

# **DIPLOMARBEIT**

**von**

**Chatué Jean Séraphin**

## **Literaturrecherche über aktuelle Einsatzbereiche von eloxierten Aluminium-Legierungen sowie praktische Verschleißtests**

**Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU Graz**

**Betreuer:**

**Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant**

**Institutsvorstand:**

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christof Sommitsch**

**Firmenbetreuer:**

**Josef Mair, MBA, Geschäftsführer Heuberger Eloxieranstalt GmbH, Graz.**

**Graz, April 2014**

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

(Unterschrift)

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

(signature)

## Danksagung

Ich möchte mich beim Institut für „Werkstoffkunde und Schweißtechnik, insbesondere bei den Herren Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christof Sommitsch und Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Enzinger bedanken, die die Durchführung dieser Diplomarbeit genehmigt haben.

Beim Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant möchte ich mich ebenfalls für die ausgezeichnete Diplomarbeitbetreuung bedanken und dafür, dass er für mich immer da war.

Herrn Dipl.-Ing. Andreas Hütter für die Versuchsdurchführungen der Verschleißtests dieser Diplomarbeit im IWS Labor der TU Graz sage ich auch danke.

Ferner noch gilt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Mustafa Kicin, Frau Dipl.-Ing. Monika Schuler für die allgemeine Unterstützung bei der Realisierung dieser Arbeit.

Bei den Herren Friedl Thomas und Stöfan Gernot sage ich für die Unterstützung bei der Metallographie im IWS - Labor danke.

Herzlichen Dank ebenso an Herrn Josef Mair, MBA, Geschäftsführer der Fa. Heuberger Eloxieranstalt, der mich beim Praktikum betreut hat.

Schließlich sage ich danke an alle, die mich direkt oder indirekt für die Durchführung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Jean Séraphin Chatué.

## Kurzfassung

Das Eloxieren von Aluminium-Bauteilen findet immer mehr Anwendung hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Leichtbau, dem Verschleiß- und Korrosionsschutz sowie aus optischen und elektrischen Gründen. Hierzu wurde eine Literaturstudie durchgeführt, um die aktuellen Anwendungen in verschiedenen Branchen zu erheben. Dies sind die Bereiche Transport- und Verkehrswesen (insbesondere Automobilbau; Luft- und Raumfahrt), Architektur und Bauwesen, Maschinen- und Anlagenbau und Medizintechnik. Weiters sind viele Gebrauchsgegenstände und -geräte für das tägliche Leben eloxiert.

Diese Literaturstudie soll einem einheimischen Eloxal-Unternehmen (KMU) zur eventuellen Erschließung neuer Geschäftsfelder dienen.

Ergänzend wurden praktische Verschleißtests an unterschiedlichen Eloxalschichten, an Aluminium-Gussteilen durchgeführt, wobei keine einheitlichen Ergebnisse erreicht werden konnten.

## Abstract

Anodizing of aluminum components is increasingly being used mainly in connection with the lightweight, wear and corrosion protection as well as optical and electrical reasons. To this end, a literature study was carried whereat the current applications in various industries have been raised. These are the areas of transportation and traffic (especially automotive and aerospace), architecture and construction, machine and plant engineering and medical engineering. Lots of utensils and equipment for daily living are anodized, too.

This literature study should be a support for a local anodizing enterprises (SMEs) to open up potential new business areas.

In addition, some practical wear tests were carried out for different anodized layers on aluminum castings, whereat no comprehensible results could be achieved.

## Résumé

L'anodisation des pièces en aluminium est de plus en plus sollicitée à cause de leur faible densité, résistance à l'usure et à la corrosion ainsi que pour des raisons optiques et leur utilisation dans le domaine de l'électricité. À cette fin, une étude de la littérature a été faite pour recueillir les applications actuelles dans diverses industries. Ce sont les secteurs comme le transport (et en particulier l'automobile, et l'aérospatial), l'architecture et de la construction, de la mécanique, des ustensiles médicaux et de nombreux équipements de la vie quotidienne.

Cette étude de la littérature aidera une entreprise locale d'anodisation (PME) pour pouvoir s'orienter dans le secteur de l'anodisation des pièces.

En outre, des tests pratiques de résistance à l'usure ont été effectués à différentes couches anodiques sur pièces moulées en aluminium, sans résultats cohérents.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG.....</b>	<b>8</b>
1.1 Ziel der Diplomarbeit .....	8
<b>2. LITERATURRECHERCHE ALLGEMEIN .....</b>	<b>9</b>
2.1 Oberflächentechnik.....	9
2.2 Galvanisieren .....	10
2.2.1 Galvanisierverfahren und - elektrolyte.....	11
2.2.2 Elektrolytisches Verzinken.....	11
2.2.3 Galvanisieren von Aluminium.....	12
2.2.4 Aluminisieren.....	12
2.2.5 Verchromen .....	13
2.2.6 Verkupfern.....	14
2.2.7 Verzinnen.....	15
2.3 Anodisieren von Titan .....	15
2.4 Hartschichten durch CVD oder PVD .....	15
2.4.1 Titanitrid (TiN) .....	16
2.4.2 Bornitrid (BN).....	16
2.5 Pulverbeschichten.....	16
2.6 Lackieren .....	17
<b>3. LITERATURRECHERCHE ELOXAL.....</b>	<b>18</b>
3.1 Aluminium / Eigenschaften und Legierungen.....	18
3.2 Aluminium-Legierungen .....	19
3.3 Natürliche Oxidschicht auf Aluminium.....	22
3.4 Voraussetzungen für das Eloxieren / Eloxierbarkeit .....	23
3.5 Eloxieren allgemein.....	25
3.5.1 Elektrochemische Vorgänge .....	26
3.5.2 Präzisionseloxieren .....	28
3.5.3 Farbeloxal .....	28
3.5.4 Eloxaldruck .....	28
3.6 Harteloxal .....	28
3.6.1 Hartanodisation von Aluminium .....	28
3.6.2 Eigenschaften der Harteloxal-Schicht.....	29
3.7 Das Verfahren der elektrolytischen Oxidation / Eloxierprozesse .....	30
3.7.1 Verfahrensablauf Eloxieren im Überblick.....	31
3.7.2 Mechanische Vorbehandlung .....	35
3.7.3 Chemische Vorbehandlung.....	36
3.7.4 Anodisieren / Eloxieren .....	37

3.7.5	Verfahrensvarianten .....	40
3.7.6	Verwendete Elektrolyte und Stromarten .....	41
<b>3.8</b>	<b>Eloxalschichten / Mikrostruktur .....</b>	<b>42</b>
3.8.1	Porenstruktur .....	44
3.8.2	TEM-Untersuchungen Sperrschicht.....	46
3.8.3	Verdichten (Sealing) / Nachbehandlung.....	48
<b>3.9</b>	<b>Eloxalverfahren zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften .....</b>	<b>51</b>
3.9.1	Fügetechnik .....	54
<b>3.10</b>	<b>Spezielle Eloxierprozesse.....</b>	<b>57</b>
3.10.1	Plasmakeramik- Verfahren (PEO- Technologie).....	57
3.10.2	Diamondzye TM- Verfahren oder Keramisches Anodisieren.....	58
3.10.3	Automatisierte Anodisierungssysteme.....	60
<b>4.</b>	<b>ELOXAL-ANWENDUNGEN IN VERSCHIEDENEN BRANCHEN.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Praktische Anwendungsbeispiele für harteloxierte Bauteile.....</b>	<b>61</b>
<b>4.2</b>	<b>Praktische Anwendungsbeispiele für eloxierte Bauteile .....</b>	<b>61</b>
4.2.1	Automobilbau .....	61
4.2.2	Maschinen- und Anlagenbau / zivile Anwendungen .....	66
4.2.3	Haushalt und allgemeine Verwendung .....	67
4.2.4	Architektur.....	68
4.2.5	Aluminiumanwendung in der Luft- und Raumfahrt .....	70
4.2.6	Thermische Spritzbeschichtung.....	79
4.2.7	Eigenschaften .....	79
4.2.8	Messung der Härte und Abriebfestigkeit.....	80
4.2.9	Schiffbau .....	80
4.2.10	Schienenfahrzeugbau .....	83
4.2.11	Medizintechnik .....	84
4.2.12	Architektur und Bauwesen .....	86
<b>4.3</b>	<b>Güteprüfung der Eloxalschichten.....</b>	<b>89</b>
4.3.1	Mögliche Fehler beim Eloxieren .....	89
4.3.2	Messung der Oxidschichtdicke .....	93
4.3.3	Prüfverfahren .....	93
<b>4.4</b>	<b>Korrosion und Korrosionsarten.....</b>	<b>94</b>
4.4.2	Korrosion von Aluminium .....	96
4.4.3	Korrosionsbeständigkeit von Eloxal.....	98
<b>4.5</b>	<b>Verschleiß und Verschleißarten.....</b>	<b>101</b>
4.5.1	Mechanismen des Verschleißes .....	102
4.5.2	Abrieb .....	102
4.5.3	Einfluss der Rauheit .....	102
4.5.4	Verschleißbeständigkeit von Eloxal .....	104
4.5.5	Verschleißtest nach Norm ISO 8251: 2011.....	105
<b>4.6</b>	<b>Erkenntnisse aus der Literaturrecherche.....</b>	<b>105</b>
<b>5.</b>	<b>VERSCHLEIßTESTS AN ELOXAL .....</b>	<b>107</b>
<b>5.1</b>	<b>Praktische Verschleißtests am IWS .....</b>	<b>107</b>

5.1.1	Beschreibung der Proben und Eloxalschichten .....	107
5.1.2	Versuchsdurchführung und Verschleißparameter .....	107
<b>5.2</b>	<b>Makroskopisches Erscheinungsbild der Verschleißspur und Schliffentnahme .....</b>	<b>109</b>
<b>5.3</b>	<b>Anfertigung metallographischer Schliffe .....</b>	<b>111</b>
<b>5.4</b>	<b>Eloxal-Härte und Schichtdickemessung.....</b>	<b>111</b>
5.4.1	Verschleißerscheinungen .....	112
<b>5.5</b>	<b>Zusammenfassung der Untersuchungen: .....</b>	<b>114</b>
<b>6.</b>	<b>PRAKTIKUM BEI HEUBERGER ELOXAL.....</b>	<b>115</b>
<b>7.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>118</b>
<b>8.</b>	<b>FIRMENVORSTELLUNG / FA. HEUBERGER ELOXIERANSTALT GMBH, GRAZ .....</b>	<b>127</b>
<b>9.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>136</b>
<b>9.1</b>	<b>Vorrichtung zur Verschleißprüfung .....</b>	<b>136</b>
<b>9.2</b>	<b>Metallographische Bilder .....</b>	<b>137</b>
<b>9.3</b>	<b>Verbände.....</b>	<b>145</b>
9.3.1	Aluminiumverbände (Auszug) .....	145
9.3.2	Oberflächentechnikverbände (Auszug) .....	147
<b>9.4</b>	<b>Begriffe der Eloxaltechnik / Terms of anodisation technique .....</b>	<b>147</b>
<b>9.5</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis und Formelverzeichnis .....</b>	<b>148</b>
<b>9.6</b>	<b>Normenverzeichnis .....</b>	<b>149</b>

# **1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG**

Auf der Oberfläche von Aluminium- und Al-Legierungen bildet sich als Reaktion mit seiner Umgebung unter atmosphärischen Bedingungen schon nach kürzester Zeit eine dünne Oxidschicht (0,1 – 0,5 µm dick). Verglichen mit den Oxidschichten, die auf den anderen Metallen entstehen, ist diese ziemlich dicht und hat dadurch eine schützende Wirkung auf den Grundwerkstoff. Nicht nur die Dichtheit ist hier entscheidend, sondern auch der Zusammenhang der bestehenden Komponenten der Schicht.

Das Eloxal-Verfahren (elektrolytische Oxidation von Aluminium) bzw. das Anodisieren von Aluminium - oder auch das Harteloxal - sind elektrochemische Verfahren, die eine Umwandlung dieser dünnen und eher schwachen Oxidschicht in eine dickere, härtere und festere Beschichtung zu ermöglichen. Die so erhaltenen eloxierten bzw. harteloxierten Oxidschichten dienen der Verbesserung der Korrosions- und Verschleißbeständigkeit (Abriebfestigkeit) der Aluminiumwerkstoffe oder der optischen Eigenschaften für dekorative Zwecke (z.B. in der Architektur) sowie auch zur Verbesserung der Klebarbeit von Aluminium-Bauteilen.

## **1.1 Ziel der Diplomarbeit**

Ein Ziel der Diplomarbeit war es, das Eloxal-Verfahren näher zu analysieren und dessen Anwendungen in bestimmten Bereichen zu erläutern und zu vergleichbaren Oberflächenveredelungsverfahren, wie z.B. das Galvanisieren, zu positionieren.

Dabei wurden die häufigsten und aktuell angewendeten Al-Legierungen aus verschiedenen Branchen (Fahrzeug-, Flugzeug-, Maschinen-, Schienenfahrzeugbau, usw.) aus der Literatur recherchiert, insbesondere welche davon im eloxierten oder im harteloxierten Zustand eingesetzt werden.

Dem Leser dieser Arbeit werden dazu Einblicke in das Wesen des Eloxal-Verfahrens sowie dessen wirtschaftliche Bedeutung, die Anwendungsmöglichkeiten und die allgemeinen Zusammenhänge, z. B. zwischen Schichtdicke und Behandlungsdauer der Teile, bekannt gemacht. Im praktischen Teil der Arbeit wurde die Verschleißfestigkeit von Eloxal und Harteloxal auf der Aluminium-Legierung 5083 Guss untersucht.

Gegenstände der Recherchen und Untersuchungen sind allgemeine Literatur, aktuelle Diplomarbeiten, Dissertationen, Forschungspublikationen sowie die wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Fachzeitschriften, Internetartikel...) u.a.m.

Dem an der Praxis orientierten Schwerpunkt des Eloxierens bzw. Harteloxierens von Aluminiumwerkstücken, wird einerseits durch das durchgeführte Praktikum bei der Fa. HEUBERGER ELOXIERANSTALT GmbH und andererseits durch die durchgeführten Verschleißtests am IWS der TU Graz Rechnung getragen.

## 2. LITERATURRECHERCHE ALLGEMEIN

### 2.1 Oberflächentechnik

Die Oberflächentechnik wird als die Summe aller Technologien zum Verändern der Eigenschaften von Oberflächen beschrieben, die einen immer wichtigeren Platz in der Anwendung einnehmen. Dabei spielt beispielweise die Entwicklung weiterer Werkstoffe und damit auch Ihre Oberflächenbehandlung eine zentrale Rolle. Um den steigenden Anforderungen in der Industrie, vor allem in den Bereichen wie Luft- und Raumfahrt, Automobil-, Schienenfahrzeug-, Schiffbau usw. gerecht zu werden, müssen die Verfahren der Oberflächentechnik heutzutage ständig verbessert werden.

„Die Grundidee der Oberflächentechnik ist das Prinzip der Funktionstrennung zwischen dem Volumen eines Bauteils oder eines Werkstückes und seiner Oberfläche,„ [1], (S.1), [2].

Die Oberflächentechnik dient dazu, um folgende Funktionen erfüllen zu können oder sie zumindest zu verbessern:

- Schutz der Oberfläche
- Schichtgrenzen setzen (Trennungsschicht)
- elektrische Funktion (elektrische Isolation, Leitfähigkeit)
- Dekorationsfunktion, etc. [3].

Das Eloxieren und das Harteloxieren als Teil der Oberflächentechnik werden in dieser Arbeit als Hauptthema behandelt.

Eine günstigere Preisentwicklung und die Erwartung, dass immer reinere Materialien oder neue Legierungen auf dem zukünftigen Werkstoffmarkt zu finden sein werden, sind die Gründe für eine stetige Aluminiumverwendung. Das Eloxieren bzw. Anodisieren ermöglicht es, eine dickere Oxidschicht für eine bessere Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Härte sowie eine gute Einfärbbarkeit oder dekoratives Aussehen zu erzeugen. Dies führt zu einer stetigen Anwendung der Aluminiumwerkstoffe, [4], (S.148).

Neben dem Eloxieren und Harteloxieren werden weitere Beschichtungsverfahren bzw. Oberflächenveredelungen z.B. Galvanisieren, Pulverbeschichten oder Lackieren aus der Literatur aufgezeigt. Aus Abbildung 1 ist zu entnehmen, dass ca. 8% der Marktanteile der Oberflächentechnologien dem Eloxal zugeordnet werden. Galvanisieren (aufbringen metallischer Schichten) hat z.B. einen Anteil von ca. 26%.

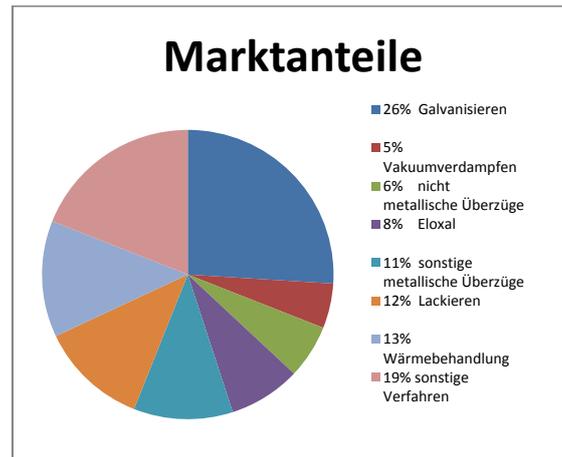


Abbildung 1: Marktanteile der Oberflächentechnologien (Deutschland), [1], (S.21)

## 2.2 Galvanisieren

Galvanisieren wird als eine Elektrolyse definiert, mit dem Zweck, Metalle oder andere leitende Materialien mit einer Metallschicht zu überziehen. Eine edlere Metall- oder Schutzschicht sieht zumeist schön aus und schützt relativ unedlere Metalle gegen Oxidation und Korrosionseingriffe [5].

Das Prinzip einer Anlage zum Galvanisieren ist in Abbildung 2 dargestellt. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Erdung gut angelegt wird und Kurzschlüsse vermieden werden.

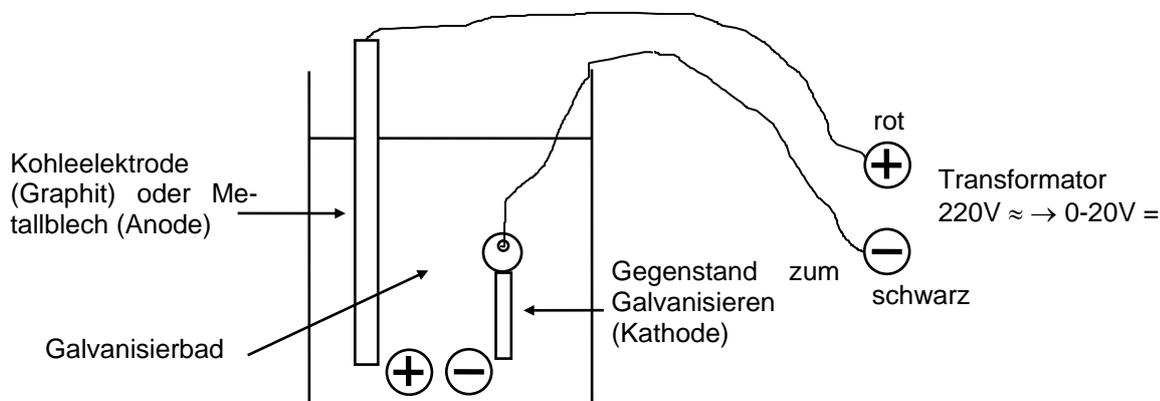


Abbildung 2: Prinzipschema einer Schaltung für das Galvanisieren [5].

Die zu galvanisierenden Werkstücke werden wie das Schema es zeigt am Minus-Pol angebracht und in ein Galvanisierbad getaucht. Die Anlage wird dann unter Spannung und Strom gesetzt und das Verfahren unter Berücksichtigung der Parameter laufen gelassen. Es bildet sich eine Schutzschicht auf der Oberfläche des Grundwerkstoffes.

Galvanisieren wird als Oberflächenbehandlungsverfahren häufig verwendet. Es ist zu erwähnen, dass Galvanisieren einen Marktanteil von ca. 26 % von den Oberflächenbehandlungsverfahren in Deutschland hat, siehe hierzu Abbildung 1. Diese Prozentzahl ist nicht zu vernachlässigen und muss deshalb in dieser Studie neben dem Eloxieren bzw. Harteloxieren behandelt werden.

## 2.2.1 Galvanisierverfahren und - elektrolyte

Die technisch ähnlichen Galvanisierverfahren beschränken sich jeweils auf spezielle Substrate oder Beschichtungsmaterialien und erhalten dadurch ihre spezifischen Namen. Diese sind: anodische Oxidation (bei Aluminium auch Eloxieren), Bandgalvanisieren, Brünieren, chemisches Galvanisieren durch Potentialdifferenz (Außenstromlos) oder Reduktionsmittel, siehe dazu Reduktion, Chromatieren, Färben von Metall, Gepulste Elektrodeposition, Gestellgalvanisieren, Kunststoffgalvanisierung, Leiterplattenherstellung, Phosphatieren, Tampongalvanisieren, Tauchverfahren (früher Sudverfahren), Trommelgalvanisierung, Veralisieren, Verchromen, Verstrahlen.

Die galvanischen oder stromlosen Verfahren finden in wässrigen Lösungen statt, die als galvanische Bäder (Galvanotechnik) oder auch noch Elektrolyte bezeichnet werden. Es wird hier zwischen sauren ( $\text{pH} < 7$ ) und alkalischen ( $\text{pH} > 7$ ) Bädern unterschieden. Weiters werden die Bäder in schwefelsaure, chloridhaltige, cyanidische, pyrophosphathaltige und verschiedene andere unterteilt. Matt-, Halbglanz- und Glanzbäder sind auch noch weitere Varianten, die zu berücksichtigen sind. Sie beziehen sich hier auf das Aussehen der Oberfläche. Für spezielle Fälle, d.h. für dickere, härtere, magnetischere Überzüge werden auch entsprechende Bäder in Betracht gezogen.

Wichtige Betriebsparameter sind Temperatur, Strom (Art, Dichte), Spannung und Badbewegung, die während des Verfahrens einzuhalten sind. Meistens sind die Grenzwerttoleranzen großzügig, manchmal aber auch nicht. In Tabelle 1 sind typische Verfahrensabläufe beim Galvanisieren aufgelistet.

	Verfahrensschritt	Grundwerkstoff Stahl	Grundwerkstoff Kupfer	Grundwerkstoff Kupfer- Zink
1	Vorentfetten	X	x	X
2	Beizentfetten (1)	X	X	X
3	Elektrolyt. Entfetten	X	X	X
4	Dekapieren (2)	X	X	X
5	Metallabscheiden	x	X	x

**Tabelle 1: Allgemeiner Verfahrensablauf für Cadmium, Zink- und Zinn- Schichten auf Stahl, Kupfer und Kupfer/Zink.**

Legende: x = erforderlich; o = empfohlen; - = entfällt / (1) = bei Werkstücken mit korrodierter Oberfläche kann Verfahrensschritt evtl. entfallen / (2) = Vor borflußsauren Elektrolyten in Borflußsäure dekapieren

Es werden die folgenden Elektrolyte eingesetzt: Aluminium-, Antimon-, Blei-, Bronze-, Cadmium-, Cobalt-, Eisen-, Gold-, Indium-, Kupfer-, Mangan-, Messing-, Nickel-, Nickel-Eisen-, Palladium-, Platin-, Rhenium-, Rhodium-, Ruthenium-, Silber-, Wismut-, Wolfram- und Zinnelektrolyte u.a.m.

## 2.2.2 Elektrolytisches Verzinken

Die zu verzinkenden Teile werden in einem Zinkelektrolyten eingetaucht. Die Werkstücke werden hier als Kathode gehängt. Als Anode wird meistens möglicherweise eine Elektrode aus reinem Zink benutzt, siehe Abbildung 3.

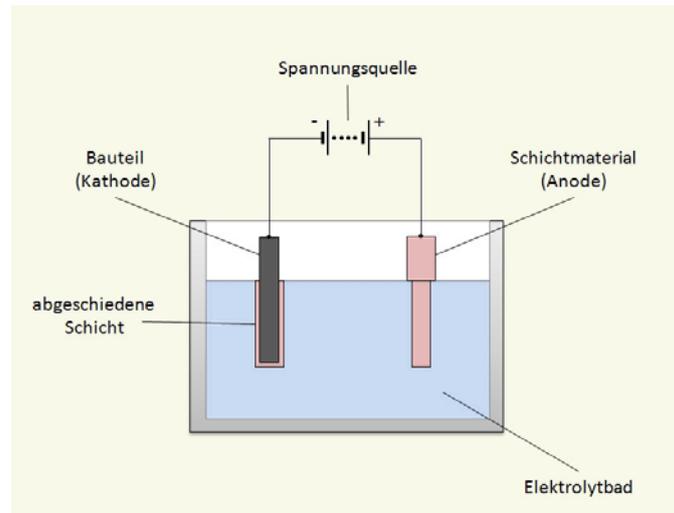


Abbildung 3: Prinzipschema Elektrolytisches Verzinken, [6].

Die Dicke der Beschichtung ist hier abhängig von der Zeitdauer und Stärke des fließenden Stroms [7] (S. 42). Die behandelten Oberflächen eignen sich gut zur darauffolgenden Pulverbeschichtung, da sie keine Oberflächenstruktur enthalten [8].

### 2.2.3 Galvanisieren von Aluminium

Vor dem Galvanisieren von Aluminium wird es empfohlen, die zu beschichteten Teile vorzubehandeln. Verfahrensfolge:

- Reinigen, Ätzen oder Beizen und Aktivieren
- Aufbringen einer Zwischenschicht
- Galvanisieren [7], (S.202).

Das Galvanisieren von Aluminium findet u.a. folgende Anwendungen:

- Verbesserung des dekorativen Aussehens und Korrosionsschutz
- Erhöhung der Oberflächenhärte, wie sie durch eine anodische Oxidation nicht immer zu erreichen ist.
- Verringerung des elektrischen Übergangswiderstandes
- Verbesserung der Schweiß- und Lötbarkeit
- Verbesserung der tribologischen Eigenschaften
- Erhöhung der Haftfestigkeit bei der Herstellung von Gummi/Metalverbindungen [7], (S.437).

### 2.2.4 Aluminisieren

Eine elektrochemische Abscheidung von Aluminium aus einer wässrigen Lösung, die Aluminiumionen enthält, ist aufgrund der Zersetzungsspannung des Wassers nicht möglich [9] (S.39). Die elektrolytische Spaltung des Wassers in Sauerstoff und Wasserstoff erfolgt bevor

die Abscheidespannung des Aluminiums erreicht wird. Deswegen ist eine Abscheidung nur aus wasserfreien Schmelzen von Aluminiumsalzen oder wasserfreien Elektrolyten möglich.

Beispiel: Aluminium aus Schmelze (Zusammensetzung: Aluminium- und Natriumchlorid im Verhältnis 1:1, 3:2 oder 3:1. Die Schmelze muss vollkommen eisenfrei sein. Die Elektrolyse erfolgt bei einer Temperatur zwischen 40-50°C über dem Schmelzpunkt des Gemisches (Stromdichte bei max. 0,5 A/dm<sup>2</sup>), [7] (S.383).

Beim Aluminisieren wird Aluminium durch Diffusion in Metalle eingebracht. Es bildet sich Aluminiumoxid an der Oberfläche des Metalls, eine Temperaturbeständigkeit bis zu 1500°C wird somit erreicht. Anwendungsbeispiele sind Wärmetauscher und Ferrulen in der chemischen und petrochemischen Industrie.

Merkmale von einer aluminieren Schicht:

- Schichttiefen: 10 bis 1000µm
- Temperaturbeständigkeit bis 1500°C
- Eigenschaft: Antidiffusion (Vorbeugung Kohlenstoffdiffusion)
- Kann für alle Ferrometalle verwendet werden, [10].

### **2.2.5 Verchromen**

Chrom zeichnet sich durch hohe Härte und Abriebfestigkeit aus. Verchromt werden Teile, um sie prinzipiell gegen Korrosion zu schützen oder auch einfach zum Dekor. Chrom kann aus Chrom (VI) oder aus Chrom (III)-haltigen Lösungen abgeschieden werden. Als Elektrolyt für die Verchromung eines Teiles kann z. B. Chromsäure dienen (Konzentration: 250 und 600g Chrom(VI)-Oxid).

Elektrolyte zum Verchromen sind folgende:

- Schwefelsäure
- Mischsäure
- Tetrachromatelektrolyte
- Hartverchromungselektrolyte

Verfahrensvarianten sind Glanzverchromen, Schwarzverchromen sowie Hartverchromen und Porösverchromen. Beim Hartverchromen betragen die Schichtdicken mehr als 2µm; üblicherweise betragen die Schichtdicken zwischen 10 und 100µm - [11] (S.22).

Chrom (Farbe: bläulich-weiß) kann galvanisch in glänzender Form auf **Stahl** abgeschieden werden und besitzt ein hohes Reflexionsvermögen. Die Gründe für die Anwendung sind Korrosionsschutz, Dekoration und spezielle Funktionen.

Die Eigenschaften der Schicht sind wie folgt:

- Korrosionsbeständigkeit bei normaler und erhöhter Temperatur
- Hohe Härte und Abriebfestigkeit

Vorsicht ist geboten bei wässrigen Lösungen auf Chromsäurebasis (H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>), die in der Galvanotechnik zur Erzeugung eines Chromüberzugs auf Metall- und Kunststoffgegenständen verwendet werden. Diese sind sehr stark ätzend und ebenfalls sehr giftig.

Um gute Ergebnisse bei der Verchromung von **Aluminium** zu erzielen, wird empfohlen, die Bauteile vor der Verchromung, zu verzinken. Eine Nachbehandlung nach der Aluminium-Verchromung ist nicht erforderlich. Das Aussehen (Glanz) der behandelten Teile sowie der Korrosionsschutz oder einfach ein Schutz gegen Kratzer sind einige Gründe für das Verchromen der Teile [12].

Die Technologie, Kunststoff als nichtleitenden Stoff galvanisch zu beschichten, ist schon lange bekannt. Nicht alle Kunststoffarten sind für Galvanisieren geeignet. Galvanisierfähige Kunststoffe sind:

ABS (auf Basis von Acrylnitril- Stadien- Styrol), Polypropylen, Copolymer. Polyamid ist z.B. ein direkt galvanisierfähiger Kunststoff.

Die Vorteile von Kunststoff gegenüber Stahl sind folgende:

- Galvanisierte Kunststoffbauteile sind leichter als vergleichbare Metallteile.
- Der aus Kunststoff in einer Form gespritzte Teil wird vom Anguss getrennt und ist für die Galvanisierung fertig.
- Komplizierte Bauteile können somit leicht gegossen und galvanisiert werden.
- Wegfallen der Vorbehandlung.
- Schnellere Herstellung größerer Stückzahl.
- Preiswerter und schöner [7] (S. 384- 388).

## 2.2.6 Verkupfern

Das Verkupfern wird allgemein definiert als die Beschichtung von metallischen Gegenständen mit Kupfer. Zum Verkupfern dient für Stahl eine Lösung von Kupfervitriol, Seignettesalz oder Ätznatron. Es wird meistens als Basis für Vergolden oder Verzinnen aufgebracht oder als Zwischenschicht vor Vernickeln oder Verchromen von Stahloberflächen verwendet.

- In der Galvanotechnik
- Beim Galvanisieren von Kunststoffen
- Als Endsicht für dekorative Zwecke usw.

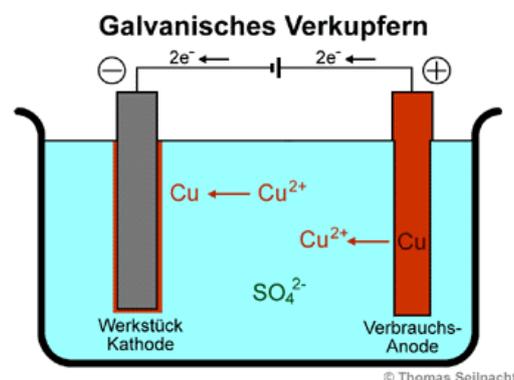


Abbildung 4: Prinzipschema Verkupfern [6].

Kupfer lässt sich aus sauren und alkalischen Elektrolyten abscheiden. Zu den wichtigsten Säure-Elektrolyten gehören schwefel- und borflusssäure Elektrolyte. Dabei sind die am meisten benutzten alkalische Elektrolyte, der cyanid- und der pyrophosphathaltige. Weiters werden auch Sulfamat- und Kupferaminelektrolyte eingesetzt.

Zu den Parametern, die das Ergebnis (z. B. Härte) der Kupferschicht beeinflussen, gehören in erster Linie die Zusammensetzung der Elektrolyten, sowie auch die Stromdichte, die Temperatur u.a.m.

### **2.2.7 Verzinnen**

Zinn (silberweißes Metall) ist verhältnismäßig gut korrosionsbeständig gegen schwache Säuren, Feuchtigkeit und wässrige Salzlösungen. Angegriffen wird es von halogenen, starken alkalischen Lösungen und Mineralsäuren.

Verzinnen ist ein Oberflächenbehandlungsverfahren. Es ermöglicht, Zinnüberzüge auf metallischen Gegenständen anzubringen. Beim elektrolytischen Verzinnen werden die zu behandelten Bauteile in einem Zinnelektrolysen-Bad eingetaucht. Eine ziemlich dünne Zinnschicht bildet sich sobald eine elektrische Spannung angelegt wird. Dieses Verfahren wird wegen der Lebensmittelverträglichkeit des Zinns besonders im Bereich Lebensmittelindustrie angewendet.

Zwei Arten von Elektrolyten werden verwendet:

Saure Elektrolyte, in denen das Zinn in der zweiwertigen Form vorliegt (früher auch als Stannoverbindungen' bezeichnet).

Alkalische Elektrolyte, in denen das Zinn in vierwertiger Ionenform vorliegt (früher als Stanniverbindungen bezeichnet) [7] (S.371).

Beispiele für Zinnelektrolyte sind Zinnsulfat, Zinnfluoroborat, Natrium- und Kaliumstannat [7].

## **2.3 Anodisieren von Titan**

Auch beim Anodisieren von Titan wird (wie bei Aluminium) die Werkstückoberfläche in eine Oxidschicht umgewandelt. Somit wird das Werkstück vor Korrosion und Abrieb geschützt. Titan verdankt seine hervorragende Korrosionsbeständigkeit einer dünnen Oxidschicht. Durch eine anodische Behandlung kann diese  $\text{TiO}_2$ -Schicht gezielt beeinflusst werden.

Titan kann sowohl in saurer als auch in alkalischer Lösung anodisiert werden. So kann die Dicke des Oxidfilms von wenigen Nano- bis zu einigen Mikrometern erzielt werden, was die Korrosionsbeständigkeit und die tribologischen Eigenschaften des Bauteils erheblich verbessert. Hinzu kommt die Möglichkeit einer farbigen Codierung von Titan-Bauteilen bei der Anodisation in saurer Lösung [13].

Anwendung findet anodisiertes Titan vor allem in der Luft- und Raumfahrttechnik sowie Medizintechnik, wo Titan als biokompatibler Werkstoff für Implantate und in der Zahnheilkunde eingesetzt wird [14].

## **2.4 Hartschichten durch CVD oder PVD**

CVD und PVD (Chemical/Physical Vapour Deposition) sind Vakuum-Technologien, zur Abscheidung sehr dünner, harter und reibungsarmer Schichten.

Beim CVD-Verfahren werden Hartstoffe aus der Gasphase abgeschieden. Einer der Vorteile dieses Verfahrens liegt in der Beschichtbarkeit von Bohrungen und Hinterschneidungen. Die Beschichtungstemperatur beträgt hier ca. 1000°C [15], [16].

Beim PVD-Verfahren (physikalische Abscheidung im Niedertemperaturplasma), erfolgt die Abscheidung von dünnen Schichten mit physikalischer Unterstützung. Bohrungen und Hinterschneidungen werden eingeschränkt beschichtbar. Die Beschichtungstemperatur liegt zwischen 200 und 500°C [15], [16].

### **2.4.1 Titannitrid (TiN)**

Die TiN-Schichten werden mittels PVD-Verfahren auf den Grundwerkstoff aufgebracht. Dieses erlaubt das Abscheiden der Schicht auf Werkzeugstählen, HSS (Schnellarbeitsstahl), Hartmetallen oder vielen anderen Werkstoffen bei Temperaturen kleiner als 450°C [17].

Die Härte der Schicht liegt zwischen 2000 und 2500 HV<sub>0,01</sub>. Anwendung findet TiN als Schneidwerkstoff, für die Konstruktion von Spritzgussformen für Kunststoff oder einfach als Dekorationsbeschichtung. TiN-Schichten werden auch noch in der Herstellung von Zerspanungs-, Umform-, Ziehwerkzeugen, Spritzgießformen und in der Medizintechnik (Allergieschutz) verwendet.

### **2.4.2 Bornitrid (BN)**

Bornitrid (BN) kann in Alpha-, Beta- und Gamma- Modifikationen vorkommen. Die Bornitride werden der Struktur nach auch in hexagonale, kubische bzw. wurzitische Bornitride (h-BN, c-BN und w-BN) unterteilt. Unter dem Namen „Borazon“ wurde CBN 1969 von der Fa. General Electric auf dem Markt gebracht.

Bornitrid ist geeignet für Anwendungen, bei welchen extreme Härte, Temperaturstabilität und chemische Resistenz erforderlich ist.

Das  $\beta$ -Bornitrid (CBN) wird oft als Schleifmittel oder auch als Schneidstoff für Wendeschneidplatten zur Bearbeitung von Stahl eingesetzt. Bornitrid und Diamant werden als superharte Schneidstoffe bezeichnet. Es handelt sich hier um Schneidstoffe, die eine Vickershärte von mehr als 50.000 N/mm<sup>2</sup> (50 GPa) besitzen.

## **2.5 Pulverbeschichten**

Mit diesem Oberflächenbeschichtungsverfahren - auch Pulverlackierung genannt - werden elektrisch leitfähige Werkstoffe mit Pulverlack beschichtet.

Das Verfahren besteht prinzipiell aus einer Vorbehandlung (d.h. Reinigung), einer anschließenden Zwischentrocknung, einer elektrischen Beschichtungszone und endgültigen Trocknung. Der Teiletransport wird dabei durch ein Fördersystem gesichert.

Die Teile werden am Anfang des Verfahrens wie üblich vorbehandelt, um die Oberflächeneigenschaften des Bauteiles zu verbessern. Nach einer Zwischentrocknungszone kommen die Teile in die Beschichtungszone, wo sie mit Pulverlack beschichtet werden. Wie schon oben erwähnt, ist dabei die elektrische Leitfähigkeit der Teile wichtig. Das Pulverbeschichten ist somit eine alternative Oberflächenbeschichtung zum Eloxalverfahren. Hier wachsen auch wie beim Galvanisieren keine Poren auf dem Grundwerkstoff, sondern es wird tatsächlich darauf eine Schutzsicht aufgetragen.

## 2.6 Lackieren

Zum Zweck der Dekoration oder zur Steigerung der Korrosionsbeständigkeit werden öfters Bauteile lackiert. Eine Vorbehandlung wird beim Lackieren meistens empfohlen. Hierbei wird grundsätzlich zwischen chemischen und physikalischen Verfahren unterschieden.

Der Lack besteht prinzipiell aus Bindemitteln, Füllstoffen, Pigmenten, Lösemitteln, Harzen und / oder Acrylaten und Additiven, sowie Bioziden (Topf- Konservierer) [18].

Lackieren hat generell folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Protektion ( schützende Wirkung, z. B. Schutzanstrich, Schutzlake )
- Dekoration ( optische Wirkung, z. B. ein bestimmter Farbeffekt ) und
- Funktion (besondere Oberflächeneigenschaften, z. B. veränderte elektrisch Leitfähigkeit) [18].

Die Eigenschaften einer Lackschicht sind zwar verschieden zu den Eigenschaften einer Eloxalschicht. Hauptzweck ist aber ebenfalls die Grundwerkstoffoberfläche gegen Korrosion und Verunreinigung zu schützen, sowie die Werkstückoberfläche dekorativ zu gestalten.

### 3. LITERATURRECHERCHE ELOXAL

#### 3.1 Aluminium / Eigenschaften und Legierungen

In der Literatur verwenden manche Autoren das Wort „Aluminium“, nicht nur, um das Reinaluminium zu bezeichnen sondern auch seine Legierungen. Mit dem Elementsymbol Al und der Ordnungszahl 13 ist Aluminium ein relativ weiches und zähes Leichtmetall. Aluminium wird durch Passivierung so geschützt, dass es bei Raumtemperatur mit Luft oder Wasser nicht mehr reagiert. Der wichtigste Rohstoff für die Herstellung von hochwertigen Aluminiumprodukten ist das Erz „Bauxit“. Es ist das einzige wirtschaftlich wichtige Ausgangsmaterial für die Aluminiumproduktion [19], [20], [21], (S.11-13) und besteht hauptsächlich aus Tonerde, Eisenoxid, Sand und Titanoxid.

Tabelle 2 zeigt die allgemeinen Eigenschaften von einigen Leichtmetallen im Vergleich zu Eisen. Ein Vergleich der angegebenen verschiedenen Dichten zeigt, dass die Dichte vom Eisen fast drei Mal größer ist als die vom Aluminium. Besonders beim Verkehrswesen spielt diese Dichte eine wichtige Rolle, da die Reduzierung der Fahrzeug-, bzw. Flugzeugmassen von Vorteil ist. Die Leichtmetalle ersetzen immer öfter den Stahl bei den Konstruktionen, besonders wo eine Gewichtseinsparung erforderlich ist. Aus diesen Gründen finden Aluminium- und Al-Legierungen immer öfters Verwendung in den Industrien. Eine dadurch immer beliebtere Oberflächenbehandlungsart ist „die Anodisierung“ oder auch „Eloxierung“.

	Symbol	Kristallstruktur	Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Schmelzpunkt $T_M$ [°C]	E- Modul [MPa]
Aluminium	Al	kfz	2,70	660,5	70 000
Magnesium	Mg	hdp	1,74	648,8	44 100
Titan	Ti	hdp, krz ab $T > 882^\circ\text{C}$	4,51	1660	110 000
Eisen	Fe	krz, kfz ab $T > 911^\circ\text{C}$ krz ab $T > 1392^\circ\text{C}$	7,87	1535	210 000

**Tabelle 2: Physikalische und mechanische Eigenschaften von Leichtmetallen und Eisen, [1] (S.380).**

Die Zugfestigkeit von reinem Aluminium liegt bei 49 MPa, die von seinen Legierungen bei 300 bis 700 MPa, sein Elastizitätsmodul liegt je nach Legierung bei etwa 70.000 MPa. Es ist dehnbar und kann durch Auswalzen zu dünnen Folien verarbeitet werden. Sogenannte Aluminium-Knetlegierungen lassen sich auch bei niedrigen Temperaturen gut umformen, biegen, pressen, und schmieden. Durch Kaltumformen im Werkstoff entstandene Spannungen können danach durch Weichglühen (bis 250°C) beseitigt werden. Duraluminium wird auch bei dieser Temperatur verformbar [22].

Die Legierungszusammensetzung spielt ebenfalls eine entscheidende Rolle. So lassen sich Al-Legierungen mit bis zu 3% Magnesium oder Silizium gut gießen (Aluminium-Druckguss) und spanabhebend bearbeiten [19]. Der Schmelzpunkt von Aluminium liegt bei 660,4°C und der Siedepunkt bei 2470°C. Die Dichte von 2,7 g/cm<sup>3</sup> zeigt den Typus als Leichtmetall deutlich.

Das reine Leichtmetall Aluminium hat aufgrund einer sich sehr schnell an der Luft bildende dünnen Oxidschicht ein stumpfes, silbergraues Aussehen. Diese passivierte Oxidschicht macht reines Aluminium bei pH-Werten von 4 bis 9 sehr korrosionsbeständig, sie erreicht eine Dicke von etwa  $0,05\ \mu\text{m}$  [19]. Diese Oxidschicht schützt auch vor weiterer Oxidation, ist aber bei der elektrischen Kontaktierung und beim Schweißen hinderlich. Sie kann durch eine elektrolytische Oxidation (Eloxieren) oder auch auf chemischem Weg verstärkt werden.

Wie es schon oben erwähnt wurde, hängen die Eigenschaften von Aluminium-Legierungen von der Zusammensetzung und der Warmbehandlung ab; siehe hierzu Abbildung 5.

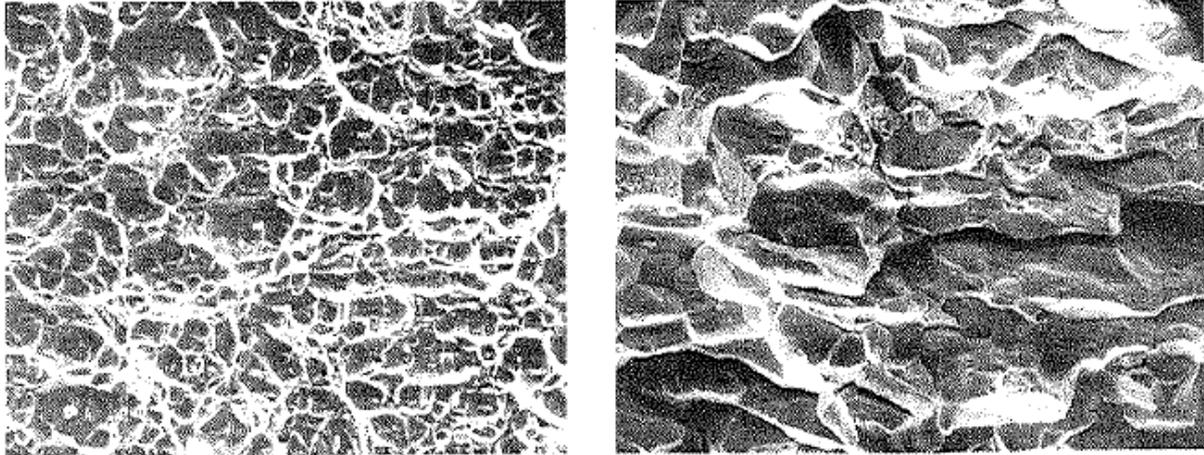


Abbildung 5: Brüche in Aluminiumlegierungen: (li.) duktil; (re.) spröde. 250fach (mit freundlicher Genehmigung Alcoa Research Laboratory) [23] (S. 74)

Die Brüche zeigen, dass sich die Struktur eines duktilen Al-Werkstoffes von der einer spröden unterscheidet.

### 3.2 Aluminium-Legierungen

**Reinstaluminium:** Al 99,99; ist das weichste Aluminium überhaupt und für Glänzen und Anodisieren (Eloxieren) geeignet. Mit einer Zulegierung von Magnesium verbessern sich die mechanischen Eigenschaften, ohne dass sich die Eloxierbar- oder Glänzbarkeit wesentlich verschlechtert. Beim Anodisieren (Eloxieren) entstehen sehr harte, transparente Schichten, die eine gute Korrosionsbeständigkeit vorweisen und hohen Ansprüchen z. B. im Automobilbau, Schmuckwaren usw. gerecht werden [4] (S.149).

**Reinaluminium:** Es handelt sich hier um einen Aluminiumwerkstoff mit geringer bis mittlerer Festigkeit. Seine Korrosionsbeständigkeit nimmt mit sinkendem Reinheitsgrad ab, die mechanische Festigkeit aber zu. Die Trübung der erhaltenen Eloxalschicht nimmt mit sinkender Reinheit und Homogenität des Materials zu. Bei steigender Reinheit wird die Glänzbarkeit in chemischen oder elektrolytischen Glänzbädern hingegen besser [4] (S.149).

**Al-Mg-Legierungen:** AlMg3, AlMg5, AlMg7; eine höhere Festigkeit diese Materialien erhält man mit steigendem Magnesiumgehalt. Sie sind korrosions- und seewasserbeständig sowie gut eloxierbar. Bei einer Legierung mit 2 bis 4 % Magnesium ergibt sich beim Eloxieren der Oberfläche auch bei größerer Dicke eine verhältnismäßig geringere Trübung.

Sehr oft verwendet wird neben AlMg3 auch AlMgSi0,5 für Architekturteile, Schiffbau und stark korrosionsbeanspruchte Teile. Im Gegensatz dazu ist die Legierung AlMg4,5Mn schlecht eloxierbar [4] (S.149-159).

**Aluminium-Magnesium-Siliziumlegierungen:** Sind hochfeste aushärtbare Werkstoffe, und für hochbeanspruchte Teile bestimmt. Mit einem Siliziumgehalt unter 1,5%. Diese Legierung (Al-Mg-Si) verhält sich beim Anodisieren wie AlMg3 und AlMg5. Übersteigt der Siliziumgehalt die 1,5 %-Grenze, dann sind die Legierungen für dekoratives Eloxieren meist ungeeignet [4], (S.150).

**Aluminium-Siliziumlegierungen:** Legierungen mit mehr als 1,5% Silizium lassen sich prinzipiell nicht mehr dekorativ anodisieren, da eine ungleiche graue Färbung entsteht. Homogenisierten Legierungen wie AlSi5 „homogen“, können jedoch für dekorative Anodisierung eingesetzt werden. Die Farbe der Oberfläche wird hierbei je nach Siliziumgehalt und Stärke hell- bis dunkelgrau [4], (S.150).

**Aluminium-Magnesium-Zinklegierungen:** Sind aushärtbar, leicht vergießbar und behalten ihre gute Eignung für die Anodisierung. Während die Gußlegierungen dieser Gruppe häufig Anwendung im Innenraum von Fahrzeugen finden, werden die Knetlegierungen eher im Automobilbau z.B. für Stoßstangen oder für Fensterrahmen verwendet [4], (S.150).

**Aluminium-Kupfer-Magnesiumlegierungen:** Sind thermisch vergütbare Legierungen mit sehr hoher mechanischer Festigkeit, jedoch geringerer Korrosionsbeständigkeit. Sie sind nicht gut eloxierbar, da die Oxidschicht ungleichmäßig erscheint und daher keine hohe Korrosionsbeständigkeit zu erwarten ist. Gebraucht werden sie meistens für hochbeanspruchte Bauteile [4], (S.150).

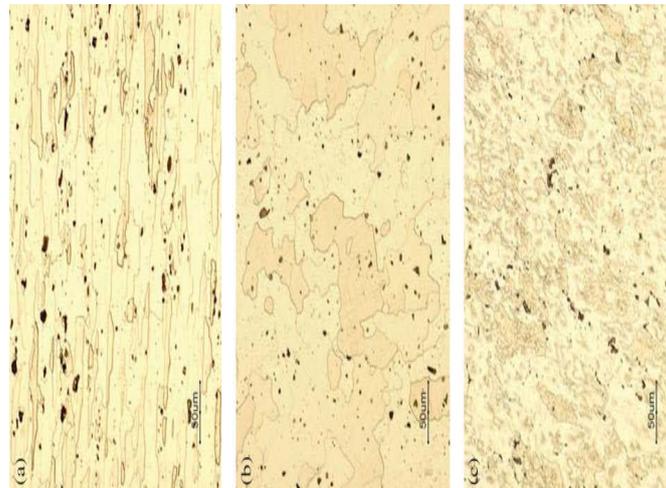
**Manganhaltige-Aluminiumlegierungen:** Legierungsgruppe mit nur mittlerer Festigkeit aber guter Korrosionsbeständigkeit. Sie sind für dekorative Zwecke nur als mattiertes Material einsetzbar, aufgrund der Tatsache, dass die Schichten beim Anodisieren je nach Mangan-gehalt milchig-trüb bis grau-streifig ausfallen [4], (S.150).

**Aushärtbare Aluminiumlegierungen:** Man beachte also, dass nur ein Teil der Al-Legierungen aushärtbar ist; in Tabelle 3 sind einige Beispiele dazu angeführt.

<b>Knetlegierungen</b>	<b>Gusslegierungen</b>
Al Cu Mg	G Al Si Mg
Al Cu Mg Pb	G Al Si Mg (Cu)
Al Mg Si	G Al Mg Mn
Al Zn Mg	

**Tabelle 3: Aushärtbare Legierungen [4], (S.149)**

In Abbildung 6 a, b und c sind Aufnahmen von metallographischen Schliffen im Lichtmikroskop dargestellt, die die Mikrostruktur von Aluminium 7075- T6 in verschiedenen Richtungen zeigen. Die Aluminiumwerkstoffe dieser aushärtbaren Klasse 7075 werden häufig in der Luft- und Raumfahrttechnik, im Automobilbau verwendet [24].



**Abbildung 6: Mikrostruktur von Aluminium 7075- T6 / a, Längs-, b, Quer-, c. Dickenrichtung; Aluminiumoxidkeramik 99,7% ( $Al_2O_3$ ), [25], (S. 9). [26], (S.433).**

Aluminium und Al-Legierungen lassen sich in 9 Gruppen einteilen [27]:

Aluminium, 99% und höher	1xxx ( Serie 1000 )
Al-Legierungen unterteilt nach den Hauptlegierungselementen	
Kupfer	2xxx ( Serie 2000 )
Mangan	3xxx ( Serie 3000 )
Silicium	4xxx ( Serie 4000 )
Magnesium	5xxx ( Serie 5000 )
Magnesium und Silicium	6xxx ( Serie 6000 )
Zink	7xxx ( Serie 7000 )
Sonstige Elemente	8xxx ( Serie 8000 )
Nicht verwendete Serie	9xxx ( Serie 9000 )

**Tabelle 4: Einteilung von Aluminium und Al-Legierungen in 9 Gruppen [27].**

Einige Al-Legierungen wie die Klassen 2024 (Serie 2000) und 7075 (Serie 7000) werden häufig in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet. Die Festigkeit und Dichte von Aluminium und Aluminiumlegierungen sind günstig für ihre Anwendung in der Luftfahrt. Die elektrische Leitfähigkeit und Dichte hingegen, begünstigen ihre Anwendung bei Überlandleitungen. Wegen der guten Korrosionsbeständigkeit werden sie auch im Bauwesen gebraucht [27], (S.2). Strangpressprofile (Knetlegierungen) aus EN AW-ALMg0,7Si (EN AW 6063 T4) finden eher Anwendung im Fahrzeugbau [27], (S.19). Karosserien, Motoren, Leichtfelgen (Alufelgen) sind Anwendungsbeispiele für Aluminium in dieser Branche (siehe auch Kapitel 'Eloxal-Anwendungen in den verschiedenen Branchen').

	Reihe	Legierungselemente	Gruppen	Anwendung
naturhart	1xxx	> 99 % Al	Al	Folien, Verpackung, Elektronik
	3xxx	Mn Mg, Cu	AlMn	Rohre, Behälter, Wärmetauscher
	4xxx	Si Mg, Bi, Fe, CuNi	AlSi	Schmiedekolben, Schweißzusatz
	5xxx	Mg Mn, Cr, Zr	AlMg(Mn)	Karosserieformteile, Druckbehälter
	8xxx	Fe, FeSi, FeSiCu	Sonderleg.	
aushärtbar	2xxx	Cu Mg, Mn, Bi, Pb, Si	AlCuMg	Schrauben, Spritzgussformen, Zahnräder
	6xxx	MgSi Mn, Cu, Pb	AlMgSi	Profile, Rohre, Fahrzeugschmiedeteile
	7xxx	Zn Mg, Cu, Ag, Zr	AlZnMg(Cu)	Fahrzeugaufbau (Lenkungs-/Bremsteile)

Tabelle 5: Einteilung der Aluminium-Knetlegierungen entsprechend der Legierungsreihen nach DIN EN 573 [55] gekennzeichnet mit der Angabe EN AW [1], (S.382).

### 3.3 Natürliche Oxidschicht auf Aluminium

Nach einigen Monaten unter atmosphärischem Einfluss bildet sich auf Aluminium eine sehr dünne (0,1- 0,5  $\mu\text{m}$ ) natürliche Oxidschicht, die es vor Korrosion schützt. Diese besteht aus einer Sperrschicht, sowie einer porösen Schicht. Nach einigen Sekunden bei Raumtemperatur ist diese Schicht ca. 1 - 2 nm, nach 10 Tagen ca. 10 nm dick, Abbildung 7. Bei 600°C wird die Schicht ca. 100  $\mu\text{m}$  dick. Um den Schutz der Aluminiumoberfläche zu verbessern, kann man gezielt diese obere Schicht durch Eloxieren umwandeln. Die so entstandene dichte und harte Oxidschicht schützt das eloxierte Aluminium vor Korrosion und Abrieb. Das Oxid ist in einem pH-Wert von 5 bis 8 stabil [28], (S.9.9).

Im Vergleich dazu ist die Korrosionsbeständigkeit eines hochlegierten CrNi-Stahles mit einem Cr- Anteil über 13 % (z.B. X5CrNi1810) darauf zurückzuführen, dass sich in einem oxidierenden Medium an dessen Oberfläche eine geschlossene, dichte Oxidschicht bildet. Diese 2-10 nm dicke aus Chromoxiden bzw. Chromoxyhydraten bestehende Passivschicht verleiht der Oberfläche eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit etwa im Kontakt mit Elektrolyten. [29], (S.9.9). Ein ähnliches Phänomen ist beim Aluminium zu beobachten, Abbildung 7.

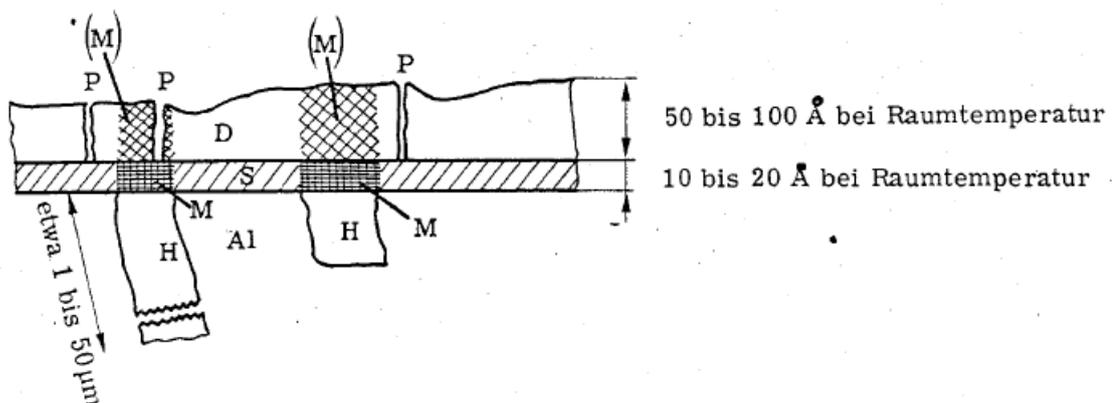


Abbildung 7: Aufbau einer natürlichen Oxidschicht von Aluminium [28], (S.9.9)

### 3.4 Voraussetzungen für das Eloxieren / Eloxierbarkeit

Nicht nur das Reinaluminium sondern auch Aluminiumlegierungen mit einem Fremdanteil bis zu 10% sind für eine technische Eloxierung geeignet [4], (S.149). Letztere haben jedoch bei hohem Fremdmittelgehalt Schichten mit geringerer Korrosionsbeständigkeit und starker Eigenfärbung.

Die Eloxalqualität hängt also stark von der Reinheit des Aluminiums bzw. von der Art und Menge der Bestandteile der Al-Legierungen ab. Die Oxidschicht, die dadurch entsteht, ist je nachdem mehr oder weniger getrübt. Deswegen ist folgendes vor Aufnahme eines Eloxal-Verfahrens sehr wichtig und unbedingt zu beachten. Für das dekorative Anodisieren ist eigentlich nur homogenes feinkristallines Material geeignet, das von den Herstellerfirmen zum Teil unter der Bezeichnung „Eloxalqualität,“ geliefert wird. Obergrenzen an Fremdanteil sind in Tabelle 5 angeführt [4], (S.149).

Silizium	1,5 %
Kupfer	0,8 %
Mangan	0,5 %
Zink	5,0 %
Magnesium	7,0 %
Eisen	0,4 %
Chrom	0,2 %
Titan	0,2 %

**Tabelle 6: Obergrenzen Fremdmittelanteile für dekoratives Eloxieren [4], (S.149).**

Sobald die in Tabelle 6 angegebenen Werte überschritten werden, kann dies eine negative Wirkung auf das Aussehen der fertigen Teile haben [4], (S.149).

Es ist also eine sorgfältige Auswahl des Werkstoffes und die Eignung der Aluminiumsorte bzw. -Legierung zu überprüfen. Eine hochglänzende, gleichmäßige Eloxalschicht lässt sich nur auf homogenen Legierungen erzielen. Außer Walz- und Strangpressmaterial sind meistens gesenkgeschmiedete Teile infolge ihrer homogenen Zusammensetzung für eine Eloxalbehandlung geeignet, wenn nicht starke Verunreinigungen oder für die Anodisierung ungeeignete Legierungsbestandteile dagegen sprechen.

Mit geeignetem Ausgangsmaterial, ist es möglich bei Kokillenguss ein dichtes Gefüge zu züchten, während bei Sandguss eine hochwertige Qualität nur selten oder schwer zu erzielen ist. Die in der Serienfertigung angewandte Spritzgusstechnik erfordert einen hohen Anteil an Legierungsbestandteilen, insbesondere an Silizium, welche das Material ungeeignet für dekoratives Eloxieren machen. Die stark ausgeprägten Fließlinien und der poröse Aufbau sind Hindernisse für die Bildung einer dekorativen Schicht. Im Gegensatz dazu sind nach dem Fließpressverfahren hergestellte Teile, wie Hülsen oder Tuben fürs Eloxieren und für vorausgehende Beiz- und Glanzbehandlung immer geeignet [4], (S.150).

Die Al-Legierungen sind fürs Eloxal bzw. Harteloxal verschieden geeignet. Vor eloxieren eines Bauteiles hat man sich daher von dessen Eloxierbarkeit zu vergewissern. In der Literatur, werden zur Eignungsbeschreibung die Worte „dekorativ,“ (für dekorative Zwecke) und „technisch,“ (bei Korrosions-, Verschleiß- oder den Abriebfestigkeit) verwendet - siehe Tabelle 7.

Aluminiumlegierung	GS-Anodisieren dekorativ	technisch
<b>Aushärtbare Werkstoffe</b>		
AlMgSi 0,43	o	o
AlMgSi 0,5	o	o
AlMgSi 0,7	o	o
AlMg1SiCu	o	o
AlMgSi 1	o	o
AlMgSi 1 Mn	o	o
AlCuMg 1	b	b
AlCuMg 2	b	b
AlCuSiMn	b	b
AlZn4,5Mg1	b	o
AlznMgCu 0,5	b	o
AlznMgCu 1,5	b	o
<b>Automatenwerkstoffe</b>		
AlMgSiPb	b	o
AlCuMgPb	b	b
AlCuBiPb	b	b
<b>Nicht aushärtbare Werkstoffe</b>		
Al 99,5	o	o
AlMn 1	o	o
AlMg 1	o	o
AlMg 2,5	o	o
AlMg 3	o	o
AlMg2,7Mn	b	o
AlMg4Mn	b	o
AlMg4,5Mn	b	o
<b>Kokillen/Sandguss</b>		
G-AlSi3Mg	b	o
G-AlSi6Mg	-	o
G-AlSi7Mg	-	o
G-AlSi10	-	b
G-AlSi13	-	b
G-AlSi9Mg	-	b
G-AlSi10Mg	-	b
G-AlSi09MgCo	-	b
G-Al Si12CuMgNi	-	b
G-AlCu4Ti	-	-
G-AlCu4MgTi	-	-
G-AlMg3	o	o
G-AlMg7Si	-	o
G-AlZn5MgCr	o	o
G-AlZn10Si8Mg	-	b
<b>Druckguss</b>		
G-AlSi10	-	b
G-AlSi10Mg	-	b
G-AlMg7Si	-	b

**Legende:**

o = Optimal einsetzbar

b = Bedingt einsetzbar

- = Nur bedingt oder nicht einsetzbar

**Tabelle 7 Eloxierbare Aluminium- und Legierungen [30].**

### 3.5 Eloxieren allgemein

Die *Anodisierung* oder auch das *Eloxieren* (elektrolytische Oxidation von Aluminium) gilt als eine spezielle Form des Galvanisierens. Einer der wichtigsten Unterschiede zwischen Beschichten und Anodisieren ist, dass beim Eloxieren eines Werkstückes, seine Oberfläche in eine harte und verschleiß- bzw. abriebfeste Oxidschicht umgewandelt wird. Beim Beschichten wird meist nur eine Schutzschicht auf das Grundmaterial aufgetragen (beispielsweise Chromieren). Eloxieren oder Anodisieren ist ein Oberflächenbehandlungsverfahren, das besonders bei Aluminium und dessen Legierungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität angewendet wird.

Da die Möglichkeit besteht, die Dicke und Härte der Oxidschicht gezielt einzustellen, wird in der Forschung und Entwicklung im Bereich Oberflächentechnik versucht, diese Technologie weiter zu optimieren. In dieser Literaturstudie der aktuelle Stand der Technik in diesem Fachgebiet aufgezeigt. Schwerpunkte werden gesetzt in den Bereichen Luft- und Raumfahrt, Automobil-, Schienenfahrzeug- und Schiffbau sowie Maschinen- und Anlagenbau, Architektur und Medizin.

In der Literatur unterscheiden manchen Autoren, zwischen der weichen (milden) und der harten Anodisation – zumeist jedoch wird nur zwischen ‚normaler‘ und Hartanodisierung unterschieden. Bei der weichen Anodisation sind die nanoporösen anodischen Aluminiumoxidschichten (AAO) dünn und kaum resistent gegen Umwelteinflüsse. Der Begriff „weiche Anodisation“ wird in diesem Fall nur benutzt, um eine Abgrenzung zur harten Anodisation zu schaffen [31], (S.5). Die milde Anodisation wird grundsätzlich angewendet, um eine selbstgeordnete AAO mit engen Verteilungen der Porendurchmesser und Proportionalitätskonstanten über die gesamte Oxidschicht zu erhalten.

Eine höhere Härte der Oxidschicht bzw. Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit usw. lassen sich dagegen bei der Hartanodisation erreichen, für industrielle Anwendungen.

Das Anodisieren oder auch Eloxieren (elektrolytische Oxidation von Aluminium) ist eine Umwandlung an der Oberfläche von Aluminium in ein Oxid bzw. Hydroxid. Dieses Verfahren erlaubt es, die Eigenschaften der entstandenen Oxidschicht während der Behandlung wie die Härte, die Dicke oder Farbe (Aussehen) genau zu definieren [32], (S.2).

In Tabelle 8 befinden sich einige elektrochemische und technische Eigenschaften von Aluminium (galvanische Verfahren) [33] (S.74): Kurzzeichen: Al (lateinisch alumen, bedeutet Alaun; das Kalium-Aluminium- Sulfat war schon im Altertum bekannt).

Molare Masse	$M_{Al} = 26,982 \text{ g/mol (26,982 u)}$
Dichte (metallurgisch)	$\rho_{Al} = 2699 \text{ kg/m}^3$
Schmelzpunkt	$\theta_{\text{Schmelz}} = 660,2 \text{ }^\circ\text{C}$
Härte metallurgisch, weich gegläut	450 bis 750 MPa ( 45 bis 75 HV)
Härte galvanisch, kalt verformt	800 bis 1250 MPa ( 80 bis 125 HV)
Härte galvanisch	800 bis 2500 MPa ( 80 bis 250 HV)
Theoretisches Abscheidungsäquivalent	$Ae_{Al} = M_{Al} / zF$
Wertigkeit: 3 Abscheidungsäquivalent	0,336 g/Ah
Normalpotential	$\epsilon_{0, Al} / Al^{3+} = -1662 \text{ mV}$ Reaktion: $Al \leftrightarrow Al^{3+} + 3e^-$

**Tabelle 8: Aluminium- Eigenschaften [33], (S.74)**

Die mechanischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften von Eloxal- oder Harteloxal-schichten und die Anwendungsgebiete eloxierter Teile werden in der vorliegenden Arbeit erhoben sowie die Verschleißfestigkeit von eloxierten Airbag-Komponenten von Fa. Heuberger Eloxieranstalt (Ventrex Automotive) geprüft.

Eloxalverfahren bzw. Anodisierungsverfahren sind Prozesse zur Herstellung Metalloxid-schichten, die sich als alternative Möglichkeit zum galvanischen Verfahren anbieten. Sie lassen sich in zwei Varianten einteilen:

**Variante 1:** Chemische Verfahren: „Es geht um Verfahren, die in einen oxidationsmittelhaltigen Elektrolyten (wässrige Lösung oder Schmelze) ablaufen,“ [33], (S.246).

**Variante 2:** Elektrochemische Verfahren: „Hier handelt es sich um Verfahren, bei denen die Werkstücke anodisch, d. h. oxidierend in einem Elektrolyten (wässrige Lösung oder Schmelze) behandeln werden,“ [33], (S.246).

Die letzte Verfahrensgruppe wird am häufigsten angewendet, Aluminium und seine Legierungen sind in diesem Fall die Hauptgrundwerkstoffe [33], (S.246).

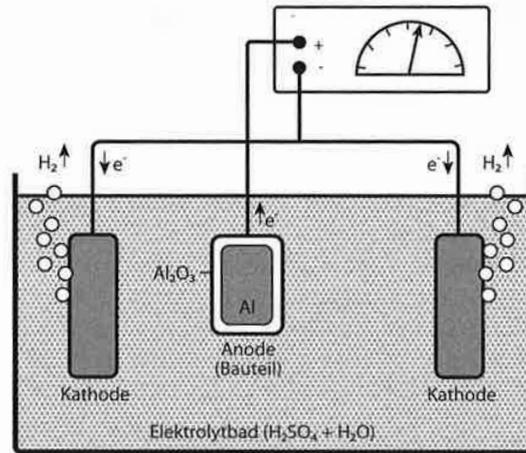
Dass das technisch hergestellte Aluminium nicht sofort mit dem Luftsauerstoff reagiert, liegt an der Art des gebildeten Aluminiumoxids. Die an der Luft gebildeten Oxidschicht ist zwar mit 5 nm bis 15 nm sehr dünn aber auch sehr dicht und lässt deshalb keinen weiteren Sauerstoff an das Aluminium; es wirkt als eine Art isolierende Schutzschicht [33], (S.246).

Das Eloxal-Verfahren, „elektrolytische Oxidation von Aluminium“, auch anodische Oxidation genannt, Eloxieren oder Anodisieren als Aufbringung von oxydischer Schutzschichten auf Aluminiumoberflächen, um die Verschleißfestigkeit oder Abriebfestigkeit der Werkstücken zu verbessern, bzw. auch zu dekorativen Oberflächenveredelung von Aluminium angewendet, gewinnt heute immer mehr an technisch- wirtschaftlicher Bedeutung [14], [34], (S.8). Neben Profilen und Blechen lassen sich auch Prototypen und Kleinserien aber auch Massenteile, in allen gängigen Eloxal- Farbtönen eloxieren [14]. Die Vereinigte Aluminium-Werke AG (in der Folge als VAW bekannt) hat auf Grund älterer Patente der Spezialfabrik für Aluminiumspulen und Leitungen GmbH (in der Folge mit SPEFAS bekannt) das Eloxal-Verfahren maßgeblich entwickelt.

### **3.5.1 Elektrochemische Vorgänge**

Beim Eloxal wird die anodische Verstärkung der Oxidschicht auf Aluminium technisch genutzt. Es wird hier ein stark saurer Elektrolyt benutzt, um eine dicke, poröse Schicht von 5 bis 25  $\mu\text{m}$  aufzubauen. Anschließend kann die poröse Schicht mit organischen oder anorganischen Pigmenten eingefärbt werden. Abschließend wird die poröse Aluminiumoxidschicht durch Behandlung in Wasserdampf (Sealing) verschlossen [35], (S.20).

Der zu behandelnde Bauteil wird beim Eloxieren bei der Anode im Elektrolytbad gehängt, wie das Schema in Abbildung 8 zeigt. Die Kathode wird am Badrand eingelegt. Die Verfahrensparameter wie Spannung, Stromdichte, Zeit und Temperatur werden eingestellt. Die Größen, welche die Bildung der Deckschichten in entscheidendem Maß beeinflussen, sind die Bestandteile der Elektrolyten und die eingelegte Gleichspannung. Die Elektrolyttemperatur ist ein weiterer wichtiger Parameter beim Eloxieren bzw. Harteloxieren. Bei niedrigeren Elektrolyttemperatur (273-278 K - ca. 0°C) entstehen poröse, kompakte und sehr harte Deckschichten (Harteloxal), während bei höheren Temperaturen (333-348 K) ein poröser Film, der weich ist und nicht schützt, entsteht [36], (S.5).

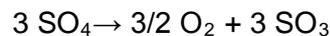


**Abbildung 8: Prinzipskizze des Anodisierens am Beispiel des Gleichstrom - Schwefelsäure-Verfahrens für Aluminiumwerkstoffe [1], (S.160).**

An der Anode entsteht atomarer Sauerstoff, sobald der Strom angelegt wird. Dieser atomare Sauerstoff reagiert mit der metallischen Oberfläche und bildet Metalloxid. Während des Verfahrens, bauen sich hexagonale Prismen mit Poren auf dem Grundwerkstoff. Die ablaufenden Reaktionen am Beispiel des GS-Verfahrens (Gleichstrom-Schwefelsäure-Verfahren) sind wie folgt [1], (S.160), [37].

Dissoziation des Elektrolyten:  $3 \text{H}_2\text{SO}_4 + 6 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{SO}_4 + 6 \text{H}_3\text{O}^+$

Anodenreaktionen:  $3 \text{SO}_4 \rightarrow 3 \text{SO}_4 + 6 e^-$



Säurerückbildung:  $3 \text{SO}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{H}_2\text{SO}_4$

Kathodenreaktion:  $6 \text{H}_3\text{O}^+ + 6 e^- \rightarrow 6 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{H}_2 \uparrow$

Der Schichtbildungsmechanismus ist also auf die Oxidation des Aluminiums durch an der Anode entstehenden, atomaren Sauerstoff zurückzuführen. Am Anfang bildet sich eine dünne, elektrisch isolierende und porenfreie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - Sperrschicht. Die Sperrschicht wächst solange Aluminiumionen aufgrund des anliegenden Stroms durch die Schicht diffundieren können. Bei einer Schichtdicke von ca.  $1 \mu\text{m}$  kommt der Prozess zum Erliegen. Um größere Schichtdicken auf Aluminium zu erreichen, werden Elektrolyte mit höherer Leitfähigkeit eingesetzt, die die Sperrschicht punktuell wieder rüchlösen. Die lokal gedünnten Bereiche werden elektrisch durchgeschlagen. Der Elektrolyt dringt in die Durchschlagkanäle ein und bewirkt eine Neubildung der Sperrschicht. Die Sperrschicht wächst in den Grundwerkstoff hinein. Am Rand der Durchschlagkanäle bildet sich die feinporige, dickere Eloxalschicht.

Die Oberfläche des Bauteils wird so in eine Oxidschicht ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) umgewandelt, in dem die entstandenen hexagonalen Prismen zu ca.  $2/3$  in den Grundstoff und ca.  $1/3$  auf dem Grundwerkstoff wachsen, [38], (S.32).

### **3.5.2 Präzisionseloxieren**

Nach dem Eloxalprozess müssen Farbe, Glanz und technische Eigenschaften des eloxierten Teils stimmen. Es muss in manchen Fällen auf die Maße des Werkstückes geachtet werden. Beim Präzisionseloxieren werden genau solche Ziele verfolgt.

### **3.5.3 Farbeloxal**

Es besteht die Möglichkeit neben dem klassischen farblosen (Naturton) Eloxal die Eloxalschicht einzufärben. Eloxal bildet eine hervorragende Grundlage zum Einfärben, da sich die Farbe in dessen Poren einlagert. Die Farbenpalette ist ziemlich groß und geht von den Naturfarben (C0) bis zu schwarz (C35).

### **3.5.4 Eloxaldruck**

Durch ein spezielles Druckverfahren ist es möglich, Farbe so in die Eloxalschicht einzubringen, dass der Druck absolut abriebfest ist. Die Oxidschicht ist keramisch, sehr dünn und fest mit dem Aluminium verbunden.

## **3.6 Harteloxal**

### **3.6.1 Hartanodisation von Aluminium**

Harteloxieren (auch Hartanodisieren oder Hartcoatieren genannt), ist eine elektrolytische Oxidation von Aluminiumwerkstoffen, um Schutzschichten auf der Oberfläche zu erzeugen, die hohen Verschleißschutz und gute tribologische Eigenschaften hat, welche durch PTFE-Imprägnierung noch verbessert werden können [39], (S.5) - und auch hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisen.

Beim Hartanodisieren wird das Werkstück in einen Elektrolyten getaucht und als Anode geschaltet. Im Unterschied zum herkömmlichen Eloxalverfahren findet die Oxidation beim Hartanodisieren in gekühlten Elektrolyten statt. Dadurch können höhere Stromstärken angewendet werden. Die Oxidschichtdicken sind in diesem Fall dicker (50 - 100  $\mu\text{m}$ ) und gewährleisten damit besseren Schutz gegen Korrosion und Abrieb.

Das Harteloxieren oder Hartanodisation ist eine Oberflächenbehandlung, die nur für technische Zwecke gedacht ist. Es wird als Erzeugung extrem harter und abriebfester anodischer Oxidschichten auf Aluminium- und dessen Legierungen definiert [40], (S.714). Nach der Behandlung der Teile mit diesem Verfahren ist eine Verbesserung der tribologischen Eigenschaften, der Hitzebeständigkeit (bis 2000°C) sowie der Isoliereigenschaften zu erwarten.

Die Erzeugung von Oxidschichten auf Aluminium und Al-Legierungen durch die Hartanodisation kann auf verschiedene Wege erreicht werden. Nicht nur die Herabsetzung der Elektrolyttemperatur unter 10°C sondern auch die Zusammensetzung der Elektrolyten und/oder die Erhöhung der Stromdichte oder der Spannung können zur Umwandlung der Oxidschicht beitragen. Die hartanodisierte Oxidschicht ist ähnlich gebaut, wie dies beim Standard-Eloxieren der Fall ist. Nur die Anzahl der Poren ist erheblich geringer und die Schicht weist daher eine höhere Dichte und Härte auf, [40], (S.714).

Um eine gute Verschleiß-, Abrieb- und Erosionsfestigkeit zu erzielen, sollte die Oxidschicht in einer Dicke von mehr als 20  $\mu\text{m}$  - im Allgemeinen zwischen 50 und 100 $\mu\text{m}$  - hergestellt wer-

den. Für eine gewöhnliche Anodisierung eines Aluminiumwerkstückes zu dekorativen Zwecken (chemische Widerstandsfähigkeit, thermische und elektrische Isolation) sollte eine Schichtdicke zwischen 2 und 20  $\mu\text{m}$  genügen, [41], (S.305).

Das Oxal-Verfahren, das speziell für die Hartanodisierung entwickelt wurde, wird in den letzten 20 Jahren auch industriell angewendet, vor allem wegen bemerkenswerter Regelmäßigkeit, konstanter Härte und die präziser Dicken der Oxidschichten, [41], (S.306). In diesem Verfahren findet die anodische Oxidation in einem schwefelsauren Medium statt. Unter Einwirkung von Strom bildet sich auf dem an der Anode befestigten Werkstück zuerst eine anhydridische, relativ kompakte Aluminiumoxidschicht, deren Dicke zur angelegten Spannung, der Dauer der Behandlung und der Stromdichte proportional ist. Diese erste anhydridische Oxidschicht heißt „Sperrschicht“. Ihre Dicke ist einzig eine Funktion der angelegten Spannung welche  $13,5 \cdot 10^{-7} \text{ mm/V}$  beträgt [41], (S.306); [42].

Die in einem Schwefelsäurebad entstandene Sperrschicht besteht aus feinsten anhydridischen Submikrokristallinen, deren Struktur immer loser wird, je weiter man sich vom metallischen Träger entfernt. Diese Änderung der Dichte in der anodischen Schicht gegen außen hin ist durch eine Hydrierung des Oxids bedingt. Es gibt daher eine Umwandlungszone, in der die Sperrschicht vom anhydridischen in den hydrierten Zustand übergeht. Diese ist die Wachstumszone der Oxidschicht, in der die Elektrolyt-Anionen auf die Aluminium-Kationen treffen, die aus dem Grundmaterial herausgelöst und vom Strom durch die anhydridische Sperrschicht transportiert werden. Von den Eigenschaften dieser Sperrschicht hängen die Merkmale der Hartoxidschicht ab, [41], (S.306); [42].

### 3.6.2 Eigenschaften der Harteloxal-Schicht

Die durch Harteloxal-Verfahren erzeugten Oxidschichten weisen eine höhere Härte (bis zu 480 kp/mm<sup>2</sup> nach Vickers) auf als die konventionell erzeugten Eloxalschichten. Diese Härte hängt vom Typ der Legierung ab. In Tabelle 9 sind der Aufbau und die Modifikation der Oxidschicht bei unterschiedlichen Bildungsbedingungen dargestellt.

Bildungsbedingungen	Schichtdicke	Dicke der Barrierschicht	Modifikation	Bezeichnung
trock. Luft 20 °C	0,001-0,004 $\mu\text{m}$	1-4 nm	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0\text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	
feuchte Luft 20 °C	0,05-0,1 $\mu\text{m}$	0,4-1,0 nm	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-AlO(OH)}$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-Al(OH)}_3$	Böhmit Hydrargillit
kochendes Wasser	0,5-2 $\mu\text{m}$	0,2-1,5 nm	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-AlO(OH)}$	Böhmit
spez. chem. Verfahren	1-5 $\mu\text{m}$	0,2-0,8 nm	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-AlO(OH)}$ z.B. $\text{PO}_4^{3-}$	Böhmit + Anion
Anodisieren RT	5-30(-600) $\mu\text{m}$	10-15 nm	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ amorph $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0\text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Hydrargillit
Hartanodisieren -5 °C - +5 °C	50-200 $\mu\text{m}$	15-30 nm	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ amorph $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0\text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Hydrargillit
Sperrschicht-anodisieren	1-3 $\mu\text{m}$	30-40 nm	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 0\text{H}_2\text{O}$ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	

Tabelle 9: Aufbau und Zusammensetzung der Oxidschicht [33], (S.253).

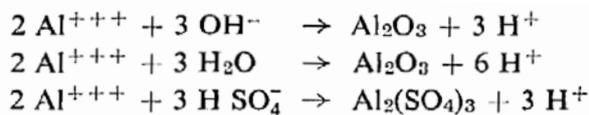
Bei etwas dickeren Schichten in der Größenordnung von 50 und 80  $\mu\text{m}$  sind Härten von 340 bis 390 kp/mm<sup>2</sup> nach Vickers zu erwarten [40], (S.716). Auch die elektrische Durchschlags-

festigkeit, die bei harteloxierten Schichten erreicht werden kann, ist bemerkenswert und kann bis zu 300 kV/mm betragen [35] (S.20).

Bestehen die Elektrolyte aus Schwefelsäure und Oxalsäure bei niedrigen Temperaturen, so sind die erzielten Schichten hart und verschleißfest, da porenärmer und ihrem Aufbau dichter. Harteloxierte Oberflächen sind prinzipiell bei korrosiver und Verschleißbeanspruchung - oder zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften - besser geeignet als Standard-Eloxal.

Hartanodisieren wird meistens bei Temperaturen unter 10°C durchgeführt. Die gewonnene Schichtdicke variiert von ca. 50 bis 100 µm und ihre Abriebfestigkeit ist besser als die von den besten Vergütungsstählen. Ihre elektrischen Isolierungseigenschaften sind auf einer Stufe mit denen von Porzellan. Der Reibungskoeffizient wird durch eine Reihe von Imprägniermitteln verringert [43] (S.193).

Folgende Oxidbildungsreaktionen laufen beim Harteloxieren ab:



Die Protonenkonzentration ist verantwortlich für die Struktur der porösen Schicht. Letztere wird daher nicht nur mit Art des Elektrolyten und seinem Dissoziationsgrad, sondern auch mit der Stromdichte, der Oxidationsspannung und der Temperatur des Elektrolytbades variieren. Es ist auch zu erwähnen, dass die Legierungszusammensetzung dabei eine wichtige Rolle spielt.

### **3.7 Das Verfahren der elektrolytischen Oxidation / Eloxierprozesse**

Das Verfahren besteht prinzipiell, wie oben erwähnt, aus einer Vorbehandlung, einer eigentlichen Oxidation und einer Nachbehandlung. Die am Ende des Anodisierens erhaltene Oxidschicht hat prinzipiell eine transparente Farbe, dadurch ist die Grundwerkstofffarbe sichtbar. Hier spielt die Art der Vorbehandlung eine entscheidende Rolle für die optische Wirkung der Eloxalschicht. Es müssen unerwünschte Oberflächenverletzungen, Fehlstellen und Unregelmäßigkeiten vor der Behandlung mechanisch und/oder chemisch entfernt werden. Eine matte oder glänzende Oberfläche wird je nach Art der Vorbehandlung als Ergebnisse erwartet. Nach einer chemischen Vorbehandlung, durch Beizen in alkalischer Lösung entsteht eine mattierte Oberfläche. Eine mechanische Vorbehandlung durch bürsten, schleifen oder polieren führt ebenso zu unterschiedlichen Effekten (Schiff, Glanz oder Mattierung).

Die Art der Vorbehandlung ist durch die entsprechenden Kurzzeichen von E0 bis E8 nach DIN 17611 gekennzeichnet, die folgende Bedeutungen haben:

- E0 = ohne wesentlichen Oberflächenabtrag (meist für technische Zwecke)
- E1 = geschliffen, eloxiert und verdichtet
- E2 = gebürstet, eloxiert und verdichtet
- E3 = poliert, eloxiert und verdichtet
- E4 = geschliffen und gebürstet, eloxiert und verdichtet
- E5 = geschliffen und poliert, eloxiert und verdichtet

- E6 = chemisch vorbehandelt in Spezial-Matt-Beizen, eloxiert und verdichtet
- E7 = gegläntzt, eloxiert und verdichtet
- E8 = poliert, gegläntzt, eloxiert und verdichtet “ [14]; [44], (S. ).

### **3.7.1 Verfahrensablauf Eloxieren im Überblick**

Die zu eloxierenden Teile werden schrittweise nach dem folgendem Schema behandeln. Die Teile werden ganz allgemein als Gestellware in die Bäder gebracht. Zwischen manchen Operationen wie z. B. Entfetten und Dekapieren ist eine Spülung vorgesehen. Die Reihenfolge der Bäder in diesem Verfahren entspricht jenem der Fa. Heuberger Eloxal.

- Vorbehandlung mechanisch
- Vorbehandlung chemisch
- Entfettet und oder Beizen
- Spülen
- Dekapieren
- Eloxieren oder Harteloxieren
- Spülen
- Färben
- Spülen
- Verdichten
- Teile trocknen (lassen)

Eigentlich gliedert sich der Eloxalprozess grob gesehen, in Vorbehandlung, Oxidation und Nachbehandlung. Die verschiedenen Verfahrensparameter, wie Bädertemperatur, Behandlungszeit (wie lange die Teile in den Bädern bleiben) sind zu beachten. Ein wichtiger Faktor in diesem Abschnitt ist auch die Geschwindigkeit, mit der sich die Flüssigkeiten in den Bädern bewegen. Davon hängt unter anderem die Qualität des Eloxals ab. In der Literatur wird folgendes Ablaufschema für die Durchführung eines Eloxal- bzw. Harteloxalverfahrens angegeben. Diese Struktur ist der von der Fa. Heuberger Eloxieranstalt GmbH ähnlich, siehe Abbildung 9.

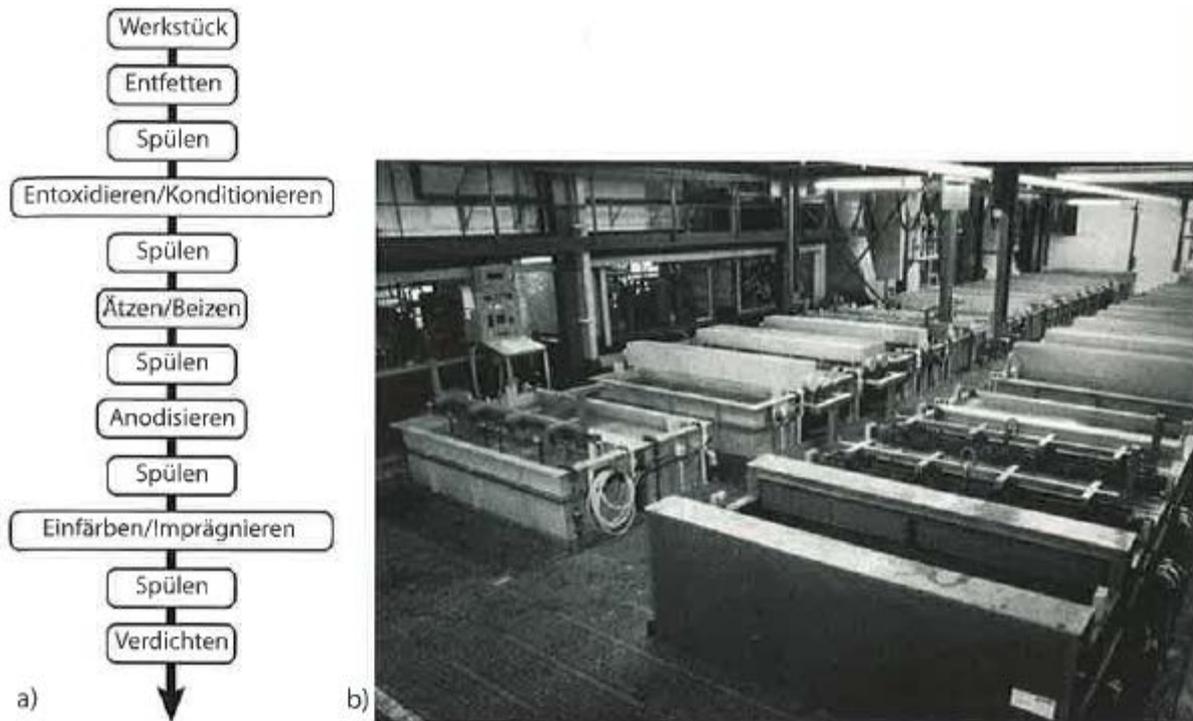


Abbildung 9: Badfolge ( a ) und Anlage ( b ) zur anodischen Oxidation ( AHC Oberflächentechnik GmbH, Kerpen, Deutschland ), [1], (S. 163).

Abbildung 10 zeigt eine Kompakt-Eloxalanlage wie bei der Fa. Heuberger Eloxal (siehe Kapitel ‚Praktikum‘).



Abbildung 10: Eloxalanlage „Lynx,, [45].

Tabelle 10 listet einen Eloxal-Verfahrensgang mit den entsprechenden Behandlungstemperaturen und -Zeiten auf.

Behandlungsgang	Prozessschritt	Temperatur in °C	Behandlungszeit in min
1	Ware aufhängen		
2	Entfetten	60	10
3	Spülen	RT	1
4	Beizen	50	3
5	Spülen	RT	1
6	Spülen	RT	3
7	Dekapierung	RT	3
8	Anodisieren	19	45
9	Spülen	RT	2
10	VE-Fließspülen	RT	30
11	Färben	50	10
12	Spülen	RT	3
13	VE-Fließspülen	RT	20
14	Heißsealing	96	45
15	Ware abhängen		

**Tabelle 10: Verfahrensgang zur Anodisierung von Aluminium mit anschließender Einfärbung, RT = Raumtemperatur [45].**

Die Art der Vorbehandlung ist durch entsprechende Kurzzeichen A0 bis A6 oder auch noch E0 bis E6 (Ö- Norm C2531) bzw. von E0 bis E6 (nach DIN 17611) gekennzeichnet [14]; [46].

Beispiel: Chemische Vorbehandlung: E0 Entfetten ohne Beizen / E6 Entfettung und Beizen

Beispielablauf [47]:

- 1, NaOH wird auf 45 °C erhitzt und das Werkstück anschließend eingetaucht
- 2, Beizdauer: 5 min. (Entfernung der gebildete Oxidschicht und Fremdmetalle)
- 3, H<sub>2</sub>O- Spülung
- 4, Werkstück ca. 30 Sekunden lang in HNO<sub>3</sub> tauchen
- 5, H<sub>2</sub>O- Spülung

Mechanische Vorbehandlung: E1 geschliffen / E2 gebürstet / E3 poliert / E4 geschliffen und gebürstet / E5 geschliffen und poliert / E7 = A7 gegläntzt, eloxiert und verdichtet.

Das Eloxieren selbst wird meistens nach dem sogenannten ruhenden („stationären“), Tauchverfahren durchgeführt, bei welchem die zu eloxierenden Teile in das Bad getaucht werden. Die Teile müssen dabei elektrisch im Kontakt z.B. über Stromschienen verbunden bleiben.

Beim Eloxieren von großen Teilen besteht die Möglichkeit, sie stückweise in das Bad zu tauchen und zu behandeln, bis das ganze Stück (Teil) anodisiert ist.

Die Oxidation von Aluminium- und Legierungen mit dem Eloxalverfahren kann generell auf drei Methoden (Arten) vorgenommen werden [48]:

Eintauchverfahren in ruhenden Bädern: Die Werkstücke werden ganz oder nur teilweise in das Oxidationsbad eingetaucht; die Stromquelle ist am Werkstück und an der im Bad tauchenden Gegenelektrode befestigt.

Spritzverfahren: Das Werkstück und eine bewegliche Düse, woraus der Elektrolyt austritt, werden an die Stromquelle angeschlossen.

Durchlaufverfahren in ruhenden Bädern: Bänder, Drähte usw. werden durch das Oxidationsbad gezogen; die Stromquelle ist wie bei Punkt 1 angeschlossen.

Es wird in dieser Arbeit hauptsächlich die erste Methode, d.h. das Eintauchverfahren in ruhenden Bädern behandelt.

Die Elektrolyttypen zum Eloxieren und deren Anwendung sind in Tabelle 11 angeführt:

Werkstoff	Elektrolyte	Besonderheit	Anwendung
Aluminium	Borsäure, Zitronensäure	Geringes Rücklösevermögen der $Al_2O_3$ -Sperrschicht.	Dielektrika von Elektrolyt-Kondensatoren
Aluminium	Schwefelsäure, Oxalsäure, Chromsäure, aliphatische Carbonsäure	Starkes Rücklösevermögen der $Al_2O_3$ -Sperrschicht (Eloxal-Verfahren). GS: Gleichstrom-Schwefelsäure GX: Gleichstrom-Oxalsäure GSX: Gleichstrom-Schwefel-/Oxalsäure WX: Wechselstrom-Oxalsäure WGX: Wechsel-/Gleichstrom-Oxalsäure	Korrosionsschutz, Verschleißschutz, Dekoration, organische Säuren und Chromsäure zum Farbanodisieren
Aluminium	Alkalicarbonat, Alkaliphosphate, Phosphorsäure	Sehr starkes Rücklösevermögen der $Al_2O_3$ -Sperrschicht.	Glanzanodisieren
Magnesium	Kaliumfluorid, Natriumphosphat, Kaliumhydroxid, Aluminiumhydroxid, Kaliumpermanganat	HAE-Elektrolyt nach Harry A. Evangeliste. Der Prozess arbeitet mit Wechselstrom. Schichtdicken bis 80 $\mu m$ sind möglich. Kein Rücklösevermögen der Oxidschicht.	Korrosionsschutz, Verschleißschutz, Dekoration
Magnesium	Ammoniumdifluorid, Natriumdichromat, Orthophosphorsäure	DOW-17-Elektrolyt	Korrosionsschutz, Verschleißschutz, Dekoration
Titan	Schwefelsäure	Zur Reibminderung ist Imprägnieren mit Schmierstoff sinnvoll.	Verschleißschutz, Dekoration
Zink	Phosphorsäure, Chromoxid, $NH_4$ , Ammoniumfluorid	Die Schichten bestehen aus Zinkammoniumphosphat, Zinkchromat.	Haftgrund für Lacke

Tabelle 11: Elektrolyte zum Anodisieren [1], (S.161).

Schwefelsäure wird meist als Elektrolyt beim Eloxieren genommen. Beim Harteloxieren wird oft eine Kombination Schwefelsäure und Oxalsäure verwendet.

Beispielablauf [49]:

Standardverfahren: in Schwefelsäure bei  $T = 19\text{ }^\circ\text{C}$ , Stromdichte: 1, 0- 2, 0 A/dm<sup>2</sup> , Schichtdickenstärke: 5- 25  $\mu m$

### 3.7.2 Mechanische Vorbehandlung

Bei der mechanischen Vorbehandlung stellen schleifen und polieren der Teile einen wesentlichen Zeitaufwand dar und sind somit mit hohen Kosten verbunden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass der Fachmann, der die Bauteile vorbereitet, diese Faktoren beachtet. Wie bei

der Fa. Heuberger Eloxal, muss er sich mit dem Material, Werkzeuge und Maschinen, Arbeitsablauf usw. gut auskennen, um die Kosten niedrig wie möglich zu halten. Es werden Bandschleifmaschinen, Schleifscheiben, Schleifpasten, Drahtbürste, Poliermaschinen, Polierpasten und Emulsionen usw. in diesem Bereich benutzt, um die Oberfläche der Teile sauber zu kriegen.

Die Art der Vorbehandlung ist besonders beim Eloxieren entscheidend. Da die anodisch erzeugten Oxidschichten transparent sind, wird der größte Teil des auf eine eloxierte Oberfläche fallenden Lichtes nicht an der Oberfläche der Oxidschicht reflektiert sondern an der Grenzfläche zum Aluminium. Die unerwünschten Oberflächenverletzungen, sowie die Fehlstellen und Unregelmäßigkeiten müssen vor der Anodisieren entfernt werden. Dies geschieht im diesem Fall durch bürsten, schleifen oder polieren. Damit können verschiedene Oberflächeneffekte erzielt werden, wie z. B. Glanz, Schiff oder Mattierung.

Die Kurzbezeichnungen sind nach DIN 17611 genormt und reichen von *A0 bis A6*

*A0 = E0 ohne wesentlichen Oberflächenabtrag*

*A6 = E0 gegläntzt, eloxiert und verdichtet.*

### **3.7.3 Chemische Vorbehandlung**

In der Literatur sind Möglichkeiten wie elektrolytisches Entgraten, anodisches Schleifen, elektrolytisches Polieren oder chemischen Glänzen erwähnt, um chemische Vorbehandlungen vorzunehmen.

Die zu behandelnden Oberflächen müssen von Ölen, Fetten und chemischen Produkten, befreit werden. Die Teile werden meistens zuerst entfettet, gebeizt und danach gespült, da sich nur auf einer reinen Metalloberfläche eine einwandfreie und gleichmäßige Oxidschicht während des Eloxalverfahrens bildet.

Nach der mechanischen Vorbehandlung werden die Teile je nach Kundenwünschen entfettet und oder gebeizt. Um eine „chemisch reine“ Oberfläche zu erzielen, ist es manchmal notwendig mehrere Verfahren anzuwenden. Diese sind von der Reaktion der nachfolgenden Elektrolyten abhängig. Bei der Fa. Heuberger Eloxal werden die Teile in einem Anodal Clean BFO® 6%-Bad entfettet, um die Unreinheiten auf der zu behandelten Oberflächen zu entfernen.

Beim Beizprozess, z. B. in einem erhitzten Natronlauge- Bad, werden die an der Luft gebildete Oxidschicht und die an der Oberfläche vorhandenen Fremdmetalle entfernt. Eine anschließende Neutralisation z.B. mit Salpetersäure löst die Fremdmetal- und Laugenreste vom Werkstück ab [14], [50]. Beim Beizen der Werkstückoberflächen wird eine metallisch reine, blanke, oxidfreie Oberfläche zu erzeugt. Dabei werden die Guss- oder Walzhaut, Oxidschichten, Rost oder Zunder mittels geeigneter Säurelösungen oder Laugen entfernt [7], (S.195). Bei Fa. Heuberger wird eine Mischung aus Natronlauge + Beizentfetter Anodal EC2® flüssig als Säure verwendet, um die Oberfläche der Teile abzubeizen. Sie werden für ca. 30s bis zu 20 min. im Bad belassen.

Nach jedem elektrolytischen oder chemischen Arbeitsvorgang haften auf den Werkstückoberflächen Flüssigkeitsreste, die durch das Spülen entfernt oder zumindest verdrängt werden müssen. Der Spülvorgang bei Heuberger Eloxal erfolgt in einem Wasserbad (mit Sprüzdüsen) bei einer Spüldauer von ca. 2 min.

Zwischen Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Reaktion ist eine Neutralisation oder Dekapierung erforderlich. In den meisten Fällen erfolgt vor der Anodisierung beim Spülen eine Dekapierung, die oft mit einer Neutralisation verbunden ist. Diese dient dazu dünnere Oberflächenschichten, die durch erhöhte Stromdichten, Temperaturen, Legierungsbestandteile oder Elektrolytkomponenten auf den Metalloberflächen entstanden oder zurückgeblieben sind, vornehmlich also Oxide, Oxidhydrate, Silicate, Carbonate und Sulfide [7], (S.209) zu entfernen. Der Dekapierungsvorgang bei Heuberger Eloxal erfolgt in einem „Dessmutter 75; 5%-Bad“ für ca. 3 min.

Das Neutralisieren dient auch dazu, die Werkstückoberflächen von störenden Oberflächenfilmen und Salzresten zu befreien. Besonders Poren, Risse, Bördelungen, Sacklöcher und Fehlstellen verschleppen oft Elektrolyte oder Salzreste. Die Wirkung dieser verschleppten Flüssigkeiten soll durch das Neutralisieren gemindert bzw. verhindert werden [7], (S.210).

### 3.7.4 Anodisieren / Eloxieren

Nach der Vorbehandlung erfolgt die eigentliche Anodisierung bzw. Eloxierung der Werkstücke. Das eigentliche Eloxal-Verfahren bedient sich der Elektrolyse. Das Aluminiumwerkstück wird dabei in einem sauren Elektrolyten an den positiven Pol (Anode) einer Gleichstromquelle angeschlossen. Bei Stromfluss wandern sauerstoffhaltige Anionen mit negativer elektrischer Ladung von der Kathode zur Anode und geben dort Sauerstoff ab. Dieser reagiert mit dem Aluminium zu Aluminiumoxid. Zuerst entsteht eine sehr dünne, porenfreie, elektrisch isolierende Sperrschicht. Diese setzt dem Stromdurchgang einen Widerstand entgegen, der jedoch infolge der Badspannung durchschlagen wird [48], [51]. Das Prinzipschema der Montage eines Bauteiles an der Anode beim Eloxieren (Abbildung 11) ist prinzipiell dem elektrochemischen Weg der Oxidation zuzuordnen.

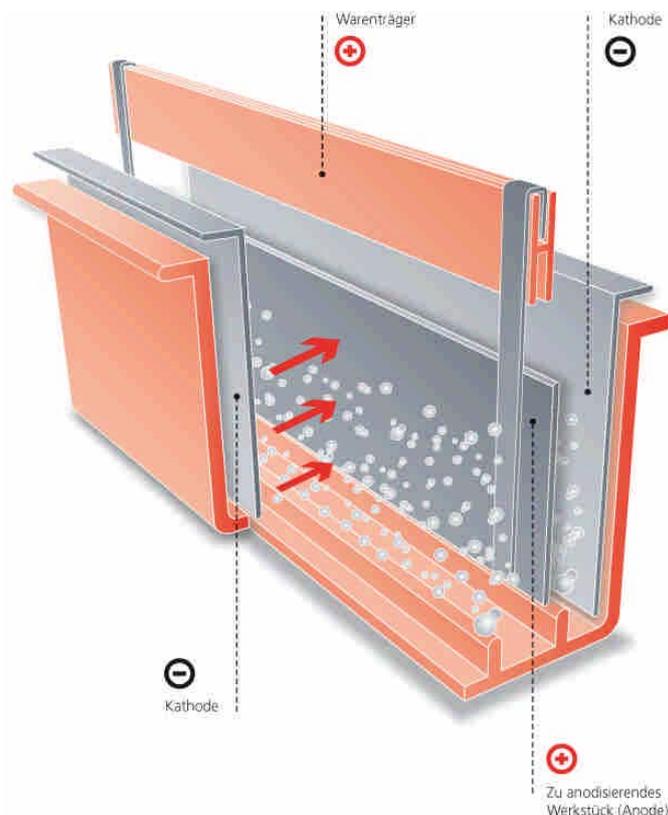


Abbildung 11: Die elektrolytische Oxidation von Aluminium [51], (S.2).

### 3.7.4.1 Beispielablauf Eloxierprozess im Vergleich zu Heuberger Eloxal

Zur Neutralisation wird eine  $\text{HNO}_3$ -Lösung verwendet. Bei der Fa. Heuberger Eloxal erfolgt keine Neutralisation. Nach einem Spülvorgang erfolgt das Eloxieren bzw. Harteloxieren. Übliche Parameter sind in Tabelle aufgelistet.

Elektrolyte	häufig: Schwefel- und Oxalsäure vereinzelt: Chromsäure- u. Phosphorsäure
Badtemperatur	15 - 35°C (z.B. 19°C in $\text{H}_2\text{SO}_4$ , [52], S. 8)
Stromdichte	etwa 0,5 bis 5 $\text{A}/\text{dm}^2$
Spannung	etwa 10 bis 60 V, je nach Verfahren
Stromart	Gleich- und Wechselstrom / Pulsstrom...

**Tabelle 12: Typische Verfahrensparameter beim Eloxieren**

Bei Fa. Heuberger Eloxal waren im Standard-Eloxalprozess die Schwefelsäure-Konzentration 180 g/l und die Badtemperatur 18°C, wobei die Eloxierdauer 10- 50 min betrug (keine Angaben über Strom und Spannung). Beim Harteloxieren wurde dem Bad Oxalsäure zugesetzt (185 g/l  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), die Temperatur lag zwischen -5 bis max. +5°C und die Eloxierdauer zwischen 10 min bis 1,5 h (keine Angaben über Strom und Spannung).

### 3.7.4.2 Färben

Nach dem Eloxalprozess werden die Teile, falls es nötig ist, gefärbt - danach wird empfohlen, sie zu verdichten. Folgende Nachbehandlungen sind üblich:

- Verschluss der Poren durch Heißwassernachverdichtung verbessert den Korrosionsschutz der Oberflächenschicht.
- Einlagerung von Gleitstoffen (beispielweise Imprägnierung mit PTFE-Partikeln) verbessert die Gleiteigenschaften der Oberflächenschicht.
- Färben der Oxidschichten mit anschließender Heißwassernachverdichtung zur Fixierung der Farbstoffe. Hierbei wird unterschieden zwischen

1. **Adsorptives Färben:** Sandalor Verfahren, 2-stufig oder kombiniert mit dem elektrolytischen Einfärben (3-stufig).

a) Mit organischen Farbstoffen: Nach dem Eloxieren werden die Teile in heiße Farbstoffmoleküle getaucht und anschließend abgespült.

b) Mit anorganischen Farbstoffen: Nach dem Eloxieren werden die Teile neutralisiert, gespült und in Farbbädern mit Metallsalzlösungen eingefärbt.

Beispielablauf: Farbbad / Tauchfärben (adsorptive Farbverfahren)

Versuchsaufbau [47]: Lösung zum Neutralisieren:  $\text{HNO}_3$  / Gerät: Heizplatte, Rührfisch, Becherglas oder Farbwanne / Farbmischung: 4- 5 g Eloxalfarbe / 1 L  $\text{H}_2\text{O}$

Ablauf: 1, Farbbad auf ca. 50 °C erhitzen / 2, Werkstück ca. 30 s lang in  $\text{HNO}_3$  tauchen / 3,  $\text{H}_2\text{O}$  spülen / 4, destillierte  $\text{H}_2\text{O}$ - Spülung / 5, Werkstück 2- 5 min. im Farbbad tauchen.

2. **Elektrolytisches Färben (Colinalverfahren):** Wird mit Wechselspannung durchgeführt. Der Elektrolyt enthält ein färbendes Metallsalz (Zinn (II)-Sulfat). Die Dauer der Elektrolyse hängt von der erwünschten Farbtiefe ab. Die Metallionen dringen tief in die Poren der Schicht ein. Die so zum Teil gefüllten Poren verursachen nun durch Aufnahme- und Streueffekte eine lichtechte Färbung. Viele unterschiedliche Farbtöne sind so erzielbar, z. B. von C0 = Farblos bis C38 = Dunkelgrau [14], [48].

Die frisch eloxierten Teile sind also infolge ihrer Oberflächenstruktur, in der Lage Farbstoffe organischer oder anorganischer Art aufzunehmen [7], (S.424); [53]. In Tabelle 13 sind einige Farbtöne und deren Bezeichnung angeführt.

C0	Natur
C1, 2, 3, 4	Goldtöne (organisch)
C8	Schwarz (organisch)
C31	Bronzetöne (elektrolytisch)
C50	Sonderfarbe (organisch)

**Tabelle 13: Farben beim Eloxieren**

Beim Farbanodisieren können Ein-, Zwei- oder Mehrstufen-Verfahren angewendet werden. Bei Heuberger Eloxal werden je nach Farbe Temperaturen von 20 bis 55°C über eine Dauer von 10 bis 40 min angewendet. Der pH-Wert wird mit Essigsäure oder Ammoniak eingestellt, falls dieser zu hoch bzw. zu niedrig ist.

### **3.7.4.3 Verdichten (Sealing) / Nachbehandlung**

Das Verdichten stellt die wichtigste und abschließende Behandlung beim Eloxieren dar. Nur ein ausreichendes Verdichten gewährleistet einen vollwertigen Schutz der Oberfläche [7], (S.436). Um die Einlagerung von korrosionsfördernden Stoffen zu verhindern, müssen die Poren verdichtet werden. Das eloxierte und eventuell gefärbte Aluminium wird in demineralisiertem Wasser durch einfaches Kochen verdichtet. Dabei kommt es zu einer Reaktion zwischen Aluminiumoxid und Wasser unter Bildung eines Aluminiumoxid-Hydrates ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Durch Wasseraufnahme erfolgt eine Volumenzunahme, sodass die Poren verengt und dann geschlossen werden [48].

Bei Fa. Heuberger Eloxal wird für das Verdichten „demineralisiertes Wasser + Sealingzusatz SH1 - 0,3%ig“ verwendet. Die Verdichtungsdauer liegt zwischen 20 und 60 min.

Beispielsablauf fürs Verdichten aus der Literatur: Behandlung in Wasser bei 96°C über 45 min. Am Ende des Verfahrens werden die eloxierten bzw. gefärbten Teile an Luft getrocknet. Nach dem Eloxalprozess werden die Teile, falls erforderlich, gefärbt und danach wird noch eine Verdichtung empfohlen. Folgende Nachbehandlungen sind üblich:

- Verschluss der Poren durch Heißwassernachverdichtung verbessert den Korrosionsschutz der Oberflächenschicht
- Einlagerung von Gleitstoffen (z.B. Imprägnierung mit PTFE- Partikeln) verbessert die Gleiteigenschaften der Oberflächenschicht

### 3.7.4.4 Arbeitsgangkarten Heuberger Eloxal

Diese dienen der Eingangs- und Verarbeitungskontrolle und beinhaltet folgende Angaben:

Vorbehandlung mechanisch / Vorbehandlung chemisch. Entfetten u./od. Beizen – Spülen – Dekapieren - Eloxal oder Harteloxal – Spülen/Färben/Spülen – Verdichten – Trocknen.

In der Literatur findet man vergleichbare Arbeitsverläufe wie bei Heuberger Eloxal.

### 3.7.5 Verfahrensvarianten

Die angebotene Vielzahl an Anodisierverfahren ermöglicht es, Oxidschichten mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften zu erzeugen. So lassen sich verfahrensabhängige Oxidschichten unterschiedlicher Dicken herstellen, die den jeweils gewünschten dekorativen oder technischen Anforderungen entsprechen [51].

Abbildung 12 zeigt die Verfahrensvarianten der Fa. BWB in Deutschland im Eloxalprozess und besonders die chemische oder elektrochemische Oxidation von Aluminium- und Al-Legierungen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die elektrochemische Variante, also den Weg über eine eventuelle mechanische Vorbehandlung, chemische Vorbehandlung, elektrolytische Oxidation und die anschließende Nachbehandlung [51].

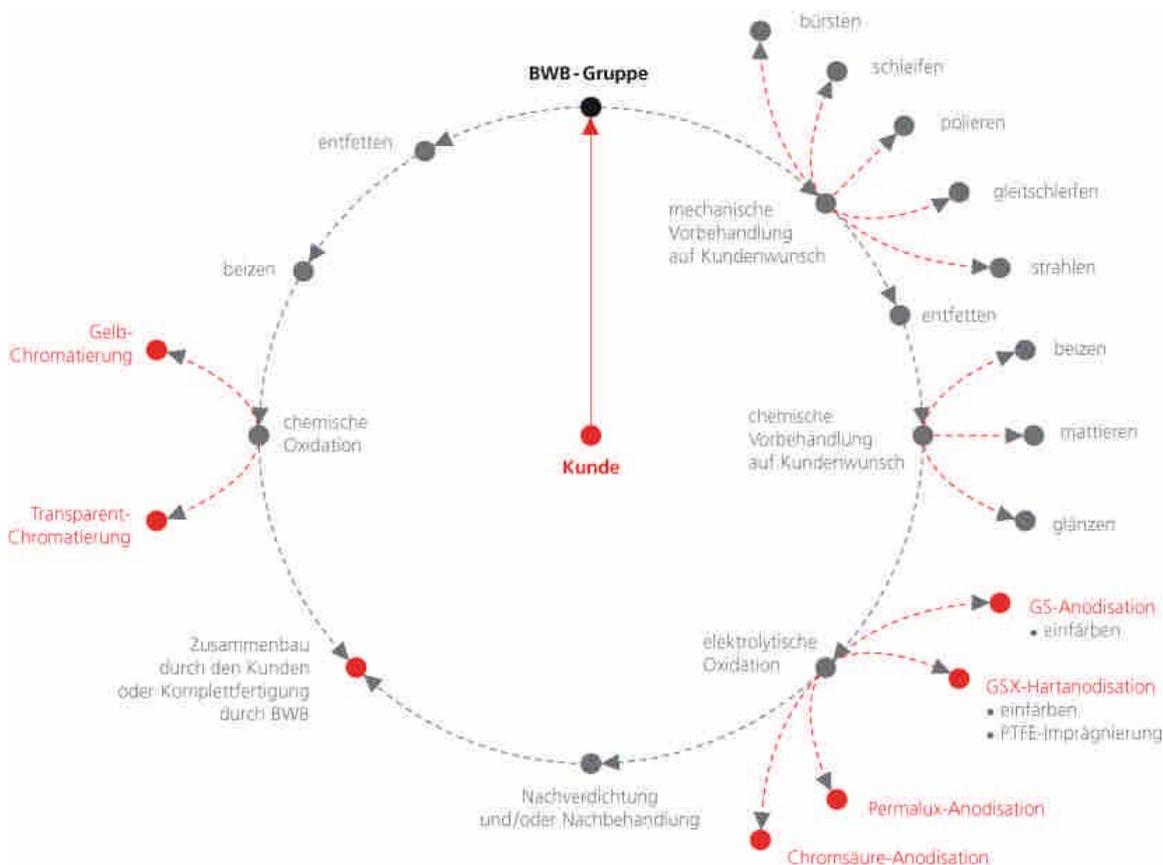


Abbildung 12: Verfahrensvarianten im Eloxierprozess (elektrolytisch oder chemisch) [51].

Aluminium ist ein elektronegatives Metall mit einer großen Affinität zum Sauerstoff. Es überzieht sich an der Luft sehr rasch mit einer natürlichen Oxidschicht, welche an sich schon korrosionshemmend wirkt. Da diese Schicht sehr dünn ist, ist ihre Wirkung gegen die Korrosion,

den Verschleiß usw. noch nicht als ausreichend zu bezeichnen. Das Aufbringen von Schutzschichten mit speziellen Eigenschaften kann mittels chemischen oder elektrolytischen Verfahren (Eloxieren/Harteloxieren) gesteuert werden. Die Qualität der erzeugten Schutzschichten hängt immer mit der Halbzeuglegierung, deren Wärmebehandlung, dem daraus resultierenden Gefügestand und dem Oberflächenzustand zusammen. Daher sind eine korrekte Materialwahl und fachmännische Verarbeitung von höchster Bedeutung.

### 3.7.6 Verwendete Elektrolyte und Stromarten

Es existieren verschiedene Anodisierverfahren [32], (S.8), wie z.B. Schwefelsäure-, Chromsäure-, Chrom-/Schwefelsäure-Anodisation, Chrom-/Schwefelsäure-Hartanodisation usw. Je nach den zu erwarteten Ergebnissen oder der Art des Grundwerkstoffes werden die einzelnen oder kombinierten Anodisierverfahren gewählt und ausgeführt.

Die Stromversorgung beim Verfahren kann je nachdem durch einen Gleichstrom (GS) oder Wechselstrom (WS) erfolgen, siehe Tabelle 14.

Bezeichnung	Stromart (=/~)	Elektrolyt	Stromdichte (A/dm <sup>2</sup> )	Spannung (V)	Temp. (°C)
GS	=	10 - 20 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 - 1,7	10 - 20	15 - 20
GS; dick	=	7 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1 - 5	23 - 120	0 - 3
WS	~		1 - 3	10 - 15	18 - 25
GSX	=	10 - 15 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1 - 2 % (COOH) <sub>2</sub>	1 - 2	12 - 25	18 - 25
GX	=	3 - 5 % (COOH) <sub>2</sub>	1 - 2,5	30 - 60	18 - 22
WX	~	3 - 5 % (COOH) <sub>2</sub>	2 - 3,5	40 - 60	25 - 35
WGX	=	3 - 5 % (COOH) <sub>2</sub>	2 - 3,5	30 - 60	20 - 30
	~		1 - 2,2	40 - 60	
Ematal (GX)	=	3 - 5 % (COOH) <sub>2</sub> Ti- oder Zr-Salze	0,2 - 0,3	120	50 - 70
Borsäure	=	9 - 15 % H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	-	230 - 250	90 - 95

Tabelle 14: Anodisierverfahren [33], (S.255).

Das Anodisierverfahren kann mit verschiedenen Basisparametern oder Quellen gesteuert werden. Gleichstrom (GS = Gleichstrom- Schwefelsäure), Wechselstrom (WS = Wechselstrom - Oxalsäure) oder Kombination der beiden ermöglicht es, die Oberfläche des Grundwerkstoffes Aluminium in eine Oxidschicht umzuwandeln. Die entsprechenden Stromdichten, Spannungen, Temperaturen, Elektrolyte und Eigenfärbung der Schichten und Elektrolyten können ebenfalls aus der Tabelle 14 entnommen werden. Diese zeigt verschiedene Arten der Anodisierung, entsprechenden Schichtdicken oder Farben und die dazu gehörigen Anwendungsgebiete. Es ist zu sehen, dass die Anwendungsbeispiele des normalen Eloxals im Bereich von Bauwesen und Haushaltsgeräten liegt sowie im Allgemeinen beim Oberflächenschutz. Im Gegensatz dazu, wird die Hartanodisation eher im Bereich Maschinenbau (Hydraulik), also im technischen Bereich verwendet, da Korrosionsbeständigkeit, Abrieb- und Verschleißfestigkeit der Bauteiloberflächen erforderlich sind.

Bezeichnung des Verfahrens	Kurzzeichen	Stromart	Spannung (V)	Stromdichte (A/dm <sup>2</sup> )	Temperatur (°C)	Eigenfärbung der Schicht	Elektrolyt
Gleichstrom-Schwefelsäure	GS	Gleichstrom	10 - 20	1 - 2	18 - 22	keine	Schwefelsäure
Wechselstrom-Oxalsäure	WX	Wechselstrom	20 - 60	2 - 3	25 - 35	leicht gelblich	Oxalsäure
Gleichstrom-Oxalsäure	GX	Gleichstrom	20 - 60 30 - 35	1 - 2 1 - 2	18 - 20 35	leichte Farbgebung	Oxalsäure Oxalsäure
Wechselstrom-Gleichstrom-Oxalsäure	WGX	Wechselstrom Gleichstrom	30 - 60 40 - 60	2 - 3 1 - 2	20 - 30 20	leicht gelblich	Oxalsäure
Gleichstrom-Schwefelsäure-Oxalsäure	GSX	Gleichstrom	20 - 25	1 - 2	20 - 27		Schwefelsäure Oxalsäure
Chromsäure	BK	Gleichstrom	45	ca. 1	40	grau	Chromsäure
Ematal	-	Gleichstrom	120	ca. 1 - 2	20 - 30	emailartig grau	Titan-Zirkon-Oxalsäure
Pigmental	-	Gleichstrom	25	2 - 2,5	60 - 65	milchig	Chromsäure
Chromatal	-	Gleichstrom		10 - 50	35 - 40	hellgrau	Chromsäure

Tabelle 15: Verfahrensvarianten zur Anodisierung von Aluminium [7], (S.425).

Art des Verfahrens	Schichtdicke, µm	Farbe der Oxidschicht	Anwendungsgebiete
Standardverfahren	5 bis 25	farblos, durchsichtig, auch gelblich	Bauwesen, Autozierteile, Haushaltsgeräte, allgemein als Oberflächenschutz
Farbanodisationsverfahren	15 bis 35	hellgelb bis schwarz	Innen- und Außenarchitektur
Zweistufenverfahren	15 bis 25	hellbronze bis schwarz	Innen- und Außenarchitektur
Hartanodisationsverfahren	25 bis 150	grau bis schwarz	Maschinenbau und Hydraulik
Bandanodisieren	2 bis 30	farblos	Innenarchitektur, Elektroindustrie
Sonderverfahren	5 bis 15	farblos bis grau	Flugzeugbau usw.

Tabelle 16: Verfahrensgruppen der Anodisierung und Anwendungsgebiete, [54], (S.12).

### 3.8 Eloxalschichten / Mikrostruktur

Die sich bildende natürliche Aluminiumoxidschicht auf der Oberfläche von Aluminium an der Luft ist von Natur aus eine extrem harte Substanz. Die Oxidschicht erreicht ihr volles Potenzial und Härte nicht, weil sie noch sehr dünn und porös ist. Bei der Steigerung der Schichtdicke oder Verbesserung der Korrosionseigenschaften ist das Schwefelsäure-Eloxieren sehr hilfreich. Was die Hartanodisation so wertvoll macht, ist die Kontrolle der Bildung von Oxid. Die Anzahl der Poren wird dabei so reduziert, dass sich eine härtere Schicht bildet [55] (S.12).

Ganz allgemein werden die Parameter der Porenstruktur von den Prozessbedingungen beeinflusst. Verfahrensart (Gleichstrom, Wechselstrom), Die Stromdichte, Prozessspannung, Type, Art und Temperatur des Elektrolyten, Werkstoffzusammensetzung und Behandlungs-

zeit sind einige Parameter, welche die Qualität der Oxidschicht nach dem Eloxier- bzw. Harteloxierprozess beeinflussen.

Der Elektrolyt rückt in die Durchschlagporen nach und bildet am metallischen Aluminiumgrund wieder eine neue kompakte Sperrschicht aus. Den kompakten, dielektrischen Charakter hat dabei immer nur die frisch und unmittelbar am Metall gebildete Sperrschicht. Dieser Vorgang wiederholt sich laufend. Dadurch wächst auf die Sperrschicht eine poröse Aluminiumoxidschicht auf. Da sich unzählige solcher Poren nebeneinander befinden, wächst die Schicht gleichmäßig ins Metall hinein. Da das Aluminiumoxid im Vergleich zum metallischen Aluminium einen größeren Volumenanteil besitzt, wächst die Oxidschicht, bezogen auf die ursprüngliche Oberfläche, zu einem bestimmten Anteil aus dem Metall heraus. Die anodische Oxidschicht ist ein genaues topographisches Abbild der ursprünglichen Oberfläche [51].

Der Schichtbildungsmechanismus ist auf die Oxidation des Aluminiums durch an der Anode entstehenden atomaren Sauerstoff zurückzuführen. Am Anfang bildet sich eine dünne, elektrisch isolierende und porenfreie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Sperrschicht. Die Sperrschicht wächst solange Aluminiumionen aufgrund des anlegten Stroms durch die Schicht diffundieren können. Bei ca.  $S=1\mu\text{m}$  ( $S$  = Schichtdicke) kommt der Prozess zum Erliegen. Um größere Schichtdicken auf Aluminium zu erreichen, werden Elektrolyte mit höherer Leitfähigkeit eingesetzt, die die Sperrschicht punktuell wieder rüchlösen. Die lokal abgedünnten Bereiche werden elektrisch durchschlagen. Der Elektrolyt dringt in die Durchschlagkanäle ein und verursacht eine Neubildung der Sperrschicht. Die Sperrschicht wächst in den Grundwerkstoff hinein und aus den verbleibenden oxidischen Bereichen. Am Rand der Durchschlagkanäle bildet sich die feinporige, dickere Eloxalschicht [1], (S.162).

Die Oxidschicht wächst dabei säulenförmig zu 1/3 aus dem Metall heraus - was bei Passungen berücksichtigt werden muss - und zu 2/3 in das Metall hinein [38], (S. 144). Diese Eigenschaft muss bei der Konstruktion der Bauteile bezüglich Passungen beachtet werden. Es gibt aber auch die Möglichkeit hierauf Einfluss zu nehmen, sodass eine Maßhaltigkeit von Passungen gewährleistet werden kann [38], (S.32); [1], (S.162).

Zwei Schichten sind prinzipiell zu unterscheiden. Eine Sperrschicht (barrier-layer) und darauf wächst die Deckschicht (porous-layer), [36], (S.5). Je nach Versuchsparametern kann die Sperrschicht allein oder zusammen mit der porösen Deckschicht auftreten.

In Abbildung 13 ist die Mikrostruktur von Aluminiumoxidkeramik (Korund) dargestellt, welche völlig unterschiedlich zur Eloxal ist, was sich natürlich in deren Eigenschaften (z.B. die sehr hohe Härte) widerspiegelt.

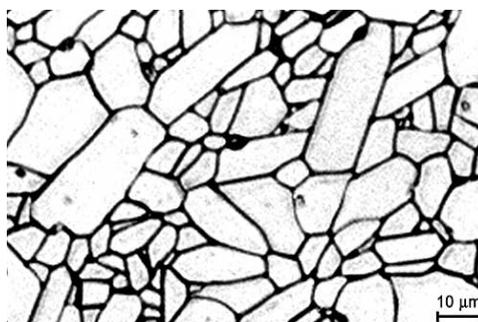


Abbildung 13: Gefüge von Aluminiumoxidkeramik 99,7% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), [25], (S.9).

### 3.8.1 Porenstruktur

Je nach Parametereinstellung des jeweiligen Prozesses wie Stromdichte, Spannung, kann also auch die Porenstruktur unterschiedlich sein. Die Eloxalschichten bestehen aus hexagonalen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Prismen. Die Härte liegt über 1000 HV<sub>0,025</sub> [56].

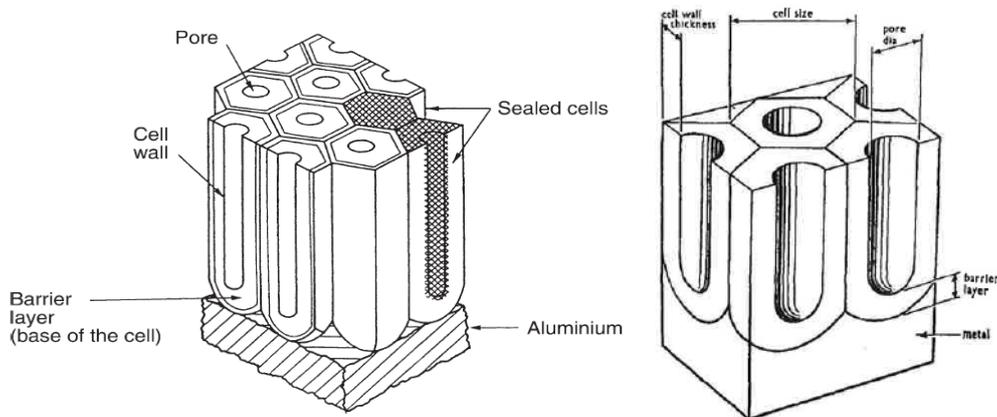


Abbildung 14: Schematische Porenstruktur einer anodisch erzeugten Aluminiumoxidschicht; links: [32], (S.10); rechts: [55], (S.12).

Der Schichtaufbau in Abbildung 14 zeigt (von unten nach oben):

- Grundwerkstoff (Aluminium)
- Sperrschicht (barrier layer)
- Pore
- Amorphes Aluminiumoxidhydrat

Abbildung 15, rechts; zeigt eine einzelne Zelle der Oxidschicht mit Porenkanal. Die linke Seite der Abbildung zeigt die Struktur einer gewachsenen Oxidzelle.

Die Oxidschicht setzt sich schließlich aus zahlreichen einzelnen Zellen zusammen, die sich auf die ganze behandelte Oberfläche des Werkstückes erstreckt, siehe Abbildung 15, links.

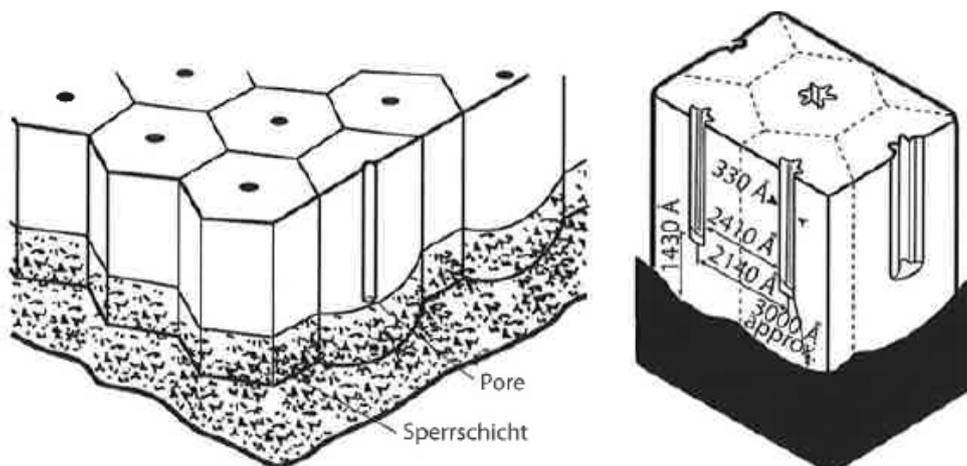
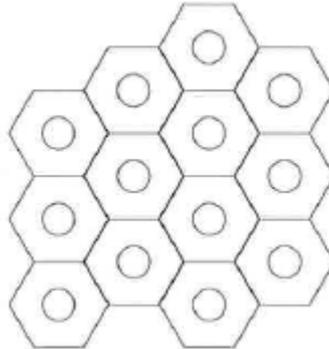


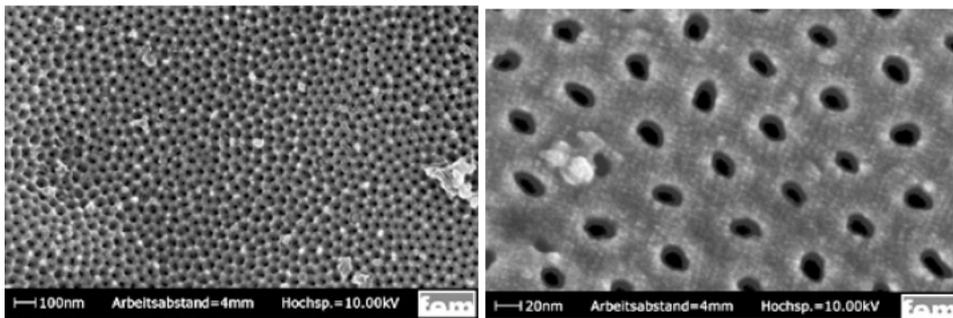
Abbildung 15: Aufbau Eloxalschicht, (li.): Struktur der gewachsenen Oxidzelle, (re.): Einzelne Zelle mit Porenkanal [1], (S.162)

Eine Draufsicht auf gewachsene Oxidzellen zeigt Abbildung 16. Die Anordnungen der einzelnen Zellen bzw. ihre Poren in der Mitte werden gezeigt.



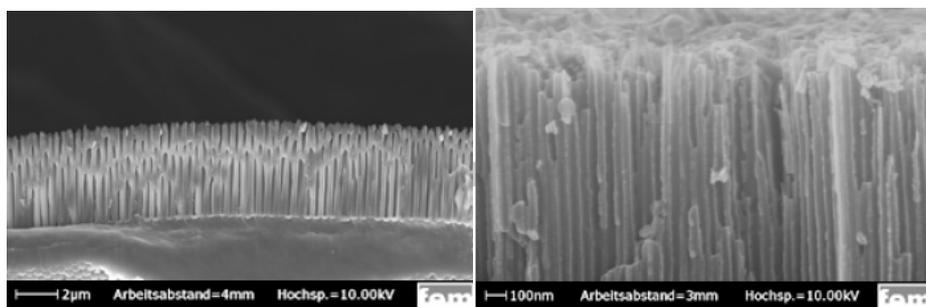
**Abbildung 16: Eloxalzellen – Draufsicht [33], (S.261).**

Abbildung 17 zeigt Draufsichten auf eloxierte Oberflächen im Elektronenmikroskop. Die Poren aus Aluminiumoxid und ihre hexagonale Anordnung sind auf diesen Aufnahmen deutlich zu erkennen. Die Durchmesser der Poren sind von vielen Parametern wie Art der Elektrolyte, Konzentration oder Temperatur abhängig aber vor allem von der benutzten Spannung (Prozessspannung).



**Abbildung 17: Eloxal-Poren – REM Aufnahme (li.) dichte und (re.) geringe Porigkeit [57], [58].**

Beim Harteloxal sind die Porendurchmesser etwas kleiner und dichter nebeneinander als beim Anodisieren bzw. Eloxieren. Abbildung 18 zeigt Aufnahmen von anodisch erzeugten Schichten bzw. Poren im Querschnitt.



**Abbildung 18: Eloxal-Poren-REM Aufnahme (li.) anodisch erzeugte Aluminiumoxidschicht (re.) [57].**

Die hexagonalen (Draufsicht) und langförmigen (Schnittansicht) Zellen sind auf den oberen Abbildungen gut zu erkennen.

Bei verschiedenen Parametern (Elektrolyten, Temperaturen, Spannungen) werden unterschiedliche Porendurchmesser und -verteilungen erhalten, wie in Abbildung 19 zu sehen ist.

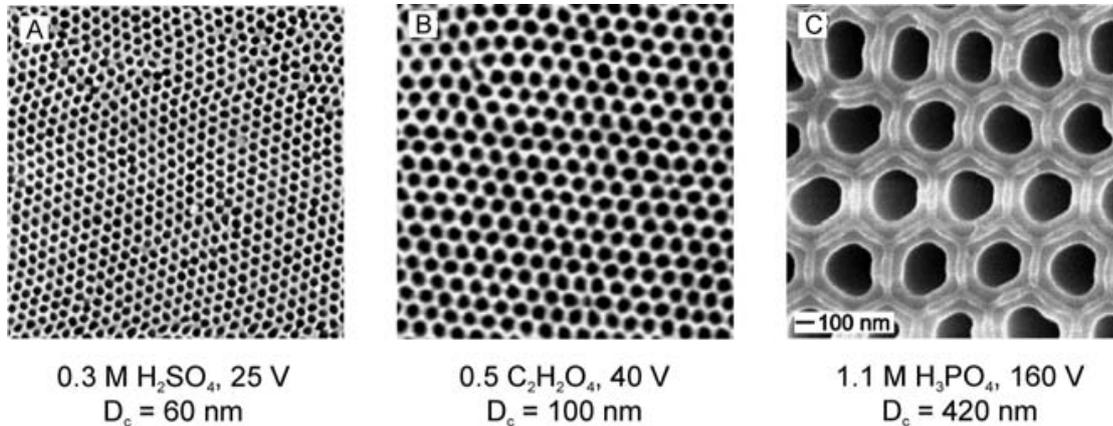


Abbildung 19: Nanostrukturen von selbstorganisierten Anodisierung in verschiedenen Elektrolyten auf  $10^\circ\text{C}$  (A),  $5^\circ\text{C}$  (B) und  $3^\circ\text{C}$  (C) / Draufsichten im REM [59], (S.62).

### 3.8.2 TEM-Untersuchungen Sperrschicht

Die einfache Morphologie des Films auf hochreinem Aluminium geht häufig beim Anodisieren von Legierungen verloren. Es handelt sich hier um eine in einer Schwefelsäure-Elektrolyt hergestellte Oxidschicht. Die Pore und die Zellen sind ca. 10 bis 30 nm groß, [60], (S.229), Abbildung 20.

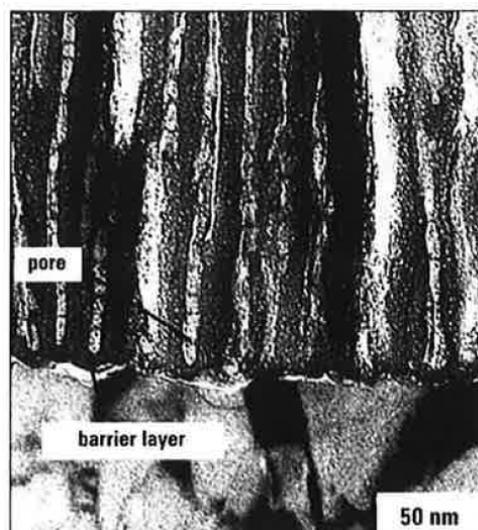
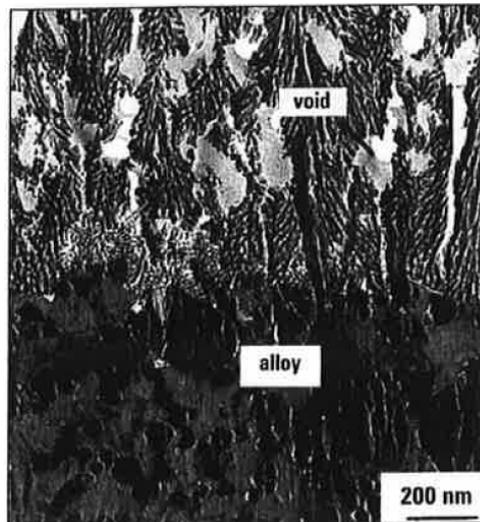


Abbildung 20: TEM- Aufnahme eines ultramikrotomierten Abschnitts einer in Schwefelsäure- Elektrolyte gebildeten Oxidschicht, [60], (S. 229).

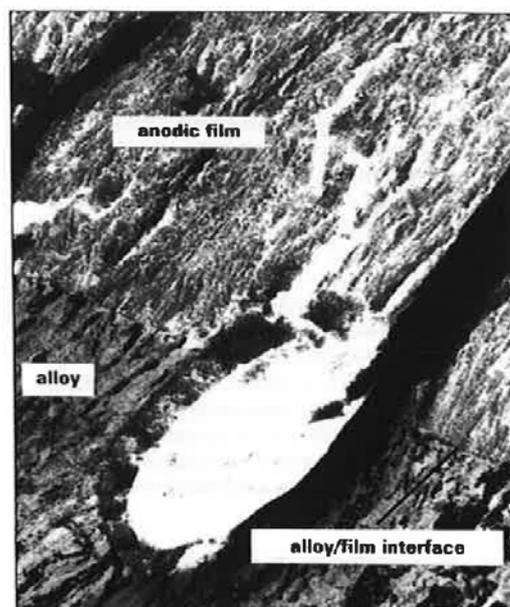
Genau zu unterscheiden sind eine Sperrschicht (barrier layer) und eine poröse Schicht. Darüber hinaus haben die mikrostrukturellen Eigenschaften der Legierungen, insbesondere die Partikel der zweiten Phase, einen direkten Einfluss auf die lokale Filmmorphologie, was nur mit den detaillierten Kenntnissen des Anodisierungsverhaltens zu verstehen ist. Die Folgen sind eine lokal modifizierte Morphologie des Films, ein Einbau von Teilchen (teilweise oder vollständig oxidiert) in den Film, Lunker, Risse, unregelmäßigen Schichtdicke und eine aufge-

raute Legierung/Film [60], (S.229), Abbildung 21. Die Hohlräume ergeben sich aus der Auflösung des Filmmaterials von den Teilchen der zweiten Phase.

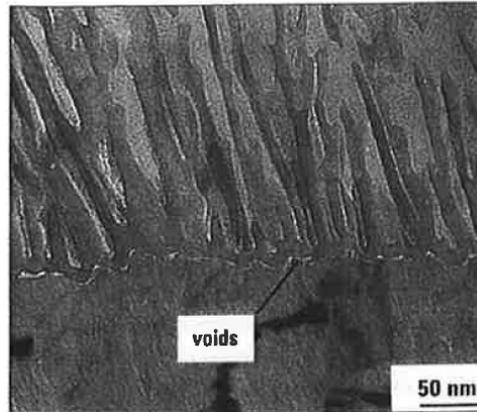


**Abbildung 21: TEM- Aufnahme ultramikrotomierter Abschnitt aus poröser anodisch oxidierte Schicht in Schwefelsäure-Elektrolyt auf einer Aluminiumlegierung (Einfluss 2. Phasen) [60], (S.229).**

Abbildung 22 zeigt ebenfalls eine undichte porösen Zone (engl. void). Unterhalb ist das Grundmaterial (alloy) zu sehen. Die Mängel im anodischen Film können den Schutz der Legierung stark beeinträchtigen. Etwa bei den 2xxx- Legierungen haben die Cu-reichen zweiten Phasen einen negativen Einfluss auf die Morphologie und Integrität des Filmes, besonders durch die Bildung von relativ großen Holräumen, siehe Abbildung 23. Das wirkt sich auch wirtschaftlich negativ auf das Verfahren aus.



**Abbildung 22: TEM - Aufnahme eines ultramikrotomierten Abschnitts des porösen anodisch oxidierten Films in Schwefelsäure-Elektrolyte auf Al-Cu-Legierung gebildet [60], (S.230).**

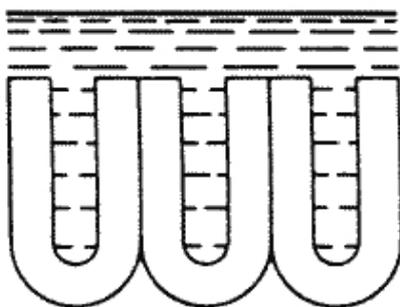


**Abbildung 23: TEM - Aufnahme eines ultramikrotomierten Abschnitt porösen anodisch oxidierten Film auf einer Aluminium Filmgrenzfläche infolge der Anodisation [60], (S.235).**

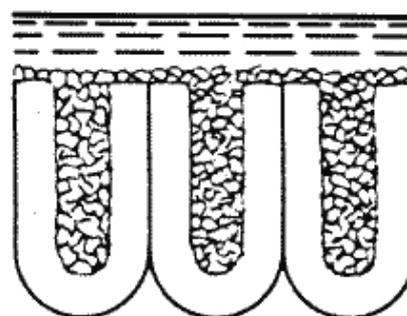
Die jüngsten Erkenntnisse bei der Erforschung der Wirkungen von Legierungselementen hinsichtlich der Bildung der Sperrschichten werden zu einer allgemeinen Verbesserung des Aufbaus der Al-Struktur beim Anodisieren beitragen. So können Partikel der 2. Phase, einschließlich der Änderung der Porenmorphologie, Produktion von Hohlräumen, die Erzeugung von Sauerstoff, Veränderungen in chemischen Stabilität des Filmmaterials und Aufrauen der Legierung/Filmgrenzfläche genauer verstanden werden. Die so gewonnenen Kenntnisse werden eingesetzt um die Leistung und die Lebensdauer der Oxidschicht beim Eloxieren zu steigern [60], (S.238).

### **3.8.3 Verdichten (Sealing) / Nachbehandlung**

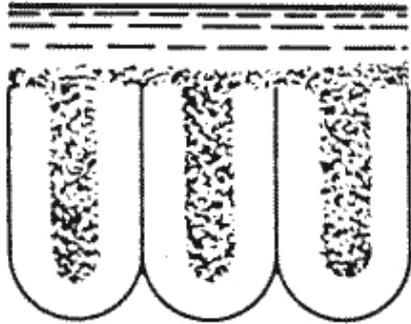
Eine Nachbehandlung – das „Sealing“ ermöglicht es, die zahlreichen Poren der Oxidschicht zu verdichten. Die Porendurchmesser der anodischen Schicht sind prinzipiell von der Art des Grundwerkstoffes, also der Zusammensetzung des Materials, der Art des Elektrolyten und den Verfahrensparametern abhängig. Ein wichtiger Parameter in diesem Fall ist die Sealingzeit, die von den Oxidschichtdicken abhängig und einzuhalten ist.



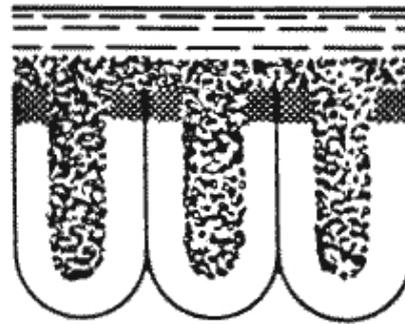
**1. Unverdichtete Poren**



**2. Quellung der Porenrandzone**



3. Aufnahme von Hydratwasser



4. Umwandlung zu  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Abbildung 24: Schematische Darstellung der Vorgänge bei Verdichtung [30].

Die Heißwassernachverdichtung erfolgt bei ca.  $96^\circ\text{C}$  und verbessert so den Korrosionsschutz der Oberflächenschicht. Die Optimierung der dekorativen Eigenschaften der entstandenen Oberfläche erfolgt durch eine adsorptive Einlagerung von Farbstoffen. Die anschließende Heißwassernachverdichtung fixiert zusätzlich die Farbe [30].

In Abbildung 14 bis 19 ist die prinzipielle Anordnung der Zellen in Erscheinung gebracht worden. Bei Abbildung 25 werden zusätzlich, verdichtete Poren gezeigt. Durch die Verdichtung (Nachbehandlung im Eloxal- bzw. Harteloxalprozess) werden die Poren der Oxidschicht geschlossen. Das Verdichten der Poren heißt auch „Sealing“. Dadurch wird die Qualität der gefärbten Oberfläche erhöht, sowie eine längere Einsatzmöglichkeit des Teiles gewährleistet.

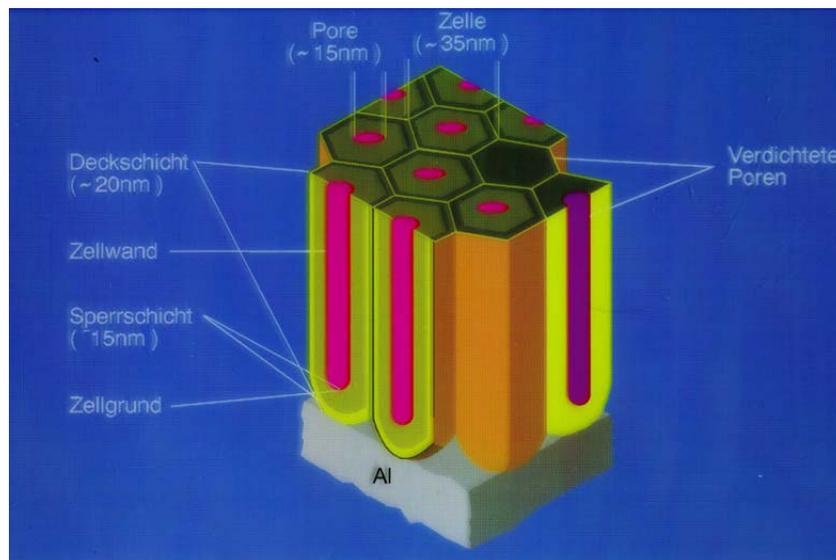


Abbildung 25: Schichtaufbau Eloxal mit verdichteten Poren, [54], (S.9).

Tabelle 17 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Oxidschichten, also von der natürlichen Oxidschicht an Luft bis zur behandelten Oberfläche (anodisch erzeugte Oxidschicht) an. Ihre Schichtdicke bzw. Eigenschaften werden ebenfalls angegeben.

Die ‚Luftoxidhaut‘ oder natürliche Oxidschicht ist das Ergebnis einer Reaktion des Aluminiums (Grundwerkstoff) mit seiner Umgebung. Die anodisch erzeugten Oxidschichten sind die Resultate eines elektrochemischen Verfahrens, Eloxal bzw. Anodisieren oder Hartanodisieren.

Art der Oxidschicht	Erzeugung durch	Schichtdicke ( $\mu\text{m}$ )	Eigenschaften der Schicht
Luftoxidhaut	Reaktion mit Sauerstoff der Luft	0,001 - 0,01	farblos, durchsichtig, korrosionsschützend
	Reaktion unter Einfluß der Witterung	0,03 - 0,1	grauweiß, wenig reflektierend
Chemische Schutzschicht	chemische Reaktion in sauerstoffabgebenden Lösungen	0,1 - 5	opak, grün, grau oder gelblich, chemisch erhöht beständig
Anodisch erzeugte Oxidschichten	Anodische Oxidation in Schwefelsäure oder nach speziellen Verfahren	5- 30	farblos, durchsichtig, chemisch sehr beständig, braun, grau oder schwarz, besonders abriebfest
		20 - 100	

Tabelle 17: Bildung und Eigenschaften von Oxidschichten [7], (S.420)

Die Oxidschicht wächst zu ca. 2/3 in den Grundwerkstoff (Aluminium) und zu ca. 1/3 über ihn hinaus, wie Abbildung 26 zeigt. Diese Verteilung des Wachstums der Schicht sichert ihre Haftung auf dem Grundmaterial. Enge oder genaue Passungen sind bei Bauteilen, die eloxiert bzw. harteloxiert werden, schon bei der Konzeption, Konstruktion und Fertigung zu beachten.

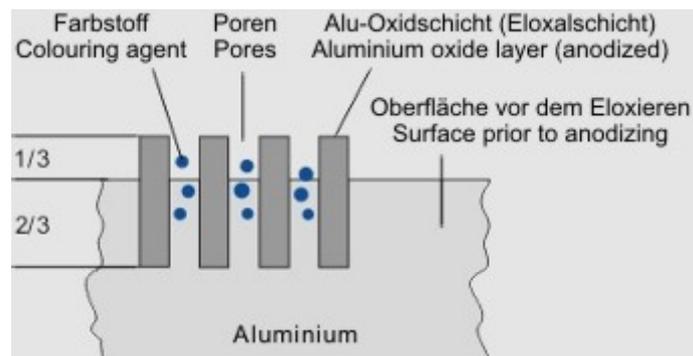


Abbildung 26: Schichtaufbau beim Eloxal, [38].

In den Poren (Abbildung 26) lagern sich die Farbstoffe beim Färben, was zu einem besseren Aussehen der Oberfläche beiträgt. Das Verdichten der Poren oder Sealing am Ende des Verfahrens, führt außerdem zu einer längeren Einsatzmöglichkeit des Teiles.

### 3.8.3.1 Beispielablauf Verdichten

In Tabelle 18 sind die verschiedenen Arten des Verdichtens (Sealing) und deren Parameter aufgelistet.

a) Heißsealing	Wassertemperatur > 96°C 2 - 3 min Behandlungszeit je $\mu\text{m}$ Eloxalschicht
b) Mitteltemperatur-sealing	Wassertemperatur 86 - 92°C 3 min Behandlungszeit je $\mu\text{m}$ Eloxalschicht
c) Kaltimprägnierung (Kaltsealing)	In nickelhaltigen Lösungen bei 20 - 32 °C 0,8 - 1,2 min Behandlungszeit je $\mu\text{m}$ Eloxalschicht

Tabelle 18 Arten des Verdichtens / Parameter

Abschließend werden die Teile in einen Trockner gelegt, nach der Trocknung verpackt und zu den jeweiligen Kunden versandt [49].

### **3.9 Eloxalverfahren zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften**

Die beim Eloxieren gebildete Oxidschicht auf dem Bauteil schützt die Oberfläche gegen Korrosion, Verschleiß und Abrieb und kann auch einen dekorativen Zweck für das Werkstück haben.

Die behandelte Oberfläche kann neben den genannten Funktionen vielfältige andere Aufgaben haben, wie beispielsweise als Haftvermittler oder Dielektrika für elektrische Anwendungen dienen [61], (S.1728).

Aluminium wird oft in der Luft- und Raumfahrttechnik benutzt. Weil manche Aluminiumlegierungen nicht schweißbar sind, wie z. B. AA- 2024, wird das Nieten oder Kleben gerade in diesem Bereich (Fügetechnik) häufig angewendet. Höherer Korrosionsschutz und gute Adhäsionseigenschaften sind hier gefragt. D. h. die behandelten Oberflächen dienen als Grundlage für die weitere Verarbeitung oder für die Montage der Teile.

Seit vielen Jahren wird das Chromsäureanodisieren (Chromic Acid Anodizing = CAA) in solchen Fällen angewendet. „CAA-Schichten sind bekannt für einen hervorragenden Korrosionsschutz und eine sehr gute Haftung von Klebverbindungen [61], (S.1728). Ein weiterer Standardprozess zur Oberflächenvorbehandlung von Aluminiumlegierungen für die Strukturklebung ist das Phosphorsäureanodisieren (Phosphoric Acid Anodizing = PAA)“.

Die Bildung der Porengröße bei der Oxidschicht unterliegt vielen Parametern. So zeigen unter gleichen Bedingungen anodisierte Legierungen der AA 2000-Serie gegenüber der AA 1050-Serie vollkommen unterschiedliche Porenstrukturen. Es ist bekannt, dass mit zunehmender Rauheit der Oberfläche vor dem Verfahren die zu erzielende Porengröße sinkt. Als vorteilhaft erwiesen sich sehr glatte, zum Beispiel elektrochemisch polierte Oberflächen genauso wie zweistufige Anodisierprozesse [61], (S.1730).

Auch die Anodisierspannung trägt als Parameter zur Bildung der Porengröße bei. Manche Autoren sehen sogar eine Proportionalität zwischen Anodisierspannung und Porengröße der Oxidschicht. Als Ergebnis wurde bei Legierung AA 1050 ein Porendurchmesser von 50 bis 60 nm und für das Oxid bei Legierung AA 2024 ein Porendurchmesser von 50 bis 70 nm gemessen, siehe hierzu Abbildung 27. Das Ziel, größere Porendurchmesser und zwar hier 100 nm, wurde nicht erreicht. Eine weitere Erhöhung der Elektrolytkonzentration und der Anodisierspannung schien aus wirtschaftlichen Gründen nicht mehr sinnvoll. Man geht hier davon aus, dass die Anodisierspannung im CAA-Verfahren bei 45 bzw. 50V lag.

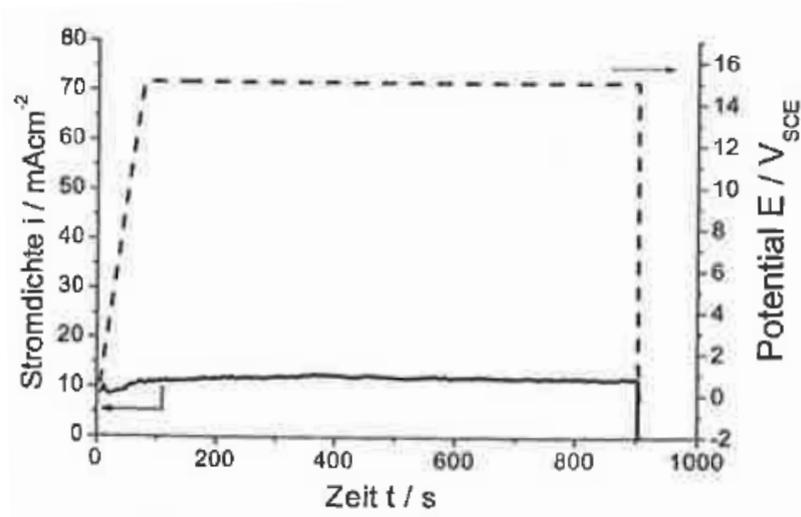


Abbildung 27: Rampe-Halte Versuch zum Anodisieren an AA 1050 in 20%iger  $H_3PO_4$  bei  $47^\circ C$  [61], (S.1732).

Anschließend gelang es auf EN AW 2024 eine Oxidschicht mit Porendurchmessern von 70 bis 90 nm unter bestimmten Parametern zu züchten.

Es ist zu erwähnen, dass unter den oben genannten Bedingungen mit CAA- und PAA-Verfahren, die Ergebnisse unterschiedlich waren, siehe auch hierzu Abbildung 28. Dargestellt wird, dass die Porendurchmesser nach der Behandlung beim AW 2024 größer als beim AW 1050 waren.

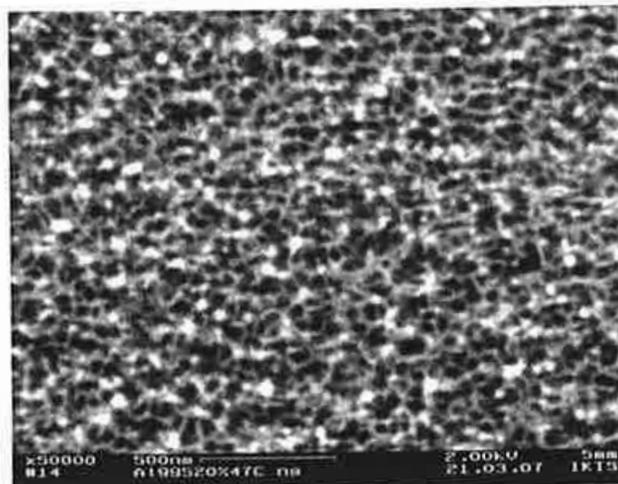


Abbildung 28: FEREM- Aufnahme der Oberfläche einer Anodierschicht auf AA 1050 nach Anodisierung unter den in Abbildung 27 in einem Rampe-Halte Versuch gezeigten Bedingungen, [61], (S.1732).

Man kann erkennen und entnehmen, dass die erzielten Ergebnisse abhängig von den gewählten Parametern sind – siehe Abbildung 29.

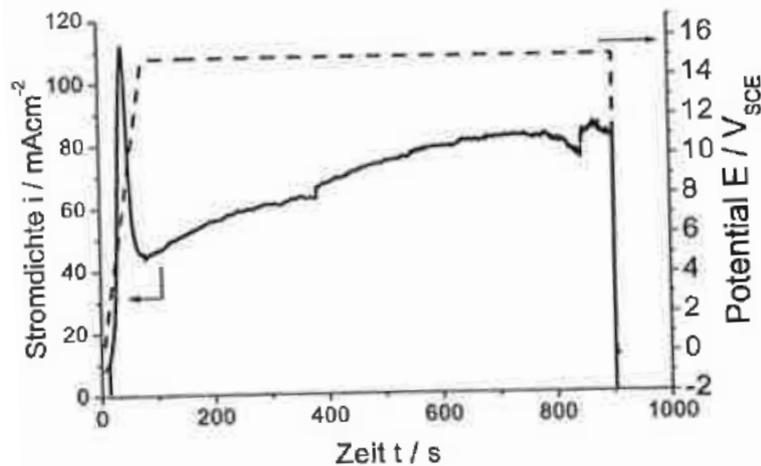


Abbildung 29: Rampe- Halte- Versuch zum Anodisieren an AA 2024 in 20%iger H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> bei 47°C, [61], (S.1732).

Die größeren Porendurchmesser bieten den Vorteil, dass auch nach der Verdichtung der Poren oder Imprägnierung der Oxidschicht noch freie Räume für die Aufnahme und Verteilung von Klebstoffen bleibt, was gut für die Haftfestigkeit und Qualität der geklebten Teilen ist.

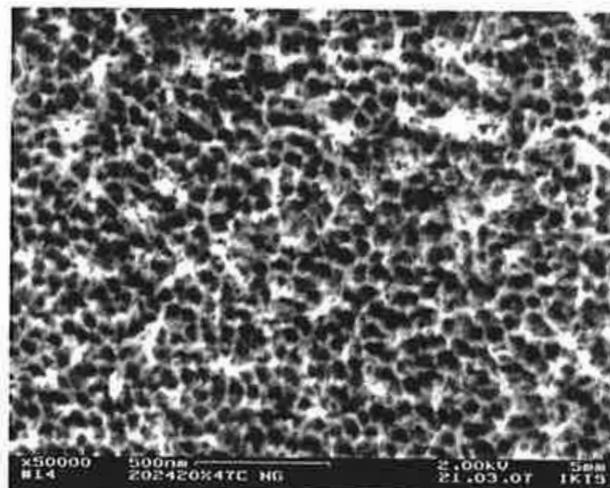


Abbildung 30: FEREM-Aufnahme der Oberfläche einer Anodierschicht auf AA 2024 nach Anodisierung unter den in Abbildung 29 in einem Rampe-Halte - Versuch gezeigten Bedingungen [61], (S.1732).

Wichtig in diesem Abschnitt ist, dass beim Kleben z. B. im Bereich Luft- und Raumfahrttechnik zur Phosphorsäureanodisierung zurückgegriffen werden kann. Dieses sollte so verändert werden, dass eine anschließende Imprägnierung zu den gewünschten Eigenschaften führt. Dies bedeutet, dass bedingt Offenporigkeit der Anodierschicht vorhanden sein muss, um eine große effektive Oberfläche, das Eindringen des Klebstoffes in die Oxidschicht und gute mechanische Verankerung gewährleisten zu können.

### 3.9.1 Fügetechnik

Manche Fügeprozesse lassen sich erst nach Anodisierung der Teile als Vorbehandlung realisieren. Die Werkstücke werden in diesem Fall vorher eloxiert, um das Kleben zu ermöglichen oder die Verschleißfestigkeit an den Gewindeoberflächen von Verbindungsschrauben zu erhöhen und die Teile gegen Korrosion zu schützen. Bei der Montage der Schrauben kann es zur Verkratzung der Teiloberflächen (eloxierten Schrauben) kommen, was zur Korrosion führen kann. Beispiele für harteloxierten Verbindungselemente sind folgende oft benutzte Schrauben in der Industrie:

Selbstschneidende Schrauben aus der hochfesten Aluminium- oder Magnesiumlegierungen werden mit Harteloxalverfahren beschichtet. Diese Schrauben werden z. B. für die Verbindung von 7000er Al-Legierungen in der Produktionstechnik und im Allgemeinen im Leichtbau eingesetzt. Wegen ihren hohen Anforderungen an den Gewindeoberflächen, Verschleißfestigkeit oder gegen Korrosion werden die Schrauben vor dem Einsatz hartanodisiert. Das Verhalten der eloxierten Selbstschneidenden Schrauben während der Montage sowie die Empfindlichkeit der hochfesten Aluminiumlegierungen wurden wissenschaftlich untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass die harteloxierten Oberflächenschichten von AW 7068 (AlZn7.5Mg2.5Cu2) gut gegen Verschleiß der Teiloberflächen und ebenfalls gegen Korrosion wirken.

Die Verwendung von Materialien mit geringer Dichte oder reduziertem Gewicht ist wichtiger Gegenstand der Forschung und Entwicklung in der Technik besonders im Bereich Leichtbau. Unter anderem Fügeverbindungen und auch lösbare Verbindung von Leichtmetallen sind eine große Herausforderung. Blechschrauben ermöglichen lösbare Verbindungen ohne vorherige Gewindeschneiden. Untersucht wurde hier die Funktionalität der eloxierten Oberflächen von Blechschrauben für eine verbesserte Leistung, insbesondere hinsichtlich Einschraubverhalten und Prüfspannung gegen Spannungsrisskorrosion.

Es ist bekannt, dass zum Verbinden von Leichtmetallstrukturen die Verwendung von traditionellen Stahlschrauben mehrere Nachteile hat. Beispiel ist die geringe Übereinstimmung von Wärmeausdehnungskoeffizienten und Elastizitätsmodul, daher tritt ein erheblicher Verlust an Vorspannkraft auf und erfordert Kompensation. Oft entsteht dazu wegen der erheblichen Unterschiede in den Korrosionspotentialen eine galvanische Korrosion. Um dies zu vermeiden, ist ein umfangreicher und kostspieliger Einsatz von isolierenden Beschichtung auf beiden Bolzen erforderlich oder die Verbindungsschrauben aus Stahl zu ersetzen [62], (S.661). Die Verwendung von Aluminium für Verbindungselemente reduziert die galvanische Korrosion auf ein Minimum und führt zu einem deutlich verringerten Verlust der Klemmkraft. Folglich kann eine höhere Vorspannkraft bei thermischer Belastung beibehalten werden.

Ein zweiter Trend in der vorliegenden Entwicklung der Herstellungstechnik liegt bei der Verkürzung der Durchlaufzeiten bei Herstellung und Montage von Produkten. Daher die Verwendung von selbstschneidenden Schrauben eine wichtige Rolle. Das Verbinden von Teilen ohne vorherige Gewindeschneiden wird erleichtert. Dies spart einen höheren Aufwand und eine erhebliche Menge an Fertigungsprozesszeit.

Zusammenfassend zeigt die Anwendung von selbstschneidenden Schrauben aus Aluminium eine vielversprechende Technologie für Leichtmetalle.

Hartanodisierte Schrauben aus EN AW- 7068 mit einer anodischen Beschichtung wurden untersucht. Eine errechnete Dicke von ca. 30  $\mu\text{m}$  (Schichtdicke) würde den Verschleiß min-

den, gegen die Korrosion wirken und die Montage der Schrauben vereinfachen [62], (S.662). In früheren Arbeiten wurden ebenfalls unbeschichtete und harteloxierte Schrauben aus EN AW-6063 untersucht. Die Härte der Schraubenoberflächen wurde um 2668 auf dem Marder Maßstab bestimmt, im Vergleich zu 984 für blankes Aluminium EN AW 7068. Es wurde festgestellt, dass die hartanodisierten Schraubenoberflächen gegen die Abnutzung der Kontaktflächen wirken und das Drehmoment fürs Festziehen der Schrauben erheblich reduziert wird.

Aus Diagramm 1 ist zu entnehmen, dass das Einschraubmoment viel kleiner wird, wenn die Schrauben hartanodisiert sind. Hier ist es also vorteilhaft hartanodisierten Schrauben zu benutzen. Nach der Wärmebehandlung T73 zeigen die untersuchten Blechschrauben unter Vorspannung eine lange Korrosionsbeständigkeit gegen Risskorrosion. Alle Proben ertragen 8 Wochen neutralen Salzsprühtest ohne zu scheitern. Harteloxierte Schrauben zeigten kein anderes Verhalten unter den betrachteten Umständen.

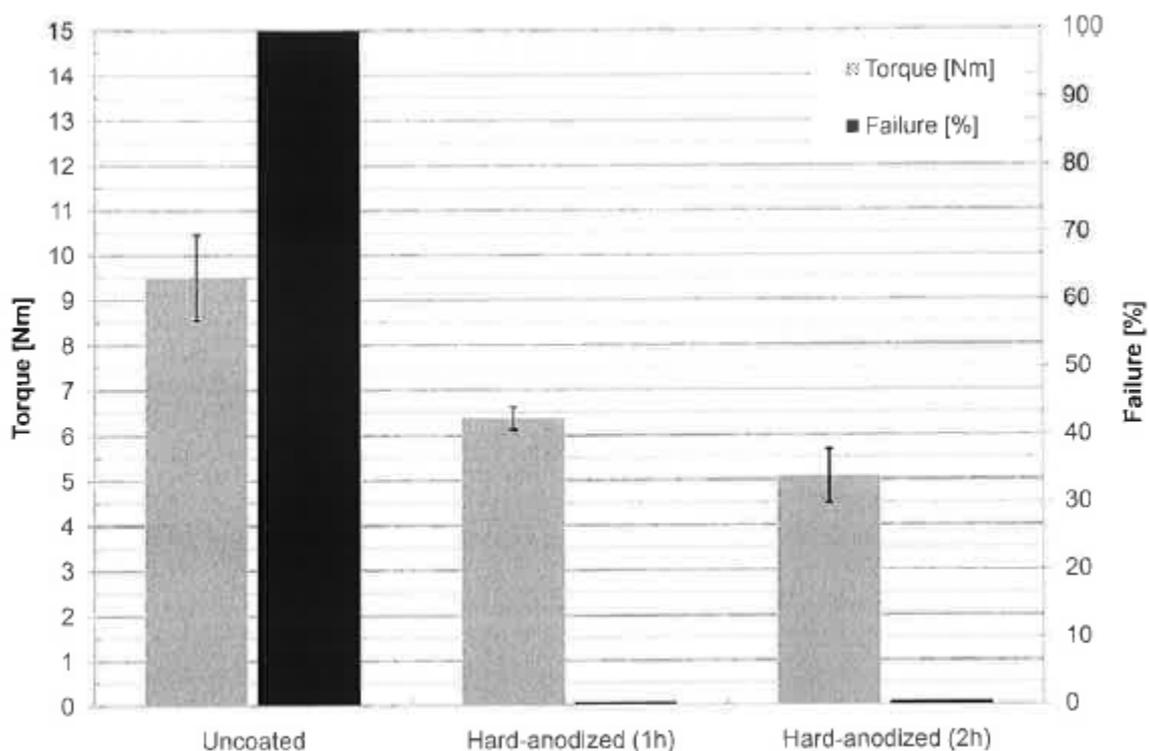
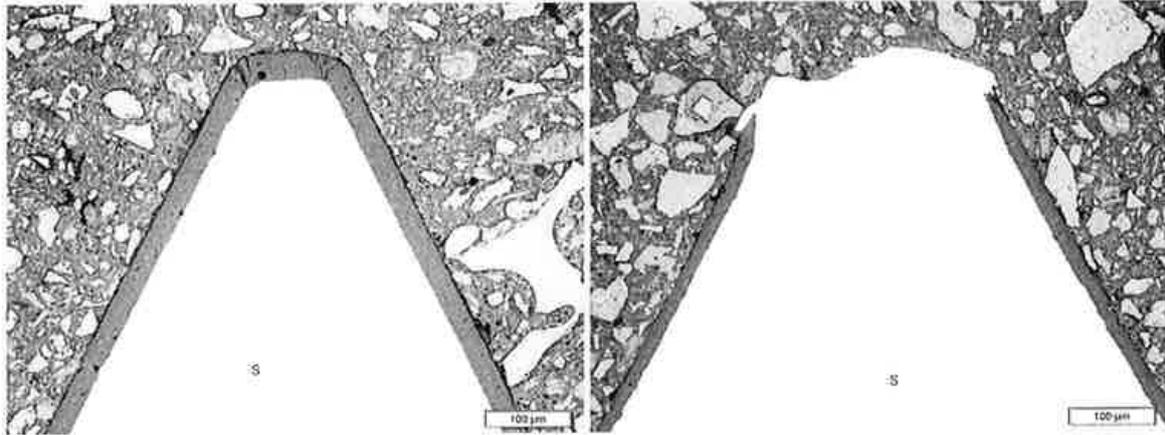


Diagramm 1: Benötigtes Einschraubmoment und Ausfallrate von Schrauben im Einschraubprozess für unbeschichtete und hartanodisierte Prüfkörper [62], (S.665).

Eng.: Failure = Ausfall ; Torque = Drehmoment; Uncoated = ohne Beschichtung; Hart-anodized = hartanodisiert

Hartanodisieren ein notwendiger Prozessschritt für die Funktionalisierung der Oberflächen der untersuchten Blechschrauben.



**Abbildung 31: Querschliff einer hartanodisierten Schraube- Links: Gewindegang im Ausgangszustand- Rechts: Erste Gewindegang nach dem Gewindefurchen mit Schichtverlust an der Gewindespitze [62], (S.665).**

Die Notwendigkeit, hart anodisierte Schrauben für die vorliegende Anwendung zu wählen, wurde bestätigt. Ohne vorherige Hartanodisierung scheiterte die Probe im Gewindefurchprozess wegen Rissbildung durch hohes Drehmoment, obwohl eine Gleitbeschichtung auf die Schraube aufgebracht wurde. Die hartanodisierten Oberflächen zeigen offensichtlich Widerstand gegen Flächendruck und ertragen die Spannungen an der Grenzfläche während die Gewindeform erhalten bleibt [62] (S.666).

### **3.9.1.1 Klebeeignung von Eloxal**

Eloxieren wird häufig aufgrund der günstigen Kosten, der Einfachheit und Vielseitigkeit der Beschichtungen in der Luft- und Raumfahrt angewendet und hat seinen Ursprung Anfang des letzten Jahrhunderts. Es wird prinzipiell gegen die Korrosion und Verschleiß oder um das Kleben zu vereinfachen oder überhaupt zu ermöglichen oder auch als Vorbehandlung fürs Lackieren angewendet [60], (S.228). Wie mehrmals erwähnt, kann auch zu dekorativen Zwecken eloxiert werden.

Eloxieren wird in der Luft- und Raumfahrttechnik auch als Vorstufe des Klebens verwendet. Weitere Materialien können in diesem Fall Verbundwerkstoffe sein. Eloxieren als Vorbereitungsverfahren fürs Kleben schließt die Lücke zwischen den metallischen und Composite-Materialien [63], (S.20). Die Eloxalschicht ist mit dem Grundwerkstoff fest verbunden und die poröse Schicht der Eloxalschicht sorgt für eine gute Aufnahme und Verteilung des Klebstoffes.

Eloxierte Oberflächen sind in den meisten Fällen eine hervorragende Grundlage für die Haftung der Beschichtungen. Sie bieten ebenfalls Schutz besonders gegen Korrosion und haben positive Merkmale wie Berechenbarkeit, Wiederholbarkeit, Konsistenz usw. [63], (S.21).

Chromsäureanodisieren z. B. hat sich für eine lange Zeit bewährt. Es bietet eine gleichmäßig dünne anodische Oxidschicht mit porösem Fundament für eine sehr starke Bindung (Haftung) der Bauteile [63], (S.23).

### **3.9.1.2 Kleben von Aluminiumteilen im Flugzeugbau**

Das Verkleben von Aluminiumblechen ist in Flugzeugbau ein wichtiges Fertigungsverfahren. Um Klebverbindungen ausreichender Festigkeit und Langzeitbeständigkeit herzustellen, muss bei der Vorbehandlung der Bleche auf der Blechoberfläche eine Aluminiumoxidschicht erzeugt werden, die bestimmten Eigenschaften aufweist.

Im Flugzeugbau wird Metall / Metall - Kleben als Verbindungstechnik seit über 30 Jahren eingesetzt. Die Vorteile des Klebens gegenüber dem Nieten sind Gewichtersparnis, günstige Spannungsverteilung, keine Bohrlöcher und deshalb höhere Korrosionsbeständigkeit (Kleben ist gleichzeitig Dichten).

Wichtigste Arbeitsvorgänge:

- Oberflächenvorbehandlung der zu verklebenden Bauteile
- Auftragen des Klebstoffes bzw. Auflegen des Klebfilms und
- Zusammenlegen der zu verklebenden Bauteile, [64], (S.164).

Die Haftung einer Verbindung wurde in einer Studie untersucht. Ergebnis war, dass in einem Klebstoffsystem viele Parameter die Eigenschaften der gesamten Verbindung bestimmen. Diese können sein: Das Aluminiumfüge, die Qualität der auf der Haftfläche durch Vorbehandlung erzeugten Oxidschicht, Primer und Klebstoff.

Die Reaktionen in der anorganisch/organischen Grenzschicht zwischen dem System und Oxid, wie oben erwähnt, sind von größter Bedeutung bei der Bestimmung des Verhaltens des Gesamtsystems [65], (S.139). Aus der Studie ist zu entnehmen, dass die Vorbehandlung und das eigentliche Verfahren (hier Eloxieren / Harteloxieren) einer zu klebenden Oberfläche eine wichtige Rolle für das ganze Fügesystem spielt.

## **3.10 Spezielle Eloxierprozesse**

### **3.10.1 Plasmakeramik- Verfahren (PEO- Technologie)**

Eine relative neue Methode Bauteile zu anodisieren bzw. zu eloxieren ist die PEO-Anodisierung (PEO-"Technologie (Plasmakeramik- Verfahren)) oder Funkenanodisierung genannt. Die zunehmende Verwendung von Materialien aus Leichtmetall, besonders in der Transportindustrie im Bereich Automobilbau, Eisenbahnen, Schiffe und Luft- und Raumfahrttechnik (Flugzeuge) erfordert neue Techniken der Oberflächenvorbereitung für den Korrosionsschutz sowie als Voraussetzung für Klebstoff basierte Prozesse.

Funkenentladung-Anodisierung (auch bekannt als „Plasma-elektrolytische Anodisierung“ „Microarc Oxidation,“) können Oberflächeneigenschaften wie Härte, Korrosionsschutz-, chemische Beständigkeit und Verschleißfestigkeit verbessern. Die Variation mehrerer Parameter (DC, Impulsstrom, Badzusammensetzung) wurde mit Aluminiumlegierungen unterschiedlicher Gehalte an Magnesium, Kupfer und Mangan (z.B. 2xxx, 6xxx-Typen) und Magnesiumlegierungen (AZ-Serie) durchgeführt.

Die Abhängigkeit von Schichtdicken-, Oberflächenmorphologie, und Benetzbarkeit von den oben genannten Prozessparametern und Legierungstypen ist erforscht worden. Funkenanodisieren ist eine mögliche Vorbehandlungsmethode für haftende Verknüpfung von Alumini-

um- und Magnesiumlegierungen. Bei Magnesiumlegierungen ist das Korrosionsverhalten von geklebten Proben stark von den Prozessparametern abhängig.

Prozesse auf Chrom-VI basierten Leichtmetalllegierungen werden mehr und mehr ersetzt, besonders im Automobilbau, wo neue Richtlinien das Maß an Chrom VI an Fahrzeugen begrenzen. Die Entwicklung von Alternativoberflächenbehandlungsprozessen ist daher eine Angelegenheit in zahlreichen Forschungsprojekten. Unter vielen Ansätzen, um Chrom-VI durch andere Metalloxide zu ersetzen, werden Anodisation basierte Prozesse zunehmend attraktiv. Niedrig-Spannung Anodisation ist nicht sogar für alle Aluminiumlegierungen möglich, aber nicht auf Magnesiumlegierungen anwendbar.

Normalerweise, erfordert die Anodisation sorgfältiges Versiegeln (Sealing) oder hoch entwickelte Anstrichprozesse als Nachbehandlung. Funken-Anodisation an höheren Spannungen generiert keramischen Schichten, die beträchtlichen Widerstand zu chemischen Angriffen anzeigen.

Funken-Anodisieren wurde im Jahr 1930 entdeckt, aber kam erst 50 Jahre später zum Einsatz, als die Vorteile dieser Technik erkannt und beschrieben wurden [66], [67], (S.102).

Die Plasmakeramik (PEO-Technologie) entsteht im Elektrolyt, wobei die Metalloberfläche in einer Plasmaentladung zu einer dichten, atomar haftenden Keramikschiicht umgewandelt wird. Diese Oberflächen-Technologie der Zukunft ermöglicht es, extrem harte und Abriebfeste Schichten, verschiedene Schichtstärken, exzellente Wärme-, und Korrosionsbeständigkeit, Imprägnierbarkeit und Umweltfreundlichkeit der Schichten zu erzielen [68].

### **3.10.1.1 Klebeeignung von PEO-Schichten**

Leichte Konstruktionsstrukturen bestehen aus einer Mischung von Materialien, die kaum geschweißt und selten mechanisch verbunden werden können. Eine Lösung ist in diesem Fall, die Teile zu verkleben. Zu prüfen ist, ob die Adhäsion des Klebstoffes oder die Reißfestigkeit (Zusammenhalt) der Teile dadurch gewährleistet ist. Tests zeigen, dass die Oberflächeneigenschaften der anodisierten Teile sich mit den Verfahrensparametern, wie Werkstoffart, Elektrolyte oder Stromdichte ändern [67] (S.105).

Es gibt Theorien, die sich mit den Auswirkungen der Umwandlung oder Vorbehandlungsschichten auf Haftfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit befassen. Benetzungs- und Haftkräfte der Beschichtung oder des Klebers sind ebenso wichtig wie ihr Diffusionsverhalten. Die Korrosionsbeständigkeit ist ein wesentliches Kriterium. In der Regel gewährleistet die Kombination einer effizienten Vorbehandlung mit geeigneten Beschichtungen korrosionsbeständige Systeme für Anwendungen in Außenbereich.

Funken-Anodisation wurde mit Aluminium- und Magnesiumlegierungen durchgeführt. Die erhaltenen Schichten wurden mit verschiedenen Methoden charakterisiert, um die Prozessparameter mit den Schichtstrukturen in Beziehung zu setzen. Im Versuch entstand eine bröckelige äußere Schicht und eine schwere, dichte Innenschicht, eine Versiegelung (Sealing) wurde zusätzlich empfohlen. Zusammenfassend lieferten diese Schichten verbesserte Eigenschaften im Vergleich mit üblichen Anodisierungsprozessen [67], (S.112).

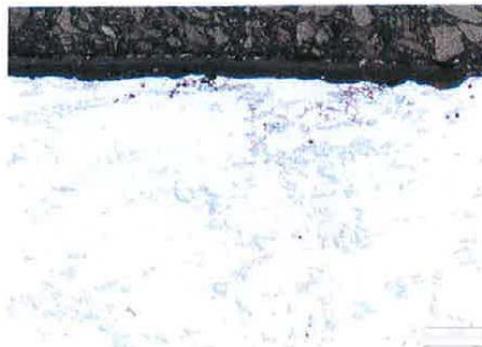
### **3.10.2 Diamondyze TM- Verfahren oder Keramisches Anodisieren**

Im Bereich Anodisierungstechnik wird zurzeit versucht, einen Durchbruch bei der Anodisierung von Aluminium zu erzielen. Ein Amerikaner, Leonard Warren, von Tech-Line Coating mit

jahrzehntelanger Erfahrung in der Beschichtungsindustrie, und ein kanadischer Metallveredler, Dale Hupe (Hupe Manufacturing), haben das „Diamondzyze TM-Verfahren“ entwickelt, das auch als „keramisches Anodisieren“, beschrieben wird [69], (S.466).

Die Durchführung des neuen Anodisierungsverfahrens verläuft mehr oder weniger konventionell und erfolgt unter Verwendung eines wässrigen Säureelektrolyts. In der anschließenden Phase, wird das frisch anodisierte Aluminium in eine Lösung getaucht, die ein geheim gehaltenes Additiv enthält. Dieser Schritt ist fast der gleiche wie beim klassischen Färbeverfahren für anodisiertes Aluminium. Und tatsächlich kann auch ein Farbstoff zugegeben werden, obwohl er nicht notwendig ist; in diesem Fall behält das anodisierte Aluminium die gleiche Farbe, die es unmittelbar nach dem Anodisieren hatte. Zum Schluss wird die Oberfläche mit einem herkömmlichen Nickelazetat, heißem Wasser, Dampf oder anderen Mitteln versiegelt. Der Anodisierungstyp II entspricht einer Anodisierung mit der Schwefelsäure und der Type III entspricht einer Hartanodisierung. Die Wahl eines Verfahrens ist von der endgültigen Verwendung des Teiles oder von seiner Konstruktion abhängig. Das Ergebnis ist eine extrem harte und korrosions- sowie verschleißfeste anodische Oxidationsschicht.

Nach der derzeitigen Studie scheint das Diamondzyze TM-Verfahren noch nicht patentiert zu sein. Einer der wesentlichen Unterschieden zur konventionellen Anodisierung liegt im komplexen und nicht völlig verstandenen chemischen Vorgang, der in Stufe 2 stattfindet. Sicher ist, dass die Keramikeilchen im Additiv die anodischen Aluminiumoxidporen imprägnieren. Das Additiv dient dazu, die Aluminiumoxidporen zusammenzuziehen, metallisches Aluminium zu oxidieren, das im elektrochemischen Prozess zuvor nicht oxidiert wurde und die poröse Struktur größtenteils auszufüllen. Das ist ein Grund, weshalb ein abschließendes Versiegeln weniger wichtig ist, als beim konventionellen Anodisieren.



**Abbildung 32: Metallographischer Querschnitt der anodisierten Diamondzyze- Type II- Beschichtung auf einen Aluminiumkolben, [69], (S.467).**

Zahlreiche Al-Legierungen und sogar kommerziell häufige Typen, wie 2024 und 6061 lassen sich mit dem neuen Verfahren behandeln. Dabei kann Typ II und Typ III-Anodisieren angewandt werden. Anodisierte Oberflächen des neuen Verfahrens weisen eine weitaus geringe Rauigkeit auf, als beim konventionellen Anodisieren. So ist die Oberflächenrauigkeit geringer als beim ursprünglichen, nicht anodisierten Aluminiumsubstrat, Abbildung 33.

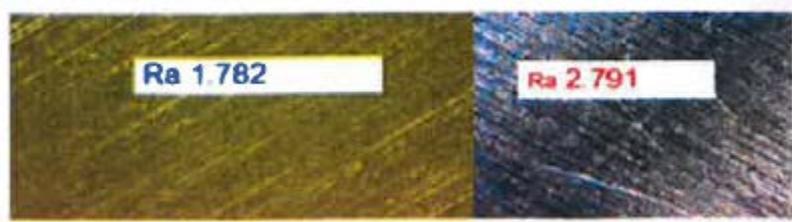


Abbildung 33: Oberflächenrauheitsreduktion nach der Diamondzye-Verfahren [69], (S.468).

Das neue Verfahren wurde beim Motorkolben eines 5-Liter-Automotors probeweise angewendet. Wegen der verringerten Reibungsverluste wurde ein Anstieg von 6% bei Leistung und Drehmoment gemessen und ebenfalls eine Brennstoffeinsparung erzielt.

Tests zeigen, dass die nach der neuen Anodisierungsmethode behandelten Teile eine gute Korrosionsbeständigkeit und Verschleißfestigkeit haben. Erfolge wurden auch beim Verkleben von Trockenschmiermitteln und Wärmedämmschichten auf so behandelten Oberflächen erzielt (die zur Optimierung der Motorleistung erforderlich sind). Auch harzbasierte Klarlacke wurden können auf die anodisierten Flächen aufgetragen werden [69], (S.472).

### **3.10.3 Automatisierte Anodisierungssysteme**

Moderne Systeme bei Anlagen sind in der Lage Eloxale vollautomatisch zu produzieren. Im Einsatz sind solche Anlagen zur Produktion von Aluminiumformteilen für Autos. Ein solches, voll automatisches System wird von einer Gesellschaft die ihren Sitz im Hafen von Huron, Michigan hat, dokumentiert [70], (S.20). Ein „H-förmiger“ Entwurf mit Ladung und Entladung an derselben Position, ist das Grundkonzept.

Die anodisierende Tankfolge (Bäderfolge) ist wie folgt beschrieben:

1, Alkalisches Bad - 2, Saures Bad - 3 brite dip - 4, Durchsickern - 5, Anodisieren - 6, Vorversiegelung und 7, Versiegelung mit Spülungen zwischen den Prozessen.

Jede Hebevorrichtung hat ihre eigene Kontrolltafel mit 3 Sicherungen und einem 460 bis 110V Kontrolltransformator. Redundante sicherheitstechnische sind vorhanden Dazu gehört ein Ventilationssystem, wobei alle geheizten und Dampf generierenden Bäder belüftbar sind [70] (S.21). Mit den beschriebenen Bädern und Spülbädern, Kontrolltafeln, Ventilationssystemen, usw. wird in der Fa. Walgren Co eine vollautomatisierte Anodisierung von Teilen für die Autoproduktion durchgeführt.

Aluminiumwerkstücke werden vermehrt in der Automationsindustrie gebraucht. Diese Teile müssen nicht nur verschleiß- oder korrosionsbeständig sein und chemische Reaktionen ohne größeren Schaden aushalten [71], (S.418).

## **4. Eloxal-Anwendungen in verschiedenen Branchen**

### **4.1 Praktische Anwendungsbeispiele für harteloxierte Bauteile**

Hartanodisation ist eines der wichtigsten Metall-Veredelungsverfahren. Die Vorteile von Harteloxal werden in den Branchen Dekoration und Architektur sichtbar. Bei richtiger Anwendung ist mit ausgezeichneter Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und elektrischer Isolierung zu rechnen [55], (S.12).

Harteloxierte Bauteile, wie Zahnräder, Kolben, Zylinder, Düsen, Zylinderbüchsen, hydraulische Bauteile, Rollen, Gleitschienen finden Anwendung im Automobil-, Schienenfahrzeug- oder im allgemeinen Maschinenbau [72]. Ohne die Einsatzgebiete (Maschinen- u. Anlagenbau, Luft- u. Raumfahrttechnik, Schienenfahrzeug, Automobil-, Schiffbau) zu unterscheiden, sind weitere Anwendungsbeispiele für harteloxierte Bauteile aufgezählt [40], (S.714-720):

- Ventilschieber, Steuergehäuse, Zylinder für pneumatische und hydraulische Geräte
- Fadenführer, Umlenkrollen, Walzen bei Textilmaschinen
- Rollen, Kupplungsscheiben, Bremsscheiben z. B. für EDV-Anlagen
- Zahnräder, Zylinder, Kolbenstangen, Spindeln, Gleitschienen, Nocken, Lager usw. für den Motorenbau
- Flügelteile einer Rakete (Schichtdicke: 180 µm)
- Ventilspindel und Steuerbuchse
- Kegelscheiben für Verstellgetriebe
- Bundbuchse
- Beschlagteile für Segelboote und Yachten
- Aufschraubteile für Tankverschluss und Zylinderbuchse
- Bremssattelhälfte
- Offset- Druckzylinder
- Lüfterrad und Steuergehäuse, weitere in [40], (S.714-720).

### **4.2 Praktische Anwendungsbeispiele für eloxierte Bauteile**

Einige Branchen sind Architektur, Medizin, Haushalt, Maschinen- und Anlagenbau, Luft- und Raumfahrttechnik, Schienenfahrzeug, Automobil-, Schiffbau. Einige Anwendungsbeispiele für eloxierte Aluminiumteile (manche Bauteile oder Komponenten sind eloxiert) werden hier wiedergegeben:

#### **4.2.1 Automobilbau**

Seit Jahren sind Al-Legierungen unverzichtbare Werkstoffe für die Automobilindustrie geworden. So wird es auch in diesem Bereich angewendet, um die Korrosions-, Verschleiß- oder Abriebfestigkeit der Teile zu verbessern - die dort eingesetzten Teile eloxiert bzw. harteloxiert. Aluminium ersetzt wegen seines geringeren Gewichts und seiner einfachen Verar-

beitung, zunehmendem Maße (im Verkehrsbereich allgemein) eisenbasierte Werkstoffe, wie Stahl. Die Tatsache, dass das Gewicht eines Autos durch die Verwendung von Al-Legierungen reduziert wird, führt zu umweltfreundlicheren Werten. Aus Abbildung 34 kann man entnehmen, dass z.B. im Jahr 2000 ca. 41% der verwendeten Al-Legierungen im Bereich Verkehr verwendet wurden. Um die Korrosion oder den Verschleiß der Teile zu verringern wird ein hoher Anteil eloxiert bzw. harteloxiert. Auch Dekor-Eloxal wird in der Automobilindustrie verwendet.

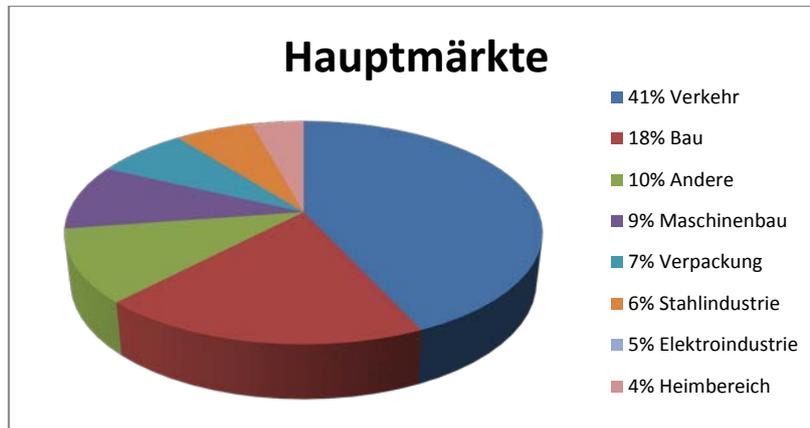


Abbildung 34: Hauptmerkmale für Al- Produkte (Beispiel Deutschland) [73], (S.24).

In Abbildung 34 ist zu sehen, dass der Verbrauch an Aluminium im Verkehrswesen mit 41% relativ hoch ist. Dadurch, dass heute viele Teile wie die Karosserie eines Fahrzeuges aus Aluminium bzw. eloxiertem Aluminium bestehen, bringt dies eine Gewichtsabnahme und damit eine Verbrauchsminderung (Energie) des Fahrzeuges.

Die Oberflächenveredlung des Aluminiums durch Eloxal / Harteloxal macht die Anwendung von Aluminium anstelle von Stahl im Automobilbereich mehr und mehr möglich. Auch die geringere Dichte vom Aluminium, günstige Festigkeitseigenschaften, eine gute Umformbarkeit sowie eine gute chemische, Witterungs- und Seewasserbeständigkeit, machen die Verwendung von eloxiertem Aluminium immer beliebter.

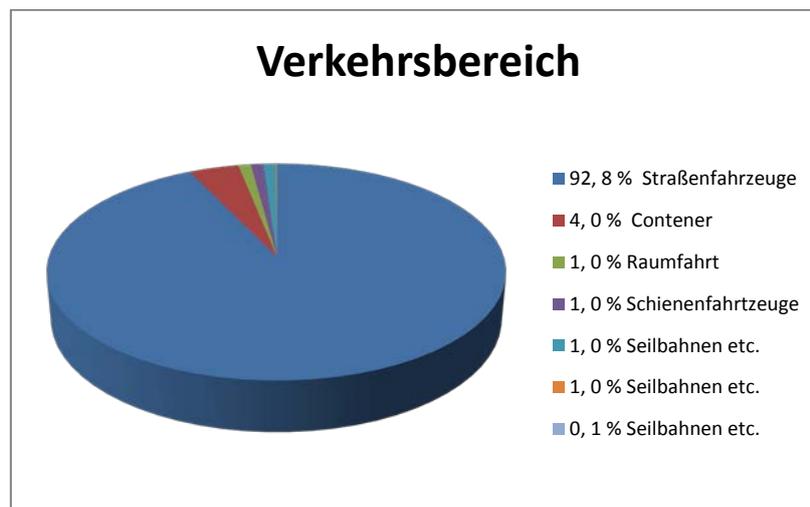


Abbildung 35: Aluminiumverteilung im Verkehrsbereich [74], (S.25).

Abbildung 35 gibt den Anteil der Straßenfahrzeuge von den oben zitierten 41% im Verkehrsbereich mit 92,8% an. Da die Automobilbranche, die wichtigste im Verkehrssektor ist, ist der Absatz vom Aluminium bzw. eloxiertem Aluminium in diesem Bereich groß. Ausserdem verspricht die Anwendung von Aluminium bzw. eloxiertem Aluminium mit neuen Technologien im Gebiet der Anodisierung, eine steige Tendenz.

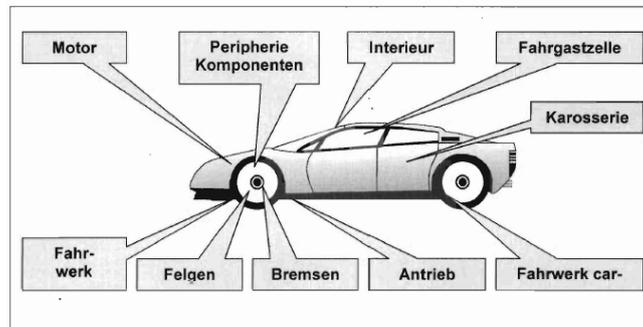


Abbildung 36: Bereiche, in denen Aluminium Stahlwerkstoffe ersetzen kann [74], (S.26)

In den Motor-, Interieur-, Karosserie-, oder Fahrwerksbereichen der Fahrzeuge (Abbildung 36), kommen immer mehr eloxierte Aluminium- und Legierungswerkstoffe anstelle von Stahl zum Einsatz. Dies lässt eine positive Entwicklung des Eloxalmarktes im Automobilbereich erwarten.

#### 4.2.1.1 Hartanodisierung von Bohrungen

Hartanodisierung der internen Bohrungen in Aluminium werden nicht mit der konventionellen Methode der Anodisierung durchgeführt. Dazu wird eine besondere Art von Jip hergestellt, um die Ringe zu halten, die von den anderen und der Elektrolyt durch die interne Bohrung ohne Versickerung des Elektrolyten durchfließen wird. Der Einfluss der Parameter, wie Temperatur, Stromdichte, Strömungsgeschwindigkeit auf die Eigenschaften (wie Härte, Dicke) wurden mit verschiedenen Elektrolyt-Systemen studiert.

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Hartanodisierungsverfahren entwickelt. Dabei lässt man eine dickere Eloxalschicht auf Al-Legierungen wachsen. Beim Eloxieren bzw. Harteloxieren besonders von komplizierten Teilen (Formen) ist es wichtig, für eine ausreichende Bewegung des Elektrolyten über die gesamte Oberfläche zu sorgen, um eine Überhitzung oder eine lokale Verbrennung der Oberfläche zu vermeiden [75], (S.277). Es wird berichtet, dass für eine Bohrung von 25 mm Durchmesser (Rohr), die hartanodisiert wird, ein relativer Elektrolytfluss zur Anodenoberfläche mit einer Geschwindigkeit von 3 bis 21 m/min - für jede 0.3 m Länge des Rohres erfolgen muss. Als eine der wichtigen Erkenntnisse dieser Studie, zeigt sich, dass beim Anodisieren oder Hartanodisieren von Teilen und besonders Teilen mit Bohrungen (wie Zylinder mit Bohrungen) das Zirkulieren von anodisierendem Elektrolyten mit einer bestimmten Geschwindigkeit sehr wichtig für ein erfolgreiches Eloxalverfahren ist. Die Teile müssen dabei so montiert sein, dass die versteckten, inneren Oberflächen, wie die Bohrungen durch den Elektrolytfluss gut erreichbar sind.

Anwendungsbeispiele: Außen- und Innenbereich, Räder [76]. Weitere Beispiele für die Verwendung von eloxierten Bauteilen in der Automobilbranche sind Kolben, Zylinder, Bremszylinder, Ventile, Hydraulik, Motorblöcke, Halterungen und Klemmen u.a.m. [77].

Die Verteilung der Verwendung von Aluminium in Deutschland und in der Welt nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2011, ist in Tabelle 19 dargestellt [78].

Deutschland:		Welt:	
Verkehr	43%	Bauwesen	24%
Bauwesen	14%	Transport	24%
Verpackung	12%	Elektrotechnik	12%
Maschinenbau	9%	Maschinen- und Anlagenbau	10%
Elektrotechnik	9%	Verpackung	9%
Eisen- und Stahlindustrie	6%	Folien	9%
Haushaltswaren	3%	Gebrauchsgüter	6%
Sonstige		Anderen	6%

**Tabelle 19: Verteilung der Verwendung von Aluminium in Deutschland und in der Welt nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2011 [78].**

Aus dieser Verteilung sind Werte für Verkehr oder Transport von 43% bzw. 24% zu entnehmen. In der Luftfahrt-, Schiff-, Autoindustrie oder auch der Maschinen- und Anlagenbau werden Al-Legierungen häufig verwendet. Aber besonders durch technische Verfahren wurde dem Werkstoff Aluminium zu seinem Siegeszug in der Industrie verholfen [54], (S.3). Die anodische Oxidation oder Eloxieren dient dazu die Eigenschaften des Aluminiums in großem Maße zu variieren. Die chemische Oberflächenbehandlung, das Eloxal-Verfahren und das Beschichten von Aluminium sind einige der Verfahren, um die Eigenschaft von Aluminium in der Oberflächentechnik optimal auszunutzen [54], (S.3).

Einige typische Vertreter der verwendeten Al-Legierungen in der Automobilbranche sind die Al-Gusslegierungen, wie in Tabelle 20 angeführt. Zirka 50 % dieser Legierungen werden für Motorblöcke und andere Teile im Automobilbau eingesetzt [1], (S.382).

Reihe	Legierungselemente	Beispiele	Anwendung
	> 99 % Al	Al	
41xxx	Si Mg, Ti		
42xxx	7 % Si Mg	AlSi7Mg	Motorgehäuse, Getriebedeckel, Felgen
43xxx	10 % Si Mg	AlSi10Mg	Motoren-, Maschinenbau
44xxx	Si	AlSi	komplizierte, dünnwandige Gussteile
45xxx	5 % Si Cu	AlSi5Cu	Motorblock
46xxx	9 % Si Cu	AlSi9Cu	Gehäuse für Motoren, Getriebe
47xxx	Si Cu	AlSiCu	Zylinderköpfe
48xxx	Si Cu, Ni, Mg	AlSiCuMgNi	Kolben für Verbrennungsmotoren

**Tabelle 20: Einteilung und Anwendung von Al- Gusslegierungen mit Silizium als Hauptlegierungselement nach DIN EN 1706 im Automobilbereich [56] [1], (S.382).**

Ein Überblick über mögliche Arten von Beanspruchungen und die dazu passenden Oxidschichtdicken gibt Tabelle 21 wieder. D.h. für eine normale Beanspruchung etwa im inneren Bereich des Bauteiles, sollte die Schichtdicke 5 µm betragen. Diese Oxidschichtdicke würde

für den Möbeloberflächenschutz schon ausreichen. Für starke Beanspruchungen im Außenbereich des Teiles, wie eben Automobilbau, sollte die Oxidschicht 15 bzw. 20 µm betragen.

Mögliche Beanspruchung	Beispielteile	Dicke der Oxidschicht
Normale Beanspruchung im Innenbereich	Beschläge, Zierelemente/Möbel	5 µm
Normale Beanspruchung im Innen- und Außenbereich	Beschläge, Reflektoren, Zierleisten an Fahrzeugen	10 µm
Starke Beanspruchung im Innenbereich	Türgriffe, Beschläge von Fenster und Türen	15 µm
Starke Beanspruchung im Außenbereich	Leichtbauteile, Ventile, Motorenteile, Schiffsbau, Modellbau, Sondermaschinenteile	20 µm
Extreme Beanspruchung im Außenbereich	Zugteile, Schiffsbau, Gehäuseteile	25 µm

**Tabelle 21: Einteilung der Eloxalschichtdicke je nach Beanspruchung [30].**

Hauptanwendungen von Eloxal im Automobilbau sind: Alufelgen, Cockpitkomponenten, Airbag-Komponenten, Innenausstattung (dekorative Anforderung), Motor-Al-Teile, Gaspedal, Endschalldämpfer, Riffelblech, Motorschutz, Al-Ventilkappen in Kolbenform, Porsche 911 G Zierleiste, Lenkerendspiegel, BenzinfILTER, Mutter Radachse, Design Carport, Motorritzel Set, Ständeraufnahme M 10, Ladekantenschutz für Hyundai i130, Kofferraum Ladefläche, Kennzeichenunterlagen, Tunnelverkleidung aus Aluminium, Felgenventile, u.a.m.

Ein diesbezügliches Entwicklungs-Highlight ist die Karosserie des Aston Martin, die vollkommen eloxiert und gefärbt ist (statt der KTL Beschichtung, wie sonst im Karosseriebau üblich).



**Abbildung 37: Karosserie: Aston Martin Rapide (Agent 007) / Quelle: Shape, 2011**

Eloxal findet auch im Fahrrad- und Motorradbau zunehmend Anwendung, wie etwa für Ventilkappen, Fahrrad- Kurbel & Kettenrad, verschiedenen Schrauben, Antriebsstrang, Moun-

tainbike-Rahmen, Pedale, Schaltwerke, Led Lenkerendkappen, Schaltröllchen und Kettenräder, Schwingenverlängerung sowie Alufelgen.



**Abbildung 38: Eloxierter Kettenblätter für Mountainbikes - verschleißfester und gleitfähiger gemacht**

Weiters werden Prozess-Schmieröltankverschlussklappe, Auspuffanlagen- Enddämpfer, Reely Stoppmutter, Ducati 899 1199 Panigale Tankverschluss, Schrauben, Unterboden Abdeckung ODF, Achsenblöcke für verschiedenen Modelle sowie Brakebooster- Bremskraftverstärker in Motorrädern verbaut.

Teile aus EN AW-ALMg0,7Si (EN AW 6063 T4) finden z. B. Anwendung im Fahrzeugbau [27], (S.19). Karossen, Motoren, Leichtfelgen (Alufelgen) sind Anwendungsbeispiele für Al in dieser Branche.

#### **4.2.2 Maschinen- und Anlagenbau / zivile Anwendungen**

Eloxierter und harteloxierter Teile finden oft Anwendung im Maschinen- und Anlagenbau. Dabei geht es um technisches Eloxal, hier werden hauptsächlich die Korrosions-, Verschleiß- oder die Abriebfestigkeit der Teile und Komponenten verlangt. Folgende hartanodisierte Teile werden üblicherweise für diesen Bereich verwendet: Steuerbuchsen und Gehäuse von pneumatischen Steuerungssysteme, Hydraulikrohre, Zahnriemenscheiben oder Ventilspindeln. Ferner noch sind Bauteile wie Lüfterräder, Pumpengehäuse oder Kugelventile oft hartanodisiert [79], (S.148). Auch Frontplatten, für die Anwendung in Maschinen- und Anlagenbau werden eloxiert um deren Langlebigkeit und Kratzfestigkeit sowie ihre beständige Farbgebung zu erhalten [80].

Teile aus Al-Blechen wie Namens-, Gravur-, Druckschilder, Lasergravuren, Profilen usw. werden anodisiert bzw. hartanodisiert. Computergehäuse, MP3-Teile, sowie Smartphone-Teile sind noch weitere Anwendungsmöglichkeiten.

Anwendung findet Aluminium auch im Bereich der elektrotechnischen Konstruktionen. So sind etwa viele Teile der „Moviecam“ oder auch der „Arricam“ (Kamera für die Filmbranche) präzisions- oder harteloxiert, [81] - Abbildung 39.



**Abbildung 39: Moviecam, [81].**

### 4.2.3 Haushalt und allgemeine Verwendung

Haushaltsgeräte:

- Kochgeschirr, Tischleuchte, Heitronic LED Einbaustrahler
- Aluminium, Stehleuchte, Wall System CD- Träger, Heitronuc Alpha LED
- Außenwandleuchte, Mini Box Spiegelschrank, Klemmschienen, Esstisch, Möbelknopf,
- Abfallbox, Ablagekästen für Büros ( Tische ), Aluminium Camping- Teller Plate, usw.

Allgemeine Verwendung:

- Lüftungsgitter, Typenschild, Schmuckkette, Möbelgriff, edles Armband, Griffleiste,
- Renngitter, Möbelfuß, Kugelschreiber Edelstahl- Aluminium, Unterlegscheibe, Aluminium
- Steigbügel, Strukturblech, Fahnschilder, Übergangsprofil, beschriftbare Etiketten,
- Selbstklemmend z. B. H- Profil Aluminium, Y44 Kettenhaube, Ringe vernietet Aluminium,
- Schlüsselanhänger, Zahlenmarke, Wetterstation, Leserbeschriftung, Tropfblech
- Messer Remix Aluminium, Aluminium Draht, Vorhängeschlösser Aluminium, Endklappe
- für Profile IL / Abdeckung U- Förmig, Fahnenmast, Radstern Hinterachse Aluminium A50,
- Hammerbuch Spiralbuch Aluminium, Schilderhalter, HiTeMP42 Bremsleitungsbefestigung
- C-Clip, Einkaufswagenchip aus Aluminium, LED Aluminium Kühlkörper, fortlaufendnummeriert als Werkzeugmarken,
- A4 Schreibplatte, Lümmelbeschlag Aluminium, usw.

	Reihe	Legierungselemente	Gruppen	Anwendung
naturhart	1xxx	> 99 % Al	Al	Folien, Verpackung, Elektronik
	3xxx	Mn Mg, Cu	AlMn	Rohre, Behälter, Wärmetauscher
	4xxx	Si Mg, Bi, Fe, CuNi	AlSi	Schmiedekolben, Schweißzusatz
	5xxx	Mg Mn, Cr, Zr	AlMg(Mn)	Karosserieformteile, Druckbehälter
	8xxx	Fe, FeSi, FeSiCu	Sonderleg.	
aushärtbar	2xxx	Cu Mg, Mn, Bi, Pb, Si	AlCuMg	Schrauben, Spritzgussformen, Zahnräder
	6xxx	MgSi Mn, Cu, Pb	AlMgSi	Profile, Rohre, Fahrzeugschmiedeteile
	7xxx	Zn Mg, Cu, Ag, Zr	AlZnMg(Cu)	Fahrzeughau (Lenkungs-/Bremsteile)

**Tabelle 22: Einteilung der Aluminium- Knetlegierungen entsprechend der Legierungsreihen nach DIN EN 573 [55] gekennzeichnet mit der Angabe EN AW [1], (S.382).**

Die Festigkeit oder Dichte von Aluminium und Aluminiumlegierungen sind physikalische und technologische Eigenschaften die Al-Legierungen für viele Anwendungen prädestinieren. Knetlegierungen finden vielfältige Anwendungen – siehe Tabelle 22.

Konservendosen, Tetrapacks, Aluminiumfolie sind typischen Vertreter im Bereich Verpackungsindustrie. In der Haushaltsbranche werden Küchengeräte, Kochtöpfe, Bestecke oder Pfannen meistens auch aus Aluminium hergestellt.

#### 4.2.4 Architektur

Wandleuchte, Gewächshaus, Aluminium- Scharnier, Etagenwegweiser, Lineargitter, Firmenschild, Deckenhänger, Aluminium- Fensterbank, Schutzrosette eckig für Türe, Bodenleuchte, Aluminium- Rahmenfenster, Pendelleuchte, Zuleitung für Wandlautsprecher, Kugel-Türknoopf gekröpft, Türdrücker Natasa- R,

- Hygienebox, Schichtschutzgitter, Treppenwinkelprofil Aluminium,
- Kabelkanal,
- Haustürknauf aus Aluminium, usw.

Aluminium und– Legierungen lassen sich in 9 Gruppen einteilen [27]:

Aluminiumlegierungen unterteilt nach den Hauptlegierungselementen	
Aluminium, mindestens 99% und höher	1xxx ( Serie 1000 )
Kupfer	2xxx ( Serie 2000 )
Mangan	3xxx ( Serie 3000 )
Silicium	4xxx ( Serie 4000 )
Magnesium	5xxx ( Serie 5000 )
Magnesium und Silicium	6xxx ( Serie 6000 )
Zink	7xxx ( Serie 7000 )
Sonstige Elemente	8xxx ( Serie 8000 )
Nicht verwendete Serie	9xxx ( Serie 9000 )

**Tabelle 23: Einteilung von Aluminium und –Legierungen in 9 Gruppen [27].**

Einige Al- und Legierungen z. B. der Klassen 2024 (Serie 2000) und 7075 (Serie 7000)

Legierung	EN-AW	DIN	Name	Eignung
AlMgSi0,5	6060	3,3206	Extrudal-050	Sehr gut
AlMgSi1	6082	3,2315	Anticorodal 100/112	Sehr gut
AlMg3	5754	3,3535	Peraluman-300	Sehr gut
AlMg1	5005A	3,3315	Peraluman-100	Sehr gut
AlMg4,5Mn	5083	3,3547	Peraluman-460 Alplan	Sehr gut
Al99,5		3,0355		Sehr gut
AlZn5,5MgCu (AlZnMgCu1,5)	7075	3,4365	Perunal-215	Gut
AlZnMgCu0,5		3,4345	Alumec-79	Gut
AlZn4,5Mg1 (AlZnMG1)	7020	3,4335	Unidur-102	Gut
AlMgSiPb	6012	3,0615	Anticorodal PB109	Weniger geeignet
AlCuMG1		3,1325		Weniger geeignet
AlCuMg2	2024	3,1355	Avional	Weniger geeignet
AlCu4PbMgMn (AlCuMgPb)	2007	3,1645		Ungeeignet
AlCuBiPb	2011	3,1655	Decoltal-500	Ungeeignet
AlMg1SiCu	6061	3,3211	Anticorodal 80	Ungeeignet
AlMgPbCuSi1				Ungeeignet

Tabelle 24: Auszug- Legierungsübersicht für Hart- Eloxal, [44].

Erzielbare Schichtdicken bis ca. 100 µm werden vorwiegend in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet.

Die Abbildung 24 zeigt verschiedene Aluminiumlegierungen und ihre Eignung für die Harteloxal. Sie sind von „sehr gut,“ eloxierbar bis „ungeeignet,“ gekennzeichnet.

Folgende Schichteigenschaften zeichnen das Harteloxal- Verfahren aus [82]:

Sehr hohe Schichtdicke bis ca. 100  $\mu\text{m}$ .

Sehr hohe Oberflächenhärte / Sehr hohe Verschleißfestigkeit / Sehr gute Abriebfestigkeit / Höchster Korrosionsschutz / Sehr gute Gleiteigenschaften / Hohe Isolationseigenschaften bis 30 V/ $\mu\text{m}$  / Materialeigenfärbung / Hohe thermische Beständigkeit / Physiologisch unbedenklich, für Lebensmittel geeignet / Geringe Wärmeleitfähigkeit, wesentlich geringer als das Grundmaterial.

#### **4.2.5 Aluminiumanwendung in der Luft- und Raumfahrt**

Aluminium und –Legierungen finden oft Anwendung in Luft- und Raumfahrttechnik. Um dies zu belegen, kann man folgendes Zitat als Beispiel in Betracht ziehen, dass der Airbus A320-200 z.Zeit zu ca. 60 % aus Aluminiumlegierungen gebaut wird, [61], (S.1728). Die Gewichtseinsparung bei den Teilen aus Stahl und die dabei mindestens bleibenden Qualität der Bauteile sind für die Forscher einige der treibenden Kräfte für die Benutzung von Aluminium- und Legierungen in diesem Bereich der Industrie.

In der Tat besteht heute ca. 80% eines typischen Transporters / Cargo (Lufttransporters) aus Aluminiumlegierungen, da sie eine hohe spezifische Festigkeit (Zugfestigkeit / Dichteverhältnis) haben. Im Design der neuen Flugzeuge, wird der Schwerpunkt auf die mechanische Lebensdauer gesetzt, für die einen Zeitraum von ca. 20 Jahren vorgesehen ist, [83], (S. 06496/2). Die hochfesten verwendeten AL- Legierungen im Flugzeugbau sind anfällig für Spannungskorrosion (SCC) in Chlorid enthaltender Umgebungen. Viele Strategien wurden angenommen, um z.B. den Werkstoff 7075- T6 vor Korrosion zu schützen, den anodischen oder kathodischen Schutz können den elektrochemischen Prozess wie die Spannungskorrosion in aggressive Umgebung entgegensteuern, [83], (S. 06496/2).

Das Eloxieren bzw. Anodisieren oder Harteloxieren der Aluminiumteile wird heute also vielfältig z. B. in der Luft- und Raumfahrtindustrie angewendet. Je leichter das Transportmittel wird, z. B. Flugzeuge, Automobile, Schienenfahrzeuge oder Schiffe, desto geringer wird entsprechend beispielsweise der Kraftstoffverbrauch und dabei steigt die Kapazität der Maschine. Nur durch das Ersetzen von Stahl durch Aluminium- und Legierung muss man darauf achten, dass die üblichen Eigenschaften der Maschine nicht negativ beeinflusst werden. In dieser Hinsicht wird für die Luft und Raumfahrtindustrie geforscht, mit dem Ziel den Aluminiumwerkstoff in diesem Gebiet zu verbreiten und damit ebenfalls auch die Verwendung vom Eloxalverfahren. So waren manche Teile der Raumstation „MIR“, beispielweise eloxierte Bauteile und sogar von Österreichern entwickelt (etwa Fitnessgeräte), gebaut und veredelt (eloxiert) worden, [84]. Das Eloxal- oder Anodisierungsverfahren ist in der Luft- und Raumfahrttechnik weit verbreitet. Die in diesem Bereich oft aus Aluminium gefertigten Teile z.B. aus Gewichtseinsparungsgründen werden nach der Entwicklung und Konstruktion, anodisch behandelt, um die Oberflächen der Teile zu schützen oder einfach zur Dekoration. Korrosionsbeständigkeit, Verschleiß- oder Abriebfestigkeit der Bauteile kann somit erhöht werden, und parallel dazu ebenfalls ihre Lebensdauer verlängert werden. Das Aussehen der Teile kann ebenso auch in solchen Fällen für Flugzeugteile usw. durch das dekorative Eloxierverfahren verbessert werden.

Neben Aluminium werden auch Titan-Legierungen (Leichtmetall) in der Flugzeugindustrie (Triebwerke, Verkleidungen, Innenausbau usw.), wo es auf die Masse ankommt, verwendet. Sie sind die meist benutzten Metalle in diesem Gebiet [85].

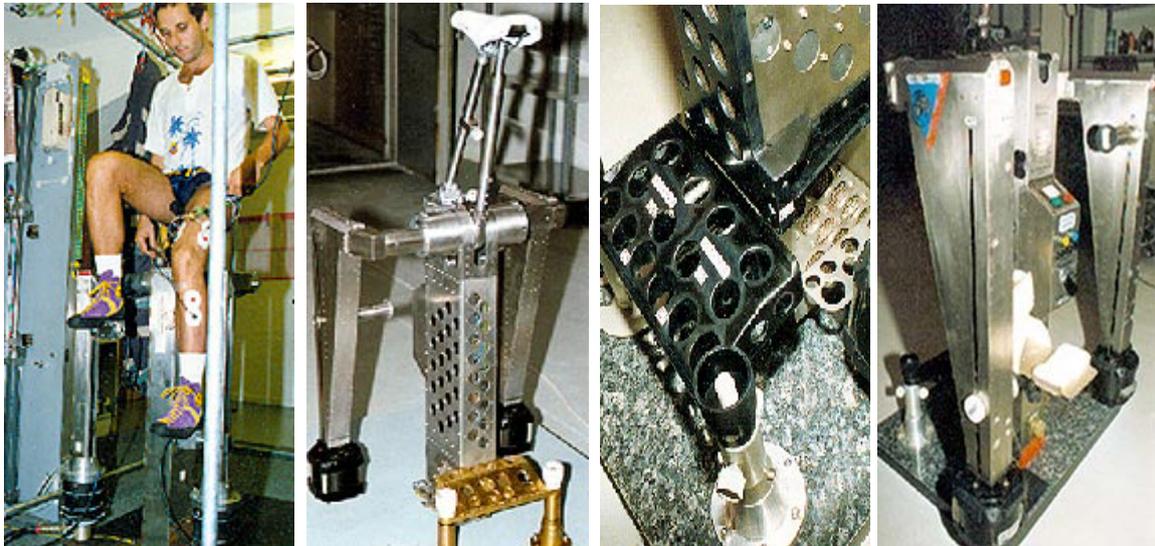


Abbildung 40 a, b, c, d: Eloxierete Teile der Raumstation ‚MIR‘ [84].

Der Wunsch, die Herstellungskosten im Bereich Luft- und Raumfahrttechnik kontinuierlich zu reduzieren und die Entwicklung leichter Designs sind also die Grundlage für ein verstärktes Interesse an der Verwendung von Aluminium auch in Fluidtechnik-Systemen von Flugzeugen. Für Anwendungen bei denen Relativbewegungen auftreten, wird eine spezielle Beschichtung mit hoher Verschleißfestigkeit erfordert. Verschiedene Techniken, die in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendet wurden, werden in der Folge angeführt. Die verwendete Beschichtungsart ist neben dem Harteloxal auch das Plasmaflammsprühen. Es wird jede Oberfläche in Bezug auf die spezifischen Design-Kriterien beschrieben, die Verarbeitung, die Anwendungen, Grenzen und Service-Erfahrung [86], (S. 279).

In den 1960er Jahren hat BOING vorgeschlagen, Hydraulikzylinder aus Aluminium zu schmieden, da dessen Eigenschaften in dieser Art von Anwendung noch unbekannt waren, wurden Tests durchgeführt, um die Leistungen zwischen Stahl sowie stromlos vernickelte und verchromte Oberflächen vergleichen zu können. Harteloxieren wurde nicht in Betracht gezogen wegen dessen bekannter nachteiliger Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit. Ein paar Jahre später wurde entdeckt, dass die Dauerfestigkeitsverminderung durch Harteloxieren bedingt durch Kugelstrahlen wiederhergestellt werden könne. Weitere Beobachtungen zeigten, dass bei den nächsten Generationen von Luft- Druckbehälter harteloxiertes Aluminium oder Stahl benutzt werden kann, z.B. wegen derer guten Verschleißfestigkeit. Harteloxiertes Aluminium bietet einen Gewichtsvorteil kombiniert in diesem Fall mit der guten Verschleißfestigkeit im Inneren des Zylinders (gleitfähige und harte Innenoberfläche des Zylinders) [86], (S.284).

#### 4.2.5.1 Geschichte des Eloxal in der Luft- und Raumfahrt

Als Werkstoff spielt Aluminium seit dem Anfang dieses Jahrhunderts eine wichtige Rolle in der Flugzeugindustrie, mit Einsatz in Propeller-Schaufeln, Sitzen, Verkleidungen, Gusslaschen und ähnlichen Teilen. Die Luft- und Raumfahrt-Produkte wurden über viele Jahre einer der wichtigsten Märkte für Aluminiumendverbraucher. Sie werden für die innere Ausrüstung wie Deckenbalken, Sitzschienen, Sitzrahmen, Cockpit-Fensterrahmen, Beschlägen oder Stützkonstruktionen usw. verwendet. Zu den oft in diesem Bereich verwendeten Teilen aus Aluminium gehört ein komplettes Sortiment von extrudierten (Profile, Formen, Stangen, Rohre) und gezogenen Rohren (rund, quadratisch, rechteckig) und gewalzten Produkten mit hohen Eigenschaften und Leistungen. Ein Flugzeug wie der A-380 besteht bis zu 60% aus Aluminium (Typ: A 320-200 auch bis zu ca. 60% aus Aluminium, [61], (S. 1728)), 10% Titan usw. während bei dem neuen Boeing-Dreamliner, der Rumpf aus 50% Verbundwerkstoffen und nur 20% Aluminium besteht. Dieser Unterschied ist dadurch zu begründen, dass sich die Fertigungstechnologie in der letzten Zeit im Bereich Verbundwerkstoffen deutlich verbessert hat und somit die Teile preiswerter geworden sind.

Die Luft- und Raumfahrt stellt also höhere Anforderungen an die in diesem Bereich verwendeten Werkstoffe. In Betracht zu ziehen sind hier eher die Oberflächen der verwendeten Teile. Chemische Umwandlungen bzw. Beschichtungen spielen eine wichtige Rolle als eine Beschichtung allein oder tragen besser zu seiner Hafteigenschaften bei [87], (S. 20).

Die Oxidschichten, die durch verschiedenen Anodisier- bzw. Eloxierverfahren entstehen, sind mechanisch besser, korrosionsbeständiger und auch abriebfester als chemische Konversionsschichten. Um die Oxidschicht bei den verschiedenen Anodisierverfahren zu bilden, lässt man den elektrischen Strom durch einen Elektrolyten fließen, in dem das Werkstück (z. B. Aluminium) an der Anode hängt, daher der Name „Anodisieren“. Dabei werden die Struktur und Eigenschaften der gebildeten Oxidschicht von der Zusammensetzung des Elektrolyten, von der erzeugten Reaktion und Betriebsparameter (Badtemperatur, Spannung, Stromdichte usw.) bestimmt. Es existieren verschiedene Anodisierverfahren, die in der Luft- und Raumfahrtindustrie angewendet werden.

Viele Elektrolyten wurden im letzten Jahrhundert getestet und patentiert aber wenige von denen finden Verwendung in industriellen Prozessen. Laut der „Eloxal-Bibel“ von Wernik, Pinner und Sheasby „Behandlung und Veredlung von Aluminium und seine Legierungen“, werden hauptsächlich Chrom-, Schwefel- oder Oxalsäure verwendet [88]. Im Bereich Luft- und Raumfahrtindustrie werden auch noch andere Säuren, wie Phosphorsäure für die Verwendung als Elektrolyten für die Anodisierung bzw. Eloxierung verwendet. Auch eine Mischung von mehreren Säuren ist heutzutage keine Seltenheit mehr, [87], (S. 20).

Chromsäure-Eloxieren (engl. Chromic Acid Anodizing, Abk.: CAA), wurde 1923 von Bengough und Stewart patentiert, und wird vor allem für die kritischen Strukturen mit allen Arten von Fugenelementen verwendet. Die Korrosionsbeständigkeit dieser Art von Anodisieren bzw. Eloxieren ist ausgezeichnet. Die gebildete Oxidschicht ist weicher und weniger porös als die von den anderen Prozessen. Der Grundmaterialverlust ist dabei ziemlich gering. Die Oxidschicht kann leicht beschädigt werden und die Farbe ist hellgrau und undurchsichtig. Je nach der Art des Sealings (Verdichtung) kann die gewonnene Farbe schließlich auch z. B. grünlich sein, [87], (S. 20).

Zwei Typen von Eloxier- bzw. Anodisierverfahren werden in der militärischen Spezifikation MIL- A- 8625F zitiert: Typ I und Typ IB; während der Erste für herkömmlichen Beschichtungen mit einer Spannung bis zu 40 Volt verwendet wird, wird der Typ IB für Behandlungen mit Spannungen von 20- 22 Volt benutzt.

Schwefelsäure- Eloxieren (Eng.: Sulfuric Acid Anodizing, Abk.: SAA), wurde 1927 patentiert. Schwefelsäure- Eloxieren kann in zwei wichtigen Varianten oder in Typ II und Typ III unterteilt werden. Der Typ II wird primär (prinzipiell) für dekorative oder schützende Zwecke verwendet, während der Typ III eher für Hartbeschichtungen (technische Zwecke) z. B. in der Luft- und Raumfahrt Industrie angewendet wird, [87], (S. 20).

Beim Typ III - MIL-A-8625F - geht es um Hartanodisieren. Die resultierende harte Oxidschicht ist stark von den verwendeten Aluminiumlegierungen abhängig. Bei den ersten Prozessen wurden höhere Stromdichten und niedrigere Elektrolyt- Temperaturen benutzt, [87], (S. 20).

Das Oxalsäure- Eloxieren ( Oxalic Acid Anodizing, Abk: OAA ) wurde von den Japanern mitten der 1950er Jahre eingeführt. Als zusätzliche Säure wird die Oxalsäure hauptsächlich für die Hartbeschichtung, Harteloxal, (Eng.: Hard Coast Anodizing, Abk.: HCA) verwendet. Die entstandene Oxidschicht ist daher härter als die nur mit dem reinen Schwefelsäure- Elektrolyten erzielten Oberfläche, [87], (S. 20).

Das Phosphorsäure- Eloxieren (engl.: Phosphor Acid Anodizing, Abk. PAA) und Borsäure Schwefelsäure- Eloxieren (engl. Boric Sulfuric Acid Anodizing, Abk.: BSAA ) wurden beide von der Fa. BOEING entwickelt, [87], (S.20).

Das erste Verfahren fand Anwendung im Bereich strukturelles Kleben und das zweite Verfahren als Ersatz für Chromsäure- Verfahren ( CAA ) für unkritische Teile.

Zusammenfassend ist also das Schwefelsäure- Eloxieren das meist verwendete Verfahren aber in der Luft- und Raumfahrt sieht die Situation ein bisschen anders aus [87], (S. 20). Dieser Prozess ist als BOEING- Prozess bekannt und erfolgt bei 10- 15 Volt.

Das aktuellste in dieser Studie erwähnte Anodisierungsverfahren ist das neue Bor- Schwefelsäure- Verfahren. Es ist eine Alternative zu den Chromsäure Elektrolyten. Die gebildete Oxidschicht hat in diesem Fall eine Anstrichhaftung, die einer auf Chromsäure gebildeten Schicht gleich oder überlegen ist. Der Prozess wird Spannungs gesteuert. Spannungen bis zu 15 Volt werden angewendet, [87], (S. 21).

Die oben genannten Prozesse sind die Varianten, die heute im Bereich Luft- und Raumfahrt öfter angewendet werden. Aber die Betriebsbedingungen können sich je nach Lage ändern und sind bei der Auswahl des Anodisierverfahrens zu berücksichtigen.

Das Vorhandensein von Legierungselementen, wie Kupfer, Magnesium und Zink in der 2xxx und 7xxx Aluminiumlegierungen erhöht nicht nur die mechanischen Eigenschaften sondern beim eloxierten Zustand wird z. B. auch die Korrosionsbeständigkeit, Verschleißwiderstand gegen den Verschleiß oder einfach den Werkstückoberflächenschutz verbessert.

Untersuchungen zeigen, dass für ein bestimmtes Elektrolyt, die erhaltene Oxidschicht bei reduzierten Potentialen eine feinere poröse Filmmorphologie mit einer besseren Korrosionsbeständigkeit erzielt wird als eine bei erhöhten Potentialen, die gröbere Morphologie zeigt [89], (S. 41).

Ergänzend zu den bisherigen Untersuchungen, wurde die Wirkung der Zugabe von Weinsäure zum benutzten Elektrolyten unter der Lupe genommen und dies zeigt, dass die Weinsäure

keinen großen Einfluss auf den porösen Folie- Wachstum hat aber es reduziert die Auflösung von einer zuvor gebildeten Säure.

Eine Untersuchung der Beziehung zwischen Spannung und Korrosionsbeständigkeit beim Eloxieren zeigt weiter, dass für ein bestimmtes Elektrolyt und Spannung nimmt die Korrosionsbeständigkeit mit zunehmender Abdichtungszeit (Sealing time) zu [89], (S. 58). Anschließend wurden die Auswirkungen der Weinsäure als Zusatzsäure beim Eloxieren studiert. Es stellte sich heraus, dass die Anwesenheit der Weinsäure im Eloxalbad die elektrischen Eigenschaften des Oxids oder des porösen anodisch oxidierten Films morphologisch nicht ändert [89], (S. 58). Dies deutete darauf hin, dass beim Eloxieren die aus Weinsäure abgeleiteten Arten nicht signifikant sind und umgekehrt wurde gezeigt, dass Weinsäure eine erhebliche Auswirkung auf das Post- Eloxieren haben kann, unabhängig von der chemischen Zusammensetzung der Oxidschicht und insbesondere, dass die Auflösung von Anodisierungsschichten in der Säureumgebung abnimmt [90], (S. 22).

Die in der Luft- und Raumfahrtindustrie verwendeten Werkstoffe müssen heute bestimmten Anforderungen wie z. B. eine verbesserte Zähigkeit, geringeres Gewicht, einen erhöhten Widerstand gegen Ermüdung, Verschleiß und Korrosion erfüllen. Duraluminium ist der Handelsname von einer der frühesten aushärtbaren Aluminiumlegierungen mit den wichtigsten Legierungselementen wie Kupfer, Mangan und Magnesium. Diese Legierungen wurden als Rahmen in der 1937 bekannten abgestürzten Zeppelin Hindenburg Airship verwendet. Das häufig verwendete moderne Äquivalent dieser Legierungen Typ ist EN AW 2024, die aus 4,4% Kupfer, 1,5% Magnesium und 0,6% Mangan besteht. Die EN AW 2024- T4 mit anodischem Coating wird standardmäßig für Aluminiumschrauben, Bolzen und Muttern benutzt. Einer der Gründe für die Verwendung dieser Art von Legierungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie ist die hohe Festigkeit, die je nach Legierungszusammensetzung variiert. Die Streckgrenze des Aluminiums EN AW 2024- T3 beträgt 340 MPa im Vergleich zu 450 MPa für die gleiche Legierung aber als EN AW 2024- T8. Zum Vergleich ein kommerziell reines Aluminium hat eine Streckgrenze von 35 MPa. Die Zugabe von Kupfer macht diese Legierungsgruppe für Korrosion anfällig. Dies war der Grund für die Entwicklung von anderen Legierungen, die heute weit in der Luft- und Raumfahrtindustrie verbreitet sind.

Die Legierung 7075, die 1945 eingeführt wurde, weist eine Kombination aus höherer Festigkeit mit mäßiger Rauheit und höhere Korrosionsbeständigkeit als viele der 2xxx- Legierungen nach, aufgrund seiner geringeren Menge an Kupfer (max. 2,0%). Eine der Möglichkeiten, um die Korrosionsbeständigkeit für Blechprodukte der Klasse 2xxx- Legierungen zu erhöhen wird durch die Bindung einer hochreinen Aluminiumoberfläche. Diese Blätter werden als Alclad bezeichnet und werden häufig in der (Flugzeugindustrie) Aircraft- Industrie benutzt.

#### **4.2.5.2 Verwendete Legierungen**

Die Anforderungen der Luft- und Raumfahrtindustrie im Werkstoffbereich z. B. von Aluminiumeigenschaften wurden ständig erweitert und aus diesem Grund wurden neue Legierungen entwickelt, um die Leistung der nächsten Generation von Flugzeugen zu erhöhen und sie auch sparsamer bauen zu können. Trotz dieser intensiven Entwicklung gibt es nur eine geringe Anzahl von Aluminiumlegierungen, die oft in der Luft- und Raumfahrtindustrie benutzt wird, siehe die Knetlegierungen in Abbildung 25.

Legierungsnummer	Hauptlegierungselemente	Zugfestigkeit, MPa	Streckgrenze, MPa	Harteloxal	Korrosion
2014	Cu 3.9-5.0, Mn 0.40-1.2, Si 0.50-1.2, Mg 0.20-0.8	485 (T6)	425 (T6)	schlecht	schlecht
2024	Cu 3.8-4.9, Mg 1,2-1.8, Mn 0.30-0.9	485 (T8)	450 (T8)	schlecht	schlecht
2219	Cu 5.8-6.8, Mn 0.20-0.40	455 (T8)	352 (T8)	ungeeignet.	schlecht
5052	Mg 2.2-2.8. Fe <= 0.40, Cr 0.15-0.35, Si <= 0.25	310 (H*9)	280 (H*9)	Sehr gut	sehr gut
6061	Mg 0.8-1.2, Si 0.40-0.8, Cu 0.15-0.40, Cr 0.04-0.35	310 (T6)	270 (T6)	gut	gut
6063	Mg 0.45-0.9, Si 0.20-0.6, Fe <= 0.35	260 (T8)	240 (T8)	sehr gut	sehr gut
7050	Zn 5.7-6.7, Cu 2.0-2.6, Mg 1.9-2.6	524 (T7)	455 (T7)	akzeptabel	schlecht / gut
7075	Zn 5.1-6.1, Mg 2.1-2.9, Cu 1.2-2.0	505 (T7)	435 (T7)	akzeptabel	schlecht / gut
7178	Zn 6.3-7.3, Mg 2.4-3.1, Cu 1.6-2.4, Cr 0.18-0.35	607 (T6)	538 (T6)	akzeptabel	gut

**Tabelle 25: Mechanische Eigenschaften und Eloxierqualität der am häufigsten verwendeten Legierungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie [90], (S. 24).**

#### 4.2.5.3 Harteloxal für den Flugzeugbau

Die auf der Aluminiumoberfläche entstandene Oxidschicht ist ein integrierter Teil der Oberfläche, der zu 50% ins Metall und 50% aufwächst. Die Farben für Harteloxal sind grau - braun bis schwarz auf Aluminiumlegierungen ohne Kupfer und grünlich-grau bis dunkelgrau für die Aluminium- Kupfer- Legierungen.

Die üblichen Prozessparameter sind z. B. eine Elektrolyt- Temperatur von ungefähr 32°F (0°C) und 165 g/l Schwefelsäure. Bei den leicht eloxierbaren Aluminiumlegierungen funktioniert dieses Prinzip aber bei den Legierungen mit hohem Kupferanteil, eine höhere Konzentration des Elektrolyten (180- 226 g/l) und die Zugabe von Oxalsäure (11- 15 g/l) hilft, um die Bildung des Oxids zu erleichtern.

Um eine bessere Oxidschicht zu erhalten, wurden verschiedene Additive eingesetzt. Das Hauptproblem für die Additive beim Harteloxieren ist es, die während des Prozesses entstehende Wärme zu absorbieren. Eine Menge von Zusatzstoffen kann auch beitragen, die Leitfähigkeit der Oxidschicht zu erhöhen.

Die anodisierten Teile können in verschiedenen Sektoren des Flugzeugsbaus eingesetzt werden. Einige der Tankanlagen- Systeme, die aus mehreren Tanks bestehen, werden beschichtet, d. h. die Oberflächen der benutzten Blechen werden anodisiert, besonders im Fall mit Chrom- Bezügen. Die Tanks mit anodisierten Oberflächen werden z. B. als Waschtanks eingesetzt, um Fett und Schmutz von den eingehenden Tragflächen zu entfernen [91], (S. 7). Die oxidischen Schutzschichten bieten gegen Schmutz und Fett z. B. eine bessere Korrosionsbeständigkeit als eine nicht anodisierte Oberfläche.

Hartanodisieren wird für Luft- und Raumfahrtprodukte verwendet, um die Korrosionsbeständigkeit, Verschleißfestigkeit und Färbung aus ästhetischen Gründen oder Farbcode Teile zu

verbessern. Die Pilot- Steuersäule, beispielweise in Piperjet ist hartanodisiert, um dessen Verschleißfestigkeit des Teiles zu erhöhen [90]. (S. 22).

#### **4.2.5.4 Bürstenanodisieren (Pinsel- Anodisieren) in Flugzeug- und Raumfahrtindustrie**

Wegen ihrer Dicke und Struktur sind bürstanodisierte Harteloxalschichten wegen ihres höheren Widerstandes gegen Korrosion und Verschleiß am besten geeignet. Ein primäres Ziel dabei ist es hartbeschichteten Oberflächen zu reparieren (z.B. bei oberflächlicher Beschädigung etwa von Tragflächen), die zuvor irgendwie eine Behandlung nicht gut überstanden haben; z. B. für ferngelenkte Geschosse aus 6051- T6, [92], (S. 44). Die Oberflächen von einigen (wichtigen) Komponenten a, b, c, und d, Fitnessgeräte für die „MIR- Station „ sind anodisiert. Das Eloxieren gibt den Bauteilen ein schöneres Aussehen und schützt sie ebenfalls gegen die Korrosion, den Verschleiß oder den Abrieb.

Bürstenelektronenplattierung war das erste entwickelte elektrochemische Verfahren zur Beschichtung von Bauteilen in diesem Bereich. In kommerzialisierten Form wurde es verwendet, um für etwa 50 Jahre in Europa und etwa 35 Jahre in den Vereinigten Staaten reine Metalle und Legierungen zu beschichten. Bürstenanodisieren von Aluminium wurde in den Vereinigten Staaten vor etwa 30 Jahren eingeführt. Die folgende Studie beschäftigt sich prinzipiell mit bestimmten Flugzeug- und Raumfahrtanwendungen, [92], (S. 36):

Seit seiner Einführung ist das Bürstenanodisieren nur in einem beschränkten Maß angewendet worden, teils weil die Technologie im Bereich Bürstenanodisieren zu dieser Zeit noch nicht so weit entwickelt war wie der Bürstenüberzug [92], (S 36). Deswegen waren die Vorteile des Bürstenanodisierens gegenüber dem Tankanodisieren in der Luft- und Raumfahrtindustrie nicht ausgenutzt worden. Diese sind:

- Tragbares, mobiles Gerät
- Es ist nicht notwendig die Demontage von manchen Einheiten durchzuführen
- Es reduziert die Menge an Maskierung
- Es erlaubt das Anodisieren von Teilen, die sonst zu groß fürs Tankanodisieren sind
- Es reduziert die Ausfallzeit- und Produktionsverzögerungen

Ein umfassendes Programm wurde fürs Bürstenanodisieren ausgeführt. Dabei wurden vier bestimmte Ziele festgelegt:

- Überlegene Lösungen fürs Bürstenanodisieren zu entwickeln
- Bessere verständliche Lösungen im Bereich Bürstenanodisieren zu finden
- Die Einführung der wichtigen Betriebsbedingungen
- Um vergleichen zu können zwischen anodisierten Anstrichen und Tankanstrichen

Die Ergebnisse aus dieser Entwicklungsarbeit bei Bürstenanodisieren (Pinsel- Anodisieren) sind:

Statt eines Tanks von flüssigem Elektrolyten zu benutzen wird ein tragbares Werkzeug verwendet. Diese sind oft identisch zu jenen, die bei Bürstenelektroplattierung verwendet werden. Die Abbildung 41 zeigt ein Beispiel für ein typisches Werkzeug und wie die durch eine Bürste anodisierten Anstrichen zu formen sind [92], (S.36).

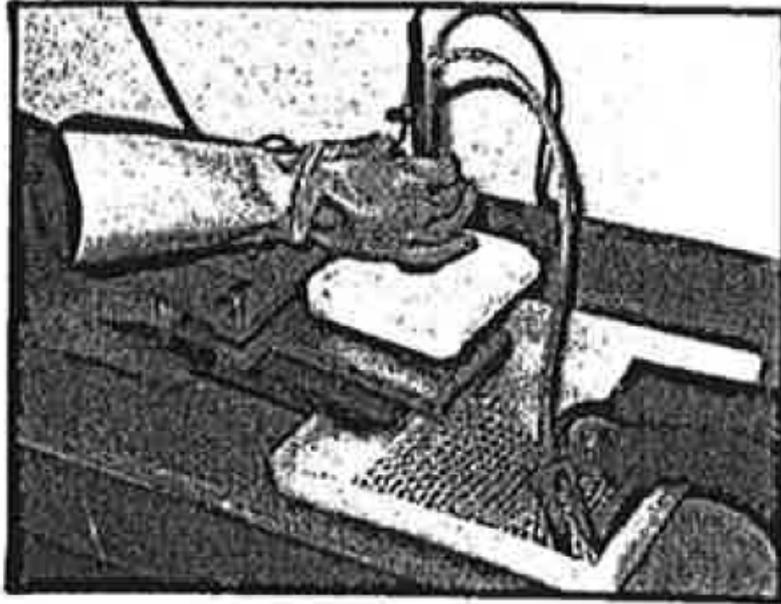


Abbildung 41: Bürst- Hartanodisierwerkzeug [92], (S. 36).

Bürstentechniken können verwendet werden, um vier Arten von anodischen Anstrichen bzw. Beschichtungen zu formen, also die gleichen Verfahren wie beim Tankanodisieren:

- Phosphorsäure
- Chromsäure
- Schwefelsäure
- Elektrolyte für Hardanodisieren

Jeder dieser Anstriche ist ein auf Aluminium geformtes Oxid mit Hilfe eines geeigneten Elektrolyten- und Reservestroms, d. h. der Teil ist anodisch oder positiv geladen. Als Anstrichformen treten drei bedeutsamen Prozesse simultan auf:

- Verbrauch des Aluminiums, um  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zu formen
- Formung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  an der Aluminiumoberfläche
- Teilweise Auflösung von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  von der anodisierenden Lösung

Der anodisierende Prozess ist deshalb komplexer als der einzelne „build- up process“ (Aufbau- Prozess), der beim Elektroplattierung auftritt.

Die vier Arten von Anodisieren unterscheiden sich hauptsächlich durch die verwendeten Lösungen. Die typischen Dicken und Eigenschaften von geformten Anstrichen ist in Tabelle 26. dargestellt.

### Four Types of Anodizing

Type of anodizing	Basic composition of solution*	Typical thickness, in.	Purpose of coating
Phosphoric	Phosphoric acid	0.000010	Improve strength of adhesive bonds
Chromic	Chromic acid	0.0001	Corrosion protection
Sulfuric	Sulfuric acid	0.0005	Corrosion protection with some wear resistance
Hard coat	Sulfuric acid	0.002	Wear resistance and often corrosion protection

Tabelle 26: Vier Arten von Bürst-Anodisieren, [92], (S. 37).

Die vier Arten von anodisierten Anstrichen (Bürst-Anodisieren) werden mit Hilfe von verschiedenen Betriebsparametern realisiert, Tabelle 27.

### Operating Conditions for Various Types of Anodizing

Type of anodizing	Typical current density, A/in. <sup>2</sup>	Recommended solution temp., °F	Typical process time, min.
Phosphoric	0.02	60-90	10
Sulfuric	1.5	65-85	0.5-10
Hard coat	0.5	30-50	10-30
Chromic	0.02	95-105	15-60

Tabelle 27: Wirkung der Legierung auf dem Chromsäureanodisieren- Prozess, [92], (S. 37).

Anodisierende Lösungen und Gellösungen sind für alle vier Typen von Anodisation anwendbar. Gele sind passend für Phosphorsäure- und Chromsäure- Anodisieren. Die Betriebsparameter für die Gele sind die selben bezüglich ihrer jeweiligen Lösungen und wenden Anstriche derselben Qualität an.

#### 4.2.5.5 Anwendungsbeispiele

- Propeller- Schaufel, Verkleidungen, Gussflaschen, Sitze
- Deckenbalken, Sitzrahmen, Sitzschienen, Cockpit- und Fensterrahmen, Beschläge
- Extrudierte Profile, Formen, Stangen, Rohre, gezogenen Rohre usw.
- Große Bauteile, die mit dem Pinsel- Anodisationsverfahren bearbeiten werden müssen, da sie nicht in Eloxierbäder passen.
- Propellerhaube eines Ultra- Leicht Flugzeuges, Luft-, Druckbehälter, Zylinder
- Flugzeug Aluminium Senkkopfnieten, usw.



Abbildung 42: Luft- und Raumfahrttechnik (Cockpit, Sitz- und Fensterrahmen u.a.m. eloxiert)

#### **4.2.6 Thermische Spritzbeschichtung**

Die Anwendung thermischer Spritzenverfahren bei der Eloxierung von reinem Aluminium, Al-5Mg und Al+(Al-5Mg+Zn-15Al) Beschichtung spielt eine positive Rolle bei der Hemmung interkristalline Rissbildungen und zusätzlich lässt sich die Zeit bis zum Ausfall von bis zu 480% auf der 7075-T651 AL-Legierung erweitern. Allerdings die mechanische Beschädigung der Beschichtung war, während der vorliegenden Studie, verantwortlich für den Ausfall der Proben durch die Ermüdungskorrosion, [83], (S. 06496/2).

In einer Studie würden die Oberflächen von 7075- T73 Aluminium in Vorbehandlung zum Eloxieren untersucht. Lokalisierte Korrosionsschäden in diesem Aluminiumlegierungstyp in verschiedenen Vorbehandlungen wurden festgestellt und die Oberflächenkorrosion mit Rasterelektronenmikroskopie (SEM) untersucht. Darüber hinaus wurden (SEM) und Energie Spektroskopie (EDS) für die zweite Phase (Bestandteil) Teilchenidentifikation benutzt [93], (S. 674).

In der Luft- und Raumfahrttechnik werden manche Bauteile, z. B. der Hydraulikverteiler und ähnlichen Flugsteuerungsteile aus hochfesten Aluminiumlegierungen hergestellt. Die Oberflächen diesen Teilen werden weitgehend dabei anodisiert, um z. B. den Korrosionsschutz zu erhöhen. Weil Bauteilversagen durch die Anwesenheit dieser Oberflächenfehler beschleunigt werden kann, ist ein umfassendes Verständnis dieser Vorbehandlungs- und Korrosionsmechanismen daher von wissenschaftlichem Interesse und hat eine technologische Bedeutung [93], (S. 674).

#### **4.2.7 Eigenschaften**

Die Eigenschaften eines harten anodischen Films sind in hohen Maße von Verarbeitungsbedingungen abhängig und in geringeren Maße von der Zusammensetzung der Legierungen [55], (S. 12). Die Eigenschaften wie Härte und Abriebfestigkeit sind teilweise miteinander verbunden. Härtewerte allein können insofern irreführend sein, da die intrinsische Härte des anodischen Films unbestimmt ist aufgrund seiner porösen Natur. Mikrohärtewerte in der Größenordnung von 350 - 500 VPN sind häufig. Es wurde festgestellt, dass unter leichten Lastbedingungen die Hartanodisation zu einer viel höheren Zufriedenheit führen kann.

Die praktische Erfahrung hat bestätigt, dass die Verschleißfestigkeit eines hartanodisierten Teils bei 450 VPN liegt. Dies ist oft besser als die eines bearbeiteten Stahls, die eine Härte von 900 VPN hat. Sicherlich würde eine hart eloxierte Kante sowohl Glas sowie eine Hartchromplatte verkratzen [55], (S. 12).

Obwohl die Porosität aus einer harten anodischen Oxidschicht relativ gering ist, ist es immer noch ausreichend, um die Imprägnierung mit einem anderen Stoff zu akzeptieren. Dies kann z. B. einen Farbstoff sein, um eine gewünschte Farbe für dekorative Zwecke oder eine Funktionskennzeichnung zu erzeugen. Noch wichtiger ist jedoch, die kontrollierte Imprägnierung mit PTFE, die den Co- Reibungskoeffizienten unter 0,05 reduzieren können und eine abriebfest Antihafbeschichtung mit ganz besonderen Verschleißfestigkeit zu erzeugen. Dieses Verfahren ist häufig in den USA als Tufram und in Großbritannien als Lubrock bekannt, [55], (S.12).

#### **4.2.8 Messung der Härte und Abriebfestigkeit**

Es gibt verschiedene Methoden zur Messung der Härte und Abriebfestigkeit z. B. einer Oxidschicht: Die Schuch und Kern Test- Verfahren L von BS 1615:1972, [55], (S.12).

Schätzungsweise wird die Dauerfestigkeit eines hartanodisierten Aluminiumprüfkörpers um etwa 30 - 40 Prozent reduziert. Unter normalen Betriebsbedingungen werden diese Kürzungen oft von der tatsächlichen mechanischen Konfiguration der Komponenten überschattet, aber für kritische Anwendungen dürfen diese nicht vergessen werden.

Die beliebteste Lösung für dieses Problem ist, die harte anodische Oxidschicht abzudichten (Sealing) [55], (S. 16).

#### **4.2.9 Schiffbau**

Im Schiffbau finden Aluminium- und Legierungen beispielweise im Innenausbau, als Werkstoff für die Herstellung von Möbeln oder als Bauteilwerkstoff usw. Anwendung. Die Teile, die im Wasser arbeiten, müssen selbstverständlich meerwasserbeständig sein, da sonst sie sehr schnell korrosionsanfällig werden.

Die Meerwasserbeständigkeit wird oft als Begriff im Bereich „Schiffbau“, benutzt und bezeichnet z. B. Legierungen, die aufgrund ihrer Festigkeit als Konstruktionswerkstoffe geeignet sind. Diese Materialgruppe zeigt gegenüber Meerwasser ein gutes Korrosionsverhalten und ist schweißbar. Eine Legierung als meerwasserbeständig zu bezeichnen, bedeutet nicht, dass in diesem Zusammenhang keine Korrosionsart auftritt.

„Ein Werkstoff gilt nach DIN 81249- 1 als seewassergeeignet, wenn das aus ihm werkstoffgerecht hergestellte Bauteil beim Einsatz im Meerwasser keine Korrosionsschaden innerhalb der geplanten Nutzungsdauer erwartet lässt „, [94].

Die folgende Tabelle zeigt einige Aluminiumknetlegierungen, die öfter im maritimen Bereich verwendet werden.

EN AW-1080A [Al 99,8 (A)]
EN AW-1070A [Al 99,7]
EN AW-1050A [Al 99,5]* **
EN AW-1200A [Al 99,0] **
EN AW-3103 [Al Mn1] **
EN AW-3003 [Al Mn1Cu]
EN AW-3105 [Al Mn0,5Mg0,5]
EN AW-3005 [Al Mn1Mg0,5]*
EN AW-3004 [Al Mn1Mg1]
EN AW-5005 [Al Mg1(B)] **

EN AW-5005A [Al Mg1(C)]
EN AW-5051A [Al Mg2 (B)]
EN AW-5052 [Al Mg2,5] **
EN AW-5754 [Al Mg3]* **
EN AW-5154 [Al Mg 3,5] **
EN AW-5082 [Al Mg4,5]*
EN AW-5019 [Al Mg5]
EN AW-5251 [Al Mg2] **
EN AW-5049 [Al Mg2Mn0,8]* * Legierungen, die bevorzugt
EN AW-5454 [Al Mg3Mn]* ** im maritimen Bereich angewendet
EN AW-5086 [Al Mg4] ** werden
EN AW-5083 [Al Mg4,5Mn0,7]* ** Knetlegierungen für Schiffbau,
EN AW-5182 [Al Mg4,5Mn0,4] Meeres- und Offshoretechnik
EN AW 6005 [Al SiMg] ** nach EN 13195-1
EN AW-6060 [Al MgSi]* ** *** Nur im Zustand "warmausgehärtet"
EN AW-6063 [Al Mg0,7Si] **
EN AW-6106 [Al MgSiMn] **
EN AW-6005A [Al SiMg(A)]*
EN AW-6082 [Al Si1MgMn]* **
EN AW-6061 [Al Mg1SiCu]*
EN AW-6012 [Al MgSi1Pb]

**Tabelle 28: Aluminiumknetlegierungen, die für den Einsatz im maritimen Bereich nach DIN 81249-1 geeignet sind [94].**

Legende für die Tabelle 28:

- \* Legierungen, die bevorzugt im maritimen Bereich angewendet werden
- \*\* Knetlegierungen für Schiffbau, Meeres- Offshoretechnik nach EN 13195- 1
- \*\*\* Nur im Zustand „Warmausgehärtet“.

Die Frontplatten und Gehäuse der Hubschrauberlandeplattform von Schiffen können z. B. aus (schwarzem) eloxiertem Seewasser- Aluminium sein, [95]. Dadurch können sie ihre lang- lebige, kratzfeste und beständige Farbgebung erhalten, [80].



**Abbildung 43: Gangway; a, und b, (aus Eloxal- Halter), [96].**

Weitere Anwendungsbeispiele für eloxierte Teile im Schiffbau sind die oben abgebildeten Gangways. Die Oberflächen von manchen Komponenten sind aus anodisierten Aluminium-Legierungen.



Abbildung 44: a, b, c, d und e; Verschiedene eloxierte bzw. teileloxierte Teile im Schiffbau, [97].

Die Abbildungen 44: a bis e, zeigen mechanische Konstruktionen oder Schiffbauteile mit eloxierten Identifikationsplaketten, Bedienungstafel (aus anodisiertem Aluminium), etc.

Deck-, Schiebeluken oder Fenster aus eloxiertem Aluminium usw. sind einige weitere Anwendungsbeispiele für den Ansatz dieses Werkstoffes im Schiffbau, [98], (S. 390, 399). Die Oxidschichten betragen ca. 15 bis 20  $\mu\text{m}$  und schützen somit die Teile z. B. gegen Korrosion. Diese eloxierten Oberflächen machen ebenfalls die Fenster oder Decklücken zum Edelwerk-

stoff (dekorativ).



Abbildung 45: Decklücken für Schiffe, [98], (S. 390).



Abbildung 46: Fenster für Schiffe, [98], (S. 399).

Die oben abgebildeten oder zitierten Bauteile sind nur einige Anwendungsbeispiele von anodisiertem Aluminium im Schiffbau- Sektor. Auch z. B. im Motorbereich wird eloxiertes oder harteloxiertes Aluminium für manche Teile verwendet.

#### **4.2.10 Schienenfahrzeugbau**

Die Aluminiumveredelung (Eloxieren bzw. Anodisieren oder Harteloxieren) als Beschichtungsverfahren findet ebenfalls sehr oft Anwendung in der Luft- und Raumfahrt bzw. im Automobilbereich, etc.. D. h. die eloxierten bzw. harteloxierten Bauteile sind prinzipiell auch in diesem Gebiet keine Seltenheit. So wird im Innenausbau der Eisenbahnwagen, für die Möbel in den Fahrzeugen, für mechanische Teile ( Bsp: Schiffstrümpfe, Schiffaufbauten, [76], (S. 1)) usw. anodisiertes (veredeltes) Aluminium verwendet.

Folgende eloxierte bzw. anodisierte Teile finden ebenfalls Anwendung im Eisenbahnwagen:

- U- Bahn- Triebwagen Platten
- Schienenfahrzeug- Deckungssysteme
- Tür und Türrahmen
- Sitzrahmen
- Beleuchtungs- und Signalgehäuse
- dekorative Komponenten
- Bodendeckungssysteme
- Lichtreflektoren
- Lichtspiegel

u.a.m. [99].

Weitere Anwendungsbeispiele für Eloxal bzw. Anodisieren im Bereich „Schienenfahrzeug“, sind z. B. diese anodisierten Lochschilder der deutschen Bundesbahn.



**Abbildung 47: Eloxierete Lokschilder (DB), [100].**

Ganz allgemein werden Aluminiumteile aus ästhetischen (dekorativen) Gründen oder gegen Korrosion, Verschleiß oder Abrieb im Bereich Schienenfahrzeuge (Motorteile, Karosserie, Fensterrahmen, Innenausbau usw.) eingesetzt. Ebenfalls aus Gewichteinsparungsgründen wird Aluminium oder eloxiertes bzw. harteloxiertes Aluminium im Transportbereich angewendet. Man muss nur darauf achten, dass die Eigenschaften des fertiggestellten Teiles wie z. B. die Härte nicht dabei verloren geht.

Als weitere Anwendungsbeispiele für eloxierte Teile im Schienenfahrzeugbau können folgende Arten von Manometern zitiert werden. Einige Bauteile dieses Geräts sind eloxiert, siehe hierzu die Abbildung 48 a, und b.



Abbildung 48: a und b: Kombi- Manometer für Schienenfahrzeuge, [101].

#### 4.2.11 Medizintechnik

Die Verwendung von anodisierten Aluminiumteilen ist im Medizinbereich gut verbreitet. Manche Teile werden z. B. farbeloxiert, um sie beispielsweise bei einer medizinischen Intervention schnell von den anderen Werkzeugen (Teilen) zu unterscheiden (besonders, wenn mehrere Werkzeuge oder Teile ähnlich aussehen). Anderen Werkzeugen oder Teilen werden eher gegen Korrosion, Verschleiß usw. eloxiert.

Aluminium wird seit Jahren in der Medizin eingesetzt und besonders im Sterilisationsbereich sind die Vorzüge dieses Material bekannt. Einige Vorteile dieses Werkstoffes in der Medizin wie beispielsweise eine schnelle Abtrocknung der Werkstücke, die Robustheit der Teile durch die Eloxalschicht, die Gewichtsprobleme (leichter als Stahl), Kennzeichnung mittels Eloxal-Druck nahezu unbegrenzt, machen die anodisierten Komponenten im Gesundheitssektor attraktiv.

Aufgrund der extrem widerstandsfähigen Eloxal-Druckverfahren ist eine dauerhafte Kennzeichnung (Beschriftung), auch farbig, gewährleistet. Dadurch überstehen die Produkte Sterilisationsprozesse bis zum einem PH- Wert von 8,5, [102], (S. 3, 4).

Im medizinischen Bereich wird das Eloxalverfahren öfter angewendet, und zwar z. B. für die Beschichtung von Dentalhandstücken. Es ist eine der modernsten Methoden zum Schutz und Dekoration Aluminiumlegierungen, und hat sich weit in vielen Zweigen der Industrie behauptet. Eigenschaften wie die Korrosionsbeständigkeit, Verschleiß oder Hitzebeständigkeit sind hier gefragt. Dazu kommt in diesem Bereich auch die Unbedenklichkeit für den menschlichen Körper. Aufgrund der Tatsache, dass eloxierte Werkstücke diese Bedingungen erfüllen, sind sie in der Herstellung medizinischen Geräten weitverbreitet, [103]. (S. 102). Manche Firmen bitten sogar Behandlungsmöglichkeiten (Anodisierungsmöglichkeiten) mit automatischen Anlagen (Spezialanlagen), z. B. zur Anodisierung von medizinischen Implantaten, [104].

In einer Studie in diesem Bereich wurde es nachgewiesen, dass die Korrosionsbeständigkeit direkt proportional zur Dicke des Films und umgekehrt proportional zur Porosität ist, [103], (S.104).

Im Bereich Medizin dient auch das Eloxal oder noch genauer Farbeloxieren in diesem Fall zur Identifizierung der Teile während eines chirurgischen Eingriffs. Die farbeloxierten Teile finden Anwendung bei den orthopädischen oder dentalen Implantaten sowie Osteosynthese-Produkten wie Schrauben, Platten oder auch einfach Instrumenten, [105].

Weitere Beispiele für die Anwendung des Eloxals in der Medizin sind Rahmen und Abdeckungen für medizinische Forschungsausrüstungen, Blutpumpe für medizinische Geräte, [106]. Handprothese oder Kniegelenke sind ebenfalls Anwendungsbeispiele für eloxiertes Aluminium im Medizinbereich.



**Abbildung 49: a, Handprothese; b, hydraulisches Kniegelenk (farbeloxiert), [107].**

Die verschiedenen Farben machen die Teile attraktiver und auch interessanter. Besonders für die Handprothese, ist es nicht verkehrt, wenn diese Teile auch schön zu sehen sind. Um dieses Ziel zu erreichen, muss man nur die Teile mit verschiedenen Farben anodisieren.

#### **4.2.11.1 Elektrochemisches Rampart- Verfahren**

Eine mikrostrukturell aufgebaute Direktmetallisierung eröffnet neue Anwendungen in der Medizintechnik. Das neu entwickelte Verfahren verleiht Aluminium die Oberflächeneigenschaften eines Edelstahls und verbindet so die Vorteile einer Leichtbauweise mit hoher Beständigkeit, [108], (S. 94).

Wegen der intensiven Reinigung der Instrumente mit stark alkalischen Reinigungsmedien, sind die eloxierten Teile nur unzureichend gegen Korrosion geschützt. Die Werkzeuge unterliegen während der üblichen Reinigung, einen chemischen und korrosiven Angriff, was sich beim Aussehen des Teiles oder die Lebensdauer dieses Element bemerkbar macht.

Ebenfalls ist der Verschleißschutz bei den eloxierten Teilen ausreichend aber keineswegs hervorragend. D. h. mit zunehmender Reinigungszyklen und dem damit verbundenen Oberflächenangriff durch den Reinigungsmedien sinkt ebenfalls der Verschleißschutz weiter ab.

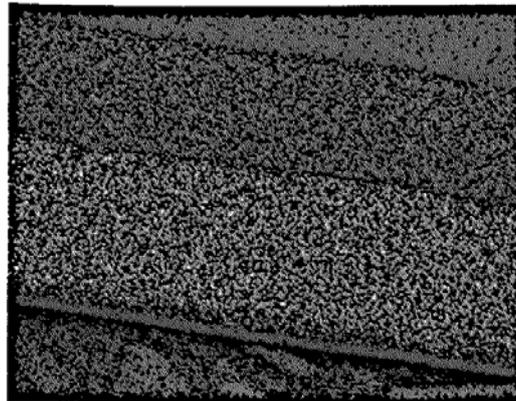
Abhilfe verspricht hier eine neuartige Beschichtungsmethode, die dieses Problem aufgreift. Das Rampart-Verfahren könnte speziell für die Anforderung der Medizintechnik adaptiert werden. Die Anwendung dieses Verfahren lassen sich im dem Bereich der Luft- und Raum-

fahrt, Automobil oder sogar Elektronik usw. verbreiten. Die Aluminiumoxidschichten der Anodisierung (Eloxierung) werden durch eine mikrostrukturell aufgebaute Direktmetallisierung ähnlich einer Galvanisierung ersetzt.

Während bei einer Anodisierung strukturell ein poröses Gerüst aufgebaut wird, das dann verdichtet und versiegelt werden muss, wird beim Rampart-Verfahren eine dichte, kompakte und vor allem porenfreie Metallschicht aufgebracht. Bei diesem Beschichtungsverfahren ist keinerlei Versiegelung mehr notwendig. Die metallische Oberfläche ist selbst in der Lage, den Schutz und die Funktionalität zu gewährleisten. Eine genau auf die jeweilige Aluminiumlegierung abgestimmte Vorbehandlung gewährleistet eine sehr gute Haftung dieser Schicht und somit ein langes Leben.

Der Multilagen- Aufbau sorgt für eine optimale Funktionalität und verbesserten Schutz der Aluminiumbauteile.

Die Härte der Beschichtung ist gegenüber anodisierten und besonders im Vergleich zu eloxierten Oberflächen um einen Faktor 2 bis 3 erhöht, was sich positiv auf die metallische Belastbarkeit auswirkt.



**Abbildung 50: Elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts der Beschichtung mit unterschiedlicher Einfärbung der einzelnen Legierungsschichten, [108], (S.94).**

Das System ist jedoch nicht nur in stark alkalischen Medien stabil, sondern widersteht auch die Belastung durch saure Reiniger.

#### **4.2.12 Architektur und Bauwesen**

Die Verwendung von eloxierten Teilen ist heute in den Bereichen Architektur wie auch im Bauwesen sehr verbreitet. Die Fassaden der Gebäude, Treppengeländer, Teile von Fenstern und Türen, Möbelkomponente usw. sind einige Beispiele für den Ansatz anodisierte Werkstücke in der Architektur oder Bauwesen.

Die Umwelteinflüsse auf die anodisierten Teile, besonders im Bereich Architektur oder Bauwesen sollten bei der Oberflächenbehandlung (eloxieren) berücksichtigt werden. Es wurden Bewitterungsversuche an Al-Legierung xxx mit einer Eloxalschicht xxx durchgeführt [109], (S. 376).

Bei dieser Untersuchung war die Elektronenmikroskopie die wichtigste Methode, um die verschiedenen Veränderungen an den vorbehandelnden Oberflächen zu charakterisieren. Eloxiertes Aluminium wurde erfolgreich für viele externe Architektur Anwendungen eingesetzt und zwar nicht nur wegen Ihrer geringeren Dichte sondern auch wegen ihrer niedrigeren Ge-

wichte bei z. B. größeren Platten. Falls sie eloxiert sind, bieten sie eine gute Korrosionsbeständigkeit und hindern nicht in der Gestaltungsfreiheit.

Somit dienen die eloxierten Bauteilen in der Architektur nicht nur als Schutz für die zugrundeliegenden Metalle sondern auch zum dekorativen Zweck. Sie sind für einige Jahre fast wartungsfrei (minimale Wartung).

Laut Cooke, [110] sind die verschiedenen Veränderungen die auftreten können, wenn ein eloxierter Bauteil der Witterung ausgesetzt wurde, z. B. Staub-, Rußakkumulation, Beginn der Lochfraßkorrosion, oder wenn dieses eloxierten Teils gefärbt wurde, kann es zur Farbänderung kommen.

Es ist allgemein anerkannt, dass Lochfraßbeständigkeit weitgehend von der Art und Legierungen der anodischen Filmdicke gesteuert wird [111], (S. 133). Jede Tendenz der Farbänderung in der Färbung [112], Dichtqualität und möglicherweise Schichtdicke [113], bzw. Schmutzsammlung können durch eine ausreichende Abdichtung minimiert werden.

Eigentlich werden grundsätzlich nur zwei Formen von oberflächlichen Verwitterung anerkannt: Kreiden und Verwitterungsblüte.

Verwitterungsblüte ist eine Aufhellung der Beschichtung. Sie wird durch einen leicht chemischen Angriff verursacht und ist durch eine schlechte Abdichtung (Sealing) gefördert. Kreiden werden durch eine hohe Eloxier-Säuretemperatur gefördert [114], [115].

Weitere Bsp.: Brücken, Hallen, Offshore- Bereich, Hubschrauberlandedecks, Wohnmodule, [76].

Eine Schutzwirkung und ein attraktives Aussehen sind einige der Eigenschaften, die die anodisierten Teile haben. Die eloxierten Teile wirken auch nicht nur ästhetisch sondern sie sind im Gegenteil zu einer nicht behandelten Oberfläche sehr hart und gegen atmosphärische Einwirkungen über lange Zeit beständig. Voraussetzung ist eine Schutzschicht von mindestens 20 µm Dicke, die einwandfrei und tief genug verdichtet ist, [116], (S. 493).

Schmutz, Staub und aggressive Bestandteile der Luft greifen langsam die anodisierten Oberflächen an, auch chemische Angriffe sind nicht ausgeschlossen. Langjährige Versuche haben gezeigt, dass der Abtrag durch die Erosion in der Regel im Durchschnitt 0, µm pro Jahr nicht übersteigen darf. Die chemischen meist sauer reagierende Bestandteile der Luft wirken auf die Oxidschichten negativ aus. Die Oberflächen werden durch diese Bestandteile aufgeraut, es entstehen weiße Ausblühungen, und die Poren der anodischen Schicht werden zum Teil geöffnet. Dadurch ändert sich auch der Farbton irreversibel, insbesondere dort, wo die Schicht in der ganzen Tiefe durchgefärbt war. Im schlimmsten Fall kann es zu örtlichen Durchbrüchen der Schicht bis auf das Grundmetall kommen, die Korrosion des Grundmetalls setzt ein, [116], (S. 493).

Um eine Fassade im ursprünglichen Zustand zu erhalten, ist es empfohlen, sie regelmäßig mit geeigneten Reinigern zu waschen, falls sie leicht verschmutzt ist. Dadurch werden sie auch konserviert. Bei stark verschmutzten Oberflächen wird es dann schwierig, da sie aufgeraut, fleckig und fettig sein können. Bei nicht einwandfrei anodisch hergestellten Oberflächen (z. B. zu warmer Elektrolyt, zu hohe Stromdichte) ist die mechanische Widerstandfähigkeit der äußeren Schicht vermindert. Durch das Abschleifen der Teile können Schichtdicke und Lebensdauer der Teile deutlich verringert werden. Aus diesem Grund ist es empfohlen, die Teile oder die Fassade chemisch zu reinigen. Es stellte sich bis zu den 70er Jahren das Problem, Reiniger zu benutzen, die die zu behandelten Oberflächen nicht angreifen und zer-

stören. Aus der Forschung hat sich ein saures Produkt am besten bewährt, es besteht aus der Kombination aus Aluminium nicht angreifenden Säure mit Schutzinhibitoren und Tensiden. Die Säure reagiert mit den Korrosionsprodukten der anodischen Schichten und bildet in Wasser, Säuren und alkalischen Lösungen unlösliche Reaktionsprodukte, die nur locker haften und durch Abwischen oder spülen mit Wasser entfernt werden können, [116], (S. 495). Auf stark korrodierten und fleckigen Oberflächen hat sich in der Praxis eine Kombination des Produkts mit einem abrasionsmittel als vorteilhaft erwiesen. Man verwendet dazu am besten mit der Reinigungslösung getränkte Vliese, in deren Fasern feinkörnige Schleifmittel eingebaut sind (Scotch- Britr, Pads). In solchen Fällen genügt ein leichtes Abreiben der Oberfläche ohne besondere Kraftaufwendungen, wie sonst beim Reinigen unter Anwendung neutraler Mittel erforderlich ist.

Stark verschmutzt und korrodierte, anodisierte Oberflächen von Aluminiumbauteilen sind mit üblichen neutralen Reinigungsmitteln schwierig und nur abrasiv zu reinigen. Alkalische Lösungen zerstören ebenfalls die Oxidschicht, Säure mit Chlorid-, Sulfat- und Fluoridionen sind zu aggressiv. Organische Säure wirken dagegen unzureichend. Eine Lösung bietet die Säurekombination mit Inhibitoren und Tensiden für manuelle Anwendung, [116], (S. 496).



**Abbildung 51: Weitere Einsatzgebiete von eloxierten Bauteilen (Gebäudebau), [54], (S. 15).**

Damit besonders im Bereich Architektur die anodisierten Teile ihre Bestimmungen erfüllen können, müssen Grundanforderungen wie z. B. die „Eloxalqualität,“ gewährleistet sein. Die chemische Zusammensetzung und der Gefügestand des Grundwerkstoffes bestimmen neben den Eloxierparametern, das Aussehen des behandelten Teils.

Prinzipiell kann jeder Aluminiumwerkstoff anodisiert werden. Aber grundsätzlich ist es nach der Anodisierung zu erwarten, dass nur die Teile, die die Eloxalqualität erfüllten auch noch die strenge Qualitätskontrolle bestehen. Neben der Zusammensetzung des Werkstoffes sind auch noch die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes in Betracht zu ziehen.

Es wird von einem Werkstoff „die Freiheit von Gefügeabzeichnungen,“ nach dem Eloxieren erwartet, d. h. ein gleichmäßiges Aussehen der eloxierten Oberflächen ohne Abzeichnung von Gefüge Unregelmäßigkeiten, [117], (S. 422). Es ist auch bekannt, dass die anodische Oxidation benutzt wird, um Gefüge Unregelmäßigkeiten eines Werkstoffes sichtbar zu machen, da hier im Gegenteil zum Galvanisieren keine zusätzliche Oberflächenbedeckung erfolgt, sondern die Oberfläche selbst umgewandelt wird. Der Grundwerkstoff sollte homogen,

mit einem nicht zu großen Unterschied in der Korngröße sein, [117], (S 422). Dabei ist die Menge der Begleitelemente nach oben zu begrenzen noch dazu, ist zu achten, dass die Höhe der nichtmetallischen Beimengungen ( z. B. Oxidhäute ) niedrig gehalten wird.

Der Verwendungszweck eines Werkstoffes sollte möglicherweise dem Halbzeugwerk bekannt sein, um eine geeignete Auswahl eines Werkstoffes fürs Eloxal zu erleichtern. Natürlich ist es auch danach zu beachten, dass die Anodisierparameter während des Verfahrens eingehalten werden, um ein positives Ergebnis zu erhalten.

Eine Zusammenarbeit zwischen Halbzeugwerk, Metallbauer und Architekt ist bei großen Objekten oder bei speziellen Anforderungen zu empfehlen, um ein positives dekoratives Ergebnis des Eloxalsverfahren zu sichern.

Die zahlreichen farbeloxierten Oxidschichten der Werkstücke in der Architektur oder Bauwesen werden abhängig vom Werkstoff und Verfahrensvarianten oder auch noch Prozess-Parametern realisiert aber zur Erzielung einer optimalen Farbtongleichheit sind bei gleicher Werkstoffqualität die Arbeitsbedingungen exakt einzuhalten; gewisse geringfügige Abweichungen sind unumgänglich, sie können sogar manchmal wünschenswert sein, müssen jedoch in ihrem Ausmaß vereinbart werden, um späteren Unstimmigkeiten von vornherein zu vermeiden, [118], (S. 31). In der Literatur werden allgemeine Richtlinien zur Anodisierung von Teilen gegeben, um z. B. ein gelungenes Färben für die Architektur zu gewährleisten, [119]. Die Umwelteinflüsse müssen ebenfalls bei den Eloxierprozessen nicht vernachlässigt werden.

Wie es schon ein paar Male erwähnt wurde, hängt das Ergebnis eines Eloxalsverfahrens auch für das Bauwesen von der Art der Elektrolyten, von der Aluminium- Legierung und auch noch von der Vorbehandlung ab. Die Elektronenmikroskopie der behandelten Teile zeigt, dass die Porendurchmesser etwa 120 Ångström und ihre Anzahl pro  $\text{cm}^2$ , ca.  $10^8$  bis  $10^9$  betragen. Beim Elektrolyseprozess wird mit Spannungen zwischen 17 und 19 V je nach Elektrolyten gearbeitet. Dabei beträgt die Stromdichte ca.  $1.5 \text{ A/dm}^2$ , [120], (S. 2693).

Um die richtige Licht- und Wetterechtheit für die anodisierten Teile beim Bauwesen zu verbessern, würde weiter geforscht, und so kam es, dass auch im diesem Bereich hartanodisiert wird. Die Farbgebung ist abhängig von der Legierung, von der thermischen Homogenisierung, der Temperatur beim Pressen bzw. Walzen, sowie der nachfolgenden Warmauslagerung, der Badzusammensetzung, Stromdichte und der Elektrolysezeit, [120], (S. 2693). Weil das Ergebnis (Farbtönung) von ziemlich vielen Parametern abhängt, werden gewisse Toleranzen bei der Begutachtung der fertigen Teile mitberücksichtigt, um akzeptable Ergebnisse zu erzielen.

## **4.3 Güteprüfung der Eloxalschichten**

### **4.3.1 Mögliche Fehler beim Eloxieren**

Beim Eloxieren oder Harteloxieren, ist es möglich, dass Fehler auftreten. Diese sind in Tabelle 29: Anodisierfehler [33], (S. 257). aufgelistet, mit der möglichen Ursache und der Korrekturmaßnahme. Falls es z. B. nach einem Eloxalverfahren keine oder mangelnde Oxidschicht auf der Werkstückoberfläche gibt, kann es daran liegen, dass eine Störung des Stromflusses vorliegt. In diesem Fall sollte man die Kontakte z. B. zwischen dem Teil und der Anodenpol prüfen und gegebenenfalls den Fehler beheben.

Eloxierfehler (z. B. Kreidung, Abplatzung, Fehlfärbungen oder unzureichender Schichtaufbau) können im Normalfall durch Entloxieren oder erneutes Eloxieren behoben werden. Wie beim Beizen ist auch beim Entloxieren mit Materialabtrag zu rechnen, der schichtdickenabhängig ca. 15- 25  $\mu\text{m}$  beträgt. In einem solchen Fall müssen extreme Passungsmaße von Präzisionsteilen vorher abgedeckt werden [38].

Presstechnik, metallurgisch oder durch Korrosion bedingte Oberflächenmerkmale und -fehler sind in der Regel jedoch durch das Eloxieren nicht zu beseitigen, [38].

Falls Fehler nach einem Eloxalprozess auftreten, sind sie genau zu analysieren, die Ursache zu suchen und falls möglich, die entsprechenden Korrekturmaßnahmen einleiten und durchführen. Eine schlechte Vorbehandlung kann auch hier Teil eines allgemeinen Problems sein.

Je nach Aufgabe der Beschichtung eines Teiles verlangt man von ihr bestimmte Eigenschaften. Sehr wichtig in diesem Zusammenhang ist die Schichtdicke oder Wandung zu nennen, denn von ihr können einige Eigenschaften abhängig sein.

<i>Fehlerart</i>	<i>mögliche Ursache</i>	<i>mögl. Korrekturmaßnahme</i>
keine Schicht oder mangelnde Schichtdicke	mangelnder Kontakt am Gestell	Kontaktgabe überprüfen und für hinreichenden Kontaktdruck sorgen
	zu geringe geflossene elektrische Ladung	Anodisierzeit verlängern
	nicht korrekte Elektrolytzusammensetzung	Elektrolyten analysieren und korrigieren oder austauschen
Irisfarbene dünne Schicht	keine korrekte Elektrolytzusammensetzung	Aluminiumgehalt analysieren und verringern Schwefelsäuregehalt analysieren und erhöhen
	zu hohe Rücklösung infolge zu hoher Elektrolyttemperatur	Temperatur überprüfen und senken
mehlige, abreibbare Schichten	zu hoher Aluminiumgehalt im Elektrolyten	Gehalt analysieren und korrigieren
	zu hohe Stromdichte	Stromdichte überprüfen und senken
	zu lange Expositionszeit	Expositionszeit überwachen
Anätzung der Schicht	zu hohe Elektrolyttemperatur	Temperatur überprüfen und senken
	zu lange Expositionszeit	Expositionszeit überwachen und senken
	mangelhaftes Spülen nach dem Anodisieren	Spülen überprüfen und verbessern; evtl. pH des abtropfenden Wassers prüfen
	zu geringe Badbewegung	Badbewegung überprüfen und verstärken Anordnung der Ware im Elektrolytstrom prüfen und Strömungswiderstand verringern
Anätzung der Schicht und schwarze Punkte	eingepresste (Fremd)Metallverunreinigungen im Aluminium	Schwermetallbereiche bei Verbundkörpern abdecken; Wareneingangskontrolle der Rohteile auf Einwalgungen durchführen
	zu hoher Chloridgehalt im Elektrolyten	Ansatz- und Einschleppungswasser (Stadtwasser) auf Chloridgehalt prüfen; deionisiertes Wasser verwenden
weiße Ausblühungen an Gusswerkstücken	mangelhaftes Spülen (Poren sind nicht elektrolytfrei gespült)	Spülen überprüfen und verbessern; evtl. pH des abtropfenden Wassers prüfen
dunkle Streifen oder Flecken auf dem Oxid	zu hoher Kupfergehalt im Elektrolyten (> 0,2 bis 0,4 g/L Cu <sup>2+</sup> ) infolge Anodisierens kupferhaltiger Legierungen	Elektrolyten analysieren und Kupferionen entfernen*

\* Die Zugabe von 2 bis 3 g/L Chromsäureanhydrid oder von 6 bis 8 g/L Salpetersäure ist aus

**Tabelle 29: Anodisierfehler [33], (S. 257).**

#### 4.3.1.1 Eloxieren zusammengesetzter Teile

Bei zusammengesetzten einzelnen Teile aus dem gleichen Material und oder auch aus der gleicher Strukturen sollte man bei der Anodisierung darauf achten, dass diese Zusammenghörigkeit besteht. Ansonsten geht man das Risiko ein, dass Unterschiede im Aussehen nach der Behandlung auftreten, die sich auch bei nachträglichem Einfärben störend bemerkbar machen können. Dieses gilt für Leichtmetallnieten, Schrauben usw. Es ist aufgrund der glei-

chen Oberflächenbeschaffenheit des Materials vor dem Anodisieren nicht möglich, auf das Aussehen der Fertigprodukte zu schließen, [4], (S. 151).

Al-Werkstücke dürfen vor dem Eloxieren nicht mit anderen metallischen Teilen (z. B. Stahl, Kupfer, Messing usw.) zusammengebaut werden. Des Weiteren sind nach der Behandlung (Eloxieren) bei der Montage der Teile Beschädigungen der Oxidschichten zu vermeiden, da z. B. eine Kontaktkorrosion auftreten könnte. Ist ein unlösbarer Zusammenbau nicht zu umgehen (z. B. eingegossene Stifte), so sind diese Fremdmetalle der Eloxierbehandlung sehr sorgfältig mit geeigneten Mitteln, wie Schutzlacken, Kunstharzen, Schläuchen, Klebebandern oder Knetmassen od.ä. abzudecken. Hierfür sind schon bei der Konstruktion der Werkstücke Vorkehrungen zu treffen, [4], (S. 151).



**Abbildung 52: Fehler (Galvanische Korrosion), [38].**

Die Abbildung 55 zeigt eine galvanische Korrosion mit dem typischen Lochfrass, das insbesondere bei den Bauteilen aus hochlegierten AlCu- Gruppe auftritt. Die Ursache ist meistens der Kontakt dieses Werkstückes im feuchten Zustand (Kontaktkorrosion) mit einer metallischen Fläche nach der Zerspanung. Im uneloxierten Zustand ist diese Korrosionsart nur schwer erkennbar.

#### **4.3.1.2 Eloxieren von Schweißnähten.**

Schweißnähte sind ganz allgemein gut anodisierbar, wenn sie ordentlich ausgeführt sind. Der Schweißdraht sollte aus dem gleichen Material wie das Grundmaterial sein, da verschiedene Werkstoffe durch das Schweißen ihre Festigkeit verlieren. Aus diesem Grund ist ein erneutes Vergüten nach dem Schweißen fällig. Dagegen sind Weichlote fürs Eloxieren ungeeignet, da sie zu viel Fremdmetall enthalten. Als Folge werden die Lötstellen dann beim Anodisieren angegriffen. In dem dekorativen Eloxieren sind Schweißnähte an sichtbaren Stellen zu vermeiden. Auch bei sorgfältigstem Bearbeiten treten diese oft störend in Erscheinung und machen ein gleichmäßiges Einfärben unmöglich, [4], (S. 151).

#### **4.3.1.3 Endgültige Formgebung vor dem Eloxieren**

Die Teile sollen jeweils erst *nach* der mechanischen Bearbeitung, der gesamten Wärmebehandlung, der Verformungen und soweit wie möglich nach dem Anbringen der Bohrungen, eloxiert werden. Nach der Eloxalbehandlung sind die Fehler, die möglicherweise bei der Vorbehandlung gemacht würden, nicht mehr zu beseitigen, [4], (s. 151).

### **4.3.2 Messung der Oxidschichtdicke**

Um die Schichten messen zu können, sind einige Angaben oder Parameter mit den entsprechenden Eigenschaften in Betracht zu ziehen, [121], (S. 3632), vgl. Abb. 48 im Anhang (zeigt Schichtparameter und die dazugehörigen Messgrößen).

Die Oxidschichten werden durch zerstörungsfreie oder zerstörende Verfahren geprüft. Die Messung der Schichtdicke wird vorrangig mit Wirbelstromgeräten nach ISO 2360 oder DIN 50984 vorgenommen. Die Dicke der Oxidschicht auf die Sichtfläche wird an mindestens 5 Meßstellen eines Werkstückes von je 0,5 cm<sup>2</sup> Fläche mit 3 - 5 Einzelmessungen bestimmt. Der Mittelwert dieser Einzelmessungen gilt als Schichtdickenmesswert.

### **4.3.3 Prüfverfahren**

Die Methoden zur Schätzung der Abriebfestigkeit aus eloxiertem Aluminium basieren auf diesen Prinzipien, [122], (S. 41):

- Test, die tatsächliche Bedingungen simulieren
- Eindruckstest auf der Oberfläche oder im Querschnitt, darunter einzel oder wiederholter Ritzhärte- Test
- Schleifmittelstrahl- Test mit Sand, Aluminiumoxid oder Siliziumcarbidpulver, und auch mit frei fallenden Sand
- Schleifabnutzungstest mit Schleifpaper, Räder oder andere Materialien

Die große und laufend wachsende Bedeutung von Aluminium in den verschiedensten Anwendungsgebieten ist ohne die anodische Oxidation nicht denkbar. Dieser eindeutige Zusammenhang zwischen der Verwendung des Metalls Aluminium und der Oberflächenbehandlung – einer gesteuerten „Korrosion,, -, die bei keinem anderen Gebrauchsmetall angewandt wird, erklärt die Bedeutung und den Umfang der Arbeiten auf diesen Gebiet.

Mit der sehr schnellen und umfangreichen Entwicklung der anodischen Oxidation hat die Prüfung der Güte der so erzeugten Schichten nicht Schritt halten können. Dies wird nun schrittweise nachgeholt. So bestehen bereits seit einiger Zeit Normen für die Mindestschichtdicke und deren Messung [123], (S. 54).

Institutionen wie QUALANDO bzw. EURAS bemühen sich, um der Kontrolle oder Prüfung der anodisch erzeugten Oberflächen einen Qualitätsstandart zu verleihen.

Eine ziemlich leicht feststellbare Eigenschaft von Eloxalschichten ist die Güte der Verdichtung, z. B. mit Hilfe der Scheinleitwertmessung und / oder des Verlustfaktors [124], [125].

Hierbei ist allerdings eine erhebliche Einschränkung zu machen, die an der Atmosphäre stattfindenden natürlichen Verdichtung der Eloxalschicht beruht. Dieses auch „Alterung,, genannte Phänomen lässt bei unzureichend verdichteten Schichten – z. B. Scheinleitwert  $y = 30 \mu\text{S}$  Ausgangswert nach der Verdichtung – nach 30 Tagen einen Scheinleitwert von etwa  $12 \mu\text{S}$  auftreten, [124], [126]]. Nach eigenen Untersuchungen sinkt der Scheinleitwert im Laufe einer fünfjährigen Bewitterungszeit in stark belasteter Umwelt (Duisburger Hafen) auf etwa  $5 \mu\text{S}$ , wobei der Ausgangswert unmittelbar nach der Verdichtung kaum von Bedeutung ist, [127]. Dadurch ist die Aussagekraft dieser Verdichtungsprüfung auf die Zeit unmittelbar nach dem Vorgang reduziert. Angesehen von weiteren Schwierigkeiten bei der Scheinleitwert Messung

– mehr stufige Verfahren – ist es vom Standpunkt der Gütesicherung her sehr unbefriedigend, dass die Ursache auftretender Mängel, meist weiße Beläge nicht durch Meßmethoden mit objektivierbarer Aussage auch nach längeren Zeiten festgestellt werden kann.

Ferner noch ist darauf zu achten, dass der nach dem Verdichten anodisierter Teile fast immer zu beobachtende weißliche Belag nicht zu vergleichen mit der Kreidung ist, die in den meisten Fällen erst nach etwa 1 bis 2 Jahren bei Teilen auftritt, die der Witterung ausgesetzt wurden. Dies wird einem falschen Anodisieren (zu warmer Elektrolyt, zu hohe Stromdichte) zugeschrieben.

Prüfungen der Abriebfestigkeit von anodisiertem Aluminium angewandten Verfahren sind in [128], (S. 510) zusammengestellt. Zu unterscheiden sind im Wesentlichen zwei Verfahrensgruppen:

- 1, - Abriebprüfung mit Hilfe eines frei fallenden oder durch Pressluft beschleunigten Strahls von harten Teilchen wie z. B. Siliziumkarbid
- 2, - Abriebprüfung mit Hilfe einer rotierenden Scheibe und / oder eines gleitenden Reibrades

In solchen Fällen, muss man bei dem Versuch diese Oberfläche mit abrasiven Mitteln sauber machen, aufpassen, dass einen Teil der Schichtdicke der Oberfläche nicht abgetragen wird.

Ein derzeit einsatzbereites Prüfgerät der „Fa. Erichsen, Hermer- Sundwig,“ reibt mit einem auf eine Scheibe gespannten Schleifpapier auf einer Oxidschicht. Die Reibfläche ist 12,5 mm breit. Hier wird durch die sich bei jedem Hub weiterdrehende Scheibe – stets gleiche Reibbedingungen durch unverbrauchtes Schleifpapier – eine Schichtdickenminderung von etwa 5 µm nach 200 Doppelhüben bei einer Ordnungsgemäß hergestellten GS- Schicht erreicht. Bei GSX- Schicht ist die entsprechende Schichtdickenminderung bei 4 µm. Das Verfahren kann bei diesen Schichten also als zerstörungsfrei angesprochen werden, da die Prüfung eine gute Anodisation voraussetzt, da kaum eine Beeinträchtigung der Oxidschicht erfolgt, [124].

Eine eindeutige Aussage über die Beeinflussung der Langzeitwitterung auf eine anodisierte Oberfläche wurde noch nicht untersucht und dazu muss man erwähnen, dass es zur Zeit intensiv über Prüfmethode und -geräte geforscht wird, um die Haftfestigkeit oder die Abriebfestigkeit anodisch erzeugter Oxidschichten zu untersuchen.

Anodisierte, gefärbte und verdichtete Aluminiumoberflächen können z. B. auf Abriebfestigkeit mit Geräten wie der Taber- Abraser, die Jet- Stream- Methode und das Erichsen- Abriebprüfgerät typ 317 Al untersucht werden, [129], (S. 515).

#### **4.4 Korrosion und Korrosionsarten**

„Die Korrosion ist eine spezielle Art oder Form der Werkstoffzerstörung. Sie ist die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu Korrosionsschaden führen kann (Definition nach DIN 55900)“; [130], (S. 32). Im Gegenteil nennt man die Zerstörung durch mechanischen Einflüsse (Abnutzung, Verschleiß) Erosion. Nicht nur die metallischen Werkstoffe können korrodieren sondern auch Werkstoffe wie Holz, Beton, Kunststoffe, Glass, etc.. In manchen Fällen können unglücklicherweise Korrosion und Erosion zusammentreten.

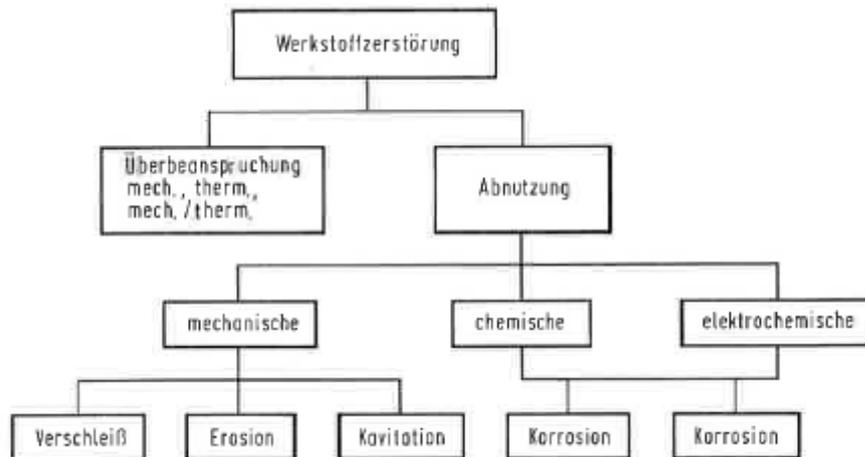


Abbildung 53: Arten der Werkstoffzerstörung [130], (S. 45)

#### 4.4.1.1 Korrosionsarten

In den folgenden Tabellen sind verschiedene Korrosionsarten aufgelistet.

a) Korrosion ohne mechanische Beanspruchung

1. Korrosionselemente
2. Spaltkorrosion
3. Berührungskorrosion
4. Selektive Korrosion
5. Interkristalline Korrosion
6. Spongiose
7. Streustromkorrosion
8. Stillstandkorrosion
9. Zunderung, Verzunderung
10. Taupunktkorrosion
11. Schweißwasserkorrosion
12. Mikrobiologische Korrosion u. a.

Tabelle 30: Korrosionsarten 1, [130], (S. 46)

b) Korrosion bei gleichzeitiger mechanischer Beanspruchung

Korrosionsarten
1. Spannungsrißkorrosion,
2. Schwingungskorrosion,
3. Erosionskorrosion
4. Kavitationskorrosion
5. Reibkorrosion u. a

**Tabelle 31: Korrosionsarten 2, [130], (S. 46)**

Der Korrosion und dem Verschleiß oder auch noch dem Abrieb der Oberflächen der Werkstücke entgegen zu treten, sind eigentlich die Hauptgründe, warum es anodisiert wird. Es kann auch zum Zweck Dekor geschehen aber grundsätzlich oder eher noch technisch gesehen, wird es oft eloxiert, um die Qualität der Oberflächen der Bauteile zu verbessern. Die oben zitierten Arten von Korrosionen sind die bekanntesten Formen, die man ihre Wirkung und / oder Vorgehensweise auf Werkstücke beherrschen sollte, wenn man eine Erfolgreiche Anodisierung eines Bauteiles durchführen möchte. Eloxierete bzw. harteloxierte Bauteile haben aus Erfahrung eine längere Lebensdauer vorzuweisen. Sie sind korrosionsbeständiger, verschleißbeständiger und abriebfester als nicht behandelte Aluminiumwerkstücke.

#### **4.4.1.2 Prozentualer Anteil der in einem großen chemischen Werk auftretenden Korrosionsarten**

Wie des weiteren geschildert wird, treten manchen Arten von Korrosion öfter als andere. Bis zu 33% beträgt der abtragende Korrosionsanteil der Gesamtprozentual. Gegen diese Form von Korrosion muss man besonders Acht geben und nicht nur beim Eloxieren sondern ganz allgemein.

- 33% abtragende Korrosion
- 19% transkristalline Spannungsrissskorrosion
- 11% Schwingungsrissskorrosion
- 6% interkristalline Spannungskorrosion
- 6% Verschleiß ( Reibung, Erosion, Kavitation )
- 5% Lochfraß
- 4% interkristalline Korrosion
- 3% nicht wässrige Hochtemperaturkorrosion
- 2% kathodische Spannungsrissskorrosion
- 1% Verschiedenes
- 17% zwei oder mehrere überlagerte Korrosionsarten [130], (S. 46)

#### **4.4.2 Korrosion von Aluminium**

Stromdichte-Potentialkurve eines passiven Metalls, hier Fe oder Al.

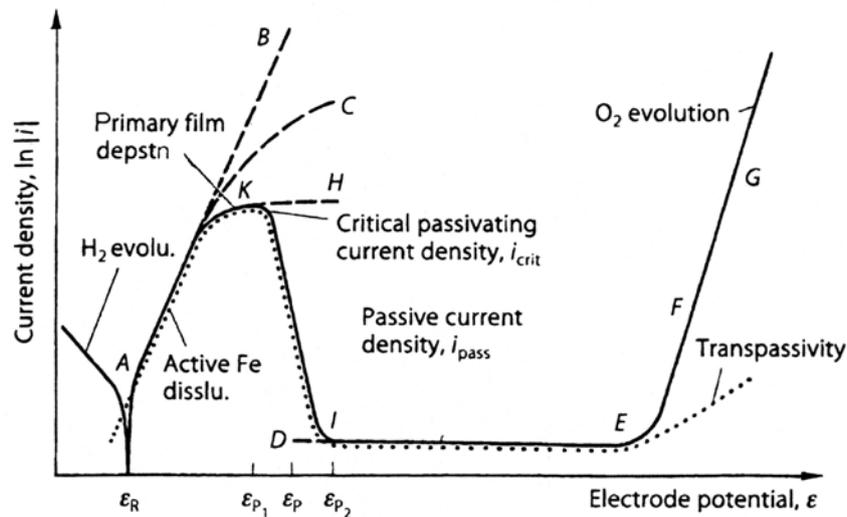


Abbildung 54: Stromdichte– Potentialkurve eines passiven Metalls, AL oder Fe [28], (S. 9. 10).

Das Ruhepotential (Korrosionspotential) liegt normalerweise bei  $\epsilon_R$ . Durch das Anlegen einer anodischen Spannung oberhalb von  $\epsilon_{p1}$  wird eine oxydische Deckschicht gebildet, die

- Oberhalb von  $\epsilon_{p2}$  dicht und halbleitend/isolierend ist
- Nur noch eine geringe Stromdichte  $i_{pass}$  zulässt.

→ Das Metall ist passiv.

Beispiele: Al, Mg, Fe in  $H_2SO_4$ , Ti, Stahl mit Cr > 13 %, X5NiCr1810, etc.

#### 4.4.2.1 Lochfraß / Verlust der Passivität

Eigenschaften von Passivschichten sind die Folgenden:

- Dicht gegen  $H_2O$ ,  $O_2$ , Ionen
- Elektrisch isolierend oder halbleitend
- Haftfest auf Grundmetall
- Praktisch nicht löslich in  $H_2O$

→ Lochfraß des Aluminiums (engl.: Pitting Corrosion)

Lochfraß ist eine spezielle Kombination aus Verlust der Passivität und einer Lokalelementbildung. Der Mechanismus läuft wie folgt:

- Adsorption von Chlor an der Oberfläche
- Lokales Anlösen von Al als  $AlCl_3 \cdot 6 H_2O$
- Bilden eines kleinen Loches (Pit)
- Ansäuern des Lochelektrolyten durch Protonen
- Kleines Loch wird aktiv = Anode, hohe Stromdichte  $j$

- Aluminiumoberfläche: passive Kathodenfläche
- Chlor verbraucht sich nicht!

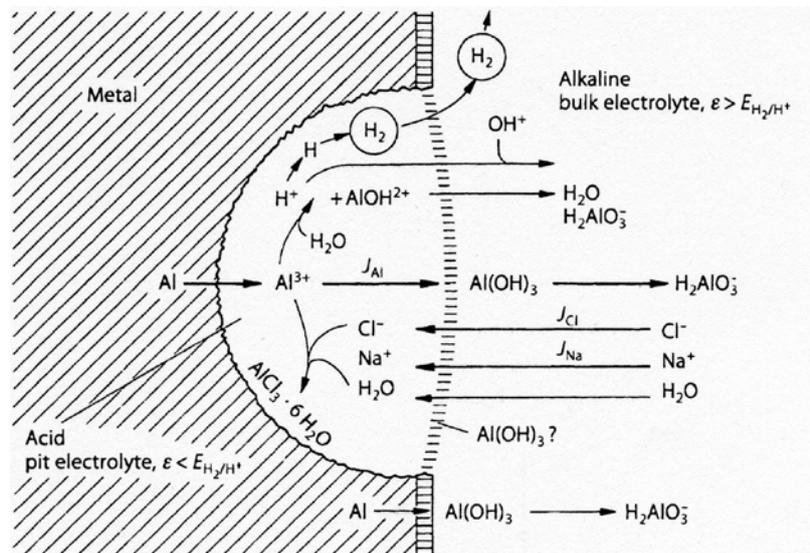


Abbildung 55: Lochfraß bei Aluminiums [28], (S. 13).

#### Anodische Oxidation = Eloxieren

Al wird in  $H_2SO_4$ -Lösung positiv (anodisch) polarisiert

→ elektrochemisches Wachstum von 10 - 20  $\mu m$  porösem Oxid

Einlagern von Farbstoff in die Poren

→ beliebige "Färbung" von Al-Oberflächen („Eloxal“)

Das Aluminium-Oxid ist etwa zwischen pH5 und pH8 stabil. E5767

#### 4.4.3 Korrosionsbeständigkeit von Eloxal

Schwefelsäure- Eloxieren wird ziemlich oft als Verfahren wegen der guten Korrosionsbeständigkeit gewählt. Die Aluminiumkomponenten werden stets in kochendem Wasser oder Wasserdampf nach dem Eloxieren abgedichtet (Sealing). Hartanodierte Teile werden auch manchmal in unverschlossenen Zustand geliefert, um eine maximale Abriebfestigkeit zu erzielen. Selbst in diesem Zustand haben die durch Schwefelsäure- Anodisierungsverfahren behandelten Teile eine gute Korrosionsbeständigkeit.

Langzeitkorrosionsschutztest in Meeres und industriellen Umgebungen haben gezeigt, dass hartanodische Oxidschichten, sowohl versiegelten als auch unversiegelten, sehr günstig im Vergleich mit 18/8 Edelstahl und sind deutlich besser als 5% Chromstahl, [55], (S.13).

Long term corrosion tests

1 years exposure	Marine Atmosphere	Industrial Atmosphere
Hard anodised, not sealed	No corrosion	No corrosion
Hard anodised, Dichromate sealed	No corrosion	No corrosion
Hard anodised, PTFE sealed	No corrosion	No corrosion
Cadmium plated	Slight corrosion	Heavy corrosion
18/8 Stainless Steel	No corrosion	No corrosion
Hard Chrome Plate	Very slight corrosion	Very slight corrosion
5% Chrome Steel	Heavy corrosion	Heavy corrosion

**Tabelle 32: Langzeit Korrosionstest, [55], (S. 13)**

Übersetzung: Engl.: Hard anodised: Hartanodisiert      cadmium plated: Cadmium vernickelt  
 Sealing: Verdichtung      Hard chrome plate: Hartchromplatte  
 Not sealed: nicht abgedichte      Chrome steel: Chromstahl  
 No corrosion: keine Korrosion      very slight corrosion: sehr leichte

**Heavy corrosion: schwere Korrosion**

Ergebnisse zeigen, dass niedrige Zugspannungen in der Zukunft in beschichteten Proben angewendet werden sollte, um eine Beschädigung der Eloxalschicht zu vermeiden, [83], (S. 06496/8). Die Beschichtungsschnittstellenmängel und offene Porosität müssen bearbeitet werden, um die Erscheinungen von Spalt- und Lochkorrosion auf dem Substrat an der Grenzfläche zu beseitigen. Folgende Studie zeigt, dass die interkristallinen Rissbildungen vorherrschend waren aber in diesem Fall wurde der Bruch durch SCC („Stress Corrosion Cracking“ / Spannungsrisskorrosion) hervorgerufen.

Ein weiterer Weg, um die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen, ist die Luft- und Raumfahrt-Al-Legierungen für die Farblackierung vorzubereiten. Dies kann auf verschiedene Weisen geschehen, wie Chromatkonversionsschicht und Eloxieren bzw. Anodisieren.

Eine Eloxalschicht kann in nicht poröse (Barriere Oxide) und poröse Oxidfilme unterteilt werden. Diese Oxidschicht kann im Kleben als Vorstufe oder Vorbehandlung benutzt werden. Die beiden großen Möglichkeiten, dies zu tun, wäre die Teile durch die Chromsäure- Eloxieren oder Phosphor- Säure behandeln zu lassen. Beide Verfahren werden ausgiebig zu Aluminium für strukturelles Kleben und Lackieren angewendet, um eine gute Haftung zu gewährleisten. Ein weiterer Weg, eine poröse Oxidschicht erzeugen zu können, wird durch Schwefelsäure- Eloxieren ermöglicht. Schwefelsäure- Eloxieren kann in zwei Hauptprozesse, eine konventionelle und eine Hartanodisieren aufgeteilt werden.

Die Anwendung des Eloxal- Verfahrens oder Anodisierens ist in der Luftfahrtindustrie ziemlich weit verbreitet. Neue Erkenntnisse der Einflüsse der Aluminiumlegierungselemente auf das Anodisieren von kommerziellen Aluminium- Legierungen und besonders ihre Anwendbarkeit auf Teilchen der zweiten Phase während des Verfahrens ermöglichen diese Verbreitung. Durch genauere Kenntnis von der Reaktion der Materialien der zweiten Phasen einer anodischen Polarisation können das Anodisieren und verwandte Oberflächenbehandlungs-

verfahren entwickelt und verbessert werden. D. h. die Leistung der Legierungselemente kann beim Eloxieren durch die neuen gewonnenen Erkenntnisse positiv beeinflusst werden [60], (S. 228). Leichtigkeit, Festigkeit und Haltbarkeit werden in der Regel in der Luft- und Raumfahrt erwünscht. Von den metallischen Materialien sind Aluminium-Legierungen, die öfter eingesetzt werden, weil sie diese Anforderungen erfüllen. Leichtigkeit und Stärke sind vor allem intrinsische Eigenschaften der Legierungen, während Haltbarkeit wird oft durch Oberflächenphänomene, insbesondere Wechselwirkungen zwischen den Legierungen und der Umgebung beeinflusst. Dies kann z. B. die Erscheinung der Korrosion in seinen verschiedenen Erscheinungsformen begünstigen.

- interkristalline Korrosion
- Lochfraß Korrosion
- Rissbildung
- Ermüdung usw.

Die Tatsache, dass Aluminium relativ weich ist, kann auch zum Problem werden; besonders, wenn darum geht, den Verschleiß zu minimieren. Deswegen wird eine breite Palette von Schutzmaßnahmen angewendet, um die Integrität der Legierungsoberflächen zu erhalten. Dies hat zur Folge, dass die Notwendigkeit der Wartung und Reparatur minimiert und die Lebensdauer der Komponenten maximiert wird.

#### **4.4.3.1 Einfluss der Vorbehandlung auf die Korrosionsbeständigkeit**

In einer Studie wurden die Oberflächen von 7075-T73 Aluminium in Vorbehandlung zum Eloxieren untersucht. Lokalisierte Korrosionsschäden in diesem Al-Legierungstyp in verschiedenen Vorbehandlungen wurden festgestellt und die Oberflächenkorrosion im Rasterelektronenmikroskopie (SEM) untersucht. Darüber hinaus wurden die EDX –Analyse (energie-dispersive Röntgenspektroskopie für die Teilchenidentifikation der 2. Phase benutzt [93], (S. 674). In der Luft- und Raumfahrttechnik werden manche Bauteile z. B. der Hydraulikverteiler und ähnlichen Flugsteuerungsteile aus hochfesten Al-Legierungen hergestellt. Die Oberflächen werden dabei weitgehend anodisiert, um z. B. den Korrosionsschutz zu erhöhen. Weil Bauteilversagen durch die Anwesenheit dieser Oberflächenfehler beschleunigt werden kann, ist ein umfassendes Verständnis dieser Vorbehandlungs-Korrosionsmechanismen daher von wissenschaftlichem Interesse und hat technologische Bedeutung [93], (S. 674).

In einer Studie wurde der Einfluss der verschiedenen Kategorien der Vorbehandlungslösungen auf das Korrosionsverhalten von 7075-T73 Aluminiumproben unter der Lupe genommen, [93]:

- Kategorie 1: Flüssige Entfettung
- Kategorie 2: „non etching (engl. nicht ätzend) alkalische Reiniger
- Kategorie 3: „ etching / ätzender Reiniger
- Kategorie 4: niedriger pH Säure basierte Desoxidatoren
- Kategorie 5: niedriger pH Schwefel- und Chromsäure (für den Eloxalprozess )

Die Proben wurden an verschiedenen Lösungen und Kombination von Lösungen behandelt, um ihre korrosiven Wirkungen zu untersuchen. Eine Probe ließ man durch das komplette Eloxalverfahren gehen.

Eine letzte Bemerkung ist, dass die 7075- Legierung signifikante interkristalline Angriffe nach 1200 s Exposition zeigte. Diese wurde zu einer hohen Konzentration von Niederschlag Teilchen am Korngrenzen für diese längere Belichtungszeit zugeschrieben. Es ist wichtig diese Art von Schäden rechtzeitig zu erkennen, um Gegenmaßnahmen zu setzen.

Es wurde weiter festgestellt, dass die Kategorien 1 und 2 Lösungen keine Korrosionsschäden verursachten, während die Kategorien 3 und 4 Lösungen sich negativ auswirkten und besonders die Kategorie 3 „hohe pH- Wert Ätzlösung“ die aggressivste war, was zu schweren allgemeine und kurze örtliche Angriffe führte.

Die niedrige pH Desoxidator Lösung verursachte, nach 600 s Belichtung, allgemeine Angriffe und lokalisierten Lochfraß. Diese Lösung war viel weniger aggressiv als die Lauge. Vertiefungen (Pits), die bei der Vorbehandlung über einen Schwellenwert hinaus gehen oder eine kritische Größe von ca.10 µm aufwiesen, erhöhen ihre Größe während des nachfolgenden Anodisierungsverfahrens [93], (S. 680); d. h. sie werden während des folgenden Eloxalverfahrens eher größer und nicht umgekehrt, also diese Arten von Säuren sind mit Vorsicht zu verwenden.

## **4.5 Verschleiß und Verschleißarten**

Im Gegensatz zur Korrosion wird die Zerstörung durch mechanische Einflüsse „Verschleiß“, genannt. „Der Verschleiß bezeichnet nach der 1997 zurückgezogenen DIN 50320 den fortschreitenden Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers ( Grundkörper ), hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt- Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers „ [1], (S. 38).

Als Folge, entsteht einen Massenverlust, in diesem Fall einen Oberflächenabtrag eines Werkstoffes durch schleifende, rollende, schlagende, kratzende, chemische und thermische Beanspruchung. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Verschleiß auch mit anderen Arten der Abnutzung gleichgestellt.

Eigentlich ist der Verschleiß unerwünscht aber im Fall „Einlaufvorgängen“, kann er toleriert werden. Er tritt meistens zum Beispiel an Lagern, Kupplungen, Getrieben, Düsen und Bremsen auf, sowie als Werkzeugschneidverschleiß. Der Verschleiß ist einer der Hauptursachen für Bauteilschädigungen und den damit verbundenen Ausfall von Maschinen und Geräten. Die Verringerung vom Verschleiß ist darum eine wesentliche Möglichkeit, die Lebensdauer von Maschinen und Geräten zu erhöhen und damit die Kosten und Rohstoffe einzusparen. Andererseits wird versucht, den nicht zu vermeidenden Verschleiß auf einfach auszutauschende Bauteile einzugrenzen, die man unter dem Begriff Verschleißteil zusammenfasst, [131].

Die Verschleißbeständigkeit eines Werkstückes hängt sehr stark von der Härte der Oxidschicht ab. Es ist allerdingst nicht leicht eine eigentlich direkte Proportionalität zwischen den beiden Größen zu finden, [41], (S. 313).

### **4.5.1 Mechanismen des Verschleißes**

Der Verschleiß wird hauptsächlich durch unterschiedliche Verschleißmechanismen bestimmt [1], (S. 39) diese sind:

- adhäsiver Verschleiß
- abrasiver Verschleiß
- Oberflächenzerrüttung
- Tribooxidation

Gegen den oben beschriebenen Verlauf des Verschleißes sollte man prinzipiell vorgehen, in dem die Bauteile z. B. eloxiert oder harteloxiert werden. Diese Art der Beschichtung ist prinzipiell geeignet, um die Korrosion, den Verschleiß oder den Abrieb zu vermindern bzw. zu stoppen.

### **4.5.2 Abrieb**

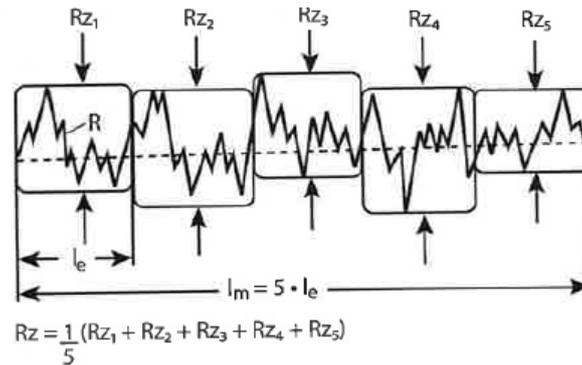
Der Abrieb wird auch von manchen Autoren „Abrasion“, genannt. Er wird als entstandenen Materialverlust an den Oberflächen von beschichteten Materialien während ihrer Benutzung oder Transport etc. verstanden. Der Abrieb wird beispielweise durch die Reibung verursacht und dadurch entstehen sehr feine Partikel, [132].

Er zerstört genauso wie die Korrosion und den Verschleiß die Oberfläche des betroffenen Werkstückes und muss deshalb erforscht und bekämpft werden.

### **4.5.3 Einfluss der Rauheit**

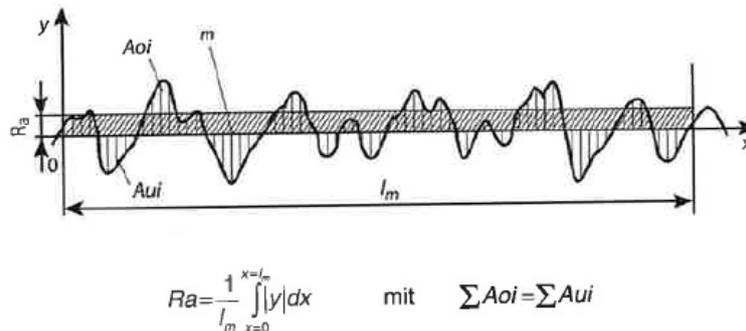
Die Verschleißfestigkeit eines Werkstoffes hängt ziemlich stark von seinem Oberflächenzustand ab. Für anodisierte bzw. eloxierte Oberflächen ist dies ein wichtiger Faktor, obschon man im Allgemeinen mit kleinen spezifischen Belastungen arbeitet. „Es ist gerade bei Werkstoffen, die gerade wärmeisolierend sind wie Aluminiumoxid, notwendig, die Oberfläche so glatt wie möglich zu machen, um den Reibungskoeffizient herabzusetzen und die spezifische Belastung auf ein rein Minimum zu reduzieren. So können lokale Überhitzungen und Zerstörungen der Schicht an den Kontaktpunkten vermindern werden,“ [41], (S.313). Der Zustand einer Oberfläche bezogen auf die Rauheit ist somit ernsthaft beim Eloxieren oder Harteloxieren von Bauteilen in Betracht zu ziehen. Fein und einige Maße homogen sollte die zu behandelnde Oberfläche sein, um die erwarteten Eigenschaften nach der Behandlung zu erfüllen. Vorbehandlungen oder Zustände der Oberflächen vor dem Anodisieren sind im Verfahren einzubeziehen, damit ein akzeptables oder gutes Ergebnis am Ende der Behandlung zu erwartet ist.

In der Literatur wird die Rautiefe  $R_z$  einer Oberfläche als Mittelwert aus Einzelrautiefen wiedergegeben. Sie beschreibt die Unebenheit einer Oberflächenhöhe. Die Größe der Rautiefe einer Oberfläche kann als Parameter des Verfahrens angesehen werden und hat somit eine Wirkung auf die am Ende des Verfahrens erhaltene Qualität der Oxidschicht. Es gilt im Allgemeinen aus der Erfahrung, je feiner und homogener die Oberfläche ist desto besser sollte die Haftung der eloxierten Oxidschicht auf dem Grundwerkstoff sein, da z. B. ein gesundes Wachstum der Poren gegeben wird.



**Abbildung 56: Gemittelte Rautiefe  $R_z$ : Mittelwert aus den Einzelrautiefen ( $R_{z1} \dots R_{z5}$ ) fünf aufeinander folgender Einzelmessstrecken  $l_e$  (nach DIN 4760 [14]) [1], (S. 6)**

Der Mittenrauwert  $R_a$  ist definiert als der arithmetische Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils  $R$  von der mittleren Bezugslinie innerhalb einer gegebenen Messstrecke, siehe hierzu die Abbildung 57. Der Mittenrauwert entspricht theoretisch dem Abstand mehrerer Linien, die sich bilden, wenn die Berge Oberhalb der Mittellinie und die Täler unterhalb der Mittellinie in gleich große Rechtecke verwandelt werden, [133], (S. 4/17). Der Mittenrauwert stellt die mittlere Abweichung des Profils von der mittleren Linie dar. Er unterscheidet nicht zwischen Spitzen und Riefen.



**Abbildung 57: Mittenrauwert  $R_a$ : arithmetischer Mittelwert aller Abweichungen des Rauheitsprofils  $R$  von der mittleren Bezugslinie innerhalb der Messstrecke  $l_m$  ( nach DIN 4760 [14], [1], (S. 6)**

Die Rautiefe  $R_z$  und der Mittenrauwert  $R_a$  sind beim Eloxieren oder Harteloxieren in Betracht zu ziehen. Deswegen können die zu eloxierenden oder harteloxierenden Teile je nach Bedarf in der Vorbehandlungsphase z. B. zu polieren oder zu schleifen sein.

Die Randzone einer technischen Oberfläche besteht aus mehreren Grenzschichten: [1], (S. 7).

- Die äußere Grenzschicht oder Schicht, auf der die Verunreinigungen sich setzen
- Adsorptionsschicht (molekulare oder atomare Anlagerung von Flüssigkeiten oder Gasen)
- Oxid- oder Reaktionsschichten (1- 10 nm)
- innere Grenzschicht (verformte Schicht abhängig von Bearbeitungsverfahren)
- Grundwerkstoff

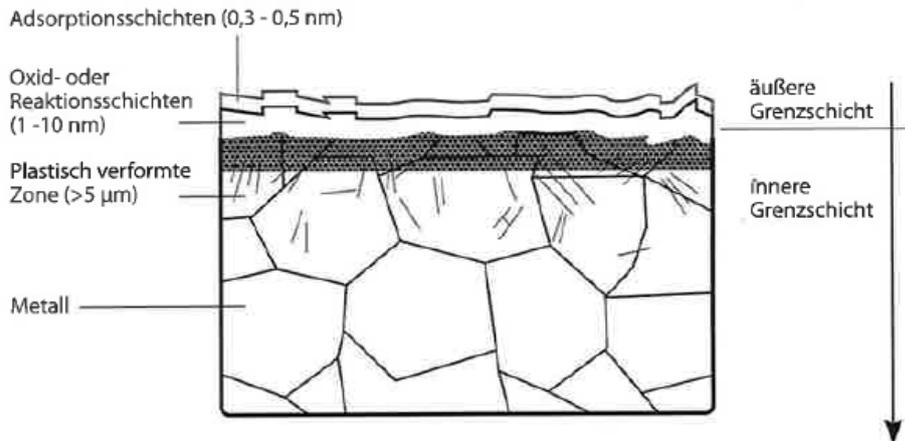


Abbildung 58: Aufbau einer metallischen Oberfläche [1], (S. 7)

Da es sich hier um eine Oberflächenbehandlung handelt, ist es sinnvoll ganz allgemein eine metallische Oberfläche zu beschreiben. Schließlich wird doch diese Oberfläche oder Schicht eloxiert oder harteloxiert. Eine genaue Darstellung der Grundstruktur einer metallischen Oberfläche mit den dazu gehörigen Funktionen kann hier nur vorteilhaft sein.

Chemischen oder mechanischen Vorbehandlung bieten Möglichkeiten betreffend Rautiefe Sonderwünsche auf anodisierten bzw. eloxierten Oberflächen zu erzeugen oder zu ergänzen. Rautiefenvermessungen inkl. Auswertungen mit modernsten Messmitteln lassen sich heute bei den meisten Firmen durchführen, [30]. Je feiner und homogener die Oberfläche eines zu eloxierenden Bauteiles ist, desto besser wird die Qualität der erhaltenen Oxidschicht, bezüglich der Oberflächenvorbehandlung.

#### 4.5.4 Verschleißbeständigkeit von Eloxal

Auf dem Grundwerkstoff (Aluminium) wird die Oberfläche beim Eloxieren in einer Oxidschicht umgewandelt - Abbildung 59.



Abbildung 59: eloxierter Bauteil, [116], (S. 3/5).

Die Haftung der behandelten Schicht (Oxidschicht) auf dem Grundwerkstoff beruht auf chemische Bindungskräfte, die als ausgezeichnet angesehen werden. Auch bei hohen mechanischen oder thermischen Beanspruchungen ist die Haftung zwischen dem Grundwerkstoff und Oberfläche gemäß Literatur prinzipiell als gut zu bezeichnen.

Harteleoxal / Härte / Verschleißart

„Die Verschleißbeständigkeit der Eloxalschichten ist in der Regel sehr gut. In den Modellversuchen zum abrasiven Verschleiß (Taber- Abraser und Stift- Scheibe- Tribometer ) können anodisch hergestellte Schichten ihre hervorragenden Eigenschaften zeigen“, [134].

In Tabelle 33 sind die Eigenschaften von Standard- und Harteleoxal, sowie PEO-Schichten (Plasma Electrolytic Oxidation / Plasmaelektrolytische Oxidation) miteinander verglichen.

	Härte [HV]	Schichtdicke [ $\mu\text{m}$ ]	Eigenschaften
Eloxal	250-350	5-30	verschleißfest und korrosionsbeständig
Harteleoxal	450-550	30-150	verschleißfest und korrosionsbeständig
PEO	1300-2000	10-200	bis zu 7-fach höherer Verschleißschutz und bis zu 3-fache höhere Härte als Harteleoxal
Dyamondzyte Schicht	k.A.	k.A.	k.A.

Tabelle 33: Härte und Schichtdicke unterschiedlicher Eloxal-Schichten

#### 4.5.5 Verschleißtest nach Norm ISO 8251: 2011

Die Oberfläche des zu testenden Werkstückes bewegt sich unter einem durch eine abrasive Streife bedeckten Rad. Die Schleifscheibe hat eine Geschwindigkeit von 1 / 400 voll Umdrehungen für jede Hin- und Herbewegung der Probe. Es wird auf der Prüffläche durch eine Federlast von 4, 9 N (500 g) gedrückt. Die Probe macht 40 Pendelbewegungen pro Minute, was eine Testzeit von 10 min. pro 400 Abnutzungszyklen entspricht. Danach wird das Schleifband gewechselt. Der Verschleißwert entspricht der benötigten Anzahl der Zyklen, um 1  $\mu\text{m}$  des Oxids zu entfernen. Ein hoher Wert entspricht einer hohen Verschleißfestigkeit, [135], (S. 995). Die Dicke vor und nach dem abrasiven Test wird mit einem Wirbelstrom- Messgerät gemessen, das zwischen 10 und 45  $\mu\text{m}$  kalibriert ist. Die Messung stimmt mit mikroskopischen Bestimmungen auf einem Querschnitt überein. Die Dicke wird auf der Grundlage von drei bis vier Messungen ( $n = 4$ ) bestimmt. Die Genauigkeit der Verschleißfestigkeit mit  $\pm 2$  berechnet, ist besser als 95 Prozent (siehe hierzu die Abbildung 34)

Messungen	Verschleißfestigkeit Zyklen / $\mu\text{m}$	Standard Abweichung	
		$\pm 2\sigma$	%
2	261	22	8.4
3	240	11	4.6
4	240	10	4.2
5	245	9	3.7

Tabelle 34: Auswertung Verschleißtest bzw. Bestimmung der Verschleißfestigkeit

#### 4.6 Erkenntnisse aus der Literaturrecherche

Das Eloxalverfahren ist eine relativ alte Beschichtungstechnologie, die auch in der Zukunft viele Anwendungsgebiete haben wird.

Die Stärke des Verfahrens bzw. von Eloxalschichten liegt sicherlich in der Vielfalt der einstellbaren Eigenschaften über die Mikrostruktur. Das sind Dekor und Design (Färben), Lebensmittelverträglichkeit, Verschleißfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, elektrische Isolation, Hitzebeständigkeit, gute Gleiteigenschaften, Verbesserung der Klebbarkeit und andere mehr.

Als Nachteil müssen der größere Aufwand bei Eloxalreparaturen, und die Überprüfung, die Beherrschung sowie die umweltgerechte Entsorgung der Bäder, sowie die Vielfalt an Prozessschritten bei einer relativ langen Durchlaufzeit genannt werden. Ferner ist man in der Eloxierbarkeit auf bestimmte Legierungen beschränkt, um die Eigenschaften von Eloxalschichten optimal nutzen zu können

Die Literatur zu den Anwendungsgebieten zeigt, dass Eloxal mit der Anwendung von Aluminium (insbesondere im Leichtbau) stetig steigen sollte; wobei es nicht (kostenfrei) möglich war an aktuelle Markprognosen über die Entwicklung der Eloxalanwendungen zu kommen.

## 5. VERSCHLEIßTESTS AN ELOXAL

### 5.1 Praktische Verschleißtests am IWS

#### 5.1.1 Beschreibung der Proben und Eloxalschichten

Es wurden 11 eloxierte Airbag Komponente aus Al-Guss AC5083 für die Verschleißtests von der Firma Heuberger übergeben, siehe **Abbildung 60**.



**Abbildung 60: Airbag-Komponente (Volkswagen) / EN AC 5083 Guss / Schichtdicken 10-25µm (Proben: N1-N6 und H1-H5)**

Die Eloxalschichten wurden in Schwefelsäure (GS-Verfahren) und in Schwefel-Oxalsäure-Gemisch (GSX-Verfahren) bei verschiedenen Temperaturen (15-25°C) bei Fa. Heuberger Eloxal hergestellt (Angaben zur Stromdichte liegen nicht vor), wobei Schichtdicken von 10 bis 25 µm laut Angabe eingestellt wurden; siehe Tabelle 35.

	H1	H2	H3	H4	H5	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Elektrolyt/Stromart	GXS					GS					
Temperatur [°C]	k.A.					17	20	17	20	17	20
Schichtdicke [µm] lt. Angabe	15	20	25	10	15	15	15	20	20	25	25

**Tabelle 35: Verfahrensparameter Eloxalschichten auf AC 5083 (GXS ... Gleichstrom in Schwefel-/Eloxalsäure – „Harteloxal“ / GS ... Gleichstrom in Schwefelsäure / k.A. ... keine Angaben)**

#### 5.1.2 Versuchsdurchführung und Verschleißparameter

Hierbei handelt es sich um einen Pin on Disk Test. Die Probe wird auf die Scheibenaufnahme (Oberteil) aufgeschraubt und im Kopf der FSW-Anlage fixiert, **Abbildung 61**. Die Prüfkraft  $F_N$  wird über die Gewichtskraft und das Hebelverhältnis eingestellt ( $F_N = F_{GM} \cdot (l_{GM}/l_N)$ ). Als Pin dient ein FSW Werkzeug aus WC-Co, **Abbildung 61**.

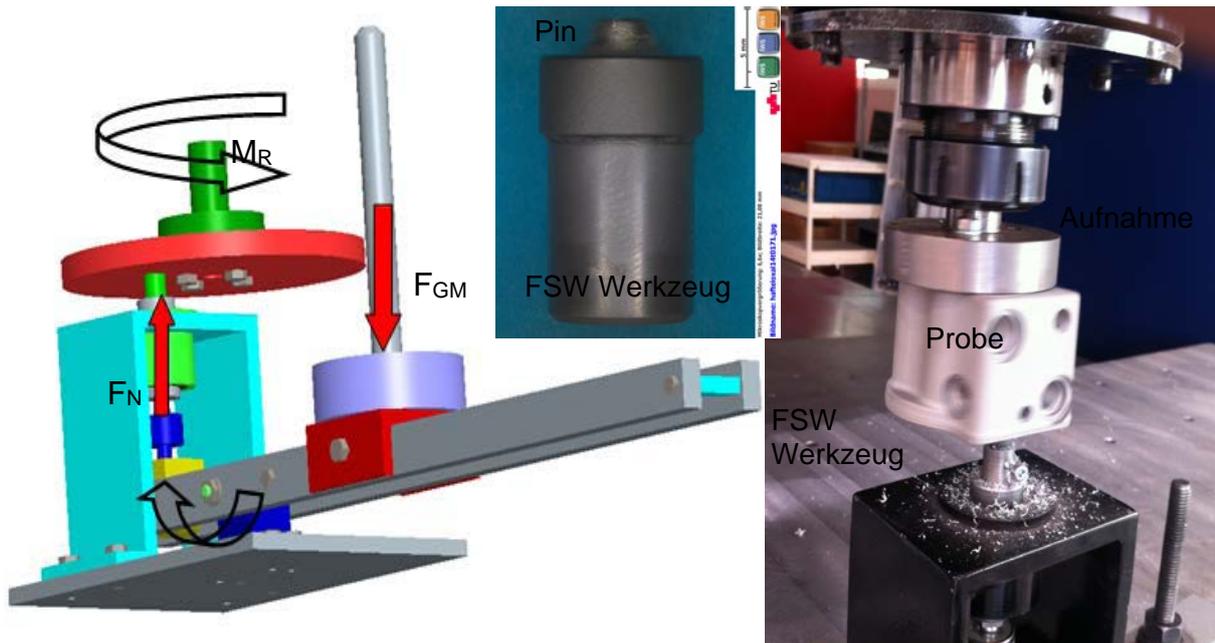


Abbildung 61: (li.) Vorrichtung [136] ( $M_R$  Drehmoment;  $F_{GM}/F_N$  Gewichts-/Prüfkraft) / (mi.) FSW Werkzeug (Pin) aus WC-Co in Arbeitsposition; Pinlänge/-durchmesser 2,4/3mm / (re.) Versuchsaufbau an der FSW während der Verschleißprüfung (IWS)

Die Verschleißtests wurden wie folgt durchgeführt:

- Montage der Probe in die Scheibenaufnahme und Prüfung des Pins
- Einstellung des Nullpunktes (Pin auf der Probenoberfläche)
- Einstellung der Parameter (Drehzahl, Druck bzw. Kraft, Zeit, usw.)
- Kontrolle und Versuchsdurchführung / die Probe dreht sich, der Pin ist fix montiert.
- Verschleißvorrichtung, FSW-Anlage und Probe vor Beginn des Versuches bzw. zwischen den Tests reinigen

Die verwendeten Versuchsparameter für die Verschleißtests sind in Tabelle 36 dargestellt.

Probe- Nr.	Prüfkraft $F_N$ [N]	Druck [N/mm <sup>2</sup> ]	Drehzahl [U/min]	Geschwindigkeit [m/s]	Weg [m]
H1, H5	270	38	10	0,035	74
H2, H3, H4	270	38	10	0,035	14
N1-N6	170	24	33	0,035	14

Tabelle 36: Parameter Verschleißtests

## 5.2 Makroskopisches Erscheinungsbild der Verschleißspur und Schliffentnahme

In Abbildung 62 ist die Verschleißspur auf der Prüffläche der Probe H1 zu sehen. Auffällig ist die ungleichmäßige Breite derselben bzw. erscheint diese ungleichmäßig tief, die vermutlich auf die fehlende Parallelität der Aufspannfläche im Vergleich zur Prüffläche zurück zu führen ist. Die Markierungen a, b und c beschreiben die Position der Schliffentnahme.

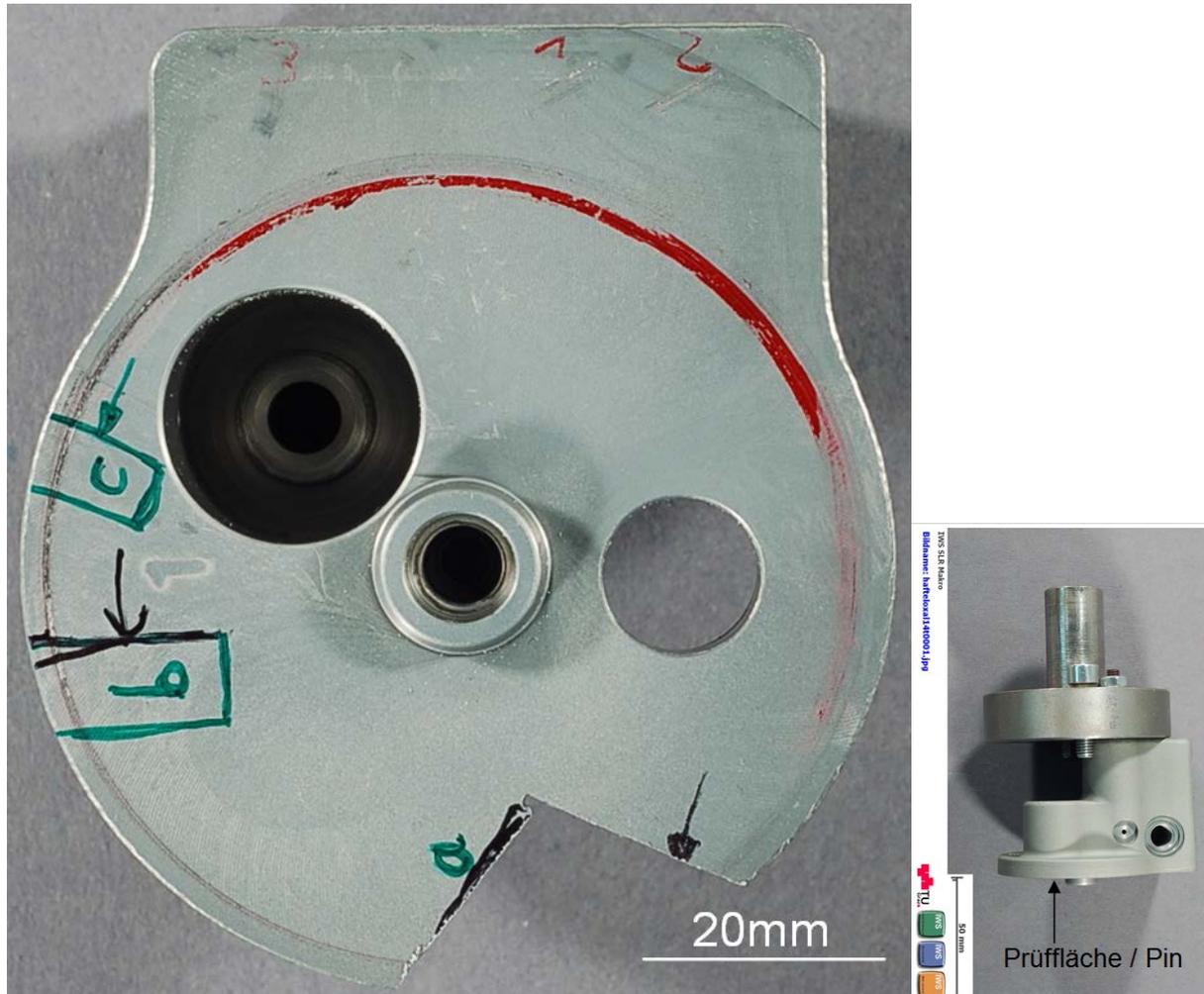


Abbildung 62: (li.) Probe H1 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme auf der Prüffläche; (re.) Lage der Prüffläche

In Abbildung 63 ist die Verschleißspur auf Probe H2 zu sehen. Diese erscheint am Großteil des Umfanges metallisch glänzend; was vermuten lässt, dass die Eloxalschicht dort nicht mehr vorhanden ist (Schlifflage 2b). Bei Schlifflage 2a sind noch Eloxal-Reste vorhanden und die Verschleißspur ist schmaler. Dies deutet wiederum auf eine ungleichmäßige bzw. zu starke Belastung hin. Weitere makroskopische Aufnahmen der Prüfflächen von H3 bis H5 sind im Anhang (**Abbildung 94** bis **Abbildung 96**) zu sehen.



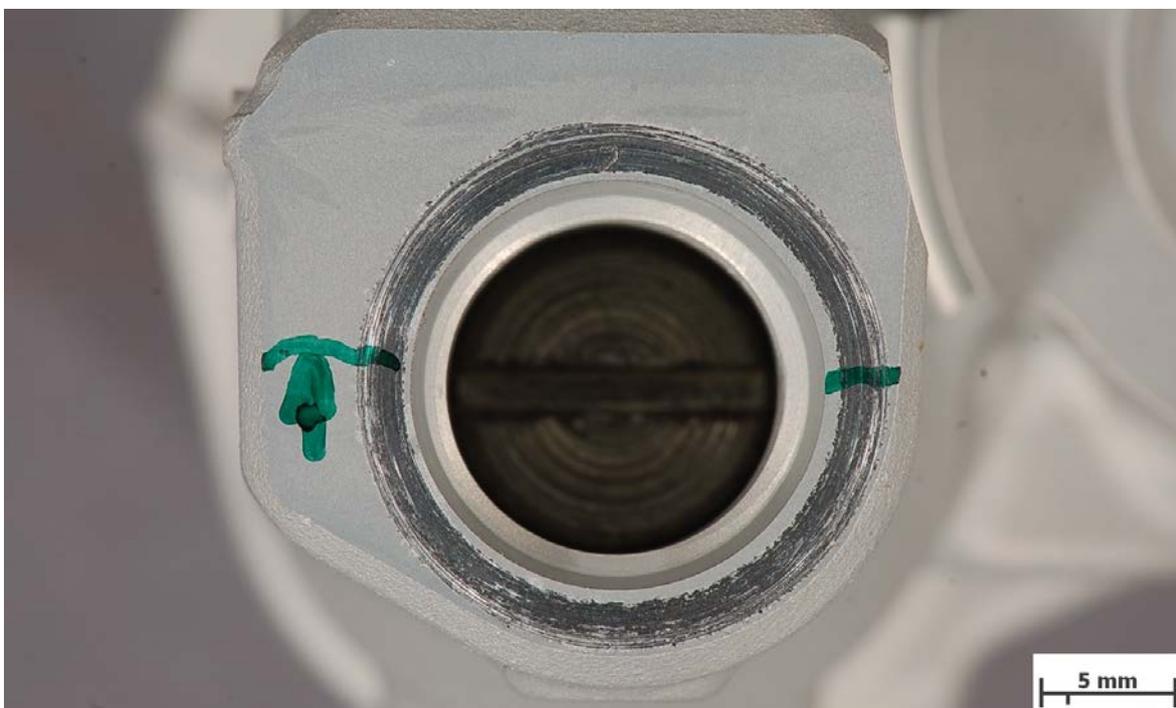
IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0034.jpg



Abbildung 63: Probe H2 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme 2a und 2b.

In Abbildung 64 ist die Verschleißspur auf der Prüffläche auf Probe N1 zu sehen. Diese erscheint schwarz verfärbt, d.h. möglicherweise sind noch Eloxalreste vorhanden. Der Pfeil markiert die Schlifflage. Die übrigen Verschleißspuren der Proben N2 bis N6 erscheinen ähnlich und sind in Abbildung 97 bis Abbildung 102 Anhang dargestellt.



IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0127.jpg



Abbildung 64: Probe N1 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme.

### 5.3 Anfertigung metallographischer Schliffe

Von allen 11 eloxierten Proben (Airbag Komponenten, Al-Guss AC5083) wurden metallographische Schliffe angefertigt, die Schlifflagen sind in **Abbildung 62** bis **Abbildung 64** und **Abbildung 94** bis **Abbildung 102** eingezeichnet.

Zur Schliffanfertigung wurde wie folgt vorgegangen:

- Vorbereitung: Analyse der Spur und der gewünschte Schlifflage; Markierung bzw. Nummerierung.
- Makrofoto der Prüffläche bzw. Verschleißspur anfertigen
- Schliff vorbereiten (sägen bzw. schneiden, schleifen)
- Schliff einbetten (Sichtrichtung beachten) / Montage wegen Druckverteilung vorzugsweise 2, 3 oder 6 Stücke pro Träger
- schleifen (Schleifpapier bis Korngröße: 4000 für Aluminium Leichtmetalle)
- OPS- Polieren
- Ultraschallreinigen
- Trocknen lassen

### 5.4 Eloxal-Härte und Schichtdickemessung

In **Abbildung 65** ist an Hand der Probe H3 das Erscheinungsbild der Eloxalschicht im Lichtmikroskop dargestellt. Die Schichtdicke liegt etwas unter den angegebenen 25µm. Die durchgeführte Mikrohärtemessung nach Vickers beträgt hier 358, 428 und 428HV<sub>0,01</sub>.



**Abbildung 65: Probe H3; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 358/428/428 HV<sub>0,01</sub>)**

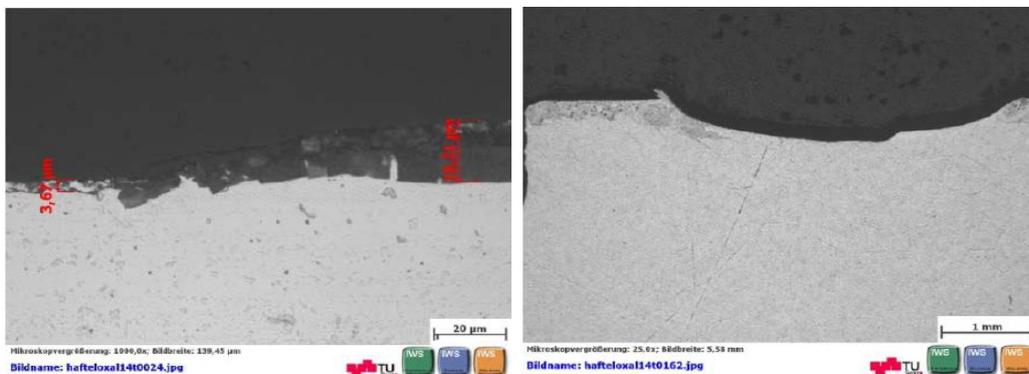
	H1	H2	H3	H4	H5	N1	N2	N3	N4	N5	N6
Schichtdicke lt. Angabe / $\mu\text{m}$	15	20	25	10	15	15	15	20	20	25	25
Schichtdicke gemessen / $\mu\text{m}$	16	22	21	12,5	15,5	17,6	16,5	18	21	25	24,5
Härte /HV0,01	425	355	358	431	384	392	364	333	428	384	438
	395	386	428	346	386	338	372	343	395	324	351
	399	366	428	421	421	366	366	351	405	392	375

**Tabelle 37 Eloxal-Schichtdicken und Härte an den Bauteilen bzw. Proben AC 5083**

In Tabelle 37 sind die gemessenen Schichtdicken, im Vergleich zu den angegebenen aufgelistet. Auch die Vickers-Mikrohärte HV0,01 von jeweils drei repräsentativen Stellen ist angeführt. Die metallografischen Aufnahmen aller übrigen Proben dazu sind im Anhang dargestellt (Abbildung 103 bis Abbildung 113).

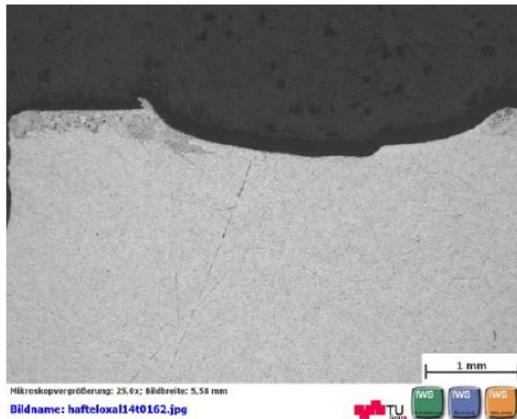
### 5.4.1 Verschleißerscheinungen

Bei Probe H1 ist die Eloxalschicht am Rand der noch vorhanden, wobei diese in der Verschleißspur nur in geringem Maße mehr zu sehen ist. Bei Probe H5 – die laut Angabe unter den selben Eloxierbedingungen wie H1 beschichtet worden ist - findet sich keine Eloxalschicht mehr, da der Grundwerkstoff durch die Prüfkraft bzw. den Prüfdruck (270N bzw. 38MPa) plastisch verformt worden ist bzw. die Verschleißbelastung einen Abtrag des Aluminiums von 0,5 mm bewirkt hat. - Abbildung 66.



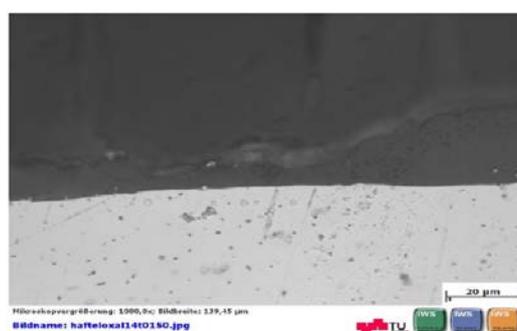
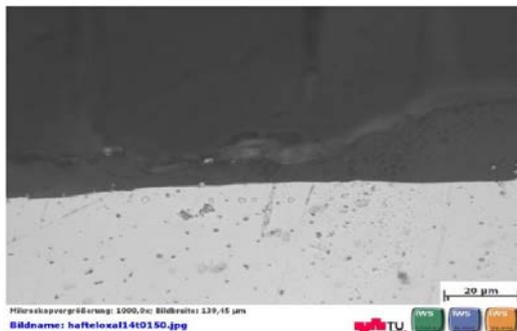
**Abbildung 66: Metallographische Querschliffe nach Verschleißtest an ‚Harteloxal‘ (li.) Probe H1 am Rand der Verschleißspur / (re.) Probe H5: Abtrag des Grundwerkstoffes - Verschleißweg u. -geschwindigkeit je 74m / 3,5cm/s, Prüfdruck 38MPa**

Bei den Proben H2 und H4, deren metallographische Bilder in Abbildung 67 zu sehen sind, zeigt sich ein ähnliches Verschleißerscheinungsbild, wie bei Probe H5; d.h. Abtrag des Aluminium-Grundwerkstoffes, wobei in der ca. 10  $\mu\text{m}$  dicken Randschicht noch Eloxal-Reste ersichtlich sind. Bemerkenswert ist, dass dieser Verschleiß bereits nach 14 m Verschleißweg (gegenüber 74 m bei H1 und H5) aufgetreten ist, d.h. der Verschleißtest wurde vorzeitig abgebrochen, nachdem makroskopisch die Verschleißspur metallisch glänzend erschienen ist bzw. ‚Eloxal-Brösel‘ sich sichtbar beim Versuch gebildet haben.

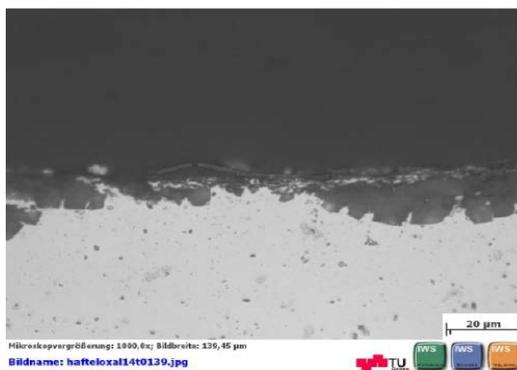
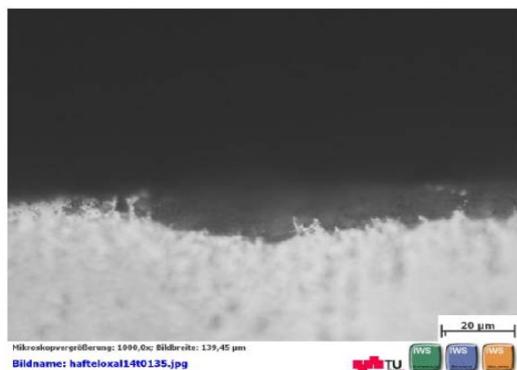


**Abbildung 67: Metallographische Querschliffe nach Verschleißtest ‚Harteloxal‘ (li.) Probe H2 Verschleißspur - Abtrag des Grundwerkstoffes; (re.) Probe H4 am Rand der Verschleißspur / Verschleißweg u. -geschwindigkeit je 14m / 3,5cm/s, Prüfdruck 38MPa**

Die Ergebnisse der Verschleißtests bei den Standard-Eloxal Proben zeigen teilweise noch Restschichten von Eloxal am Rand der Verschleißspur (ca. 5-10 µm), wobei diese in der Verschleißspur nicht vollständig sind, d.h. die Eloxalschicht zeigt teilweise Risse und Ecken und wurde teilweise in den Grundwerkstoff hineingedrückt. Bei diesen Verschleißtests wurde - nach den schlechten Ergebnissen bei den ‚Harteloxal‘-Proben - eine geringerer Prüfdruck von 24 MPa verwendet. Wobei die Tests ebenso bereits nach 14 m abgebrochen wurden, Abbildung 68 und Abbildung 69.



**Abbildung 68: Metallographische Querschliffe nach Verschleißtest ‚Normaleloxal‘ - am Rand der Verschleißspuren (li.) Probe N6; (re.) N5 / Verschleißweg u. -geschwindigkeit je 14m / 3,5cm/s, Prüfdruck 24MPa**



**Abbildung 69: Metallographische Querschliffe nach Verschleißtest ‚Normaleloxal‘ – in den Verschleißspuren (li.) Probe N1; (re.) N2 / Verschleißweg u. -geschwindigkeit je 14m / 3,5cm/s, Prüfdruck 24MPa**

## Mikrohärte Messung



**Abbildung 70: Probe 1; Mikrohärte Messung**

Drei Messungen werden an verschiedenen Stellen durchgeführt, ein Mittelwert wird errechnet und ergibt dann den Wert der Mikrohärte.

## **5.5 Zusammenfassung der Untersuchungen:**

Bei den Verschleißtests ist bei den meisten Proben ein starker Verschleiß bzw. ein Abtrag des Grundwerkstoffes erfolgt – mit teilweise plastischer Verformungen am Rand der Verschleißspur. Die Eloxalschichten waren in der Verschleißspur nur mehr in Spuren vorhanden und sind auch teilweise in den Aluminium Grundwerkstoff hineingedrückt worden.

Vermutlich bewirken die abgelösten bzw. gebrochenen Eloxalpartikel dabei einen schnell fortschreitenden Verschleiß bzw. Abrieb und wirken als ‚Schleifmittel‘.

Möglicherweise war also für diese Eloxalschichten der Prüfdruck zu hoch (betrug ca. 30% bzw. 20% der Fließgrenze 125 MPa) oder die Haftfestigkeit derselben war nur gering. Wahrscheinlicher aber liegt die Ursache für die nicht reproduzierbaren bzw. ungleichmäßigen Ergebnisse am FSW-Werkzeug, dessen Pin einen zu geringen Radius ausweist und so vermutlich die Eloxalschichten ‚abhebt‘. Hier ist eine Wiederholung der Versuche mit einem Werkzeug mit entsprechend großem Radius ratsam. Eventuell kann auch die etwas ungleichmäßige Druckverteilung auf Grund des Hebelsystems der Vorrichtung und der nicht exakten Normalbelastung (unter 90°) durch die Scheibenaufnahme zu diesen Ergebnissen geführt haben.

Die Dicken der Eloxalschichten, die metallographisch vermessen wurden entsprechen in etwa den angegebenen Werten – letztere sind etwas niedriger.

Die Mikrohärtewerte der ‚hartelexierten‘ Proben (H1 bis H5) liegen im Bereich von 400HV0,01 und sind damit nur unwesentlich höher als jene der ‚normal eloxierten‘ Proben (N1 bis N6); letztere liegen im Bereich von ca. 370HV0,01

## 6. PRAKTIKUM BEI HEUBERGER ELOXAL

In **Tabelle 38** ist der Verfahrensablauf für Hart- bzw. Standard-Eloxal zu sehen.

Behandlungsgang	Prozessschritt	Temperatur ( °C )	Zeit ( min. )
1	Mech. Vorbeh. Schleifen, Bürsten, Polieren		
2	Ware aufhängen		
3	Entfetten		0,5 – 20 min.
4	Spülen		2
5	Dekapieren		3
6	Eloxieren	15 - 35 (Schwefels. 18°C)	10 - 50
7	Spülen		2
8	Färben	20 - 55	10 - 40
9	Spülen		2
10	Verdichten Heißsealing	> 96	20 - 60
11	Trocknen		
12	Ware abhängen		

**Tabelle 38** Verfahrensablauf Fa. Heuberger Eloxieranstalt / Juli 2013

Mein Praktikum erfolgte an der Kompaktanlage und der großen Bäderanlage in allen Behandlungsgängen.

Bei der Fa. Heuberger Eloxieranstalt, kümmert sich die Abteilung „Warenübernahme“ um die neu angelieferten Bauteile. Die zu behandelnden Bauteile werden, nachdem sie im Empfang genommen wurden, gelagert. Manche Teile müssen je nach ‚Priorität‘ sofort behandelt werden. Auf einer begleitenden Kartei stehen alle für die Behandlung der Bauteile nötigen Informationen wie: Verfahren / Werkstoff / Vorbehandlung / Behandlungsart / Nachbehandlung / Oxidschichtdicke (Eloxaldicke) / Behandlungszeitraum / Liefertermin usw.

Beispiele für Kurzbezeichnungen auf der Kartei:

E1 = geschliffen, eloxiert und verdichtet

C 2 = gefärbt (Hellgold)

Während meines Praktikums musste ich hauptsächlich helfen, die zu eloxierenden Werkstücke auf die Träger bzw. Stangen zu montieren. Danach wurden die Werkstückträger in die Bäder getaucht, die großen Teile (meist von Magna Steyr Fahrzeugtechnik) wurden mit dem Kran zu den verschiedenen Bäder transportiert. Die Behandlungszeiten und die Anordnung (Reihenfolge) der Tauchvorgänge waren einzuhalten, um das beste Beschichtungsergebnis zu erzielen.

Die maximalen Abmessungen der Teile betragen ca. 6500 x 550 x 1500 mm.

Die kleinen Teile, die in der Kompaktanlage behandelt wurden, waren manuell von Bad zu Bad zu transportieren und einzutauchen. Die Behandlungszeit, Bäderfolge und andere Parameter mussten genau befolgt werden.

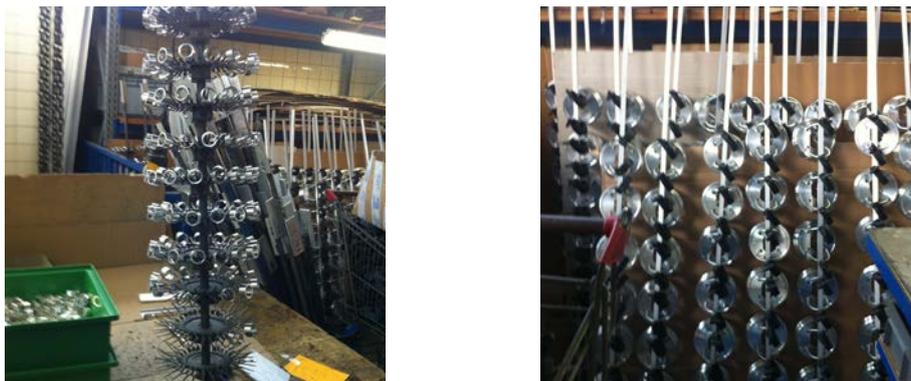
Zwei Mitarbeiter, beispielsweise der Eloxierer und ich, haben die verschiedenen Verfahren bei der Kompaktanlage von der Wareaufhängung bis zur Verpackung durchgeführt.



**Abbildung 71: (li.) Montage Großteile; (re.) Montage von Teilen mittlerer Größe**



**Abbildung 72: (li.) Vorbehandlung – Polieren; (re.) eloxierte Kleinteile - färbig**



**Abbildung 73: (li.) Montage der Teile; (re.) fertig montierte Teile auf Titanzahnstange (plus Träger) auf Träger**

Falls der Kunde es wünscht, werden die Bauteile vor der Beschichtung, vorbehandelt. Auf der Abbildung 72 wird beispielweise ein Bauteil gerade poliert.

Die Abbildung 73 (re.) zeigt kleine eloxierte Teile in verschiedenen Farben. Sie wurden in der Kompakt- Eloxieranlage bearbeitet (beschichtet).

Auf dem Bild 71 (re.) werden große Teile auf einem Querträger gehängt. Der Träger (samt Teile) wird mittels eines Kranes in den Bädern transportiert.

Verschieden Montage- Varianten je nach dem Gewicht, der Form oder Abmessungen der Teile usw. sind in Abbildung 71 und Abbildung 73 zu sehen.

Das Praktikum bei der Fa. Heuberger hat geholfen, das Eloxal / Harteloxal- Verfahren ein bisschen detaillierter zu verstehen. Eine eher praktische Betrachtung dieser Oberflächenbehandlung wird hier angeboten. Die aus der Literatur usw. gewonnenen Kenntnisse werden bei der Firma (Heuberger) in der Praxis umgesetzt. Zahlreiche instruktiven Bilder von diesem Praktikum sind im Anhang dieser Arbeit zu finden.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B. Kirsten, Oberflächentechnik für den Maschinenbau, Weinheim: Wiley- Vch Verlag GmbH & Co, KGaA, 2013.
- [2] „Encyclopedie-de.snyke.com/articles/oberfächentechnik.html,“ [Online]. [Zugriff am 13 08 2013].
- [3] „Oberflächentechnik, <http://de.wikipedia/wiki/Oberflächentechnik>,“ [Online]. [Zugriff am 13 10 2013].
- [4] S. P., „Aluminium und seine Eigenschaften für Eloxieren,“ *Galvanotechnik*, pp. 148-154, 1979.
- [5] „Galvanisieren, [swisseduc.ch/chemie/labor/galvanisieren/docs/galvani...](http://swisseduc.ch/chemie/labor/galvanisieren/docs/galvani...),“ [Online]. [Zugriff am 13 08 2013].
- [6] „[www.google.at/verzinken](http://www.google.at/verzinken),“ [Online]. [Zugriff am 10 04 2014].
- [7] T. W. Jelinek, Praktische Galvanotechnik, Saulgau / Württ./ Germany: Eugen G. Leuze Verlag / Verlag der Fachzeitschrift " Galvanotechnik ", 1997.
- [8] „Verzinken, [www.de.org/wiki/verzinken#VERZINKEN](http://www.de.org/wiki/verzinken#VERZINKEN),“ [Online]. [Zugriff am 09 04 2014].
- [9] H. Schönfelder, „Galvanische Aluminiumierung von Automobilbauteilen,“ Volume 1, Issue 2, pp 38-43, 2008.
- [10] „[www.chromin.nl/DE/prozesse/aluminisieren-alonizing](http://www.chromin.nl/DE/prozesse/aluminisieren-alonizing),“ [Online]. [Zugriff am 10 04 2014].
- [11] J. Bohnet, Entwicklung eines Verfahrens zur Abscheidung technischer Chromschichten aus einem Chrom(III)-Elektrolyten / Dissertation, Heimsheim: Jost-Jetter Verlag , 2010.
- [12] „Aluminium verchromen, [www.mwm-ansberg.de/aluminium-chromatieren-aluminium-verchromen.html](http://www.mwm-ansberg.de/aluminium-chromatieren-aluminium-verchromen.html),“ [Online]. [Zugriff am 11 04 2014].
- [13] „Collini- Titan anodisieren, <http://www.collini.eu/de/produkte/galvanisieren-feuerverzink...>,“ [Online]. [Zugriff am 12 04 2014].
- [14] „Eloxieren, [www.heuberger.at](http://www.heuberger.at),“ [Online]. [Zugriff am 19 06 2013].
- [15] „CVD/PVD- Hartstoffbeschichtung, [www.doerrenber.de/fileadmin/redaktion/.../pdf/CVD\\_PVD/pdf](http://www.doerrenber.de/fileadmin/redaktion/.../pdf/CVD_PVD/pdf),“ [Online]. [Zugriff am 11 04 2014].
- [16] „Bornitrid, [de.wikipedia.org/wiki/Bornitrid#Galvanische Bindungen](http://de.wikipedia.org/wiki/Bornitrid#Galvanische_Bindungen),“ [Online]. [Zugriff am 11 04 2014].
- [17] „High Tech Beschichtungen , [www.eifeler.com/leistungen/pvd-schichtsysteme/tin-titan-nitrid/](http://www.eifeler.com/leistungen/pvd-schichtsysteme/tin-titan-nitrid/),“ [Online]. [Zugriff am 10 04 2014].

- [18] „Lack, [de.wikipedia.org/wiki/Lack](http://de.wikipedia.org/wiki/Lack),” [Online]. [Zugriff am 25 10 2013].
- [19] „Aluminium, <https://de.wikipedia.org/wiki/Aluminium>,” [Online]. [Zugriff am 13 03 2013].
- [20] J. H. Schäfer, „[www.aluinfo.de/.../pdf/Fact\\_Schettis/Bauxitabbau\\_und\\_Rekultivierung.pdf](http://www.aluinfo.de/.../pdf/Fact_Schettis/Bauxitabbau_und_Rekultivierung.pdf),” Gesamtverband der Aluminiumindustrie e. v., Februar 2006. [Online]. [Zugriff am 12 August 2013].
- [21] C. Sommitsch, *Skriptum Vorlesung Werkstoffkunde*, Graz ( TU Graz ), 2012.
- [22] „Aluminium, <http://www.chemie.de/lexikon/aluminium.html>,” [Online]. [Zugriff am 22 Oktober 2013].
- [23] L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys*, London; Boston; Butterworths, 1976.
- [24] „[www.capalex.co.uk](http://www.capalex.co.uk) / Manufacturer of Aluminium,” [Online]. [Zugriff am 05 11 2013].
- [25] „[sk\\_wtii\\_ss08\\_keramische\\_werkstoffe.pdf](http://sk_wtii_ss08_keramische_werkstoffe.pdf),” [Online]. [Zugriff am 12 09 2013].
- [26] W. O. h. J. L. O. D. B. Jacob L. Cartner, „Stress Corrosion Cracking of an Aluminium Alloy used in External Fixation Devices,” Biomedical Engineering Departement, University of Memphis, 06 02 2008. [Online]. [Zugriff am 30 10 2013].
- [27] „[www.uni-due.de/imperial/content/.../SK\\_wtii\\_ss08\\_aluminium.pdf](http://www.uni-due.de/imperial/content/.../SK_wtii_ss08_aluminium.pdf),” [Online]. [Zugriff am 2013].
- [28] H. Kaesche, „Korrosionsverhalten von Aluminium, Kapitel 8: Elektrochemie,” 2003.
- [29] H. Wholfahrt, „Forschungsbericht / TU Braunschweig / Institut für Schweißtechnik ( Abschlussbericht- AiF 11.381 ),“ Braunschweig.
- [30] „[www.lahner.at](http://www.lahner.at), Oberflächentechnik, Eloxieren,” [Online]. [Zugriff am 07 2013].
- [31] K. Schirn, *Harte Anodisation von Aluminium mit verdünnter Schwefelsäure, Dissertation*, Halle, Germany, 2008.
- [32] S. Ellecosta, *Korrosionuntersuchung an der Anodisierten Aluminium Überlaufrinne, Bakkalaureatarbeit*, Graz, 2012.
- [33] J. N. M. Unruh, *Lehrbuch für Galvaniseure und Oberflächenbeschichter*, Eugen G. Leuze- Verlag, 2007.
- [34] L. Lux, *Die elektrolytische Schutzoxydation von Aluminium nach dem Eloxal-Verfahren*, Berlin w 50: Abteilung- Verlag, 1941.
- [35] C. Hammer, *Elektrochemische Kinetik der Passiv- und Korrosionsschutzschichten technischer Metalloberflächen, Dissertation*, Düsseldorf, 2011.
- [36] G. Sussek, *Über die Bildung und den Durchbruch anodisch erzeugter Oxidfilme dargestellt am Beispiel des Aluminiums, Dissertation*, Berlin: D 83, 1977.
- [37] S. G. Bargel H.-J., *Werkstoffkunde*, Düsseldorf: VDI- Verlag GmbH, ISBN 3-18-400823-1, 1988.

- [38] „www3.rohde-technics.com, Oberflächentechnik, Industrial Handles, Surfaces...“, [Online]. [Zugriff am 09 12 2013].
- [39] „Harteloxal, www.de.wikipedia.org/wiki/harteloxal,“ [Online]. [Zugriff am 14 03 2013].
- [40] L. Bosdorf, „Die Hartanodisation von Aluminium und ihre praktische Anwendungen,“ *Galvanotechnik nr. 9*, p. Seite 714, 1976.
- [41] A. Oechslin, „Hartanodisierung von Aluminiumlegierungen / Oxydation anodique dure des alliages d'aluminium,“ *Conference: Schweizer Aluminium Rundschau- Rev Suisse de l'Aluminium*, Bde. %1 von %2v 19, n 8, pp. 305- 326, 1969 ( November 1 ).
- [42] R. W. Franklin, „Proceedings at the University of Nottingham,“ 1961.
- [43] C. Vargel, „Corrosion of Aluminium,“ *Elsevier Science*, Nr. ISBN- 13: 9780080444956, 658 pp, p. 193, 2004.
- [44] „[12] www.seo-foto.de/fileadmin/download/Eloxien.pdf,“ Bd. 11, Nr. 21, p. 2013.
- [45] „Flexible Kompakt- Eloxal- Anlage als Alternative zum Lohneloxieren, [http://www.decker-anlagenbau.de/fileadmin/content/presse/aluminium\\_032011.pdf](http://www.decker-anlagenbau.de/fileadmin/content/presse/aluminium_032011.pdf),“ [Online]. [Zugriff am 04 02 2014].
- [46] „www.tk-oberflaeche.de/vorbehandlung-eloxal.php,“ [Online]. [Zugriff am 29 10 2013].
- [47] „www.modell-bau.org/eigenschaften-eloxal,“ [Online]. [Zugriff am 04 11 2013].
- [48] „www.wikipedia.org/wiki/ELOXAL-Verfahren / Eloxal- Verfahren,“ [Online]. [Zugriff am 20 September 2013].
- [49] „Produktübersicht, [http://www.chemal.com/de/downloads/public/CHEMAL%2520produktübersicht%2520Anidisieren\\_09-2012.p...](http://www.chemal.com/de/downloads/public/CHEMAL%2520produktübersicht%2520Anidisieren_09-2012.p...),“ [Online]. [Zugriff am 04 11 2013].
- [50] „vorbehandlung des Aluminiums, www.modell-bau.org/vorbehandlung-aluminium,“ [Online]. [Zugriff am 14 07 2013].
- [51] „www.bwb-group.com/docs/verfahren\_werkstoffe,“ [Online]. [Zugriff am 12 03 2013].
- [52] „ www.chemal.com/.../CHEMAL, Chemische Produkte zur Anodisation von Aluminium,“ [Online]. [Zugriff am 20 September 2013].
- [53] S. Kawai, Anodizing and coloring of Aluminium Alloys, 2002.
- [54] „www.sgersing.de/pdf/SFT041.pdf,“ [Online]. [Zugriff am 11 09 2013].
- [55] M. S. J. Perry, „Hard Anodizing Deserves wider use,“ *Product Finishing*, Nr. Nr. 36, pp. 12- 16, 1983.
- [56] „Was ist mit der Verschleißbeständigkeit der Eloxalschichten ?, <http://www.anoditect.de/was-ist-mit-der-verschleißbeständigkeit-der-eloxal-schichten.html>,“ Anodi Tec. [Online]. [Zugriff am 17 Oktober 2013].
- [57] h. The eloxal process. [Online]. [Zugriff am 15 03 2013].
- [58] „sr71.dyndns.info/info-eloxieren-von-aluminium.php / Eloxieren von Aluminium nach

- dem GS- Verfahren,“ [Online]. [Zugriff am 29 10 2013].
- [59] G. D. Sulka, „Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self- Organized Anodizing / Nanostructured Materials in Electrochemistry,“ Wiley, 2008.
- [60] H. H. K. S. M. S. P. S. X. Z. a. G. C. W. G. E. Thompson, „Anodizing of Aluminium Alloys,“ *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Bd. 71, pp. 228- 238, 1999.
- [61] w. F. K.-w. S. K. Weidmann, „Modifizierung von Anodisierschichten auf Aluminiumwerkstoffen durch chemische Nanotechnologie,“ *Galvanotechnik* , p. Eugen G. Leuze Verlag, 08 2010.
- [62] I. S. M. H. R. J. H. T. L. M. Sieber, „Influence of Anodic Oxide Coatings on Screwing Behaviour and Suceptibility to Stress Corrosion Cracking of Self Tapping Aluminium Screws,“ Bde. %1 von %2Mat. Wiss. und Werkstofftechnik, 43, Nr. nr. 7, pp. 661-667, 2012.
- [63] E. a. J. K. Christian, „Anodizing for Bonding Applications in Aerospace,“ *Products Finishing*, p. 20ff, 20 12 2011.
- [64] H. E. Franz\*, „Charakterisierung von Aluminiumoxischichten,“ *Z. Werkstofftechnik*, Bd. 14, Nr. Verlag Chemie GmbH, Weinhein, pp. 164- 170, 1983.
- [65] W. Brockmann\*- , -D. H.-. O., H., Kollek-\* und C. Matz-\*, „Adhesion in Bonded Aluminium Joints for Aircraft Construction,“ *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Bd. 6/3, pp. 115- 143, 1986.
- [66] K. P., Herstellung, Charackterisierung und Anwendung von AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Schichten insbesondere auf Aluminium und Eisenwerkstoffen, Diss. TU Chemnitz, 1982.
- [67] J. W. C. L. N. K. A. S. G. N. N. Godja, Spark Anodization as a Successful Method for Surface Treatments, T. S. Sudarshan and Per Nylen.
- [68] „[www.ceranod.com/index.php](http://www.ceranod.com/index.php) / Hybridoberfläche, Plasmakeramik, Hartanodisation, Anodisation,“ [Online]. [Zugriff am 22 01 2014].
- [69] A. T. Kuhn, „Diamondzye TM: Durchbruch bei der Anodisierung von Aluminium ?,“ *Galvanotechnik*, pp. 466- 472, 03 2013.
- [70] N. N., „Automated Anodizing system shines using latest Technology / Automatisches Eloxieren von Kraftfahrzeugteilen,“ *Precision Metal \* Band 39, Heft 10*, pp. 20- 22, 1981.
- [71] X. A. Ventura, „Hard Anodizing for Aluminium Pieces- Supporting Friction and Wearing for the Automotion and Motorcycling Industrie,“ *Surface Finishing ( NASF )*, pp. 418- 425, August 2007.
- [72] „<http://www.nicrola.de/de/verfahren/harteloxieren.php>,“ [Online]. [Zugriff am 10 02 2014].
- [73] „GDA, Gesamtverband der Deutschen Aluminiumindustrie eV; Branchenportrait der deutschen Aluminiumindustrie, Düsseldorf,“ 2000.
- [74] F. Fischer, „Entwicklung eines energiesparenden Oxidationsverfahrens zur Herstellung extrem fester Harteloxalschichten auf hochlegierten Aluminiumwerkstoffe

- mittels selbstlernender Stromdichteregulung,“ 2001.
- [75] VL Narasimhan, D. Kanagaraj und R. V. a. R. Subramanian, „hard Anodising of internal Bore of cylindrical Aluminium alloys for Engineering Application,“ *Industrial Metal Finishing / Central Electrochemical research institute, Karaikudi-623006*, pp. 277- 279, Mai- Juni 1986.
- [76] W. Huppatz, „Grundlage des Korrosionsschutzes für Aluminium als Konstruktionswerkstoff, Teil 1,“ *Metall- Internationale Zeitschrift für Technik und Wirtschaft*, Bd. 49, pp. 401- 408, 1995.
- [77] „<http://www.anodising.co.nz/automotive>,“ [Online]. [Zugriff am 05 02 2014].
- [78] „<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/240721/umfrage/verteilung-des-weltweiten-aluminiumbedarfs-nach-sektoren/>, Zugriff: März 2913.,“ [Online]. [Zugriff am 17 08 2013].
- [79] R. Nissen\*, „Verschleißfeste Oberflächenschichten auf Aluminium / Hartanodisation,“ *Metalloberfläche* 36, pp. 148- 149, 1982.
- [80] „[www.wenzelmann.de/index.php](http://www.wenzelmann.de/index.php),“ WMS Ernst Wenzelmann GmbH. [Online]. [Zugriff am 08 01 2014].
- [81] „[http://www.praegler.at/html2/eloxieren-highlights\\_1.html](http://www.praegler.at/html2/eloxieren-highlights_1.html),“ [Online]. [Zugriff am 04 02 2014].
- [82] „<http://www.stark-eloxal.de/cms/harteloxal.php>,“ [Online]. [Zugriff am 04 2013].
- [83] B. Arsenault, P. Marcoux, S. Simand und E. Ghali, „Stress Corrosion Cracking Mitigation of 7075- T6 Aluminium Alloys by Thermal Spray Coating,“ *Corrosion 2006*, Bd. paper 06496.
- [84] „[http://www.praegler.at/html2/eloxieren-higlights\\_2.html](http://www.praegler.at/html2/eloxieren-higlights_2.html) / Eloxieren / Anodisieren / Präzisionseloxieren / Harteloxieren,“ [Online]. [Zugriff am 18 12 2013].
- [85] „[www.landeshighendmachining.de/marken/auftraggeberflugz...](http://www.landeshighendmachining.de/marken/auftraggeberflugz...),“ [Online].
- [86] D. L. E. R. Pettersen und Parks, „Wear Surfacing Techniques for Aluminum Components used in Fluid Power Systems,“ *OF Technol, Chicago, 25- 27 Oct. 1977*, Bd. 31, pp. 278- 284, 1977.
- [87] J. A. Deacon, „Overview of Anodizing in the Aerospace Industry,“ *Metal Finishing*, Bd. 108, pp. 10- 21, 2010.
- [88] S. P. R. a. S. P. G. Wernick, „The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and its Alloys,“ *Finishing Publications LTD*, Bd. 5. Ed., Nr. Teddington, Middlesex, England, 1987.
- [89] M. Curioni, P. Skeldon, G. E und J. Ferguson, „Graded Anodic Films for Corrosion Protection of Aerospace Alloys Anodizing,“ pp. 41- 59, 2008.
- [90] A. Deacon Juhl, „Hard anodizing of aerospace aluminium alloys,“ *Lght metall Age*, pp. 22, 24, 26, 28, 30, 32, 33,, 2009.
- [91] S. Birsh, „Anodizing for Airbus,“ *Aerospace Engineering*, Bd. 18, 1998.

- [92] J. C. Norris, „Brush Anodizing in the Aircraft / Aerospace Industries,“ *Plating and Surface Finishing*, pp. 36- 49, 1991.
- [93] u. J. C. E. Terence P. Savas, „Surface Characterization of 7075- T73 Aluminum Exposed to Anodizing Pretreatment Solutions,“ *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 674- 681, Oktober 2008.
- [94] „Meerwasserbeständigkeit von Knetlegierungen, [www.haueselmann.de/tl\\_files/download/bestandigkeit.pdf](http://www.haueselmann.de/tl_files/download/bestandigkeit.pdf), Meerwasserbeständigkeit von Aluminiumknetlegierungen“.
- [95] „<http://www.afk-promotion.de/files/standardheme/im...> / Maritime Anwendungsfälle,“ Maritim HMI / SÜTRON. [Online]. [Zugriff am 07 01 2014].
- [96] „<http://www.bootsbedarf-nord.de>,“ Bootsbedarf Nord / Gangway und Zubehör. [Online]. [Zugriff am 08 01 2013].
- [97] „[www.horizonsig.com/shipbuilding.html](http://www.horizonsig.com/shipbuilding.html) / Durable Identification for Shipbuilding & Marine Applications,“ ISG Imaging Systems Group. [Online]. [Zugriff am 16 01 2013].
- [98] „<http://www.pfeiffer-marine.de/sites/kataloge/gebo.pdf>,“ [Online]. [Zugriff am 03 03 2014].
- [99] „<http://www.lorin.com/transportation/rail-cars> / Infinite Possibilities in Aluminium Finishing Solutions,“ LORIN. [Online]. [Zugriff am 08 01 2014].
- [100] „<http://www.lokschilder.info/eloxierte-schilder.htm>,“ [Online]. [Zugriff am 03 Februar 2014].
- [101] „[http://www.manometer-thermometer.de/csdata/download/1/de/5901\\_116.pdf](http://www.manometer-thermometer.de/csdata/download/1/de/5901_116.pdf),“ [Online]. [Zugriff am 04 02 2014].
- [102] „[www.abs-trost.de](http://www.abs-trost.de) / Eloxal- Druckverfahren,“ Allgemeiner Beschichtungsservice Trost. [Online]. [Zugriff am 06 12 2013].
- [103] L. A. S. a. I. V. B. V. E. Ermakova, „Special Anodizing for Finishing Aluminium- Alloys / Dental Handpieces,“ *Plenum Publishing Corporation*, Bde. %1 von %20006-3398/83/1703- 0102S07. 50, pp. 102- 104, 1984.
- [104] „<http://www.stsindustrie.com/Automatische-Anlagen-zum-Anodis.73.0.html>,“ [Online]. [Zugriff am 18 12 2013].
- [105] „<http://www.dot-coating.de> / DOT: Anodizing Type III ( Colouring )- / Medical Implant Solutions,“ [Online]. [Zugriff am 17 12 2013].
- [106] „[www.bodycote.com/fr-FR/services/.../anodising.asp...](http://www.bodycote.com/fr-FR/services/.../anodising.asp...) / Anodisation,“ [Online]. [Zugriff am 17 12 2013].
- [107] „<http://www.praegler.at/>,“ [Online]. [Zugriff am 04 02 2014].
- [108] W. Hansal, „Aluminium wird alkalisch sterilisierbar / Verschleißfeste Oberflächen in der Medizintechnik,“ *Galvanotechnik / JOT*, pp. 94- 95, 2011.
- [109] R. C. F. a. B. C. C. W. R. Rigby, „Mechanisms of Short- Term Superficial Weathering of Anodized Aluminium,“ *Interfinish 49*, Nr. Bundery, Oxfordshire, England, 1994.

- [110] W. E. Cooke, *Modern Metals.*, 24, 54., 1968.
- [111] P. G. Shessby, *Symp. on Anodizing Aluminium*, London: Aluminium Federation, 1967.
- [112] L. K. & K. Dahlberg, *Trans. Inst. Metals Fin.* 53, 54, 1976.
- [113] R. C. Spooner, *Metal finishing* 66 ( Dec. ), 44, 1968.
- [114] „ISO / DIS / 7583“.
- [115] H. J. G. & H. P. W. Friedmann, „Aluminium, 8, 471.“ 1977.
- [116] J. Rones, „Reinigungsmittel auf Basis saurer Basis für anodisierte Aluminiumbauteile,“ *Aluminium*, Bd. 53, Nr. 8, pp. 493- 496, 1977.
- [117] H. Zeiger, „Aluminiumlegierungen für die Anodisation, besonders zur Anwendung in der Architektur,“ Frankfurt am Main, 1969.
- [118] L. Bosdorf, „Die Anwendung des Aluminiums in der Architektur-Farbanodisationsverfahren-,“ *Metall*, p. Heft 1, Januar 1969.
- [119] B. A. Graves, „The Specifics of Architectural Anodizing,“ *Products Finishing*, pp. 61-65, 2003.
- [120] G. E. Schunter, „Anodisieren im Bauwesen,“ *Galvanotechnik*, Bd. 11, Nr. 77 (1986)Nr. 11 , pp. 2692- 2694, 1986.
- [121] K. Nitzsche, „Neue Verfahren der Schichtmeßtechnik / New Techniques in Thickness Measurement,“ *Galvanotechnik*, pp. 3632- 3638, 1997.
- [122] R. W. Thomas, „Measurements of Hardness, Wear and Index and Abrasion Resistance of Anodic Coatings on Aluminium,“ *Institute of Metal Finishing / The British Aluminium Centre* , pp. 39- 68, 1981.
- [123] C. A. Witt\*, „Güteprüfung anodisch erzeugter Oxidschichten auf Aluminium,“ Bd. 1, 1977.
- [124] W. H. Gühring, „Oberfläche / Surface,“ Bd. 17, pp. 220- 228, 1976.
- [125] „DIN 50 949- Zerstörungsfreie Prüfung von anodisch erzeugten Oxidschichten durch Messung des Scheinleitwertes“.
- [126] W. Friedmann, „Aluminium,“ Bd. 50, pp. 150- 153, 1974.
- [127] W. C. A, „Arbeiten zur Güteprüfung anodisch erzeugter Oxidschichten auf Aluminium, Veröffentlichung demnächst“.
- [128] W. C. A, „Prüfung der Abriebfestigkeit anodisch erzeugter Oxidschichten,“ *Vereinigte Aluminium- Werke AG / Fachtagung Aluminium- Oberflächen, Düsseldorf*, Bd. 54, Nr. 8, pp. 510- 513, 1978.
- [129] H. J. Göhausen, „Einfluß von Anodisations-, Färbe- und Verdichtungsparametern auf den Abriebwiderstand anodisch erzeugter Aluminiumoxidschichten,“ *Mitteilung aus den Laboratorien der Henkel KGaA, Düsseldorf*, Bd. 55, Nr. 8, pp. 515- 521, 1979.

- [130] K.-. A. V. Oeteren, Korrosiosschutz durch Beschichtungsstoffe, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1980.
- [131] „Verschleiß, <http://de.wikipedia.org/wiki/verschleiß>,” [Online]. [Zugriff am 24 10 2013].
- [132] „Abrieb, <http://de.wikipedia.org/wiki/Abrieb>,” [Online]. [Zugriff am 24 10 2013].
- [133] B. B. S. Jung und H. W. Haas, „<http://www.ima.uni-stuttgart.de/Studium/dt/Hauptfachversuche>, Oberflächenbeurteilung; Rauheitsmessung,” Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart. [Online]. [Zugriff am 23 10 2013].
- [134] „Was ist mit der Verschleißbeständigkeit von Eloxal- Schichten... / [www.anotec.de/was-ist-mit-der-verschleißbeständigkeit-der-eloxal-schichten.html](http://www.anotec.de/was-ist-mit-der-verschleißbeständigkeit-der-eloxal-schichten.html),” [Online]. [Zugriff am 14 04 2014].
- [135] J. Rasmussen, „Abrasive Wear Resistance of Hard Anodized Aluminium,” *Pioneer Metal Finishing*, pp. 995- 999.
- [136] J. Steppeler, B. Bock und J. Rainer, Vorrichtung / Diplomarbeit TU Graz/HTL Bulme, 2011.
- [137] „Verband ( Recht ), [de.wikipedia.org/Verband\\_\(Recht\)](http://de.wikipedia.org/Verband_(Recht)),” [Online]. [Zugriff am 19 September 2013].
- [138] „Verband ( Soziologie ), [de.wikipedia.org/Verband\\_\(Soziologie\)](http://de.wikipedia.org/Verband_(Soziologie)) / Verband,” [Online]. [Zugriff am 19 September 2013].
- [139] W. Johann, <http://e-collection.library.ch/eserv/eth:21467/et...>, Beitrag zur Technik der anodischen Oxidation von Aluminium unter besonderer Berücksichtigung des Alumilites- Verfahrens, Promotionsarbeit, A. G, Berlin: Reinhold Kühn, 1936.
- [140] W. C. A. u. G. Gerken, „Aluminium,” Bd. 47, pp. 748- 750, 1971.
- [141] „<http://www.sgersing.de/prf/SFT041.pdf>, Oberflächenbehandlung von Aluminium,” Vorlesung: Leichtmetalle. [Online]. [Zugriff am 10 Oktober 2013].
- [142] K. A. Y. D. Q. F. A. G. W. Critchlow\*, „Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys,” *International Adhesion & Adhesives* / [www.elsevier.com/locate/ijadhadh](http://www.elsevier.com/locate/ijadhadh), 13 September 2005. [Online]. [Zugriff am 30 10 2013].
- [143] F. Deppe, „[www.fritz-deppe.de/fileadmin/user\\_upload/PDF/Eloxalinfo.pdf](http://www.fritz-deppe.de/fileadmin/user_upload/PDF/Eloxalinfo.pdf) / Anodisieren- Eloxieren / Blechbearbeitung,” [Online]. [Zugriff am 11 11 2013].
- [144] S. Kawai, Anodizing and Coloring of Aluminium Alloys, British Library Cataloguing, 2002.
- [145] R. W. Thomas, „Measurements of Hardness, Wear Index And Abrasion Resistance of Anodic Coatings on Aluminium,” *Institut of Metal Finishing*, pp. 39- 68, 5- 9 ( Technical annual Conferance ) Mai 1981.
- [146] „Aluminium, <http://www.downhillsschrott.com/dhs/wissen/aluminium.d.html>,” [Online]. [Zugriff am 12 07 2014].

- [147] „Hartanodisation, Anodisation, Plasmakeramik,  
<http://www.elb.biz/relaunch/index.php>,” [Online]. [Zugriff am 10 03 2014].
- [148] „GMT / Gummi- Metall- Technik GmbH, <http://www.gmt-gmbh.de/index.php>,” [Online].  
[Zugriff am 10 01 2014].
- [149] „[www.seo-foto.de/fileadmin/download/Eloxien.pdf](http://www.seo-foto.de/fileadmin/download/Eloxien.pdf),” Bd. 11, Nr. 21, p. 2013.

## 8. Firmenvorstellung / Fa. Heuberger Eloxieranstalt GmbH, Graz



Abbildung 74: Heuberger Eloxieranstalt GmbH, Graz



Abbildung 75: Firmenvorstellung / Übersicht



Abbildung 76: Tätigkeitsbereich

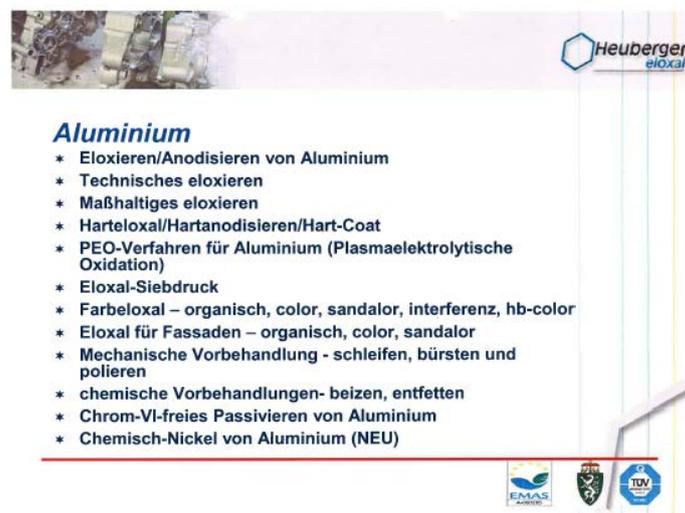
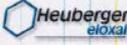


Abbildung 77: Beschichtungsverfahren



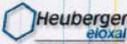
### Ablauf Eloxalverfahren



- \* Mechanische Vorbehandlung  
Schleifen, Bürsten, Polieren
- \* Entfetten
- \* Beizen
- \* Spülen
- \* Dekapieren
- \* Eloxieren
- \* Spülen
- \* Färben (organisch/elektrolytisch)
- \* Spülen
- \* Verdichten
- \* Ev. Trocknen



Abbildung 78: Ablauf / Eloxalverfahren



### Ablauf Harteloxalverfahren



- \* Mechanische Vorbehandlung  
Schleifen, Bürsten, Polieren
- \* Entfetten
- \* Beizen
- \* Spülen
- \* Dekapieren
- \* **Harteloxieren**
- \* Spülen
- \* Färben (organisch/elektrolytisch)
- \* Spülen
- \* Verdichten
- \* Ev. Trocknen



Abbildung 79: Ablauf / Harteloxalverfahren

## Eloxieren von Aluminiumwerkstoffen

### Zusammenfassung:

- Reinaluminium / Hüttenaluminium = Al99-99,8
- Reinstaluminium = Al99,8 – 99,99
- Legierungen = Verbesserung der chemischen und mechanischen Eigenschaften durch Zugabe von Mg, Si, Mn, Cu, Pb, Zn
- Aushärtbare Legierungen = Festigkeitserhöhung durch Wärmebehandlung
- Nicht aushärtbare Legierungen = Endfestigkeit durch Zwischenglühung und Kaltverformung

21.01.2013

Josef Mair, ASV Folie 39  
A. Heuberger Eloxieranstalt GmbH  
www.heuberger.at

### Abbildung 80: Eloxieren / Werkstoffe



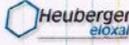
**Anwendungen**

- \* Automotive
- \* Maschinenbau
- \* Beleuchtungstechnik
- \* Lebensmittelbereich
- \* Freizeitbereich
- \* Beschlägetechnik
- \* Optische Industrie
- \* Luftfahrttechnik
- \* Freizeit und Sport
- \* Architektur  
Außenarchitektur  
Innenarchitektur

Heuberger eloxal

EMAS TÜV

### Abbildung 81: Anwendungen



### **Kunden - Referenzen**

**Fassadenbau:**  
Strabag, SFL, Kern, Gregorcic, Heidenbauer, BUG, GIG

**Industrie:**  
Assmann, Pankl, Bene, Swarovski, OTIS elevators

**Gewerbe:**  
Elmont, Radkersburger, Nikitscher, Schinko, Rottag,

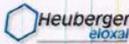
**Automotive:**  
Remus, Sebring, KTM, Magna, Pankl, AVL, Mercedes, Porsche, Lamborghini

**Luffahrt:**  
Magna, FACC, (indirekt Boeing, Airbus, EADS)

**Schienenfahrzeuge:**  
Knorr Bremse, Siemens Verkehrstechnik



Abbildung 82: Kundenreferenzen



### **Anwendungen -Automotive**

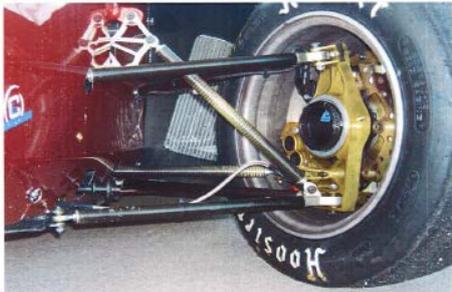



Abbildung 83: Anwendungen / Automotive



Abbildung 84: Anwendungen / Maschinenbau



Abbildung 85: Anwendungen / Lebensmittelbereich

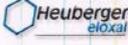


Abbildung 86: Anwendungen / Design



Abbildung 87: Anwendungen / Design





### Eloxal - Siebdruck

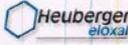


- \* Beim Eloxal-Siebdruck werden ein- und mehrfarbige Drucke in die Oxidschicht eingelagert und verdichtet. Diese Druckverfahren gestatten die wirtschaftliche Herstellung großer Serien gleicher Motive. Diese Aufschriften haben eine jahrzehntelange Lebensdauer und sind nur mechanisch zerstörbar



Abbildung 88: Eloxalverfahren / Siebdruck





### Verfahrensentwicklungen



- \* **Für Titan:**  
anodisieren von Titan
- \* **Für Magnesium:**  
Veredelung von Magnesium für die Automobilindustrie
- \* **Für Aluminium:**  
Beschichtungen für die Luftfahrtindustrie



Abbildung 89: Verfahrensentwicklungen

## Eloxieren von Aluminiumwerkstoffen

Einsatz einfacher Universalklemmen



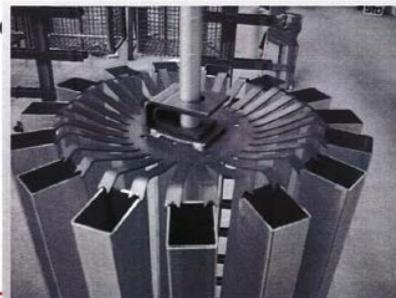
21.01.2013

Josef Mair, ASV Folie 53  
A. Heuberger Eloxieranstalt GmbH  
www.heuberger.at

Abbildung 90: Eloxal / Montage

## Eloxieren von Aluminiumwerkstoffen

Einsatz



21.01.2013

Josef Mair, ASV Folie 57  
A. Heuberger Eloxieranstalt GmbH  
www.heuberger.at

Abbildung 91: Eloxieren / Montage

## 9. ANHANG

### 9.1 Vorrichtung zur Verschleißprüfung

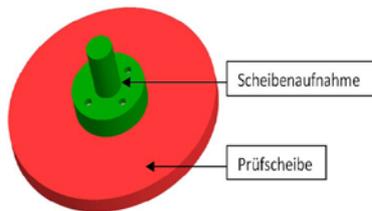


Abbildung 92: Oberteil

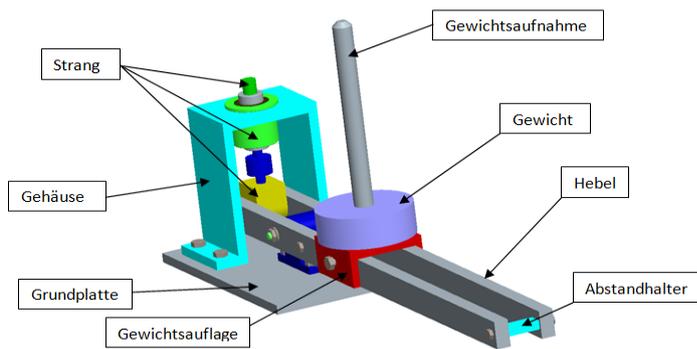


Abbildung 93: Unterteil

## 9.2 Metallographische Bilder

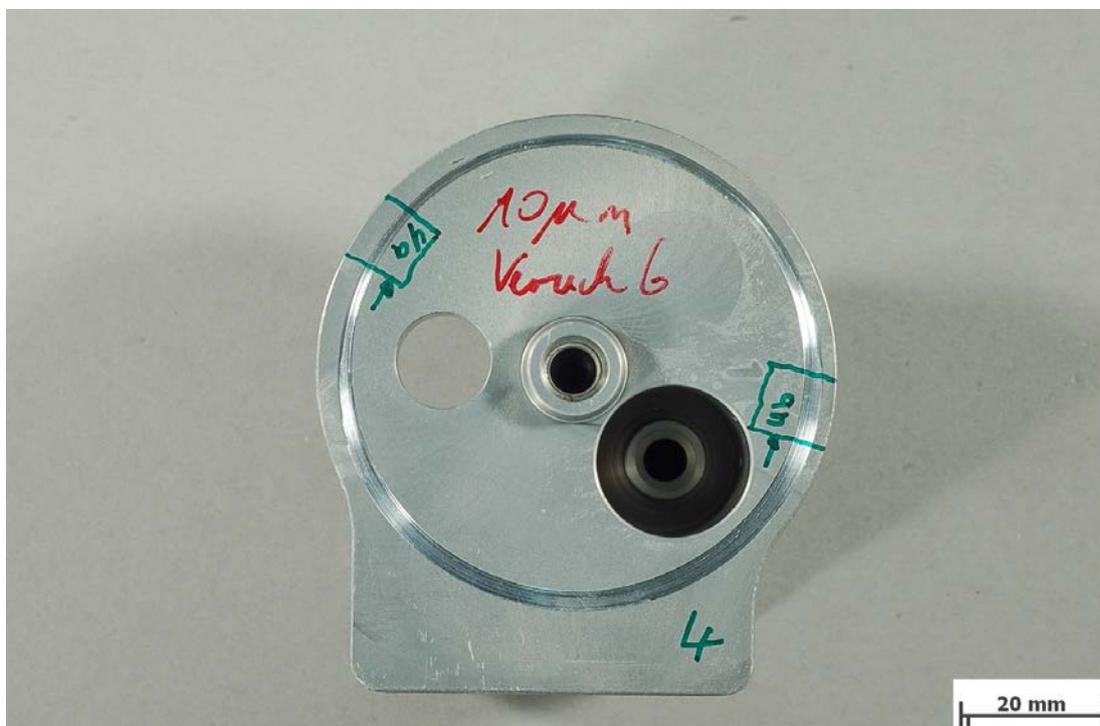


IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0035.jpg



Abbildung 94: Probe H3 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme Probe

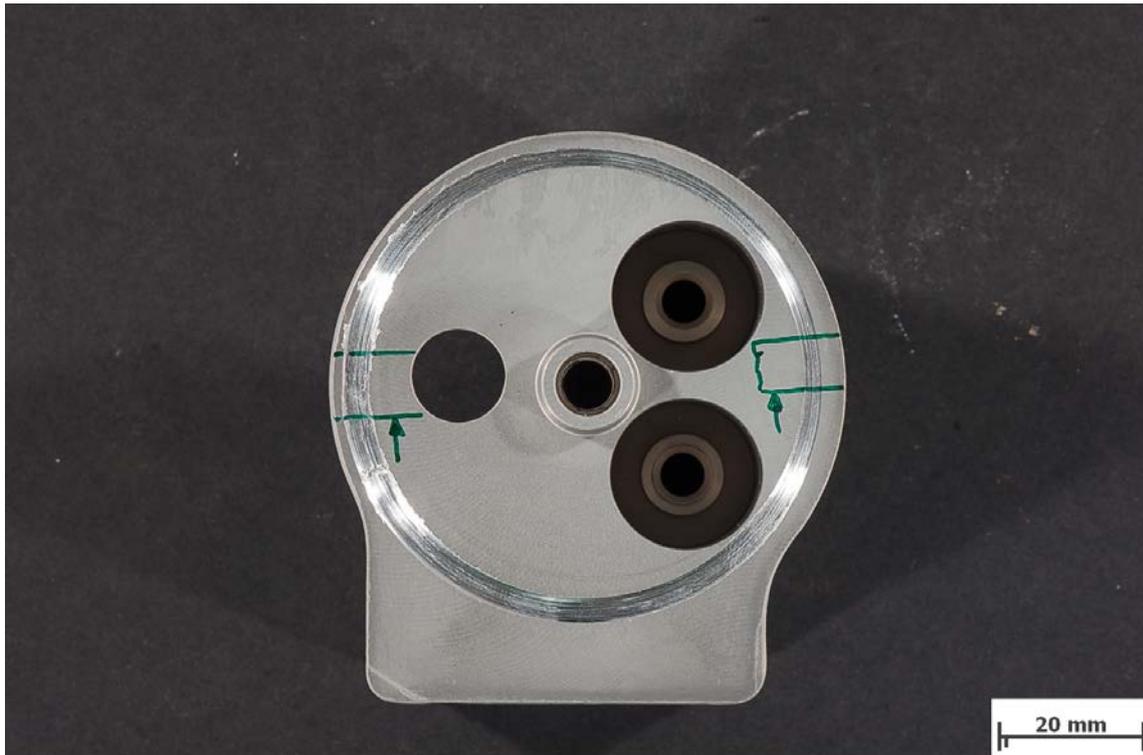


IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0036.jpg



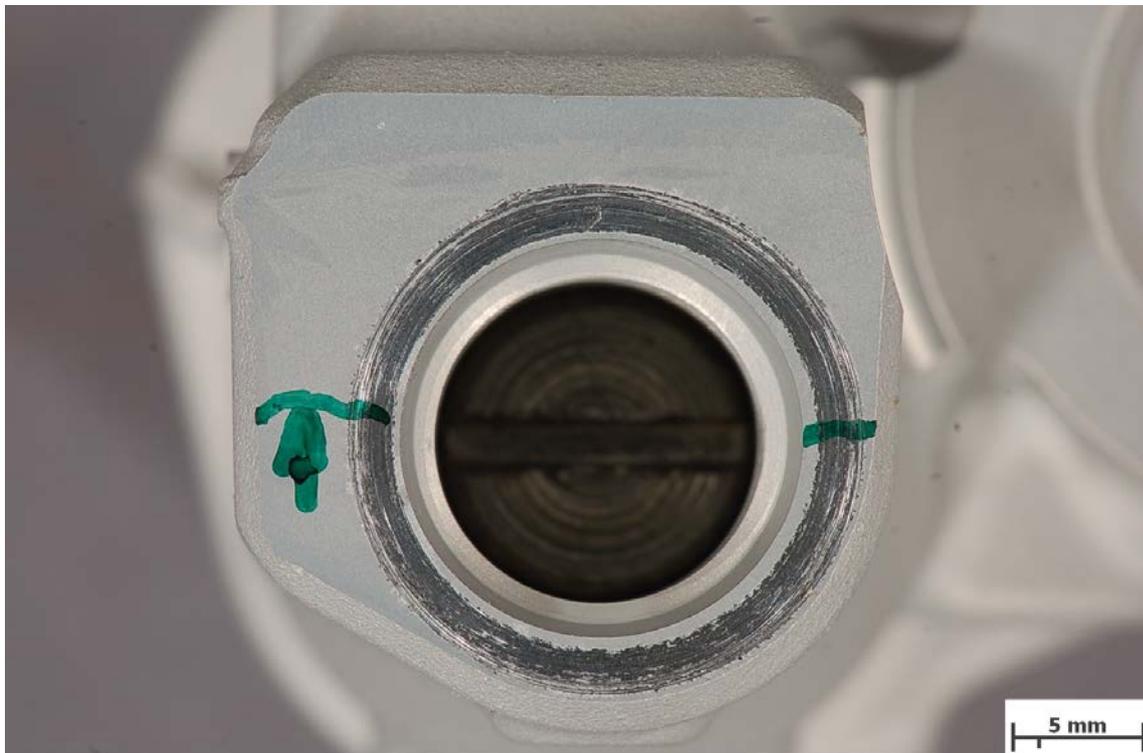
Abbildung 95: Probe H4 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme Probe



IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0133.jpg

Abbildung 96: Probe H5 / Verschleißspur und Position der Schliiffentnahme



IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0127.jpg

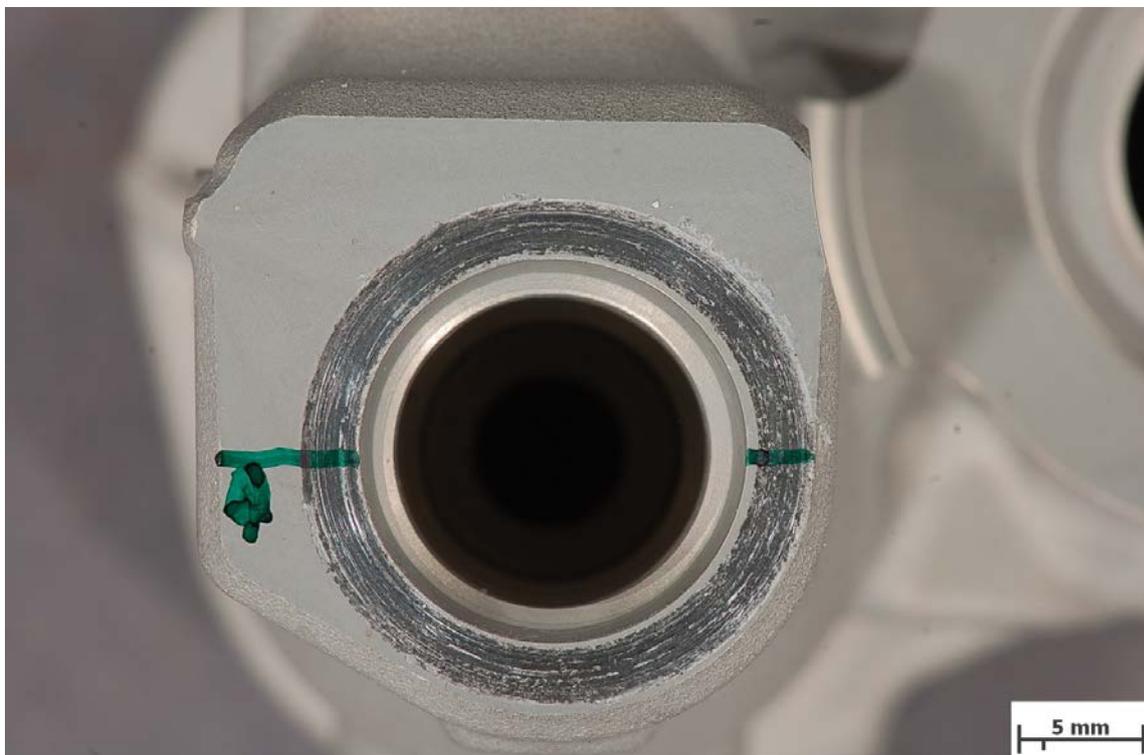
Abbildung 97: Probe N1 / Verschleißspur und Position der Schliiffentnahme



IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0128.jpg

Abbildung 98: Probe N2 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme



IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0129.jpg

Abbildung 99: Probe N3 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme



IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0130.jpg



Abbildung 100: Probe N4 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme

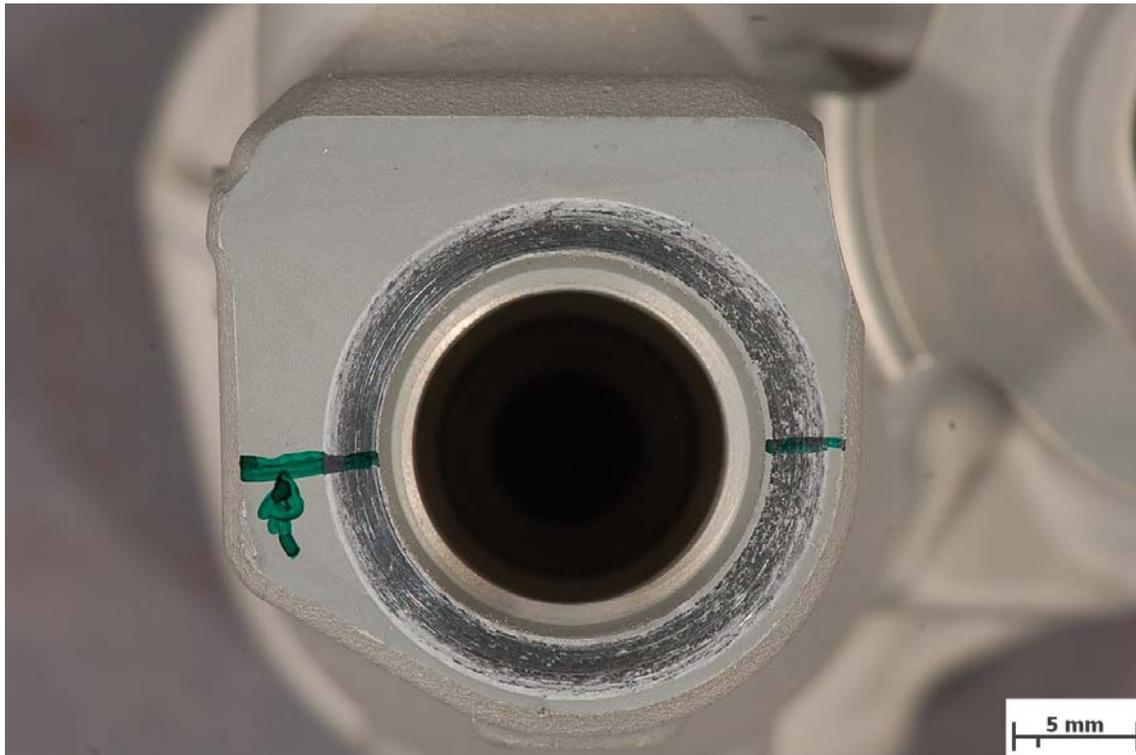


IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0131.jpg



Abbildung 101: Probe N5 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme



IWS SLR Makro

Bildname: hafteloxal14t0132.jpg



Abbildung 102: Probe N6 / Verschleißspur und Position der Schliffentnahme



Abbildung 103: Probe H1; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 425/395/399 HV0,01)

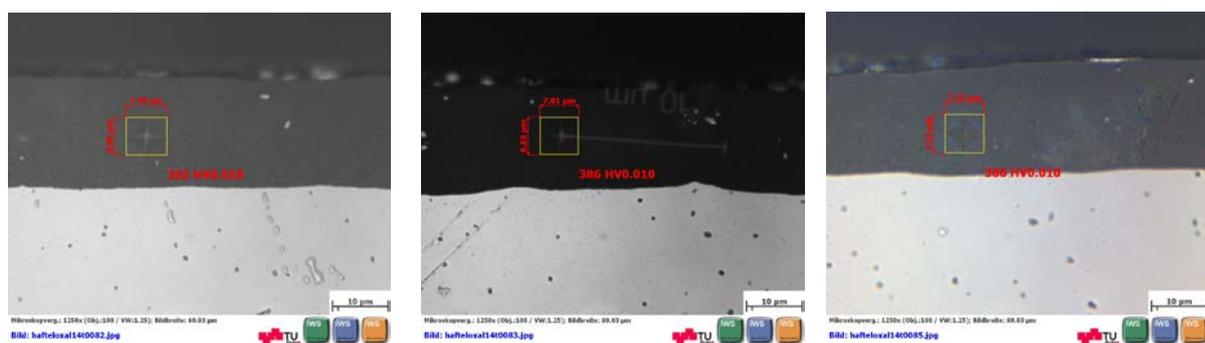


Abbildung 104: Probe H2; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 355/386/366 HV0,01)

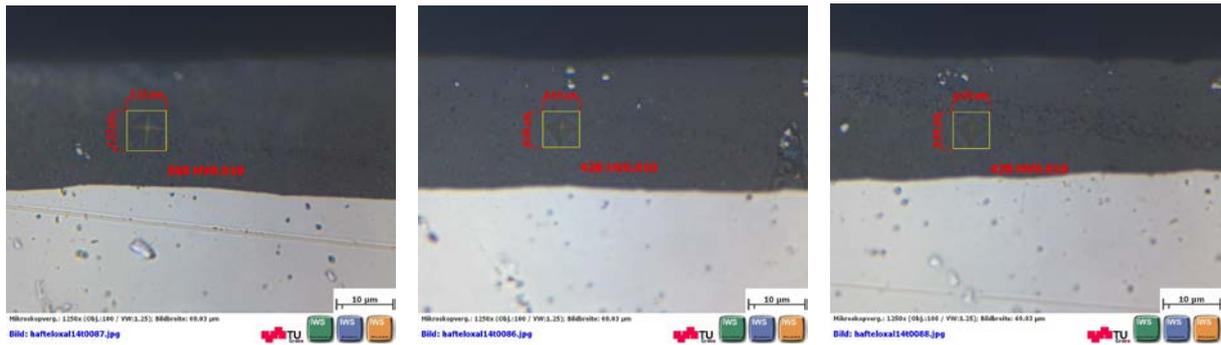


Abbildung 105: Probe H3; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 358/428/428 HV0,01)



Abbildung 106: Probe H4; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 431/346/421 HV0,01)



Abbildung 107: Probe H5; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 384/386/421 HV0,01)

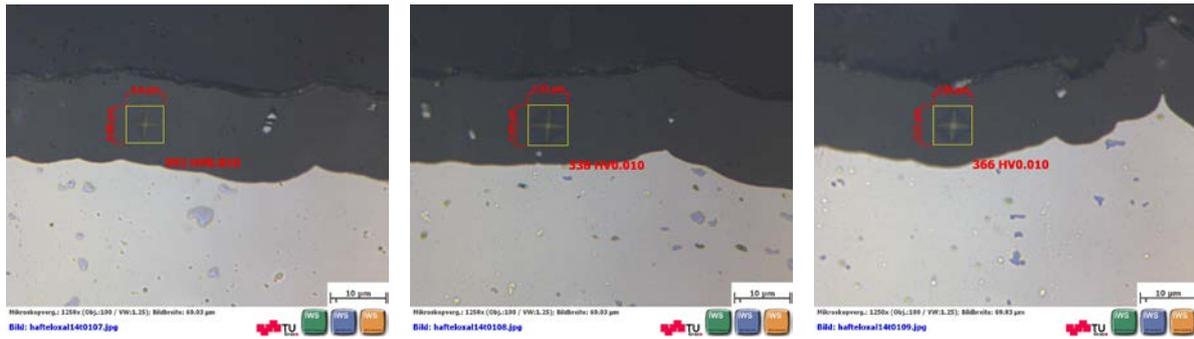


Abbildung 108: Probe N1; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 392/338/366 HV0,01)

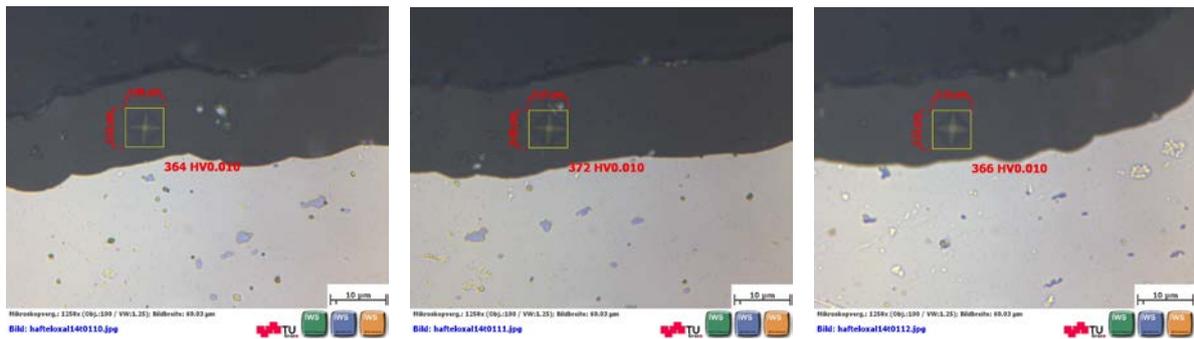


Abbildung 109: Probe N2; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 364/372/366 HV0,01)



Abbildung 110: Probe N3; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 333/343/351 HV0,01)

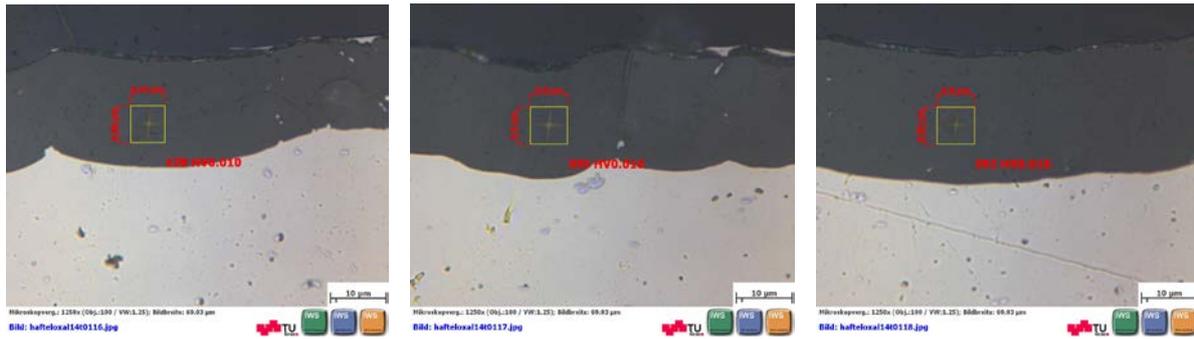


Abbildung 111: Probe N4; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 428/395/405 HV0,01)



Abbildung 112: Probe N5; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 384/324/392 HV0,01)



Abbildung 113: Probe N6; Härte und Schichtdicke im Querschliff (xx / yy / 21 µm - 438/351/375 HV0,01)

## 9.3 Verbände

### Definition (Recht)

Verbände sind Gruppen von Einzelpersonen (natürliche Personen) oder Körperschaften (juristische Personen) aller Art, die sich freiwillig zur Verfolgung gemeinsamer Zwecke zusammengeschlossen haben und meist über eine feste interne Organisationsstruktur auf Basis einer Satzung verfügen.

Verbände bündeln die Interessen der Einzelnen Mitglieder zum Erreichen gemeinsamer Ziel- oder Wertvorstellungen, sie stellen eine soziale Interessengruppe dar (Interessenverband). Sie existieren und agieren in allen Gesellschaftsbereichen. [137].

### Definition (Soziologie)

„Verband soll eine nach Außen regulierend beschränkte oder geschlossene soziale Beziehung dann heißen, wenn die Innenhaltung ihre Ordnung garantiert wird durch das eigens auf deren Durchführung eingestellte Verhalten bestimmter Menschen: eines Leiters und, eventuell, eines Verwaltungsstabes, der gegebenenfalls normalerweise zugleich Vertretungsgewalt hat.“ [138].

### Aufgaben

„Verbände erfüllen vielfältige Aufgaben innerhalb des politischen Systems. Durch ihre Möglichkeiten, gesellschaftliche Bedürfnisse an politische Entscheidungsträger heranzuziehen, stärken sie die Legitimität politischer Entscheidungen. Sie werden daher oftmals auch als Intermediäre, als Mittler zwischen Gesellschaft und Politik bezeichnet“ [138].

Die Aluminiumverbände sind in diesem Fall eher Wirtschafts- Verbände, eine Vereinigungen von Unternehmern (und Unternehmen) des gleichen fachlichen Wirtschaftszweiges, die ihre Interesse vertreten etc.

### 9.3.1 Aluminiumverbände (Auszug)

#### 1, **World Aluminium**

Adresse: [www.world-aluminium.org/](http://www.world-aluminium.org/)

#### EU:

#### 2, **EAA European Aluminium Association (Über 60 Mitglieder)**

Adresse: [www.eaa.net](http://www.eaa.net)

#### 3, **GDA Gesamtverband der Aluminiumindustrie**

Adresse: [www.aluinfo.de](http://www.aluinfo.de)

#### 4, **VAR Verband der Aluminiumrecycling- Industrie**

Adresse: [www.aluminium-recycling.com](http://www.aluminium-recycling.com)

#### 5, **OEA Organisation of European Aluminium Refiners and Remelters**

Adresse: [www.oea-alurecycling.org](http://www.oea-alurecycling.org)

**6, VOA Verband für die Oberflächenveredelung von Aluminium**

Adresse: [www.voa.de](http://www.voa.de)

**7, Verband der Aluminium Verarbeitenden Industrie**

Adresse: [web2.cylex.de/.../verband-der-aluminium-verarbeitenden-industrie-e--...](http://web2.cylex.de/.../verband-der-aluminium-verarbeitenden-industrie-e--...)

**8, EAFA European Aluminium Foil Association**

Adresse: [www.alufoil.org](http://www.alufoil.org)

**9, Aluminium- Verband- Schweiz**

Adresse: [www.alu.ch](http://www.alu.ch)

**10, WKO Fachverband NE-Metallindustrie**

Adresse: [www.nemetall.at/](http://www.nemetall.at/)

**USA und Canada:**

**11, The Aluminium Association**

Adresse: [www.aluminium.org/](http://www.aluminium.org/)

**12, AAC Aluminium Association of Canada**

Adresse: [www.aac.aluminium.qc.ca](http://www.aac.aluminium.qc.ca)

**Südamerika:**

**13, ABAL The Brazilian Aluminium Association**

Adresse. [www.abal.org.br](http://www.abal.org.br)

**Australien:**

**14, Anodisers Association of Australia**

Adresse: [www.anodising.org/](http://www.anodising.org/)

**Asien:**

**15, Aluminium Association of India**

Adresse: [www.aluminium-india.org/](http://www.aluminium-india.org/)

**Afrika:**

**16, AFSA Aluminium Federation of South Africa**

---

Adresse: [www.afsa.org.za/](http://www.afsa.org.za/)

### **9.3.2 Oberflächentechnikverbände (Auszug)**

Die Verbände im Bereich „ Oberflächentechnik „ haben eigentlich die gleichen Aufgaben wie die Aluminiumverbände. D. h. sie fördern und unterstützen die Zusammenarbeit der Unternehmen der Aluminiumbeschichtung im technisch- wissenschaftlichen wie auch im betriebswirtschaftlichen Bereich.

Die DGO ist eine gemeinnützige, wissenschaftliche- technische Gesellschaft mit den Zielen, die technologische Entwicklung sowie den Erfahrungs- und Wissensaustausch zwischen Wissenschaft und Praxis zu fördern.

**1, Deutsche Gesellschaft für Galvano- Oberflächentechnik e. V**

Adresse: [dgo.info@biv.org](mailto:dgo.info@biv.org)

**2, Zentralverband Oberflächentechnik ZVO**

Adresse: <http://www.zvo.org>

**3, Fachverband Oberflächentechnik e. V.**

Adresse: [www.123people.de/s/oberflächentechnik+fachverband](http://www.123people.de/s/oberflaechentechnik+fachverband)

**4, VLO- Vereinigung Lieferbetriebe für die Oberflächentechnik**

Adresse: [www.vlo-ss0-fsts.ch](http://www.vlo-ss0-fsts.ch)

### **9.4 Begriffe der Eloxaltechnik / Terms of anodisation technique**

<b>Anodization / Anodizing (Anodising)</b>	Anodisieren, Eloxieren
<b>Barrier layer</b>	Sperrschicht
<b>Coating</b>	Beschichtung
<b>Cold sealing</b>	Kaltversiegelung
<b>Roughness</b>	Rautiefe
<b>Sealing</b>	Verdichten

## 9.5 Abkürzungsverzeichnis und Formelverzeichnis

**SEM / REM** Scanning Electron Microscopy / Rasterelektronenmikroskop  
**TEM** Transmissionselektronenmikroskop

**OAA** Oxalic Acid Anodizing  
**HCA** Hard Coat Anodizing / Hartanodisieren  
**CAA** Chromic Acid Anodizing / Chromsäure Eloxieren  
**SAA** Sulfuric Acid Anodizing / Schwefelsäure Eloxieren  
**PAA** Phosphoric Acid Anodizing / Phosphorsäure Eloxieren  
**BSAA** Boric Sulfuric Anodizing / Bor- Schwefelsäure Eloxieren  
**EDS/EDX** Energy Dispersive Spectroscopy / Energie Spektroskopie  
**DC** Direct Current / Gleichstrom  
**PC** Pulsed Current / Impulsstrom  
**PEO** Plasma Electrolytic Oxidation / Plasmaelektrolytische Oxidation  
**SCC** Stress Corrosion Cracking / Spannungsrisskorrosion

**Al** Aluminium  
**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** Aluminiumoxid  
**Al(OH)<sub>3</sub>** Aluminiumhydroxid  
**H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>** Oxalsäure  
**H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>** Chromsäure  
**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** Schwefelsäure  
**H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>** Borsäure  
**H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>** Phosphorsäure  
**H<sub>6</sub>C<sub>4</sub>O<sub>6</sub>** Weinsäure  
**HCl** Salzsäure  
**HNO<sub>3</sub>** Salpetersäure

## 9.6 Normenverzeichnis

Normen Verfahren

DIN 50939 Chromatieren von Aluminium

MIL-C-5541E

DIN EN 2536 Hartanodisieren von Aluminium

MIL-A-8625F Typ 3

BS 5599

ISO 10074

DIN 17611 Anodisch oxidierte Erzeugnisse aus Aluminium

MIL-A-8625F Typ 2 GS-Anodisation mit und ohne Einfärben

Ö-Norm C-2531

BS 3987

DIN EN 2101 Chromsäure-Anodisieren von Aluminium

MIL-A-8625F Typ 1

DIN EN 12373-1 bis 19 Prüfung von anodischen Oxidschichten

BS 6161 Part 1 bis 18

ISO 3210 1983:

ISO 8251 2011: Verschleißtest