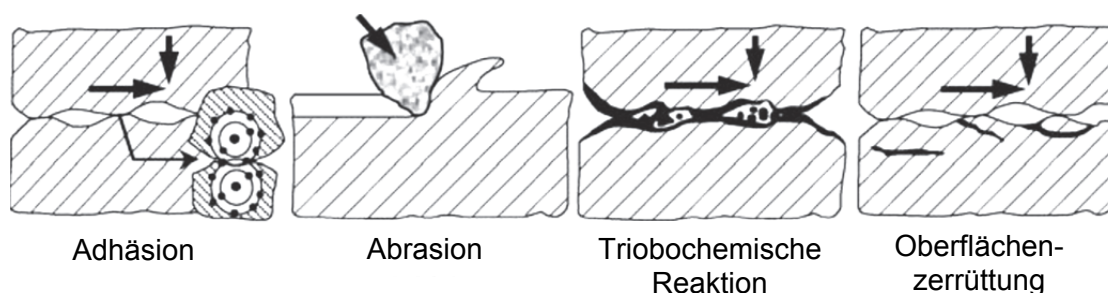


Abbildung 3-8: Prinzipielle Darstellung der unterschiedlichen Verschleißerscheinungen bei der Zerspanung von Aluminium [30]

Abrasion entsteht durch die Wechselwirkungen von Werkzeug mit harten Gefügepartikeln. Der rein mechanische Vorgang erfährt durch den thermischen Einfluss der Reibwärme noch Begünstigung, da sich der Grundwerkstoff zusätzlich erweicht. Der adhäsive Verschleiß beruht auf der durch atomare Wechselwirkungen ausgelösten Reibschweißung zwischen Werkstück und Schneidstoff. Adhäsion wird durch den ständigen Abtrag der passivierten (chemisch inerten) Oberflächenschicht der Schneide begünstigt. Durch die vermehrt

vorhandenen freien Bindungen kann es leichter zu Mikroverschweißungen kommen. Die Adhäsionsvorgänge nehmen mit höherer Schneidgeschwindigkeit ab. Diffusion ist naturgemäß durch die erhöhten Temperaturen beim Zerspanen begünstigt. Mit steigender Wärmeenergie nimmt die Beweglichkeit der Atome und Moleküle in einem Werkstoff zu, wodurch es thermisch aktivierten Platzwechselfvorgängen von Bestandteilen des Schneidstoffes in das zu bearbeitende Material oder auch umgekehrt kommen kann. Ausgelöst durch chemische Reaktionen in beiden Wirkpartnern, entstehen Randzonen mit eventuell herabgesetzten mechanischen Kennwerten. Oxidation tritt vor allem an den Rändern der Kontaktzone auf, wenn die Oberflächentemperaturen und die Oxidationsneigung des Schneidstoffes entsprechend hoch sind. Beim Zerspanen treten parallele (laterale) und normal zur Schneidkante stehende Risse auf. Zweitere erscheinen häufig in regelmäßigen Abständen und gelten als sogenannte Kammriss. Ihr Ursprung liegt in thermisch induzierten Spannungen. Der Haupteinflussfaktor auf den Werkzeugverschleiß ist wiederum die Schnitttemperatur. Eine schematische Darstellung des Zusammenhangs der Temperatur und der auftretenden Verschleißarten ist in Abbildung 3-9 angeführt. Der Verschleiß beim Zerspanen von Knetlegierungen ist sehr gering. Er wird, im Gegensatz zu den Werten aus der Verarbeitung von Gusslegierungen, nicht in mm/min, sondern in Millimeter pro Produktionstag angeführt und ist nur selten Inhalt wissenschaftlicher Betrachtungen. [27,32]

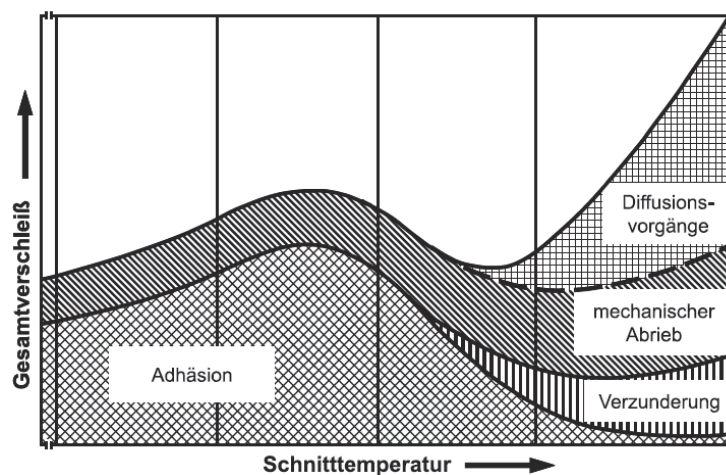


Abbildung 3-9: Prinzipieller Zusammenhang zwischen Schnitttemperatur und Verschleißarten [27]

Die bei einem Zerspanungsprozess auftretenden Schnittkräfte müssen individuell für jeden Zerspanungsvorgang ermittelt werden. Sie sind dabei einerseits von den eingesetzten Materialien und andererseits von der Spangröße abhängig. Zudem bringen Kühlschmiermittel eine Erhöhung der Schnittkräfte mit sich, da die herabgesetzte Temperatur zu einer höheren Festigkeit des Werkstoffs führt. Die Schmierwirkung allerdings bewirkt wiederum eine einfache Spanabführung und reduziert dadurch die notwendige Zerspanungskraft. Auch der Schneidkeilradius hat Einfluss, da die Materialstauchung in der Schneidzone

zur Krafterhöhung führt. Aber der größte Beitrag wird wiederum dem Verschleiß der Schneidspitze zugerechnet. Desto länger die Schneiden bereits eingesetzt wurden, umso höher ist der Kraftaufwand für die Zerspanung. Eine Zusammenfassung der Einflussgrößen ist unter Tabelle 3-2 ersichtlich. Eine Unterteilung der Aluminiumlegierungen nach ihrer generellen Zerspanbarkeit ist im Anhang angeführt. [30,34]

Tabelle 3-2: Zusammenhang zwischen Prozessparameter und Zerspanbarkeit über die Stärke der Einflussnahme (●... starker, ◐... durchschnittlicher, ◑... geringer/kein Zusammenhang) [32]

	Spanform	Oberfläche	Verschleiß	Schneidkraft
Prozess	●	●	●	●
Aluminiumwerkstoff	●	◐	●	◐
Schneidbedingungen und Werkzeuggeometrie	◐	●	●	◐
Maschine	◑	●	◐	◑
Werkzeugmaterial	◑	◐	●	◑

### 3.6 Zerspanungsverfahren

Beim Drehprozess erfolgt Spanen mit geschlossener meist keilförmiger Bewegung und quer zur Schnittrichtung liegendem Vorschub. Der Spanabtrag ergibt sich dabei durch eine Rotation des Werkstücks und die schlittengelagerte Vorschubbewegung des Werkzeuges. Die theoretisch erzielbare Oberflächenrauigkeit ist durch die Größe des Spitzenradius am Drehmeißel und dem Vorschub gegeben. [27,30]

Beim Fräsen erfolgt die spanende Formgebung über ein rotierendes Werkzeug. Die Schneiden erzeugen dabei durch ihre Rotation um die Mittelachse die Schnittbewegung. Die Vorschubbewegung kann in unterschiedliche Richtungen ausgeführt werden und kommt entweder durch das Werkzeug, das Werkstück oder durch beide zustande. Zu den Besonderheiten dieses Bearbeitungsverfahrens gehört die Tatsache, dass die Schneiden nicht ständigen Eingriff in das Bearbeitungsmaterial haben. Fräsmaschinen müssen daher speziell gegen dynamische Belastungen ausgelegt sein. [27,29]

Beim Bohren erfolgt eine kreisförmige Schnittbewegung, wobei die Vorschubbewegung in Richtung der konstanten Drehachse liegt. Üblicherweise wird der Bohrvorgang anhand eines zweiseitigen Werkzeuges, dem sogenannten Wendelbohrer durchgeführt. Dabei produzieren die Schneidkanten zwei identische Späne, welche über den Helixwinkel möglichst einfach auszutragen sein sollten. Zudem ist eine ausreichende Wärmeabfuhr notwendig, um Verzug von Grundmaterial und Bohrkopf zu minimieren. Der Winkel der Bohr-

helix kann dabei signifikanten Einfluss auf die Oberflächenqualität haben. Der Vergleich ist in Abbildung 3-10 verdeutlicht. [27,92]

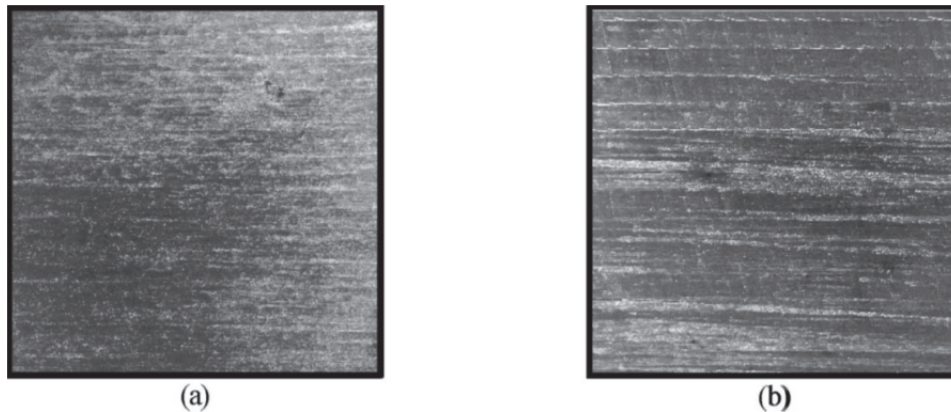


Abbildung 3-10: Oberflächen in Bohrlochern mit unterschiedlichen Helixwinkeln  
(a) - 10 ° und (b) + 10 ° [92]

### 3.7 Schneidwerkstoff

Zerspanungswerkzeuge sind hochbeanspruchte Maschinenteile und ihre Schneidleistung hängt stark von der Wahl des Werkstoffes ab. Die wichtigste Anforderung an die eingesetzten Materialien ist dabei eine hohe Verschleißfestigkeit, um lange Standzeiten und ausreichende Prozesssicherheit zu gewährleisten. Entscheidend dafür sind die Härte, Warmhärte, Zähigkeit und chemische Beständigkeit des Schneidstoffes. [36]

Unlegierte Werkzeugstähle haben heute auf Grund ihrer geringen Wärmebeständigkeit und der damit verknüpften geringen Schnittgeschwindigkeit kaum noch technische Relevanz. Sie weisen einen Kohlenstoffgehalt von 0,6-1,5 % auf und sind nur bis ca. 300 °C temperaturbeständig. Ihre maximal zulässige Schnittgeschwindigkeit liegt bei 10 m/min. Schnellarbeitsstähle (HSS) sind aufgrund ihrer karbidbildenden Legierungselemente (z. B. Chrom, Molybdän, Wolfram, Vanadium) viel leistungsfähiger. Sie weisen eine höhere Warmhärte, eine verbesserte Verschleißfestigkeit und eine optimierte Anlassbeständigkeit auf. Zusätzlich kann die Lebensdauer der aus Schnellarbeitsstählen bestehenden Werkzeuge durch Hartverchromen, Nitrieren oder Karbonieren gesteigert werden. Ihre einfache Handhabung und der geringe Kostenaufwand in der Anschaffung sind ebenfalls nicht zu unterschätzende Argumente. Da sie aber eine geringere Beständigkeit gegenüber Oberflächenabrasion aufweisen, werden sie hauptsächlich bei Knet- und nicht bei Gusslegierungen eingesetzt. Außerdem muss eine strenge Temperaturkontrolle erfolgen und dementsprechend geringe Schnittgeschwindigkeit (unter 500 m/min) [32] Anwendung finden. Hartmetalle sind pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe, die aus zwei oder mehr Phasen bestehen. Die zwei Hauptkomponenten unterteilen sich in ein zähigkeitsbestimmendes Bindemetall ( $\beta$ -Phase) und einem Härte-träger (z. B. Wolframkarbid, Niobkarbid, Titankarbonitrid). Der Metallkarbid- oder -karbonitridanteil wird als  $\alpha$ -Phase bezeichnet. Durch Variation der  $\alpha$ - und  $\beta$ -

Bestandteile lässt ist eine maßgeschneiderte Eigenschaftsprofil des Werkstoffs einstellen. Allgemein unterteilen sich Hartmetalle in drei Zerspanungsanwendungsgruppen (P, K, M). Die P-Gruppe („plastisch“) umfasst die Wolframkarbid-Kobalt-Legierungsklasse, wobei W durch Titan, Tantal oder Niob substituierbar ist. Die P-Gruppe eignet sich vor allem für den Einsatz bei der Zerspanung von langspanenden Eisenwerkstoffen. Die weitgehend von Titan und Tantal freie K-Gruppe („kurzspanend“) besteht primär aus Wolframkarbid-Kobalt-Clustern und wird vor allem für Nichteisenmetalle, Gusswerkstoffe (z. B. Al-Si-Legierungen), Holz und Kunststoffe eingesetzt. Den Übergang zwischen der K- und der P-Gruppe schafft die M-Klasse („Mischgruppe“). Bei der Nomenklatur der Hartmetallwerkzeuge folgt nach dem Kennbuchstaben eine Ziffer. Diese kennzeichnet die Zähigkeit und die Verschleißfestigkeit des Werkstoffs. Auf das Grundmaterial werden Schichtstoffe aus Titancarbid (TiC), Titanitrid (TiN), Titankarbonitrid (TiCN), Titanaluminiumnitrid (TiAlN) oder Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aufgebracht. Für die Bearbeitung von Aluminium sind titanhaltige Hartmetalle aber eher zu meiden, da das Ti eine hohe Affinität zu Al hat und somit Diffusion unvermeidbar ist. Mit WC ist dieser Effekt nicht zu erwarten. Die weiteren Eigenschaften der unterschiedlichen Beschichtungswerkstoffe sind dem Anhang zu entnehmen. [27,32,36,38,39]

Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ist der Hauptbestandteil der gängigen keramischen Werkstoffe in der Zerspanungstechnik. Man unterscheidet dabei zwei Legierungsklassen der Sinteroxide:

- Aluminiumoxide mit geringer Zulegierung von anderen Metalloxiden
- Aluminiumoxide mit einem Anteil von 40-60 % an Metallkarbiden

Keramikwerkzeuge weisen eine hohe Härte sowie große Verschleißbeständigkeit auf. Aufgrund ihres ausgeprägten spröden Verhaltens sind sie jedoch sehr bruchempfindlich. Ihre ausgeprägte Verschleißfestigkeit bedingt ihren Einsatz bei sehr hohen Schnittgeschwindigkeiten und ermöglicht so die Fertigung mit ausgezeichneten Oberflächengüten. Allerdings können sich Probleme über Diffusion einstellen. [28,32]

Diamant weist extrem hohe Bindungs- und Gitterenergien auf und übertrifft dadurch alle bekannten Werkstoffe an Härte und Wärmeleitfähigkeit. Diamantschneidwerkstoffe haben entweder einen mono- oder polykristallinen Aufbau. Die Beschichtung der Grundwerkstoffe erfolgt sowohl mittels PVD- als auch CVD-Verfahren. Werden Diamantschneiden mit Hilfe der CVD-Technologie beschichtet, weisen sie einen niedrigen Reibungskoeffizienten, eine extrem hohe thermische Leitfähigkeit, ausreichende Hochtemperaturfestigkeit, generell höhere Härtewerte und ausgezeichnete chemische Beständigkeit auf. Der große Vorteil bei CVD-beschichteten Schneiden ist die geringe Adhäsionsneigung des Aluminiums auf der Oberfläche, dadurch ermöglicht sich eine Minimalmengenschmierung oder Trockenzerspanung. Zusätzlich reduzieren sie die aufzubringenden Zerspanungskräfte und optimieren die Oberflächenrauigkeit des Werkstückes durch Schlichtbewegungen. Eine Problematik bei der Anwendung ergibt sich aus der relativ geringen Adhäsionsneigung der Beschichtung auf

dem Grundwerkstoff. Etwaige Kollisionen mit festen Phasen mit zu scharfen Werkzeugkanten können zu einem Abplatzen der Beschichtung und somit zu einem frühzeitigen Werkzeugversagen führen. Lösungsansätze bieten sich durch Geometrieänderungen oder Diamantmultilayerbeschichtungen mit höheren Adhäsionswerten. Die polykristallinen Diamantschneiden bestehen aus Partikeln im Mikrometerbereich und entsprechenden Metallbindern. Die bindende Komponente setzt sich häufig aus Übergangsmetallen (z. B. Cu, Ni) zusammen. Der Binderanteil kann bis zu 15 % betragen und hat die Aufgabe, die Zähigkeit der Beschichtung zu erhöhen. Die Herstellung der finalen Schneidwerkzeuge erfolgt über das Aufsintern der polykristallinen Diamantschicht (bei 1.400-2.000 °C und 6-7 GPa) auf Hartmetallsubstrat unter Anwesenheit metallischer Katalysatoren (z. B. Co, Si). Dabei kommt es zur Ausbildung stabiler Diamantbrücken, die dem polykristallinen Körper seine Festigkeit verleihen. Die mechanischen Kenngrößen sind im Gegensatz zu den monokristallinen Schneiden isotrop. Abhängig von den Schnittbedingungen und dem gewählten Werkstoff können PD-Werkzeuge zwischen 40- und 100-mal so effektiv sein als Hartmetallschneiden. Ihre hohen Anschaffungskosten amortisieren sich daher in den meisten Fällen. [32,38]

DLC-Beschichtungen („diamond-like carbon“) kombinieren die Eigenschaften von Kohlenstoff und Diamant in einem Schichtsystem und bieten dadurch eine Reihe von Vorteilen. Aufgrund ihrer geringen Adhäsionsneigung bei Aluminiumwerkstoffen, ihren generell gering ausfallenden Reibwerten, guten Hochtemperatureinsatzmöglichkeiten, ihrer guten Wärmeleitfähigkeit und der geringen Wärmeausdehnung, sowie der hohen Verschleißbeständigkeit bringen DLC-Beschichtungen großes Potenzial im Bereich der Trockenzerspanung mit sich. DLC-beschichtete Schneiden eignen sich besonders gut für Werkstoffe, deren abrasive Eigenschaften im Mittelfeld liegen. [38,40]

Fox-Rabinovich et al. [40] betrachten in ihrer Arbeit verschiedenste Beschichtungen auf Hartmetallsubstraten unter unterschiedlichen Schmierbedingungen zur Zerspanung von B319-Gussaluminium. Untersucht wurden Al<sub>0,7</sub>Cr<sub>0,3</sub>N-, Perfluorpolyether-, hoch wasserstoffhaltige DLC-, niedrig wasserstoffhaltige DLC- und Diamantbeschichtungen. In den Vorversuchsreihen (50 Bohrungen) schnitten die niedrig-wasserstoffhaltigen DLC- und die Diamantschneiden am besten ab, wobei die zweite Beschichtung wesentlich weniger Verschleiß aufwies (siehe Abbildung 3-11). Bei den langfristigen Bohrversuchen versagte die Diamantbeschichtung allerdings wesentlich früher (4.300 statt 7.000 Bohrungen). Die DLC-Schichten zeigten auch unter Minimalmengenschmierung ausgezeichnete Ergebnisse. [40]

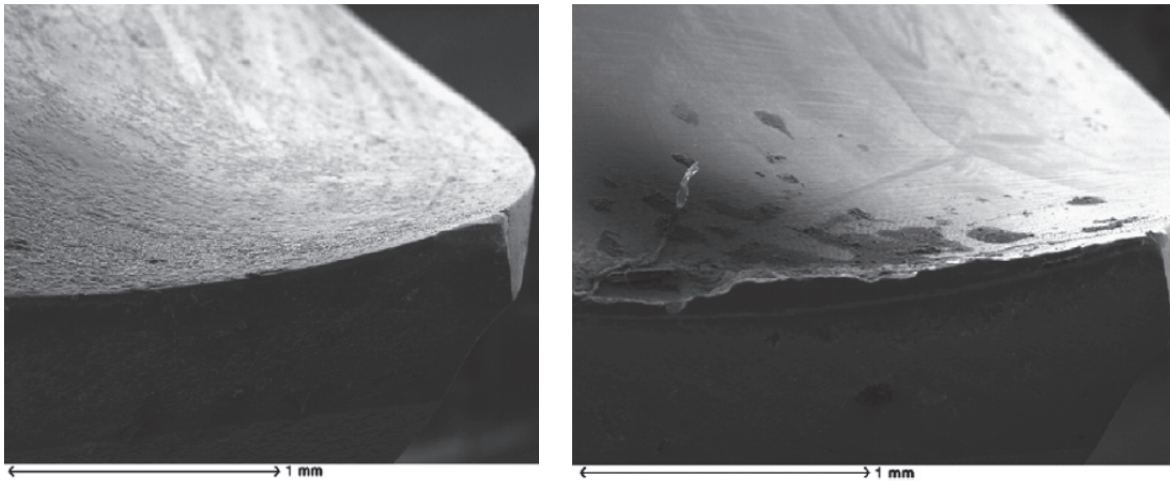


Abbildung 3-11: Rasterelektronenmikroskopaufnahme zweier Schneiden nach dem Bohren von 500 Löchern; (links) Diamantbeschichtung; (rechts) DLC-Beschichtung [40]

### 3.8 Schmier- und Kühlstoffe

Zu den Aufgaben der Kühl- und Schmierstoffe während des Zerspanungsprozesses gehören laut [28]:

- Verminderung des Werkzeugverschleißes
- Erzielung guter Maßgenauigkeit des Werkstückes
- Einstellung optimaler Oberflächengüte
- Unterstützung beim Spanabtransport
- Reduzierung der Wärmebelastung
- Herabsetzen der Zerspanungskräfte

Die Kosten für Schmierstoffe können 15-20 % [39,41,42,93] der Bearbeitungskosten beim Zerspanen ausmachen. Ein zusätzlicher finanzieller Aspekt ist der Werkstoffverschleiß, der bei Zerspanung ohne Schmiermittel signifikant höher ausfällt. Untersuchungen zeigen, dass bei Bearbeiten von Al-Si-Legierungen bei vollen Schmiermitteleinsatz bis zu 10.000 Bohrungen möglich sind, während bei einer Trockenzerspanung ein Versagen nach 30-40 Bohrungen auftritt. Jedoch wirken die meisten Schmiermittel umwelt- und gesundheits-schädlich. Tabelle 3-3 zeigt eine Gegenüberstellung der einzelnen Schmierstoffanwendungen und die dazugehörigen Stoffflüsse. [39,41,42,93]

Tabelle 3-3: Einteilung der Schmierstoffarten [28]

Schmierungsart	Bezeichnung	Verwendete Menge
Nassbearbeitung	Überflutung, Vollstrahlschmierung	10 bis 100 l/min
Reduzierte Schmierung	Minimalmengen- Kühlschmierung	< 50 ml/h
Ohne Schmierung	Trockenbearbeitung	Keine

Wasser hat im Vergleich zu Mineralöl eine größere Wärmeleitfähigkeit und eine höhere spezifische Wärmekapazität. Die eingesetzten Öle und Additive haben die Aufgabe, die Reibung während des Zerspanungsprozesses zu minimieren. Gegenwertig erfolgt primär der Einsatz von Emulsionen aus wassermischbaren Mineralölen und Wasser. Der Anteil an Mineralöl beträgt dabei 5-7 %. Die Auswahl des geeigneten Kühlschmierstoffes richtet sich dabei nach der Bearbeitungsaufgabe und eventuell angegebenen Maschinenhersteller-richtlinien. [28]

Die Trockenzerspanung entstand aus dem Anliegen der Industrie den Schmiermitteleinsatz aus ökonomischen und ökologischen Gründen zu reduzieren. Neben dem hohen Werkzeugverschleiß, der herabgesetzten Oberflächenqualität und der erhöhten Wärmeentwicklung, ergibt sich dabei eine vermehrte Staubbelastung, die ebenfalls gesundheits-schädliche Einflüsse haben kann. Die Problematik der Adhäsion des Grundwerkstoffs auf dem Schneidwerkzeug ist speziell bei Aluminiumlegierungen als Aufbauschneiden bekannt. Bei zu hohen Temperaturen während dem Zerspanungsprozess kann es zu Diffusionserscheinungen kommen. Um den negativen Effekten bei der Trockenzerspanung entgegenzuwirken, obliegt es dem Techniker die Werkzeuggeometrie und die Schnittparameter optimal anzupassen. [94-96]

In geringem Maße kann die Adhäsion durch spezielle Materialien vermieden werden (z. B. DLC-beschichtete Schneidwerkzeuge), aber eine geringe Menge an Schmiermittel ist meist notwendig. Bei der sogenannten Minimalmengenschmierung erfolgt die Pulverisierung einer kleinen Menge Öl und dessen feine Verteilung in einem Luftstrom. Bei bestimmten Verfahren kommt zusätzlich Wasser zum Einsatz, um eine gleichmäßigere Verteilung des Schmierfilms und zusätzliche Kühlung zu garantieren. Bei Bohrungen kann mit dieser Technologie sogar mit unter bessere Ergebnisse erzielt werden als bei gewöhnlichem Schmiermitteleinsatz. [39,40,42,97,98]

## **4 Eloxieren**

Der Begriff Eloxieren steht für die elektrolytische Oxidation von Aluminium und beschreibt den elektrochemischen Prozess zur Herstellung relativ dicker, harter Oxidschichten auf Aluminiumsubstrat. Der dadurch generierte Schutz gegen Korrosion und Verschleiß ermöglicht ein weitaus größeres Einsatzgebiet der beschichteten Bauteile. Zusätzlich bietet sich durch das sogenannte dekorative Eloxal eine Modifikation des optischen Erscheinungsbildes (z. B. Färben, Mattieren). Das Anodisieren selbst ist seit den frühen 1920er Jahren bekannt, zur industriellen Anwendung gelangte das Verfahren allerdings erst zwanzig Jahre später. Heute gängige Prozesse arbeiten mit Schwefel-, Chrom- oder Oxalsäure als Elektrolyt. Eloxieren werden dabei kleinste Massenwaren (Kletterkarabiner) bis hin zu großen Flugzeugbestandteilen (Fahrgestelle, Flügel). Generell weist Aluminium aufgrund seiner



dichten Oxidschicht eine gute Beständigkeit gegenüber atmosphärischen Angriffen auf. Diese natürlich gewachsene Oxidhaut ist ca. 25 Å [46] dick und in ihrer Beschaffenheit von den Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit) abhängig. Die anodische Oxidation zielt auf die Herstellung wesentlich dickerer Schichten ab, welche in Sonderfällen bis zu 100 µm erreichen. Durch die erhöhte Korrosionsbeständigkeit stellen dann sogar maritime und industrielle Umgebungen kein Problem für die Anwendung der Bauteile dar. Zudem ergibt sich, wie zuvor erwähnt, über die erhöhte Härte der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Schicht ein Schutz gegen Verschleiß und Abrasion. Die isolierende Wirkung des Aluminiumoxids ermöglicht weiters einen gezielten Einsatz in der Elektronikindustrie. [8,43,45-47]

## 4.1 Grundprinzip der Anodisation

Befindet sich Aluminium in einen entsprechend leitfähigen Elektrolyten und erfährt elektrische Polarisierung, gehen negativ geladenen Anionen in Lösung und begeben sich zur Anode. Diese entlädt sich über den Verlust von Elektroden. In wässriger Lösung bestehen diese negativen Ladungsträger meist aus Sauerstoff, welcher an der Anode mit dem Aluminium reagiert und das Metalloxid bildet. Formel (2) beschreibt die anodische Auflösung des Metalls (Kationenbildung) [6,48]:



Wodurch sich folgende Reaktion (3) mit dem negativen Sauerstoffkation ergibt:



Die resultierende Nettoreaktion der anodischen Oxidation lautet:



Das entstehende Aluminiumoxid bildet zu Beginn eine dichte Sperrschicht, welche in ihrer Dicke proportional zur Spannung ist. Nach Erreichen eines bestimmten Widerstands durch die Isolierwirkung des Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> beginnt das Wachstum des porösen Oxids. Dabei entstehen gleichmäßige, zylindrische Poren, welche im Idealfall der hexagonal dichtesten Kugelpackung entsprechen (siehe Abbildung 4-1). [6,49]

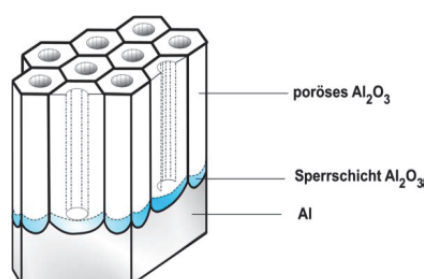


Abbildung 4-1: Schematischer Aufbau einer elektrolytisch hergestellten Oxidschicht [49]

Bei Betrachtung der Stromdichte über die Eloxalzeit wird gezeigt, dass sich der Prozess in einzelne Teilbereiche untergliedert (siehe Abbildung 4-2). Zu Beginn wächst die Sperrschicht (Bereich I), die Stromdichte sinkt dabei rapide ab. Im Bereich II entstehen die ersten Poren und es kommt zu einer Kehrtwende im Stromverlauf. Das Plateau im Bereich III beruht auf dem weiteren Porenwachstum. Unter IV stellt sich dann der finale Gleichgewichtszustand zwischen dem Porenwachstum und der Rücklösung des Oxids im Elektrolyten ein. [50]

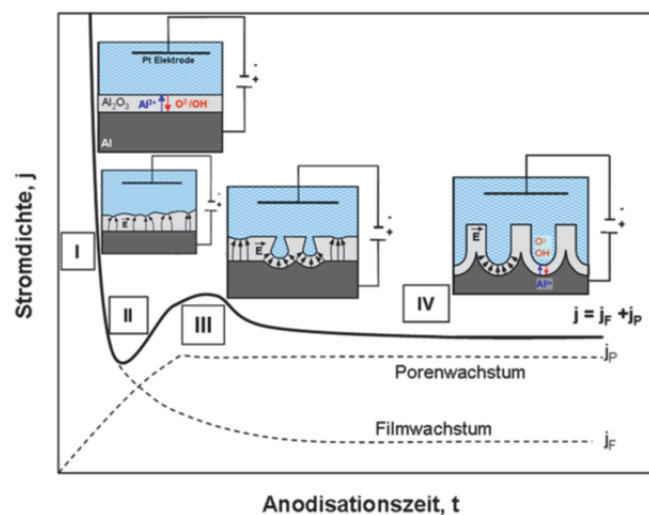


Abbildung 4-2: Prinzipieller Verlauf der Stromdichte während einer anodischen Oxidation in Schwefelsäure mit den entsprechenden Bereichen des Porenwachstums [50]

Das eigentliche Schichtwachstum ereignet sich dabei am Porengrund. Der äußere Bereich ist länger dem aggressiven Medium ausgesetzt, daher meist weicher und weist einen höheren Porendurchmesser auf. Auch wenn der eigentliche Bildungsmechanismus noch nicht vollständig geklärt ist, gehören die plastische Verformung aufgrund von sogenannten Oxidationsspannungen zu einer der neuesten und gängigsten Theorien. Çapraz et al. [51] behandeln in ihrer Arbeit die Oxidationsspannungen, welche sich als Druckspannungen im Oxid abbilden und mit der verwendeten Stromdichte ansteigen. Generell wird postuliert, dass die höchsten elektrischen Spannungen im Porengrund vorliegen und daher ein spannungsinduzierter Ionentransport in Verbindung mit viskosem Fließen entlang der Porenwände als möglich gilt. Gezielte Spannungsmessungen beim Auflösen eines zuvor generierten Oxides haben gezeigt, dass an beiden Grenzflächen Spannungen herrschen. Elastische Druckspannungen sind dabei vor allem wenige Nanometer entfernt von der Oxid-Elektrolyt-Grenzschicht zu verzeichnen. Eine ältere Theorie besagt, dass die Porenbildung durch die Durchlöcherung der Sperrschicht anhand des Stromflusses erfolgt. Dabei soll unter der porösen Struktur eine neue Sperrschicht wachsen. In der Theorie von Keller et al. [6] erfolgt der Stromtransport in den mit Elektrolyt angefüllten Poren zum Porengrund. Dort fließt er durch das feste Oxid der Sperrschicht weiter und führt durch den hohen Widerstand dieser Barriere zu einer starken Erwärmung. Der Auflösungsprozess wird durch die reaktive

Elektrolytflüssigkeit zusätzlich begünstigt und die Pore kann dadurch weiter nach unten wachsen. Die Größe der Poren ist dabei vom verwendeten Elektrolyten abhängig, aber korreliert nicht mit der angelegten Badspannung. Die Dicke der Porenwände und der Grundsicht korrelieren dieser Ausführung nach mit der angelegten Spannung. [6,51,52]

## 4.2 Einflussfaktoren

Der Erfolg einer Eloxierung wird von vielen Parametern beeinflusst. Grob lassen sich diese in material- und prozessbezogene Faktoren unterteilen. Erstere beziehen sich auf alle Eigenschaften, die mit zu anodisierendem Substrat zusammenhängen. Dazu gehören die Legierungs- und Verunreinigungselemente des Aluminiums und ihr Vorkommen in der Matrix als Mischkristall, Ausscheidung oder Sekundärphase. Eine Übersicht der verschiedenen Aluminiumlegierungen und ihrer Eloxierbarkeit ist im Anhang angeführt. Dem Wärmebehandlungszustand des Werkstoffs kommt deshalb auch eine große Bedeutung zu. Außerdem entstehen Variationen über die unterschiedlichen Herstellungsverfahren, Verformungsgrade oder Kornstrukturen. So kann beispielsweise das ausgewählte Gussverfahren (z. B. Sand-, Kokillen oder Druckguss) über die Gleichmäßigkeit und Dicke der Eloxierschicht bestimmen. Problematisch ist dabei zum Beispiel die hohe Oberflächenporosität des Sandgusses, welche zu sogenannten Ausschwitzungen des Elektrolyten führen kann und damit die Eloxierung unbrauchbar macht. Der Druckguss wiederum erzeugt sehr glatte Oberflächen, hier können allerdings Pressriefen zu optisch-ästhetischen Problemen führen. [53]

### 4.2.1 Prozessparameter

Zu den wichtigsten Prozessparametern bei der Eloxierung zählen die Stromdichte, Elektrolyttemperatur, Behandlungszeit und die Reaktivität bzw. Zusammensetzung des Elektrolyten. Die Stromdichte ist naturgemäß mit der beaufschlagten Spannung verknüpft und entscheidend über die Geschwindigkeit des Schichtwachstums, die Temperaturentwicklung am Bauteil und das Auflösen des Metalls im Elektrolyten. Große Unterschiede in der Stromdichte ergeben sich beim dekorativen Anodisieren gegenüber den Harteloxal. Zweiteres benötigt wesentlich höhere Stromdichten ( $> 2 \text{ A/dm}^2$ ), um die geforderten harten und weniger porösen Schichten zu generieren. Die Elektrolyttemperatur entscheidet über dessen Leitfähigkeit und die Auflösung des Metalls in ihm. Daraus ergibt sich ein Zusammenhang mit der Porosität der Schicht sowie ihrer Schutzwirkung gegenüber mechanischem Verschleiß. Außerdem können die für nanotechnologischen Anwendungen wichtigen, hochgeordneten Porenstrukturen nur bei niedrigen Temperaturen (0-5 °C) entstehen. Die herkömmliche dekorative Anodisation läuft hingegen bei Raumtemperatur oder darüber (meist 22 °C). Wichtig bei der Betrachtung der Elektrolyttemperatur ist auch

ihre Homogenität über das gesamte Behandlungsbecken. Nur eine ausreichende Rührung bzw. Umwälzung ermöglicht einen gleichmäßigen Eloxiererfolg, da lokale Überhitzungen zu fatalem Versagen, wie dem sogenannten „Burning“ führen können. Die Zusammensetzung des Elektrolyten ist, wie bereits zuvor erwähnt, für die Form der Oxidschicht ausschlaggebend. Während die Eloxierung mit Schwefelsäure eine gleichmäßige Porenstruktur mit kleinen Durchmessern in Kombination mit einem relativ schnellen Schichtwachstum ermöglicht, bildet sich bei der Chromsäure-Anodisation eine wenig poröse und eher dünne Schicht aus. Entscheidend ist dabei die Reaktivität oder das Lösungspotenzial des Elektrolyten bezüglich des gebildeten Aluminiumoxids. Elektrolyte wie Weinsäure, mit einer verschwindend geringen Oxidlöslichkeit, bilden keine porösen, sondern sehr dünne, dichte Schichten aus. Einige der wichtigsten Zusammenhänge zwischen Betriebsbedingungen und ihren Effekten auf die Eloxierung sind unter Tabelle 4-1 zu finden. [6,48,54,55]

Tabelle 4-1: Zusammenhänge zwischen Betriebsbedingungen in der Eloxierung und ihre Auswirkungen auf das Eloxalergebnis [48]

Veränderung in den Betriebsbedingungen	Weichheit, Porosität, Elastizität, Absorptionsfähigkeit der Eloxierschicht	Schutzwirkung der Eloxierung	Löslichkeit des Metalls im Bad
Zunahme der Elektrolyttemperatur	Zunahme	Abnahme	Starke Zunahme
Zunahme der Reaktivität des Elektrolyten	Zunahme	Abnahme	Zunahme
Zunahme der Stromdichte	Abhängig von Temperatur und Badumwälzung		Abnahme, falls eine ausreichende Badumwälzung stattfindet
Geringere Behandlungszeit (bei gleichbleibender Stromdichte)	Geringe Zunahme	Zunahme	Zunahme
Wechselstrom anstatt Gleichstrom	Zunahme	Abnahme	Zunahme

Abbildung 4-3 zeigt den Zusammenhang zwischen Stromdichte, Spannung, Legierungs-klasse und Badumwälzung. Dabei wird deutlich, wie sehr sich eine unzureichende Zirkulation des Elektrolyten auf die Effektivität des Prozesses auswirken kann. Bei der Spannung gilt, dass geringere Werte eher klarer und dekorativ hochwertige Schichten produzieren. Höhere Stromdichten sind vor allem dann notwendig, wenn die Auflösung durch einen stark reaktiven Elektrolyten eingegrenzt werden muss. Die Spannung, welche notwendig ist, um die entsprechende Stromdichte aufrecht zu erhalten, ist sowohl von der jeweiligen Legierung als auch von dem Elektrolyten abhängig und liegt üblicherweise zwischen 10 und 20 Volt. Im Vergleich zu Reinaluminium benötigen Zn- oder Zn-Cu-haltige Legierungen niedrigere, während Si-haltige Werkstoffe höhere Spannungen. Diese Materialien dürfen niemals

zusammen eloxiert werden. Die Spannung variiert auch mit dem gelösten Aluminiumgehalt im Elektrolyt. Die spezifische Abrasionsbeständigkeit einer Eloxierung nimmt mit der aufgewendeten Spannung zu. Beim Harteloxal liegt sie beispielsweise 2-3 mal so hoch wie bei dekorativen Eloxal. [6,48]

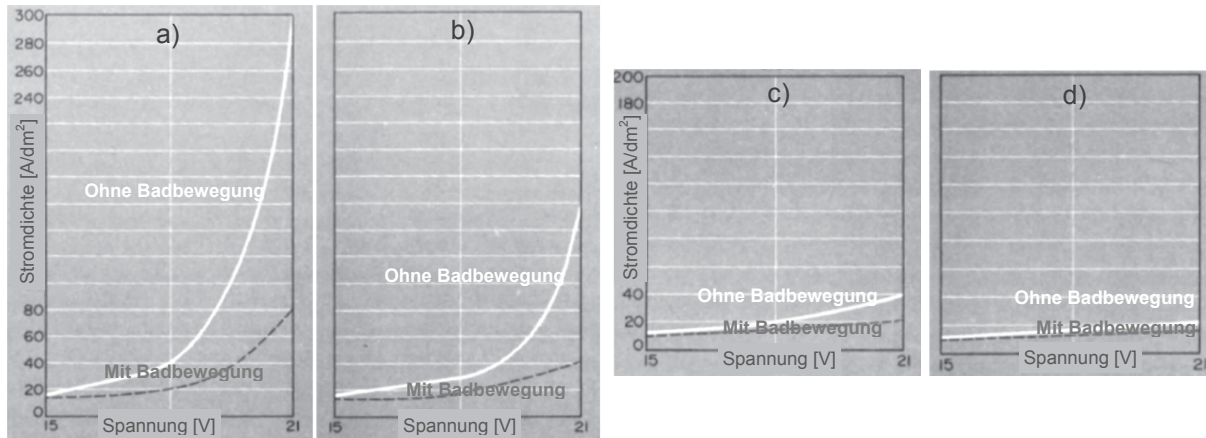


Abbildung 4-3: Darstellung des Stromdichte-Spannungsverlaufes mit oder ohne Rührung des Elektrolyten für vier unterschiedliche Aluminiumlegierungen (a) Hochreines Aluminium (b) 6063 (c) 3103 (d) 2014A [48]

Der Behandlungszeitraum richtet sich nach der gewünschten Schichtdicke, wobei folgende Faustformel für Reinaluminium gilt [48]:

$$\text{Schichtdicke } [\mu\text{m}] = \frac{\text{Stromdichte } \left[ \frac{\text{A}}{\text{dm}^2} \right] \cdot \text{Zeit } [\text{min}]}{3} \quad (5)$$

Also wächst die Schicht bei einer Stromdichte von  $1,5 \text{ A/dm}^2$  um  $0,5 \mu\text{m}$  pro Minute. Dies gilt allerdings nur für Reinaluminium und variiert mit dem Grundmaterial und den angewendeten Prozessbedingungen. Der daraus resultierende Wachstumskoeffizient nimmt mit steigender Temperatur und zunehmender Säurekonzentration ab. Bei den meisten Legierungen ist er ohnehin geringer als bei Reinaluminium. Gelten gleiche Bedingungen, so kann beispielsweise die Oxidschicht auf einer kupferhaltigen Legierung fast um die Hälfte dünner sein als die auf unlegiertem Aluminium. Der Wachstumskoeffizient ergibt sich dabei aus dem Gewicht der Oxidschicht bezogen auf die Masse des gelösten Metalls. Ein niedriger Koeffizient bedeutet, dass ein Großteil des Stromes in die Auflösung des Materials und die damit einhergehende Porenbildung geflossen ist. Abbildung 4-4 (a) zeigt wie stark die Schichtbildung von der Temperatur des Elektrolyten abhängig ist. Bei  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  kann unter den gegebenen Bedingungen so gut wie kein Schichtwachstum mehr erfolgen, die Rücklösung erfolgt fast zeitgleich. In Abbildung 4-4 ist ein ähnlicher Verlauf dargestellt, wobei hier die Wirkung der zunehmenden Säurekonzentration ausschlaggebend ist. [6,48]

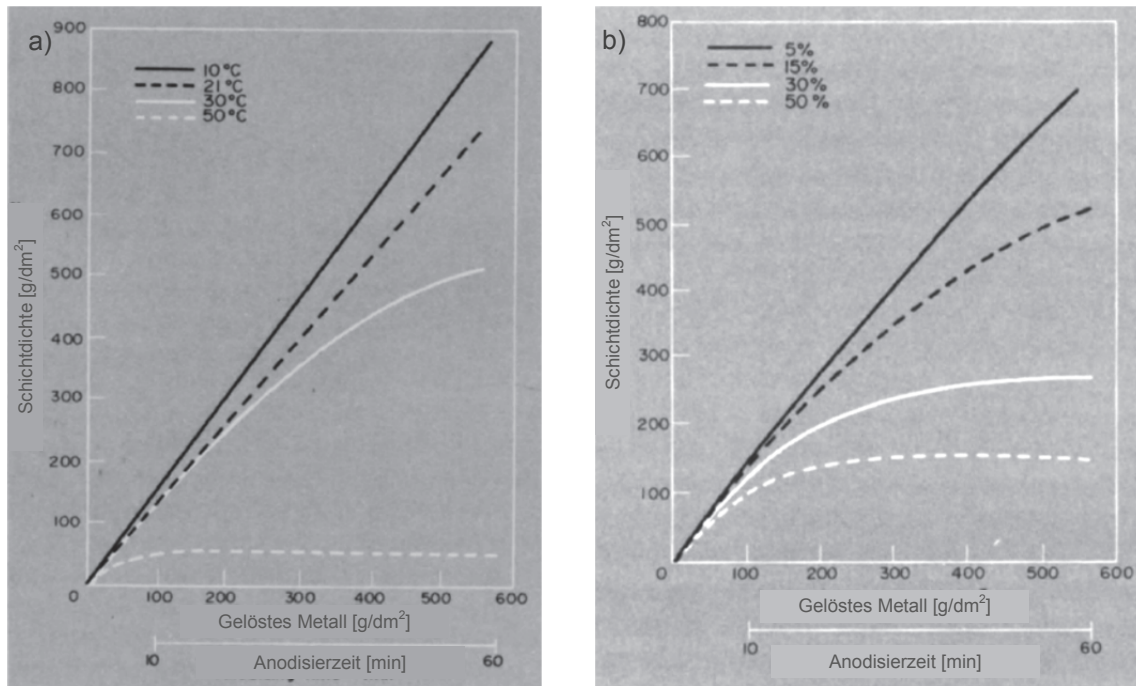


Abbildung 4-4: Darstellung des Zusammenhangs zwischen Oxidgewicht, gelöstem Material und Anodisierzeit bei (a) unterschiedlichen Elektrolytttemperaturen (b) unterschiedlichen Säurekonzentrationen [48]

In der Arbeit von Aerts et al. [54] ergab eine Variation der Elektrolytttemperatur zwischen -5 und 5 °C nur wenig Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit der unter 4 A/dm<sup>2</sup> hergestellten Schichten. Erst zwischen 5-15 °C zeigten sich leichte und zwischen 15-30 °C stärkere Abnahmen in der Verschleißbeständigkeit (siehe Abbildung 4-5, links). Bei einer Betrachtung der Schichthärte im Querschnitt zeichnet sich lediglich bei 0 °C Elektrolytttemperatur ein gleichmäßiges Bild, bei höheren Temperaturen kommt es zur Ausbildung von Gradienten. Die durchschnittlichen Härtewerte sind Abbildung 4-5 (rechts) zu entnehmen. Als verantwortlich für den graduellen Härteverlauf zählt die gestiegenen Aggressivität des Elektrolyten und die damit einhergehenden außenseitige Oxidauflösung. Der Porendurchmesser am Grund ist dabei generell konstant, während es nach außen hin zu einer konischen Aufweitung der Poren, vor allem bei erhöhten Elektrolytttemperaturen, kommt (Abbildung 4-6). [54]

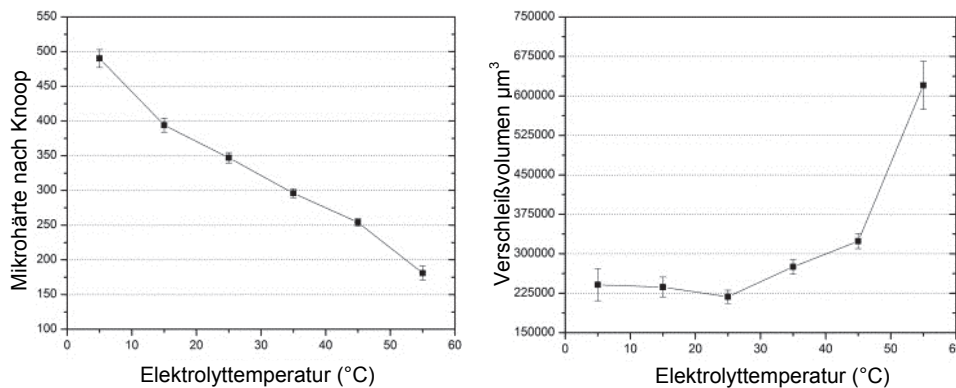


Abbildung 4-5: Auswirkung von Elektrolytttemperatur auf die Mikrohärte und Verschleißbeständigkeit von Eloxierschichten [54]

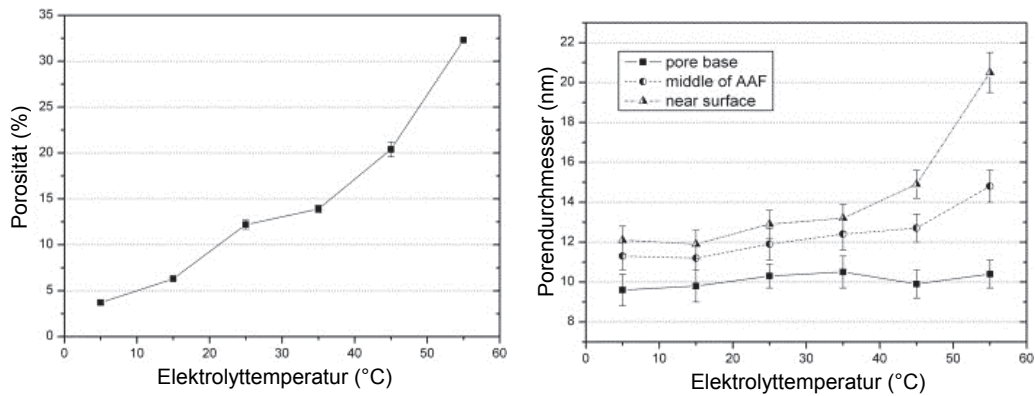


Abbildung 4-6: Darstellung der Auswirkung von Elektrolyttemperatur auf die Porosität und den Porendurchmesser von Eloxierschichten [54]

## 4.2.2 Die chemische Vorbehandlung

Primäre Zielsetzungen der chemischen Vorbehandlung sind die gründliche Reinigung der Oberfläche von Verschmutzungen, Ölen und Fetten und zudem die Entfernung der natürlich gewachsenen Oxidschicht. Diese ist wenige Nanometer dick und besteht aus 20-30 Moleküllagen Aluminiumoxid. Der allgemeine Reinigungsschritt erfolgt dabei oftmals in basischen, industriell hergestellten Elektrolyten und sorgt für eine partikel- und fettfreie Grenzschicht mit gleichmäßigen Benetzungseigenschaften. Das nachgeschaltete Beizen arbeitet meist auf der Basis von Natronlauge. In einigen Spezialfällen kommen auch Säuren mit erhöhten Badtemperaturen zum Einsatz. Eine Kombination aus basischer und saurer Beizung, auch Dekapierung genannt, ermöglicht zudem den optimalen Abtrag von während der Natronlaugeätzung gebildeten Niederschlag (Cu, Si). In Abbildung 4-7 ist die Beständigkeit der Aluminiumoxidschicht gegenüber verschiedenen Medien als Metallabtragsrate über den pH-Wert dargestellt. Die blau markierten Substanzen gehören dabei zu den am häufigsten eingesetzten Beizmitteln. [6,65]

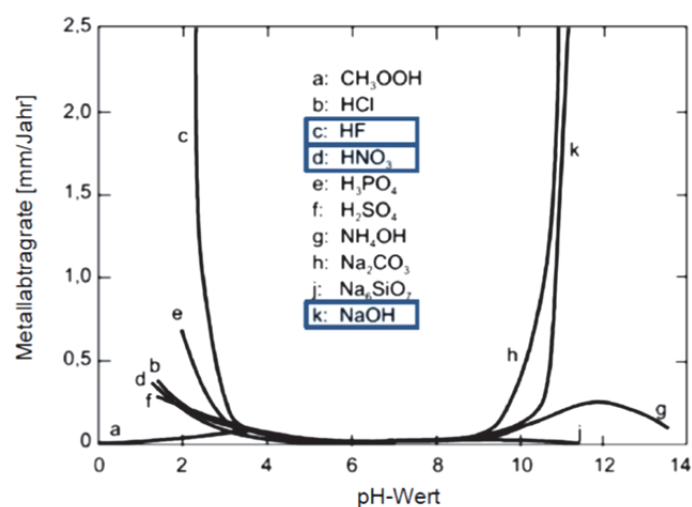


Abbildung 4-7: Darstellung der Beständigkeit von Aluminiumoxid in verschiedenen Medien mit unterschiedlichen pH-Werten [6]

Die häufig eingesetzte Natronlauge ist in ihrer Wirkung auf das Oxid nicht nur von der Konzentration, sondern auch von der Temperatur abhängig (siehe Abbildung 4-8). [6,56]

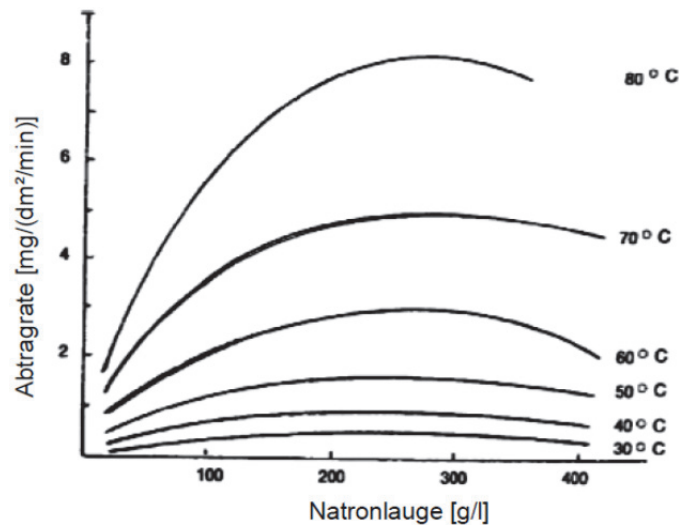


Abbildung 4-8: Darstellung der Oxidabtragrate von NaOH in Abhängigkeit von der Elektrolyttemperatur [6]

Zudem ist die Beizrate über die Anwesenheit von Legierungselementen gesteuert. Entscheidend dabei ist deren elektrochemischer Potenzialunterschied im Vergleich zur Aluminiumgrundmatrix. [56]

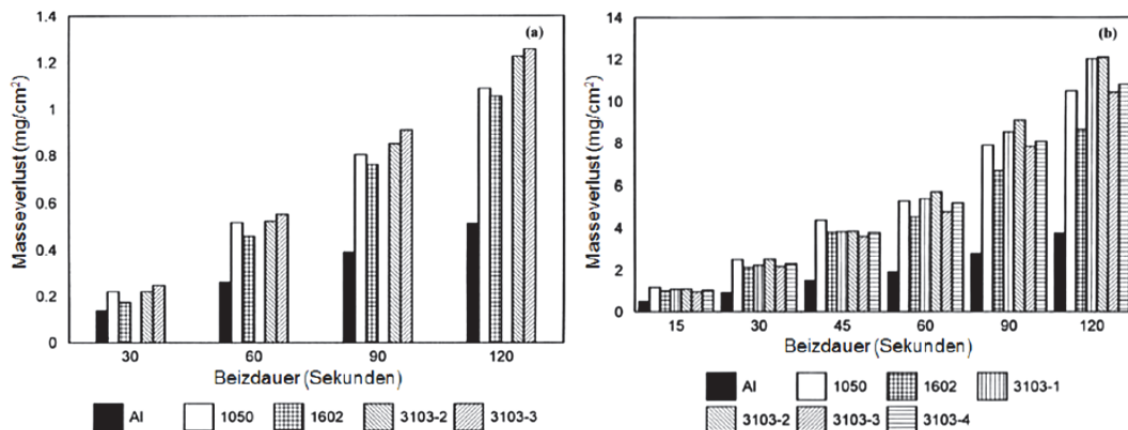


Abbildung 4-9: Darstellung unterschiedlicher Abtragraten in 1,5 molarer NaOH-Lösung mit anschließendem Dekatpieren in 50 %iger HNO<sub>3</sub>-Lösung für unterschiedliche Legierungen und bei (a) 40 °C bzw. (b) 80 °C [57]

Die durch das Ätzen generierten Oberflächen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Morphologie und vor allem der Dichte und Tiefe der sogenannten Ätzgrübchen (siehe Abbildung 4-10). Diese gelten in späterer Folge als häufige Ausgangspunkte für das Versagen bei Kriechversuchen. Weiters kann es je nach eingesetzter Legierung zu unterschiedlichen Elementrückständen kommen, die das Eloxalergebnis mehr oder weniger stark beeinflussen. [57,58]



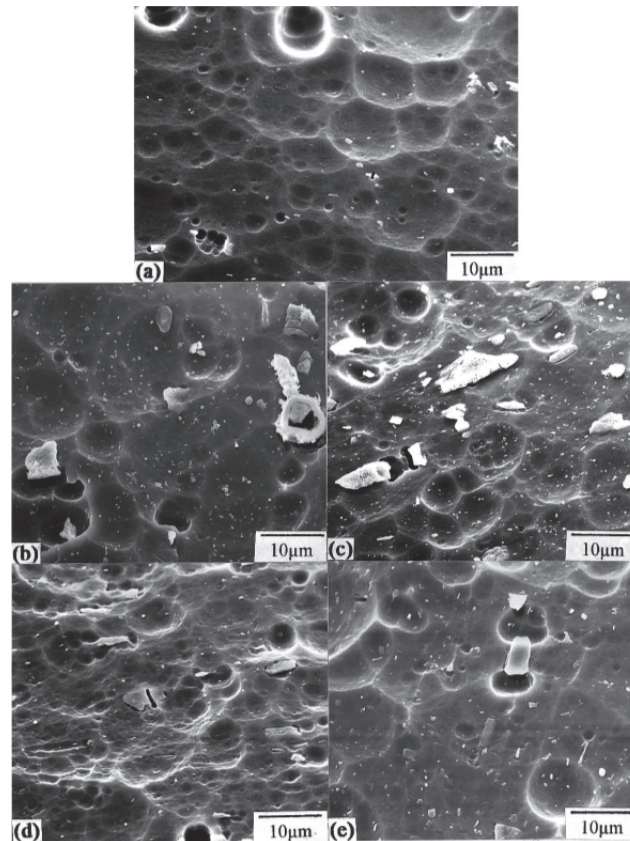


Abbildung 4-10: Rasterelektronenmikroskopaufnahme verschiedener Legierungen nach dem einminütigen Ätzen mit NaOH bei 80 °C und anschließendem Dekapieren in HNO<sub>3</sub>: (a) 1050, (b) 3103-1 mit hohem Cu-Gehalt, (c) 3103-2, (d) 3103 mit niedrigem Si-Gehalt, (e) 3103-4 mit niedrigem Si-Gehalt und hohem Cu-Gehalt [57]

### 4.2.3 Einfluss von Legierungs- und Verunreinigungselementen

Legierungselemente im Aluminium können, wie bereits zuvor erwähnt, im Mischkristall gelöst sein oder als intermetallische Verbindungen bzw. Ausscheidungen vorliegen. Entscheidend für das Eloxalergebnis ist, wie sich diese während der Oxidbildung verhalten. Dabei kommt es entweder zu einer vollständigen, teilweisen oder keiner Oxidation. Im letzten Fall ist die Phase einfach im Aluminiumoxid eingebettet bzw. davon umwachsen oder fällt aus dem Kontinuum aus und gelangt in den Elektrolyten. Weiters können sowohl Fremdelemente als auch ihre Oxide im Elektrolyt löslich sein und führen dementsprechend zu Hohlräumen in Eloxalschichten. Zudem reichern sich einige der löslichen Elemente unter der Aluminiumoxidschicht an und werden erst nach dem Erreichen einer Sättigungskonzentration mitoxidiert. Die physikalischen und chemischen Hintergründe dieser Effekte sind im Folgenden dargestellt. [8,45,59,60-63,70,71]

#### 4.2.3.1 Anreicherungsschichten

Die Anreicherung passiert in einer Bereich von 1-5 nm Dicke, direkt unter der Eloxierschicht und fällt abhängig von der Legierungszusammensetzung unterschiedliche hoch aus. Welche Elemente sich anreichern entscheidet die Freie Gibbs'sche Energie ihrer Oxide (siehe

Abbildung 4-11). Wenn das Oxidformungspotenzial edler ist, als das von Aluminium, bildet sich eine dünne Subschicht und es kommt im ersten Stadium zur ausschließlichen Aluminiumoxidation. Erst nach Erreichen einer bestimmten, element- und konzentrations-abhängigen Sättigung (typischerweise zwischen  $10^{15}$ - $10^{16}$  Atome pro  $\text{cm}^2$ ) erfolgt die Mitoxidation des Legierungspartners. Dabei entspricht der Elementgehalt im Oxid allgemein dem in der Legierung, während sich die Anreicherung konstant hält. [64,65]

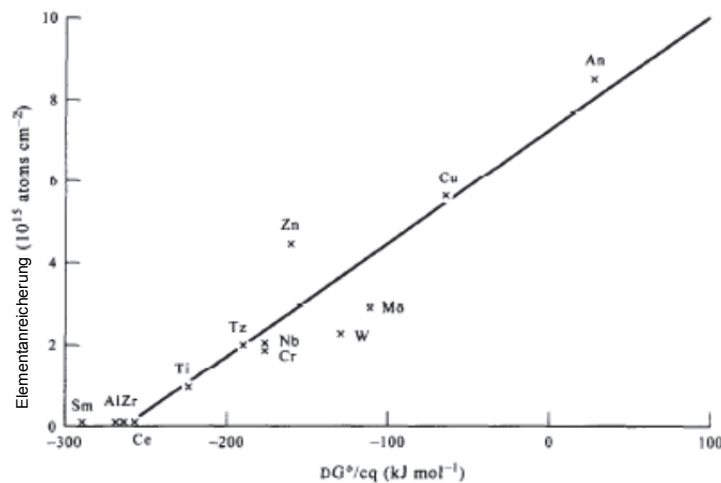


Abbildung 4-11: Variation der Anreicherung der Legierungselemente mit der Freien Gibbs-Energie für die Bildung der Legierungselementoxide bei der Anodisierung mit  $5 \text{ A/dm}^2$  in  $0,01 \text{ M}$  Ammoniumpentaborat bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die entsprechenden Oxide sind:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Au}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{ZnO}$  und  $\text{ZrO}_2$  [64]

In Abbildung 4-2 sind einige Gibbs-Energien für gängige Legierungselemente angeführt. Dadurch kann abgeschätzt werden, ob es bei diesen Elementen zur Anreicherung kommen kann.

Tabelle 4-2: Verschiedene Gibbs-Energien für die Oxidbildung [66]

Verbindung	G [kJ/mol bei RT]
$\text{Al}_2\text{O}_3$	-1.690,879
$\text{ZrO}_2$	-1.112,477
$\text{TiO}_2$	-959,741
$\text{CuO}$	-950,989
$\text{NbO}_2$	-811,214
$\text{Bi}_2\text{O}_3$	-619,051
$\text{MgO}$	-609,268
$\text{MoO}_3$	-602,737
$\text{ZnO}$	-363,471
$\text{SnO}$	-302,611
$\text{PbO}$	-283,545

Durch die Bildung von Anreicherungsschichten kann es zu unterschiedlichen Problemen kommen. Bekannt ist, dass verschiedene Sublayer eine Störung der Bindung zwischen Aluminiumoxid und -metall auslösen und so zum teilweisen Abplatzen der Eloxierschicht beitragen. Zudem erzeugen die verschiedenen Gitterparameter der Oxide eine weitere

Quelle für Eigenspannungen. Bei der, nach dem Erreichen einer bestimmten Sättigungskonzentration in der Anreicherungsschicht, parallel ablaufenden Oxidation bilden sich für bestimmte Elemente sogenannte Clusterstrukturen, wodurch wiederum die Korrosionsbeständigkeit der Schicht sinkt. Einige der anreichernden Elemente bilden Halbleiteroxide, welche die Bildung von Sauerstoffblasen und das damit einhergehenden Aufplatzen der Schicht begünstigen. So variiert beispielsweise die Morphologie der auf hochkupferhaltigen Legierungen gebildeten Oxidschichten stark von jenen, die auf reinem Aluminium gewachsen sind. Die entstandenen Oxidschichten sind dabei weniger hochstrukturiert und weisen oft eine zelluläre bis clusterförmige Variation der Kupferkonzentrationen auf. Die entstehende Porenstruktur ist dabei stark unregelmäßig und verläuft kaum linear. Der bei hochkupferhaltigen Legierungen entstehende Anreicherungsschicht hat mitunter eine Cu-Konzentration bis zu 40 at.-% und ist typischerweise 2 nm dick. Bei der Integration der  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen in die Schicht, bleibt deren durchschnittliche Konzentration in der Anreicherungszone konstant. Da das gebildete  $\text{Cu}_2\text{O}$  ein Halbleiter ist, kommt es zur Entstehung von Sauerstoffblasen. Herrscht in diesen ein entsprechender Gasdruck platzen sie auf. Die  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen diffundieren zudem bis zu 3-mal so schnell wie die  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen und sind daher nur im verringerten Ausmaß im Oxid enthalten. Neben der Anreicherung beim eigentlichen Eloxieren, kann es auch bei Vorbehandlungen wie dem chemischen Ätzen zu diesem Effekt kommen, wobei eine solche Vorschaltung in manchen Fällen bessere Eloxalergebnisse bewirkt. [59,60,64,99,100]

#### 4.2.3.2 Sekundärphasen

Werden Sekundärphasen während der Eloxierung nicht mitoxidiert, erfolgt oftmals eine Einbettung in das Aluminiumoxid. Dadurch erfolgten allerdings häufig die Ausbildung einer inneren Spannung und Initiierung von Rissen, die wiederum als lokale Korrosionsstellen in der späteren Anwendung fungieren können. Wichtige Beispiele solcher Sekundärphasen sind eisenhaltige intermetallische Verbindungen. Typische Fe-haltige Verunreinigungen in 7075-Legierungen bestehen aus Silizium, Mangan und Eisen und überstehen die konventionelle Schwefelsäure-Oxalsäure-Anodisierung. Diese  $\text{Al}_{12}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}$ -basierenden Partikel werden in die Oxidschicht eingebettet und führen daher zu einem sehr starken Anstieg der Spannung und einem ungleichmäßigem Schichtwachstum. Generell gilt dieser Effekt als weniger gravierend, wenn diese Teilchen parallel zur Wuchsrichtung des Oxides angeordnet sind. Mukhopadhyay et al. [8,12] rät in seinen Arbeiten sogar zur Verwendung eines aggressiveren Elektrolyten (mit Salzsäurebeimengung), um die Auflösung der Partikel während des Eloxierprozesses zu ermöglichen. Die meisten eisenhaltigen Verunreinigungen liegen als sogenannte „Stringers“ vor, also in linearer Anordnung. Diese Formation ergibt sich, weil größere Partikel während der Umformung zerbrechen und sich entlang der

Extrusionsrichtung anordnen. Wie zuvor erwähnt, führen Teilchen die parallel zur Oxidwuchsrichtung vorliegen, zu weniger Schichtbeeinträchtigungen. [8,12,47,61,69-71]

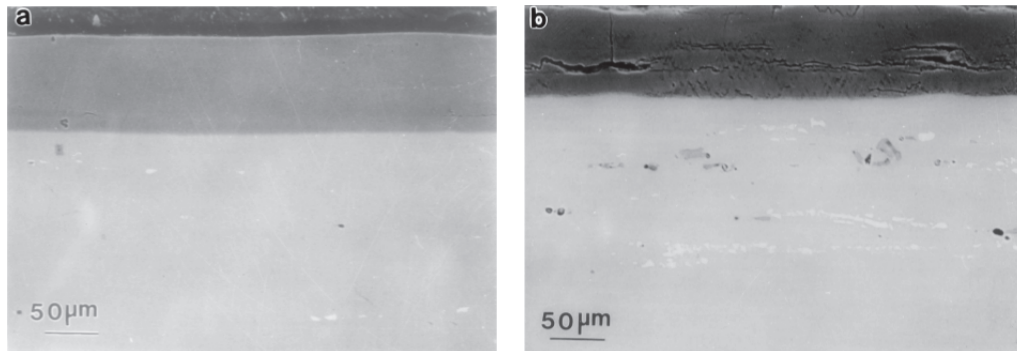


Abbildung 4-12: Vergleich zweier Eloxierschichten, wobei Legierungen mit unterschiedliche hohen Gehalten an Fe als Substrat dienen (a) 0.05 Gew.-% Si, 0.04 Gew.-% Mn und 0.18 Gew.-% Fe (b) 0.27 Gew.-% Si, 0.25 Gew.-% Mn und 0.25 Gew.-% Fe [12]

Ein vor allem in Gusslegierungen sehr häufiges Legierungselement ist Silizium. Generell werden Si-Partikel in die Oxidschicht eingebettet und sorgen dort, abhängig von ihrer Größe, Verteilung und Morphologie für Rissstrukturen (siehe Abbildung 4-13). [61,62,70-72]

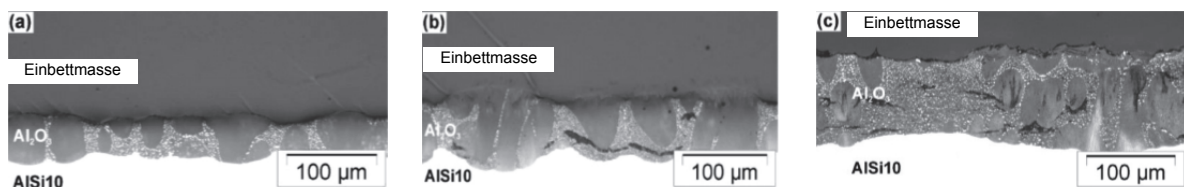


Abbildung 4-13: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Querschliffen unterschiedlicher Oxidschichten auf AlSi10,  $6,0 \text{ A/dm}^2$  ( $2,25 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ ,  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , 50 min.) nach unterschiedlichen Eloxierzeiten von (a) 16 min., (b) 28 min. und (c) 50 min. [61]

Fratila-Apachitei et al. zeigen in ihrer Arbeit [61] die Abhängigkeit unterschiedlicher Filmparameter (z. B. Sperrschichtdicke) von der chemischen Zusammensetzung und speziell dem Siliziumgehalt der eingesetzten Legierungen (siehe Tabelle 4-3). Außerdem beweisen Transmissionselektronenmikroskopaufnahmen die bei entsprechend hohen Strömen auftretende teilweise Oxidation der Si-Sekundärphasen (siehe Abbildung 4-14, rechts). Aufgrund der hohen Si-O-Bindungsenergie ( $466 \text{ kJmol}^{-1}$ ) im Vergleich zu Al-O mit  $281 \text{ kJmol}^{-1}$  ist Silizium im Aluminiumoxidfilm unbeweglich. Daraus folgend enthält die Sperrschicht eine gewisse Si-Konzentration. Die teilweise Oxidation von Siliziumpartikel benötigt sehr hohe Feldstärken und wird von Sauerstoffblasenbildung begleitet. Daher ergeben sich häufig sauerstoffgefüllte Hohlräume über den Partikeln (siehe Abbildung 4-14). Die über Si-Partikeln gewachsene Oxidschicht ist sehr dünn und scheint laut [61] keine poröse Struktur aufzuweisen. Durch die Anwesenheit der Teilchen kommt es also zu einer Herabsetzung der Schichtbildungseffizienz, erhöhten lokalem Widerstand und damit auch zu einem Anstieg der finalen Spannung. [61,62,69-71]

Tabelle 4-3: Sperrschichtdicke und Porendurchmesser gemessen mittels TEM-Aufnahmen, nach der anodischen Oxidation von drei verschiedenen Aluminiumlegierungen bei  $4,2 \text{ Adm}^{-2}$  in 2,25 molarer  $\text{H}_2\text{SO}_4$  für 50 Minuten bei  $0^\circ \text{C}$  [61]

Substrat (Gew.-%)	Sperrschichtdicke (nm)	Porendurchmesser am Porengrund [nm]	Porendurchmesser an der Oberfläche [nm]	Finale Spannung [V]	Formierungsverhältnis [ $\text{nmV}^{-1}$ ]
99,8 Al	$40 \pm 6$	$25 \pm 5$	$16 \pm 4$	43	0,93
Al-10Si	$90 \pm 10$	$38 \pm 8$	$15 \pm 3$	110	0,82
Al-10Si-3Cu	$90 \pm 10$	$30 \pm 6$	$16 \pm 3$	84	1,07

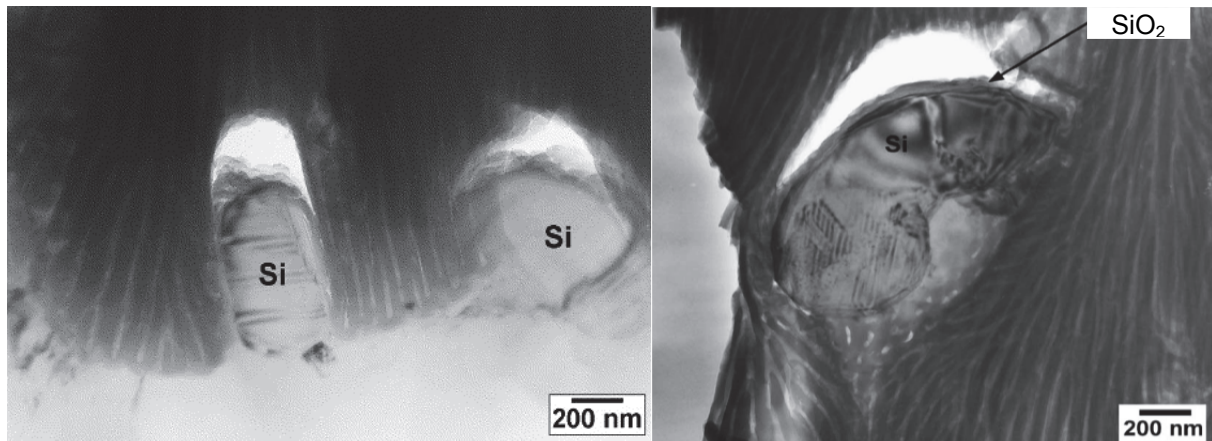


Abbildung 4-14: Transmissionselektronenmikroskopaufnahmen der anodisch erzeugten Schicht auf AlSi10 nach dem Anodisieren bei  $4,2 \text{ Adm}^{-2}$  in 2,25 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  für 25 min (rechts) und 50 min (links), bei  $0^\circ \text{C}$ ; [61]

Riddar et al. [53] vergleichen in ihrer Arbeit die Auswirkung unterschiedlicher Herstellungsverfahren auf die Harteloxierung von siliziumhaltigen Legierungen. Betrachtung finden dabei Standform-, Kokillen- und Hochdruckguss, sowie Extrusion hinsichtlich ihrer Einflussnahme auf den Korrosions- und Verschleißwiderstand. Dabei wird deutlich, dass die Abstände zwischen den Siliziumpartikeln und ihre Verteilung im Oxid vom eingesetzten Herstellungsprozess abhängig sind. Die vier untersuchten Eloxierschichten (siehe Abbildung 4-15) unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Schichtdicke, Morphologie und der Mikrohärtigkeit. Die höchsten Härten erreichten dabei die Sandguss- und die Extrusionslegierungen. Die schlechtesten Mikrohärtigkeitsergebnisse erzielte das Druckgussverfahren. Beim Abrasionstest mittels Kalottenschliff wies die auf dem extrudierten Substrat gewachsene Schicht die besten Resultate auf. Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss allerdings auf die unterschiedlichen eingesetzten Legierungen (AlSi7Mg, AlSi1Mg, AlSi9Cu3) verwiesen werden. [53,73]

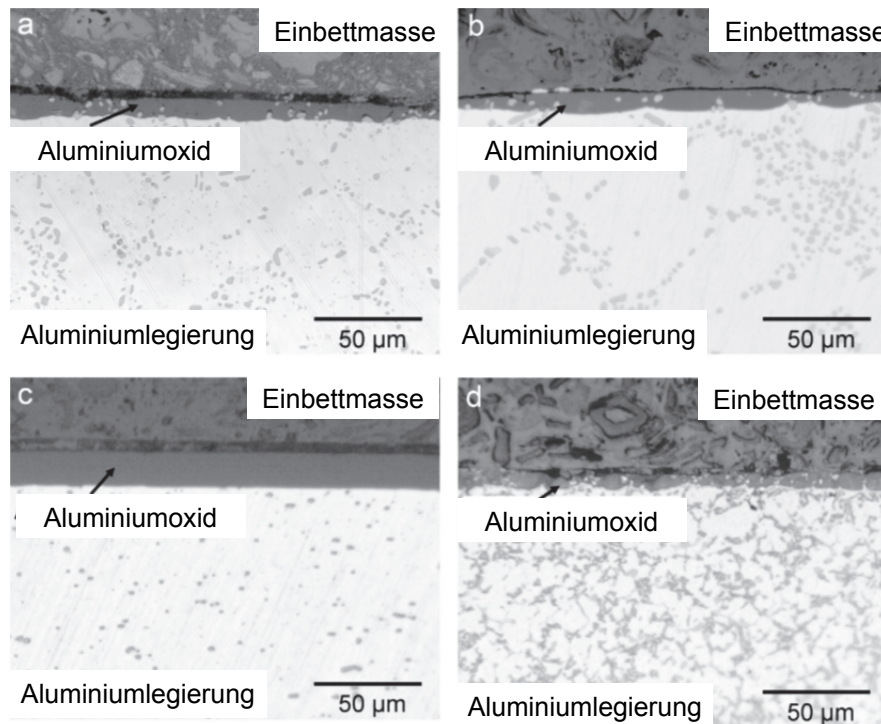


Abbildung 4-15: Querschliff der Eloxierschichten auf (a) einer AISi7Mg-Legierung, hergestellt mittels Kokillenguss (b) einer AISi7Mg-Legierung, hergestellt mittels Sandguss (c) einer AISi1Mg-Legierung, hergestellt mittels Extrusion und (d) einer AISi9Cu3-Legierung aus dem Druckgussverfahren [53]

Kupferhaltige intermetallische Verbindungen wie  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$  oder  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  werden aufgrund ihrer hohen Leitfähigkeit während der Eloxierung bevorzugt und somit vollständig oxidiert. Die dadurch entstehenden Oxide sind meist unstrukturiert und lösen sich in Schwefelsäure schon bei geringen Polarisierungen. Zudem ermöglicht der Halbleitercharakter des Kupferoxids Sauerstoffblasenbildung in der Schicht, wodurch es zum Anstieg der finalen Eloxierspannung kommt. Durch die geringe Bindungsenergie des Kupfers und Sauerstoffs wandern Kupferionen schneller durch die Schicht und gehen in den Elektrolyten, daraus resultiert wiederum erhöhte Defektneigung. Gelegentlich entstehen bei Cu-haltigen Legierungen laterale Substrukturen im Gegensatz zu den ansonsten normal ausgerichteten Porenstrukturen. [46,60-62,74,75]

Bei der weinsauren Anodisierung ergeben sich beispielsweise folgende Abläufe. Niedrigkupferhaltige Al-Fe-Mn-Cu-Partikel oxidieren halb so schnell wie die umliegende Aluminiummatrix, dadurch werden sie zum Teil in die Oxidmatrix eingebettet. Über den Teilchen formt sich ein hochporöses und unregelmäßiges Oxid mit entsprechenden Elementkonzentrationen (siehe Abbildung 4-16). Al-Fe-Mn-Cu-Partikel mit mittleren Kupfergehalten oxidieren bereits frühzeitig vollständig und gehen während des Eloxierprozesses in Lösung oder fallen aufgrund der geringen Oberflächenhaftung aus dem Oxidverbund aus. Hochkupferhaltige Partikel lösen sich sogar so schnell, dass sich Hohlräume und Fehlstellen im Oxid bilden. [76]

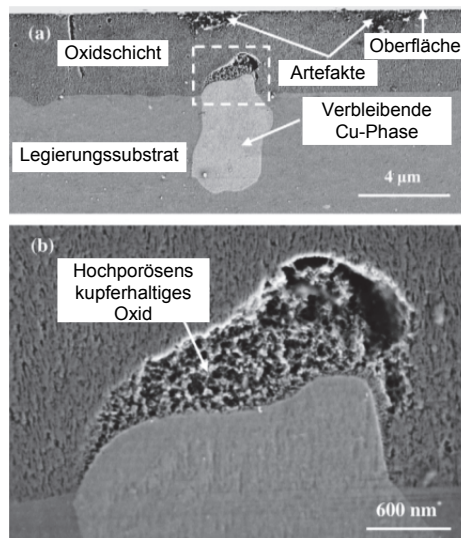


Abbildung 4-16: REM-Aufnahme einer hochporösen Oxidstruktur über einer Al-Fe-Mn-Cu-Phase [76]

Generell ist festzustellen, dass unterschiedliche intermetallische Phasen bei verschiedenen Spannungen oxidieren. Die Löslichkeit der einzelnen Elemente oder Partikel hängt neben ihrer Oxidbindungsstärke auch vom angewendeten Elektrolyte und dessen pH-Wert ab. Größere Hohlräume, Rissstrukturen und ungleichmäßige Oxidstrukturen führen zu einer herabgesetzten Härte der Eloxalschicht. Zudem ermöglichen Risse und andere Inhomogenitäten das Eindringen von Chlorionen und bilden somit die Ausgangspunkte für Lochkorrosion. [61,62,74,76,77]

#### 4.2.3.3 Auswirkungen weiterer häufiger Legierungselemente

Magnesium kann aufgrund der relativ geringen Löslichkeit des Magnesiumoxids bzw. -hydroxids bei hohen pH-Werten zu Problemen beim basischen Beizen führen. Hier ist eine vorgeschaltete saure Beizung in Schwefelsäure zu empfehlen. Aufgrund seiner niedrigen Gibbs-Energie wird bei Magnesium keine Elementanreicherung unter der Oxidschicht erwartet. Zudem gelten magnesiumhaltige Legierungen im Allgemeinen als gut eloxierbar, da sich die meisten intermetallischen Phasen während der Oxidation auflösen. Zhou et al. [78] entdeckten in ihrer Arbeit allerdings ein speziell den binären Al-Mg(5%)-Legierungen zugeordnetes Phänomen der teilweisen Schichtabplatzung während der Eloxierung in Ammoniumpentaborat. Dabei kommt es in der Nähe des Metall-Oxid-Übergangs zu etwa 4 nm dicken und fast über die gesamte Probenlänge verteilten Hohlräumen. Diese führt der Autor in letzter Konsequenz auf das negative Pilling-Bedworth-Verhältnis des Magnesiums von 0,81 zurück. [78]

## 4.2.4 Eigenspannungen in der Oxidschicht

Generell führen zu hohe Eigenspannungen in Eloxierschichten zu Rissen und lokalen Abplatzungen. Für die Entstehung dieser Spannungen in der Oxidschicht gibt es mehrere Ursachen. Generell gilt der Volumensprung bei der Oxidation von Aluminium zu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  als Grund für Druckeigenspannungen. Weitere Möglichkeiten für Spannungsbildung sind eingebaute Fremdphasen, die eine lokale Wachstumsbarriere für das Schichtwachstum darstellen. Zudem können veränderte Gitterparameter durch die Ausbildung von Anreicherungs-zonen zu Problemen führen. Eine Vielzahl von Untersuchungen zeigt, dass die Eigenspannungen in Oxidschichten graduell verlaufen und stark vom angelegten Stromfeld bzw. der Spannung abhängen (siehe Abbildung 4-17). Als entscheidend gilt zudem die Wachstumsrate des Oxids, die Stromdichte, der verwendete Elektrolyt und die Elektrolyttemperatur. Die maximale rissfreie Schichtdicke zeigt die Fähigkeit des Oxides Spannungen abzubauen. [45,51,52,79]

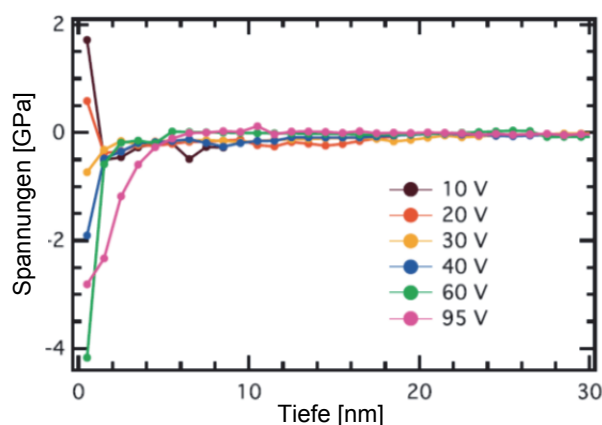


Abbildung 4-17: Eigenspannungsverläufe in anodisch erzeugten Oxidschichten bei unterschiedlichen Badspannungen und  $5 \text{ mA/cm}^2$  Stromdichte in Abhängigkeit von der Tiefe [51]

Außerdem können die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Substrat und Schicht zu Schichtrissen während dem Sealing führen. [80]

## 4.3 Der Eloxierprozess

Der Eloxierprozess gliedert sich in eine Vielzahl einzelne Teilschritte (siehe Abbildung 4-18). Der erste Schritt ist die mechanische Vorbehandlung. Hierzu zählen die Verfahren des Polierens und Schleifens, ebenso wie das Sand- oder Kugelstrahlen. Die Strahlbehandlungen sind vor allem bei Gussteilen sehr verbreitet, da sie einige der nachteiligen Effekte auf die Eloxierung eingrenzen können. Das Schleifen und Polieren ermöglichen den Ausgleich von tiefen Kratzern und Riefen, die durch eine chemische Vorbehandlung nicht zu beseitigen wären. Durch eine Bürstung entstehen matte Oberflächen, welche vor allem dekorativen Ansprüchen genügen. Durch mechanische Bearbeitung liegen wiederum viele



Oberflächenverunreinigungen vor, die bei der chemischen Vorbehandlung zu entfernen sind. Dazu zählen Schmierfette, Öle, Kühlschmierstoffe und Spanrückstände. Bei unzureichender Entfettung kommt es nicht nur zu einer Verschleppung dieser Substanzen in weitere Behandlungsbecken, im schlechtesten Fall können diese verunreinigten Stellen nicht gebeizt und eloxiert werden und führen dadurch zu optische unansehnlichen Ausgangsstellen für Korrosionsangriffe. Mild-alkalische Reiniger haben einen leichten Ätzcharakter und ermöglichen über geringfügige Gasblasenbildung einen effektiven Abtransport von Schmutzpartikeln. Wichtig für die Benetzung ist auch die Zugabe von Tenside. Die alkalische Ätzung mittels Natriumhydroxid ist preiswert und weit verbreitet. Dabei gelten die Empfehlungen einer Konzentration von 5 % NaOH und eine Betriebstemperatur von 40-50 °C. Der chemische Angriff steigt mit der Temperatur. Zu beachten ist jedoch, dass es sich bei den meisten beizenden Reaktion um exotherme Vorgänge handelt und daher bei großen Einsatzmengen eher eine Kühlung als Heizung notwendig ist. In NaOH-Becken kann es durch Aluminiumrückstände zu harten Ablagerungen an Heiz- und Kühlschlangen kommen. Das dort abgelagerte Aluminiumhydroxid fällt aus der übersättigten Lösung aus. Viele der heutigen Badzusätze verhindern die Ausfällung von Aluminiumhydroxid und verlängern dadurch die Lebensdauer und Wartungsintervalle der Beizbecken. Weiters kann die Ätzrate und das finale Oberflächenansetzen durch Zugabe von Nitraten, Nitriden, Fluoriden und anderer Chemikalien verändert werden. [6,56,81]

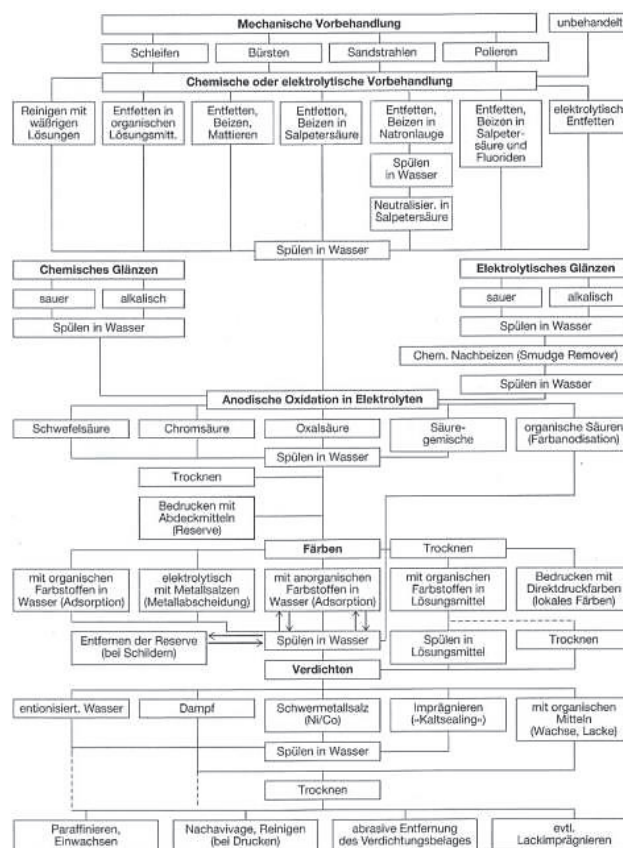


Abbildung 4-18: Übersicht bezüglich des gesamten Eloxierprozesses aus der industriellen Praxis [6]

Während des Beizprozesses bilden in Natronlauge unlösliche Legierungselemente eine Art Schlamm auf der Werkstückoberfläche. Kupferhaltige Legierungen (z. B. AW 2011) sind nach dem Beizen mit einem gräulich-braunen Schlamm überzogen (siehe Abbildung 4-19, links). Siliziumhaltige Materialien erzeugen einen gräulichen Überzug (siehe Abbildung 4-19, rechts). Der Kupferrückstand kann während der sogenannten Dekapierung bzw. Neutralisierung in Salpetersäure gelöst werden (siehe Abbildung 4-20), wohingegen der Siliziumrückstand bestehen bleibt. In diesem Fall muss entweder ein mechanisches Reinigen oder der Einsatz von Flusssäure Anwendung finden. [6,56,82]

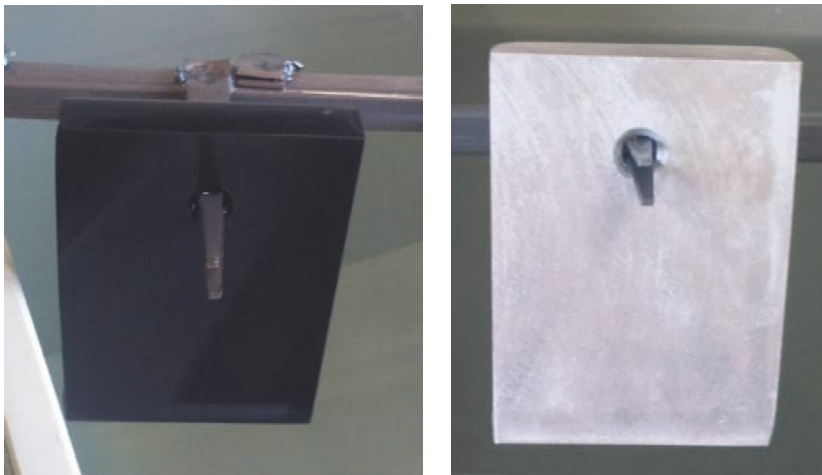


Abbildung 4-19: Aluminiumproben nach dem Beizen in Natronlauge; (links) kupferhaltiger und (rechts) siliziumhaltiger Rückstand auf der Materialoberfläche

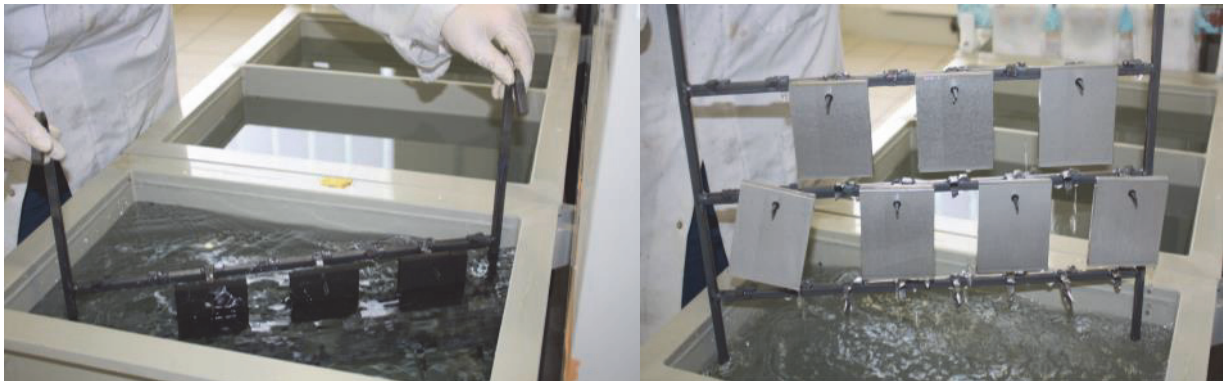


Abbildung 4-20: Kupferhaltige Aluminiumprobe nach dem Beizen; (links) beim Eintauchen in die Salpeterlösung; (rechts) nach 30 Sek. in der Salpeterlösung

Während des gesamten Eloxierprozesses ist eine gründliche Zwischenspülung sehr wichtig. Dabei kommt meist deionisiertes Wasser zum Einsatz. Dadurch kann eine Verschleppung einzelner Prozesslösungen und eine gegenseitige Neutralisation verhindert werden. Rund um das Beizen ist allerdings eine Besonderheit zu beachten. Der pH-Wert-Abfall zwischen den einzelnen Schritten sollte „sanft“ vonstattengehen und daher sind die Zwischenspülbecken mit entsprechenden Mengen an Säuren oder Basen zu versetzen. Generell sollten die Ätzbedingungen (z. B. Haltezeit) an die Bedürfnisse der Legierungen angepasst

sein. Vorsicht ist beispielsweise bei zinkhaltigen Werkstoffen geboten, da es hier zu einer sogenannten Grobkornätzung kommen könnte. [56,82]

Das saure Ätzen findet nur in Sonderfällen Anwendung und arbeitet entweder mit reiner Salpetersäure oder einer Mischung aus  $\text{HNO}_3$  und Flusssäure, wobei im zweiten Fall verschärfte Arbeitssicherheitsmaßnahmen notwendig sind. Generell stellen nitrose Gase immer ein Gesundheitsrisiko dar. Die Temperaturführung und Abgasabsaugung sind hierbei noch strenger zu überwachen, als bei der reinen Natronlaugenbeizung. [6]

Beim eigentlichen Anodisierschritt kommt vor allem Schwefelsäure als Elektrolyt zum Einsatz. Ihre Konzentration bewegt sich dabei zwischen 8-35 Gew.-%, wobei die Auflösung des Metalls mit der Säurekonzentration zunimmt. Eine Zugabe von Oxalsäure erhöht den Schichtbildungskoeffizienten und steigert die Schichthärte. Beste Ergebnisse zeigten sich bei 120 g/L Schwefelsäure und 50 g/L Oxalsäure. Dabei können die Temperaturen um bis zu 10 °C steigen, ohne negative Auswirkungen auf die Abrasionsbeständigkeit der Schicht zu haben. Der Verbrauch von Oxalsäure liegt bei ungefähr 0,2 g pro Amperestunde, was eine regelmäßige Zugabe notwendig macht. Wie schon zuvor besprochen, kommt der Temperaturführung und der Badumwälzung große Bedeutung zu. Generell sollte bei der dekorativen Eloxierung eine Temperatur von 18 °C nicht unter- und von 25 °C nicht überschritten werden. Als ideal gelten 20 °C. Je kälter das Eloxierbecken ist, umso härtere Schichten mit wenigen Poren entstehen. Zu hohe Temperaturen oder lokale Überhitzungen führen zu pudrigen, unebenen und ungleichmäßigen Schichten. Die Badumwälzung erfolgt heute häufig über die Einblasung von Druckluft oder entsprechende Umpumpsysteme, Rührer sind eher selten. Neben der Badkontrolle ist eine gründliche Befestigung und gute Kontaktierung der Bauteile auf dafür vorgesehenen Aluminium- oder Titangestellen unumgänglich. Unzureichender elektrischer Kontakt oder wackelnde Teile konnten zu extremen Temperaturen, lichtbogenähnlichen Entladungen und lokalem Aufschmelzen der Produkte führen. Neben ihrer Fixierung ist auch die geometrische Lage der Werkstücke zu berücksichtigen. Sie sollten meist über 15 cm von den Kathoden entfernt sein und auf beiden Seiten hin die gleichen Abstände aufweisen. Ein starkes Abweichen von Anoden- und Kathodenoberflächen ist zu vermeiden. Aus sicherheitstechnischen und qualitätsbezogenen Gründen dürfen die Bauteile nicht bei eingeschaltetem Strom ins das Eloxierbad überführt werden. Sie sollten aber auch nicht zu lange im stromlosen Becken lagern. Beim dem Sonderverfahren zur Harteloxierung geht es vor allem darum, dicke Oxidschichten mit einer hohen Abrasionsbeständigkeit zu generieren. Dabei wächst die Schicht, anders als bei der dekorativen Eloxierung, nur zur Hälfte aus dem Werkstück heraus. Die Arbeitstemperaturen liegen zwischen -5 und 5 °C, wobei auch hier höhere Werte durch die Zugabe von Oxalsäure möglich sind. Zudem finden große Stromdichten (1,5-2,5 A/dm<sup>2</sup>) Anwendung, wobei Spannungsspitzen bis zu 100 V möglich sind. [6,45,47,82]

Nach dem Eloxieren ist wieder eine gründliche Spülung notwendig, manche Literaturstellen raten sogar zu einer relativ langen Verweilzeit der Bauteile in deionisiertem Wasser. Wichtig ist dabei, dass der direkte Kontakt mit den behandelten Oberflächen nur mit sauberen und feuchten Handschuhen erfolgen darf. [6,82]

Anschließend ist ein Färbeprozess möglich. Dabei erfolgt die Einlagerung von metallischen oder organischen Farbpartikeln in die offenporige Struktur des Aluminiumoxids. Eine ähnliche Möglichkeit zur ästhetischen Modifikation besteht in dem sogenannten Farb-anodisieren. Um optimale Farbergebnisse zu gewährleisten, sind möglichst transparente Eloxierschichten notwendig. Die Schichtdicke ist dabei von dem gewünschten Farbton abhängig. Generell gelten 25 µm als Optimalwert, um Licht- und Wetterbeständigkeit der Farbe zu garantieren. Bei hochsiliziumhaltigen Legerungen können graue oder violett-graue Verfärbungen auftreten, daher werden für diese Materialien nur dunklere Farbtöne angewendet. Zwischen dem Eloxieren und dem Färben, sowie dem Färben und dem finalen Sealing sollte möglichst wenig Zeit vergehen. Zudem sind die Bauteile immer nur im nassen Zustand in das Färbebecken einzusetzen. Dieses muss dabei individuell nach den Angaben des Herstellers angerührt und gut temperiert sein. [6]

Das Sealing hat die Aufgabe, die Poren der Eloxierschicht zu verschließen, um die eingesetzte Farbe vor dem Auslaufen zu bewahren und die chemische Beständigkeit der Schicht zu gewährleisten. Das häufig bei Harteloxalschichten angewendete physikalische Sealing umfasst alle Prozesse des Lackierens, Ölens und Wachsend. Diese Methoden setzen die Verschleißfestigkeit des Materials nicht herab, führend aber zu einem ausreichenden Verschließen der Porosität. Das chemische Sealing basiert meist auf der Hydrierung des Aluminiumoxids unter Dampf oder mittels kochenden Wassers. Dabei verschließt das volumenmäßig größere Böhmit die offenen Porenkanäle. Dieser Prozess ist bis heute noch nicht vollständig erforscht, allgemein wird aber von folgenden Abläufen ausgegangen [48]:

- 1.) Ein geringer Prozentsatz des Elektrolyten aus der Eloxierung befindet sich noch in den Poren. Üblicherweise enthält eine Schicht, abhängig von den Prozessparametern und ihrer Dicke, bis zu 13 % Schwefelsäure. Teilweise kommt es noch zu einer Auswaschung des Schwefels, ein Großteil bleibt jedoch vorhanden.
- 2.) Die eloxierte Schicht ist mit 0,5 % Wasser sozusagen unterhydriert. Während des Sealings steigt dieser Gehalt auf 8-13 %.
- 3.) Die Absorption von Wasser führt zu einer Zunahme von Gewicht, allerdings sinkt die Gesamtdichte über die eingeschlossenen Sauerstoffporen von 2,6 auf 2,4 g/cm<sup>3</sup>.
- 4.) Die zuvor klar definierte Porenstruktur verliert einen Teil ihrer Ordnung durch die Blockierung der Poren, welche im äußeren Bereich startet.
- 5.) Das zu Beginn vorliegende Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird teilweise in Böhemit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O überführt.

- 6.) Der äußerste Bereich der Schicht verliert dabei an Härte und ist leichter durch abrasive Belastung abzutragen.
- 7.) Es kann durch Mineralien aus dem Sealingbecken zur Entstehung eines feinen, weißen Rückstandes kommen, der aber einfach abzuwaschen ist und die Qualität der Eloxierung nicht herabsetzt.

Bei Heißwassersealing sind generell Temperaturen zwischen 96-100 °C notwendig. Wobei der Siedepunkt aus energetischer Sicht nur sehr schwer zu erreichen ist. Die Proben müssen entsprechend ihrer Schichtdicke im Sealingbecken verweilen, wobei zwei Minuten pro Mikrometer als Faustformel gilt. Bei einer Abkühlung des Beckens unter 80 °C kommt es zu einem schlechteren Sealing, da bei diesen Temperaturen ein anderer Böhmit-Typ entsteht. Zudem ist auf den pH-Wert des Sealingbeckens zu achten, dieser sollte nicht unter 5,4 sinken, weil darunter die Qualität stark abnimmt. Über einem pH-Wert von 7 ist die Gefahr eines inhärenten chemischen Angriffs gegeben. Eine regelmäßige Überwachung ist sinnvoll, da eine stetige Säureeinschleppung aus den vorgeschalteten Prozessschritten zu erwarten ist. Beim Sealing mit chemischen Zusätzen kommt häufig Nickel-Azetat (8-10 g/L, pH 5,6-5,8) zum Einsatz. Dabei ist eine Temperatursenkung auf 80 °C möglich. Es entstehen Nickelhydroxide, welche die Poren ebenfalls effektiv verschließen und gegen den Angriff durch alkalische Medien schützen. Die Anwendungszeit beträgt zwischen zwei und drei Minuten, wobei in einigen Fällen eine nachgeschaltete Heißwassersealingeinheit den absoluten Porenverschluss gewährleisten soll. Das sogenannte Dichromat-Sealing ist speziell für maritime Anwendungen entwickelt worden. Dabei kommt Natrium-Dichromat in einer Konzentration von 70-100 g/L und Natronlauge mit 18 g/L zum Einsatz. Der pH-Wert beträgt demzufolge 6,3-7,4. Bei 96 °C ist eine ca. 5-10 minütige Behandlung durchzuführen. Zudem haben die fertigen Schichten einen leichten Gelbstich, da Chrom eingelagert wurde. [6,48,80]

## 5 Aufbau einer Laborversuchsanlage

Um den industriellen Anodisierprozess so gut wie möglich abzubilden, erwies sich die Anschaffung einer Laboreloxieranlage als sinnvoll. Dabei wurden die örtlichen Gegebenheiten und die bereits vorhandene Infrastruktur in die Planung miteinbezogen. Die verwendeten, relativ aggressiven Elektrolyten setzen voraus, dass ein leicht zu reinigender Fließboden als Basis bereitsteht. Zudem machen Aerosole und andere Dämpfe eine Absaugung mit mehrfachem Luftwechsel notwendig. Das zentrale Basisaggregat ist der Generator, der den notwendigen Gleichstrom bis zu einer Spannung von 70 V bereitstellt und eine möglichst präzise Steuerung aufweisen sollte. Ausgewählt wurde dazu der bereits am Lehrstuhl vorhandene Generator vom Typ „Power Supply EA-PS 8068-250A“. Nähere Informationen dazu sind im Anhang und der Betriebsanleitung angeführt. Weitere infrastrukturell

notwendige Gegebenheiten sind ein Ionentauscher und ein Anschluss für deionisiertes Wasser, eine entsprechende Koppelung an das hausinterne Kühlsystem, temperaturbeständige Abflussrohre und fettfreie Druckluft. Zudem darf der Stromaufwand für die Heizstäbe nicht unterschätzt werden und entsprechende Stromquellen sollten bereitstehen. Zur Befüllung und Entleerung der Elektrolyten müssen entsprechende Umpumpsysteme vorhanden sein, die auch unter Einsatz konzentrierter Schwefelsäure fehlerfrei funktionieren. Die Auswahl der Beckenmaterialien basiert auf ihrer Beständigkeit gegenüber Säuren und Basen und fällt bis auf eine Ausnahme auf PP-Kunststoff. Lediglich die bei knapp unter 100 °C betriebene Sealingeinheit besteht aus rostbeständigem Stahl. Der prinzipielle Aufbau der Eloxieranlage ist unter Abbildung 5-1 ersichtlich. Genauere Daten zu den einzelnen Becken sind dem Anhang zu entnehmen.

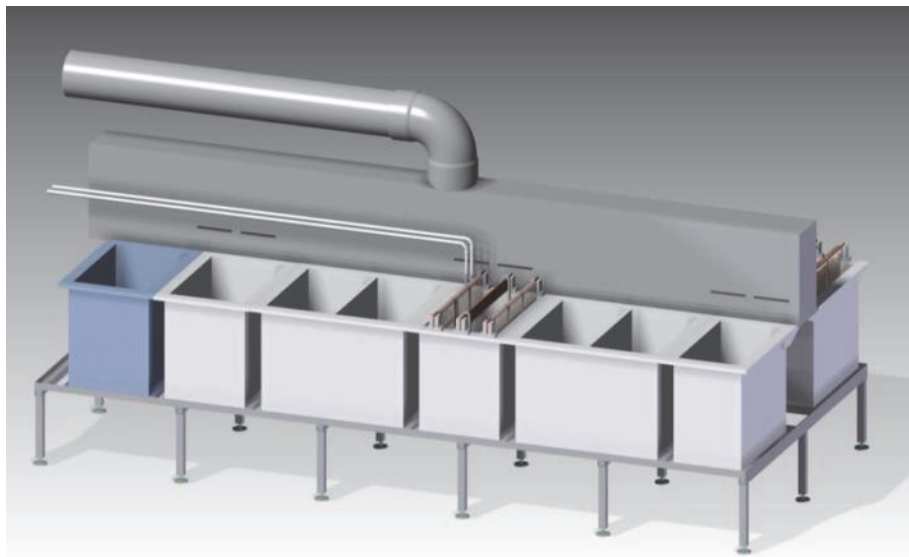


Abbildung 5-1: Technische Zeichnung der Laboreloxieranlage am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie

Das Kernstück der Eloxieranlage stellt die eigentliche Anodisiereinheit dar (siehe Abbildung 5-2). Die Stromversorgung läuft dabei über drei Kupferschienen, wobei die beiden äußeren negativ und die innere positiv gepolt sind. Auf jeder Kathodenleitung befinden sich drei Kathoden aus Aluminium (Legierung 6063), welche mittels Kupferschrauben befestigt sind. Über die Aluminiumplatten gestülpt sind die sogenannten Kathodensäcke. Diese stellen eine Sicherheitsmaßnahme zur Reduzierung der Aerosole während dem Eloxierprozess dar und funktionieren als einfache mechanische Barriere für die aufsteigenden Wasserstoffbläschen. Auf der mittleren Kupferschiene ist das Titangestell mit den zu anodisierenden Bauteilen eingehängt. Dabei ist wichtig, dass sämtliche Werkstücke gut befestigt sind, um Kurzschlüsse und Lichtbogenbildung zu verhindern. Außerdem darf kein Kontaktpunkt mehr als 20 A tragen. Eine gleichmäßige Beschichtung kann nur über eine entsprechend gute Kontaktierung erfolgen.

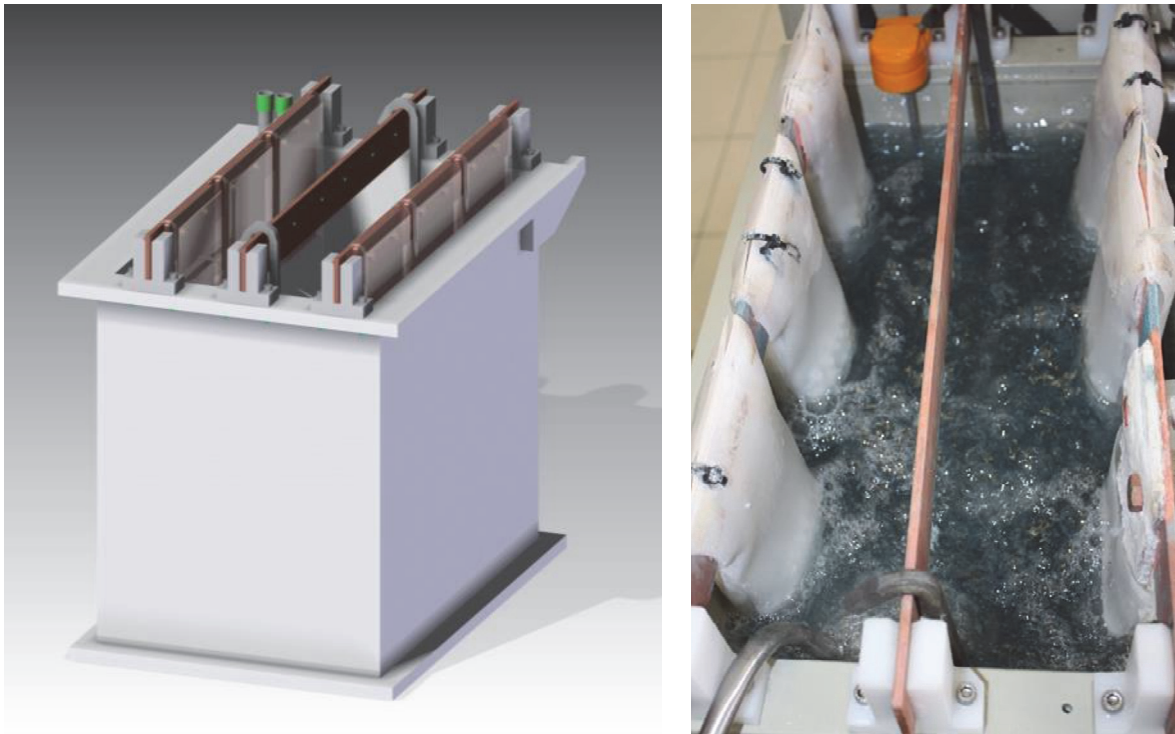


Abbildung 5-2: Anodisiereinheit als technische Zeichnung (links) und im realen Betrieb als Draufsicht (rechts)

Das Titangestell entwickelt während mehreren Eloxierprozessen eine sehr dünne Oxidschicht, die zu leichten Verfärbungen führen kann, dadurch ist die Funktionsweise des Trägers aber nicht beeinflusst. Neben der ausreichenden Kontaktierung der Werkstücke ist auch ihr Abstand zu den Kathodenschienen wichtig. Dieser sollte zu beiden Seiten gleich groß sein, damit es nicht zu einer einseitigen, erhöhten Schichtbildung kommt. Bei komplizierten Bauteilen ist zudem zu beachten, dass der Elektrolyt überall hinfließen können muss. Besonders wichtig ist auch, dass nur Bauteile aus der gleichen Legierungsklasse bzw. mit der gleichen Zusammensetzung auf dem Gestell montiert sind, ansonsten könnte es zu einer einseitigen Strombelastung durch entsprechende Gefügebestandteile kommen und sehr ungleichmäßige Beschichtungen bei eigentlich stabilen Betriebsparametern entstehen. Zur Vermeidung von Hitzestauungen ist für eine gute Badbewegung zu sorgen. Dies geschieht über die Einblasung von Druckluft, wobei eine exakte Steuerung der Durchflussmenge sich als zielführend herausgestellt hat. Die Temperaturführen des Beckens erfolgt einerseits über ein Thermoelement und andererseits über die aus Edelstahl bestehenden Kühlspiralen. Die Säurebeständigkeit der Kühlspiralen ist nur bei niedrigen Temperaturen ( $< 20\text{ °C}$ ) gewährleistet, wodurch die Beckenbefüllung aufgrund der damit einhergehenden Wärmeentwicklung sehr langsam durchzuführen ist. Die restlichen Becken beinhalten zwischen 60 und 65 Liter und ermöglichen die notwendigen Vor- und Nachbehandlung der Bauteile.

Die genaue Arbeitsabfolge lautet dabei:

- 1.) Entfetten (alkalisch)
- 2.) Doppelspüle
- 3.) Beizen (alkalisch)
- 4.) Doppelspüle
- 5.) Dekapieren (Neutralisieren, sauer)
- 6.) Doppelspüle
- 7.) Glänzen (sauer)
- 8.) Doppelspüle
- 9.) Eloxieren oder Harteloxieren (sauer)
- 10.) Doppelspüle
- 11.) Färben
- 12.) Doppelspüle
- 13.) Sealing (Versiegeln)

Die exakten Arbeitsanweisungen zum Ansetzen der Bäder und ihrer laufenden Kontrolle sind wiederum den Anhang oder der Betriebsanleitung zu entnehmen.

## **6 Zerspanungsversuche**

Die im Folgenden beschriebenen Zerspanungsversuche wurden bei Fuchshofer Präzisionstechnik GmbH in Eibiswald und am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den Verfahren Fräsen, Drehen und Bohren. Die statistische Versuchsplanung (Design on Experiment) erfolgte dabei mit dem Computerprogramm Modde© 7. Im ersten Schritt fand die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Zerspanungsbedingungen und Oberflächencharakteristika sowie anderen Zielgrößen statt. Im zweiten Versuchsteil standen die Auswirkungen des Zerspanungsprozesses auf die Eloxierung im Vordergrund (siehe Kapitel 7 Eloxieren).

### **6.1 Fräsen**

Die Fräsversuche erfolgten an relativ einfachen Geometrien mit Stirnfräsen und zwei unterschiedlichen Typen von Wendeschneidplatten. Die bei der Fa. Fuchshofer verwendete Anlage vom Typ MAHO DMF 220 LINEAR (siehe Abbildung 6-1) fährt mit einer maximalen Drehzahl von 12.000 U/min und wird mit einer Hochdruckkühlung (40 bar) über einen Spindellauf betrieben.





Abbildung 6-1: Foto der Zerspanungsanlage [83]

Um eine Charakterisierung vornehmen zu können, werden für die Zerspanungswerkzeuge zwei unterschiedliche Arten von Schneiden eingesetzt. Einerseits die konventionellen Hartmetalle, die zurzeit in ca. 90 % der Zerspanungsvorgänge bei Fuchshofer bedienen. Andererseits erfolgte die Bearbeitung auch mit ausgewählten Diamantschneiden, die aktuell vor allem bei Spiegelglanzoberflächen Einsatz finden. In Abbildung 6-2 ist die Geometrie der verwendeten Hartmetallwerkzeuge ersichtlich. Die vom Hersteller mitgelieferten Datenblätter empfehlen einen Einsatz für Aluminium mit einem Si-Anteil unter 0,5 %. Zudem werden Schnittgeschwindigkeiten zwischen 200 und 3.000 m/min sowie ein Vorschub zwischen 0,1-0,25 mm pro Zahn empfohlen. Die Eingrifftiefe sollte 10 mm nicht übersteigen.

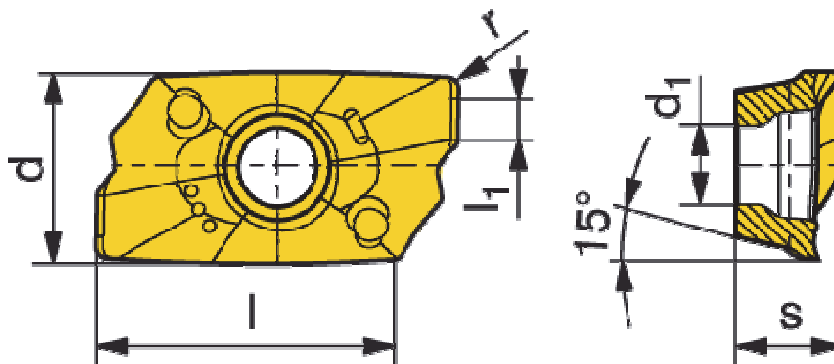


Abbildung 6-2: XDHT 1904 Wendeschnidplatte:  $r = 0,4$  mm,  $l = 19,0$  mm,  
 $s = 4,76$  mm,  $d_1 = 4,65$  mm,  $d = 9,52$  mm

Polykristalline diamantbeschichtete Schneiden haben generell eine hohe Lebensdauer und sind gut für hochglänzende Oberflächen heranzuziehen. Die eingesetzte Geometrie ist in der Abbildung 6-3 dargestellt. Vergleichbar werden beide Wendeschnidplattentypen über ihren Spitzenradius  $r$  mit 0,4 mm.

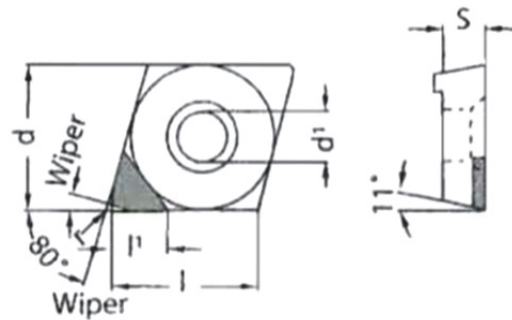


Abbildung 6-3: PDC-S-Fräsplatte von „Beckerdiamant“:  $d = 9,52$  mm,  $d^1 = 4,40$  mm,  $s = 3,97$  mm,  $l = 9,70$  mm,  $l^1 = 4,29$ ,  $r = 0,4$  mm

Die zur Analyse eingesetzten Materialien stammen von zwei unterschiedlichen Anbietern und stellen einen Querschnitt durch die wichtigsten Legierungsklassen dar. Ihre Zusammensetzung laut Funkenspektralanalyse und die Daten aus dem Materialprüfzeugnis sind dem Anhang zu entnehmen. Wie bereits erwähnt, ist die Werkstückgeometrie eher einfach gehalten (siehe Abbildung 6-4) und bereits auf die anschließende Eloxierung hin ausgerichtet. Die Bohrung am Kopfteil ist dabei so ausgelegt, dass die Bauteile in späteren Arbeitsschritten einfach zu kontaktieren bzw. befestigen sind. Um den eigentlichen Werkzeugvergleich durchführen zu können, erfolgen die Fräsbehandlungen der großen Grundflächen mit unterschiedlichen Schneidmaterialien, wobei eine einheitliche Maximalrautiefe angestrebt wird. Der Anstellwinkel zur flächigen Bearbeitung ist mit  $45^\circ$  vordefiniert.

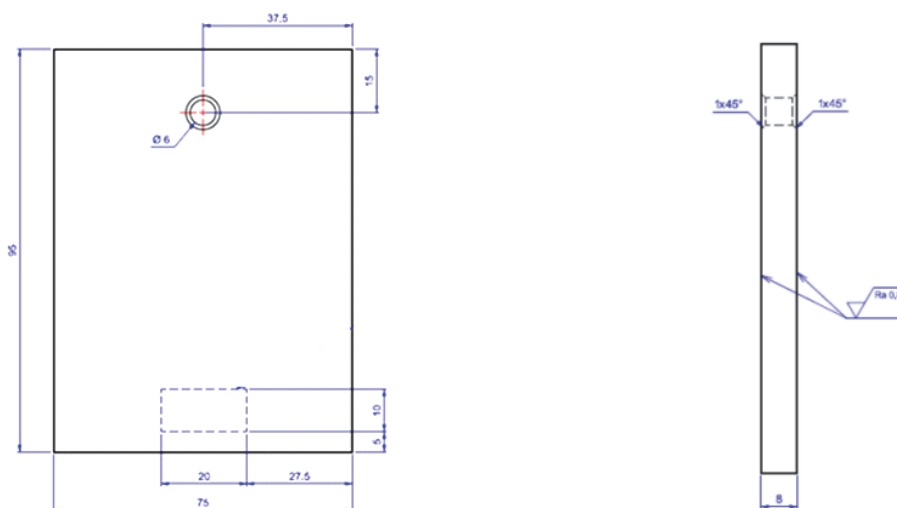


Abbildung 6-4: CNC-Entwurf des Werkstücks mit Angabe zum Werkzeuganstellwinkel und der maximalen Rautiefe  $R_a$

Die Prozessparameter liegen im Bereich der Grenzwerte, angegeben durch die Werkzeughersteller, und basierend auf dem empirischen Wissen der Zerspanungstechniker bei Fuchshofer. Bei der Spantiefe ( $a_p$ ) wird beim Hartmetallwerkzeug ein Wert von 0,2 mm festgelegt und bei Diamant 0,1 mm. Die eingesetzte Kühlschmierung (Hysol MB50) hat den als ideal geltenden pH-Wert von 8,8 und eine Konzentration von 10,3 %, wobei die ausge-

wiesenen Werte auf den täglich vorgenommenen Messungen bei Fuchshofer stammen. Bei beiden Schneidklassen werden entweder Drehzahlen (S) von 7.000 oder 10.000  $\text{min}^{-1}$  festgelegt. Die beaufschlagten Vorschübe variieren von 800-4.000 mm/min und liegen prinzipiell bei den Diamantschneiden geringfügig höher (siehe Tabelle 6-1). Generelle Schneidparameter für die Zerspanung von Aluminiumlegierungen sind im Anhang nachzuschlagen.

Tabelle 6-1: Übersichtstabelle zu den Prozessparametern  
(Anmerkung: x steht als Platzhalter für die Kennzeichnung der jeweilige Versuchsklasse)

Probennummer	Drehzahl [1/min] Hartmetall	Vorschub [mm/min] Hartmetall	Drehzahl [1/min] Diamant	Vorschub [mm/min] Diamant
<b>EV-x01-1</b>	10.000	1.500	10.000	3.000
<b>EV-x01-2</b>	10.000	2.000	10.000	4.000
<b>EV-x01-3</b>	10.000	800	10.000	1.000
<b>EV-x01-4</b>	10.000	1.000	10.000	2.000
<b>EV-x01-5</b>	7.000	1.500	7.000	3.000
<b>EV-x01-6</b>	7.000	2.000	7.000	4.000
<b>EV-x01-7</b>	7.000	800	7.000	1.000
<b>EV-x01-8</b>	7.000	1.000	7.000	2.000

Die Analyse und Auswertung der Zerspanungsversuche erfolgt über die Charakterisierung der produzierten Späne, mit Hilfe der Oberflächenbewertung und mittels metallographischer Methoden. Erstere sind in Spanformklassen (siehe Tabelle 3-1) unterteilt. Diese Kennzahlen lassen Rückschlüsse auf die Handhabbarkeit der jeweiligen Form zu. Im Anhang sind die Späne der jeweiligen Fräsvorgänge abgebildet und mittels Spanformklassen charakterisiert. Da diese Beurteilungsstrategie beim Fräsen aufgrund geometriebedingter Spanlängennormierung und unterbrochener Schnittführung nur begrenzt aussagekräftig ist, erfolgt in diesem Abschnitt eine weitere Betrachtung der Makro- und Mikrostruktur ausgewählter Spanstücke. Generell ist die Spaninnen- im Gegensatz zur -außenseite eher rau und weist eine strukturierte bis segmentierte Oberfläche auf (siehe Abbildung 6-5). Neben diesen Charakteristika haben viele Späne unterschiedliche Kantenformen vorzuweisen, wobei eine der Ecken sehr glatt und die andere eher ausgefranst erscheint. Diese Reißspuren korrelieren oftmals mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und sind exemplarisch unter Abbildung 6-6 dargestellt.

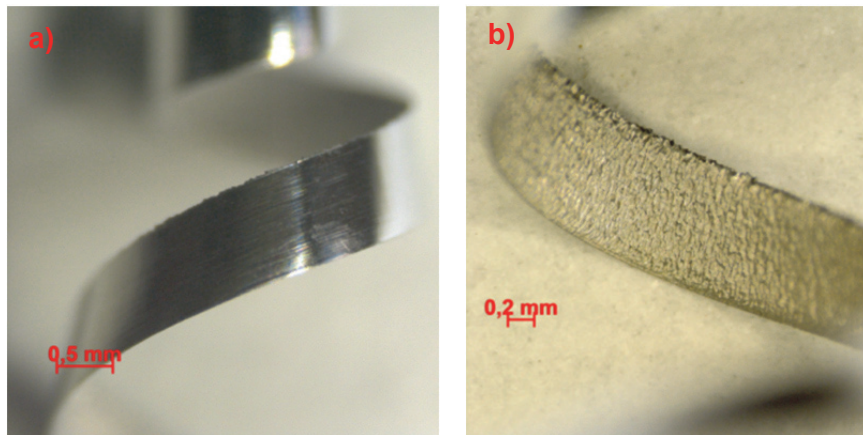


Abbildung 6-5: a) Außen- und b) Innenseite eines kurzen Spiralwendelspans nach Bearbeitung mit Diamantwendeschneidplatten



Abbildung 6-6: Span aus der 7075-Legierung nach der Diamantzerspanung ( $D = 7000$ ,  $f = 3000$ )

Bei der Diamantwerkzeugzerspanung der 5083-Legierung entstanden zudem spezielle Spanformen. Diese sehr flachen aber dafür mit größerer Grundfläche ausgestatteten Späne haben einen folienähnlichen Charakter und weisen eine sehr ebene Oberflächenstruktur auf (siehe Abbildung 6-7).



Abbildung 6-7: Sonderspan der Legierung 5083 mit sehr ebener Oberflächenstruktur

Auch bei den 7075-Legierungen sind sowohl bei der Zerspanung mit Hartmetall- sowie Diamantschneiden Sonderspanformen aufgetreten (siehe Abbildung 6-8).

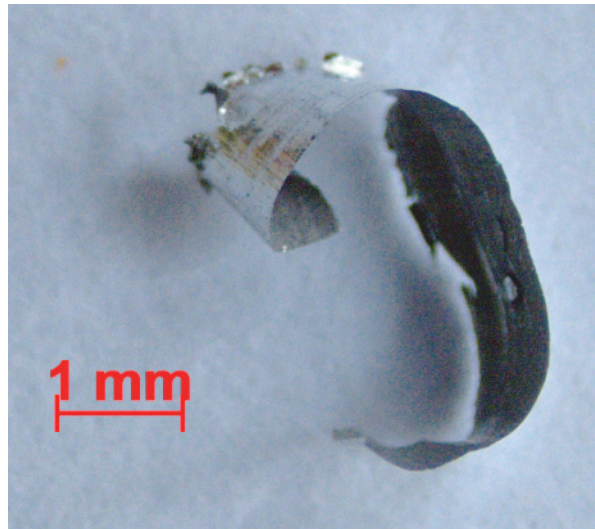


Abbildung 6-8: Sonderspan der Legierung 7075 nach Verwendung von Hartmetallschneiden

Eine Analyse mittels Rasterelektronenmikroskop/EDX bietet die Möglichkeit, neben der Messung von Elementgehalten und Zusammensetzungen, auch eine sehr genaue Topographieabbildung der Spanoberfläche darzustellen. Abbildung 6-9 zeigt die Innenseite eines mit Diamantwerkzeug bearbeiteten Spans. Dabei sind zwei unterschiedliche Zonen ersichtlich. Im ersten Bereich ist der Span fast 50  $\mu\text{m}$  dick und trägt unterschiedliche Profilsuren der Wendeschneidplatte. Die zweite Zone besteht aus sehr dünnem Material, das folienähnlich vom eigentlichen Hauptspan absteht. Auch darauf sind leichte Riefen ersichtlich.

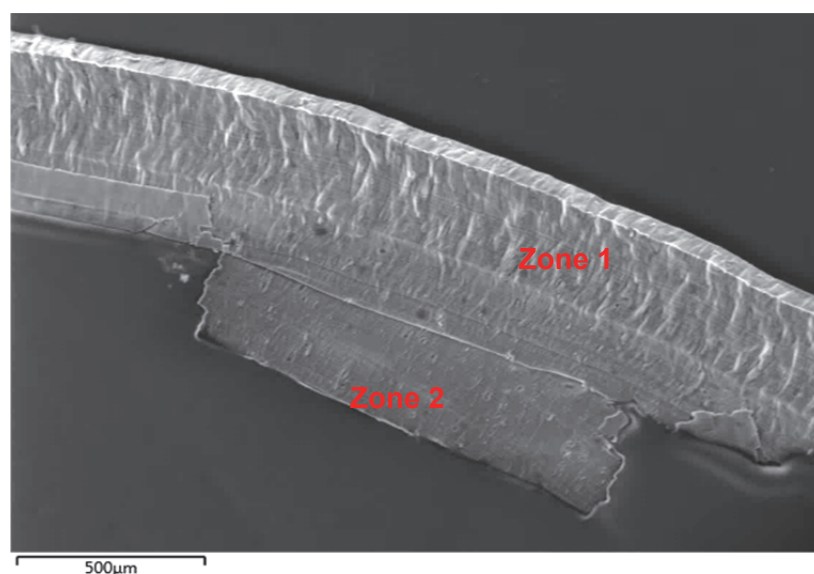


Abbildung 6-9: Span der Legierung A, hergestellt unter hoher Schmiermittelzufuhr mittels Diamantwendeschneidplatten

Abbildung 6-10 zeigt den mit Diamantwerkzeugen generierten Span in der Detailansicht. Die Riefen, welche durch die Oberflächenrauigkeit des Schneidkeils entstehen überlagern die durch die Materialstauchung gebildete sogenannte Organgenhaut.

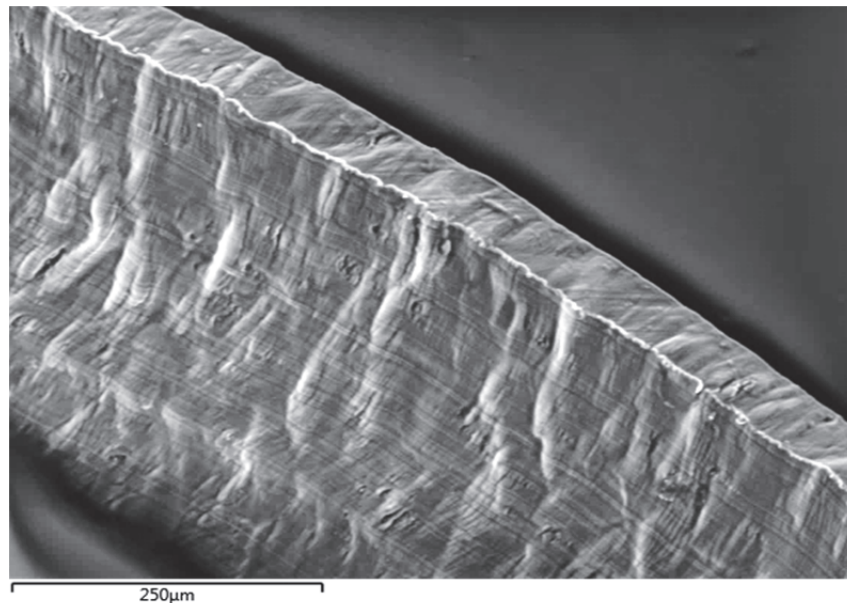


Abbildung 6-10: Detailansicht zu Abbildung 6-9

Der gegenteilige Fall ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Die Rückseite eines mit Hartmetallschneiden erzeugten Spans zeigt sehr starke Stauchungsstrukturen und nur geringe Riefenmuster durch die Werkzeugoberfläche.

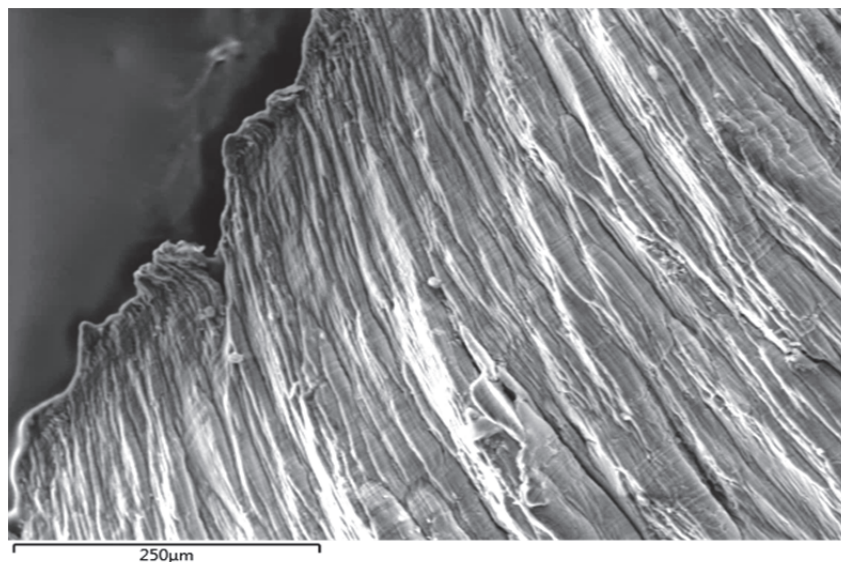


Abbildung 6-11: Rückseite eines mit Hartmetallschneiden hergestellten Spans auf einer AW2007-Legierung

Die dazugehörige Vorderseite des Spans weist eine sehr starke Struktur an der Kante auf (siehe Abbildung 6-12). Hier wurde der Werkstoff durch Reißen vom Grundmaterial getrennt.

Die Innenseite des Spans ist ebenso mit Riefen, entstanden durch die feine Oberfläche des Hartmetallwerkzeuges, gezeichnet.

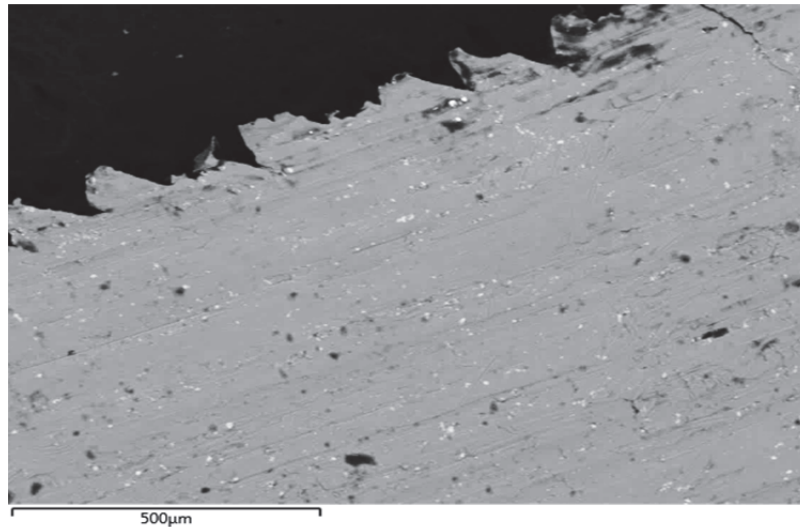


Abbildung 6-12: Innenseite eines mit Hartmetallwendeschneidplatten erzeugten Spans einer AW2007-Aluminiumlegierung

Durch den Einsatz unterschiedlicher Wendeschneidplatten kann die Oberflächenhärte von Werkstücken beeinflusst werden. Die im Anhang angeführten Härtevergleiche sollen Kaltverfestigungseffekte, ausgelöst durch variable Prozessparameter, darstellen. Eine Falschfarbenabbildung der Oberfläche ermöglicht es, die Auswirkungen unterschiedlicher Prozessparameter aufzuzeigen und Oberflächenfehler besser interpretieren zu können. Die Analyse erfolgt dabei mittels Konfokalmikroskop der Firma ALICONA. In Abbildung 6-13 ist die Periodizität der Fräsriefen durch die Vorschubbewegung gut dargestellt. Die wiederkehrenden Vertiefungen im Fräsmuster weisen auf eine ungleichmäßige und somit mangelhafte Fixierung der Wendeschneidplatten hin.

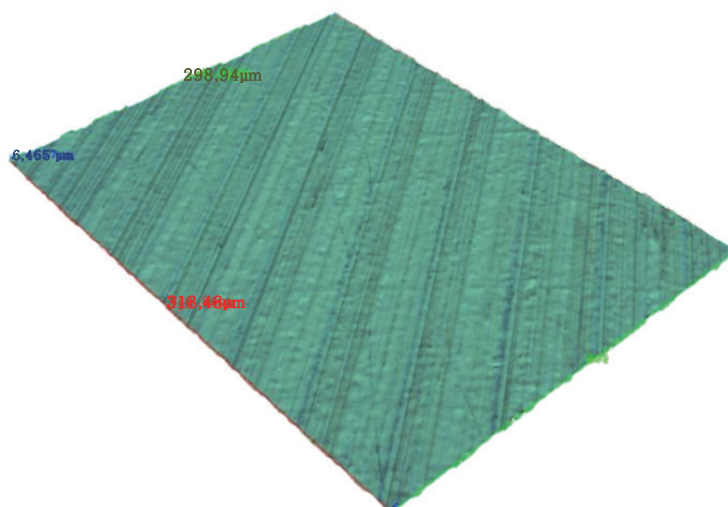


Abbildung 6-13: Dreidimensionale Falschfarbendarstellung einer gefrästen Oberfläche

Das konfokale Messsystem ALIONA 3.5 erlaubt neben der optischen Darstellung der Oberfläche auch eine flächenbezogene Rauigkeitsmessung, Traglastkurvenbestimmung und die Ermittlung vieler anderer Kennwerte. Die entsprechend generierten Daten befinden sich im Anhang. Neben dem primären Rauigkeitsprofil helfen Falschfarbendarstellung auch Fehlerzonen besser abzubilden. Unter Abbildung 6-15 ist das gesamte Ausmaß des Oberflächendefekt erkennbar. Die schaufelförmigen Einkerbungen und ihre Ausrichtung in Vorschubrichtung legen die Vermutung von Spananhaftungen an der Schneidkante und damit einhergehenden sekundären Materialabtrag nahe.

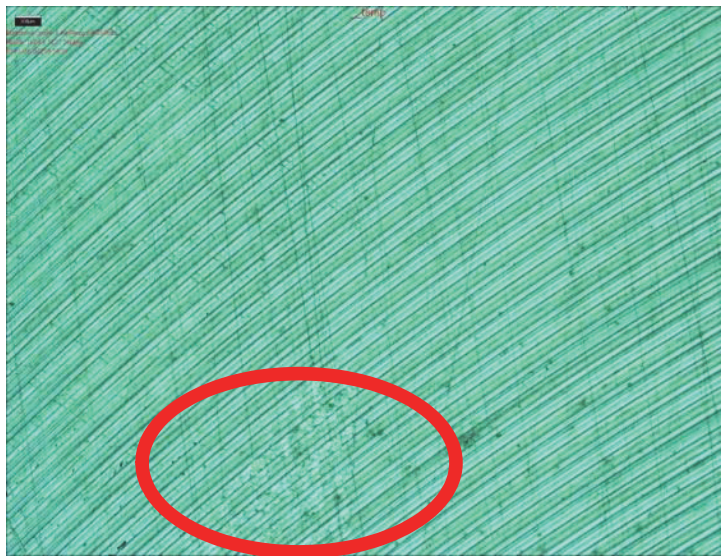


Abbildung 6-14: Darstellung eines Fräsprofils mit größerer Defektstelle (Falschfarbendarstellung)

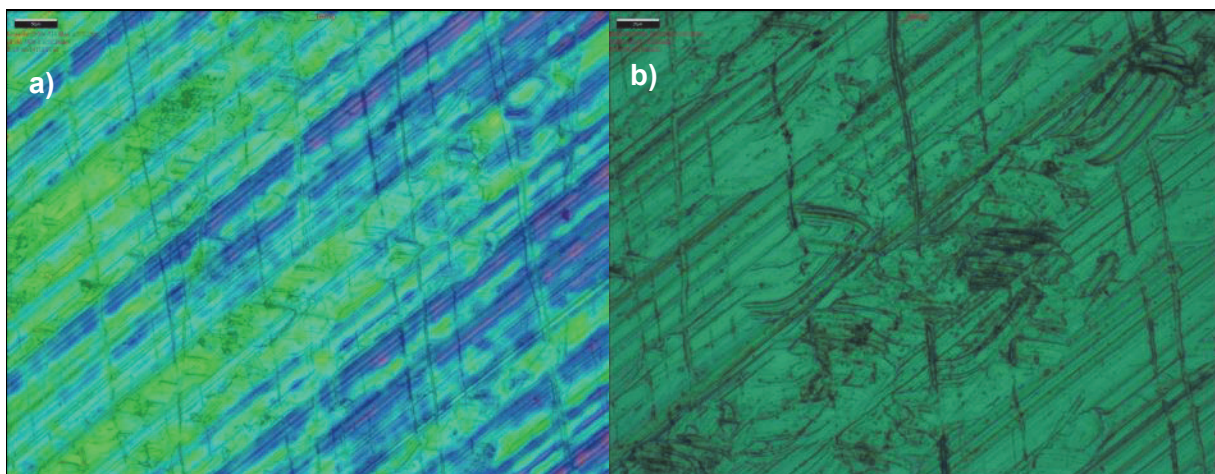


Abbildung 6-15: Darstellung der Defektzone aus Abbildung 6-14; (a) mittels Falschfarben; (b) in entsprechender Vergrößerung

## 6.2 Bohren

Beim Bohren muss sowohl die Spanform als auch die generierte Materialoberfläche Betrachtung finden. Einflüsse ergeben sich dabei über Schmiermittel, Werkstoff, Bohr-



geschwindigkeit, Vorschub, Bohrtiefe und Werkzeugverschleiß. Zu den Bewertungskriterien gehören Spangröße, Oberflächenqualität im Bohrloch und Gratbildung. Der Austrag der Späne aus dem Bohrloch erfolgt über das Schmiermittel. Die Beeinflussung der Spangröße gelingt über eine Variation der Prozessparameter. Dabei sind kleine, gebrochene Späne leichter abzutransportieren und belasten das Werkzeug generell weniger. Der stärkste Prozessparametereinfluss ergibt sich über den Vorschub. Steigt dieser, nimmt auch die Spanmasse zu. Dabei kommt es durch die zunehmende Fläche der beanspruchten Schneide zu größeren unverformten Zonen in den Spänen, wodurch wiederum deren Widerstand gegen Verbiegung zunimmt. Der Schmiermittelsatz hat ebenfalls großen Einfluss auf die Späne, durch die eingebrachte Kühlung werden diese spröder und brechen früher. Zudem kann bei ausreichender Schmierung die Ausbildung von Aufbauschneiden verhindert werden. Batzer et al. [44] berichten in ihrer Arbeit von einem eindeutigen Zusammenhang zwischen Spanmasse und Oberflächengüte.

Für die Bohrversuche wurden drei unterschiedliche Bearbeitungswerkzeuge ausgewählt (siehe Abbildung 6-16), wobei es sich laut Herstellerangaben um gute Beschichtungen bzw. Oberflächen für die Bearbeitung von Aluminiumknetlegierungen handelt. Zur Beurteilung des Einflusses von Schmiermitteln dienen Versuche mit unterschiedlichen Mengen an Kühlschmierstoffen, ausgehend von der Trockenzerspanung bis hin zur konventionellen Bohrlochflutung. Wie bereits aus der Literatur bekannt, kann es bei der Trockenzerspanung zu extremen Performanceabfall kommen. Zudem muss beim Bohren die Werkzeug- und Grundmaterialerwärmung mitberücksichtigung finden. [41,84]

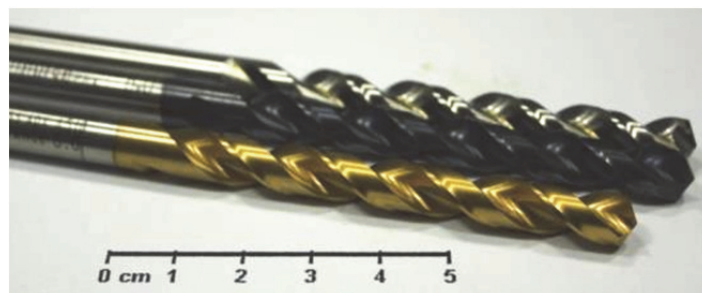


Abbildung 6-16: Die für die Versuche herangezogenen Bohrer aus Schnellarbeitsstahl; unbeschichtet (silber); Beschichtung mit „alcrona top“ aus AlCrN (scharz); beschichtet mit Titannitrid (gold)

Zur Analyse ausgewählt wurden folgende Parameter:

- Schmiermitteleinsatz (trocken, Vollschmierung)
- Vorschub
- Drehzahl
- Werkzeugmaterial (TiN, AlCrN, HSS)

Der zentrale Versuchsaufbau bei Vollschmierung ist unter Abbildung 6-17 ersichtlich. Bei der Bearbeitung zeigte sich unmittelbar, dass lange Späne zu Problemen führen, da sich diese

um das Werkzeug wickeln und die um das Bohrloch liegende Oberfläche der Probe zerkratzen.

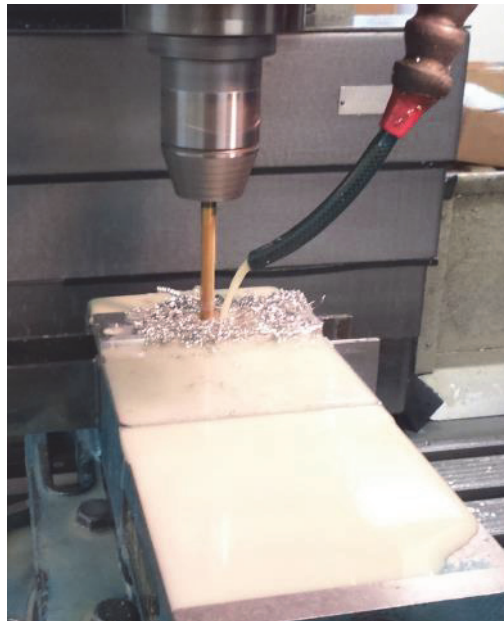


Abbildung 6-17: Bohren mit TiN-beschichtetem Werkzeug unter Vollschrnerung

Die Bewertung der Bohrlochqualität erfolgt über Gradbildung, Formstabilität, Spanform (siehe z. B. Abbildung 6-18) und Oberflächengüte. Zudem geben Anhaftungen an die Werkzeugoberfläche klare Aussagen bezüglich Verschleißbeständigkeit und Aufbauschneiden. Genaueres zu den Versuchsplänen und den Einzelergebnissen ist dem Anhang zu entnehmen.

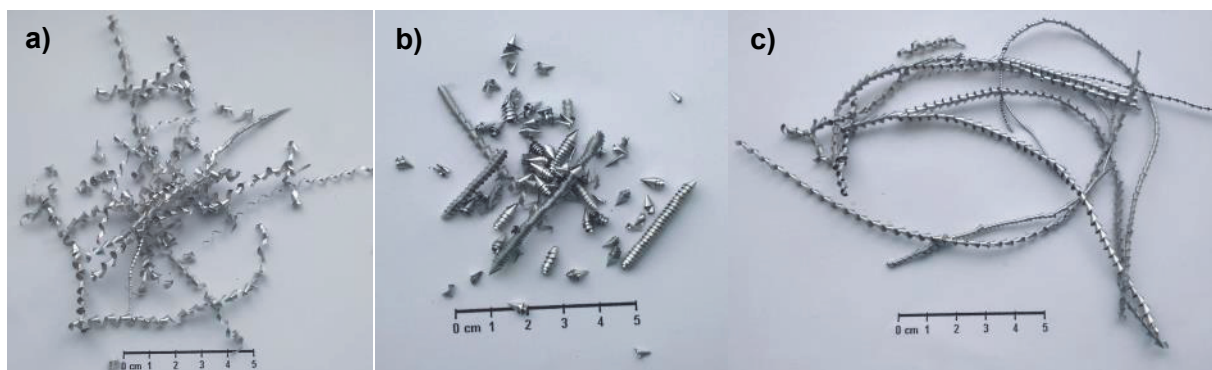


Abbildung 6-18: Vergleich der bei unterschiedlichen Versuchen angefallenen Späne (a) TiN-Werkzeug, 25 m/h Vorschub, 1000 Umdrehungen/min., ohne Schmiermittel (b) unbeschichtetes Werkzeug, 25 m/h Vorschub, 500 Umdrehungen/min., mit Bohrlochflutung und (c) TiN-Werkzeug, 25 m/h Vorschub, 500 Umdrehungen/min., mit Bohrlochflutung

### 6.3 Drehen

Das Drehen gehört zu den am besten analysierten Zerspanungsverfahren. Der Schwerpunkt der folgenden Betrachtung liegt auf der Einflussnahme des Spanwinkels und der Schmrnerung

auf die Oberflächengüte und Eloxierbarkeit. Die Zusammensetzung des verwendeten Werkstoffes (AW 2007) ist der Tabelle 6-2 zu entnehmen.

Tabelle 6-2: Chemische Zusammensetzung der kommerziellen 2007-Legierung in Gew.-% mittels Funkenspektalanalyse

Mg	Mn	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Bi	Ni	Pb	Sn	Al
0,59	0,68	0,23	0,53	3,83	0,41	0,06	0,01	0,02	0,61	0,06	Rest

Die Einstellung der Spanwinkel erfolgte manuell über eine speziell dafür vorgesehene Vorrichtung (siehe Abbildung 6-19). Der Versuchsplan mit allen angewendeten Spanwinkeln und der entsprechenden Trocken- oder Nasszerspanung und einiger der Zielgrößen sind unter Tabelle 6-3 angeführt.



Abbildung 6-19: Darstellung der für die Versuche herangezogenen Hartmetallschneide und den entsprechenden Rundproben

Tabelle 6-3: Ergebnisse der Drehversuche mit besonderem Augenmerk auf die Rauigkeitskenngrößen

Winkel [°]	Schmierung [-]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Standardabweichung $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Standardabweichung $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
-27	Öl-Wasser-Emulsion	0,44	0,01	2,65	0,07
+27	Öl-Wasser-Emulsion	0,64	0,02	3,90	0,36
-18	Öl-Wasser-Emulsion	0,31	0,02	2,32	0,17
+18	Öl-Wasser-Emulsion	0,37	0,01	2,33	0,11
-9	Öl-Wasser-Emulsion	0,50	0,02	3,11	0,10
+9	Öl-Wasser-Emulsion	0,48	0,01	2,77	0,23
0	Öl-Wasser-Emulsion	0,39	0,01	2,60	0,16
+27	Trocken	0,36	0,05	2,62	0,17
-27	Trocken	0,52	0,03	3,22	0,20
0	Trocken	0,36	0,03	2,63	0,20

Sehr starke Unterschiede ergaben sich hinsichtlich der Spanformen (siehe Abbildung 6-20). Generell ermöglichten positive Winkel Endlosspäne, die sich in vielen Fällen in Knäueln aufstauten und so die frische Drehoberfläche beschädigen. Negativ verhielt sich dabei der Span bei einem Schneidwinkel von  $+27^\circ$  mit Schmierung (siehe Abbildung 6-20, a). Die zugehörige Probe zeigte auch die höchsten Rauigkeitswerte (Tabelle 6-3). Weiters ergaben die Winkel  $-9^\circ$  und  $-18^\circ$  Endlosspäne. Optimal sind daher die Winkel  $0^\circ$ ,  $+9^\circ$ ,  $+18^\circ$  und  $-27^\circ$  (Spanbilder sind im Anhang). Generell zeigen die Versuche unter Schmierung längere Späne als die Trockenbearbeitung. Direkt nach dem Drehen waren die trockenzerspannten Probenkörper auch deutlich wärmer. Ergänzende Ergebnisse bezüglich der gebildeten Späne befinden sich im Anhang.

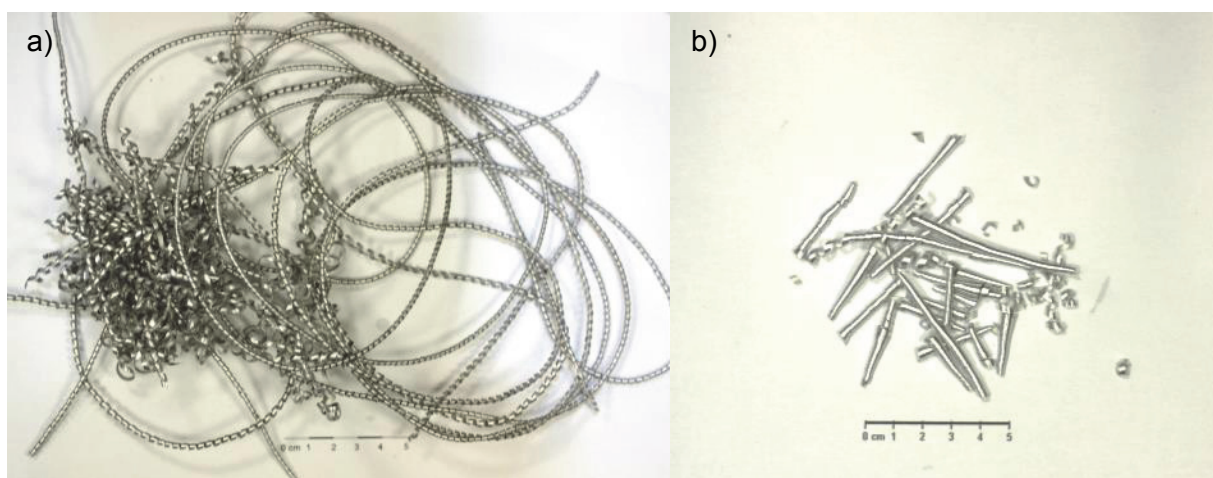


Abbildung 6-20: Drehspäne nach der Zerspanung von 2007-Aluminium mit Drehwinkeln von (a)  $+27^\circ$  und (b)  $-27^\circ$

## 7 Eloxierversuche

Der folgende Teil der Arbeit baut teilweise auf die Ergebnisse aus den Zerspanungsversuchen auf. Erweiterungen bezüglich der mechanischen Vorbehandlung erfolgen mittels Kugelstrahlen, Polieren, Bürsten und Schleifen der Oberflächen. Weiters werden unterschiedliche Legierungsklassen für Eloxierversuche unter Anwendung variabler Prozessparametern herangezogen. Betrachtung finden dabei verschiedene Effekte, welche sich aus der chemischen Zusammensetzung, der thermischen Vorgeschichte und anderen Eigenschaften der Grundwerkstoffe ergeben. Zielsetzung ist es, möglichst fehlerfreie, harte und korrosionsbeständige Schichten herzustellen und erweiterte Einblicke in die Mechanismen der Schichtbildung zu erhalten. Abbildung 7-1 zeigt die allgemeine Verfahrensrouten der Versuchsabfolgen.

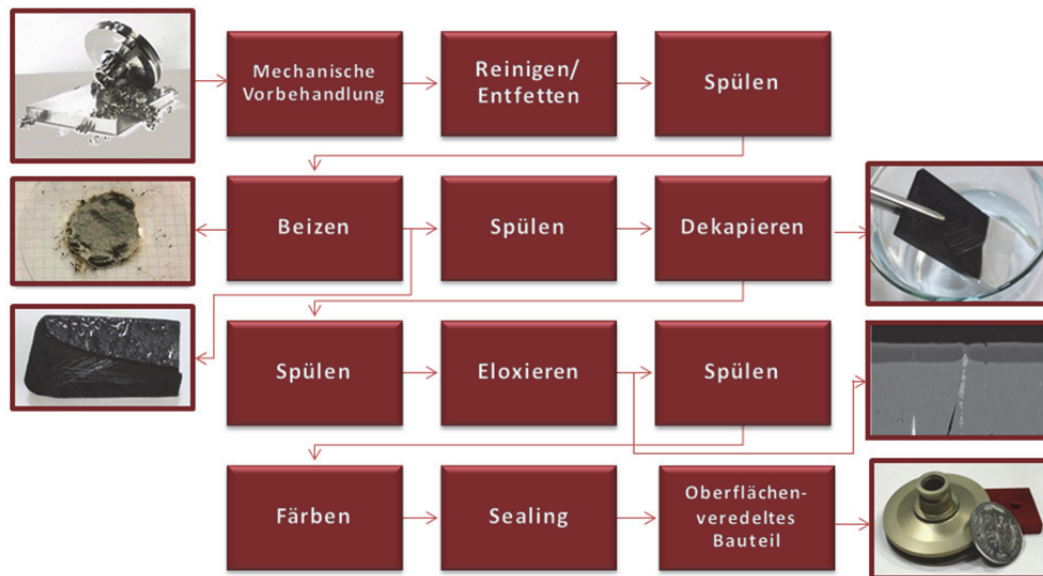


Abbildung 7-1: Übersichtsdarstellung der einzelnen Verfahrensschritte in den Eloxierversuchsreihen

## 7.1 Analyse unterschiedliche Vorbehandlungen

Für Zerspanungsunternehmen hat die Passgenauigkeit und Formstabilität ihrer Produkte höchste Priorität. Wie bereits erwähnt, kommt es während des Eloxierprozesses aber sowohl zu Materialabtrag als auch zu Schichtwachstum. Ersteres korreliert mit den Prozessparametern der Beizung (z. B. pH-Wert, Temperatur). Sogenannte Beizgrübchen sind ebenfalls ein wichtiges Phänomen, da sie die Dauerfestigkeit eines Werkstücks drastisch senken können [57,85,86]. Unzureichend entfernte Oxidschichten führen zudem zu Problemen wie Schichtabplatzungen und verringerter Korrosionsbeständigkeit [6,56]. Die im Folgenden betrachteten Beizversuche beziehen sich auf die Legierungen AW 2017, AW 6082, AW 7075 (siehe Tabelle 7-1) und eine Recyclinglegierung aus Festplattenschrotten.

Tabelle 7-1: Zusammensetzungen der Aluminiumlegierungen AW 2017, AW 6082, AW 7075 und der Recyclinglegierung aus Festplattenschrotten für die Beizversuche in sauren und basischen Medien

Probe	Fe	Si	Cu	Mg	Mn	Cr	Ti	Zn	Al
7075	0,30	0,20	1,26	2,42	0,02	0,17	0,05	5,37	Rest
2017	0,25	0,65	4,47	0,85	0,78	0,02	0,04	0,08	Rest
6082	0,24	1,14	0,09	0,84	0,57	0,03	0,04	0,05	Rest
Guss	0,45	5,39	1,47	0,13	0,10	0,03	0,04	3,30	Rest

Der relativ einfache Versuchsaufbau (siehe Abbildung 7-2) ermöglicht es exakt Materialabtragraten für bestimmte Legierungen bei unterschiedlichen Elektrolytkonzentrationen und -temperaturen zu ermitteln. Als Untersuchungsmethoden fanden dabei einerseits die weit verbreitete basische Behandlung in Natronlauge mit anschließender Dekapierung in Salpetersäure und andererseits die seltenere Salpetersäureätzung bei erhöhten

Temperaturen Anwendung. Weitere Versuche zu unterschiedlichen chemischen Vorbehandlungen, z. B. unter Zusatz von Natriumfluorid, sind in den verschiedenen Folgekapiteln, zugeordnet zu den jeweiligen legierungsspezifischen Eloxierversuchen, dargestellt. Ein wichtiger Aspekt ist neben der Analyse von Abtragraten auch die Bewertung der durch Beizung generierten Oberflächen. Ein Beispiel einer frisch behandelten 7075-Legierung zeigt Abbildung 7-2 (b). Dabei wird eine dünne, rissbehaftete Aluminiumoxidschicht neben von der Beizung unberührt gebliebenen eisenhaltigen Partikeln sichtbar. Bei längerem Ätzen würde sich rund um diese anodisch wirkenden Phasen Ätzgrübchen ausbilden. [57]

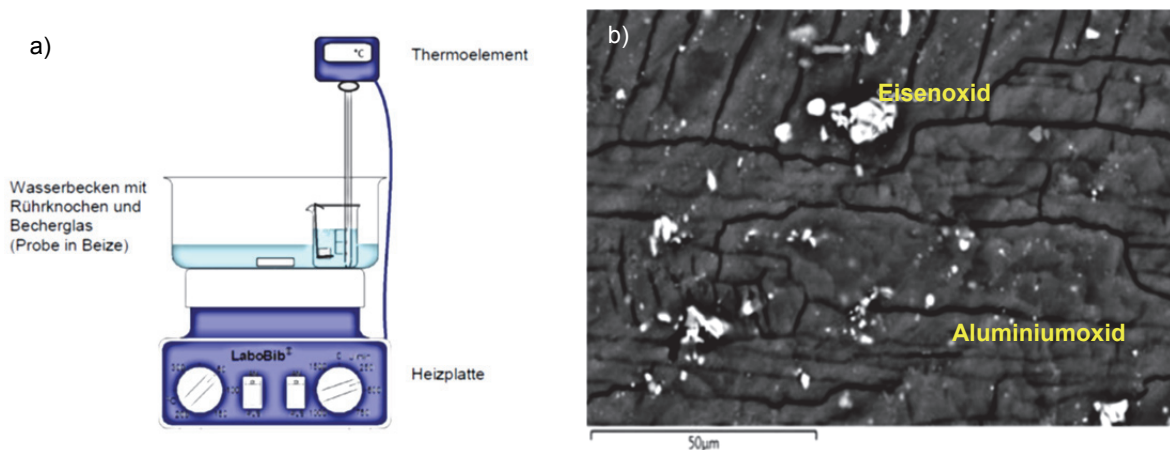


Abbildung 7-2: Einfacher Versuch zur Bestimmung des Massenverlustes bei der Beizung in verschiedenen sauren und basischen Medien (a) und die entstehende Oberfläche nach dem Beizen in Natronlauge für eine 7075-Legierung (b)

Eine Auswertung der Beizversuche ergab für den 7075-Werkstoff die unter Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 dargestellten Abtragkurven. Dabei wird ersichtlich, dass eine höhere Säurekonzentration zu geringerem Materialabträgen führt. Dieser Effekt beruht auf der Passivierung des Metalls.

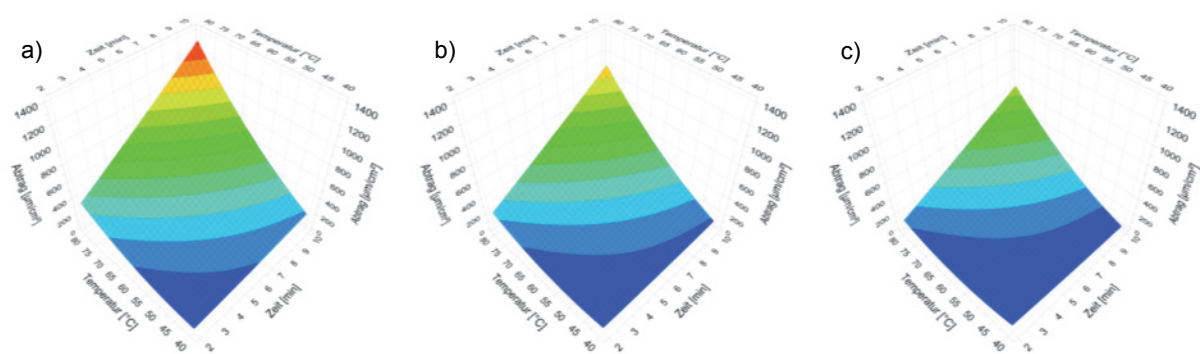


Abbildung 7-3: Abtragkurven beim sauren Beizen in Salpetersäure von 7075-Legierungen bei unterschiedlichen Salpetersäurekonzentrationen (a) 20 Gew.-% (b) 40 Gew.-% (c) 60 Gew.-%

Bei der basischen Beize ergibt sich ein sehr ähnlicher Verlauf. Allerdings sind hier wesentlich größere Abtragraten gegeben.

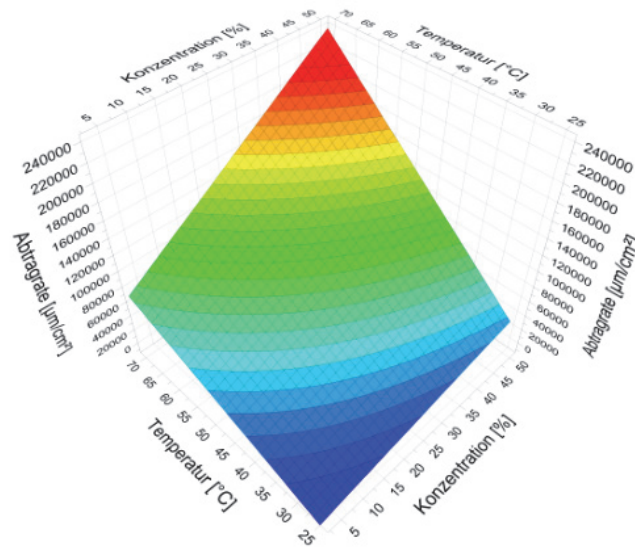


Abbildung 7-4: Abtragkurve beim basischen Beizen einer 2024-Legierung in Natronlauge als Funktion der Temperatur und verschiedener NaOH-Konzentrationen

Abbildung 7-5 zeigt die Auswirkungen der Dekapierung auf die Oberfläche nach dem Beizen. Unter Abbildung 7-5 (a) ist die unstrukturierte Ablagerung verschiedener in Natronlauge unlöslicher Oxide dargestellt. Abbildung 7-5 (b) enthüllt die darunterliegende Oberfläche und einige, selbst in Salpetersäure unlöslichen, Restbereiche. Die eindeutig kathodisch wirkenden Fremdphasen haben dabei zur Ausbildung eines Ätzgrübchens, also einer bevorzugten Auflösung der Aluminiummatrix, geführt.

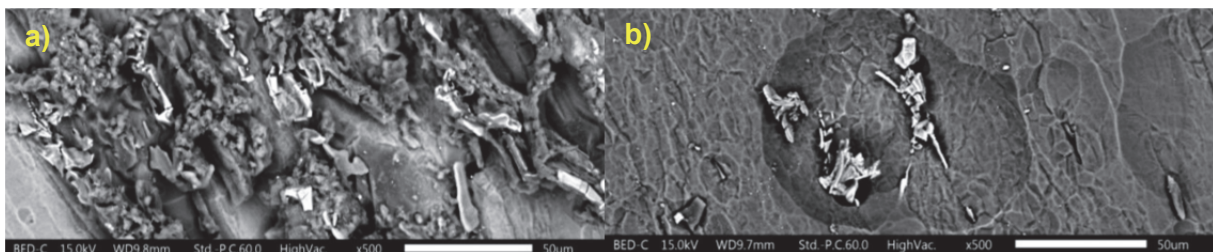


Abbildung 7-5: Darstellung einer frisch in Natronlauge gebeizten Oberfläche (a) vor und (b) nach dem Dekapieren in Salpetersäure

Alle weiteren Abtragraten und ergänzende Messungen bezüglich der an den Elektrolyten abgegebenen Elemente sind dem Anhang zu entnehmen.

## 7.2 Eloxieren von Recyclinglegierungen

Im Allgemeinen ist es schwierig, Aluminiumwerkstoffe mit exakt bekanntem Rezyklatanteil und deklarierten Einsatzschrotten zu erhalten. Um dieser Problematik beizukommen, erfolgte die Herstellung dreier unterschiedlicher Sekundärlegierungen. Anwendung fanden dabei drei verschiedene Schrottklassen. Das erste Material stammt dabei aus dem Recyclingprozess von Festplattenschrotten und entspricht der Zusammensetzung nach dem EN AC-46000

(AlSiCu3FeZn). Wobei die erhöhten Kupfer- und Eisenwerte auf Diffusionsvorgänge während des Umschmelzens der Festplattengehäuse zurückzuführen sind. Legierung 2 entstand aus unter Salz umgeschmolzenen, bezüglich ihrer Legierungsklasse vorsortierten, Aluminiumspänen. Der dritte Werkstoff stammt aus dem Recyclingprozess von Dosenschrotten. Die exakten Legierungszusammensetzungen sind Tabelle 7-1 zu entnehmen.

Tabelle 7-2: Chemische Zusammensetzung der Recyclinglegierungen und Vorschmolze in Gew.-% laut Funkenspektralanalyse

Leg.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Pb	Sn	Zr
1	10,1	0,62	2,69	0,13	0,21	0,02	0,24	1,12	0,04	0,11	0,02	0,01
2	0,09	0,14	1,58	0,02	2,49	0,18	0,01	5,71	0,06	0,01	-	0,01
3	0,26	0,48	0,17	0,87	1,40	0,02	0,02	0,06	0,03	0,01	-	0,00

Für die Analyse des Eloxierverhaltens erfolgten verschiedene Vorbehandlungen der einzelnen Proben (siehe Abbildung 7-3). Die thermischen Modifikationen umfassen dabei entweder eine Homogenisierungsglühung entsprechend der unterschiedlichen Legierungszusammensetzungen oder eine festigkeitssteigernde Wärmebehandlung mit Lösungsglühen, Abschrecken und Warmauslagern. Unter die mechanischen Oberflächenbehandlungen fallen Polieren, Schleifen, Kugelstrahlen und Fräsen. Die Variationen der chemischen Vorbehandlung entspricht den herkömmliche Verfahren mit dem Beizen in Natronlauge (20 Gew.-%) bei 50 °C und dem Dekapieren in Salpetersäure (10 Gew.-%) bei Raumtemperatur. Die alternativen Routen beschreiben das saure Beizen in HNO<sub>3</sub> mit und ohne Natriumfluorid, wobei bei letzteren erhöhte Temperaturen (40 °C) Anwendung fanden. Die Prozessparameter beim eigentlichen Eloxieren variieren hinsichtlich der angewendeten Stromdichte, wobei zu beachten bleibt, dass bei Spannungsspitzen (über 60 V) am Ende der Eloxierung die Stromstärke gesenkt werden musste. Die in Tabelle 7-3 angeführten Beckentemperaturen bei der Anodisierung variierten aufgrund der während der Versuche eingebrachten thermischen Energie. Die Anodisierzeit betrug für alle Proben 20 Minuten, wobei relativ hohe Stromstärken für die Ausbildung dicker Schichten sorgten. Die konstant gehaltenen Einflussfaktoren sind die Elektrolytzusammensetzung und -konzentration im Anodisierbecken (15 Gew.-% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 5 g/Liter C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, 8 g/Liter Aluminium), eine gleichmäßige Badumwälzung mittels Druckluft einblasung und die Probenbefestigung auf Titanstellen.



Tabelle 7-3: Versuchsplan zur Eloxierung von drei verschiedenen Recyclinglegierungen

Leg./Nr.	WB	Mech. Beh.	Beizen mit NaOH (T, t)	Beizen mit HNO <sub>3</sub> (T, t)	Beizen mit HNO <sub>3</sub> und NaF (T, t)	Anodisieren (T, c, t)
1/1	O	Kugelstrahlen	50 °C, 1 min	20 °C, 1 min	-	14 °C, 20 A, 20 min
2/2	O	Kugelstrahlen	50 °C, 1 min	20 °C, 1 min	-	14 °C, 20 A, 20 min
3/3	O	Kugelstrahlen	50 °C, 1 min	20 °C, 1 min	-	14 °C, 20 A, 20 min
1/4	O	Schleifen	-	20 °C, 10 min	-	13 °C, 20 A, 20 min
2/5	O	Schleifen	-	20 °C, 10 min	-	13 °C, 20 A, 20 min
3/6	O	Schleifen	-	20 °C, 10 min	-	13 °C, 20 A, 20 min
1/7	O	Schleifen	-	-	40 °C, 15 min	13 °C, 20 A, 20 min
2/8	O	Schleifen	-	-	40 °C, 15 min	13 °C, 20 A, 20 min
3/9	O	Schleifen	-	-	40 °C, 15 min	13 °C, 20 A, 20 min
1/10	T6	Polieren	-	-	40 °C, 25 min	13 °C, 5 A, 10 min
2/11	T6	Polieren	-	-	40 °C, 25 min	13 °C, 10 A, 10 min
3/12	T6	Polieren	-	-	40 °C, 25 min	13 °C, 10 A, 10 min
1/13	T6	Polieren	60 °C, 5 min	20 °C, 1 min	-	13 °C, 10 A, 20 min
2/14	T6	Polieren	60 °C, 5 min	20 °C, 1 min	-	13 °C, 10 A, 20 min

Die Ergebnisse der Anodisierung zeigen teilweise inhomogene Schichtdicken und verschiedene Farbgebungen (siehe Tabelle 7-4).

Tabelle 7-4: Ergebnisse der Eloxierung unterschiedlicher Recyclinglegierung

Leg./Nr.	Aussehen der Eloxierung	Schichtdicke
1/1	Dunkles Grau-braun	35 µm
2/2	Grünstich	38 µm
3/3	Mattes Grau mit dunklen Punkten	32 µm
1/4	Braun	35 µm
2/5	Grau mit leichter Grünfärbung	30 µm
3/6	Mattgrau mit inhomogänen Glanz	49 µm
1/7	Graubraun	32 µm
2/8	Grünlich mit dunkleren Punkten	47 µm
3/9	Dunkelbraun mit punktuellen Defekten	38 µm
1/10	Korngrenzen sind sichtbar	28 µm
2/11	Korngrenzenätzung und inhomogener Glanz	17 µm
3/12	Korngrenzenätzung und inhomogener Glanz	13 µm
1/13	Grau mit leichten Defekten	35 µm
2/14	Grau	35 µm
3/15	Mattgrau	32 µm

Die erste Legierung weist ein von Primärsilizium dominiertes Eloxierverhalten auf. So ist auf den lediglich homogenisierungsgeglühten und herkömmlich geätzten Proben eine deutliche Dendritenstruktur in der Draufsicht und eine generelle Braunfärbung erkennbar (siehe Abbildung 7-6, a). Abbildung 7-6 (b) zeigt den Querschliff der Eloxierschicht, wobei die unoxidierten Si-Partikel von der Aluminiumoxidmatrix umwachsen sind und durch die somit induzierten Wachstumsspannungen zu lokalen Rissstrukturen führten. Weiters sind Hohlräume, verursacht durch die Auflösung kupferhaltiger Oxide, zu erkennen.

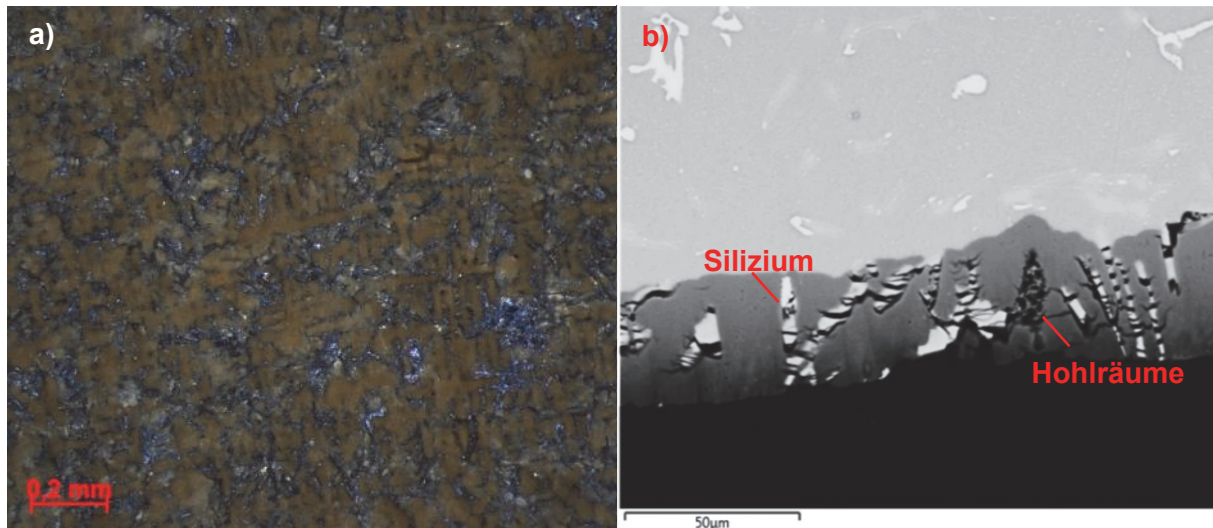


Abbildung 7-6: Eloxierschicht auf Legierung 1 (Festplattenrecycling), homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Natronlauge, dekapiert in Salpetersäure und mit  $18 \text{ A/dm}^2$  anodisiert;

Die Messung der chemischen Zusammensetzung der defektfreien Oxidschicht erfolgte an fünf Punkten. Die entsprechenden Mittelwerte sind Tabelle 7-5 zu entnehmen.

Tabelle 7-5: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Eloxierschicht auf Legierung 1 ohne Warmauslagerung

O [Gew.-%]	Al [Gew.-%]	S [Gew.-%]	Zn [Gew.-%]	Cu [Gew.-%]
52,1	40,6	6,0	0,7	0,5

Die Einflussnahme über die chemische Vorbehandlung stellt Abbildung 7-7 dar. Die nach der sauren Beizung mittels Salpetersäure und Natriumfluoride anodisierte Probe zeigt eine ungleichmäßige aber relativ dichte Oxidschicht (siehe Abbildung 7-7, a). Die Detailaufnahme unter Abbildung 7-7 lässt feinverteilte oder lokal gebrochene Siliziumphasen erkennen. Die entsprechende Elementanalyse ist unter Abbildung 7-8 ersichtlich.

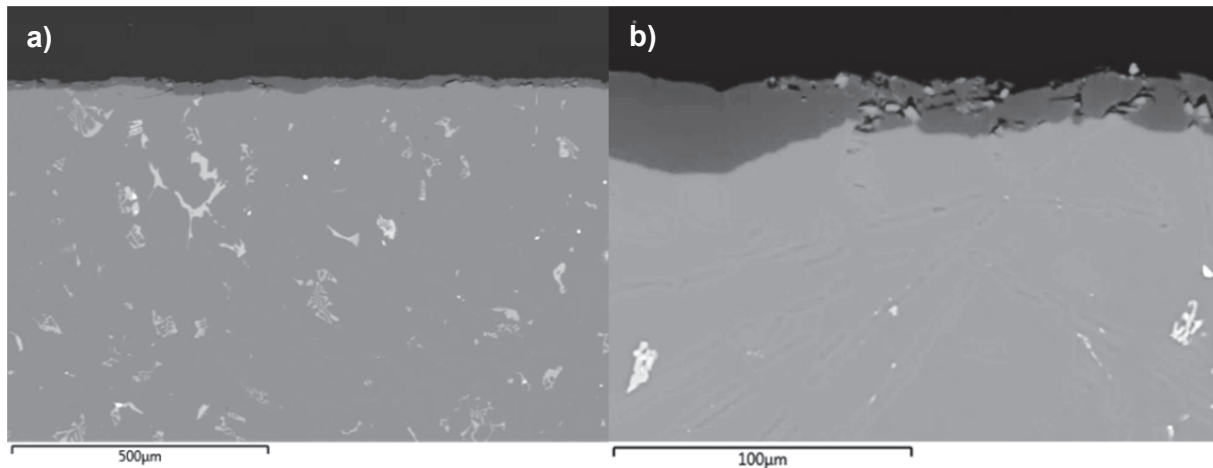


Abbildung 7-7: Querschliff einer Eloxierschicht (a) auf sauer gebeiztem ( $\text{HNO}_3$  und  $\text{NaF}$ ) und geschliffenem Recyclingaluminium (Legierung 1, Festplattenschrott) bei einer aufgewendeten Stromdichte von  $18 \text{ A/dm}^2$  (b) Detailansicht

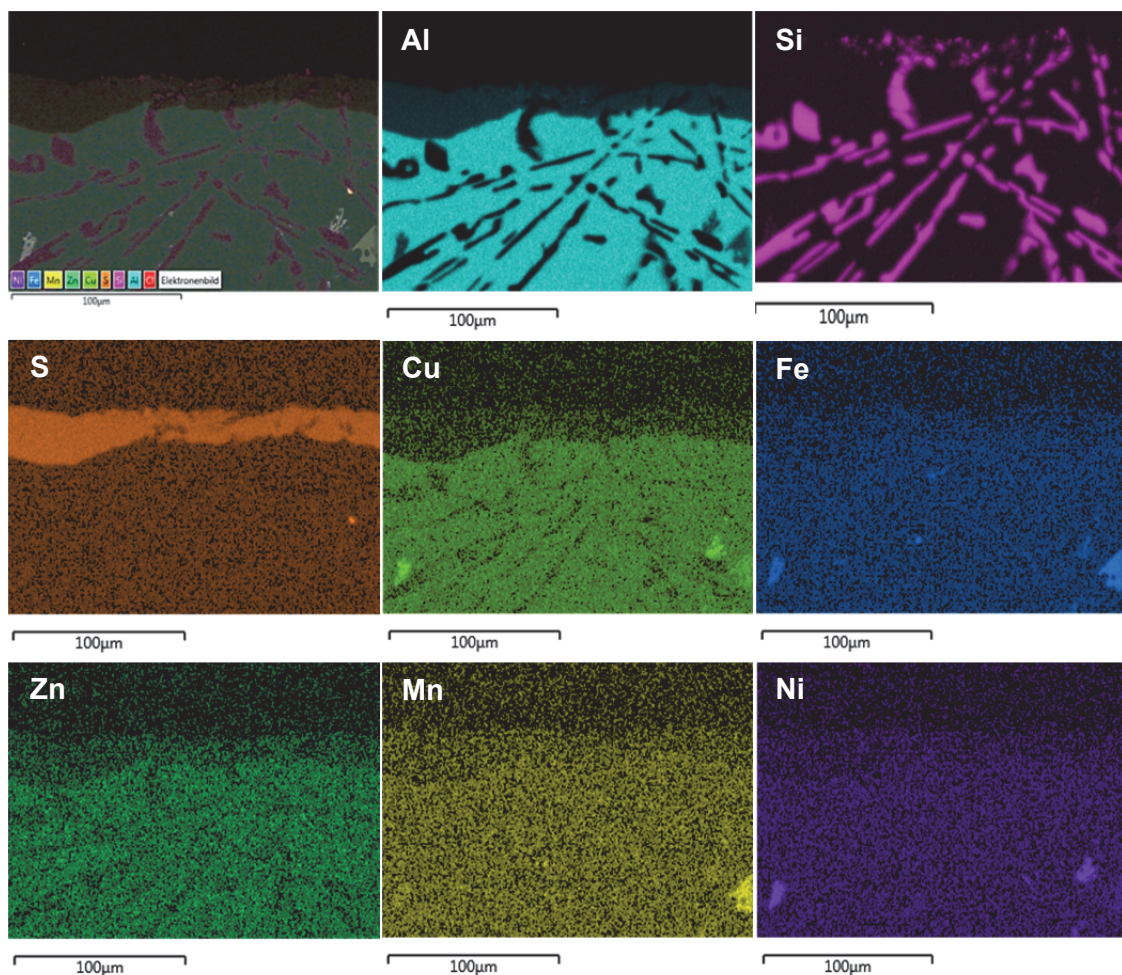


Abbildung 7-8: Elementverteilung einer Eloxierschicht auf sauer gebeiztem ( $\text{HNO}_3$  und  $\text{NaF}$ ), warmausgelagertem und poliertem Recyclingaluminium (Legierung 1, Festplattenschrott) bei einer aufgewendeten Stromdichte von  $18 \text{ A/dm}^2$

Der Einfluss der T6-Wärmebehandlung zeigt sich nicht nur in der Farbe der Eloxierung, sondern auch in den entsprechenden Querschliffen.

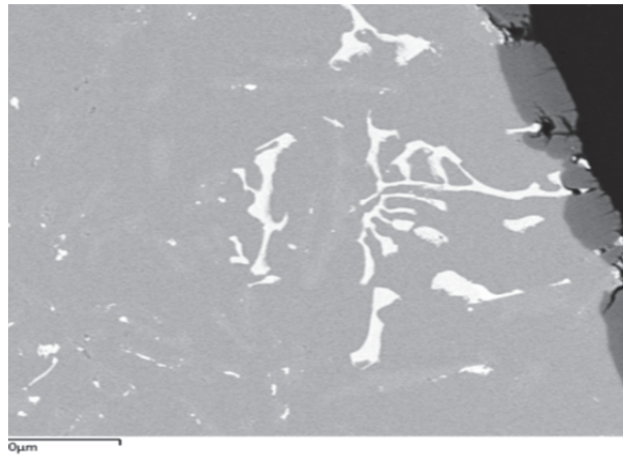


Abbildung 7-9: Querschliff einer Eloxierschicht auf herkömmlich gebeiztem (NaOH und HNO<sub>3</sub>), warmausgelagertem und geschliffenem Recyclingaluminium (Legierung 1, Festplattenschrott) bei einer aufgewendeten Stromdichte von 9 A/dm<sup>2</sup>

Die Messung der chemischen Zusammensetzung der defektfreien Oxidschicht erfolgte an fünf Punkten. Die entsprechenden Mittelwerte sind Tabelle 7-6 zu entnehmen.

Tabelle 7-6: Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Eloxierschicht auf Legierung 1 ohne Warmauslagerung

O [Gew.-%]	Al [Gew.-%]	S [Gew.-%]	Zn [Gew.-%]	Cu [Gew.-%]	Si [Gew.-%]
42,5	44,9	3,1	0,8	0,8	7,4

Von der Zusammensetzung her entspricht die Legierung aus den Spanschrotten einem 7075-Material. Sämtliche eloxierte Werkstücke weisen eine leichte bis starke Grünfärbung (siehe Abbildung 7-10, a) auf. Die mit dem herkömmlichen Beizverfahren (NaOH, HNO<sub>3</sub>) behandelte Probe hat eine sehr gleichmäßige Oxidschicht. Lediglich entsprechend den Korngrenzenverläufen des Grundsubstrats folgende Hohlraumdefekte sind zu erkennen. Die im Grundmaterial vorliegenden Phasen sind unter Abbildung 7-10 (b) aufgeführt.

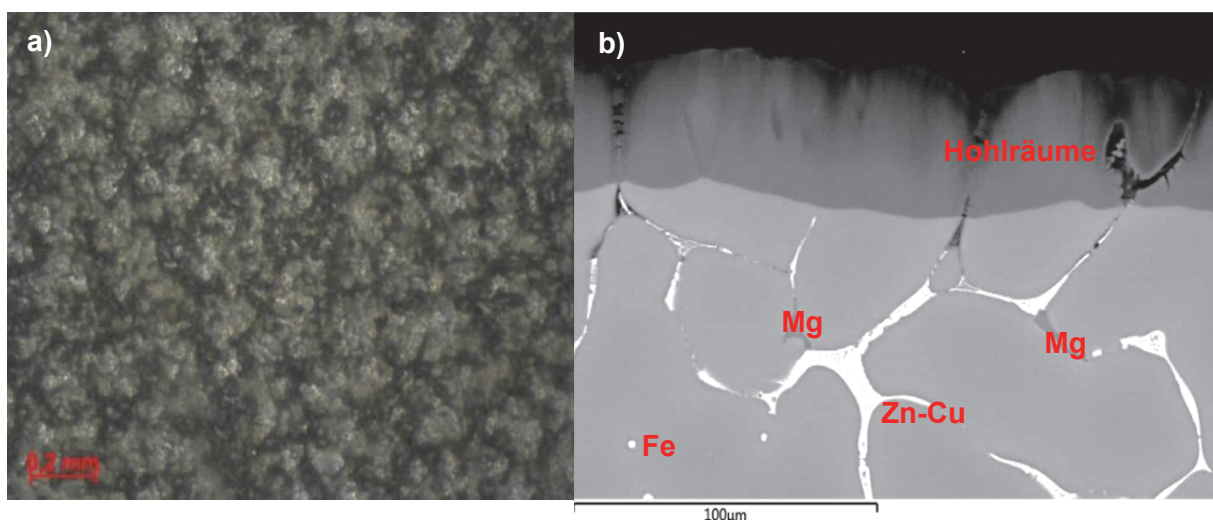


Abbildung 7-10: Eloxierschicht auf Legierung 2 (Spanrecycling); homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Natronlauge, dekapiert in Salpetersäure und mit 18 A/dm<sup>2</sup> anodisiert;  
(a) Draufsicht (b) Querschliff;

Die Proben mit der sauren Beizung bei Raumtemperatur wiesen Probleme mit der Schichthaftung und teilweisen Abplatzungen auf (siehe Abbildung 7-11 a und b).

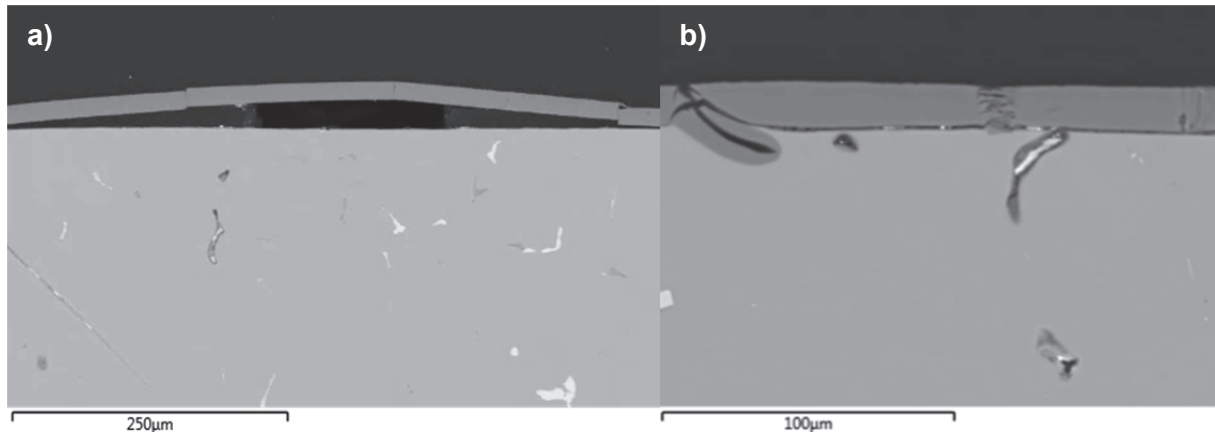


Abbildung 7-11: Eloxierschicht auf Legierung 2 (Spanrecycling); homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Salpetersäure bei Raumtemperatur und mit  $18 \text{ A/dm}^2$  anodisiert;  
(a) Übersichtsaufnahme; (b) Detailansicht

Eine chemische Analyse mittels Linescan zeigt Elementanreicherungen (Zn, Mg) an der Oberseite des Oxids (siehe Abbildung 7-12). In der Grenzzone zwischen Oxid und Metall können allerdings keine Anhäufungen festgestellt werden.

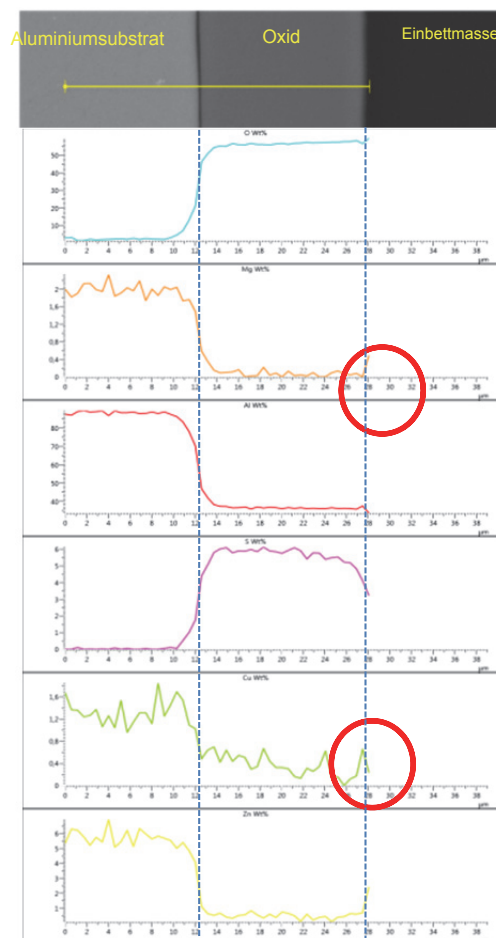


Abbildung 7-12: Linescan über die Oxidschicht auf Legierung 2 (Spanrecycling), homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Salpetersäure bei Raumtemperatur und mit  $18 \text{ A/dm}^2$  anodisiert;

Abbildung 7-13 zeigt die Abplatzungen der Eloxierschicht an den Werkstückkanten. Weiters findet sich unter Abbildung 7-14 und Tabelle 7-7 unterschiedliche chemische Analysen aufgenommen mittels EDX mit verschiedenen Beschleunigungsspannungen, um etwaige Oberflächeneffekte darzustellen.

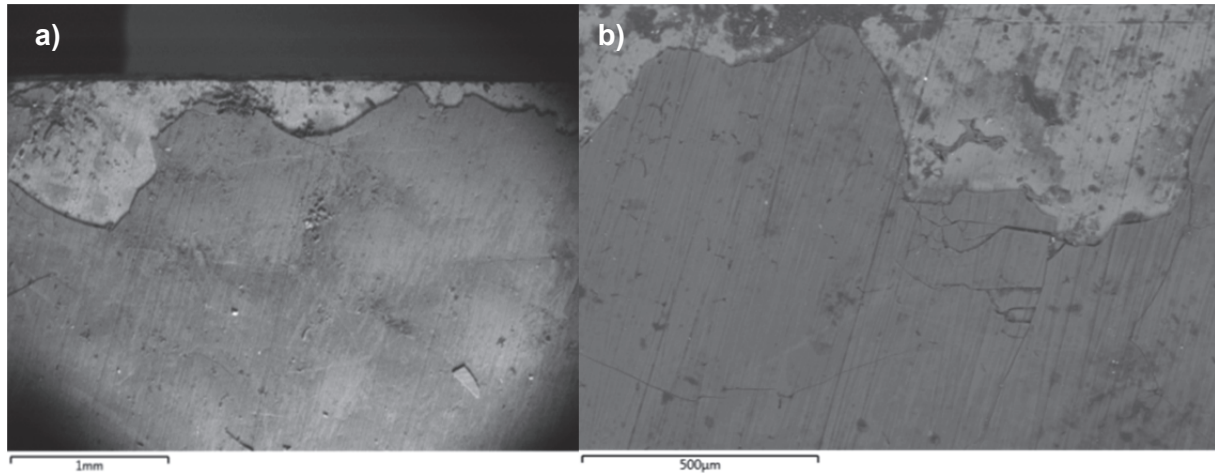


Abbildung 7-13: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Abplatzungen auf der sauer vorbehandelten und unter  $18 \text{ A/dm}^2$  anodisierten Spanschrottlegerung; (a) Übersichtsaufnahme und (b) Detaildarstellung

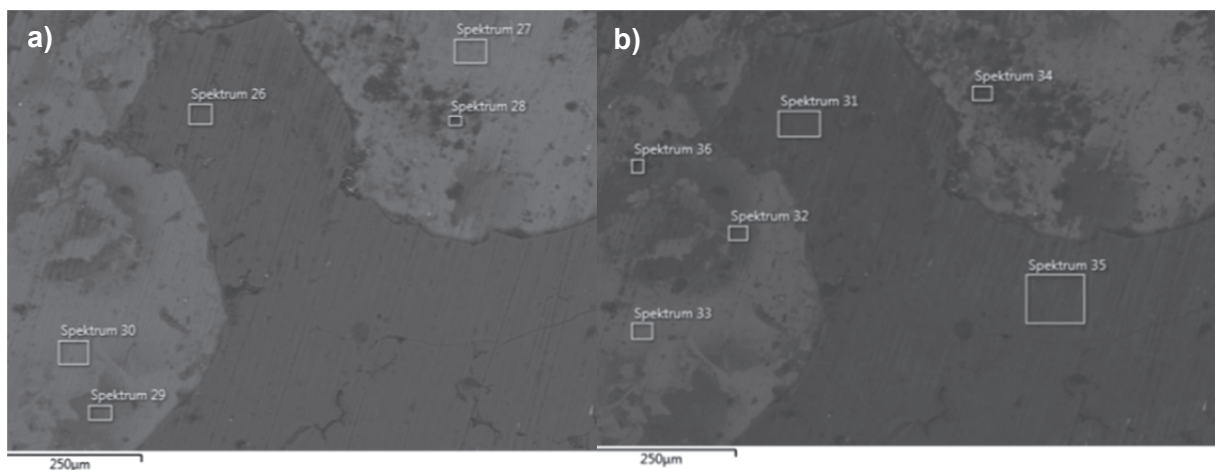


Abbildung 7-14: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Abplatzungen auf der sauer vorbehandelten und unter  $18 \text{ A/dm}^2$  anodisierten Spanschrottlegerung, aufgenommen mit unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen bei (a) 20 eV und (b) 13 eV

Tabelle 7-7: Elementspektren, aufgenommen mittels EDX für die unter Abbildung 7-14 (a) und (b) abgebildeten Bereiche

Spektrum	O	Al	S	Ca	Zn	Si	Mg	Cu	Fe
26	48,5	42,7	6,9	0,6	0,6	0,3	0,2	-	-
27	13,8	77,6	0,1	-	5,0	-	1,8	1,4	-
28	41,3	51,9	0,6	-	2,9	0,7	1,1	0,5	0,6
29	35,2	58,7	0,4	0,3	3,3	-	1,1	0,9	-
30	12,8	78,8	0,2	-	5,0	-	1,7	1,3	-
31	52,1	10,1	5,4	1,2	-	0,4	0,3	-	-
32	41,9	53,5	1,0	0,5	2,0	-	0,7	-	-
33	10,2	80,6	-	-	5,5	-	1,7	2,0	-
34	46,8	46,6	1,6	0,4	3,2	-	0,9	-	-
35	54,6	38,8	5,0	0,8	-	0,4	-	-	-
36	53,2	39,1	0,6	1,8	0,8	0,9	0,4	-	0,4

Abbildung 7-15 (a, b) zeigen die Schnittkante der basisch vorbehandelten Probe aus Spanschrotten. Hier ist die Schicht leicht verformt, weist aber keine umfangreichen Abplatzungen auf. Hingegen zeigen dunkle Bereiche mit hohen Zn-Gehalten das Vorhandensein von Ätzgrübchen. Wie stark dieser Effekt ist, wird in Abbildung 7-16 verdeutlicht.

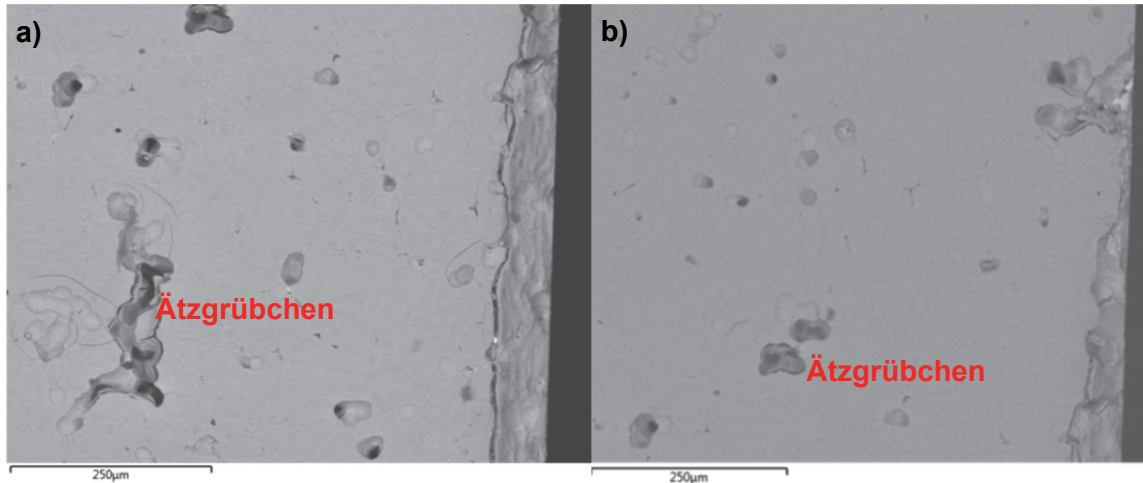


Abbildung 7-15: Schnittkanten der Probe aus Spanschrotten mit gut haftender Eloxierschicht (nach basischer Beizen in NaOH und Dekapierung in HNO<sub>3</sub>) mit gut sichtbaren Ätzgrübchen

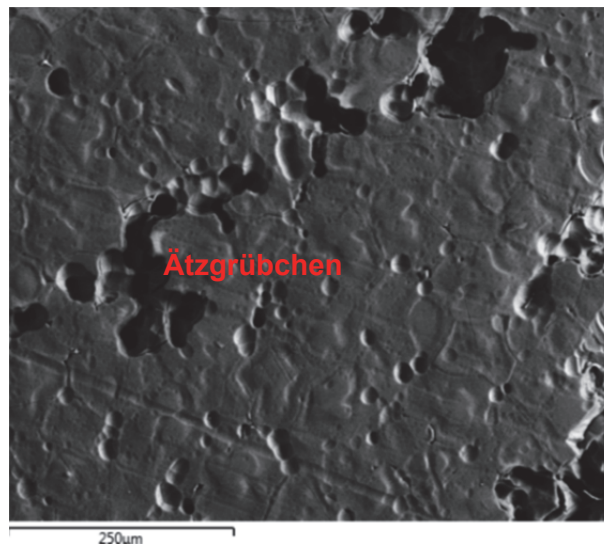


Abbildung 7-16: Topographische Aufnahme der Oberfläche der basisch vorbehandelten Spanschrottprobe mit deutlichen Ätzgrübchen

Die Eloxierung auf dem Recyclingprodukt aus Dosenschrotten zeigt bei der kombinierten Behandlung aus Polieren und saurer Beizung mit erhöhten Temperaturen eine sehr gleichmäßige und dichte Schicht (siehe Abbildung 7-17, b). Die Eisen-Mangan-Phasen, welche auch in der Draufsicht erkennbar sind (siehe Abbildung 7-17), werden dabei weitgehend in die Schicht eingebaut und lösen sich nur geringfügig. Anders verhält sich die warmausgelagerte und basisch gebeizten Probe (siehe Abbildung 7-18). Zu den Unter-

schieden zwischen den Eloxierschichten unter Abbildung 7-17 und Abbildung 7-18 gehört auch die unterschiedlich gewählte Stromdichte von 18 und 9 A/dm<sup>2</sup>.

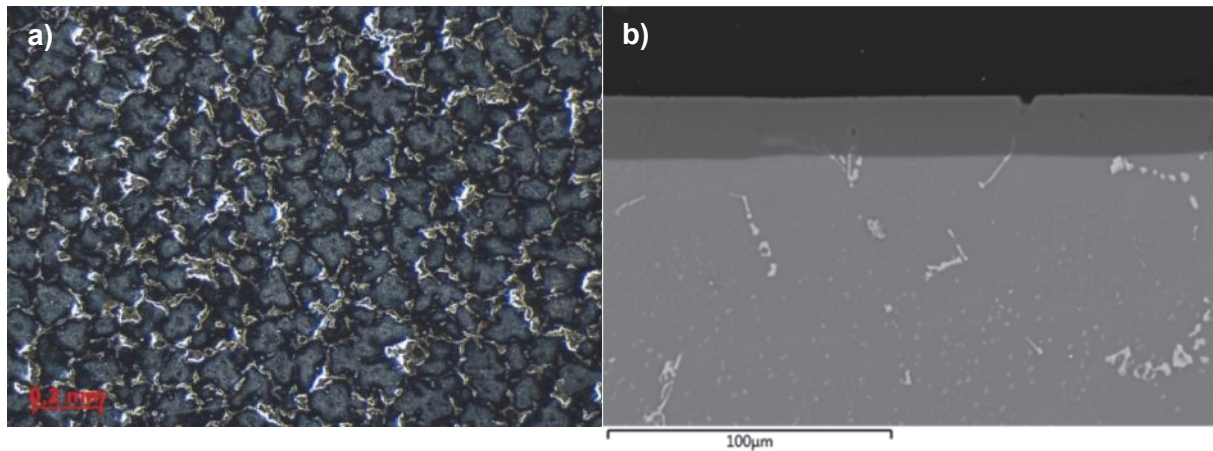


Abbildung 7-17: Eloxierschicht auf Legierung 3 (Dosenschrotte); homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Salpetersäure und Natriumfluorid bei 40 °C, anodisiert mit 18 A/dm<sup>2</sup>; (a) Draufsicht und (b) Querschliff;

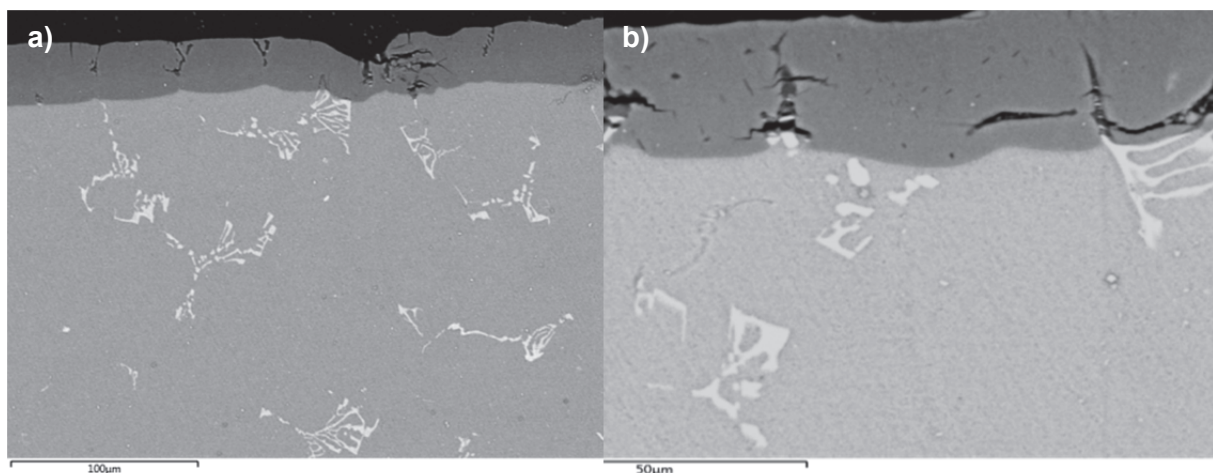


Abbildung 7-18: Eloxierschicht auf Legierung 3 (Dosenschrotte); warmausgelagert, gebeizt in Natronlauge und dekapiert in Salpetersäure, anodisiert bei 9 A/dm<sup>2</sup>; (a) Übersicht- und (b) Detailaufnahme;

Durch einen Vergleich der Sekundärphasenzusammensetzung in der wärmebehandelten Probe (siehe Abbildung 7-19) zur nichtausgelagerten (siehe Abbildung 7-20) wird ersichtlich, dass direkt nach dem Vergießen hauptsächlich Eisenmangan-Phasen vorliegen, die während der anodischen Oxidation nicht löslich sind, wohingegen nach längerer Warmauslagerung komplexe Verbindungen mit Mg, Fe, Mn und anderen Elementen vorliegen, welche wiederum selbst bei geringeren Stromdichten oder Spannungen im Elektrolyt löslich sind (siehe Abbildung 7-19).



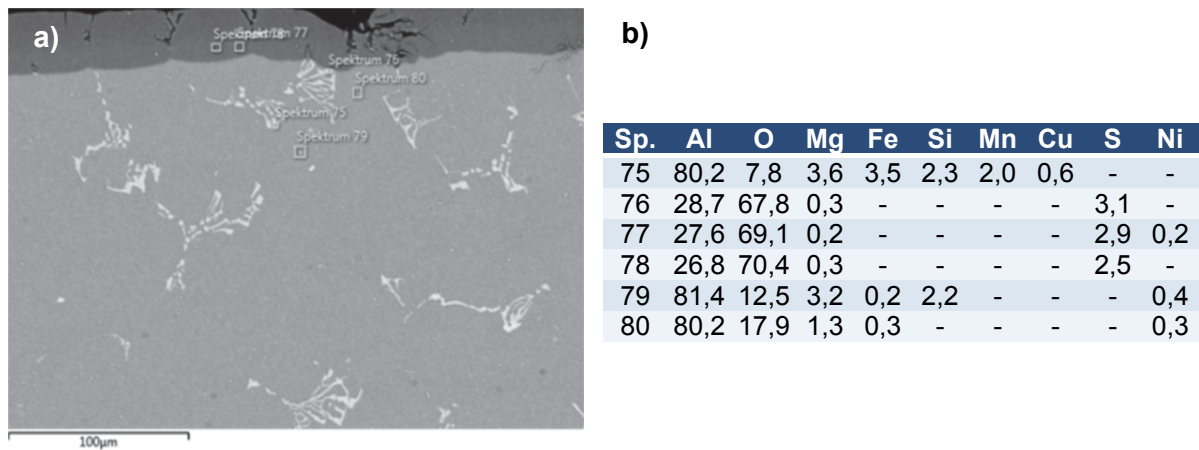


Abbildung 7-19: Eloxierschicht auf Legierung 3 (Dosenschrotte); warmausgelagert, geätzt in Natronlauge und dekapiert in Salpetersäure, anodisiert bei  $9 \text{ A/dm}^2$ ; (a) REM-Aufnahme und (b) entsprechenden chemischen Analysen per EDX in Gew.-% angeführt

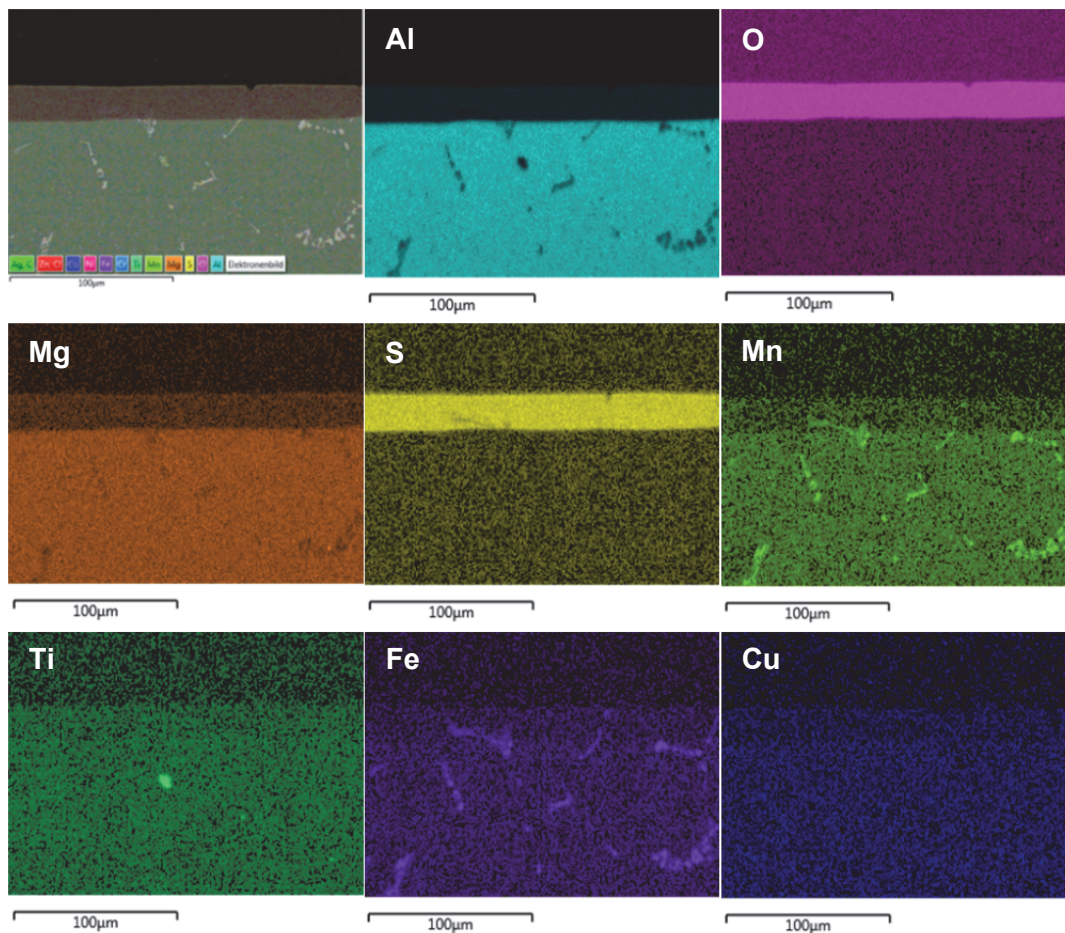


Abbildung 7-20: Elementverteilung zu Abbildung 7-17 (b)

### 7.3 Eloxieren von 1050-Legierungen

Der Versuchsplan für die Eloxierung der 1050-Legierung (siehe Tabelle 7-8) variiert hinsichtlich der verwendeten Stromstärke ( $1, 5$  und  $20 \text{ A/dm}^2$ ), der Behandlungsdauer (10 bis 120 min.) und der mechanischen und thermischen Vorbehandlung der Proben. Dazu zählen

Kugelstrahlen, Bürsten, Biegen und Glühen auf 100 oder 200 °C. Wobei die Wärmebehandlung lediglich für eine Spannungsreduktion dient.

Tabelle 7-8: Versuchsplan und Bewertung der Eloxierung auf 1050-Aluminium

Nr.	Stromstärke [A/dm <sup>2</sup> ]	Dauer [min]	Vorbehandlung	Schichtdicke [µm]	Risse	Rissdichte
1	5	10	Klassisch	4,25	Nein	-
2	20	10	Klassisch	24,7	Nein	-
3	5	30	Klassisch	19,9	Nein	-
4	5	10	Klassisch	17,6	Nein	-
5	5	10	Klassisch	17,6	Nein	-
6	20	10	Klassisch	18,1	Nein	-
7	20	55	Klassisch	75,7	Ja	Mittel
8	5	10	Klassisch	4,71	Nein	-
9	20	10	Klassisch	23,4	Nein	-
10	5	30	Klassisch	17,3	Nein	-
11	5	50	Klassisch	41,6	Nein	-
12	20	20	Klassisch	46,8	Ja	Minimal
13	10	40	Klassisch	55,1	Ja	Mittel
14	10	40	Gebogen	50,5	Ja	Mittel
15	20	10	Geboten	29,3	Nein	-
16	5	30	Geboten	20,5	Nein	-
17	10	60	Kugelgestrahlt	65,0	nein	-
18	5	60	Geglüht	64,1	Ja	Maximal
19	5	30	Klassisch	23,2	Nein	-
20	5	30	Klassisch	25,0	Nein	-
21	10	60	Kugelgestrahlt	60,1	Nein	-
22	10	50	Kugelgestrahlt	50,3	Nein	-
23	10	50	Klassisch	60,4	o.S.	-
24	5	120	Geglüht	80,0	Ja	Maximal
25	5	120	Geglüht	79,1	Ja	Maximal

Generell sind 1050-Legierungen aufgrund ihrer geringen Fremdelementgehalte gut zu eloxieren und bilden dichte Schichten mit sehr wenigen Defekten (siehe Abbildung 7-21).

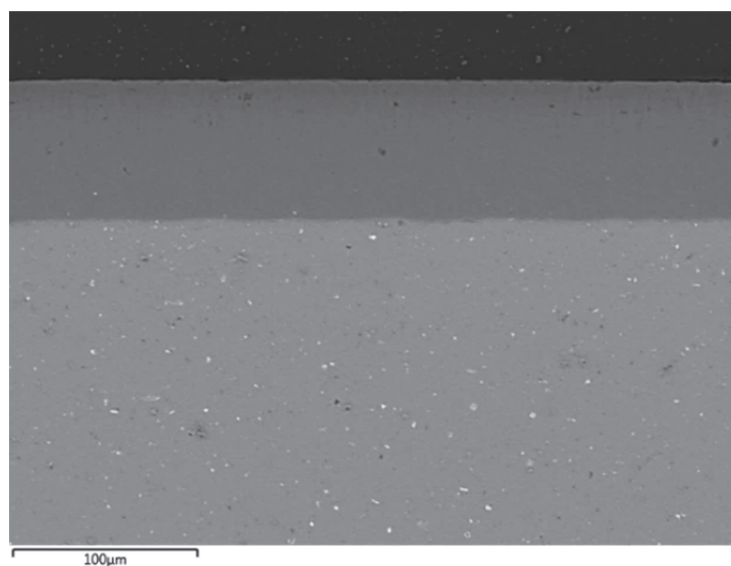


Abbildung 7-21: Querschnitt einer nahezu defektfreien, 80 µm dicken Eloxierschicht auf 1050-Aluminium

Allerdings zeigen sich sofort nach dem Beginn des Sealingprozesses bei Schichten mit einer Dicke größer 50  $\mu\text{m}$  Rissstrukturen (siehe Abbildung 7-22 und Tabelle 7-8). Diese korrelierten mit geometrischen Bedingungen und Biegespannungen und sind Ergebnis der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

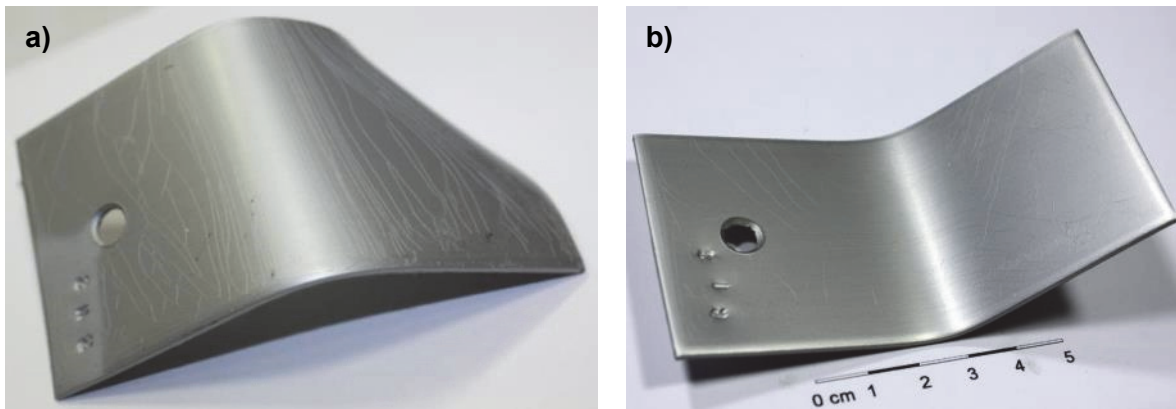


Abbildung 7-22: Rissstruktur nach dem Sealing (30 min) von ca. 60  $\mu\text{m}$  dicken Eloxalschichten auf 1050-Aluminium

Eine interessante Tatsache ist, dass die Rissstruktur wesentlich feiner ausfällt, wenn eine geringere Stromstärke und somit Spannung beim Eloxieren zum Einsatz kommt. Zur besseren Darstellung sind die Rissstrukturen unter Abbildung 7-23 hervorgehoben. Eine optische Manipulation der Defekte mittels Risseindringverfahren blieb erfolglos, was die Annahme bestätigt, dass die Fehlstellen vom Substrat ausgehen. Eine nach dem Biegen folgende Spannungsarmglühung zeigte keinen nennenswerten Effekt auf die Rissstruktur.

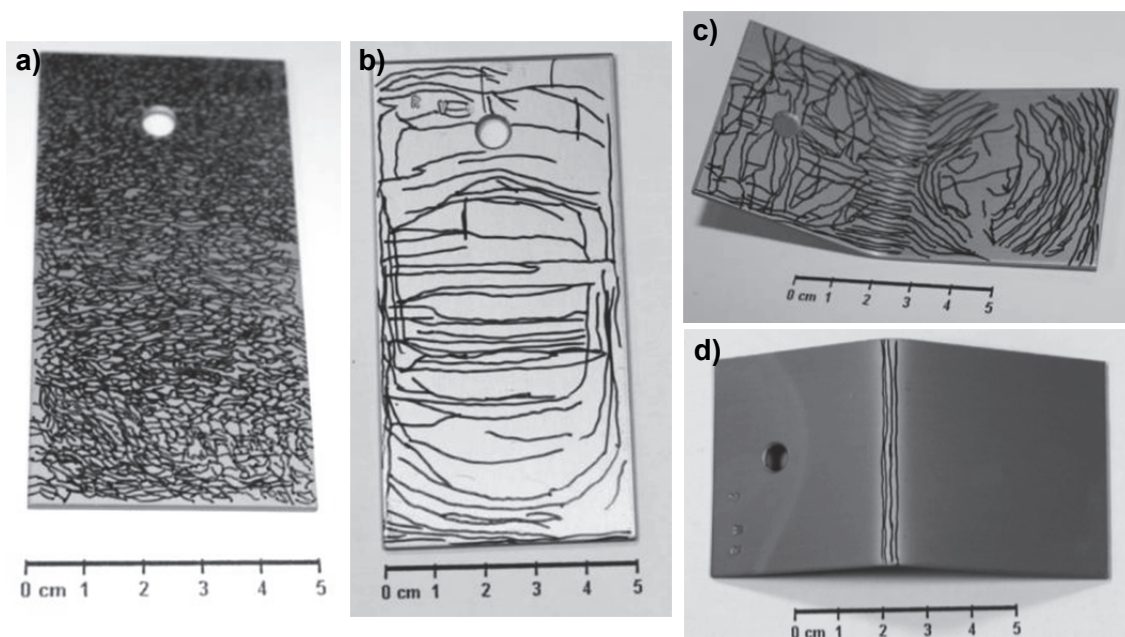


Abbildung 7-23: Verschiedene Rissstrukturen abhängig von der Behandlungsdauer, der Stromstärke und der Nachbehandlung (a) 5  $\text{A}/\text{dm}^2$ , 60 min., 58  $\mu\text{m}$  – ohne mechanische Vorbehandlung, 30 min. Sealing (b) 10  $\text{A}/\text{dm}^2$ , 50 min., 51  $\mu\text{m}$  – ohne mechanische Vorbehandlung, 30 min. Sealing (c) 10  $\text{A}/\text{dm}^2$ , 50 min., 52  $\mu\text{m}$  – einfache Biegung im Mittelfeld ohne thermische Behandlung, 30 min. Sealing (d) 10  $\text{A}/\text{dm}^2$ , 60 min., 59  $\mu\text{m}$  – einfache Biegung mit Mittelfeld – ohne Sealing;

Lediglich die durch Kugelstrahlen vorbehandelten Proben zeigen unabhängig von der Schichtdicke, der Stromstärke und dem Sealingprozess eine rissfreie, wenngleich auch matte Eloxierschicht (siehe Abbildung 7-25).



Abbildung 7-24: Rissfreie Probe nach dem Sealing bei einer Schichtdicke von 65  $\mu\text{m}$  Schichtdicke, ermöglicht durch vorgeschaltetes Kugelstrahlen

Die Abhängigkeit des Schichtwachstums von Zeit und Stromstärke ist unter Abbildung 7-25 ersichtlich. Bei beiden Parametern zeigt der Verlauf eine Art Sättigung bzw. ein Plateau an, dabei handelt es sich um das Erreichen eines Gleichgewichtszustandes zwischen Schichtauflösung und -wachstum.

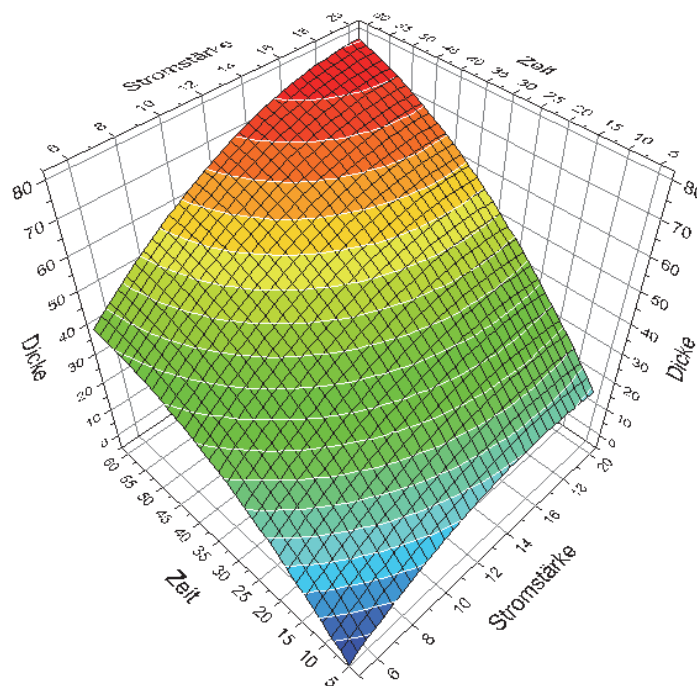


Abbildung 7-25: Abhängigkeit der Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ] von der aufgewendeten Stromstärke in  $\text{A}/\text{dm}^2$  und der Eloxierzeit angeführt in Minuten

Weitere Herausforderungen ergaben sich bei zu hohen lokalen Badtemperaturen, hervorgerufen durch mangelnde Elektrolytumwälzung oder zu hohe Bestückungszahlen. Dabei entstanden milchige und in einem Fall stark verformte Oberflächen (siehe Abbildung 7-26). Die gekennzeichneten Zonen sind anhand von Querschliffen genauer analysiert worden (Abbildung 7-27/Abbildung 7-29). Die wellige Struktur der ersten Zone von Abbildung 7-26 (a) weist eine hochdefekte und nur wenige Mikrometer dicke Eloxierschicht mit horizontalen und vertikalen Rissen auf (siehe Abbildung 7-27). Die milchigen Bereiche (Zone 2) beider Proben zeichnen sich durch lange vertikale Risse nahe der Oberfläche aus (siehe Abbildung 7-28 (a) und Abbildung 7-29). Die transparenten Eloxierschichten (Zone 3) sind hingegen vollkommen defektfrei und wesentlich dicker (siehe Abbildung 7-28 b).

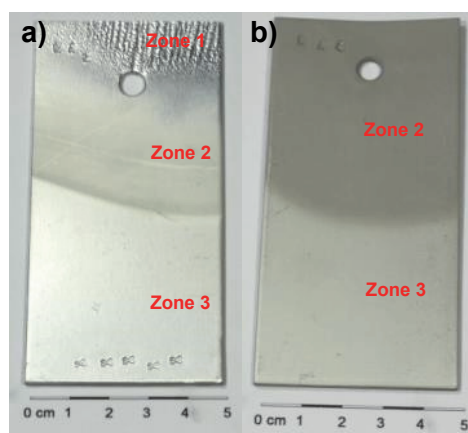


Abbildung 7-26: Fehlerhafte Eloxierschichten (a) 20 A/dm<sup>2</sup>, 10 min. Behandlungszeit, doppelte Bestückung (b) 20 A/dm<sup>2</sup>, 20 min. Behandlungszeit, einfache Bestückung

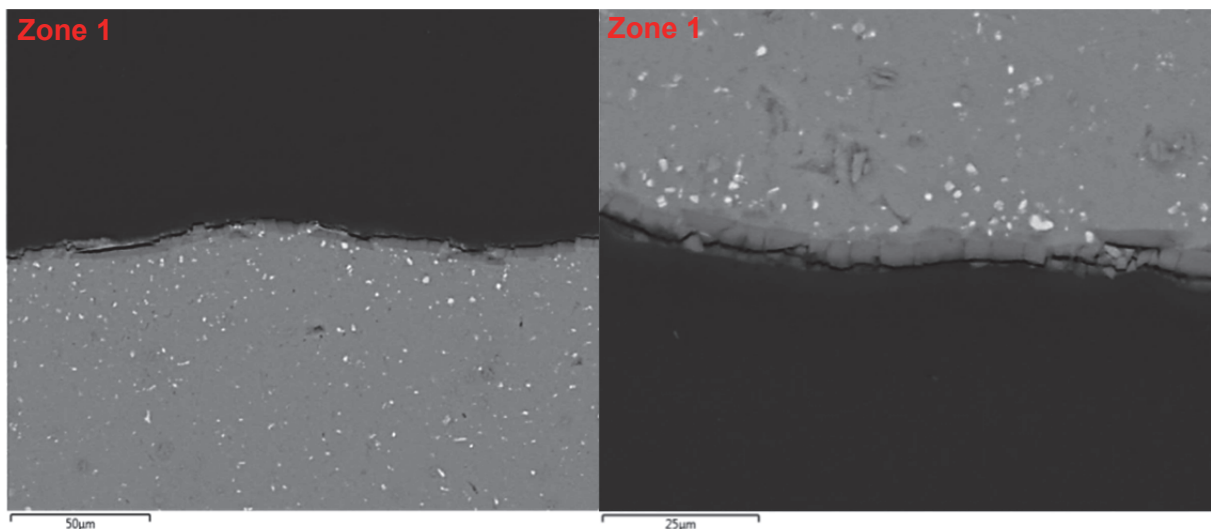


Abbildung 7-27: Querschliff zu Abbildung 7-26 (a) – Zone 1; mit Übersichtsaufnahme und Detailansicht

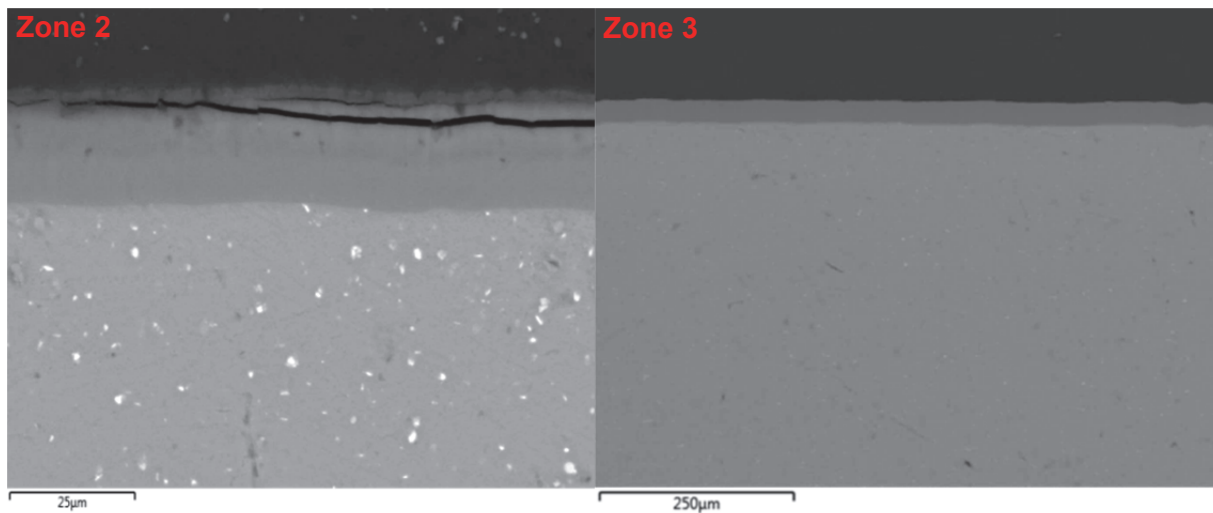


Abbildung 7-28: Querschliff zu Abbildung 7-26 (a); Zone 2 und Zone 3

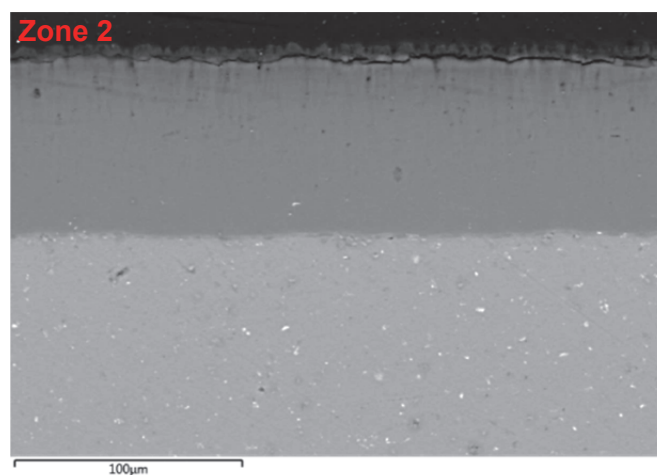


Abbildung 7-29: Querschliff zu Abbildung 7-26 (rechts) Zone 2

Einen Überblick bezüglich der chemischen Zusammensetzung der Eloxierschichten auf 1050-Aluminium gibt Tabelle 7-9).

Tabelle 7-9: Chemische Zusammensetzung einer Eloxierschicht an unterschiedlichen Positionen auf 1050-Aluminium in Gew.-%

Punkte	O	Al	S	Fe	Si
1	49,1	43,2	7,8	1,2	1,0
2	49,2	42,8	5,9	0	2,1
3	49,9	43,7	8,1	0	0

## 7.4 Eloxieren der Legierungsklasse 2000

Legierungen der Serie 2000 gelten aufgrund ihres hohen Kupferanteils als schwierig zu eloxieren. Zudem kommen unlösliche, niedrigschmelzende Schwermetalle als spanbrechende Phasen und eventuell enthaltene Verunreinigungen in Form von Si- und Fe-Verbindung. Um die Auswirkungen einzelner Legierungsbestandteile besser beurteilen zu

können, erfolgte die Herstellung unterschiedlicher Materialien deren Elementgehalte die Norm nur leicht unter- oder überschreiten bzw. ihr genau entsprechen. Die größten Variationen fanden dabei im Bereich der neuen spanbrechenden Phasen Bi und Sn statt (siehe Tabelle 7-10). Der entsprechende Versuchsplan mit detaillierter Vorbehandlungsabfolge und zugeführte Stromdichten ist unter Tabelle 7-11 ersichtlich.

Tabelle 7-10: Legierungsübersicht zu den Versuchsreihen der Legierungsklasse 2000

Legierung	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Bi	Pb	Sn	Ti
ZL1	0,05	0,09	3,5	0,7	0,9	0	0,01	0,41	0,01
ZL2	0,05	0,09	3,01	0,54	0,43	0,23	0	0	0,01
ZL3	0,05	0,09	3,19	0,61	0,45	0,4	0,02	0	0,01
ZL4	0,02	0,04	3,38	0,62	0,46	0	0	0,001	0,01
ZL5	0,01	0,01	3,43	0,64	0,42	0	1,74	0	0,01
ZL6	0,01	0,01	3,65	0,64	0,42	0	1,74	0	0,01
ZL7	0,02	0,03	3,78	0,62	0,47	0,02	0,01	0,03	0,01
ZL8	0,02	0,03	2,38	0,64	0,47	0,02	0	0,02	0,01
ZL9	0,01	0,03	3,48	0,41	0,55	0,04	0	0,03	0,02
ZL10	0,02	0,03	4,04	0,66	0,52	0,04	0,01	0,02	0,01
ZE1	0,05	0,1	3,62	0,71	0,52	0,16	0,01	0,75	0,01
ZE2	0,05	0,1	3,58	0,53	0,52	0,34	0,01	0,18	0,02
ZE3	0,05	0,10	3,01	0,10	0,52	0,21	0,76	0,17	0,02
ZE4	0,05	0,1	3,66	0,63	0,53	0,68	0,01	0,41	0,03
Komm.	0,53	0,23	3,83	0,68	0,59	0,01	0,64	0,06	0,06

Tabelle 7-11: Versuchsplan zur Eloxierung der 2007-Legierung

Probe	Mechanische Vorbehandlung	Chemische Vorbehandlung	Stromdichte [A/dm <sup>2</sup> ]
R1	Drehen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	6
R2	Drehen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5
R3	Drehen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
R4	Drehen	Entfetten, Beizen (HNO <sub>3</sub> , 50 °C, 4 min.)	10
R5	Drehen	Entfetten, Beizen (HNO <sub>3</sub> , 50 °C, 4 min.)	5
R6	Drehen	Entfetten, Beizen (HNO <sub>3</sub> , 50 °C, 4 min.)	2
T0	Fräsen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
T3	Fräsen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
T8	Fräsen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
ZL1	Fräsen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
ZL2	Fräsen	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
ZL3	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
ZL4	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
ZL5	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5

<b>ZL6</b>	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5
<b>ZL7</b>	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	2
<b>ZL8</b>	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5
<b>ZL9</b>	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5
<b>ZE1</b>	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5
<b>ZE2</b>	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5
<b>ZE3</b>	Polieren	Entfetten, Beizen (NaOH, 50 °C, 2 min.), Dekapieren (HNO <sub>3</sub> , RT)	5

Die generierten Schichtdicken und das optische Erscheinungsbild der Eloxierungen ist unter Tabelle 7-12 aufgelistet. Wie stark die optische Varianz hinsichtlich der Anodisierung ausfallen kann ist zudem unter Abbildung 7-30 und Abbildung 7-31 ersichtlich. Auffällig ist dabei, dass die Intensität der Grünfärbung oftmals mit Schichtdicke und zugeführten Stromdichte korreliert. Außerdem entscheidet auch das Gefüge der Proben über die Gleichmäßigkeit der Schichtfärbung. Knetlegierungen erzielen dabei bessere Ergebnisse als Gusswerkstoffe.

Tabelle 7-12: Ergebnisse der Versuche unter Tabelle 7-11

<b>Probe</b>	<b>Aussehen</b>	<b>Schichtdicke [µm]</b>
<b>R1</b>	Hellere, grüne Oberfläche, leicht milchig, Aufschmelzungen an der Kontaktstelle	21
<b>R2</b>	Kräftige grün-gelbe Färbung, ohne erkennbare Defekte	41
<b>R3</b>	Dunkelgraue Färbung mit Farbverlauf	5
<b>R4</b>	Hellere, grünliche Oberfläche	20
<b>R5</b>	Dunkelgrün mit gelblichem Glanz	45
<b>R6</b>	Dunkelgrau mit dunklerem Außenbereich	4
<b>T0</b>	Hellgrün	22
<b>T3</b>	Hellgrün	29
<b>T7</b>	Hellgrün	21 *
<b>T8</b>	Hellgrün	20 *
<b>ZL1</b>	Grünlich	34
<b>ZL2</b>	Grünlich mit sichtbarem Korngrenzen	32
<b>ZL3</b>	Grünlich mit sichtbarem Korngrenzen	33
<b>ZL4</b>	Grünstich	36
<b>ZL5</b>	Grünstich, fleckig	34
<b>ZL6</b>	Leicht grünlich mit inhomogenem Aussehen	33
<b>ZL7</b>	Leicht grünlich mit Flecken	18
<b>ZL8</b>	Dunkelgrün	40
<b>ZL9</b>	Milchig und Fleckig	20 *
<b>ZL10</b>	Farbverlauf von grau nach grün	24 *
<b>ZE1</b>	Grünstich	38
<b>ZE2</b>	Grünstich	43
<b>ZE3</b>	Grün	46

\*) Breite Streuung der Schichtdicke über das Gesamtbauteil



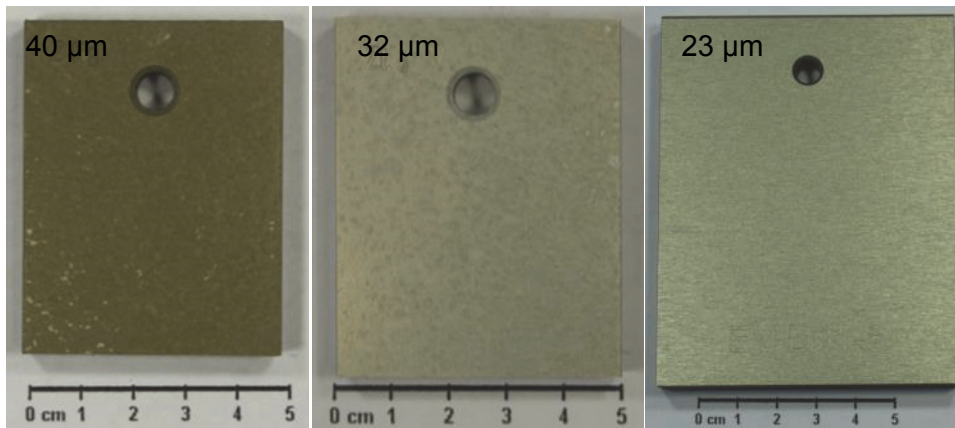


Abbildung 7-30: Unterschiedliche Farbgebung auf Legierungen der 2000-Serie (a) ZL8, Legierung mit niedrigem Kupferanteil, eloxiert mit  $10 \text{ A/dm}^2$ , basische Ätzung mit NaOH und Dekapierung  $\text{HNO}_3$ , herkömmliches Sealing (b) ZL6, Legierung mit sehr hohem Bleigehalt, eloxiert bei  $10 \text{ A/dm}^2$ , basische Ätzung mit NaOH und dekapiert mit  $\text{HNO}_3$ , herkömmliches Sealing (c) AW 2017 T451, eloxiert mit  $12 \text{ A/dm}^2$ , basische Ätzung mit NaOH und dekapiert in  $\text{HNO}_3$ , herkömmliches Sealing

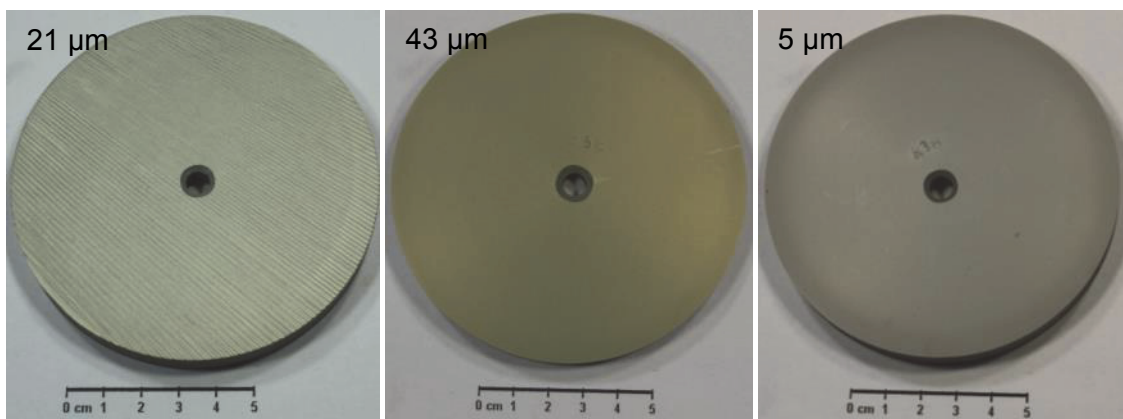


Abbildung 7-31: Unterschiedliche Farbgebung der Eloxierschichten auf AW 2007 kommerziell (a) gesägte Oberfläche; Beizen in NaOH für 2 min. auf  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Dekapieren in  $\text{HNO}_3$  für 1 min. bei RT, 35 min. Eloxieren mit  $3 \text{ A/dm}^2$ , Sealing für 30 min. (b) gedrehte Oberfläche; Beizen in NaOH für 2 min.; Dekapieren in  $\text{HNO}_3$  für 1 min. bei RT, 35 min. Eloxieren mit  $5 \text{ A/dm}^2$ , Sealing für 30 min. (c) gedrehte Oberfläche; Beizen in NaOH für 2 min.; Dekapieren in  $\text{HNO}_3$  für 1 min. bei RT, 10 min. Eloxieren mit  $2,4 \text{ A/dm}^2$ , Sealing für 30 min.

Wie bereits zuvor erwähnt, gehören Legierungen der 2000-Serien zu den anspruchsvolleren Eloxiersubstraten. Die hohen Kupfergehalte führen zur Sauerstoffentstehung während des Oxidationsvorganges, was meist auch zu aufsteigenden Blasen im Elektrolyt führt. Zudem kommt es bei höheren Stromdichten zu lokalen Aufschmelzungen in der Kontaktzone zwischen Bauteil und Titangestell (siehe Abbildung 7-32).

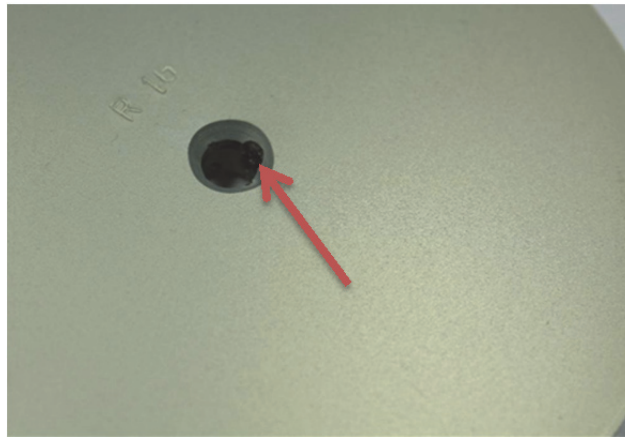


Abbildung 7-32: Lokale Aufschmelzungen in der Kontaktzone durch zu hohe Spannungen und Stromstärken (60 V, 32 A) und damit einhergehender Lichtbogenbildung während dem Eloxieren

Welchen Einfluss das Substratgefüge auf die Eloxierung hat wird im Folgenden dargestellt. Abbildung 7-33 zeigt die Schicht auf Probe R1. Dabei ist vor allem die Defektzone, markiert unter Abbildung 7-33 (b), entscheidend. Die vertikalen Risse deuten auf ein periodisches Aufplatzen des Oxides hin. In der chemischen Zusammensetzung der defektbehafteten Zone sind allerdings keine Fremdelemente detektiert worden (siehe Tabelle 7-13, Spektrum 86).

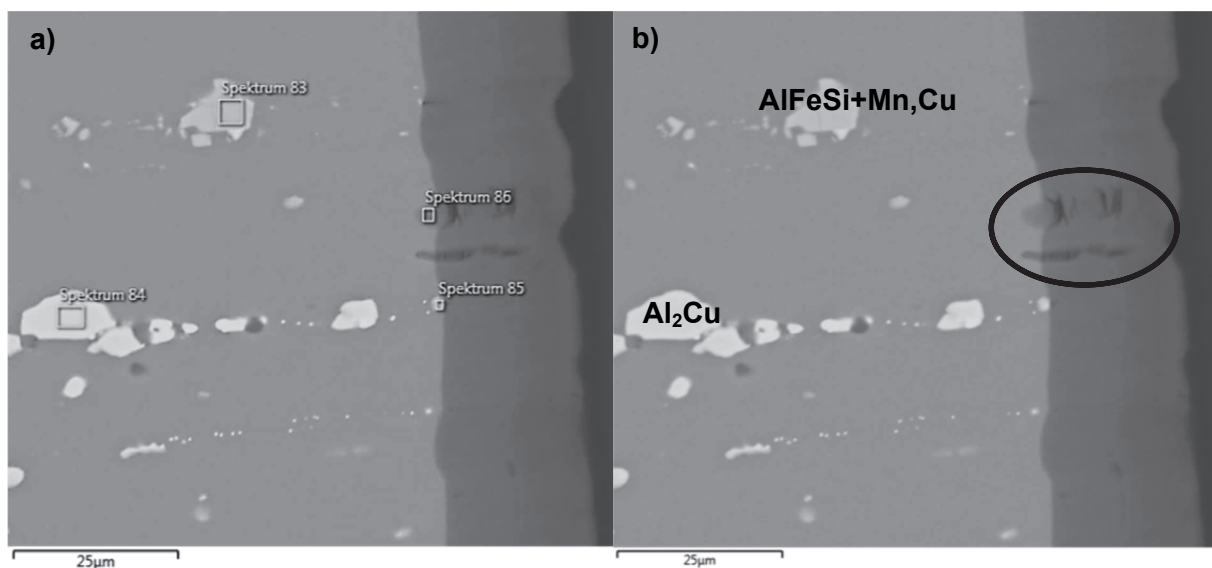


Abbildung 7-33: Eloxierschicht der Probe R1 mit basischer Vorbehandlung und einer Anodisierung unter  $10 \text{ A/dm}^2$ ; (a) Positionierung der EDX-Spektren mit chemischer Analyse unter Tabelle 2-1Tabelle 7-13; (b) Beschreibung der intermetallischen Phasen und Markierung des Schichtdefektes;

Tabelle 7-13: Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-33 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse

Spektrum	Al	Fe	Mn	Si	Cu	Mg	O	S
83	70,5	9,8	8,1	5,2	5,1	0,9	-	-
84	60	-	-	-	49,3	-	-	-
85	35,1	-	-	0,3	1,2	-	58,0	5,0
86	-	-	-	0,5	-	-	58,3	5,1

Abbildung 7-34 (b) zeigt eine andere Art von Defekt. Weil die Grundphase noch teilweise erhalten ist, kann deren Zusammensetzung mittels EDX bestimmt werden (siehe Tabelle 7-14, Spektrum 87). Es handelt sich dabei um  $\text{Al}_2\text{Cu}$  mit geringen Mengen an Mg und Si. Über der Phase liegt ein poröses, kupferhaltiges Oxide vor. Außerdem befindet in der Schicht eingebettet einige Pb-Partikel. Die Spanbrecher werden nicht oxidiert und lediglich von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  umwachsen.

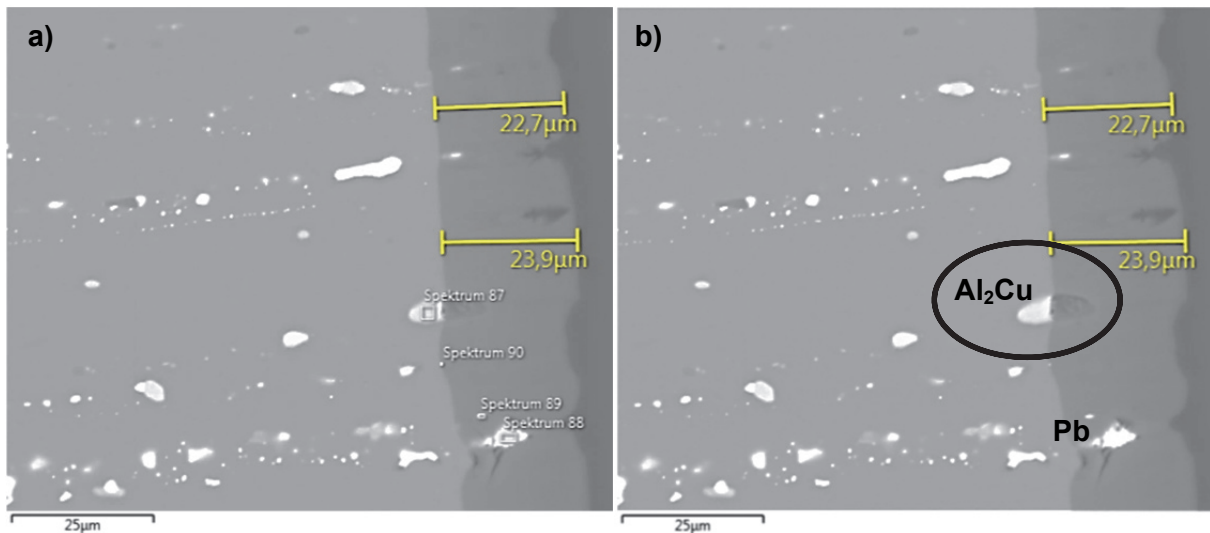


Abbildung 7-34: Eloxierschicht der Probe R1 mit basische Vorbehandlung und einer Anodisierung unter  $10 \text{ A/dm}^2$ ; (a) Positionierung der EDX-Spektren mit chemischer Analyse unter Tabelle 7-13; (b) Beschreibung der intermetallischen Phasen und Markierung des Schichtdefektes;

Tabelle 7-14: Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-34 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse

Spektrum	Al	Fe	Mn	Si	Cu	Mg	O	S	Pb
87	52,1	-	-	0,9	38,7	0,9	9,0	1,3	-
88	28,1	-	-	0,3	-	-	52,3	3,2	14,8
89	36,7	-	-	-	-	-	60,2	5,2	-
90	36,4	-	-	-	2,1	-	57,9	6,1	-

In Abbildung 7-35 ist eine gleichmäßige Verteilung von eisen-, silizium- und manganhaltigen Phasen über die gesamte Probe dargestellt. Diese aus Verunreinigungen gebildeten Teilchen sind meist linienförmig entlang der Umformrichtung angeordnet und werden während der Anodisierung gelöst (siehe Abbildung 7-36).

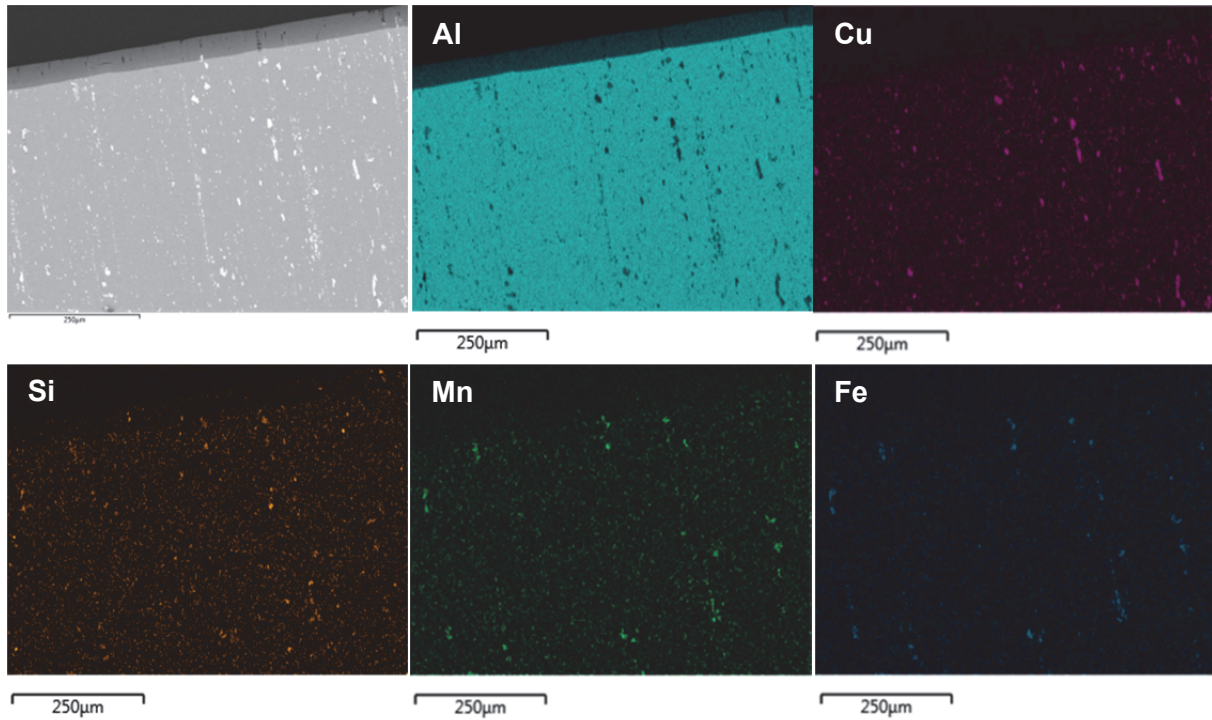


Abbildung 7-35: Elementverteilung der Probe R5 nach dem Eloxiieren mit  $5 \text{ A/dm}^2$

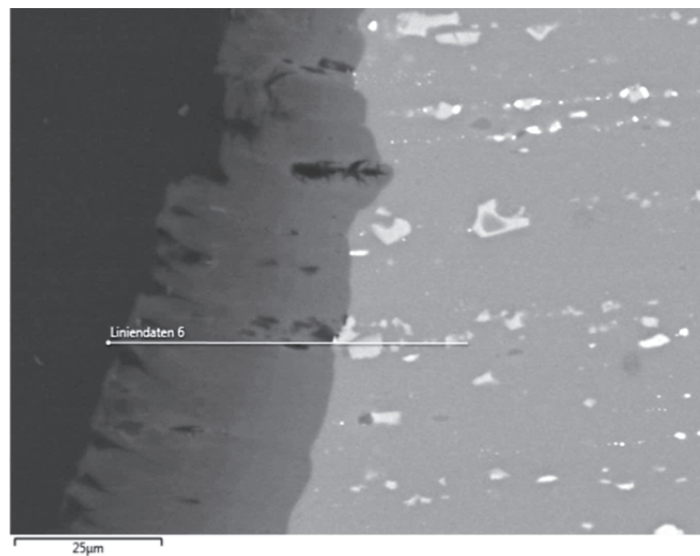


Abbildung 7-36: Eloxierschicht auf Probe T3 mit EDX-Linescan (Detailansicht unter Abbildung 7-37)

Die Detailaufnahme zum Linescan (Abbildung 7-37) zeigt, dass die linear angeordneten Phasen aus Eisen, Silizium, Mangan und teilweise aus Kupfer bestehen. Durch die Fehlstellen im Oxid lässt sich eine bevorzugte Auflösung dieser Mischphasen ableiten.

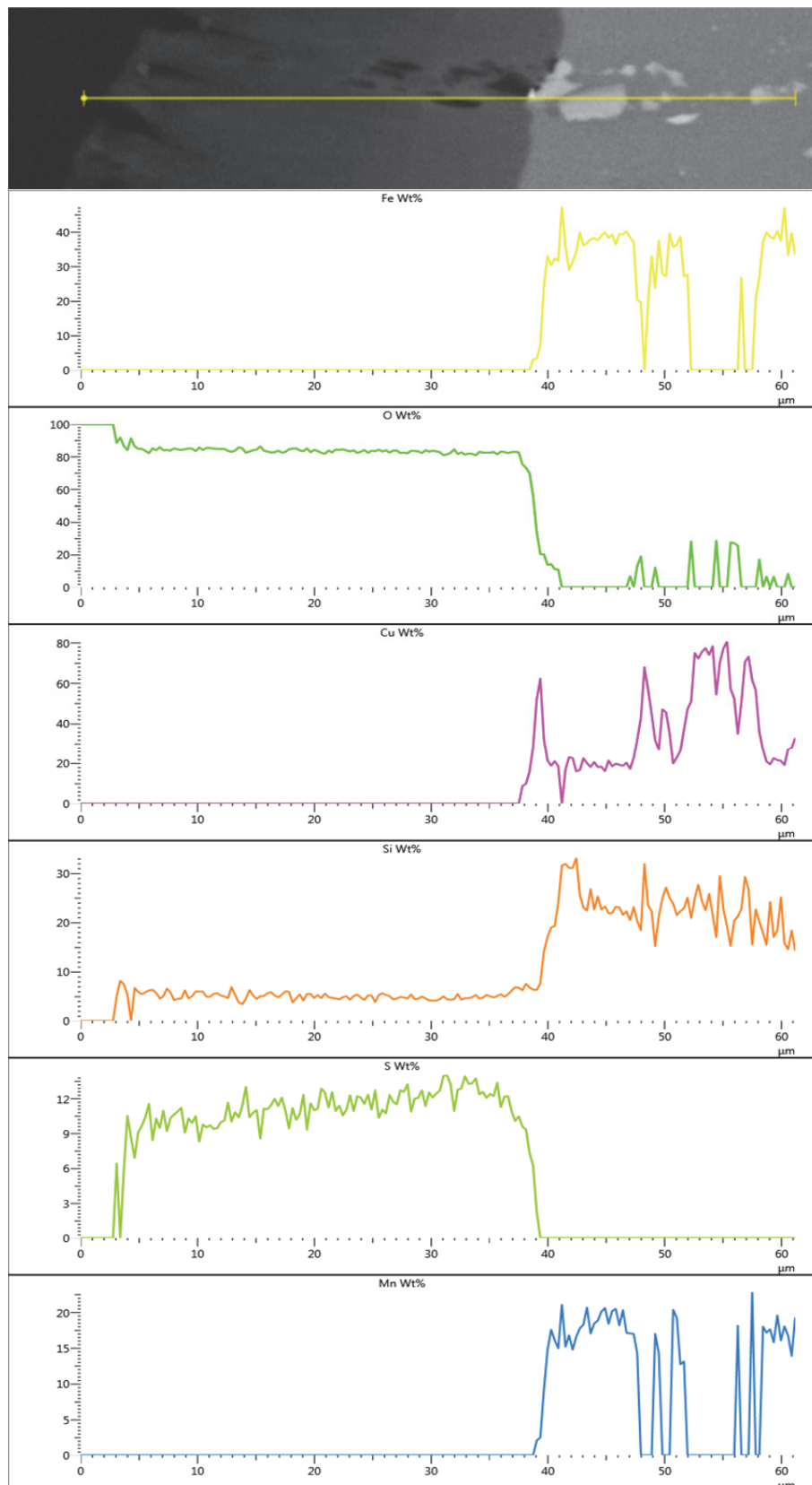


Abbildung 7-37: Detaillierter Linescan zu der Aufnahme unter Abbildung 7-36;

Die am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie hergestellten Proben (ZL1-10 und ZE1-4) wurden in Stahlkokillen mit 2 kg gegossen. Die relativ schnelle Abkühlung ermöglicht größtenteils feine Gefüge. Allerdings ergaben sich durch die fehlenden Umformschritte langverzweigte

eutektische Strukturen an den Korngrenzen und Porositäten (siehe Abbildung 7-38). Erstere lösen sich aufgrund des hohen Kupferanteils im Elektrolyten und ermöglichen ein tiefes Eindringen in das Grundgefüge. Dadurch ergibt sich lokal eine unter die Grenzschicht reichende Oxidausbildung.

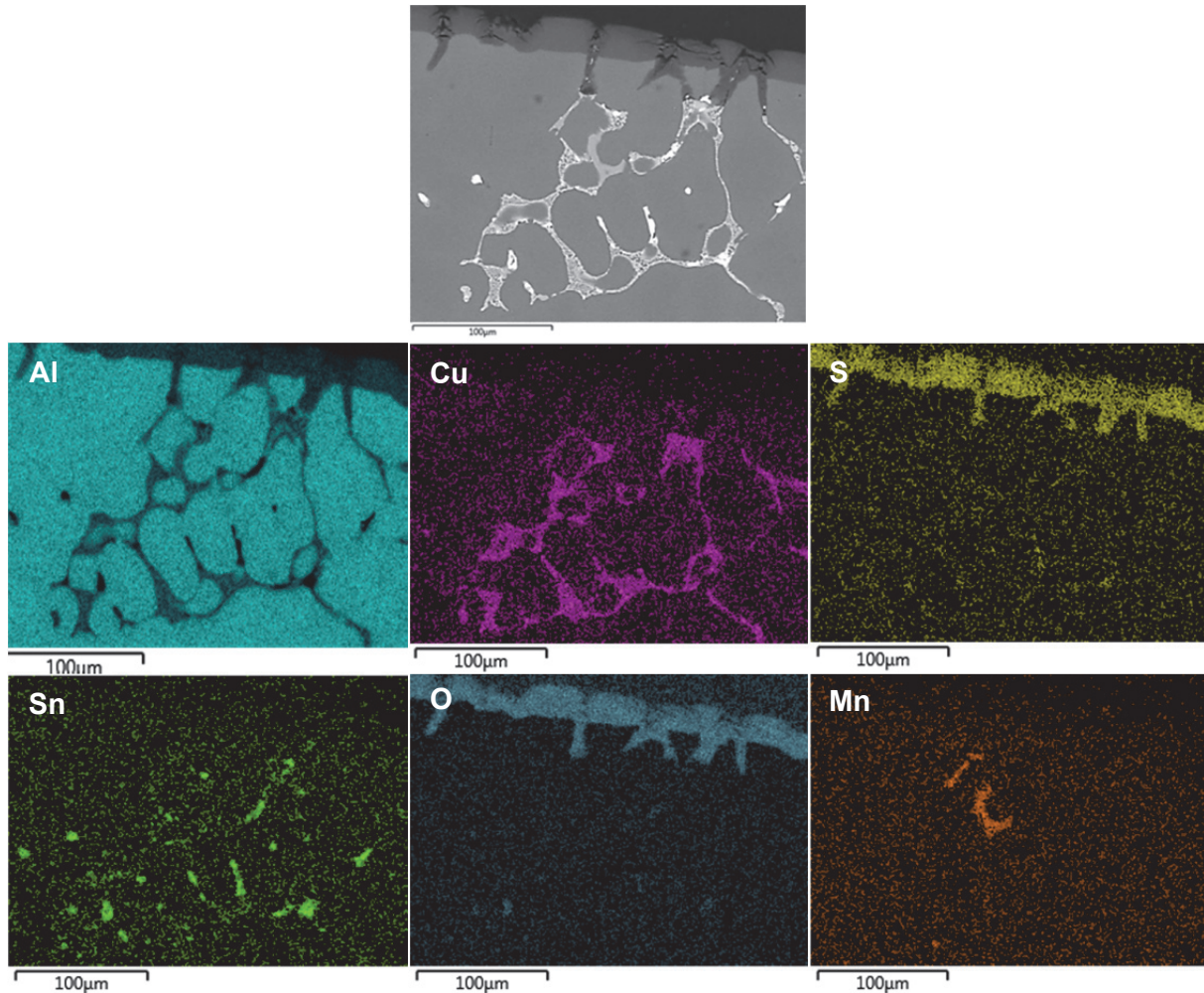


Abbildung 7-38: Elementanalysen des Querschliffes der Legierung ZL5 nach dem Eloxieren

## 7.5 Eloxieren von Legierungen der Serie 5000

Die Legierungen der Klasse 5000 sind aufgrund des Hauptlegierungselements Magnesium und den geringen Gehalten an Begleitstoffen relativ einfach zu Anodisieren. Mg führt lediglich bei sehr großen Gehalten zu Veränderungen oder Verfärbungen in den Oxidschichten. [6] Daher werden auch viele der sogenannten „Eloxalqualitäten“ aus magnesiumhaltigen Legierungen hergestellt. Gerade aber bei solchen kann es wiederum zur Problematik mit „Sealingrissen“ kommen (siehe Abbildung 7-39). Abbildung 7-40 zeigt eine über 50 µm dicke, fast defektfreie Eloxierschicht auf einer 5754-Legierung.

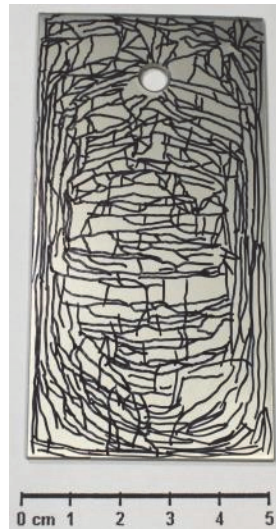


Abbildung 7-39: Rissstruktur (grafisch nachbearbeitet) entstanden während dem Sealing einer 5050-Legierung mit der Deklaration „Eloxalqualität“, saure Vorbehandlung mittels  $\text{HNO}_3$  und anodisiert unter  $5 \text{ A/dm}^2$  für 45 Minuten,  $40 \mu\text{m}$  Schichtdicke

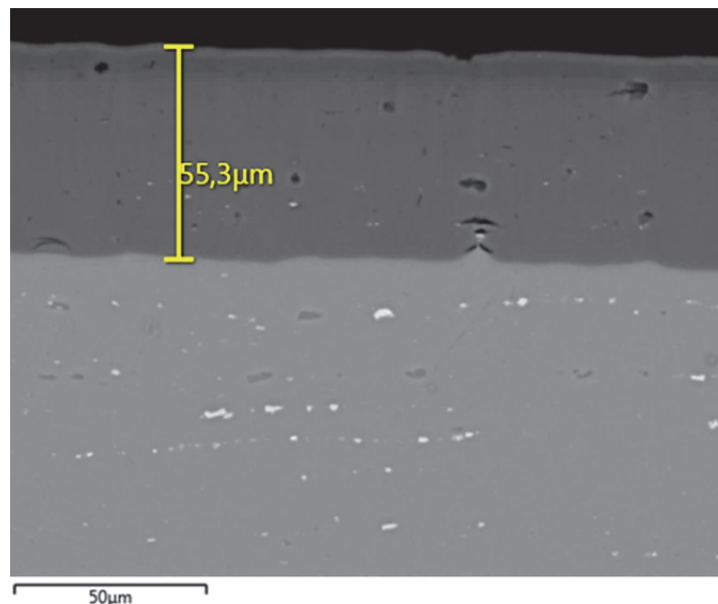


Abbildung 7-40: Eloxierschicht auf 5754-Aluminium; basische Vorbehandlung mit  $\text{NaOH}$  für 20 Minuten, anodisiert unter  $10 \text{ A/dm}^2$  für 30 Minuten

Eisen tritt oftmals in Verbindung mit Mangan (siehe Abbildung 7-41 und Tabelle 7-15) auf und kann unter Umständen zu Problemen bei der Eloxierung führen. Der Linescan unter Abbildung 7-42 zeigt zudem, dass Magnesium im Oxid sehr leicht beweglich ist und daher schneller in den Elektrolyten geht. Manganoxid entspricht in seiner Bindungsstärke dem Aluminiumoxid und ist deshalb in konstanter Konzentration im Grundmaterial und in der Eloxierschicht enthalten.

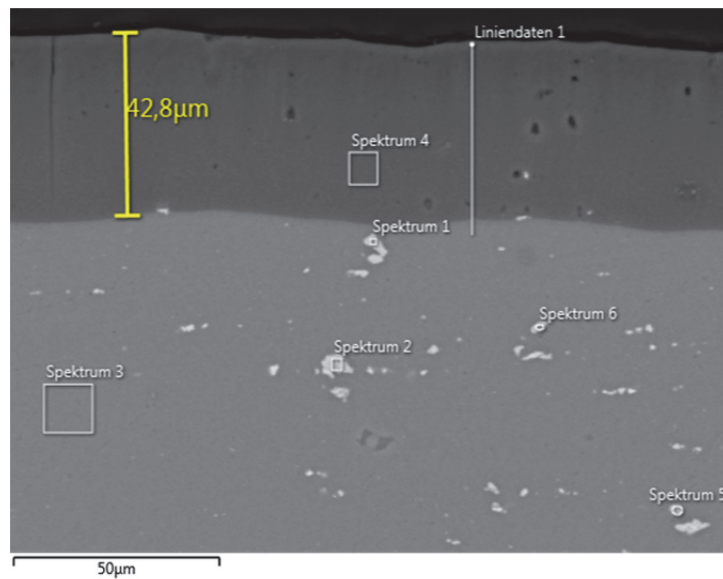


Abbildung 7-41: Eloxierschicht auf 5083-Aluminium

Tabelle 7-15: Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-41 in Gew.-% laut EDX-Analyse

Spektrum	Al	Fe	Mn	Si	Cu	Mg	O	S	Cr
1	73,1	17,2	6,4	5,0	-	2,0	-	-	0,8
2	68,0	25,7	5,9	2,1	0,9	1,9	-	-	-
3	92,8	-	2,1	-	-	4,2	-	-	-
4	42,1	-	-	-	-	2,8	50,9	7,0	-
5	78,9	14,1	3,9	2,8	-	1,8	-	-	-
6	74,9	15,1	4,3	3,4	-	2,1	-	-	-

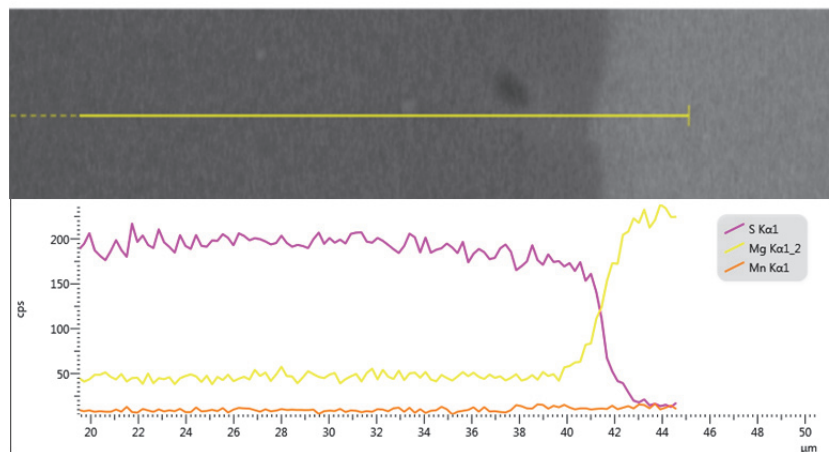


Abbildung 7-42: Linescan zu Abbildung 7-41



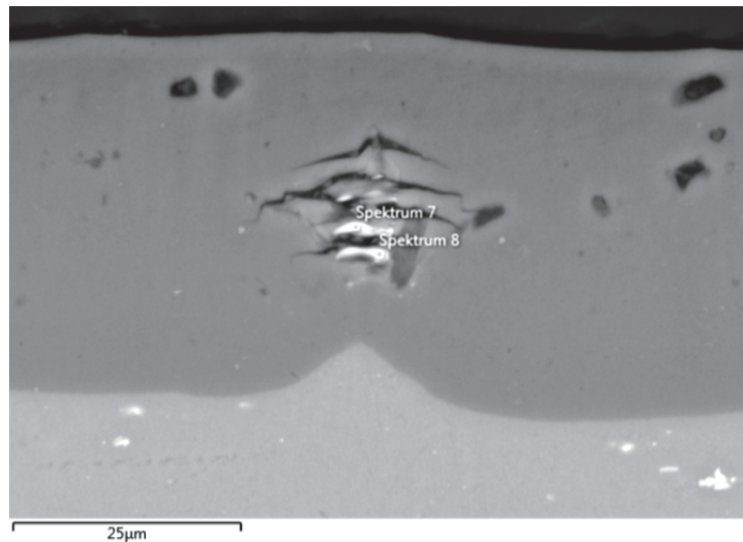


Abbildung 7-43: Defektzone in einer Eloxierschicht auf 5083-Aluminium

Tabelle 7-16: Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-41 in Gew.-% laut EDX-Analyse

Spektrum	Al	Fe	Mn	Si	Cu	Mg	O	S	Cr
1	52,0	14,2	5,8	4,2	-	1,0	12,2	2,3	1,0
2	60,3	14,9	5,1	4,9	-	0,9	22,2	1,9	0,9

Die hocheisenhaltigen Phasen (siehe Abbildung 7-43 und Tabelle 7-16) werden zum Teil unoxidiert in die Eloxierschicht eingebettet und sorgen dort für Rissbildung. Vor allem in Verbindung mit ungleichmäßiger Stromführung können sich so starke Rissstrukturen ausbilden (siehe Abbildung 7-44, b).

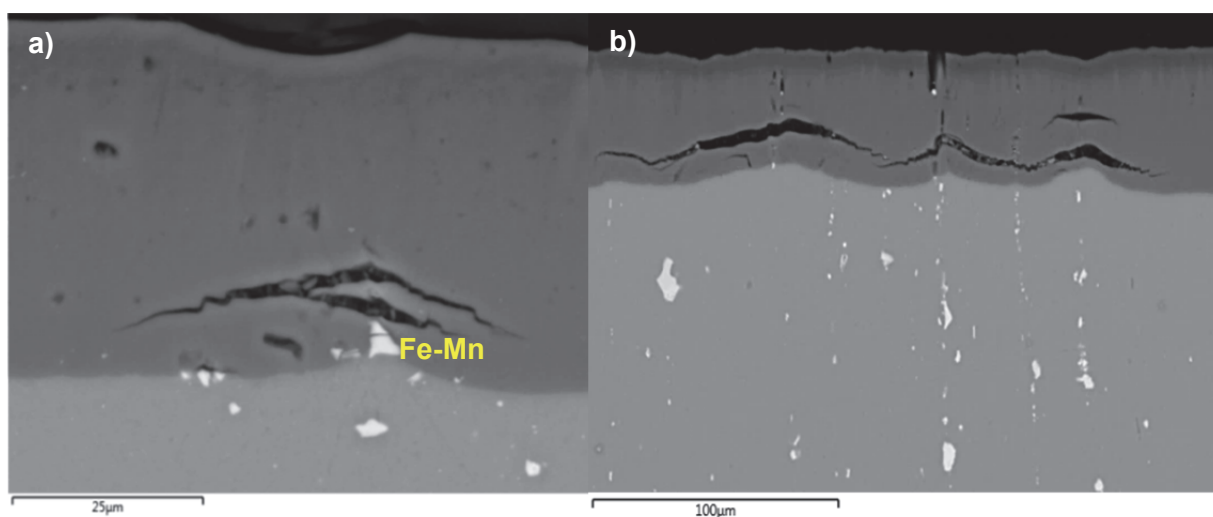


Abbildung 7-44: Rissstrukturen in der Eloxierschicht einer 5754-Legierung (a) Detailvergrößerung über einer Fe-Mn-Phase (b) Übersichtsaufnahme

## 7.6 Eloxieren von Legierungen der Serie 6000

Die im Folgenden betrachteten 6082-Substrate stammen von drei unterschiedlichen Herstellern. Die Versuchspläne entsprechen jenen der 1050-Serie. Augenscheinlich ist die dunkle Färbung der Eloxiertungen bei hohen Schichtdicken (siehe Abbildung 7-45). Außerdem kommt es zu keiner Rissbildung während des Sealings obwohl die Proben völlig idente Behandlungen wie bei den 1050-Legierungen unterzogen wurden (vergleiche Abbildung 7-23 a). Unter Abbildung 7-46 ist die Abhängigkeit der Schichtdicke von der Eloxierzeit und der aufgewendeten Stromdichte dargestellt.



Abbildung 7-45: 6000-Legierung mit 80  $\mu\text{m}$  dicker Eloxierschicht bereitgestellt bei Stromdichten von  $5 \text{ A/dm}^2$

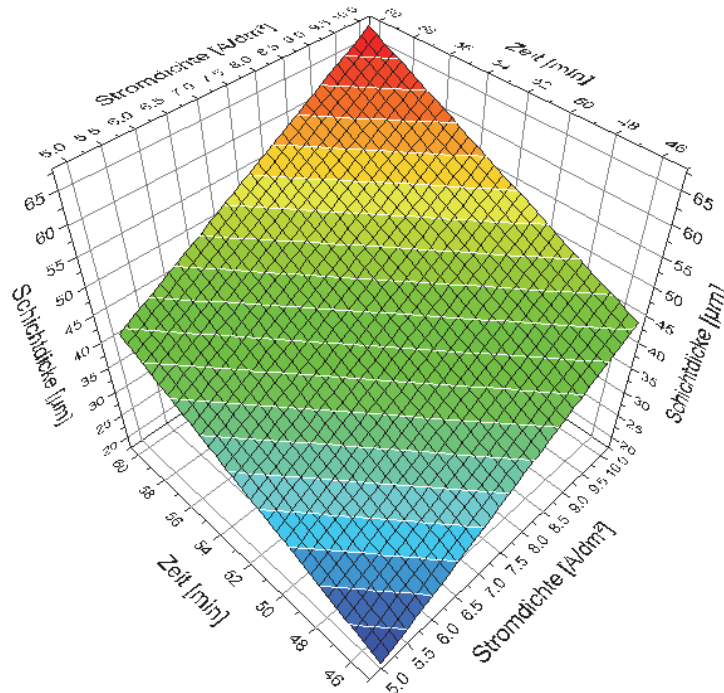


Abbildung 7-46: Abhängigkeit der Schichtdicke auf 6082-Aluminium von Stromdichte und Eloxierzeit

Welchen Einfluss die Legierungselemente auf die Morphologie der anodisch hergestellten Eloxierschichten haben, ist unter Abbildung 7-47 und Abbildung 7-48 ersichtlich. Die Fe-Mn-Si-Phasen lösen sich bei den gegebenen Behandlungsbedingungen im Elektrolyt auf.

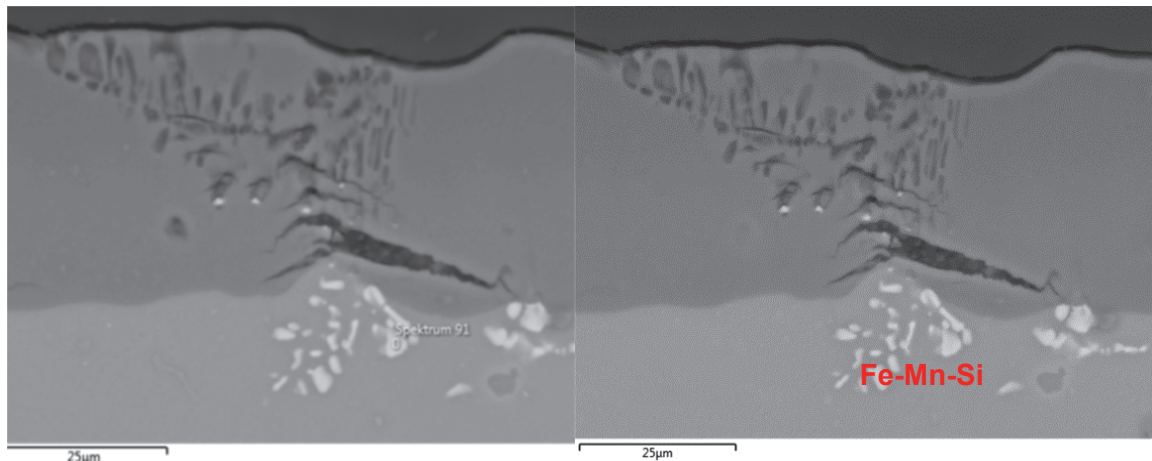


Abbildung 7-47: Defektzone in einer Eloxierschicht auf einem 6082-Aluminiumsubstrat nach basischer Vorbehandlung in NaOH und Eloxieren unter  $10 \text{ A/dm}^2$  für 25 min. (a) Aufnahme mit markiertem Spektrum (siehe Tabelle 7-17) (b) Fe-Mn-Si-Phase in der Grundmatrix und Hohlräume im Oxid

Tabelle 7-17: Chemische Zusammensetzung der Phase unter Abbildung 7-47 in Gew.-% laut EDX-Analyse

Spektrum	Al	Fe	Mn	Si	Cr
91	69,1	12,1	10,2	8,4	0,2

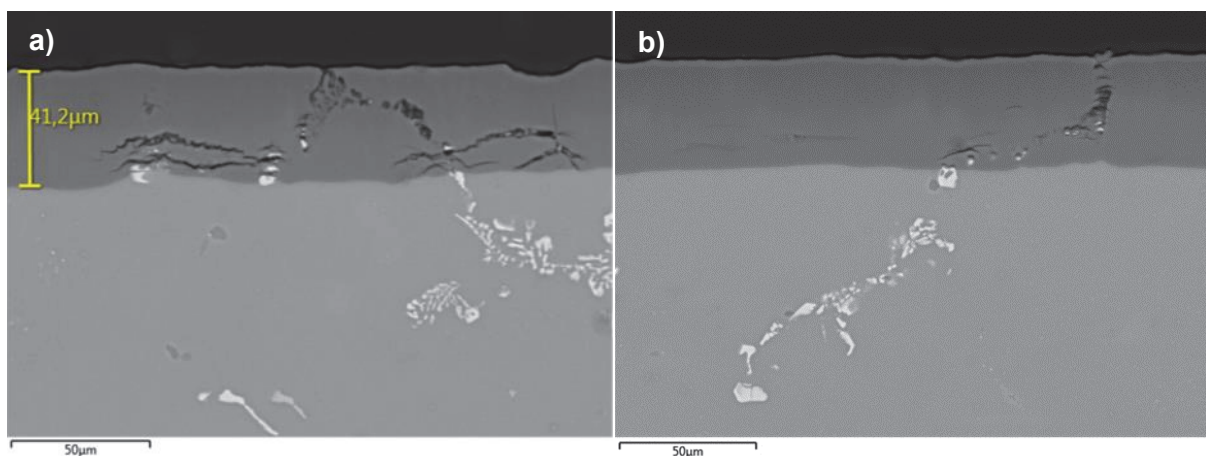


Abbildung 7-48: Querschliff einer Eloxierschicht auf einer 6082-Legierung (Anbieter Nr. 1), basische Vorbehandlung, Eloxieren mit  $10 \text{ A/dm}^2$  für 30 min. bei  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ ; (a) Position 1 (b) Position 2

Interessant ist auch das Verhalten hochsiliziumhaltiger Phasen. In den meisten Fällen bleibt Si unoxydiert. Kommt es allerdings zu einer Mitoxidation hochsiliziumhaltiger Verbindungen, so entwickelt sich wie bei Kupfer elementarer Sauerstoff, wodurch wieder eine lokale, periodische Rissbildung erklärbar ist (siehe Abbildung 7-49).

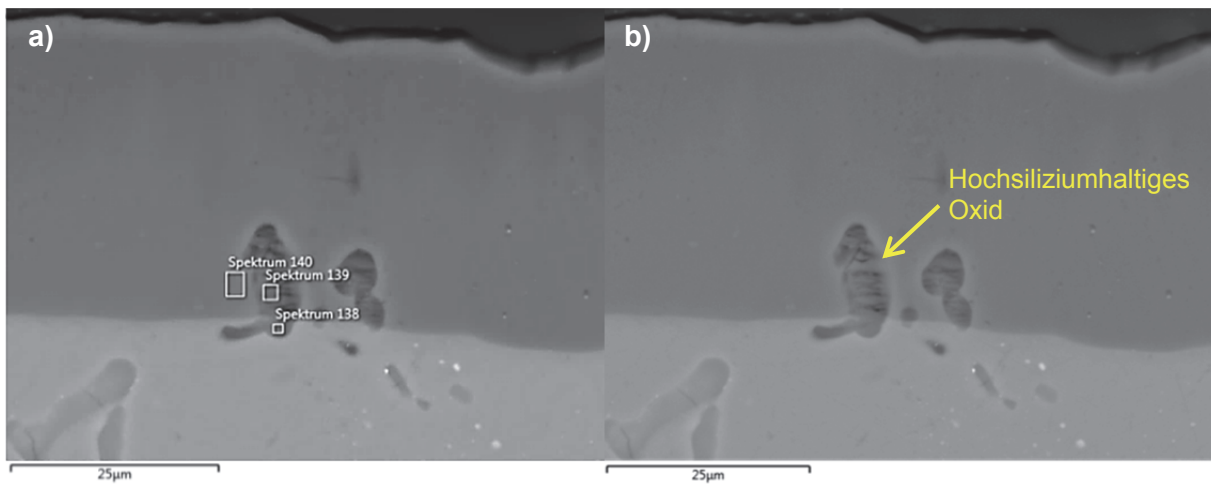


Abbildung 7-49: Defekte rund um eine hochsiliziumhaltige Phase in einer Grundmatrix aus 6082-Aluminium und der entsprechenden Eloxierschicht (a) Kennzeichnung der Spektren in Tabelle 7-18 (b) Detailansicht

Tabelle 7-18: Chemische Zusammensetzung des Spektrums unter Abbildung 7-49 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse

Spektrum	Al	O	Si	S	Mg
138	47,4	35,4	16,2	0,4	0,3
139	31,5	54,5	9,1	4,6	0,1
140	37,2	56,9	0,4	5,5	-

Die Zusammensetzung der einzelnen typischen Phasen in der 6082-Legierung, ihre Auswirkung auf die Oxidschicht und die Zusammensetzung des Oxides sind unter Abbildung 7-50 und Tabelle 7-19 ersichtlich.

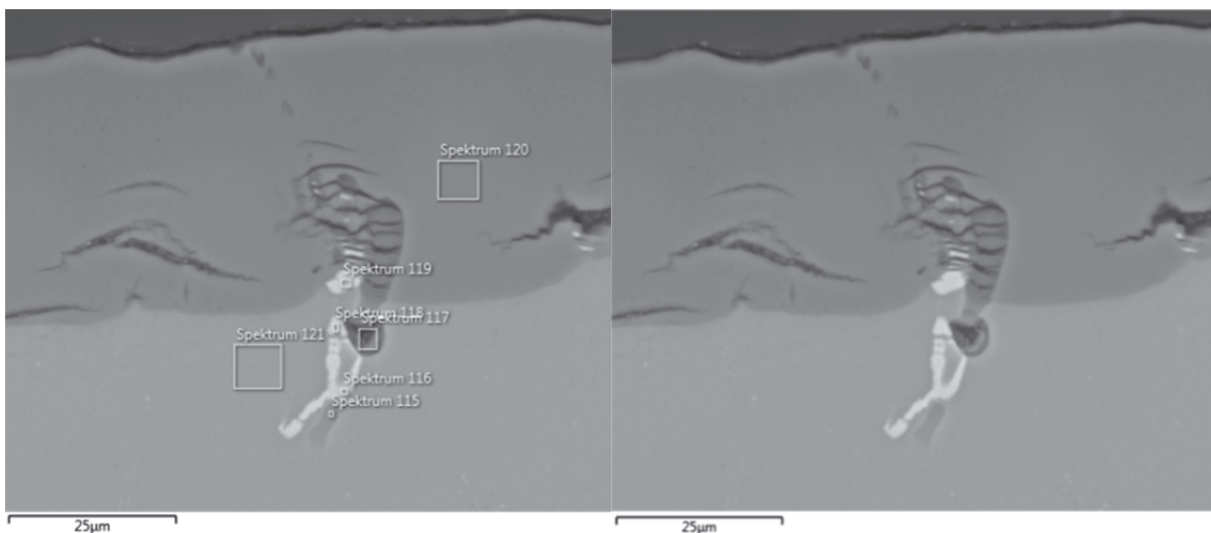


Abbildung 7-50: Defektverursachende Phasen in einer Eloxierschicht auf 6082-Aluminium (Anbieter 2) nach einer basischen Vorbehandlung und dem Anodisieren bei 7 A/dm<sup>2</sup>

Tabelle 7-19: Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-50 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse

Spektrum	Al	Fe	Mn	Si	Cr	Mg	O	S
115	50,9	0,2	0,4	20,4	-	25,5	2,6	-
116	70,4	7,0	13,8	7,6	0,6	0,4	-	-
117	80,3	0,3	0,6	1,8	-	0,5	15,8	0,5
118	67,1	11,0	11,0	6,5	0,3	-	4,1	-
119	62,0	11,6	13,2	8,1	0,5	-	4,6	-
120	38,6	-	-	0,5	-	-	55,1	5,8
121	97,3	-	-	-	-	-	0	-

## 8 Auswertung und Diskussion

Die Ergebnisse der Fräsversuche zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit von den Grundeinflussfaktoren Vorschub, Drehzahl und Schmierung. Zudem sind Trends basierend auf verschleißspezifische Charakteristika der Werkzeuge und Einflüsse von Maschinenschwingungen oder -instabilitäten zu erkennen. Der Rauigkeitsverlauf des 2017-Werkstoffs offenbart beispielsweise einen deutlichen Zusammenhang zwischen Schnittgeschwindigkeit und Oberflächenbeschaffenheit (siehe Abbildung 8-3). Sowohl bei der Bearbeitung mittels Diamantwerkzeug, als auch mittels Hartmetallschneiden, ergeben sich bessere Oberflächenqualitäten bei erhöhten Drehzahlen. Dieser Trend beruht auf der Tatsache, dass größere Schnittgeschwindigkeiten die Aufbauschneidenbildung reduzieren, veränderte Spanbildungsmechanismen vorliegen und abweichende Wärmetransportvorgängen Vorteile bringen. [3]

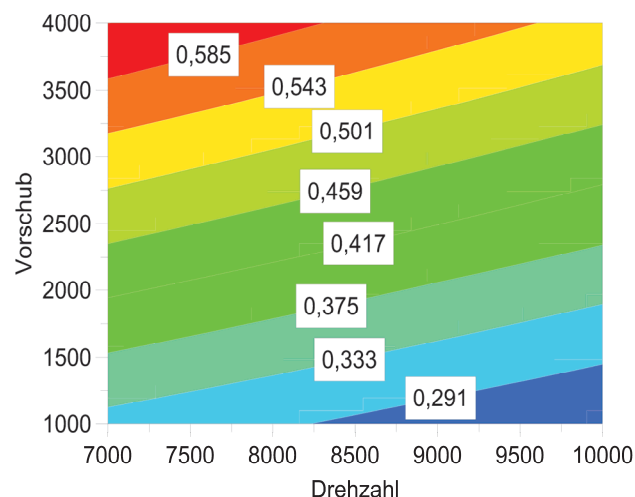


Abbildung 8-1: Darstellung der Oberflächenrauigkeit (in µm) des 2017-Werkstoffs bei Bearbeitung mit Diamantschneidplatten bei verschiedenen Vorschüben (in mm/min) und Drehzahlen (in 1/min)

Abbildung 8-2 zeigt den „Summary Plot“ des Diagramms unter Abbildung 8-1. Dieser gibt Auskunft über Fehler und Gültigkeit des erstellten Modells sowie dessen Ergebnisreproduzierbarkeit. Der  $R_2$ -Wert gibt die Korrelation der Passgenauigkeit der berechneten mit den im Versuch ermittelten Werten wieder. Dabei spielt der lineare Zusammenhang zwischen den Einflussfaktoren eine entscheidende Rolle. Im angeführten Diagramm (siehe Abbildung 8-2) liegt eine hohe Passgenauigkeit vor. Der  $Q_2$ -Wert beurteilt die Möglichkeit mit dem gegebenen Modell Werte vorherzusagen. Hier ergibt sich ein passabler Wert für die Rauigkeitsprognose anhand gegebener Schnittparameter. Zu beachten ist, dass die Software Modelle nur Aufschluss über den Werteverlauf innerhalb der vordefinierten Grenzen geben kann. Eine Extrapolation der Rauigkeitstrends ist daher nur begrenzt sinnvoll, vor allem wenn es zu einer Änderung in den zugrundeliegenden physikalischen Effekten kommt.

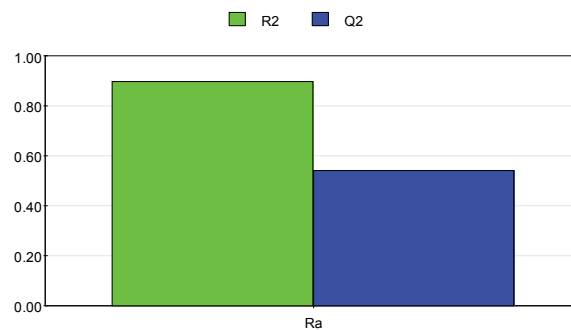


Abbildung 8-2: „Summary Plot“ zum Rauigkeitsmodell unter Abbildung 8-1

Abbildung 8-3 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit Hartmetallschneiden. Auch hier offenbart sich ein Zusammenhang zwischen erhöhter Drehzahl und geringer Oberflächenrauigkeit.

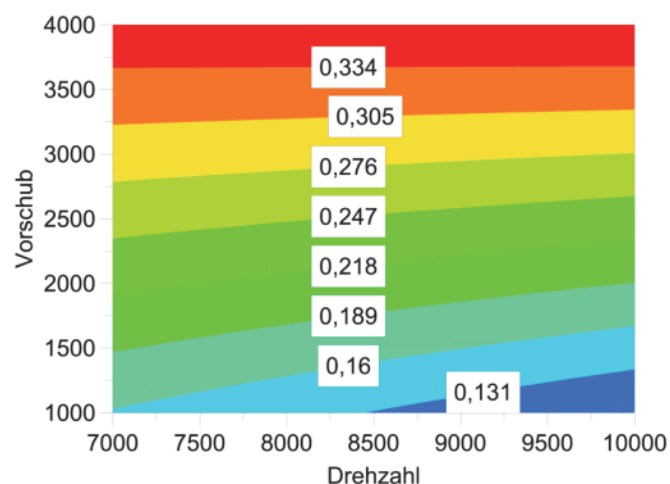


Abbildung 8-3: Darstellung der Oberflächenrauigkeit (in  $\mu\text{m}$ ) des 2017-Werkstoffs bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden bei verschiedene Vorschüben (in  $\text{mm}/\text{min}$ ) und Drehzahlen (in  $1/\text{min}$ )

In Abbildung 8-4 ist wieder die Modellqualität ersichtlich, diesmal zur Berechnung der Oberflächenqualität beim Einsatz von Hartmetallschneiden.

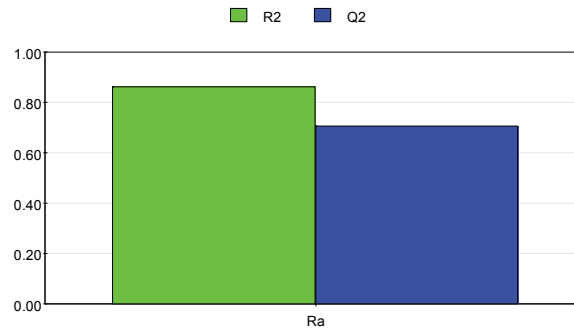


Abbildung 8-4: Modellqualität zum Rauigkeitsmodell unter Abbildung 8-3

Beim Vergleich sämtlicher ermittelter Rauigkeitsverläufe (siehe Anhang) zeigt sich, dass die untersuchten Knetlegierungen stark voneinander abweichende Ergebnisse liefern. Dabei ergeben sich vor allem bei den hochfesten Werkstoffen (2000- und 7000-Klassen) niedrigere durchschnittliche  $R_a$ - und  $R_z$ -Werte, also höhere Oberflächenqualitäten. Die gesamte Bandbreite dieser Kennwerte sind in Tabelle 8-1 zusammengefasst. Die breiteste Streuung zeigen dabei die 6082-Legierungen. Zudem wird ersichtlich, dass die Bearbeitung mittels Diamantwerkzeug, bezogen auf die finale Oberflächengüte, eine geringere Sensibilität gegenüber Parametervariationen aufweist. Ein weiterer interessanter Vergleich lässt sich anhand der Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Schmiermittelkonzentrationen (Mischungsverhältnis von Öl mit Wasser) anstellen (siehe Tabelle 8-2 und Tabelle 8-3). Dabei ergibt eine fettere Emulsion bei Diamantschneiden nur geringe Vorteile, wohingegen die Bearbeitungsfeinheit der Hartmetallschneiden unter Vollfetttschmierung meist deutlich ansteigt. Ein höherer Fettanteil im Schmiermittel bedeutet dabei eine herabgesetzte Reibung zwischen Werkzeug und Bauteil und verringerte Haftneigung vom Aluminium auf den Schneiden, während die Kühlleistung konstant bleibt. Dadurch entstehen, ausgehend von einem weiteren Absenken der Aufbauschneidneigung, offensichtlich Vorteile bei der Zerspanung mittels Hartmetallwendeschneidplatten. Allerdings machen die Mehrkosten für Schmiermittelzusätze und die erhöhte Umweltbelastung diesen Ansatz nur bedingt anwendbar.

Tabelle 8-1: Vergleich der maximalen und minimalen Rauigkeitswerte ( $R_a$  in  $\mu\text{m}$ ) unterschiedlicher Legierungen bei der Fräzerspannung mittels Diamant- oder Hartmetallschneiden

Legierung	Diamantbearbeitung [min - max]	Hartmetallbearbeitung [min - max]
EN AW 5754 H111	0,31-0,59	0,68-1,38
EN AW 5083 H111	0,34-0,61	0,35-0,87
EN AW 7075 T651	0,27-0,49	0,20-0,70
EN AW 2017 T451	0,29-0,59	0,13-0,33
EN AW 6082 H111	0,29-0,64	0,46-1,72

Tabelle 8-2: Vergleich der Rauheitswerte ( $R_a$  in  $\mu\text{m}$ ) unterschiedlicher Legierungen bei der Zerspanung mittels Hartmetallschneiden mit zwei Schmiermittelkonzentrationen

Legierung	Schmierung (50 %)	Schmierung (80 %)
EN AW 5754 H111	0,34	0,33
EN AW 5083 H111	0,26	0,07
EN AW 7075 T651	0,13	0,06
EN AW 2017 T451	0,14	0,08
EN AW 6082 H111	0,08	0,08

Tabelle 8-3: Vergleich der Rauheitswerte ( $R_a$  in  $\mu\text{m}$ ) unterschiedlicher Legierungen bei der Zerspanung mittels Diamantschneiden mit zwei Schmiermittelkonzentrationen

Legierung	Schmierung (50 %)	Schmierung (80%)
EN AW 5754 H111	0,29	0,30
EN AW 5083 H111	0,28	0,29
EN AW 7075 T651	0,29	0,28
EN AW 2017 T451	0,28	0,28
EN AW 6082 H111	0,18	0,28

Vergleiche der Rauigkeiten mit den aufgetretenen Spanformklassen zeigen eine Korrelation von geringen Oberflächengüten mit dem Auftreten mehrerer Spanarten innerhalb eines Trennvorganges (siehe Anhang). Zudem erweist sich der Spanabtransport als kritische Einflussgröße, vor allem dann, wenn sich Oberflächeneffekte aufgrund mitgeschleppter Späne ergeben (siehe Abbildung 6-15). Die Sensibilität der Zerspanungsergebnisse gegenüber geringfügig abweichenden Werkzeugeinstellungen (siehe Abbildung 6-13) ist ebenfalls nicht von der Hand zu weisen.

Umfassende Eloxierversuche, mit den unter verschiedenen Betriebsbedingungen gefertigten Bauteilen, zeigen keinen nennenswerten Zusammenhang zwischen Schnittparametern (Drehzahl, Vorschub, etc.) und Anodisierergebnissen. Es ist anzunehmen, dass die für die Fräsversuche gewählten Parameter nur geringen Einfluss auf tieferliegende Regionen des Substrates haben und lediglich leichte Schwankungen der Rauigkeiten auftreten, diese aber durch längere Beizvorgänge Kompensation finden. Mikrohärtemessungen und Ätzungen der Kornstruktur bestätigen diese Beobachtung (siehe Anhang). Vergleiche unterschiedlicher Schichtquerschliffe zeigen ähnliche Defektzonen und den Eloxalparametern entsprechende Schichtdicken über alle Proben. Eine Auswahl der Versuchsergebnisse ist unter Abbildung 8-5 ersichtlich, alle ergänzenden Darstellungen befinden sich im Anhang.



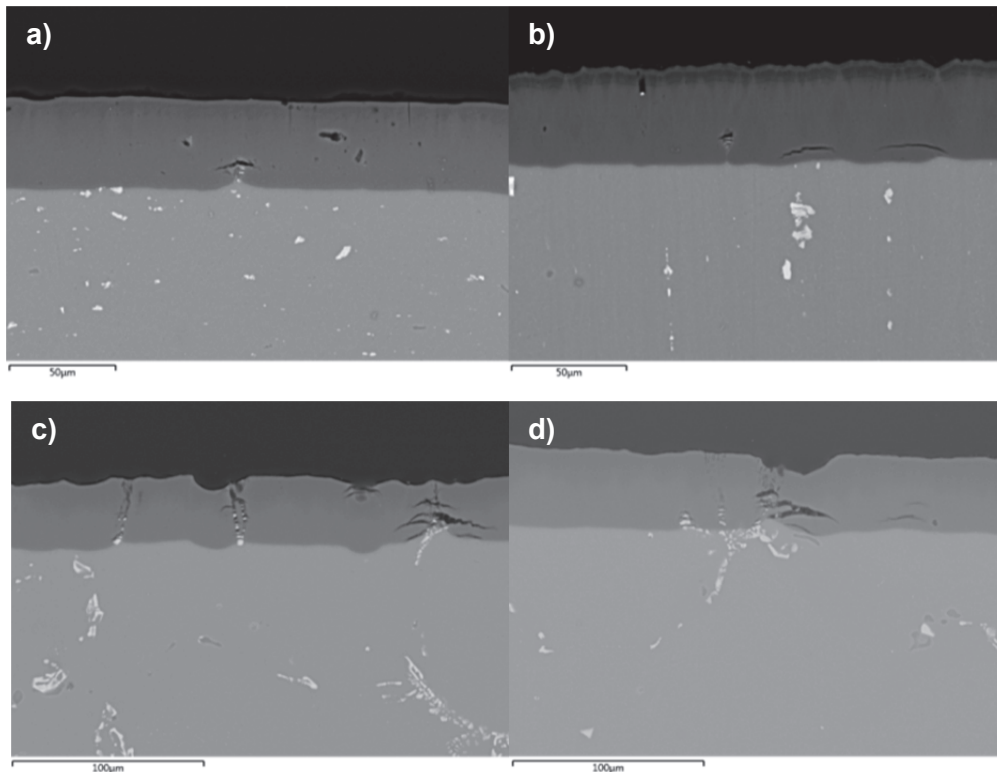


Abbildung 8-5: Eloxalschichten auf unterschiedlich zerspannten Legierungen (a) 5754-Aluminium, gefräst mit einer Drehzahl von 7.000 1/min und einem Vorschub von 1.000 mm/min unter 50%iger Emulsion (b) 5754-Aluminium gefräst mit einer Drehzahl von 7.000 1/min und einem Vorschub von 700 mm/min unter 80%iger Emulsion (c) 6082-Aluminium gefräst mit einer Drehzahl von 10.000 1/min und einem Vorschub von 1.000 mm/min unter 50%iger Emulsion (d) 6082-Aluminium gefräst mit einer Drehzahl von von 7.000 1/min und einem Vorschub von 700 mm/min unter 80%iger Emulsion

Zeigen die Zerspanungsparameter beim Fräsen keinen Einfluss auf die Eloxierung, so wirkt sich die Wahl des Werkzeuges umso deutlicher aus. In verschiedensten Querschliffen sind immer wieder Rückstände von Hartmetallschneiden aus Elementen wie Wolfram, Kobalt, Tantal etc. in die Oxidschicht eingebettet. Selbst lange Beizzeiten (NaOH, 30 min und 50 °C NaOH) können diese Bestandteile nicht vollständig entfernen. Aufgrund ihrer Stellung in der elektrochemischen Spannungsreihe sind diese Elemente zusätzliche Korrosionsquellen. Vor allem Abbildung 8-6 (a) zeigt das Defektbildungspotenzial dieser Hartmetallrückstände. Ausgehend von der ursprünglichen Oberfläche drückt das wachsende Aluminiumoxid das Partikel hinaus bzw. schiebt es vor sich her. Makroskopisch betrachtet können dadurch schon unmittelbar nach der Eloxierung sichtbare Punktdefekte auf der Werkstückoberfläche auftreten.

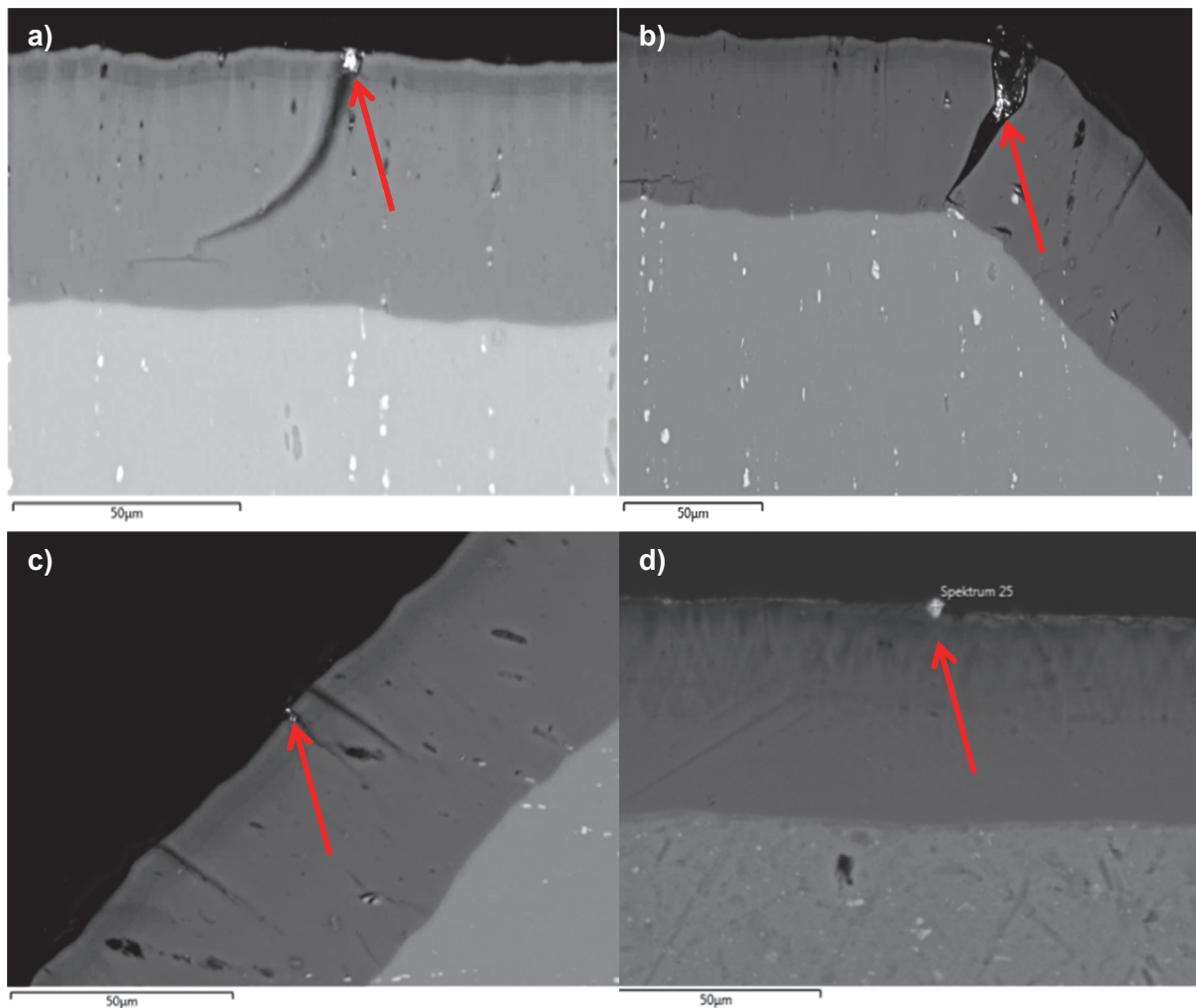


Abbildung 8-6: Verschiedene Eloxierschichten auf Grundsubstraten, welche mit Hartmetallschneidplatten zerspannt wurden - alle Proben weisen spezifische Rückstände aus Hartmetallbestandteilen auf

Da bei den durchgeführten Fräsversuchen keine direkten Korrelationen zwischen Zerspanungsparametern und Eloxialergebnissen auftraten, wurden für die Drehversuche extremere Bedingungen gewählt. Eine Variation erfolgte bei Spanwinkel und Schmierung (siehe Tabelle 6-3), wodurch sich neben stark unterschiedlichen Spanlängen, großen Temperaturschwankungen und individuellen Eigenspannungstiefenprofilen, auch abweichende Rau-tiefen einstellten. Allgemein gilt dabei, je größer der Spanwinkel, umso einfacher der Spanabfluss und geringer die Reibung zwischen Werkzeug und Span. Zudem ergeben sich weniger Spanstauchung, höhere Oberflächengüte und niedrigere Schnittkräfte. Negative Spanwinkel sorgen hingegen für eine starke Verformung und früheren Spanbruch. [30,35] Diese Aussagen bestätigten sich bei den durchgeführten Versuchen nur zum Teil. Wie bereits erwähnt, bildeten sich bei den Winkeln  $+27^\circ$ ,  $-9^\circ$  und  $-8^\circ$  Endlosspäne und damit einhergehende Oberflächenschädigungen. Kurze Formen entstanden sowohl bei niedrigen positiven als auch hohen negativen Winkeln. Die Kühlschmierung erweist sich vorteilhaft, da durch die Kühlwirkung die Späne früher brechen. Eine nennenswerte

Verschlechterung der Oberflächengüte durch Trockenerspannung konnte jedoch nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 8-4 zusammengefasst. Abbildung 8-7 zeigt einige der Schichten im Querschliff. Bemerkenswert ist neben den numerischen Ergebnissen der Umschlag der Farbgebung während dem Sealing. Die offenporigen Schichten weisen ein viel kräftigeres Grün als die gesealten Proben auf.

Tabelle 8-4: Ergebnisse der Eloxierung unterschiedlich gedrehter Oberflächen von 2007-Aluminium

Probe	Winkel [°]	R <sub>a</sub> [μm]	Schmierung	Stromdichte [A/dm <sup>2</sup> ]	Schichtdicke [μm]	Querrisse
P1	-27	0,44	Nass	5	35	Ja
P2	+27	0,64	Nass	2	31	Nein
P3	-18	0,31	Nass	2	28	Ja
P4	+18	0,37	Nass	2	27	Ja
P5	-9	0,50	Nass	2	28	Ja
P6	+9	0,48	Nass	2	28	Nein
P7	0	0,39	Nass	2	29	Nein
P8	+27	0,36	Trocken	2	29	Nein
P9	-27	0,52	Trocken	2	28	Ja
P10	0	0,36	Trocken	2	29	Nein

Die unter Abbildung 8-7 (P1, P3, P4, P5) auftretenden Horizontalrisse ziehen sich dabei fast über den gesamten Probenquerschnitt. Bei der makroskopischen Betrachtung der Bauteile sind allerdings keine Unterschiede zwischen den rissfreien und -behafteten Proben auszumachen. Derartige Rissstrukturen werden in der Literatur oftmals mit dem Vorhandensein von Fremdphasen wie Al-Fe-Si-Partikeln in Verbindung gebracht. [8,12] Diese müssen aufgrund ihrer geringen Oxidationsneigung vom Aluminiumoxid umwachsen werden und sorgen dadurch für innere Spannungen in der Schicht [8]. Allerdings korrelieren die Risse unter Abbildung 8-7 nicht mit besonderen Anhäufungen an Verunreinigungen oder Fremdphasen.

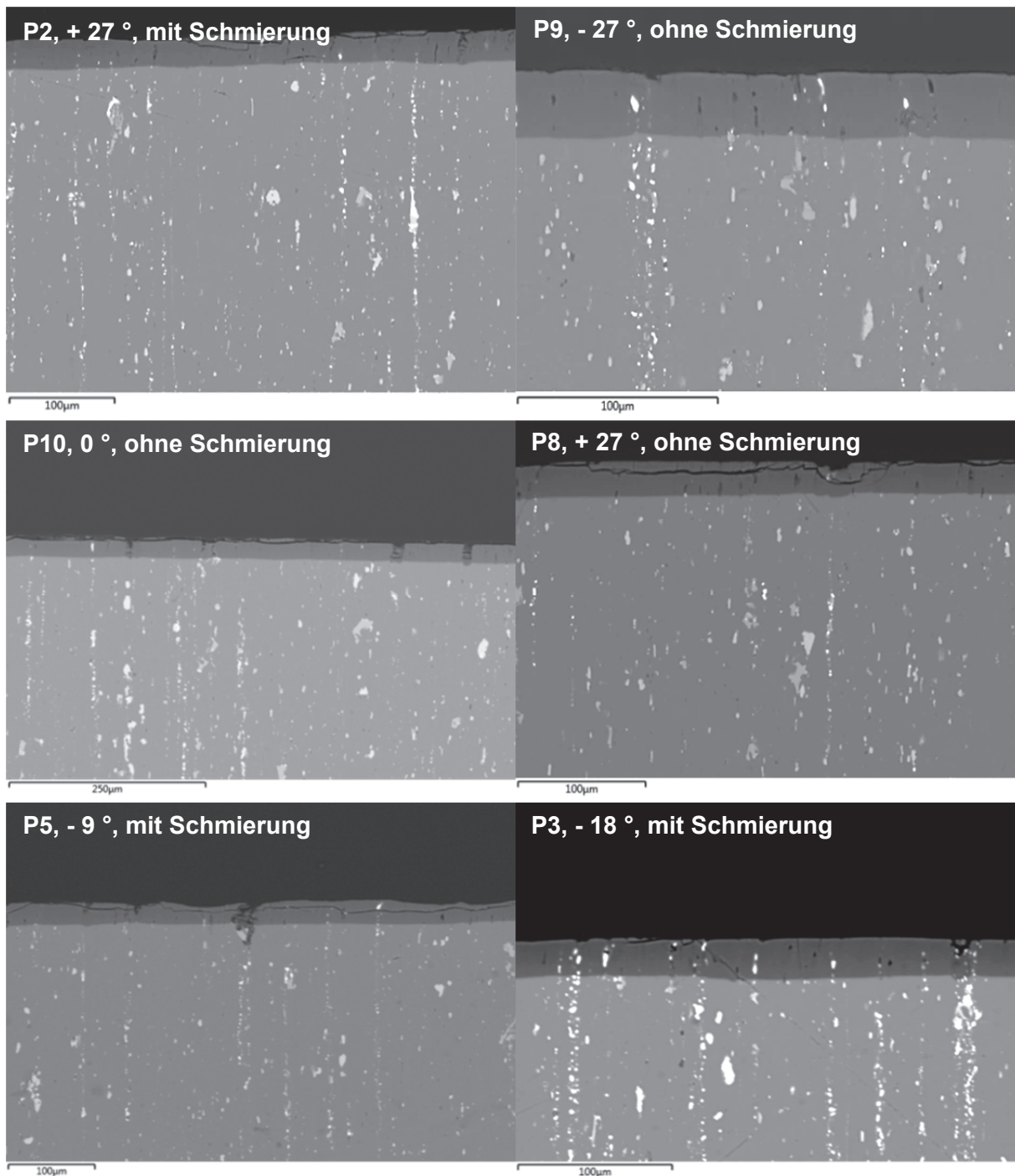


Abbildung 8-7: Vergleich ausgewählter Eloxalschichten auf unterschiedlich zerspannten 2007-Aluminium, mit horizontalen Rissstrukturen korrelierend mit dem aufgewendeten Spanwinkeln

Ein Vergleich zwischen Eloxierschichten auf gedrehten und gefrästen Oberflächen desselben Materials (siehe Abbildung 8-8) zeigen, dass die Rissproblematik ausschließlich auf Seiten der gedrehten Werkstücke liegt. Bemerkenswert ist zudem, dass die Defekte auf unterschiedlichen Höhen in der Oxidschicht liegen. Während sich bei Probe 10 die Risse sehr nahe der Oberfläche bewegen, reichen sie bei Probe 8 weit in die Schicht hinein. Eine eindeutige Korrelation zwischen dem Einsatz von Schmiermittel und der Defektzonen kann nicht festgestellt werden. Die Substrate, welche mit negativen Spanwinkeln bearbeitet wurden, weisen aber tendenziell weniger Risse bzw. defektfreie Schichten auf. Dieser Effekt

könnte mit den über das Zerspanungswerkzeug eingebrachten Eigenspannungen im Grundmaterial zusammenhängen. Offen bleibt, ob die Tiefe der Defektzone einen Einfluss auf die Lokalisierung der Rissnetzwerke hat.

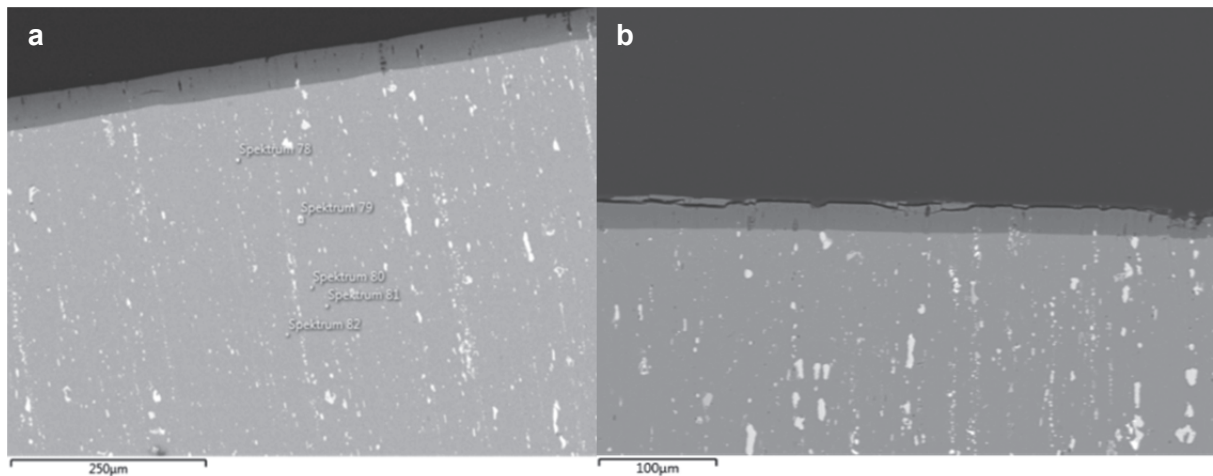


Abbildung 8-8: Vergleich zweier Eloxierschichten auf (a) einer gefrästen Oberfläche gefertigt mittels basischer Vorbehandlung und Anodisierung unter  $5 \text{ A/dm}^2$  und (b) einer gedrehten Oberfläche gefertigt mittels basischer Vorbehandlung und Anodisierung unter  $2 \text{ A/dm}^2$

Das Bohren als individuell betrachtetes Fertigungsverfahren ist nur sehr schwierig unmittelbar mit den Ergebnissen einer Eloxierung zu verknüpfen. Meist sind Borlöcher zugleich auch Kontaktierungspunkte und deshalb oftmals nicht oder nur teilweise eloxiert. Zudem können die scharfen, beim Bohren unweigerlich entstehenden, Kanten nicht defektfrei eloxiert werden (siehe Abbildung 8-9). Diese Problematik kann nur durch abgerundete Ecken vermindert werden, wobei die Zielschichtdicke für die geometrische Gestaltung ausschlaggebend ist. [87]

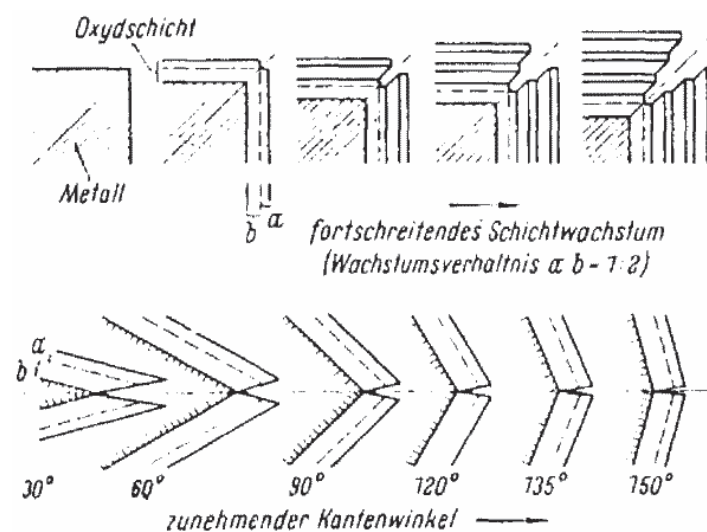


Abbildung 8-9: Schematische Darstellung der Kantenproblematik beim Eloxieren [87]

Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Trends bezüglich der Spanformen und der Bohrlochoberflächen. Wenn auch das geschliffene Hartmetallwerkzeug die kleinsten Späne genierten (siehe Tabelle 8-5), bilden sich auf der Innenfläche Ratterspuren oder Materialverschmierungen (siehe Abbildung 8-10). Die beschichteten Werkzeuge hingegen erzeugen erheblich bessere Oberflächenqualitäten in den Bohrlöchern. Eine Gradbildung zeigte sich bei allen Proben, allerdings in geringem Rahmen. Der Werkzeugverschleiß viel naturgemäß bei der Trockenzerspanung am größten aus. Aufbauschneiden bildeten sich zudem auf jeder der Werkzeugspitzen (siehe Abbildung 8-11).

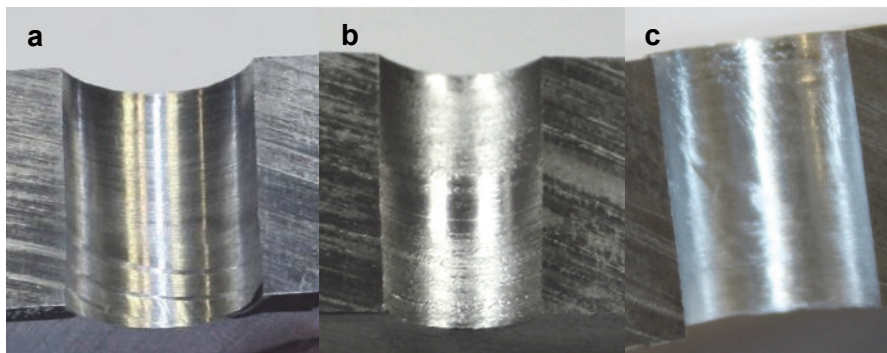


Abbildung 8-10: Unterschiedliche Bohrlochoberflächen (a) mit guter Oberflächenqualität (b) mit Ratterspuren (c) mit Materialverschmierungen

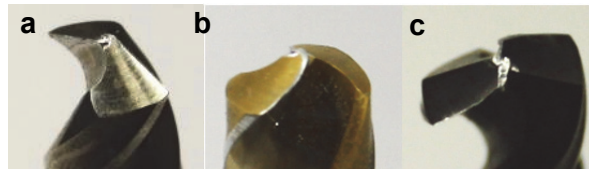


Abbildung 8-11: Werkzeugspitzen mit Aufbauschneiden (a) polierte Hartmetallschneide (b) TiNi-beschichtete Schneide (c) AlCrN-beschichtete Schneide

Tabelle 8-5: Ergebnisübersicht der Bohrversuche: Bewertung der Spanform (A ... kurze Späne, B ... mittlere Späne, C ... Endlosspan); Bewertung der Oberflächengüte im Bohrloch (A ... gute, B ... geringe Fehlstellen, C ... deutliche Materialverschmierungen und Ratterspuren);

Nr.	Vor-schub	Dreh-zahl	Werk-zeug	Schmierung	Spanform	Oberfläche
1	25	500	AlCrN	Trocken	C	A
2	50	1000	AlCrN	Trocken	B	A
3	25	1000	AlCrN	Trocken	B	B (leichte Verschmierung)
4	50	1000	AlCrN	Trocken	C	C (Ratterspuren)
5	25	500	TiN	Trocken	C	B (leichte Verschmierung)
6	50	500	TiN	Trocken	B	C (Verschmierung)
7	25	1000	TiN	Trocken	B	C (Verschmierung)
8	50	1000	TiN	Trocken	C	C (Verschmierung)
9	25	500	HSS	Trocken	B	B (leichte Verschmierung)
10	50	500	HSS	Trocken	B	C (Verschmierung)
11	25	1000	HSS	Trocken	B	B (leichte Verschmierung)
12	50	1000	HSS	Trocken	B	C (Verschmierung)
13	25	500	AlCrN	Nass	C	A
14	50	500	AlCrN	Nass	A	A
15	25	1000	AlCrN	Nass	C	B (leichte Ratterspuren)
16	50	1000	AlCrN	Nass	C	A
17	25	500	TiN	Nass	C	A
18	50	500	TiN	Nass	B	A
19	25	1000	TiN	Nass	C	A
20	50	1000	TiN	Nass	B	A
21	25	500	HSS	Nass	A	B (leichte Ratterspuren)
22	50	500	HSS	Nass	A	B (leichte Ratterspuren)
23	25	1000	HSS	Nass	A	B (leichte Ratterspuren)
24- 27	50	1000	HSS	Nass	A	B (Ratterspuren)

Bei der Trockenerspanung erweisen sich hohe Drehzahlen als vorteilhaft. Die höheren Temperaturen führen zum Aufschmelzen der spanbrechenden Phasen (hier Pb), wodurch einerseits kürzere Spanformen aber andererseits auch Verschmierung der niedrigschmelzenden Elemente und des Grundmaterials entstehen. Bei der Bohrlochflutung ist eine ausreichende Kühlung gegeben, um solche Effekte zu vermeiden. Kurze Späne entstehen vor allem bei der Anwendung eines unbeschichteten Bohrers, dabei bilden sich aber unabhängig von den Schneidparametern Ratterstrukturen an der Bohrlochoberfläche. Diese wiederum bezeugen eine ungleichmäßige und ruckartige Bearbeitung, welche frühzeitig Materialversagens hervorrufen kann. Die besten Ergebnisse lassen sich mit AlCrN-Beschichtungen und moderaten Schnittparametern erzielen, wobei die Oberflächenqualität weder durch gesteigerte Vorschübe noch Drehzahlen abnimmt. Die ungünstigste Bearbeitungsvariante ist die Trockenerspanung unter Verwendung eines TiN-Bohrers mit großen Vorschub und hoher Drehzahl. Offensichtlich ist, dass die Art der Beschichtung einen wesentlichen Beitrag zur Spanbildung und Materialanhaftung beiträgt. Entscheidend sind dabei materialspezifische Adhäsionskräfte und mögliche Diffusionsvorgänge.

Der deutliche Zusammenhang zwischen den Auswirkungen unterschiedlicher spanabtragender Fertigungsverfahren und deren Eloxalergebnis ist unter Abbildung 8-12 dargestellt. Beide Querschliffe stammen von einem Bauteil, welches verschiedene Bearbeitungsschritten ausgesetzt war. Die polierte Oberfläche weist dabei eine deutlich dickere und defektfreiere Eloxalschicht auf, als die gefräste oder gesägte Werkstückseite. Unter Abbildung 8-12 b wird vor allem die Problematik scharfer Kanten und ihre schlechte Eloxierbarkeit deutlich. Eine defektfreie Anodisierung ist auf sehr rauen Oberflächen demensprechend nicht möglich.

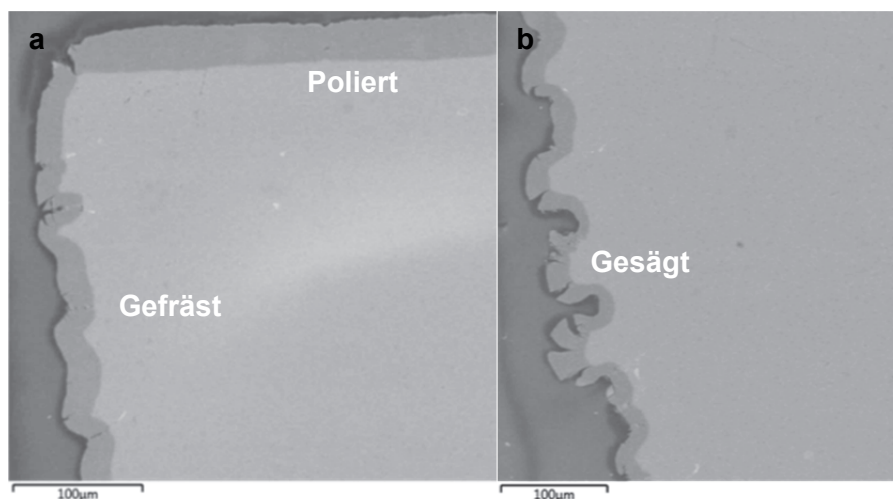


Abbildung 8-12: Unterschiedlich spanabtragend gefertigte Oberflächen eines eloxierten Bauteils

Die stark voneinander abweichenden Schichtdicken sind laut [88] und [89] über die Rauigkeit des Grundsubstrats zu erklären. Die Autorinnen führen an, dass es bei stark konvexen oder konkaven Oberflächen zu Porenauslöschungen oder Porenneubildungen kommt. Ein Beispiel dafür ist unter Abbildung 8-13 ersichtlich. Wie stark die Krümmung des Substrates die Dicke der gebildeten Oxidschicht beeinflusst, hängt von der elektrischen Feldstärke ab. Eine prinzipielle Darstellung dieses Zusammenhangs ist unter Abbildung 8-14 angeführt.

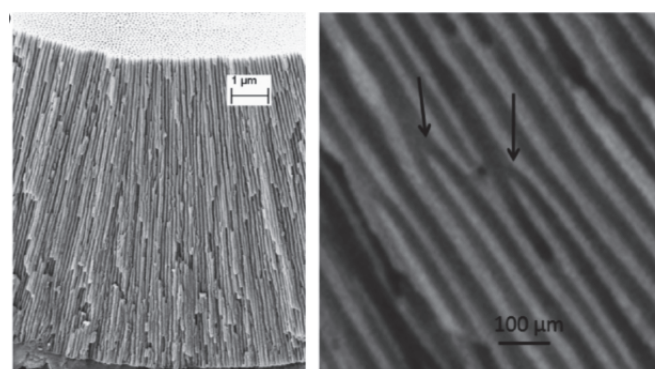


Abbildung 8-13: TEM-Aufnahme der Porenauslöschung in einer Eloxierschicht auf gekrümmten Substrat [88]



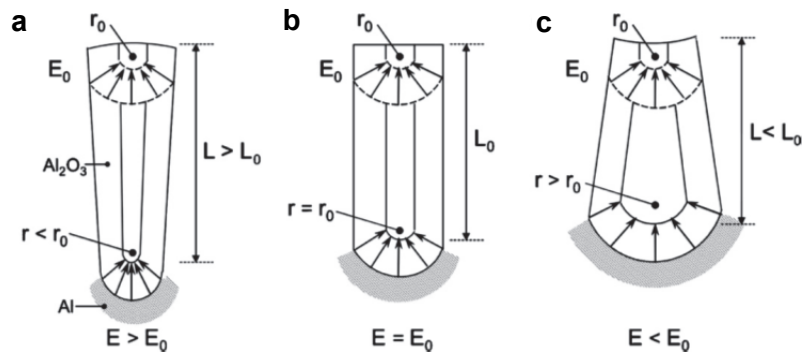


Abbildung 8-14: Modellvorstellung des unterschiedlichen Oxidwachstums auf konvexen (a) und konkaven (c) Oberflächen mit einer elektrischen Feldstärke ( $E$ ), einer elektrischen Feldstärke an der Oberfläche ( $E_0$ ), einem Radius ( $r$ ), einem Radius an der Oberfläche ( $r_0$ ), einer Porenlänge ( $L$ ) und einer Porenlänge auf einer planaren Oberfläche ( $L_0$ ) unter (b) [89]

Eine Vergrößerung der unter Abbildung 8-12 b dargestellten Oberfläche (siehe Abbildung 8-15) bestätigt das vermehrte Schichtwachstum an konvexen, gegenüber konkaven Grenzflächen. Außerdem wird die begrenzte Duktilität und die damit einhergehende geringe Möglichkeit der Oxidschicht der Substratbiegung dauerhaft zu folgen, sichtbar.

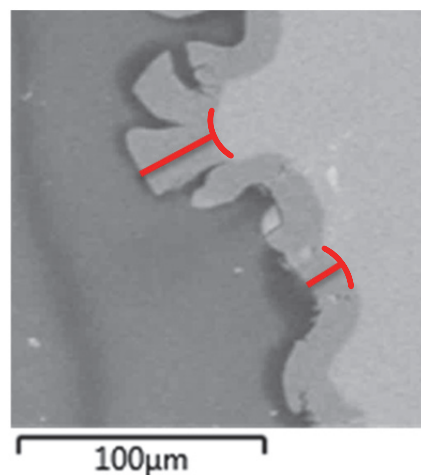


Abbildung 8-15: Ausschnitt der Eloxieschicht aus Abbildung 8-12 b

Zusammenfassen lassen sich die Wechselwirkungen zwischen der spanabtragenden Fertigung und dem Eloxierergebnis unterschiedlicher Legierungen wie folgt beschreiben:

- Die Rauigkeit der Oberfläche beeinflusst Dicke und Defektdichte der Eloxierschicht.
- Die durch Zerspanung eingebrachten thermischen und mechanischen Eigenspannungen haben nur eine untergeordnete Rolle.
- Rückstände von Hartmetallschneiden können hingegen zu Korrosionsproblemen und lokalen Verfärbungen der Oxidschicht führen.

Eine der wichtigen Aufgaben des Beizens ist der Abtrag der natürlich gewachsenen Oxidschicht. Bei entsprechend langer Beizzeit werden aber auch tieferliegende Regionen des Aluminiumbauteils aufgelöst. Vor allem das sogenannte „seidenmatte Finish“, also einer längere Behandlung unter 50-70 °C heißer Natronlauge, kann zu deutlichen Material-

abtragraten führen (siehe Tabelle 8-6). Um eine genaue Vorhersage dieser und mögliche Rückschlüsse auf Gesetzmäßigkeiten treffen zu können, erfolgten entsprechende Analysen in unterschiedlichen Beizbädern. Die mittleren Abtragraten der betrachteten Legierungen ist unter Tabelle 8-6 ersichtlich. Die basische Beizung hat naturgemäß einen viel größeren Abtrag als die saure Behandlung. Das Kupfer in der 2000-Legierungsserie wirkt zudem stark anodisch und beschleunigt die Auflösung der Aluminiummatrix im basischen Milieu.

Tabelle 8-6: Durchschnittliche Abtragraten in  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  ( $t = 10 \text{ min.}$ ) beim Beizen in unterschiedlichen Medien mit verschiedenen Konzentrationen [90,91]

Legierung	Abtragrate NaOH (30 %, 70 °C)	Abtragrate HNO <sub>3</sub> (20 %, 60 °C)
7075	3952	358
2017	9394	308
6082	4469	381

Untersuchungen der basisch behandelten Oberflächen zeigen Aufkonzentrationen von Eisen, Mangan, Silizium und Kupfer (siehe Abbildung 8-16). Diese in der Natronlauge unlöslichen Elemente fallen als Rückstand am Werkstück an und müssen mittels HNO<sub>3</sub>-Dakapierung entfernt werden.

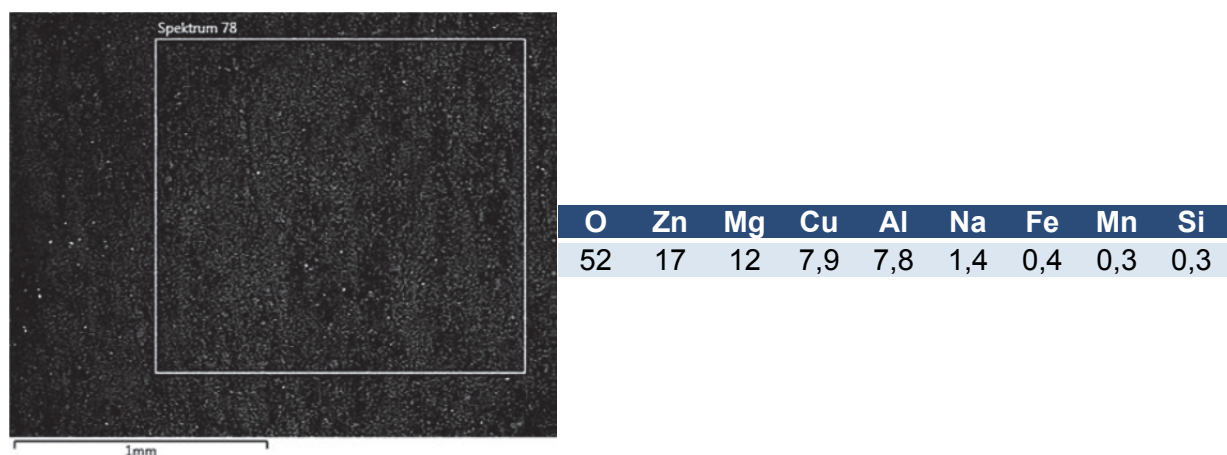


Abbildung 8-16: Analyse einer mit Natronlauge gebeizten 7075-Legierung (a) REM-Aufnahme und (b) Elementspektrum laut EDX-Analyse in Gew.-% [90]

Die bei der basischen Behandlung generierten Ätzgrübchen führen bei eloxierten Aluminiumbauteilen zu einer herabgesetzten Dauerfestigkeit [58]. Sie entstehen größtenteils um Partikel (z. B. CuAl<sub>2</sub>, FeAl<sub>3</sub>, etc.), welche edler sind als die Aluminiumgrundmatrix.

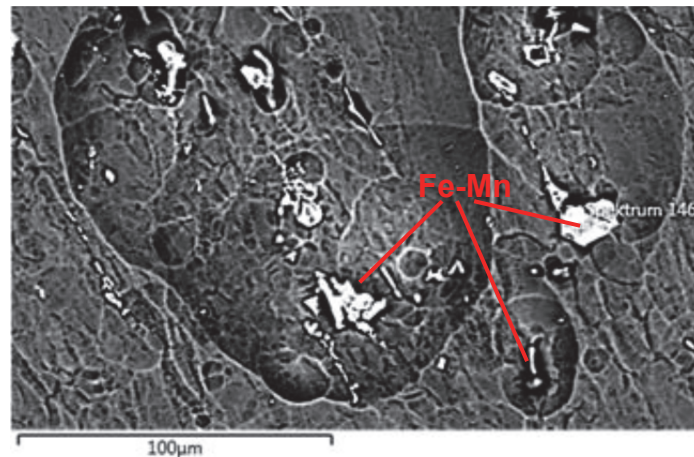


Abbildung 8-17: Ätzgrübchen auf einer frisch in NaOH-geätzten Aluminiumoberfläche [90]

Beizungen im sauren Medium zeigen bei Raumtemperatur so gut wie keinen Materialabtrag. Eine ausreichende Oxidentfernung ist also nur bei erhöhten Temperaturen zu erwarten. Dabei ist allerdings darauf zu achten, dass Silizium selbst in  $\text{HNO}_3$  unlöslich ist. Bei entsprechend langer Behandlungsdauer können sich also auch in saurer Lösung um Si-Partikel Ätzgrübchen bilden (siehe Abbildung 8-18).



Abbildung 8-18: Angriff der Aluminiummatrix rund um eine hochsiliziumhaltige Phasen nach der Beizung in  $\text{HNO}_3$  [91]

Die Ergebnisse der Eloxierung von Recyclinglegierung zeigen den starken Einfluss von Legierungselementen und Verunreinigungen auf die Schichtqualität. Die Messung der Abrasionsbeständigkeit mittels Kalottenschliff ist eine mögliche Qualitätskontrolle bei Eloxal-schichten. Dabei zeigt sich bei den untersuchten Materialien mitunter eine Abhängigkeit von der chemischen Vorbehandlung.

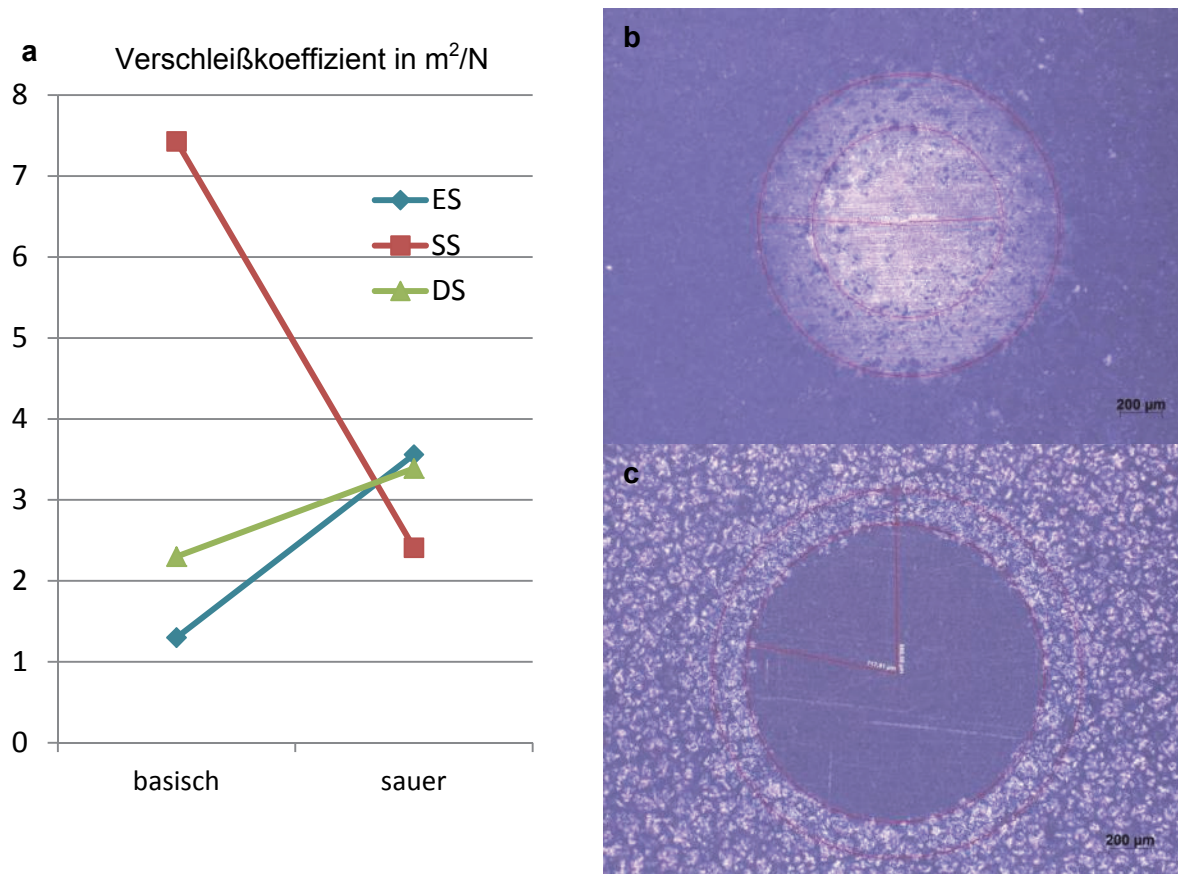


Abbildung 8-19: Ergebnisse der Kalottenschliffanalyse (a) Gegenüberstellung der einzelnen Verschleißkoeffizienten der verschiedenen gebeizten und ident eloxierten Legierungsoberflächen aus Elektronik- (ES), Span- (SS) und Dosen- (DS), (b) Kalottenschliff der Eloxierschicht auf einer Dosen-Recyclinglegierung und (c) Kalottenschliff einer Eloxierschicht auf einer Elektronik-Recyclinglegierung

Die höchste Abrasionsbeständigkeit hat die Legierung mit Si-Primärhasen. Diese dienen als festigkeitssteigernde Einschlüsse im Oxid und stoppen den Verschleißfortschritt. [53,73] Allerdings senken die vielen durch die Si-Phasen ausgelösten Defekte und Risstrukturen (siehe Abbildung 8-20) die Korrosionsbeständigkeit der Legierung drastisch.

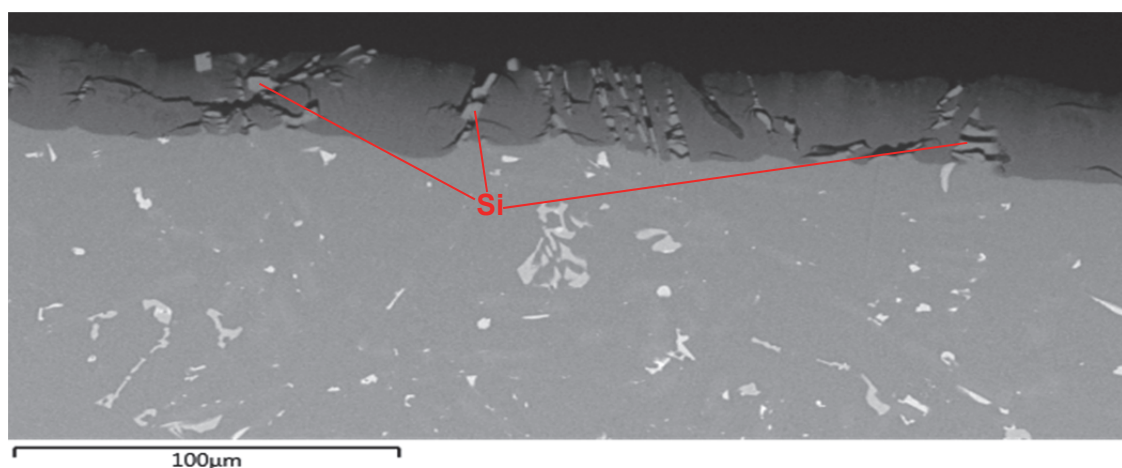


Abbildung 8-20: Querschliff einer Eloxierschicht auf Recyclingaluminium aus Festplattenschrotten mit Darstellung der Einflusszonen durch primärausgeschiedenes Silizium

Diese groben Si-Phasen können durch eine angepasste Prozessführung oder eine Zugabe von Veredelungssubstanzen (z. B. Strontium) vermieden werden. Zudem sind eher geringere Stromdichten zu wählen, um dem Aluminiumoxid genug Zeit zu lassen die komplex geformte Si-Partikel zu umwachsen. [53,73]

Eine andere Form von Defekten zeigte sich ebenfalls bei der aus Festplattenschrotten gewonnenen Legierung [101]. Die relativ geringen Temperaturen beim Aluminiumumschmelzen ermöglichen es einzelnen Verbindungen im festen Zustand bestehen zu bleiben. In diesem Fall handelt es sich um Siliziumnitridphasen (siehe Abbildung 8-21). Diese stammen aus den Fest- oder deren Speicherplatten. Es handelt sich dabei um die eigentliche Speicherschicht auf der Aluminiumdisk [102]. Diese Rückstände sorgen für massive Probleme in der Eloxierschicht, da es zu einer lokalen Blockierung des Oxidwachstums kommt. Dadurch entstehen Pfade für Cl-Ionen und damit Angriffspunkte für Korrosion. Um solche Verunreinigungen verhindern zu können, muss die Aluminiumschmelze durch sehr feine Keramikfilter geleitet werden. [103]

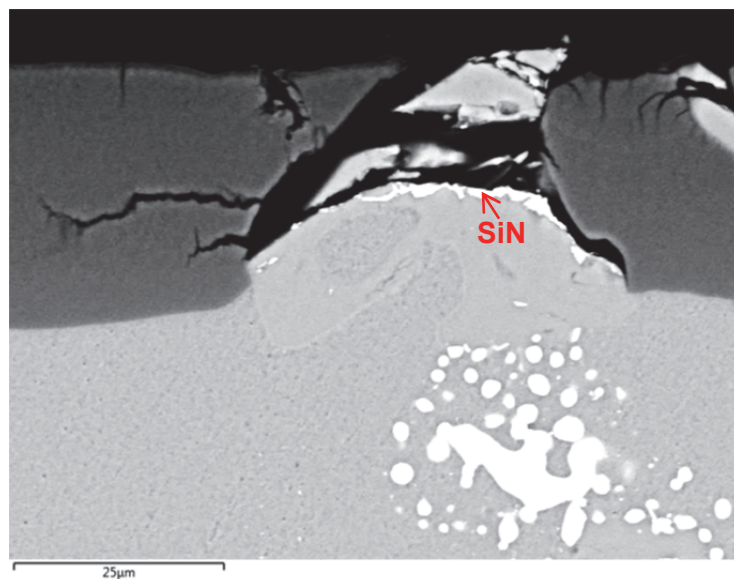


Abbildung 8-21: Siliziumnitridphase aus dem Recyclingprozess eingebettet in die Eloxierschicht

Die rissbehafteten Strukturen des Aluminiumoxids sorgen zudem für eine verminderte Leitfähigkeit während der Eloxierung. Diese Thematik ist unter Abbildung 8-22 ersichtlich. Weiters zeigt sich, dass die Span- und die Dosenschrottlegerung sehr ähnliche und damit geringere Spannungsverläufe aufweisen. Erhöhte Werte aufgrund von Nebenreaktionen wie Kupferdioxid und der damit einhergehenden Sauerstoffblasenbildung können nicht festgestellt werden.

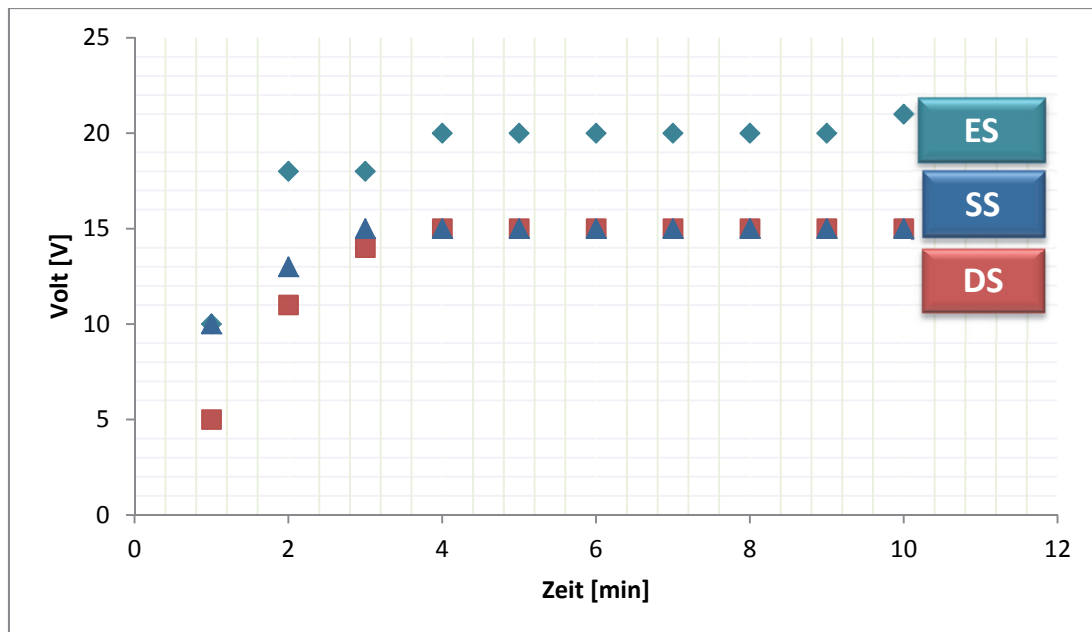


Abbildung 8-22: Spannungsverlauf über die Eloxierzeit von drei unterschiedlichen Legierungen bei gleichbleibender Stromdichte von  $5 \text{ A/dm}^2$  (ES ... Festplattenschrotte, SS ... Spanschrotte, DS ... Dosenschrotte)

Generell sind Gusslegierungen auf Grund ihres größeren Gefüges, den hohen Legierungsgehalten und häufig auftretenden Oberflächenporositäten schwieriger zu eloxieren. Die Oxidschicht erscheint dabei optisch immer weniger homogen als bei Knetwerkstoff. [86]

Angelehnt an die Betrachtung der Gusslegierungen bietet sich das binäre Al-Si-System als wichtige Informationsquelle an. Dabei zeigt sich sofort, dass die Höhe des Si-Gehaltes für die Modifikationen in der Eloxalschicht ausschlaggebend ist. Typische Gehalte an Si-Verunreinigungen bewegen sich in einem Grenzbereich bis 1 % [23]. Dabei kann es bei sehr dicken Eloxierschichten zu einer leichten Grau- oder Braunfärbung kommen. Abbildung 8-23 zeigt eine geringfügige Modifikation der Oxidschicht die sich im Querschliff durch wolkiges Aussehen manifestiert. Die chemischen Spektren zeigen allerdings keine Variationen im Elementgehalt.

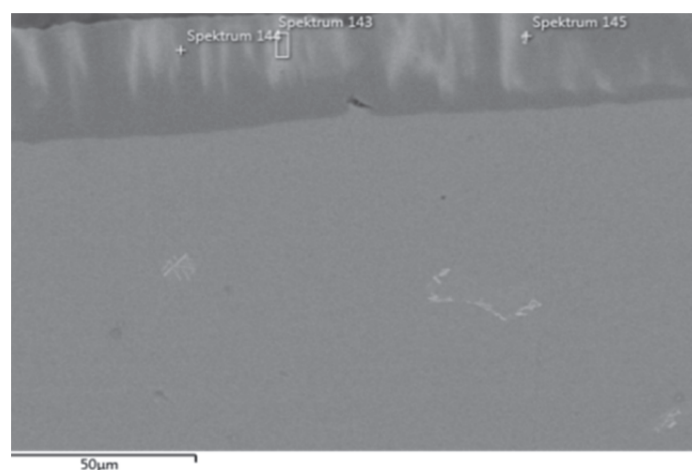


Abbildung 8-23: Eloxierung einer binären Al-Si-Legierung mit 1,5 Gew.-% Silizium

In Abbildung 8-24 ist eine andere Art von Einflussnahme durch Silizium, die ebenfalls in einer binären Legierung mit nur 1,5 Gew.-% Si auftreten kann, zu sehen. Der geringe Sauerstoffgehalt dieses Partikels (siehe Tabelle 8-7) zeigt, dass keine Oxidation erfolgt ist und lediglich eine Umwachsung mittels  $\text{Al}_2\text{O}_3$  stattfand, was auch die Rissstruktur rund um die Phase erklärt.

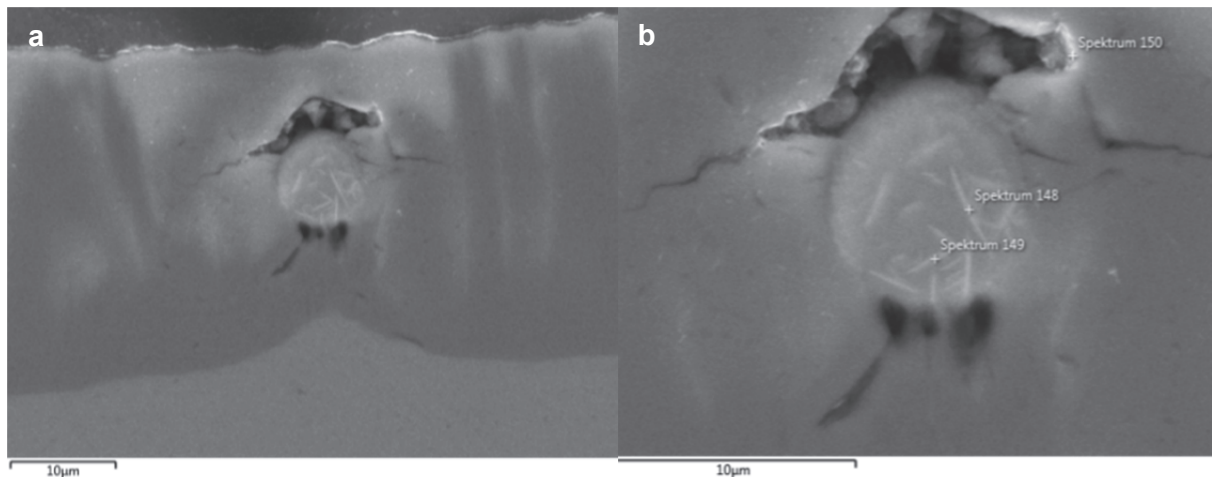


Abbildung 8-24: Si-Phase eingebettet in eine Eloxierschicht (a) Übersichtsaufnahme (b) Detailansicht

Tabelle 8-7: EDX-Spektrum in Gew.-% zu Abbildung 8-24: Si-Phase eingebettet in eine Eloxierschicht

Spektrum	Al	Si	Fe	O	Ni	S
<b>148</b>	63,2	22,9	4,8	2,1	0,8	-
<b>149</b>	50,3	14,8	1,2	29,9	-	1,2
<b>150</b>	31,8	1,8	-	61,1	-	4,9

Eine Form der Si-Verunreinigung zeigte sich auch in den Versuchen mit der kommerziellen 2007-Legierung. Die häufig auftretenden Al-Fe-Si-Phasen mit Spuren von Mn, Cu und Cr, führen zu Schichtinhomogenitäten wie Rissen und Hohlräumen. Entscheidend ist dabei ob sich sogenannten Stringer, welche aus bei der Verformung zerteilten größeren Al-Fe-Si-Partikeln mit linearer Anordnung bestehen, normal oder parallel zur Wachstumsrichtung der Oxidschicht anordnen. In Abbildung 8-25 sind Schichten vertikal oder horizontal zur Umformrichtung verlaufend dargestellt. Dabei liegen unterschiedliche Formen der Fehlstellen vor. Während die Stringer in paralleler Anordnung zur Schicht eher gelöst werden und Hohlräume hinterlassen, ergeben die normal zum Oxid verlaufenden Phasen Risse im  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Diese Problematik könnte durch vorherrschende Eigenspannungen aus der Umformung noch begünstigt werden. Sämtliche durchgeführten Versuche zeigen jedoch keine eindeutige Korrelation zwischen Schichtwachstum oder Stromdichte und dem Rissvorkommen.

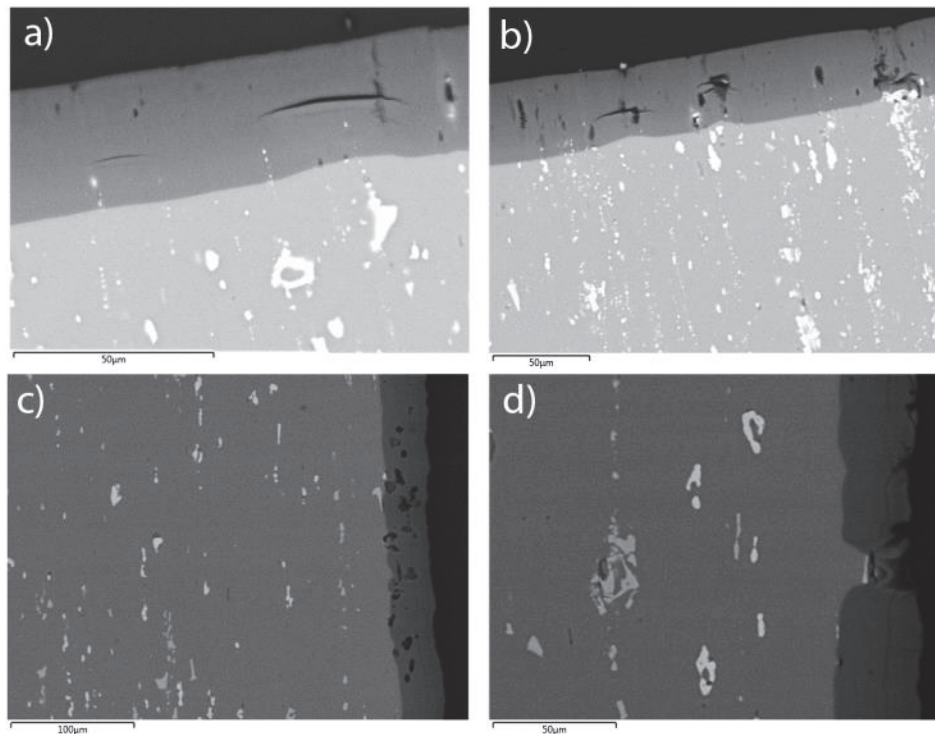


Abbildung 8-25: Unterschiedliche Ausrichtung der Stringer zur Wachstumsrichtung der Eloxierschicht (a,b) parallel mit lokaler Rissbildung und (c,d) normal mit Hohlraumdefekten

Kupfer ist das Hauptlegierungselement in der 2000-Serie und sorgt für unterschiedliche Fehlstellen in der Eloxierung. Generell kommt es bei Cu-haltigen Phasen aufgrund des Halbleitercharakters von Kupferoxid zur Sauerstoffwicklung und somit Gasblasenbildung. [64] Bei entsprechend hohen Drücken können diese gasgefüllten Hohlsäume aufbrechen und das allgemeine Schichtwachstum stören. Sehr häufig sind, vor allem in hochkupferhaltigen Legierungen, Fehlstellen in Form von „Käfern“ ersichtlich. Dabei liegt ein zentraler Hohlraum vor, der durch mehrere horizontale Risse umrandet wird (siehe Abbildung 8-28). Diese Fehlstellen reichen dabei meist unter die Grenzschicht von Aluminiumsubstrat und Oxidschicht. Bei einer Analyse des Bereiches rund um die Phasen sind immer wieder erhöhte Cu- und Si-Gehalte vorhanden.

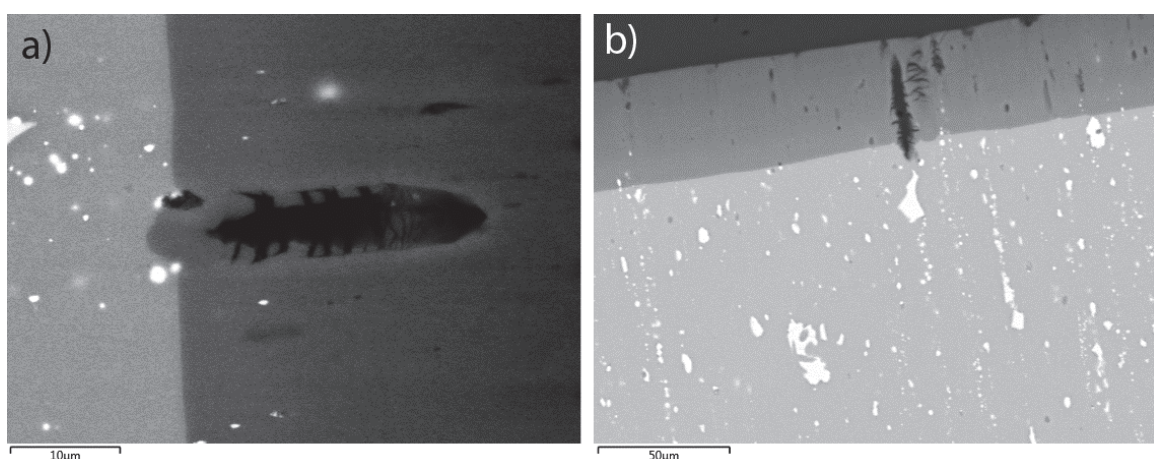


Abbildung 8-26: „Käferähnliche“ Phasen in einer Eloxierschicht auf 2007-Aluminium



Die käferartigen Defekte treten auch in binären Al-Cu-Systemen auf (siehe Abbildung 8-28, a), wobei die periodische Anordnung der horizontalen Risse mit dem periodischen Aufreißen dünner Oxidschichten zusammenhängen kann (siehe Prinzipskizze unter Abbildung 8-27).

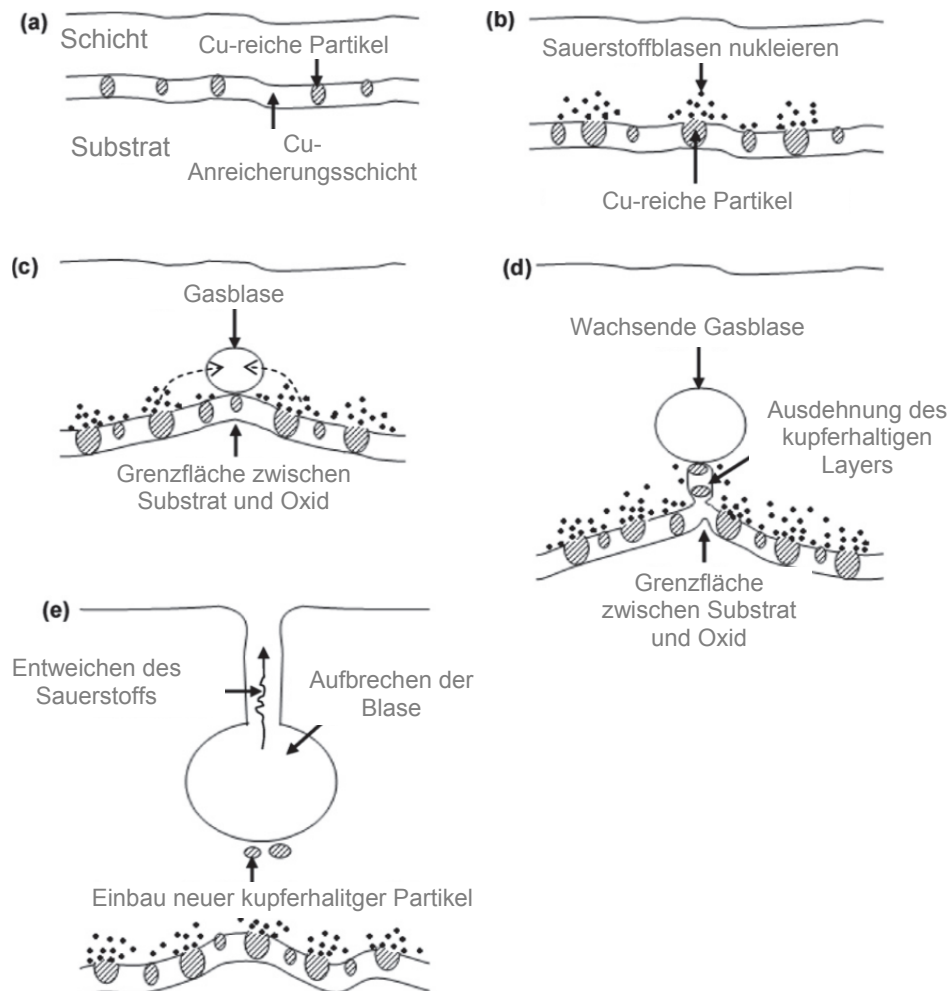


Abbildung 8-27: Schematische Darstellung der Abläufe zur Rissbildung in kupferhaltigen Eloxierschichten [104]

Eine andere durch kupferhaltige Phasen ausgelöste Defektart ist unter Abbildung 8-28 (b) ersichtlich. Dabei liegt im Zentrum ein sehr poröses Al-Cu-Oxid vor. Die eigentliche Ausgangsphase muss weit unter der Grenzfläche von Metall und Eloxierschicht gelegen haben. Ähnliche Defekte sind aus [76] bekannt. Wieder tauchen periodische Risse, in diesem Fall über der eigentlichen Phase, auf. Der endgültige Beweis für kupferhaltige und hochporöse Oxide gelingt mit Abbildung 8-29 (a). Hier ist lediglich die halbe Cu-Al-Phase in die Eloxierschicht eingebaut worden. In dem Bereich dieser fast globularen Ausscheidung existiert ein poröses, wieder durch Cu-Oxidation und Sauerstoffbildung entstandenes Oxid.

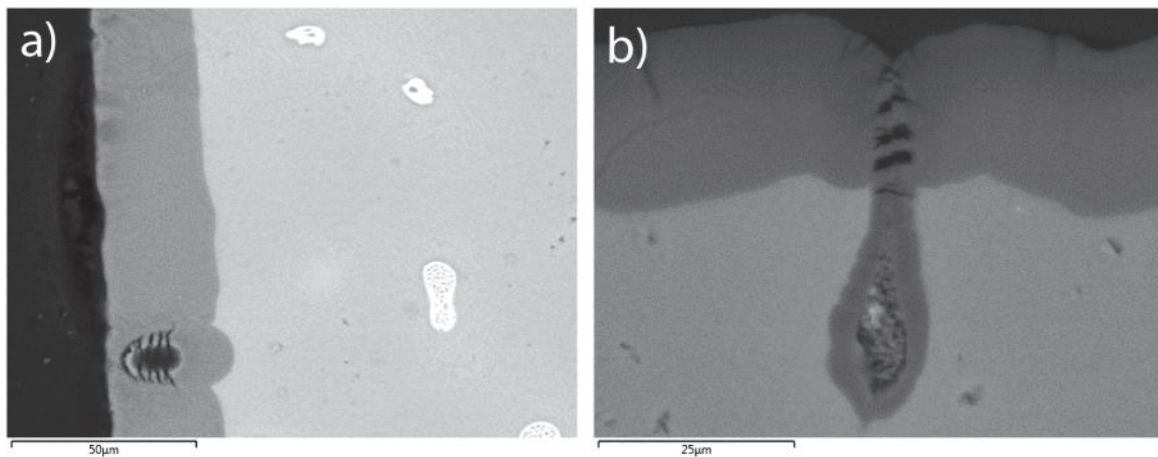


Abbildung 8-28: Unterschiedliche Formen von kupferinduzierten Fehlstellen in Eloxierschichten mit (a) einer binären Al-Cu-Legierung als Substrat und (b) einer 2007-Legierung als Substrat

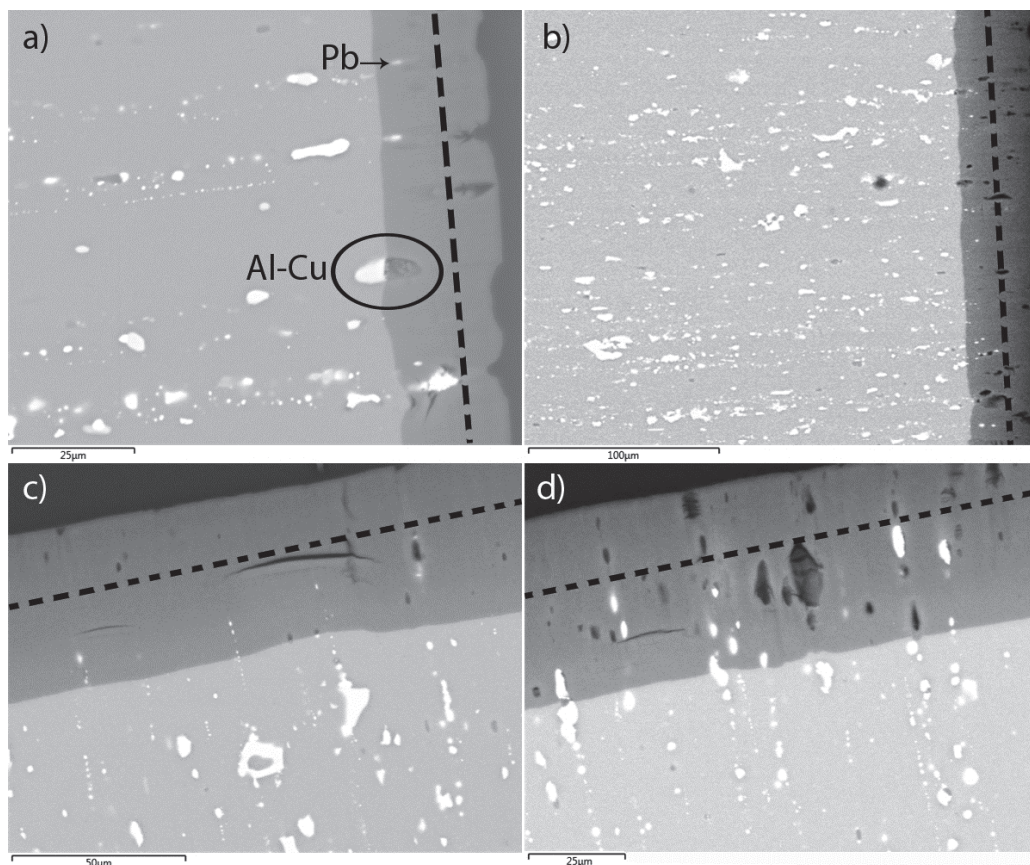


Abbildung 8-29: Verschiedene Defektarten und beschränktes Vorkommen von Pb bis zu einer gewissen Höhe in der Eloxierschicht

Die Betrachtung der Darstellungen unter Abbildung 8-29 zeigt, dass die spanbrechende Phase aus Blei nur bis rund zwei Drittel der Schichthöhe auftritt (gestrichelte Linie). Pb wird generell nicht oxidiert, sondern einfach in die Oxidschicht eingebettet bzw. von ihr umwachsen. Seine oftmals globulare Form verhindert dabei meist Risse oder ähnliche Defekte. Generell kann dabei davon ausgegangen werden, dass die Pb-Partikel während der

ersten Phase der Schichtbildung aus dem Verbund ausgefallen sind, da es nur eine begrenzte Haftung zwischen Pb-Oberflächen und  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gibt.

Eine mögliche Substitution zu dem toxischen Pb als Spanbrecher stellen Sn und Bi dar. Daher erfolgten ergänzend einige Versuche mit diesen Elementen. Auch Sn und Bi werden lediglich vom Oxid umschlossen und liegen meist in globularer Form vor (siehe Abbildung 8-30).

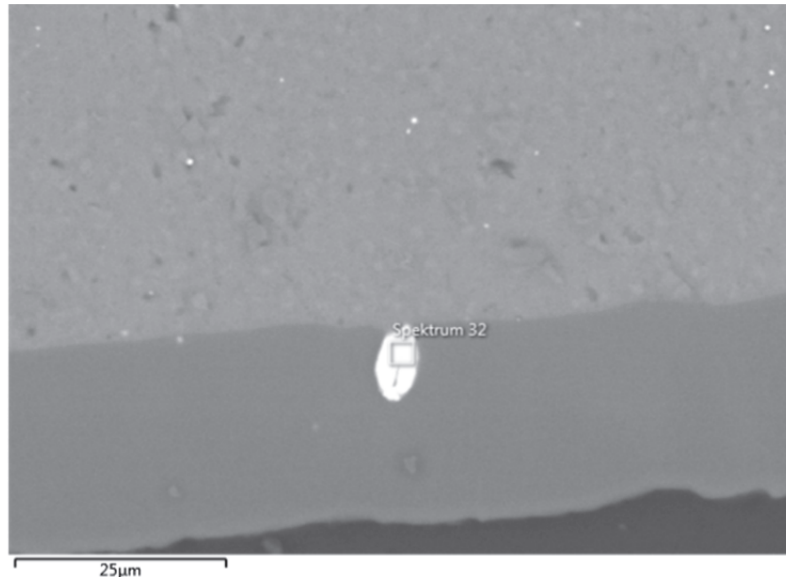


Abbildung 8-30: Sn-Partikel eingelagert in eine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schicht gewachsen auf binären Al-Sn-Substrat

Als problematisch erweisen sich die Sn-Phasen nur in Verbindung mit kupferreichen eutektischen Strukturen (siehe Abbildung 8-31). Hier bilden sich einfache Verbindungen durch das poröse Oxid und damit optimale Angriffspunkte für Chlorionen. Unter [106] ist eine ähnliche Problematik mit Sn-Bi-Partikeln dargestellt.

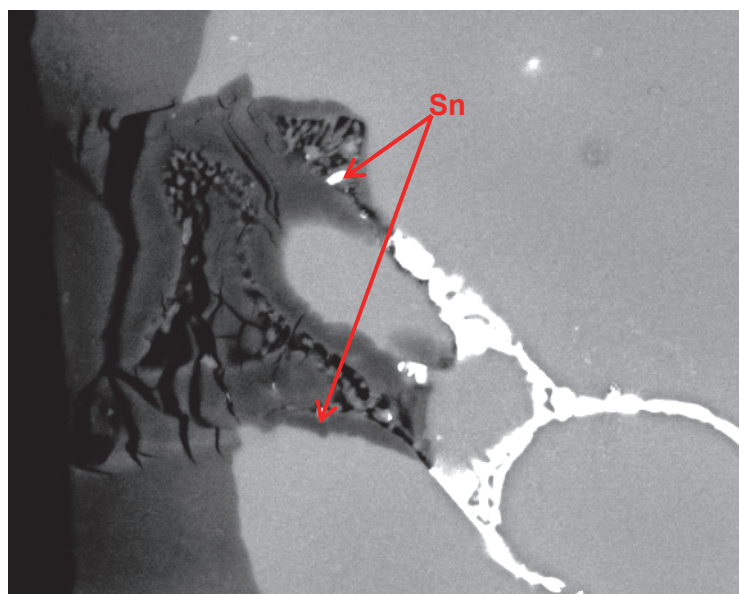


Abbildung 8-31: Sn-Partikel eingebettet in poröser Oxidschicht; auf einer mit Sn-Spanbrechern versehen 2007-Legierung (ohne Umformschritt vor dem Eloxieren);

Das Eloxieren von 1050-Legierungen erweist sich weitgehend als unproblematisch. Generell können auf diesem niedriglegierten Material einfach defektfreie und homogene Schichten hergestellt werden (siehe Abbildung 8-32).

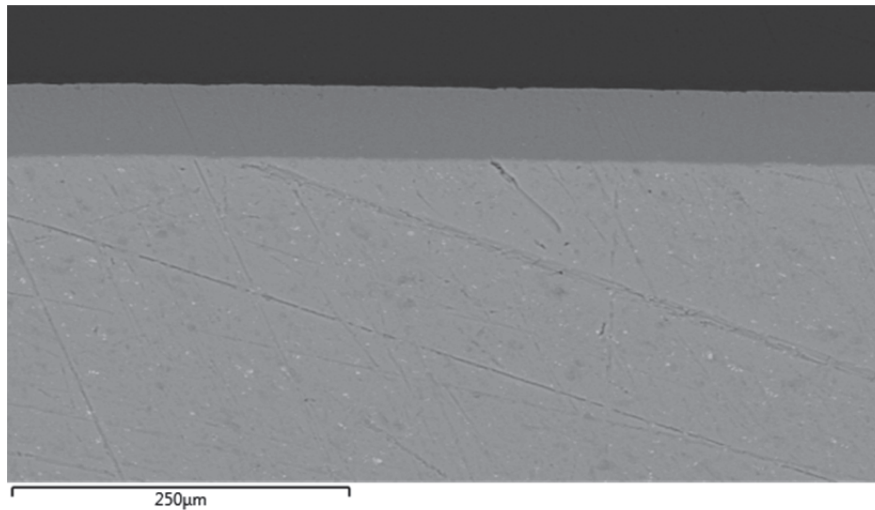


Abbildung 8-32: Übersichtsaufnahme einer Eloxierschicht auf einem 1050-Substrat

Nach dem Sealing von Schichten mit einer Dicke von  $> 30 \mu\text{m}$  werden Risse mit freiem Auge sichtbar. Querschliffe offenbaren deren zur Wachstumsrichtung parallelen Verlauf durch das Oxid (siehe Abbildung 8-33).

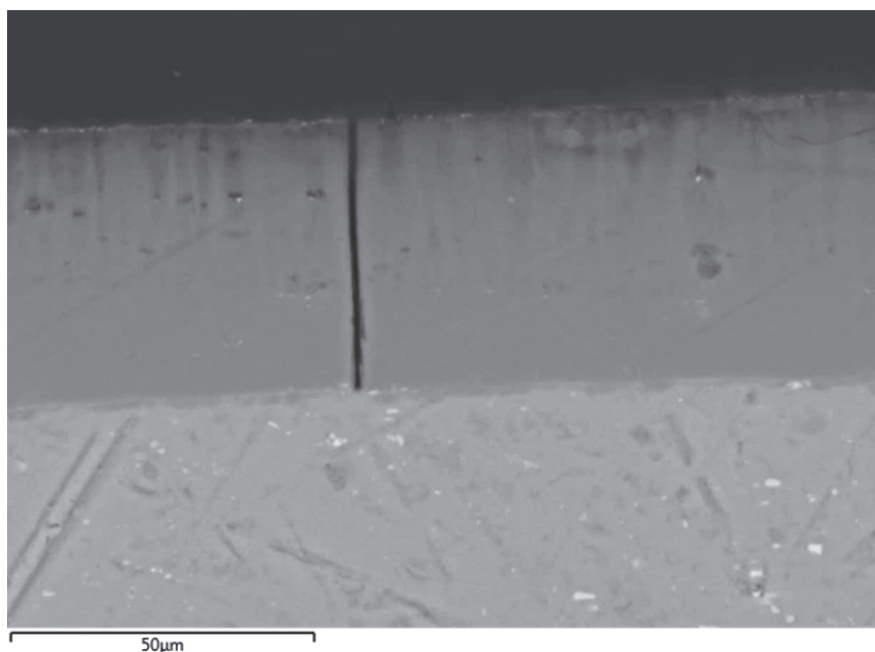


Abbildung 8-33: Riss in einer Eloxierschicht auf 1050-Aluminium

Außerdem korrelieren die Rissstrukturen mit geometrischen Gegebenheiten (siehe Abbildung 8-34).

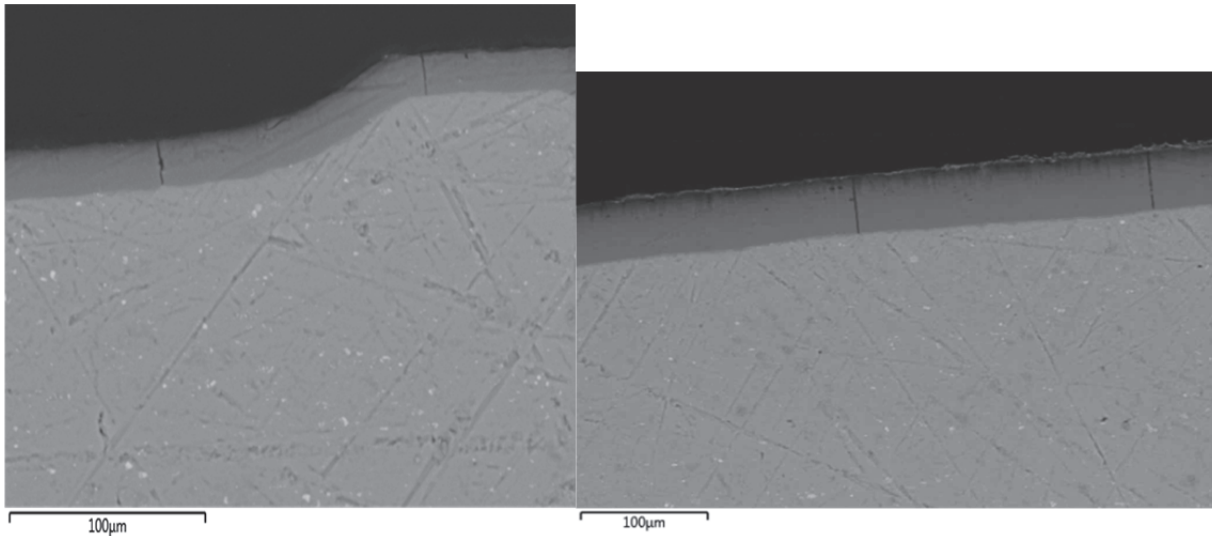


Abbildung 8-34: Eloxierschichten auf 1050-Aluminium mit feinen Rissstrukturen nach dem Sealing

Die Rissbildung ist durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Aluminium und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Oxid zu erklären [80]. Diese Problematik kann durch eine geeignete Wahl der Geometrie und sogenanntes Kaltsealing bei niedrigeren Temperaturen umgangen werden. Interessant bleiben aber die Tatsache, dass diese Art der Rissbildung nur bei relativ niedrig-legierten Materialien (1050, 5182, etc.) und sehr homogenen Schichten auftritt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Defekte in anderen Eloxierungen (z. B. auf 2000-Substrat) helfen die inneren Spannungen, ausgelöst durch den thermischen Missfit, zu kompensieren. Außerdem kommt es zu keiner Rissbildung, wenn ein vorgeschalteter Schritt mittels Kugelstrahlen, also dem gezielten Einbringen von Druckspannungen in die Materialoberfläche, erfolgt. Wichtig ist zudem die Beobachtung, dass einhergehend mit unterschiedlichen Stromdichten bei der Eloxierung auch Unterschiede in der Rissstruktur auftreten. Bei niedrigeren Stromdichten, also geringeren Wachstumsraten, entstehen engmaschigere Muster. Bekannt ist, dass bei höheren Spannungen auch härtere Schichten entstehen. Somit können die unter  $10 \text{ A/dm}^2$  hergestellten Oxide höhere Zugkräfte als die bei  $5 \text{ A/dm}^2$  gewachsenen ertragen, allerdings wäre hier eine gestiegene Sprödigkeit zu erwarten. Eine Auswirkung der angewendeten elektrischen Spannung auf die in der Schicht vorliegenden inneren Spannungen wird unter [51] postuliert. Dabei gehen die Autoren aber lediglich von einer Spannungsspitze direkt unter der Oxidoberfläche aus (siehe Abbildung 4-17). Eine Überlagerung von beiden Effekten könnte allerdings für höhere Eigenspannungen bei niedrigeren Stromdichten sorgen und somit das feinere Rissnetzwerk erklären.

In den untersuchten 6000-Legierungen treten häufig Si-Fe-Phasen auf. Diese werden teilweise gelöst und in die Eloxierung eingebettet (siehe Abbildung 8-35). Solche Fehlstellen im Oxid sind bevorzugte Angriffspunkte für Cl-Ionen und damit Korrosionsausgangsstellen. [46]

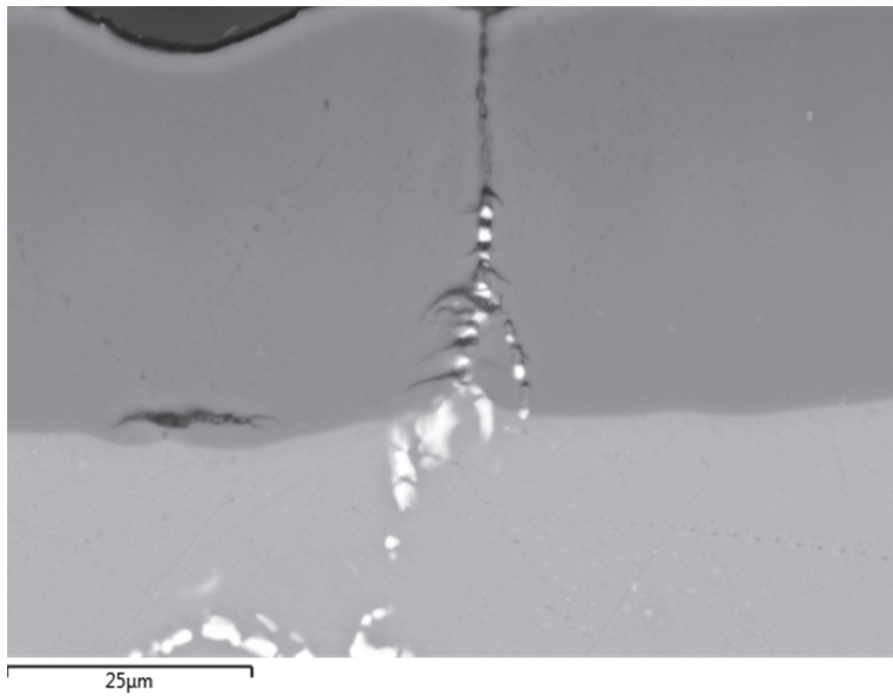


Abbildung 8-35: Al-Fe-Si-Phase eingebettet in einer Eloxierschicht auf 6000-Aluminium

## 9 Diskussion

Im abschließenden Teil dieser Arbeit werden einerseits die wichtigsten Erkenntnisse zur Eloxierung einzelner Legierungsklassen zusammengefasst und andererseits die aufgedeckten Zusammenhänge zwischen den drei beobachteten Prozessschritten des Recyclings, der Zerspanung und des Anodisierens dargestellt.

Die Eloxierung der 1000-Serie gilt weitgehend als unproblematisch. Unabhängig von erzeugter Schichtdicke und angewendeter Vorbehandlung entstehen weitgehend defektfreie und transparente Schichten. Der Sealingsschritt in kochendem Wasser sorgt allerdings bei Schichten über 30 µm Dicke für ein feines Rissnetzwerk im Oxid. Dessen Verlauf ist einerseits von der Geometrie des Werkstücks und andererseits von der angewendeten Stromdichte abhängig. Um diese Form von Defekten zu vermeiden, gibt es die Möglichkeiten, entweder von einem Heißsealing abzusehen und den Porenverschluss mittels geeigneter Salze hervorzurufen oder die Werkstückoberfläche mittels Kugelstrahlen vorzubereiten. Die dadurch eingebrachten Druckeigenspannungen verhindern das Aufreißen der Schicht auch während einer intensiven Sealingperiode.

Das Anodisieren von 2000-Serien ist einerseits durch den Einfluss kupferhaltiger Phasen und andererseits durch auftretende Verunreinigungen geprägt. Die spanbrechenden Elemente haben nur eine untergeordnete Wirkung, da sie hauptsächlich in globularer Form auftreten und einfach in das Oxid eingebettet werden. Bei den kupferhaltigen Phasen ist entscheidend wie hoch der Kupfergehalt ausfällt. In der einschlägigen Fachliteratur wird zwischen niedrig-, mittel- und hochkupferhaltigen Phasen unterschieden. Entscheidend ist zudem, welche zusätzlichen Elemente mit dem Cu vergesellschaftet sind. Generell verhalten sich alle intermetallischen Phasen unterschiedlich bezüglich ihres Lösungs- und Oxidationsverhaltens. Entscheidend ist dabei, ob sich Hohlräume, hoch-poröse Strukturen oder andere Defektformen ausbilden. Die Lösung der Phasen und ihr Oxidationsverhalten kann zudem über die angewendete Stromdichte und die Aggressivität des Elektrolyten gesteuert werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Gesamthärte des Oxids nicht zu weit sinkt, da zu geringe Stromdichte auch zu weicherem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  führen. Als problematisch können sich auch Al-Fe-Si-Phasen erweisen. Hier ist vor allem ihre Ausrichtung zum Oxidwachstum entscheidend. Generell sollten diese Verunreinigungen aber für Eloxierlegierungen so gering wie möglich gehalten werden, da sie entweder Risse oder Hohlräume fördern zu scheinen.

Die Eloxierung von 5000-Legierung ist eher unkompliziert. Magnesium geht als Hauptlegierungselement schnell in den Elektrolyten und verursacht nur in Kombination mit Eisen leichte Defekte in der Eloxierschicht. Aufgrund der Tatsache, dass nur wenige Störstellen im Oxid vorhanden sind, kommt es bei Sealing von sehr dicken Anodierschichten wieder zur Rissbildung (wie bei den 1050-Legierungen). Auch in diesem Fall ist der Effekt mittels Kugelstrahlen oder Kaltsealing zu umgehen.

Die Anodisation von 6000-Werkstoffen ergibt bei hohen Schichtdicken eine starke Graufärbung der Eloxierung. In den Querschliffen zeigen sich lediglich einige wenige Fe-Mn-Phasen als problematisch.

Die 7000-Legierungen stellen ebenfalls eine Herausforderung dar. Generell kommt es bei ihrer Anodisation zu einer Grünverfärbung des Oxids. Außerdem bilden sich aufgrund der elektrochemisch stark unterschiedlichen Phasen tiefe Ätzgrübchen. Hier ist darauf zu achten, dass die Beizung nicht zu aggressiv verläuft. Eine zu geringe Vorbehandlung (z. B. saure Beizung bei RT) kann allerdings auch zu Problemen führen. Die Schichten neigen dann zur Abplatzung vom Grundsubstrat. Eine Empfindlichkeit gegenüber Heißeisung kann an dieser Stelle nicht bestätigt werden.

Das Eloxieren von Gusslegierungen ist generell schwieriger als die Behandlung von Knetwerkstoffen. Neben den höheren Legierungsgehalten und Oberflächenporositäten entstehen viele Probleme wegen der groben Strukturen vieler Ausscheidungen und Phasen. Hier ist auf eine entsprechende Kornfeinerung und Veredelung zu achten. Außerdem sollten die Oberflächen, wenn möglich, kugelgestrahlt werden, da sich dadurch gleichmäßigere Ergebnisse erzielen lassen. Eine Homogenisierungslösung hilft zudem ein ansprechendes optisches Erscheinungsbild herzustellen. Allerdings sollten Eloxierungen auf Gusslegierungen nicht unbedingt für Sichtbauteile eingesetzt werden, es sei denn es kommt eine verschleiende Schwarzanodisation zum Einsatz. Zu beachten bleibt auch, dass die Korrosionsbeständigkeit der untersuchten Eloxierungen auf Guss- unter denen von Knetlegierungen gelegen ist. Die Abrasionsbeständigkeit ist hingegen weitgehend als ebenbürtig einzustufen.

Die wichtigsten Zusammenhänge zwischen dem Zerspanungsprozess und der Eloxierung sind:

- Rückstände von Hartmetallschneiden können in die Eloxierschicht eingebettet werden und als lokale Korrosionsstellen die Anodisierung schädigen.
- Schmiermittel und andere Betriebsstoffe aus der spanabtragenden Fertigung müssen sehr gründlich entfernt werden, weil sie ansonsten zu lokalen Fehlstellen in der Eloxierung führen oder sogar eine Oxidbildung verhindern.
- Die Rauigkeit der erstellten Oberflächen kann das Schichtwachstum beeinflussen. Es ist daher darauf zu achten, dass Bauteile mit unterschiedlichen Rauigkeiten entsprechend eloxiert und auch überprüft werden.
- Eine zu raue Oberfläche kann zu lokalen Rissstrukturen führen. Generell ist darauf zu achten, dass keine zu scharfen Kanten in der Geometrie auftauchen.



- Das Einbringen von Druckspannungen über die Zerspannungen ist zu bevorzugen. Zugspannungen oder tiefe Defektzonen können Rissbildung in der Eloxierung induzieren.
- Generell überwiegen allerdings die Elementeinflüsse aus dem Grundmaterial gegenüber der Einwirkung durch Zerspanungsparameter.
- Wichtig ist nach jeder Umformung eine Homogensierungsglühung durchzuführen. Bei machen Schichten kann es sonst zu einer ungleichmäßigen Farbgebung kommen.
- Außerdem ist Gegebenheiten wie Walz- und Extrusionsrichtung immer mitzubedenken. Hier können sich ebenfalls starke Inhomogenitäten in der Farbgebung und Korrosionsbeständigkeit ergeben.

Die Zusammenhänge zwischen dem Recycling und der Eloxierung ergeben sich naturgemäß vor allem über Elementvariationen bzw. Verunreinigungen:

- Oxidische, nitridische oder andere keramische Einschlüsse müssen aus der Schmelze entfernt werden (z. B. mittels Filterbehandlung).
- Eisen und Silizium können sich sehr schädlich auf Eloxierungen auswirken. Ihr Aufkommen in Recyclinglegierungen sollte daher streng kontrolliert werden und gegebenenfalls für Eloxierprodukte limitiert sein.
- Generell überlagern aber die Effekte, ausgelöst durch Hauptlegierungselemente, jene von Recyclingverunreinigungen.
- Zu beachten bleibt, dass schon geringe Elementvariationen zu Verfärbungen oder Veränderungen der Korrosionsbeständigkeit der Eloxierung führen können. Hier ist es sehr wichtig, einzelne Produkte vor der Serienfertigung ausreichend auf ihre Funktionalität hin zu prüfen und gegebenenfalls den Endnutzer entsprechend aufzuklären.
- Legierungsspezifische Auswirkungen können über eine Variation der Stromstärke und damit der Geschwindigkeit des Schichtwachstums variiert werden, hier ist allerdings auf eine gesenkte Schichthärte bei niedrigeren Spannungen zu achten.
- Generell sind Knetlegierungen mit Recycleanteil leichter handzuhaben als Gusswerkstoffe.
- Bei der Verfärbung von Schichten ist entscheidend, ob Elemente in Lösung oder als Ausscheidungen vorliegen. Hier ist eine sehr kontrollierte Wärmebehandlung entscheidend.

## 10 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgte eine umfangreiche Literatur- und Patentrecherche zu den drei Verfahrensschritten Recycling, Zerspanung und Eloxieren von Aluminium. Dabei zeigten sich wichtige Anhaltspunkte hinsichtlich entscheidender Wechselwirkungen. Im ersten Teil der praktischen Versuche kamen drei unterschiedliche Zerspanungsprozesse zum Einsatz. Dabei wurden für jedes Verfahren (Fräsen, Drehen, Bohren) individuelle Parametervariationen, angelehnt an die Daten aus der Literatur, ausgewählt und entsprechende Versuchspläne mittels des Softwarepakets Modde 7 erstellt. Beim Fräsen galt das Hauptaugenmerk der Veränderung von Oberflächengüte und Spanklasse aufgrund von Variation der Fräsgeschwindigkeit, des Vorschubes und Fettgehaltes der Schmiermittelemulsion. Zudem kamen zwei verschiedene Schneidmaterialien (Hartmetall und polykristalliner Diamant) zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigten eindeutige Korrelationen zwischen den Schnittparametern und der Oberflächenrauigkeit, wobei die Resultate bei hochfesten Legierungsklassen (2000- und 7000-Aluminium) die konstantesten Verläufe aufwiesen. Darüber hinaus ergab sich eine eindeutige Korrelation zwischen der Anzahl unterschiedlicher Spanformklassen im jeweiligen Verfahrensschritt und der generierten Oberflächengüte. Vergleiche bei den einzelnen Schmiermittelkonzentrationen erwiesen sich für die Hartmetallschneiden als ausschlaggebend, während bei den Versuchen mit Diamantschneiden keine verbesserten Ergebnisse mit fetterer Schmierung erzielt werden konnten. Bei den Drehversuchen lagen andere Eingangparameter im Vordergrund. Dabei erfolgten die Variation der Spanwinkel im positiven und negativen Bereich (von 0-27 °) und der prinzipielle Gebrauch von Schmiermittel. Dabei ergaben sich bei der Trockenzerspanung tendenziell kürzere Späne. Vor allem die bei einigen Winkeln entstehenden Endlosspäne, welche sich bevorzugt um das Schneidwerkzeug wickeln, schädigten die Oberfläche der Werkstücke. Generell zeigte sich kein sehr großer Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit durch den modifizierten Spanwinkel. Erst nach Analyse der Eloxierergebnisse offenbarte sich eine Korrelation, da die eingesetzte 2007-Legierung aufgrund ihres inhomogenen Gefüges zu horizontalen Rissstrukturen neigt. Lediglich bei hohen negativen Winkeln konnten keine derartigen Defekte festgestellt werden, was auf einen Zusammenhang mit den eingebrachten Eigenspannungen hindeutet. Bei den Bohrversuchen kam es zur Variation von Bohrerbeschichtung, Drehzahl, Vorschub und Schmiermitteleinsatz, wobei sich wieder eindeutige Korrelationen ergaben. Vor allem die Unterschiede zwischen den un- und beschichteten Werkzeugen vielen sehr deutlich aus. Die Bildung von Aufbauschneiden konnte bei der Trockenzerspanung aber trotz Einsatz von hochtechnologischen Bohrerbeschichtungen nicht vermieden werden. Die Analyse der Bohrlochinnenfläche zeigt zwei unterschiedliche Defektarten. Die sogenannten Ratterspuren waren ein Problem des

unbeschichteten Bohrers bei hohen Drehzahlen. Das Verschmieren des Materials trat erwartungsgemäß bei der Trockenzerspanung auf. Die Auswertung der Zerspanungsversuche hinsichtlich der Korrelation zwischen mechanischer Vorbehandlung und Eloxierung zeigte einen geringen Einfluss über die spanabtragende Formgebung. Lediglich die eingebrachten Eigenspannungen und die Oberflächenrauigkeit können das Schichtwachstum beeinflussen. In beiden Fällen kam es zu diesen Effekten, aber nur unter verschärften Bedingungen. Wichtig ist zudem, dass Hartmetallschneiden Rückstände auf der Oberfläche hinterlassen können, welche die Eloxierung empfindlich stören.

Die Ergebnisse der der Anodisierungsversuche zeigen eine starke Abhängigkeit der Eloxierung vom verwendeten Substrat. Entscheidend ist dabei die Art, Häufigkeit und der Aufbau von Defekten in der Oxidschicht, resultierend aus intermetallischen Phasen oder Ausscheidungen. Vor allem kupferhaltige Gefügebestandteile sorgen für ein periodisches Aufbrechen des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Außerdem hängt das Lösungsverhalten verschiedener Phasen stark von ihrer exakten Zusammensetzung und der aufgewendeten Stromdichte ab. Versuche haben gezeigt, dass sich bei ein und derselben Legierung vor und nach der Wärmebehandlung stark unterschiedliche Oxidstrukturen bilden können. Neben der chemischen Zusammensetzung der jeweiligen Substrate ist auch die entsprechende Vorbehandlung für das Eloxalergebnis von Bedeutung. Es zeigte sich beispielsweise, dass vor allem bei 1050-Legierungen mit sehr dicken Schichten eine vorgeschaltete Kugelstrahlung sinnvoll ist. 2007-Werkstoffe neigen hingegen zu horizontalen Rissstrukturen, welche ebenfalls mit der entsprechenden mechanischen Vorbehandlung reduziert werden können. 6068-Legierungen sind im Vergleich sehr einfach zu eloxieren, allerdings setzt ab einer gewissen Schichtdicke eine starke Graufärbung des Oxides ein. Materialien der 7075-Gruppe sind anfällig gegenüber starker lokaler Ätzwirkung, aber auch schlechter Schichthaftung bei unzureichender Beizbehandlung. Zusammenfassend wurde dargestellt, dass in allen Versuchen eine starke Dominanz der Hauptlegierungselemente auf die Eloxierbarkeit vorliegt. Verunreinigungen aus dem Recyclingprozess zeigen häufig nur eine untergeordnete Rolle und können oftmals durch geeignete Schmelzbehandlung reduziert werden.

## 11 Ausblick

In Zukunft wird es ohne Zweifel zu immer mehr Legierungen mit höheren Recycleanteil kommen. Dabei ist darauf zu achten, dass sich so wenig „Downcycling“ wie möglich ergibt. Vor allem eine zusätzliche Verunreinigung durch Gusswerkstoffen oder anhaftende Eisenschrotte ist aus Sicht des Eloxierers als negativ zu bewerten, da Si und Fe für die schwerwiegendsten Inhomogenitäten in Oxidschichten führen. Andere Begleitelemente sollten ebenfalls kontrolliert werden, fallen aber in ihrer Auswirkung auf die Eloxierung meist unter jene der Hauptlegierungselemente (z. B. Cu, Zn und Mn). Für alle zukünftigen Untersuchungen ist wichtig, neben der metallographischen Analyse der Schichten auf Härtemessungen durchführen zu können. Dabei ist aufgrund der geringen Ausmaße auf die sogenannte Nanoindentierung oder zumindest auf eine Mikrohärteprüfung zurückzugreifen. Interessant ist zudem die Korrelation zwischen Stromdichte und Verschleißbeständigkeit. Um dies genauer zu analysieren, können Kalottenschliffe Anwendung finden. Zur Erweiterung des Grundlagenwissens bezüglich des Verhaltens von intermetallischen Phasen während der Anodisation ist die Anwendung von TEM-Untersuchungen zu empfehlen. Ergänzend können Methoden, wie GDOES oder anderen sensiblen Messprinzipien, noch genauere Auskünfte über die elementspezifische Zusammensetzung der Schichten liefern. Eine Bestimmung der Eigenspannungsprofile in den Oxiden kann zudem die Zusammenhänge zwischen Zerspannung und Eloxierung noch deutlicher beleuchten.

## 12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Prinzipielle Darstellung der Zusammenhänge zwischen den drei in dieser Dissertation betrachteten Prozessschritten Recycling, Zerspanung und Eloxierung .....	2
Abbildung 2-1:	Prinzipiskizze der unterschiedlichen Routen in der Sekundäraluminiumproduktion [13].....	4
Abbildung 2-2:	Darstellung des berechneten maximalen Schrotteinsatzes für die jeweilige Ziellegierung [16].....	6
Abbildung 3-1:	Bildung eines Spans (rechts), Prinzipiskizze (links) Realaufnahme [29] ..	12
Abbildung 3-2:	Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauigkeit und der Schnittgeschwindigkeit[32].....	13
Abbildung 3-3:	Oberflächenrauigkeit und Schnittgeschwindigkeit bei der Zerspanung einer AW2014-Legierung mit Diamantwerkzeug [33].....	14
Abbildung 3-4:	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der unterschiedlichen Schneidoberflächen nach der Zerspanung mit verschiedenen Schneidgeschwindigkeiten [37].....	14
Abbildung 3-5:	Scheinspan an einer Werkzeugfreikante nach der Zerspanung von Aluminium mit sehr hohen Geschwindigkeiten [30] .....	15
Abbildung 3-6:	Schematische Darstellung der Vorgänge bei der Entstehung der Schnittflächenrauheit. Beschreibung: (1) Span (2) Stauzone (3) Schneide (4) entstehende Schnittfläche; (a) Bildung der Stauzone (b) Trennvorgang (c) Abwandern von Teilen der Stauzone bei geringer Schnittgeschwindigkeit (d) Glätten der Schnittfläche durch die Schneide [30] .....	17
Abbildung 3-7:	Korrelation zwischen Oberflächenqualität und Schnittgeschwindigkeit (I) Bereich der Aufbauschneidenbildung (II) Abnahme der Rauigkeit durch erhöhte Temperaturen in der Schnittzone (III) externe Einflüsse wie Rattern und Instabilitäten (IV) Scheinspannbildung [30].....	18
Abbildung 3-8:	Prinzipielle Darstellung der unterschiedlichen Verschleißerscheinungen bei der Zerspanung von Aluminium [30].....	18
Abbildung 3-9:	Prinzipieller Zusammenhang zwischen Schnitttemperatur und Verschleißarten [27] .....	19
Abbildung 3-10:	Oberflächen in Bohrlöchern mit unterschiedlichen Helixwinkeln (a) - 10 ° und (b) + 10 ° [92] .....	21
Abbildung 3-11:	Rasterelektronenmikroskopaufnahme zweier Schneiden nach dem Bohren von 500 Löchern; (links) Diamantbeschichtung; (rechts) DLC-Beschichtung [40] .....	24
Abbildung 4-1:	Schematischer Aufbau einer elektrolytisch hergestellten Oxidschicht [49].....	26
Abbildung 4-2:	Prinzipieller Verlauf der Stromdichte während einer anodischen Oxidation in Schwefelsäure mit den entsprechenden Bereichen des Porenwachstums [50].....	27
Abbildung 4-3:	Darstellung des Stromdichte-Spannungsverlaufes mit oder ohne Rührung des Elektrolyten für vier unterschiedliche Aluminiumlegierungen (a) Hochreines Aluminium (b) 6063 (c) 3103 (d) 2014A [48] .....	30
Abbildung 4-4:	Darstellung des Zusammenhangs zwischen Oxidgewicht, gelöstem Material und Anodisierzeit bei (a) unterschiedlichen Elektrolyttemperaturen (b) unterschiedlichen Säurekonzentrationen [48] .....	31
Abbildung 4-5:	Auswirkung von Elektrolyttemperatur auf die Mikrohärtigkeit und Verschleißbeständigkeit von Eloxierschichten [54] .....	31

Abbildung 4-6:	Darstellung der Auswirkung von Elektrolyttemperatur auf die Porosität und den Porendurchmesser von Eloxierschichten [54].....	32
Abbildung 4-7:	Darstellung der Beständigkeit von Aluminiumoxid in verschiedenen Medien mit unterschiedlichen pH-Werten [6] .....	32
Abbildung 4-8:	Darstellung der Oxidabtragrate von NaOH in Abhängigkeit von der Elektrolyttemperatur [6] .....	33
Abbildung 4-9:	Darstellung unterschiedlicher Abtragraten in 1,5 molarer NaOH-Lösung mit anschließendem Dekatpieren in 50 %iger HNO <sub>3</sub> -Lösung für unterschiedliche Legierungen und bei (a) 40 °C bzw. (b) 80 °C [57].....	33
Abbildung 4-10:	Rasterelektronenmikroskopaufnahme verschiedener Legierungen nach dem einminütigem Ätzen mit NaOH bei 80 °C und anschließendem Dekapieren in HNO <sub>3</sub> : (a) 1050, (b) 3103-1 mit hohem Cu-Gehalt, (c) 3103-2, (d) 3103 mit niedrigem Si-Gehalt, (e) 3103-4 mit niedrigem Si-Gehalt und hohem Cu-Gehalt [57].....	34
Abbildung 4-11:	Variation der Anreicherung der Legierungselemente mit der Freien Gibbs-Energie für die Bildung der Legierungselementoxide bei der Anodisierung mit 5 A/dm <sup>2</sup> in 0,01 M Ammoniumpentaborat bei 20 °C. Die entsprechenden Oxide sind: Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CeO <sub>2</sub> , Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO, MoO <sub>3</sub> , Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , TiO <sub>2</sub> , WO <sub>3</sub> , ZnO und ZrO <sub>2</sub> [64] .....	35
Abbildung 4-12:	Vergleich zweier Eloxierschichten, wobei Legierungen mit unterschiedliche hohen Gehalten an Fe als Substrat dienen (a) 0.05 Gew.-% Si, 0.04 Gew.-% Mn und 0.18 Gew.-% Fe (b) 0.27 Gew.-% Si, 0.25 Gew.-% Mn und 0.25 Gew.-% Fe [12] .....	37
Abbildung 4-13:	Lichtmikroskopische Aufnahmen von Querschliffen unterschiedlicher Oxidschichten auf AlSi10, 6,0 A/dm <sup>2</sup> (2,25 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0 °C, 50 min.) nach unterschiedlichen Eloxierzeiten von (a) 16 min., (b) 28 min. und (c) 50 min. [61] .....	37
Abbildung 4-14:	Transmissionselektronenmikroskopaufnahmen der anodisch erzeugten Schicht auf AlSi10 nach dem Anodisieren bei 4,2 Adm <sup>-2</sup> in 2,25 M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> für 25 min (rechts) und 50 min (links), bei 0 °C; [61].....	38
Abbildung 4-15:	Querschliff der Eloxierschichten auf (a) einer AlSi7Mg-Legierung, hergestellt mittels Kokillenguss (b) einer AlSi7Mg-Legierung, hergestellt mittels Sandguss (c) einer AlSi1Mg-Legierung, hergestellt mittels Extrusion und (d) einer AlSi9Cu3-Legierung aus dem Druckgussverfahren [53] .....	39
Abbildung 4-16:	REM-Aufnahme einer hochporöse Oxidstruktur über einer Al-Fe-Mn-Cu-Phase [76] .....	40
Abbildung 4-17:	Eigenspannungsverläufe in anodisch erzeugten Oxidschichten bei unterschiedlichen Badspannungen und 5 mA/cm <sup>2</sup> Stromdichte in Abhängigkeit von der Tiefe [51] .....	41
Abbildung 4-18:	Übersicht bezüglich des gesamten Eloxierprozesses aus der industriellen Praxis [6] .....	42
Abbildung 4-19:	Aluminiumproben nach dem Beizen in Natronlauge; (links) kupferhaltiger und (rechts) siliziumhaltiger Rückstand auf der Materialoberfläche.....	43
Abbildung 4-20:	Kupferhaltige Aluminiumprobe nach dem Beizen; (links) beim Eintauchen in die Salpeterlösung; (rechts) nach 30 Sek. in der Salpeterlösung .....	43
Abbildung 5-1:	Technische Zeichnung der Laboreloxieranlage am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie .....	47
Abbildung 5-2:	Anodisiereinheit als technische Zeichnung (links) und im realen Betrieb als Draufsicht (rechts).....	48
Abbildung 6-1:	Foto der Zerspanungsanlage [83] .....	50
Abbildung 6-2:	XDHT 1904 Wendeschneidplatte: r = 0,4 mm, l = 19,0 mm, s = 4,76 mm, d <sub>1</sub> = 4,65 mm, d = 9,52 mm .....	50

Abbildung 6-3:	PDC-S-Fräsplatte von „Beckerdiamant“: $d = 9,52$ mm, $d' = 4,40$ mm, $s = 3,97$ mm, $l = 9,70$ mm, $l' = 4,29$ , $r = 0,4$ mm.....	51
Abbildung 6-4:	CNC-Entwurf des Werkstücks mit Angabe zum Werkzeuganstellwinkel und der maximalen Rautiefe $R_a$ .....	51
Abbildung 6-5:	a) Außen- und b) Innenseite eines kurzen Spiralwendelspans nach Bearbeitung mit Diamantwendeschneidplatten .....	53
Abbildung 6-6:	Span aus der 7075-Legierung nach der Diamantzerspannung ( $D = 7000$ , $f = 3000$ ) .....	53
Abbildung 6-7:	Sonderspan der Legierung 5083 mit sehr ebene Oberfläche.....	53
Abbildung 6-8:	Sonderspan der Legierung 7075 nach Verwendung von Hartmetallschneiden .....	54
Abbildung 6-9:	Span der Legierung A, hergestellt unter hoher Schmiermittelzufuhr mittels Diamantwendeschneidplatten.....	54
Abbildung 6-10:	Detailansicht zu Abbildung 6-9.....	55
Abbildung 6-11:	Rückseite eines mit Hartmetallschneiden hergestellten Spans auf einer AW2007-Legierung .....	55
Abbildung 6-12:	Innenseite eines mit Hartmetallwendeschneidplatten erzeugten Spans einer AW2007-Aluminiumlegierung .....	56
Abbildung 6-13:	Dreidimensionale Falschfarbendarstellung einer gefrästen Oberfläche... 56	56
Abbildung 6-14:	Darstellung eines Fräsprofils mit größerer Defektstelle (Falschfarbendarstellung) .....	57
Abbildung 6-15:	Darstellung der Defektzone aus Abbildung 6-14; (a) mittels Falschfarben; (b) in entsprechender Vergrößerung .....	57
Abbildung 6-16:	Die für die Versuche herangezogenen Bohrer aus Schnellarbeitsstahl; unbeschichtet (silber); Beschichtung mit „alcrona top“ aus AlCrN (scharz); beschichtet mit Titanitrid (gold) .....	58
Abbildung 6-17:	Bohren mit TiN-beschichtetem Werkzeug unter Vollschröierung .....	59
Abbildung 6-18:	Vergleich der bei unterschiedlichen Versuchen angefallenen Späne (a) TiN-Werkzeug, 25 m/h Vorschub, 1000 Umdrehungen/min., ohne Schmiermittel (b) unbeschichtetes Werkzeug, 25 m/h Vorschub, 500 Umdrehungen/min., mit Bohrlochflutung und (c) TiN-Werkzeug, 25 m/h Vorschub, 500 Umdrehungen/min., mit Bohrlochflutung.....	59
Abbildung 6-19:	Darstellung der für die Versuche herangezogenen Hartmetallschneide und den entsprechenden Rundproben.....	60
Abbildung 6-20:	Drehspäne nach der Zerspanung von 2007-Aluminium mit Drehwinkeln von (a) $+27^\circ$ und (b) $-27^\circ$ .....	61
Abbildung 7-1:	Übersichtsdarstellung der einzelnen Verfahrensschritte in den Eloxierversuchsreihen.....	62
Abbildung 7-2:	Einfacher Versuch zur Bestimmung des Massenverlustes bei der Beizung in verschiedenen sauren und basischen Medien (a) und die entstehende Oberfläche nach dem Beizen in Natronlauge für eine 7075-Legierung (b).....	63
Abbildung 7-3:	Abtragkurven beim sauren Beizen in Salpetersäure von 7075-Legierungen bei unterschiedlichen Salpetersäurekonzentrationen (a) 20 Gew.-% (b) 40 Gew.-% (c) 60 Gew.-% .....	63
Abbildung 7-4:	Abtragkurve beim basischen Beizen einer 2024-Legierung in Natronlauge als Funktion der Temperatur und verschiedener NaOH-Konzentrationen .....	64
Abbildung 7-5:	Darstellung einer frisch in Natronlauge gebeizten Oberfläche (a) vor und (b) nach dem Dekapieren in Salpetersäure.....	64
Abbildung 7-6:	Eloxierschicht auf Legierung 1 (Festplattenrecycling), homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Natronlauge, dekapiert in Salpetersäure und mit $18$ A/dm <sup>2</sup> anodisiert; .....	67
Abbildung 7-7:	Querschliff einer Eloxierschicht (a) auf sauer gebeiztem ( $\text{HNO}_3$ und NaF) und geschliffenem Recyclingaluminium (Legierung 1,	

	Festplattenschrott) bei einer aufgewendeten Stromdichte von 18 A/dm <sup>2</sup> (b) Detailansicht.....	68
Abbildung 7-8:	Elementverteilung einer Eloxierschicht auf sauer gebeiztem (HNO <sub>3</sub> und NaF), warmausgelagertem und poliertem Recyclingaluminium (Legierung 1, Festplattenschrott) bei einer aufgewendeten Stromdichte von 18 A/dm <sup>2</sup> .....	68
Abbildung 7-9:	Querschliff einer Eloxierschicht auf herkömmlich gebeiztem (NaOH und HNO <sub>3</sub> ), warmausgelagertem und geschliffenem Recyclingaluminium (Legierung 1, Festplattenschrott) bei einer aufgewendeten Stromdichte von 9 A/dm <sup>2</sup> .....	69
Abbildung 7-10:	Eloxierschicht auf Legierung 2 (Spanrecycling); homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Natronlauge, dekapiert in Salpetersäure und mit 18 A/dm <sup>2</sup> anodisiert; (a) Draufsicht (b) Querschliff;.....	69
Abbildung 7-11:	Eloxierschicht auf Legierung 2 (Spanrecycling); homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Salpetersäure bei Raumtemperatur und mit 18 A/dm <sup>2</sup> anodisiert; (a) Übersichtsaufnahme; (b) Detailansicht.....	70
Abbildung 7-12:	Linescan über die Oxidschicht auf Legierung 2 (Spanrecycling), homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Salpetersäure bei Raumtemperatur und mit 18 A/dm <sup>2</sup> anodisiert;.....	70
Abbildung 7-13:	Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Abplatzungen auf der sauer vorbehandelten und unter 18 A/dm <sup>2</sup> anodisierten Spanschrottlegerung; (a) Übersichtsaufnahme und (b) Detaildarstellung.....	71
Abbildung 7-14:	Rasterelektronenmikroskopaufnahmen der Abplatzungen auf der sauer vorbehandelten und unter 18 A/dm <sup>2</sup> anodisierten Spanschrottlegerung, aufgenommen mit unterschiedlichen Beschleunigungsspannungen bei (a) 20 eV und (b) 13 eV.....	71
Abbildung 7-15:	Schnittkanten der Probe aus Spanschrotten mit gut haftender Eloxierschicht (nach basischer Beizen in NaOH und Dekapierung in HNO <sub>3</sub> ) mit gut sichtbaren Ätzgrübchen.....	72
Abbildung 7-16:	Topographische Aufnahme der Oberfläche der basisch vorbehandelten Spanschrottprobe mit deutlichen Ätzgrübchen.....	72
Abbildung 7-17:	Eloxierschicht auf Legierung 3 (Dosenschrotte); homogenisierungsgeglüht, gebeizt in Salpetersäure und Natriumfluorid bei 40 °C, anodisiert mit 18 A/dm <sup>2</sup> ; (a) Draufsicht und (b) Querschliff;.....	73
Abbildung 7-18:	Eloxierschicht auf Legierung 3 (Dosenschrotte); warmausgelagert, gebeizt in Natronlauge und dekapiert in Salpetersäure, anodisiert bei 9 A/dm <sup>2</sup> ; (a) Übersicht- und (b) Detailaufnahme;.....	73
Abbildung 7-19:	Eloxierschicht auf Legierung 3 (Dosenschrotte); warmausgelagert, gebeizt in Natronlauge und dekapiert in Salpetersäure, anodisiert bei 9 A/dm <sup>2</sup> ; (a) REM-Aufnahme und (b) entsprechenden chemischen Analysen per EDX in Gew.-% angeführt.....	74
Abbildung 7-20:	Elementverteilung zu Abbildung 7-17 (b).....	74
Abbildung 7-21:	Querschliff einer nahezu defektfreien, 80 µm dicken Eloxierschicht auf 1050-Aluminium.....	75
Abbildung 7-22:	Rissstruktur nach dem Sealing (30 min) von ca. 60 µm dicken Eloxalschichten auf 1050-Aluminium.....	76
Abbildung 7-23:	Verschiedene Rissstrukturen abhängig von der Behandlungsdauer, der Stromstärke und der Nachbehandlung (a) 5 A/dm <sup>2</sup> , 60 min., 58 µm – ohne mechanische Vorbehandlung, 30 min. Sealing (b) 10 A/dm <sup>2</sup> , 50 min., 51 µm – ohne mechanische Vorbehandlung, 30 min. Sealing (c) 10 A/dm <sup>2</sup> , 50 min., 52 µm – einfache Biegung im Mittelfeld ohne thermische Behandlung, 30 min. Sealing (d) 10 A/dm <sup>2</sup> , 60 min., 59 µm – einfache Biegung mit Mittelfeld – ohne Sealing;.....	76



Abbildung 7-24:	Rissfreie Probe nach dem Sealing bei einer Schichtdicke von 65 $\mu\text{m}$ Schichtdicke, ermöglicht durch vorgeschaltetes Kugelstrahlen .....	77
Abbildung 7-25:	Abhängigkeit der Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ] von der aufgewendeten Stromstärke in $\text{A}/\text{dm}^2$ und der Eloxierzeit angeführt in Minuten .....	77
Abbildung 7-26:	Fehlerhafte Eloxierschichten (a) 20 $\text{A}/\text{dm}^2$ , 10 min. Behandlungszeit, doppelte Bestückung (b) 20 $\text{A}/\text{dm}^2$ , 20 min. Behandlungszeit, einfache Bestückung .....	78
Abbildung 7-27:	Querschliff zu Abbildung 7-26 (a) – Zone 1; mit Übersichtsaufnahme und Detailansicht.....	78
Abbildung 7-28:	Querschliff zu Abbildung 7-26 (a); Zone 2 und Zone 3 .....	79
Abbildung 7-29:	Querschliff zu Abbildung 7-26 (rechts) Zone 2.....	79
Abbildung 7-30:	Unterschiedliche Farbgebung auf Legierungen der 2000-Serie (a) ZL8, Legierung mit niedrigem Kupferanteil, eloxiert mit 10 $\text{A}/\text{dm}^2$ , basische Ätzung mit NaOH und Dekapierung $\text{HNO}_3$ , herkömmliches Sealing (b) ZL6, Legierung mit sehr hohem Bleigehalt, eloxiert bei 10 $\text{A}/\text{dm}^2$ , basische Ätzung mit NaOH und dekapiert mit $\text{HNO}_3$ , herkömmliches Sealing (c) AW 2017 T451, eloxiert mit 12 $\text{A}/\text{dm}^2$ , basische Ätzung mit NaOH und dekapiert in $\text{HNO}_3$ , herkömmliches Sealing .....	82
Abbildung 7-31:	Unterschiedliche Farbgebung der Eloxierschichten auf AW 2007 kommerziell (a) gesägte Oberfläche; Beizen in NaOH für 2 min. auf 50 °C; Dekapieren in $\text{HNO}_3$ für 1 min. bei RT, 35 min. Eloxieren mit 3 $\text{A}/\text{dm}^2$ , Sealing für 30 min. (b) gedrehte Oberfläche; Beizen in NaOH für 2 min.; Dekapieren in $\text{HNO}_3$ für 1 min. bei RT, 35 min. Eloxieren mit 5 $\text{A}/\text{dm}^2$ , Sealing für 30 min. (c) gedrehte Oberfläche; Beizen in NaOH für 2 min.; Dekapieren in $\text{HNO}_3$ für 1 min. bei RT, 10 min. Eloxieren mit 2,4 $\text{A}/\text{dm}^2$ , Sealing für 30 min.....	82
Abbildung 7-32:	Lokale Aufschmelzungen in der Kontaktzone durch zu hohe Spannungen und Stromstärken (60 V, 32 A) und damit einhergehender Lichtbogenbildung während dem Eloxieren .....	83
Abbildung 7-33:	Eloxierschicht der Probe R1 mit basischer Vorbehandlung und einer Anodisierung unter 10 $\text{A}/\text{dm}^2$ ; (a) Positionierung der EDX-Spektren mit chemischer Analyse unter Tabelle 7-13; (b) Beschreibung der intermetallischen Phasen und Markierung des Schichtdefektes;.....	83
Abbildung 7-34:	Eloxierschicht der Probe R1 mit basische Vorbehandlung und einer Anodisierung unter 10 $\text{A}/\text{dm}^2$ ; (a) Positionierung der EDX-Spektren mit chemischer Analyse unter Tabelle 7-13; (b) Beschreibung der intermetallischen Phasen und Markierung des Schichtdefektes;.....	84
Abbildung 7-35:	Elementverteilung der Probe R5 nach dem Eloxieren mit 5 $\text{A}/\text{dm}^2$ .....	85
Abbildung 7-36:	Eloxierschicht auf Probe T3 mit EDX-Linescan (Detailansicht unter Abbildung 7-37).....	85
Abbildung 7-37:	Detaillierter Linescan zu der Aufnahme unter Abbildung 7-36;.....	86
Abbildung 7-38:	Elementanalysen des Querschliffes der Legierung ZL5 nach dem Eloxieren .....	87
Abbildung 7-39:	Rissstruktur (grafisch nachbearbeitet) entstanden während dem Sealing einer 5050-Legierung mit der Deklaration „Eloxalqualität“, saure Vorbehandlung mittels $\text{HNO}_3$ und anodisiert unter 5 $\text{A}/\text{dm}^2$ für 45 Minuten, 40 $\mu\text{m}$ Schichtdicke .....	88
Abbildung 7-40:	Eloxierschicht auf 5754-Aluminium; basische Vorbehandlung mit NaOH für 20 Minuten, anodisiert unter 10 $\text{A}/\text{dm}^2$ für 30 Minuten.....	88
Abbildung 7-41:	Eloxierschicht auf 5083-Aluminium .....	89
Abbildung 7-42:	Linescan zu Abbildung 7-41 .....	89
Abbildung 7-43:	Defektzone in einer Eloxierschicht auf 5083-Aluminium .....	90
Abbildung 7-44:	Rissstrukturen in der Eloxierschicht einer 5754-Legierung (a) Detailvergrößerung über einer Fe-Mn-Phase (b) Übersichtsaufnahme .....	90

Abbildung 7-45:	6000-Legierung mit 80 µm dicker Eloxierschicht bereitgestellt bei Stromdichten von 5 A/dm <sup>2</sup> .....	91
Abbildung 7-46:	Abhängigkeit der Schichtdicke auf 6082-Aluminium von Stromdichte und Eloxierzeit.....	91
Abbildung 7-47:	Defektzone in einer Eloxierschicht auf einem 6082-Aluminiumsubstrat nach basischer Vorbehandlung in NaOH und Eloxieren unter 10 A/dm <sup>2</sup> für 25 min. (a) Aufnahme mit markiertem Spektrum (siehe Tabelle 7-17) (b) Fe-Mn-Si-Phase in der Grundmatrix und Hohlräume im Oxid .....	92
Abbildung 7-48:	Querschliff einer Eloxierschicht auf einer 6082-Legierung (Anbieter Nr. 1), basische Vorbehandlung, Eloxieren mit 10 A/dm <sup>2</sup> für 30 min. bei 12 °C; (a) Position 1 (b) Position 2 .....	92
Abbildung 7-49:	Defekte rund um eine hochsiliziumhaltige Phase in einer Grundmatrix aus 6082-Aluminium und der entsprechenden Eloxierschicht (a) Kennzeichnung der Spektren in Tabelle 7-18 (b) Detailansicht.....	93
Abbildung 7-50:	Defektverursachende Phasen in einer Eloxierschicht auf 6082-Aluminium (Anbieter 2) nach einer basischen Vorbehandlung und dem Anodisieren bei 7 A/dm <sup>2</sup> .....	93
Abbildung 8-1:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit (in µm) des 2017-Werkstoffs bei Bearbeitung mit Diamantschneidplatten bei verschiedenen Vorschüben (in mm/min) und Drehzahlen (in 1/min).....	93
Abbildung 8-2:	„Summary Plot“ zum Rauigkeitsmodell unter Abbildung 8-1.....	95
Abbildung 8-3:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit (in µm) des 2017-Werkstoffs bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden bei verschiedene Vorschüben (in mm/min) und Drehzahlen (in 1/min).....	95
Abbildung 8-4:	Modellqualität zum Rauigkeitsmodell unter Abbildung 8-3.....	96
Abbildung 8-5:	Eloxalschichten auf unterschiedlich zerspannten Legierungen (a) 5754-Aluminium, gefräst mit einer Drehzahl von 7.000 1/min und einem Vorschub von 1.000 mm/min unter 50%iger Emulsion (b) 5754-Aluminium gefräst mit einer Drehzahl von 7.000 1/min und einem Vorschub von 700 mm/min unter 80%iger Emulsion (c) 6082-Aluminium gefräst mit einer Drehzahl von 10.000 1/min und einem Vorschub von 1.000 mm/min unter 50%iger Emulsion (d) 6082-Aluminium gefräst mit einer Drehzahl von von 7.000 1/min und einem Vorschub von 700 mm/min unter 80%iger Emulsion.....	98
Abbildung 8-6:	Verschiedene Eloxierschichten auf Grundsubstraten, welche mit Hartmetallschneidplatten zerspannt wurden - alle Proben weisen spezifische Rückstände aus Hartmetallbestandteilen auf.....	99
Abbildung 8-7:	Vergleich ausgewählter Eloxalschichten auf unterschiedlich zerspannten 2007-Aluminium, mit horizontalen Rissstrukturen korrelierend mit dem aufgewendeten Spanwinkeln .....	101
Abbildung 8-8:	Vergleich zweier Eloxierschichten auf (a) einer gefrästen Oberfläche gefertigt mittels basischer Vorbehandlung und Anodisierung unter 5 A/dm <sup>2</sup> und (b) einer gedrehten Oberfläche gefertigt mittels basischer Vorbehandlung und Anodisierung unter 2 A/dm <sup>2</sup> .....	102
Abbildung 8-9:	Schematische Darstellung der Kantenproblematik beim Eloxieren [87] .....	102
Abbildung 8-10:	Unterschiedliche Bohrlochoberflächen (a) mit guter Oberflächenqualität (b) mit Ratterspuren (c) mit Materialverschmierungen .....	103
Abbildung 8-11:	Werkzeugspitzen mit Aufbauschneien (a) polierte Hartmetallschneide (b) TiNi-beschichtete Schneide (c) AlCrN-beschichtete Schneide .....	103
Abbildung 8-12:	Unterschiedlich spanabtragend gefertigte Oberflächen eines eloxierten Bauteils.....	105

Abbildung 8-13:	TEM-Aufnahme der Porenauslöschung in einer Eloxierschicht auf gekrümmten Substrat [88].....	105
Abbildung 8-14:	Modellvorstellung des unterschiedlichen Oxidwachstums auf konvexen (a) und konkaven (c) Oberflächen mit einer elektrischen Feldstärke (E), einer elektrischen Feldstärke an der Oberfläche ( $E_0$ ), einem Radius (r), einem Radius an der Oberfläche ( $r_0$ ), einer Porenlänge (L) und einer Porenlänge auf einer planaren Oberfläche ( $L_0$ ) unter (b) [89] .....	106
Abbildung 8-15:	Ausschnitt der Eloxieschicht aus Abbildung 8-11 b .....	106
Abbildung 8-16:	Analyse einer mit Natronlauge gebeizten 7075-Legierung (a) REM-Aufnahme und (b) Elementspektrum laut EDX-Analyse in Gew.-% [90] .....	107
Abbildung 8-17:	Ätzgrübchen auf einer frisch in NaOH-gebeizten Aluminiumoberfläche [90] .....	108
Abbildung 8-18:	Angriff der Aluminiummatrix rund um eine hochsiliziumhaltige Phasen nach der Beizung in $HNO_3$ [91] .....	108
Abbildung 8-19:	Ergebnisse der Kalottenschliffanalyse (a) Gegenüberstellung der einzelnen Verschleißkoeffizienten der verschiedenen gebeizten und ident eloxierten Legierungsoberflächen aus Elektronik- (ES), Span- (SS) und Dosen-schrotten (DS), (b) Kalottenschliff der Eloxierschicht auf einer Dosen-Recyclinglegierung und (c) Kalottenschliff einer Eloxierschicht auf einer Elektronik-Recyclinglegierung.....	109
Abbildung 8-20:	Querschliff einer Eloxierschicht auf Recyclingaluminium aus Festplattenschrotten mit Darstellung der Einflusszonen durch primärausgeschiedenes Silizium.....	109
Abbildung 8-21:	Siliziumnitridphase aus dem Recyclingprozess eingebettet in die Eloxierschicht .....	110
Abbildung 8-22:	Spannungsverlauf über die Eloxierzeit von drei unterschiedlichen Legierungen bei gleichbleibender Stromdichte von $5 A/dm^2$ (ES ... Festplattenschrotte, SS ... Spanschrotte, DS ... Dosen-schrotte).....	111
Abbildung 8-23:	Eloxierung einer binären Al-Si-Legierung mit 1,5 Gew.-% Silizium.....	111
Abbildung 8-24:	Si-Phase eingebettet in eine Eloxierschicht (a) Übersichtsaufnahme (b) Detailansicht .....	112
Abbildung 8-25:	Unterschiedliche Ausrichtung der Stringer zur Wachstumsrichtung der Eloxierschicht (a,b) parallel mit lokaler Rissbildung und (c,d) normal mit Hohlraumdefekten .....	113
Abbildung 8-26:	„Käferähnliche“ Phasen in einer Eloxierschicht auf 2007-Aluminium.....	113
Abbildung 8-27:	Schematische Darstellung der Abläufe zur Rissbildung in kupferhaltigen Eloxierschichten [104] .....	114
Abbildung 8-28:	Unterschiedliche Formen von kupferinduzierten Fehlstellen in Eloxierschichten mit (a) einer binären Al-Cu-Legierung als Substrat und (b) einer 2007-Legierung als Substrat.....	115
Abbildung 8-29:	Verschiedene Defektarten und beschränktes Vorkommen von Pb bis zu einer gewissen Höhe in der Eloxierschicht.....	115
Abbildung 8-30:	Sn-Partikel eingelagert in eine $Al_2O_3$ -Schicht gewachsen auf binären Al-Sn-Substrat.....	116
Abbildung 8-31:	Sn-Partikel eingebettet in poröser Oxidschicht; auf einer mit Sn-Spanbrechern versehen 2007-Legierung (ohne Umformschritt vor dem Eloxieren); .....	116
Abbildung 8-32:	Übersichtsaufnahme einer Eloxierschicht auf einem 1050-Substrat....	117
Abbildung 8-33:	Riss in einer Eloxierschicht auf 1050-Aluminium .....	117
Abbildung 8-34:	Eloxierschichten auf 1050-Aluminium mit feinen Rissstrukturen nach dem Sealing .....	118
Abbildung 8-35:	Al-Fe-Si-Phase eingebettet in einer Eloxierschicht auf 6000-Aluminium .....	119

Abbildung 14-1:	Rauhigkeitsmessung mit Linienprofil auf einer EV_B01_1-Probe (Bearbeitung durch eine Diamantschneide).....	XXVI
Abbildung 14-2:	Traglastkurve einer diamantgefrästen 5083-Legierung (D = 10.000 1/min, f = 3.000 mm/min) .....	XXVII
Abbildung 14-3:	Traglastkurve der 5083-Legierung nach der Zerspanung mit Hartmetallfräsen.....	XXVII
Abbildung 14-4:	Zerspanung einer 5083-Legierung mit Hartmetallfräsen bei einer Drehzahl von 10.000 Umdrehungen pro Minute und einem Vorschub von 2.000 mm pro Minute .....	XXVIII
Abbildung 14-5:	Zerspanung einer 5083-Legierung mit Hartmetallfräsen bei einer Drehzahl von 7.000 Umdrehungen pro Minute und einem Vorschub von 2.000 mm pro Minute .....	XXVIII
Abbildung 14-6:	Oberfläche einer 5083-Legierung nach der Zerspanung mit Hartmetallfräsköpfen .....	XXIX
Abbildung 14-7:	Detailansicht eines Oberflächendefektes nach der Hartmetallzerspannung von 5083-Aluminium .....	XXIX
Abbildung 14-8:	Lichtmikroskopische Aufnahme des ungeätzten Gefüges der 5754-Legierung vom Anbieter ALFUN .....	XLI
Abbildung 14-9:	Ungeätzte Gefügeaufnahme der 5083-Legierung vom Anbieter ALFUN .....	XLI
Abbildung 14-10:	Ungeätztes Gefüge der 7075-Legierung vom Anbieter ALFUN .....	XLII
Abbildung 14-11:	Ungeätztes Gefüge der 2017-Legierung vom Anbieter ALFUN .....	XLII
Abbildung 14-12:	Gefüge der 6082-Legierung vom Anbieter ALFUN .....	XLIII
Abbildung 14-13:	Gefüge der 6082-Legierung vom Anbieter Plancast Plus 5083 .....	XLIII
Abbildung 14-15:	Bohrspäne der Versuche 1-6 .....	XLIV
Abbildung 14-16:	Bohrspäne der Versuche 7-16 und 19-26 .....	XLV
Abbildung 14-17:	Drehspäne hergestellt mit unterschiedlichen Spanwinkeln und unter Trockenzerspannung oder Bohrlochflutung .....	XLVI
Abbildung 14-18:	MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 7075-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration) [90] .....	XLVII
Abbildung 14-19:	MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 7075-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration, mit Saccharose als Beizadditiv) [90].....	XLVII
Abbildung 14-20:	MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 2017-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration, mit Saccharose als Beizadditiv) [90].....	XLVIII
Abbildung 14-21:	MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 2017-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration) [90] .....	XLVIII
Abbildung 14-22:	MODDE®-Diagramme der Abtragsraten von 7075-Aluminium bei 20 und 40 Gew.-% Salpetersäure (links nach rechts) als Funktion der Zeit sowie Temperatur [91] .....	XLIX
Abbildung 14-23:	MODDE®-Diagramme der Abtragsraten von 2017-Aluminium bei 20 und 40 Gew.% Salpetersäure (links nach rechts) als Funktion der Zeit sowie Temperatur [91] .....	XLIX
Abbildung 14-24:	MODDE®-Diagramme der Abtragsraten von 6082-Aluminium (anderer Hersteller) bei 20 und 40 Gew.-% Salpetersäure (links nach rechts) als Funktion der Zeit sowie Temperatur [91] .....	XLIX
Abbildung 14-25:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5083-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden .....	L
Abbildung 14-26:	Modellqualität zu Abbildung 14-25 .....	L
Abbildung 14-27:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5083-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallfräsen.....	L

---

Abbildung 5-19:	Modellqualität zu Abbildung 14-27 .....	LI
Abbildung 14-29:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden .....	LI
Abbildung 14-30:	Darstellung der Modellqualität zu Abbildung 14-29.....	LI
Abbildung 14-31:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden .....	LII
Abbildung 5-23:	Darstellung der Modellqualität zu Abbildung 14-31.....	LII
Abbildung 14-33:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 6082-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden .....	LII
Abbildung 14-34:	Modellqualität zu Abbildung 14-33 .....	LIII
Abbildung 14-35:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 6082-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden .....	LIII
Abbildung 14-36:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 7075-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden .....	LIII
Abbildung 14-37:	Modellqualität zu Abbildung 14-36 .....	LIV
Abbildung 14-38:	Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 7075-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden .....	LIV
Abbildung 14-39:	Modellqualität zu Abbildung 14-38.....	LIV
Abbildung 15-1:	Teilansicht der Eloxieranlage während der Montage .....	LIX
Abbildung 15-2:	Technische Zeichnung der Anlagendraufsicht (bereitgestellt von ETIS-Europe) .....	LXI
Abbildung 15-3:	Technische Zeichnung der Abzugswand .....	LXII
Abbildung 15-4:	Schichtdicke in Relation zur Stromstärke und Einwirkzeit [6].....	LXV
Abbildung 15-6:	Vorderansicht des Potentiostaten .....	LXIX
Abbildung 15-7:	Innenbau des Harteloxalbeckens vor der Befüllung.....	LXX
Abbildung 15-8:	Anschluss der Absaugwand an das Laborbelüftungssystem.....	LXXI
Abbildung 15-9:	Öffnungen in der Absaugwand über dem Sealingbecken.....	LXXI

## 13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Raffinationsmöglichkeiten der Aluminiumschmelze [13].....	4
Tabelle 2-2:	Prinzipielle Unterteilung der Aluminiumlegierungselemente [13].....	8
Tabelle 3-1:	Die wichtigsten Spanformen im Überblick [29,31] .....	12
Tabelle 3-2:	Zusammenhang zwischen Prozessparameter und Zerspanbarkeit über die Stärke der Einflussnahme (● ... starker, ◐ ... durchschnittlicher, ◑ ... geringer/kein Zusammenhang) [32].....	20
Tabelle 3-3:	Einteilung der Schmierstoffarten [28].....	24
Tabelle 4-1:	Zusammenhänge zwischen Betriebsbedingungen in der Eloxierung und ihre Auswirkungen auf das Eloxalergebnis [48].....	29
Tabelle 4-2:	Verschiedene Gibbs-Energien für die Oxidbildung [66].....	35
Tabelle 4-3:	Sperrschichtdicke und Porendurchmesser gemessen mittels TEM-Aufnahmen, nach der anodischen Oxidation von drei verschiedenen Aluminiumlegierungen bei 4,2 Adm <sup>2</sup> in 2,25 molarer H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> für 50 Minuten bei 0 °C [61] .....	38
Tabelle 6-1:	Übersichtstabelle zu den Prozessparametern (Anmerkung: x steht als Platzhalter für die Kennzeichnung der jeweilige Versuchsklasse).....	52
Tabelle 6-2:	Chemische Zusammensetzung der kommerziellen 2007-Legierung in Gew.-% mittels Funkenspektralanalyse.....	60
Tabelle 6-3:	Ergebnisse der Drehversuche mit besonderem Augenmerk auf die Rauigkeitskenngrößen.....	60
Tabelle 7-1:	Zusammensetzungen der Aluminiumlegierungen AW 2017, AW 6082, AW 7075 und der Recyclinglegierung aus Festplattenschrotten für die Beizversuche in sauren und basischen Medien.....	62
Tabelle 7-2:	Chemische Zusammensetzung der Recyclinglegierungen und Vorschmelze in Gew.-% laut Funkenspektralanalyse.....	65
Tabelle 7-3:	Versuchsplan zur Eloxierung von drei verschiedenen Recyclinglegierungen .....	66
Tabelle 7-4:	Ergebnisse der Eloxierung unterschiedlicher Recyclinglegierung .....	66
Tabelle 7-5:	Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Eloxierschicht auf Legierung 1 ohne Warmauslagerung .....	67
Tabelle 7-6:	Durchschnittliche chemische Zusammensetzung der Eloxierschicht auf Legierung 1 ohne Warmauslagerung .....	69
Tabelle 7-7:	Elementspektren, aufgenommen mittels EDX für die unter Abbildung 7-14 (a) und (b) abgebildeten Bereiche .....	71
Tabelle 7-8:	Versuchsplan und Bewertung der Eloxierung auf 1050-Aluminium.....	75
Tabelle 7-9:	Chemische Zusammensetzung einer Eloxierschicht an unterschiedlichen Positionen auf 1050-Aluminium in Gew.-%.....	79
Tabelle 7-10:	Legierungsübersicht zu den Versuchsreihen der Legierungsklasse 2000....	80
Tabelle 7-11:	Versuchsplan zur Eloxierung der 2007-Legierung.....	80
Tabelle 7-12:	Ergebnisse der Versuche unter Tabelle 7-11 .....	81
Tabelle 7-13:	Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-33 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse .....	83
Tabelle 7-14:	Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-34 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse .....	84
Tabelle 7-15:	Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-41 in Gew.-% laut EDX-Analyse .....	89
Tabelle 7-16:	Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-41 in Gew.-% laut EDX-Analyse .....	90
Tabelle 7-17:	Chemische Zusammensetzung der Phase unter Abbildung 7-47 in Gew.-% laut EDX-Analyse .....	92
Tabelle 7-18:	Chemische Zusammensetzung des Spektrum unter Abbildung 7-49 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse .....	93

Tabelle 7-19:	Chemische Zusammensetzung der Spektren unter Abbildung 7-50 (a) in Gew.-% laut EDX-Analyse .....	94
Tabelle 8-1:	Vergleich der maximalen und minimalen Rauheitswerte ( $R_a$ in $\mu\text{m}$ ) unterschiedlicher Legierungen bei der Fräzerspanung mittels Diamant- oder Hartmetallschneiden .....	96
Tabelle 8-2:	Vergleich der Rauheitswerte ( $R_a$ in $\mu\text{m}$ ) unterschiedlicher Legierungen bei der Zerspanung mittels Hartmetallschneiden mit zwei Schmiermittelkonzentrationen .....	97
Tabelle 8-3:	Vergleich der Rauheitswerte ( $R_a$ in $\mu\text{m}$ ) unterschiedlicher Legierungen bei der Zerspanung mittels Diamantschneiden mit zwei Schmiermittelkonzentrationen .....	97
Tabelle 8-4:	Ergebnisse der Eloxierung unterschiedlich gedrehter Oberflächen von 2007-Aluminium .....	100
Tabelle 8-5:	Ergebnisübersicht der Bohrversuche: Bewertung der Spanform (A ... kurze Späne, B ... mittlere Späne, C ... Endlosspan); Bewertung der Oberflächengüte im Bohrloch (A ... gute, B ... geringe Fehlstellen, C ... deutliche Materialverschmierungen und Ratterspuren); .....	104
Tabelle 8-6:	Durchschnittliche Abtragraten in $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ( $t = 10 \text{ min.}$ ) beim Beizen in unterschiedlichen Medien mit verschiedenen Konzentrationen [90,91] .....	107
Tabelle 8-7:	EDX-Spektrum in Gew.-% zu Abbildung 8-24: Phasen eingebettet in eine Eloxierschicht .....	112
Tabelle 14-1:	Übersicht der Schrottsorgen entsprechend Europäischer Aluminiumschrottnorm [4] .....	I
Tabelle 14-2:	Häufige Partikel in Aluminiumschmelzen mit Informationen zu ihren üblichen Abmessung und der Entstehung [21] .....	IV
Tabelle 14-3:	Klassifizierung der Aluminiumlegierungen nach ihrer Zerspanbarkeit [30] .....	V
Tabelle 14-4:	Eigenschaften verschiedener Hartmetallwerkzeugbeschichtungen [30] .....	VII
Tabelle 14-5:	Schmierölzusätze und ihre beabsichtigten Wirkungen [27] .....	VII
Tabelle 14-6:	Anodisierbarkeit unterschiedlicher Knetlegierungen mittels Schulsystem bewertet; 1 = Exzellenz, 2 = Sehr gut, 3 = Gut, 4 = Brauchbar, 5 = Schlecht, 6 = Sehr schlecht, * = abhängig von der thermischen Vorbehandlung und der genauen Legierungszusammensetzung [48] .....	VIII
Tabelle 14-7:	Vorbehandlungsschritte nach EURAS [6] .....	X
Tabelle 14-8:	Unterschiedliche Elektrolyten für die Anodisation und ihre Auswirkung auf die Porosität der entstehenden Schichten [6] .....	X
Tabelle 14-9:	Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation .....	XII
Tabelle 14-10:	Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse .....	XII
Tabelle 14-11:	Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation .....	XII
Tabelle 14-12:	Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation .....	XII
Tabelle 14-13:	Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse .....	XII
Tabelle 14-14:	Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation .....	XII
Tabelle 14-15:	Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation .....	XII
Tabelle 14-16:	Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse .....	XII
Tabelle 14-17:	Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation .....	XII
Tabelle 14-18:	Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation .....	XIII
Tabelle 14-19:	Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse .....	XIII
Tabelle 14-20:	Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation .....	XIII
Tabelle 14-21:	Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation .....	XIII
Tabelle 14-22:	Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse .....	XIII
Tabelle 14-23:	Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation .....	XIII
Tabelle 14-24:	Spanbilder der 5754 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XIV

---

Tabelle 14-25:	Spanbilder der 5754 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XV
Tabelle 14-26:	Spanbilder der 5083 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XVI
Tabelle 14-27:	Spanbilder der 5083 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XVII
Tabelle 14-28:	Spanbilder der 7075 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XVIII
Tabelle 14-29:	Spanbilder der 7075 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XIX
Tabelle 14-30:	Spanbilder der 2017 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XX
Tabelle 14-31:	Spanbilder der 7075 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XXI
Tabelle 14-32:	Spanbilder der 6082 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XXII
Tabelle 14-33:	Spanbilder der 6082 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XXIII
Tabelle 14-34:	Spanbilder der 6082 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XXIV
Tabelle 14-35:	Spanbilder der 6082 Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug; .....	XXV



Tabelle 14-36: Ergebnisdarstellung einer Rauheitsanalyse mittels ALICONA-Konvokalmikroskop der 5083-Legierung nach Diamantzerspannung mit 10.000 Umdrehungen pro Minute und 3.000 mm Vorschub pro Minierte .....	XXVI
Tabelle 14-37: Härtewerte der Legierung EN AW 5754 auf beiden Bearbeitungsseiten (Diamant- und Hartmetallschneiden) .....	XXX
Tabelle 14-38: Härtewerte der Legierung EN AW 5083 auf beiden Bearbeitungsseiten (Diamant- und Hartmetallschneiden) .....	XXX
Tabelle 14-39: Härtewerte der Legierung EN AW 7075 auf beiden Bearbeitungsseiten (Diamant- und Hartmetallschneiden) .....	XXX
Tabelle 14-40: Härtewerte der Legierung EN AW 2017 auf beiden Bearbeitungsseiten (Diamant- und Hartmetallschneiden) .....	XXXI
Tabelle 14-41: Härtewerte der Legierung EN AW 6082 auf beiden Bearbeitungsseiten (Diamant- und Hartmetallschneiden) .....	XXXI
Tabelle 14-42: Härtewerte der Legierung EN AW 6082 auf beiden Bearbeitungsseiten (Diamant- und Hartmetallschneiden) .....	XXXI
Tabelle 14-43: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach den Prozessparametern).....	XXXII
Tabelle 14-44: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach den Rauheitswerten) .....	XXXII
Tabelle 14-45: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie).....	XXXII
Tabelle 14-46: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach den Prozessparametern).....	XXXII
Tabelle 14-47: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach den Rauheitswerten) .....	XXXIII
Tabelle 14-48: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie).....	XXXIII
Tabelle 14-49: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXIII
Tabelle 14-50: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauheitswerten).....	XXXIII
Tabelle 14-51: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (Messungen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XXXIV
Tabelle 14-52: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXIV
Tabelle 14-53: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauheitswerten).....	XXXIV
Tabelle 14-54: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XXXIV
Tabelle 14-55: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXV
Tabelle 14-56: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XXXV
Tabelle 14-57: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauheitswerten).....	XXXV
Tabelle 14-58: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXV
Tabelle 14-59: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit) .....	XXXVI
Tabelle 14-60: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgen) .....	XXXVI

Tabelle 14-61: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXVI
Tabelle 14-62: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeit) .....	XXXVI
Tabelle 14-63: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XXXVII
Tabelle 14-64: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXVII
Tabelle 14-65: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit) .....	XXXVII
Tabelle 14-66: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XXXVII
Tabelle 14-67: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXVIII
Tabelle 14-68: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeit) .....	XXXVIII
Tabelle 14-69: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XXXVIII
Tabelle 14-70: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXVIII
Tabelle 14-71: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit) .....	XXXIX
Tabelle 14-72: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XXXIX
Tabelle 14-73: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XXXIX
Tabelle 14-74: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeit) .....	XXXIX
Tabelle 14-75: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XL
Tabelle 14-76: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter).....	XL
Tabelle 14-77: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit) .....	XL
Tabelle 14-78: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie) .....	XL
Tabelle 14-82: Versuchsplan zu den Borversuchen .....	XLIV
Tabelle 15-1: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Reinigungsbecken .....	LXIII
Tabelle 15-2: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Beizbecken .....	LXIV
Tabelle 15-3: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Aufhellbecken (Dekapieren) .....	LXV
Tabelle 15-4: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Glanzbecken.....	LXVI
Tabelle 15-5: Kurzübersicht der Betriebsdaten zu den Spülbecken .....	LXVI
Tabelle 15-6: Kurzübersicht der Betriebsdaten zur Eloxierung.....	LXVII

---

## 14 Literaturverzeichnis

- [1] Seigné-Itoiz, E. et al.: Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market, *Resources, Conservation and Recycling* 89 (2014), 94–103
- [2] Rombach, G.: Raw material supply by aluminium recycling – Efficiency evaluation and long-term availability, *Acta Materialia* 61 (2013) 3, 1012–1020
- [3] Antrekowitsch, H.: Recycling und Werkstoffentwicklung von Aluminium, *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 157 (2011) 7, 287–294
- [4] Krone, K.: Aluminiumrecycling, Aluminium-Verl., Düsseldorf, ISBN: 3-00-003839-6, (2000);
- [5] Moutarlier, V.M. Gigandet und J. Pagetti: Characterisation of pitting corrosion in sealed anodic films formed in sulphuric, sulphuric/molybdate and chromic media, *Applied Surface Science* 206 (2003) 1-4, 237–249;
- [6] Jelinek, T.W.: Oberflächenbehandlung von Aluminium, Leuze, Saulgau/Württ., ISBN: 3-87480-115-2, (1997);
- [7] Crossland, A. et al.: Formation of manganese-rich layers during anodizing of Al–Mn alloys, *Corrosion Science* 41 (1999) 10, 2053–2069;
- [8] Mukhopadhyay, A.K. und A.K. Sharma: Influence of Fe-bearing particles and nature of electrolyte on the hard anodizing behaviour of AA 7075 extrusion products, *Surface and Coatings Technology* 92 (1997) 3, 212–220;
- [9] Koch, S.: Untersuchungen an bleifreien Aluminium-Atuomatenlegierungen, Dissertation, Leoben, (2010);
- [10] Altenpohl, D.: Aluminium von innen, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, Auflage 5. Aufl, ISBN: 3-87017-235-5, (1994);
- [11] Europäisches Parlament: Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000, 2000/53/EG, (2000);
- [12] Mukhopadhyay, A.K.: On the nature of the Fe-bearing particles influencing hard anodizing behavior of AA 7075 extrusion products, *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A* (1998) 29A, 979–987;
- [13] Boin, U.: Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung in Hinblick auf die IPPC-Richtlinie, Umweltbundesamt GmbH, Österreich, ISBN: 3-85457-543-3, (2000);
- [14] Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, (2011), EU-Parlament
- [15] Wener, A.: Recyclingmythen, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. GDA Artikeldienst 34 (2010) 2
- [16] Paraskevas, D. et al.: Environmental modelling of aluminium recycling: a Life Cycle Assessment tool for sustainable metal management, *Journal of Cleaner Production* 105 (2015), 357–370

- 
- [17] Gaustad, G.E., Olivetti R. und R. Kirchain: Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies, *Resources, Conservation and Recycling* 58 (2012), 79–87
- [18] Puga, H. et al.: Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 11, 5195–5203
- [19] Xiao, Y. und M. Reuter: Recycling of distributed aluminium turning scrap, *Minerals Engineering* 15 (2002) 11, 963–970
- [20] Pucher, P.: Recycling-Gusslegierungen für Automobil-Strukturbauteile, *AluReport* (2012) 3, Seite: 14–15
- [21] European Aluminium Association: The Aluminium Automotive Manual, <http://www.european-aluminium.eu/aam/>, Abruf: 18.08.2015
- [22] Smith, R.J. und R.G. Bryant: Metal substitutions in carbonic anhydrase: a halide ion probe study, *Biochemical and biophysical research communications* 66 (1975) 4, 1281–1286
- [23] Drossel, G. und C. Kammer: Aluminium Taschenbuch 2, Aluminium Verlag, Düsseldorf, Auflage 16. Aufl, ISBN: 978-3-87017-293-0, (2002-2011)
- [24] Schlucht, S.: Ökologische Modernisierung und Strukturwandel in der deutschen Aluminiumindustrie, Berlin, (1999)
- [25] Han, Q. et al.: Dross formation during remelting of aluminum 5182 remelt secondary ingot (RSI), *Materials Science and Engineering: A* 363 (2003) 1-2, 9–14
- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Fertigungsverfahren Spanen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe, (2003-09)
- [27] Paucksch, E.: Zerspantechnik, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, Wiesbaden, Auflage 12., vollständig überarbeitete und erw. Aufl, ISBN: 978-3-8348-0279-8, (2008)
- [28] Tschätsch, H. und J. Dietrich: Praxis der Zerspantechnik, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, Auflage 9., erw. Aufl, ISBN: 978-3-8348-0540-9, (2008)
- [29] Klocke, F. und W. König: Fertigungsverfahren 1, Springer, Berlin, Auflage 8. Aufl, ISBN: 978-3-540-23458-6, (2007)
- [30] Johne, P.: Handbuch der Aluminiumzerspannung, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 3870171723, (1984)
- [31] Klocke, F. und K. Gerschwiler: Zerspanen von Stahl, Stahl-Informations-Zentrum (2005)
- [32] Johne, P.: Machining of Products, (Onlinedokument), Abruf: 11.08.2015
- [33] Oishi, K.: Mirror cutting of aluminum with sapphire tool, *Journal of Materials Processing Technology* 62 (1996) 4, 331–334
- [34] Simeone, A.E.B. Woolley und S. Rahimifard: Tool State Assessment for Reduction of Life Cycle Environmental Impacts of Aluminium Machining Processes via Infrared Temperature Monitoring, *Procedia CIRP* 29 (2015), 526–531

- 
- [35] Wang, M.-Y. und H.-Y. Chang: Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014-T6, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (2004) 1, 51–57
- [36] Tönshoff, H.K. und B. Denkena: *Spanen*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio, Auflage 2., erw. und Neubearb. Aufl, ISBN: 3-540-00588-9, (2004)
- [37] Yousefi, R. und Y. Ichida: A study on ultra-high-speed cutting of aluminium alloy, *Precision Engineering* 24 (2000) 4, 371–376
- [38] Lei, X.B. Shen und F. Sun: Optimization of diamond coated microdrills in aluminum alloy 7075 machining: A Case Study, *Diamond and Related Materials* 54 (2015), 79–90
- [39] Agustina, B. de et al.: Experimental Analysis of the Cutting Forces Obtained in Dry Turning Processes of UNS A97075 Aluminium Alloys, *Procedia Engineering* 63 (2013), 694–699
- [40] Fox-Rabinovich, G. et al.: Cutting performance of different coatings during minimum quantity lubrication drilling of aluminum silicon B319 cast alloy, *Surface and Coatings Technology* 205 (2011) 16, 4107–4116
- [41] Coldwell, H. et al.: The use of soft/lubricating coatings when dry drilling BS L168 aluminium alloy, *Surface and Coatings Technology* 177-178 (2004), 716–726
- [42] Braga, D.U. et al.: Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 122 (2002) 1, 127–138
- [43] Araoyinbo, A.O.: Room temperature anodization of aluminum and the effect of the electrochemical cell in the formation of porous alumina films from acid and alkaline electrolytes, *Advanced Materials Letters* 3 (2012) 4, 273–278
- [44] Batzer, S. et al.: Chip morphology and hole surface texture in the drilling of cast Aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 79 (1998) 1-3, 72–78
- [45] Yerokhin, A. und R.H.U. Khan: Anodising of light alloys, *Surface engineering of light alloys* (2010), 83–109
- [46] Bartolomé, M. et al.: Behaviour of different bare and anodised aluminium alloys in the atmosphere, *Surface and Coatings Technology* 202 (2008) 12, 2783–2793
- [47] Klakurková, L. et al.: Analysis of surface defects of aluminium components with hard anodized layers, *Engineering Failure Analysis* (2015)
- [48] Henley, V.F.: *Anodic oxidation of aluminium and its alloys*, Pergamon Press, Oxford, New York, Auflage 1st ed, (1982)
- [49] Lotz, A.R.: *Studien zur Nanostrukturierung von Aluminium-Oberflächen mittels elektrochemischer Methoden*, Justif-Liebig-Universität Gießen, (2009)
- [50] Schwirn, K.: *Harte Anodisation von Aluminium mit verdünnter Schwefelsäure*, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, (2008)
- [51] Çapraz, Ö.Ö. et al.: Factors Controlling Stress Generation during the Initial Growth of Porous Anodic Aluminum Oxide, *Electrochimica Acta* 159 (2015), 16–22

- 
- [52] Çapraz, Ö.Ö. et al.: Role of Oxide Stress in the Initial Growth of Self-Organized Porous Aluminum Oxide, *Electrochimica Acta* 167 (2015), 404–411
- [53] Riddar, F.S. Hogmark und Å.K. Rudolphi: Comparison of anodised aluminium surfaces from four fabrication methods, *Journal of Materials Processing Technology* 212 (2012) 11, 2272–2281
- [54] Aerts, T. et al.: Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film, *Surface and Coatings Technology* 201 (2007) 16-17, 7310–7317
- [55] Thompson, G.F.: Porous anodic alumina: fabrication, characterization and applications, *Thin Solid Films* 297 (1997), 192–201
- [56] Wernick, S. und R. Pinner: *The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and its Alloys*, Robert Draper LTD, Teddington, Auflage 3, (1964)
- [57] Koroleva, E. et al.: Surface morphological changes of aluminium alloys in alkaline solution, *Corrosion Science* 41 (1999) 8, 1475–1495
- [58] Shih, T.-S. und Y.-W. Chiu: Corrosion resistance and high-cycle fatigue strength of anodized/sealed AA7050 and AA7075 alloys, *Applied Surface Science* 351 (2015), 997–1003
- [59] Liu, Y. et al.: Anodic film growth on an Al–21at.%Mg alloy, *Corrosion Science* 44 (2002) 5, 1133–1142
- [60] Garcia-Vergara, S.J. et al.: Influence of copper on the morphology of porous anodic alumina, *Corrosion Science* 48 (2006) 10, 2937–2946
- [61] Fratila-Apachitei, L. et al.: Influence of substrate microstructure on the growth of anodic oxide layers, *Electrochimica Acta* 49 (2004) 7, 1127–1140
- [62] Fratila-Apachitei, L.E.J. Duszczyk und L. Katgerman: Vickers microhardness of AlSi(Cu) anodic oxide layers formed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at low temperature, *Surface and Coatings Technology* 165 (2003) 3, 309–315
- [63] Fares, C. et al.: Coupled effects of substrate microstructure and sulphuric acid anodizing on fatigue life of a 2017A aluminum alloy, *Materials & Design* 86 (2015), 723–734
- [64] Habazaki, H. et al.: Nanoscale enrichments of substrate elements in the growth of thin oxide films, *Corrosion Science* 39 (1997) 4, 731–737
- [65] Shimizu, K. et al.: Selective oxidation of aluminium and interfacial enrichment of iron during anodic oxide growth on an Al<sub>6</sub>Fe phase, *Corrosion Science* 42 (2000) 5, 831–840
- [66] Barin, I. und G. Platzki: *Thermochemical data of pure substances*, VCH, Weinheim, New York, Auflage 3rd edition, ISBN: 3-527-28745-0, (1995)
- [67] Iglesias-Rubianes, L. et al.: Cyclic oxidation processes during anodizing of Al–Cu alloys, *Electrochimica Acta* 52 (2007) 24, 7148–7157
- [68] Liu, Y. et al.: Anodic behaviour of a model second phase: Al–20at.%Mg–20at.%Cu, *Corrosion Science* 48 (2006) 5, 1225–1248

- 
- [69] Fratila-Apachitei, L. et al.: A transmission electron microscopy study of hard anodic oxide layers on AlSi(Cu) alloys, *Electrochimica Acta* 49 (2004) 19, 3169–3177
- [70] Fratila-Apachitei, L.J. Duszczyk und L. Katgerman: Voltage transients and morphology of AlSi(Cu) anodic oxide layers formed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at low temperature, *Surface and Coatings Technology* 157 (2002) 1, 80–94
- [71] Mohedano, M. et al.: PEO of pre-anodized Al–Si alloys: Corrosion properties and influence of sealings, *Applied Surface Science* 346 (2015), 57–67
- [72] Fratila-Apachitei, L.J. Duszczyk und L. Katgerman: AlSi(Cu) anodic oxide layers formed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> at low temperature using different current waveforms, *Surface and Coatings Technology* 165 (2003) 3, 232–240
- [73] Riddar, F. und Å. Kassman Rudolphi: Comparison of friction performance of four anodised aluminium surfaces for use in a clutch actuator, *Wear* 319 (2014) 1-2, 227–233
- [74] Saenz de Miera, M. et al.: Modelling the anodizing behaviour of aluminium alloys in sulphuric acid through alloy analogues, *Corrosion Science* 50 (2008) 12, 3410–3415
- [75] Arrowsmith, D.J.: Nucleation and Growth of Hard Anodic Oxide on Aluminium, *Transaction of the Institute of Metal Finish* (1982) 60, 5–8
- [76] Ma, Y. et al.: Discontinuities in the porous anodic film formed on AA2099-T8 aluminium alloy, *Corrosion Science* 53 (2011) 12, 4141–4151
- [77] Dejun, K. und W. Jinchun: Salt spray corrosion and electrochemical corrosion properties of anodic oxide film on 7475 aluminum alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 632 (2015), 286–290
- [78] Zhou, X. et al.: Film formation and detachment during anodizing of Al–Mg alloys, *Corrosion Science* 41 (1999) 8, 1599–1613
- [79] Krishnamurthy, R. und D.J. Srolovitz: Stress distributions in growing oxide films, *Acta Materialia* 51 (2003) 8, 2171–2190
- [80] Goueffon, Y. et al.: Investigations into the coefficient of thermal expansion of porous films prepared on AA7175 T7351 by anodizing in sulphuric acid electrolyte, *Surface and Coatings Technology* 205 (2010) 7, 2643–2648
- [81] Rieger, F.: *Aluminium 4*, Beuth, Berlin [u.a.], Auflage 1. Aufl, ISBN: 978-3-410-16960-4, (2012)
- [82] Verband für die Oberflächenbehandlung von Aluminium e.V.: *Fehlermanagement: Fehler erkennen - Fehler vermeiden*, VOA, München, (2014)
- [83] Indiamart: Products & Services, <http://www.indiamart.com/g-aktiengesellschaft/products.html>
- [84] Bono, M. und J. Ni: The effects of thermal distortions on the diameter and cylindricity of dry drilled holes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41 (2001) 15, 2261–2270
- [85] Cirik, E. und K. Genel: Effect of anodic oxidation on fatigue performance of 7075-T6 alloy, *Surface and Coatings Technology* 202 (2008) 21, 5190–5201

- 
- [86] de Camargo, J.A.M. et al.: Coating residual stress effects on fatigue performance of 7050-T7451 aluminum alloy, *Surface and Coatings Technology* 201 (2007) 24, 9448–9455
- [87] Hübner, W.: Die Praxis der anodischen Oxidation des Aluminiums, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, Auflage 3. Aufl, ISBN: 978-3870171315, (1977)
- [88] Lelonek, M.O. Kopp und M. Knoll: Pore bifurcation, growth and pore termination in nanoporous alumina with concave and convex surfaces, *Electrochimica Acta* 54 (2009) 10, 2805–2809
- [89] Kopp, O.M. Lelonek und M. Knoll: Influence of surface morphology on oxide growth in porous alumina, *Electrochimica Acta* 54 (2009) 26, 6594–6597
- [90] Waldsam, F.: Auswirkungen basischer Beizbehandlungen auf die Oberflächenqualität und Eloxierbarkeit von Aluminium-Knetlegierungen, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben, (2014)
- [91] Gruber, B.: Auswirkungen saurer Beizbehandlungen auf die Oberflächenqualität und Eloxierbarkeit von Aluminium-Knetlegierungen, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben, (2014)
- [92] Bezerra, A.A. et al.: Effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 120, (2011), 185–198
- [93] Dasch, J. M. et al.: A comparison of five categories of carbon-based tool coatings for dry drilling of aluminium, *Surface & Coatings Technology* 200 (2006) 2970–2977
- [94] Balkrishna R. und C. Shin: Analysis on high-speed face-milling of 7075-T6 aluminum using carbide and diamond cutters, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 1763–1781
- [95] Nouari, M., G. List, F. Girot, D. Ge'hin: Effect of machining parameters and coating on wear mechanisms in dry drilling of aluminium alloys, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 1436–1442
- [96] Nouari, M., G. List, F. Girot, D. Coupard: Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys, *Wear* 255 (2003) 1359–1368
- [97] Durval, U. et al.: Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 122 (2002) 127–138
- [98] Itoigawa, F. et al.: Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy, *Wear* 260 (2006) 339–344
- [99] Iglesias-Rubianes, L. et al.: Cyclic oxidation processes during anodizing of Al–Cu alloys, *Electrochimica Acta* 52 (2007) 7148–7157
- [100] Garcia-Vergara, S.J. et al.: Influence of copper on the morphology of porous anodic alumina, *Corrosion Science* 48 (2006) 2937–2946
- [101] Stuhlpfarrer P., S. Luidold und H. Antrekowitsch: Recyclingkonzepte zur Rückgewinnung von Massen- und Technologiemetallen aus E-Schrotten der Kategorie 3. *World of metallurgy - Erzmetall* 67 (2014) No. 1, 28–37



- [102] Tilke, A., F. Beug, T. Melde und R. Knöfer: Speichern ohne Fluchtgefahr, Physik Journal 8 (2009) Nr. 4, 33–38
- [103] Bao, S.: Filtration of Aluminium-Experiment, Wetting and Modelling, Dissertation, Norwegian University of Science and Technolgy, Faculty of Natural Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering, 2011
- [104] Ma, Y. at al.: Anodic film growth on Al–Li–Cu alloy AA2099-T8, Electrochimica Acta 80 (2012) 148–159
- [105] Kikuchi, T. at al.: Corrosion of Al–Sn–Bi alloys in alcohols at high temperatures. Part II: Effect of anodizing on corrosion, Corrosion Science 52 (2010) 2525–2534
- [106] World Bureau of Metal Statistics: Metallstatistik, Metal statistics, 2003-2013, 101. Jahrgang, England, (2014)

# 15 Anhang

Tabelle 15-1: Übersicht der Schrottsorgen entsprechend Europäischer Aluminiumschrottnorm [4]

Teil-Nr.	Schrottsorte	Materialbeispiel	Schmelzausbeute	Zusammensetzung der Probeschmelze	Bemerkung
# 1	Allgemeine Anforderungen, Probennahme und Prüfverfahren;				
# 2	Unterlegierter Aluminiumschrott	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neuschrotte aus der Blech-, Band-, Rohrherstellung</li> <li>- Neues und altes Lithographiematerial</li> </ul>	95 %	0,25 % Si, 0,40 % Fe, 0,05 % Cu, 0,05 % Mn, 0,07 % Zn, 0,05 % Ti, Sonstige je 0,05 %, Rest Aluminium; Unlegiert:	Min. 0,2 mm dick; frei von beschichteten Material, Öl, Fett, Kunststoff etc.
# 3	Draht- und Kabelschrott	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neuschrotte aus der Draht- und Kabelherstellung</li> <li>- Altschrotte aus der Kabelzerlegung und -aufbereitung</li> </ul>	95 % min.	0,25 % Si, 0,40 % Fe, 0,05 % Cu, 0,05 % Mn, 0,05 % Mg, 0,07 % Ti, Sonstige je 0,03 %, Aluminiumgehalt 99,5 %; Si/Mg legiert (6xxx): 0,60 % Si, 0,30 % Fe, 0,60 % Mg, 0,05 % Cr, 0,07 % Zn, 0,10 % Ti, Sonstige ges. 0,05 %, Rest Aluminium;	Min. 0,8 mm pro Einzeldraht; frei von Tragseilen etc. aus Stahl u.a.: unbeschichtet; frei von Verbrennungsrückständen, Öl, Fett, Schmutz, Kunststoff etc., in Form von Packeten, Presslingen, Coils bzw. geschnitten o. gehäckselt
# 4	Schrott einer spezifizierten Knetlegierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neuschrotte aus der Blech-, Band-, Rohr-, Profilverherstellung, Pressreste, etc.</li> </ul>	95 % min.	Materialanalyse entspricht EN 573-3	Wie # 2
# 5	Material zweier oder mehrerer spezifizierter Knetlegierungen des gleichen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stückstoffe von Blech, Band, Rohren, Strangpressprofilen</li> <li>- Ausschussteile</li> <li>- Sortierte Altschrotte</li> </ul>	88 % min.	Allgemein: 0,70 % Si, 0,70 % Fe, 0,40 % Cu, 0,40 % Zn, 0,50 % Mn, 0,60 % Mg, 0,10 % Pb, 0,10 % Sn, Sonstige je	Max. 5 % Öl, Fett, Schmutz, Kunststoff u. a. nichtmetallische Fremdbestandteile; frei von metallischen Fremdbestandteilen

Legierungstyps				0,10 %, Rest Aluminium; Außerdem spezifiziert für Schrott der Legierungsserien 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx;	
# 6	Material zweier oder mehrerer Knetlegierungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorzugsweise Altschrotte, z.B. Geschirrschrott, TV-Antennen, Verkehrs- und KFZ-Kennzeichen, Fernsterrahmen u.a.</li> <li>- Bauabbruchschrotte</li> </ul>	88 % min.	Grade A: 1,0 % Si, 0,80 % Fe, 0,80 % Cu, 0,50 % Mn, 0,60 % Mg, 0,50 % Zn, 0,20 % Ti, Sonstige je 0,10 %, Rest Aluminium; Grade B: 1,5 % Si, 1,2 % Fe, 1,0 % Cu, 0,70 % Zn, 0,20 % Ti, Sonstige je 0,15 %, Rest Aluminium;	Max. 5 % Öl, Fett, Schmutz, Kunststoff, anhaftende Verbrennungsprodukte; Frei von Material der Legierungsgruppen 2xxx und 7xxx und metallischen Fremdbestandteilen
# 7	Gussschrott	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neuschrotte, z. B. Steiger, Speiser, Ausschussteile</li> <li>- Altschrotte aus der Verwertung von Kraftfahrzeugen, Maschinen, Haushaltgeräten</li> <li>- Kolben, Räder, Felgen</li> </ul>	90 % min.	9,0 % Si, 1,1 % Fe, 3,5 % Cu, 0,50 % Mn, 0,30 % Mg, 0,30 % Ni, 1,2 % Zn, 0,15 % Ti, 0,20 % Pb, 0,10 % Sn, Sonstige je 0,15 %, Rest Aluminium;	Max. Stückgröße 600·600·400 mm, max. 2 % flüchtige Bestandteile, max. 2 % nichtmetallische Bestandteile, max. 2 % metallische Fremdbestandteile
# 8	Shredderschrott zur weiteren Aufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aluminiumhaltiges Materialgemisch vermengt mit anderen Metallen und Nichtmetallen</li> </ul>	90 % min.	Probeschmelze der aussortierten Al-Fraktion: wie # 7, außer 0,50 % Mg;	Min. 20 % Al, min. 15 % andere Metalle, Stückgröße 10-200 mm
# 9	Shredderschrott aufbereitet	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vorzugsweise Gussschrott, aufbereitet, z. B. durch Sink-Schwimm-Scheidung</li> </ul>	90 % min.	Wie # 8	Max. 2 % Öl, Fett, Schmutz, u. a. nichtmetallische Bestandteile; frei von metallischen Fremdbestandteilen,

# 10	Getränkedosen	- Vollständig entleerte Getränkedosen aus Sammelsystemen und freier Sammlung	88 % min.	0,30 % Si, 0,50 % Fe, 0,20 % Cu, 1,1 % Mn, 1,3 % Mg, 0,01 % Ni, 0,05 % Zn, 0,01 % Pb, 0,01 % Sn, Sonstige ges. 0,15 %, Rest Aluminium	Stückgröße 10-200 mm; Pakete: max. 800·1000·1200 mm mit 200-350 kg/m <sup>3</sup> Presslinge: max. 400·400·400 mm, max. 2 % Feuchtigkeit, max. 5 % flüchtige Bestandteile, frei von anderen Metallen - ins besonders Eisen und Blei
# 11	Al/Cu-Kühlerschrott	- Kühler aus Fahrzeugen, Kühlschränken u.a. Kühlanlagen		Min. 40 % Cu, max. 0,70 % Fe, max. 0,20 % andere Bestandteile, Rest Aluminium	Frei von Feuchtigkeit, Öl, Fett, Schmutz, Kunststoff, Eisen, Messing, u. a. Fremdbestandteilen, Stückgröße: 500 x 500 x 250 mm
# 12	Spanschrott einer spezifischen Legierung	- Fräs-, Dreh-, Bohr- u.a. Späne einer Knet- oder Gusslegierung	90 % min.	Materialanalyse entsprechend EN 573.3 bzw. EN 1706 bzw. nach anderen Spezifikationen	Max. 0,5 % magnetisches Material, max. 5 % Feuchtigkeit, Öl, frei von anderen Fremdbestandteilen; Feinanteil < 0,59 mm wird vom Liefergewicht abgezogen
# 13	Spanschrott zweier oder mehrerer spezifizierter Legierungen	- Fräs-, Dreh-, Bohr-, u.a. Späne der Bearbeitung von Platten, Strangpressprofilen, Gussstücken, etc.	90 % min.	9,0 % Si, 1,0 % Fe, 3,5 % Cu, 0,50 % Mn, 0,30 % Mg, 0,30 % Ni, 1,5 % Zn, 0,15 % Ti, 0,20 % Pb, 0,10 % Sn, Sonstige je 0,15 %, Sonstige ges. 0,45 %, Rest Aluminium	Wie # 12
# 14	Gebrauchte Aluminiumverpackungen	- Gebrauchte Nahrungsverpackungen - Sprühdosen, Falschenverschlüsse, etc.	28 % min.	1,0 % Si, 1,0 % Fe, 2,5 % Cu, 0,40 % Mn, 0,20 % Mg, 0,80 % Zn, 0,20 % Pb+Sn, Sonstige je 0,10 %, Rest Aluminium	Pakete: 1000 x 1200 mm mit max. 500 kg Presslinge: 300 x 300 x 400 mm mit max. 30 kg, max. 5 % Stahlblechverpackung, frei von freiem Kunststoff, Papier

					und Blisterverpackungen, abschwelbbare Bestandteile max. 60 %
# 15	Gebrauchte Aluminiumverpackungen, entschichtet	- Wie # 14 jedoch thermisch, mechanisch oder/und chemisch entschichtet	80 % min.	Wie # 14	Frei von freiem Eisen, nichtmetallischen Fremdbestandteilen und Feinanteil < 1 mm
# 16	Abhübe, Krätzen, Ausläufer, Gröben	- Abhübe, Krätzen, Ausläufer, auch Produkte der Krätze- und Stalزشlackenaufbereitung wie Gröbe	30 % min	Nach Vereinbarung	Krätzebrocken: Stückgröße max. 600 mm, feinteiliges Material: Korngröße min. 0,8 mm

Tabelle 15-2: Häufige Partikel in Aluminiumschmelzen mit Informationen zu ihren üblichen Abmessung und der Entstehung [21]

Partikelgruppe	Chemische Formel	Aussehen	Größe [ $\mu\text{m}$ ] Dicke d Durchmesser $\emptyset$	Entstehung
<b>Oxide</b>	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Filme oder Gruppe von Filmen	d = 0,1-5 $\emptyset$ = 10-1000	Oxidation der Badoberfläche oder ungelöste Tonerde
	MgO	Partikel polygonale Partikel Filme mit Partikeln	$\emptyset$ = 0,2-30 $\emptyset$ = 0,2-1 d = 1-6 $\emptyset$ = 10-1.000	Oxidation der Badoberflächen oder durch Verunreinigungen der Legierungselemente
	$\text{Al}_2\text{MgO}_4$	Pyramidenförmige Partikel dicke Filme mit Partikeln	$\emptyset$ = 0,1-5 d = 1-6 $\emptyset$ = 10-1.000	Oxidation der Badoberfläche
<b>Silikate</b>	$\text{SiO}_2$	Brocken oder Klumpen	$\emptyset$ = 0,5-5	Feuerfestmaterial, Legierungselemente
	Ca-Silikate (Ca, Si, O)	Klumpen oder kugelförmige Partikel	$\emptyset$ = 10-100	Reaktion mit Feuerfestmaterial oder Legierungselemente
	K-Silikate (K, Si, O)	Klumpen oder kugelförmige Partikel	$\emptyset$ = 10-1.000	Reaktionen mit Feuerfestmaterial oder Legierungselementen
	Al-Silikate (Al, Si, O)	Klumpen oder Partikel	$\emptyset$ = 10-300	Reaktion mit Feuerfestmaterial oder Legierungselementen

<b>Karbide</b>	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub> und Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C	dreiecksförmig oder hexagonale Scheiben	d < 1 Ø = 0,5-25	Hall-Heroult-Zelle
	Graphit	lang gezogene Partikel	Ø = 1-20	Hall-Heroult-Zelle
<b>Nitride</b>	AlN	Filme	Ø = 10-50 d = 0,1-3	Reaktion mit Luftstickstoff oder durch Spülgasbehandlung eingebracht
<b>Fluoride</b>	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	kugelförmige Partikel	Ø = 2-60	Hall-Heroult-Zelle
<b>Chloride</b>	NaCl, KCl	Kugelförmige Partikel	Ø = 10-90	Schmelzprozess unter Salz, Spülgasbehandlung mit Cl <sub>2</sub>
<b>Boride</b>	AlB <sub>12</sub>	polygonale Partikel oder poröse Klumpen	Ø = 1-20	Kornfeinerung
	AlB <sub>2</sub>	Dreiecksförmige oder hexagonale Scheiben	Ø = 20-60	Kornfeinerung
	TiB <sub>2</sub>	Cluster von dreiecksförmigen oder hexagonalen Scheiben	Ø = 1-50	Kornfeinerung
	ZrB <sub>2</sub>	dreiecksförmige oder hexagonale Scheiben	Ø = 1-10	Kornfeinerung
<b>Aluminide</b>	Al <sub>3</sub> Ti	stabförmig	Ø = 1-30	Legierungselemente
	Al <sub>3</sub> Zr	vielflächige Partikel, stabförmige Partikel auch in Clustern	Ø = 1-150	Legierungselemente

Tabelle 15-3: Klassifizierung der Aluminiumlegierungen nach ihrer Zerspanbarkeit [30]

Gruppe	Legierungstyp	Legierungsbeispiel	Charakteristiken
<b>1 – Knetlegierungen mit geringer Festigkeit</b>	Nicht aushärtbare und weichgeglühte Knetlegierungen	Reinaluminium, AlMn, AlMg1, AlMgMn, AlMgSi0,5, AlMgSi1	Weiche, duktile, homogene Struktur ohne Hartphasen; Klebt am Schneidwerkzeug; Aufbauschneidbildung; keine Scheinspannbildung
<b>2.1 – Knetlegierungen mit höhere Festigkeit</b>	Nicht aushärtbare Legierungen, kaltverfestigt; Aushärtbare Legierungen im	AlMn, AlMg1 bis AlMg5, AlMgMn, AlMg4,5Mn, AlCuMg1, AlZnMg1,	Festigkeitswerte zwischen 300 und 600 N/mm <sup>2</sup> mit guter Zähigkeit und ohne harten Partikeln;

	ausgehärteten Zustand	AlZnMgCu0,5, AlZnMgCu1,5	Abnehmende Tendenz zur Aufbauschneidbildung mit zunehmender Legierungsfestigkeit, keine Scheinspannbildung
<b>2.2 – Automatenlegierungen</b>	Aushärtbare Knetlegierungen mit spanbrechenden Zusätzen	AlMgSiPb, AlCuBiPb, AlCuMgPb	Kurze Späne dank der spanbrechenden Phasen, Festigkeitswerte zwischen 280 und 380 MPa, geringe Tendenzen zur Bildung von Aufbauschneiden, keine Scheinspannbildung
<b>3.1 – AlSi-Gusslegierungen mit einem Si-Gehalt von bis zu 10 %</b>	AlSiCu- oder AlSiMg-Legierungen	AlSi5Cu1, AlSi6Cu4, AlSi8Cu3, AlSiCu3AlSi5, AlSi7Mg, AlSi9Mg, AlSi10Mg	Festigkeit bis 250 MPa für AlSiCu und 360 MPa für AlSiMg; Zunehmender Werkzeugverschleiß aufgrund der harten Phasenbestandteile, gute Spanbrucheigenschaften, glatte Oberfläche, Aufbauschneidbildung tendentiell nur bei Legierungen mit Si > 5 %, Scheinspannbildung ist möglich
<b>3.2 – AlSi-Gusslegierung mit niedriger Härte</b>	AlSi-Legierungen mit 12 % Si	AlSi12	Geringe Härte des Matrixmaterials, harte Phasen und eventuelle Einschlüsse, hohe Tendenz zu Aufbauschneiden und Scheinspannbildung
<b>3.3 – AlSi-Gusslegierungen mit hoher Härte</b>	AlSi-Legierungen mit Si-Werten über 12 %	AlSi18CuMgNi, AlSi21CuNiMg, AlSi25CuMgNi, AlSi17Cu4FeMg	Mittlere Festigkeit, hohe Härte, geringe Duktilität; Hoher Verschleiß der Schneidwerkzeuge durch die Hartphasen, starke Tendenzen zur Ausbildung von Aufbauschneiden und Scheinspänen

Tabelle 15-4: Eigenschaften verschiedener Hartmetallwerkzeugbeschichtungen [30]

	WC	TiC	TiN	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>Härte HV05 bei RT</b>	1.800	3.000	2.400	2.200
<b>bei 1.000 °C</b>	800	400	450	1.100
<b>Wärmeausdehnungskoeffizient 10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> bei 25 bis 1.000 °C</b>	7,3	7,8	9,4	8,3
<b>Wärmeleitfähigkeit W/mK</b>	90	30	39	25
<b>E-Modul GPa</b>	690	450	256	410
<b>Bildungsenthalpie kJmol<sup>-1</sup> bei 1.450 °C</b>	-54	-165	-335	-1.670

Tabelle 15-5: Schmierölzusätze und ihre beabsichtigten Wirkungen [27]

Art der Zusätze	Wirkung	Beispiele
<b>Polare Zusätze</b>	erhöhen die Schmierungseigenschaften	natürliche Fette und Öle, synthetischer Esther
<b>EP-Zusätze</b>	sollen Mikroverschweißungen zwischen Metalloberflächen bei hohen Drücken und Temperaturen vermeiden	geschwefelte Fette und Öle, phosphorhaltige Verbindungen, chlorhaltige Verbindungen
<b>Korrosionsschutzzusätze</b>	sollen das Rosten von Metall-Oberflächen vermeiden	Alkanolamine, Sulfonate, Organische Borverbindungen, Natriumnitrid
<b>Antinebelzusätze</b>	sollen das Zerreißen des Öles verhindern und somit weniger Ölnebel erzeugen	hochmolekulare Substanzen
<b>Alterungsschutzstoffe</b>	sollen Reaktionen innerhalb des Kühlschmiermittels verhindern	organische Sulfide, Zinkdiphosphate, aromatische Amine
<b>Fettschmierstoffe</b>	sollen die Schmierung verbessern	Graphite, Molybdänsulfide, Ammoniummolybdän
<b>Emulgatoren</b>	sollen Öl mit Wasser in Verbindung bringen	Tenside, Petroleumsulfonate, Alkalseifen, Aminseifen
<b>Entschäumer</b>	sollen die Bildung von Schaum verhindern	Siliconpolymere, Tributylphosphat
<b>Biozide</b>	sollen die Bildung von Bakterien, Keimen und Pilzen verhindern	Formaldehyd, Phenol, Formaldehydabkömmlinge, Isothiazolinone



Tabelle 15-6: Anodisierbarkeit unterschiedlicher Knetlegierungen mittels Schulsystem bewertet; 1 = Exzellent, 2 = Sehr gut, 3 = Gut, 4 = Brauchbar, 5 = Schlecht, 6 = Sehr schlecht, \* = abhängig von der thermischen Vorbehandlung und der genauen Legierungszusammensetzung [48]

Material und Zustand	Schutzanodisierung	Dekoratives Eloxal	Glanzbehandlung	Hartanodisieren
1080A-0	1	1	1-2	1
1080A-H8	1	1	1-2	1
1050-0	1	1	2	1
1050-H8	1	1	2	1
1200-0	2	2	3	1
1200-H4	2	2	3	1
1200-H8	2	2	3	1
2011-TD	4	4 (Schwarz)	6	3
2011-TF	4	4 (Schwarz)	6	3
2014A-TB	4	4 (Schwarz)	6	3
2014A-TF	4	4 (Schwarz)	6	3
2024-TB	4	4 (Schwarz)	6	3
2024-TD	4	4 (Schwarz)	6	3
2618-TF	4	4	6	4
3103-0	3	3	4-5	3
3103-H4	3	3	4-5	3
3103-H8	3	3	4-5	3
3105-0	3	3	4-5	3
3105-H4	3	3	4-5	3
3105-H8	3	3	4-5	3
5005-0	1	1	1	1
5005-H4	1	1	1	1

---

<b>5005-H8</b>	1	1	1	1
<b>5083-0</b>	2	2	3	1
<b>5083-H2</b>	2	2	3	1
<b>5083-H4</b>	2	2	3	1
<b>5154A-0</b>	2	2	3	1
<b>5154A-H2</b>	2	2	3	1
<b>5154A-H4</b>	2	2	3	1
<b>5251-0</b>	2	2	2-3	1
<b>5251-H3</b>	2	2	2-3	1
<b>5251-H6</b>	2	2	2-3	1
<b>5454-0</b>	2	2	3	1
<b>5454-H2</b>	2	2	3	1
<b>5454-H4</b>	2	2	3	1
<b>6061-TB</b>	3	3	4	5
<b>6061-TF</b>	3	3	4	5
<b>6063-TB</b>	2	2	2-3	1
<b>6063-TF</b>	2	2	2-3	1
<b>6082-TB</b>	3	3	4	2-3
<b>6082-TF</b>	3	3	4	2-3
<b>7020-TB</b>	4	4	*	3
<b>7020-TF</b>	4	4	*	3
<b>7075-TF</b>	4	4	*	4

Tabelle 15-7: Vorbehandlungsschritte nach EURAS [6]

Kurzzeichen	Behandlung	Beschreibung
<b>E0</b>	Anodisieren ohne Vorbehandlung	„Industrieeloxierung“; es findet lediglich eine leichte Entfettung oder Beizung statt; Kratzer, Riefen und andere Oberflächendefekte bleiben bestehen;
<b>E1</b>	Geschliffen und anodisiert	Durch das Schleifen der Oberfläche stellt sich eine gleichmäßige, gerichtete Struktur ein. Ungleichmäßigkeiten verschwinden üblicherweise durch diese Operation.
<b>E2</b>	Gebürstet und anodisiert	Durch das Bürsten entsteht ein gleichmäßiges, helles Aussehen. Kratzer, Riefen und andere Defekte bauen sich nur zum Teil ab.
<b>E3</b>	Poliert und anodisiert	Das Polieren ermöglicht die Eistellung glatter und glänzender Oberflächen aber tiefere Riefen und Kratzer können nicht entfernt werden.
<b>E4</b>	Geschliffen, gebürstet und anodisiert	Durch das Schleifen und Bürsten entwickelt sich ein sauberes, gleichmäßig helles Erscheinungsbild. Normale Riefen und Molden gehen zurück, es kommt allerdings nicht zu einem Planschliff.
<b>E5</b>	Geschliffen, poliert und anodisiert	Das Werkstück zeigt ein glattes, glänzendes, weitgehend fehlerfreies Aussehen. Alle Aufrauungen sind normalerweise entfernbar.
<b>E6</b>	Chemisch vorbehandelt und anodisiert	Durch die chemische Vorbehandlung in stark beizenden Bädern entsteht eine matt-silbrige Oberfläche. Pressrillen, Kratzer und Scherstellen bleiben in gewissem Maße bestehen, sind allerdings weniger gut sichtbar.
<b>E7</b>	Entfettet und gegläntzt vor der Anodisierung	Nach der Entfettung der Bauteile in einem Reinigungsmittel erfolgt die Behandlung in einem speziellen chemischen oder elektrochemischen Glänzbad. Oberflächenfehler verringern sich dabei nur im begrenzten Umfang.
<b>E8</b>	Geschliffen, poliert und gegläntzt vor der Anodisierung	Polieren über chemisches oder elektrochemisches Glänzen mit vorgeschaltetem Schleifen und Polieren führt zu einem hochglänzenden Bauteil. Mechanische Aufrauungen und beginnende Korrosionen gehen verloren.

Tabelle 15-8: Unterschiedliche Elektrolyten für die Anodisation und ihre Auswirkung auf die Porosität der entstehenden Schichten [6]

Elektrolyt	Konzentration (gew.%)	Temperatur (°C)	Stromdichte (A/dm <sup>2</sup> )	Spannung (V)	Charakteristika der erzeugten Schicht
<b>Chromsäure (CrO<sub>3</sub>)</b>	10	45-55	0,3-1	40-50	Graustich
<b>Schwefelsäure (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</b>	5-25	15-25	0,8-3	15-20	Transparente Schichten möglich
<b>Oxalsäure</b>	3-5	20-30	1-1,5	25	Gelbstich
<b>Phosphorsäure</b>	3-10	20-30	0,5-2	40-100	Helles Blau
<b>Harteloxal Schwefelsäure Oxalsäure</b>	<b>mit und</b> 20-20 1	0-5	2-4	25-60	Transparent mit hoher Härte > 600 HV

---

<b>Alkalische Anodisation</b>	8-12	10-20	1-4	30-70	Beständig in korrosiven Medien
<b>Natronlauge</b>	2-3				
<b>Wasserstoffperoxid</b>	0,1-0,5				
<b>Natronphosphat</b>					
<b>Wechselstromverfahren mit Schwefelsäure</b>	15-30	0-40	3-12	15-30	Weichere und duktilere Schichten

**EN AW 5754 H111**

Tabelle 15-9: Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Al
0,36	0,27	0,05	3,47	0,34	0,05	0,04	0,06	rest

Tabelle 15-10: Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Al
0,34	0,15	0,03	3,20	0,32	0,04	0,02	0,03	rest

Tabelle 15-11: Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
222	85	28

**EN AW 5083 H111**

Tabelle 15-12: Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Ni [%]
0,22	0,1	0,056	4,38	0,55	0,059	0,03	0,23	0,004

Tabelle 15-13: Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Al
0,26	0,21	0,06	4,58	0,54	0,10	0,04	0,11	rest

Tabelle 15-14: Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
312	170	28

**EN AW 7075 T651**

Tabelle 15-15: Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Ni [%]
0,28	0,16	1,37	2,57	0,08	0,18	0,039	5,67	0,004

Ga [%]	V [%]	Al
<b>0,009</b>	0,014	rest

Tabelle 15-16: Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Al
0,34	0,33	1,10	3,00	0,09	0,03	0,056	5,04	rest

Tabelle 15-17: Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
577	517	9,5

**EN AW 2017 T451**

Tabelle 15-18: Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Ni [%]
0,24	0,67	4,30	0,83	0,8	0,02	-	0,08	

Tabelle 15-19: Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Al
0,24	0,65	4,47	0,85	0,78	0,02	0,04	0,08	rest

Tabelle 15-20: Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
433	286	16,4

**EN AW 6082**

Tabelle 15-21: Legierungszusammensetzung laut Lieferspezifikation

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Ni [%]
0,22	1,03	0,16	0,73	0,99	0,02	0,02	0,07	0,005

Tabelle 15-22: Legierungszusammensetzung laut Spektralanalyse

Fe [%]	Si [%]	Cu [%]	Mg [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ti [%]	Zn [%]	Al
0,24	1,14	0,09	0,84	0,57	0,03	0,04	0,05	rest

Tabelle 15-23: Mechanische Kennwerte laut Lieferspezifikation

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]
295	240	7

## Legierung EN AW 5754

Tabelle 15-24: Spanbilder der 5754-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

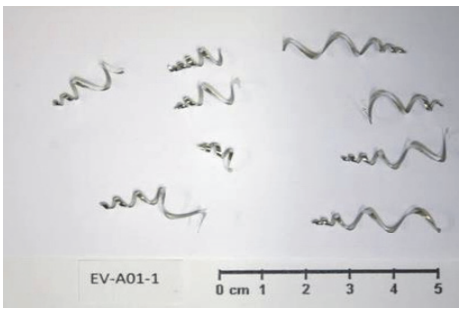
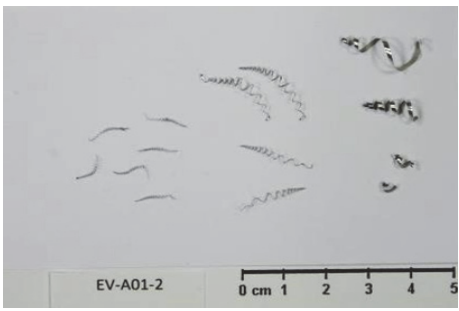
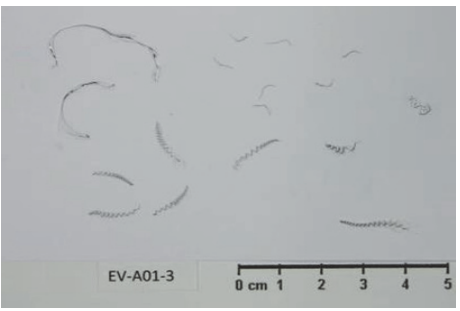
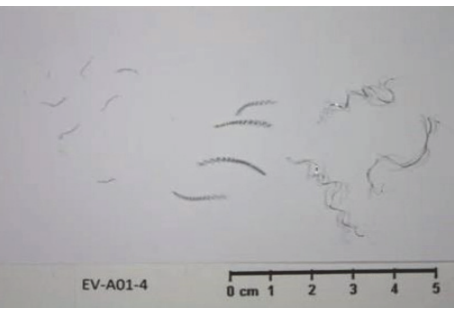
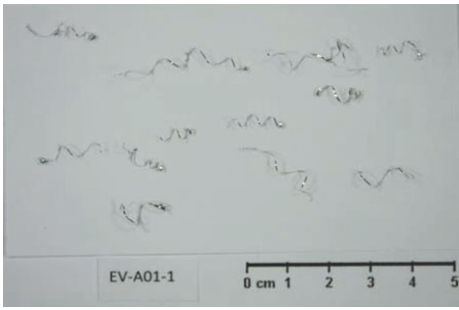
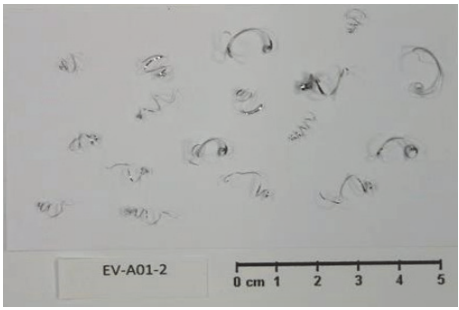
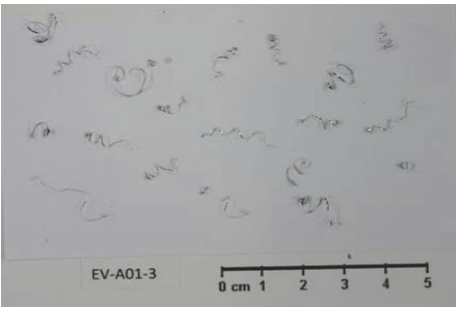
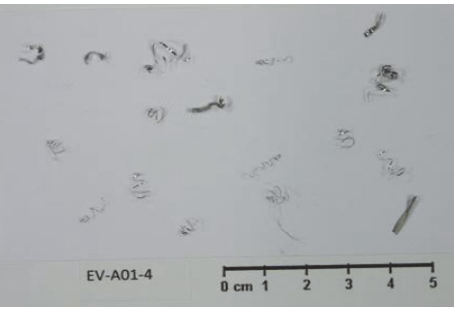
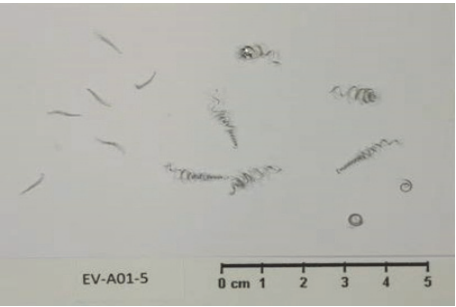
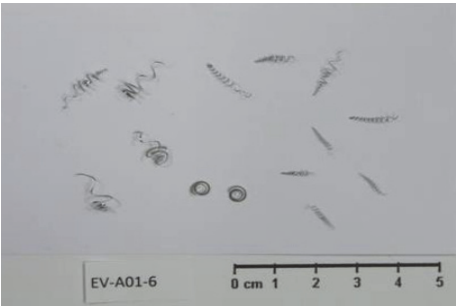

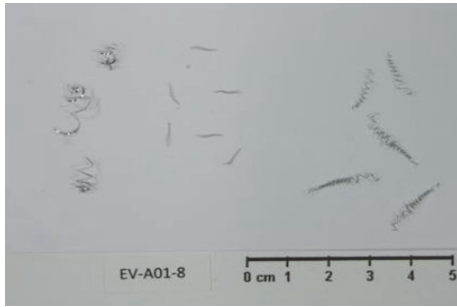
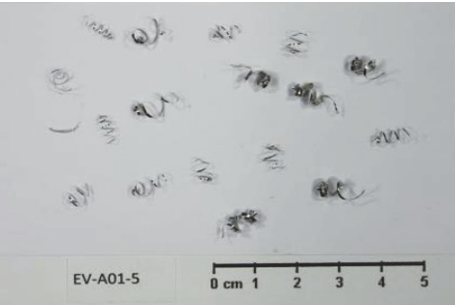
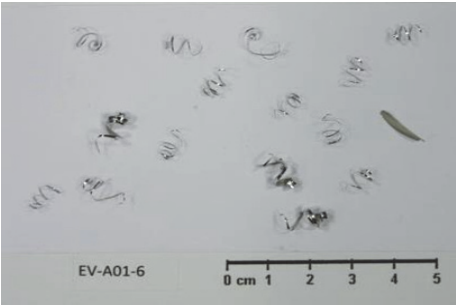
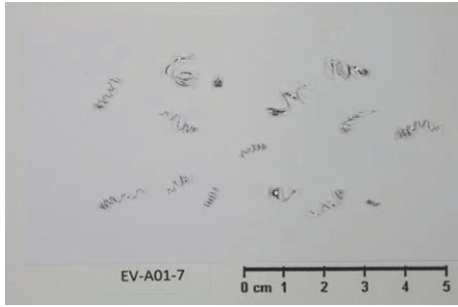
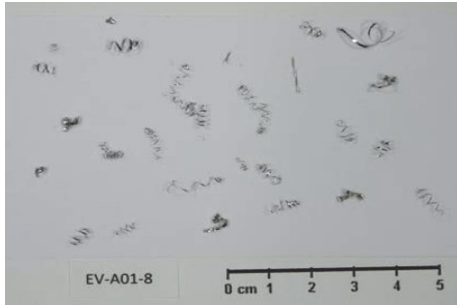
	S = 10.000 1/min F = 1.500 mm/min (7)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7)	S = 10.000 1/min F = 800 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
H				
D				

Tabelle 15-25: Spanbilder der 5754-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

	S = 7.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,8,3)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,8,3)	S = 7.000 1 /min F = 800 mm/min (7,8)	S = 7.000 1/min F = 1.000 mm/min (8,3)
<b>H</b>				
	S = 7.000 1/min F = 3.000 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 4.000 mm/min (7)	S = 7.000 1 /min F = 1.000 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7)
<b>D</b>				

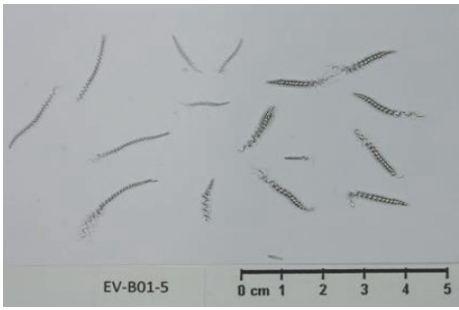
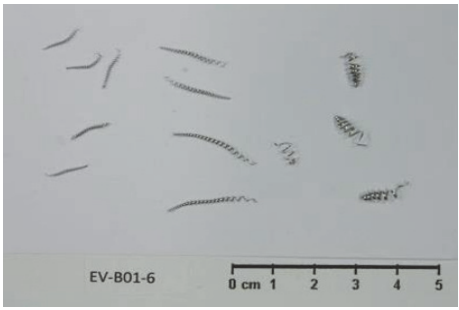
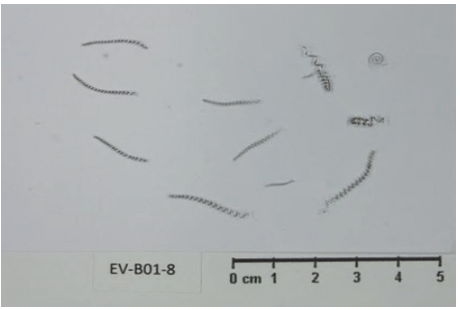
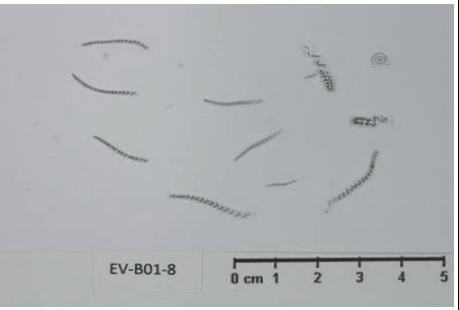
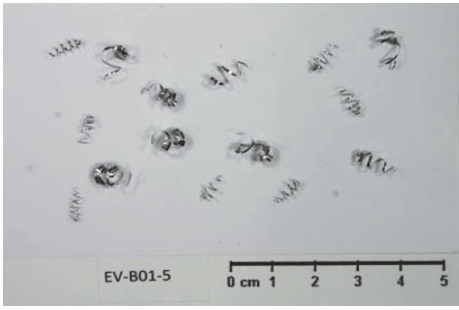
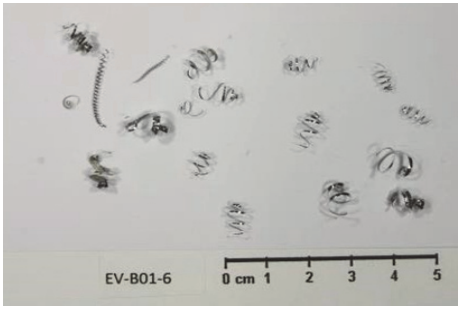
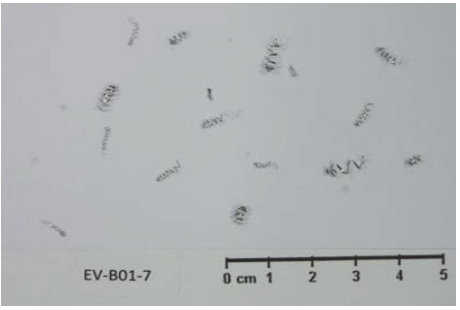
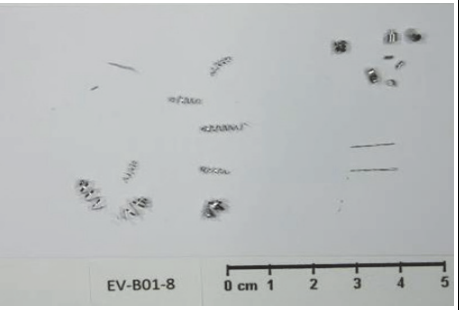


## Legierung EN AW 5083

Tabelle 15-26: Spanbilder der 5083-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

	S = 10.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 800 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
H	 EV-B01-1 0 cm 1 2 3 4 5	 EV-B01-2 0 cm 1 2 3 4 5	 EV-B01-3 0 cm 1 2 3 4 5	 EV-B01-4 0 cm 1 2 3 4 5
	S = 10.000 1/min F = 3.000 mm/min (7,8)	S = 10.000 1/min F = 4.000 mm/min (7)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,?)
D	 EV-B01-1 0 cm 1 2 3 4 5	 EV-B01-2 0 cm 1 2 3 4 5	 EV-B01-3 0 cm 1 2 3 4 5	 EV-B01-4 0 cm 1 2 3 4 5

Tabelle 15-27: Spanbilder der 5083-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

	S = 7.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)	S = 7.000 1/min F = 800 mm/min (7,3,8)	S = 7.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
<b>H</b>				
	S = 7.000 1/min F = 3.000 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 4.000 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 1.000 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,8)
<b>D</b>				

## Legierung EN AW 7075

Tabelle 15-28: Spanbilder der 7075-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

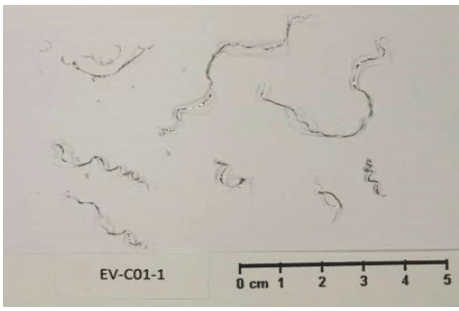
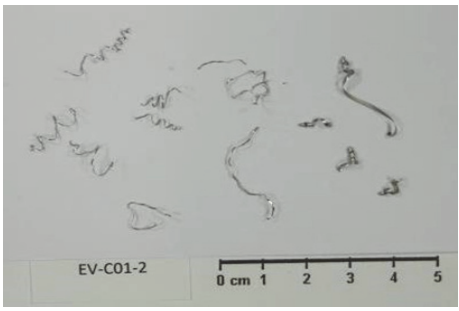
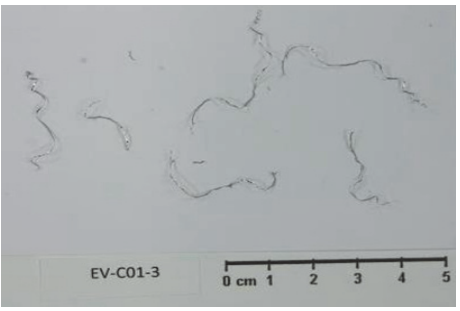
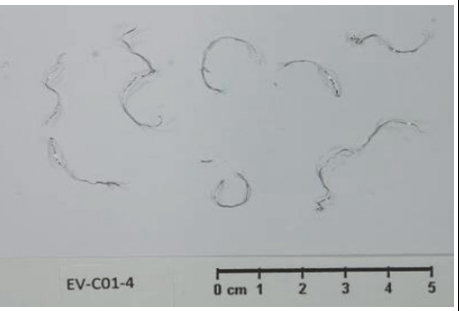
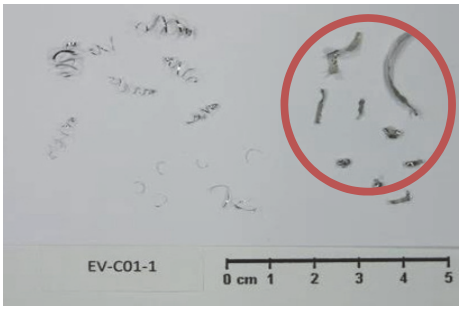
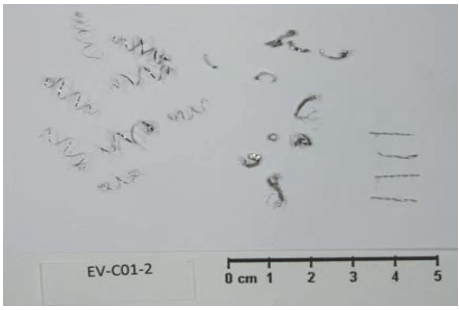
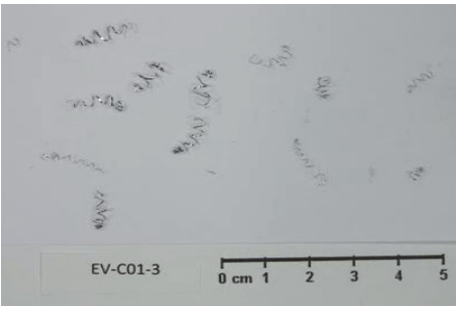
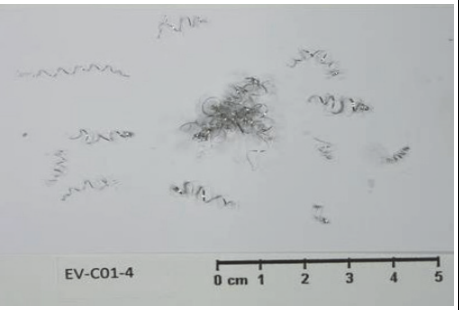
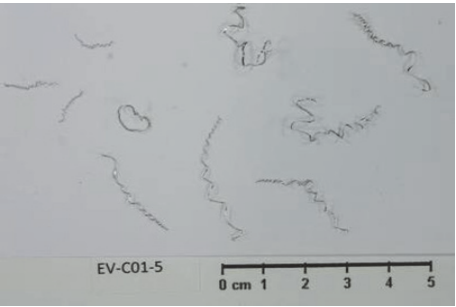
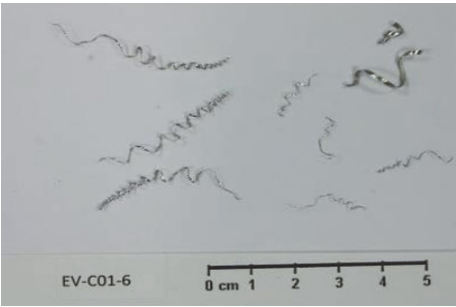
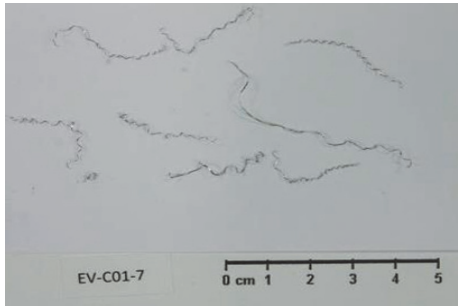
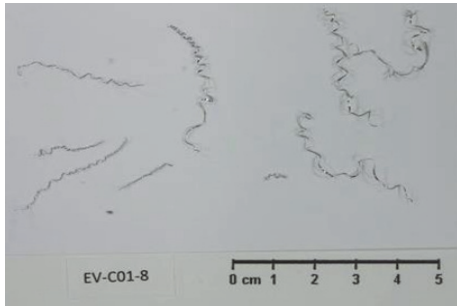
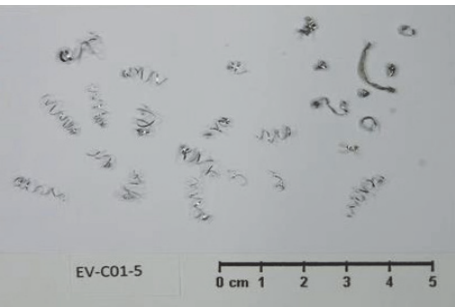
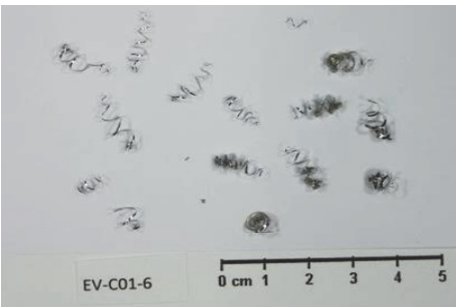
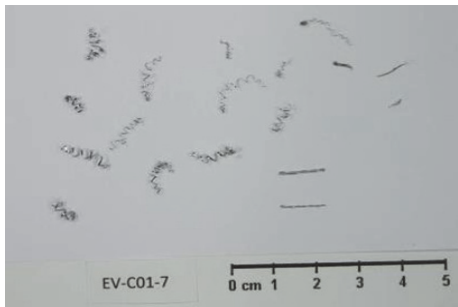
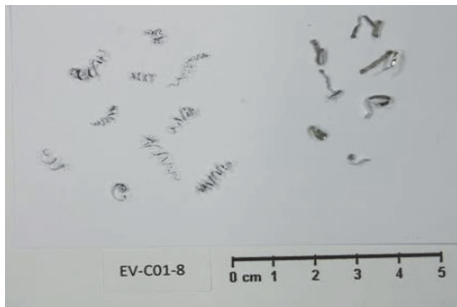
	S = 10.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 800 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
<b>H</b>				
	S = 10.000 1/min F = 3.000 mm/min (7,?)	S = 10.000 1/min F = 4.000 mm/min (7,8)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)
<b>D</b>				

Tabelle 15-29: Spanbilder der 7075-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

	S = 7.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)	S = 7.000 1 /min F = 800 mm/min (3)	S = 7.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
<b>H</b>				
<b>D</b>				

**Legierung EN AW 2017**

Tabelle 15-30: Spanbilder der 2017-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

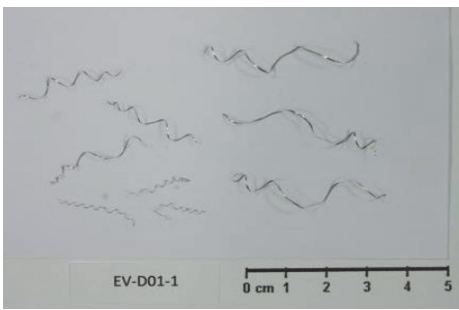
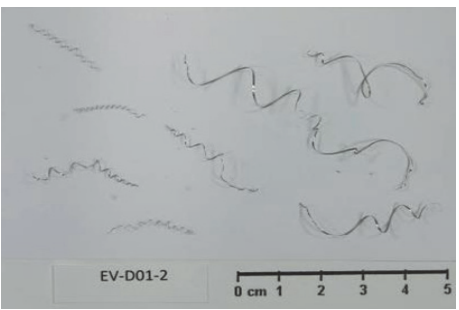

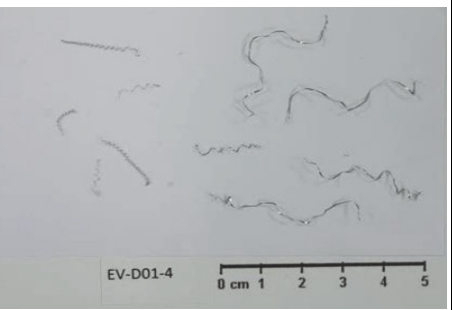
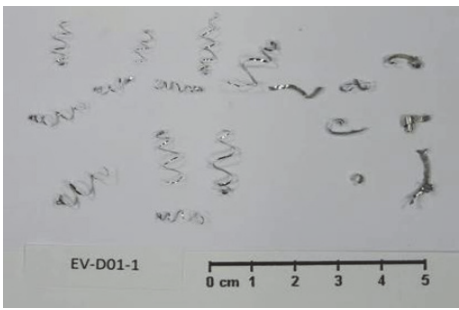
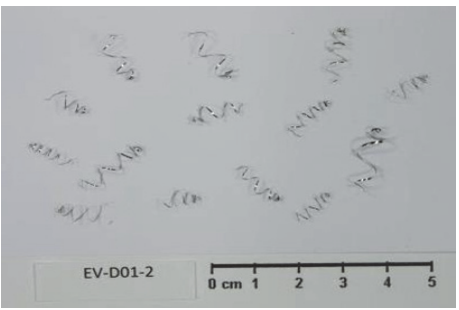
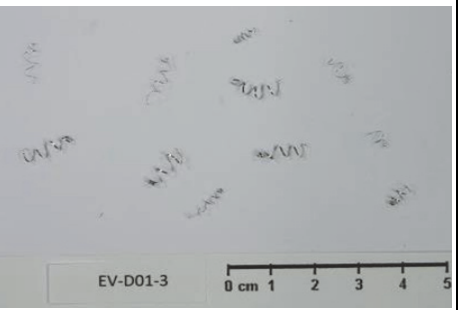
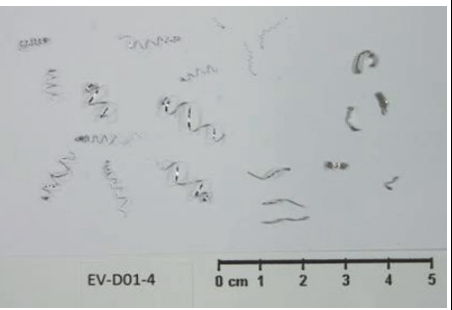
	S = 10.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 800 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
<b>H</b>				
	S = 10.000 1/min F = 3.000 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 4.000 mm/min (7)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7)
<b>D</b>				

Tabelle 15-31: Spanbilder der 7075-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

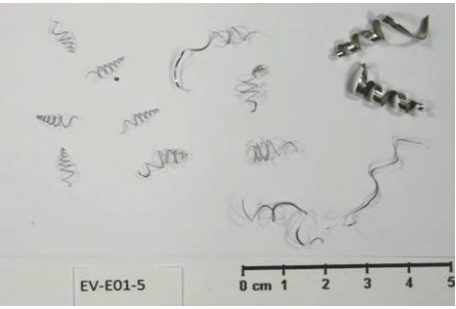

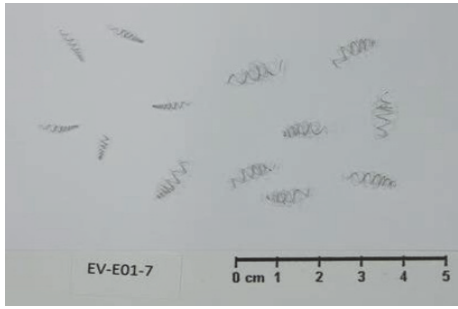
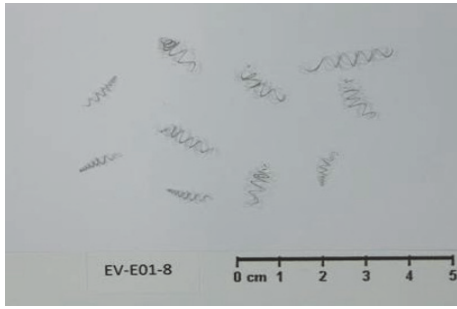
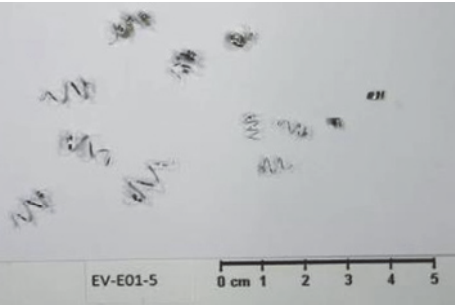
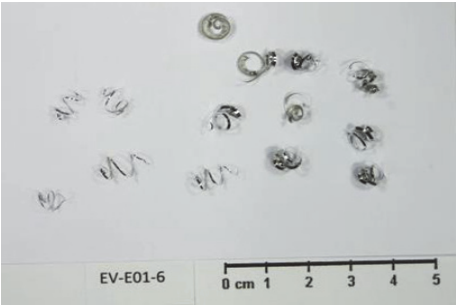
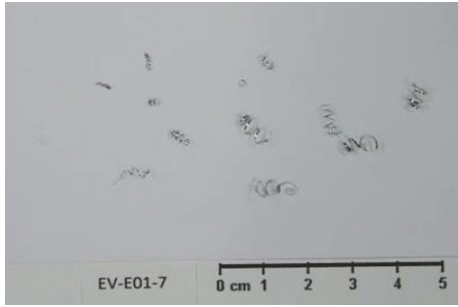
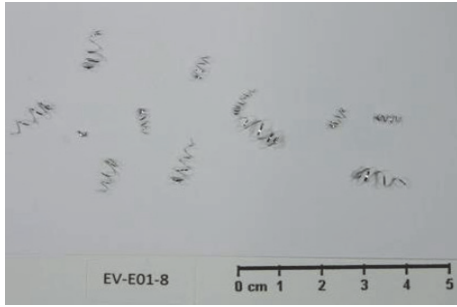
	S = 7.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3,4)	S = 7.000 1 /min F = 800 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
<b>H</b>	 EV-D01-5	 EV-D01-6	 EV-E01-7	 EV-D01-8
	S = 7.000 1/min F = 3.000 mm/min (7,8)	S = 7.000 1/min F = 4.000 mm/min (7)	S = 7.000 1 /min F = 1.000 mm/min (7,8)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,6)
<b>D</b>	 EV-D01-5	 EV-D01-6	 EV-D01-7	 EV-D01-8

## Legierung EN AW 6082

Tabelle 15-32: Spanbilder der 6082-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

	S = 10.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 800 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
<b>H</b>	 EV-E01-1	 EV-E01-2	 EV-E01-3	 EV-E01-4
	S = 10.000 1/min F = 3.000 mm/min (7,5,8)	S = 10.000 1/min F = 4.000 mm/min (7,5)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,5)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,5)
<b>D</b>	 EV-E01-1	 EV-E01-2	 EV-E01-3	 EV-E01-4

Tabelle 15-33: Spanbilder der 6082-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

	S = 7.000 1/min F = 1.500 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,8)	S = 7.000 1/min F = 800 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 1.000 mm/min (7)
H				
D				



## Legierung EN AW 6082, zweiter Anbieter

Tabelle 15-34: Spanbilder der 6082-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 10.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

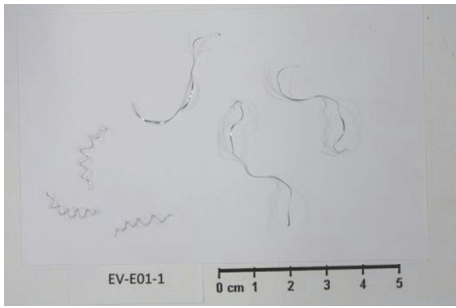
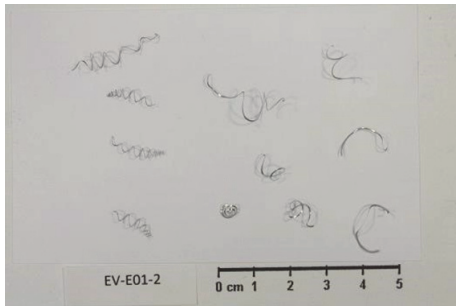
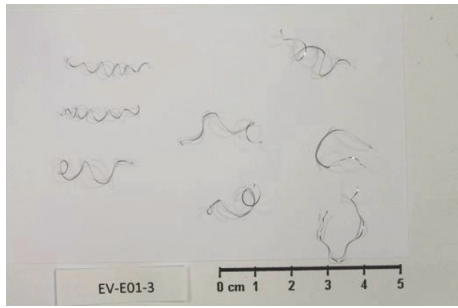
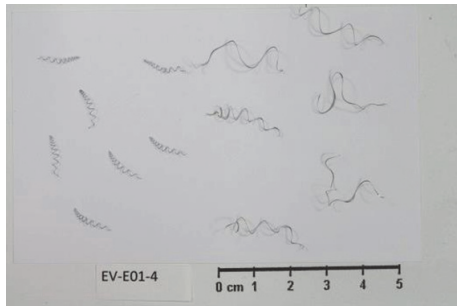
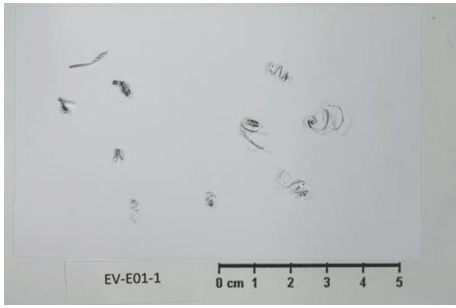
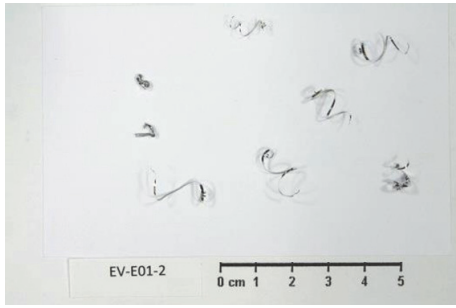
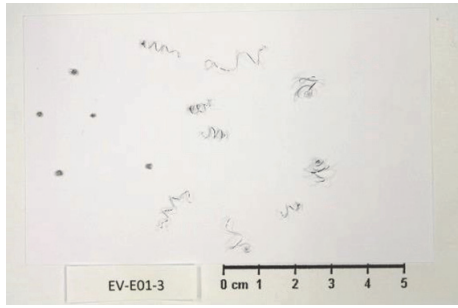
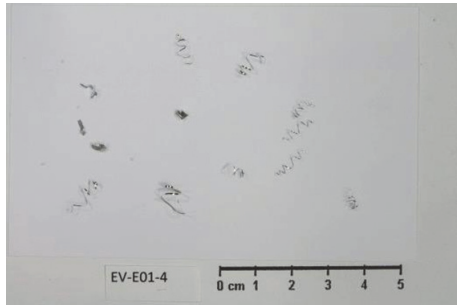
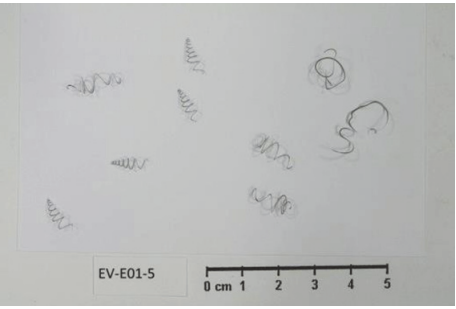
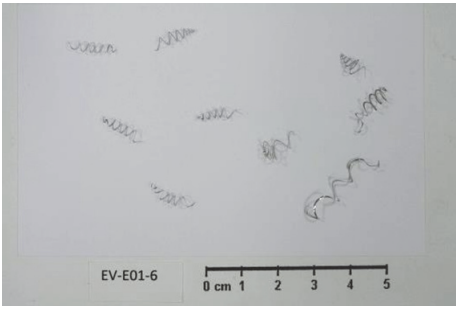
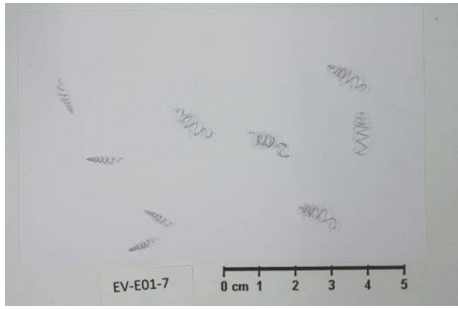
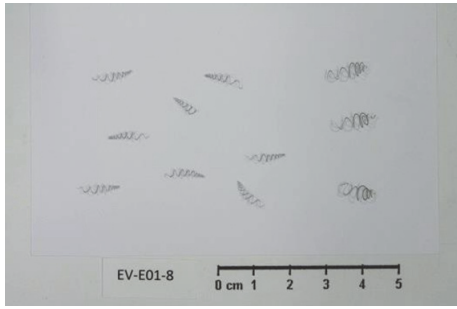

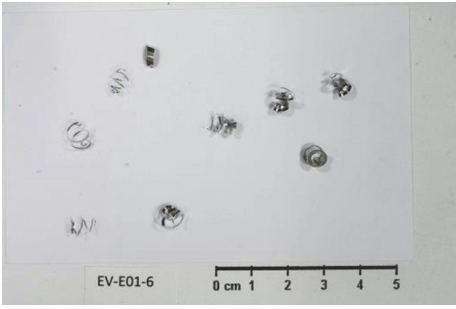
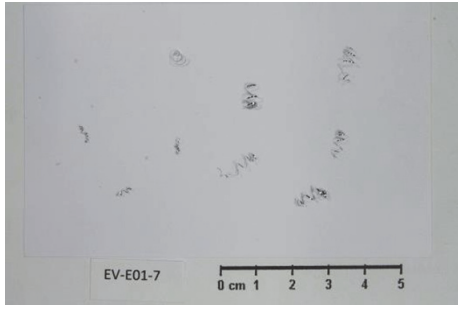
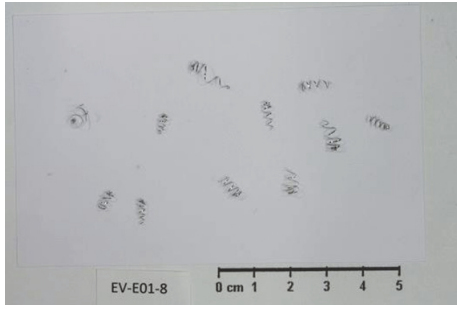
	S = 10.000 1/min F = 1.500 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 800 mm/min (7,3)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,3)
H				
	S = 10.000 1/min F = 3.000 mm/min (7,5,8)	S = 10.000 1/min F = 4.000 mm/min (7,5)	S = 10.000 1/min F = 1.000 mm/min (7,5)	S = 10.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,5)
D				

Tabelle 15-35: Spanbilder der 6082-Legierung mit unterschiedlichen Prozessparametern; Die Bewertung der Spanklasse ist neben den Vorschubwerten (F) angeführt; S beschreibt die beaufschlagten Drehzahlen und beträgt 7.000 1/min; H und D kennzeichnen das jeweils eingesetzte Schneidwerkzeug

	S = 7.000 1/min F = 1.500 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7,8)	S = 7.000 1 /min F = 800 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 1.000 mm/min (7)
H				
	S = 7.000 1/min F = 3.000 mm/min (7,8)	S = 7.000 1/min F = 4.000 mm/min (7,8)	S = 7.000 1 /min F = 1.000 mm/min (7)	S = 7.000 1/min F = 2.000 mm/min (7)
D				

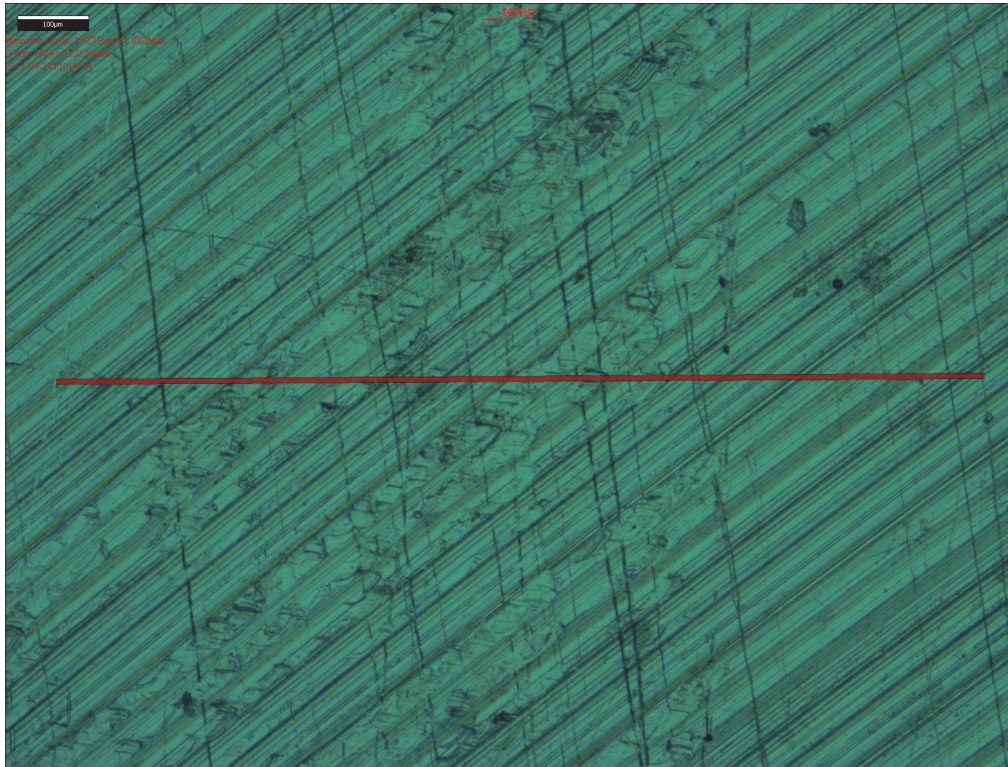


Abbildung 15-1: Rauigkeitsmessung mit Linienprofil auf einer EV\_B01\_1-Probe (Bearbeitung durch eine Diamantschneide)

Tabelle 15-36: Ergebnisdarstellung einer Rauigkeitsanalyse mittels ALICONA-Konvokalmikroskop der 5083-Legierung nach Diamantzerspannung mit 10.000 Umdrehungen pro Minute und 3.000 mm Vorschub pro Minierte

Parameter	Wert		Beschreibung
$R_a$	870	nm	Mittlere Rauheit des Profils
$R_q$	10,73	$\mu\text{m}$	Quadratische Rauheit des Profils
$R_t$	52,4	$\mu\text{m}$	Gesamthöhe des Rauheitsprofil
$R_z$	39,6	$\mu\text{m}$	Gemittelte Höhe des Rauheitsprofil
$R_{\text{max}}$	52,4	$\mu\text{m}$	Maximale Höhe des Rauheitsprofil innerhalb einer Einzelmessstrecke
$R_p$	28,5	$\mu\text{m}$	Höhe der größten Profilspitze des Rauheitsprofil
$R_v$	23,9	$\mu\text{m}$	Tiefe des größten Profilitales des Rauheitsprofil
$R_c$	33,1	$\mu\text{m}$	Mittlere Höhe der Profilunregelmäßigkeiten des Rauheitsprofil
$R_{\text{sm}}$	128,7	$\mu\text{m}$	Mittlerer Abstand der Profilunregelmäßigkeiten des Rauheitsprofil
$R_{\text{sk}}$	0,034		Schiefe des Rauheitsprofil
$R_{\text{ku}}$	26,9		Steilheit des Rauheitsprofil
$R_{\text{dq}}$	0,077		Quadratischer Mittelwert der Profilsteigung des Rauheitsprofil
$R_t/R_z$	13,25		Extreme Kratzer/Spitzen-Wert von Rauheitsprofil, ( $\geq 1$ ), höhere Werte bedeuten größere Kratzer/Spitzen

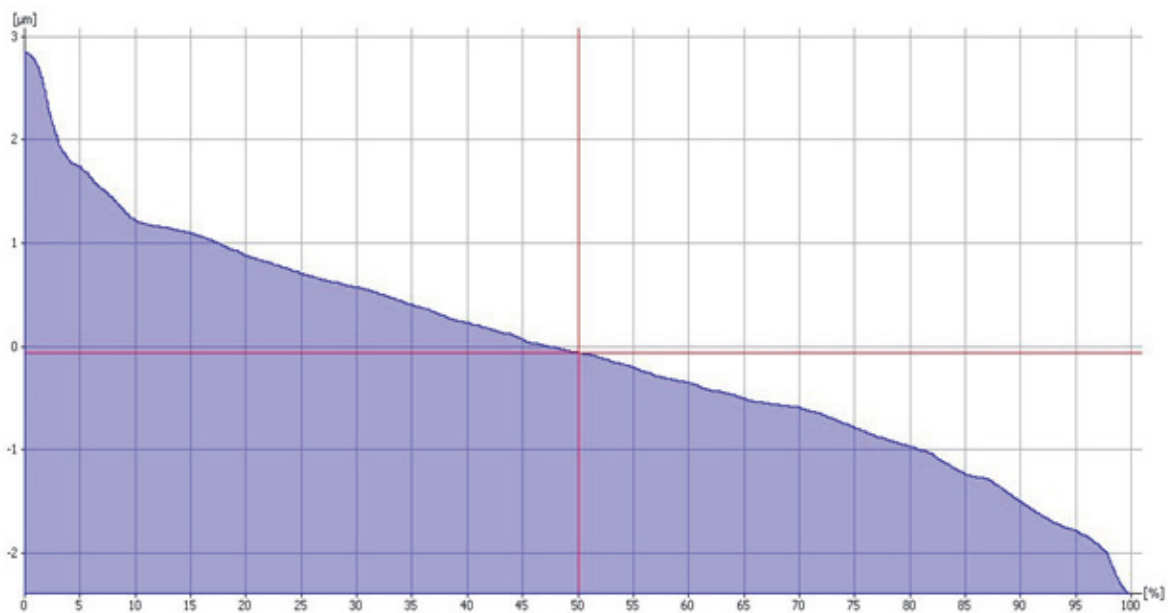


Abbildung 15-2: Traglastkurve einer diamantgefrästen 5083-Legierung ( $D = 10.000 \text{ 1/min}$ ,  $f = 3.000 \text{ mm/min}$ )

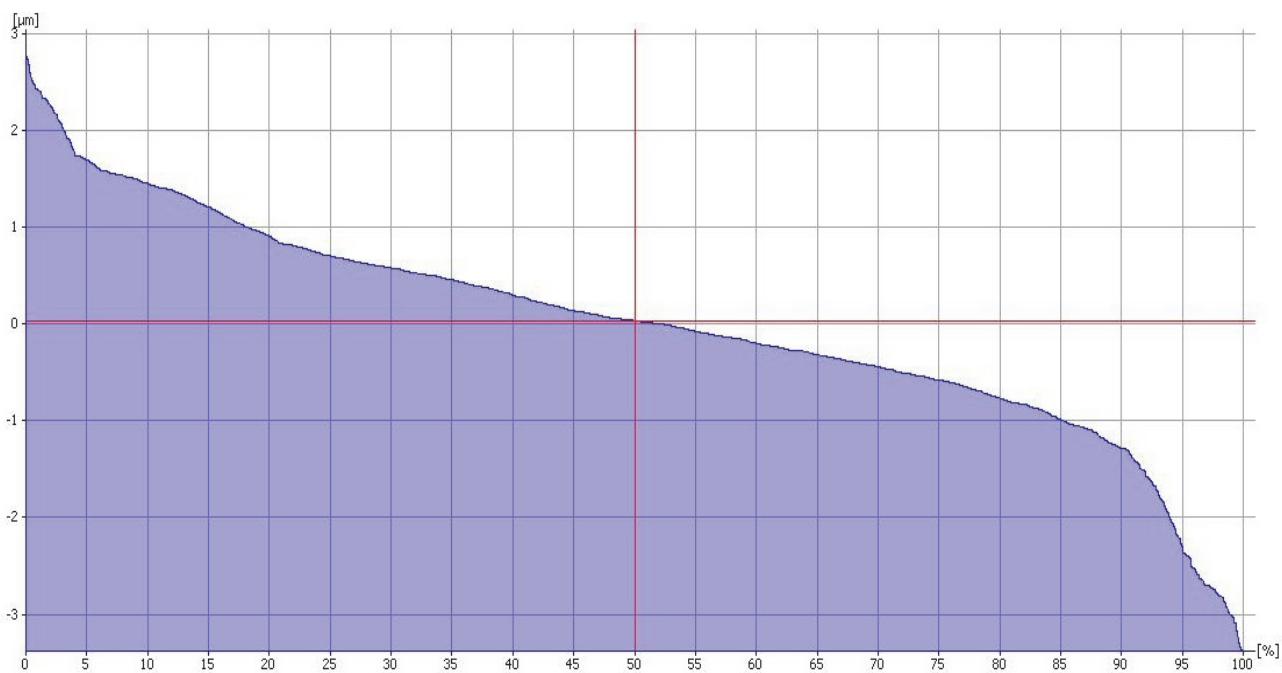


Abbildung 15-3: Traglastkurve der 5083-Legierung nach der Zerspanung mit Hartmetallfräsen

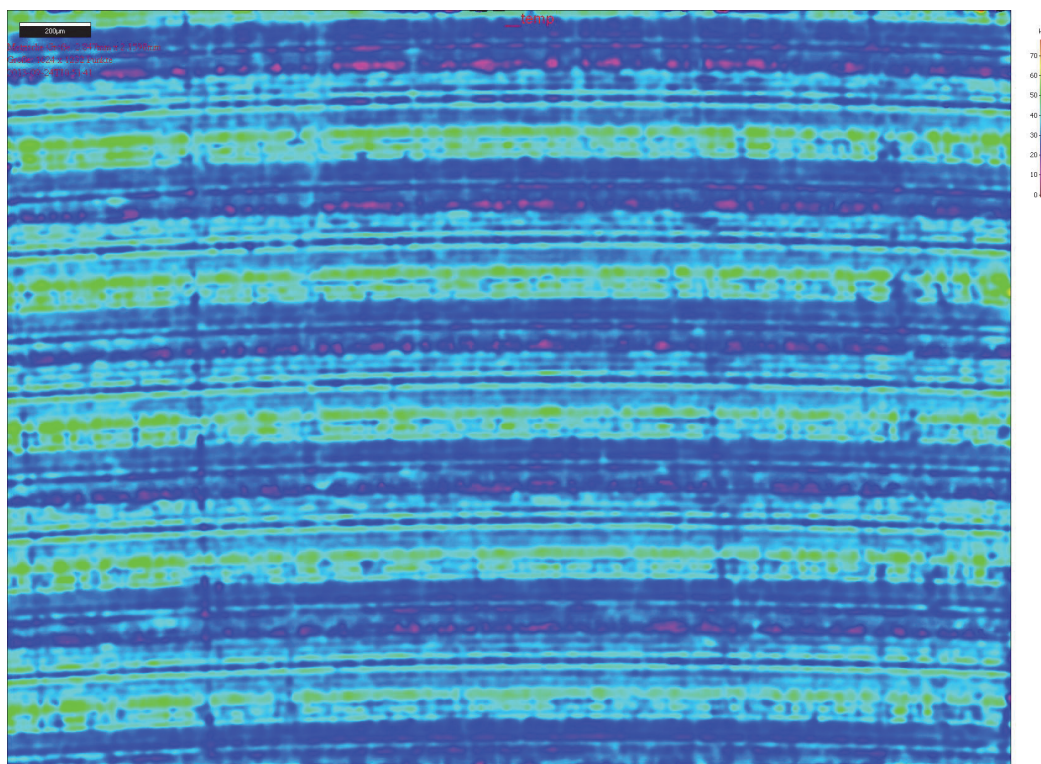


Abbildung 15-4: Zerspanung einer 5083-Legierung mit Hartmetallfräsen bei einer Drehzahl von 10.000 Umdrehungen pro Minute und einem Vorschub von 2.000 mm pro Minute

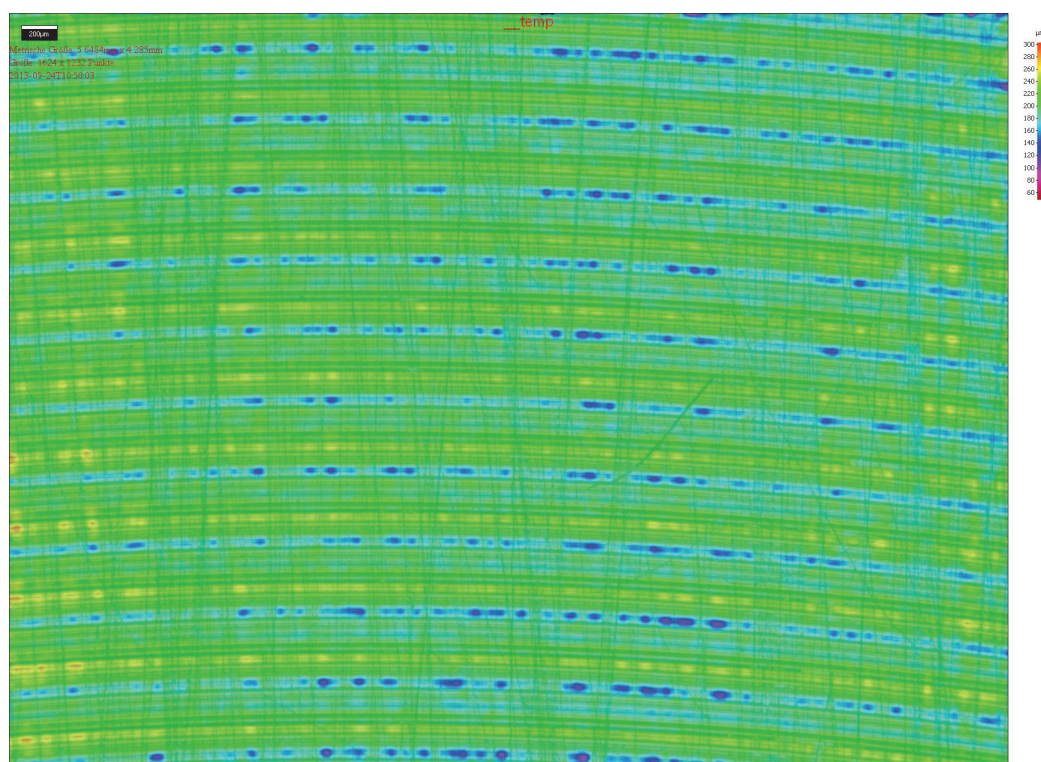


Abbildung 15-5: Zerspanung einer 5083-Legierung mit Hartmetallfräsen bei einer Drehzahl von 7.000 Umdrehungen pro Minute und einem Vorschub von 2.000 mm pro Minute

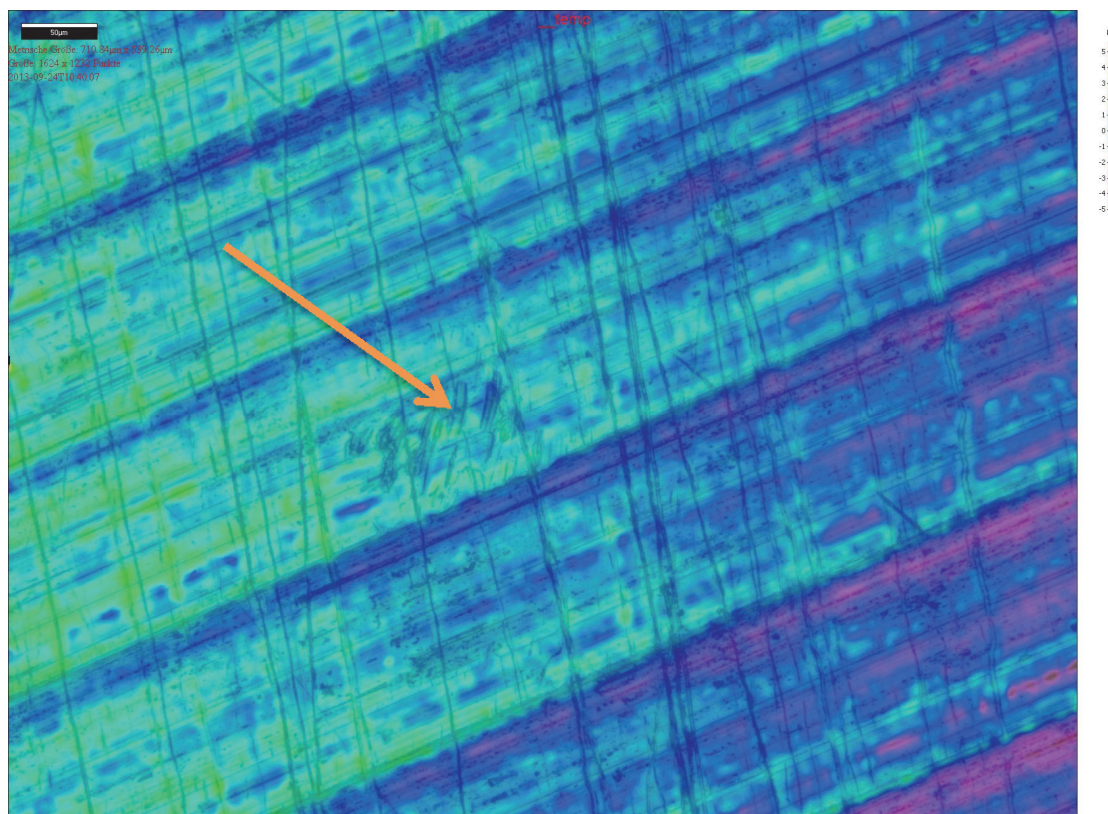


Abbildung 15-6: Oberfläche einer 5083-Legierung nach der Zerspanung mit Hartmetallfräsköpfen

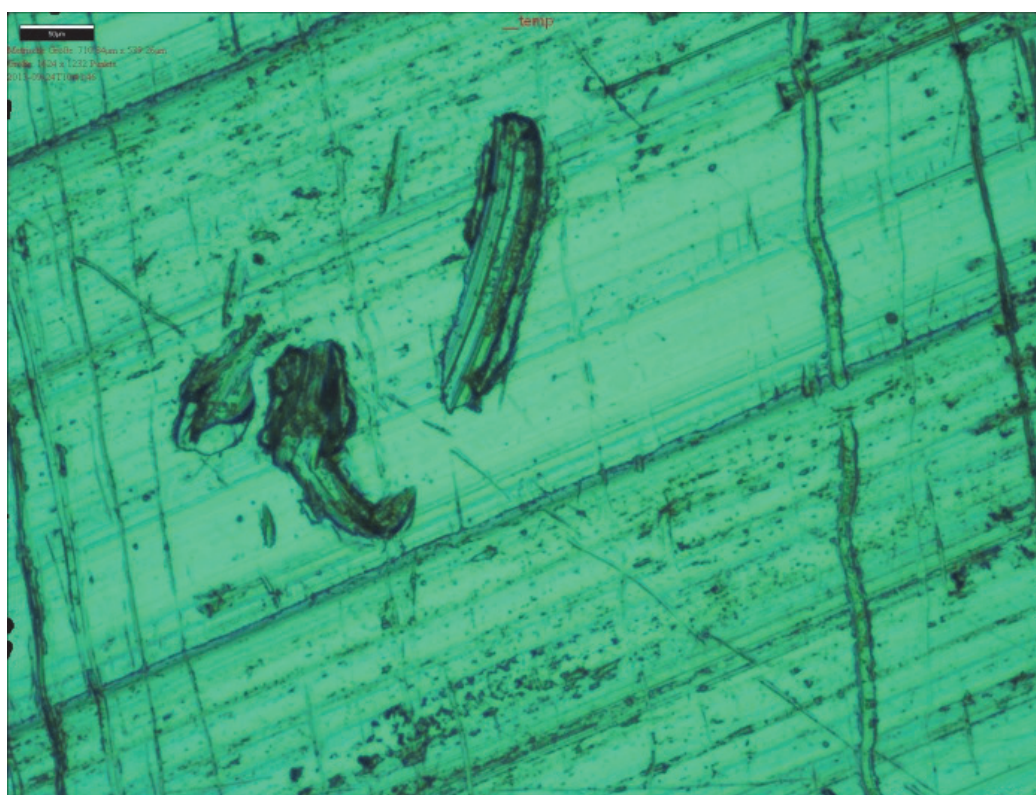


Abbildung 15-7: Detailansicht eines Oberflächendefektes nach der Hartmetallzerspanung von 5083-Aluminium

**Legierung EN AW 5754**Tabelle 15-37: Härtewerte der Legierung EN AW 5754 auf beiden Bearbeitungsseiten  
(Diamant- und Hartmetallschneiden)

Probe Diamant	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]	Probe Hartm.	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]
1	67,6	67,4	67,4	67,5	1	67,6	67,9	67,5	67,7
2	-	-	-	-	2	-	-	-	-
3	67,7	69,9	68,8	68,8	3	68,2	69,3	68,3	68,6
4	67,5	67,3	67	67,3	4	66,2	66,8	67	66,7
5	67,7	68,8	67,9	68,1	5	68,1	66,9	66,7	67,2
6	65	61,3	60,8	61,4	6	62,8	62,4	64	63,1
7	68,6	67,9	67,4	68,0	7	66,4	66,6	66,7	66,6
8	67,4	66,7	68,6	67,6	8	66,5	66,2	66,1	66,3
9	67,2	67,9	67,0	67,4	9	69,1	68,6	69,0	68,9

**Legierung EN AW 5083**Tabelle 15-38: Härtewerte der Legierung EN AW 5083 auf beiden Bearbeitungsseiten  
(Diamant- und Hartmetallschneiden)

Probe Diamant	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]	Probe Hartm.	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]
1	82,4	81,6	82,2	82,1	1	81,1	80,3	80,4	80,6
2	81,4	81,6	80,8	81,3	2	81,7	82,4	81,7	81,9
3	82,9	82,6	83	82,8	3	80,9	80,8	80,4	80,7
4	84,1	84,3	84,3	84,2	4	83,3	82,6	83	83,0
5	81,3	81,7	80,5	81,2	5	80,7	80,2	80,8	80,6
6	85,5	84,7	86,2	85,5	6	84,3	83,7	84,7	84,2
7	87,0	85,4	84,8	85,7	7	83,3	83,9	82,9	83,4
8	85,8	85,7	86,4	86,0	8	83,9	83,9	84,7	84,2
9	83,6	82,5	81,8	82,6	9	80,7	81,4	81,3	81,1

**Legierung EN AW 7075**Tabelle 15-39: Härtewerte der Legierung EN AW 7075 auf beiden Bearbeitungsseiten  
(Diamant- und Hartmetallschneiden)

Probe Diamant	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]	Probe Hartm.	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]
1	175	174	173	174	1	179	179	178	179
2	172	172	173	172	2	179	180	177	179
3	172	174	174	173	3	178	177	179	178
4	173	173	170	172	4	180	178	181	180
5	173	170	171	171	5	181	181	177	180
6	170	173	173	172	6	179	178	178	178
7	172	172	172	172	7	182	182	179	181
8	170	173	175	173	8	180	177	178	178
9	173	175	172	173	9	180	178	181	180

**Legierung EN AW 2017**Tabelle 15-40: Härtewerte der Legierung EN AW 2017 auf beiden Bearbeitungsseiten  
(Diamant- und Hartmetallschneiden)

Probe Diamant	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]	Probe Hartm.	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]
1	119	118	120	119	1	123	124	121	123
2	121	117	117	118	2	121	121	120	121
3	119	121	120	120	3	119	123	121	121
4	118	119	119	119	4	123	123	122	123
5	120	118	117	118	5	121	120	121	121
6	119	118	117	118	6	121	119	120	120
7	118	118	119	118	7	120	122	120	121
8	118	118	119	118	8	123	121	121	122
9	119	118	119	119	9	125	124	125	125

**Legierung EN AW 6082**Tabelle 15-41: Härtewerte der Legierung EN AW 6082 auf beiden Bearbeitungsseiten  
(Diamant- und Hartmetallschneiden)

Probe Diamant	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]	Probe Hartm.	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]
1	101	103	101	102	1	101	100	101	101
2	100	102	101	101	2	101	101	102	101
3	101	98,6	103	101	3	101	102	99,8	101
4	102	99,3	99,5	100	4	102	100	99,5	101
5	100	100	100	100	5	101	101	101	101
6	100	98,6	99,5	99,0	6	99,1	99,1	101	101
7	101	99,3	99,5	100	7	101	101	101	101
8	97,4	99,8	102	100	8	101	100	101	101
9	102	101	102	102	9	99,6	99,3	100	100

**Legierung EN AW 6082 (anderer Anbieter)**Tabelle 15-42: Härtewerte der Legierung EN AW 6082 auf beiden Bearbeitungsseiten  
(Diamant- und Hartmetallschneiden)

Probe Diamant	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]	Probe Hartm.	Pos. 1 [HV]	Pos. 2 [HV]	Pos. 3 [HV]	MW [HV]
1	73,3	74,4	74	73,9	1	76,4	74,3	76,7	75,8
2	76,4	74,4	76,2	75,7	2	75,4	76,4	76,0	75,9
3	77,4	77,0	76,2	76,9	3	76,8	75,5	75,3	75,9
4	72,3	72,1	72,1	72,2	4	77,5	76,3	74,1	76,0
5	74,9	75,8	75,6	75,4	5	75,1	73,1	74,7	74,3
6	73,8	73,9	74,4	74,0	6	74,8	73,9	75	74,6
7	72,4	74,2	74,0	73,5	7	73,0	76,3	74,7	74,7
8	74,1	72,3	73,3	73,2	8	74,9	74,6	72,7	74,1
9	74,4	74,7	72,8	74,0	9	74,4	76,3	74,4	75,0



**EN AW 5754 – ALFUN**

Tabelle 15-43: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach den Prozessparametern)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-A01-7	7000	800	0,493	✓
EV-A01-8	7000	1000	0,634	✓
EV-A01-5	7000	1500	0,677	✓
EV-A01-6	7000	2000	0,899	x
EV-A01-3	10000	800	0,567	✓
EV-A01-4	10000	1000	0,634	✓
EV-A01-1	10000	1500	0,669	✓
EV-A01-2	10000	2000	0,943	x

Tabelle 15-44: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach den Rauigkeitswerten)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-A01-7	7000	800	0,493	✓
EV-A01-3	10000	800	0,567	✓
EV-A01-8	7000	1000	0,634	✓
EV-A01-4	10000	1000	0,634	✓
EV-A01-1	10000	1500	0,669	✓
EV-A01-5	7000	1500	0,677	✓
EV-A01-6	7000	2000	0,899	x
EV-A01-2	10000	2000	0,943	x

Tabelle 15-45: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-A01-1	0,32	1,55	0,20	1,13
EV-A01-2	0,54	3,09	0,41	2,35
EV-A01-3	0,45	2,67	0,43	2,46
EV-A01-4	0,34	1,89	0,33	1,74
EV-A01-5	0,44	2,03	0,37	2,20
EV-A01-6	0,45	2,36	0,33	2,09
EV-A01-7	0,29	2,00	0,30	1,51
EV-A01-8	0,42	1,97	0,44	2,40
EV-A01-9	0,33	1,03	0,19	1,11

Tabelle 15-46: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach den Prozessparametern)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-A01-7	7000	1000	0,342	✓
EV-A01-8	7000	2000	0,310	✓
EV-A01-5	7000	3000	0,469	✓
EV-A01-6	7000	4000	0,681	✓
EV-A01-3	10000	1000	0,284	✓
EV-A01-4	10000	2000	0,396	✓
EV-A01-1	10000	3000	0,467	✓
EV-A01-2	10000	4000	0,543	✓

Tabelle 15-47: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach den Rauigkeitswerten)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-A01-3	10000	1000	0,284	✓
EV-A01-8	7000	2000	0,310	✓
EV-A01-7	7000	1000	0,342	✓
EV-A01-4	10000	2000	0,396	✓
EV-A01-1	10000	3000	0,467	✓
EV-A01-5	7000	3000	0,469	✓
EV-A01-2	10000	4000	0,543	✓
EV-A01-6	7000	4000	0,681	✓

Tabelle 15-48: Oberflächenrauigkeit der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-A01-1	0,43	2,05	0,44	2,18
EV-A01-2	0,42	3,18	0,40	2,19
EV-A01-3	0,46	2,86	0,44	2,78
EV-A01-4	0,28	1,54	0,17	1,05
EV-A01-5	0,29	1,74	0,16	0,95
EV-A01-6	0,30	1,77	0,13	0,95
EV-A01-7	0,26	1,40	0,15	0,91
EV-A01-8	0,28	1,70	0,15	1,30
EV-A01-9	0,30	1,94	0,16	0,83

### EN AW 5083 – ALFUN

Tabelle 15-49: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-B01-7	7000	800	0,35	✓
EV-B01-8	7000	1000	0,245	✓
EV-B01-5	7000	1500	0,563	✓
EV-B01-6	7000	2000	0,5	✓
EV-B01-3	10000	800	0,182	✓
EV-B01-4	10000	1000	0,247	✓
EV-B01-1	10000	1500	0,538	✓
EV-B01-2	10000	2000	0,392	✓

Tabelle 15-50: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeitswerten)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-B01-3	10000	800	0,182	✓
EV-B01-8	7000	1000	0,245	✓
EV-B01-4	10000	1000	0,247	✓
EV-B01-7	7000	800	0,35	✓
EV-B01-2	10000	2000	0,392	✓
EV-B01-6	7000	2000	0,5	✓
EV-B01-1	10000	1500	0,538	✓
EV-B01-5	7000	1500	0,563	✓

Tabelle 15-51: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (Messungen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-B01-1	0,33	1,74	0,41	2,00
EV-B01-2	0,41	2,00	0,36	1,81
EV-B01-3	0,25	1,11	0,28	1,38
EV-B01-4	0,26	1,27	0,21	0,82
EV-B01-5	0,28	1,37	0,29	1,42
EV-B01-6	0,27	1,68	0,24	1,45
EV-B01-7	0,24	1,32	0,22	0,90
EV-B01-8	0,26	1,28	0,27	1,48
EV-b01-9	0,07	0,45	0,05	0,38

Tabelle 15-52: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [µm]	Toleranz (Ra = 0,8 µm)
EV-B01-7	7000	1000	0,316	✓
EV-B01-8	7000	2000	0,464	✓
EV-B01-5	7000	3000	0,392	✓
EV-B01-6	7000	4000	0,723	✓
EV-B01-3	10000	1000	0,283	✓
EV-B01-4	10000	2000	0,403	✓
EV-B01-1	10000	3000	0,271	✓
EV-B01-2	10000	4000	0,306	✓

Tabelle 15-53: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeitswerten)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [µm]	Toleranz (Ra = 0,8 µm)
EV-B01-1	10000	3000	0,271	✓
EV-B01-3	10000	1000	0,283	✓
EV-B01-2	10000	4000	0,306	✓
EV-B01-7	7000	1000	0,316	✓
EV-B01-5	7000	3000	0,392	✓
EV-B01-4	10000	2000	0,403	✓
EV-B01-8	7000	2000	0,464	✓
EV-B01-6	7000	4000	0,723	✓

Tabelle 15-54: Oberflächenrauigkeit der 5083-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-B01-3	0,26	1,43	0,23	1,18
EV-B01-4	0,28	1,64	0,13	0,80
EV-B01-5	0,28	1,65	0,14	0,93
EV-B01-8	0,28	1,74	0,13	0,86
EV-B01-1	0,29	1,69	0,13	0,70
EV-B01-6	0,29	1,75	0,16	1,04
EV-b01-9	0,29	1,82	0,15	1,06
EV-B01-7	0,30	1,63	0,14	0,98
EV-B01-2	0,32	1,97	0,15	0,90

**EN AW 7075 – ALFUN**

Tabelle 15-55: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-C01-7	7000	800	0,203	✓
EV-C01-8	7000	1000	0,140	✓
EV-C01-5	7000	1500	0,178	✓
EV-C01-6	7000	2000	0,205	✓
EV-C01-3	10000	800	0,116	✓
EV-C01-4	10000	1000	0,107	✓
EV-C01-1	10000	1500	0,2	✓
EV-C01-2	10000	2000	0,363	✓

Tabelle 15-56: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-C01-4	10000	1000	0,107	✓
EV-C01-3	10000	800	0,116	✓
EV-C01-8	7000	1000	0,140	✓
EV-C01-5	7000	1500	0,178	✓
EV-C01-1	10000	1500	0,2	✓
EV-C01-7	7000	800	0,203	✓
EV-C01-6	7000	2000	0,205	✓
EV-C01-2	10000	2000	0,363	✓

Tabelle 15-57: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeitswerten)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-C01-1	0,18	0,96	0,16	0,85
EV-C01-2	0,17	0,98	0,16	0,82
EV-C01-3	0,11	0,55	0,09	0,59
EV-C01-4	0,38	0,57	0,12	0,59
EV-C01-5	0,13	0,66	0,11	0,59
EV-C01-6	0,18	1,00	0,13	0,79
EV-C01-7	0,12	0,63	0,08	0,47
EV-C01-8	0,13	0,72	0,10	0,52
EV-C01-9	0,06	0,44	0,08	0,52

Tabelle 15-58: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-C01-7	7000	1000	0,308	✓
EV-C01-8	7000	2000	0,420	✓
EV-C01-5	7000	3000	0,351	✓
EV-C01-6	7000	4000	0,473	✓
EV-C01-3	10000	1000	0,248	✓
EV-C01-4	10000	2000	0,307	✓
EV-C01-1	10000	3000	0,437	✓
EV-C01-2	10000	4000	0,529	✓

Tabelle 15-59: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-C01-3	10000	1000	0,248	✓
EV-C01-4	10000	2000	0,307	✓
EV-C01-7	7000	1000	0,308	✓
EV-C01-5	7000	3000	0,351	✓
EV-C01-8	7000	2000	0,420	✓
EV-C01-1	10000	3000	0,437	✓
EV-C01-6	7000	4000	0,473	✓
EV-C01-2	10000	4000	0,529	✓

Tabelle 15-60: Oberflächenrauigkeit der 7075-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgei)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-C01-1	0,28	1,85	0,20	1,01
EV-C01-2	0,28	1,74	0,20	0,99
EV-C01-3	0,25	1,32	0,22	1,12
EV-C01-4	0,29	1,68	0,20	1,05
EV-C01-5	0,28	1,81	0,21	0,93
EV-C01-6	0,29	1,74	0,19	0,91
EV-C01-7	0,26	1,55	0,23	1,08
EV-C01-8	0,27	1,59	0,19	0,97
EV-C01-9	0,28	1,87	0,19	0,94

## EN AW 2017 – ALFUN

Tabelle 15-61: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-D01-7	7000	800	0,122	✓
EV-D01-8	7000	1000	0,17	✓
EV-D01-5	7000	1500	0,222	✓
EV-D01-6	7000	2000	0,204	✓
EV-D01-3	10000	800	0,094	✓
EV-D01-4	10000	1000	0,098	✓
EV-D01-1	10000	1500	0,130	✓
EV-D01-2	10000	2000	0,198	✓

Tabelle 15-62: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeit)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-D01-3	10000	800	0,094	✓
EV-D01-4	10000	1000	0,098	✓
EV-D01-7	7000	800	0,122	✓
EV-D01-1	10000	1500	0,130	✓
EV-D01-8	7000	1000	0,17	✓
EV-D01-2	10000	2000	0,198	✓
EV-D01-6	7000	2000	0,204	✓
EV-D01-5	7000	1500	0,222	✓

Tabelle 15-63: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-D01-1	0,11	0,68	0,12	0,60
EV-D01-2	0,14	0,78	0,18	0,74
EV-D01-3	0,09	0,49	0,07	0,46
EV-D01-4	0,09	0,54	0,10	0,49
EV-D01-5	0,14	0,82	0,15	0,79
EV-D01-6	0,16	1,00	0,12	0,72
EV-D01-7	0,10	0,57	0,07	0,48
EV-D01-8	0,13	0,76	0,10	0,72
EV-D01-9	0,08	0,49	0,07	0,66

Tabelle 15-64: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [µm]	Toleranz (Ra = 0,8 µm)
EV-D01-7	7000	1000	0,355	✓
EV-D01-8	7000	2000	0,377	✓
EV-D01-5	7000	3000	0,483	✓
EV-D01-6	7000	4000	0,67	✓
EV-D01-3	10000	1000	0,261	✓
EV-D01-4	10000	2000	0,329	✓
EV-D01-1	10000	3000	0,449	✓
EV-D01-2	10000	4000	0,422	✓

Tabelle 15-65: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [µm]	Toleranz (Ra = 0,8 µm)
EV-D01-3	10000	1000	0,261	✓
EV-D01-4	10000	2000	0,329	✓
EV-D01-7	7000	1000	0,355	✓
EV-D01-8	7000	2000	0,377	✓
EV-D01-2	10000	4000	0,422	✓
EV-D01-1	10000	3000	0,449	✓
EV-D01-5	7000	3000	0,483	✓
EV-D01-6	7000	4000	0,67	✓

Tabelle 15-66: Oberflächenrauigkeit der 2017-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-D01-1	0,28	2,01	0,20	1,02
EV-D01-2	0,30	1,81	0,15	0,70
EV-D01-3	0,24	1,30	0,21	1,09
EV-D01-4	0,28	1,52	0,19	0,96
EV-D01-5	0,29	1,84	0,20	0,97
EV-D01-6	0,30	1,82	0,19	0,95
EV-D01-7	0,28	1,62	0,22	1,10
EV-D01-8	0,28	1,72	0,22	1,05
EV-D01-9	0,28	1,78	0,20	1,01

**EN AW 6082 – ALFUN**

Tabelle 15-67: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-E01-7	7000	800	0,089	✓
EV-E01-8	7000	1000	0,097	✓
EV-E01-5	7000	1500	0,165	✓
EV-E01-6	7000	2000	0,217	✓
EV-E01-3	10000	800	0,22	✓
EV-E01-4	10000	1000	0,066	✓
EV-E01-1	10000	1500	0,128	✓
EV-E01-2	10000	2000	0,142	✓

Tabelle 15-68: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeit)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-E01-4	10000	1000	0,066	✓
EV-E01-7	7000	800	0,089	✓
EV-E01-8	7000	1000	0,097	✓
EV-E01-1	10000	1500	0,128	✓
EV-E01-2	10000	2000	0,142	✓
EV-E01-5	7000	1500	0,165	✓
EV-E01-6	7000	2000	0,217	✓
EV-E01-3	10000	800	0,22	✓

Tabelle 15-69: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-E01-1	0,28	1,64	0,19	0,99
EV-E01-2	0,10	0,62	0,11	0,63
EV-E01-3	0,06	0,35	0,06	0,39
EV-E01-4	0,05	0,34	0,04	0,29
EV-E01-5	0,08	0,52	0,07	0,49
EV-E01-6	0,11	0,72	0,08	0,59
EV-E01-7	0,08	0,49	0,05	0,30
EV-E01-8	0,08	0,66	0,05	0,33
EV-E01-9	0,08	0,45	0,06	0,36

Tabelle 15-70: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-E01-7	7000	1000	0,324	✓
EV-E01-8	7000	2000	0,334	✓
EV-E01-5	7000	3000	0,373	✓
EV-E01-6	7000	4000	0,346	✓
EV-E01-3	10000	1000	0,249	✓
EV-E01-4	10000	2000	0,356	✓
EV-E01-1	10000	3000	0,555	✓
EV-E01-2	10000	4000	0,466	✓

Tabelle 15-71: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-E01-3	10000	1000	0,249	✓
EV-E01-7	7000	1000	0,324	✓
EV-E01-8	7000	2000	0,334	✓
EV-E01-6	7000	4000	0,346	✓
EV-E01-4	10000	2000	0,356	✓
EV-E01-5	7000	3000	0,373	✓
EV-E01-2	10000	4000	0,466	✓
EV-E01-1	10000	3000	0,555	✓

Tabelle 15-72: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-E01-1	0,11	0,65	0,07	0,64
EV-E01-2	0,31	1,87	0,16	0,96
EV-E01-3	0,27	1,43	0,19	0,94
EV-E01-4	0,18	0,93	0,19	0,95
EV-E01-5	0,30	1,90	0,20	0,99
EV-E01-6	0,31	1,88	0,22	1,02
EV-E01-7	0,30	1,56	0,22	1,09
EV-E01-8	0,27	1,72	0,21	1,05
EV-E01-9	0,28	1,48	0,19	0,93

### EN AW 6082 – Plancast Plus 5083

Tabelle 15-73: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-F01-7	7000	800	0,283	✓
EV-F01-8	7000	1000	0,350	✓
EV-F01-5	7000	1500	0,131	✓
EV-F01-6	7000	2000	0,361	✓
EV-F01-3	10000	800	0,417	✓
EV-F01-4	10000	1000	0,903	x
EV-F01-1	10000	1500	0,947	x
EV-F01-2	10000	2000	1,043	x

Tabelle 15-74: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (sortiert nach Rauigkeit)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-F01-5	7000	1500	0,131	✓
EV-F01-7	7000	800	0,283	✓
EV-F01-8	7000	1000	0,350	✓
EV-F01-6	7000	2000	0,361	✓
EV-F01-3	10000	800	0,417	✓
EV-F01-4	10000	1000	0,903	x
EV-F01-1	10000	1500	0,947	x
EV-F01-2	10000	2000	1,043	x



Tabelle 15-75: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Hartmetallschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-F01-1	1,28	7,11	0,80	3,58
EV-F01-2	0,67	3,54	0,62	2,65
EV-F01-3	0,37	1,91	0,53	2,52
EV-F01-4	0,81	3,75	0,62	3,09
EV-F01-5	0,28	1,91	0,29	1,46
EV-F01-6	0,41	1,88	0,26	1,62
EV-F01-7	0,33	1,62	0,34	1,99
EV-F01-8	0,20	1,15	0,35	1,33
EV-F01-9	0,42	2,14	0,40	1,85

Tabelle 15-76: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Prozessparameter)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-F01-7	7000	1000	0,316	✓
EV-F01-8	7000	2000	0,346	✓
EV-F01-5	7000	3000	0,527	✓
EV-F01-6	7000	4000	0,371	✓
EV-F01-3	10000	1000	0,296	✓
EV-F01-4	10000	2000	0,326	✓
EV-F01-1	10000	3000	0,329	✓
EV-F01-2	10000	4000	0,542	✓

Tabelle 15-77: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (sortiert nach Rauigkeit)

Probennummer	Drehzahl S [1/min]	Vorschub F [mm/min]	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Toleranz (Ra = 0,8 $\mu\text{m}$ )
EV-F01-3	10000	1000	0,296	✓
EV-F01-7	7000	1000	0,316	✓
EV-F01-4	10000	2000	0,326	✓
EV-F01-1	10000	3000	0,329	✓
EV-F01-8	7000	2000	0,346	✓
EV-F01-6	7000	4000	0,371	✓
EV-F01-5	7000	3000	0,527	✓
EV-F01-2	10000	4000	0,542	✓

Tabelle 15-78: Oberflächenrauigkeit der 6082-Legierung nach der Bearbeitung mit einer Diamantschneide (gemessen am Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie)

	Ra(l)	Rz(l)	Ra(b)	Rz(b)
EV-F01-1	0,29	1,43	0,12	0,63
EV-F01-2	0,29	1,86	0,14	0,69
EV-F01-3	0,23	1,33	0,13	0,65
EV-F01-4	0,27	1,53	0,12	0,64
EV-F01-5	0,28	1,66	0,14	0,67
EV-F01-6	0,30	1,85	0,13	0,68
EV-F01-7	0,27	1,43	0,12	0,65
EV-F01-8	0,28	1,81	0,13	0,71
EV-F01-9	0,30	1,88	0,47	0,70

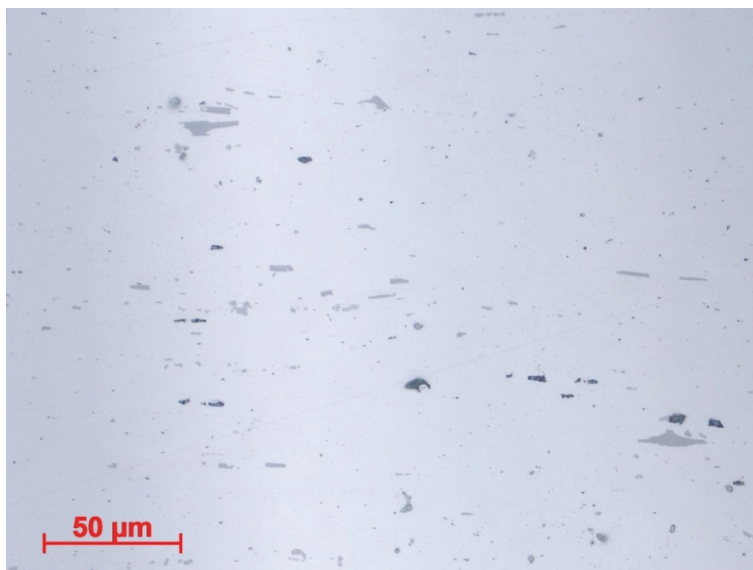


Abbildung 15-8: Lichtmikroskopische Aufnahme des ungeätzten Gefüges der 5754-Legierung vom Anbieter ALFUN

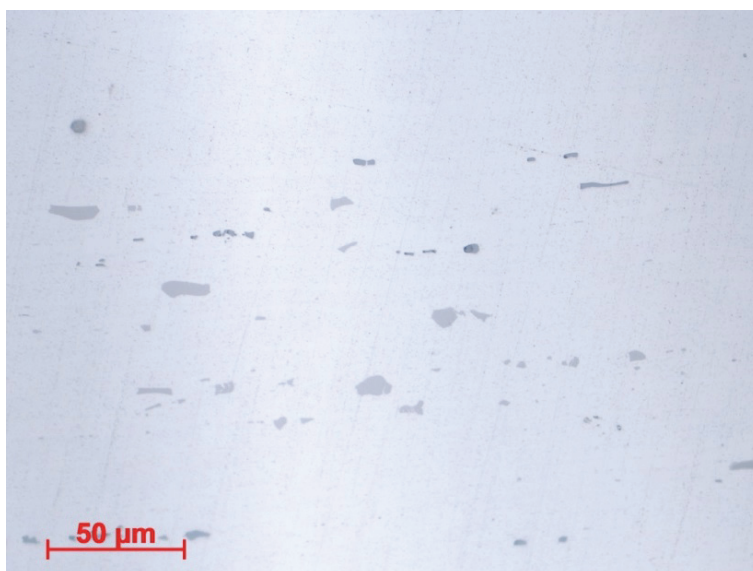


Abbildung 15-9: Ungeätzte Gefügeaufnahme der 5083-Legierung vom Anbieter ALFUN

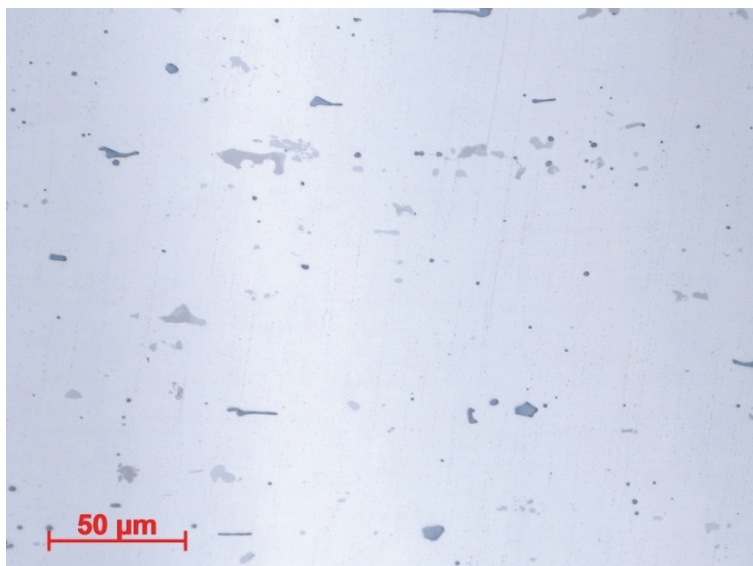


Abbildung 15-10: Ungeätztes Gefüge der 7075-Legierung vom Anbieter ALFUN

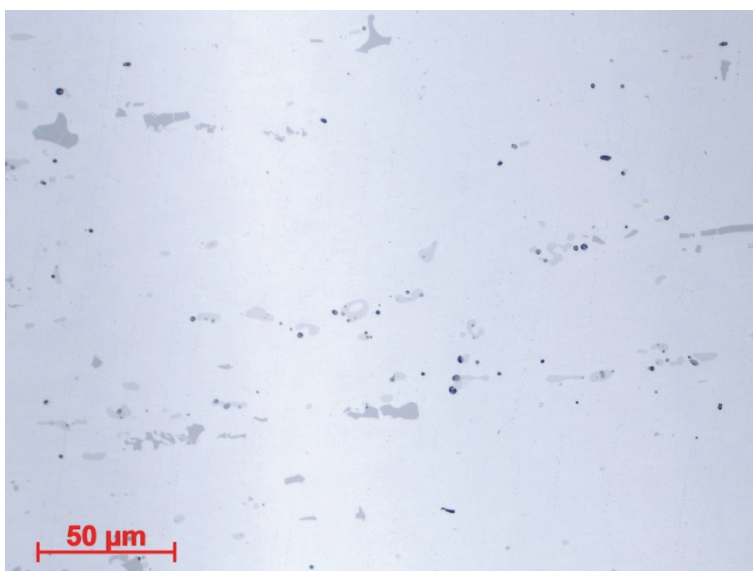


Abbildung 15-11: Ungeätztes Gefüge der 2017-Legierung vom Anbieter ALFUN

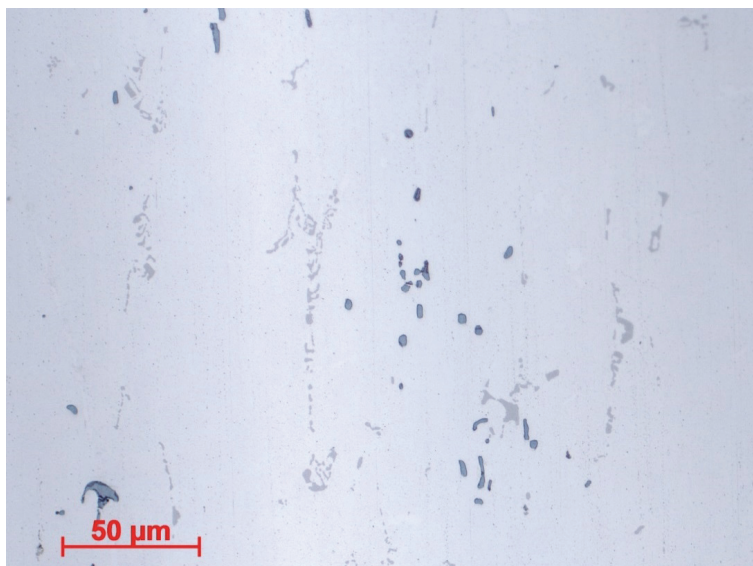


Abbildung 15-12: Gefüge der 6082-Legierung vom Anbieter ALFUN

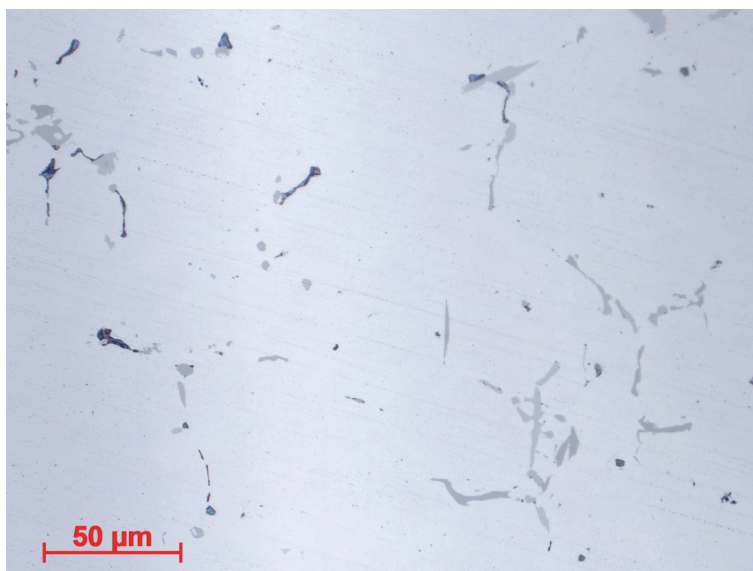


Abbildung 15-13: Gefüge der 6082-Legierung vom Anbieter Plancast Plus 5083

Tabelle 15-79: Versuchsplan zu den Borversuchen

Nr.	Vor-schub	Dreh-zahl	Werk-zeug	Schmierung	Spanform	Oberfläche
1	25	500	AlCrN	Trocken	C	A
2	50	1000	AlCrN	Trocken	B	A
3	25	1000	AlCrN	Trocken	B	B (leichte Verschmierung)
4	50	1000	AlCrN	Trocken	C	C (Ratterspuren)
5	25	500	TiN	Trocken	C	B (leichte Verschmierung)
6	50	500	TiN	Trocken	B	C (Verschmierung)
7	25	1000	TiN	Trocken	B	C (Verschmierung)
8	50	1000	TiN	Trocken	C	C (Verschmierung)
9	25	500	HSS	Trocken	B	B (leichte Verschmierung)
10	50	500	HSS	Trocken	B	C (Verschmierung)
11	25	1000	HSS	Trocken	B	B (leichte Verschmierung)
12	50	1000	HSS	Trocken	B	C (Verschmierung)
13	25	500	AlCrN	Nass	C	A
14	50	500	AlCrN	Nass	A	A
15	25	1000	AlCrN	Nass	C	B (leichte Ratterspuren)
16	50	1000	AlCrN	Nass	C	A
17	25	500	TiN	Nass	C	A
18	50	500	TiN	Nass	B	A
19	25	1000	TiN	Nass	C	A
20	50	1000	TiN	Nass	B	A
21	25	500	HSS	Nass	A	B (leichte Ratterspuren)
22	50	500	HSS	Nass	A	B (leichte Ratterspuren)
23	25	1000	HSS	Nass	A	B (leichte Ratterspuren)
24	50	1000	HSS	Nass	A	B (Ratterspuren)
25	50	1000	HSS	Nass	A	B (Ratterspuren)
26	50	1000	HSS	Nass	A	B (Ratterspuren)
27	50	1000	HSS	Nass	A	B (Ratterspuren)

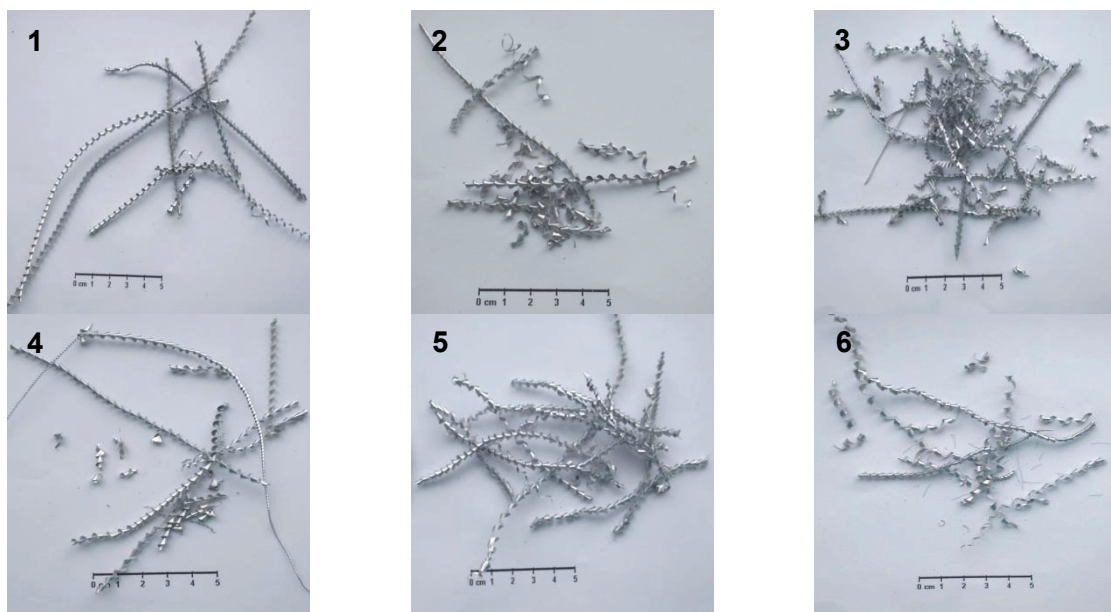


Abbildung 15-14: Bohrspäne der Versuche 1-6

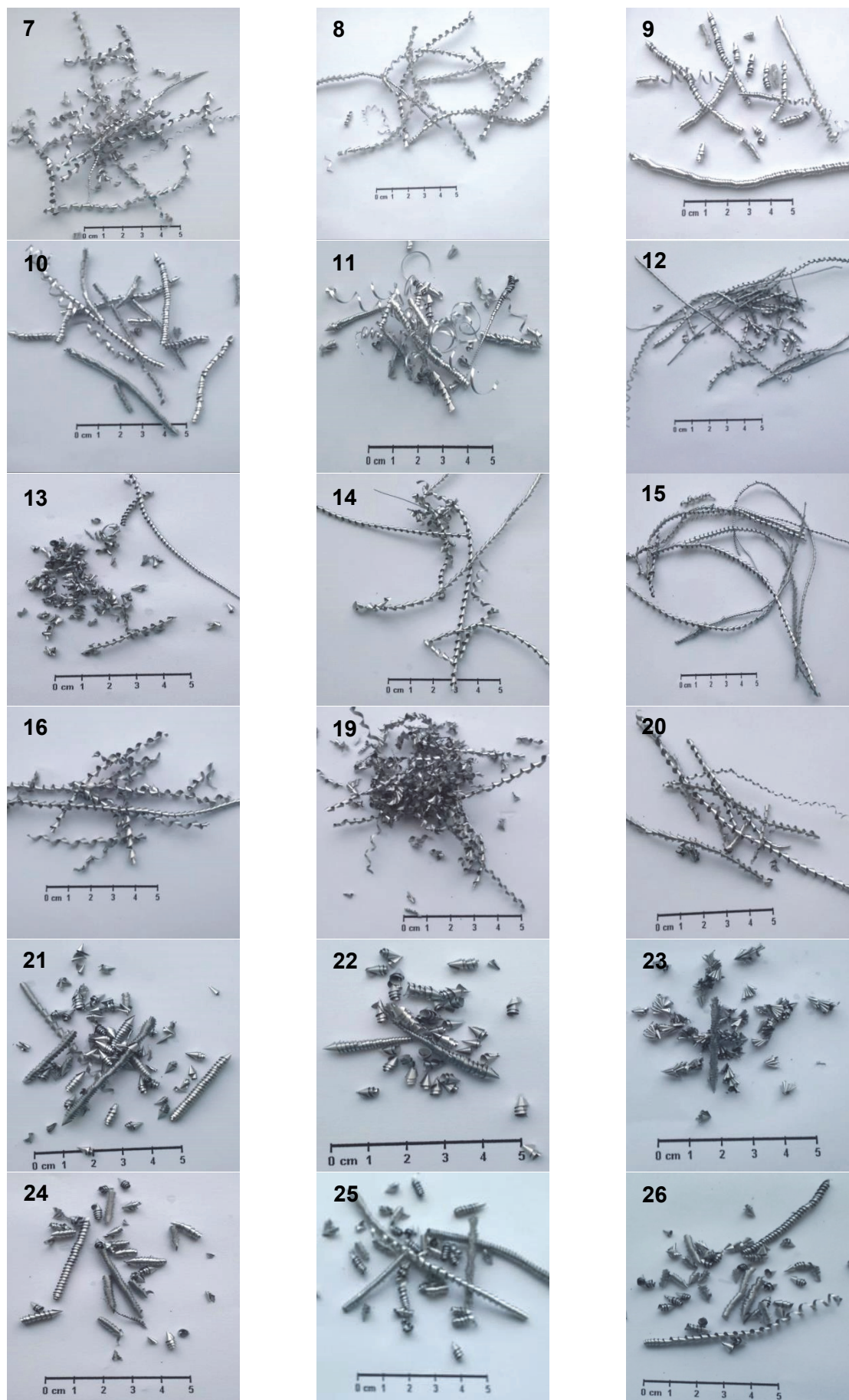


Abbildung 15-15: Bohrspäne der Versuche 7-16 und 19-26

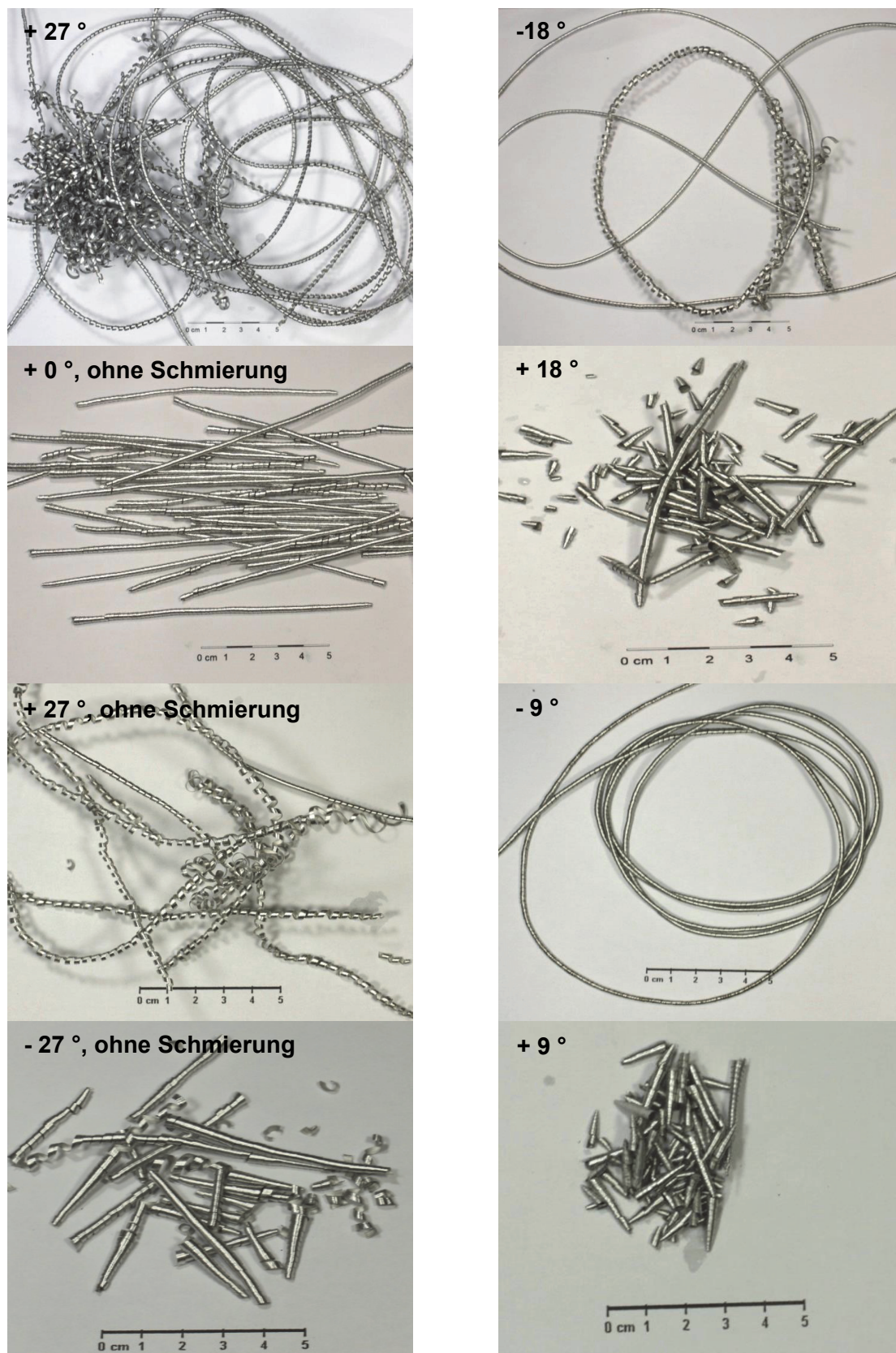


Abbildung 15-16: Drehspäne hergestellt mit unterschiedlichen Spanwinkeln und unter Trockzerspannung oder Bohrlochflutung

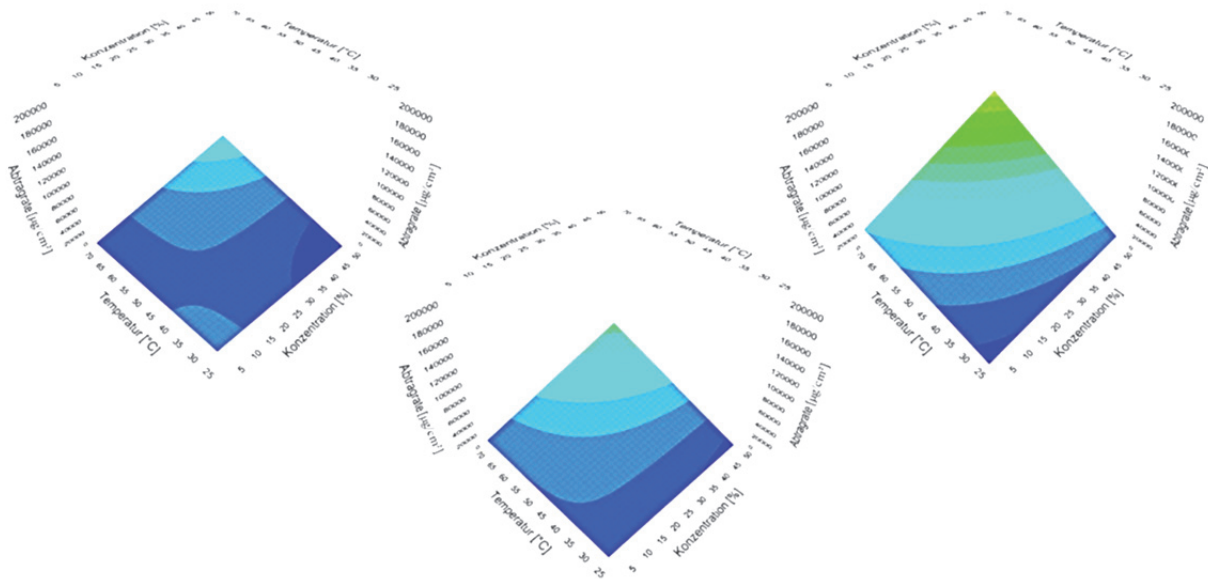


Abbildung 15-17: MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 7075-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration) [90]

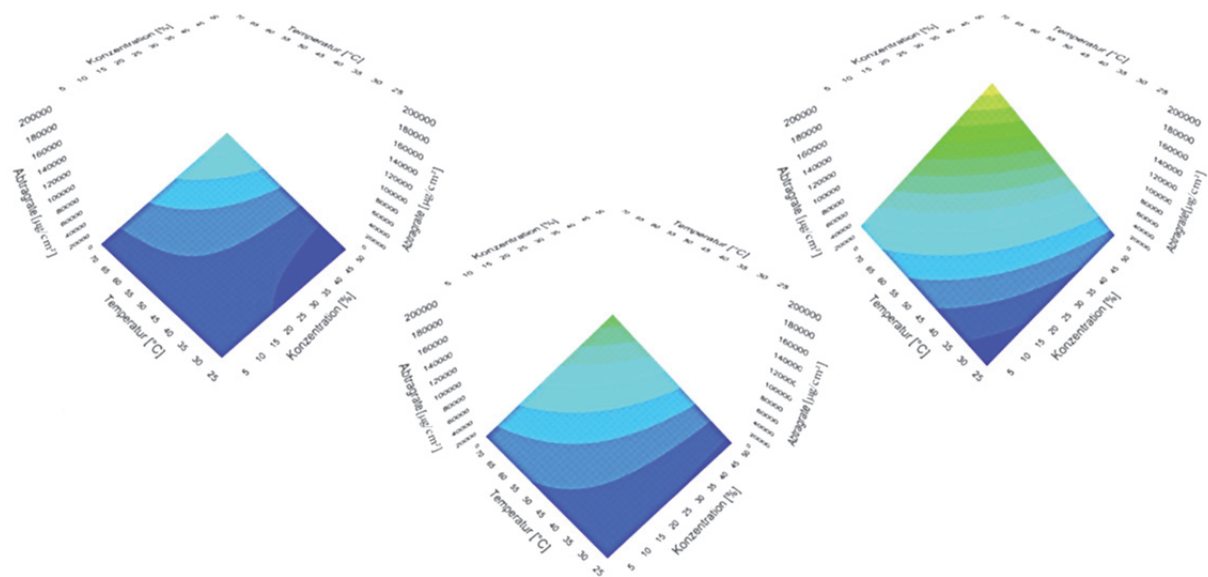


Abbildung 15-18: MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 7075-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration, mit Saccharose als Heizadditiv) [90]



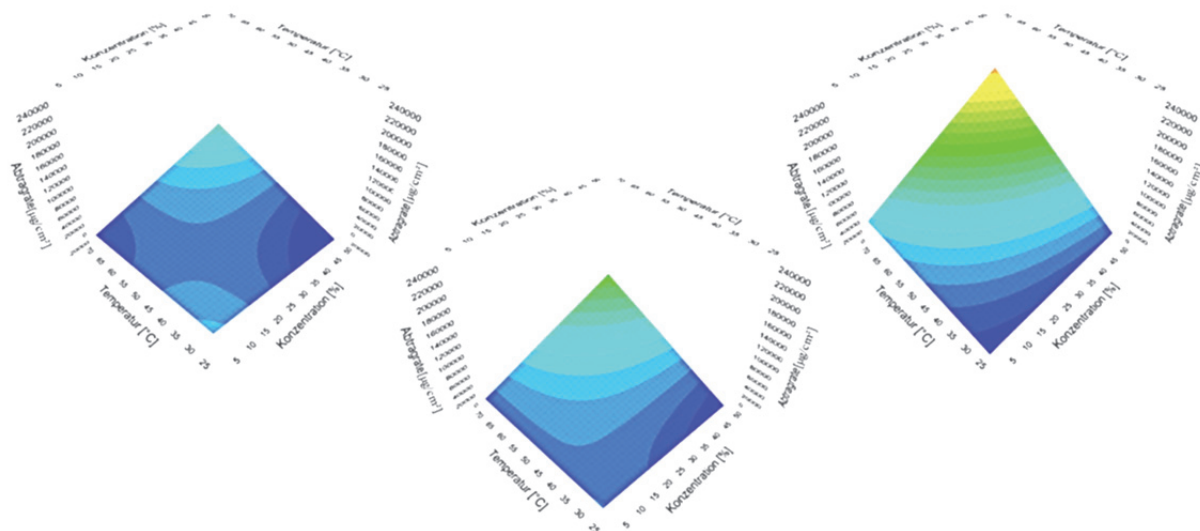


Abbildung 15-19: MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 2017-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration, mit Saccharose als Beizadditiv) [90]

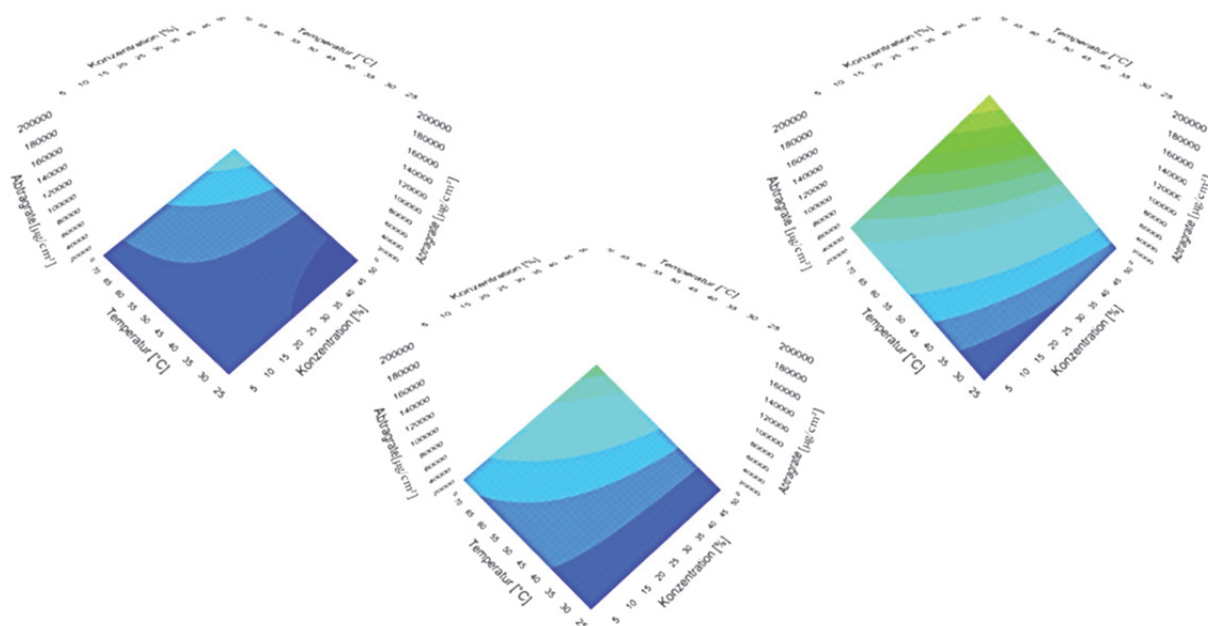


Abbildung 15-20: MODDE®-Diagramme der Abtragraten von 2017-Aluminium nach 10, 20 und 40 Minuten (von links nach rechts) in Natronlauge (variable Temperatur und Konzentration) [90]

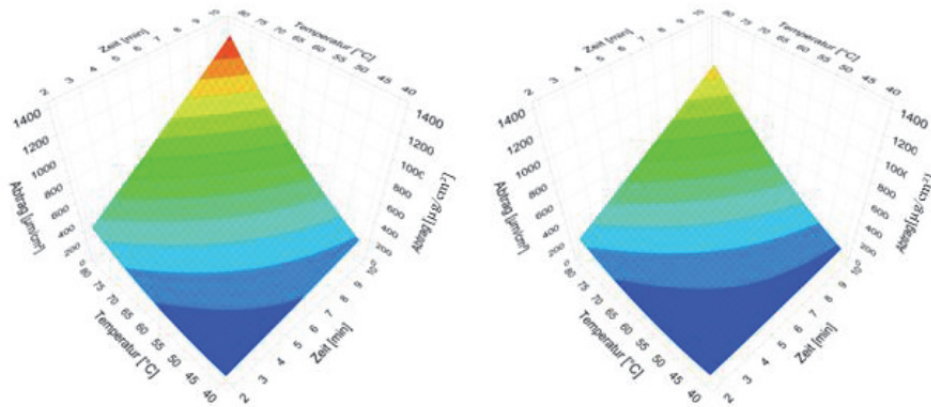


Abbildung 15-21: MODDE®-Diagramme der Abtragsraten von 7075-Aluminium bei 20 und 40 Gew.-% Salpetersäure (links nach rechts) als Funktion der Zeit sowie Temperatur [91]

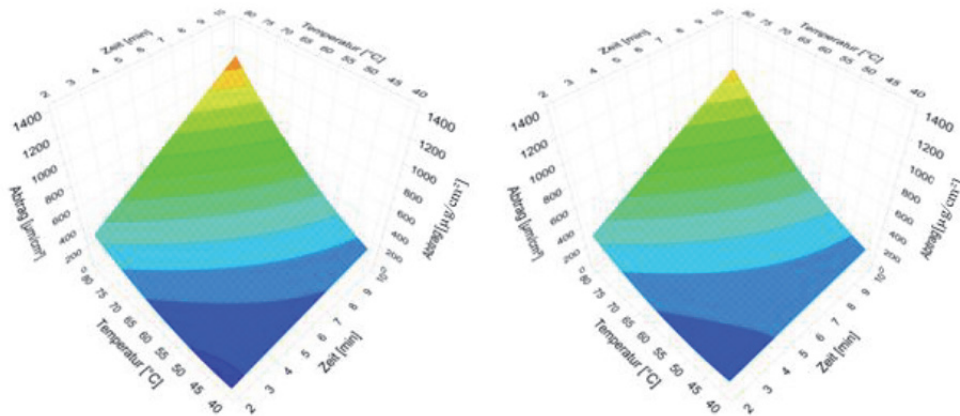


Abbildung 15-22: MODDE®-Diagramme der Abtragsraten von 2017-Aluminium bei 20 und 40 Gew.% Salpetersäure (links nach rechts) als Funktion der Zeit sowie Temperatur [91]

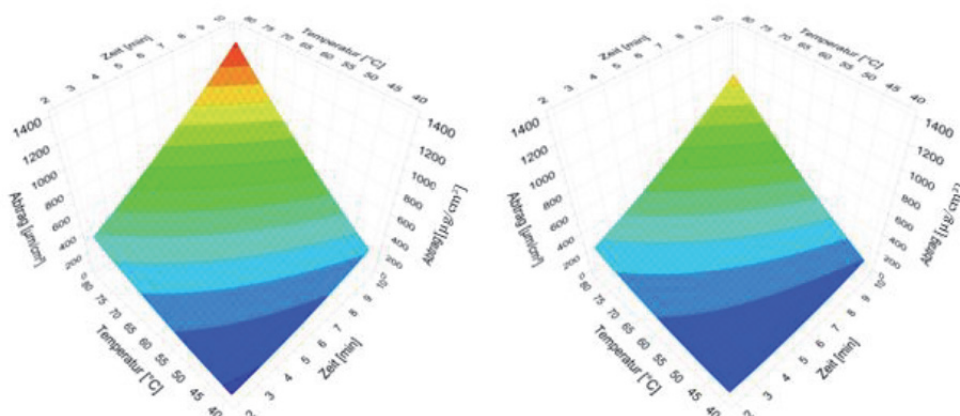


Abbildung 15-23: MODDE®-Diagramme der Abtragsraten von 6082-Aluminium (anderer Hersteller) bei 20 und 40 Gew.-% Salpetersäure (links nach rechts) als Funktion der Zeit sowie Temperatur [91]

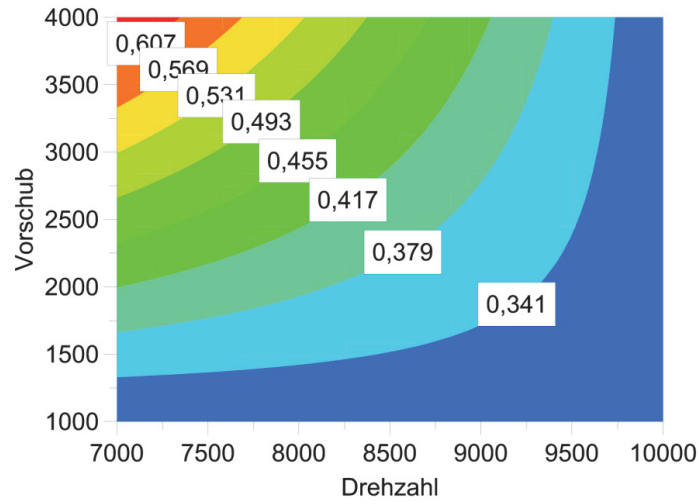


Abbildung 15-24: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5083-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden

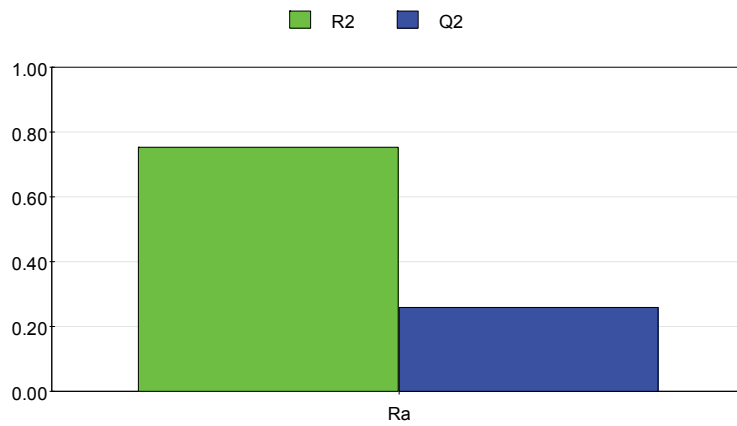


Abbildung 15-25: Modellqualität zu Abbildung 15-24

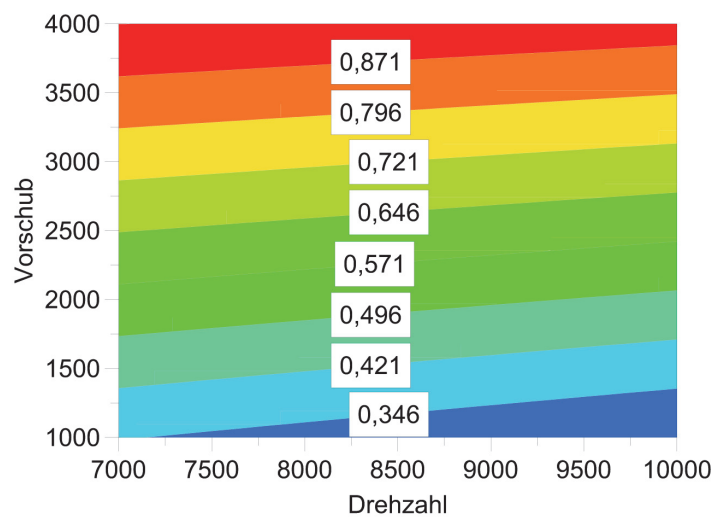


Abbildung 15-26: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5083-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallfräsen

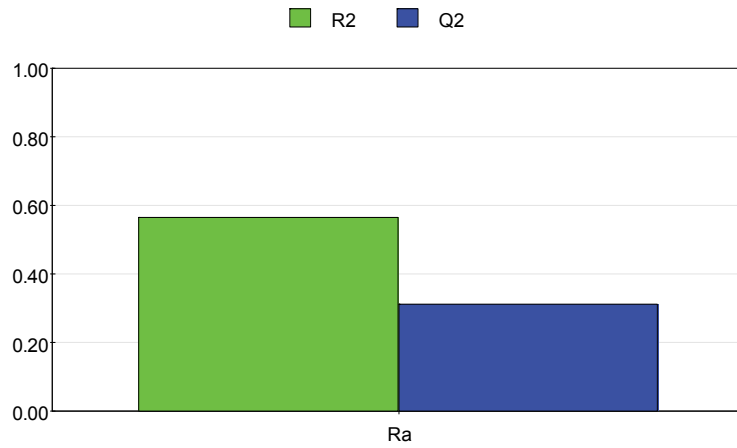


Abbildung 15-27: Modellqualität zu Abbildung 15-26

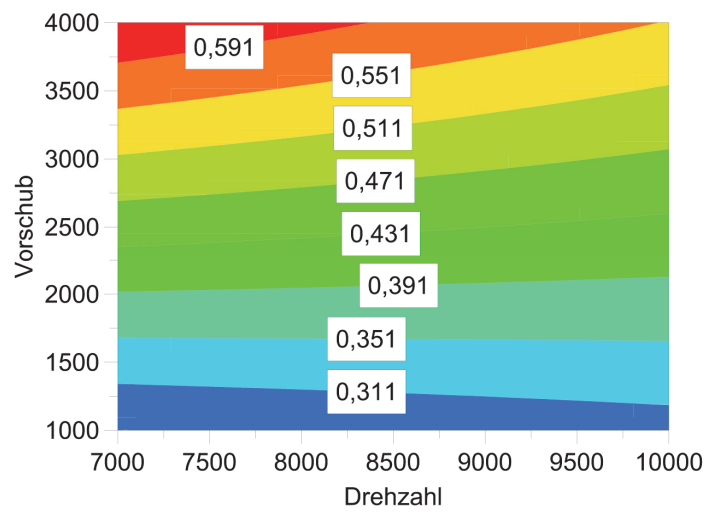


Abbildung 15-28: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden

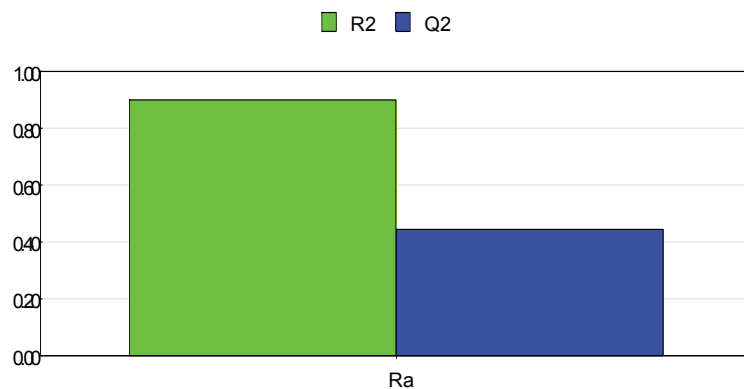


Abbildung 15-29: Darstellung der Modellqualität zu Abbildung 15-28

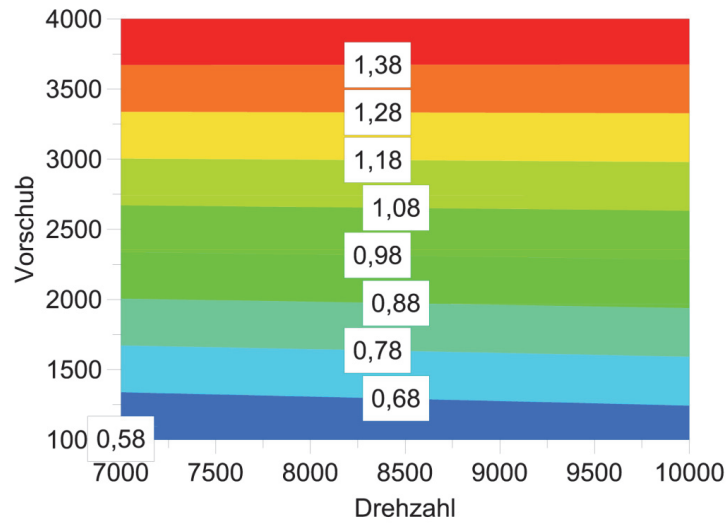


Abbildung 15-30: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 5754-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden

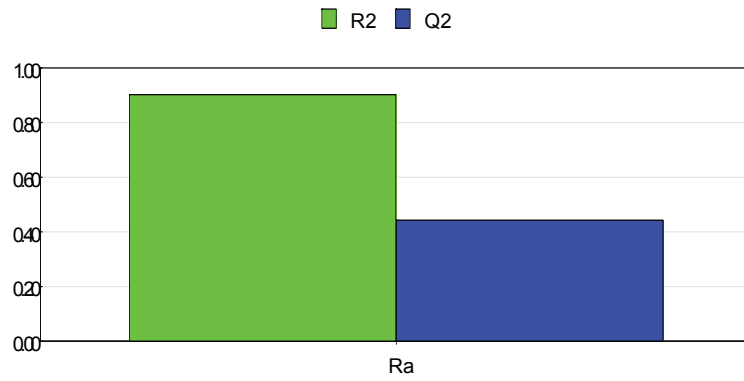


Abbildung 15-31: Darstellung der Modellqualität zu Abbildung 15-30

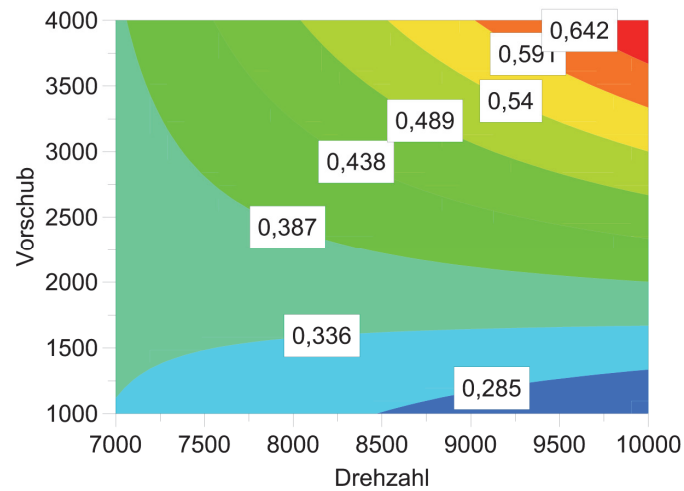


Abbildung 15-32: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 6082-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden

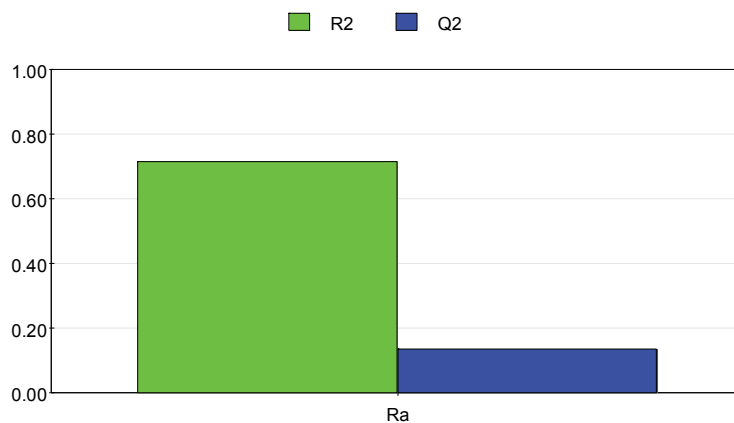


Abbildung 15-33: Modellqualität zu Abbildung 15-32

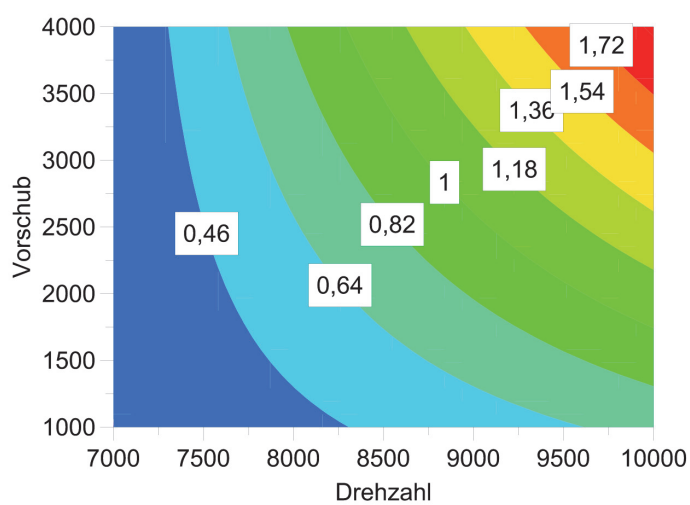


Abbildung 15-34: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 6082-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden

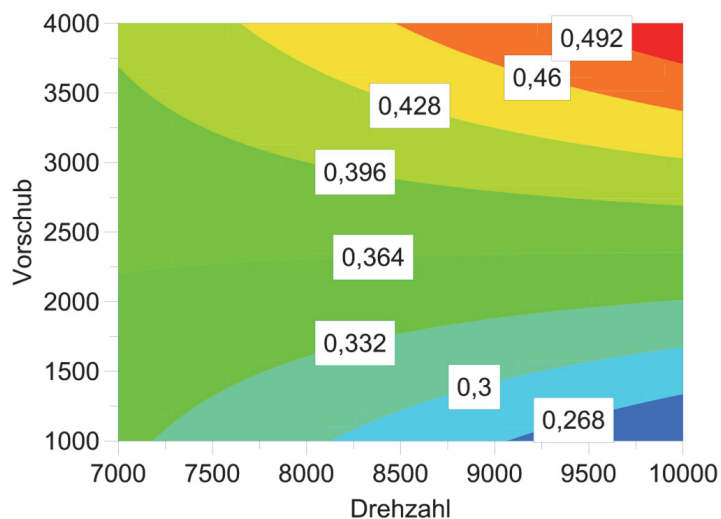


Abbildung 15-35: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 7075-Legierung bei Bearbeitung mit Diamantschneiden

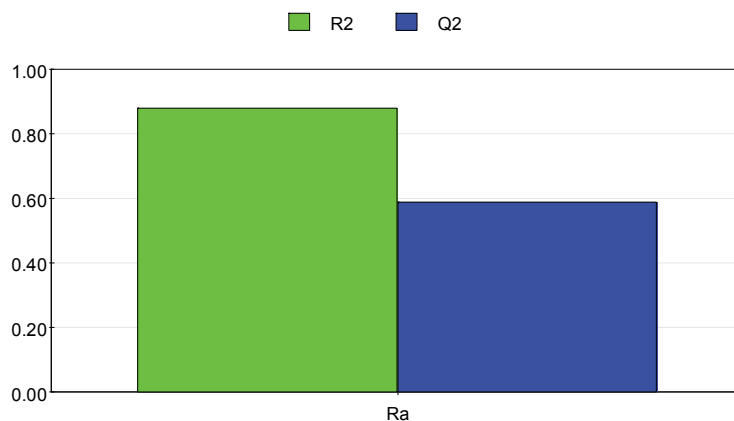


Abbildung 15-36: Modellqualität zu Abbildung 15-35

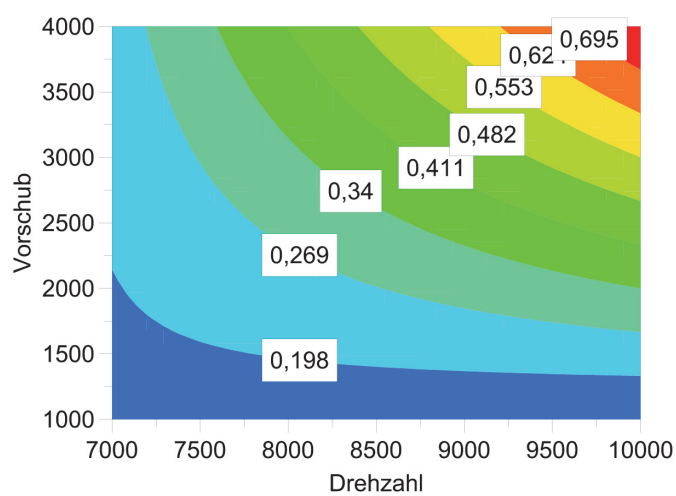


Abbildung 15-37: Darstellung der Oberflächenrauigkeit von der 7075-Legierung bei Bearbeitung mit Hartmetallschneiden

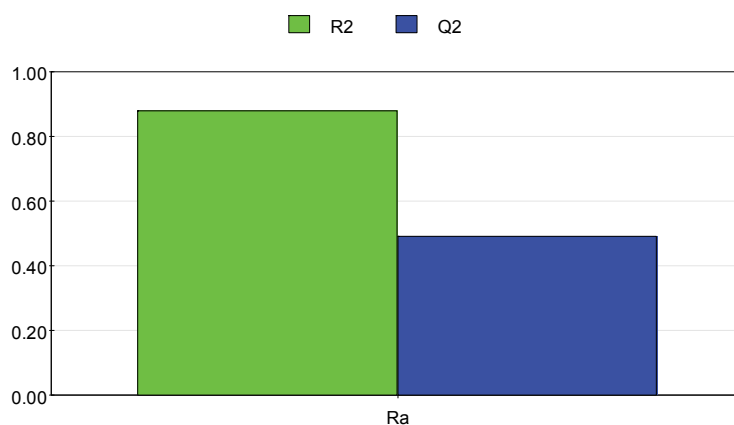


Abbildung 15-38: Modelqualität zu Abbildung 15-37

## **16 Betriebsanleitung**

Anlage:

# **Laboreloxieranlage mit manueller Bestückung**

**Inventar-Nr.: 30000639**

**Version 1.1**



Anlagenbeauftragte:

**Dipl.-Ing. Carina Schlögl**

Leiter:

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

Leoben, Oktober 2015

---



### *Wichtige Hinweise für die Benutzung der Betriebsanleitung*

Die von ETIS-Europe hergestellte Laboreloxieranlage mit manueller Bestückung wird aus technischen Gründen in der folgenden Dokumentation als Anlage bezeichnet.

Einige in der Beschreibung oder Anleitung eingefügten Bilder und Zeichnungen dienen zur Erklärung der Anlage. Weitere Bilder zeigen die Anlage mit demontierten Sicherheitseinrichtungen wie Abdeckungen, Kabelschächten und Verkleidungen, damit Details der Komponenten besser dargestellt werden können.

Die den ER-Richtlinien entsprechende Dokumentation der Einzelkomponenten (z. B.: Pumpen, Wärmetauscher, Thermostat) wird der Betriebsanleitung für die Gesamtanlage beigelegt.

Die Betriebsanleitung basiert auf den Richtlinien der BGFE (Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektronik) und der EU Maschinenrichtlinie.

## HINWEIS



**Die vorliegende Betriebsanleitung gilt ergänzend zu der Laborordnung des Lehrstuhls für Nichteisenmetallurgie.**

*Technische Änderungen und Ergänzungen der Beschreibung/Anleitung sind vorbehalten.*

*Für den Inhalt wird keine Haftung übernommen, insbesondere für Schäden durch vorhandene, nicht vorhandene oder fehlerhafte Angaben.*

*Weitergabe und Ergänzung dieser Beschreibung/Betriebsanleitung, sind nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich genehmigt.*

Grundlegende Informationen:

Projektnummer: P052-F-19-03  
Projekttyp: Bridge (FFG)  
Projektname: Sekundär-Al-Knetlegierungen mit „high-performance“ Oberflächen-  
finish für die anodische Oxidation  
Aufstellungsort: Elektrolyselabor, Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, MU Leoben  
Hauptlieferant: ETIS-Europe (Ansprechpartner: Hr. Kull)  
Inventarnummer: 30000639  
Verantwortlicher: Dipl.-Ing. Carina Schlögl (DW: 5232)  
Inbetriebnahme: Dezember 2013

## Allgemeines

### Erläuterung der Sicherheitshinweise

Bitte beachten Sie die Bedeutung folgender Symbole- und Hinweiserklärungen. Sie sind in Gefahrenstufen unterteilt und klassifiziert nach ISO 3864-1.

## GEFAHR



**Bezeichnet eine unmittelbar drohende Gefahr.  
Wenn die Information nicht befolgt wird, sind Tod oder schwerste  
Körperverletzungen (Invalidität) die Folge.**

## WARNUNG



**Bezeichnet eine mögliche gefährliche Situation.  
Wenn die Information nicht befolgt wird, sind Tod oder schwere  
Körperverletzung (Invalidität) die Folge.**

## VORSICHT



**Bezeichnet eine möglicherweise gefährliche Situation.  
Wenn die Information nicht befolgt wird, sind Sachschäden sowie leichte  
oder mittlere Körperverletzungen die Folge.**

## HINWEIS



**Bezeichnet allgemein Hinweise, nützliche Anwender-Tipps und  
Arbeitsempfehlungen, welche aber keinen Einfluss auf die Sicherheit und  
Gesundheit des Personals haben.**

## Grundlegende Sicherheitshinweise

Diese Betriebsanleitung dient als Grundlage, um die Laboreloxieranlage (siehe Abbildung 16-1) sicherheitsgerecht einzusetzen und zu betreiben. Diese Betriebsanleitung, insbesondere die Sicherheitshinweise, ist von allen Personen zu beachten, die an oder mit der Anlage arbeiten. Darüber hinaus sind die für den Einsatzort jeweils geltenden Regeln und Vorschriften (Laborordnung des Lehrstuhls) zu beachten.

# HINWEIS



**Die Betriebsanleitung ist ständig im Eloxier- bzw. Elektrolyselabor aufzubewahren.**



Abbildung 16-1: Teilansicht der Eloxieranlage während der Montage

### **Bestimmungsmäßige Verwendung**

Die Laboreloxieranlage ist zur Oberflächenbehandlung unterschiedlicher Aluminiumlegierungen einzusetzen. Die Anlage ist nicht auf die anodische Oberflächenbehandlung von Titan oder Magnesium ausgelegt.

Der Grundlegende Ablauf der Eloxierprozesskette umfasst folgende Schritte:

- 1.) Entfetten
- 2.) Spülen
- 3.) Beizen (alkalisch)
- 4.) Spülen
- 5.) Dekapieren (Neutralisieren, sauer)
- 6.) Spülen
- 7.) Glänzen (sauer)
- 8.) Spülen
- 9.) Eloxieren bzw. Harteloxieren (sauer)
- 10.) Spülen
- 11.) Färben
- 12.) Spülen
- 13.) Sealing (Versiegeln)

Nicht alle Arbeitsschritte müssen zwingend durchgeführt werden. Eine zuvor eloxierte Oberfläche kann nicht zusätzlich harteloxiert werden.

Die **einzusetzenden Werkstücke** müssen folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Es darf sich ausschließlich um Aluminiumbauteile handeln.
- Es dürfen nur vorgereinigte Bauteile eingesetzt werden. Grobe Rückstände und Verschmutzungen wie Schmierfette oder Grate müssen im Vorfeld entfernt werden.
- Die Bauteile dürfen nicht klebrig sein.
- Die Bauteile dürfen keine organischen Überzüge aufweisen.
- Die Bauteile dürfen nicht magnetisch sein.
- Die Bauteile dürfen keine erhöhte Temperatur aufweisen.
- Die Bauteile dürfen die maximal vorgesehenen Abmessungen (siehe Kapitel 4.3.2) nicht überschreiten.

## Beschreibung der Anlage

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der funktionalen Beschreibung der Gesamtanlage und ihrer einzelnen Komponenten.

### Allgemeine Anlagenbeschreibung

Die handbetriebene Eloxieranlage wird zur Oberflächenbehandlung einzelner Aluminiumbauteile eingesetzt. Hierbei werden die auf den Titangestellen montierten Bauteile von einem Becken zum nächsten geführt und über die Wechselwirkung von Stromeinfluss und Elektrolyteinwirkung verschiedene Modifikationen der Oberfläche hervorgerufen.

Die technische Zeichnung der Beckenanordnung ist unter Abbildung 16-2 dargestellt. Die Bäder sind vor Ort mit einer entsprechenden Kennzeichnung versehen. Zusatzaggregate und Steuerelemente werden in den folgenden Kapiteln näher erläutert.

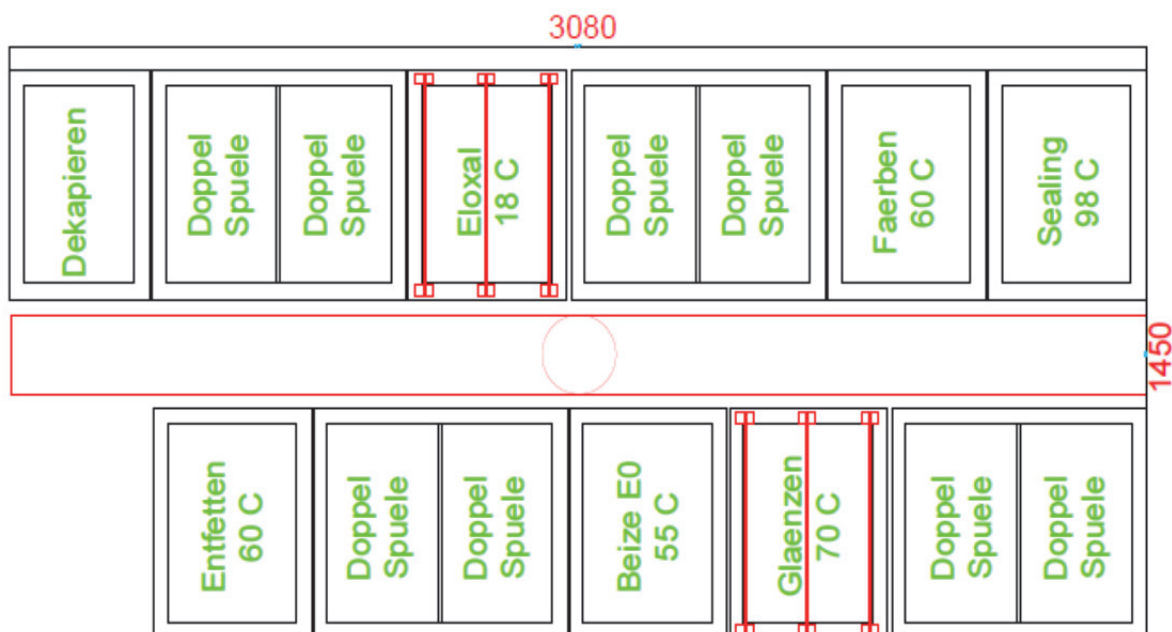


Abbildung 16-2: Technische Zeichnung der Anlagendraufsicht (bereitgestellt von ETIS-Europe)

Die zusätzlich zur Eloxiereinheit angebrachte Absaugwand ist unter Abbildung 16-3 (technische Zeichnung) ersichtlich.

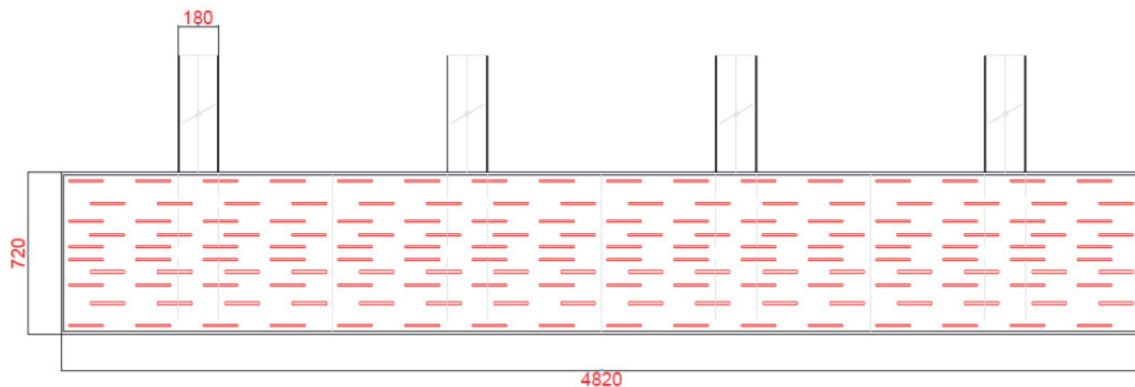


Abbildung 16-3: Technische Zeichnung der Abzugswand

### Funktionsbeschreibung der Gesamtanlage

Während des Eloxierprozesses wird ein Bauteil sowohl chemischen als auch elektrischen Einflüssen ausgesetzt, um so bestimmte Oberflächeneigenschaften einstellen zu können. Dabei ist auf die exakte Abfolge der einzelnen Arbeitsschritte sowohl aus sicherheits- als auch qualitätstechnischen Gründen Rücksicht zu nehmen.

Der Grundaufbau der Eloxieranlage setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- 11 Becken, wobei die Spülbecken eine zusätzliche Trenneinheit (im Folgenden als Doppelspüle ausgewiesen) aufweisen
- Potentiostat
- Elektronische Steuereinheit mit Messlaptop
- Verkabelung inklusive flüssigkeitsdichten bzw. säurebeständigen Kabelschächten
- Kühlaggregat inklusive Pumpvorrichtung, Kreislaufführung und Ventilkopplung
- Absaugwand mit entsprechender Laborabsaugung (Ventilationssystem mit Tropfenscheider)
- Untergestellt aus Stahl mit Rutschsicherung (Gummierung)
- Abflusssystem für Spülwasser
- Pumpen und Filter in den Becken (Badumwälzung, Chemikalienentsorgung)
- Thermostate mit entsprechenden Steuerelementen
- Heizeinheiten
- Kühlspiralen

Um eine erfolgreiche Behandlung der Oberfläche vornehmen zu können, sind die Werkstücke nach dem im Kapitel 3 angeführten Ablaufprinzip zu bearbeiten, wobei auf obligatorische Einzelschritte gesondert hingewiesen wird.

## Funktionsbeschreibung der Einzelbecken

Um die Funktionalität der einzelnen Komponenten genauer zu erläutern, sind in den folgenden Unterkapiteln die prozesstechnischen Hintergründe dargestellt.

### Entfetten

Die Werkstücke sind in der Entfettungseinheit einzutauchen. Die Entfettungslösung besteht aus einem alkalischen flüssigen Reiniger der Fa. Schwenk Galvanotechnik. Der Aluminiumreiniger entfernt Verschmutzungen, Schleif-, Polier- und Läpprückstände, Öle und Fette. Der pH-Wert des Reinigers liegt bei 8,3 bei der vorgesehenen Konzentration von 25 ml/l. Die Kontaktzeit der Werkstücke mit der Lösung liegt je nach Verschmutzung zwischen 1 und 30 Minuten. Es ist über die Pumpen eine Elektolytbewegung aufzubringen oder die Werkstücke mehrfach hin und her zu bewegen. Das Becken ist während der gesamten Behandlung auf 60 °C (50-70 °C Grenzwerte) zu halten. Die Builderlösung ist laut Datenblatt Xi reizend. Das Tensid ist laut Datenblatt Xn gesundheitsschädlich.

Tabelle 16-1: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Reinigungsbecken

<b>Temperatur:</b>	60 °C (50-70°C)
<b>pH-Wert:</b>	8,3
<b>Kontaktzeit:</b>	1-10 Min.
<b>Chemikalieneinsatz:</b>	Reiniger (Schwenk) Builderlösung (Schwenk)
<b>Substitutionsmöglichkeit:</b>	Aceton (Lactan)
<b>Kontrolle:</b>	Optische Überprüfung auf Fettfilm

### Beizung

Der Beizschritt erfolgt, um die natürliche Oxidschicht vom Werkstück abzutragen, etwaige letzte Schmutzanhaftungen zu entfernen und eine chemisch aktive Oberfläche zu generieren.

Im Beizbecken befindet sich 50%ige (20%ige) Natronlauge mit dem Beizzusatz BH-42 der Firma Schwenk Galvanotechnik. Es handelt sich dabei um ein flüssiges Produkt. Der Beizzusatz verhindert eine Schaumbildung des basischen Beckeninhalts. Das gesamte Becken soll auf einer Temperatur von 55 °C gehalten werden (Grenzwerte: 50–70 °C). Die Kontaktzeit der Werkstücke beträgt je nach gewünschtem Endaussehen zwischen 3 und 20 Minuten (bei frischen Bädern ist die Eintauchzeit kürzer zu wählen, da stärkerer



Materialabtrag zu erwarten ist). Der Elektrolyt wird über ein Pumpensystem umgewälzt. Die Heizung des Beckens erfolgt über eine chemikalienbeständige Heizwendel.

Tabelle 16-2: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Beizbecken

<b>Temperatur:</b>	55 °C (50-70°C)
<b>pH-Wert:</b>	14
<b>Kontaktzeit:</b>	3-20 Min.
<b>Chemikalieneinsatz:</b>	Natronlauge (Lactan) Beizzusatz BH-42 (Schwenk)
<b>Substitutionsmöglichkeit:</b>	Aceton (Laborqualität)
<b>Kontrolle:</b>	Titration Messung des Aluminiumgehalts

### **Dekapierung (Neutralisation oder Aufhellen)**

Nach dem Beizen können in Natronlauge unlösliche Legierungsbestandteile (z. B. Cu, Zn) auf der Oberfläche zurückbleiben. Bildet sich beispielsweise eine schwarze Schicht aus, handelt es sich um kupferhaltige Legierungen. Dieser Belag wird in einer ca. 20%igen Salpetersäurelösung oder in Schwefelsäure mit einem entsprechenden Dekapierungsadditiven entfernt. Ein grauer Belag bildet sich auf siliziumhaltigen Aluminiumlegierungen und muss häufige noch mechanisch entfernt werden. Die Zusammensetzung der Dekapierungslösung richtet sich demzufolge primär nach der Legierungszusammensetzung des Grundwerkstoffs.

Die vorgesehene Behandlung wird unterschiedlich tituliert. Laut dem Hauptlieferant (Schwenk Galvanotechnik) ist die Verwendung der sauren Beize (Aufhellen) empfehlenswert. Dieser Bearbeitungsschritt ist notwendig, um die Metallabscheidungen, die sich in Form von Belägen während der alkalischen Beizung auf der Aluminiumoberfläche gebildet haben, zu entfernen und um die schwer abzuspülenden Alkalien zu beseitigen. Bei hochlegierten und kupferhaltigem Aluminium muss die Badtemperatur auf 50-60 °C eingestellt werden. Mit zunehmender Gebrauchsdauer sinkt der Gehalt an Beizzusatz EBS. Ein Mangel an Beizzusatz EBS verlängert die Beizezeit und ergibt keine gleichmäßige Aufhellung der Werkstückoberfläche. Die Beizkonzentration kann analytisch ermittelt werden, jedoch gilt: dauert die Aufhellzeit mehr als 20 Sekunden muss Beizzusatz EBS zugegeben werden.

Der Schwefelsäuregehalt wird mittels Analyse ermittelt und bei Bedarf korrigiert. Bei Überdosierung von Schwefelsäure wird die Aluminiumoberfläche bei längerem Beizen stark angegriffen (Lochfraß).

Der Desoxidizer EBS kann durch kontrollierte Neutralisation entgiftet werden.

Tabelle 16-3: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Aufhellbecken (Dekapieren)

<b>Temperatur:</b>	20 °C (20-60°C)
<b>pH-Wert:</b>	2
<b>Kontaktzeit:</b>	10 Sekunden bis 2 Minuten
<b>Chemikalieneinsatz:</b>	Schwefelsäure (Lactan) Beizzusatz EBS
<b>Substitutionsmöglichkeit:</b>	Salpetersäure (Lactan)
<b>Kontrolle:</b>	Titration ICP-Analyse des Schwefelsäuregehalts

### Elektrolytisches Glänzen

Das elektrolytische Glänzen wird, wie der Name schon sagt, unter Stromzufuhr gefahren. Das Becken wird mit kalziniertem Soda betrieben und mit  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  aufgewertet. Zur Badanalyse steht Methylorange zur Verfügung.

Die Mechanismen bei der anodischen Oxidation von Aluminium und beim elektrolytischen Glänzen sind von ihrem Prinzip her vergleichbar. Die Lösungsgeschwindigkeit und die Schichtdicke, bei denen anodischen Glänzen stattfindet, sind sehr unterschiedliche und von der Art des Elektrolyten abhängig. In einigen Elektrolyten findet Glänzen unter schwachen Angriff der Anode bei Bedingungen statt, bei denen gleichzeitig dicke Schichten gebildet werden, die einen merklichen Korrosionsangriff ausüben. Bei anderen Verfahren sind die Schichten dagegen nicht dicker als einige Moleküllagen. Abbildung 16-4 zeigt einige Schichtdickendiagramme im Vergleich.

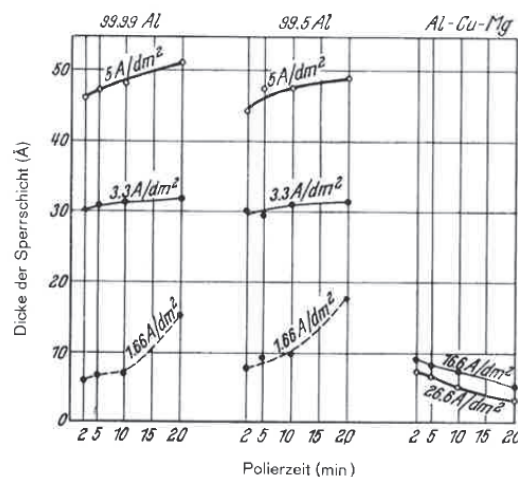


Abbildung 16-4: Schichtdicke in Relation zur Stromstärke und Einwirkzeit [6]

Tabelle 16-4: Kurzübersicht der Betriebsdaten zum Glänzbecken

<b>Temperatur:</b>	20 °C (20-60°C)
<b>pH-Wert:</b>	9
<b>Stromstärke:</b>	15-25 A
<b>Kontaktzeit:</b>	10 Sekunden bis 2 Minuten
<b>Chemikalieneinsatz:</b>	Wasserfreies Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O
<b>Substitutionsmöglichkeit:</b>	SurTec 485
<b>Kontrolle:</b>	Methylorgange Analytik

### Spülung

Die Doppelspüle ist mit entionisiertem Wasser zu befüllen. Die eingesetzten Werkstücke müssen in den jeweiligen Kammern mindestens eine Minute auf und ab bewegt werden. Um einen weichen pH-Wert-Übergang zu erreichen, ist es sinnvoll, bei Neuansatz nach- und vorgeschaltete Chemikalien im geringen Maße beizufügen. Die Sauberkeit der Becken ist mittels optischer Kontrolle zu überprüfen. Bei starken Staubeinträgen sind die Becken neu zu befüllen.

Tabelle 16-5: Kurzübersicht der Betriebsdaten zu den Spülbecken

<b>Temperatur:</b>	RT
<b>pH-Wert:</b>	Neutral
<b>Stromstärke:</b>	-
<b>Kontaktzeit:</b>	min. 1 Minute (bei Bewegung)
<b>Chemikalieneinsatz:</b>	Deionisiertes H <sub>2</sub> O
<b>Substitutionsmöglichkeit:</b>	-
<b>Kontrolle:</b>	pH-Wertmessung

### Eloxierung

Der Hauptarbeitsschritt der Eloxierung erfolgt im dafür vorgesehenen Becken. Dabei werden die Werkstücke in einen schwefelsauren Elektrolyten eingebracht. Da es sich bei den stattfindenden chemischen Reaktionen um exotherme Prozesse handelt, ist über das integrierte Kühlsystem zu temperieren. Eine optimale Eloxierung ist nur bei 20 °C möglich. Die Stromführung erfolgt dabei über die vorgelegten Kupferleitungen, welche über Titangestelle leitend mit den Aluminiumbauteilen verbunden sind. Die eingesetzten Kathoden

(Reinaluminium oder 6xxx-Legierungen) müssen eine zu der Bauteiloberfläche äquivalente Größe aufweisen. Um eine übermäßige bzw. schädliche Entstehung von Aerosolen durch Wasserstoffblasenbildung zu verhindern, werden die Kathoden mit sogenannten Kathodensäcken umgeben. Diese verhindern das Aufsteigen von säurebehafteten Bläschen indem sie diese agglomerieren und als eine Art Tropfenabscheider fungieren. Zusätzlich zu den Kathodensäcken befinden sich in deren Inneren Kunststoffbälle die ebenfalls die Ausbringung von Aerosolen verhindern. Ergänzend enthält der Elektrolyt Badzusätze, welche eine optimale Oberflächenbenetzung ermöglichen und eine Schaumbildung verhindern. Um Wärmepole in den Becken zu verhindern, sind kleine Pumpsysteme zur Badumwälzung montiert. Diese werden zusätzlich mit Aktivkohlefilter ausgestattet, um etwaige Badverunreinigungen schnell und effektiv aus dem Elektrolyten zu entfernen. Bei jedem Eloxieren ist auf die richtige Kombination von Stromstärke und Behandlungsdauer zu achten, diese Parameter sind material- bzw. legierungsbezogen und müssen individuell ausgelegt werden. Beim Ansätzen des Eloxalbetes wird 200 g/l Schwefelsäure (chemische Reinheit) mit 1,5 ml Netzmittel NE 709 (Schwenk Galvanotechnik) eingesetzt. Die Beckentemperatur sollte immer auf 20 °C eingestellt sein (lediglich eine leichte Unterschreitung des Werts ist akzeptabel). Die anzuwendende Stromdichte beträgt 1,8 A/dm<sup>2</sup> Werkstückoberfläche. Die Tauchzeit ist variabel und liegt im Durchschnitt bei 30 Minuten (Schichtdicke zwischen 10-15 µm bei Reinaluminium). Das eingesetzte Netzmittel ist laut Sicherheitsdatenblatt Xn (Gesundheitsschädlich). Es entstehen in Wasser gelöste Fluortenside. Die Eloxierung ist immer unter laufender Absaugung durchzuführen. Soweit als möglich sollten die Becken immer abgedeckt sein. Die Werkstücke müssen immer absolut fest montiert sein, damit sie nicht von der Halterung abfallen können.

Tabelle 16-6: Kurzübersicht der Betriebsdaten zur Eloxierung

<b>Temperatur:</b>	20 °C
<b>pH-Wert:</b>	5 (Schwimmtauchmessung)
<b>Stromstärke:</b>	Individuell (materialbezogen)
<b>Kontaktzeit:</b>	individuell (materialbezogen)
<b>Chemikalieneinsatz:</b>	Salzsäure (20%ig) Netzmittel Schaumzusatz
<b>Substitutionsmöglichkeit:</b>	Oxalsäure statt Salzsäure
<b>Kontrolle:</b>	pH-Wertmessung, ICP-Analyse, Titration

## VORSICHT



Die Werkstücke müssen fest auf dem Titangestell montiert sein, damit diese nicht in den Elektrolyten fallen können und es zu Säurespritzern kommt.

## VORSICHT



Die Werkstücke müssen bereits vollständig mit Elektrolyt bedeckt sein (die Halterung entsprechend eingerastet sein) bevor der Stromkreislauf aktiviert wird!

### Harteloxierung

Das Verfahren der Harteloxierung entspricht der Eloxierung. Erforderlich sind lediglich wesentlich niedrigere Temperaturen und ein weniger reaktiver Elektrolyt (Oxalsäurezusatz). Die Temperaturen müssen unter 10 °C liegen. Die Zieltemperatur beläuft sich auf 5 °C. Ansonsten gelten dieselben Bestimmungen wie für das herkömmliche Eloxal.

### Färben

Beim Färben von Oxidschichten werden Farbpigmente in die offenporige Struktur der Oberfläche eingebracht. Zur Färbung liegt eine Vielzahl von möglichen Substanzen (anbieterabhängig) vor. Näheres dazu ist der jeweiligen Handhabungsanweisung zu entnehmen.

### Sealing (Verdichten)

Das Verdichten (Sealing) der offenporigen Struktur erfolgt in deionisiertem Wasser bei 100 °C (bzw. 98 °C laut Anzeige) und muss entsprechend der Schichtdicke zeitlich angepasst werden. Geeignete Sealingzusätze ermöglichen den Einsatz von herkömmlichem Leitungswasser. Aufgrund der hohen Verdampfungsmengen ist der Beckenfüllstand alle zwei Stunden zu kontrollieren und gegebenenfalls anzupassen.

### Funktionsbeschreibung der Zusatzaggregate

Die sogenannten Zusatzaggregate (z. B. Kühlanlage, Potentiostat) dienen zum störungsfreien und sicheren Betrieb der Eloxieranlage.

### Potentiostat

Der Potentiostat (siehe Abbildung 16-5) erzeugt die nötige Strommenge (Gleichstrom). Stromdurchflossene Becken sind das Eloxal-, das Harteloxal- und das Glanzbecken.

Sämtliche Becken sind gemeinsam zu steuern. Die Stromführung erfolgt in wasserdichten Kabelschächten über eine von Fachkräften ausgeführte Kupferverkabelung. Die Stromkontrolle findet je nach Einstellung strom- oder spannungskontrolliert statt.

## HINWEIS



Die vom Hersteller gelieferte Betriebsanleitung des Potentiaostaten ist dem Anhang zu entnehmen.

## VORSICHT



Während der Eloxierung stehen alle Kupferelemente unter Strom!



Abbildung 16-5: Vorderansicht des Potentiaostaten

## Elektrolytkühlung

Die Kühlung der Becken erfolgt über Stahlspiralen (siehe Abbildung 16-6), die je nach Anforderung mit Wasser aus der Hauskühlung betrieben werden. Sämtliche Kühlmittel werden in geschlossenen Kreisläufen und über eine entsprechende Kälteanlage (Fa. HiRef, Typ PCC010) geführt.

## HINWEIS



**Die detaillierten, vom Hersteller ausgehändigten Betriebsanleitungen der Kälteanlage und der Pumpsysteme sind dem Anhang zu entnehmen.**

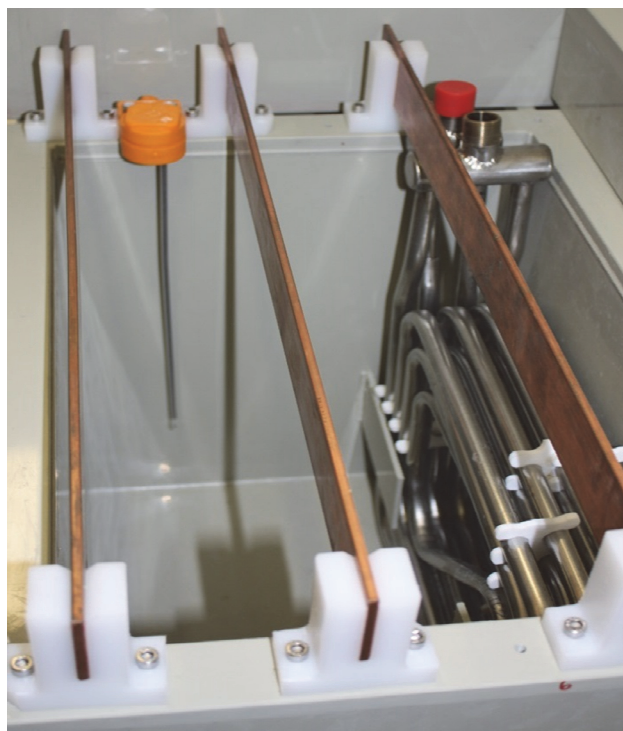


Abbildung 16-6: Innenbau des Harteloxalbeckens vor der Befüllung

## Titangestelle

Die Titangestelle zum Eintauchen der Werkstücke (Anoden) sind so gestaltet, dass sie einfach mit den Anodenschienen verbunden werden können. Die Werkstücke sind während der gesamten Prozessabfolge mittels der Titangestelle zu transportieren. Bei der Montage der Titangestelle ist auf vollständige Kontaktierung zu achten. Da Titan gegenüber sämtlichen verwendeten Chemikalien inert ist, bedarf es keiner zwischengeschalteten Beizung der Gestelle.

## Absaugung

Die Absaugvorrichtung (siehe Abbildung 16-7) dient zur Abfuhr entstehender Dämpfe und ist überall dort mit Zugangsöffnungen ausgestattet, wo mit einer größeren Wärmeentwicklung in den Bädern zu rechnen ist (siehe Abbildung 16-8).



Abbildung 16-7: Anschluss der Absaugwand an das Laborbelüftungssystem



Abbildung 16-8: Öffnungen in der Absaugwand über dem Sealingbecken



## Inbetriebnahme der Anlage

### HINWEIS



**Folgende Schritte sind bei jeder Aktivierung der Anlage und vor jedem Arbeitsgang durchzuführen. Die angeführte Reihenfolge der Komponentenaktivierung ist strikt einzuhalten.**

- 1.) Überprüfung der Absaugung
- 2.) Einschalten der Heizung (Temperatursteuerung)
- 3.) Kontrolle der Kühlung (Temperatursteuerung)
- 4.) Aktivierung der Pump- und Filtersysteme (individuelle Aktivierung der einzelnen Beckenpumpen und der Drucklufteinblasung)
- 5.) Werkstücke sicher auf Titangestellen montieren (ausreichende Kontaktierung ist zu gewährleisten)
- 6.) Erreichen der Betriebsparameter (individuelle Temperatur der Bäder)
- 7.) Langsames Eintauchen der Werkstücke
- 8.) Aktivierung der Stromzufuhr (im Eloxierschritt bzw. beim Glänzen)

### WARNUNG



**Die Werkstücke müssen vor der Stromzufuhr vollständig mit dem Elektrolyten bedeckt sein um etwaigen Kurzschlüssen vorzubeugen.**

### WARNUNG



**Die Kupferschienen sind regelmäßig durch Feilen von Oxidschichten zu befreien, ansonsten kann es einer Stromentladung (Lichtbogen) kommen.**

## Ansetzen der Bäder

Die folgenden Beschreibungen dienen zur einwandfreien Erstbefüllung der unterschiedlichen Becken.

### Entfettung

- 1.) Das Bad wird 2/3 mit entionisiertem Wasser (über Schlauchanlage) befüllt.
- 2.) Es erfolgt eine Aufwärmung auf ca. 55 °C.
- 3.) Builderlösung AR-BL58 (25 ml/l) zugeben

- 4.) Teside S10 zugeben (10 ml/l)
- 5.) Auf Endvolumen mit entionisiertem Wasser auffüllen
- 6.) Nach Erreichen der Arbeitstemperatur ist der Elektrolyt betriebsbereit

In der folgenden Tabelle befindet sich die gesamte Chemikalienübersicht zum Behandlungsschritt „Entfetten“.

Arbeitsschritt	Vorgang	Chemikalien	benötigt für 1 Vorgang	vorhanden	kaufen	Preis	Menge
entfetten	entfetten	SurTec® 133	3kg (f. 60l Bad)	bestellt	nein		
	Badanalyse durch Titration	HCl 0,1mol/l	~10ml /Titration	~2l 32%ige; ergibt ca. 200l 0,1molare Lsg.	nein		
		<i>oder</i>					
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 0,05mol/l	~10ml /Titration	~2l konz. = 96%; ergibt >700l 0,05molare Lsg.	nein		
		Methylorange-Lsg 0,04%	3 Tropfen/Titr.	nein	ja	14,70 €	0,04%ige Lsg.
	Neutralisation des gebrauchten SurTec® 133	HCl 30%ig (techn.)	0,385l HCl (f. 60l Bad m. 1%iger Lsg.)	nein	ja	28,10 €	10l ≥30%ig

## Spülen

Die Doppelspüle ist mit entionisiertem Wasser zu befüllen und gegebenenfalls mit Chemikalien aus den Folgebädern zu versehen (sanfter pH-Wert-Wechsel).

## Beizen

Ansetzen des Beizbades:

- 1.) Das Bad wird zu  $\frac{3}{4}$  mit entionisiertem Wasser gefüllt
- 2.) Die Natronlauge wird unter kräftigen Rühren langsam zugesetzt (Vorsicht: Lösung wird heiß!) – 92 ml/l bei 50%iger Lauge
- 3.) Beizzusatz BH-42 wird unter kräftigem Rühren zugegeben
- 4.) Becken wird auf Endvolumen aufgefüllt (entsprechende Markierung beachten)

# VORSICHT



**Das Ansetzen des Beizbeckens ist entsprechend langsam durchzuführen, da es sich bei den ablaufenden Reaktionen um exotherme Abläufe handelt.**

Auf der folgenden Seite befindet sich die gesamte Chemikalienübersicht für die Beizbehandlungen.

Arbeitsschritt	Vorgang	Chemikalien	benötigt für 1 Vorgang	vorhanden	kaufen	Preis	Menge	
beizen	beizen m. NaOH	NaOH 175g/l	10,5kg NaOH Plätzchen (pro 60l Bad)	4,5kg techn.	ja	49,80€	10kg	
	beizen m. SurTec® 181	SurTec® 181	~3 kg (f. 60l Bad)	bestellt	nein	87,50€	25kg	
	Badanalyse (Titr.) bei NaOH		Testlsg. $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ in NaOH und $H_2O$	10ml pro Titr.; 46,28g in 40,0g NaOH auf 250ml aufgefüllt	700g	nein	12,90€	50g Pulver, ergibt ca. 5l 1%ige Lsg.
			Phenolphthalein (c=?)	3 Tropfen/Titr.	nein	ja	15,90€	250ml 1%ige Lsg.
			Kaliumfluoridlsg.	20-60ml	ca. 2,5kg Feststoff; f. 1l Lsg werden 500g benötigt	nein		
			$H_2SO_4$ 1mol/l	~10ml/Titr.	ja (muss verd. werden)	nein		
			ev. NaOH (indirekte Titr.)	~10ml/Titr.	ja (muss verd. werden)	nein		
			HCl 1mol/l	~10ml/Titr.	ja (muss verd. werden)	nein		
	Badanalyse (Titr.) bei SurTec® 181		<i>oder</i>					
			$H_2SO_4$ 0,5mol/l	~10ml/Titr.	ja (muss verd. werden)	nein		
			Phenolphthalein 0,1% in EtOH	3 Tropfen/Titr.	siehe oben	s.o.		
			Ethanol vergällt f. Phenolph.lsg.	nach Bedarf	ca. 4l	nein		
			Natriumfluorid fest	2,5g/Titr., nur bei älteren Bädern	ja	nein		

## Dekapieren

Die Dekapierung (Neutralisation) wird mit 10%iger  $HNO_3$  und entsprechenden Zusätzen gefahren. Beim Befüllen ist die Reihenfolge der Chemikaliengabe zu beachten.

## Glänzen

Das Glänzbecken ist mit 3,5 kg SurTec 485 und deionisiertem  $H_2O$  zu befüllen.

Arbeitsschritt	Vorgang	Chemikalien	benötigt für 1 Vorgang	vorhanden	kaufen	Preis	Menge
elek. glänzen	glänzen mit SurTec® 485	SurTec® 485	3,5kg (f. 70l Bad)	bestellt	nein		
	Badanalyse bei SurTec® 485	HCl 1 mol/l	einige ml/Titr.	ja (muss verd. werden)	nein		
		Kaliumfluorid-Lsg 35%	10ml/Titr.	ca. 2,5kg Feststoff	nein		
		Phenolphthalein 0,1% in 70% EtOH	einige Tropfen/Titr.	siehe oben	s.o.		
		Ethanol f. Phenolphth.	nach Bedarf	siehe oben			
	glänzen laut Buch (mit Soda)	kalzinierte Soda = wasserfreies $Na_2CO_3$	~10kg reines Soda (für 70l Bad)	900g z.A.	ja	46,20€	10kg
		$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	~8kg (f. 70l Bad)	nein	ja	87,80€	25kg
	Badanalyse bei Sodatechnik	Methylorange-Lsg 0,1%	4 Tropfen/Titr.	siehe oben	s.o.		
		$H_2SO_4$ 1mol/l	einige ml/Titr.	siehe oben	s.o.		
		Thymolphthalein-Lsg. 0,1% in 96% EtOH	10 Tropfen/Titr.	nein	ja	15,30 €	5g
EtOH 96% f. Thymolph.		nach Bedarf	siehe oben	nein			
NaOH 2mol/l		einige ml/Titr.	siehe oben	nein			

## Eloxieren

Das Eloxalbecken ist mit 20%iger Schwefelsäure zu befüllen. Bei entsprechender Anmischung ist darauf zu achten, möglichst langsam Säure zuzugeben, damit keine zu hohen Temperaturen entstehen und die Stahleinbauten nicht angegriffen werden.

Arbeitsschritt	Vorgang	Chemikalien	benötigt für 1 Vorgang	vorhanden	kaufen	Preis	Menge	
eloxieren	eloxieren GS-Verf.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> c. (96%)	~14,6l (f. 70l Bad)	nicht genug	ja	85,80 €	25l 96%ig techn.	
	Badanalyse GSX	Testlsg. Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·18H <sub>2</sub> O in H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> und H <sub>2</sub> O	46,28g Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ·18H <sub>2</sub> O in 49,039 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> c. auflösen u. m. H <sub>2</sub> O auf 250ml auffüll.	<i>siehe oben</i>	nein			
		NaOH 2mol/l	einige ml/Titr.	<i>siehe oben</i>	nein			
		Phenolphthalein (c=?)	2-3 Tropfen/Titr.	<i>siehe oben</i>	s.o.			
		KF-Lsg.	20ml/Titr.	<i>siehe oben</i>	nein			
	eloxieren GSX-Verf.	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> c. (96%)	siehe GS-Verfahren	<i>siehe oben</i>	s.o.			
		Oxalsäure (Feststoff)	350-1050g (f. 70l Bad)	100g wasserfrei 800g Dihydrat z.A.	ja	15,65 € 39,50 €	1kg Dihydrat, krist. 1kg Dihydrat, z.A.	
	Badanalyse GSX	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> c.	1ml/Titr.	<i>nein</i>	ja	47,50 €	1l 85% z.A.	
		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> c. (96%)	20ml/Titr.	<i>siehe oben</i>	s.o.			
		KMnO <sub>4</sub> -Lsg. 0,02mol/l	einige ml/Titr.	<i>siehe oben</i>	s.o.			
		KF-Lsg.	20ml/Titr.	<i>siehe oben</i>	nein			
		Phenolphthalein	2-3 Tropfen/Titr.	<i>siehe oben</i>	s.o.			
		NaOH 2mol/l	einige ml/Titr.	<i>siehe oben</i>	nein			

## Harteloxieren

Das Harteloxalbecken ist mit 10%iger Schwefelsäure und 1 % Oxalsäure anzumischen. Wieder ist auf die Temperaturentwicklung bei der Säurezugabe zu achten. Eventuell müssen die Stahleinbauten mit Passivierungsstrom beaufschlagt werden.

## Färben

Beim Ansetzen der Farbbänder muss sich der Farbstoff vollständig auflösen. Dazu ist es sinnvoll die Chemikalie in einem zwei Liter Becherglas mit kochendem Wasser vorabzulösen. Je nach Farbton sind, entsprechend der Herstellerangaben, geringe Mengen an Essigsäure zuzugeben. Der pH-Werte muss exakt an den jeweiligen Farbton angepasst werden. Die meisten Farbbäder sind vor dauerhafter Lichteinwirkung zu schützen. Geeignete Zusätze verhindern eine Algenbildung.

## Sealing

Das Harteloxalbecken ist mit deionisiertem Wasser zu befüllen. Eine geringfügige Zugabe spezieller Harteloxalzusätze ist möglich und erfolgt nach Herstellerangaben.