



Montanuniversität Leoben - University of Leoben

Department Metallurgie - Department of Metallurgy

Nichteisenmetallurgie - Nonferrous Metallurgy



# DIPLOMARBEIT

Thema:

## Werkstoffverbunde und Korrosion von NE-Metallen im Kfz-Bereich unter Berücksichtigung der EU-Altautorichtlinie



Ersteller:

Holger Schnideritsch

Betreuer:

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

Leoben, September 2006

# **Danksagung**

Diese Arbeit ist das Ergebnis meiner Tätigkeit als Diplomand am Institut für Nichteisenmetallurgie an der Montanuniversität Leoben in Kooperation mit der MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG in Graz.

Um dieses Ziel überhaupt erreichen zu können, standen mir in vergangenen Monaten viele hilfreiche Hände und Köpfe zur Seite, bei denen ich mich nun recht herzlich bedanke.

Mein aufrichtiger Dank gilt in erster Linie Herrn Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.mont. Helmut Antrekwitsch für seine langjährige, aufopfernde Hingabe zu den Studenten sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen, diese Diplomarbeit an der Nichteisenmetallurgie schreiben zu dürfen.

Besonders möchte ich mich bei meinen beiden Diplomarbeitsbetreuern Herrn Dipl.-Ing. Helmut Seebacher (Montanuniversität Leoben) und Herrn Dipl.-Ing. Peter Oswald (MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG) für ihre vorbildhafte Betreuung und Unterstützung während meiner „Diplomanden-Zeit“ bedanken.

Weiterer Dank gilt Frau Dipl.-Ing.Dr.techn. Heidi Schlatzer (MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG) für ihre beratende und unterstützende Funktion in den Fragen der Korrosionsprüfung sowie Herrn Muhr und Herrn Scherr für die „Betreuung“ meiner Proben vor und während der Korrosionstests.

Nicht zu vergessen sei die hilfreiche Unterstützung und Motivation durch die Belegschaft des MSF-Engineerings, des Prototypenbaus, der BMW X3-Lackierlinie und des Technischen Personals der Montanuniversität Leoben im Zeitraum der Probenherstellung.

Großer Dank gilt auch meinen Freunden und Kollegen die mir während des Studiums hilfreich zur Seite standen und mich begleiteten.

Abschließend möchte ich mich recht herzlich bei meinen Eltern bedanken. Nur durch ihre Unterstützung war es mir möglich, eine solche Ausbildung und Lebenserfahrung genießen zu können. DANKE!

St. Michael, September 2006

Holger Schnideritsch

*gewidmet meiner Familie  
und meiner Freundin*

## *Kurzfassung*

Die durch umwelt- und wirtschaftspolitische Aspekte initiierte Ära der Leichtmetallwerkstoffe im Automobilbau stellt die Konstrukteure vor immer neuere Herausforderungen. So gilt es, die Probleme auf dem Gebiet der Füge- und Beschichtungstechnik – verknüpft mit Korrosionserscheinungen – zu lösen, um den Image- und Kundenanforderungen am globalen Automobilmarkt zu entsprechen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die korrosionstechnische Untersuchung verschiedenster Werkstoff- und Fügekombinationen mittels Salzsprühtest (DIN 50 021), VDA Wechselklimatetest (VDA 621-415) sowie durch Messungen der charakteristischen Stromdichte-Potenzial-Kurven. Anhand der zu erwartenden Daten sind Rückschlüsse auf konstruktions- und produktionsspezifische Probleme möglich bzw. bilden diese einen Ansatz für denkbare Lösungen.

## *Abstract*

The era initiated by environmental-political and economic aspects of the light alloy materials in the automobile-construction leads to newer and newer challenges. Therefore it is a matter of solving the problems in the area of joining- and coating-technology – connected with corrosion phenomena – to correspond to the image- and customer-requirements for the global automobile market.

The purpose of this work is the corrosion-technical investigation of different material- and joining-combinations by means of salt spray test (DIN 50 021), change climate test VDA (VDA 621-415) as well as by measurements of the typical current-potential curves. With the help of the data conclusions on problems specific for production and construction are possible or this one form the base for possible solutions.

# Eidesstattliche Erklärung

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

---

Holger Schnideritsch

Leoben, September 2006

## **Werkstoffverbunde und Korrosion von NE-Metallen im Kfz-Bereich unter Berücksichtigung der EU-Altautorichtlinie**

Die MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG in Graz ist einer der führenden, markenunabhängigen Engineering- und Manufacturing-Partner der Automobilindustrie weltweit. Um die hohen Ansprüche des globalen Automobilmarktes sowie ihrer Vertrags- und Endkunden erfüllen zu können, sind ständige Optimierungen im Bereich der Konstruktion und Produktion notwendig.

Jahrelang wurde die Einsatzdauer eines Fahrzeugs durch die geringe Korrosionsbeständigkeit der einzelnen Baugruppen begrenzt. Aufgrund fortlaufend steigender Kundenanforderungen hinsichtlich Luxus, Modernität, Sparsamkeit sowie Lebensdauer entwickelte sich im Laufe der Zeit das Automobil vom einfachen Transportmittel zu einem sozialbestimmenden Prestigeobjekt. Um diese Wünsche befriedigen zu können, gibt es momentan zahlreiche Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des Leicht- bzw. Hybridbaus, der Motorentechnik und des Korrosionsschutzes.

Ziel dieser Diplomarbeit ist die korrosionstechnische Untersuchung verschiedenster Werkstoff- und Fügekombinationen mittels Salzsprühstest (DIN 50 021-SS) und VDA Wechselklimatest (VDA 621-415) unter Berücksichtigung kostengünstiger Produktionsmethoden und der EU-Altautorichtlinie.

Mit Hilfe der zu erwartenden Ergebnisse sind Rückschlüsse auf konstruktions- und produktionsspezifische Probleme möglich bzw. sollen diese einen denkbaren Lösungsansatz darstellen.

Leoben, im September 2006

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>VOLKSWIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE DER KORROSION</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN</b> .....	<b>6</b>
3.1	Korrosionsreaktionen .....	6
3.2	Gleichgewichtspotenziale .....	6
3.3	Chemische Gleichgewichte .....	7
3.4	Elektrochemische Zellen und Spannungsreihen .....	8
3.5	Gleichgewichtspotenzial-pH-Diagramm .....	9
3.6	Stromspannungskurve .....	10
3.7	Passivität .....	12
3.8	Einfluss der Verformung, Wärmebehandlung und der Kristallographie auf das Korrosionsverhalten .....	13
<b>4</b>	<b>ARTEN DER KORROSION</b> .....	<b>14</b>
4.1	Gleichförmige Korrosion .....	14
4.2	Muldenkorrosion .....	15
4.3	Lochkorrosion .....	16
4.4	Spaltkorrosion .....	19
4.5	Filiformkorrosion .....	20
4.6	Kontaktkorrosion .....	21
4.7	Selektive Korrosion .....	22
4.7.1	Interkristalline Korrosion .....	22
4.7.2	Schichtkorrosion .....	23
4.7.3	Spongiose .....	24
4.7.4	Entzinkung .....	24
4.8	Hochtemperaturkorrosion .....	25
4.9	Metal dusting .....	25
4.10	Mikrobiologische Korrosion .....	25
4.11	Spannungsrissskorrosion .....	27
4.12	Schwingungsrissskorrosion .....	29

---

4.13	Wasserstoffinduzierte Schädigung .....	29
4.14	Reibkorrosion .....	31
4.15	Erosionskorrosion.....	31
4.16	Kavitationskorrosion .....	31
4.17	Metallinduzierte Werkstoffschädigung.....	32
<b>5</b>	<b>KORROSION IM AUTOMOBILBAU .....</b>	<b>34</b>
5.1	Korrosionsbelastungen.....	35
5.1.1	Fremdbelastungen am Straßenfahrzeug.....	35
5.1.2	Fahrzeugeigenbelastungen.....	36
5.2	Korrosion und Korrosionsschutz an verschiedenen Fahrzeugbaugruppen.....	37
5.2.1	Karosserie .....	38
5.2.2	Verbindungselemente und Kleinteile .....	40
5.2.3	Fahrwerk .....	41
5.2.4	Kraftstoffsystem.....	42
5.2.5	Antrieb .....	43
5.2.6	Abgasanlage .....	44
5.2.7	Elektrik.....	45
5.3	Allgemeiner Korrosionsschutz .....	45
5.3.1	Konstruktiver Korrosionsschutz.....	45
5.3.2	Phosphatierung .....	47
5.3.3	Lackierung.....	47
5.3.4	Nahtversiegelung .....	48
5.3.5	Unterbodenschutz .....	48
5.3.6	Hohlraumkonservierung .....	48
5.3.7	Außenhautkonservierung .....	48
<b>6</b>	<b>KORROSIONSPRÜFVERFAHREN .....</b>	<b>49</b>
6.1	Kurzzeitprüfverfahren .....	50
6.2	Langzeitprüfverfahren .....	53
<b>7</b>	<b>FÜGETECHNIK IM AUTOMOBILBAU .....</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>KORROSIONSUNTERSUCHUNGEN AN DEN PROBEN .....</b>	<b>58</b>
8.1	Werkstoffbeschreibungen.....	58
8.1.1	Aluminiumlegierung AW-6016 T4.....	58
8.1.2	Magnesiumlegierung AZ91 HP .....	59
8.1.3	Stahlwerkstoff H260 PD + Z100MBO.....	60
8.1.4	Sonderwerkstoff CFK MSF.....	60
8.2	Modellierung der Probenform.....	61
8.3	Fügemethode der Proben .....	64
8.4	Vortestserie .....	65

---

---

8.5	Haupttestserie .....	65
8.6	Auswertung .....	66
8.7	Nomenklatur .....	68
<b>9</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>72</b>
9.1	Aluminium-Stahl-Stanznieten (alstn) .....	72
9.2	Aluminium-Stahl-Durchsetzfugen (alstd) .....	76
9.3	Aluminium-Aluminium-Geomet 321-Schraube (alalgeo) .....	80
9.4	Aluminium-CFK-Geomet 321-Schraube (alcfkgeo) .....	84
9.5	Aluminium-Stahl-Geomet 321-Schraube (alstgeo) .....	88
9.6	CFK-Stahl-Geomet 321-Schraube (cfkstgeo) .....	92
9.7	Aluminium-Magnesium-Aluminiumschraube (almgal) .....	96
9.8	Aluminium-CFK-Aluminiumschraube (alcfkal) .....	100
9.9	Aluminium-Stahl-Aluminiumschraube (alstal) .....	104
9.10	Magnesium-Magnesium-Aluminiumschraube (mgmgal) .....	108
9.11	Magnesium-CFK-Aluminiumschraube (mgcfkal) .....	112
9.12	Magnesium-Stahl-Aluminiumschraube (mgstal) .....	116
9.13	CFK-Stahl-Aluminiumschraube (cfkstal) .....	120
9.14	Gravimetrische Messung .....	124
9.15	Stromdichte-Potenzialmessungen (IU-Kurven) .....	125
<b>10</b>	<b>GEGENÜBERSTELLUNG SALZSPRÜHTEST DIN 50 021-SS – WECHSELKLIMATEST VDA 621-415 .....</b>	<b>126</b>
<b>11</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>128</b>
<b>12</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>131</b>
<b>13</b>	<b>LITERATUR .....</b>	<b>132</b>
<b>14</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>135</b>
<b>15</b>	<b>TABELLEN UND ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>136</b>

<b>16</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>141</b>
16.1	RIVSET®- und RIVCLINCH®-Datenblätter.....	141
16.2	CathoGuard® Elektrotauchlack-Datenblatt.....	145
16.3	Übersicht Fügeverfahren.....	148
16.4	Galvanische Spannungsreihe.....	161

# 1 Einleitung

Das Wort Korrosion leitet sich vom Lateinischen *corrodere* (= zernagen, zernagen) ab und beschreibt eine uns täglich begleitende, überall anzutreffende Erscheinungsform der Materialzerstörung. Diese ergibt sich, bedingt durch einen Ungleichgewichtszustand, aus der Reaktion des Materials mit seiner Umgebung, welche in Form von Rostschäden an Automobilen, Rohrbrüchen, etc. jedem bekannt sind. Die eigentliche Zerstörung des Werkstoffes bzw. Bauteils ist nicht nur mit einem Wertverlust, sondern auch mit den daraus folgenden Sachschäden bzw. sogar Personenschäden verbunden. In diesem Sinne ist eine Korrosionsvorbeugung, Überprüfung und Instandhaltung relevanter Systeme von sicherheitstechnischem und volkswirtschaftlichem Interesse. Alleine in Österreich belaufen sich die Kosten für diese erforderlichen Maßnahmen auf mehrere Milliarden Euro im Jahr (2001: ~ 8,4 Mrd. €) <sup>[1], [22]</sup>.

## EU-Altautorichtlinie

Die „Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge“ – im weiteren „EU-Altfahrzeugrichtlinie“ genannt ist am 1. Juli 2002 in Kraft getreten. Diese Richtlinie muss durch die nationalen Legislativen der Mitgliedstaaten umgesetzt werden, in Österreich geschieht dies in der „407. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von Altfahrzeugen (Altfahrzeugeverordnung)“ vom 5. November 2002 <sup>[2]</sup>.

Die wesentlichen Eckpunkte der EU-Altfahrzeugrichtlinie sind <sup>[2]</sup>:

- Sie gilt für alle Neu- und Altfahrzeuge (PKW, leichte Nutzfahrzeuge und bestimmte dreirädrige Kfz), einschließlich Bauteile, Werkstoffe sowie Ersatz- und Nachrüstteile.
- Sie fordert den Aufbau einer flächendeckenden Infrastruktur zur Rücknahme, Sammlung und Verwertung der Altfahrzeuge sowie deren Wertstoffe.
- Die Hersteller (Importeure) müssen die Rücknahme- und Entsorgungskosten für die in den Verkehr gebrachten Fahrzeuge der „eigenen“ Marke (die nach dem 1. Juli 2002 zugelassen wurden) und für alle Altfahrzeuge der „eigenen“ Marke ab 2007 vollständig übernehmen.
- Ab 2006 müssen mind. 85 Gew. % eines Altfahrzeuges verwertet und mind. 80 % wieder verwendet oder stofflich verwertet werden.

- Ab 2015 müssen diese Zielvorgaben auf 95 Gew. % für die Verwertung bzw. 85 % für Wiederverwendung oder stoffliche Verwertung gesteigert werden.
- Daraus folgt, dass letztlich nur mehr max. 5 Gew. % des Altfahrzeuges auf eine Deponie gelangen dürfen.
- Bei der Produktion von Fahrzeugen bzw. Bauteilen muss ab dem 1. Juli 2003 auf die Verwendung von Cadmium (Cd), Blei (Pb), Quecksilber (Hg) und sechswertigem Chrom (Cr<sup>6+</sup>) verzichtet werden (gemäß Anhang II).
- Der Aufbau eines Monitoring-Systems, zur Überprüfung der Einhaltung von Verpflichtungen, die sich aus dieser Verordnung ergeben. Die Kontrolle erfolgt durch das zuständige Ministerium bzw. durch die EU-Kommission. Infolge der Verordnung müssen die jeweiligen Aufzeichnungs- und Meldepflichten sowie die Informationsflüsse genau dargestellt werden. Ein wesentlicher Punkt in dieser „Pflichtenliste“ ist die Angabe der Recycling- und Verwertungsquoten durch die Hersteller bzw. Importeure.

### **Geschichte und Innovation**

Seit mehreren tausend Jahren beschäftigt sich die Menschheit mit der Gewinnung von Metallen, deren Weiterverarbeitung und der Korrosion – einer Zwangsbegleiterscheinung. Bereits Plato (427 – 347 v. Chr.) berichtete über das Rosten von Eisen, welches er als „Ausscheidung des Erdigen aus dem Eisen“ bezeichnete. Jene Theorie galt bis in das 16. Jhdt., wo Georg Agricola (1494 – 1555) in seinem mineralogischen Werk *de natura fossilium* (1546) verzeichnete: „Der Eisenrost (ferrugo oder auch rubigo corripit ferrum) ist sozusagen eine Ausscheidung des metallischen Eisens. Man schützt das Eisen gegen diesen Fehler durch mancherlei Anstriche, wie Mennige, Bleiweiß, Bitumen und Holzteer“. Diese Art des Korrosionsschutzes war bereits schon zur Römerzeit bekannt. Im 17. Jhdt. behalf man sich mit der Phlogistontheorie, in welcher Georg Ernst Stahl (1660 – 1734) lehrte, dass die Oxidation eines Stoffes mit dem Entweichen des „Phlogiston“ verkettet sei. Wird ein „phlogistonreicher“ Stoff diesem zugesetzt, kann die Oxidation verhindert werden. Sir Humphry Davy, Alessandro Volta, Michael Faraday und viele andere mehr seien noch genannt, welche ihr Leben der Grundlagenforschung widmeten. Weitere historische Daten sind aus Tabelle 1 zu entnehmen <sup>[1], [6], [22]</sup>.

Ausgehend von der Luft- und Raumfahrtindustrie inspiriert der Leichtbau die gesamte Fahrzeugindustrie. Das Ziel: geringerer Energie- und Treibstoffverbrauch bzw. ein höheres Nutzvolumen bei gleichem Gewicht. Auch das wachsende Bedürfnis an Luxus, Modernität und mehr Sicherheit im Automobilbau stellt eine neue und schwierige Herausforderung für die Konstrukteure und Werkstofftechniker dar. Dieses Vorhaben ist hauptsächlich durch den

Einsatz von Leichtmetallen wie Aluminium und Magnesium sowie von innovativen Faserverbundwerkstoffen und Tailored Blanks realisierbar. Die mit einer solchen Hybridbauweise verbundenen Probleme hinsichtlich der Festigkeits- und Korrosionseigenschaften gilt es noch zu lösen. Vor allem den Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Füge- und Beschichtungstechnik wird eine zukunftsweisende Rolle zugesprochen <sup>[25], [33]</sup>.

370 v. Chr.	erste Überlieferung vom Rosten des Eisens durch Plato
250 v. Chr.	Römer verhindern Kontaktkorrosion im Schiffsbau durch Bleiüberzüge an Kupfernägeln
70 v. Chr.	Plinius erwähnt Bitumen und Asphalt als Korrosionsschutz für Eisenbauteile
30 v. Chr.	Vitruv befasst sich mit der Korrosion in der Architektur
1412 n. Chr.	Wasserbaumeister L. Krag erwähnt Korrosion an schmiedeeisernen Rohren von Augsburg
1603	Guibert definiert den Begriff „Korrosion“
1681	Pech und Teer als Korrosionsschutz im Schiffsbau in England patentiert
1774	A. Lavoisier begründet die Sauerstofftheorie der Korrosion
1799	S. Hickling patentiert Glasüberzüge als Schutz für Metallgefäße
1801	Volta entdeckt die Spannungsreihe der Metalle
1819	V. Tenard erkennt Rosten als elektrolytischen Vorgang
1824	H. Davy erfindet den kathodischen Schutz für Schiffe
1834	M. Faraday entdeckt das Äquivalenzgesetz der Elektrolyse
1851	M. Vogelsang verfasst ein Lehrbuch über die Emaillierkunst von Eisen
1858	C. Frischen berichtet über den Schutz von Eisen durch galvanische Elektrizität
1891	T. Edison befasst sich mit dem kathodischen Fremdstromschutz
1885	erste Streustromableitung in New York und Aachen
1906	F. Haber misst Korrosionsströme von Rohrleitungen und Rohr/Bodenpotenziale, erstes deutsches Patent für kathodischen Streustromschutz durch H. Geppert
1911	E. Cumberland schützt Dampfkessel mittels Fremdstrom
1922	der Berliner Apotheker Schade entwickelt eine plastische Korrosionsschutzbinde
1929	erste Isolierstücke in Rohrleitungen gegen Streustrom
1931	Übergang von Bitumen-Jute-Umhüllungen auf Bitumen-Wollfilzpappe
1934	Streustromdrainagen für Fernmeldekabel in Mailand
1936	erster kathodischer Fremdstromschutz in Brüssel
1949	Kühlwasserleitungen bei Braunschweig mit Zinkanoden kathodisch geschützt
1952	im Saarland und in der Pfalz erster kathodischer Schutz für Gasfernleitungen
1955	Gründung der Europäischen Föderation Korrosion
1958	Gründung des europäischen Korrosionskomitees CEOCOR in Luxemburg
1960	Entwicklung der Kunststoffumhüllung für Stahlrohre
1965	mehrlagige Kunststoffbinden als Baustellenumhüllung, Entwurf DIN 30672
1990	Beginn der europäischen Normung für Korrosionsschutz CEN-TC 262

Tabelle 1: Historische Daten der Korrosionsforschung <sup>[6]</sup>

## 2 Volkswirtschaftliche Aspekte der Korrosion

Allgemein betrachtet lassen sich die Kosten auf dem Gebiet der Korrosion in zwei Abschnitte unterteilen. Die erste Kategorie umfasst die Kosten des planmäßigen Korrosionsschutzes, bestehend aus den Erstkosten und den Instandhaltungskosten, die zweite die Korrosionsschadenskosten, bestehend aus Kosten der primären und sekundären Schädigung. Die beschriebene Aufschlüsselung ist in Abbildung 1 dargestellt <sup>[6], [22]</sup>.

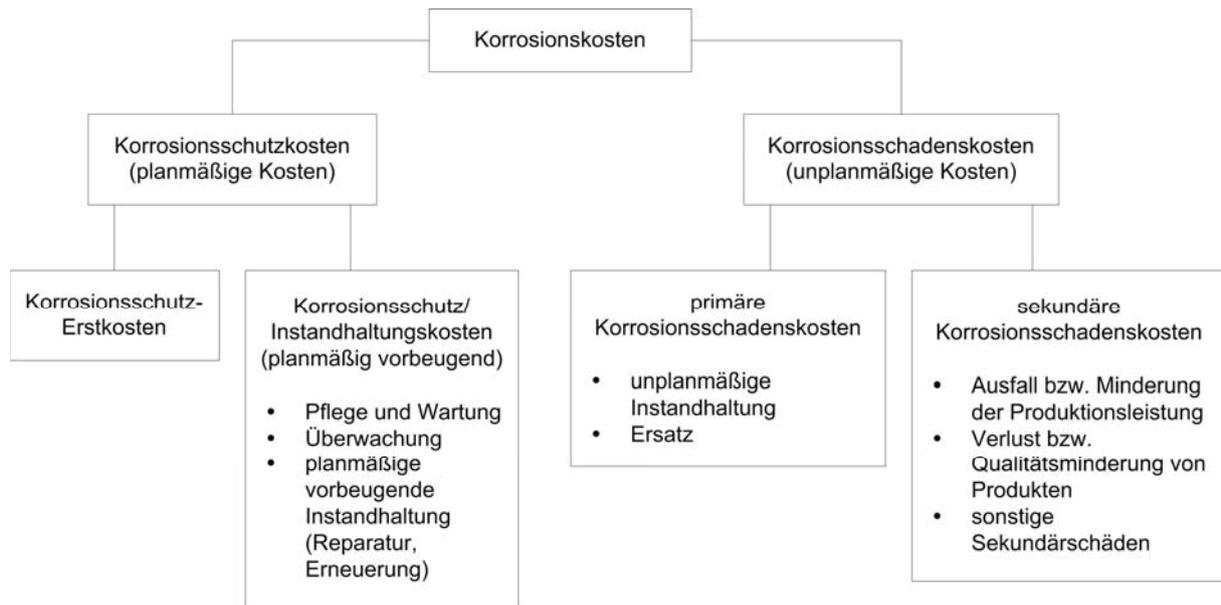


Abbildung 1: Kosten verursacht durch Korrosion <sup>[6]</sup>

Es sollte dabei bedacht werden, dass die Schadenskosten oft höher als die Erstkosten sind, vor allem wenn mit einer Umweltgefährdung (beschädigter Öltank) oder mit Personenschäden (defekte Transporteinrichtung) zu rechnen ist. Etwa ein Viertel aller Korrosionskosten wären durch regelmäßige Überprüfung relevanter Systeme vermeidbar. Eine generelle Unterteilung der Folgeschäden ist in Tabelle 2 ersichtlich <sup>[6], [22]</sup>.

Produktionsverluste	Produktionsausfall infolge von Korrosion vor allem in den Bereichen der chemischen Industrie, Kraftwerken und Transporteinrichtungen (Stillstände, Notabschaltungen, etc.).
Effizienzverluste	Überall dort wo durch die Ablagerung von Korrosionsprodukten die Durchsatzleistung bzw. Energieübertragung des Systems vermindert wird (Rohrleitungen, Filteranlagen, Wärmetauscher, elektrische Kontakte, etc.).
Produktkontamination	Zu berücksichtigen in den Sparten der pharmazeutischen, Lebensmittel- und Pigmentindustrie. Korrosion kann hier eine Produktminderung bzw. einen Totalverlust bedeuten. Die Kontamination von Kühlwasser durch radioaktive Stoffe in Kernkraftwerken stellt das größte Problem dar.
Überdimensionierung von Bau-/Anlagenteilen	Bereits in der Konstruktion von Bau-/Anlagenteilen wird die Auswirkung einer möglichen Korrosion in Form von Bauteilüberdimensionierungen, Geometrie- und Werkstoffänderungen berücksichtigt. Dadurch ergeben sich höhere Forschungs-, Betriebs- und Materialkosten.
hohe Versicherungskosten	Überall dort, wo mit hohen Umwelt- und Personenschäden zu rechnen ist (Offshore, Transport, chemische Industrie, etc.).
besondere Folgeschäden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausfall von Gas, Wasser, Heizung, Strom und Steuersystemen in Industrieanlagen und Ballungszentren.</li> <li>• Umwelt-/Personengefährdung durch Entweichen von chemischen, biologischen und radioaktiven Substanzen.</li> <li>• Gesamterneuerung von Gebäuden, Brücken, Anlagen, etc.</li> <li>• Veränderung der Arbeitsmarktsituation infolge eines Total- und/oder Imageverlustes (Automobilindustrie, Elektronikindustrie, etc.).</li> </ul>

Tabelle 2: Unterteilung der Folgeschäden <sup>[6]</sup>

### 3 Grundlagen

Das folgende Kapitel befasst sich mit den elektrochemischen und chemischen Gleichgewichten, der Thermodynamik und weiteren chemisch-physikalischen Grundlagen der Korrosion. Als wichtigste Voraussetzungen für eine korrosive Schädigung ist der Kontakt des Werkstoffes mit einem Elektrolyten, einer ionenleitenden Phase oder einem anderen Werkstoff anzusehen. Weiters müssen die kinetischen Bedingungen erfüllt werden, um einen Schädigungsprozess zu initiieren bzw. aufrecht zu halten.

#### 3.1 Korrosionsreaktionen

Metalle sowie organische Werkstoffe zersetzen sich infolge Korrosion zu löslichen, festen oder gasförmigen Stoffen. Oxidische Werkstoffe werden entweder aufgelöst oder in eine andere Verbindung umgewandelt. Der Korrosionsvorgang wird generell in eine oxidierende (anodische) und reduzierende (kathodische) Teilreaktion untergliedert. Diese sind in den Gleichungen (3.1) und (3.2) ersichtlich <sup>[6], [22], [38]</sup>.



#### 3.2 Gleichgewichtspotenziale

Werden von einer Metallelektrode Ionen ( $\text{Me}^{n+}$ ) oder Elektronen ( $\text{e}^-$ ) in die Phasengrenzschicht übertragen, so besteht die Möglichkeit, dass sich bei gleicher Geschwindigkeit der Hin- und Rückreaktion ein Metall-Metallionengleichgewicht bzw. ein Redox-Gleichgewichtspotenzial bildet. In diesen beiden Fällen erfolgt kein Angriff des metallischen Werkstoffes wie in Abbildung 2 ersichtlich ist. Ausschlaggebend hierfür ist die Geschwindigkeit der Hin- und Rückreaktion des Systems, welche durch das Faradaysche Gesetz (Gleichung (3.3)) bestimmt wird <sup>[6], [22], [38]</sup>.

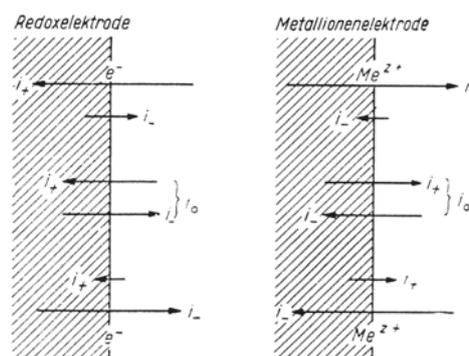


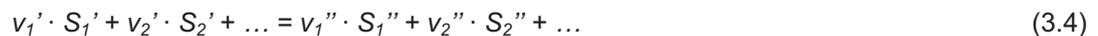
Abbildung 2: Graphische Erläuterung eines Metallionen- bzw. Redoxgleichgewichtes <sup>[6]</sup>

Faradaysches Gesetz: 
$$i = \frac{dm}{dt} = \frac{M \cdot I}{n \cdot F} \quad (3.3)$$

Je nach Polarisation der Elektrode wird die Teilstromdichte  $i$  entweder in den positiven anodischen (edleren) bzw. in den negativen kathodischen (unedleren) Bereich verschoben. Der daraus folgende Stromfluss führt entweder zu einer Oxidation (Gleichung (3.1)) oder Reduktion (Gleichung (3.2)) bzw. Änderung der Reaktionsrichtung im vorliegenden System [6], [22], [38].

### 3.3 Chemische Gleichgewichte

Die allgemeine Form eines chemischen Gleichgewichtes wird mit folgender Gleichung (3.4) beschrieben:



Die Reaktionsrichtung steht in Abhängigkeit zur Gibbs-Funktion (Gleichungen (3.5) bis (3.7)) und läuft immer in Richtung der niedrigsten freien Energie  $\Delta G$ . Eine bildliche Erklärung dieses Ablaufes ist in Abbildung 3 wiedergegeben [6], [22], [38].

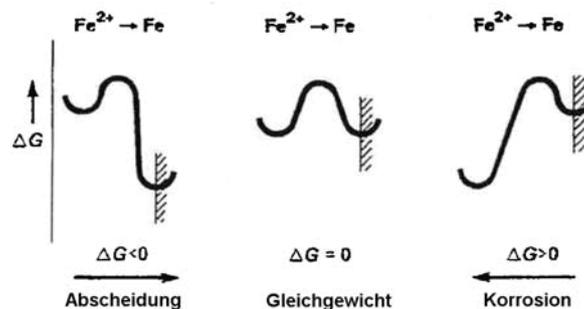


Abbildung 3: Bildliche Erklärung der Gibbs-Funktion [22]

Gibbs-Funktion: 
$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3.5)$$

$$\Delta G = -n \cdot F \cdot E \quad (3.6)$$

$$G_0 = -R \cdot T \cdot \ln K \quad (3.7)$$

### 3.4 Elektrochemische Zellen und Spannungsreihen

Eine elektrochemische Zelle besteht aus zwei leitenden Elektroden, die in einen Elektrolyt getaucht werden. Je nach Reaktionsverhalten wird zwischen folgenden Zelltypen unterschieden:

- **Galvanische Zelle**

Diese gibt infolge innerer elektrochemischer Reaktionen Strom ab. Beispiele hierfür sind Akkumulatoren bzw. Batterien sowie Kontaktkorrosionserscheinungen<sup>[6]</sup>.

- **Elektrolytische Zelle**

Durch einen angelegten Fremdstrom werden Reaktionen im Zellinneren bewirkt. Dieser Zelltyp ist mit dem Prinzip des kathodischen Schutzes vergleichbar<sup>[6]</sup>.

Ein oft benutztes Beispiel zur Veranschaulichung der galvanischen Zelle ist das sogenannte Daniell-Element in Abbildung 4. Dieses besteht aus zwei galvanisch verbundenen Elektroden aus Kupfer und Zink, welche unter Stromabgabe miteinander reagieren. Die messbare Zellspannung entspricht der Differenz der Elektrodenpotenziale<sup>[6]</sup>.

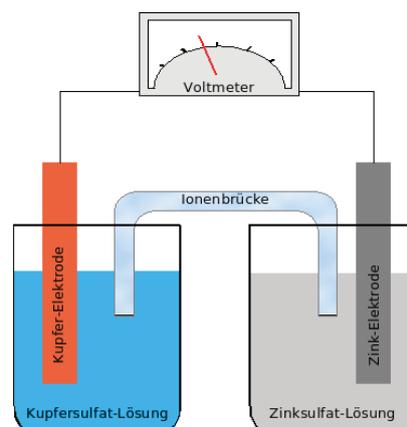


Abbildung 4: Daniell-Element<sup>[1]</sup>

Die Potenzialdifferenz zwischen Elektrode und Elektrolyt (Halbelement) ist hingegen nicht direkt messbar. Aus diesem Grund wurde die Normal-Wasserstoff-Elektrode als Referenzelektrode für elektrochemische Messungen eingeführt, die den Nullpunkt der Standardpotenzialskala festlegt. Diese besteht aus einem platinieren Platinblech, welches in eine saure wässrige Lösung ( $a(\text{H}^+) = 1$ ) eintaucht und mit Wasserstoff ( $p = 1 \text{ atm}$ ) umspült wird. Somit ist es möglich, das Normalpotenzial von Halbelementen zu bestimmen bzw. zu vergleichen. Die Zusammenstellung verschiedenster Normalpotenziale bzw. Halbelemente ergibt die sogenannte elektrochemische Spannungsreihe. Metalle mit einem negativen Vorzeichen werden als unedel bzw. Metalle mit positivem Vorzeichen als edel bezeichnet. In

einer beliebigen galvanischen Zelle entspricht das unedle Metall der Anode (Oxidation), das edle Metall der Kathode (Reduktion). Direkte Aussagen bezüglich Kontaktkorrosion sind nur eingeschränkt möglich, da die Messungen unter Standardbedingungen bzw. idealen Verhältnissen erfolgen. In der Praxis bezieht man sich daher auf praktische Spannungsreihen, die das chemische Verhalten von Metallen bzw. Legierungen in realen Elektrolyten (Meer- oder Leitungswasser, Lösungsmittel, etc.) wiedergeben. Eine galvanische Spannungsreihe verschiedenster Metalle bzw. Legierungen befindet sich im Anhang [6], [21], [22].

### 3.5 Gleichgewichtspotenzial-pH-Diagramm

Die durch M. Pourbaix erstellten Gleichgewichtsdiagramme geben den Einfluss des pH-Wertes ( $H^+$ -Ionen-Konzentration) und des Elektrodenpotenzials ( $n \cdot e^-$ ) auf die thermodynamische Beständigkeit einer Substanz wieder. Der Reaktionsverlauf ist abhängig von der bereits erwähnten Gibbs-Funktion und des jeweiligen Redoxpotenzials des Systems (siehe Gleichung (3.8)). Je nach Variation des pH-Wertes, Elektrodenpotenzials und Bezugselektrolyten stellen sich verschiedene Existenzbereiche der Metalle und ihrer Korrosionsprodukte ein. In Abbildung 5 und Abbildung 6 werden als Beispiele die verschiedenen Existenzbereiche von Aluminium und Magnesium angeführt. Bei Anwesenheit von Fremdionen können diese unter Komplexbildung den Bereich des korrosiven Angriffs bzw. der Passivität erweitern oder verschieben [6], [22], [38].

$$G = G_0 + R \cdot T \cdot \ln \frac{(a_{S_1''})^{v_1''} \cdot (a_{S_2''})^{v_2''}}{(a_{S_1'})^{v_1'} \cdot (a_{S_2'})^{v_2'}} \quad (3.8)$$

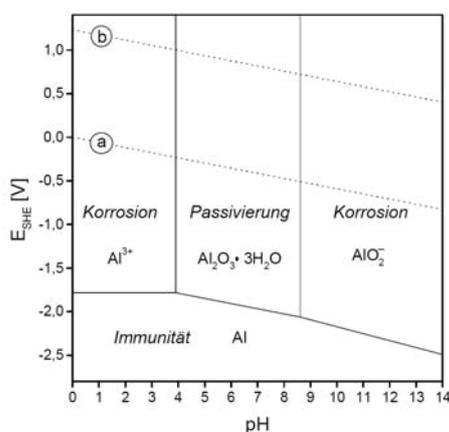


Abbildung 5: Vereinfachtes Pourbaix-Diagramm für Aluminium in  $H_2O$  ( $25^\circ C$ ) mit einer Hydrargillit-Passivschichtausbildung ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ) [21]

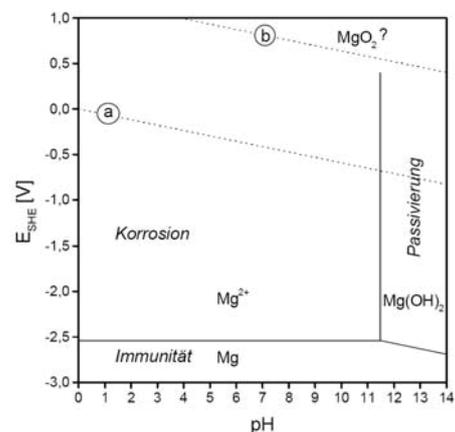


Abbildung 6: Vereinfachtes Pourbaix-Diagramm für Magnesium in  $H_2O$  ( $25^\circ C$ ) [21]

Folgende allgemeine Gleichung (3.9) beschreibt den Verlauf einer elektrochemischen Reaktion, wobei  $A_X$  die oxidierte und  $B_X$  die reduzierte Form des betreffenden Elements X darstellt. Die durch den Ladungsaustausch gebildeten  $H^+$ -Ionen führen zu einer Herabsetzung des pH-Wertes und zu einem verstärkten korrosiven Angriff. Gleichung (3.10) gibt die Gleichgewichtsbedingung des Systems wieder. Die dazu notwendigen Voraussetzungen sind <sup>[6], [22]</sup>:

- Elektrodenpotenzial und pH-Wert sind unabhängige Variablen.
- Die logarithmische Funktion der Konzentrationen bzw. Drücke der Substanzen  $A_X$  und  $B_X$  dient als Parameter.
- Der Existenzbereich wird durch die thermodynamischen Begrenzungslinien a ( $E_{0,a} = 0,000 - 0,0591 \cdot \text{pH [V]}$ ) und b ( $E_{0,b} = 1,228 - 0,0591 \cdot \text{pH [V]}$ ) definiert und als Bezugssystem für alle elektrochemischen Korrosionen in wässrigen Lösungen herangezogen.



$$E_0 = \frac{E_{0,0}}{n} - \frac{0,0591}{n} \cdot m H^+ + \frac{0,0591}{(B_X) \cdot b} \cdot \log(A_X) \cdot a \quad (3.10)$$

### 3.6 Stromspannungskurve

Die Messung von Stromspannungskurven spielt in der Korrosionskunde eine wesentliche Rolle. Im Allgemeinen wird zwischen den folgenden Messverfahren unterschieden <sup>[16], [17]</sup>:

#### Stationären Verfahren

Mit Hilfe dieser Verfahren kann der funktionale Zusammenhang der Variablen einer elektrochemischen Reaktion (Stromstärke I in Abhängigkeit vom Potenzial E) bei einer zeitunabhängigen Betrachtung bestimmt werden. Die auf die Elektrodenoberfläche A bezogene Stromdichte i (siehe Gleichung (3.11)) ist dabei von großem Interesse <sup>[16], [39]</sup>.

$$i = \frac{I}{A} \quad (3.11)$$

- **Galvanostatische Messung**

Bei diesem Verfahren wird zwischen der Mess- und Gegenelektrode ein konstanter Strom aufgedrückt, die Messung des sich an der Messelektrode eingestellten

Potenzials erfolgt mittels Bezugselektrode. In Abbildung 7 ist das schematische Schaltbild dieser Messmethode ersichtlich <sup>[16], [39]</sup>.

- **Potenziostatische Methode**

Durch Verschaltung eines Potenziostaten wird zwischen der Mess- und Bezugselektrode ein konstantes Potenzial angelegt und der resultierende Strom gemessen. Ein Regelkreis steuert den Zellstrom derart, dass sich die Differenz zwischen der vorgegebenen Sollspannung und dem sich einstellenden Potenzial minimiert. Die Schaltung einer potenziostatischen Messeinheit ist wesentlich komplexer aufgebaut und ist in Abbildung 8 dargestellt <sup>[16], [39]</sup>.

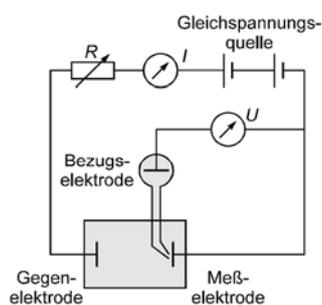


Abbildung 7: Schaltplan für eine galvanostatische Messungen <sup>[39]</sup>

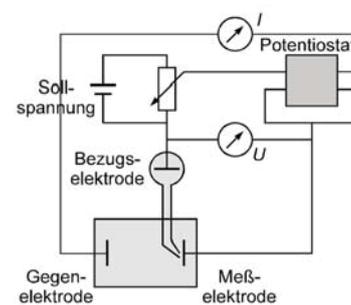


Abbildung 8: Schaltplan für eine potenziostatische Messungen <sup>[39]</sup>

## Instationäre Verfahren

Für rein qualitative Untersuchungen von Proben ist oft der prinzipielle Verlauf der Strom-Spannungskurve für eine Beurteilung ausreichend. Bei dieser Methode werden die Änderungen der Systemparameter aufgezeichnet und untersucht <sup>[16], [39]</sup>.

- **Potenziokinetische Messung**

An die Messzelle wird eine zeitlich linear variierende Spannung potenziostatisch angelegt und wiederum der resultierende Strom mit Hilfe eines Kompensationsschreibers ermittelt. Bei einer geringen Vorschubgeschwindigkeit des Potenzials, sprich quasi stationär, erhält man Kurven, die dem stationären Zustand gleichen <sup>[16], [39]</sup>.

Als Ergebnis der bereits genannten Messverfahren ergibt sich eine Strom-Spannungskurve, wie in Abbildung 9 schematisch dargestellt. Anhand der ermittelten Kurven können Rückschlüsse auf die allgemeinen Eigenschaften sowie auf das Korrosionsverhalten in Mischbauweisen gezogen werden. Aufgrund der Komplexität dieses Themas wird hier nicht näher auf die genaueren Details der physikalisch-chemischen und mathematischen Hintergründe der Stromdichte-Potenzialmessungen eingegangen.

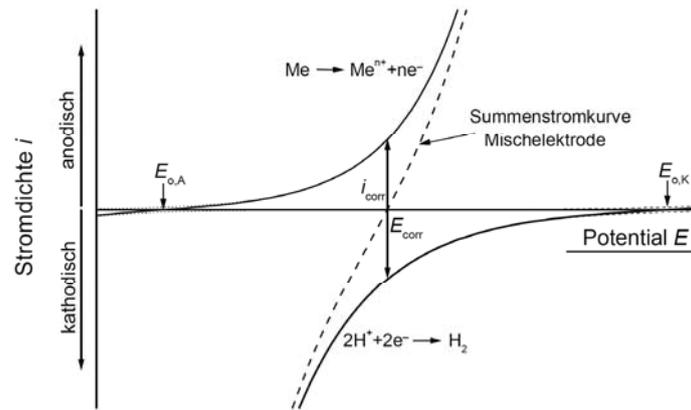


Abbildung 9: Strom-Spannungskurve einer unter Wasserstoffentwicklung korrodierenden Metallprobe <sup>[21]</sup>

### 3.7 Passivität

Ein Metall ist dann als passiv zu bezeichnen, wenn unter den gegebenen Reaktionsbedingungen eine hohe Korrosionsgeschwindigkeit erwartet wird, d.h. die Reaktion  $\text{Me} \rightarrow \text{Me}^{n+} + n\text{e}^{-}$  ungehemmt ablaufen sollte, tatsächlich aber eine sehr langsame Auflösung des Metalls aufgrund einer Schutzschicht aus zumeist oxidischen Korrosionsprodukten eintritt. Wird nun die Passivschicht eines Metalls zerstört, so kann eine Repassivierung erfolgen, wobei die notwendige Stromstärke sich proportional zur beschädigten Fläche verhält. Je größer die beschädigte Fläche ist, desto schwieriger kann eine Passivschicht reproduziert werden. Die Potenzialbereiche der jeweiligen Zustände (aktiv, passiv, transpassiv) sind aus den zuvor beschriebenen Strom-Spannungskurven ableitbar und in Abbildung 10 dargestellt. Wichtige Einflussfaktoren auf die Passivität sind die Legierungszusammensetzung und der pH-Wert des Umgebungsmediums <sup>[22], [38], [39]</sup>.

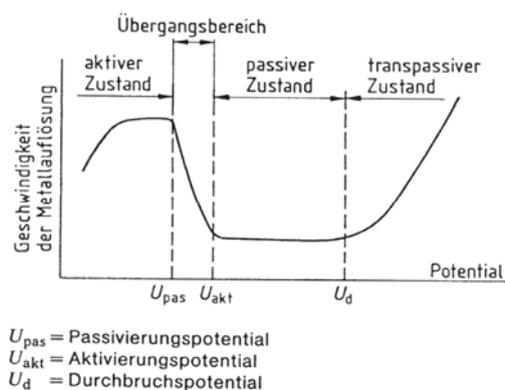


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Potenzialbereiche für den aktiven, passiven und transpassiven Zustand eines passivierbaren Metalls <sup>[6]</sup>

### 3.8 Einfluss der Verformung, Wärmebehandlung und der Kristallographie auf das Korrosionsverhalten

Die Abhängigkeit der Verformung auf das Korrosionsverhalten eines Werkstoffes lässt sich aufgrund der großen Anzahl von Einflussfaktoren (Versetzungsart und -dichte, Gefügebestandteile, Ausscheidungen, Kristallorientierung, Deckschichtbildung, etc.) nicht allgemein mit Formeln oder Tabellen beschreiben, sondern ist nur mit einer problemspezifischen Probenuntersuchung möglich. Untersuchungen durch Simnad und Evans <sup>[10]</sup> zeigten, dass mit zunehmendem Kaltumformgrad bei Blechen die Korrosionsgeschwindigkeit ansteigt (siehe Abbildung 11). Veränderungen der Werkstoffcharakteristik infolge einer Wärmebehandlung sind ebenfalls zu beobachten. Die durch die Umformung erzielte Oberflächentextur bzw. Kristallorientierung beeinflusst im Wesentlichen die Oberflächeneigenschaften und -aktivität, wodurch es zu unterschiedlichen Ausbildungen des Korrosionsverhaltens der einzelnen Orientierungen kommt. Diese Erscheinungsform wird als Korrosionsanisotropie bezeichnet, deren Auswirkungen in Abbildung 12 ersichtlich sind. Eine generelle Aussage bezüglich der Wirkung einzelner Faktoren auf das Korrosionsverhalten ist nicht möglich, da die Zusammenhänge sehr komplex und teilweise unerforscht sind <sup>[6], [22]</sup>.

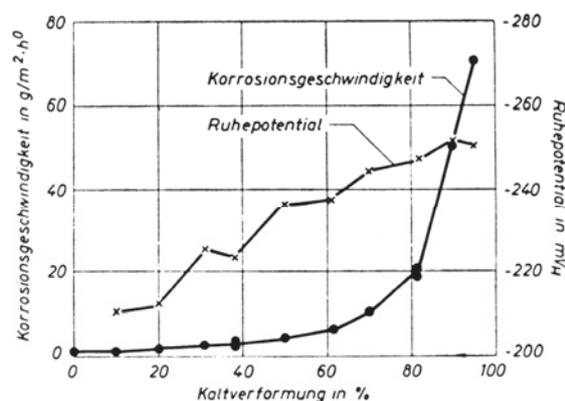


Abbildung 11: Einfluss des Kaltumformgrades auf die Korrosionsgeschwindigkeit und das Ruhepotential von Weicheisen mit 0,8 % C in 1 molarer H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bei 25°C <sup>[6]</sup>

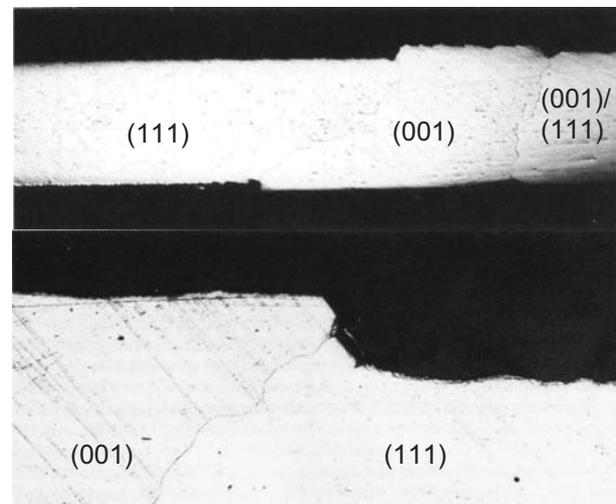


Abbildung 12: Charakteristik der Korrosionsanisotropie <sup>[6]</sup>

## 4 Arten der Korrosion

In der Korrosionstechnik ist ein breites Spektrum von Schädigungsarten zu unterscheiden. Es erfolgt eine allgemeine Unterteilung in Schädigungen mit und ohne mechanische Belastung. Eine generelle Zuordnung der einzelnen Korrosionsarten ist Abbildung 13 zu entnehmen <sup>[1], [6], [19]</sup>.

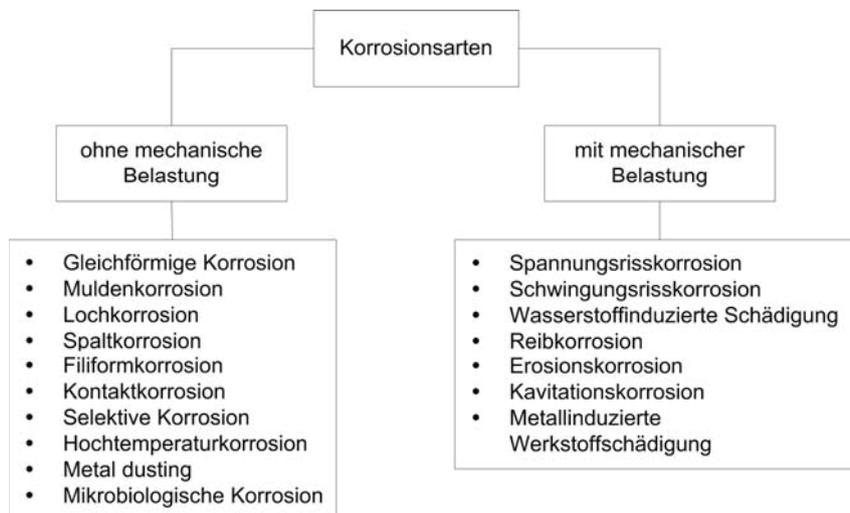


Abbildung 13: Unterteilung der Korrosionsarten <sup>[6], [22]</sup>

### 4.1 Gleichförmige Korrosion

Bei der gleichförmigen Korrosion ist ein ebenmäßiger Abtrag über die gesamte Oberfläche zu beobachten (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15). Dies ist auf die Ausbildung einer homogenen Mischelektrode zurückzuführen, wobei örtlich die Anoden und Kathoden statistisch wechseln. Die Korrosionsgeschwindigkeit hängt von der Elektrolytkonzentration, der Temperatur, der Relativbewegung (Elektrolyt/Bauteil), der Deckschichtbildung, den Inhibitoren und der Oberflächenrauigkeit ab. Die Abtragsrate wird wie folgt in Tabelle 3 definiert und umgerechnet <sup>[6], [22]</sup>:

Einheit	Umrechnungsfaktor auf					
	mg/dm <sup>2</sup> d	g/m <sup>2</sup> d	µm/a	mm/a	mils/a	inch/a
mg/dm <sup>2</sup> d	1	0,1	36,5/ρ	0,0365/ρ	1,144/ρ	0,00144/ρ
g/m <sup>2</sup> d	10	1	365/ρ	0,365/ρ	14,4/ρ	0,0144/ρ
µm/a	0,0274 ρ	0,00274ρ	1	0,001	0,0394	0,0000394
mm/a	27,4 ρ	2,74 ρ	1000	1	39,4	0,0394
mils/a <sup>*)</sup>	0,696 ρ	0,0696 ρ	25,4	0,0254	1	0,001
inch/a <sup>*)</sup>	696 ρ	69,6 ρ	25400	25,4	1000	1

<sup>\*)</sup> hauptsächlich im englischen Sprachraum in Verwendung  
 ρ = Dichte [g/cm<sup>3</sup>]

Tabelle 3: Definition der Abtragsrate <sup>[22]</sup>

Ab ca. 70 % Luftfeuchtigkeit ist ein Eintritt von gleichmäßiger Korrosion zu erwarten. Dabei kondensieren Wassertropfen, die sich durch atmosphärische Verunreinigungen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NaCl}$ , etc.) ansäuern und die Metalloberfläche angreifen. Vor allem  $\text{Cl}^-$ - und  $\text{SO}_4^{2-}$ -Ionen, geringe Wasserhärte und Bakterien begünstigen eine höhere Abtragsrate<sup>[6], [7]</sup>.

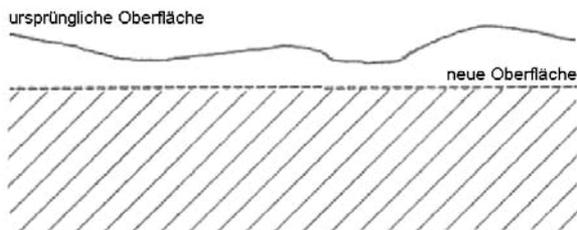


Abbildung 14: Schematische Darstellung der gleichförmigen Korrosion<sup>[3]</sup>

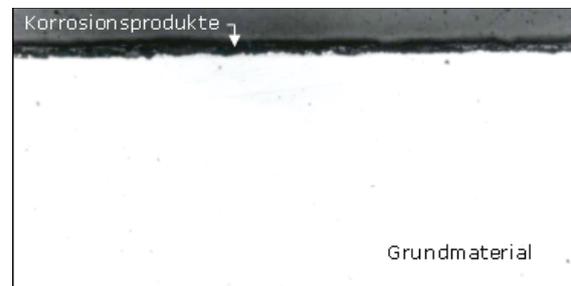


Abbildung 15: Schliffbild einer gleichmäßig korrodierten Probe<sup>[40]</sup>

Bei Aluminiumwerkstoffen erfolgt ein gleichmäßiger Flächenabtrag in Medien, in denen die Oxidschicht löslich ist, z. B. bei Einwirkung von Säuren und Laugen bei pH-Werten unter 4,5 und über 8,5. Am stärksten wird Aluminium von Alkalilaugen (Natron-, Kalilauge, etc.) und Halogenwasserstoffsäuren (Flusssäure, Salzsäure, etc.) angegriffen<sup>[3], [7]</sup>.

## 4.2 Muldenkorrosion

Diese Korrosionsform stellt den Übergang zwischen der Loch- und der gleichförmigen Korrosion dar. Kennzeichnend dafür ist der ungleichmäßige Flächenabtrag unter Ausbildung von Mulden (Durchmesser > Tiefe), welche durch Inhomogenitäten des Werkstoffes (Gefüge, Ausscheidungen, etc.) und des Korrosionsmediums (Belüftung, Konzentration, etc.) initiiert werden. In Grenzfällen ist eine Unterscheidung von Muldenkorrosion und Lochfraßstellen mitunter nicht möglich. Abbildung 16 zeigt den metallographischen Schliff durch eine Korrosionsmulde<sup>[6], [22]</sup>.

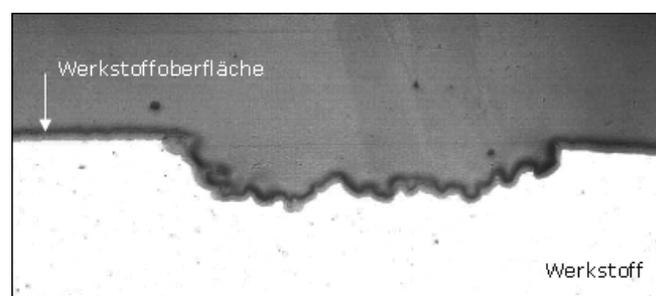


Abbildung 16: Schliffbild einer Korrosionsmulde<sup>[40]</sup>

### 4.3 Lochkorrosion

Unter Lochkorrosion ist der lokale, korrosive Angriff auf Materialien zu verstehen, welche im Allgemeinen eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Der Angriff erfolgt nur an kleinen Oberflächenbezirken und führt zur Ausbildung von Lochfraß, dessen vielfältige Morphologie in Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt ist. Eine Überlagerung dieser mit anderen Korrosionsarten und/oder mechanischen Belastungen kann katastrophale Schäden bewirken, da der Materialangriff meist nur an der Oberfläche, aber nicht im Bauteilinneren ersichtlich ist<sup>[6], [22]</sup>.

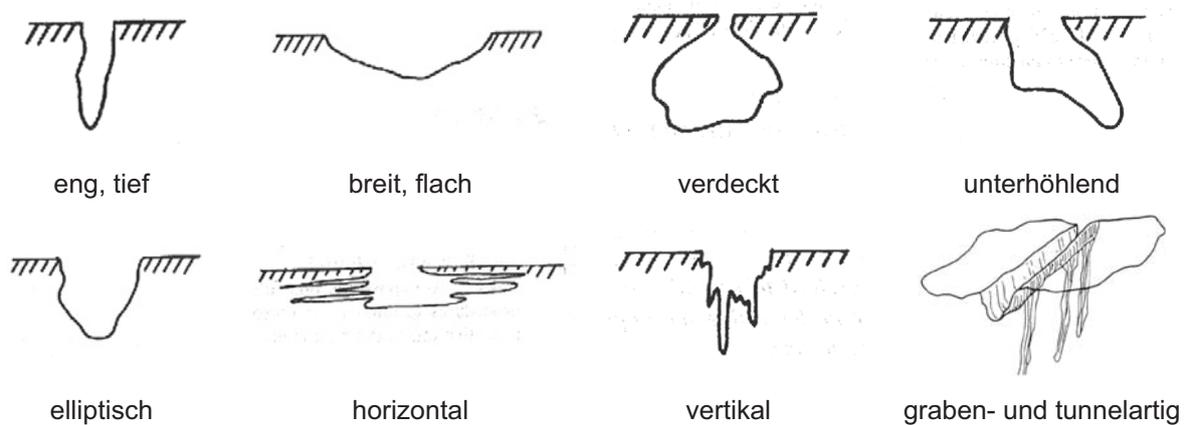


Abbildung 17: Ausbildungsformen von Lochkorrosion<sup>[6], [22]</sup>

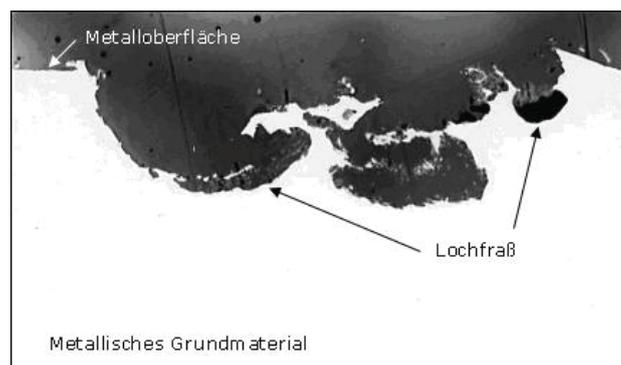


Abbildung 18: Schlichtbild einer Lochfraßstelle<sup>[40]</sup>

Die Initiierung erfolgt in vielen Fällen in Bereichen nichtmetallischer (sulfidischer/oxidischer) Einschlüsse, hervorgerufen durch den Einfluss unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten (Lochbildung) und/oder elektrochemischen Potenzialen (Ionenfluss). Bezüglich des Lochkorrosionsmechanismus wird unterschieden zwischen:

- **Passivschicht-Penetration**

Infolge des elektromagnetischen Feldes an der Oberfläche wird ein  $\text{Cl}^-$ -Ionen-Durchschlag induziert, wodurch Defekte in der Passivschicht erzeugt werden und eine höhere Metallauflösung eintritt<sup>[6]</sup>.

- **Filmbruch**

Aufgrund von Deckschichtfehlern können Chloride und andere aggressive Anionen direkt an die metallische Oberfläche gelangen und diese zerstören. Eine Repassivierung der Fehlstelle wird durch die hohe  $\text{Cl}^-$ -Ionen-Konzentration verhindert<sup>[6]</sup>.

- **Adsorption**

Durch den Einbau von  $\text{Cl}^-$ -Ionen anstatt  $\text{OH}^-$ - bzw.  $\text{O}^{2-}$ -Ionen in die Passivschicht werden Oxyhalogenide ausgebildet, welche eine höhere Auflösungsrate aufweisen. Infolge der Dickenverringerung der Oxidschicht steigt die lokale Feldstärke und Abtragung an, bis diese durchbrochen ist<sup>[6]</sup>.

Prinzipischnen der jeweiligen Lochkorrosionsmechanismen sind in Abbildung 19 wiedergegeben.

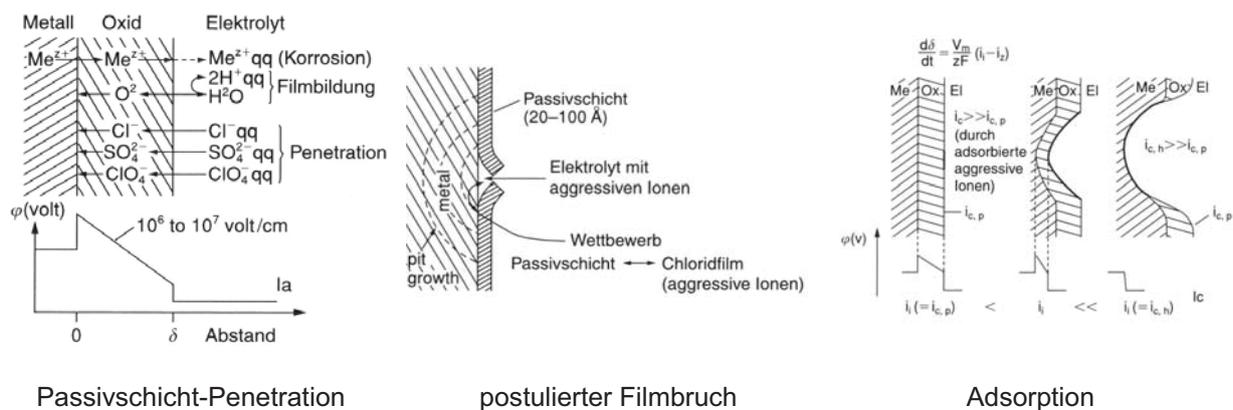


Abbildung 19: Modelle der Lochkorrosion<sup>[6]</sup>

Aluminiumwerkstoffe sind vor allem im pH-Bereich von 4,5 – 9,0 für Lochkorrosion anfällig. Anwesende  $\text{Cl}^-$ -Ionen führen zur Zerstörung der Passivschicht, wodurch mikrotunnelförmige Korrosionserscheinungen ausgebildet werden (siehe Abbildung 20). Aufgrund der steigenden  $\text{AlCl}_3$ -Konzentration im Loch wird der pH-Wert auf 3,5 herabgesenkt und eine Repassivierung verhindert<sup>[3], [7], [22]</sup>.



## 4.4 Spaltkorrosion

Die Spaltkorrosion ähnelt in den Grundzügen der Lochkorrosion und tritt bevorzugt an Fugstellen bzw. Bauteilverengungen (Nuten, Bohrungen, saugfähige Dichtungen, Rissen etc.) auf. Spalt und Oberfläche bilden aufgrund unterschiedlicher Elektrolytzusammensetzung und Belüftung ein Korrosionselement aus, wobei die Werkstoffoberfläche die Kathode und der Spalt (mit Elektrolyt) die Anode darstellt (siehe Abbildung 21). Durch die steigende Elektrolytansäuerung im Spalt ( $H^+$ -Ionen) wird die Metallauflösung ( $Me^{2+}$ -Ionen) beschleunigt und die Korrosionsrate weiter gesteigert. Spaltkorrosion entsteht bei der Mehrzahl der Metalle bevorzugt im Bereich kritischer Spaltweiten von etwa 0,02 mm bis 0,5 mm, auch im Fall einer Werkstoffpaarung von Metall mit Kunststoff<sup>[6], [3]</sup>.

- Bei der Materialkombination zweier unlegierter Stähle liegt der Korrosionsmechanismus der unterschiedlichen Belüftung zu Grunde. Der Spalt wird mit weniger Sauerstoff versorgt als die Werkstoffoberfläche, wodurch es zu einer pH-Verringerung des Elektrolyten im Spalt und infolge dessen zu einer Steigerung der anodischen Korrosionsrate kommt<sup>[6]</sup>.
- Bei Verbindungen aus niedriglegierten mit hochlegierten Stählen bildet sich hingegen ein galvanisches Element aus, was wiederum die Auflösung des unedleren Materials bewirkt. Begleitende Hydrolyseerscheinungen führen zu einer Verringerung des pH-Wertes, wodurch die Korrosionsbedingungen zusätzlich verschärft werden<sup>[6]</sup>.
- Bei nichtrostenden Stählen ist der Korrosionsmechanismus wesentlich komplizierter und mehrstufiger aufgebaut. Die Schädigung ergibt sich infolge einer zunächst auftretenden Sauerstoffverarmung im Spalt, gefolgt von einer Übersäuerung des Elektrolyten und schlussendlich des Passivschicht-Zusammenbruches<sup>[6]</sup>.
- Bei Werkstoffen mit Passivschicht (z.B. Al, Mg, etc.) sinkt zunächst der pH-Wert im Spalt aufgrund schlechter Belüftung ab. Die Oberfläche wird im Spaltbereich entpassiviert, wodurch sich ein galvanisches Element ausbildet und die Korrosion fortschreitet<sup>[6]</sup>.

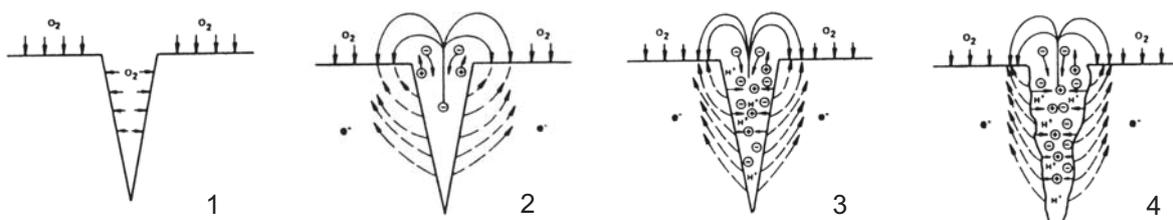


Abbildung 21: Stufen des Belüftungselement-Mechanismus<sup>[6]</sup>

## 4.5 Filiformkorrosion

Diese ist eine Sonderform der Spaltkorrosion und tritt bevorzugt unter organischen Beschichtungen von Kohlenstoffstählen und an Aluminium-/Magnesiumoberflächen auf. Ausgangspunkt der Filiformkorrosion sind Fehlstellen innerhalb der Beschichtung bzw. Metalloberfläche, wodurch es zur Ausbildung eines Belüftungselementes kommt. Die Korrosionszelle, bestehend aus aktivem „Kopf“ und inaktivem „Schwanz“, pflanzt sich infolge der Elektrolytansäuerung oberflächlich mit geringem Tiefenwachstum fort. Der Filiform-Mechanismus wird in Abbildung 22 näher erläutert. Da der Angriff nicht wesentlich in die Tiefe geht, werden die mechanischen Eigenschaften des Metalls, entgegen der Optik, nicht beeinflusst (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Bei Anwesenheit von Chloriden, Sulfaten, Sulfiden und Kohlendioxid wird die Wachstumsgeschwindigkeit gesteigert. Die wesentlichen Merkmale sind <sup>[6]. [7]. [22]</sup>:

- Filiformkorrosion tritt nur bei hohen Luftfeuchtigkeiten (> 70 %) in Anwesenheit eines hygroskopischen Stoffes (Staubteilchen, Beizreste, etc.) an der Oberfläche auf <sup>[3]</sup>.
- Besonders gefährdet sind anodisierte AlMg-Bleche mit Mg-Gehalten über 3 %. Das Magnesium diffundiert beim Umformschritt in die Deckschicht und bildet einen MgO-Film. Wird eine solche Oberfläche vor dem Beschichten nur unzureichend vorbehandelt, so können verbleibende Verunreinigungen Keimstellen für einen Korrosionsangriff darstellen <sup>[3]</sup>.

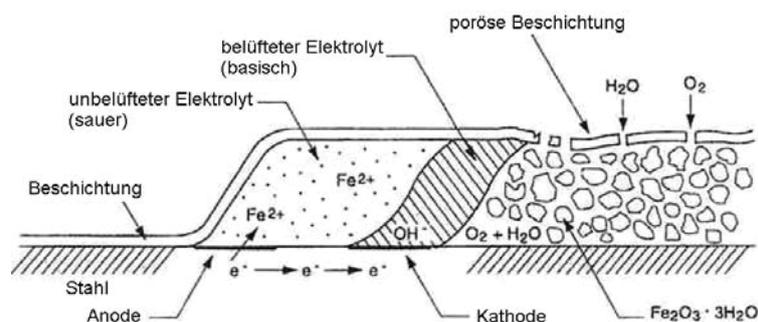


Abbildung 22: Mechanismus der Filiformkorrosion <sup>[22]</sup>

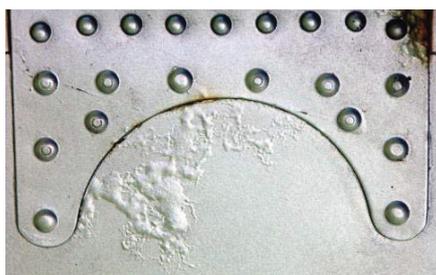


Abbildung 23: Filiformkorrosion an einem Bauteil <sup>[40]</sup>

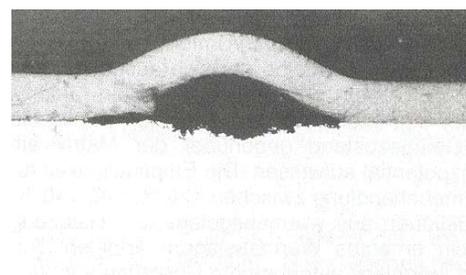


Abbildung 24: Schliff durch eine Korrosionszelle <sup>[3]</sup>

## 4.6 Kontaktkorrosion

Kontaktkorrosion ergibt sich infolge einer Paarung zweier Metalle bzw. einer Metall-Elektronenleiter-Kombination mit unterschiedlichen, elektrochemischen Potenzialen. Die Initiierung erfolgt an der Fügestelle (Schrauben, Nieten, Schweißnaht, etc.) in Anwesenheit eines korrosiven Mediums. Dadurch wird die elektrochemische Auflösung des unedleren Verbindungspartners (Anode) hervorgerufen. Das edlere Metall (Kathode) bleibt zunächst beständig, kann jedoch durch entstehende Korrosionsumwandlungsprodukte ebenfalls angegriffen werden. Beispiele hierfür sind in Abbildung 25 und Abbildung 26 angegeben. Kontaktkorrosion kann auch bei gleichartiger Metallkombination auftreten, wenn beide Partner Unterschiede hinsichtlich des Verformungsgrades, der kristallographischen Orientierung, der Oberflächentextur oder der Wärmebehandlung aufweisen (siehe Kapitel 3.8). Korrosionserscheinungen, die durch eingepresste Fremdmetallpartikel infolge einer Oberflächenbearbeitung induziert werden, zählen ebenfalls zur galvanischen Korrosion. Die Korrosionsrate ist abhängig von <sup>[6], [22]</sup>.

- Differenz der Ruhepotenziale (je größer, desto höher ist die Abtragsrate).
- Elektrolytleitfähigkeit (je höher, desto weitgreifender ist der Angriff, siehe Abbildung 27).
- Anoden-Kathoden-Flächenverhältnis  $r = A_{\text{Anode}}/A_{\text{Kathode}}$  (je kleiner das Verhältnis, desto kritischer ist diese Paarung zu betrachten, siehe Abbildung 28).

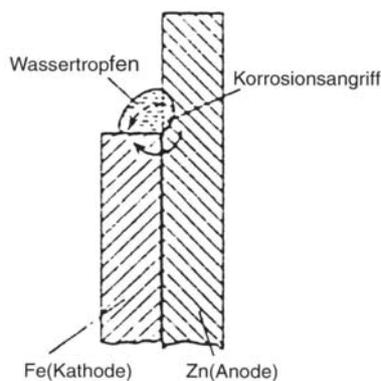


Abbildung 25: Beispiel für ein praxisnahes Korrosionselement <sup>[6]</sup>



Abbildung 26: Kontaktkorrosion verschiedenster Materialien an einem Fittingsystem <sup>[40]</sup>

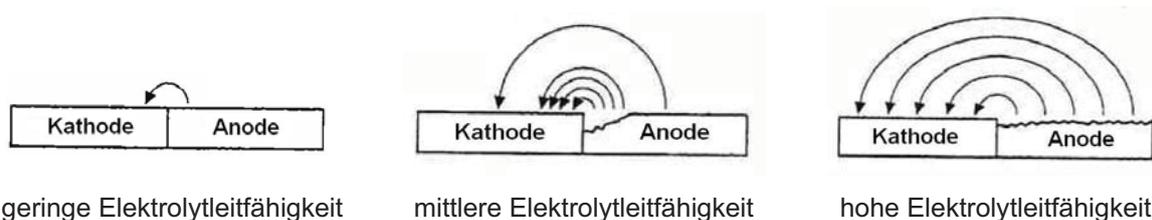


Abbildung 27: Einfluss der Elektrolytleitfähigkeit auf das Kontaktkorrosionsverhalten <sup>[22]</sup>

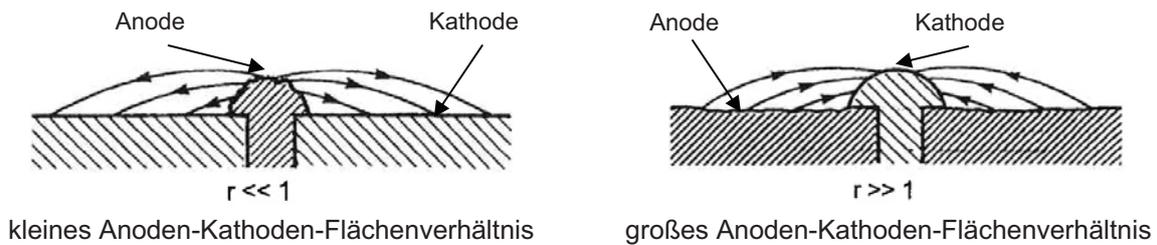


Abbildung 28: Auswirkungen bei unterschiedlichem Anoden-Kathoden-Flächenverhältnis <sup>[22]</sup>

Bei Aluminiumteilen ist Kontaktkorrosion anhand von loch- und muldenförmigen Korrosionserscheinungen im Fügebereich zu erkennen. Wie Praxiserfahrungen belegen, ist ein Verbund von walz- und pressblankem Aluminium mit folgenden Metallen problemlos möglich <sup>[3]</sup>:

- Nichtrostenden Chrom- und Chromnickelstählen
- Al
- Pb, Cr, Ni, Sn, Zn bzw. Stahl mit Überzügen aus diesen Metallen
- Cd (aufgrund Toxizität von geringer Bedeutung)
- Stahl mit organischer Beschichtung

## 4.7 Selektive Korrosion

Hierbei wird je nach Erscheinungsform zwischen interkristalliner Korrosion, Schichtkorrosion, Spongiose und Entzinkung unterschieden.

### 4.7.1 Interkristalline Korrosion

Bei der interkristallinen Korrosion werden selektiv die Korngrenzen bzw. die korngrenzennahen Bereiche angegriffen, wodurch ein Zerfall des Gefüges eintritt. Gründe dafür sind:

- Eine Verarmung an korrosionsbeständigen Legierungselementen im Korngrenzenbereich. Als Beispiel sei die Chromverarmung bei Stählen in der Wärmeeinflusszone aufgrund von  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ -Ausscheidungen an den Korngrenzen angeführt <sup>[6], [7], [22]</sup>.
- Der chemische Angriff von Ausscheidungen ( $\text{TiC}$ ,  $\text{TiCN}$  bei austenitischen Stählen) <sup>[6], [7], [22]</sup>.
- Auflösung infolge einer Anreicherung von korrosionsfördernden Spurenelementen ( $\text{Si}$ ,  $\text{P}$  bei austenitischen CrNi-Stählen) <sup>[6], [7], [22]</sup>.

- Die Ausbildung einer galvanischen Zelle, wobei die Korngrenzenausscheidungen die Kathode oder Anode darstellen können [6], [7], [22].

Diese kritischen Gefügestände sind ebenfalls bei kupfer- und magnesiumhaltigen Aluminiumlegierungen infolge ungünstiger Wärmeeinflüsse (falsche Wärmebehandlung, hohe Betriebstemperatur, etc.) zu beobachten:

- So besteht bei AlMg- und AlMgMn-Legierungen (5xxx) mit über 3 % Mg keine Anfälligkeit für interkristalline Korrosion, wenn die aus dem übersättigten AlMg-Mischkristall ausgeschiedene  $\beta$ -Phase ( $\text{Al}_8\text{Mg}_5$ ) perlschnurartig in voneinander getrennten Globuliten vorliegt [3], [22].
- Bei den AlCuMg-Legierungen (2xxx) sind Korngrenzenausscheidungen von  $\text{Al}_2\text{Cu}$  immer kritisch. Bei Elektrolytzutritt werden diese aufgrund ihres edleren Charakters, im Gegenteil zum benachbarten Mischkristall, nicht angegriffen. Dadurch kommen weitere, an den Korngrenzen vorhandene  $\text{Al}_2\text{Cu}$ -Ausscheidungen mit dem Elektrolyten in Berührung, so dass die Korrosion fortschreitet (siehe Abbildung 29) [3], [22].
- AlZnMg- und AlZnMgCu-Legierungen (7xxx und 71xx) können bei ungünstiger Zusammensetzung (bei zu hohem Zn-Gehalt und  $\text{CuMgAl}_2$ -Ausscheidungen) ebenfalls zur Korngrenzenkorrosion neigen [3], [22].
- Weitgehend unempfindlich gegen interkristalline Korrosion sind Rein- bzw. Reinstaluminium und nicht übersättigte Aluminiumknetlegierungen wie z. B. AlMg1, AlMg3, AlMn1 und AlMgSi0,5 sowie der Typ AlMgMn [3], [22].

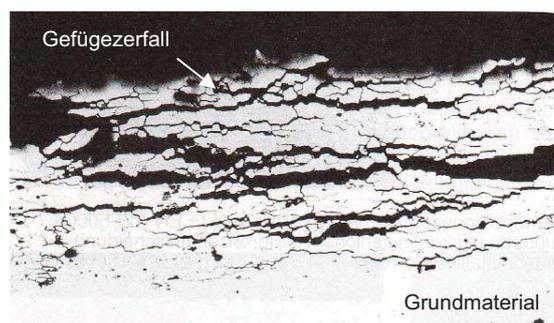


Abbildung 29: Interkristalline Korrosion an einer AlCuMg1-Legierung [V = 100:1] [3]

#### 4.7.2 Schichtkorrosion

Dieser Korrosionstyp verläuft annähernd parallel zur Verformungsrichtung in Walz-, Schmiede- und Strangpressprodukten, wodurch ein schichtförmiges Aufblättern des Werkstoffes eintritt. Dies wird durch das selektive Herauslösen von Ausscheidungen

innerhalb des Zeilengefüges bzw. von Seigerungszone im Gussgefüge hervorgerufen und steht somit in Beziehung zur interkristallinen (Spannungsrisss)korrosion. Die Empfindlichkeit des Werkstoffes gegenüber Schichtkorrosion kann durch spezifische Wärmebehandlungen nach der Formgebung verringert werden. Als Beispiel sei der schichtförmige Angriff einer 7xxx-Legierung in Abbildung 30 angegeben <sup>[3], [6], [22]</sup>.

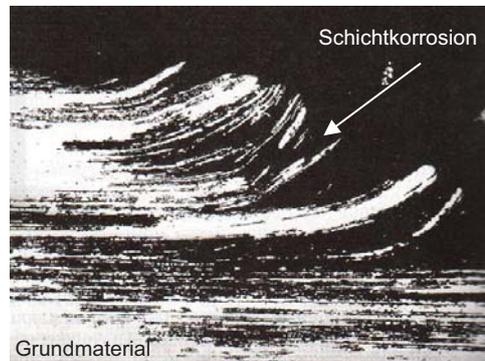


Abbildung 30: Schichtkorrosion an einer AlZnMgCu<sub>0,5</sub>-Legierung mit partiell rekristallisierten Seigerungszeilen [V = 100:1] <sup>[3]</sup>

### 4.7.3 Spongiose

Diese Form der selektiven Korrosion tritt ausschließlich bei Bauteilen aus Grauguss in sauerstoffarmen Wässern bzw. verdünnten Säuren auf und ist noch nicht vollständig erforscht. Hierbei kommt es zur Ausbildung eines lokalen galvanischen Elements zwischen den Graphitlamellen und der metallischen Matrix. Die metallische Grundmasse wird aufgelöst, wodurch eine schwammartige Graphitstruktur (engl. sponge → Spongiose) zurück bleibt. Da Graphit nur geringe Festigkeitswerte aufweist, führt dies meist zum Bauteilversagen. Bei zunehmendem Sauerstoffgehalt im Elektrolyten verringert sich die Korrosionsrate aufgrund einer Deckschichtbildung <sup>[6], [22]</sup>.

### 4.7.4 Entzinkung

Bei der Entzinkung von Kupfer-Zink-Legierungen handelt es sich um eine ähnliche Korrosionserscheinung wie bei der Spongiose. Das Zink sowie die zinkreiche  $\beta$ -Phase bei  $\alpha$ - $\beta$ -Messing werden selektiv herausgelöst, zurück bleibt wiederum eine schwammartige Struktur bestehend aus Kupfer. Die Mechanismen sind <sup>[6], [22]</sup>:

- Mischkristallauflösung gefolgt von der Zementation des edleren Kupfers.
- Auflösen des Zinks bei gleichzeitigem Zusammenfügen des Kupfers durch Oberflächendiffusion.

## 4.8 Hochtemperaturkorrosion

Wirken Gase (z.B.: O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) bei hohen Temperaturen auf ein Metall ein, wird eine Deckschicht bestehend aus Oxiden und/oder Sulfiden ausgebildet. Dieser Vorgang ist im alltäglichen Sprachgebrauch auch unter Verzundern bekannt. Der Grad der Deckschichtausbildung ist abhängig vom Grundmaterial, der Gastemperatur und -zusammensetzung sowie den jeweiligen (Partial)druckverhältnissen. Obwohl beim Verzundern das Grundmaterial korrosionstechnisch betrachtet angegriffen wird, kann diese Zunderschicht unter besonderen Bedingungen eine Schutzfunktion übernehmen. Voraussetzungen sind <sup>[6], [22]</sup>:

- Die gebildeten Oxide bzw. Sulfide besitzen ein größeres Molvolumen als die zugehörige Metallstruktur.
- Die Oxid- bzw. Sulfidschicht weist einen hohen Bedeckungsgrad auf.
- Die Oxid- bzw. Sulfidprodukte sind beständig und verflüchtigen sich nicht (Ag<sub>2</sub>O, PtO, etc.).
- Durch Zulegieren von unedleren Elementen kann die Zähigkeit erhöht bzw. die Fehlordnung der Deckschicht herabgesetzt werden.

Die „Korrosionsgeschwindigkeit“ ist verhältnismäßig gering, da die Reaktionen ausschließlich über Volumen- bzw. Korngrenzendiffusion von Anionen und Kationen ablaufen.

## 4.9 Metal dusting

Diese Sonderform der Hochtemperaturkorrosion ist bei Stahl- und Nickellegierungen im Temperaturbereich von 400 – 800 °C in Atmosphären mit einer Kohlenstoffaktivität von  $a_C > 1$  zu beobachten. Es erfolgt eine Aufkohlung des Grundwerkstoffes, wodurch Graphitpartikeln und Metallkarbide des Typs M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> und M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (M steht für Cr, Ni, Fe) gebildet werden. Diese Ausscheidungen führen zur Zerstörung des Gefüges und dem Abstauben der Komponenten (engl. dusting → metal dusting). Durch Zulegieren von oxidschichtbildenden Elementen wie Chrom, Aluminium und/oder Silizium kann die Beständigkeit des Bauteils gegenüber metal dusting erhöht werden <sup>[6], [22]</sup>.

## 4.10 Mikrobiologische Korrosion

Im Vergleich zu den bereits genannten Korrosionsarten, welche chemisch-physikalischen Reaktionen zugrunde liegen, ist diese auf die Anwesenheit von Mikroorganismen zurückzuführen. Verursacher eines solchen mikrobiologischen Angriffs sind Bakterien, Pilze, Flechten, Algen oder Protozoen, wobei die erstgenannten die wichtigste Gruppe darstellen

(Wirkungsweise siehe Tabelle 5). Vor allem Bakterien weisen eine hohe Beständigkeit auf: Temperatur: - 12 – 110 °C, Druck: 0 – > 1400 bar, pH-Wert: 0 – > 13. Auftretende Korrosionserscheinungen werden wie folgt charakterisiert:

- aufgrund der Oberflächenbesiedelung durch Mikroorganismen bildet sich ein Biofilm aus, wodurch Belüftungs- und Konzentrationselemente erzeugt werden<sup>[6], [22]</sup>.
- die durch die Mikroorganismen gebildeten Stoffwechselprodukte führen zu einer Veränderung der lokalen Korrosionsbedingungen (pH-Wert-Veränderung, Biodegradation von Werkstoff/Beschichtung/Inhibitor, etc.)<sup>[6], [22]</sup>.
- einzelne Stoffwechselprodukte bewirken eine Veränderung der Reaktionskinetik (Stimulation von elektrochemischen Teilreaktionen, Modifikation der Oberflächenaktivität, etc.)<sup>[6], [22]</sup>.

Stoffwechselltypus	Organismus	Wirkung
<b>sulfatreduzierend</b>	anaerobe Bakterien	H <sub>2</sub> S-Bildung durch S- und H <sub>2</sub> -Verbrauch → Metallangriff unter Bildung von MeS und H <sub>2</sub> → Korrosionsrate steigt (da Bakterien H <sub>2</sub> verbrauchen)
<b>säurebildend</b>	organische Säuren: Clostridium aceticum, E. coli, Cladosporium resinae Schwefelsäure: Thiobacillus thiooxidans Salpetersäure	Ausscheidung von Säuren → Erhöhung des lokalen pH-Wertes → Korrosionsrate steigt
<b>schleimbildend</b>	Pseudomonas, Escherichia, Flavobacterium, Aerobacter, Bacillus	Aufwachsen einer Schleimschicht auf das Bauteil → Ausbildung von Belüftungselementen → Spalt-, Mulden-, Lochkorrosion, etc.
<b>metall(oxid)-abscheidend</b>	Gallionella, Sphaerotilus, Siderocapsa, Thiobacillus ferrooxidans, Pseudomas manganoxidans	Oxidation von Metallionen im Medium → Bildung von Metall(oxid)ablagerungen → galvanische-, Spalt-, Mulden-, Lochkorrosion, etc.
<b>ammoniakbildend</b>	-	Ammoniakbildung → Werkstoffversprödung, Spannungsriss-, Spalt-, Mulden-, Lochkorrosion, etc.
<b>metallreduzierend</b>	Pseudomonas sp.	Angriff bzw. Auflösung von Deckschichten
<b>wasserstoffbildend</b>	-	Bildung von Wasserstoff Zerstörung von Deckschichten, Versprödung des Werkstoffes durch H <sub>2</sub> -Diffusion

Tabelle 5: Wirkungsweise der Mikroorganismen<sup>[6], [36]</sup>

## 4.11 Spannungsrissskorrosion

Unter Spannungsrissskorrosion (SPRK) ist eine Rissbildung mit inter- oder transkristallinem Verlauf in Metallen unter Einwirkung bestimmter Korrosionsmedien bei rein statischer oder mit überlagerten, niederfrequenten, schwelenden Zugbeanspruchungen (aber auch bei Eigenspannungen) zu verstehen. Die größte Gefahr bei der Spannungsrissskorrosion stellt das plötzliche Bauteilversagen dar, da keine vorhergehenden Verformungen bzw. Korrosionserscheinungen am Bauteil ersichtlich sind. Diese tritt dann auf, wenn alle drei Voraussetzungen – SPRK-empfindlicher Werkstoff, Korrosionsmedium und mechanische Belastung – erfüllt sind. Die Rissbildung kann entweder durch Metallauflösung oder Wasserstoffversprödung ( $H_2$ -Bildung durch Reduktion von  $H^+$ -Ionen im Elektrolyten) initiiert werden, man spricht daher von einer anodischen bzw. kathodischen Spannungsrissskorrosion. Zur Erklärung der Rissbildung werden folgende Modelle herangezogen:

- **Gleitstufen-Passivschicht-Verletzungsmodell**

Die durch Zugspannungen hervorgerufenen Gleitstufen führen zu einer lokalen Beschädigung der Passivschicht, wodurch dem Korrosionsmedium ein Metallangriff ermöglicht wird. Es folgt eine Repassivierung der freigelegten Oberflächenbezirke. Die abermalige Wiederholung dieses Vorganges stellt den Rissfortschrittsmechanismus dar, welcher in Abbildung 31 ersichtlich ist <sup>[6], [22]</sup>.

- **Filmriss-Spaltbildungsmodell**

Durch Spannungseinwirkung auf spröde, gut haftende Deckschichten werden Risse initiiert, die bis in das Grundmaterial fortschreiten. Nach der Repassivierung des Risses wiederholt sich ebenfalls dieser Vorgang, der in Abbildung 32 dargestellt ist <sup>[6]</sup>.

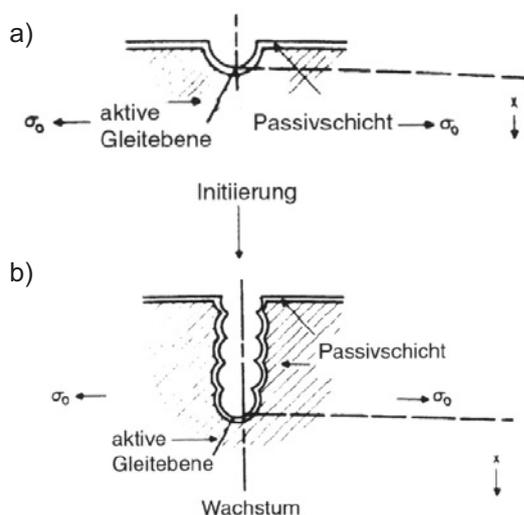


Abbildung 31: Gleitstufen-Passivschicht-Verletzungsmodell <sup>[6]</sup>

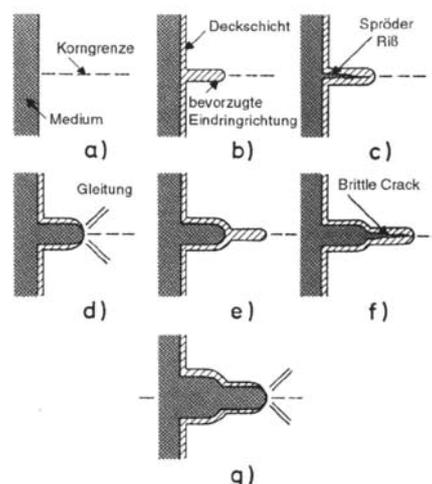


Abbildung 32: Filmriss-Spaltbildungsmodell <sup>[6]</sup>

Durch elektrochemische Maßnahmen, wie anodischer bzw. kathodischer Polarisierung, lässt sich das Auftreten von Spannungsrisskorrosion kaum positiv beeinflussen. In Tabelle 6 sind Beispiele für SPRK-empfindliche Systeme angeführt <sup>[6]</sup>.

Werkstoff	Korrosionsmedium
<b>un-/niedriglegierte Stähle</b>	Natronlauge, NaOH-Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> -Lösung, Calcium-, Ammonium- und Natriumnitrat-Lösungen, Säuremischungen (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -HNO <sub>3</sub> ), saure H <sub>2</sub> S-Lösung, Seewasser, Na-Pb-Schmelzen, HCN-Lösungen, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup> /CN <sup>-</sup> /PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /CO <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> S/FeCl <sub>3</sub> /NH <sub>3</sub> /Roh-Methanol gelöst in H <sub>2</sub> O (flüssig oder dampfförmig), etc.
<b>legierte Stähle</b>	MgCl <sub>2</sub> -/BaCl <sub>2</sub> -/NaCl-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -/NaOH-H <sub>2</sub> S-Lösungen, H <sub>2</sub> S, Seewasser, Cl <sup>-</sup> /OH <sup>-</sup> /F <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> S/H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> gelöst in H <sub>2</sub> O, Polythionsäuren, etc.
<b>Aluminium(legierungen)</b>	NaCl-/NaCl-H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Lösungen, Seewasser, feuchte Luft, Wasserdampf, Cl <sup>-</sup> /Br <sup>-</sup> /I <sup>-</sup> gelöst in H <sub>2</sub> O, organische Flüssigkeiten, etc.
<b>Magnesium(legierungen)</b>	NaCl-K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> -Lösungen, Land- und Küstenatmosphäre, destilliertes Wasser, etc.

Tabelle 6: SPRK-empfindliche Systeme <sup>[6], [7]</sup>

Bei Aluminiumwerkstoffen sind vor allem Legierungen des Typs AlZnMg(Cu), AlMg und AlMgMn bezüglich Spannungsrisskorrosion als empfindlich einzustufen.

- Durch Legierungsmaßnahmen, die sowohl die Legierungselemente Zn, Mg und gegebenenfalls Cu als auch kleine Zusätze von Cr, Ti, V und andere betreffen, sowie gezielte Wärmebehandlungen können AlZnMg(Cu)-Legierungen (7xxx) sensibilisiert werden <sup>[3]</sup>.
- Die SPRK-Empfindlichkeit von AlMg- (5xxx) und AlMgMn-Legierungen (5xxx) mit einem Magnesiumanteil > 3 % ist auf die zusammenhängenden Al<sub>8</sub>Mg<sub>5</sub>-Ausscheidungen an den Korngrenzen zurückzuführen. Diese weisen gegenüber der Aluminiummatrix ein um etwa 80 mV negativeres Lochfraßpotenzial auf <sup>[3]</sup>.
- Mit zunehmender Festigkeit steigt ebenfalls die SPRK-Anfälligkeit <sup>[3]</sup>.
- Rein- und weichgeglühtes Aluminium gelten als beständig <sup>[3]</sup>.

Ein Unterschied zwischen Spannungsrisskorrosion und interkristalliner Korrosion ist auch bei bekannten Einflussparametern nur schwer festzustellen. Eine genaue Differenzierung wird nur durch eine rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Rissoberfläche ermöglicht. Hierbei weisen Oberflächen mit Spannungsrisskorrosion eine wesentlich glattere Struktur auf als die der interkristallinen Korrosion <sup>[3], [6]</sup>.

## 4.12 Schwingungsrissskorrosion

Schwingungsrissskorrosion ist bei allen Reinmetallen und Legierungen in Gegenwart eines unspezifischen Korrosionsmediums und einer frequenten Spannungsbelastung zu beobachten. Diese führt meist zu transkristallinen Rissbildungen, wodurch die Zeitstandfestigkeit herabgesetzt wird. Im Stadium primärer Rissentstehung kann die Lebensdauer des Werkstoffes durch kathodische Korrosionsschutzsysteme (potenzialgeregelte Gleichstromquelle, thermisch gespritzte Überzüge, etc.) erhöht werden. Bei sekundären Rissen oder Einschnitten ist der kathodische Korrosionsschutz nur begrenzt wirksam. Polierte Bauteile erreichen eine höhere Zeitstandfestigkeit als jene mit einer raueren Oberfläche<sup>[6], [22]</sup>.

Die korrosionsresistenteren Aluminiumlegierungen der Gruppe AlMg (5xxx) und AlMgSi (6xxx) weisen eine höhere Zeitschwingfestigkeit als AlCuMg- (2xxx) und AlZnMg-Legierungen (7xxx) auf<sup>[3]</sup>.

## 4.13 Wasserstoffinduzierte Schädigung

Wärmebehandlungen, hohe Drücke und elektrochemische Reaktionen begünstigen eine Wasserstoffdiffusion in das metallische Gitter. Dieser positioniert sich bevorzugt im Bereich von Fehlstellen (Leerstellen, Versetzungen, Korngrenzen, Phasengrenzflächen, etc.), wodurch bei Krafteinwirkung eine Schädigung der metallischen Struktur erfolgt. Mögliche Mechanismen der wasserstoffinduzierten Schädigung sind Tabelle 7 zu entnehmen. Anfällig sind vorwiegend Metalle mit einem krz-Gitter (ferritische Stähle, etc.), wogegen Metalle mit kfz-Gitter (austenitische Stähle, Aluminiumlegierungen, etc) nicht nennenswert angegriffen werden. Zur Charakterisierung der Schädigung werden folgende Modelle herangezogen:

- **Drucktheorie**

An der Phasengrenzfläche kommt es zur Rekombination des atomar gelösten Wasserstoffes bzw. in Anwesenheit von Kohlenstoff und/ oder Sauerstoff zur  $\text{CH}_4$ - bzw.  $\text{H}_2\text{O}_{\text{Dampf}}$ -Gasblasenbildung, die bei hohem Druck das Gefüge zerstören<sup>[6], [22]</sup>.

- **Adsorptionstheorie**

Durch die Adsorption von Wasserstoff wird die Oberflächenenergie in der Fehlstelle herabgesetzt und eine spannungsarme Rissbildung sowie -fortsetzung begünstigt<sup>[6], [22]</sup>.

- **Versetzungstheorie**

Die durch den Wasserstoff erzeugten Cottrell-Wolken setzen die Beweglichkeit der Versetzungen herab und führen somit zu einer höheren Sprödbrechneigung<sup>[6], [22]</sup>.

- **Dekohäsionstheorie**

Interstitiell gelöster Wasserstoff senkt die Kohäsionskräfte zwischen den Metallatomen herab, wodurch das Risswachstum bzw. eine Rissfortsetzung begünstigt wird <sup>[6], [22]</sup>.

Eine graphische Interpretation der oben angeführten Modelle ist in Abbildung 33 wiedergegeben.

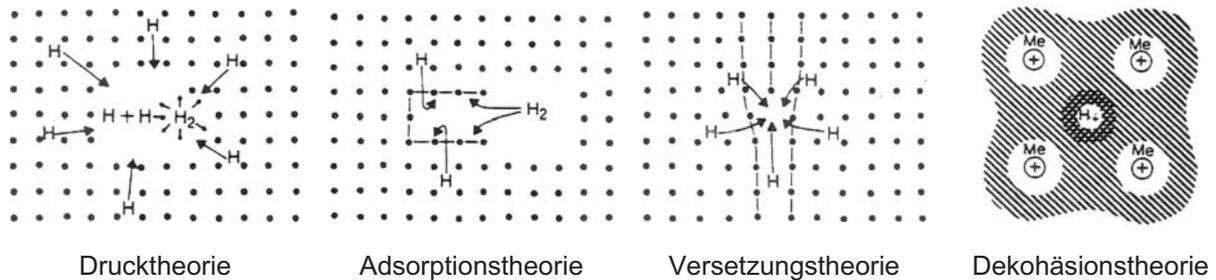


Abbildung 33: Modelle der wasserstoffinduzierten Schädigung <sup>[6], [22]</sup>

Schadensart	Bedingungen	Schädigungsform
<b>chemisch induzierte Wasserstoffschädigung/-rissbildung (CIW)</b>	Grenzwertüberschreitung für Temperatur und H-Partialdruck, Einwirkzeit  Rissemempfindliche Legierungszusammensetzung	Druckwasserstoffangriff, Schäden durch Dampfspaltung → Blasen- und Rissbildung ohne äußere Zugbeanspruchung, vor allem bei Werkstoffen mit $R_{p0,2} < 600 \text{ N/mm}^2$ . Ausgangspunkt meist an nicht-metallischen Einschlüssen oder harten Gefügebestandteilen → Stufenrisse, Waben- oder Spaltbruch.
<b>physikalisch-chemisch induzierte Wasserstoffschädigung/-rissbildung (PIW)</b>	Hohe Wasserstoffreinheit, Verunreinigungen (z.B. $\text{O}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ , etc.) wirken als Inhibitoren  Bei statischer Beanspruchung Mindestzugfestigkeit, Legierungszusammensetzung, Kerbschärfe bestimmend  Bei dynamischer Beanspruchung Mindestwert der Spannungsamplitude bestimmend	Herabsetzung der Zähigkeit bzw. Duktilität des Werkstoffes durch atomaren Wasserstoff → physikalisch induzierte Wasserstoffversprödung
<b>elektrochemisch induzierte Wasserstoffschädigung/-rissbildung (EIW)</b>	Hinreichendes H-Angebot an der Phasengrenzfläche	kathodische- bzw. $\text{H}_2\text{S}$ -Spannungsrissskorrosion, Beizsprödigkeit, statische Ermüdung, Rissbildung unter Zugbeanspruchung → verzweigte Risse mit trans- ( $R_{p0,2} <$ ) oder interkristallinem ( $R_{p0,2} >$ ) Verlauf

Tabelle 7: Mechanismen der Wasserstoffschädigung <sup>[6]</sup>

## 4.14 Reibkorrosion

Reibkorrosion tritt überall dort auf, wo eine Relativbewegung zwischen zwei Bauteilen vorhanden ist. Die Korrosionserscheinungen werden einerseits durch den Materialabtrag selbst, andererseits durch das Freilegen chemisch aktiver Flächen verursacht. Diese sind anhand von Farbunterschieden, welche durch Umwandlungsprodukte hervorgerufen werden, an der Bauteiloberfläche zu erkennen. Ursachen hierfür sind <sup>[3], [22]</sup>:

- unsachgemäße Lagerung bzw. Transport von Halbzeug (Coil, Profile, etc.) und Bauteilen (Karosserieblech, etc.)
- unsachgemäße Handhabung des Produktes in der Fertigung
- durch Montage- und/oder Konstruktionsfehler bedingte zu geringe Bauteilabstände

## 4.15 Erosionskorrosion

Gemäß DIN 50900 versteht man unter Erosionskorrosion das gleichzeitige Zusammenwirken von mechanischer, strömungsbedingter Oberflächenabtragung und chemischer oder elektrochemischer Korrosion. Diese ist meist in Systemen mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten, starken Turbulenzen und Druckunterschieden anzutreffen. Das strömende Fluid kann entweder einphasig (gasförmig od. flüssig) oder zweiphasig (gasförmig + flüssig) vorliegen, bei zusätzlicher Einwirkung von Feststoffpartikeln spricht man jedoch von Reibkorrosion. Je nach Werkstoff und Fluidparameter ergeben sich verschiedenartige Erosionserscheinungen wie die in Abbildung 34 dargestellten Formen <sup>[6], [22]</sup>.



Abbildung 34: Erscheinungsformen der Erosionskorrosion <sup>[6]</sup>

## 4.16 Kavitationskorrosion

Wird der Dampfdruck in einer Flüssigkeit partiell unterschritten und Dampfblasen ausgebildet, welche bei Druckerhöhung wieder implodieren und dadurch den Bauteil an der Oberfläche beschädigen, so spricht man von Kavitationskorrosion. Die Korrosionserscheinungen werden einerseits durch die aufschlagenden Dampfblasen (Oberflächenschädigung), andererseits durch das wirkende Medium verursacht. Der Hauptschaden am Werkstoff entsteht durch den Aufprall des so genannten „Mikro-Jets“ auf

die Bauteiloberfläche, welcher durch den Kollaps der Luftblase hervorgerufen wird. In Abbildung 35 und Abbildung 36 ist der Kavitationsmechanismus bzw. der Aufbau eine Kavitationsblase ersichtlich. Ob nun die Flüssigkeit strömt oder das Bauteil sich im Fluid bewegt ist nicht von Relevanz <sup>[6], [22]</sup>.

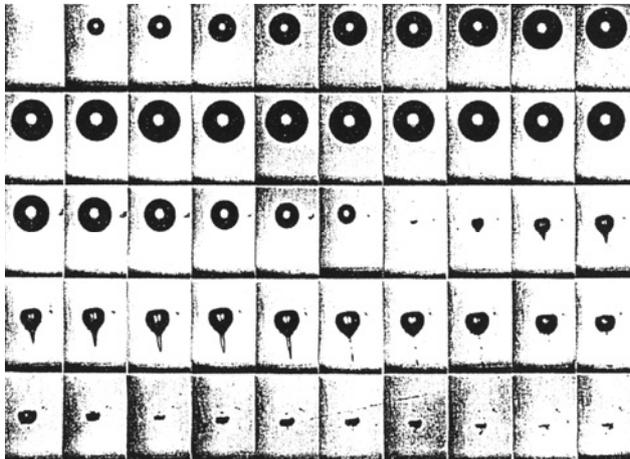


Abbildung 35: Kollaps einer kreisrunden laserinduzierten Kavitationsblase in Wandnähe aufgenommen mit 75000 Bilder pro Sekunde <sup>[6]</sup>

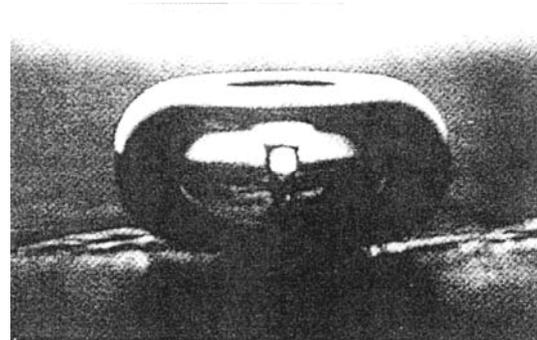


Abbildung 36: Mikro-Jet-Ausbildung während des Zerfalls einer 2 mm großen Luftblase <sup>[6]</sup>

## 4.17 Metallinduzierte Werkstoffschädigung

Das Phänomen der metallinduzierten Werkstoffschädigung (MIW) ist im Allgemeinen Sprachgebrauch auch unter Lötbruch seit mehr als 130 Jahren bekannt und beschreibt den Einfluss flüssiger bzw. fester Metalle auf andere Werkstoffe. Deren Wirkungsweise und Folgen sind in Tabelle 8 erläutert. Wesentliche Einflussfaktoren für eine MIW sind:

- Guter Metallkontakt (Oberflächenstruktur, Benetzbarkeit)
- Gefügeausbildung (Ausscheidungs- und Korngröße, Kaltverfestigung, Gleitvorgänge)
- Spannungen (Zug-, Biege-, Torsionsspannung, dynamisch oder statisch)
- Temperatur

Eine Bildung von intermetallischen Phasen mit hohen Schmelzpunkten darf aber dabei nicht eintreten. Die MIW bewirkt eine Verringerung der Bruchdehnung sowie eine Verschiebung der Spröd-Zäh-Übergangstemperatur zu geringeren Festigkeitswerten (Versprödung) in der Einflusszone. Infolge dessen werden bei Bauteilbelastung Risse initiiert, welche Ausgangspunkte für korrosive Angriffe darstellen <sup>[6], [22]</sup>.

Paarung	Temperatur [°C]	Spannungseinwirkung	Metallurgie	Beispiel
<b>Cu/Fe</b>	> 900	Eigenspannung	Austenitische Stähle (ALSL 304, 316, 321, 347, 4140, 4340 und Co-Basislegierungen empfindlich. Unempfindlich hingegen ferritische Stähle, z.B. ALSL 430	dünn verkupferte Grundwerkstoffe
<b>Li/Fe</b>	250	Zugversuch	Li ruft in unlegierten Stählen Entkohlung hervor („Pseudo-MIW“). Cr und Mo-legierte Stähle sind beständig	-
<b>Pb/Fe</b>	> 150	Zug, Biegung, Torsion mit Zähigkeitsabfall bzw. Verschiebung der Spröd-Zäh-Übergangstemperatur zu geringeren Festigkeitswerten	Bi, Cu, Sb, Sn, Zn, in Pb verstärken dessen Wirkung auf Stähle, die ihrerseits durch Korngrenzenverschiebungen und Kaltverfestigung empfindlicher werden. Pb-Zulegierungen in Stählen führen zur „inneren MIW“	Presswerkzeuge, Verdichterscheiben, warmlaufende Wellen aus niedriglegierten Stählen
<b>Sn/Fe</b>	unterhalb Schmelztemp.	quasi-statisch,	Schädigung unlegierter Stähle durch MIW, niedrig-/hochlegierte Cr- und CrNi-Stähle kaum betroffen	Lötverbindungen mit Sn- bzw. Sn-Pb-Weichlot
<b>Zn/Fe</b>	419 – 570	18/8 CrNi ohne Lastspannung	„erosiver“ langsamer Metallabtrag	-
<b>Zn/Fe</b>	570 – 750	18/8 CrNi ohne Lastspannung	Bildung einer intermetallischen Ni-Zn-Phase	Schadensfall Nyprowerke, Flixborough, England
<b>Zn/Fe</b>	> 750	18/8 CrNi ohne Lastspannung, aber mit Eigenspannungen zufolge metallischer Vorgänge	Korngrenzenangriff, verbunden mit einer Ni-Verarmung zufolge Bildung intermetallischer NiZn <sub>3</sub> - bzw. Ni <sub>5</sub> Zn <sub>21</sub> -Verbindungen und γ/α-Umwandlung, Volumenschrumpfung und Zugeigenspannungen ergeben interkristallines Risswachstum	Schadensfall Nyprowerke, Flixborough, England
<b>Zn/Fe</b>	800 – 1150	Austenitische Stähle unter Schweißspannung	Einwirkung von Zinkstaubfarbe, Zinkabrieb, thermisch aufgebrauchte Spritzverzinkungsschicht, Flüssigzinkabtropfung	Rohrleitungsteile
<b>Zn/Cu</b>	Fe-Lotschmelztemp.	Thermische Spannung beim Hartlöten austenitischer Stähle	vermeidbar durch Einsatz von niedrigschmelzenden Ag-Hartloten	alle Lötverbindungen

Tabelle 8: Wirkungsweise der metallinduzierten Werkstoffschädigung bei unterschiedlichen Metallkombinationen<sup>[6]</sup>

## 5 Korrosion im Automobilbau

Jahrelang wurde die Lebensdauer eines Fahrzeuges durch die geringe Korrosionsbeständigkeit der einzelnen Baugruppen begrenzt. Das Kfz verrichtete so lange seine Aufgabe, bis der technische Dienst (TÜV, etc.) dieses bemängelte. Im Laufe der Zeit entwickelte sich das Auto vom einfachen Transportsystem zu einem sozialbestimmenden Prestigeobjekt. Aus diesem Grund stiegen jährlich die Kundenanforderungen bezüglich Luxus, Modernität, Sparsamkeit und Lebensdauer. Um diese Wünsche zu befriedigen, gab es zahlreiche Aktivitäten auf dem Gebiet des Leicht- bzw. Hybridbaus, der Motorentechnik und des Korrosionsschutzes. Das durch die Luxuselektronik (Soundsystem, DVD-Player, Klimaanlage, etc.), stärkere Motorenleistung und größeren Platzbedarfes verursachte höhere Fahrzeuggewicht ist nur mittels konstruktivem Leichtbau und Mischbauweise unterschiedlichster Materialien kompensierbar. Die durch diesen Materialmix hervorgerufenen Probleme im Bereich der Fahrzeugkonstruktion und des Korrosionsschutzes gilt es teilweise noch zu lösen <sup>[28], [29], [33]</sup>.

Viele Automobilhersteller nutzen den Korrosionsschutz als Werbemittel für ihr Produkt. Eine weitaus effektivere Reklame ist das optische Erscheinungsbild einer Automobilmarke im täglichen Straßenverkehr, denn ein Rostimage wirkt sich folgens schwer auf den Absatzmarkt aus. Der funktionale Rostschutz ist schon lange nicht mehr für die Werterhaltung des Fahrzeuges ausreichend, vielmehr hat sich die kosmetische Korrosion zu einer tragenden Rolle im Korrosionsschutz entwickelt, da der Kunde vorwiegend über optische Eindrücke in seinem Kaufverhalten gesteuert wird. Anderwärtige Probleme ergeben sich durch die immer strenger werdende Umweltschutzgesetzgebung (Stichwort: „EU-Altauto-Richtlinie“), wodurch bereits bewährte und weit verbreitete Korrosionsschutzmittel und -hilfsmittel wie z.B. Cadmium, Chrom, PVC, etc. in den kommenden Jahren aus der Automobilbranche entfernt werden. An entsprechenden Ersatzmitteln wird mit hohen Investitionen geforscht.

Die folgenden Kapitel befassen sich mit den korrosiven Einwirkungen im Automobilbau und betrachten die fahrzeugspezifischen Problemstellungen sowie deren Lösungen.

## 5.1 Korrosionsbelastungen

Wie bereits viele Autohersteller erkannten, sind Straßenfahrzeuge fahrende Korrosionslaboratorien. Eigens für diese Forschungszwecke werden präparierte Fahrzeuge in den Test geschickt und den alltäglichen Belastungen im Straßenverkehr ausgesetzt. Die Auswertung der gewonnenen Daten liefert wichtige Informationen an die Konstrukteure sowie an das Produktionsmanagement. Dieses Forschungskonzept wurde von vielen Autoproduzenten übernommen und hinter Synonymen wie „DYKO“ oder „Run for Life“ versteckt<sup>[9]</sup>.

### 5.1.1 Fremdbelastungen am Straßenfahrzeug

Darunter sind regional und zeitlich differierende Einflussfaktoren wie Klima, Industrieemissionen und Winterdienst zu verstehen, welche durch den Autohersteller nicht beeinflussbar sind. Diese so genannte „globale“ Betrachtung ist daher bereits in der Konstruktion zu berücksichtigen<sup>[9]</sup>.

#### Temperaturwechsel

Der durch das tages- bzw. jahreszeitliche Klima (Tag/Nacht bzw. Sommer/Winter) und die unterschiedliche Sonneneinstrahlung hervorgerufene Temperaturwechsel führt zu Relativbewegungen oder Eigenspannungen an Bauteilen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten. Es werden Risse zwischen Grundwerkstoff und Beschichtung initiiert, welche die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes herabsetzen und einen korrosiven Angriff fördern. Weiters sind Temperaturwechsel bei entsprechender Luftfeuchtigkeit mit einer Kondensatbildung verbunden<sup>[9]</sup>.

#### Niederschläge

Diese Belastung tritt in Form von Nebel, Regen, Schnee und Hagel auf, wobei eine differenzierende Betrachtung bezüglich Eindring- und mechanischem Verhalten notwendig ist. Kondensate infolge von Temperaturwechseln zählen ebenfalls zu dieser Kategorie, wobei in diesem Fall auch Hohlräume betroffen sind. Ein hohes Schädigungspotenzial von Niederschlägen ergibt sich immer in Kombination mit chemisch aktiven Stoffen wie Schwefeldioxid/Stickoxid („saurer Regen“), Salzen (Glättebekämpfungsmittel bzw. Küstennähe) sowie Industrieemissionen (z.B.: Zementstaub, Eisen-/Kupferpartikel). Bereits in dieser Betrachtung ist ein von Region zu Region stark unterschiedliches Belastungsschema erkennbar<sup>[9]</sup>.

#### Pflanzen- und Tierabsonderungen

Darunter ist der korrosive Angriff durch Baumharze, Tierexkremete sowie an der Oberfläche festhaftende, tote Insekten zu verstehen. Diese Belastungen sind wiederum jahreszeitlich und regional stark unterschiedlich<sup>[9]</sup>.

**Ruß und Metallabrieb**

Ruß durch Hausbrand und von Dieselmotoren ist leicht schwefelhaltig und reagiert in Kombination mit Feuchtigkeit zu angesäuerten Lösungen, welche den Lack angreifen. Weiters führen Metallabriebe von Schienen und Oberleitungen im Bahnbereich eine Schädigung der Oberfläche herbei, weshalb bei Bahntransporten von Neufahrzeugen besondere Schutzmaßnahmen sinnvoll sind<sup>[9]</sup>.

**Glättebekämpfungsmittel**

Das am meisten gefürchtetste Korrosionsmedium, welches auf ein Fahrzeug einwirkt, ist das Streusalz zur Bekämpfung der Straßenglätte. Dieses besteht zu 80 % aus Natriumchlorid und zu 20 % aus Calciumchlorid. Bei hoher Fahrzeuggeschwindigkeit und dementsprechender Feuchte bildet sich ein feiner Salzsprühnebel aus, der ein immenses Eindringverhalten besitzt und im Fahrzeuginneren Schäden hervorruft (Motorraum). Durch die vermehrte Splitstreuung bei Straßenglätte wird der Korrosionsangriff zusätzlich verstärkt – die Splitkörner bewirken eine Vorschädigung der Karosserieoberfläche, das salzhaltige Medium gelangt an die Metalloberfläche und führt zur Korrosion<sup>[9]</sup>.

## 5.1.2 Fahrzeugeigenbelastungen

Diese Belastungen können weitgehend vom Autohersteller durch dementsprechende Konstruktionsweise, Werkstoff- und Betriebsmittelauswahl gesteuert werden.

**Karoserieschwingungen**

Diese führen zu Relativbewegungen in den Fügstellen, wodurch vorhandene Versiegelungen beschädigt werden und Feuchtigkeit eindringt. In vielen Fällen ist ein dementsprechender Korrosionsangriff von außen nicht ersichtlich bzw. steuerbar<sup>[9]</sup>.

**Bremsabrieb**

Der Bremsabrieb greift einerseits durch den großen Potenzialunterschied (Bremsabrieb-Bauteil) umliegende Bauteile an, andererseits kann sich dieser aufgrund seiner hohen Temperatur in die Lackoberfläche einbrennen und diese vorschädigen<sup>[9]</sup>.

**Bremsflüssigkeit**

Diese besteht aus einem Gemisch von Glykolethern und Glykoletherestern, welche ein hohes Lösungsvermögen für Anstrichstoffe der Karosserielackierung sowie für organische Bauteile (Dichtungen) im Bremskreislauf besitzen<sup>[9]</sup>.

### Kühlmittel

Kühlmittel sind ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel in Form von Ethylenglykol. Deren hohe Betriebstemperaturen und elektrische Leitfähigkeiten fördern den korrosiven Angriff von Metallkombinationen, wie z.B. Kupfer-Aluminium, Zink-Eisen im Kühlkreislauf <sup>[9]</sup>.

### Kraftstoff

In Verbindung mit Wasser korrodiert der Kraftstoff die Innenfläche des Treibstoffbehälters. Im Bereich des Einfüllstutzens führt überlaufender Treibstoff zum Angriff der Lackierung. Nach dessen Verbrennung können sich saure Kondensate ausbilden, die das Abgassystem sowie Teile des Fahrzeughecks angreifen <sup>[9]</sup>.

### Reinigungsmittel

Diese werden zur Entfernung von Insekten- und Teerflecken verwendet, können aber ebenfalls den Lack sowie Kunststoffteile gefährden. Waschbürsten und Reinigungsmittel in Waschanlagen schädigen ebenso die Fahrzeuglackierung <sup>[9]</sup>.

## 5.2 Korrosion und Korrosionsschutz an verschiedenen Fahrzeugbaugruppen

Das folgende Kapitel befasst sich mit den baugruppenspezifischen Korrosionsproblemen sowie deren Lösungen. Eine Veranschaulichung der Modulaufteilung ist in Abbildung 37 ersichtlich <sup>[9]</sup>.



Abbildung 37: Baugruppenunterteilung im Fahrzeugbau

## 5.2.1 Karosserie

Die Karosserie ist die am stärksten beanspruchte Baugruppe des Fahrzeuges, sämtliche Umwelteinflüsse und Fahrzeugschwingungen wirken auf diesen korrosionsgefährdeten Bauteil ein. Bei einer selbsttragenden Karosseriebauweise ist deren Haltbarkeit maßgeblich für die Lebens- bzw. Einsatzdauer des Fahrzeuges. Die Karosseriewerkstoffe werden nach den Kriterien der Festigkeit und Wirtschaftlichkeit gewählt, welche aber meist nur eine geringe Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Die Teile müssen daher mit entsprechenden, teils kostspieligen Beschichtungsverfahren gegen einen korrosiven Angriff geschützt werden. Beschichtetes Stahlblech ist der weltweit häufigste Karosseriewerkstoff, aber auch Sonderwerkstoffe wie Aluminium, Magnesium, Kunststoffe sowie Verbundwerkstoffe finden immer mehr Einzug im Automobilbau. Die Vorteile der Mischbauweise sind in der Gewichts- und Treibstoffeinsparung zu sehen, nachteilig bei diesem Konzept ist jedoch der höhere Aufwand in der Entwicklung und im schlussendlichen Recycling<sup>[4], [5], [9]</sup>.

Wie bereits genannt ist Stahl (derzeit noch) die Nr. 1 der Karosseriewerkstoffe. Seine Vorteile liegen im relativ niedrigen Preis, der hohen Festigkeit und Steifigkeit, der guten Verformbarkeit, der hervorragenden Schalldämmung sowie in der hohen Energieaufnahme bei Unfällen. Stahl weist jedoch nur eine geringe Korrosionsbeständigkeit auf, wodurch verschiedenste Veredelungs- und Beschichtungskonzepte für den Einsatz im Fahrzeugbau unumgänglich sind. Das häufigste Oberflächenveredelungsverfahren ist das Verzinken. Je nach Einsatzgebiet im Fahrzeug bzw. Investitionsfreudigkeit der Automobilhersteller wurden verschiedenste Zinkbeschichtungen entwickelt. Beispiele hierfür sind in Tabelle 9 angeführt.

Bezeichnung	Zusammensetzung [Massen%]	Auftragstechnik
Feuerverzinken	99,8 % Zn + 0,2 % Al	Schmelztauchen
Galfan®	95 % Zn + 5 % Al	
Galvalume®	55 % Al + 43 % Zn/Si	
Zink elektrolytisch	100 % Zn	elektrolytische Abscheidung
Zink-Nickel elektrolytisch	88 % Zn + 12 % Ni	

Tabelle 9: Arten der Verzinkung<sup>[9]</sup>

Zink weist ein elektrochemisch unedleres Potenzial auf als das Stahlblech und opfert sich bei Fehlen, Unvollkommenheit oder Beschädigung der Lackierung bei Einwirkung eines korrosiven Mediums zu Gunsten des Grundwerkstoffes. Je nach Ausführung der Verzinkung werden unterschiedliche Ergebnisse in der Korrosionsbeständigkeit erzielt. Resultate von

Potenzialmessungen und Salzsprühtests nach DIN 50 021 sind in Tabelle 10 wiedergegeben<sup>[9]</sup>.

Bezeichnung	Potenzial gegen unleg. Stahl [mV]		240 Std. Salzsprühtest (DIN 50 021)			
	in VE-Wasser	in NaCl-Lösung	Flächen	Doppelungen	Kanten	Kratzer
<b>Feuerverzinkung/ Zn-elektrolytisch</b>	- 450	- 500	Zinkoxid und Zinkchlorid	kein Rotrost (bei einseitiger Verzinkung)	kein Rotrost	kein Rotrost
<b>Zn-Ni- elektrolytisch</b>	- 240	- 330	geringe Korrosion	Rotrost (bei einseitiger Verzinkung)	Rotrost	Rotrost

Tabelle 10: Ergebnisse verschiedener Korrosionstests<sup>[9]</sup>

Anhand dieser Untersuchungen ist zu erkennen, dass Bleche mit einer Feuer- bzw. elektrolytischen Verzinkung eine höhere Korrosionsbeständigkeit aufweisen als jene mit einer Zink-Nickel-Verzinkung. Letztere ist jedoch bezüglich der Schweißbarkeit anderen Veredelungsarten überlegen. Passivierungen erhöhen ebenfalls die Korrosionsbeständigkeit, müssen aber mit der jeweiligen Produktionslinie bzw. der Lackiererei abgestimmt werden, da ansonsten unerwünschte Farbeffekte an der Lackoberfläche auftreten. Eine weitere Verbesserung wird durch die Verwendung von Duplex-Systemen erzielt. Diese Kombination aus metallischem und organischem Überzug besitzt einen hohen Steinschlagwiderstand, weshalb solche beschichteten Bleche in stark beanspruchten Fahrzeugpartien, wie z.B. der Fronthaube, eingesetzt werden<sup>[9]</sup>.

Das Rezyklieren oberflächenveredelter Bleche ist inzwischen weitgehend möglich. Beim Einschmelzen des Schrottes verbrennt der organische Anteil, das Zink verdampft und wird über den Stahlwerksstaub ausgetragen. Problematisch hingegen sind die Anteile des Nickels. Dieses besitzt einen hohen Schmelz- und Verdampfungspunkt, weshalb es in der Stahlschmelze verbleibt<sup>[9]</sup>.

In den letzten Jahren erfuhr der Werkstoff Aluminium eine immer größer werdende Bedeutung im Automobilbau. Die geringe Dichte und die gute Umformbarkeit sprechen für diesen Werkstoff, jedoch wirken sich der hohe Preis, die geringe Steifigkeit und Schalldämmung, die große thermische Ausdehnung sowie eine empfindliche Oberfläche negativ auf sein Erscheinungsbild aus. Anwendungsziel ist die wirtschaftliche Gewichtsreduzierung (verbunden mit einer Kraftstoffeinsparung) sowie das Erreichen optimaler Fahrzeugeigenschaften. Der Großteil der im Karosseriebau befindlichen

Aluminiumbleche ist zwecks besserer Werkstoffeigenschaften mit Silizium oder Mangan legiert, Sekundärlegierungen sind aufgrund von Verunreinigungen derzeit nicht für diesen Verwendungszweck geeignet. Durch gezielte Beschichtungsverfahren wird die Korrosionsbeständigkeit des Aluminiums deutlich verbessert, eine Beschädigung der Basisoxidschicht kann sich jedoch problematisch auf die Lackbeständigkeit auswirken [4], [25], [28], [37].

Magnesium wird aufgrund seiner geringen Dichte bei vielen Automobilherstellern als „Werkstoff der Zukunft“ im Fahrzeugbau gehandelt, die hohe Korrosionsanfälligkeit sowie die geringe Duktilität und Kriechbeständigkeit schränken aber das Einsatzgebiet von Magnesiumwerkstoffen stark ein. Bei entsprechender Vorbehandlung und mehrstufiger Beschichtung (aufwendig und teuer) ist der Einsatz von Magnesium im Außenbereich des Fahrzeuges in Form von Türmodulen, Trägern und Abdeckungen bereits möglich, aber erst durch korrosionsresistentere Legierungsmodelle bzw. kostengünstige Beschichtungssysteme wird eine wirtschaftliche Etablierung dieses Leichtbauwerkstoffes sinnvoll sein [5], [11], [28], [37].

## 5.2.2 Verbindungselemente und Kleinteile

Diese Baugruppe ist bezüglich des Korrosionsschutzes kritisch zu betrachten, da eine Vielzahl von Herstellern und Lieferanten auf den Autoproduzent abgestimmt werden muss. Je nach Fahrzeugtyp und Einbauort werden unterschiedlichste Anforderungen an das Produkt gestellt, mangelnder Korrosionsschutz ist schnell ersichtlich und wirkt sich negativ auf das Image des Automobil- und Kleinteileherstellers aus. Verbindungselemente wie Schrauben und Muttern sind je nach Einsatzgebiet und Beanspruchung aus niedriglegiertem Stahl oder Aluminium gefertigt. Bei bestimmten Bauteilen wie z.B. Schlauchschellen haben sich nichtrostende Stähle sowie Kunststoffe bewährt. Aber auch andere Leichtmetallkomponenten aus Magnesium und Aluminium sind aufgrund der geringen Dichte von großem Interesse. Magnesiumteile sollten nur im Fahrzeuginneren verbaut werden, Aluminiumelemente hingegen sind im gesamten Fahrzeugbereich einsetzbar. Unbeschichtete Aluminiumteile sollten aus kupferfreien Legierungen bestehen. Aufgrund der guten Gießeigenschaften sind auch Zinkdruckgusslegierungen im Fahrzeugbau in Verwendung, diese erfordern ebenfalls einen widerstandsfähigen Korrosionsschutz. Der harte Wettbewerb auf diesem Sektor bewirkt eine stetige Produktverbesserung [4], [5], [9], [11].

### 5.2.3 Fahrwerk

Bauteile im Fahrwerksbereich unterliegen einem erhöhten Korrosionsangriff, da neben Steinschlag auch Straßensalz auf die Oberfläche einwirkt.

#### Räder

Der Großteil der im Straßenverkehr befindlichen Felgen besteht aus mehreren zusammengeschweißten Stahlblech-Tiefziehteilen. Um eine gute Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten, müssen die Schweißverbindungen gründlich gereinigt, die Felge phosphatiert und lackiert werden. Radkappen bieten einen zusätzlichen Schutz gegen Steinschlag und Korrosion<sup>[9]</sup>.

Gegossene oder geschmiedete Aluminium- und Magnesiumfelgen erfreuen sich, vor allem aus optischen Gründen, immer größerer Beliebtheit. Die meistzitierte Gewichtseinsparung ist kritisch zu hinterfragen, da Alufelgen (abhängig vom Design) sich gewichtsmäßig kaum von handelsüblichen Stahlfelgen unterscheiden. Hinsichtlich des Korrosionsschutzes ist eine Mehrfachbeschichtung der Leichtmetallfelge, um diese vor aggressivem Streusalz und Bremsabrieb zu schützen, unumgänglich. Neueste Entwicklungen gehen in Richtung Kunst- und Verbundstofffelgen, welche aber aus Kostengründen dem Rennsport und luxuriösen Fahrzeugmodellen vorbehalten sind<sup>[9]</sup>.

#### Bremssystem

Aufgrund der extremen Sicherheitsanforderungen an das Bremssystem im Fahrzeugbetrieb werden ebenfalls hohe Ansprüche an den Korrosionsschutz gestellt. Das Bremssystem wird innenseitig durch die Bremsflüssigkeit, außen (im Unterbodenbereich) wiederum durch die Einflüsse der Straße belastet. Da der Großteil der Bremsanlage aus korrosionsempfindlichen Legierungen besteht, ist eine spezifische Beschichtung der einzelnen Bauteile notwendig. Laut dem Stoffverbot der EU-Altauto-Richtlinie müssen hier (wie auch in allen anderen Teilen des Fahrzeugbaus) ebenfalls Ersatzstoffe für die cadmium-/chromhaltigen Beschichtungen gefunden werden – die weit verbreiteten Zink-Aluminium-Flake-Beschichtungen konnten sich bereits bewähren<sup>[9]</sup>.

#### Achsen

Achsen und Achsträger sind Schweiß-, Schmiede- bzw. Gussteile aus Stahl oder Aluminium und befinden sich im korrosionskritischen Unterbodenbereich des Fahrzeuges. Die aus Stahl gefertigten Bauteile weisen eine höhere Korrosionsbeständigkeit auf als jene aus Aluminium, letztere werden daher durch eine dickere Schutzschicht gegen den Angriff geschützt. Abriebgefährdete Teile/Bereiche müssen zusätzlich mit einer elastischen Schutzschicht

versehen werden bzw. Hohlräume sind mit einem dementsprechenden Hohlraumschutz zu versiegeln<sup>[9]</sup>.

### **Federn**

Die Schwingfestigkeit von Fahrzeugtragfedern wird durch Strahlverfestigung der äußeren Randschicht gesteigert, ein guter Oberflächenschutz ist daher besonders wichtig. Der Basisschutz besteht aus einer kathodischen Tauchlackierung (KTL), bei enormer Oberflächenbelastung wie z.B. Steinschlag ist eine zusätzliche Pulverbeschichtung der Feder notwendig<sup>[9]</sup>.

### **Stoßdämpfer**

Der Großteil der heutigen Stoßdämpfergehäuse wird elektrotauchlackiert, die innen liegenden Kolbenstangen werden bevorzugt einer speziellen Oberflächennitrierung unterzogen<sup>[9]</sup>.

## **5.2.4 Kraftstoffsystem**

Ähnlich dem Bremssystem wird das Kraftstoffsystem einerseits innen durch den Kraftstoff (sowie dessen Zumischungen), andererseits außenseitig wiederum durch die Einflüsse der Straße belastet. Das Hauptaugenmerk gilt der Dichtheit des gesamten Kraftstoffsystems, denn Lecke bzw. korrodierte Stellen können bei Unfällen zu Fahrzeugbränden führen<sup>[9]</sup>.

### **Kraftstoffbehälter**

Kraftstoffbehälter werden bzw. wurden aus bleibeschichtetem Stahlblech hergestellt, da Blei einen hervorragenden Korrosionsschutz gegen Treibstoff und den in ihm gelösten Wasser und Additiven (aggressive Chlorverbindungen) bietet. Beschädigungen der Bleibeschichtungen durch Schweißnähte im unteren Bereich des Behälters sind zu vermeiden. Aufgrund von Umweltschutzbestimmungen und der EU-Altauto-Richtlinie erfolgt derzeit ein Umstieg auf Kunststoffbehälter aus HDPE (High Density Polyethylen). Der wesentliche Vorteil dieser liegt in der einfachen Formgebung und der erreichbar hohen Formenkomplexität, nachteilig ist jedoch die aufwendige Innenbeschichtung des Kunststoffbehälters gegen Permeation. Unabhängig vom Behältermaterial muss der Tank bei exponierter Lage im Unterbodenbereich durch Bleche oder elastische Schutzlacke gegen Beschädigungen durch Steinschlag und dergleichen geschützt werden<sup>[9]</sup>.

### **Kraftstoffleitungen**

Diese ähneln den Bremsleitungen bezüglich der Korrosionsbelastung, weshalb die gleichen Werkstoffe und Beschichtungen wie bei den oben genannten Bremsleitungen verwendet werden. Bei besonders abrasionsgefährdeten Teilstücken der Kraftstoffleitung kommen Rohre aus Kupfernickellegierungen (ohne Beschichtung) zum Einsatz<sup>[9]</sup>.

### **Pumpen- und Filtergehäuse**

Aus Gründen der Gewichtseinsparung werden diese häufig aus dünnwandigem Aluminium hergestellt, bei der Montage im Spritzwasserbereich ist auf Kontaktkorrosion mit dem Befestigungsmaterial zu achten<sup>[9]</sup>.

## **5.2.5 Antrieb**

Wie alle anderen Baugruppen des Fahrzeugs wird die Antriebsgruppe durch innere (Öl, Kühlmittel, etc.) und äußere (Steinschlag, Salz, etc.) Einflussfaktoren korrosiv belastet. Im folgenden Kapitel erfolgt eine spezifische Betrachtung der einzelnen Komponenten<sup>[9]</sup>.

### **Motor und Getriebe**

Die meisten der im Fahrzeugbau befindlichen Zylinderköpfe werden aus Aluminiumlegierungen hergestellt. Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten und die Aggressivität des Kühlmediums können in den Kühlkanälen Kavitationsschäden bzw. einen chemischen Angriff am Aluminium verursachen. Die aus Grauguss oder Aluminium gefertigten Kurbelgehäuse und Zylinderblöcke sind nur bei längeren Standzeiten des Motors durch Kontakt- und Spaltkorrosion infolge von Kondenswasserbildung gefährdet. Deshalb ist eine Konservierung des Motorinnenraums notwendig. Im Betrieb sind die Motorengehäuse dem rauen Klima der Straße ausgesetzt. Spezielle, wärmebeständige Lacke schützen die Motorenoberfläche vor Korrosion. Für die im Unterboden positionierten Getriebegehäuse (meist aus Aluminium) ist kein besonderer Korrosionsschutz vorgesehen, da diese nicht im Blickfeld des Kunden liegen<sup>[9]</sup>.

### **Antriebswellen**

Die Gelenke der im Unterboden befindlichen Antriebswellen (Verbindung zwischen Getriebe und Rad) sind starken Korrosionsbeanspruchungen ausgesetzt und müssen daher durch Faltenbälge gegen Feuchtigkeitseintritt geschützt werden. Bei Fahrzeugen mit Kardantrieb (Heckantrieb durch Frontmotor) muss die Funktionstüchtigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Kardanwelle auch bei extremsten Klimabedingungen gewährleistet sein<sup>[9]</sup>.

### **Kühler**

Die funktionsbedingte, geringe Wandstärke der Kühler erfordert einen besonders sorgfältigen Korrosionsschutz gegen Außen- und Innenangriffe. Die früher verwendeten Schwermetallkühler waren weitgehend immun gegen Salzwasser und Bremsabrieb. Die aus Gewichtseinsparung heute eingesetzten Aluminiumkühler müssen durch aufwendige Lacküberzüge geschützt werden, wobei diese die Kühlwirkung negativ beeinflussen. Inhibitoren wie Sebacinate, Silikate, Borate, etc. verringern die Korrosionswirkung des

Kühlmittels im Inneren des Kühlsystems. Der pH-Wert der Kühlflüssigkeit soll zwischen 7,5 und 9 liegen<sup>[9]</sup>.

## 5.2.6 Abgasanlage

Das Abgassystem wird innenseitig durch die heißen, aggressiven Verbrennungsgase des Motors angegriffen, außen im Unterbodenbereich durch Feuchtigkeit, Stäube und Salz belastet.

### Schalldämpfer

Aufgrund der geringeren Temperaturen am Abgasstrangende kommt es zu einer verstärkten Kondenswasserbildung im Bereich des Endschalldämpfers, weshalb diese aus höherwertigen Chromtitan- (X6CrTi12) oder Chromnickelstählen (X6CrNiTi1810) gefertigt werden. Absorbermassen im Abgassystem dienen der vorübergehenden Kondensatbindung während des Abkühlvorganges. Der Außenmantel des Schalldämpfers wird meist aus aluminiumbeschichteten, unlegierten Stahlblechen hergestellt<sup>[9]</sup>.

### Katalysatoren

Katalysatorengehäuse werden grundsätzlich aus hochwarmfesten, korrosionsbeständigen Stählen (X6CrNiTi1810) oder Sonderlegierungen (NiCr23Fe) erzeugt. Diese hohen Qualitäten sind notwendig, um die vorgegebenen Herstellergarantien gegen Durchrostung zu erfüllen<sup>[9]</sup>.

### Rohre

Die dem Abgaskrümmern unmittelbar nachgeschalteten Rohre sollten aus hochwarmfesten, korrosionsbeständigen Stählen (z.B.: X6CrNiTi1810 oder NiCr23Fe) gefertigt sein. In Bereichen geringerer Temperaturbelastung können einfache Chromtitanstähle (z.B.: X6CrTi12) verwendet werden<sup>[9]</sup>.

### Aufhängung

Die Komponenten der Abgasanlagen-aufhängung erfordern einen besonderen Korrosionsschutz gegen Streusalz und weiteren Umwelteinflüssen. Daher werden Lack- und Pulverüberzüge gegenüber metallischen Schutzarten bevorzugt<sup>[9]</sup>.

### Auspuffblenden

Diese aus rein optischen Gründen montierten Teile werden fast immer aus Kupferlegierungen mit einem Kupferanteil > 75 % hergestellt. Der hohe Kupfergehalt verhindert einen weitgehenden Angriff durch Spannungsrisskorrosion. Eine abschließende Vernickelung und Verchromung der Oberfläche rundet das optische Bild der Blende ab<sup>[9]</sup>.

## 5.2.7 Elektrik

Die Fahrzeugelektrik ist besonders in den Bereichen des Unterbodens, der Frontpartie und des Motorraums starken korrosiven Beanspruchungen ausgesetzt<sup>[9]</sup>.

### Kontakte und Stromverbindungen

Spezielle Beschichtungen der Kontaktflächen von Steckverbindungen gewährleisten ein Optimum an elektrischer Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Besonders gefährdete Kontakte werden durch Schutzfette oder Schrumpfschläuche vor einem Elektrolyteintritt geschützt<sup>[9]</sup>.

### Gehäuse

Gehäuse sind außen durch Beschichtungen gegen Korrosion zu schützen, etwaige Kabeldurchführungen müssen abgedichtet sein. Das Luftvolumen im Inneren des Gehäuses soll möglichst gering gestaltet werden, um bei Temperaturschwankungen (gekoppelt mit einer Volumsänderung) die Dichtheit des Gehäuses zu garantieren<sup>[9]</sup>.

### Scheinwerfer

Diese mit Aluminium bedampften Reflektoren sind empfindlich gegen korrosive Medien. Im Betrieb heizt sich die Innenluft auf und drückt nach außen, beim Abkühlen des Scheinwerfers wird Umgebungsluft und Feuchtigkeit angesaugt. Mit Kondenswasser beschlagene und korrodierte Leuchtkörper sind die Folge. Um dieses Problem zu lösen, werden Lampen und Reflektoren zu einer mit Inertgas befüllten Einheit, so genannten sealed beams, kombiniert<sup>[9]</sup>.

## 5.3 Allgemeiner Korrosionsschutz

Darunter sind all jene Schutzmaßnahmen zu verstehen, die der Automobilhersteller einem Korrosionsangriff gezielt entgegensetzt.

### 5.3.1 Konstruktiver Korrosionsschutz

Bereits in der Konstruktion besteht die Möglichkeit wesentliche Beiträge hinsichtlich des Korrosionsschutzes zu leisten. Es gilt Kanten, Falze, Doppelungen, Punktschweißnähte und Hohlräume konstruktionstechnisch so weit als möglich zu meiden, da diese Stellen bei einer nachfolgenden Lackierung nur unvollständig oder gar nicht beschichtet werden. Solche Fehlstellen in der Lackoberfläche stellen meist Ausgangspunkte für spätere Korrosionsherde dar. Um einen weiteren Korrosionsfortschritt zu unterbinden bzw. zu reduzieren, sind folgende wichtige Richtlinien zu berücksichtigen:

- Bauteile bzw. Module, die hoher Feuchtigkeit unterliegen, sind mit einer entsprechend wirksamen Belüftung zu versehen, da Nässe eine wesentliche Voraussetzung für einen korrosiven Angriff ist<sup>[9]</sup>.
- Feuchtigkeitsansaugende Kapillaren müssen mit zusätzlichen Hilfsmitteln wie Dichtmitteln, Klebefolien und Beschichtungen gegen einen Feuchtigkeitseintritt geschützt werden<sup>[9]</sup>.
- Bereiche bzw. Hohlräume in denen eine Kondenswasserbildung auftritt, sind im jeweils tiefsten Punkt des Bauteils mit Ablauflöchern zu versehen<sup>[9]</sup>.
- Übergänge wie Ecken und Kanten an der Karosserie müssen so gestaltet sein, dass kein Schmutz haften bleibt bzw. keine Dauerfeuchtbereiche („stehende Flüssigkeit“) entstehen. Solche Schmutz- und Feuchtigkeitsansammlungen stellen den Ausgangspunkt für spätere Korrosionsherde dar<sup>[9]</sup>.

Abbildung 38 zeigt Beispiele für den konstruktiven Korrosionsschutz.

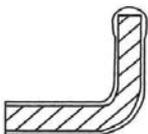
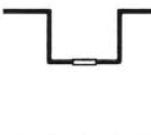
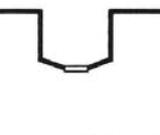
-	+	Vorteile einer guten Gestaltung
		Blechabwinkelungen nach unten <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bessere Kantenbeschichtung bei Spritzlackierungen</li> </ul>
		Punktschweißflansch mit Abdichtfuge <ul style="list-style-type: none"> <li>• Führung für Fadenpistole, dadurch exakte Dichtnahtlage</li> </ul>
		Ablauföffnung an tiefster Stelle <ul style="list-style-type: none"> <li>• Keine Feuchtigkeit in den Ecken</li> </ul>
		Ablauföffnung gegen die Fahrtrichtung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abwehr von Spritzwasser</li> </ul>
		Unterbodenvorsprünge mit Anstragungen <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein Beschichtungsabrieb an vorstehenden Kanten</li> </ul>

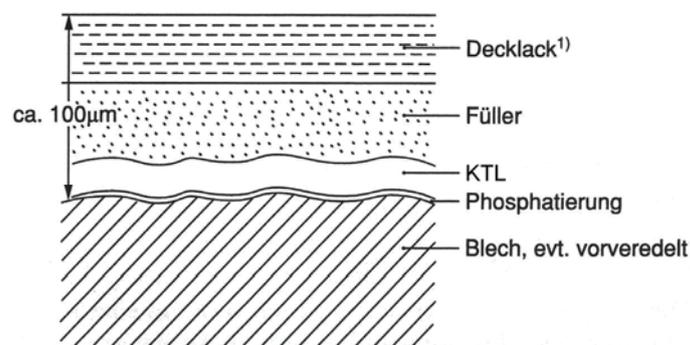
Abbildung 38: Beispiele für konstruktiven Korrosionsschutz<sup>[9]</sup>

### 5.3.2 Phosphatierung

Diese stellt für alle metallischen Karosseriewerkstoffe das Bindeglied zwischen der Metalloberfläche und der Lackierung dar und ist ausschlaggebend für die Lackhaftung und -beständigkeit. Die Phosphatierung wird mittels Spritz- oder Tauchapplikation durchgeführt, wobei mit der Tauchphosphatierung eine höhere Schichtdicke und bessere Hohlräumenetzbarkeit erreichbar ist. Spritzphosphatierte Oberflächen hingegen weisen wegen der gröberen Oberflächenstruktur eine höhere Lackhaftung auf. Die Beständigkeit der Phosphatschicht selbst ist von der jeweiligen Vorbehandlung (Glühung, Veredelung, Reinigung, Aktivierung, etc.) der Bauteiloberfläche anhängig<sup>[9]</sup>.

### 5.3.3 Lackierung

Die Lackierung eines Fahrzeuges dient nicht nur dem optischen Zweck, sondern übernimmt auch einen wesentlichen Teil des Korrosionsschutzes bei klimatischer und mechanischer Belastung. Je nach Fahrzeugbereich ist der Aufbau der Lackierung unterschiedlich; Zonen die dem Sichtbereich oder starker Beanspruchung unterliegen, werden mit einer dickeren Lackierung versehen als jene außerhalb dieser Kriterien. In Abbildung 39 ist der allgemeine Aufbau einer Lackierung dargestellt<sup>[9]</sup>.



<sup>1)</sup> bei Metallic-Lackierungen besteht der Decklack aus zwei Schichten (Grundmetallic + Klarlack)

Abbildung 39: Aufbau einer Lackierung<sup>[9]</sup>

Die Kathodische Tauchlackierung (KTL) bildet zusammen mit der Phosphatierung den eigentlichen Korrosionsschutz. Im Wasser schwimmende Lackteilchen werden mit Hilfe eines zwischen der Tauchbeckenwand und der Karosserie befindlichen elektrischen Feldes zur Blechoberfläche transportiert und dort abgeschieden. Beim Ausfahren der Karosserie aus dem Tauchbecken verbleibt eine dünne, definierte Lackschicht auf der Oberfläche, welche im darauf folgenden Trockner eingebrannt wird. Die darüber liegende Füllerschicht dient einerseits der Oberflächeneinebnung, andererseits federt diese Steinschläge ab. Die Decklackschicht muss gegen klimatische Beanspruchungen und zu einem gewissen Grad gegen mechanische Beschädigungen beständig sein. Mit derartigen, nur ca. 0,1 mm dicken

Schichtsystemen in Verbindung mit dem entsprechenden Substrat und der abgestimmten Vorbehandlung ist es möglich, Fahrzeuge über die Betriebszeit von mehreren Jahren an der gesamten Außenhaut vor Korrosion zu schützen.

### **5.3.4 Nahtversiegelung**

Punktschweißflansche, Falze sowie sichtbare Schnittkanten müssen gegen Feuchtigkeitszutritt und Rostbildung versiegelt werden. Hierfür wird derzeit noch (EU-Altauto-Richtlinie) dauerelastisches PVC verwendet, das geringe Relativbewegungen kompensiert, ohne Risse auszubilden. Die PVC-Nähte werden nach der KTL-Beschichtung mittels Fadenpistole oder von Hand auf die betroffenen Bereiche aufgetragen und gemeinsam mit dem Füller getrocknet<sup>[9]</sup>.

### **5.3.5 Unterbodenschutz**

Da die Unterbodenlackierung meist nur aus der Phosphatierung und der KTL-Schicht besteht, ist ein zusätzlicher Schutzbelag aus PVC oder Bitumen gegen Feuchtigkeit, Streusalz, Steinschlag sowie Straßenschmutz notwendig<sup>[9]</sup>.

### **5.3.6 Hohlraumkonservierung**

Hohlräume im Fahrzeug erfordern einen besonderen Schutz gegen die Kondenswasserbildung und salzhaltige Medien. Deshalb wird mittels spezieller Düsen in die betroffenen Bereiche Wachs eingesprüht und dadurch der Hohlraum versiegelt. Bessere Ergebnisse sind durch die Wachsfluttechnik zu erreichen; der Hohlraum wird einseitig verschlossen, mit warmen Wachs geflutet und anschließend wieder entleert<sup>[9]</sup>.

### **5.3.7 Außenhautkonservierung**

Die Außenhautkonservierung ist nur eine temporäre Schutzmaßnahme, diese schützt die frische Decklackierung bis zur Auslieferung des Fahrzeuges gegen Regen, Vogelkot, Baumharz und dergleichen. Die Konservierung wird auf die noch nicht vollständig ausgehärtete Fahrzeuglackierung aufgesprüht oder in Form von Folien aufgeklebt. Ebenso sind Abdeckplanen im Einsatz, wobei Tür- und Fensterbereiche aus Transportgründen mit Reißverschluss-Einsätzen versehen sind. Das Entfernen des Schutzüberzuges erfolgt beim Kunden<sup>[9]</sup>.

Abbildung 40 zeigt einen Überblick von den im Automobilbau angewandten Korrosionsschutzverfahren. Beim Großteil der angeführten Schutzmethoden handelt es sich um Standardprozeduren in der Automobilproduktion und wurden daher bereits in den vorhergehenden Kapiteln besprochen, andere hingegen sind für Nischenanwendungen ausgerichtet<sup>[8]</sup>.

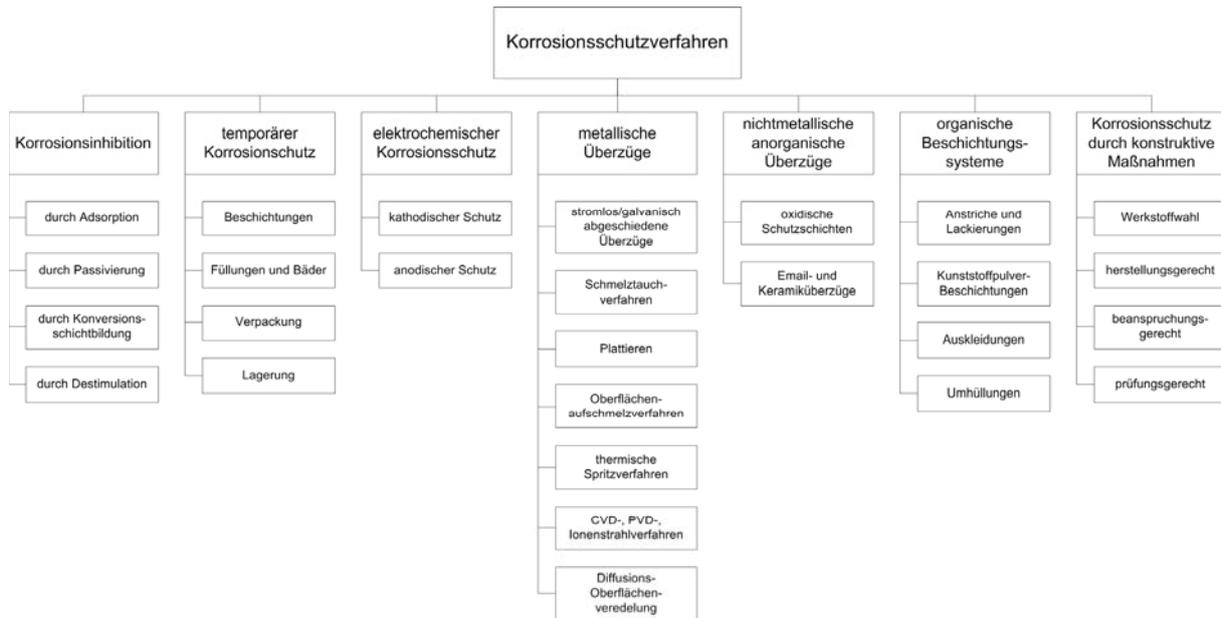


Abbildung 40: Mögliche Korrosionsschutzverfahren [8]

## 6 Korrosionsprüfverfahren

Um mögliche Korrosionsangriffe zu simulieren, wurde eine Reihe von Prüfverfahren entwickelt, die nach einer kurzen Prüfzeit eine allgemeine Aussage bezüglich der Langzeitkorrosionsbeständigkeit ermöglichen. Die Aussagekraft der einzelnen Technologien ist umstritten. Tabelle 11 gibt Auskunft über mögliche Prüfvarianten in den jeweiligen Fahrzeugbereichen.

Korrosionsbelastung	Feuchtigkeit	Salznebel NaCl/CaCl <sub>2</sub>	Abgas	Wärme	Steinschlag
Innenraum	X	-	-	-	-
Karosserie außen über Gürtellinie	X	X	-	-	X
Karosserie außen unter Gürtellinie	X	X	X	-	X
Motorraum	X	X	X	X	-
Unterboden	X	X	X	(X)	X
Prüfverfahren	Kondenswasser DIN 50 017	Salzsprühtest DIN 50 021	Kondenswasser + SO <sub>2</sub>	Lagerung im Wärmeschrank	VDA Multischlag

Tabelle 11: Prüfverfahren im Fahrzeugbau [9]

## 6.1 Kurzzeitprüfverfahren

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den wichtigsten Kurzzeitprüfverfahren der Automobilentwicklung; die für diese Diplomarbeit relevanten Versuchsmethoden werden genauer beschrieben.

### Kondenswasserprüfung (DIN 50 017)

Bei diesem Prüfverfahren werden die Proben extremer Luftfeuchtigkeit und erhöhter Temperatur ausgesetzt, wodurch mögliche Haftstörungen in der Beschichtung (auch bei Kunststoffteilen) ermittelt werden. Der Prüfablauf ist in Tabelle 12 ersichtlich, genauere Informationen sind dem entsprechenden Normblatt zu entnehmen<sup>[9], [15]</sup>.

Prüfklima		Dauer eines Zyklus		Bedingungen für den Nutzraum nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes		
		Benennung	Kurzzeichen	Gesamt	1. Prüfabschnitt	Lufttemperatur
2. Prüfabschnitt						
Kondenswasser-Konstantklima		KK	-	vom Anwärmen bis Ende Beanspruchung	(40 ± 3) °C	etwa 100 % mit Betauung der Proben
Kondenswasser-Wechselklima	mit Wechsel von Luftfeuchte und -temperatur	KFW	24 h	8 h einschließlich Anwärmen	(40 ± 3) °C	etwa 100 % mit Betauung der Proben
				16 h einschließlich Abkühlen (Klimakammer geöffnet bzw. belüftet)	18 bis 28 °C	unter 100 %
	mit Wechsel von Lufttemperatur	KTW	24 h	8 h einschließlich Anwärmen	(40 ± 3) °C	etwa 100 % mit Betauung der Proben
				16 h einschließlich Abkühlen (Klimakammer geschlossen)	18 bis 28 °C	etwa 100 %

Tabelle 12: Kondenswasserprüfbedingungen nach DIN 50 017<sup>[15]</sup>

### Salzsprühtest (DIN 50 021)

Dies ist der häufigste Kurzzeittest für Komponenten im Automobilbau. Die Probenkörper werden bei erhöhter Temperatur einer sehr aggressiven Salznebelatmosphäre ausgesetzt, wodurch der Korrosionsschutz auf Wirksamkeit und Fehlstellen überprüfbar ist. In Tabelle 13 sind die Bedingungen der Sprühnebelprüfung ersichtlich<sup>[9], [14]</sup>.

Prüfungsarten		Salzsprühnebelprüfung	Essigsäure-Salzsprühnebelprüfung	Kupferchlorid-Essigsäure-Salzsprühnebelprüfung
Normbezeichnung		Prüfung DIN 50 021-SS	Prüfung DIN 50 021-ESS	Prüfung DIN 50 021-CASS
Prüflösung	Massenkonzentrationen an Natriumchlorid in g/l	(50 ± 5)		
	weitere Zusätze	keine	Essigsäure	Essigsäure und Kupfer(II)-chlorid
pH-Wert		6,5 bis 7,2	3,1 bis 3,3	
Temperatur im Prüfraum in °C		(35 ± 2)		(50 ± 2)

Tabelle 13: Bedingungen der DIN 50 021<sup>[14]</sup>

Die genauen Definitionen bezüglich Prüfkammer, -lösung, -durchführung, etc. sind der jeweiligen Prüfnorm zu entnehmen.

### Kondenswasserwechselklimaprüfung in SO<sub>2</sub>-haltiger Atmosphäre

Dieses auch unter dem „Kesternichtest“ bekannte Prüfverfahren dient der Ermittlung des Korrosionsverhaltens von Bauteilen in stark abgashaltiger Atmosphäre. Der Kesternichtest wird hauptsächlich zur Überprüfung von Abgasanlageanteilen und Zerteilen im Heckbereich herangezogen<sup>[9]</sup>.

### Wärmelagerung

Die Lagerung von Bauteilen bei erhöhten Temperaturen erfolgt meist um eine Vorbelastung für die nachfolgenden Prüfverfahren zu erreichen. So wird beispielsweise das Riss- und Haftverhalten von Chromatierungen auf verzinkten Teilen sowie anderer Kombinationen analysiert<sup>[9]</sup>.

### Steinschlagprüfung nach VDA

Bei diesem Test werden definierte, scharfkantige Hartgussteilchen mittels Pressluft auf die zu prüfende Lackierung bzw. Beschichtung geschleudert, wobei Eindringtiefe und -größe die Lackgüte definieren<sup>[9]</sup>.

### Kombinierte Kurzzeitprüfungen

Weltweit gibt es eine große Anzahl von Prüfkombinationen aus Salzsprühnebeltest und Kondenswasserprüfung, wie z.B. die VDA 621-415. Diese dienen der Beurteilung lackierter Karosseriebleche unter wechselnden klimatischen Bedingungen <sup>[9]</sup>.

Die VDA 621-415 bildet das Herzstück jeder Korrosionsprüfung im Automobilbau. Mit dieser Methode wird das Wachstumsverhalten von Rand-, Kanten-, Flächenrosterscheinungen sowie Unterwanderungen der Beschichtung simuliert und das Korrosionsverhalten von Mischbauweisen studiert. Die folgende Tabelle 14 beschreibt den Prüfablauf der VDA 621-415, die genaue Beschreibung der Durchführung und Auswertung ist wiederum der entsprechenden Norm zu entnehmen <sup>[9], [20]</sup>.

Prüfklima		Dauer eines Zyklus	Bedingungen in der Prüfkammer
Benennung	Norm		
Salzsprühnebelprüfung	DIN 50 021-SS	1 Tag = 24 h	nach DIN 50 021-SS
Kondenswasserwechselklima	DIN 50 017-KFW	4 Tage = 4 Zyklen	nach DIN 50 017-KFW
Konstantklima	DIN 50 014	2 Tage = 48 h	bei Raumtemperatur (18 bis 28 °C) nach DIN 50 014
Gesamtprüfzeit		7 Tage = 1 Zyklus nach VDA 621-415, Anzahl der VDA-Zyklen frei wählbar	

Tabelle 14: Ablauf der zyklisch wechselnden Klimaprüfung nach VDA 612-415 <sup>[20]</sup>

### Sonderprüfmethoden

Neben den allgemeinen Kurzzeitprüfungen existiert eine Reihe von Sonderprüfverfahren wie Einfärbetests für Eloxalschichten auf Aluminium, Kraftstoffbeständigkeit von Tankblechen, Kondensatbildung in Abgasablagen oder Hochtemperaturtests für Kühlmittel im Kühlkreisläufen <sup>[9]</sup>.

## 6.2 Langzeitprüfverfahren

Da die einzelnen Kurzzeitprüfverfahren unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Korrosionsbeständigkeit liefern, wurde von den Automobilherstellern eine Reihe von Langzeitprüfverfahren entwickelt, um bessere Aussagen über die Einsatzbeständigkeit treffen zu können<sup>[9]</sup>.

### **Verschärfte Freibewitterung nach VDA**

Diese Prüfmethode ist zwar sehr zeitaufwendig, liefert aber mit einfachen Einsatzmitteln praxisgerechte Ergebnisse. Die Prüfkörper werden ins Freie gelegt und der natürlichen Witterung ausgesetzt. Zusätzlich erfolgt eine Besprühung der Proben einmal pro Woche mit einer Natriumchloridlösung. Die Beurteilung der Proben wird in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt, nutzbare Ergebnisse sind nach einem Jahr zu erwarten. Aufgrund der klimatischen Schwankungen ist dieses Prüfverfahren zwar für Vergleiche unterschiedlichster Beschichtungen geeignet, die daraus resultierenden Absolutwerte sind aber nur bedingt verwertbar<sup>[9]</sup>.

### **Beschleunigte Korrosionsprüfung kompletter Fahrzeuge**

Eine praxisorientierte Korrosionsanalyse ist nur anhand von Inspektionen an Kundenfahrzeugen möglich. Da sich der Beobachtungszeitraum über mehrere Jahre erstreckt, wird aus marktwirtschaftlichen Gründen eine extreme Zeitraffung der Korrosionseinflüsse durchgeführt. Durch die gezielte Einwirkung von Feuchtigkeit, Schmutz, Salz, Hitze und Schwingungen (auf eigens angelegten Teststrecken) sowie Ruhe- und Standphasen auf das Fahrzeug, werden Zeitraffungen im Verhältnis von ca. 10:1 erreicht. Die Ergebnisse sind jeweils zu interpretieren, da dieser geraffte Versuch in gewissen Bereichen über- bzw. unterzeichnet. Diese Prüfmethode ist bei vielen Automobilherstellern bereits Voraussetzung für die Freigabe von neuen Fahrzeugmodellen oder verändertern Korrosionsschutzmaßnahmen im Rahmen der Fertigung<sup>[9]</sup>.

## 7 Fügetechnik im Automobilbau

Um das Produkt „Automobil“ fertigen zu können, sind zahlreiche Verfahren und Arbeitsschritte notwendig. Die wichtigste Prozessstufe in der Automobilherstellung ist das Zusammenfügen der einzelnen Bauteile zum gesamten Fahrzeug. Das Spektrum an Fügetechniken im Automobilbau ist enorm; von Schweißen, Nieten über Kleben bis hin zum einfachen Klettverschluss werden alle möglichen Methoden angewandt. Dabei stößt man schnell an die Grenzen der Festigkeit und der Korrosion, denn unterschiedliche Materialien bedeuten auch ein unterschiedliches Korrosionsverhalten bzw. elektrochemisches Potenzial. Daher liegt die Aufgabe der Konstrukteure nicht nur in der Basisentwicklung der Fahrzeuge, sondern auch in der richtigen Wahl und Gestaltung des Fügeprozesses, um unerwünschte Erscheinungen wie Kontakt- oder Spaltkorrosion zu verhindern. Je nach Materialkombination bzw. Belastungsschema variiert der Arbeitsaufwand und Schwierigkeitsgrad des Fügeprozesses – wo bei überlappten Stahlblechen noch ein einfacher Niet ausreichend ist muss z.B. bei Kombinationen mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) eine aufwendige Isolierung zum Partnermaterial durchgeführt werden<sup>[4], [12], [13], [29]</sup>.

Da ein wesentlicher Teil dieser Arbeit das Thema „Fügetechnik“ behandelt, werden im Folgenden die Fügeverfahren Schrauben, Durchsetzfügen und Stanznieten näher erläutert. Da die Gesamtheit aller Fügeverfahren zu umfangreich ist, wird in diesem Kapitel nicht auf die genauere Beschreibung weiterer Methoden eingegangen. Eine überblicksmäßige Zusammenstellung und Beschreibung sämtlicher Fügetechniken befindet sich im Anhang.

### Schrauben

Die Schraube ist das am häufigsten und vielseitigst verwendete Verbindungselement im Fahrzeugbau, das im Vergleich zu anderen Bauelementen in den verschiedenartigsten Formen hergestellt und genormt ist. Es ist daher zu unterscheiden zwischen:

- **Befestigungsschrauben:** für lösbare Verbindungen von Bauteilen aller Art<sup>[12]</sup>.
- **Bewegungsschrauben:** zur Umwandlung von Drehbewegungen in Längsbewegungen (Schiebedach) oder zur Erzeugung großer Kräfte (Wagenheber)<sup>[12]</sup>.
- **Dichtungsschrauben:** zum Verschließen von Einfüll- und Auslassöffnungen (Getriebe, Lager, Ölwanne und Armaturen)<sup>[12]</sup>.
- **Einstellschrauben:** zum Ausrichten von Geräten und Instrumenten, zum Einstellen von Ventilen oder zur Messung<sup>[12]</sup>.

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 41 eine Befestigungsschraube mit zugehöriger Mutter dargestellt.

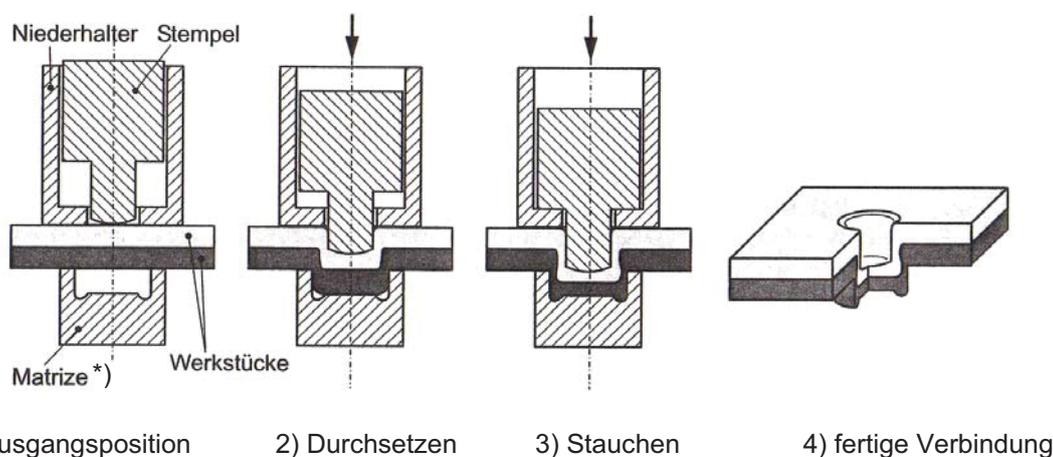


Abbildung 41: Sechskantschraube mit zugehöriger Mutter

### Durchsetzfügen

Das Durchsetzfügen, oder auch Clinchen bezeichnet, entwickelte sich in den letzten Jahren zu einem der wichtigsten Fügeverfahren im Automobilbau. Mit Hilfe eines Stempels und einer Matrize werden die überlappt angeordneten Werkstücke partiell durchsetzt und gestaucht, so dass durch Breit- und Fließvorgänge eine unlösbare, form- und kraftschlüssige Verbindung entsteht. Unter bestimmten Bedingungen der Prozessführung und Materialkombination ist sogar eine stoffschlüssige Verbindung möglich. Da die Herstellung dieser Verbindung kein zusätzliches Verbindungselement benötigt, gilt dieses Verfahren als sehr wirtschaftlich und zeichnet sich außerdem durch sein geringes Verbindungsgewicht aus<sup>[4], [12], [26]</sup>.

Bezüglich des Herstellprozesses wird zwischen der einstufigen und mehrstufigen bzw. der schneidenden, partiell schneidenden und nicht schneidenden Methode unterschieden. In Abbildung 42 und Tabelle 15 sind der Verfahrensablauf sowie eine Gegenüberstellung der einzelnen Varianten ersichtlich<sup>[12], [13], [27]</sup>.



\*) Bei einer mehrstufigen Stempelfahrweise beinhaltet die untere Matrize einen zusätzlichen beweglichen Umformstempel

Abbildung 42: Verfahrensschritte beim einstufigen, nicht schneidenden Clinchen<sup>[12]</sup>

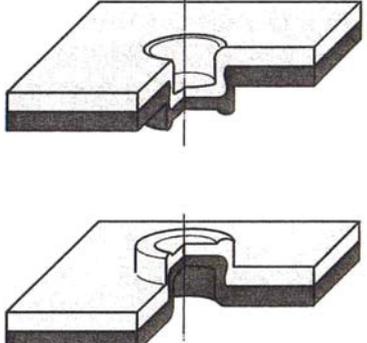
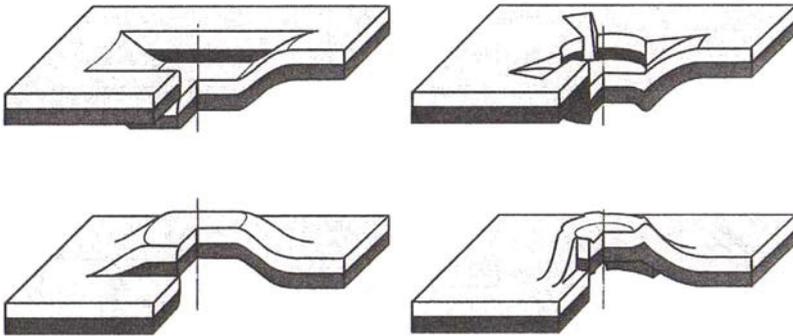
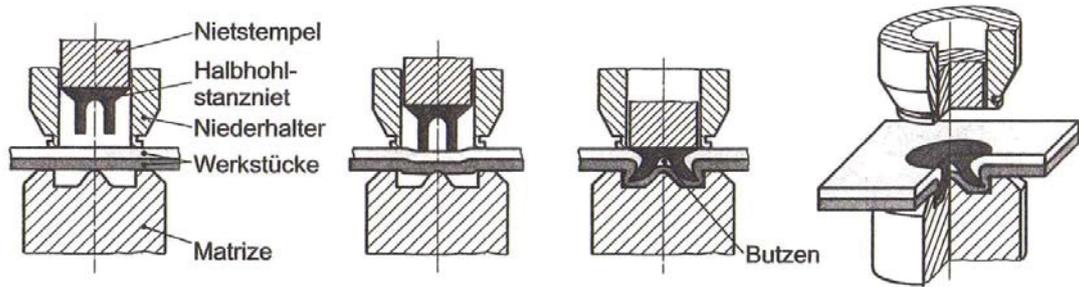
nicht schneidende Clinchverbindungen	schneidende Clinchverbindungen
	
Rundpunkt	Balkenpunkt (links) und Sonderformen (rechts)
<b>Vorteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• richtungsunabhängige Belastung möglich</li> <li>• symmetrisches äußeres Aussehen</li> </ul>	<b>Vorteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geringere Fügekräfte als bei nicht schneidenden Clinchverfahren</li> <li>• Verdrehsicherheit bei Einzelpunktverbindungen</li> </ul>
<b>Nachteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• höhere Fügekräfte erforderlich</li> <li>• starke Kaltverfestigung des Werkstoffes im Bereich der Fügeverbindung</li> </ul>	<b>Nachteile</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• keine Dichtheit gegen Flüssigkeiten und Gase</li> <li>• Spaltkorrosion möglich</li> <li>• richtungsabhängige Beanspruchbarkeit</li> <li>• kein vollsymmetrisches äußeres Aussehen</li> </ul>

Tabelle 15: Gegenüberstellung von schneidenden und nicht schneidenden Clinchverbindungen <sup>[12]</sup>

### Stanznieten

Die steigende Produktivität und Automation in der Automobilindustrie Ende der 60er Jahre erforderte eine effizientere und zeitsparendere Niettechnologie, da herkömmliche verwendete Nietverfahren mit einem zeitaufwendigen Vorlochen und Positionieren der Werkstücke verbunden waren. Aus dieser Überlegung entstand die Methode des Stanznietens mit einem Halbhohl Niet, bei dem ein Stanzniet das stempelseitige Werkstück durchtrennt und auf der Matrizen Seite samt Werkstoff aufgespreizt wird. Dadurch entsteht eine form- und kraftschlüssige Verbindung, die gegen Flüssigkeiten und Gase dicht ist. Neben der fügenden Funktion können Stanzniet-Sonderformen auch die Aufgabe von einer Gewindemutter oder eines Gewindebolzens übernehmen. Abbildung 43 stellt das allgemeine Verfahrensschema des Stanznietens dar, in Abbildung 44 sind die soeben genannten Sonderformen ersichtlich <sup>[4], [12], [26]</sup>.



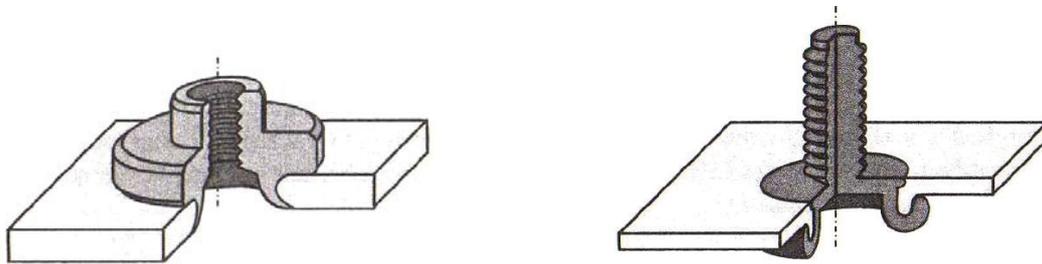
1) Ausgangsposition

2) Verklammern

3) Stanzen

4) fertige Verbindung

Abbildung 43: Verfahrensablauf des Stanznietens mit einem Halbhohlstanzniet<sup>[12]</sup>



Stanznietmutter

Stanznietbolzen

Abbildung 44: Stanzniet-Sonderformen<sup>[12]</sup>

## 8 Korrosionsuntersuchungen an den Proben

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Ermittlung des Korrosionsverhaltens von Mischbauweisen in Abhängigkeit verschiedenster Fügeverfahren mittels der bereits besprochenen Salzsprüh- (DIN 50 021-SS) und VDA-Tests (VDA 621-415) sowie Stromdichte-Potenzial-Messungen.

Da die Palette der metallischen Werkstoffe im Fahrzeugbau beinahe unübersichtlich ist und die eben genannten Korrosionsprüfungen in zeitlicher, technischer und finanzieller Hinsicht beschränkt sind, musste anhand verschiedenster Kriterien eine engere Werkstoffauswahl für die spätere Probenherstellung getroffen werden. Die Auswahl erfolgte nach Abstimmung mit den Interessen der Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & Co KG und einer umfangreichen Literaturrecherche<sup>[23], [24], [41]</sup>.

Folgende Materialien wurden für die Probenherstellung festgelegt:

- Aluminiumlegierung: AW-6016 T4
- Magnesiumlegierung: AZ91 HP
- Stahlwerkstoff: H260 PD + Z100MBO
- Sonderwerkstoff: CFK MSF

### 8.1 Werkstoffbeschreibungen

Das folgende Kapitel umfasst die Beschreibung aller relevanten Werkstoffe der Probenherstellung zur Testserie.

#### 8.1.1 Aluminiumlegierung AW-6016 T4

Die Aluminiumlegierung AW-6016 T4 (AlMg<sub>0,4</sub>Si<sub>1,2</sub>) ist der Hauptvertreter der Aluminiumwerkstoffe im Automobilbau und wird vorwiegend für großflächige Karosserieaußenteile verwendet. So werden aus Gründen der Gewichtsersparnis hauptsächlich Motorhauben-, Tür- und Heckklappen- sowie Dachkomponenten aus dieser Legierung gefertigt, eine Karosseriegesamtkonstruktion aus Aluminium ist ebenfalls möglich, wie das Audi-Projekt A2 beweist. Die Umformung des Bleches erfolgt im T4-Zustand mit anschließender Endaushärtung bei 205 °C (30 min), wobei die Warmaushärtung vorzugsweise mit dem Lackierprozess in einem Schritt zu kombinieren ist. Viele Automobilhersteller optimieren daher ihre Produktions- bzw. Lackierlinie hinsichtlich eines gemeinsamen Einsatzes von Stahl- und Aluminiumkomponenten in einem Prozess. Bezüglich Beschichtungs- und Fügeverfahren sind zahlreiche Varianten möglich<sup>[35], [41]</sup>.

**Blechdicke:** 1,5 mm

**Lieferant:** AMAG automotive (Austria Metall Aktiengesellschaft), A-5282 Ranshofen.

**Probenfertigung:** Eigenhändig im Bereich des Prototypenbaus (Magna Steyr Fahrzeugtechnik & Co KG, A-8041 Graz-Thondorf).

**Chemische Zusammensetzung:** (siehe Tabelle 16)

	Si [%]	Mg [%]	Fe [%]	Zn [%]	Mn [%]	Cu [%]	Ti [%]	Cr [%]	Andere [%]	Al [%]
<b>min</b>	1,0	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>max</b>	1,5	0,6	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,1	≤ 0,15	Rest
<b>ist</b>	1,335	0,553	0,194	0,003	0,056	0,041	0,019	0,013	-	97,786

Tabelle 16: chemische Zusammensetzung von AW-6016 T4 <sup>[3], [41]</sup>

### 8.1.2 Magnesiumlegierung AZ91 HP

Hierbei handelt es sich um eine Magnesiumdruckgusslegierung mit 9 % Aluminium und 1 % Zink, die vor allem wegen ihrer geringen Dichte (ca.  $\frac{1}{3}$  leichter als Aluminium) und den hervorragenden Dämpfungseigenschaften von großem Interesse für die Fahrzeugkonstrukteure ist. Nachteile wie unzureichende Festigkeit, geringe Korrosionsbeständigkeit und hoher Preis werden gerne in Kauf genommen, um die erwünschte Gewichtseinsparung zu erzielen. Bei entsprechender Vorbehandlung und Beschichtung ist der Einsatz dieser Legierung im Außenbereich des Fahrzeuges in Form von Motorhauben, Felgen, Tür- und Heckklappenmodulen möglich – vorzugsweise ist dieser Werkstoff im Innenbereich des Fahrzeuges (Lenkrad, Handbremshebel, Armaturenräger, etc.) anzuwenden <sup>[5]</sup>.

**Lieferant:** Montanuniversität Leoben, Department Metallurgie - Nichteisenmetallurgie, A-8700 Leoben.

**Probenfertigung:** Aus den bereitgestellten AZ91-Masseln wurden durch die Firma Zieserl GmbH & Co KG, A-8074 Raaba, entsprechende prismatische Profile (4 x 4 cm) herausgefräst und bei Magna Steyr Fahrzeugtechnik & Co KG - Sonderfertigung, A-8041 Graz-Thondorf, zu 1,5 mm dicken Plättchen weiter verarbeitet. Die Endfertigung erfolgte wiederum eigenhändig im Bereich des dort ansässigen Prototypenbaus.

**Probendicke:** 1,5 mm.

**Chemische Zusammensetzung:** (siehe Tabelle 17)

	Al [%]	Zn [%]	Mn [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Ni [%]	Andere je [%]	Mg [%]
<b>min</b>	8,3	0,35	-	-	-	-	-	-	
<b>max</b>	9,7	1,0	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,005	≤ 0,030	≤ 0,002	≤ 0,01	Rest
<b>ist</b>	9,53	0,50	-	-	-	0,001	-	-	89,97

Tabelle 17: chemische Zusammensetzung von AZ91 HP <sup>[5]</sup>

### 8.1.3 Stahlwerkstoff H260 PD + Z100MBO

Darunter ist ein phosphorlegierter Tiefziehstahl mit einer 0,2%-Dehngrenze von 260 – 320 MPa für großflächige Außenhautteile sowie Strukturteile mit geringer Umformbeanspruchung zu verstehen. Die erhöhten Festigkeitseigenschaften werden durch Feinkornbildung und Mischkristallverfestigung infolge des Zulegierens von Phosphor erreicht. Die Oberfläche ist feuerverzinkt (Z) mit ca. 100 g/m<sup>2</sup> (100 → 50 g/(m<sup>2</sup>-Seite) entsprechen einer Zinkschichtdicke von ≈ 7 µm), bestehend aus kleinen bzw. makroskopisch nicht erkennbaren Zinkblumen (M), verbessert durch Nachwalzen (B) und aus Schutzgründen leicht geölt (O) <sup>[34]</sup>.

**Blechdicke:** 1,25 mm.

**Lieferant:** Bereitgestellt durch Magna Steyr Fahrzeugtechnik & Co KG – Prototypenbau, A-8041 Graz-Thondorf.

**Probenfertigung:** Eigenhändig, in der oben genannten Abteilung.

**Chemische Zusammensetzung:** Wurde nicht analysiert, da hauptsächlich die Verzinkung für das Korrosionsverhalten ausschlaggebend ist.

### 8.1.4 Sonderwerkstoff CFK MSF

CFK bezeichnet einen Kohlefaser-Kunststoff-Verbundwerkstoff, in dessen Grundmaterial aus Kunststoff (= Matrix; meist aus Duromeren wie z.B. Epoxidharz) mehrere, unterschiedlich orientierte Lagen aus Kohlefasern (zum Teil auch Aramid- und Glasfasern) als Verstärkung eingebettet sind. Bei der Fertigung von CFK-Laminaten ist ein hoher Faservolumenanteil erwünscht, Verunreinigungen wie Luftbläschen oder Fremdpartikel sind zu vermeiden, da solche Fehlstellen die Festigkeitseigenschaften herabsetzen. Zugfestigkeit und Steifigkeit von CFK-Bauteilen sind wie bei allen Faserverbundwerkstoffen in Faserrichtung höher als in Querrichtung, weshalb die Fasermatten unterschiedlich orientiert werden. Die Modellierung des CFK-Schichtaufbaus erfolgt belastungsspezifisch anhand von Computerberechnungen

durch den Entwickler. Die gelieferte Spezifikation entspricht dem Aufbau nach MSF, wobei es sich um ein Nasslaminat in Autoklaventechnik mit einseitigem Moldface handelt.

**Laminatdicke:** 1,6 mm.

**Lieferant:** Carbo Tech Composites GmbH, A-5020 Salzburg.

**Zusammensetzung:** CFK nach MSF, genauere Details unterliegen der MSF-Geheimhaltung.

**Probenfertigung:** Erfolgte bereits beim Lieferanten, Endfertigung wiederum eigenhändig im MSF-Prototypenbau.

Abbildung 45 zeigt die jeweiligen Werkstoffproben samt individueller Probenkennzeichnung.



Abbildung 45: Probepfättchen der einzelnen Werkstoffe

## 8.2 Modellierung der Probenform

Die Modellierung der Probe erfordert zahlreiche Überlegungen und Definitionen. So sollte diese:

- einfach und kostengünstig herstellbar sein
- reproduzierbar und prüfgerecht sein
- „aussagekräftige“ Abmessungen besitzen, trotz der Einschränkungen bezüglich Prüfraumgröße und finanzieller Mittel
- die Fügestelle eines zusammengesetzten Karosserieaußenbauteils darstellen
- nur eine einfache KTL-Beschichtung aufweisen (mit vorhergehender Vorbehandlung), um eine kostengünstige Fahrzeugfertigung zu simulieren
- keine zusätzlichen Korrosionsschutzmaßnahmen wie Nahtversiegelung oder Klebefolie im Fügebereich besitzen, um wiederum eine kostenoptimierte Produktion zu studieren

- für unterschiedliche Fügemethoden anwendbar und vergleichbar sein
- einfach in den Beschichtungs- und Prüfprozess integrierbar sein
- mehrere Korrosionsarten gleichzeitig simulieren

Anhand dieser Aspekte wurden zwei verschiedene Probenformen erstellt, welche in Tabelle 18 ersichtlich sind.

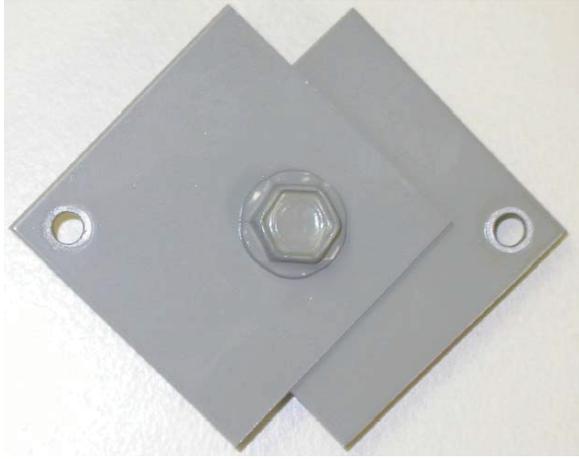
 <p style="text-align: center;">Variante „Schmetterling“</p>	 <p style="text-align: center;">Variante „Diamant“</p>
<p><b>Vorteile</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• einfaches Fertigen und Fügen der Probe (keine doppelte Lochüberlappung)</li> </ul>	<p><b>Vorteile</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• einfacher Einbau der Probe in die Beschichtungs- und Prüfeinheit (nur ein Montageloch vorhanden)</li> </ul>
<p><b>Nachteile</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeitsaufwand für Einbau in Beschichtungs- und Prüfeinheit höher (zwei separate Montagelöcher vorhanden)</li> <li>• frühzeitiges Versagen der Probe durch „Auseinanderbrechen“ möglich</li> </ul>	<p><b>Nachteile</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• genaues Fertigen und Fügen aufgrund doppelter Lochüberlappung notwendig</li> </ul>

Tabelle 18: Gegenüberstellung der einzelnen Probenvarianten

Um eine vollständige Gegenüberstellung beider Varianten zu ermöglichen und die Abscheidungscharakteristik der KTL-Beschichtung zu studieren, wurden mehrere Proben in ein speziell angefertigtes Trägersystem montiert (siehe Abbildung 46) und in der MSF X3-Lackierlinie beschichtet. Annahmen, dass bei Variante „Schmetterling“ durch das Zweilochsystem eine signifikant stärkere KTL-Abscheidung eintreten könnte, wurden anhand mehrfacher Schichtdickenmessungen mittels Leptoskop widerlegt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 19 ersichtlich.

Modell	Mittelwerte der Schichtdickenmessung [ $\mu\text{m}$ ]	
	Vorderseite	Rückseite
„Schmetterling“	24,63 <sup>1)</sup> / 17,63 <sup>2)</sup>	26,05 <sup>1)</sup> / 19,05 <sup>2)</sup>
„Diamant“	25,30 <sup>1)</sup> / 18,30 <sup>2)</sup>	25,63 <sup>1)</sup> / 18,63 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> abgeschiedene KTL-Schichtdicke + Verzinkung (100 g/m<sup>2</sup> Zink entsprechen ~ 7  $\mu\text{m}$ )  
<sup>2)</sup> reine KTL-Schichtdicke

Tabelle 19: Ergebnisse der Schichtdickenmessung



Abbildung 46: Probenträgersystem für den Beschichtungsvorgang

Anhand der vorliegenden Fakten aus Tabelle 18 und Tabelle 19 wurde Variante „Diamant“ als Probenform festgelegt, deren genaue Abmessungen aus Abbildung 47 zu entnehmen sind.

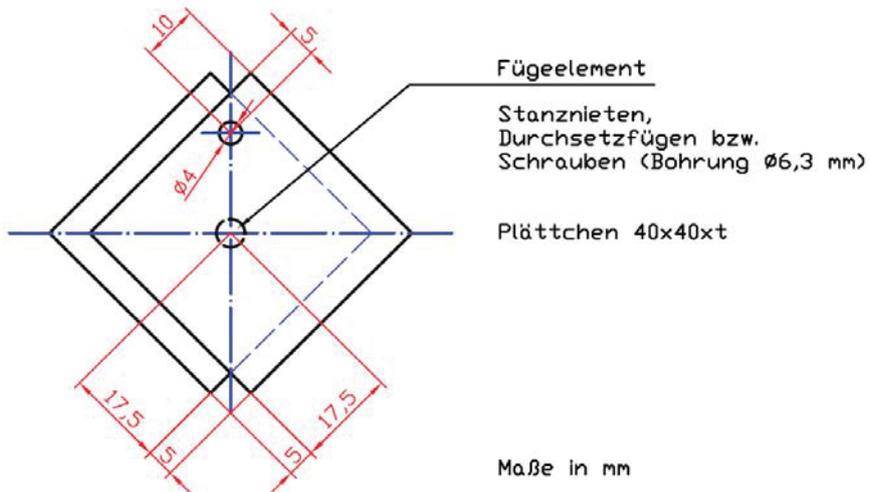


Abbildung 47: Abmessungen der Probe

### 8.3 Fügemethode der Proben

Um den Einflussfaktor des Fügeelements auf das Korrosionsverhalten von Mischbauweisen zu studieren, wurden anhand verschiedenster Kriterien vier unterschiedliche Fügeoptionen ausgewählt. Diese sind in der darunter liegenden Tabelle 20 mit den jeweiligen Spezifikationen und Parametern ersichtlich.

Aluminiumverschraubung	Stahlverschraubung	Durchsetzfügen	Stanznieten
Schraube: <ul style="list-style-type: none"> <li>M6x12, DIN 934, AW-6082</li> </ul>	Schraube: <ul style="list-style-type: none"> <li>M6x12-8.8, EN 1665</li> <li>Geomet 321-beschichtet (Zink-Aluminiumflake)</li> </ul>	Matrize: <ul style="list-style-type: none"> <li>SR 603 14</li> </ul>	Niet: <ul style="list-style-type: none"> <li>C 5x5 SKR H4</li> <li>Almac-beschichtet (Zink-Zinn-Aluminiumflake)</li> </ul>
Mutter: <ul style="list-style-type: none"> <li>M6x5, DIN 933, AW-5754</li> </ul>	Mutter: <ul style="list-style-type: none"> <li>M6x8, EN 1661</li> <li>Geomet 321-beschichtet (Zink-Aluminiumflake)</li> </ul>	Stempel: <ul style="list-style-type: none"> <li>SR 52 10</li> </ul>	Matrizenkontur: <ul style="list-style-type: none"> <li>FM 090 2015</li> </ul>
Unterlegscheibe: <ul style="list-style-type: none"> <li>6,5/12x1,5, DIN 125, AW-6101</li> </ul>		Abstreifer: <ul style="list-style-type: none"> <li>mechanisch Polymer</li> </ul>	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>stempelseitig: AW-6016 T4</li> <li>matrizenseitig: H260 PD + Z100 MBO</li> </ul>	
Anziehmoment: <ul style="list-style-type: none"> <li>4 Nm (drehmomentgesteuert)</li> </ul>	Anziehmoment: <ul style="list-style-type: none"> <li>10 Nm (drehmomentgesteuert)</li> </ul>	Fügwerkzeug: <ul style="list-style-type: none"> <li>Luftdruck Booster</li> <li>Böllhoff RIVCLINCH® P50 Pass</li> <li>C-Rahmen 2006</li> </ul> Setzkraft: <ul style="list-style-type: none"> <li>6 bar</li> </ul>	Nietsetzdruck: <ul style="list-style-type: none"> <li>230 bar</li> </ul> Niederhalterdruck: <ul style="list-style-type: none"> <li>60 bar</li> </ul> Fügwerkzeug: <ul style="list-style-type: none"> <li>Böllhoff RIVSET® MTF / MBF</li> </ul>
Lieferant: <ul style="list-style-type: none"> <li>Böllhoff GmbH, A-4061 Pasching</li> </ul>	Lieferant: <ul style="list-style-type: none"> <li>Knipping Verbindungstechnik GmbH, D-58566 Kierspe</li> </ul>	Lieferant: <ul style="list-style-type: none"> <li>Böllhoff Systemtechnik GmbH &amp; Co KG, D-33649 Bielefeld</li> </ul>	

Tabelle 20: Details zu den einzelnen Fügevarianten <sup>[31], [32]</sup>

## 8.4 Vortestserie

Um eine Prüfanordnung für die Haupttestserie festlegen bzw. den späteren Probenumfang zu minimieren, wurde zunächst eine Vortestserie erstellt, die in Tabelle 21 aufgelistet ist. Die Prüfung erfolgte über einen Zeitraum von 240 Stunden mittels Salzsprühtest nach DIN 50 021-SS (siehe Kapitel 6.1). Anhand der gewonnenen Daten war zu erkennen, dass bei Geomet-321-beschichteten Schraubensystemen eine Inkompatibilität der Magnesiumlegierung AZ91 HP vorliegt, was in Abbildung 48 in Form von hohen Abtragsraten ersichtlich ist. Dies widerspricht einigen wissenschaftlichen Angaben in der fachführenden Literatur, in denen das KTL-Verfahren einen weitreichenden Schutz bieten soll. Weiters ist eine ringförmige Ausbildung der (Kontakt-)Korrosionsfront an der Magnesiumprobe (Abbildung 48, rechts) erkennbar, was auf hohe Potenzialströme an der Oberfläche rückschließen lässt. Da die Magnesiumkorrosion mit einer starken pH-Wert-Änderung (bis pH 13) verbunden ist, werden unter Umständen auch Partnerwerkstoffe angegriffen, die ein edleres Potenzial aufweisen als das Magnesium selbst <sup>[5]</sup>.

Geomet 321 -Schraube	Plättchen 2			
	AW-6016 T4	AZ91 HP	CFK MSF	Z100MBO
Plättchen 1				
AW-6016 T4	X			
AZ91 HP	X	X		
CFK MSF	X	X		
Z100MBO	X	X	X	

Aluminium -Schraube	Plättchen 2			
	AW-6016 T4	AZ91 HP	CFK MSF	Z100MBO
Plättchen 1				
AW-6016 T4				
AZ91 HP		X		
CFK MSF		X	X	
Z100MBO		X	X	

Tabelle 21: Probenkombinationen der Vortestserie

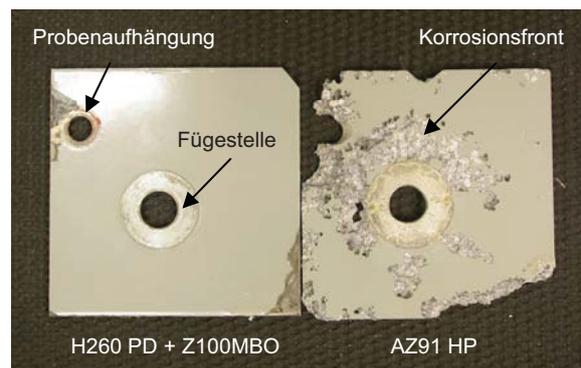


Abbildung 48: Korrodierte Probenkombination aus Stahl und Magnesium mit Geometverschraubung

## 8.5 Haupttestserie

Mit Hilfe der in der Vortestserie ermittelten Daten wurden die in Betracht gezogenen Werkstoff- und Fügekombinationen abgeändert bzw. erweitert und sämtliche Magnesium-Geomet 321-Kombinationen aus dem Prüfprogramm ausgeschlossen. Die gesamte Haupttestserie umfasst 13 verschiedene Werkstoff- und Fügekombinationen (siehe Tabelle 22), die nun dem Salzsprühtest (120, 240, 504, 744 Stunden) und dem VDA-Test (3, 5, 10 Zyklen) unterzogen werden. Um die Streuung der Messergebnisse zu minimieren, sind je Prüfschritt und Materialkombination 3 Probenentnahmen notwendig, wodurch sich eine Gesamtprobenzahl von 273 Stück ergibt. Die Vorbehandlung und Beschichtung der

einzelnen Proben erfolgt wiederum mittels des speziellen Trägersystems in der MSF-X3-Lackiererei, die technischen Informationen bezüglich Badführung- und Zusammensetzung sind den entsprechenden Arbeitsanweisungen (MSF AA-QW-127/6 bzw. MSF AA-QW-128/11) zu entnehmen. Bereiche unvollständiger Beschichtung, d.h. jene wo die Probe während des KTL-Verfahrens kontaktiert wird, werden mit einem Korrosionsschutzlack versiegelt, um eine Verfälschung des Korrosionsverlaufes und der Messergebnisse zu verhindern. Kunststoffrohre und -schnüre dienen zur Befestigung der Proben in der Prüfkammer (siehe Abbildung 49 und Abbildung 50) [30].

Stanznieten	Plättchen 2			
	AW-6016 T4	AZ91 HP	CFK MSF	Z100MBO
Plättchen 1				
AW-6016 T4				
AZ91 HP				
CFK MSF				
Z100MBO	X			

Durchsetz-fügen	Plättchen 2			
	AW-6016 T4	AZ91 HP	CFK MSF	Z100MBO
Plättchen 1				
AW-6016 T4				
AZ91 HP				
CFK MSF				
Z100MBO	X			

Geomet 321-Schraube	Plättchen 2			
	AW-6016 T4	AZ91 HP	CFK MSF	Z100MBO
Plättchen 1				
AW-6016 T4	X			
AZ91 HP				
CFK MSF	X			
Z100MBO	X		X	

Aluminium-Schraube	Plättchen 2			
	AW-6016 T4	AZ91 HP	CFK MSF	Z100MBO
Plättchen 1				
AW-6016 T4				
AZ91 HP	X	X		
CFK MSF	X	X		
Z100MBO	X	X	X	

Tabelle 22: Fügekombinationen der Haupttestserie



Abbildung 49: Prüfkammer



Abbildung 50: Korrodierte Proben

## 8.6 Auswertung

Nach der Entnahme der Proben aus der Prüfkammer wurden die Fügestellen geöffnet und die einzelnen Komponenten von eventuell vorhandenen Korrosionsprodukten befreit. Die Reinigung erfolgte mechanisch durch Bürsten unter fließendem Wasser bzw. mechanisch-chemisch durch Zuhilfenahme eines Ultraschallreinigungsgerätes mit einer ca. 1-%igen Essigsäurelösung (pH-Wert ~ 4) als Reinigungsmittel. Die Dauer der Reinigung richtete sich

nach dem jeweiligen Korrosionsgrad. Anschließend wurden die Proben getrocknet und in einem Exsikkator zwischengelagert.

Die Auswertung der Probenoberfläche erfolgte auf optischem Wege mit Hilfe eines Rastersystems (siehe Abbildung 51), unterstützt durch die Bildanalysesoftware CLEMEX Vision Pro®. Da mit diesen Methoden nur der Bedeckungsgrad an der Oberfläche erfasst wird, ist eine zusätzliche Klassifizierung bezüglich der Korrosionstiefe notwendig. Zur Bestimmung des Korrosionsgrades an Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben wurden deren geometrische Flächenelemente berechnet und der Anteil der korrodierten Oberfläche interpoliert. Die Möglichkeit der gravimetrischen Auswertung besteht nur bei den Magnesiumproben, da alle anderen Werkstoffe keine bzw. zu geringe Abtragsraten für eine aussagekräftige Messung aufweisen. Die Messung der Lackunterwanderungslänge liefert zusätzliche Ergebnisse bezüglich der Lackhaftung und -beständigkeit am jeweiligen Untergrund. Es ist darauf hinzuweisen, dass die verwendeten Analyseverfahren eine gewisse Messungenauigkeit aufweisen, weshalb die ermittelten Daten nicht als Absolutwerte anzusehen sind<sup>[18]</sup>.

Um das optische Korrosionsverhalten der Probe detaillierter zu illustrieren, wird die Oberfläche in mehrere Regionen unterteilt und bewertet. Das Einteilungsschema ist in Abbildung 52 ersichtlich. Anhand dieser Daten sind informative Rückschlüsse für die Bauteilgestaltung und die Fahrzeugproduktion möglich.

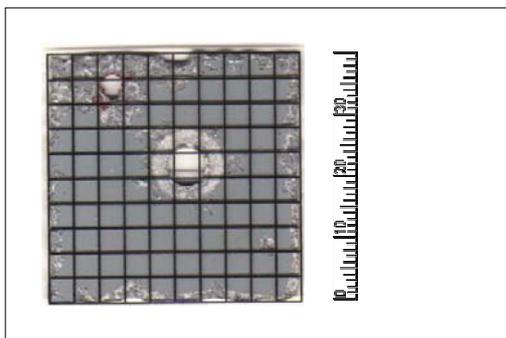


Abbildung 51: Handschablone zur Bestimmung des Korrosionsgrades (Maße in mm)

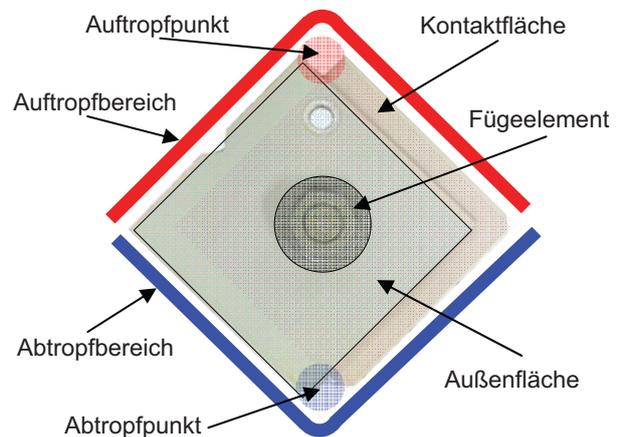
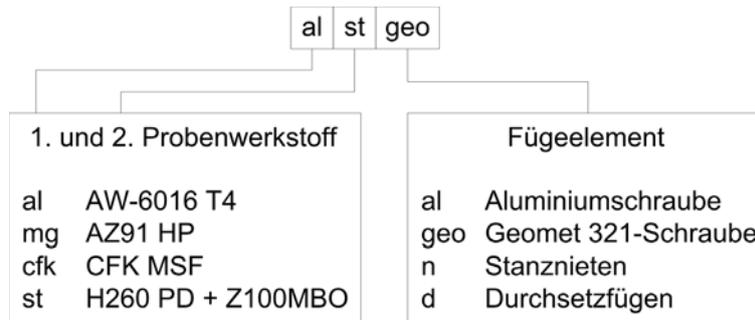


Abbildung 52: Unterteilung der Probe in einzelne Regionen

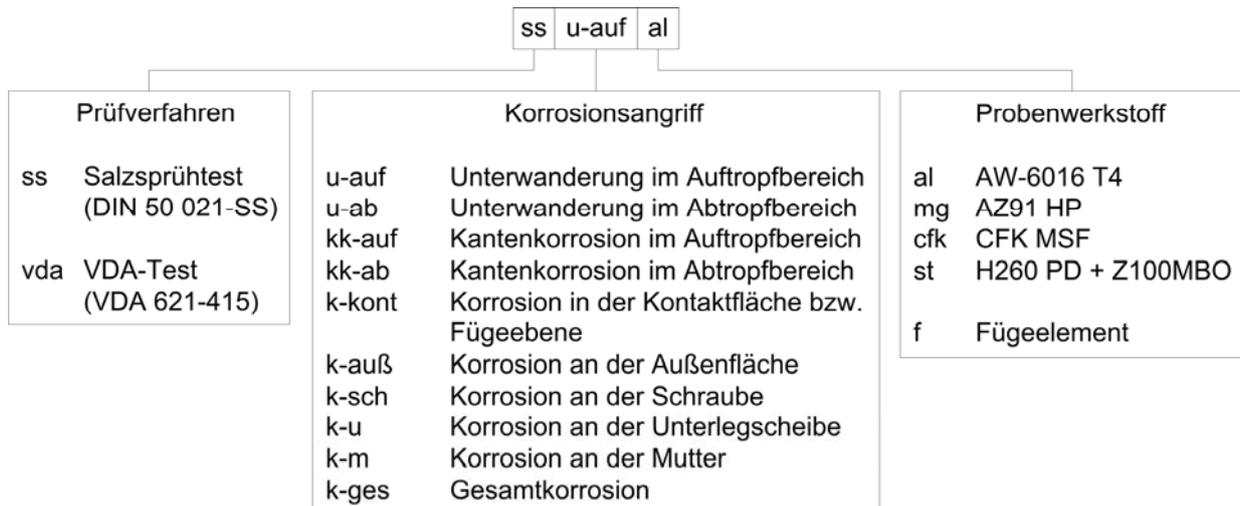
## 8.7 Nomenklatur

Zwecks einfacher Handhabung bzw. Übersicht wurde eine Kurzschreibweise für die Werkstoffe, die Verbindungselemente sowie die Prüfverfahren eingeführt. Diese lautet wie folgt:

### Probenkombination



### Diagrammbeschriftung



### Klassifizierung der Korrosionstiefe

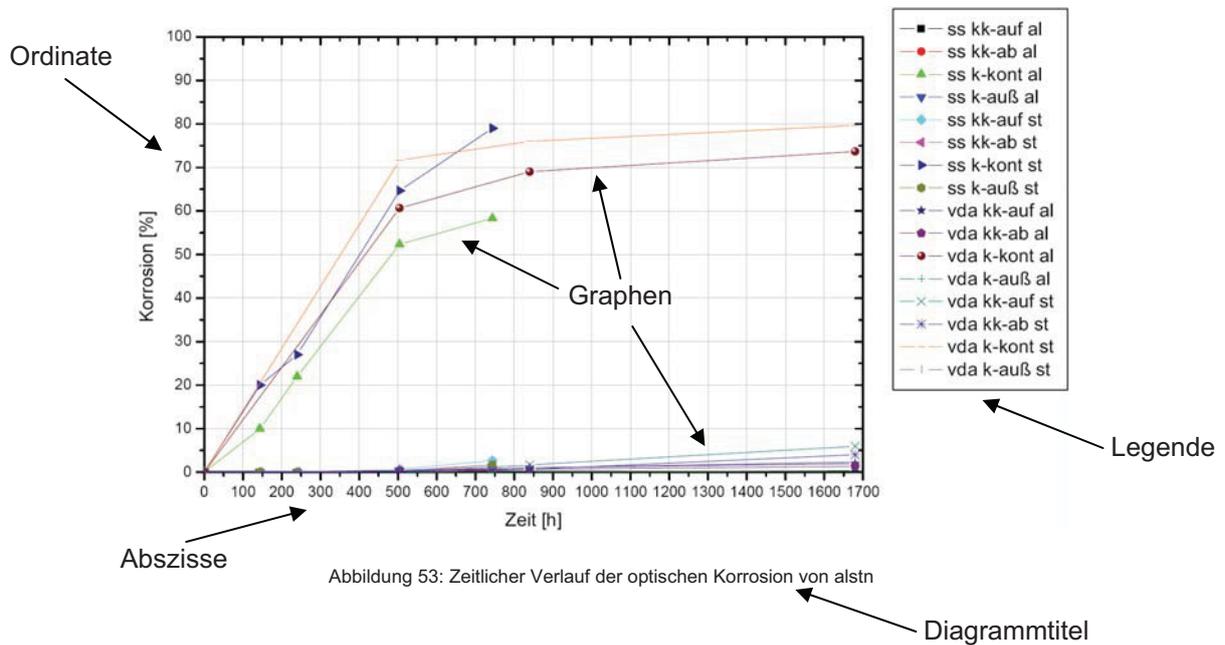
Stufe 0: kein Korrosionsangriff ersichtlich

Stufe 1: die Korrosion erfolgt oberflächlich bei geringer Abtragsmenge und -tiefe (gering)

Stufe 2: die Korrosion erfolgt bei moderater Abtragsmenge und -tiefe (mittel)

Stufe 3: die Korrosion erfolgt bei hoher Abtragsmenge und -tiefe (hoch)

## Diagrammbeschreibung



**Ordinate (y-Achse):** gibt die Messdaten (Mittelwert aus jeweils 3 Proben) der optischen Korrosion an der Probenoberfläche in [%] bzw. die Unterwanderung der KTL-Beschichtung in [mm] wieder.

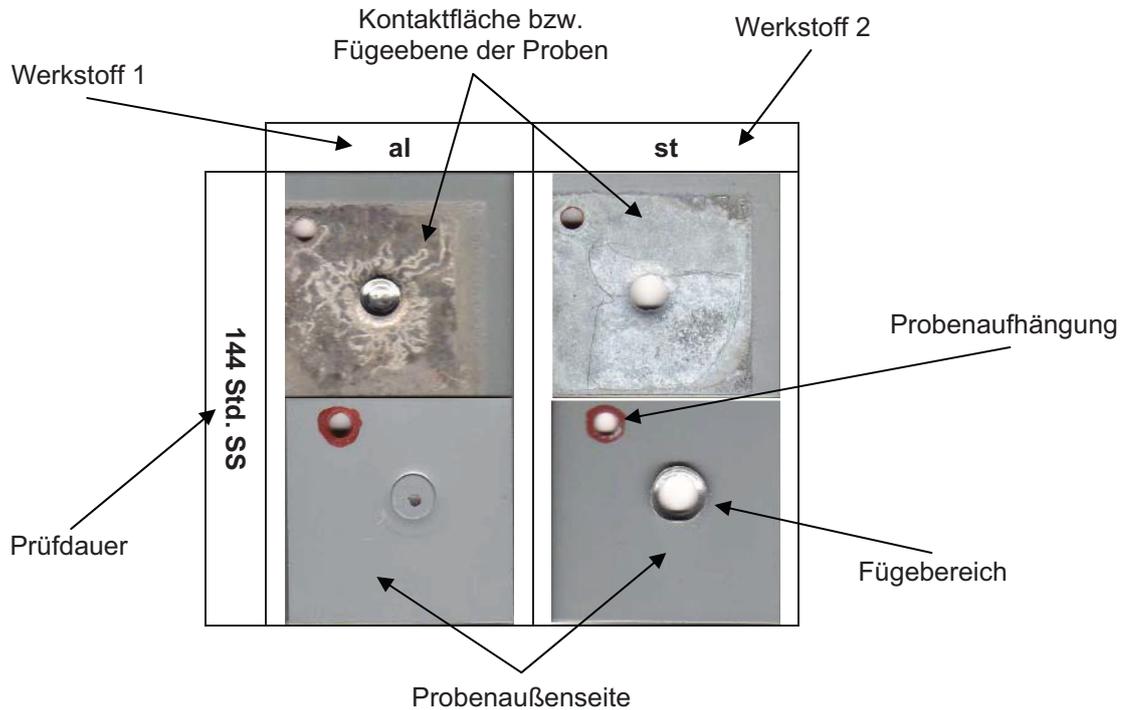
**Abszisse (x-Achse):** auf dieser sind die Zeitpunkte der jeweiligen Messungen aufgetragen. Bei der VDA-Prüfserie wurde die Zyklanzahl bzw. -dauer in die entsprechende Gesamtprüfzeit umgerechnet (3, 5, 10 Zyklen → 504, 840, 1680 Stunden).

**Diagrammtitel:** bezeichnet das Diagramm hinsichtlich Auswertungsmethode und Werkstoffkombination.

**Graphen:** diese beschreiben den zeitlichen Verlauf der optischen Korrosion an der Oberfläche bzw. die Unterwanderung der KTL-Beschichtung. Bei starker Überlagerung einzelner Graphen erfolgt eine Aufteilung der Prüfserie in mehrere Diagramme. Bereiche niedriger Messwerte werden in einem eigenen Diagramm vergrößert dargestellt.

**Legende:** anhand der Legende ist die jeweilige Graphenbezeichnung ersichtlich.

## Beschreibung der fotografischen Zusammenstellung



## Beschreibung der Gegenüberstellung

Die Gegenüberstellung Salzsprühtest – VDA-Prüfung in Kapitel 10 beinhaltet die wichtigsten Messdaten und ermöglicht anhand eines Bewertungsschemas den einfachen Vergleich beider Prüfserien. Hierfür wurde die Gesamtkorrosion (in %) der jeweiligen Probenkomponente berechnet und mit dem zugehörigen Gewichtungsfaktor  $K$  für die Korrosionstiefe  $KT$  multipliziert. Für Verbindungselemente gilt einheitlich die Korrosionsstufe 1. Die Gesamtpunktezahl ergibt sich aus den beiden Probenplättchen und dem Verbindungselement im Verhältnis 1:1:1 (eine oberflächenbezogene Bewertung wäre hier nicht richtig, da ein kleines Verbindungselement für den Probenverbund gleich wichtig ist wie ein größeres). Die Vergabe der Bewertungssymbole erfolgt nach dem Schulnotensystem, wobei 50 % der Gesamtpunktezahl für eine positive Benotung erforderlich sind. Bei CFK-Verbindungen wird nur der metallische Anteil der Probe beurteilt, weshalb ein gesonderter Punkteschlüssel notwendig ist.

In Tabelle 23 und Tabelle 24 sind die spezifischen Gewichtungsfaktoren bzw. der Notenschlüssel für die Berechnung der Bewertung ersichtlich.

<b>Korrosionstiefe KT</b>	<b>0</b>	<b>0 – 1</b>	<b>1</b>	<b>1 – 2</b>	<b>2</b>	<b>2 – 3</b>	<b>3</b>
<b>Gewichtungsfaktor K</b>	0	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2

Tabelle 23: Umrechnungstabelle Korrosionstiefe – Gewichtungsfaktor

<b>Note</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Bewertungssymbol</b>	+++	++	+	o	-
<b>allgemeiner Punkteschlüssel</b>	> 0	> 43	> 85	> 128	> 170
<b>CFK-Punkteschlüssel</b>	> 0	> 28	> 55	> 83	> 110

Tabelle 24: Bewertungs- und Punkteschlüssel der Gegenüberstellung SS – VDA

## 9 Ergebnisse

### 9.1 Aluminium-Stahl-Stanznieten (alstn)

#### Salzsprühtest

Bereits nach 144 Stunden waren die ersten geringen Korrosionserscheinungen aufgrund Kontakt- und Spaltkorrosion am Stahlblech (Angriff der Zinkschicht) sowie am Aluminiumplättchen (fadenförmige Korrosionsgräben) im Bereich des Fügeelements ersichtlich. Verfärbungen der Oberfläche deuten auf ein weiteres Voranschreiten der Korrosion hin. Am Stahlblech ist im Randgebiet der Kontaktfläche (Übergang KTL-Schicht – Verzinkung) ein Ablösen der Zinkschicht erkennbar, dies führt aber zu keiner Rotrostbildung. Im Zeitraum von 240 bis 504 Stunden breitet sich die Korrosionsfront beinahe über die gesamte Kontaktfläche aus. Die Aluminiumoberfläche ist mit einer dünnen, nicht flächendeckenden Korrosionsschicht überzogen, partiell sind Mulden- bzw. Lochfraßerscheinungen aufgetreten. Die Verzinkung des Stahlbleches ist zu diesem Zeitpunkt weiträumig unter Weißrostbildung korrodiert bzw. partiell nicht mehr vorhanden – eine Rotrostbildung tritt jedoch nicht ein. Nach 744 Stunden wird das Maximum der Korrosionserscheinungen an den Probenkomponenten erreicht. An den Stahlplättchen sind aufgrund der fehlenden Schutzwirkung des Zinks regional Rotrostflecken zu beobachten, an der Außenseite eindeutige Lackunterwanderungen bzw. Blasenbildungen vorhanden. Am Fügeelement selbst ist im gesamten Prüfzeitraum keine Korrosionserscheinung wahrnehmbar. Allgemein betrachtet werden die Bereiche mit KTL-Beschichtung kaum korrosiv belastet, was auf eine optimale Schutzwirkung dieses Beschichtungsverfahrens für Aluminium- und Stahlteile hindeutet. Die im Vergleich zu den verschraubten Proben relativ hohe korrosive Belastung im Kontaktbereich ist auf eine optimale Spaltausbildung und Kapillarwirkung rückzuführen (siehe Kapitel 4.4).

#### VDA-Test

Bezüglich der Korrosionserscheinungen verläuft der VDA-Test ähnlich wie der Salzsprühtest, wobei beim Ersteren das Ausmaß der Oberflächenkorrosion im zeitlichen Verlauf etwas höher liegt und die Weißrostbildung geringfügig stärker ausgeprägt ist. Die Erscheinungen der Unterwanderung sind im Salzsprühtest nur unwesentlich stärker ausgebildet als die im VDA-Test.

Die zeitlichen Verläufe der Korrosion und der Lackunterwanderung beider Tests sind in Abbildung 53 bis Abbildung 56 wiedergeben. Eine chronologische fotografische Zusammenstellung der korrodierten Proben in Abbildung 57 soll einen optischen Eindruck des Korrosionsverlaufes vermitteln.

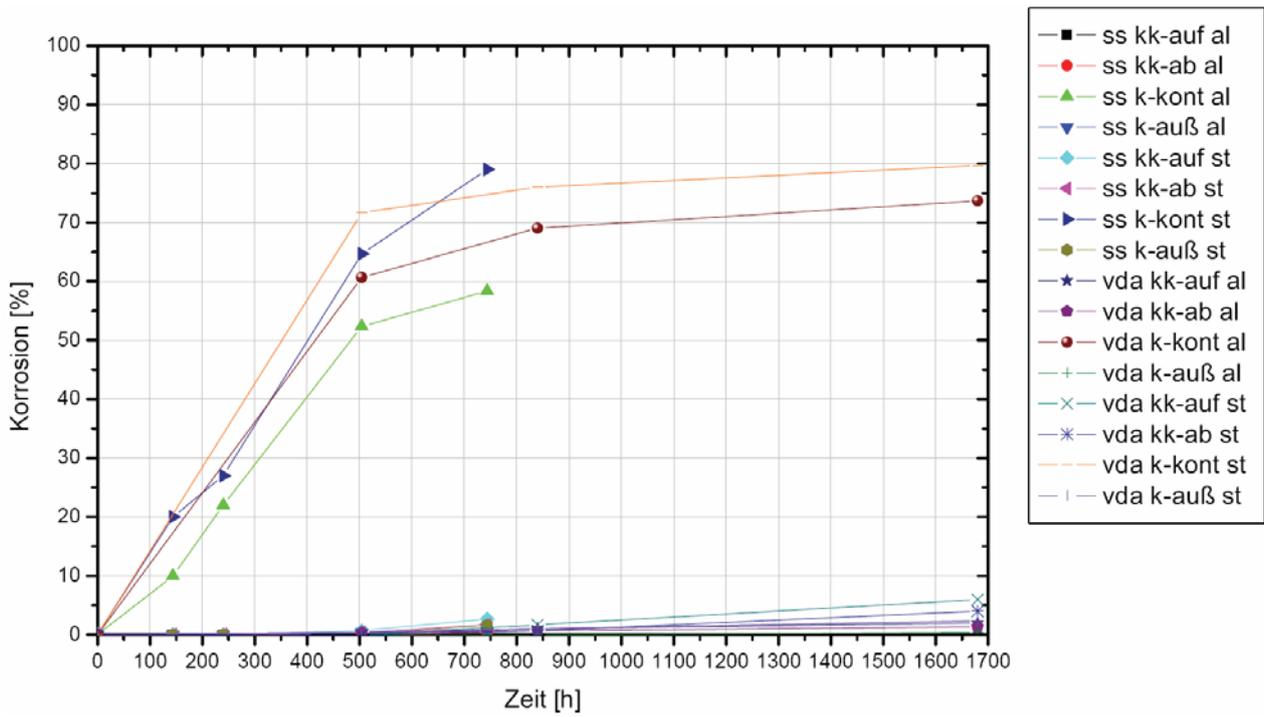


Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstn

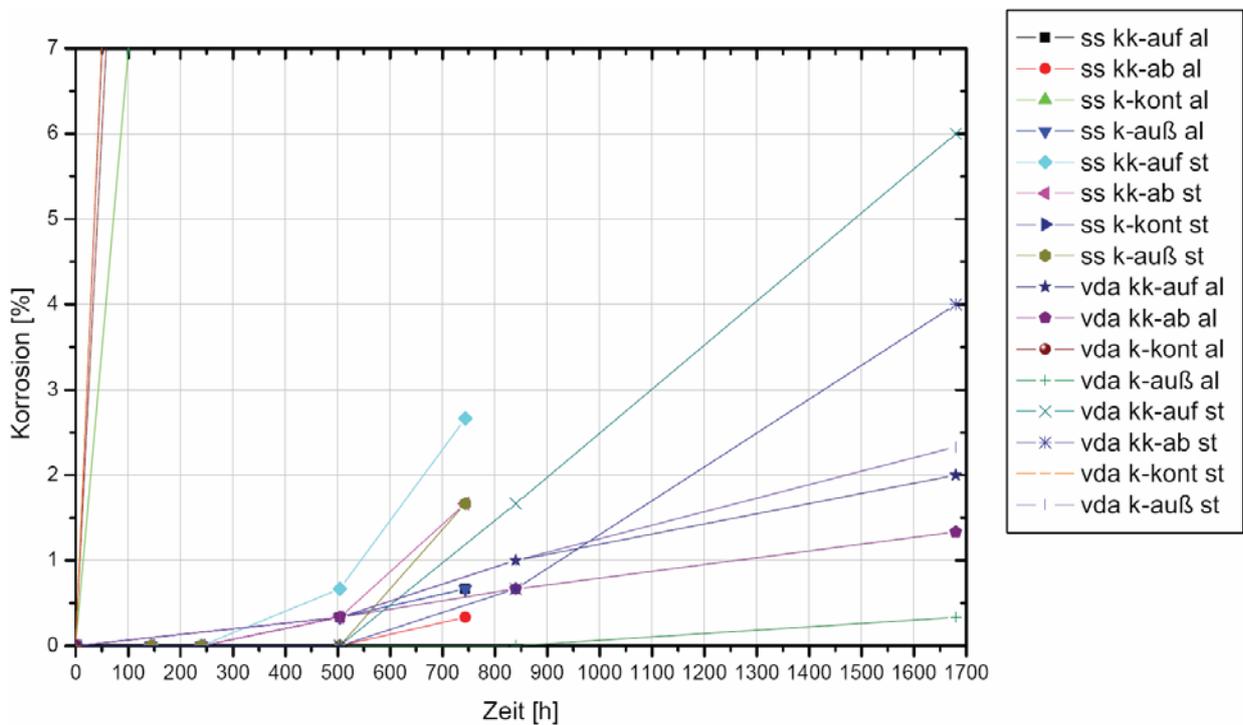


Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstn (Vergrößerung)

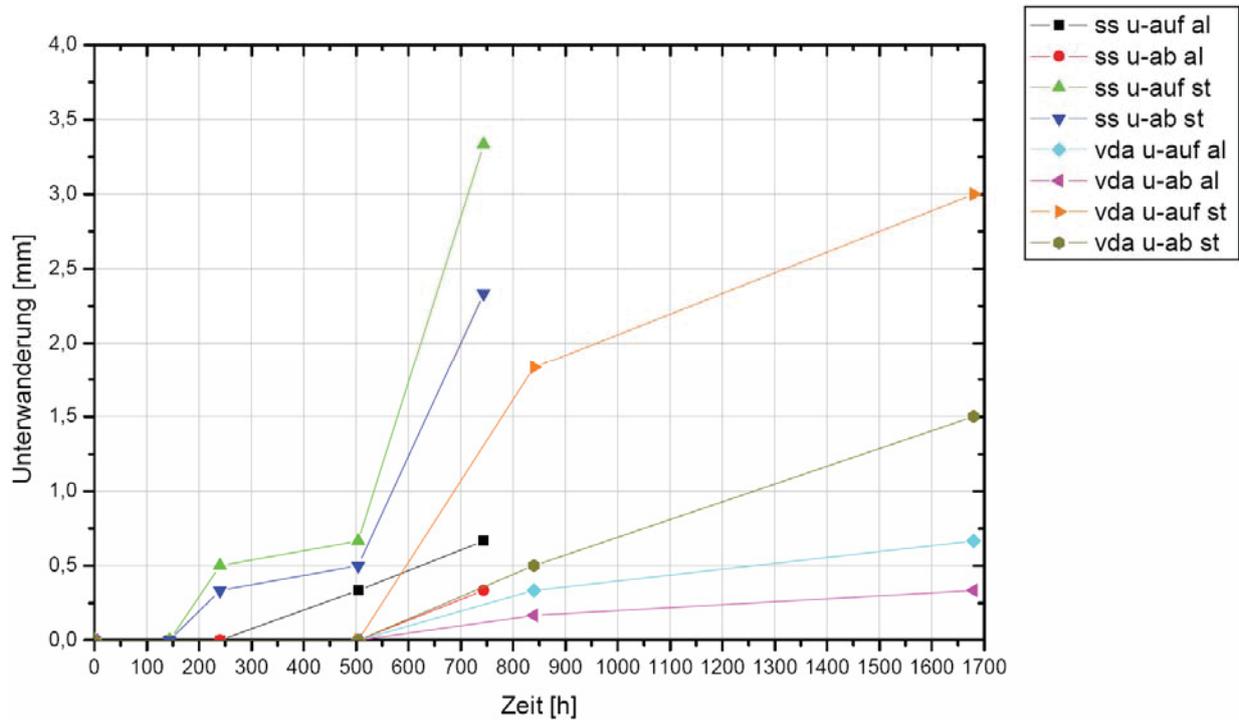


Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstn

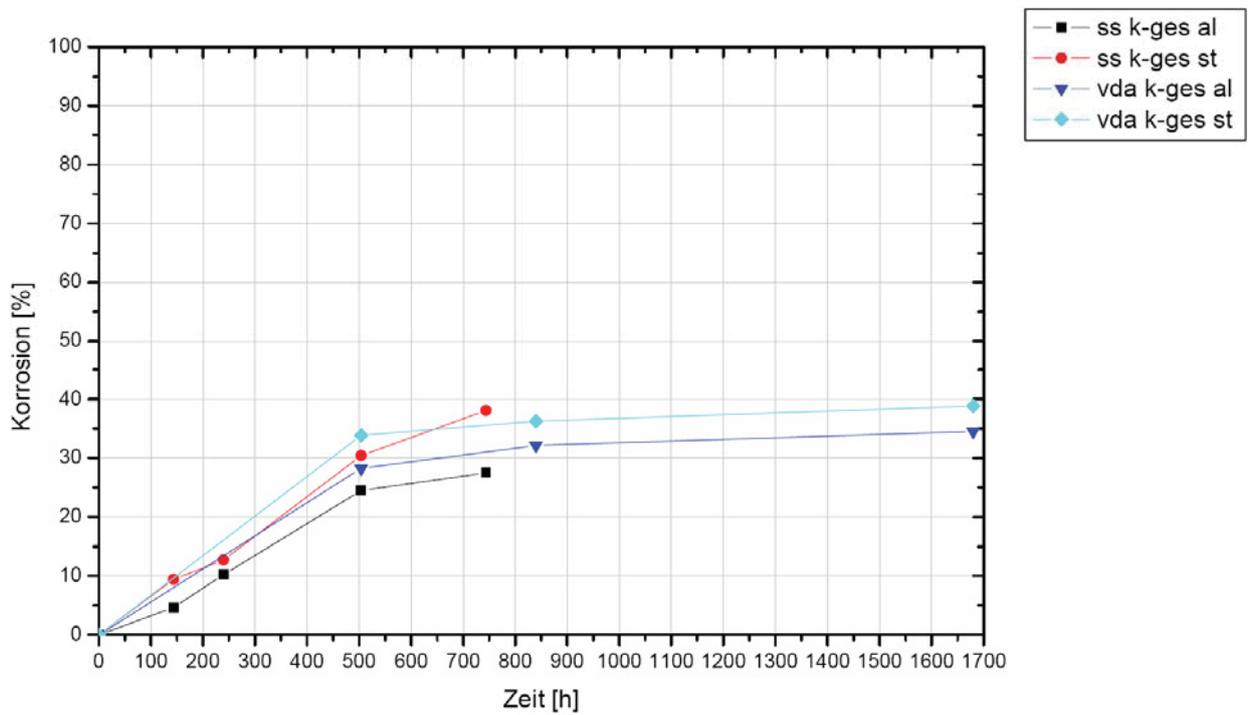


Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstn

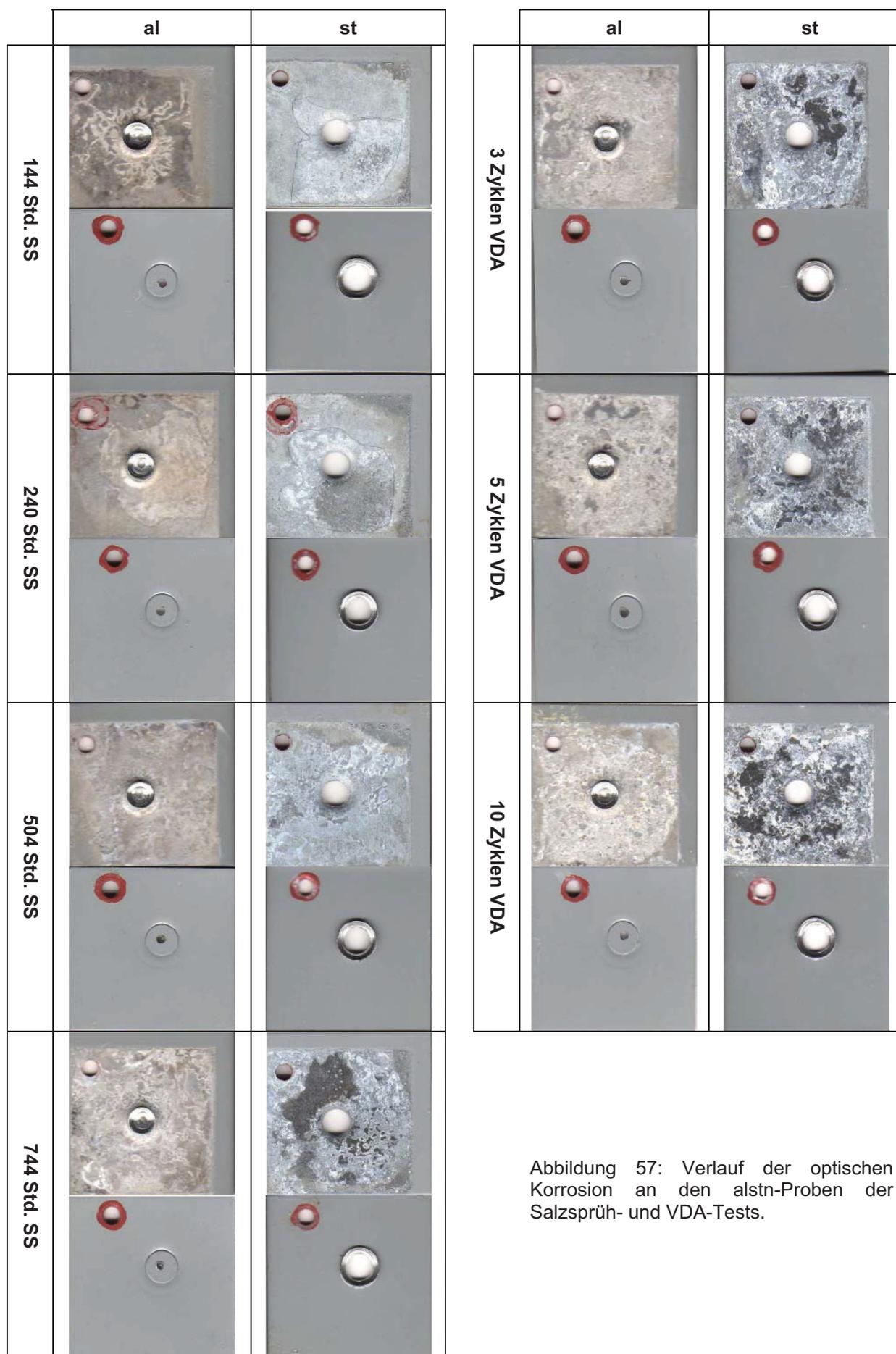


Abbildung 57: Verlauf der optischen Korrosion an den alstn-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

---

## 9.2 Aluminium-Stahl-Durchsetzfügen (alstd)

### Salzsprühtest

Die Graphen der Proben weisen anfangs eine höhere Korrosionswachstumsrate auf als die der alstn-Testserie, pendeln sich aber im Zeitraum von 240 bis 504 Stunden auf etwa die gleichen Werte hinsichtlich der Kontaktkorrosion ein. Bezüglich der Korrosionserscheinungen treten nur geringe Unterschiede in den beiden Testserien auf, woraus zu schließen ist, dass die Fügemethoden Stanznieten und Durchsetzfügen bei dieser Werkstoffkombination Aluminium-Stahl korrosionstechnisch (aber nicht festigkeitstechnisch) gleichsetzbar sind. Bestehende und mögliche Differenzen im Erscheinungsbild der Korrosion können möglicherweise auf eine unterschiedliche Spaltausbildung zwischen den Probelplättchen zurückgeführt werden, welche in Abhängigkeit zur Werkzeugform und -kraft steht. Ebenso ist im Unterwanderungsverhalten kaum ein Unterschied zu bemerken.

### VDA-Test

Hinsichtlich des Korrosionsverlaufes gibt es nur geringe Abweichungen im Vergleich zu den ermittelten Daten aus dem Salzsprühtest. Die Oberfläche des Aluminiums weist ebenfalls filiformartige Korrosionsgräben neben flächigen-, muldenförmigen- und lochfraßähnlichen Korrosionserscheinungen auf, deren Anteil mit zunehmender Prüfzeit ansteigt. Beim Stahlblech ist wiederum eine höhere Weißrostbildung im Vergleich zu den Salzsprühproben zu bemerken. Die Bewertung der optischen Korrosion erfolgt aus technischen Gründen nur flächenbezogen und nicht tiefenbezogen, weshalb dieser Punkt eigens zu klassifizieren ist. Der Summenwert der VDA-Lackunterwanderung liegt etwas höher als der des Salzsprühtests. Wiederum ist ein stärkerer Korrosionsangriff im Auftropfbereich als in der Abtropfzone zu erkennen.

Die beschriebenen Erkenntnisse aus den Prüfungen sind mit Hilfe der ermittelten Korrosionsverläufe in Abbildung 58 bis Abbildung 61 nachvollziehbar. Eine fotografische Zusammenstellung der Proben in Abbildung 62 soll das Korrosionsverhalten vermitteln.

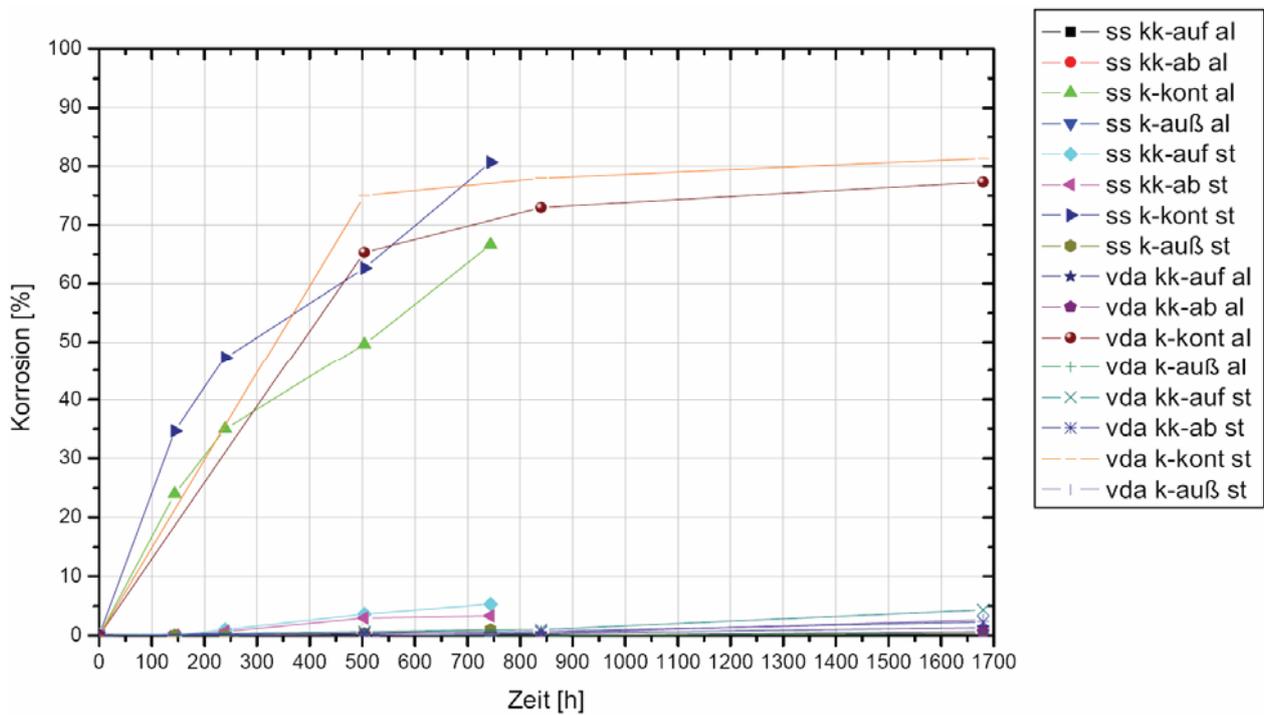


Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstd

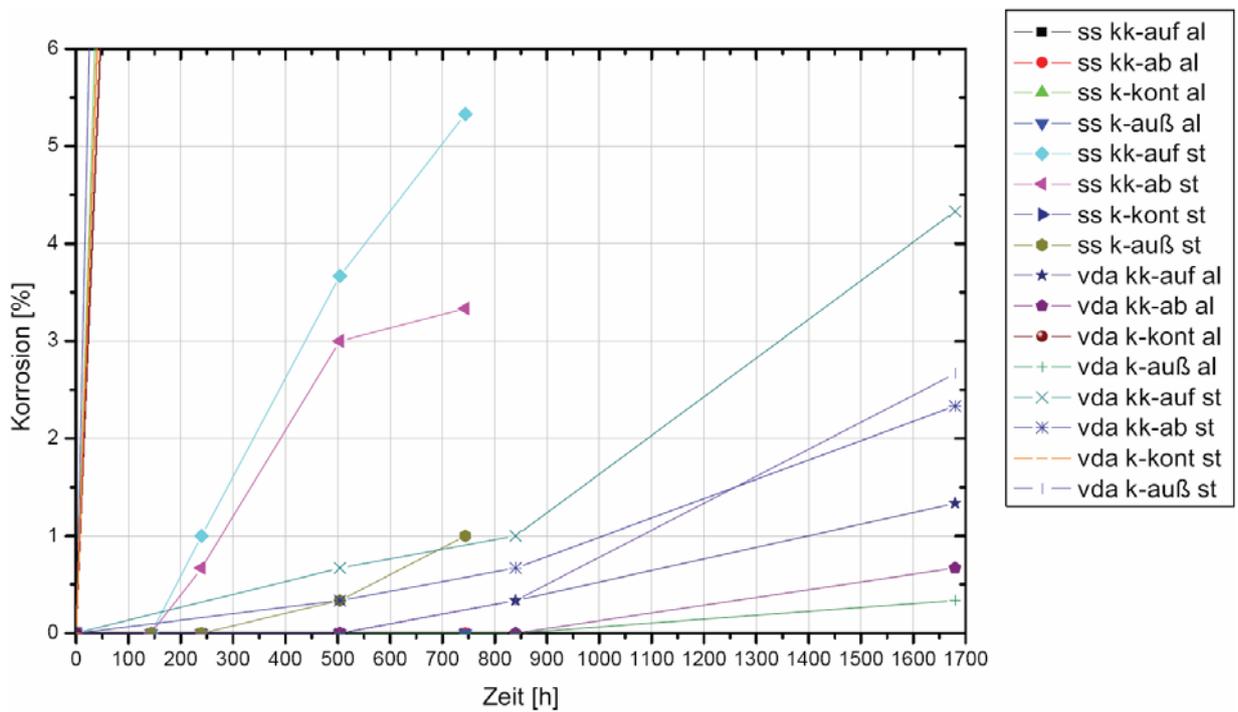


Abbildung 59: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstd (Vergrößerung)

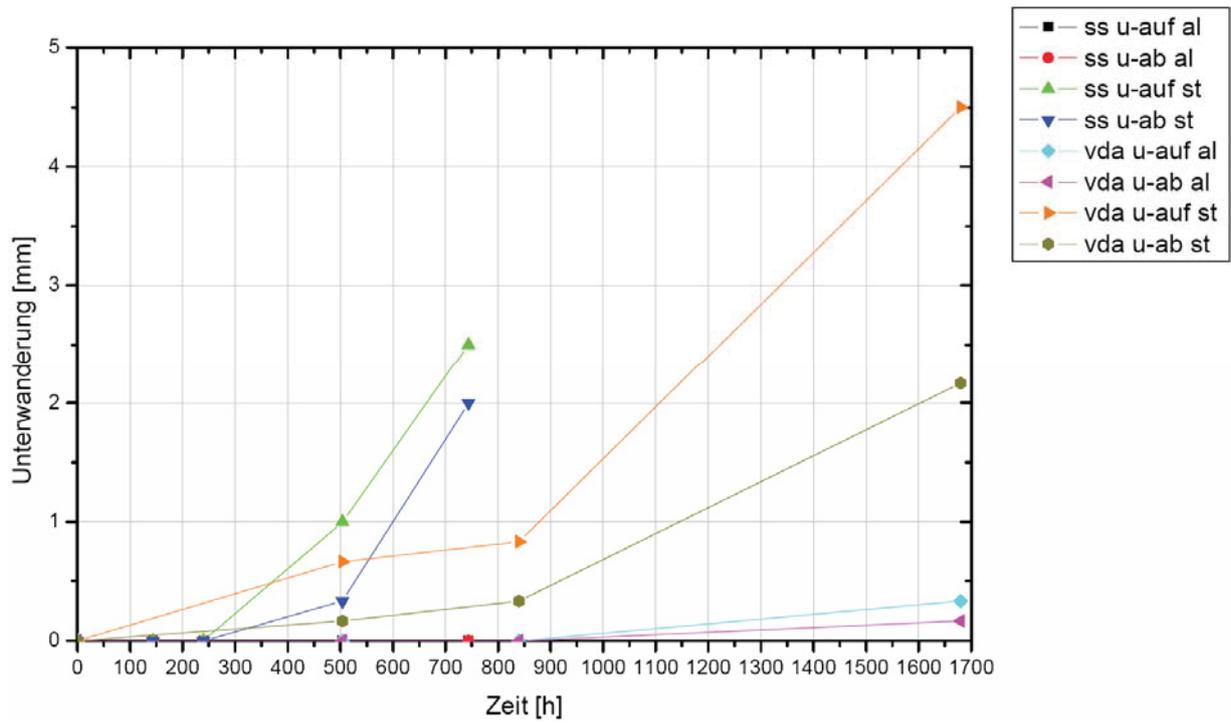


Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstd

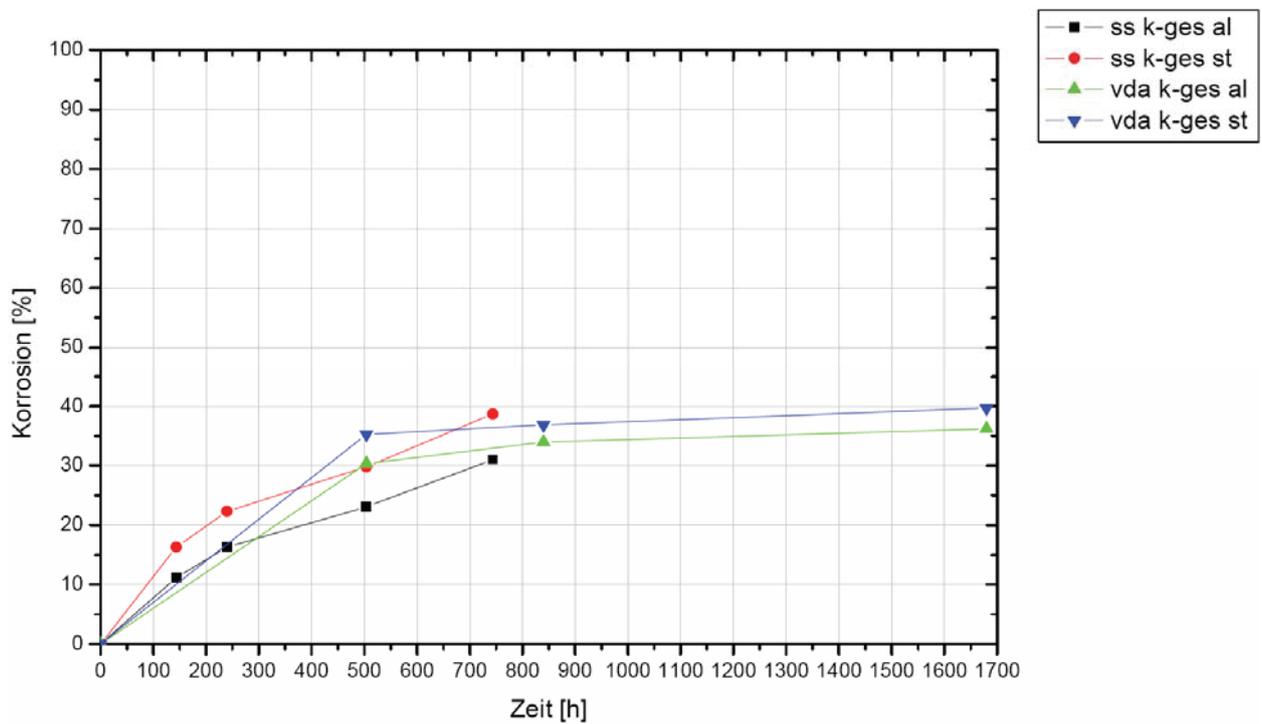


Abbildung 61: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstd

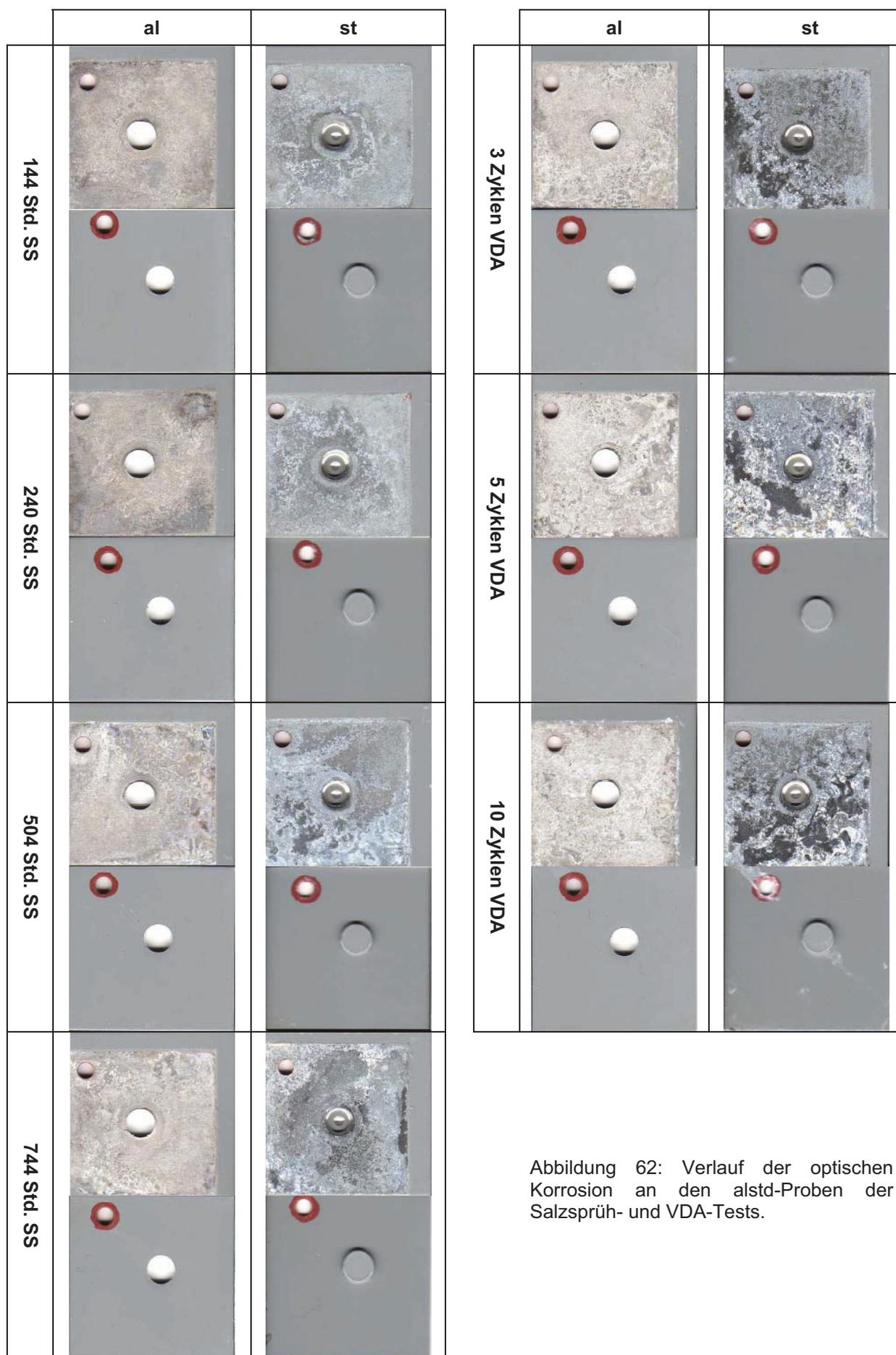


Abbildung 62: Verlauf der optischen Korrosion an den alstd-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

## 9.3 Aluminium-Aluminium-Geomet 321-Schraube (alalgeo)

### Salzsprühtest

Die ersten Korrosionserscheinungen am Aluminium treten nach 120 Stunden in Form von Verfärbungen und Flecken an der Kontaktoberfläche auf. Im Vergleich zu anderen Probenkombination sind diese jedoch deutlich geringer ausgeprägt. Auffällig erscheint die kreisrunde, korrosionsfreie Zone um das Bohrloch des Fügeelementes, die dem Aufpressbereich der Verschraubung entspricht. Die hohen Presskräfte der Schraube hindern den Elektrolyten an einem weiteren Vordringen in den Probenspalt. Zu diesem Zeitpunkt ist kein Korrosionsangriff an der Schraube bzw. Mutter erkennbar. Im Zeitraum zwischen 240 und 504 Stunden der Testserie weitet sich das Korrosionsgebiet nahezu konzentrisch vom Mittelpunkt ausgehend aus und erreicht nach 720 Stunden Prüfzeit seinen maximalen Bedeckungsgrad. Im Vergleich zu den alstn- und alstd-Proben existieren keine Korrosionsgräben bzw. -mulden oder Lochfraßstellen, der Tiefenangriff ist ebenfalls geringer als bei allen anderen Werkstoffverbunden. Die zuvor beschriebene, korrosionsfreie Kernzone bleibt bis zum Ende bestehen. Die durch die KTL-Beschichtung geschützten Oberflächenbereiche unterliegen kaum einer korrosiven Belastung, was sich in der äußerst geringen Oberflächen- und Kantenkorrosion sowie in der geringen Unterwanderungstiefe zeigt. Auch die KTL-beschichteten Geometschrauben weisen kaum Korrosionserscheinungen auf. Angegriffene Bereiche wären auf Beschichtungsfehler (unvollständige Abscheidung, Schmutzpartikel, etc.) während des KTL-Prozesses zurückzuführen.

### VDA-Test

Die ermittelten Daten aus dem VDA-Test liegen während der Testreihe knapp unterhalb der Salzsprühtest-Linie und erreichen am Ende der Prüfung etwa dieselben Kontaktkorrosionsraten wie die Proben des Salzsprühtests. Die Korrosionserscheinungen sowie deren Verlauf gleichen dem Salzsprühtest, die korrosionsfreie Zone im Schraubbereich bleibt ebenfalls bis zum Ende des gesamten Prüfablaufes beständig. KTL-beschichtete Bereiche werden wiederum hervorragend gegen einen korrosiven Angriff geschützt.

Die Graphen der einzelnen Korrosionsverläufe sind wiederum in der nachfolgenden Abbildung 63 bis Abbildung 65 dargestellt, Probenfotos in Abbildung 66 vermitteln optisch den Korrosionsverlauf (da es sich hier um eine gleichartige Verbindung aus Aluminium-Aluminium handelt, wird auf die Darstellung des zweiten Probenplättchens verzichtet).

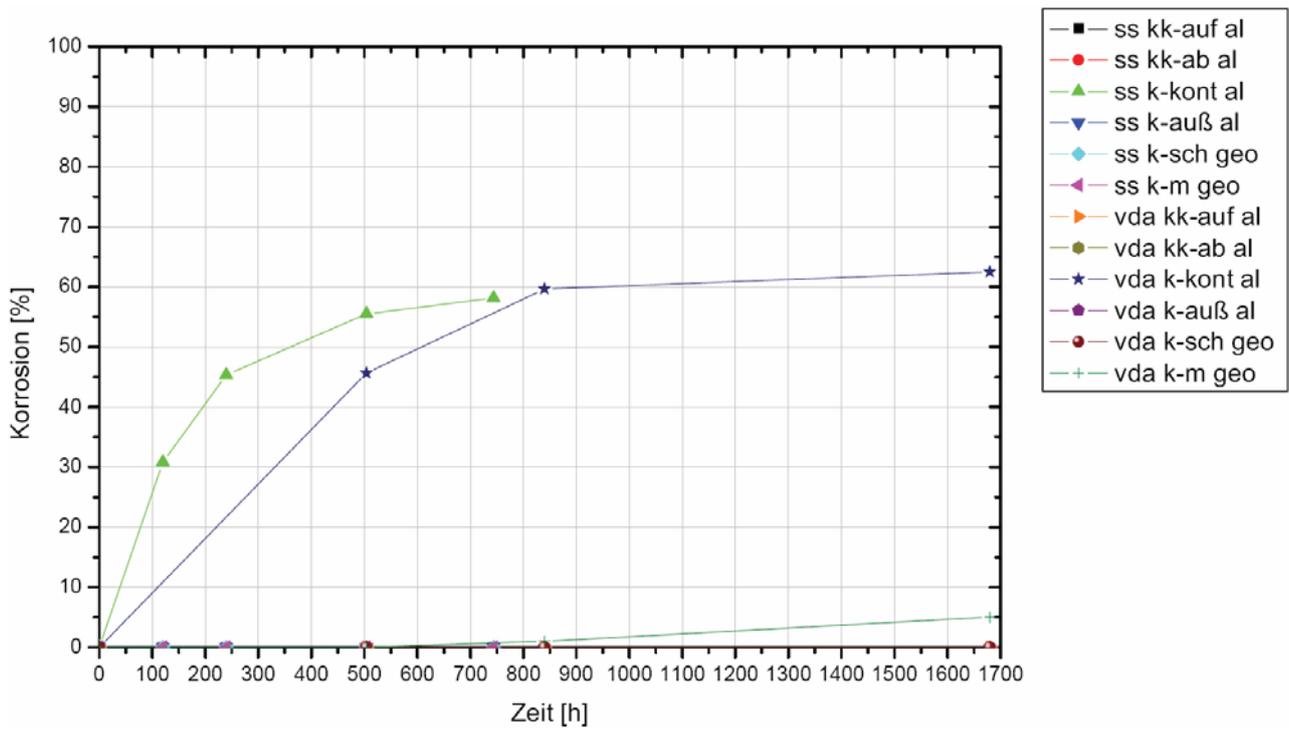


Abbildung 63: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alalgeo

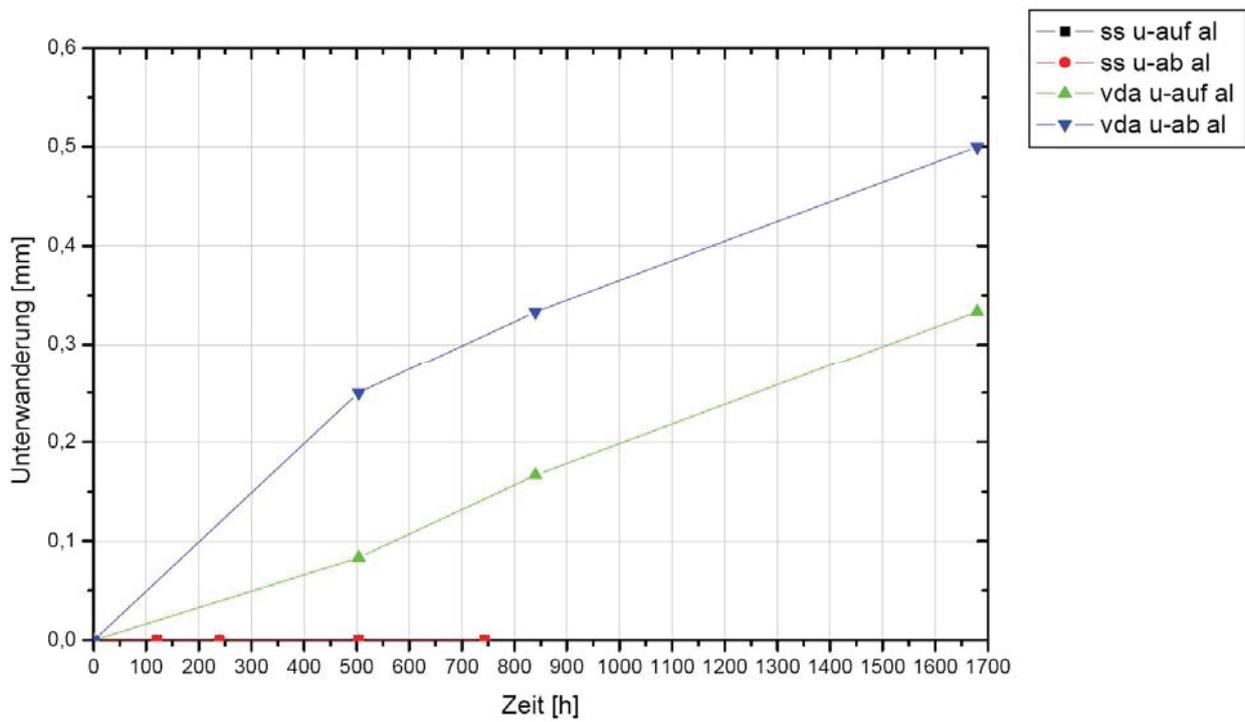


Abbildung 64: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alalgeo

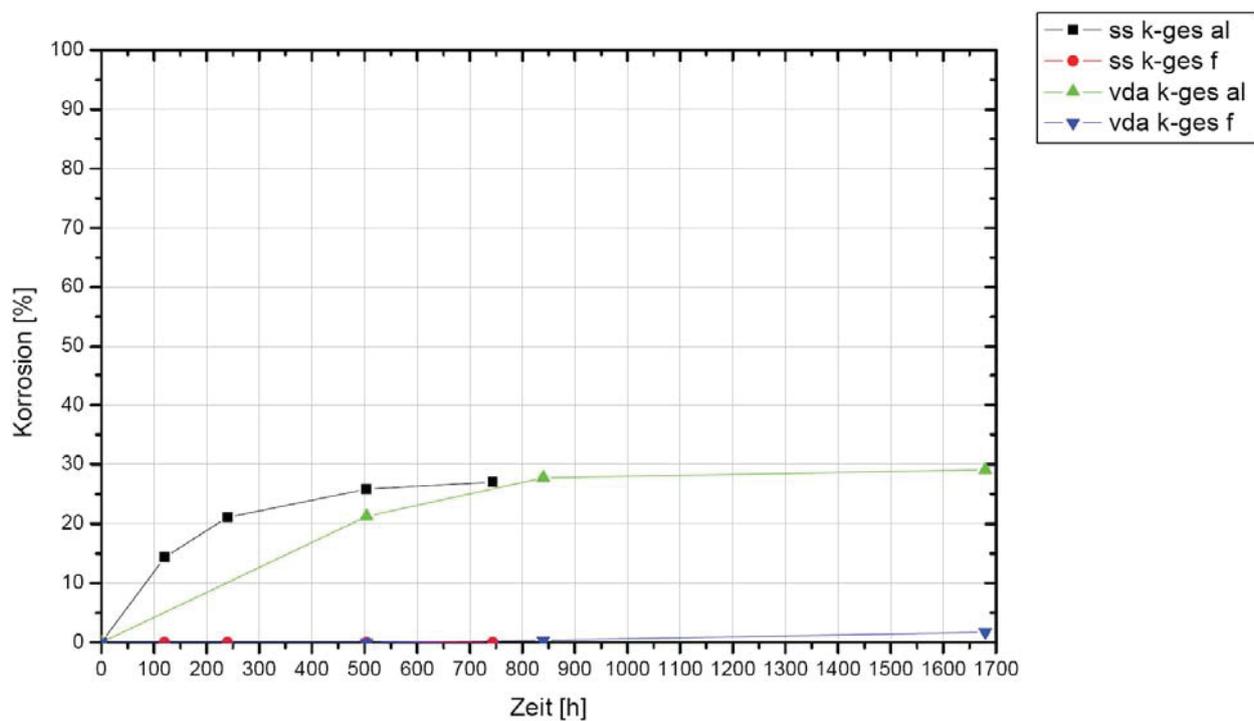


Abbildung 65: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alageo

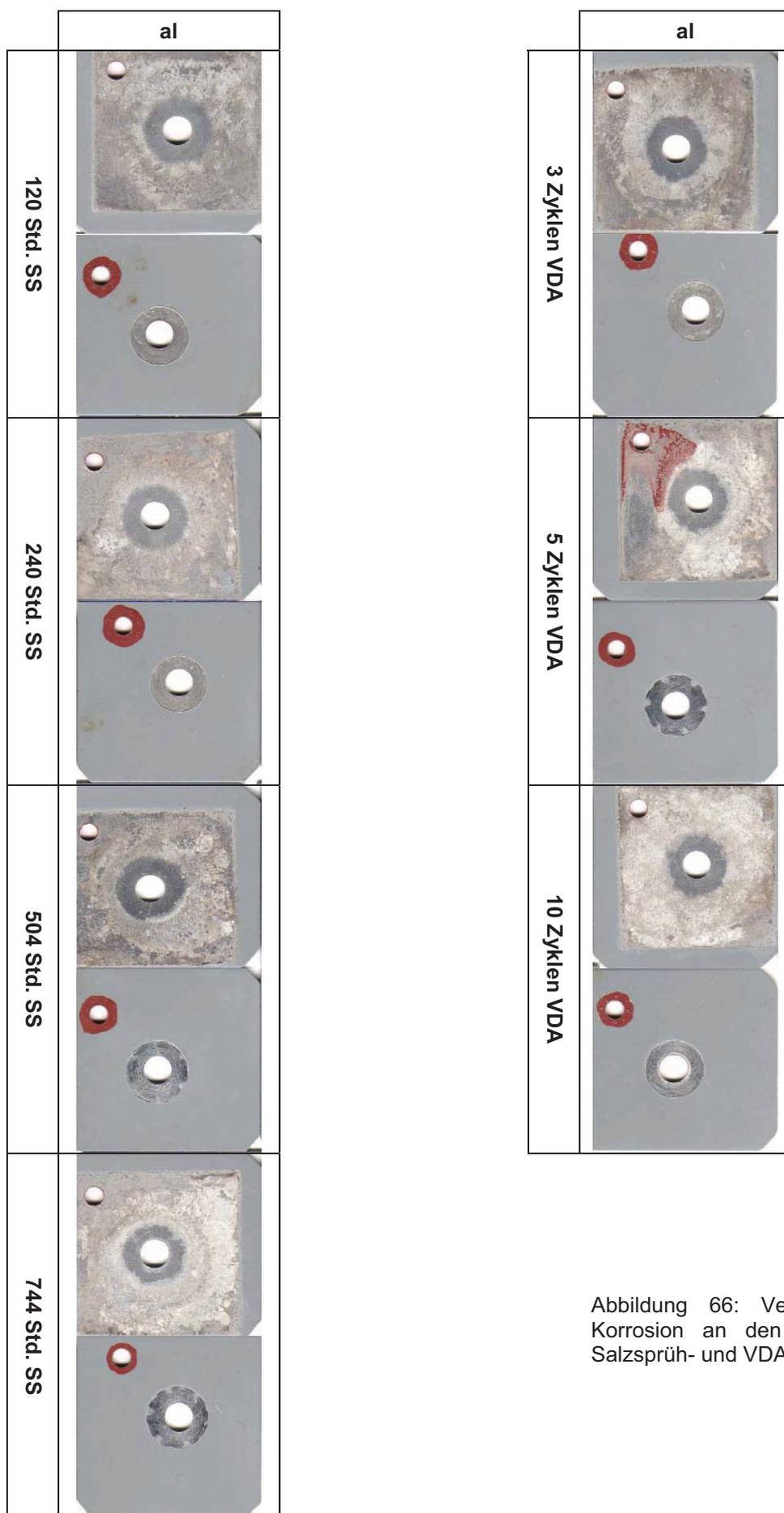


Abbildung 66: Verlauf der optischen Korrosion an den alalgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

## 9.4 Aluminium-CFK-Geomet 321-Schraube (alcfkgeo)

### Salzsprühtest

In dieser Verbindung unterliegt das Aluminium einem hohen Korrosionsangriff durch das CFK, welches einen elektrochemisch edlen Charakter aufweist. Bereits nach 120 Stunden ist ein großflächiger Korrosionsangriff sowie vereinzelte Lochkorrosionsstellen an der Aluminium-Kontaktfläche ersichtlich. Der Kernbereich um die Verschraubung ist nur gering korrosiv belastet. Auffällig bei dieser Verbindung ist das tiefe Eindringen der KTL-Flüssigkeit in das Probeninnere, das wahrscheinlich auf die geriffelte Oberflächentextur des CFK rückzuführen ist. Die Schraube bzw. Mutter wird in jenen Zonen korrodiert, in denen freiliegende CFK-Fasern (Bereich von Bohrungen und Schnittkanten) die Metalloberfläche kontaktieren. Auffallend ist ebenfalls die webmusterartige Abscheidung der KTL an der CFK-Außenoberfläche sowie die Rückstände der Geomet 321-Verschraubung im Außenbereich der Bohrung. Vermutung: während des KTL-Prozesses verklebt das CFK mit der Geomet 321-Beschichtung und löst diese beim Abkühlvorgang bzw. bei mechanischer Belastung oder Loslösen der Schraube von der Schraubenoberfläche. Dies hat einen korrosiven Angriff in den ungeschützten Oberflächenbereichen der Verschraubung zur Folge. Mit zunehmender Prüfzeit verstärken sich die Korrosionserscheinungen, sodass nach 744 Stunden Salzsprühtest großflächige Materialabtragungen und Korrosionsmulden bzw. -löcher in der Kontaktfläche des Aluminiumplättchens feststellbar sind. Die Kernzone bleibt weitgehend beständig.

### VDA-Test

Form und Verlauf der Korrosionserscheinungen entsprechen weitgehend den bereits beschriebenen Erkenntnissen aus dem Salzsprühtest. Weiters ist eine etwas stärkere Ausprägung der Lochkorrosion und der Lackunterwanderung in der Fügefläche sowie die Ausbildung von Korrosionsgräben und -löchern entlang der Schnittkante des CFK bemerkbar. Die starke korrodierende Wirkung des CFK ist nicht nur auf das edle Potenzial zurückzuführen, sondern auch auf jene Tatsache, dass dieser Verbundwerkstoff nicht korrodiert und daher keine Korrosionsprodukte für eine Wachstumshemmung produziert.

In Abbildung 67 bis Abbildung 70 sind die Graphen der einzelnen Korrosionsverläufe ersichtlich, Abbildung 71 untermauert das Ergebnis optisch.

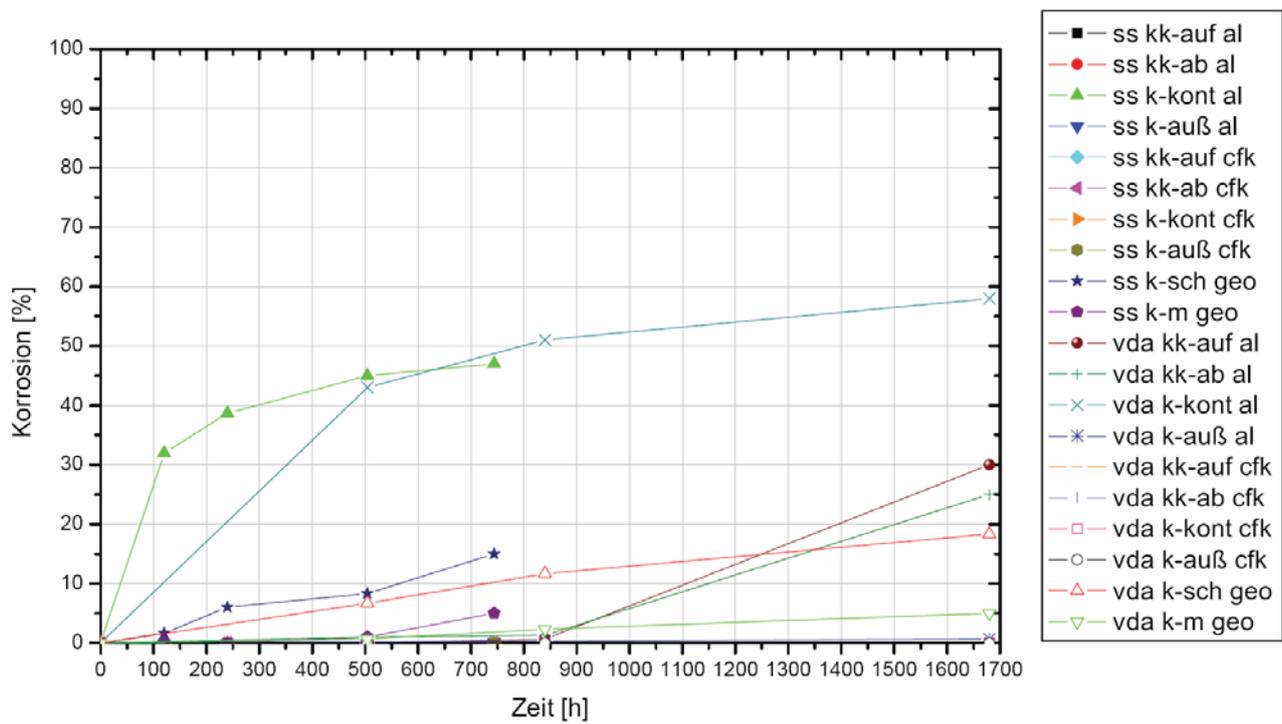


Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkgeo

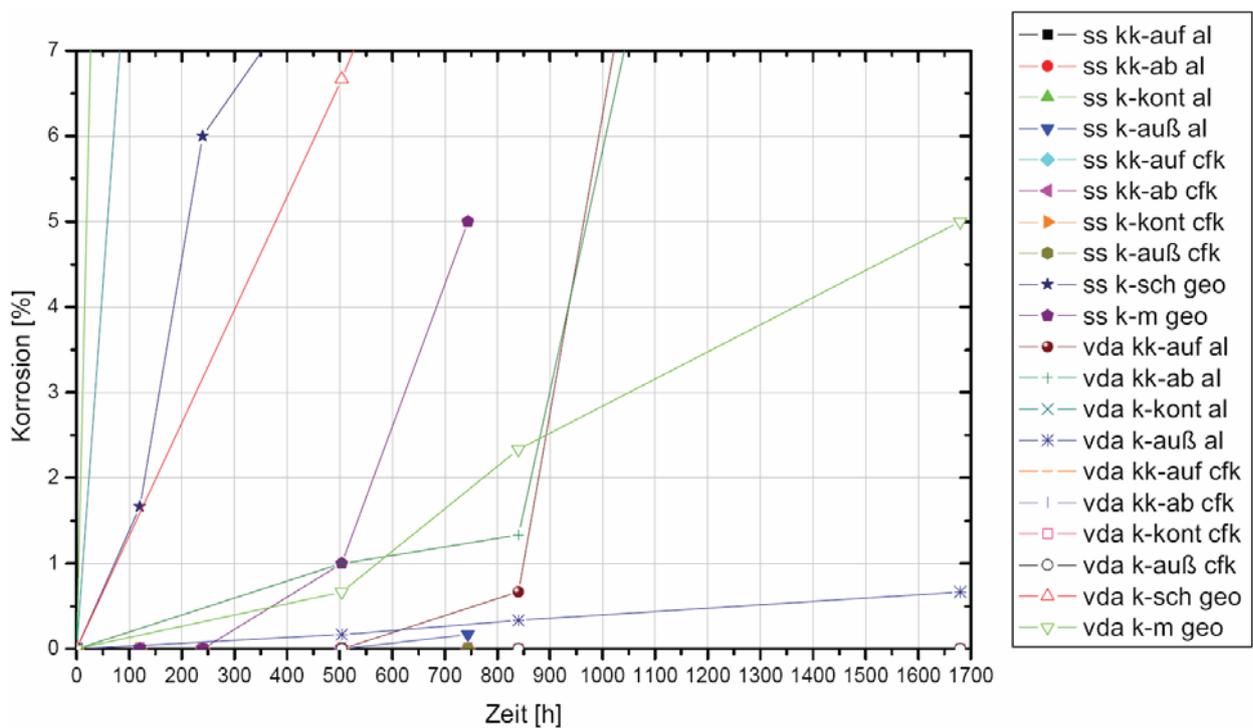


Abbildung 68: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkgeo (Vergrößerung)

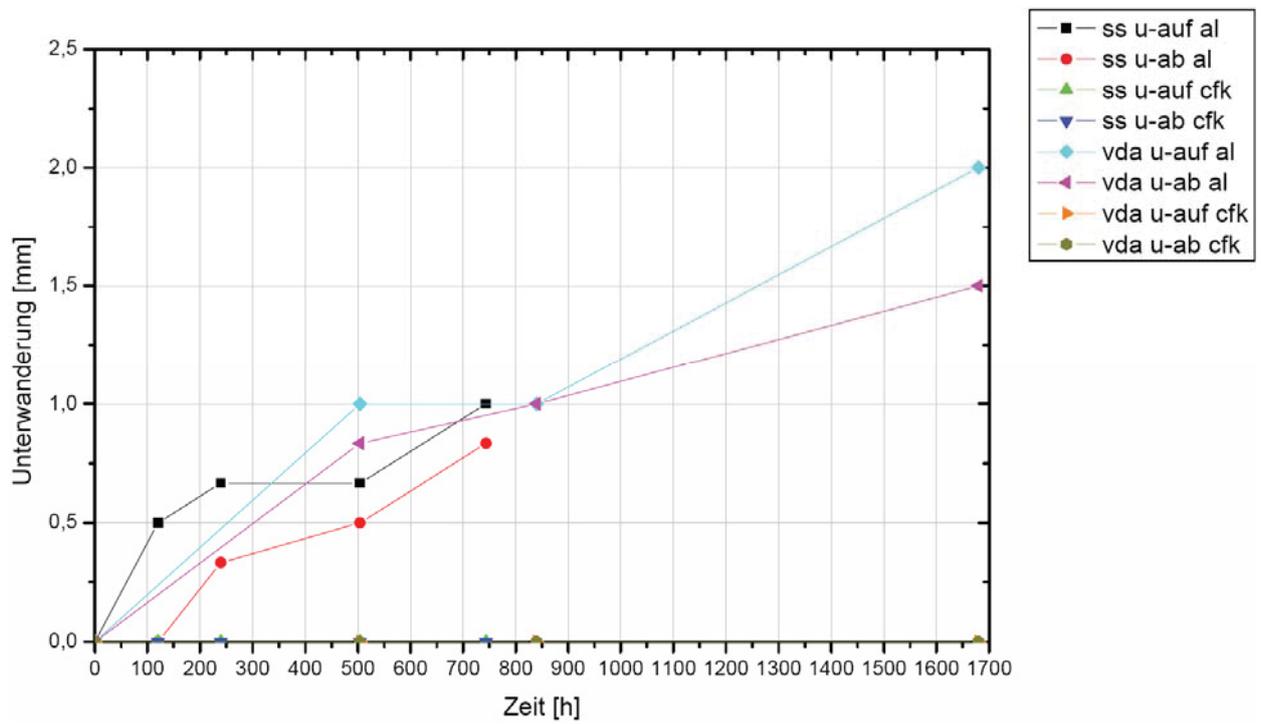


Abbildung 69: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alcfkgeo

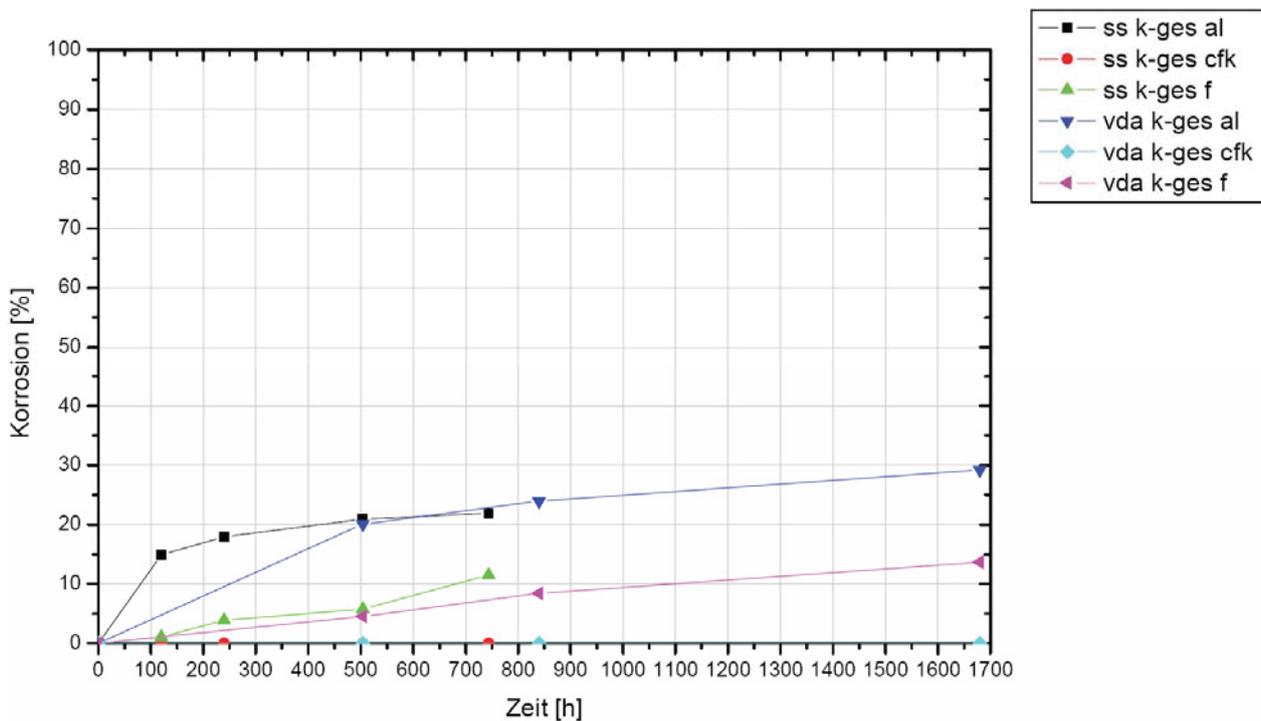


Abbildung 70: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alcfkgeo

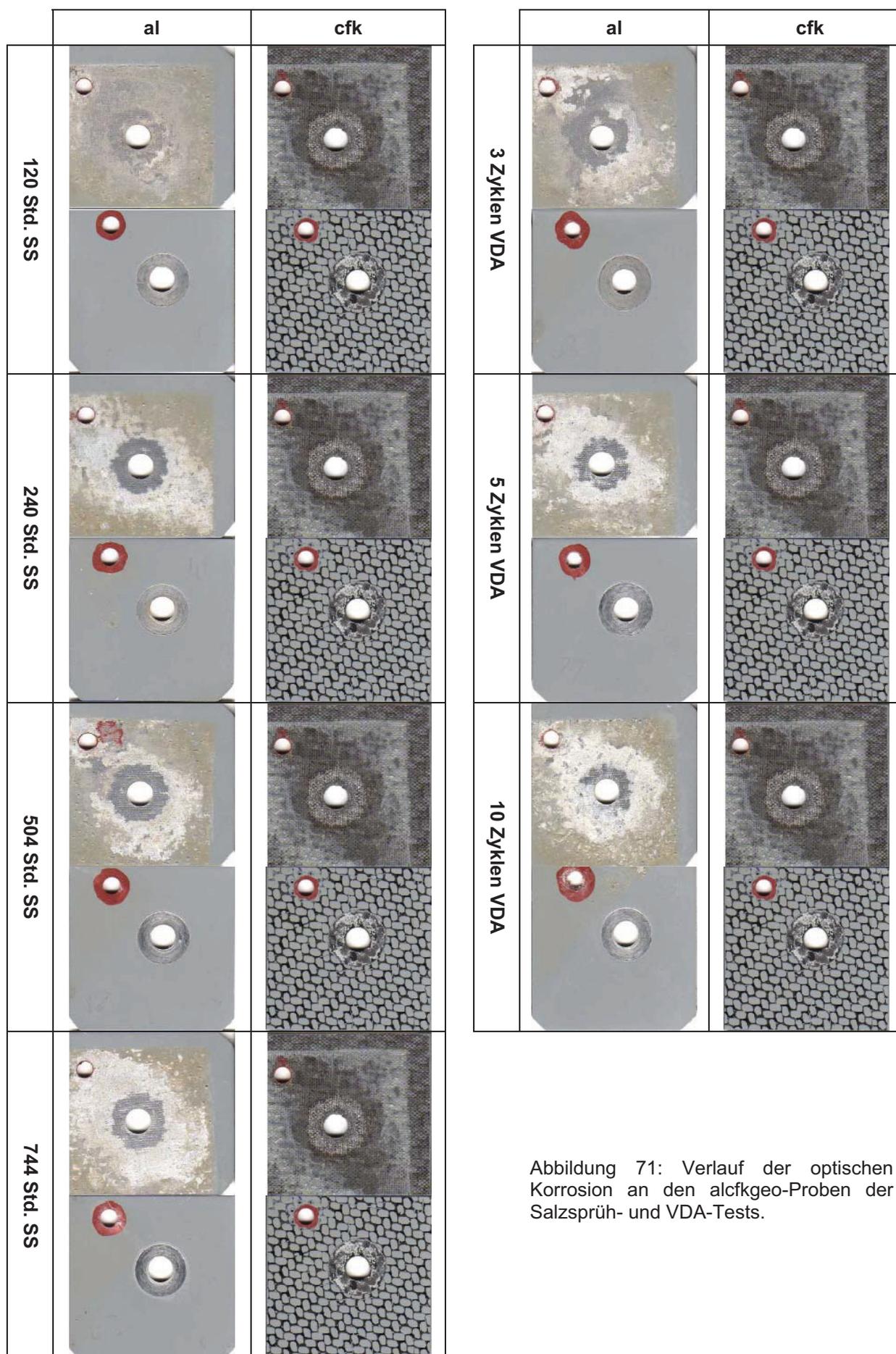


Abbildung 71: Verlauf der optischen Korrosion an den alcfkgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

---

## 9.5 Aluminium-Stahl-Geomet 321-Schraube (alstgeo)

### Salzsprühtest

Zu Beginn der Salzsprühprüfungen sind nur geringe Korrosionserscheinungen am Aluminium und am verzinkten Stahlblech feststellbar. Bei beiden Proben bilden sich rund um die Presszone kreisrunde Korrosionsfronten, die sich mit fortschreitender Prüfdauer über die gesamte Kontaktfläche ausweiten. Dabei wird die Zinkschicht angegriffen, die Weißrostbildung ist jedoch im Vergleich zu den anderen Aluminium-Stahl-Kombinationen relativ gering. Nach 504-stündiger Prüfdauer ist die Verzinkung am Stahlplättchen teilweise verschwunden und hinterlässt an diesen Stellen die blanke Stahloberfläche. Eine Rotrostbildung ist zu diesem Zeitpunkt nicht erkennbar. An der Aluminiumoberfläche treten vereinzelt Löcher und Mulden auf, der Hauptteil des korrosiven Angriffs erfolgt dennoch flächenförmig. Am Ende des Salzsprühtests, nach 744 Stunden, sind bereits größere Zonen des Stahlblechs im Außenbereich der Kontaktfläche unverzinkt, an einzelnen Stellen bildete sich Rotrost aus. Bei Schraube und Mutter ist in der gesamten Prüfzeit nur eine geringe korrosive Schädigung bemerkbar.

### VDA-Test

Im Vergleich zum Salzsprühtest erfolgt bei dieser Testreihe der korrosive Angriff in der Kontaktfläche wesentlich stärker. Die Kernzone rund um den Pressbereich der Schraube wird ebenfalls kaum belastet. Nach der festgelegten Prüfzeit von 10 Zyklen sind am Stahlblech großflächige, zinkfreie Zonen im Randbereich der Kontaktflächen erkennbar. Wiederum ist eine partielle Rotrostbildung an den betroffenen Stellen eingetreten.

Detaillierte Informationen bezüglich der übrigen Korrosionsverläufe sind aus Abbildung 72 bis Abbildung 75 zu entnehmen. In Abbildung 76 ist die Dokumentation des Salzsprüh- und VDA-Tests ersichtlich.

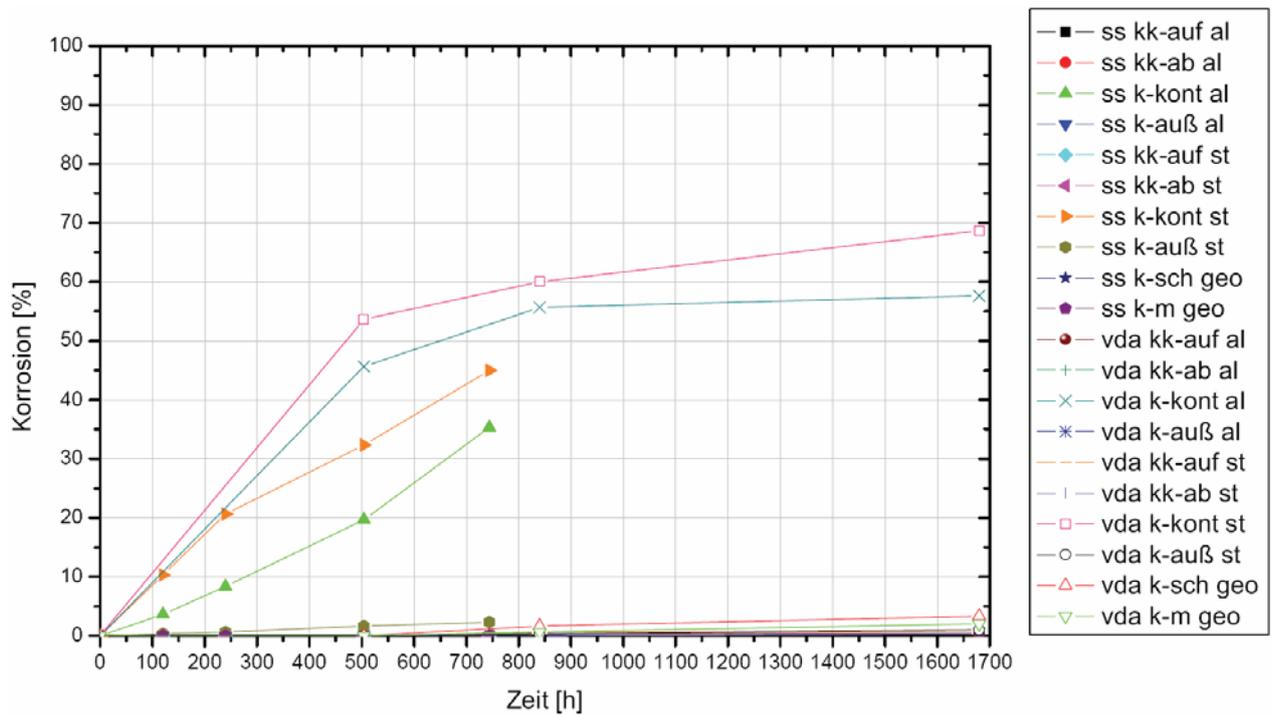


Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstgeo

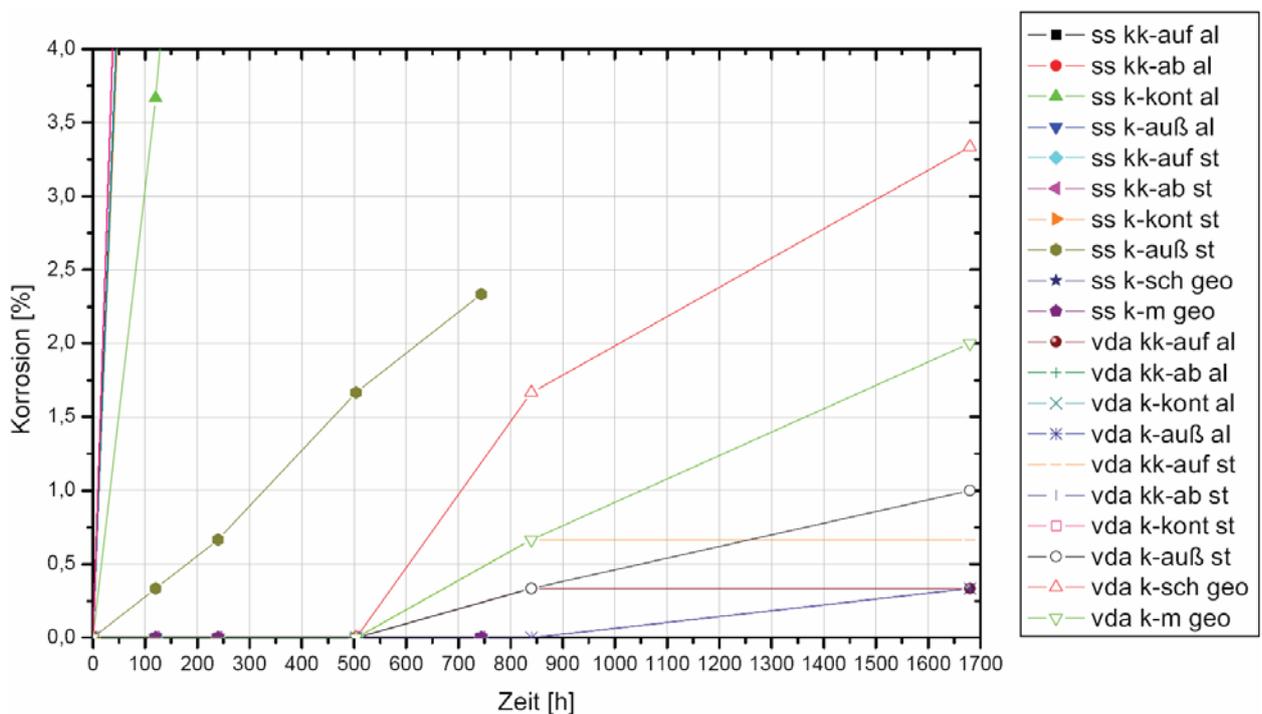


Abbildung 73: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstgeo (Vergrößerung)

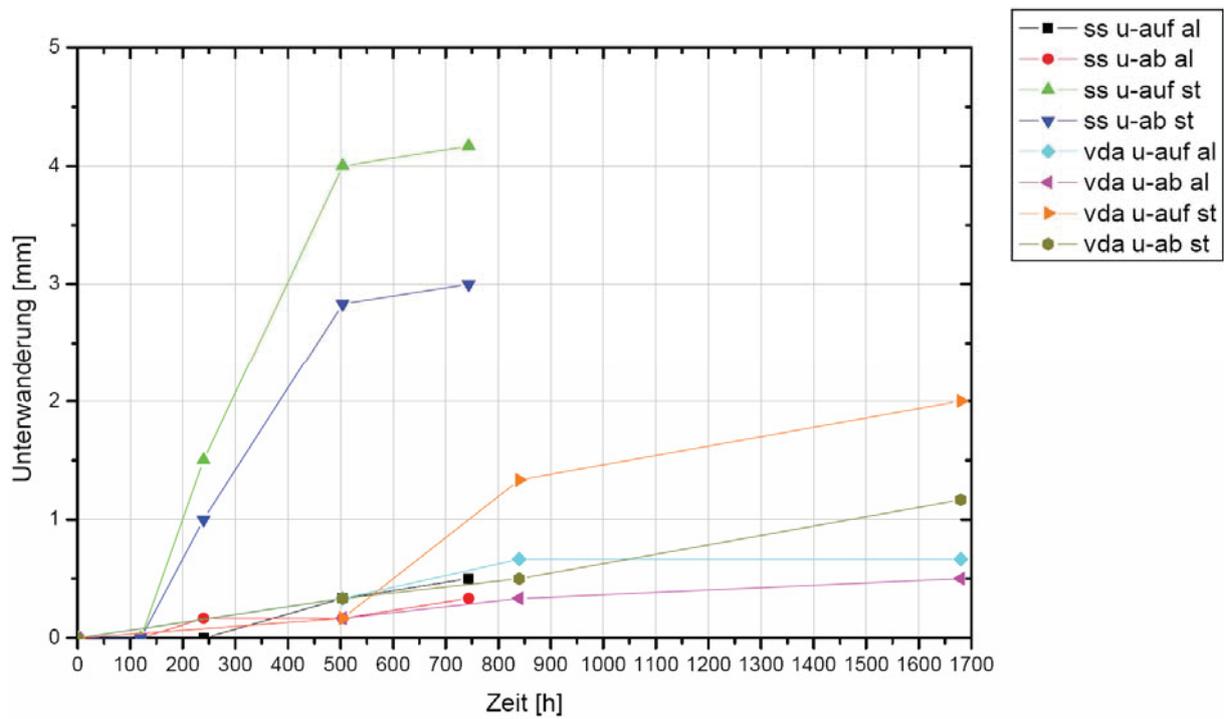


Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstgeo

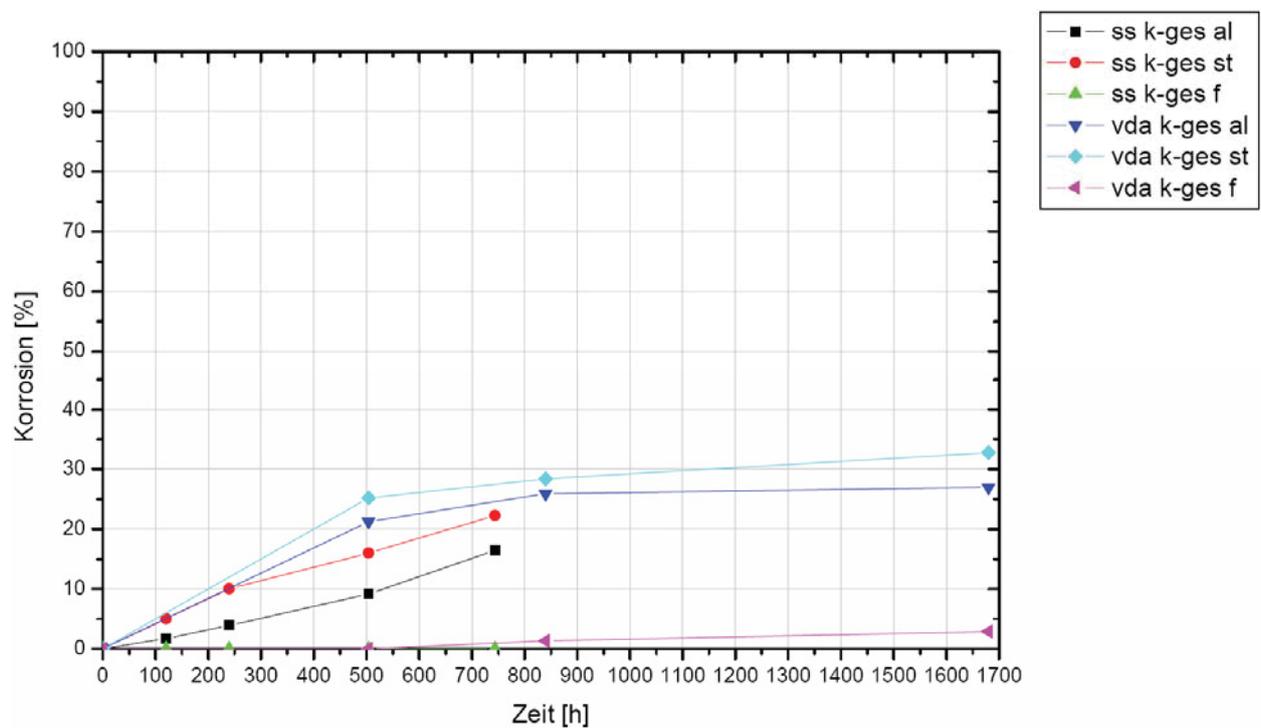


Abbildung 75: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstgeo

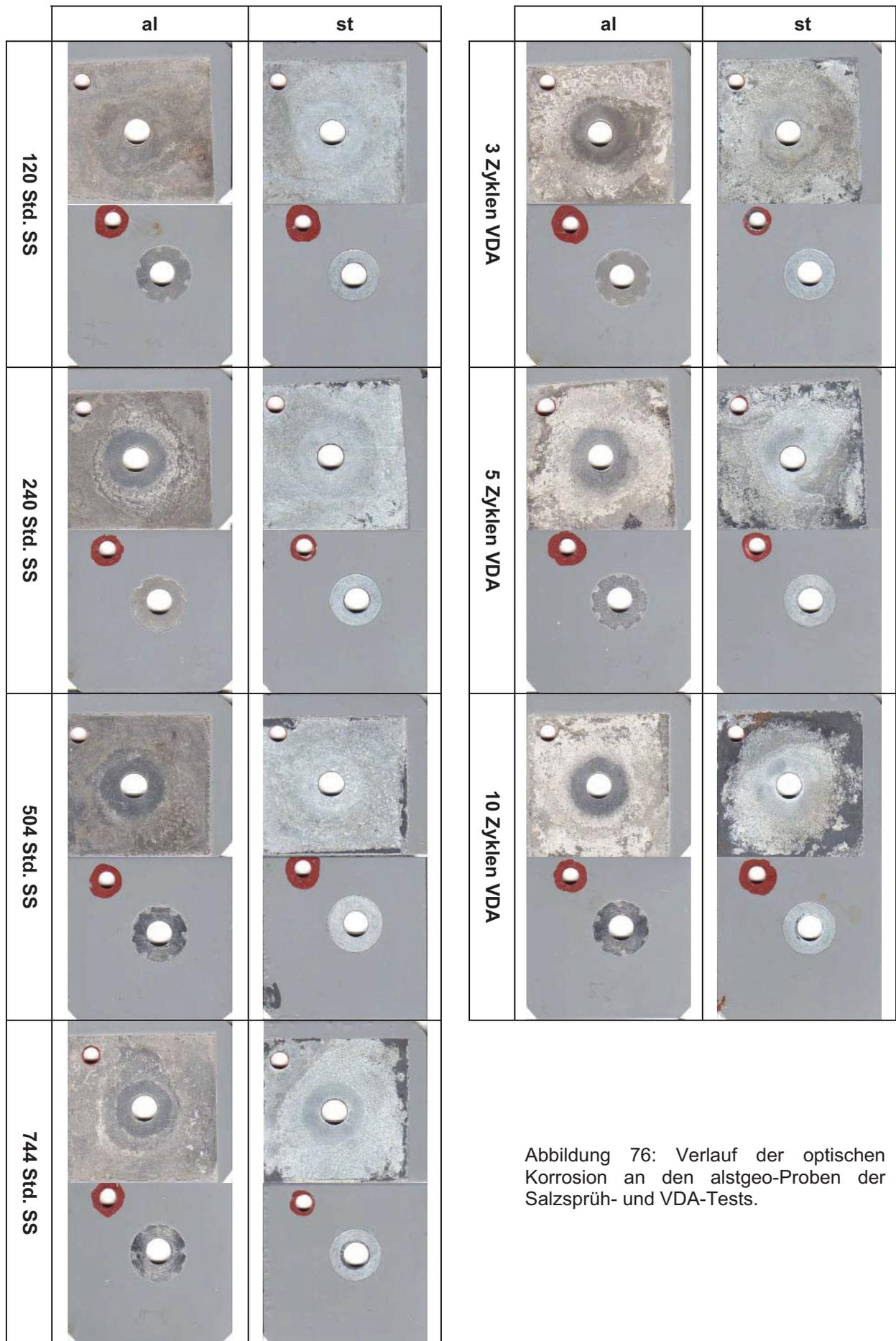


Abbildung 76: Verlauf der optischen Korrosion an den alstgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

---

## 9.6 CFK-Stahl-Geomet 321-Schraube (cfkstgeo)

### Salzsprühtest

Ähnlich der alcfkgeo-Verbindung unterliegt hier der Stahl einer hohen korrosiven Belastung durch das elektrochemisch edlere CFK. Bereits nach 120 Stunden Prüfzeit sind die ersten unverzinkten Oberflächenbezirke am Stahlblech in der Fügefläche erkennbar. Eine sichtbare Rotrostbildung ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht eingetreten. Wiederum ist das tiefe Eindringen der KTL-Flüssigkeit in das Probeninnere auffällig. Der Pressbereich der Schraube, die so genannte Kernzone, ist vom Korrosionsgeschehen kaum betroffen. Mit voranschreitender Prüfzeit weiten sich die Korrosionszonen aus und unterwandern teilweise die KTL-Beschichtung im Randbereich (Übergang KTL-Schicht – Verzinkung) und an der Probenaußenseite. Nach einer Prüfdauer von 504 Stunden sind die ersten Rotroststellen in den unverzinkten Oberflächenbereichen sichtbar, welche sich bis zum Testende weiter ausbreiten. Schraube und Mutter korrodieren vor allem im Kontaktbereich von freien CFK-Lamellen. In der Auflagefläche Geomet 321-Schraube/Stahlblech treten während des gesamten Prüfzyklus keine Korrosionserscheinungen auf, was auf eine gute Verträglichkeit der beiden Beschichtungstypen hinweist.

### VDA-Test

Bezüglich des Korrosionsverhaltens gibt es im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Salzsprühtest kaum Unterschiede, außer dass der Gesamtwert der Korrosionserscheinungen höher liegt. Dies ist anhand der wesentlich stärker ausgeprägten Rotrostbildung an der Stahlprobe ersichtlich.

Die beschriebenen Erkenntnisse aus beiden Prüfungen sind anhand der ermittelten Graphen in Abbildung 77 bis Abbildung 80 nachvollziehbar. Eine fotografische Zusammenstellung der Proben in Abbildung 81 soll den Korrosionsfortschritt verdeutlichen.

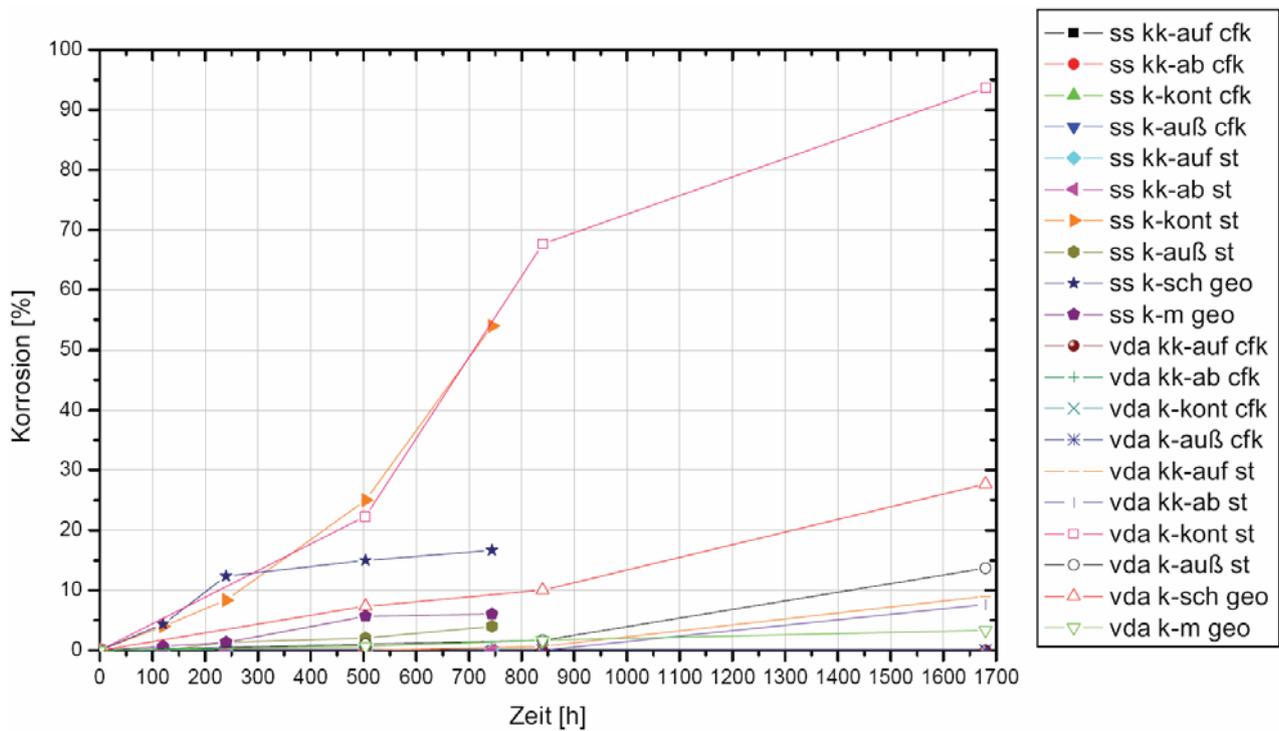


Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstgeo

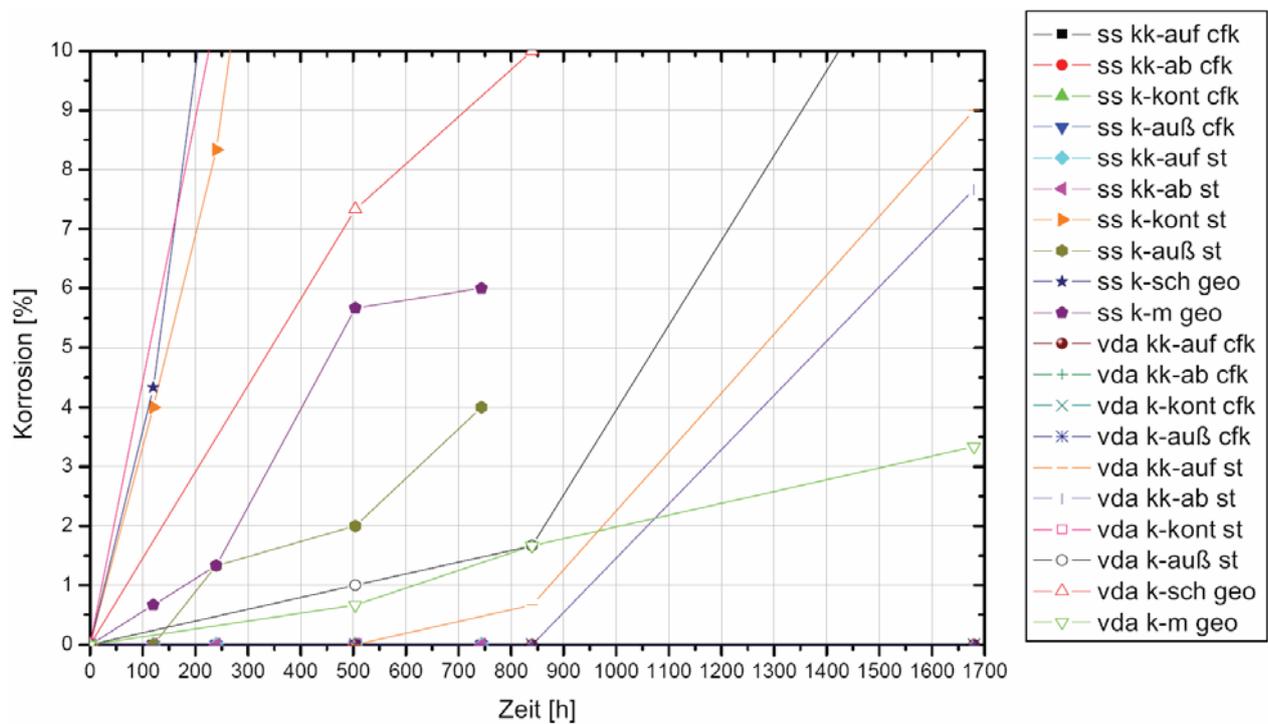


Abbildung 78: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstgeo (Vergrößerung)

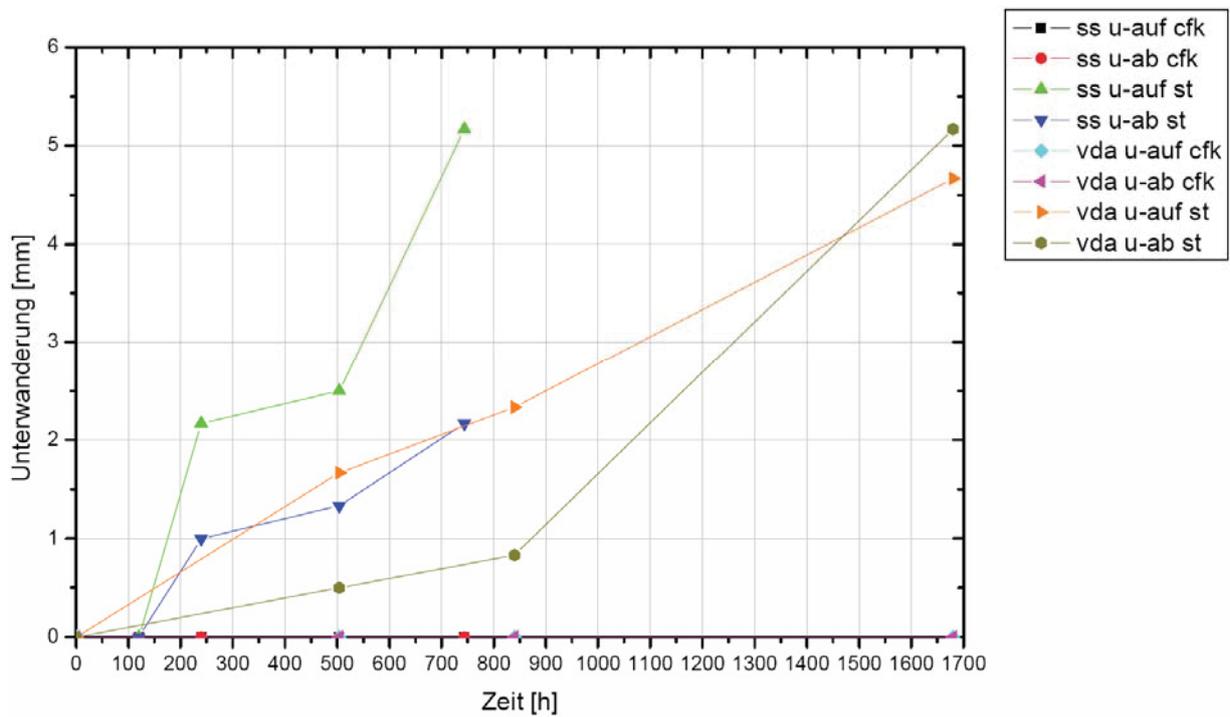


Abbildung 79: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von cfkstgeo

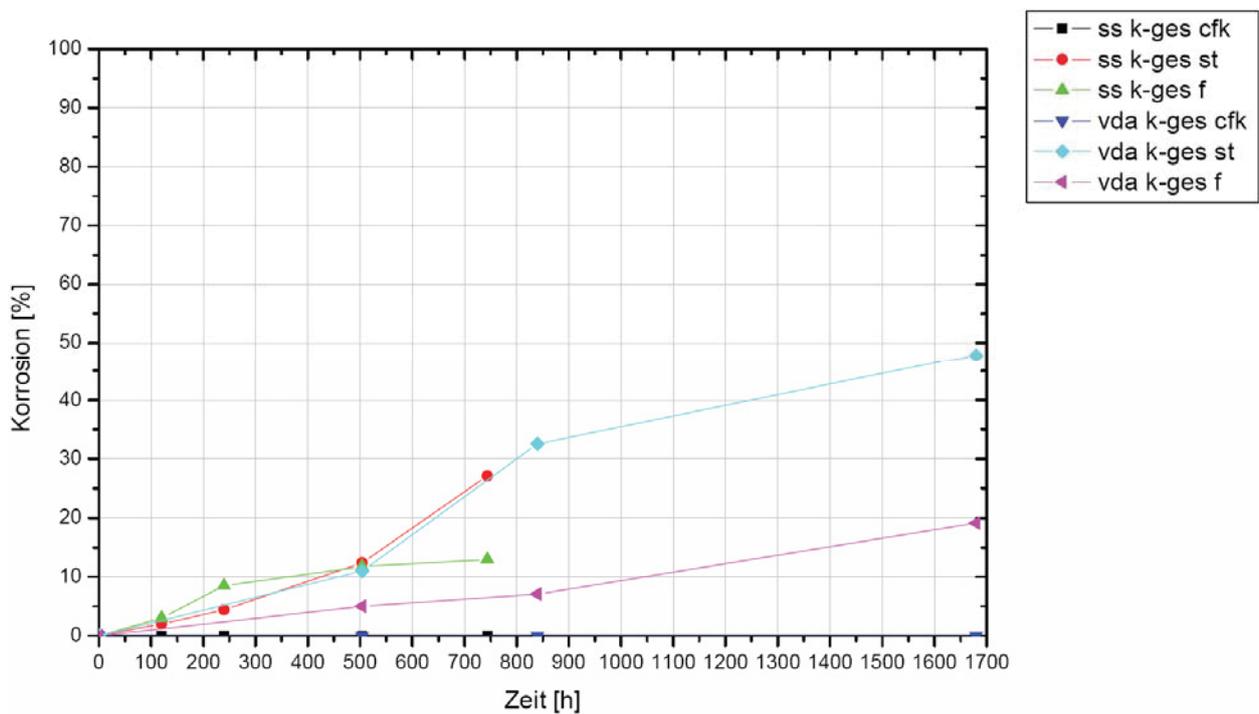


Abbildung 80: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von cfkstgeo

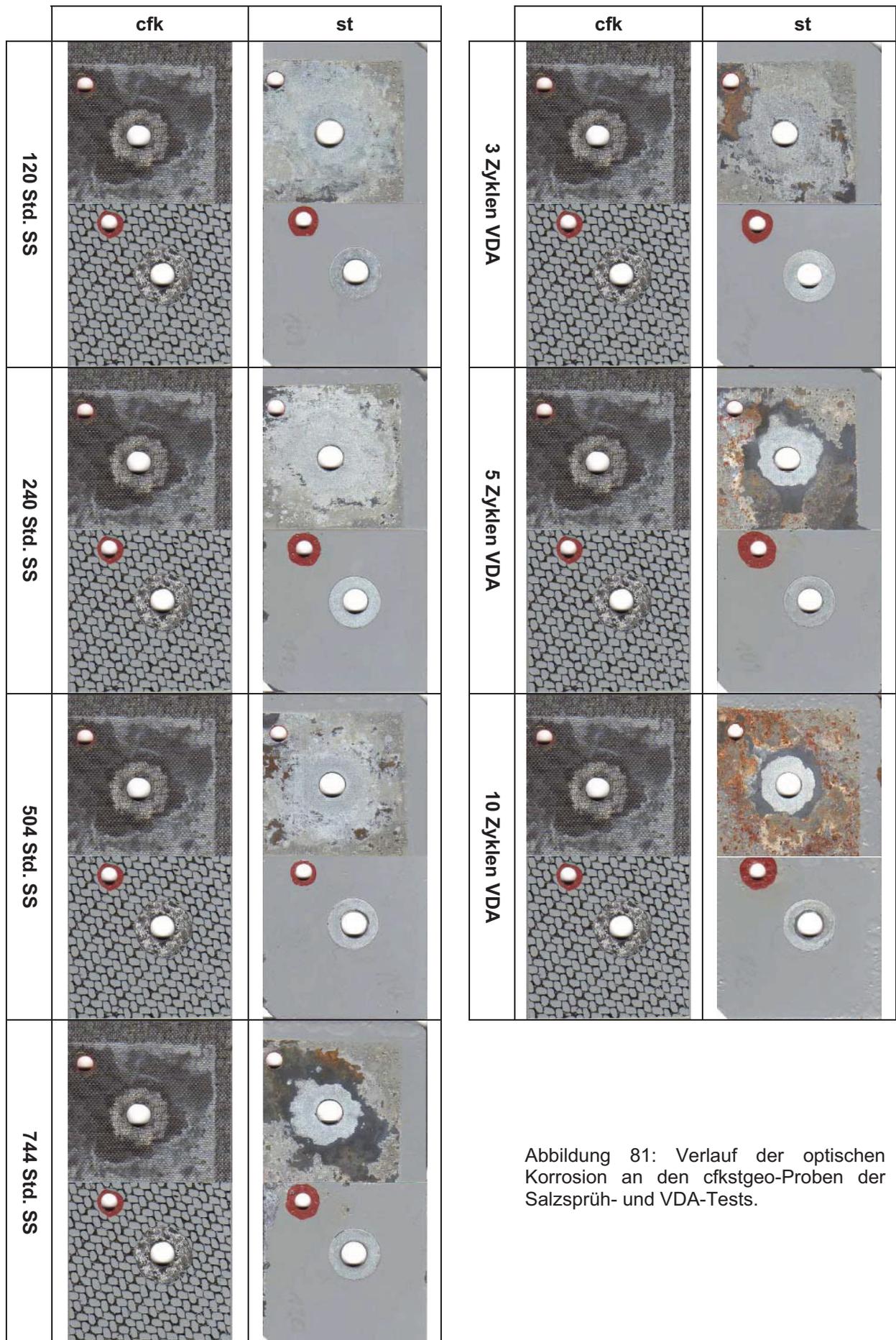


Abbildung 81: Verlauf der optischen Korrosion an den cfkstgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

---

## 9.7 Aluminium-Magnesium-Aluminiumschraube (almgal)

### Salzsprühtest

Nach einer Prüfzeit von 120 Stunden weist die Magnesiumprobe einen relativ hohen Korrosionsgrad in der Fügefläche sowie Lochfraßstellen am gesamten Probenkörper (vorwiegend im Kantenbereich) auf. Beim Aluminium ist der Korrosionsgrad im Kontaktbereich außergewöhnlich hoch, was auf die hohen pH-Wert-Änderungen infolge des Magnesiumzerfalls rückzuführen ist. Die Korrosion schreitet voran, sodass nach 240 Stunden die Magnesiumprobe einen nennenswerten Materialverlust im Abtropfpunkt aufweist, an der Aluminiumprobe ist in diesem Zeitabschnitt ein plättchenförmiger Abtrag an der Oberfläche zu erkennen. Nach 504-stündiger Prüfdauer sind am Magnesium hohe Materialverluste und probendurchgängige Lochkorrosionsstellen feststellbar. Am Ende des Prüfzyklus (744 Stunden) ist ein Großteil der Magnesiumprobe nicht mehr vorhanden, das Aluminium korrodiert großflächig in der Fügeebene und wird schichtförmig abgetragen. Schraube, Mutter und Unterlegscheibe korrodieren vorwiegend im Kontaktbereich mit dem Magnesium.

### VDA-Test

Bei der VDA-Prüfung ist anfangs die Korrosionsgeschwindigkeit geringer als beim Salzsprühtest, erreicht aber bezüglich der Kontaktkorrosion die gleichen Endwerte. Wesentlicher Unterschied ist der geringere Angriff und Massenverlust an der Probenaußenseite des Magnesiums. An dieser ist ebenfalls die von den Kanten ausgehende gleichmäßig, voranschreitende Unterwanderung der KTL-Beschichtung auffällig. Rund um das Fügeelement bildeten sich kreisrunde Korrosionsgräben aufgrund von Kontaktkorrosion aus. Der Tiefenangriff ist im Vergleich zum Salzsprühtest etwas geringer, daher sind auch keine probedurchgängigen Lochfraßstellen feststellbar.

Weitere Details zu der almgal-Auswertung sind in Abbildung 82 bis Abbildung 85 protokolliert. Der Korrosionsverlauf an den Proben ist in Abbildung 86 sichtbar.

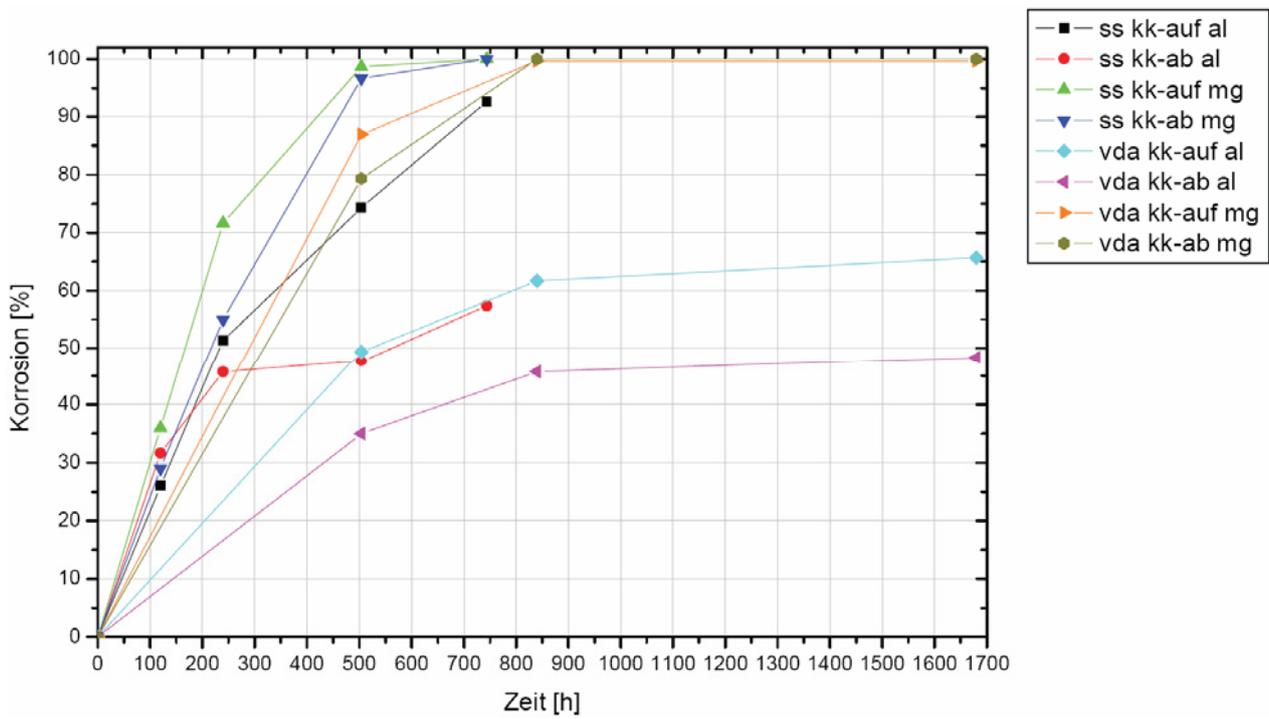


Abbildung 82: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von almgal (Teilbild I)

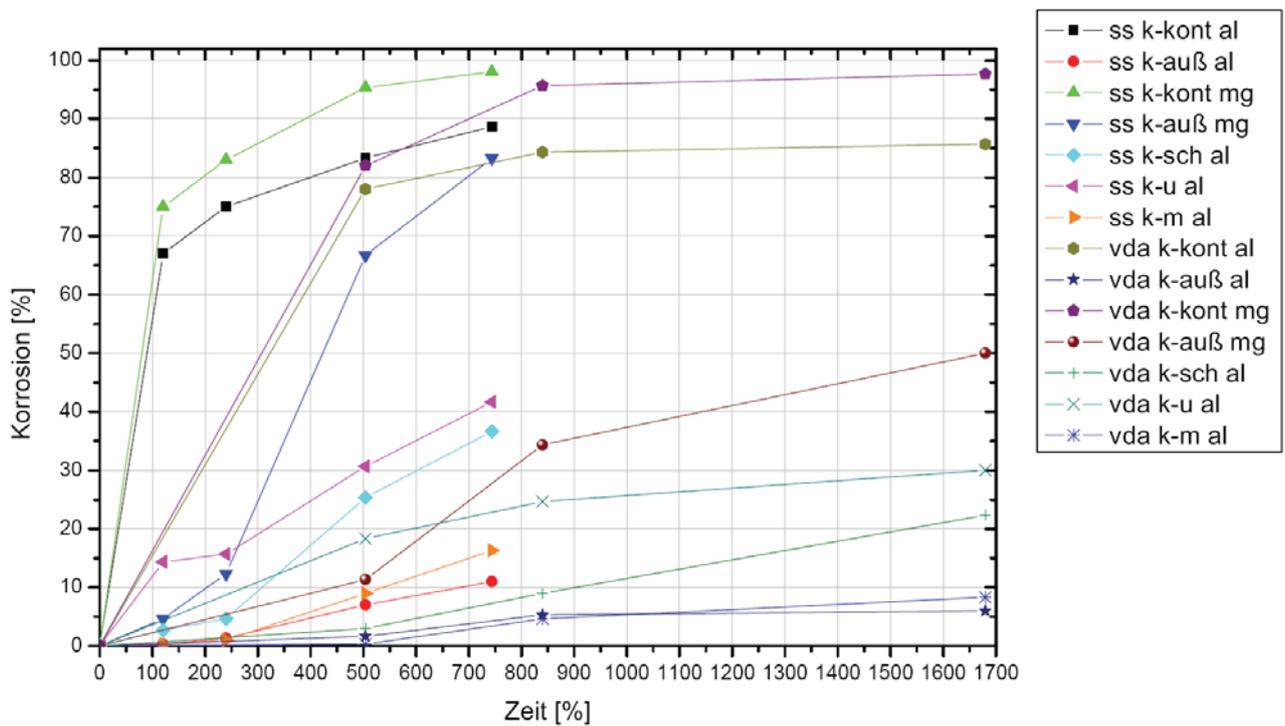


Abbildung 83: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von almgal (Teilbild II)

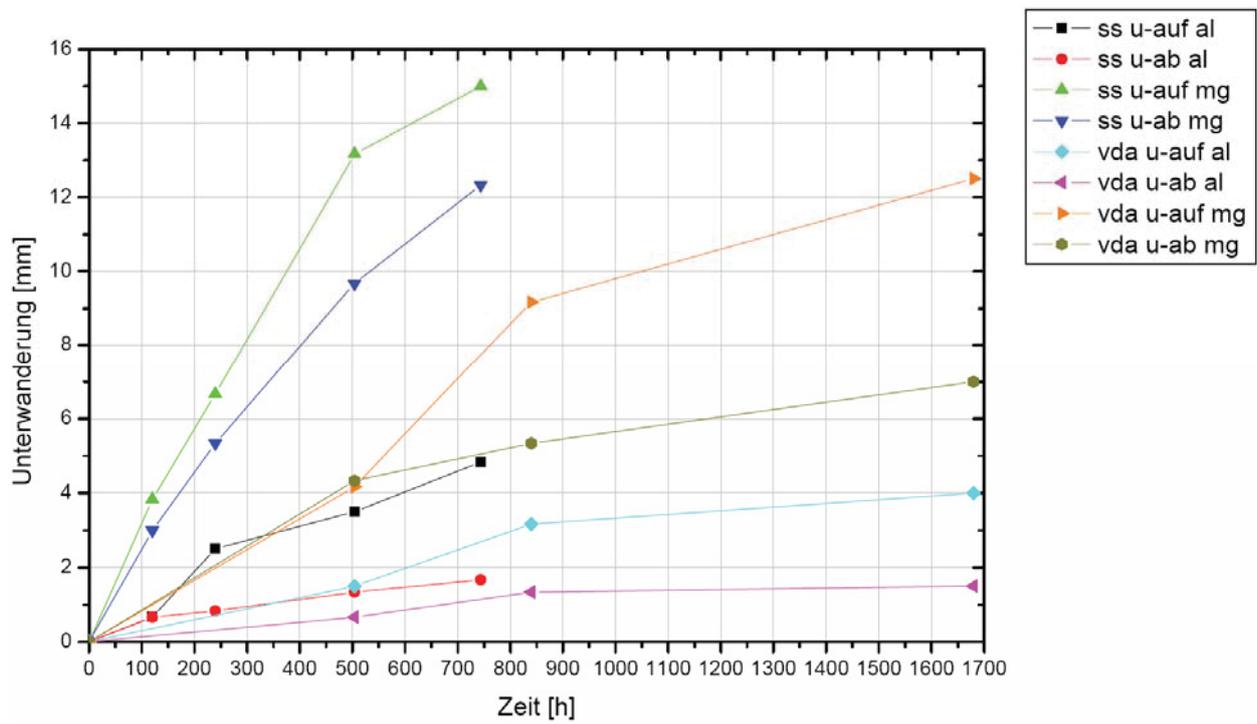


Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von almgal

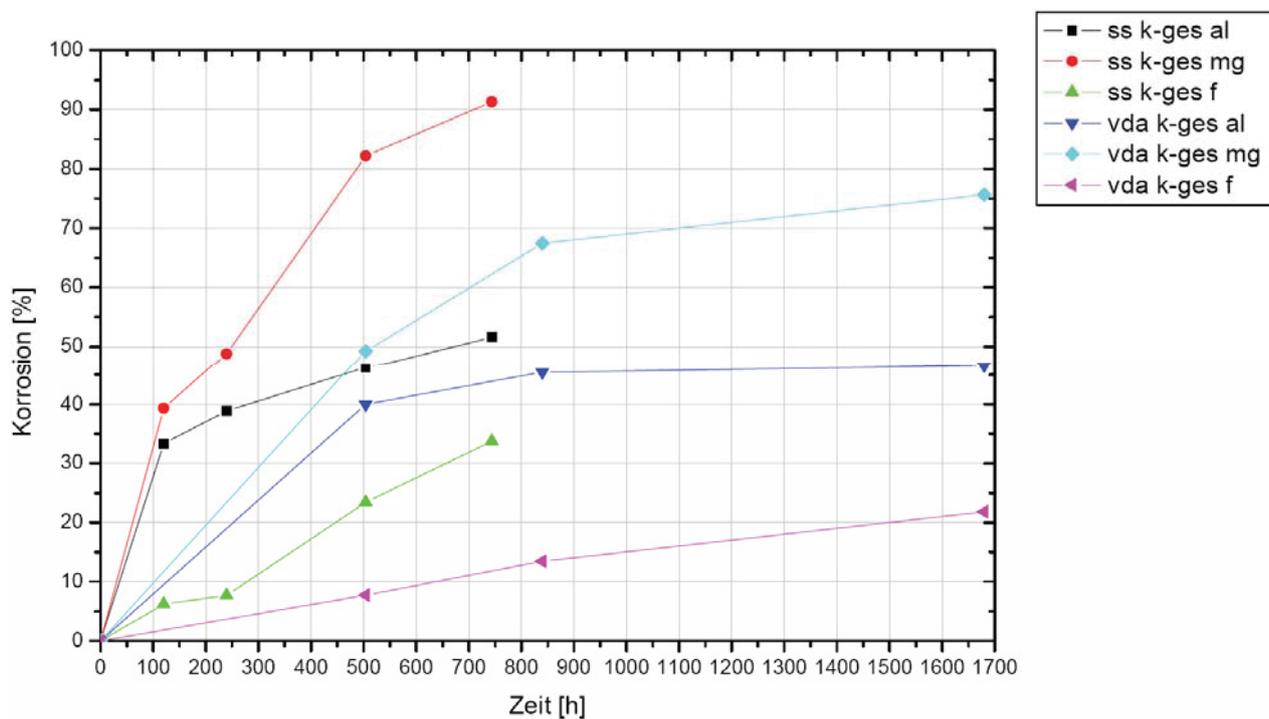


Abbildung 85: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von almgal

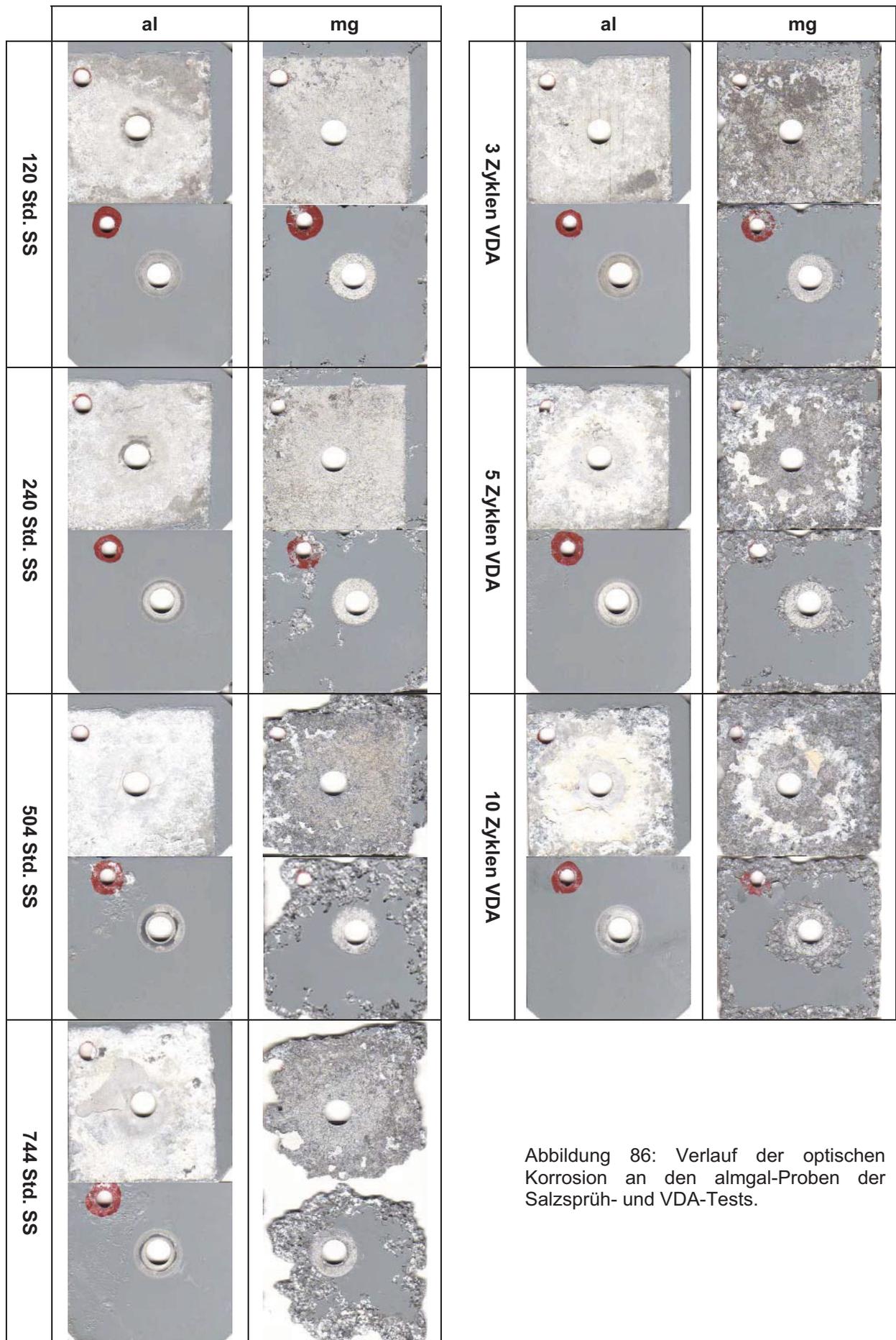


Abbildung 86: Verlauf der optischen Korrosion an den almgal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

---

## 9.8 Aluminium-CFK-Aluminiumschraube (alcfkal)

### Salzsprühtest

Wie bei allen anderen CFK-Verbindungen wird hierbei das Aluminium durch den elektrochemisch edleren Faserverbundwerkstoff korrosiv belastet. Bereits nach kurzer Salzsprühbelastung sind flächige Korrosionsangriffe sowie vereinzelte Lochfraßstellen an der Aluminiumoberfläche zu erkennen. Der Kernbereich wird aufgrund der geringeren Presskräfte ebenfalls angegriffen. Die KTL-Flüssigkeit dringt auch bei dieser Probenkombination weit in das Probeninnere vor. Dieses Phänomen liegt der geriffelten Oberfläche des Laminats zu Grunde. Schraube, Mutter und Unterlegscheibe werden im Kontaktbereich zu freiliegenden, elektrochemisch edlen CFK-Fasern korrodiert, was sich in Form von fehlenden Gewindegängen bzw. Teilstücken dieser bemerkbar macht. Mit fortschreitender Prüfdauer weitet sich die Korrosionsfront in der Kontaktfläche aus, KTL-bedeckte Zonen sind kaum von einem korrosiven Angriff betroffen. Nach 744 Stunden sind großflächige Abtragungen am Aluminium im Kontaktbereich zum kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff feststellbar. Außerdem haben sich Korrosionsmulden und -löcher an der Oberfläche ausgebildet, wobei letztere das geriffelte Muster (in Form und Position) des kontaktseitigen CFK wiedergeben. Daraus ist zu schließen, dass die Oberfläche des CFK allseitig Poren aufweist, welche einen Kontaktkorrosionsangriff hervorrufen können.

### VDA-Test

Die aus dem VDA-Test gewonnenen Informationen über den Korrosionsvorgang entsprechen weitgehend den Erkenntnissen des Salzsprühtests, lediglich dass die Korrosionsergebnisse etwas höher liegen. Weiters ist eine geringfügig stärkere Ausprägung der Lochkorrosion und der Lackunterwanderung in der Fügefläche sowie die Ausbildung von Korrosionsgräben und -löcher entlang der Schnittkante des CFK bemerkbar. „Korrosionsabdrücke“ des CFK-Musters sind wiederum an der Probenoberfläche sowie an den außenliegenden Unterlegscheiben erkennbar. Der Anteil der Korrosion an der Schraube im Bereich des Gewindes liegt höher als beim Salzsprühtest.

In Abbildung 87 bis Abbildung 90 sind die Korrosionsverläufe der einzelnen Probenbereiche anhand deren Graphen ersichtlich, Abbildung 91 vermittelt einen optischen Eindruck über den Prüfverlauf.

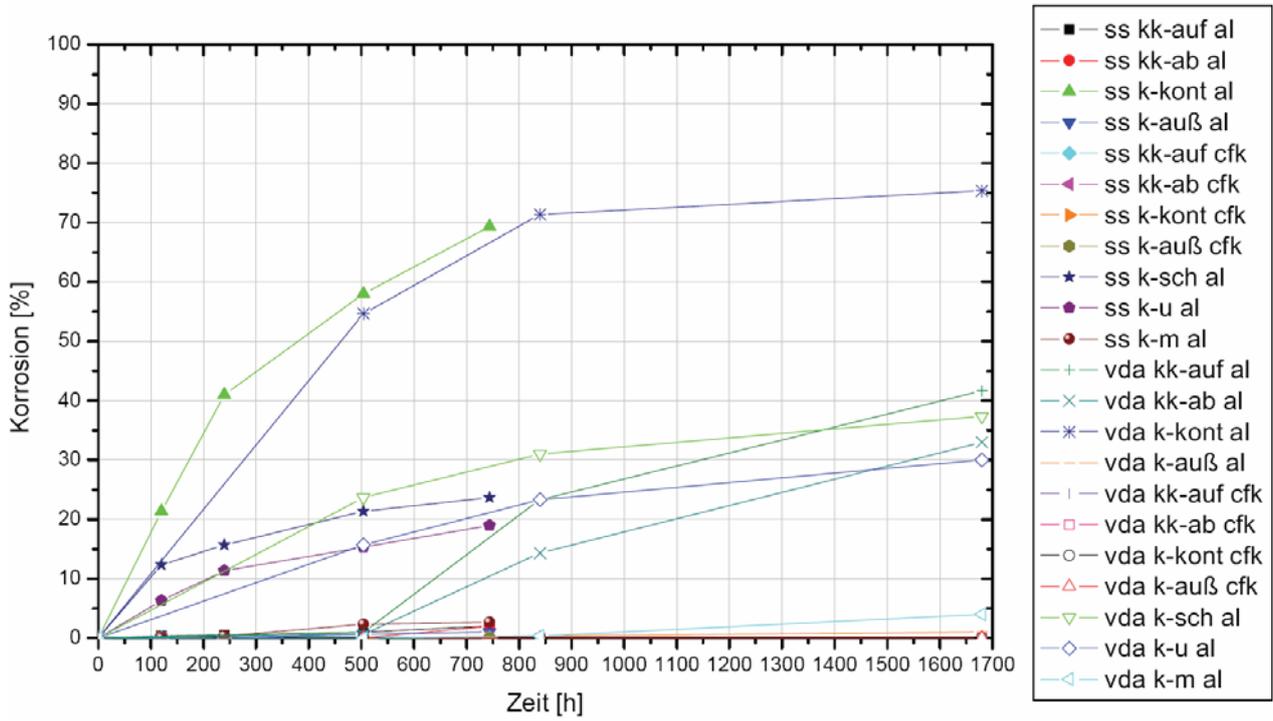


Abbildung 87: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkal

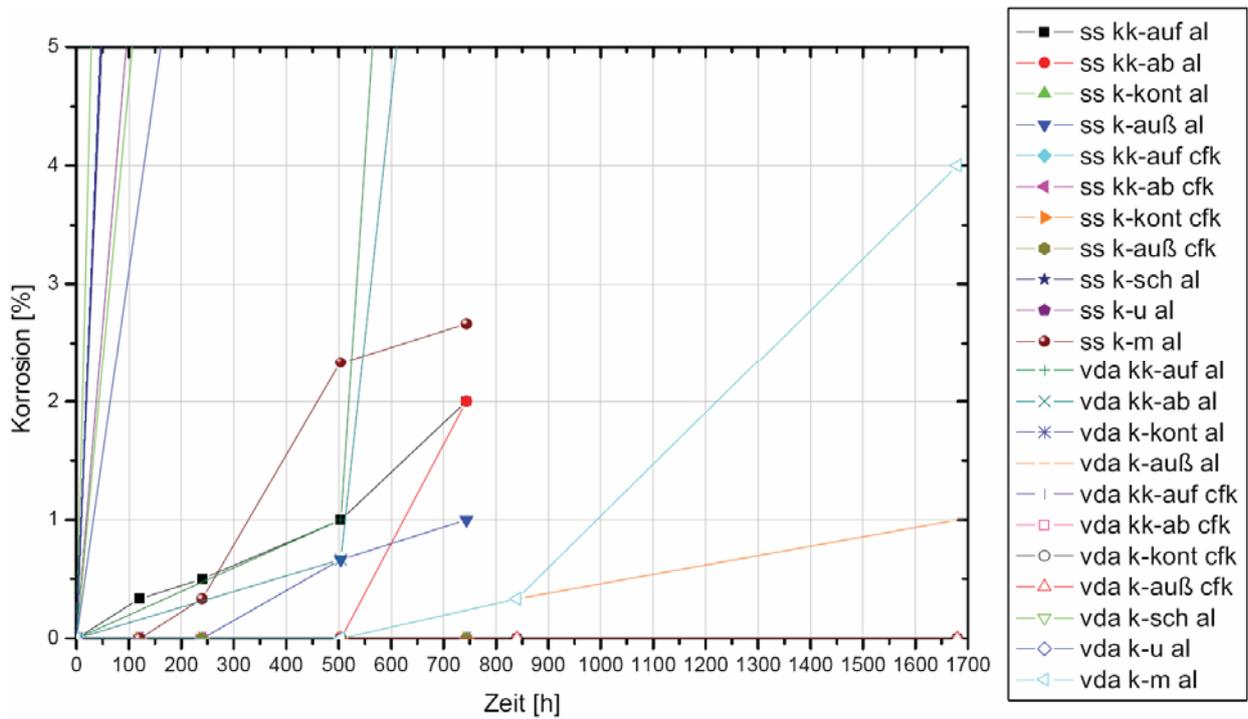


Abbildung 88: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkal (Vergrößerung)

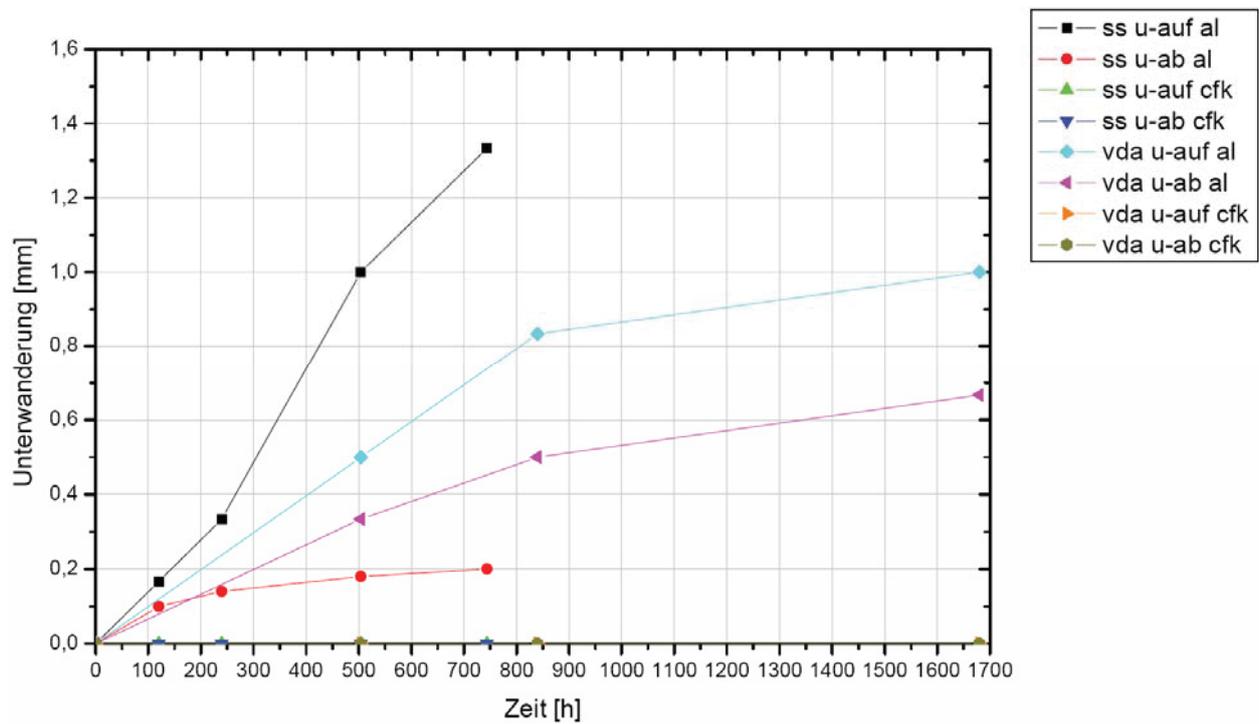


Abbildung 89: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alcfkal

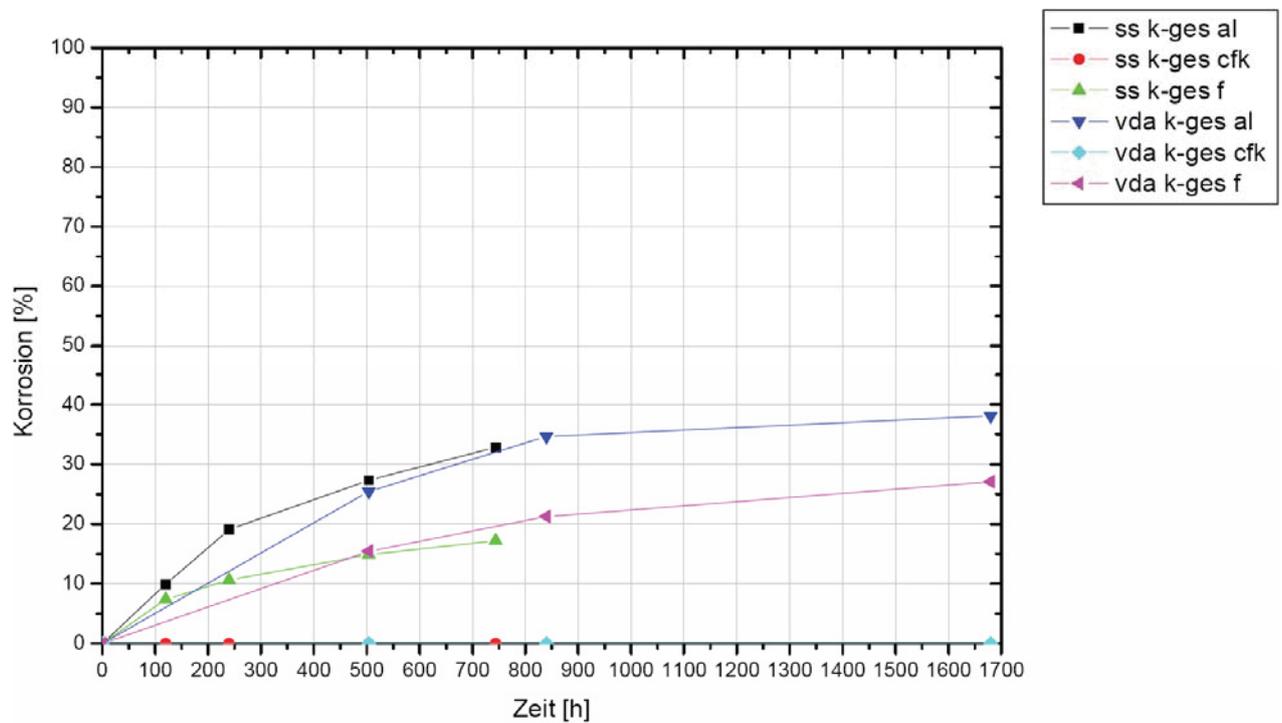


Abbildung 90: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alcfkal

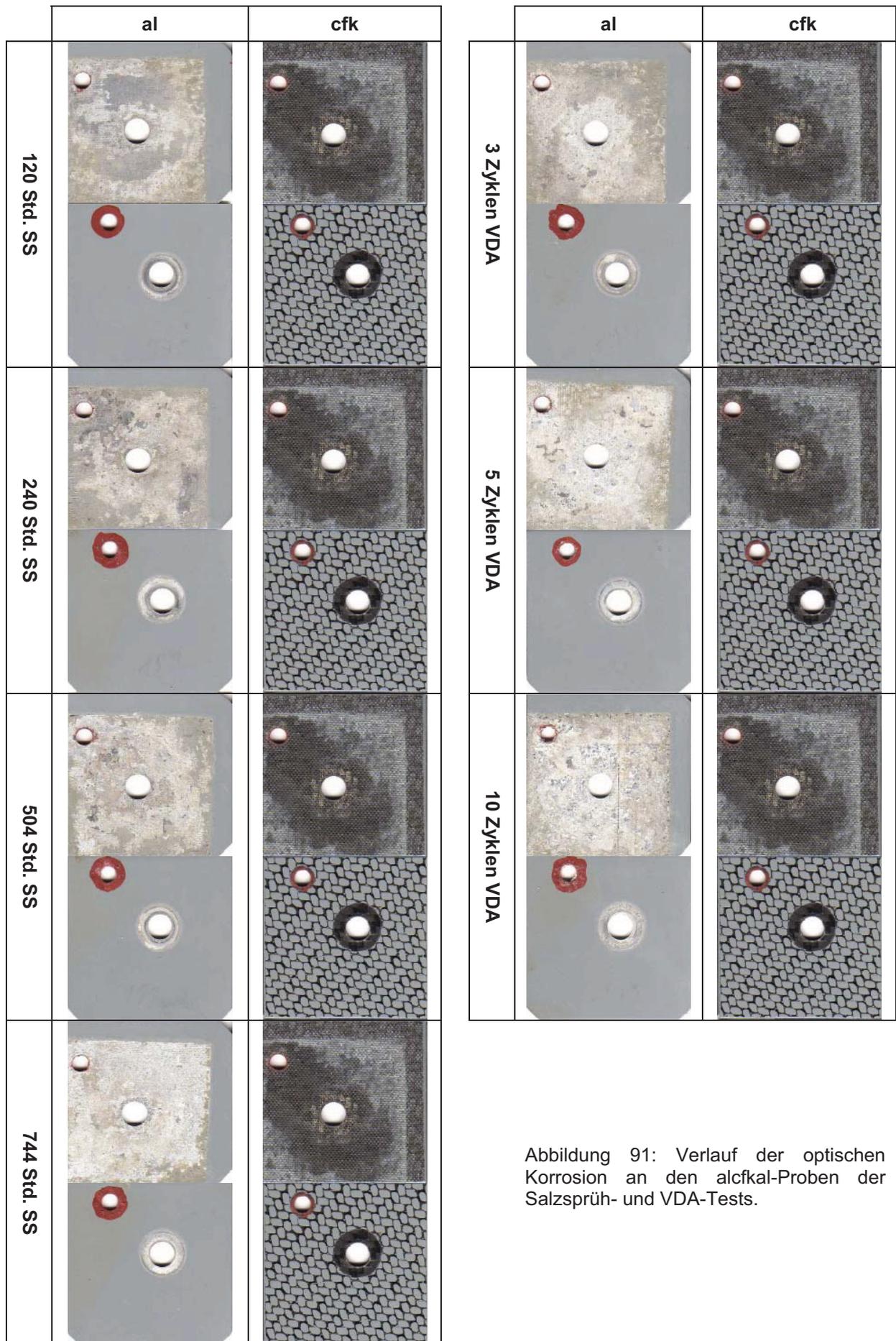


Abbildung 91: Verlauf der optischen Korrosion an den alcfkal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

---

## 9.9 Aluminium-Stahl-Aluminiumschraube (alstal)

### Salzsprühtest

Nach einer korrosiven Belastung von 120 Stunden treten an den Aluminiumplättchen kreisförmige Korrosionserscheinungen rund um das Bohrloch auf. Beim Stahl ist die Korrosionsfront weniger orientiert, im Kantenbereich der Probe sind bereits kleine Gebiete ohne Verzinkung vorhanden. Im Zeitabschnitt von 504 bis 744 Stunden weitet sich die runde Korrosionsfront an der Aluminiumoberfläche aus. Am Stahlblech entstand im Übergang zur Lackierung ein Saum unverzinkter Zonen. In den lackierten Bereichen der Stahlprobe ist eine Blasenbildung bzw. Lackunterwanderung erkennbar. Der Pressbereich der Schraube weist im Vergleich zu den alstgeo-Proben eine höhere Korrosionsbelastung auf, wobei die Begründung in der geringeren Presskraft der Aluminiumverschraubung und der daraus folgenden unterschiedlichen Spaltausbildung zu suchen ist. Schraube, Mutter und Unterlegscheibe werden kaum korrosiv belastet.

### VDA-Test

Hierbei erfolgt der anfängliche Korrosionsangriff wesentlich stärker als beim Salzsprühtest. Am Aluminiumplättchen hat sich eine deutlich erkennbare Korrosionszone sowie ein partiell mulden- und grabenförmiger Materialangriff ausgebildet. Das Stahlblech unterliegt einer hohen korrosiven Belastung, sodass in der gesamten Kontaktfläche unverzinkte Zonen auftreten. Mit zunehmender Prüfzeit verstärken sich die Korrosionserscheinungen an den Aluminium- und Stahlproben, weshalb am Ende der Testserie große Bereiche der Verzinkung abgetragen oder angegriffen sind. Die Kontaktfläche des Aluminiums weist einen flächigen bis muldenförmigen Abtrag mit geringer Eindringtiefe auf. An den Elementen der Verschraubung traten wiederum nur geringe Korrosionserscheinungen auf.

In Abbildung 92 bis Abbildung 95 sind die bereits erläuterten Zusammenhänge und Ergebnisse der Salzsprüh- und VDA-Prüfung ersichtlich. Probenfotos in Abbildung 96 vermitteln einen optischen Eindruck über den Korrosionsfortschritt.

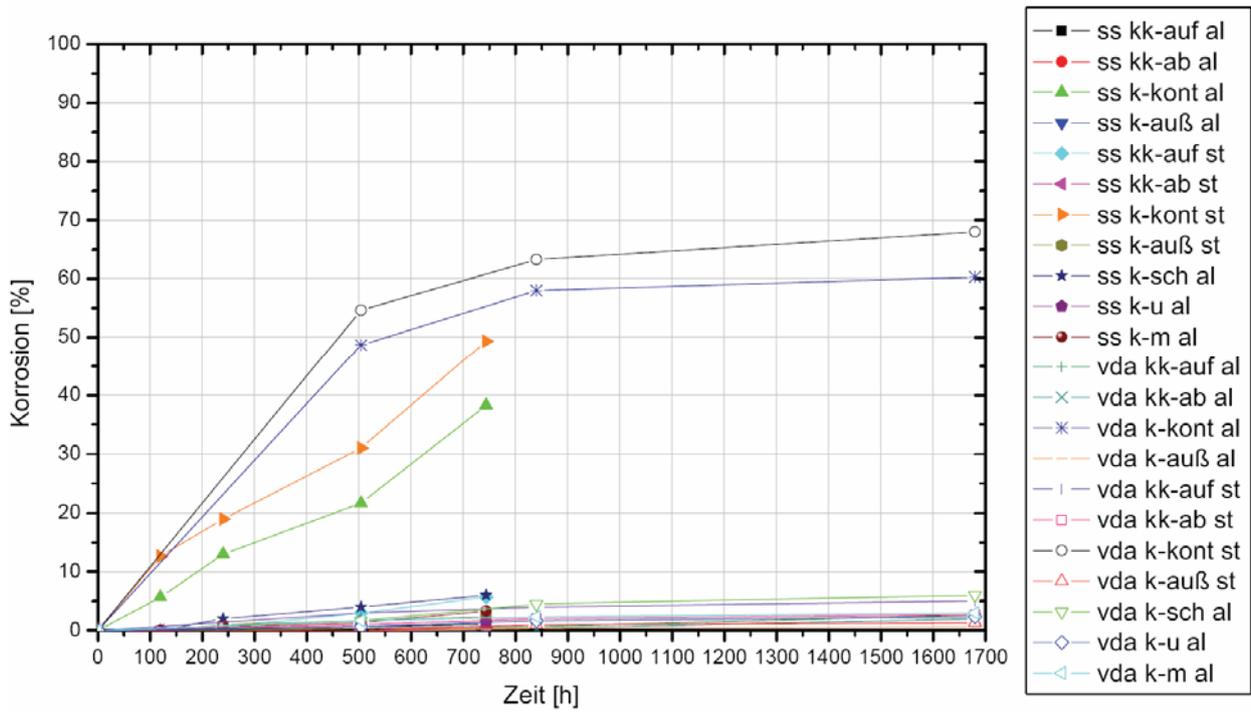


Abbildung 92: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstal

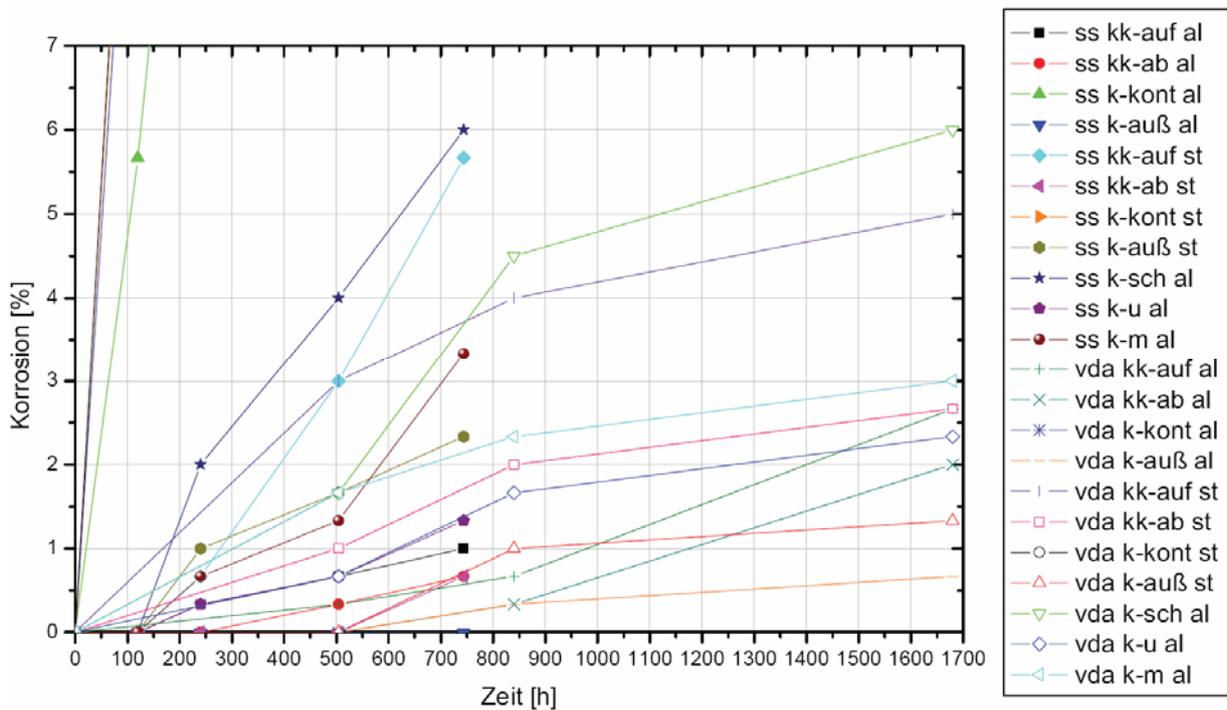


Abbildung 93: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstal (Vergrößerung)

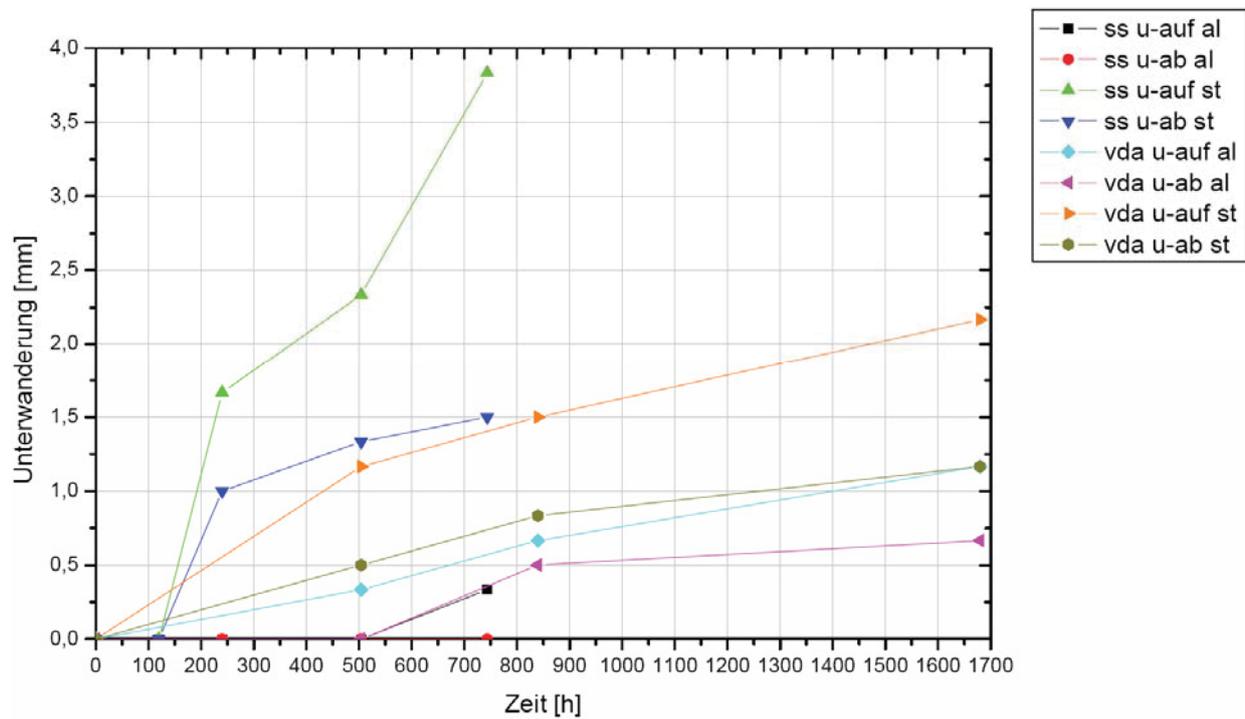


Abbildung 94: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstal

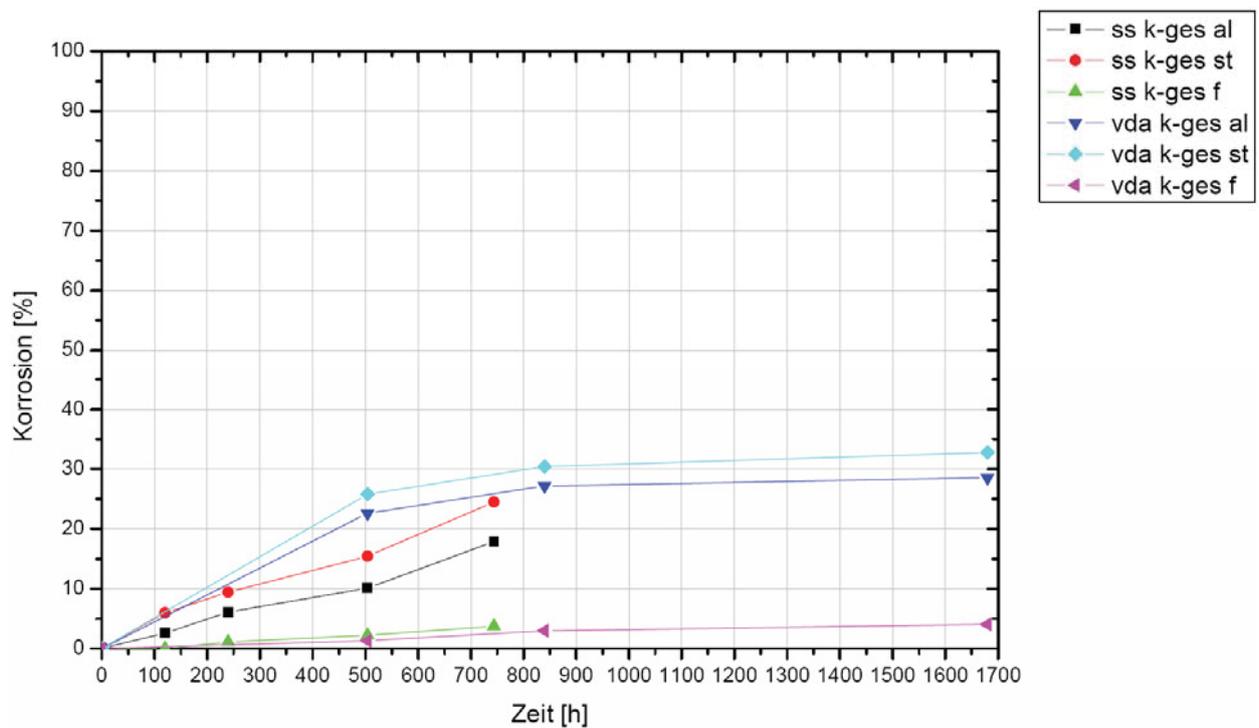


Abbildung 95: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstal

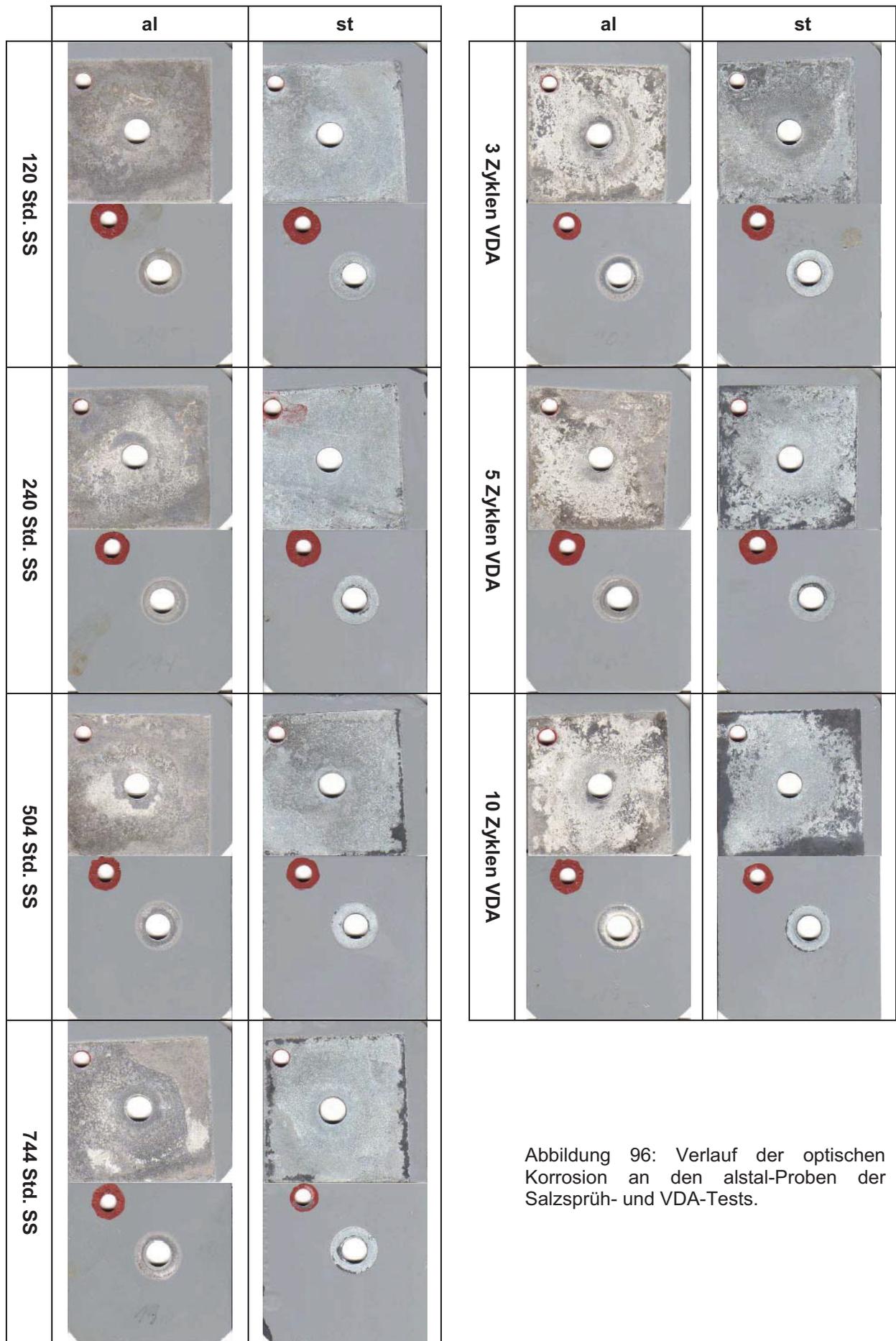


Abbildung 96: Verlauf der optischen Korrosion an den alst-al-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

## 9.10 Magnesium-Magnesium-Aluminiumschraube (mgmgal)

### Salzsprühtest

Obwohl in diesem Beispiel derselbe Werkstoff mit einander verbunden wurde, weisen die beiden Probeplättchen nach 120 Stunden einen relativ hohen Korrosionsgrad in Form eines flächenförmigen Abtrags sowie Löcher und Mulden in der Fügefläche auf. Im KTL-beschichteten Bereich der Kontaktebene als auch an der Außenseite der Probe sind fadenförmige Lochfraßstellen erkennbar, entlang der Beschichtungsgrenze (Übergang KTL auf Metall) haben sich Korrosionsgräben ausgebildet. Mit fortschreitender Prüfdauer verstärken sich die Korrosionserscheinungen, sodass nach 504 Stunden entsprechende Materialverluste im Auftropfbereich sowie im Abtropfpunkt feststellbar sind. Die Unterwanderung der KTL-Beschichtung wächst im selbigen Ausmaß mit. Gegen Ende der Testserie ist eine große Menge des Magnesiums wegkorrodiert, geringe Restmengen verbleiben im Bereich der Verschraubung. Kontaktkorrosionsgräben rund um das Fügeelement konnten nicht festgestellt werden. Schraube, Mutter und Unterlegscheiben sind vor allem im Kontaktbereich mit dem Magnesium starker korrosiver Belastung ausgesetzt.

### VDA-Test

Im Vergleich zum Salzsprühtest verläuft hier bei der VDA-Prüfung der Korrosionsangriff etwas langsamer und äußert sich dementsprechend in geringeren Finalwerten. Nach dem dritten Belastungszyklus ist ein erheblicher Anteil der Kontaktfläche korrodiert und weist ebenfalls Lochfraßstellen und Korrosionsmulden auf. Im Verlauf der 10 Prüfzyklen entsteht durch den Abtrag des Magnesiums an beiden Seiten des Kantenbereiches eine scharfkantige Korrosionsfront. Rund um das Verschraubungselement ist die Ausbildung eines deutlichen Kontaktkorrosionsringes, bestehend aus Löchern und Mulden, erkennbar. Die Auflagefläche der Unterlegscheibe bleibt bis zum Ende der Prüfreihe weitgehend gegen einen Korrosionsangriff beständig. Der Masseverlust an der Probe ist deutlich geringer als im Salzsprühtest.

Weiter Informationen bezüglich des Korrosionsverhaltens von Magnesium im VDA- und Salzsprühtest sind in Abbildung 97 bis Abbildung 100 ersichtlich sowie in Abbildung 101 fotografisch hinterlegt. Da es sich hier um eine gleichartige Verbindung handelt, wird auf die Darstellung des zweiten Probeplättchens verzichtet.

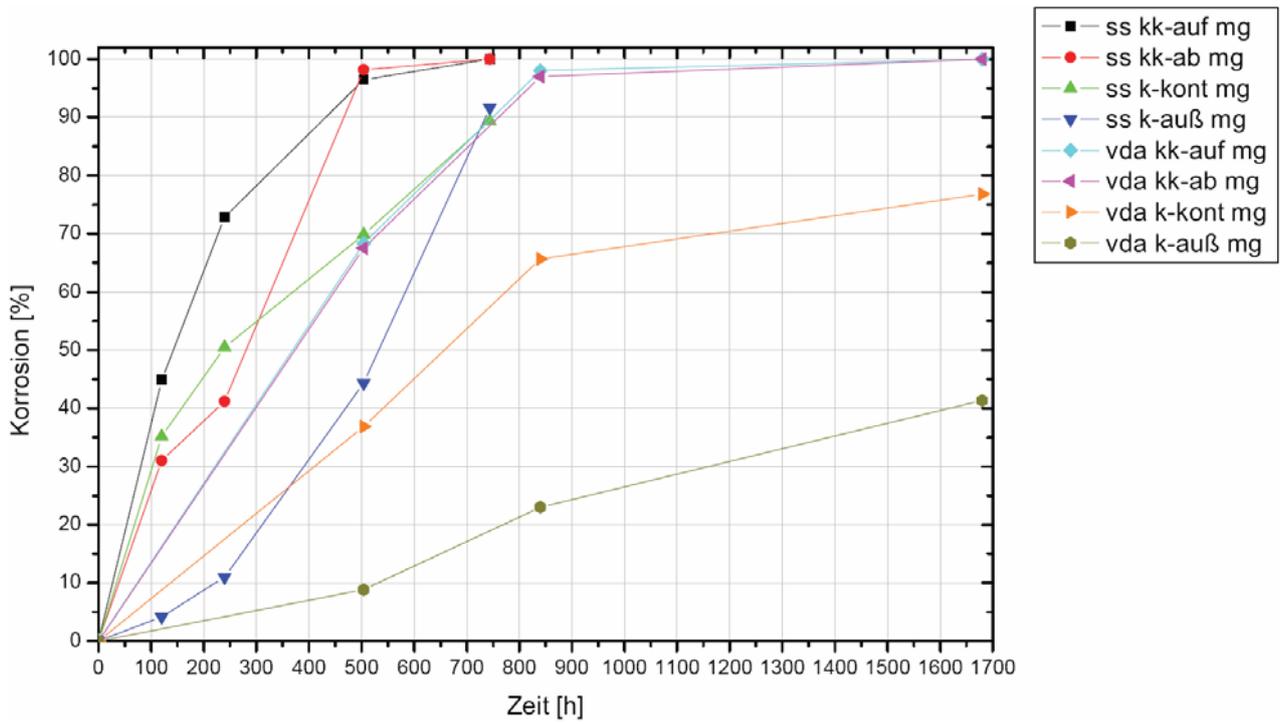


Abbildung 97: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgmgal (Teilbild I)

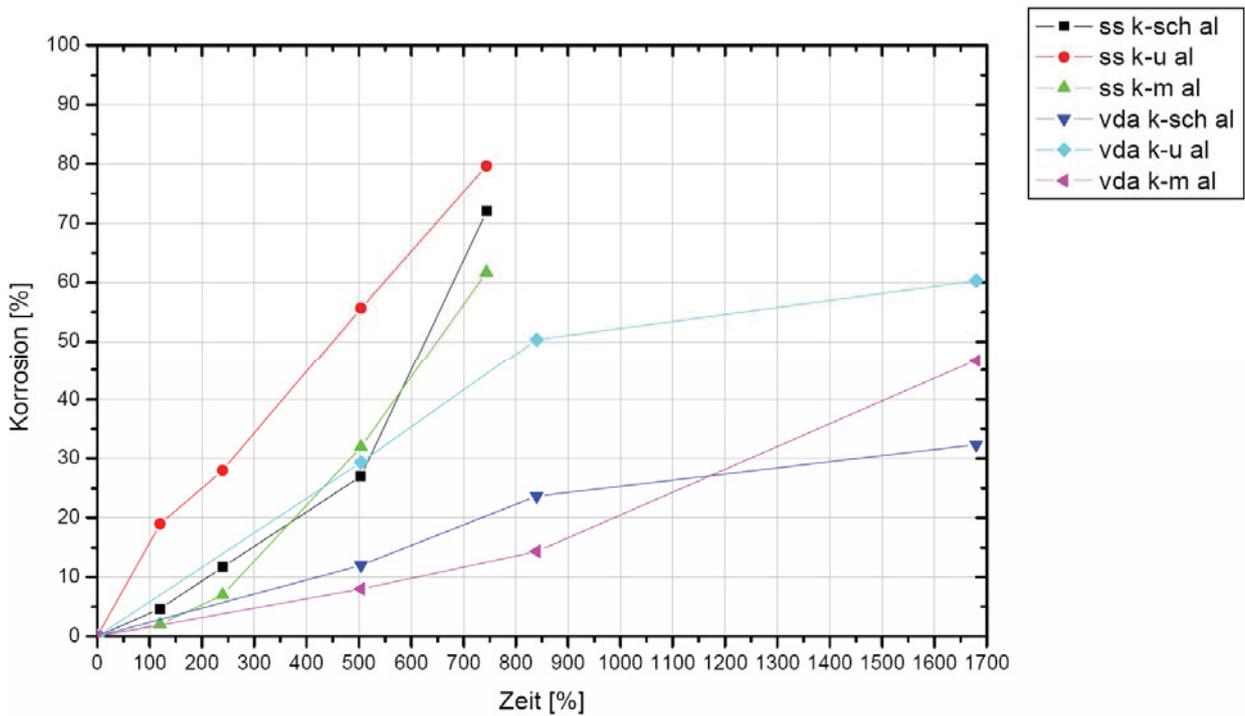


Abbildung 98: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgmgal (Teilbild II)

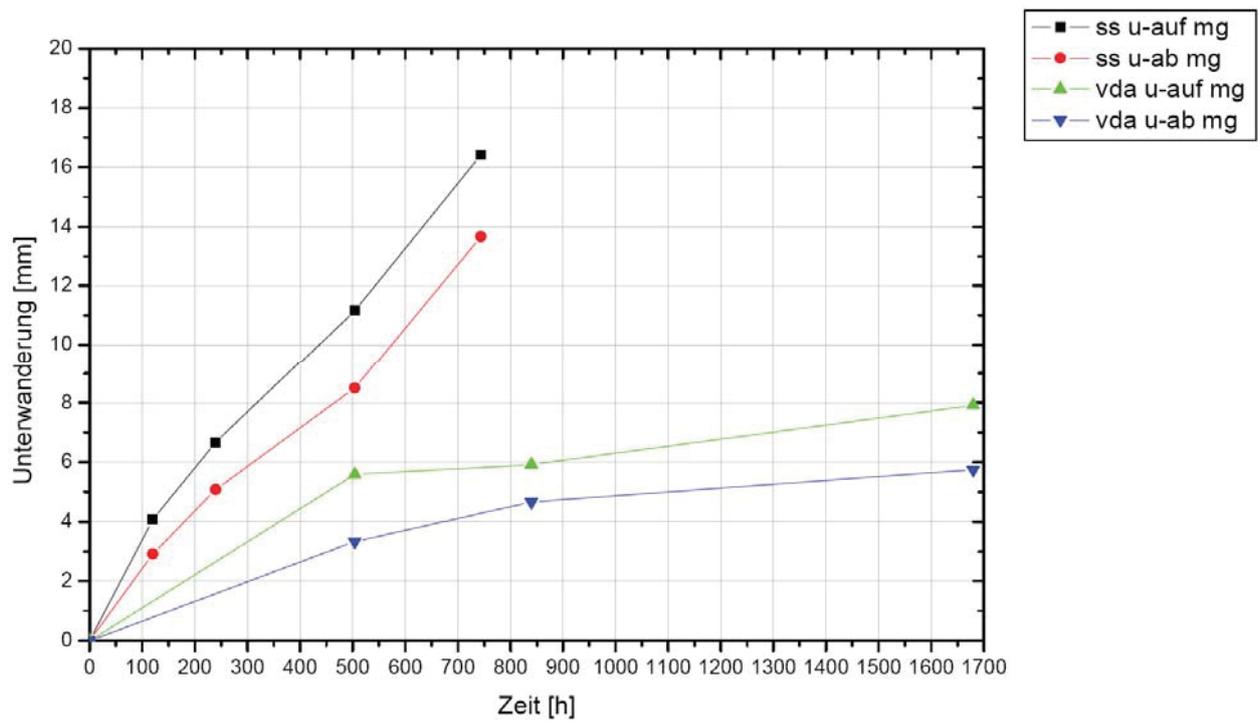


Abbildung 99: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von mgmgal

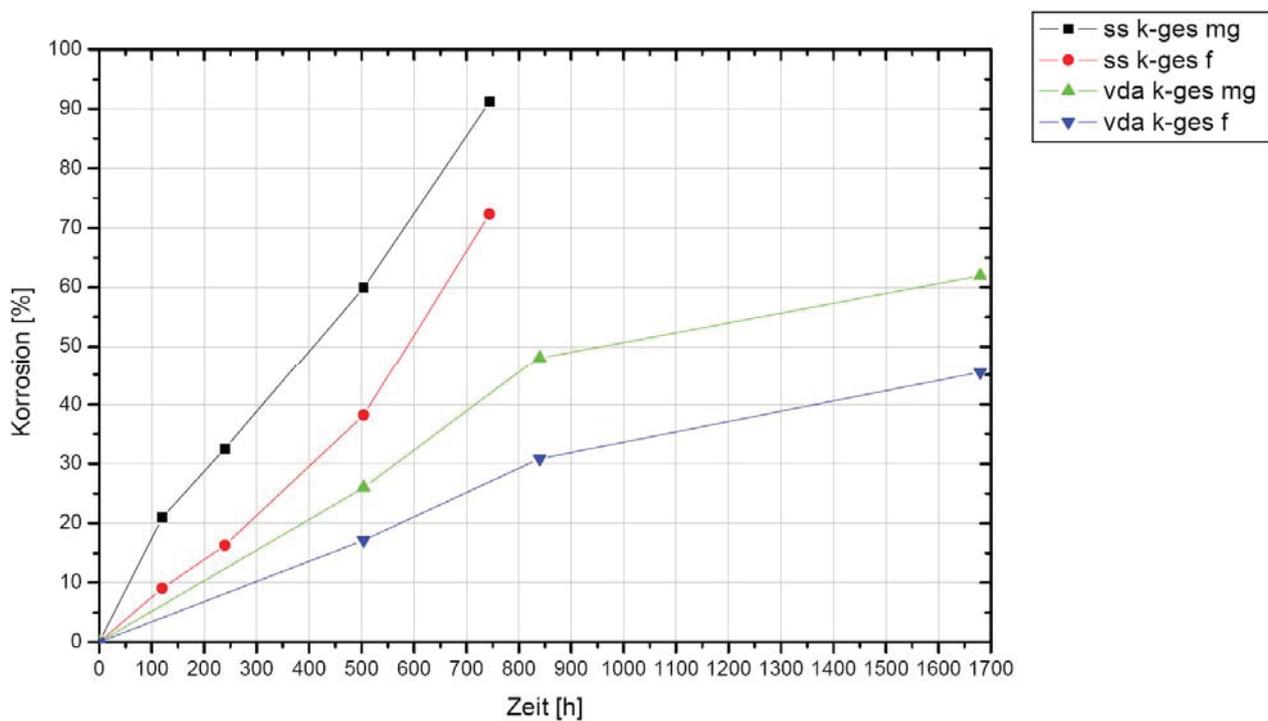


Abbildung 100: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von mgmgal

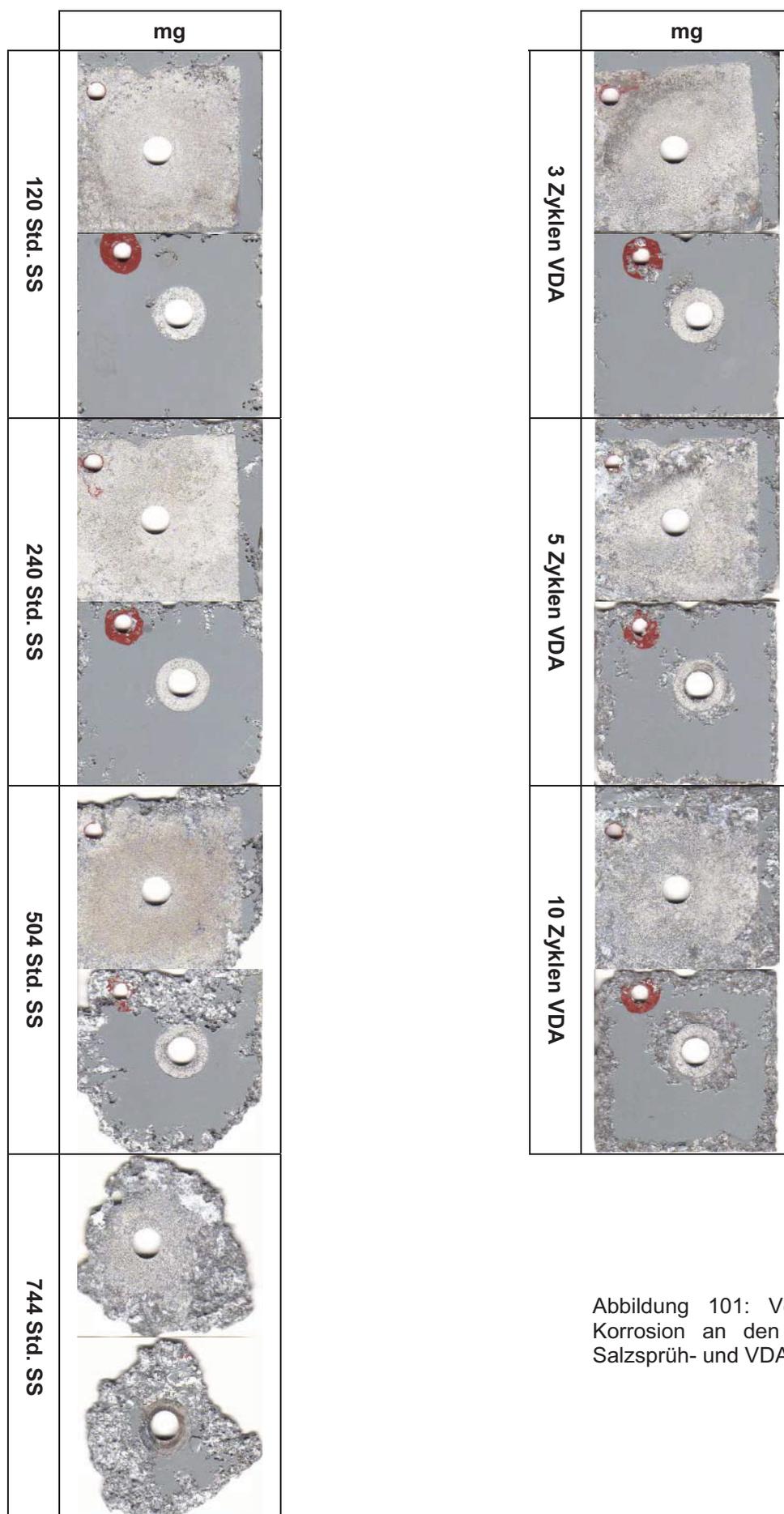


Abbildung 101: Verlauf der optischen Korrosion an den mgmgal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

## 9.11 Magnesium-CFK-Aluminiumschraube (mgcfkal)

### Salzsprühtest

Aufgrund des elektrochemisch edleren Potentials des Verbundwerkstoffes sind schon nach 120 Stunden Salzsprühtest, so wie bei allen anderen CFK-Kombinationen, starke Korrosionsangriffe am Magnesium bemerkbar. Diese äußern sich in Form eines flächenförmigen Angriffs im Kontaktbereich und den zahlreichen Lochfraßerscheinungen am Probenkörper. Mit zunehmender Prüfdauer weitet sich das Korrosionsgebiet aus, sodass nach 504 Stunden ein erheblicher Anteil des Magnesiums korrodiert ist. Im beschriebenen Zeitraum durchdringen die loch- und muldenförmigen Korrosionserscheinungen das Magnesiumplättchen. Die entstandenen Korrosionsprodukte des Magnesiums wachsen in die Oberfläche des CFK ein, und könnten dieses unter Umständen beschädigen (vor allem wenn das CFK-Bauteil mechanisch belastet wird und scharfkantige Korrosionsprodukte einzelne Fasern durchtrennen). Am Ende der Prüfreihe ist der Großteil der Magnesiumprobe korrodiert, der Rest verbleibt um bzw. unter den Unterlegscheiben aus Aluminium. In dieser Probenkombination werden die Verschraubungskomponenten durch den Magnesiumzerfall sowie durch das elektrochemisch edle CFK korrosiv belastet; magnesiumseitige Bauteile werden stärker angegriffen.

### VDA-Test

Das Korrosionsverhalten des Magnesiums und dessen Erscheinungsformen entsprechen weitgehend dem Ergebnis aus der Salzsprühprüfung. Der Angriff erfolgt ebenfalls flächen-, mulden- und lochartig am gesamten Probenkörper, der Masseverlust an Magnesium ist hingegen geringer. Wie bei den vorhergehenden mgmgal-Proben bildet sich durch den beidseitigen korrosiven Angriff entlang der Ränder eine scharfkantige Form aus. Der durch Kontaktkorrosion induzierte Korrosionsring rund um das Fügeelement ist wiederum erkennbar.

In Abbildung 102 bis Abbildung 105 sind die Korrosionsverläufe der einzelnen Probenbereiche anhand deren Graphen ersichtlich, Abbildung 106 vermittelt einen optischen Eindruck über den Prüfverlauf.

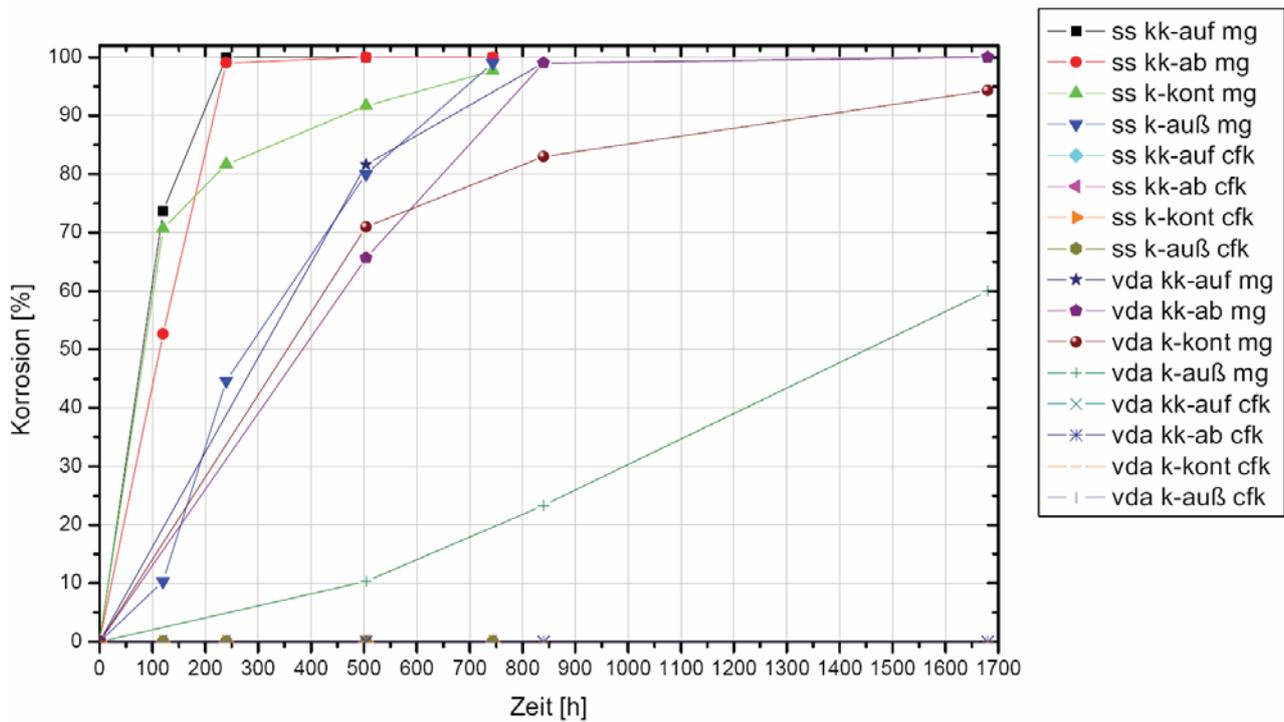


Abbildung 102: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgcfkal (Teilbild I)

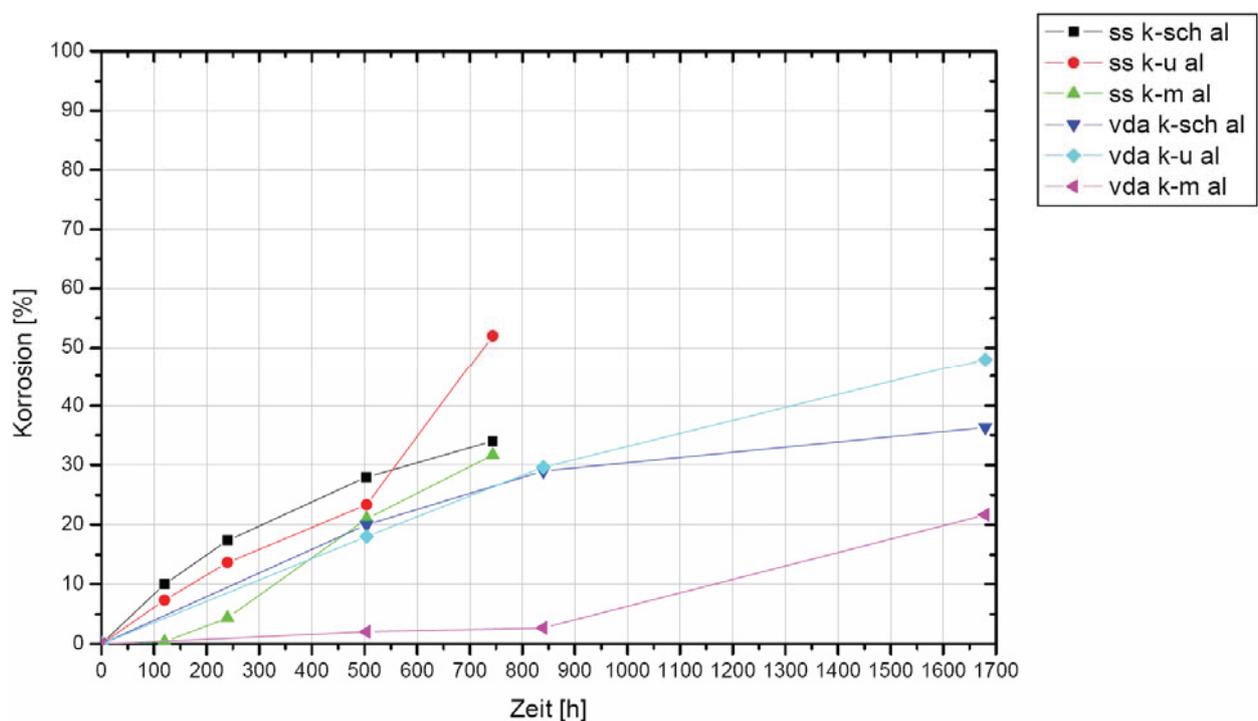


Abbildung 103: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgcfkal (Teilbild II)

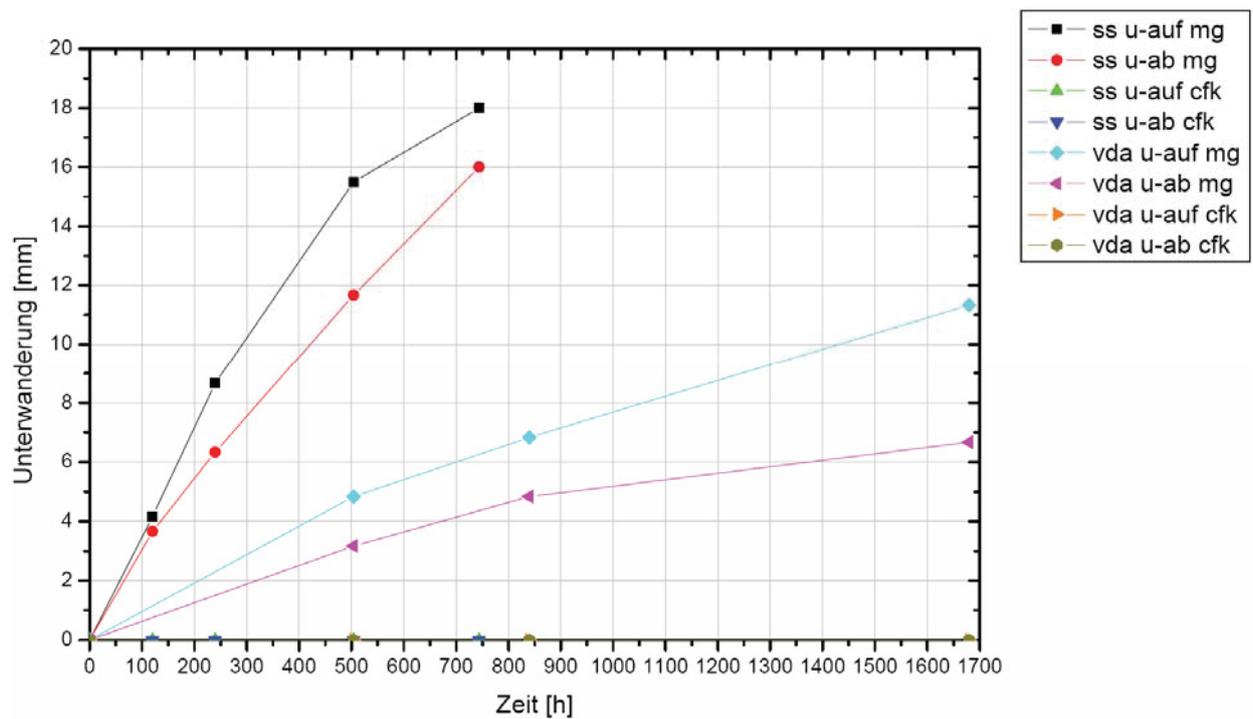


Abbildung 104: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von mgcfkal

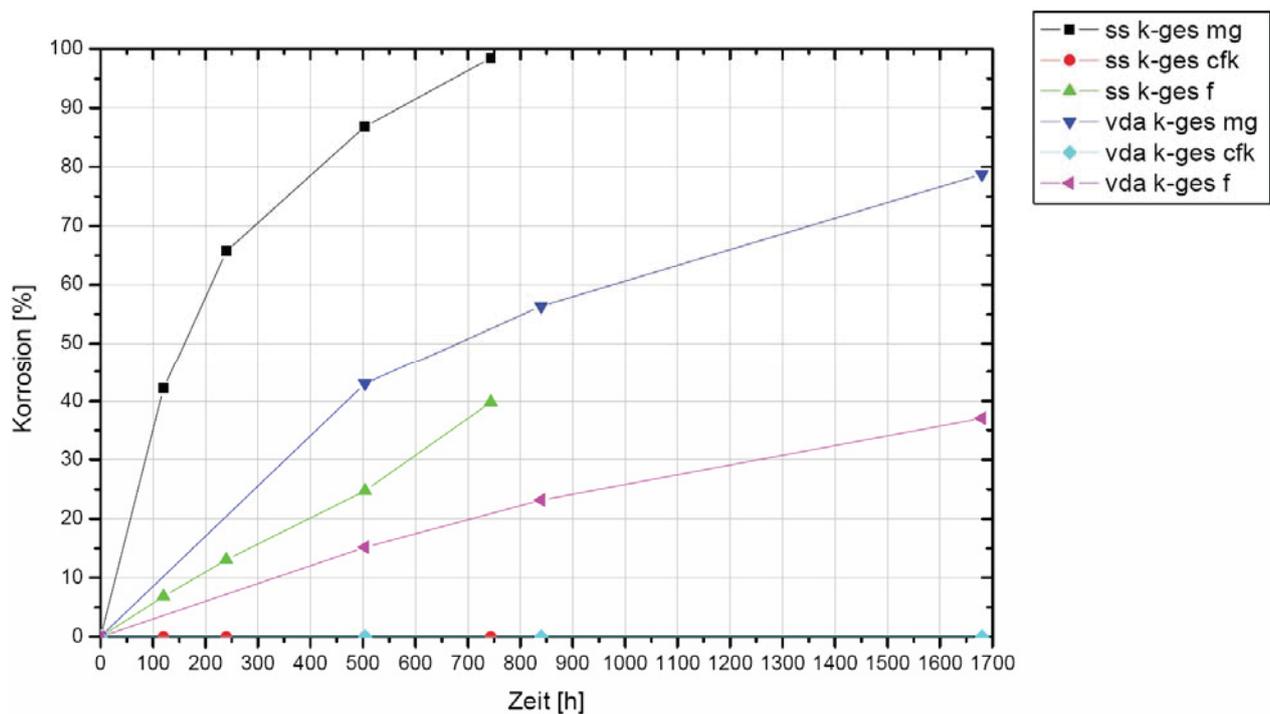


Abbildung 105: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von mgcfkal

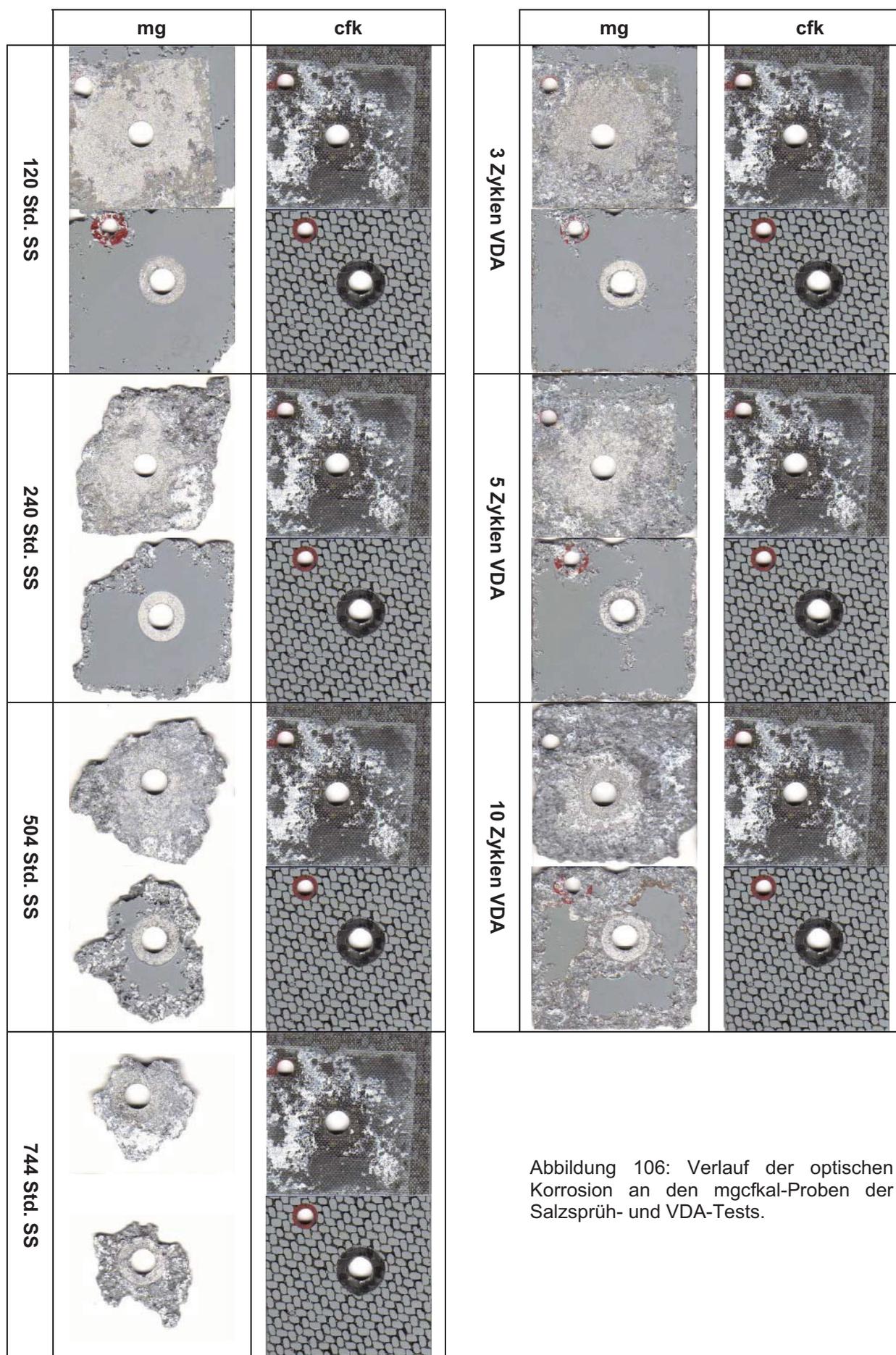


Abbildung 106: Verlauf der optischen Korrosion an den mgcfkal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

---

## 9.12 Magnesium-Stahl-Aluminiumschraube (mgstal)

### Salzsprühtest

Aufgrund des hohen Potenzialunterschiedes der beiden Werkstoffe und dem Magnesiumzerfall bedingten hohen pH-Wert, sind nach 120 Stunden die Kontaktflächen beider Werkstoffe stark korrodiert. Der etwas höhere Korrosionsgrad am Stahlblech ist durch den pH-Wert bedingten hohen Zinkabtrag und der starken Lackunterwanderung am Blech zu erklären. Am Magnesium sind neben flächenförmigem Abtrag im Kontaktbereich auch tiefe Lochfraßstellen und Mulden am Rand der Probe erkennbar. Mit Fortschreiten der Prüfdauer und des Korrosionsgrades wird verstärkt die Zinkschicht abgetragen, sodass nach 240 Stunden kaum noch Zink an der Stahloberfläche vorhanden ist. Dadurch steht nun das wesentlich höhere elektrochemische Potenzial des blanken Stahlbleches dem Magnesium gegenüber, welches nun durch den enormen Potenzialunterschied verstärkt korrodiert. Nach 504 Stunden ist das Magnesium nicht mehr vorhanden, weshalb das Stahlblech die restliche Prüfzeit alleine in der salzhaltigen Atmosphäre weiterkorrodiert. Am Ende des Prüfvorganges sind eindeutig Rotrostflecken an der Stahloberfläche zu erkennen. Magnesiumseitige Verschraubungselemente werden wiederum stärker korrosiv belastet als jene auf der Stahlseite.

### VDA-Test

Nach 3 Prüfzyklen ist die Magnesium- und Stahlprobe in der Kontaktfläche ähnlich dem Salzsprühtest weitgehend korrodiert. An der Stahlprobe sind starke Lackunterwanderungen und ein hoher Zinkabtrag erkennbar. Das Magnesium weist wiederum flächen-, mulden- und lochförmigen Materialabtrag auf. Außerdem ist eine gleichmäßig voranschreitende Korrosions- und Unterwanderungsfront, ausgehend von den Probekanten, zu beobachten. In den Grundzügen entspricht der VDA-Test der Salzsprühprüfung, Letzterer ist jedoch mit einem höheren Masseabtrag verbunden.

Weitere Informationen bezüglich des Korrosionsverhaltens der mgstal-Verbindung im VDA- und Salzsprühtest sind in Abbildung 107 und Abbildung 110 ersichtlich sowie in Abbildung 111 fotografisch hinterlegt.

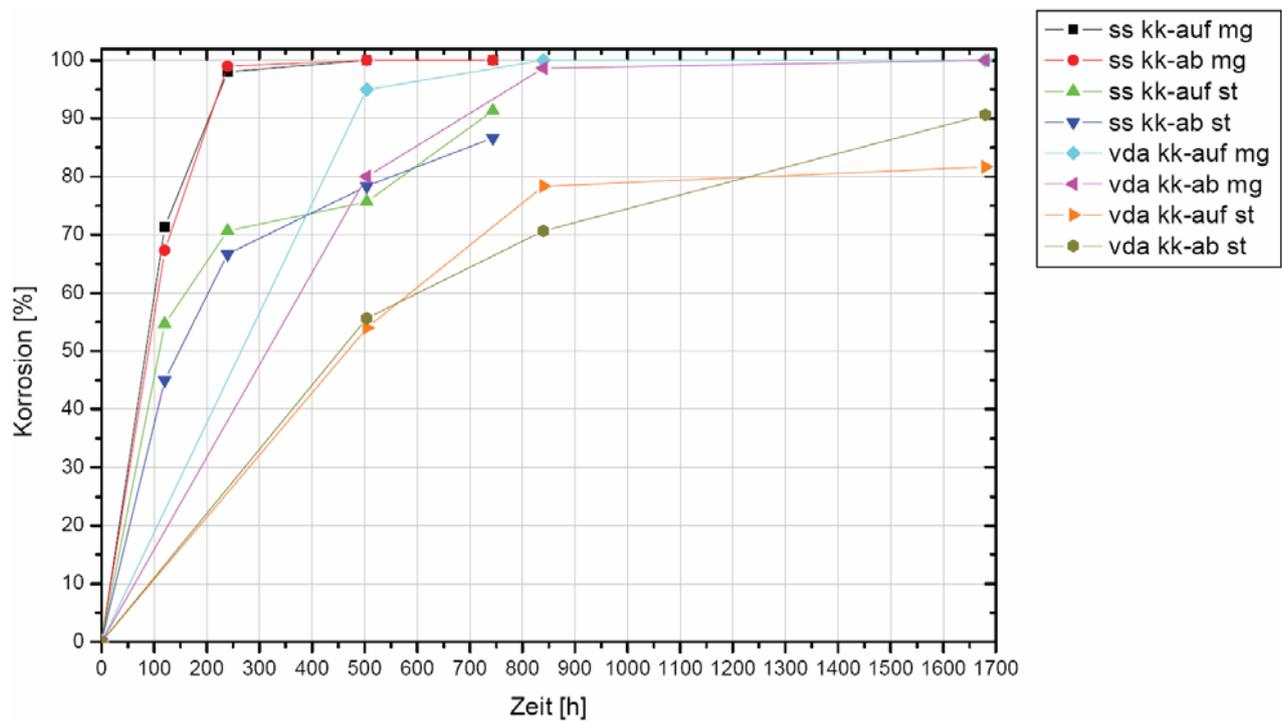


Abbildung 107: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgstal (Teilbild I)

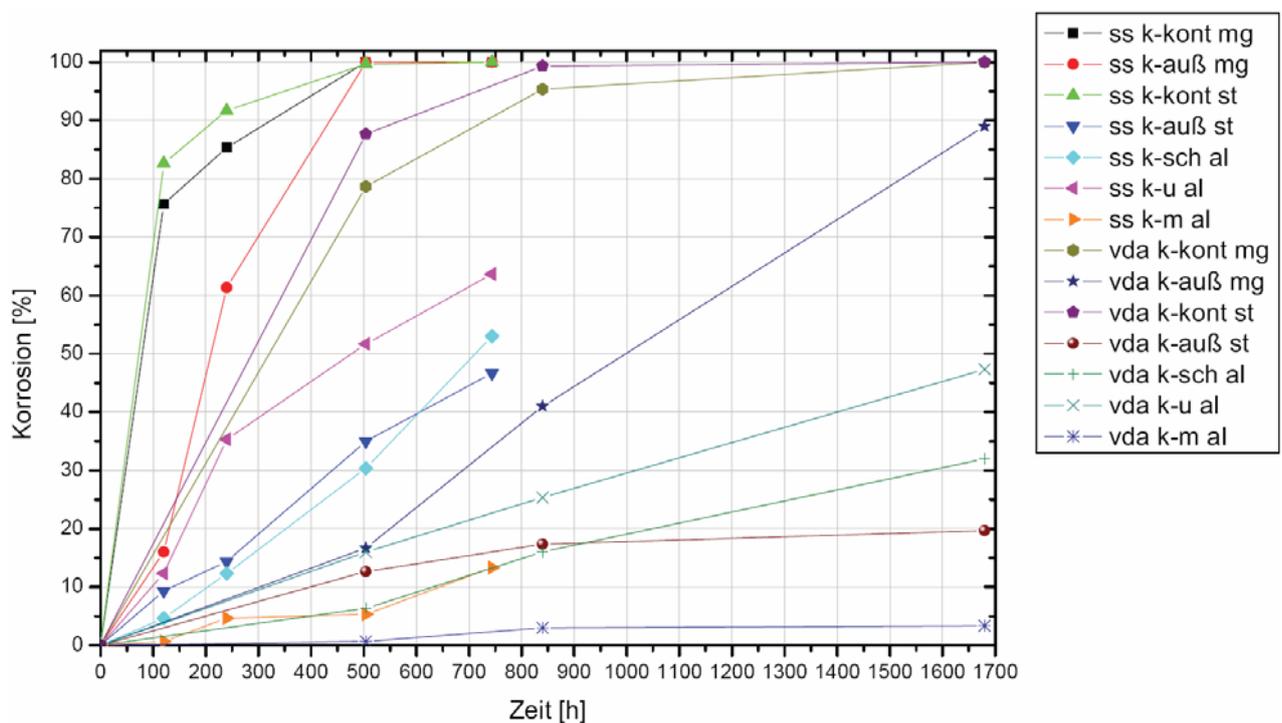


Abbildung 108: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgstal (Teilbild II)

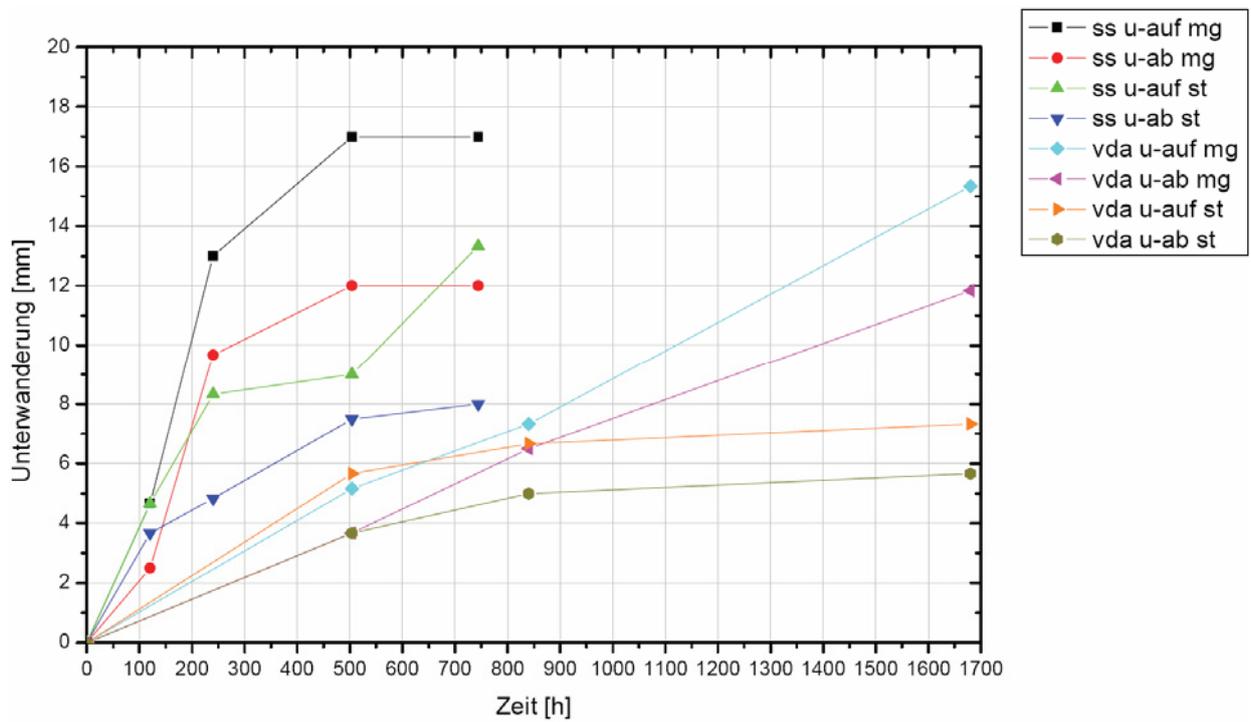


Abbildung 109: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von mgstal

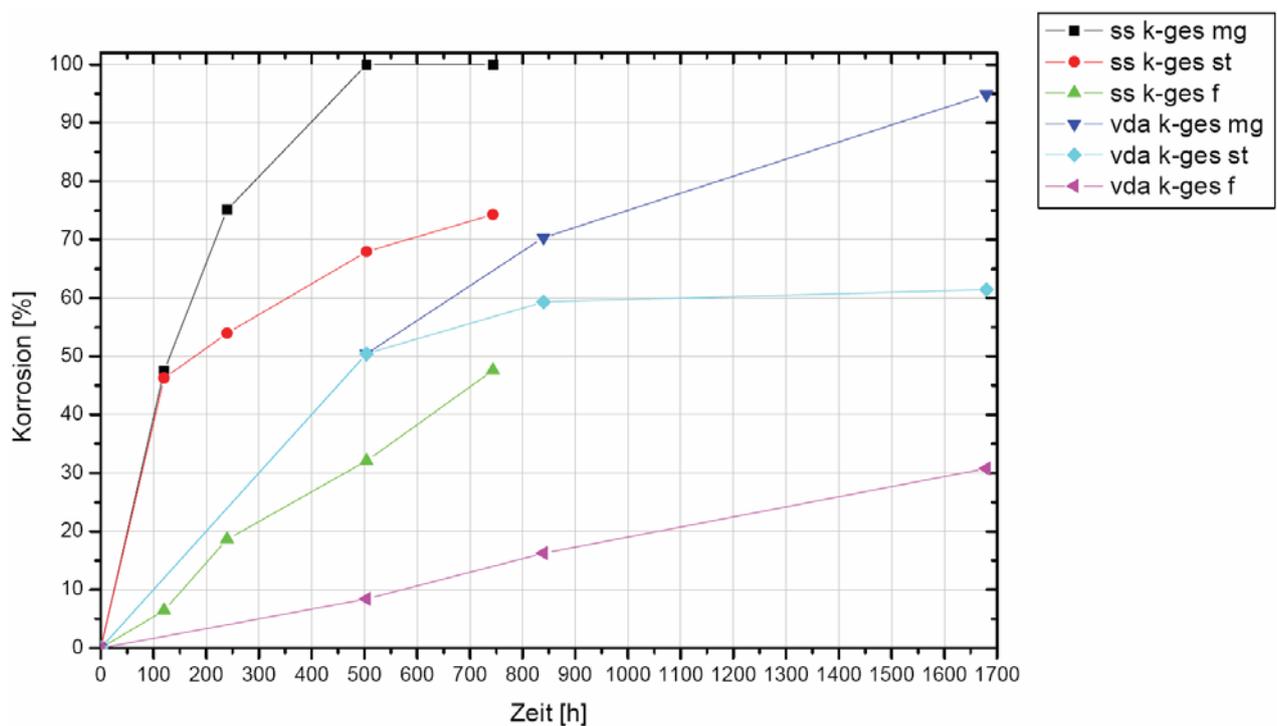


Abbildung 110: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von mgstal

	mg	st		mg	st
120 Std. SS			3 Zyklen VDA		
240 Std. SS			5 Zyklen VDA		
504 Std. SS	Probe nicht mehr vorhanden		10 Zyklen VDA		
744 Std. SS	Probe nicht mehr vorhanden				
	Probe nicht mehr vorhanden				

Abbildung 111: Verlauf der optischen Korrosion an den mgstal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

## 9.13 CFK-Stahl-Aluminiumschraube (cfkstal)

### Salzsprühtest

Ähnlich der cfkstgeo-Verbindung ist bei dieser Testserie der Stahl ebenfalls einer hohen Korrosionsbelastung durch das elektrochemisch edlere CFK ausgesetzt. Nach 120 Stunden sind die ersten unverzinkten Oberflächenbezirke an der Stahlprobe in der Kontaktebene erkennbar. Folglich bildet sich an einzelnen, kleinen Stellen Rotrost aus. Mit voranschreitender Prüfzeit weiten sich die Korrosionszonen aus und unterwandern teilweise die KTL-Beschichtung im Randbereich der Kontaktebene und an der Probenaußenseite. Auffällig ist wiederum das tiefe Eindringen der KTL-Flüssigkeit in das Probeninnere, was auf die Oberflächenstruktur des Laminatwerkstoffes zurückzuführen ist. Schraube, Mutter und Unterlegscheibe werden hauptsächlich an der CFK-zugewandten Probenseite korrodiert. An der CFK-Oberfläche selbst sind außer den Rotrostabdrücken des Stahls keine Korrosionserscheinungen bemerkbar.

### VDA-Test

Die aus dieser Testserie gewonnen Informationen über das Korrosionsverhalten der cfkstal-Proben entsprechen weitgehend dem Ergebnis des Salzsprühtests. Bei der durchgeführten Prüfung liegt das Endresultat für die optische Korrosion höher, die Werte der Unterwanderung hingegen niedriger als bei der Salzsprühprüfung.

Die beschriebenen Erkenntnisse aus beiden Prüfungen sind anhand der ermittelten Graphen in Abbildung 112 bis Abbildung 115 nachvollziehbar. Eine fotografische Zusammenstellung der Proben in Abbildung 116 soll den Korrosionsfortschritt verdeutlichen.

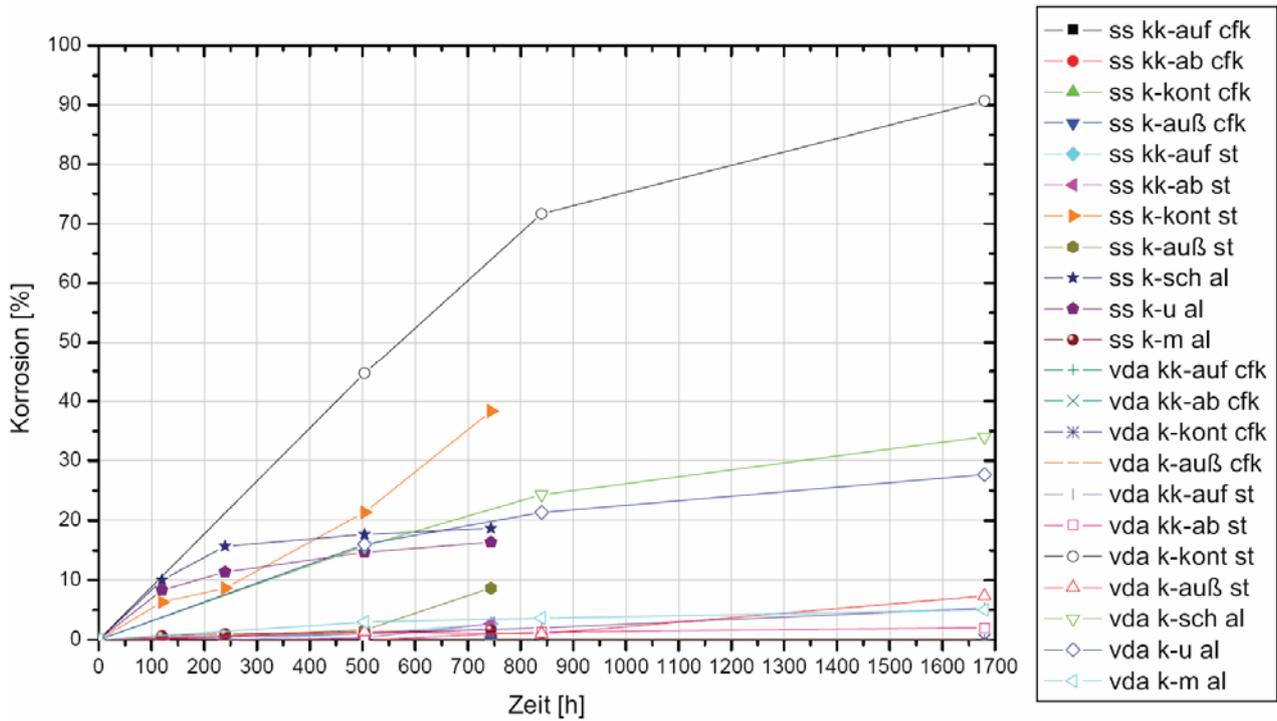


Abbildung 112: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstal

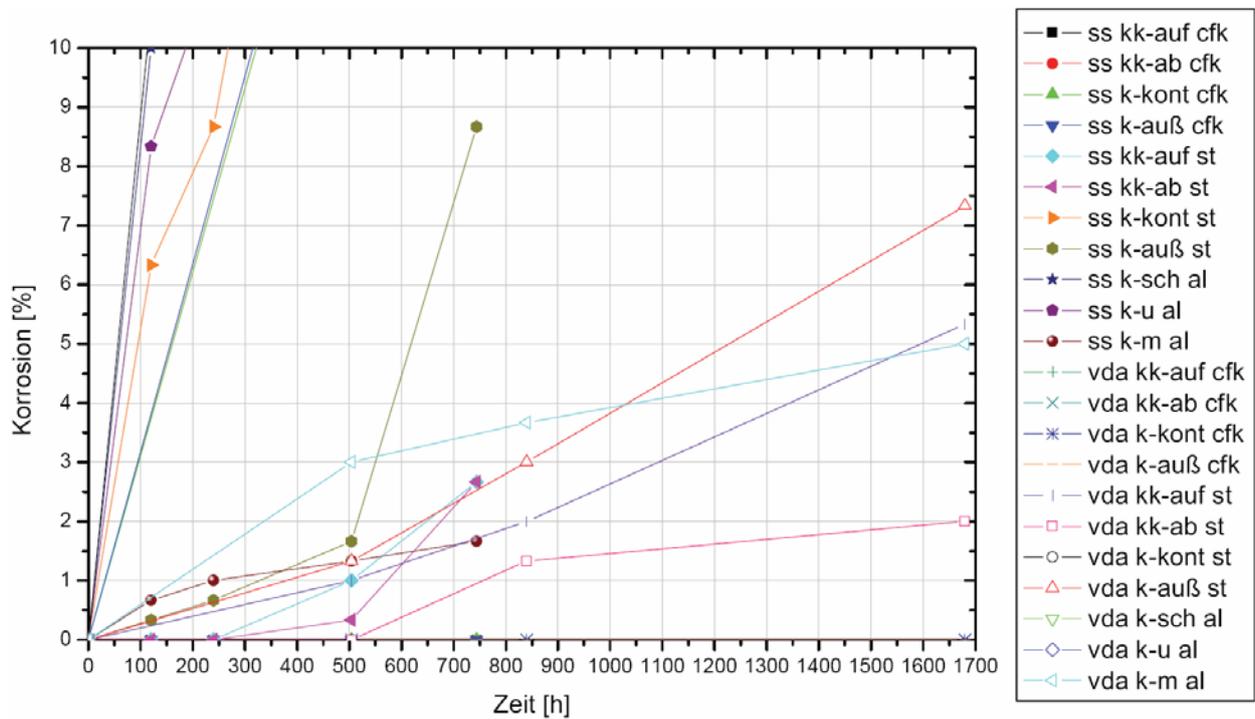


Abbildung 113: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstal (Vergrößerung)

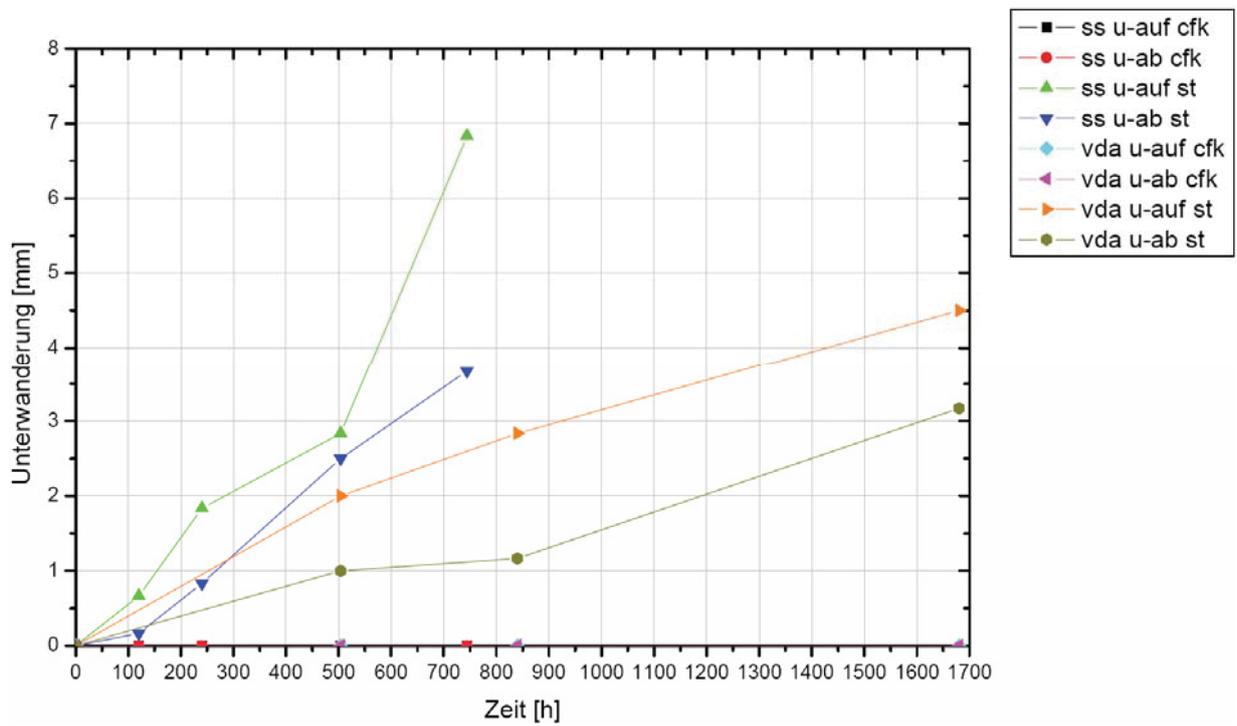


Abbildung 114: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von cfkstal

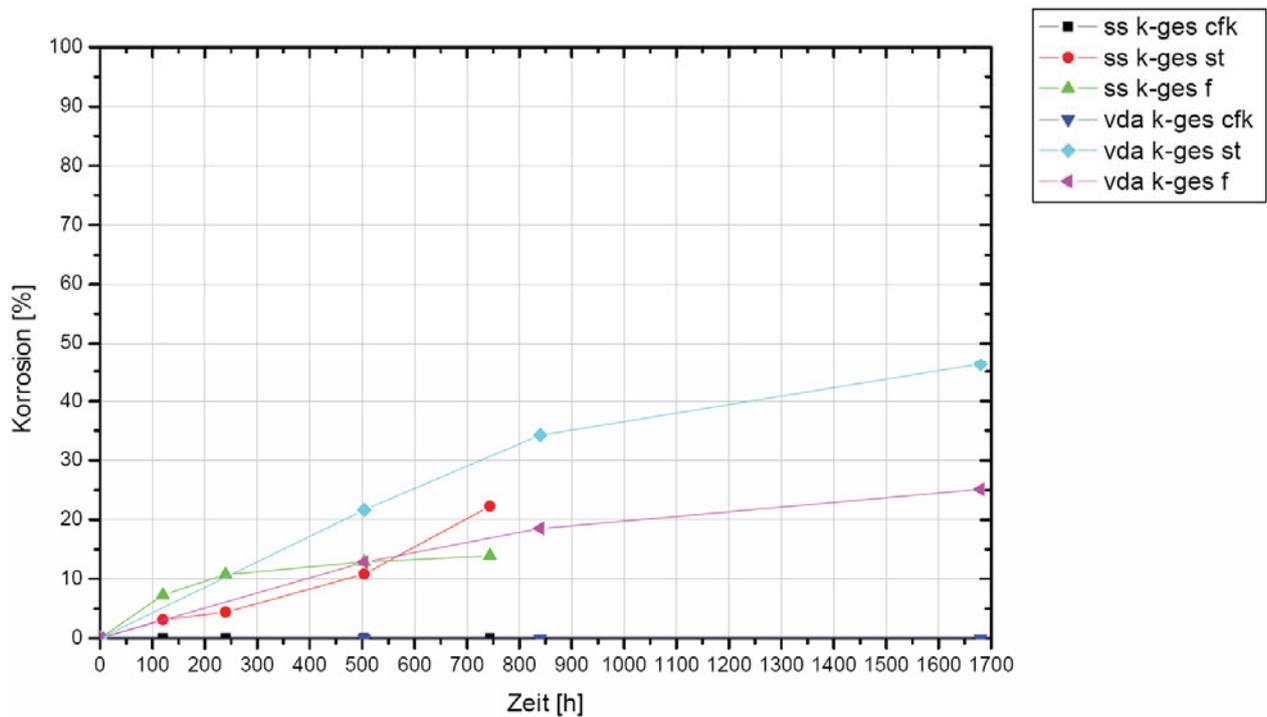


Abbildung 115: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von cfkstal

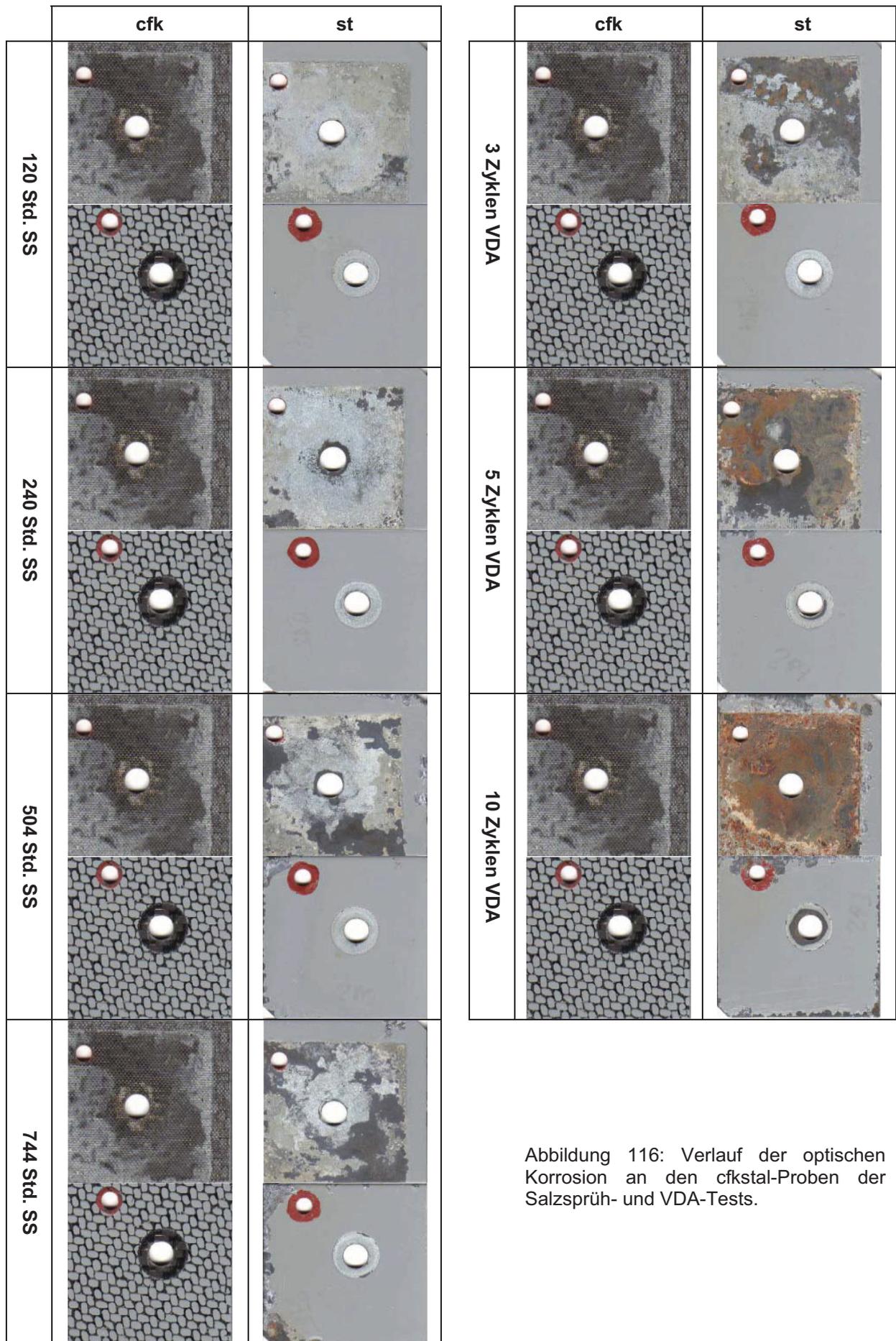


Abbildung 116: Verlauf der optischen Korrosion an den cfkstal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.

## 9.14 Gravimetrische Messung

Wie bereits in Kapitel 8.6 erläutert, sind gravimetrische Messungen nur an Magnesiumverbindungen möglich. Die Bestimmung des Gewichtsverlustes der Magnesiumplättchen ist mit einer gewissen Messungsgenauigkeit verbunden, da eine vollständige Entfernung der Korrosionsprodukte aus den Poren und den Unterwanderungen der korrodierten Oberfläche nicht möglich war. Dennoch sind gewisse Trends anhand der Graphen in Abbildung 117 erkennbar.

So ist bei Stahl-Magnesium-Kombinationen mit einer hohen Korrosions- und Abtragsrate zu rechnen. CFK-Verbindungen erfahren ebenfalls starke Korrosionserscheinungen. Bei genauerer Betrachtung der Graphen erkennt man, dass Magnesium-Aluminium-Kombinationen ein geringes Endresultat bezüglich des Gewichtsverlustes aufweisen als jene aus Magnesium-Magnesium. Dies erscheint zunächst unlogisch, kann aber durch die gegenseitige Beeinflussung (beide Magnesiumteile korrodieren und erzeugen einen extrem basischen Elektrolyten) erklärt werden. Allgemein ist der Salzsprühtest mit einem höheren Gewichtsverlust verbunden als die VDA-Prüfung.

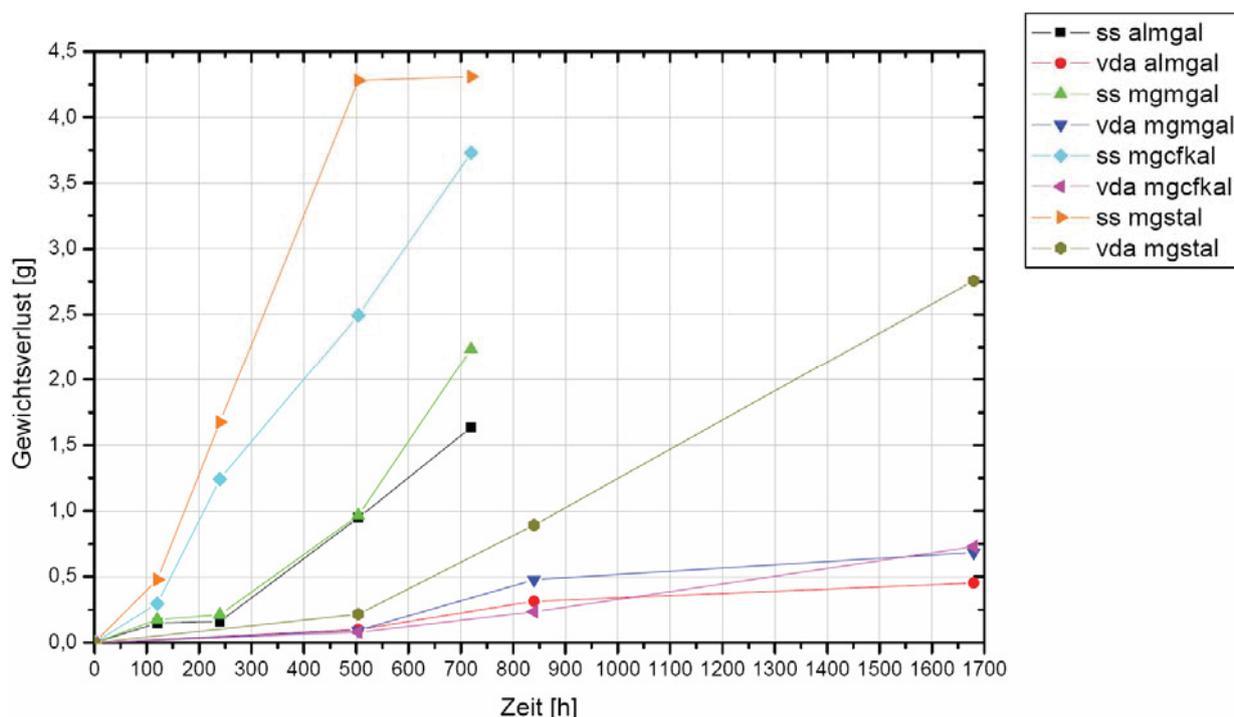


Abbildung 117: Zeitlicher Verlauf des Gewichtsverlustes bei mg-Verbindungen

## 9.15 Stromdichte-Potenzialmessungen (IU-Kurven)

Das Prinzip der Stromdichte-Potenzialmessung wurde bereits in Kapitel 3.6 beschrieben. Die Messung selbst erfolgte mit Hilfe eines Jaissle-Potenziostaten (IMP 88 PC) in einer 5-%igen NaCl-Lösung bei 35°C und gleichzeitiger Argonbegasung. Diese gewählten Parameter entsprechen weitgehend den Bedingungen im Salzsprühtest. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in Abbildung 118 dargestellt.

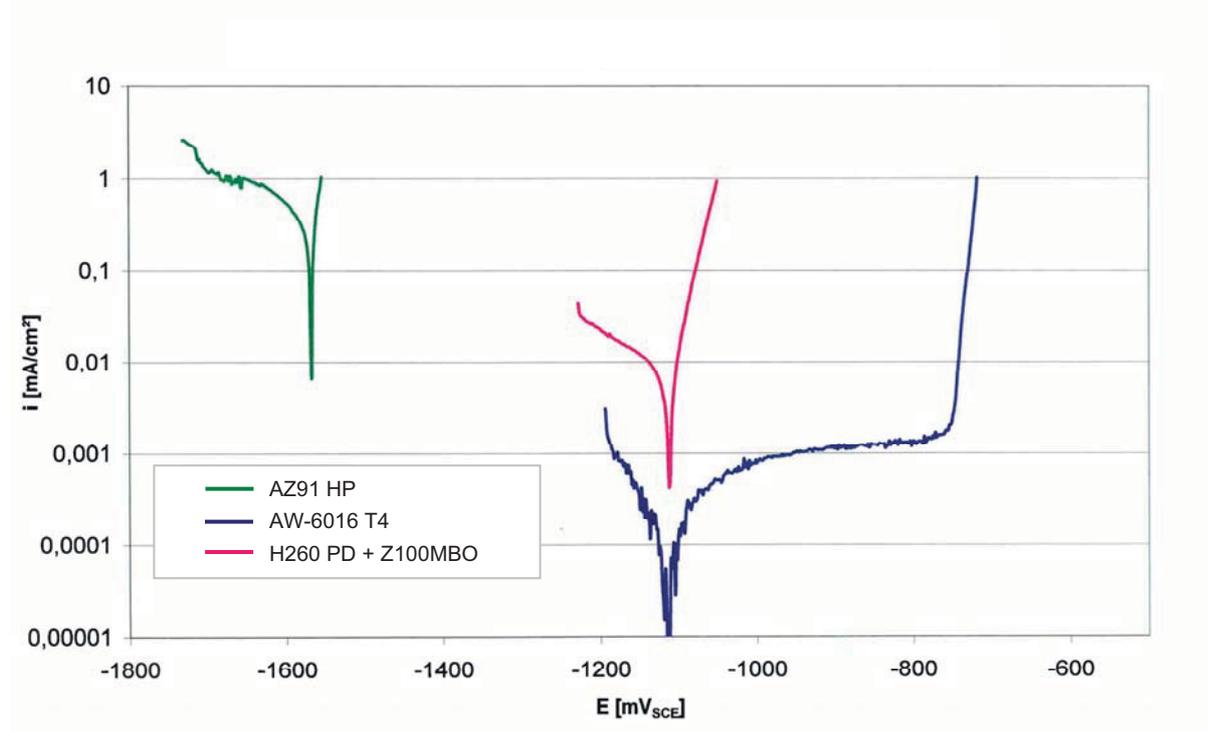


Abbildung 118: IU-Kurven der einzelnen Probenwerkstoffe in 5 % NaCl, 35 °C, Ar <sup>[42]</sup>

Die Magnesiumlegierung AZ91 HP besitzt ein unedles Ruhepotential von ca. - 1570 mV<sub>SCE</sub> und weist aufgrund des gleichförmigen Angriffs im anodischen Ast der Kurve einen steilen Verlauf auf. Die gemessene Korrosionsstromdichte liegt bei etwa 0,5 mA/cm<sup>2</sup> <sup>[42]</sup>.

Die Aluminiumlegierung AW-6016 T4 zeigt im Vergleich zur Magnesiumlegierung ein deutlich edleres Ruhepotential von ca. - 1120 mV<sub>SCE</sub> mit einem ausgeprägten Passivbereich bis zum Durchbruchpotential von ca. - 750 mV<sub>SCE</sub>. Die Korrosionsstromdichte erreicht mit etwa 0,1 µA/cm<sup>2</sup> einen für passivierbare Metalle typischen Wert <sup>[42]</sup>.

Im Unterschied dazu ist am H260 PD + Z100 MBO mit 8 µA/cm<sup>2</sup> eine deutlich höhere Korrosionsstromdichte erkennbar. Dessen Ruhepotential liegt, gleich wie bei Aluminium, bei ca. - 1120 mV<sub>SCE</sub>. Die Probe zeigt ein aktives Korrosionsverhalten mit einem steilen Stromanstieg <sup>[42]</sup>.

---

Anhand der gewonnenen Daten ist das ungefähre Korrosionsverhalten der einzelnen Werkstoffe in einer Materialkombination abschätzbar, direkte Rückschlüsse auf die Salzsprüh- bzw. VDA-Tests sind aber nur bedingt möglich. Gründe hierfür sind:

- bei den elektrochemischen Untersuchungen bleibt der Einfluss des Fügelements hinsichtlich Presskraft, Spaltweite, Verfahrensablauf (schneidend/nicht schneidend) sowie dessen chemisches Verhalten unbeachtet.
- während der Messung liegen keine realen Spaltbedingungen vor, d.h. mögliche Wechselwirkungen zwischen den beiden Fügepartnern wie z.B. Änderung des pH-Wertes, Belüftung, Teilpassivierung, etc. werden nicht simuliert.
- die Beeinflussung des Korrosionsverhaltens durch eventuell vorhandene Oberflächentexturen, Vorbehandlungen bzw. Beschichtungen (bzw. auch umgekehrt) ist mit einer Standard-IU-Messung nicht erfassbar. In diesem Fall wären eigene Sonderverfahren notwendig.
- mit Hilfe der elektrochemischen Messverfahren sind keine Rückschlüsse auf die Konstruktion und Bauteilgestaltung möglich.
- produktionstechnische Einflüsse wie z.B. Beschädigungen der Oberfläche durch Verschraubung, Schweißspritzer, etc. sind nicht erfassbar.
- betriebstechnische Einflüsse wie z.B. Temperaturwechsel, Schwingungen, Bauteilspannungen, Steinschlag, etc. werden bei diesem Messverfahren nicht ermittelt (im Gegensatz zum DYKO).

## **10 Gegenüberstellung Salzsprühtest DIN 50 021-SS – Wechselklimatest VDA 621-415**

In folgender Tabelle 26 ist eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Salzsprühtest DIN 50 021-SS und dem Wechselklimatest VDA 621-415 ersichtlich. Zwecks einfacher Vergleichsmöglichkeit ist neben der Gesamtkorrosion beider Werkstoffpartner und des Fügelements ein Bewertungsschema angeführt. Die Bewertung der Werkstoffkombinationen erfolgt anhand der ermittelten Gesamtkorrosion an den Proben (Schulnotensystem). Bei CFK-Verbindungen ist aufgrund des hohen KTL-Eindringvermögens die Bewertung nur scheinbar positiv. Kombinationen mit diesem Verbundwerkstoff sind daher als kritisch zu betrachten.



## 11 Schlussfolgerungen

Anhand der gewonnenen Daten aus den VDA- und Salzsprühtests ist es möglich, Rückschlüsse auf konstruktive, produktions- sowie werkstofftechnische Probleme zu ziehen. Diesbezüglich können folgende, allgemeine Aussagen getroffen werden:

Der Verbundwerkstoff CFK besitzt ein hohes elektrochemisches Potenzial, metallische Werkstoffe (bezogen auf AW-6016 T4, AZ91 HP und H260 PD + Z100 MBO), die in Kontakt zu diesem stehen, sind einer hohen Korrosionsbeanspruchung ausgesetzt. Dies ist in Form von starken flächen-, mulden- und lochförmigen Abtragserscheinungen in den dementsprechenden Kontaktflächen zu erkennen. Um angrenzende Bauteile vor einem korrosiven Angriff zu schützen, ist eine allseitige Isolierung des Laminats in den Kontaktbereichen notwendig. Mögliche Lösungen wären:

- Beschichtung der betroffenen Bauteile bzw. deren Zonen mit einem dichten, nicht leitenden, chemisch beständigen, nichtmetallischen Überzug.
- Einsatz von Isolationsmaterial bzw. -stücken in den Kontaktbereichen.
- Eine allseitige bzw. partielle Beschichtung des CFK-Bauteils mit einem isolierenden Überzug, wenn dies aus optischen Gründen möglich ist.

Weiters ist die faserorientierte Abscheidung der KTL an der Oberfläche sowie das tiefe Eindringen der KTL-Flüssigkeit in das Probeninnere auffällig.

Die Aluminiumlegierung AW-6016 T4 weist im Allgemeinen eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, in Extremsituationen (in Verbund mit Magnesium oder CFK) sind jedoch starke Korrosionserscheinungen möglich. Eine dementsprechende Beschichtung bzw. Isolation im Kontaktbereich ist empfehlenswert.

Das verzinkte Stahlblech verhält sich in den Tests ähnlich wie das Aluminium, in Kontakt mit Magnesium oder CFK zeigt dieses ebenfalls hohe Korrosionserscheinungen. In Bezug auf die optische Korrosion ist wiederum eine Schutzisolierung in der Kontaktfläche sinnvoll.

Problematisch hingegen ist die derzeitige Situation der Magnesiumlegierung AZ91 HP. Diese besitzt aufgrund des elektrochemisch unedleren Charakters nur eine sehr geringe Korrosionsbeständigkeit, weshalb in feuchter bzw. salzhaltiger Atmosphäre hohe Abtragsraten zu erwarten sind. Mögliche Lösungen wären:

- Optimierung der KTL-Vorbehandlung bzw. Entwicklung einer neuartigen KTL-Flüssigkeit hinsichtlich des Einsatzes von Magnesium im Karosseriebereich.

- Mehrfachbeschichtung der Magnesiumbauteile mit dichten, isolierenden Überzügen (Standardmethode).
- Verwendung von Isolationsmaterialien im Kontaktbereich zu anderen, korrosionsfördernden Materialien.
- Entwicklung hoch-korrosionsresistenter Magnesiumlegierungen für den Einsatz im Automobilbau.

Die Elemente der Verschraubung (Geomet-beschichtet oder aus Aluminium) zeigen im Kontakt zu Aluminium selbst oder verzinktem Stahlblech eine gute Korrosionsbeständigkeit. In Kombination mit Magnesium oder CFK ist jedoch ein Angriff zu erwarten. Auf den Korrosionsverlauf in der Kontaktfläche haben die Verschraubungselemente nur einen indirekten Einfluss, und zwar in jener Hinsicht, dass je nach Presskraft der Schraube mehr oder weniger Elektrolyt in den Fügespalt gelangt. Der Unterschied zwischen einer Aluminium- und Geomet 321-Verschraubung ist gering. Anders ist die Situation im Auflagebereich der Unterlegscheibe bzw. Mutter und Schraube zu bewerten. Je nach Untergrundmaterial sind Kontaktkorrosionserscheinungen möglich, vor allem, wenn ein hoher Potenzialunterschied beider Materialien vorliegt. Beispiele hierfür sind die kreisförmigen Korrosionsgräben rund um die Schraube an der Magnesiumoberfläche.

Beim Durchsetzfügen, eine Fügemethode ohne zusätzlichem Verbindungselement und dem Stanznietverfahren sind aufgrund der kritischen Spaltweite bzw. Kapillarwirkung starke Korrosionserscheinungen in der Kontaktfläche eingetreten. Lösungswege hinsichtlich dieser Problematik sind in einer Optimierung des Fügeprozesses (Matrizen-/Stempeldesign, Press- und Haltekräfte, etc.) bzw. in der Kombination mit Klebstoffen zu suchen (Standardmethode). Die Verbindungsstelle selbst und deren Randbereich weisen hingegen nur geringe Korrosionsspuren auf.

Anhand des bereits beschriebenen Eindringverhaltens der KTL-Flüssigkeit an den CFK-Proben, welches durch die strukturierte Oberfläche des Verbundwerkstoffes hervorgerufen wird, sind Ansätze hinsichtlich der Bauteilgestaltung bzw. verschiedener Fügeverfahren möglich. So wäre durch eine gezielte und optimierte Strukturierung der Fügeoberfläche (bei verschiedensten Bauteilen und Werkstoffen) eine verbesserte Abscheidung der KTL oder anderer Beschichtungsflüssigkeiten möglich und somit ebenfalls eine Einsparung an Korrosionsschutz-Hilfsmitteln erreichbar. Bezüglich dieser Annahme wären gesonderte, wissenschaftliche Experimente bzw. Untersuchungen notwendig.

Bei Betrachtung der Messergebnisse aus den Korrosionsprüfungen ist zu erkennen, dass Kanten im Auftropfbereich stärker korrodiert und unterwandert werden als jene im

Abtropfbereich. Es wäre daher sinnvoll, betroffenen Bauteilsegmente mit einer dickeren Beschichtung zu versehen bzw. so zu gestalten, dass keine oder nur wenige feuchtigkeitsaffine Kantenbereiche in der Auftropfregion vorhanden sind. In Problemfällen kann durch Rundschleifen der Schnittkanten eine höhere KTL-Abscheidung sowie Korrosionsbeständigkeit erreicht werden (gleiches gilt ebenfalls für die Fügelemente: durch gezielte Rundungen und Übergänge bei z.B. der Gestaltung des Schraubenkopfes wäre eine höhere Korrosionsbeständigkeit möglich) <sup>1)</sup>.

Die oben angeführte Aussage ist in jener Hinsicht erweiterbar, dass im Abtropfpunkt des Bauteils mit einer höheren Korrosionsbelastung zu rechnen ist als im restlichen Abtropfbereich. Anhand dieser Feststellung ist es denkbar das Bauteil mit Hilfe von „künstlichen“ Schrägungen und Abtropfpunkten so zu designen, dass ein widerstandsarmes Abfließen bzw. Abtropfen etwaiger Flüssigkeiten ermöglicht wird. Beispiel hierfür sei eine mögliche Designvariante des BMW-Modell X3 in Abbildung 119 <sup>1)</sup>.

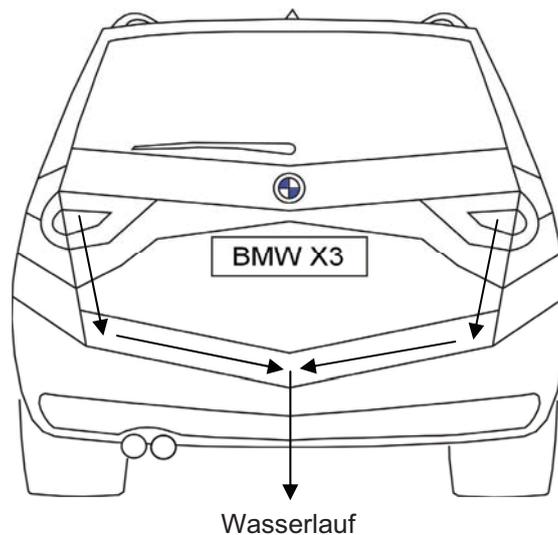


Abbildung 119: Ablaufoptimiertes Design am BMW X3 (Heckansicht)

<sup>1)</sup> Diese Überlegungen entstanden aus den Ergebnissen der Korrosionstests sowie zahlreicher metallographischer Untersuchungen der Proben bezüglich des spezifischen Korrosions- und KTL-Abscheidungsverhaltens.

## 12 Zusammenfassung

Großer Konkurrenzdruck sowie hohe Image- und Kundenanforderungen am internationalen Automobilmarkt stellen die Fahrzeugproduzenten vor immer schwierigere Herausforderungen. Diese sind durch Innovationen auf dem Gebiet des Leichtbaus und der Werkstofftechnik realisierbar, Probleme hinsichtlich Konstruktion und Produktion gelten noch zu lösen. Ein wichtiges Qualitätskriterium in der Automobilindustrie ist die weitgehende Vermeidung bzw. Steuerung der Korrosion am Fahrzeug wobei dessen Verhalten mit Hilfe zahlreicher Korrosionsprüfverfahren simuliert und erforscht werden kann.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der korrosionstechnischen Untersuchung verschiedenster Material- und Fügekombinationen mittels Salzsprühtest DIN 50 021, VDA Wechselklimatest VDA 621-415 sowie der Stromdichte-Potenzial-Messung der betroffenen Probenwerkstoffe. Anhand dieser Ergebnisse ist es möglich wichtige Rückschlüsse hinsichtlich des Korrosionsschutzes, der Konstruktion und der Bauteilgestaltung zu treffen.

Anhand der korrosionstechnischen Untersuchungen und deren Ergebnisse sind folgende grundsätzliche Aussagen möglich:

- Der Verbundwerkstoff CFK besitzt ein hohes elektrochemisches Potenzial weshalb metallische Werkstoffe (bezogen auf AW-6016 T4, AZ91 HP und H260 PD + Z 100 MBO) die in Kontakt mit diesem stehen einer hohen Korrosionsbeanspruchung ausgesetzt sind.
- Die Aluminiumlegierung AW-6016 T4 und das verzinkte Stahlblech H260 PD + Z100 MBO weisen im Allgemeinen eine gute Korrosionsbeständigkeit auf, in Extremsituationen (in Verbund mit Magnesium oder CFK) sind jedoch starke Korrosionserscheinungen möglich.
- Problematisch hingegen ist die derzeitige Situation der Magnesiumlegierung AZ91 HP. Diese besitzt aufgrund des elektrochemisch unedleren Charakters nur eine sehr geringe Korrosionsbeständigkeit, weshalb in feuchter bzw. salzhaltiger Atmosphäre hohe Abtragsraten zu erwarten sind.

Hinsichtlich des großen Spektrums an Korrosionsbelastungen, Werkstoffpaarungen, Füge- und Beschichtungsvariationen im Automobilbau sind die Forschungsmöglichkeiten auf diesem Gebiet beinahe unerschöpflich. Weiterführende Untersuchungen im Bereich der Korrosionstechnik könnten informationsreich und zielführend sein.

## 13 Literatur

- [1] Wikimedia Foundation Inc.: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. Online im Internet: <<http://www.wikipedia.de>>. (Stand 06.06.2005; Abruf 06.06.2005).
- [2] Wirtschaftskammern Österreichs: wko.at – Informationsplattform. Online im Internet: <<http://www.wko.at>>. (Stand 27.08.2006; Abruf 27.08.2006).
- [3] Kammer, C.: Aluminium Taschenbuch, Band 1 – Grundlagen und Werkstoffe, 16. Auflage – Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH Düsseldorf, 2002.
- [4] Kammer, C.: Aluminium Taschenbuch, Band 3 – Weiterverarbeitung und Anwendung, 16. Auflage – Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH Düsseldorf, 2003.
- [5] Kammer, C.: Magnesium Taschenbuch, 1. Auflage – Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH Düsseldorf, 2000.
- [6] Kunze, E. (Hrsg.): Korrosion und Korrosionsschutz, Band 1 – Einführung und wissenschaftliche Grundlagen – Wiley-VCH Weinheim, 2001.
- [7] Kunze, E. (Hrsg.): Korrosion und Korrosionsschutz, Band 2 – Korrosion der verschiedenen Werkstoffe – Wiley-VCH Weinheim, 2001.
- [8] Kunze, E. (Hrsg.): Korrosion und Korrosionsschutz, Band 3 – Korrosionsschutzverfahren – Wiley-VCH Weinheim, 2001, 2975 – 3000.
- [9] Kunze, E. (Hrsg.): Korrosion und Korrosionsschutz, Band 5 – Korrosion und Korrosionsschutz in verschiedenen Gebieten, Teil 2 – Wiley-VCH Weinheim, 2001.
- [10] Simnad, M. T., U. R. Evans: Trans. Farad. Soc. 46, 1950, 175 – 186.
- [11] Scheiding, W.: Verschrauben von Magnesium braucht mehr als Alltagswissen – Was Konstrukteure wissen und beachten sollten. Online im Internet: <<http://www.kamax.de/pdf/scheidung1.pdf>>. (Stand 20.06.2005; Abruf 20.06.2005).
- [12] Matthes, K.-J., F. Riedel (Hrsg.): Fügetechnik, Überblick – Löten – Kleben – Fügen durch Umformen – Fachbuchverlag Leipzig, 2003.
- [13] VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik: Fügetechnik – Schadensanalyse, Schadensprävention und Qualitätssicherung, 12. Jahrestagung Schadensanalyse, Tagung Würzburg, 18. und 19. Oktober 2000 – VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 2000.
- [14] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 50 021 – Sprühnebelprüfungen mit verschiedenen Natriumchlorid-Lösungen – Beuth Verlag GmbH Berlin, 1988.
- [15] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 50 017 – Klimate und ihre technische Anwendung / Kondenswasser-Prüfklimate – Beuth Verlag GmbH Berlin, 1982.
- [16] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 50 918 – Korrosion der Metalle / Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen – Beuth Verlag GmbH Berlin, 1978.

- 
- [17] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 50 919 – Korrosion der Metalle / Korrosionsuntersuchungen der Kontaktkorrosion in Elektrolytlösungen – Beuth Verlag GmbH Berlin, 1984.
- [18] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 50 905 – Korrosion der Metalle / Korrosionsuntersuchungen, Teil 1-3 – Beuth Verlag GmbH Berlin, 1987.
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): EN ISO 8044 – Korrosion von Metallen und Legierungen / Grundbegriffe und Definitionen – Beuth Verlag GmbH Berlin, 1999.
- [20] VDA Verband der Automobilindustrie e.V. (Hrsg.): VDA 621-415 – Anstrichtechnische Prüfungen / Prüfung des Korrosionsschutzes von Kraftfahrzeuglackierungen bei zyklisch wechselnder Beanspruchung – DKF Dokumentation Kraftfahrwesen e.V. Bietingheim-Bissingen, 1982.
- [21] Ehmann, H.: Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen an Leichtmetallproben, Diplomarbeit – Technische Universität Graz, 2005.
- [22] Mori, G.: Korrosionskunde – Principles of Corrosion, Vorlesungsunterlagen SS 2004 – Montanuniversität Leoben, 2004.
- [23] Elsevier B.V.: ScienceDirect – Digital library of the future. Online im Internet: <<http://www.sciencedirect.com>>. (Stand 16.06.2005; Abruf 16.06.2005).
- [24] CSA Illumina: Guide to Discovery. Online im Internet: <<http://md3.csa.com>>. (Stand 17.06.2005; Abruf 17.06.2005).
- [25] mic – management information center GmbH (Hrsg.): Leicht ist schwer, Automobil-Entwicklung Januar 2004 – Landsberg, 2004.
- [26] Modrike, B. L., H. Wiesner (Hrsg.): Fügen von Magnesiumwerkstoffen – DVS-Verlag Düsseldorf, 2005.
- [27] Brandenburg, A. (Hrsg.): Kleben metallischer Werkstoffe – DVS-Verlag Düsseldorf, 2001.
- [28] Miller, F.: Leichtbau, Fraunhofer Magazin 4.2002 – Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. München, 2002.
- [29] Büdgam, S., V. Freitag, O. Hahn, M. Ruther: Fügesystemoptimierung für Mischbauweisen im Karosseriebau, ATZ 12/2004 Jahrgang 106 – Vieweg Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2004.
- [30] BMW AG (Hrsg.): BMW Group Standard GS 90011 – Beschichtung von Teilen aus metallischen Werkstoffen mit organischen Materialien / Anforderung und Prüfung – BMW AG Normung München, 2001.
- [31] Böllhoff (Hrsg.): Versuchsbericht Nr. 0382/05 vom 12.10.2005 / RIVCLINCH® Durchsetzfügetechnik – Böllhoff Systemtechnik GmbH & Co KG Bielefeld, 2005.
- [32] Böllhoff (Hrsg.): Versuchsbericht Nr. 0381/05 vom 12.10.2005 / RIVSET® Stanzniettechnik – Böllhoff Systemtechnik GmbH & Co KG Bielefeld, 2005.

- 
- [33] DVM (Hrsg.): DVM-Bericht 120 – Fügen im Leichtbau, 20. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit am 12 und 13 Oktober 1994 in der Konzernverwaltung Daimler-Benz AG Stuttgart-Möhringen – Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. Berlin, 1994.
- [34] voestalpine AG (Hrsg.): Feuerverzinktes Stahlband von voestalpine – Technische Lieferbedingungen kaltgewalztes und oberflächenveredeltes Stahlband – voestalpine AG Linz, 2004.
- [35] Mukeli, E.: Aushärteverhalten der Aluminiumlegierung AA6016 sowie Vergleich einiger aluminiumrelevanter Fügeverfahren, Diplomarbeit – Montanuniversität Leoben, 2002.
- [36] Gühring, I. K.: Mikrobieller Befall von Elektrotauchlack in der Automobilindustrie, Dissertation – Universität Stuttgart, 2000.
- [37] Klein, B.: Leichtbau im Automobilbau – Universität Gesamthochschule Kassel, 2004.
- [38] Strobl, Ch.: Korrosion und Korrosionsschutz in Theorie und Praxis, Veranstaltungsunterlagen, 4. Auflage – Fachhochschule Ingolstadt / Haus der Technik e.V. Essen, 2005.
- [39] Mittermeijer, E. J.: Praktikum Metalle – Korrosion, Vorlesungsunterlagen – Universität Stuttgart, 2005.
- [40] korrosion online: Fachinformationen und Lehrangebote zu Korrosion und Korrosionsschutz. Online im Internet: <<http://www.korrosion-online.de>>. (Stand 26.06.2005; Abruf 26.06.2005).
- [41] alumatter: e-Learning. Online im Internet. <<http://aluminium.matter.org.uk>>. (Stand 04.07.2005; Abruf 04.07.2005).
- [42] Mori, G.: Prüfbericht LAB 846/06 – Montanuniversität Leoben, 2006.

## 14 Abkürzungsverzeichnis

$dm/dt$	Masse/Zeit-Ableitung
M	Molekulargewicht
I	Stromstärke
i	Stromdichte
n, m	Anzahl Ladungsträger
F	Faraday-Konstante (96485 A·s/mol)
$v_i$	stöchiometrischer Koeffizient
$S_i$	Substanz
$\Delta G, \Delta H, \Delta S$	Änderung der freien Energie, Enthalpie bzw. Entropie
T	Temperatur [K]
K	Gleichgewichtskonstante
G	freie Reaktionsenthalpie
$G_0$	Standardenergie
p	Druck
$a_i$	Aktivität
R	Rydberg-Konstante (8,314 J/(mol·K))
a, b, c	stöchiometrische Koeffizienten
$A_x$	Substanz X in oxidierter Form
$B_x$	Substanz X in reduzierter Form
$E_0$	Gleichgewichtspotenzial
$E_{0,0}$	Normalpotenzial bei 298 K
SCE	gesättigte Kalomelelektrode (saturated calomel electrode)
SHE	Normal-Wasserstoff-Elektrode (standard hydrogen electrode)
KTL	Kathodische Tauchlackierung
MSF	Magna Steyr Fahrzeugtechnik
VE	vollentsalzt

## 15 Tabellen und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Historische Daten der Korrosionsforschung <sup>[5]</sup> .....	3
Tabelle 2: Unterteilung der Folgeschäden <sup>[5]</sup> .....	5
Tabelle 3: Definition der Abtragsrate <sup>[21]</sup> .....	14
Tabelle 4: Potenzialwerte einiger Aluminiumwerkstoffe in Meerwasser <sup>[2]</sup> .....	18
Tabelle 5: Wirkungsweise der Mikroorganismen <sup>[5], [35]</sup> .....	26
Tabelle 6: SPRK-empfindliche Systeme <sup>[5], [6]</sup> .....	28
Tabelle 7: Mechanismen der Wasserstoffschädigung <sup>[5]</sup> .....	30
Tabelle 8: Wirkungsweise der metallinduzierten Werkstoffschädigung bei unterschiedlichen Metallkombinationen <sup>[5]</sup> .....	33
Tabelle 9: Arten der Verzinkung <sup>[8]</sup> .....	38
Tabelle 10: Ergebnisse verschiedener Korrosionstests <sup>[8]</sup> .....	39
Tabelle 11: Prüfverfahren im Fahrzeugbau <sup>[8]</sup> .....	49
Tabelle 12: Kondenswasserprüfbedingungen nach DIN 50 017 <sup>[14]</sup> .....	50
Tabelle 13: Bedingungen der DIN 50 021 <sup>[13]</sup> .....	51
Tabelle 14: Ablauf der zyklisch wechselnden Klimaprüfung nach VDA 612-415 <sup>[19]</sup> .....	52
Tabelle 15: Gegenüberstellung von schneidenden und nicht schneidenden Clinchverbindungen <sup>[11]</sup> .....	56
Tabelle 16: chemische Zusammensetzung von AW-6016 T4 <sup>[2], [40]</sup> .....	59
Tabelle 17: chemische Zusammensetzung von AZ91 HP <sup>[4]</sup> .....	60
Tabelle 18: Gegenüberstellung der einzelnen Probenvarianten .....	62
Tabelle 19: Ergebnisse der Schichtdickenmessung .....	63
Tabelle 20: Details zu den einzelnen Fügevarianten <sup>[30], [31]</sup> .....	64
Tabelle 21: Probenkombinationen der Vortestserie .....	65
Tabelle 22: Fügekombinationen der Haupttestserie .....	66
Tabelle 23: Umrechnungstabelle Korrosionstiefe – Gewichtungsfaktor .....	71
Tabelle 24: Bewertungs- und Punkteschlüssel der Gegenüberstellung SS – VDA .....	71
Tabelle 25: Gegenüberstellung Salzsprühstest DIN 50 021-SS – Wechselklimatest VDA 621-415 .....	127
Abbildung 1: Kosten verursacht durch Korrosion <sup>[5]</sup> .....	4
Abbildung 2: Graphische Erläuterung eines Metallionen- bzw. Redoxgleichgewichtes <sup>[5]</sup> .....	6
Abbildung 3: Bildliche Erklärung der Gibbs-Funktion <sup>[21]</sup> .....	7
Abbildung 4: Daniell-Element <sup>[1]</sup> .....	8
Abbildung 5: Vereinfachtes Pourbaix-Diagramm für Aluminium in H <sub>2</sub> O (25°C) mit einer Hydrargillit-Passivschichtausbildung (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O) <sup>[20]</sup> .....	9

Abbildung 6: Vereinfachtes Pourbaix-Diagramm für Magnesium in H <sub>2</sub> O (25°C) <sup>[20]</sup> .....	9
Abbildung 7: Schaltplan für eine galvanostatische Messungen <sup>[38]</sup> .....	11
Abbildung 8: Schaltplan eine für potenziostatische Messungen <sup>[38]</sup> .....	11
Abbildung 9: Strom-Spannungskurve einer unter Wasserstoffentwicklung korrodierenden Metallprobe <sup>[20]</sup> .....	12
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Potenzialbereiche für den aktiven, passiven und transpassiven Zustandes eines passivierbaren Metalls <sup>[5]</sup> .....	12
Abbildung 11: Einfluss des Kaltumformgrades auf die Korrosionsgeschwindigkeit und das Ruhepotenzial von Weicheisen mit 0,8 % C in 1 molarer H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> bei 25°C <sup>[5]</sup> .....	13
Abbildung 12: Charakteristik der Korrosionsanisotropie <sup>[5]</sup> .....	13
Abbildung 13: Unterteilung der Korrosionsarten <sup>[5], [21]</sup> .....	14
Abbildung 14: Schematische Darstellung der gleichförmigen Korrosion <sup>[2]</sup> .....	15
Abbildung 15: Schliffbild einer gleichmäßig korrodierten Probe <sup>[39]</sup> .....	15
Abbildung 16: Schliffbild einer Korrosionsmulde <sup>[39]</sup> .....	15
Abbildung 17: Ausbildungsformen von Lochkorrosion <sup>[5], [21]</sup> .....	16
Abbildung 18: Schliffbild einer Lochfraßstelle <sup>[39]</sup> .....	16
Abbildung 19: Modelle der Lochkorrosion <sup>[5]</sup> .....	17
Abbildung 20: Lochkorrosionsmechanismus bei Aluminiumwerkstoffen .....	18
Abbildung 21: Stufen des Belüftungselement-Mechanismus <sup>[5]</sup> .....	19
Abbildung 22: Mechanismus der Filiformkorrosion <sup>[21]</sup> .....	20
Abbildung 23: Filiformkorrosion an einem Bauteil <sup>[39]</sup> .....	20
Abbildung 24: Schliff durch eine Korrosionszelle <sup>[2]</sup> .....	20
Abbildung 25: Beispiel für ein praxisnahes Korrosionselement <sup>[5]</sup> .....	21
Abbildung 26: Kontaktkorrosion verschiedenster Materialien an einem Fittingsystem <sup>[39]</sup> .....	21
Abbildung 27: Einfluss der Elektrolytleitfähigkeit auf das Kontaktkorrosionsverhalten <sup>[21]</sup> .....	21
Abbildung 28: Auswirkungen bei unterschiedlichem Anoden-Kathoden- Flächenverhältnis <sup>[21]</sup> .....	22
Abbildung 29: Interkristalline Korrosion an einer AlCuMg1-Legierung [V = 100:1] <sup>[2]</sup> .....	23
Abbildung 30: Schichtkorrosion an einer AlZnMgCu0,5-Legierung mit partiell rekristallisierten Seigerungszeilen [V = 100:1] <sup>[2]</sup> .....	24
Abbildung 31: Gleitstufen-Passivschicht-Verletzungsmodell <sup>[5]</sup> .....	27
Abbildung 32: Filmriss-Spaltbildungsmodell <sup>[5]</sup> .....	27
Abbildung 33: Modelle der wasserstoffinduzierten Schädigung <sup>[5], [21]</sup> .....	30
Abbildung 34: Erscheinungsformen der Erosionskorrosion <sup>[5]</sup> .....	31
Abbildung 35: Kollaps einer kreisrunden laserinduzierten Kavitationsblase in Wandnähe aufgenommen mit 75000 Bilder pro Sekunde <sup>[5]</sup> .....	32

---

Abbildung 36: Mikro-Jet-Ausbildung während des Zerfalls einer 2 mm großen Luftblase <sup>[5]</sup> ..	32
Abbildung 37: Baugruppenunterteilung im Fahrzeugbau .....	37
Abbildung 38: Beispiele für konstruktiven Korrosionsschutz <sup>[8]</sup> .....	46
Abbildung 39: Aufbau einer Lackierung <sup>[8]</sup> .....	47
Abbildung 40: Mögliche Korrosionsschutzverfahren <sup>[7]</sup> .....	49
Abbildung 41: Sechskantschraube mit zugehöriger Mutter .....	55
Abbildung 42: Verfahrensschritte beim einstufigen, nicht schneidenden Clinchen <sup>[11]</sup> .....	55
Abbildung 43: Verfahrensablauf des Stanznietens mit einem Halbhohlriet <sup>[11]</sup> .....	57
Abbildung 44: Stanzniet-Sonderformen <sup>[11]</sup> .....	57
Abbildung 45: Probeplättchen der einzelnen Werkstoffe .....	61
Abbildung 46: Probenträgersystem für den Beschichtungsvorgang .....	63
Abbildung 47: Abmessungen der Probe .....	63
Abbildung 48: Korrodierte Probenkombination aus Stahl und Magnesium mit Geometverschraubung .....	65
Abbildung 49: Prüfkammer .....	66
Abbildung 50: Korrodierte Proben .....	66
Abbildung 51: Handschablone zur Bestimmung des Korrosionsgrades (Maße in mm) .....	67
Abbildung 52: Unterteilung der Probe in einzelne Regionen .....	67
Abbildung 53: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstn .....	73
Abbildung 54: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstn (Vergrößerung) .....	73
Abbildung 55: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstn .....	74
Abbildung 56: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstn .....	74
Abbildung 57: Verlauf der optischen Korrosion an den alstn-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests. ....	75
Abbildung 58: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstd .....	77
Abbildung 59: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstd (Vergrößerung) .....	77
Abbildung 60: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstd .....	78
Abbildung 61: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstd .....	78
Abbildung 62: Verlauf der optischen Korrosion an den alstd-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests. ....	79
Abbildung 63: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alalgeo .....	81
Abbildung 64: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alalgeo .....	81
Abbildung 65: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alalgeo .....	82
Abbildung 66: Verlauf der optischen Korrosion an den alalgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests. ....	83
Abbildung 67: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkgeo .....	85
Abbildung 68: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkgeo (Vergrößerung) .....	85

---

Abbildung 69: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alcfkgeo .....	86
Abbildung 70: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alcfkgeo.....	86
Abbildung 71: Verlauf der optischen Korrosion an den alcfkgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.....	87
Abbildung 72: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstgeo .....	89
Abbildung 73: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstgeo (Vergrößerung) .....	89
Abbildung 74: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstgeo .....	90
Abbildung 75: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstgeo .....	90
Abbildung 76: Verlauf der optischen Korrosion an den alstgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.....	91
Abbildung 77: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstgeo .....	93
Abbildung 78: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstgeo (Vergrößerung).....	93
Abbildung 79: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von cfkstgeo .....	94
Abbildung 80: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von cfkstgeo.....	94
Abbildung 81: Verlauf der optischen Korrosion an den cfkstgeo-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.....	95
Abbildung 82: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von almgal (Teilbild I) .....	97
Abbildung 83: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von almgal (Teilbild II) .....	97
Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von almgal .....	98
Abbildung 85: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von almgal .....	98
Abbildung 86: Verlauf der optischen Korrosion an den almgal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.....	99
Abbildung 87: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkal .....	101
Abbildung 88: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alcfkal (Vergrößerung).....	101
Abbildung 89: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alcfkal.....	102
Abbildung 90: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alcfkal.....	102
Abbildung 91: Verlauf der optischen Korrosion an den alcfkal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.....	103
Abbildung 92: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstal .....	105
Abbildung 93: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von alstal (Vergrößerung).....	105
Abbildung 94: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von alstal .....	106
Abbildung 95: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von alstal.....	106
Abbildung 96: Verlauf der optischen Korrosion an den alstal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests.....	107
Abbildung 97: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgmgal (Teilbild I) .....	109
Abbildung 98: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgmgal (Teilbild II) .....	109
Abbildung 99: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von mgmgal .....	110

---

Abbildung 100: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von mgmgal .....	110
Abbildung 101: Verlauf der optischen Korrosion an den mgmgal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests. ....	111
Abbildung 102: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgcfkal (Teilbild I) .....	113
Abbildung 103: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgcfkal (Teilbild II) .....	113
Abbildung 104: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von mgcfkal .....	114
Abbildung 105: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von mgcfkal.....	114
Abbildung 106: Verlauf der optischen Korrosion an den mgcfkal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests. ....	115
Abbildung 107: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgstal (Teilbild I) .....	117
Abbildung 108: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von mgstal (Teilbild II) .....	117
Abbildung 109: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von mgstal .....	118
Abbildung 110: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von mgstal .....	118
Abbildung 111: Verlauf der optischen Korrosion an den mgstal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests. ....	119
Abbildung 112: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstal .....	121
Abbildung 113: Zeitlicher Verlauf der optischen Korrosion von cfkstal (Vergrößerung).....	121
Abbildung 114: Zeitlicher Verlauf der Unterwanderung von cfkstal.....	122
Abbildung 115: Zeitlicher Verlauf der Gesamtkorrosion von cfkstal.....	122
Abbildung 116: Verlauf der optischen Korrosion an den cfkstal-Proben der Salzsprüh- und VDA-Tests. ....	123
Abbildung 117: Zeitlicher Verlauf des Gewichtsverlustes bei mg-Verbindungen .....	124
Abbildung 118: IU-Kurven der einzelnen Probenwerkstoffe in 5 % NaCl, 35 °C, Ar <sup>[41]</sup> .....	125
Abbildung 119: Ablaufoptimiertes Design am BMW X3 (Heckansicht) .....	130

# 16 Anhang

## 16.1 RIVSET®- und RIVCLINCH®-Datenblätter

**BÖLLHOFF**  
Joining together!



Versuchsbericht Nr. 0381/05 vom 12.10.2005

### RIVSET® Stanzniettechnik

**Kunde** Magna Steyr  
Fahrzeugtechnik AG & Co. KG  
Herr Holger Schnideritsch  
EGE-K  
Liebenauer Hauptstr. 317  
A-8041 Graz-Thondorf  
Österreich

**Vorgang/Projekt** Stanznietversuche  
**Beschreibung** Erstbemusterung

### Werkstoffkombination

**Materialien** Original Mustermaterial

**Werkstoffpaarung**



Fügerichtung

Lage	Werkstoff	Material-Stärke	Beschichtung
1	Al 6016 T4	1,5 mm	
2	St. H260PD Z100MBO	1,25 mm	vz.
3			
4			

### Ermittelte Fügeparameter

**Niet** Typ C 5X5 SKR H4  
Beschichtung Almac

**Matrizenkontur** FM 090 2015

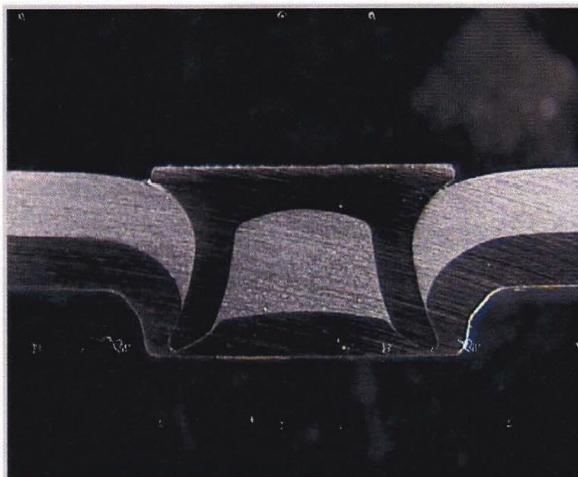
**Einstellung Fügwerkzeug** Nietsetzdruck 230 bar Niederhalterdruck 60 bar

**Verwendetes Fügwerkzeug** Böllhoff RIVSET® MTF / MBF

Verteiler:

Projektmanager: Schlick  
TBV:

Original: Kunde  
Kopie: Anwendungstechnik

**Schliffbild****Ergebnis**

Eine Verbindung ist möglich.

**Bemerkung**

25 Teile mit a. einem des o. g. Niettyps nach Vorgabe bemustert.

Böllhoff Systemtechnik, Mechanische Fügetechnik

Bielefeld, den 12.10.2005

i.A.

  
Wolfgang Erdmann (Tel - 452)

Anwendungstechnik

i.A.

Jürgen Wandtke (Tel - 318)

Leiter Anwendungstechnik

**Hinweis**

Diese Angaben entsprechen dem Ergebnis labormäßiger Untersuchungen und haben nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften unserer Produkte oder deren Eignung für den konkreten Einsatzzweck zuzusichern. Es obliegt dem Anwender, die Eignung unserer Produkte, deren einwandfreie Qualität wir im Rahmen unserer Verkaufsbedingung gewährleisten, für den jeweiligen Anwendungszweck im Rahmen seiner konstruktiven Verantwortung zu prüfen.

**Versuchsbericht Nr. 0382/05 vom 12.10.2005**
**RIVCLINCH® Durchsetzfügetechnik**

**Kunde** Magna Steyr  
 Fahrzeugtechnik AG& Co. KG  
 Herr Holger Schnideritsch  
 EGE-K  
 Liebenauer Hauptstr. 317  
 A-8041 Graz-Thondorf  
 Österreich

**Vorgang/Projekt** Stanznietversuche  
**Beschreibung** Erstbemusterung

**Werkstoffkombination**

**Materialien** Original Mustermaterial

**Werkstoffpaarung**



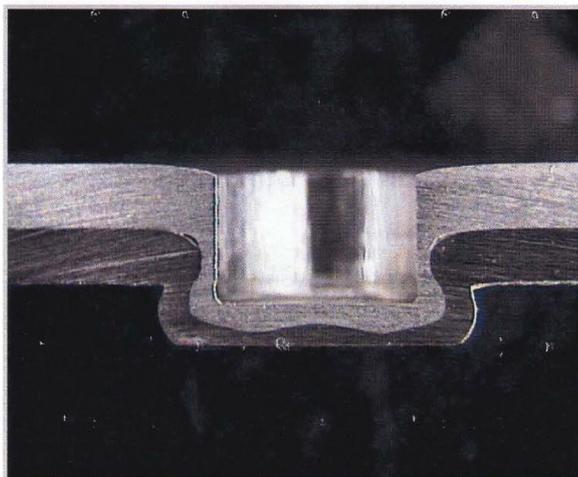
Fügerichtung

Lage	Werkstoff	Material-Stärke	Beschichtung
1	Al 6016 T4	1,5 mm	
2	St. H260PD Z100MBO	1,25 mm	vz.
3			
4			

**Ermittelte Fügeparameter**

**Matrize** SR 603 14  
**Stempel** SR 52 10  
**Abstreifer** Mechanisch Polymer  
**Restbodenstärke** 1 mm  
**Einstellung** Luftdruck Booster 6 bar  
**Fügewerkzeug** Setzkraft  
**Verwendetes** Böllhoff RIVCLINCH® P50 Pass  
**Fügewerkzeug** C-Rahmen 2006

Verteiler: Projektmanager: Schlick Original: Kunde  
 TBV: Kopie: Anwendungstechnik

**Schliffbild****Ergebnis**

Eine Verbindung ist möglich.

**Bemerkung**

25 Teile mit a. einem des o. g. Punktes nach Vorgabe bemustert.

Böllhoff Systemtechnik, Mechanische Fügechnik

Bielefeld, den 12.10.2005

i.A.

  
Wolfgang Erdmann (Tel - 452)

Anwendungstechnik

i.A.

Jürgen Wandtke (Tel - 318)

Leiter Anwendungstechnik

**Hinweis**

Diese Angaben entsprechen dem Ergebnis labormäßiger Untersuchungen und haben nicht die Bedeutung, bestimmte Eigenschaften unserer Produkte oder deren Eignung für den konkreten Einsatzzweck zuzusichern. Es obliegt dem Anwender, die Eignung unserer Produkte, deren einwandfreie Qualität wir im Rahmen unserer Verkaufsbedingung gewährleisten, für den jeweiligen Anwendungszweck im Rahmen seiner konstruktiven Verantwortung zu prüfen.

## 16.2 CathoGuard® Elektrottauchlack-Datenblatt

Technische Information	 <b>BASF</b> <small>The Chemical Company</small>
<b>CathoGuard® Elektrottauchlacke</b>	
Automotive OEM Coatings Solutions	

Version 1 / Stand : 12/2001 / Seite 1/3

**Produktbezeichnung** : CATHOGUARD® 310  
**Produktnummer** : FT 25-7490  
**Farbton** : grau

### Eigenschaften:

- Bleifreie KTL
- exzellente Oberfläche
- exzellenter Umgriff
- globale Anwendung möglich

### Badkenndaten:

Mischungs- und Kompensationsverhältnis:		
Volumenteile Bindemittel	FT 23-0300	5,8 ± 0,2
Volumenteile Pigmentpaste	FT 24-7325	1,0
Festkörper (30 min 180 °C)		19,0 ± 1,5 %
Aschegehalt im Festkörper		25,0 ± 1,5 %
pH-Wert		5,9 ± 0,2
Spezifische Leitfähigkeit (20 °C)		1,7 ± 0,2 mS/cm

### Laborapplikation:

Badtemperatur	28 – 34 °C
Beschichtungszeit	mind. 120 s
Spannung	330 – 400 V
Vorwiderstand	150 Ohm
Elektrochemisches Equivalent	50 – 70 C/m <sup>3</sup>

### Filmeigenschaften:

Schichtdicke	18 – 23 µm
Filmdichte (bei mittlerem Kompensationsverhältnis)	1,38 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>

### Einbrennbedingungen:

Objekttemperatur	15 min 175 ± 5 °C
------------------	-------------------

### Sicherheitstechnische Merkmale:

<u>Flammpunkt</u>	<u>Gefahrenklasse</u>	<u>Kennzeichnung nach GSV</u>
> 100 °C	siehe EG-Sicherheitsdatenblatt	siehe EG-Sicherheitsdatenblatt

Die Angaben in dieser Druckschrift basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung unserer Produkte nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder der Eignung für einen konkreten Einsatzzweck kann hieraus nicht abgeleitet werden. Etwaige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Verarbeiter stets in eigener Verantwortung zu beachten.

BASF Coatings AG  
 Glasuritstrasse 1  
 48165 Münster  
 Tel.: +49 2501 14-0  
 Fax: +49 2501 14-3373

Technische Information

**CathoGuard® Elektrottauchlacke**

Automotive OEM Coatings Solutions


**BASF**  
 The Chemical Company

Version 1 / Stand : 12/2001 / Seite 2/3

**Produktbezeichnung** : CATHOGUARD® 310  
**Produktnummer** : FT 25-7490  
**Farbton** : grau

Bindemittel	Pigmentpaste
FT 23-0300	FT 24-7325

**Sicherheitstechnische Merkmale:**

Flammpunkt	> 61 °C	> 61 °C
Gefahrenklasse	siehe EG-S.datenblatt	siehe EG-S.datenblatt
Kennzeichnung nach GSV	siehe EG-S.datenblatt	siehe EG-S.datenblatt

**Kenndaten:**

Farbton	farblos	grau
Festkörper (30 min / 180 °C)	30,0 ± 1,5 %	60,0 ± 1,5 %
Pigmentgehalt (vom FK)	-	76,5 ± 1,5 %
Aschegehalt (vom FK)	-	71,0 ± 1,5 %
pH-Wert	6,1 – 6,5	-
Dichte (20 °C)	1,05 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>	1,50 ± 0,03 g/cm <sup>3</sup>
Viskosität nach Brookfield (25 °C)	< 100 mPas	1200 – 1500 mPas
Organische Lösungsmittel	2,2 ± 0,5 %	6,0 ± 0,5 %

**Lieferform:**

Innenlackierte Fässer, Container, Tankwagen

**Lagerfähigkeit:**

Bei Temperaturen von > 4°C und < 35 °C	Mindestens 6 Monate	Mindestens 3 Monate; 6 Monate, wenn vor Gebrauch aufgerührt wird
-------------------------------------------	---------------------	------------------------------------------------------------------------

Die Angaben in dieser Druckschrift basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung unserer Produkte nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder der Eignung für einen konkreten Einsatzzweck kann hieraus nicht abgeleitet werden. Etwasige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Verarbeiter stets in eigener Verantwortung zu beachten.

BASF Coatings AG  
 Glasuritstrasse 1  
 48165 Münster  
 Tel.: +49 2501 14-0  
 Fax: +49 2501 14-3373

Technische Information

**CathoGuard® Elektrottauchlacke**

Automotive OEM Coatings Solutions



Version 1 / Stand : 12/2001 / Seite 3/3

**Produktbezeichnung** : CATHOGUARD® 310  
**Produktnummer** : FT 25-7490  
**Farbton** : grau

**Verarbeitungsrichtlinien eines Laboransatzes:**

Vollentsalztes Wasser	433,0 g
SC 18-0110	4,0 g
FT 23-0300	451,0 g
FT 24-7325	112,0 g
	<hr/>
	1000,0 g

Das Wasser wird vorgelegt und alle anderen Komponenten werden unter ständigem Rühren zugegeben.

Nach mindestens 1 Std. Homogenisierung ist der Lack abscheidbar. Im Laufe der Alterung nimmt die Applikationsspannung zu.

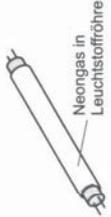
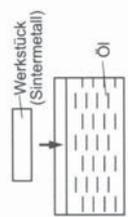
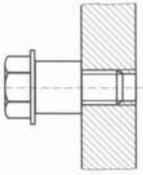
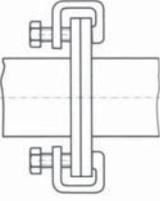
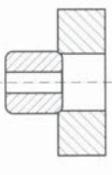
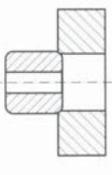
Das Bad ist ständig zu rühren.

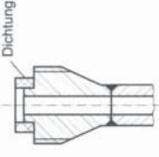
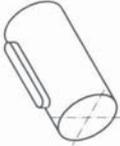
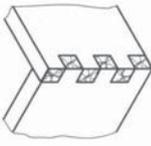
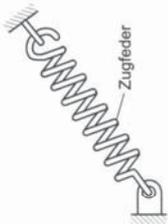
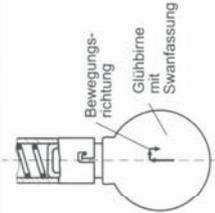
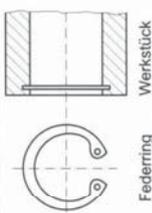
Korrekturen sollten nur nach Rücksprache mit dem Lacklieferanten erfolgen.

Die Angaben in dieser Druckschrift basieren auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Sie befreien den Verarbeiter wegen der Fülle möglicher Einflüsse bei der Verarbeitung unserer Produkte nicht von eigenen Prüfungen und Versuchen. Eine rechtlich verbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder der Eignung für einen konkreten Einsatzzweck kann hieraus nicht abgeleitet werden. Etwaige Schutzrechte sowie bestehende Gesetze und Bestimmungen sind vom Verarbeiter stets in eigener Verantwortung zu beachten.

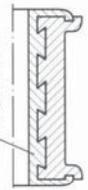
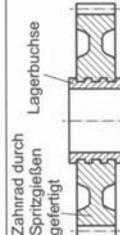
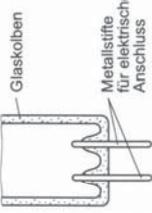
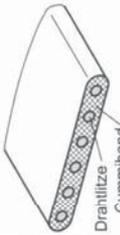
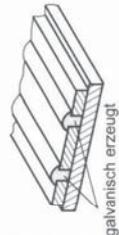
BASF Coatings AG  
 Glasuritstrasse 1  
 48165 Münster  
 Tel.: +49 2501 14-0  
 Fax: +49 2501 14-3373

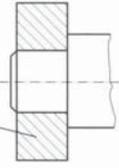
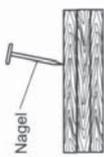
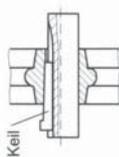
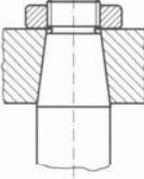
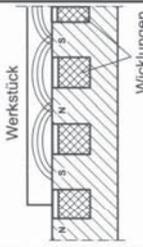
# 16.3 Übersicht Fügeverfahren

Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
	Untergruppe	Verfahren		
2 Füllen	2.1 Einfüllen		... ist Füllen durch Einbringen von gasförmigem, flüssigem oder festem Stoff in hohle Körper.	
		2.2 Tränken, Imprägnieren	Tränken ist Füllen durch Einbringen von flüssigem oder breiigem Stoff in poröse Körper oder faserige Stoffe. Imprägnieren ist Tränken eines Gewebes mit einem flüssigen Stoff zur Erzeugung einer Wasser abstoßenden Oberfläche.	
	3.1 Schrauben		... ist Anpressen mittels selbsthemmender Gewinde an Werkstücken und/oder Verbindungselementen (Schrauben, Muttern).	
		3.2 Klemmen	... ist Anpressen durch Aneinanderdrücken von Werkstücken mittels Verbindungselementen.	
		3.3 Klammern	... ist Anpressen durch Aneinanderdrücken von Werkstücken mit einer federnden Klammer (z. B. Schraub- oder Bauklammer).	
3.4 Fügen durch Pressverbindung		... ist An- und Einpressen eines Innenwerkstückes in ein Außenwerkstück, wobei vor dem Fügen zwischen beiden ein Übermaß besteht.		
		3.4.1 Fügen durch Einpressen, Verstellen	... ist axiales Fügen durch Presspassung, indem ein Innenwerkstück oder Verbindungselement (Stift) in ein Außenwerkstück gedrückt wird.	

Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
	Untergruppe	Verfahren		
1 Zusammensetzen	1.1 Auflegen, Aufsetzen, Schichten		... ist Zusammensetzen durch Über- oder Aufeinanderlegen.	
		1.2 Einlegen, Einsetzen	... ist Zusammensetzen, indem ein kleineres Werkstück in ein größeres gelegt wird.	
		1.3 Ineinanderschieben	... ist Zusammensetzen, indem Werkstücke ineinander oder Formelemente eines Werkstücks in entsprechende Gegenformelemente anderer Werkstücke geschoben werden.	
	1.4 Einhängen	... ist Zusammensetzen, indem Werkstücke oder Werkstück und Verbindungselement mit oder ohne elastische Verformung durch Zusammenhängen verbunden werden.		
	1.5 Einrenken	... ist Zusammensetzen durch axiales Ineinanderschieben zweier Werkstücke mit anschließendem Sichern gegen ungewolltes Lösen derart, dass die Lagebestimmung allein durch entsprechende Formelemente an den Werkstücken möglich wird.		
	1.6 Federnd spreizen	... ist Zusammensetzen durch vorheriges elastisches Verformen, wodurch das Fügeglied nach dem Einlegen und Rückfedern durch Formschluss gehalten wird.		

Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
	Untergruppe	Verfahren		
4 Fügen durch Urformen	4.1 Ausgießen	Verfahren	... ist Fügen durch Urformen, indem flüssiger, breiiger oder pastenförmiger Stoff auf eine oder mehrere Flächen eines Werkstücks zum Bilden eines Ergänzungsstücks gegossen wird.	 Ausgießen einer Lagerschale
			... ist Fügen durch Urformen, wobei mittels formlosen Stoffs ein Ergänzungsstück in ein Bauteil eingebunden wird.	
	4.2 Einbetten	4.2.1 Umspritzen	... ist Fügen durch Einbetten, wobei ein festes Innenteil mit einem Außenteil aus Kunststoff durch Spritzgießen verbunden wird.	 Zahnrad durch Spritzgießen gefertigt Lagerbuchse
			... ist Fügen durch Einbetten, indem feste Werkstücke eingegossen, umgossen oder eingeschmolzen werden.	 Glaskolben Metalstifte für elektrischen Anschluss
	4.3 Vergießen	4.2.2 Eingießen, Umgießen, Einschmelzen	... ist Fügen durch Einbetten, wobei ein gummiartiger formloser Stoff durch Vernetzen (vulkanisieren) verfestigt wird.	 Drahlitze Gummband
			... ist Fügen durch Urformen, indem Werkstücke mit einem flüssigen und später fest werdenden Stoff verbunden werden.	
4.4 Eingalvanisieren	4.2.3 Einvulkanisieren	... ist Fügen durch Urformen, indem die Werkstücke durch galvanisches Abscheiden verbunden werden.	 galvanisch erzeugt	

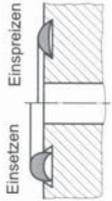
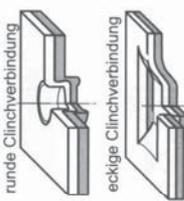
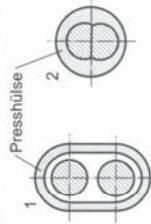
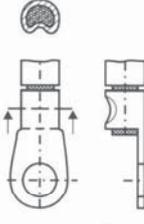
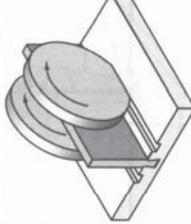
Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
	Untergruppe	Verfahren		
3 An- und Einpressen	3.4 Fügen durch Pressverbindung	3.4.2 Fügen durch Schrumpfen	... ist Fügen durch Presspassung, wobei ein Innen- und Außenwerkstück lose zusammengesteckt und nachfolgend radial angelehrt werden, z. B. durch Schrumpfen nach Erwärmen (Querpresspassung).	 Außenteil, vor dem Fügen erwärmt
		3.4.3 Fügen durch Dehnen	... ist Fügen durch Presspassung, wobei ein Innen- und Außenwerkstück lose zusammengesteckt und nachfolgend radial angelehrt werden, z. B. durch Dehnen nach Unterkühlen (Querpresspassung).	 Innenteil, vor dem Fügen unterkühlt
	3.5 Nageln, Einschlagen		... ist Fügen durch Einpressen von Verbindungselementen in Werkstücke durch mechanische Energie, wobei mehrere Werkstücke durch Aneinanderpressen miteinander verbunden werden.	 Nagel
3.6 Verkeilen		... ist Fügen, indem ein keilförmiges Verbindungselement in einen Spalt, meist in Form einer Nut, eingepresst oder eingeschlagen wird.	 Keil	
3.7 Verspannen		... ist Fügen, indem die Werkstücke mit einem Konus oder Spannelementen verpresst werden, wobei die erforderliche Axialkraft über ein Gewinde aufgebracht werden kann.		
3.8 Fügen durch magnetische Feldkraft		... ist das vorübergehende Anpressen von Werkstücken durch magnetische Felder.	 Werkstück Wicklungen	

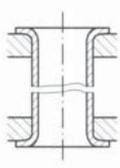
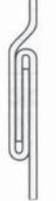
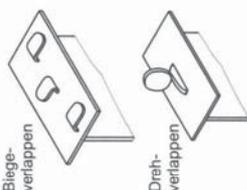
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele	
	Untergruppe	Verfahren			
5 Fügen durch Umformen	5.1 Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper	5.1.6 Wickeln	... ist Fügen durch Umformen, indem Drähte durch fortlaufendes Biegen um ein Innenteil gelegt werden.		
		5.1.7 Weben	... ist Fügen von Drähten durch Umformen, indem nach einer bestimmten Ordnung ein Drahtgewebe entsteht.		
	5.2 Fügen durch Umformen von Blechen, Rohren und Profilen	5.1.8 Heften	... ist Fügen von Werkstücken durch Umbiegen eines drahtförmigen Verbindungselementes.		
		5.2.1 Körnen, Kerben	... ist Fügen durch Umformen, indem das freie Ende eines durch ein Werkstück gesteckten Teiles oder ineinander gesteckte Werkstücke punktförmig oder linienförmig umgeformt werden.		
	5.2.2 Gemeinsames Fließpressen	5.2.3 Gemeinsames Ziehen	5.2.2	... ist Fügen durch Umformen, indem an- oder ineinander gelegte Werkstücke durch gemeinsames Fließpressen verbunden werden.	
			5.2.3	... ist Fügen von zwei ineinander geschobenen rohrförmigen Werkstücken, indem eine kraftschlüssige Verbindung durch gemeinsames Ziehen durch einen Ziehring erzeugt wird.	
	5.2.4 Weiten	5.2.4 Weiten	5.2.4	... ist Fügen durch Umformen, indem ein hohles Innenwerkstück so aufgeweitet oder aufgebraucht wird, dass mit einem Außenwerkstück eine form- oder kraftschlüssige Verbindung entsteht.	

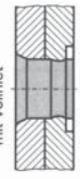
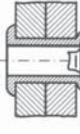
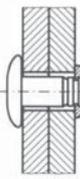
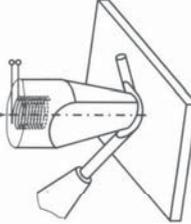
Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
	Untergruppe	Verfahren		
4 Fügen durch Umformen	4.5 Ummanteln	4.5	... ist Fügen durch Umformen, indem ein Werkstück mit gleichem oder andersartigem Stoff umhüllt wird.	
		4.6 Klitzen	... ist Fügen durch Umformen, indem die Fugen zwischen Werkstücken aus meist verschiedenen Werkstoffen verkittet werden, z. B. um zu Dichten.	
5 Fügen durch Umformen	5.1 Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper	5.1.1 Drahtflechten	... ist Fügen von Drähten durch gegenseitiges Umschlingen oder Drillen zu flächennahen oder räumlichen Drahtgeflechten.	
		5.1.2 Verdrehen	... ist Fügen durch schraubförmiges Umeinanderbiegen von drahtförmigen Werkstücken.	
		5.1.3 Versellen	... ist Fügen durch Umformen, indem Drähte, Litzen und Seile schraubförmig umeinander gelegt werden.	
		5.1.4 Spießeln	... ist Fügen durch Ummanteln von Seilenden miteinander oder eines Seilendes mit demselben Seil zu einer Schlaufe, indem die Litzen kraft- und formschlüssig über- und untereinander angeordnet werden.	
		5.1.5 Knoten	... ist Fügen durch Umeinanderbiegen von Drähten zu einem Knoten.	

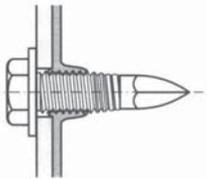
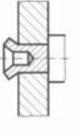
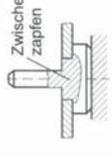
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe		
5 Fügen durch Umformen	5.2 Fügen durch Umformen von Blechen, Rohren und Profilen	5.2.10 Umformen des Einspreizen	 <p>Einsetzen Einspreizen</p>
		5.2.11 Clinchen	 <p>runde Clinchverbindung eckige Clinchverbindung</p>
		5.2.12 Verpressen	 <p>1 2 Presshülse</p> <p>1 vor und 2 nach dem Verpressen</p>
		5.2.13 Quetschen	 <p>... ist Fügen eines Seiles oder einer Litze mit einem Endstück (z. B. Seil- oder Kabelschuh, Crimphülse), indem das umschließende Endstück so verformt wird, dass eine form- und kraftschlüssige Verbindung entsteht.</p>
		5.2.14 Linienförmiges Fügen	 <p>... ist Fügen zweier ineinander gesteckter Werkstücke, indem durch linienförmige Umformung eines Werkstückes der Werkstoff so in eine Profilierung eines anderen Werkstückes (z. B. Steg) geformt wird, dass ein Formschluss entsteht.</p>

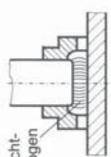
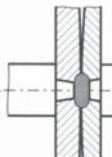
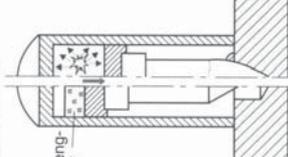
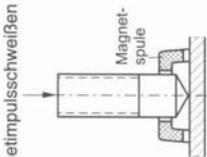
Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe		
5 Fügen durch Umformen	5.2 Fügen durch Umformen von Blechen, Rohren und Profilen	5.2.5 Engen	 <p>Fügen durch Rundknieten</p> <p>Fügen durch Einhalsen</p> <p>Fügen durch Sicken</p>
		5.2.6 Bordeln	 <p>... ist Fügen durch Umformen, indem ein Werkstück durch das Ausformen eines Bordes formschlüssig mit einem anderen Werkstück verbunden wird.</p>
		5.2.7 Falzen	 <p>... ist Fügen durch Umformen, indem gemeinsam die Ränder von Werkstücken so umgebogen werden, dass ein Formschluss entsteht.</p>
		5.2.8 Wickeln, Um- und Bewickeln	 <p>... ist Fügen durch Umformen, indem Bänder durch fortlaufendes Biegen um ein Innenteil gefügt werden</p>
		5.2.9 Verlappen	 <p>Biegeverlappen</p> <p>Drehverlappen</p> <p>... ist Fügen durch Umformen, indem das freie Ende eines durch ein Werkstück gesteckten flachen Formelementes (Lappen) gebogen oder verdreht wird.</p>

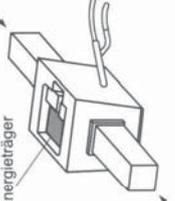
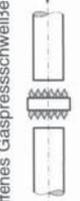
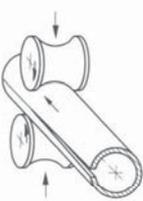
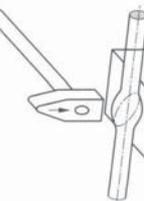
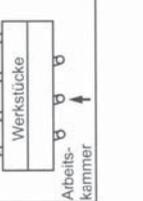
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
	Untergruppe	Verfahren		
5 Fügen durch Umformen	5.3 Fügen durch Nietverfahren	5.3.6 Stanznieten	... ist Fügen durch Umformen, indem aufeinander liegende Werkstücke durch Einpressen eines Verbindungselementes (Niet) und gemeinsames Ausformen (Stanznieten mit Halbhohlniet) oder durch Stanzen der Werkstücke und nachfolgendem Einformen des Werkstoffes eines Werkstückes in den Niet (Stanznieten mit Vollniet) miteinander verbunden werden.	 Stanznieten mit Halbhohlniet  mit Vollniet
		5.3.7 Blindnieten	... ist Fügen durch Umformen, indem in die Bohrung übereinander liegender Werkstücke ein Verbindungselement (Blindniet) eingesteckt und durch Zurückziehen eines inneren Nietdorns das eingesteckte Ende des Nietes so umgeformt wird, dass eine form- und kraftschlüssige Verbindung entsteht.	 verbleibender Nietdorn, an der Sollbruchstelle gerissen
	5.3.8 Schließringnieten	... ist Fügen durch Umformen, indem in die Bohrung übereinander liegender Werkstücke ein Verbindungselement (Schließringniet) eingesteckt und ein Schließring in die Ausformungen des Nietes eingeleitet wird und somit eine form- und kraftschlüssige Verbindung entsteht.	 Schließring	
6 Fügen durch Schweißen	6.1 Pressschweißen	6.1.1 ... durch feste Körper	Heizelementschweißen ... ist Fügen von Werkstücken durch das Anpressen mit einem beheizten Schweißwerkzeug.	 Heizelementschweißen andere Verfahrensvarianten: Düsenschiweißen

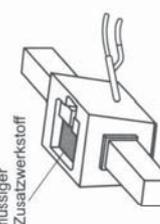
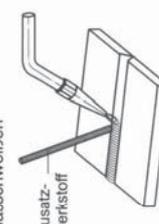
Gruppe	Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
	Untergruppe	Verfahren		
5 Fügen durch Umformen	5.2 Fügen durch Umformen von Blechen, Rohren und Profilen	5.2.15 Fließlochformendes Verschrauben	... ist Fügen zweier übereinander liegender Werkstücke durch umformendes Verschrauben, indem ein um die eigene Achse rotierendes Verbindungselement (Schraube) in beide Werkstücke eindringt, einen Durchzug ausformt und in diesem Durchzug ein für das Verschrauben notwendiges Gewinde einformt.	
		5.3.1 Nieten	... ist Fügen durch Stauchen eines bolzenförmigen Verbindungselementes (Niet) zum Verbinden aufeinander liegender Werkstücke.	
		5.3.2 Hohlnieten	... ist Fügen durch Umformen, indem die überstehenden Teile eines Hohlnietes umgelegt werden und so aufeinander liegende Werkstücke verbunden werden.	
		5.3.3 Zapfennieten	... ist Fügen durch Umformen, indem das überstehende Teil eines durch ein Werkstück gesteckten Zapfens gestaut wird.	
		5.3.4 Hohlzapfennieten	... ist Fügen durch Umformen, indem die überstehenden Teile eines durch ein Werkstück gesteckten Hohlzapfens umgelegt werden.	
5.3.5 Zwischenzapfennieten	... ist Fügen durch Stauchen eines Zwischenzapfens eines der zu fügenden Werkstücke.	 Zwischenzapfen		

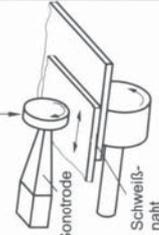
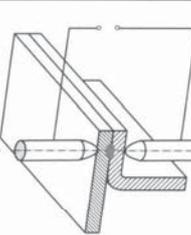
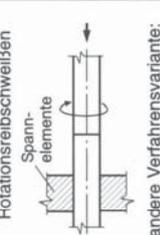
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe		
6 Fügen durch Schweißen	6.1 Pressschweißen	6.1.4 ... durch elektrische Gasentladung	<p>Lichtbogenbozenschweißen</p>  <p>andere Verfahrensvariante: (Lichtbogen)-Pressschweißen mit mag. bewegt. Lichtbogen</p>
		6.1.5 ... durch Bewegung	<p>Kaltpressschweißen</p>  <p>andere Verfahrensvariante: Fließpressschweißen</p>
			<p>Schockschweißen</p>  <p>andere Verfahrensvariante: Sprengschweißen</p>  <p>Magnetimpulsschweißen</p> 

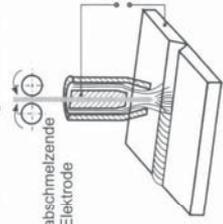
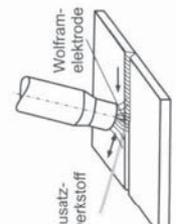
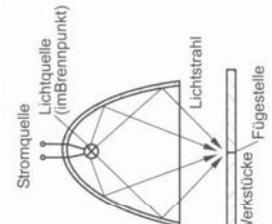
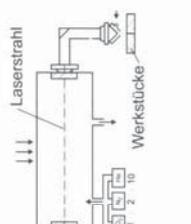
Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe		
6 Fügen durch Schweißen	6.1 Pressschweißen	6.1.2 ... durch Flüssigkeit	<p>flüssiger Energieträger</p>  <p>... ist Fügen, indem die eingeformte Fügestelle der Werkstücke durch Umgießen mit einem flüssigen Energieträger erwärmt und verpresst wird.</p>
		6.1.3 ... durch Gas	<p>Offenes Gaspressschweißen</p>  <p>andere Verfahrensvariante: Geschlossenes Gaspressschweißen</p> 
			<p>Walzschweißen</p>  <p>... ist Fügen, indem erwärmte Werkstücke gemeinsam gewalzt werden.</p>
			<p>Feuerschweißen</p>  <p>... ist Fügen von Werkstücken durch Freiformen, Gesenkformen oder Durchdrücken der im Feuer erwärmten Stoßflächen.</p>
			<p>Diffusionschweißen</p>  <p>... ist Fügen von Werkstücken im Vakuum, unter Schutzgas oder in einer Flüssigkeit aufgrund von Diffusion an den Stoßflächen durch Wärme und Kraft.</p>

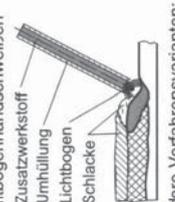
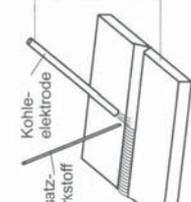
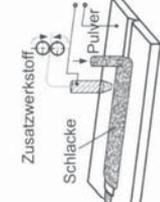
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe			
6 Fügen durch Schweißen	6.1 Pressschweißen	6.1.6 ... durch elektrischen Strom	Widerstandsschweißen	andere Verfahrensvarianten: • Buckelschweißen • Rollnahtschweißen • Rolltransformatorschweißen • Schleifkontaktschweißen • Abrennstumpfschweißen • Pressstumpfschweißen 2. induktives Pressschweißen: Induktionsschweißen
		6.2.1 ... durch Flüssigkeit	Gießschmelzschweißen	flüssiger Zusatzwerkstoff 
	6.2 Schmelzschweißen	6.2.2 ... durch Gas	Gasschmelzschweißen	Gasschweißen Zusatzwerkstoff  andere Verfahrensvarianten: Gas-Pulver-Schweißen
		6.2.3 ... durch elektrische Gasentladung (Lichtbogen-schmelzschweißen)	(Lichtbogen)-Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen	... ist Fügen von Werkstücken, indem ein magnetisch abgelenkter Lichtbogen die Schweißfüge aufschmilzt. ...ist Fügen, indem durch Funkenentladungen der Werkstoff der Elektrode zum Werkstück abgetragen wird. Funken-schweißen Zusatzwerkstoff Funkenentladung Magnet Lichtbogen

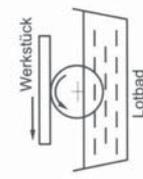
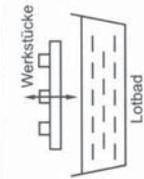
Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe			
6 Fügen durch Schweißen	6.1 Pressschweißen	6.1.5 ... durch Bewegung	Ultraschallschweißen	Ultraschallschweißen  andere Verfahrensvarianten: Ultraschallwärmeschweißen
		6.1.6 ... durch elektrischen Strom	Widerstandsschweißen	1. konduktives Pressschweißen: Widerstandspunktschweißen 
	6.2 Schmelzschweißen	6.2.1 ... durch Flüssigkeit	Reibschweißen	... ist Fügen, indem die durch Reibung erwärmten Werkstücke miteinander verpresst werden. 1. mind. ein Werkstück wird bewegt: Rotationsreibschweißen Spannelemente andere Verfahrensvarianten: Reibbolzenschweißen 2. Werkstücke werden nicht bewegt: Rührreibschweißen 

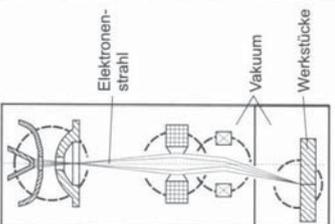
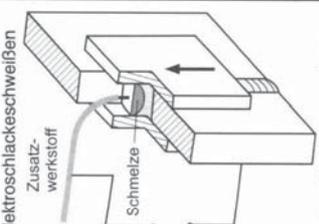
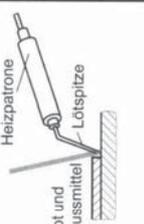
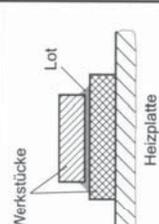
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen			Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe	Verfahren		
6 Fügen durch Schweißen	6.2 Schmelzschweißen	6.2.3 ... durch elektrische Gasentladung (Lichtbogenschweißen)	<p>... ist Fügen, indem die Fügestelle mit einem Lichtbogen, der unter Schutzgas zwischen einer Elektrode und dem Werkstück brennt, aufgeschmolzen wird.</p>	<p>1. abschmelzende Elektrode: Metall-Schutzgasschweißen</p>  <p>abschmelzende Elektrode</p> <p>2. nicht abschmelzende Elektrode: Wolfram-Inertgasschweißen</p>  <p>Zusatzwerkstoff</p> <p>Wolframelektrode</p>
			<p>... ist Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines nicht kohärenten Lichtstrahls aufgeschmolzen wird.</p>	 <p>Stromquelle</p> <p>Lichtquelle (im Brennpunkt)</p> <p>Lichtstrahl</p> <p>Werkstücke</p> <p>Fügestelle</p>
		6.2.4 ... durch Strahl	<p>... ist Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines kohärenten Lichtstrahls aufgeschmolzen wird.</p>	 <p>Laserstrahl</p> <p>Werkstücke</p>

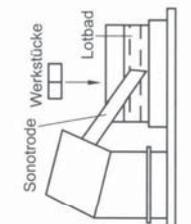
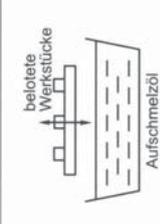
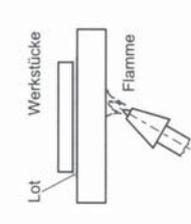
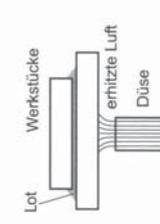
Hauptgruppe Fügen			Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe	Verfahren		
6 Fügen durch Schweißen	6.2 Schmelzschweißen	6.2.3 ... durch elektrische Gasentladung (Lichtbogenschweißen)	<p>... ist Fügen durch Aufschmelzen der Fügestelle mit Hilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer abschmelzenden, schlackebildenden Elektrode und dem Werkstück brennt.</p>	<p>Lichtbogenhandschweißen</p>  <p>Zusatzwerkstoff</p> <p>Umhüllung</p> <p>Lichtbogen</p> <p>Schlacke</p> <p>andere Verfahrensvarianten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schwerkraftlichtbogenschweißen</li> <li>• Federkraftlichtbogenschweißen</li> <li>• Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode</li> <li>• Unterschlansschweißen</li> </ul>
			<p>... ist Fügen durch Aufschmelzen der Fügestelle mit Hilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer nicht abschmelzenden Kohlelektrode und dem Werkstück brennt.</p>	 <p>Kohlelektrode</p> <p>Zusatzwerkstoff</p>
			<p>... ist Fügen durch Aufschmelzen der Fügestelle mit einem Lichtbogen, der zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück brennt, wobei der Lichtbogen mit schlackebildendem Pulver abgedeckt ist.</p>	 <p>Zusatzwerkstoff</p> <p>Schlacke</p> <p>Pulver</p>

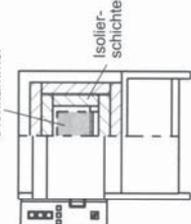
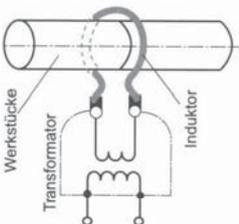
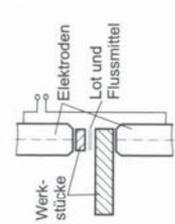
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Verfahren		
7 Fügen durch Löten	7.1 Weichlöten ( $T_{s, Lot} < 450^\circ\text{C}$ )	... ist Fügen (Beilöten) der Werkstücke zu löten, indem die Oberflächen durch eine in schmelzflüssigem Lot rotierende, dadurch aufgeheizte und mit Lot benetzte Rolle.	
	7.1.1 ... durch feste Körper	Rollenslöten	
	7.1.2 ... durch Flüssigkeit	Lotbadlöten	
		Wellenslöten (Schwalllöten)	
	Schlepplöten	... ist Fügen, indem die Werkstücke mit der Oberfläche eines schmelzflüssigen Lotbades in Berührung gebracht werden.	

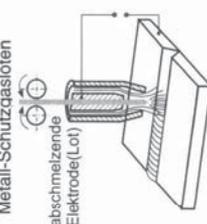
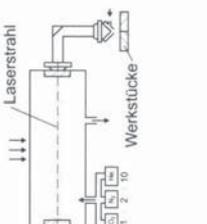
Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Verfahren		
6 Fügen durch Schweißen	6.2 Schmelzschweißen	... ist Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit einem Elektronenstrahl aufgeschmolzen wird.	
	6.2.4 ... durch Strahl	Elektronenstrahl-schweißen	
	6.2.5 ... durch elektrischen Strom	Widerstand-schmelz-schweißen	
7 Fügen durch Löten	7.1 Weichlöten ( $T_{s, Lot} < 450^\circ\text{C}$ )	... ist Fügen, indem mit einem Lötkolben die Lötstelle erwärmt und das Lot abgeschmolzen wird.	
	7.1.1 ... durch feste Körper	Kolbenslöten	<b>andere Verfahrensvariante: Kamerschweißen</b>
		Blocklöten	

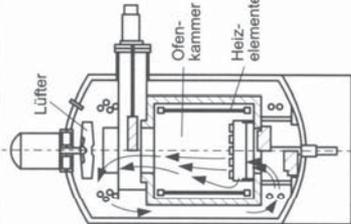
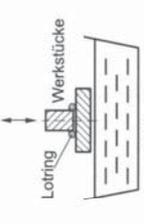
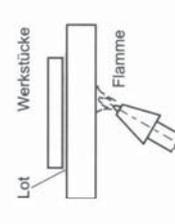
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe			
7 Fügen durch Löten	7.1 Weichlöten ( $T_{s, Lot} < 450^\circ\text{C}$ )	7.1.2 ... durch Flüssigkeit	Ultraschalllöten	 <p>... ist Fügen, indem die Werkstücke mit einem mit Ultraschall-schwingungen versehenem schmelzflüssigen Lotbad in Berührung gebracht und die Oxide auf den Lötstellen durch Kavitation beseitigt werden.</p>
			Wiederaufschmelzlöten (Reflow-Löten)	 <p>... ist Fügen, indem beilote Werkstücke in einem Aufschmelzlot erwärmt und verlötet werden.</p>
	7.1.3 ... durch Gas	Flammlöten	 <p>... ist Fügen, indem die Werkstücke durch Verbrennungswärme eines Brenngases auf Löttemperatur erwärmt werden.</p>	
			Warmgaslöten	 <p>... ist Fügen, indem die Werkstücke durch das Aufblasen erwärmer Luft oder Gase mittels eines Düsen-systems auf Löttemperatur erwärmt werden.</p>

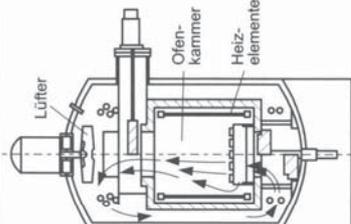
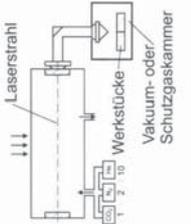
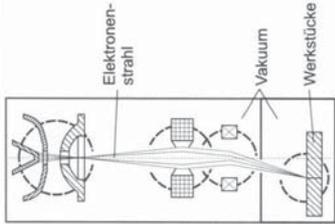
Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe			
7 Fügen durch Löten	7.1 Weichlöten ( $T_{s, Lot} < 450^\circ\text{C}$ )	7.1.3 ... durch Gas	Löten im Gasofen	 <p>... ist Fügen, indem die Werkstücke in einer gasbeheizten Ofenkammer durch Konvektion auf Löttemperatur erwärmt werden.</p>
			7.1.4 ... durch Strahl	Lichtstrahl-löten
		7.1.5 ... durch elektrischen Strom	Induktions-löten	 <p>... ist Fügen, indem Werkstücke durch einen induzierten Wechselstrom (elektromagnetische Induktion) auf Löttemperatur erwärmt werden.</p>
			Widerstands-löten	 <p>... ist Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle durch elektrische Widerstandserwärmung auch unter Anwendung von Druck auf Löttemperatur erwärmt wird.</p>

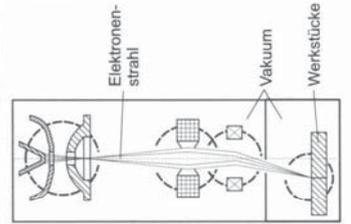
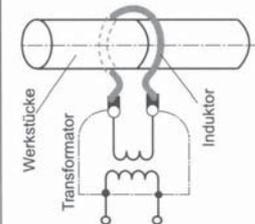
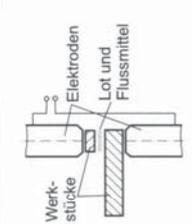
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe			
7 Fügen durch Löten	7.2 Hartlöten ( $T_{S, Lot} > 450^\circ\text{C}$ )	7.2.3 ... durch elektrische Gasentladung	... ist Fügen, indem das Lot durch einen Lichtbogen, der zwischen einer Elektrode und dem Werkstück unter Schutzgas brennt, abgeschmolzen wird.	 <p>1. abschmelzende Elektrode: Metall-Schutzgaslöten abschmelzende Elektrode(Lot)</p> <p>2. nicht abschmelzende Elektrode: Wolfram-Inertgaslöten</p>
	7.2.4 ... durch Strahl	Lichtstrahl-löten		
		Laserstrahl-löten	... ist Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines kohärenten Lichtstrahls auf Löttemperatur erwärmt wird.	 <p>Laserstrahl Werkstücke</p>

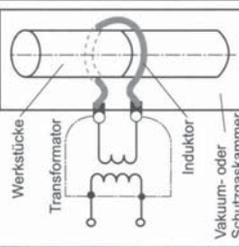
Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele	
Gruppe	Untergruppe				
7 Fügen durch Löten	7.1 Weichlöten ( $T_{S, Lot} < 450^\circ\text{C}$ )	7.1.5 ... durch elektrischen Strom	Ofenlöten mit Flussmittel ... ist Fügen, indem Werkstücke durch Konvektion, Wärmestrahlung und/oder Wärmeleitung in einer elektrisch beheizten Ofenkammer auf Löttemperatur erwärmt werden.		
				7.2 Hartlöten ( $T_{S, Lot} > 450^\circ\text{C}$ )	7.2.1 ... durch Flüssigkeit
			7.2.2 ... durch Gas	Salzbadlöten ... ist Fügen, in dem die Werkstücke durch Eintauchen in ein auf Löttemperatur erwärmtes Salzbad gelötet werden, wobei das Salzbad oft auch die Funktion des Flussmittels erfüllt.	 <p>Lotring Werkstücke Salzbad</p>
				Flammlöten ... ist Fügen, indem die Werkstücke durch Verbrennungswärme eines Brenngases auf Löttemperatur erwärmt werden.	 <p>Werkstücke Lot Flamme</p>

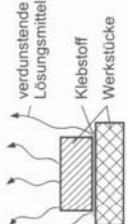
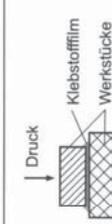
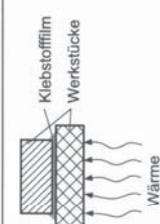
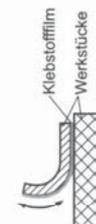
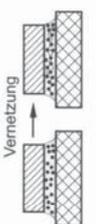
Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe			
7 Fügen durch Löten	7.2 Hartlöten ( $T_{s, Lot} > 450^\circ\text{C}$ )	7.2.5 ... durch elektrischen Strom	Ofenlöten  ... ist Fügen, indem Werkstücke durch Konvektion, Wärmestrahlung und/oder Wärmeleitung in einer elektrisch beheizten Ofenkammer auf Löttemperatur erwärmt werden.	 <ol style="list-style-type: none"> <li>Ofenlöten mit Flussmittel</li> <li>Ofenlöten in reduzierendem Schutzgas</li> <li>Ofenlöten in inertem Schutzgas</li> <li>Ofenlöten im Vakuum</li> </ol>
	7.3 Hochtemperaturlöten ( $T_{s, Lot} > 900^\circ\text{C}$ , Löten nur im Vakuum oder Schutzgas)	7.3.1 ... durch Strahl	Laserstrahl-löten  ... ist Fügen von Werkstücken, indem die Füge-stelle mit der Energie eines kohärenten Strahls auf Löttemperatur erwärmt wird.	
		Elektronenstrahl-löten  ... ist Fügen von Werkstücken, indem die Füge-stelle mit einem Elektronenstrahl auf Löttemperatur erwärmt wird.		

Hauptgruppe Fügen		Verfahren	Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe			
7 Fügen durch Löten	7.2 Hartlöten ( $T_{s, Lot} > 450^\circ\text{C}$ )	7.2.4 ... durch Strahl	Elektronenstrahl-löten  ... ist Fügen von Werkstücken, indem die Füge-stelle mit einem Elektronenstrahl auf Löttemperatur erwärmt wird.	
		7.2.5 ... durch elektrischen Strom	Induktions-löten  ... ist Fügen, indem Werkstücke durch einen induzierten Wechselstrom (elektromagnetische Induktion) auf Löttemperatur erwärmt werden.	
		Widerstands-löten  ... ist Fügen von Werkstücken, indem die Füge-stelle durch elektrische Widerstands-wärme unter Anwendung von Druck auf Löttemperatur erwärmt wird.		

Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe		
7 Fügen durch Löten	7.3 Hochtemperaturlöten ( $T_{S,Loe} > 900^{\circ}C$ , Löten nur im Vakuum oder Schutzgas)	<p>... ist Fügen, indem Werkstücke durch einen induzierten Wechselstrom (elektromagnetische Induktion) auf Löttemperatur erwärmt werden.</p> <p>... ist Fügen, indem Werkstücke durch Konvektion, Wärmestrahlung und/oder Wärmeleitung in einer elektrisch beheizten Ofenkammer auf Löttemperatur erwärmt werden.</p>	 <p>1. Induktionslöten in reduzierendem Schutzgas 2. Induktionslöten in inertem Schutzgas 3. Induktionslöten im Vakuum</p>
	7.3.2 ... durch elektrischen Strom		

Hauptgruppe Fügen		Beschreibung	Beispiele
Gruppe	Untergruppe		
8 Kleben	8.1 Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen	8.1.1 Nasskleben	<p>... ist Fügen von Werkstücken mit einem Klebstoff, welcher nach dem Vereinigen der Werkstücke noch wesentliche Anteile an Lösungs- bzw. Dispersionsmittel enthält und ein Abbinden nach Verdunstung der Lösungs- bzw. Dispersionsmittel erfolgt.</p> 
		8.1.2 Kontaktkleben	<p>... ist Fügen von mit Klebstoff versehenen Werkstücken durch Kontaktieren des scheinbar trockenen Klebstofffilmes unter Druck.</p> 
	8.2 Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen (Reaktionskleben)	8.1.3 Aktivierkleben	<p>... ist Fügen von mit Klebstoff versehenen Werkstücken, wobei die Klebstofffilme durch äußere Einwirkung klebefähig (aktiv) gemacht werden, wobei Wärmeaktivierverfahren in der Praxis am häufigsten Anwendung finden.</p> 
		8.1.4 Hartkleben	<p>... ist Fügen von mit Klebstoff versehenen Werkstücken, bei denen die Klebstofffilme nach beliebiger Zeit schon unter geringem Druck haften. Charakteristisch sind geringe Haftfestigkeiten, die ein späteres Trennen der Werkstücke ohne Materialbeschädigung ermöglichen.</p> 
9 Textiles Fügen		<p>Das „Textile Fügen“ umfasst das Fertigen von Fäden, das Fügen mit diesen Fäden als Verbindungselemente und das Fertigen von textilen Flächengebilden, wobei nichtmetallische Werkstoffe Anwendung finden. Die Fügeverfahren sind teilweise vergleichbar mit den Verfahren „5.1 Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper“.</p> 	

Ober- und Untergruppen der Fügeverfahren nach DIN 8593, DIN 1910 und DIN 8505 [12]

## 16.4 Galvanische Spannungsreihe <sup>[22]</sup>

