

Diplomarbeit

# Korrosionsuntersuchungen von verschraubten Mg-Komponenten

zur Erlangung des Titels eines Dipl. - Ing.



**MONTAN**  
**UNIVERSITÄT**  
WWW.UNILEOBEN.AC.AT

Montanuniversität Leoben

Department Product Engineering

Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau



DI (FH) Thomas Jakob

**Begutachter:**

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Florian Grün

Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben

Leoben, 2015

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

## AFFIDAVIT

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

17.01.2015

---

Datum



---

Unterschrift

## Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand aus Eigeninitiative parallel zu meiner Tätigkeit als Produktmanager bei dem Unternehmen ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG, das europaweit Marktführer bei der Herstellung von gewindefurchenden Schrauben ist. Seit 2004 wurden in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau (AMB) am Department Product Engineering der Montanuniversität Leoben und der MAGNA Powertrain AG & Co KG Untersuchungen zum Einsatz hochfester gewindefurchender Aluminiumschrauben für Magnesium-Powertrainkomponenten durchgeführt. Im Rahmen dieser Forschungstätigkeiten wurden bereits zwei Dissertationen und eine Diplomarbeit erstellt, welche jedoch alle den Schwerpunkt Betriebsfestigkeit hatten. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Ausarbeitungen durfte ich als Produktmanager für gewindefurchende Schraubensysteme bei ARNOLD UMFORMTECHNIK einige Schraubenverbandsauslegungen und labortechnische Applikationsanalysen mit gestalten und durchführen. Die Einsatzbedingungen hinsichtlich Montagezustand, Betriebslasten, Betriebstemperaturen und Relaxation wurden somit untersucht, das komplexe Thema der korrosionsgerechten Auslegung von verschraubten Mg-Komponenten mit hochfesten gewindefurchenden Al-Schrauben aus der Legierung EN AW 7075 ist aber noch nicht final ausgearbeitet worden.

Für einen Serieneinsatz derartiger Schraubensysteme muss eine Auslegungsrichtlinie erstellt werden. Ziel dieser Auslegungsrichtlinie ist die Festlegung der Grenzen der Einsatzbedingungen sowie die Beschreibung des Schraubenherstellprozesses und der Schraubenprüfkriterien. Meiner Meinung nach kann eine Auslegungsrichtlinie nur konstruktiv sein.

Für die Begleitung und Unterstützung der Arbeit möchte ich meinen Dank an folgende Personen richten:

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Florian Grün, Leiter des Lehrstuhls für Allgemeinen Maschinenbau, für die Möglichkeit der Durchführung der vorliegenden Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. István Gódor für die zahlreichen interessanten Diskussionen und konstruktiven Hinweise zur Gestaltung dieser Diplomarbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Hinteregger für die Initiierung vieler Projekte, für die vielen fachlichen Diskussionen und gemeinsam durchgeführten Schraubfallanalysen oftmals bis spät in die Nacht hinein.

Herrn Ao. Univ.-Prof. Dr. Gregor Mori für die Durchführung der Korrosionsuntersuchungen am Institut für Allgemeine, Analytische und Physikalische Chemie an der MUL sowie für die maßgebende Mitgestaltung der Versuchsstrategie bei den geführten Korrosionsuntersuchungen.

Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerhard Gerstmayr für die Betreuung meiner Diplomarbeit in der Anfangsphase sowie für die konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen des maßgebenden Forschungsprojektes der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft.

Spezieller Dank gilt außerdem dem langjährigen Firmenpartner Magna Powertrain, Lannach, und insbesondere der Vorentwicklungsabteilung, vertreten durch Dr. Heinz Klampfl und DI (FH) Markus Reiterer, sowie dem ehemaligen Mitarbeiter DI Philipp Oberhuber, der auch in den Forschungsprojekten mitgearbeitet hat.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Heinz Leitner, der als Projektleiter seitens des AMB in der Anfangsphase einige Verschraubungsprojekte maßgeblich mitgestaltet hat.

Ein besonderer Dank gilt weiters der Geschäftsführung der ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG und allen Mitarbeitern, die diese Projekte unterstützt haben. Ohne die Unterstützung der Geschäftsführung wären die Projektdurchführung und die Erstellung der vorliegenden Diplomarbeit nicht möglich gewesen.

Zuletzt möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie, insbesondere bei meiner Ehefrau, für die Unterstützung in den vergangenen Jahren bedanken.

## Kurzfassung

Gewindefurchende Aluminiumschrauben bieten bei der Magnesiumdirektverschraubung ein großes Potenzial zur Kosten- und Gewichtsreduzierung. Für einen prozesssicheren Gewindefurchprozess in Magnesium ist der Einsatz von EN AW 7xxx-Furchschrauben notwendig. In der Literatur wird aber auf ein negatives Korrosionsverhalten der EN AW 7xxx-Legierungen hingewiesen.

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Erstellung einer Auslegungsrichtlinie für hochfeste gewindefurchende Al-Schrauben für einen Serieneinsatz bei Mg-Antriebsstrangkomponenten. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfkonzept zur Bewertung des Kontaktkorrosionsverhaltens verschraubter Mg-Komponenten unter praxisnahen Einsatzbedingungen entwickelt. Entsprechend der hohen Korrosionsschutzanforderungen von 720 h im Salzsprühnebeltest nach DIN 50021 zeigte sich, dass Schrauben aus der Legierung EN AW 7075 mit einem geeigneten Top Coat eine geringere korrosive Abtragsrate der verschraubten Mg-Teile generierten als Schrauben aus der Legierung EN AW 6056, welche bereits in der Automobilindustrie etabliert sind. Neben den Aluminiumschrauben wurden auch Stahlschrauben mit verschiedenen Schutzsystemen untersucht.

Ferner wurde eine Testmethodik für den Nachweis von Spannungsrisskorrosion (SpRK) entwickelt. Überelastisch montierte EN AW 7075 (T6, T7x)-Schrauben in Prüfkörpern aus Al, Mg und Edelstahl (A2) bei Auslagerung im Wechselklimatetest VDA 621 - 415 sowie im Salzsprühnebeltest DIN 50021 zeigten, dass SpRK der EN AW 7075-Schrauben überwiegend bei verspannten Edelstahlrahmen auftrat. Dies ist ein Indikator dafür, dass die SpRK primär durch eine anodische Auflösung in den korngrenzennahen Bereichen ausgelöst wird. Bei den verspannten Magnesiumrahmen traten keine Brüche der EN AW 7075 T6-Schrauben auf, weil die Schrauben durch das unedlere Mg kathodisch geschützt werden. Daher erscheint das Risiko der SpRK bei der Verschraubung von Mg-Komponenten als gering. Die Untersuchung zeigte, dass druckinduzierte Eigenspannungen durch plastische Verformung beim Gewindewalzen nach der Wärmebehandlung einen signifikanten Einfluss auf die SpRK-Empfindlichkeit haben.

Gewindefurchschrauben EN AW 7075 T7x im schlussgerollten Zustand mit angepasstem Top Coat haben aufgrund der geringen Kontaktkorrosion sowie eines deutlich reduzierten Risikos für die SpRK das größte Potenzial für die Verwendung für prozesssicheres Gewindefurchen in Mg-Legierungen. Eine finale Verifizierung dieses Zustandes mit Hilfe von angepassten SpRK-Tests ist zu empfehlen.

## Abstract

Aluminium threadforming screws for fastening magnesium components offer a high potential regarding cost- and weightreduction. For a safe threadforming process in magnesium the bolt material EN AW 7xxx is necessary. EN AW 7075 alloys are often referred as not applicable for high load applications in the literature due to negative corrosion performance.

The own of this diploma thesis is the creation of a guideline for high strength aluminum threadforming fasteners for usage in magnesium powertrain components in service.

For this purpose a concept for evaluation of the contact corrosion behavior of bolted magnesium components under practical application conditions was created. Accordingly to the high requirements for corrosion protection of powertrain components due to the recommended 720 hours salt spray test with reference to DIN 50021, the corrosion test results indicate a better galvanic corrosion performance of EN AW 7075 screws with special top coat compared to the in the automotive industry established EN AW 6056 screws. In addition to the aluminium bolts steel bolts with different surface systems and protection systems were investigated.

Furthermore a testing method for detection of stress corrosion cracking (SCC) was developed. Overelastic tightened high strength aluminium fasteners type EN AW 7075 (T6, T7x) in test specimens consisting of aluminium, magnesium and stainless steel with removal in salt spray tests according to DIN 50021 and alternating climate tests according VDA 621-415, indicated that SCC mostly appears with the bolted stainless steel test specimens. This indicates that SCC under these conditions will be activated primary due to an anodic dissolution near to the grain boundaries of the EN AW 7075 bolt material. Bolted magnesium test specimens show no cracks of the EN AW 7075 T6 bolts under SCC testing conditions because EN AW 7075 bolts are cathodic protected due to the ignoble magnesium. Therefore the risk for SCC is on a low level when using EN AW 7075 bolts for fastening of magnesium components. This study also shows a significant influence of the thread rolling process after heat treatment on SCC sensitivity as compressive residual stresses and the influence of relaxation when thread rolling happen before heat treatment.

Thread forming screws EN AW 7075 T7x with final thread rolling condition and with adapted top coats offer a big potential for a threadforming process into magnesium alloys with process security, low galvanic corrosion attack to magnesium and a low risk for SCC. A final verification for these conditions with adapted SCC tests is recommended.

# Inhaltsverzeichnis

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG.....	2
Vorwort.....	3
Kurzfassung .....	5
Abstract.....	6
Inhaltsverzeichnis.....	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
1. Einleitung .....	1
2. Stand der Technik .....	3
2.1 Aluminiumschrauben.....	3
2.1.1 Aluminiummetallurgie, Bezeichnungsangaben .....	4
2.1.2 Normung von Aluminiumschrauben.....	7
2.2 Korrosion verschraubter Magnesiumkomponenten .....	8
2.2.1 Grundlagen zu Magnesiumlegierungen.....	8
2.2.2 Eigenschaften von wichtigen Mg-Legierungen .....	9
2.2.3 Einteilung von Korrosionsarten.....	11
2.2.4 Korrosion von Magnesiumkomponenten .....	13
2.2.5 Kontaktkorrosion von verschraubten Mg-Komponenten .....	15
2.2.6 Spannungsrisskorrosion von hochfesten Aluminiumschrauben .....	20
<i>Formel 20 Pitting Korrosion – Reaktion im Bereich des intermetallischen Partikels .....</i>	<i>24</i>
3. Prüfmethodik.....	32
3.1 Galvanische Korrosion .....	33
3.1.1 1. Voruntersuchung von verschraubten Mg-Gehäusen aus AZ91HP.....	33
3.1.2 2. Salzsprühnebeltest von verschraubten Mg-Gehäusen aus AZ91HP .....	48
3.1.3 Elektrochemische Potenzialmessungen .....	55
3.2 Spannungsrisskorrosionstest .....	57
3.2.1 1. Voruntersuchung der SpRK von verschraubten AZ91HP-Platten .....	57
3.2.2 2. SpRK - Test mit AMgSi0,5-Prüfplatten.....	64
3.2.3 SpRK-Tests im Rahmen des FFG-Förderungsprojektes .....	74
4. Zusammenfassung und Ausblick.....	106
4.1 Zusammenfassung Galvanische Korrosion: .....	106
4.2 Zusammenfassung Spannungsrisskorrosion .....	107
4.3 Fazit und Ausblick .....	110
4.3.1 Wirtschaftliche Aspekte .....	110
4.3.2 Montagevorspannkkräfte, Relaxation – Anfangs und Endfestigkeiten .....	111
4.3.3 Galvanische Korrosion verschraubter Magnesiumgehäuse .....	111
4.3.4 Spannungsrisskorrosion.....	112
5. Literaturverzeichnis .....	114
6. Publikationsverzeichnis .....	118
7. Abbildungsverzeichnis.....	119
8. Tabellenverzeichnis.....	123

9. Formelverzeichnis .....	125
----------------------------	-----

## Abkürzungsverzeichnis

A	Bruchdehnung [%]
A <sub>S</sub>	Spannungsquerschnitt [mm <sup>2</sup> ]
Al	Aluminium
ASR	Außensechsrund
AUT	ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG
FEAU	Fertigungsauftrag
F <sub>v</sub>	Montagevorspannkraft [kN]
FVA	Forschungsvorhaben Antriebstechnik
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Gefu	Gewindefurchende Schrauben
HCL	Salzsäure (Chlorwasserstoffsäure)
IK	Interkristalline Korrosion
M <sub>A</sub>	Anziehdrehmoment [Nm]
M <sub>d</sub>	Drehmoment [Nm]
M <sub>F</sub>	Gewindefurchmoment [Nm]; Drehmoment, das beim Furchen des Muttergewindes auftritt
M <sub>S</sub>	Schwellmoment [Nm], eingestelltes Enddrehmoment der 1. Schraubstufe
M <sub>LB</sub>	Losbrechmoment [Nm]
M <sub>aus</sub>	Ausschraubmoment [Nm]
MK	Mischkristall
MUL	Montan Universität Leoben
n	Schrauberspindeldrehzahl in U.p.M.
OKS 1700	Gleitmittel für Schrauben (synthetisches Wachs in Isopropanol und Wasser)
R <sub>m</sub>	Zugfestigkeit [MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Streckgrenze [MPa]
SpRK	Spannungsrissskorrosion
SG	Schlussgerollt, d.h.Gewindewalzen nach der Wärmebehandlung
SW	Schlusswärmebehandelt, d.h.Gewindewalzen vor der Wärmebehandlung
SST	Salzsprühnebeltest nach DIN 50021

---

St	Stahl
Trilobular	Bei Schraubengeometrien gleichbedeutend mit „Gleichdick“. Die Höchstpunkte des Außendurchmessers sind je um 120° versetzt angeordnet.
TT2k	TAPTITE 2000® = gewindefurchende trilobulare Schraube, welche ein metrisches Gewinde in Metalle formt
T6	Zustand höchster Festigkeit von warmausgelagerten Aluminiumlegierungen
T7x	Überalterter Zustand von warmausgelagerten Aluminiumlegierungen
U.p.M.	Umdrehungen / Minute [ $\text{min}^{-1}$ ]
NaCl	Natriumchlorid (Kochsalz)
N	Normalität $N = n_{\text{val}} / V$ ( $n_{\text{val}}$ = Menge an äquivalenten, $V$ = Volumen, 0,1 N Lösung liegt vor, wenn $c_{\text{eq}} = 0,1 \text{ mol / L.}$ ) Stoffmengenkonzentration

# 1. Einleitung

Antriebsstrangkomponenten wie z.B. Getriebegehäuse werden heute zumeist aus Aluminium hergestellt. Für das Fügen dieser Aluminiumgehäuse werden häufig Stahlschrauben der Festigkeitsklasse 8.8 oder 10.9 verwendet.

In der Automobilindustrie steigt der Druck, die Kosten und den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu reduzieren, was zur Anwendung von Leichtbaustrategien in Verbindung mit dem Einsatz gewindefurchender Schraubensysteme führt.

So wird z.B. nach [1] das Mercedes Benz 7G-Tronik-Getriebe aus der Magnesiumlegierung AS 31 hergestellt.

Im Vergleich zur zuvor verwendeten Al-Legierung konnte das Gehäusegewicht durch die Anwendung einer Mg-Legierung von 8,3 kg auf 5,9 kg gesenkt werden, bei einer gleichzeitigen Erhöhung der übertragbaren Drehmomente um 20%.

Bei diesem Getriebetyp werden entsprechend der Mercedes Benz Werknorm MBN – 8839 [2] bereits Aluminiumschrauben mit metrischen Regelgewinden aus der Legierung EN AW – AlSi1MgCuMn mit der Werkstoff - Nr.: EN AW 6056 eingesetzt.

Die Gießerei des Volkswagenwerkes in Kassel produziert laut [3] täglich ca. 10.000 Getriebegehäuse, darunter ca. 2.000 Magnesiumgehäuse.

Dies zeigt, dass zunehmend mehr Gehäuse für Powertrainkomponenten aus Magnesium gefertigt werden.

Für die Verschraubung von Mg-Gehäusen werden derzeit Aluminiumschrauben mit metrischen Gewinden eingesetzt. Für die weitere Kostenoptimierung stellt sich die Frage, welcher Aluminiumschraubenwerkstoff ein Gewindefurchen in Magnesium ermöglicht.

Einige Veröffentlichungen wie z.B. [4] und [5] weisen darauf hin, dass die etablierte Al-Legierung EN AW 6056 nicht geeignet ist, eine gewindefurchende Verbindung von Magnesiumwerkstoffen herzustellen. Diese Al-Legierung weist eine zu geringe Festigkeit und Härte auf.

Insofern besteht die Notwendigkeit, höherfeste Aluminiumlegierungen zu verwenden, wobei insbesondere AlZnMgCu-Legierungen aus der 7000er-Gruppe in Betracht kommen. Diese Al-Legierungen weisen jedoch ein schlechteres Korrosionsverhalten auf.

Die Thematik des Gewindefurchens mit hochfesten TAPTITE 2000®-Schrauben aus der Legierung EN AW 7075 in Mg-Legierungen wurde bereits in [6], [7] und [8] erforscht. Besonders die Bereiche Montage, Relaxation und Schwingfestigkeit wurden eingehend untersucht, wobei für den Grundwerkstoff (zu verschraubender Werkstoff) ausschließlich die Mg-Legierung AZ91 verwendet wurde. Das Problem der Korrosion wurde nicht näher betrachtet. In [9] wurde das Betriebsverhalten thermisch belasteter Mg-Legierungen untersucht. Dabei erfolgten in Zusammenarbeit mit der MONTAN UNIVERSITÄT LEOBEN (AMB & Institut für Chemie), MAGNA POWERTRAIN und ARNOLD UMFORMTECHNIK verschiedene Korrosionsuntersuchungen. Der Schwerpunkt dieser Dissertation [9], die im

Rahmen eines Förderprojektes [13] erstellt wurde, lag aber nicht auf den Korrosionsuntersuchungen.

Der Autor dieser Diplomarbeit hat bei allen dieser Diplomarbeit vorangegangenen Projekten [6], [7], [8] und [9] als Projektleiter seitens der ARNOLD UMFORMTECHNIK GmbH & Co. KG (im nachfolgenden AUT genannt) mitgewirkt.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist nachzuweisen, unter welchen Rahmenbedingungen ein Serieneinsatz dieser hochfesten Aluminium-Gewindefurchschrauben der 7000er Klasse für Powertrainkomponenten aus Mg in Betracht kommt. Dabei ist insbesondere zu berücksichtigen, unter welchen Umständen das Risiko für Spannungsrisskorrosion (SpRK) und galvanische Korrosion (Kontaktkorrosion) zu Magnesium akzeptabel ist, wobei der Einfluss folgender Kriterien untersucht werden soll:

- Legierungsauswahl der gewindefurchenden Al-Schrauben
- Herstellprozess und Wärmebehandlungsparameter der Schrauben
- Oberflächenbeschichtung

Dabei sollen folgende Teilbereiche betrachtet werden:

- Vergleich der galvanischen Korrosionseigenschaften von hochfesten EN AW 7075-Schrauben mit den der etablierten EN AW 6056-Schrauben und herkömmlichen Stahlschrauben im Verband mit Mg-Gehäusen
- Aufbau einer Versuchsmethodik sowie Erklärung der Versuchsdurchführung von SpRK-Tests und Erläuterung der mechanischen Eigenschaften und der vorherrschenden Spannungszustände in den Versuchsschrauben. Dabei soll ein Vergleich der SpRK-Eigenschaften, welche in [9] ermittelt wurden, mit den Ergebnissen aus bereits davor erfolgten SpRK-Untersuchungen erfolgen.

In weiterer Folge soll ein Auslegungsstandard zur Verschraubung von Magnesium-Powertrain-Komponenten definiert werden.

## 2. Stand der Technik

### 2.1 Aluminiumschrauben

Im Bereich hochfester Aluminiumlegierungen gibt es in der Industrie derzeit zwei Hauptgruppen, nämlich EN AW 6000 und EN AW 7000.

Aluminiumschrauben werden heute in der Automobilindustrie in vielen Bereichen eingesetzt. Einige deutsche Automobilhersteller haben Werknormen für die Spezifikation der Al-Schrauben erstellt, dabei ist derzeit nur die Legierung EN AW 6056 – T6 als eigener Standard normiert. Sowohl in der Literatur (z.B. Heinrich [15] und Westphal [16]) als auch in den Normen der Automobilindustrie (Daimlernorm MBN 8839, VW-Norm VW 60469, BMW Group Standard GS 92018) wird die Legierung EN AW 6056 – T6 als etablierter Al-Schraubenwerkstoff dargestellt, da sie sich durch hohe Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und geringe thermische Dehnung auszeichnet.

Aluminiumschrauben werden für das Fügen von Leichtmetallkomponenten (Magnesium oder Aluminium) produziert und verwendet. Wesentliche Vorteile von Al-Schrauben gegenüber Stahlwerkstoffen sind nach Reinhold et al. [14] sowie Heinrich [15] und Westphal [16]:

- Al-Schraubenwerkstoff und Gehäuse aus Al-Werkstoff oder Mg-Werkstoff haben ähnliche thermische Ausdehnungskoeffizienten und dadurch geringere Vorspannkraftrelaxation.
- Durch ähnliche elektrochemische Potenziale weisen sie eine geringere Neigung zur Kontaktkorrosion auf.
- Al-Schrauben generieren geringere Schraubengewichte, da sie um ca. 60% leichter als Stahlschrauben sind. Durch die gegenüber Stahlschrauben geringere Festigkeit wird weniger Einschraubtiefe benötigt. Dadurch können kürzere Al-Schrauben und beim Einschraubteil kleinere Gussaugen verwendet werden. Durch die leichteren und kürzeren Schrauben und die Gussaugen mit weniger Volumen wird eine Reduktion des Gesamtgewichtes ermöglicht.

Die Hauptproduzenten von EN AW 6056-Schrauben sind derzeit:

- RIBE, Richard Bergner Verbindungstechnik GmbH (2012 ~ 750 Tonnen Al-Draht bzw. 180 Mio. Stück Al-Schrauben)
- ESKA Automotive GmbH (2012 ca. 600 Tonnen Al-Draht)

Derzeit gibt es in der Automobilindustrie noch keinen Serieneinsatz von Schrauben aus der Legierung EN AW 7075. Der Grund dafür liegt primär in der ablehnenden Haltung der Automobilhersteller. Nach Reinhold et al. [14] ist ein Festigkeitsniveau von ca. 400 MPa für die meisten Anwendungsfälle ausreichend. Zitat DVM – Bericht „Korrosionsschutz bei Leichtmetallverschraubungen“ – B. Reinhold, Audi AG [14]:

*„Das Bestreben, sehr hochfeste Alu-Legierungen einzusetzen, weist sich spätestens dann als überflüssig, wenn die Schraubenverbindung eine zusätzliche Temperaturbelastung erfährt. Durch thermisch aktivierte Fließvorgänge im Magnesium wird dann die Vorspannkraft*

*auf ein stationäres Niveau reduziert und die gedachte hohe Vorspannkraft kann nicht in das Magnesium übertragen werden, da dieses kriecht.“*

Ferner wird in [14] erwähnt, dass bei potentiometrischer Polarisierung von AlMgSi-Schrauben (EN AW 6013) mit 0,6 % – 1,1 % Cu Vorteile gegenüber AlZnMgCu-Schrauben (EN AW 7075) mit 1,2 % – 2,0 % Cu nachgewiesen wurden. Die Oxidschicht auf der EN AW 6013-Schraube ist stabiler. Ferner wird in [14] auf das interkristalline Korrosionsverhalten der AlZnMgCu-Schrauben hingewiesen.

Nach [15] ist die Anwendung von höchstfesten Al-Legierungen der 7000er-Gruppe auf Komponenten beschränkt, welche einer max. Temperatur von 120°C ausgesetzt sind. Ferner dürfen die Komponenten keinen salzhaltigen Medien ausgesetzt sein.

Dies führt zum Schluss, dass Schrauben der 7000er-Gruppe für Powertrainanwendungen ungeeignet sind, da diese i. d. R. mit salzhaltigen Medien in Kontakt kommen und zudem oftmals einer Temperatur über 120°C ausgesetzt sind.

Diese beiden Kernaussagen – mangelnde Korrosions- und Temperaturbeständigkeit der 7000er-Legierungen – repräsentieren die typische Sichtweise der Automobilindustrie, die einen Einsatz dieses Schraubenwerkstoffes in diesem Industriebereich bisher verhindert hat.

Für einen prozesssicheren Gewindefurchprozess mit der Anforderung, noch akzeptable Montagevorspannkraft zu erzielen, reicht der in der Automobilindustrie etablierte Schraubenwerkstoff EN AW 6056 – T6 festigkeitstechnisch nicht aus. Gewindefurchschrauben des Types TAPTITE 2000® z.B. aus der Legierung EN AW 7075 - T6 weisen hingegen eine hinreichende Festigkeit auf, so dass beim Furchen in Magnesium durchaus Montagevorspannkraft > 10 kN erreicht werden können. Dieser Sachverhalt wurde bereits in zahlreichen Veröffentlichungen wie Jakob et al. [4], [5], [11] sowie Leitner et al. [10] dargestellt.

### **2.1.1 Aluminiummetallurgie, Bezeichnungsangaben**

Aluminiumlegierungen werden nach PECHINEY RHENALU [56] in acht Serien unterteilt, wobei bei den Knetlegierungen der Legierungsanteil bei 1% bis zu 7% liegt.

Übersicht von Aluminium - Legierungsreihen					
Leg. - Serie	Haupt-Leg. Element 1 [%]	Haupt-Leg. Element 2 [%]	Zusatz-elemente	Zugfestigkeit Rm [Mpa]	Verfestigungsart
1000	-	-	Cu	50 -160	Kaltverfestigung
3000	Mangan 0,5-1,5	-	Mg, Cu	100-240	
5000	Magnesium 0,5-5,0	-	Mn, Cr	100-340	
8000	Silizium 0,3-1,0	Eisen 0,6-2,0	-	130-190	
6000	Magnesium 0,5-1,5	Silizium 0,5-1,5	Cu, Cr	200-320	Warm- & Kalt-aushärtung
2000	Kupfer 2,0-6,0	-	Si, Mg	300-480	
7000	Zink 5,0-7,0	Magnesium 0,5-1,5	Cu	430-600	
4000	Silizium 0,8-1,7	-	-	150-400	

**Tabelle 1: Al-Legierungsreihen und deren wichtigsten Legierungselemente [56]**

Al-Legierungen enthalten ferner in geringeren Konzentrationen (< 1%) Zusatzstoffe wie z.B. Chrom, Mangan, Titan, Zirkonium, um bestimmte Eigenschaften zu erreichen. Die Zusatzstoffe der wichtigsten Legierungen werden in Tabelle 1 detailliert aufgelistet.

Bei Legierungen der 7000-Klasse ist z.B. Kupfer erforderlich, wenn die Festigkeit maximiert werden soll. Die DIN 515 unterscheidet zwischen 3 Werkstoffzuständen:

- F = Herstellzustand ohne garantierte Eigenschaften
- O = Weichgeglüht mit max. Formänderungsvermögen
- H = Kaltverfestigt

Bei den H-Zuständen erfolgt mit Hilfe von zwei weiteren Zahlen nach dem H eine detailliertere Beschreibung des Verfestigungszustandes, wobei die 1. Zahl bedeutet:

- H1X = nur Kaltverfestigung
- H2X = Kaltverfestigt mit anschließendem Teilglühen
- H3X = Kaltverfestigt + stabilisiert (z.B. Wärmebehandlung bei niedriger Temperatur)

Nach [20] bezeichnet die zweite Zahl den endgültigen Grad der Kaltverfestigung, wobei zwischen 4 Hauptzuständen differenziert wird:

- **Hart** wird mit der Zahl 8 bezeichnet. Dementsprechend gilt für „nur Kaltverfestigung = 1“ und „Zustand hart = 8“ die Bezeichnung H18, welches einer 75%igen Kaltverfestigung durch Kaltwalzen entspricht.
- **Dreiviertelhart** entspricht H16 und weist eine 50%-ige Kaltverfestigung auf.
- **Halbhart** entspricht H14 und weist entsprechend eine 25%-ige Kaltverfestigung auf.
- **Viertelhart** wird mit H12 bezeichnet und weist entsprechend eine 12%-ige Kaltverfestigung auf.

Bei der Herstellung von Aluminiumschrauben haben sich die Anlieferzustände H12 / H13 bewährt, weil diese ein relativ hohes Umformvermögen des Aluminiumdrahtes zeigen.

Im Bereich der hochfesten / höchstfesten Aluminiumschrauben hat sich die Verwendung von aushärtbaren Al-Legierungen (Legierung 2000, 6000 und 7000) etabliert.

Die Aushärtung dieser Legierungen basiert nach [56] auf folgenden Schritten:

- **Lösungsglühen** (nahe Solidustemperatur), wobei eine korrekte Temperaturführung sehr wichtig ist. Zu niedrige Temperaturen bewirken u.U. eine starke Reduktion der mechanischen Eigenschaften, während zu hohe Temperaturen zu irreparablen Schäden führen können.
- **Abschrecken**, das unmittelbar nach dem Lösungsglühen mittels Wasserbad, Sprühnebel oder Druckluft erfolgen muss. Die Abschreckgeschwindigkeit muss oberhalb der kritischen Abschreckgeschwindigkeit liegen. Bei EN AW 7020 liegt diese z.B. bei  $0,5^{\circ}\text{C s}^{-1}$ . Für die höchstfeste Legierung EN AW 7075, aus welcher auch die gewindefurchenden TAPTITE 2000<sup>®</sup>-Schrauben hergestellt wurden, liegt die kritische Abschreckgeschwindigkeit bei  $\geq 100^{\circ}\text{C s}^{-1}$ .
- **Auslagerung**, wobei unterschieden wird zwischen  
Kaltauslagerung bei Umgebungstemperatur ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$ ), d.h. mit zunehmender Auslagerungsdauer erfolgt durch die „Alterung“ eine Festigkeitszunahme und eine Reduktion des Umformvermögens.  
Warmauslagerung bei erhöhten Temperaturen zwischen  $100^{\circ}\text{C}$  und  $200^{\circ}\text{C}$ , wobei eine Ausscheidung von festigkeitserhöhenden Verbindungen aus der erstarrten übersättigten Lösung erfolgt. Im Einzelnen handelt es sich um die Ausscheidung folgender intermetallischen Phasen:
  - $\text{Al}_2\text{Cu}$  bei EN AW 2017A und  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  bei EN AW 2024
  - $\text{Mg}_2\text{Si}$  bei 6000-Legierungen
  - $\text{MgZn}_2$  bei kupferfreien 7000-Legierungen
  - $\text{Mg}(\text{ZnAlCu})_2$  bei kupferhaltigen 7000-Legierungen (wie im Projekt verwendet)

Die Warmauslagerung erfolgt i.d.R. mit Hilfe von Luftumwälzöfen, wobei auch hier eine genaue Einhaltung der Auslagerungsdauer sowie der Solltemperaturen erforderlich ist.

Nach [20] wird ein Maximum an mechanischer Festigkeit beim Zustand T6 nach der Zeit  $t$  erreicht. Ist die Warmauslagerungsdauer  $< t$ , dann liegt ein unteralterter Zustand vor (T51, T61, T63, T64, T65). Im unteralterten Zustand weist die Al-Leg. eine relativ gute plastische Verformbarkeit auf, jedoch eine geringere Korrosionsbeständigkeit.

Bei einer Auslagerungsdauer  $> t$  liegen überalterte Zustände (T73, T74, T76, T79) mit einer verbesserten Korrosionsbeständigkeit vor.

Nach [20] wird für korrosionskritische Legierungen wie z. B. EN AW 7075 oder EN AW 7049 eine 2-stufige Warmauslagerung empfohlen:

- T73: erhöhte Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion;
- T76: begrenzte Überalterung, so dass die max. Zugfestigkeit erreicht wird, die noch mit einer angemessenen Schichtkorrosionsbeständigkeit vereinbar ist.

Ferner werden lt. [20] Bedingungen für das Lösungsglühen, Abschrecken und Aushärten beschrieben:

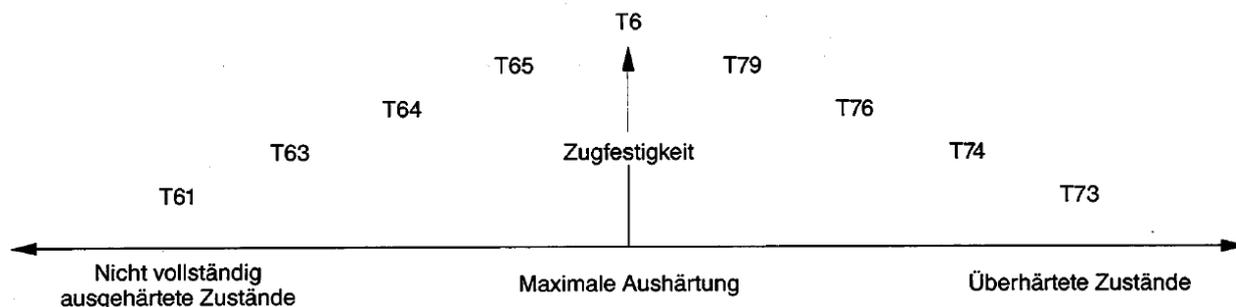


Abbildung 1: Aushärtungszustände nach DIN 515 S.8 [20]

### 2.1.2 Normung von Aluminiumschrauben

Eine Normung von Aluminiumschrauben auf internationaler Ebene erfolgt lediglich in der ISO 8839, Mechanical properties of fasteners – Bolts, screws, studs and nuts made of non-ferrous metals [12]. Von den Al-Legierungen mit  $R_m > 380$  MPa werden dort aber nur die Legierungen Al4 (AlCu4MgSi) sowie Al5 AlZnMgCu0,5) und Al6 (AlZn5,5MgCu) normiert. Die bei den deutschen Autobauern etablierte Legierung EN AW 6056 (AlSi1MgCuMn) hingegen wird in der ISO 8839 nicht erwähnt. Bestrebungen seitens der deutschen Automobilindustrie und der DIN, die ENAW 6056-Legierung in die ISO 8839 aufnehmen zu lassen, sind bislang gescheitert. Die wichtigsten Aluminiumlegierungen für Schraubenwerkstoffe werden in Tabelle 1 dargestellt.

Bezeichnung der Legierung						mech. Eigenschaften			chem. Zusammensetzung [%]													
Werkstoffkurzname	Kurzzeichen	Werkstoff-Nr.	Int. Norm	OEM-Norm	WB-Zustand	R <sub>m</sub> min [MPa]	R <sub>p0,2</sub> min [MPa]	A <sub>min</sub> [%]	Norm	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Ga	V	Al
ENAW-AlZn5,5MgCu	Al6	EN AW-7075	ISO 8839	/	?	510	440	7	DIN EN 573-3	0,4	0,5	1,2 - 2	0,3	2,1 - 2,9	0,18 - 0,28	/	5,1 - 6,1	0,2*	*	/	/	Rest
ENAW-AlSi1MgCuMn	/	EN AW-6056	/	/	/				DIN EN 573-3	0,7 - 1,3	0,5	0,5 - 1,1	0,4 - 1,0	0,6 - 1,2	0,25	/	0,1 - 0,7	d	d	/	/	Rest
ENAW-AlSi1MgCuMn	Al9	EN AW-6056	/	MBN 8839	T6	380	350	8	MBN 8839	0,7 - 1,2	max. 0,25	0,65 - 0,85	0,55 - 0,65	0,6 - 1,0	max 0,05	/	0,15 - 0,25	max. 0,05	0,11 - 0,17	/	/	Rest

Tabelle 2: Mech. Eigenschaften und chem. Zusammensetzung wichtiger Al-Legierungen

Die in der Automobilindustrie etablierte Legierung EN AW 6056 wird in der DIN 573 – 3 hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung normiert. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von Al-Schrauben gibt es jedoch lediglich die Werknormen der Automobilhersteller (MBN 8839, VW60469, BMW GS 92018, PTL 2080), welche allesamt in sehr ähnlicher Weise die Anforderungen für diese metrischen Schrauben der Legierung EN AW 6056 – T6 beschreiben. Auffällig ist aber, dass z. B. die MBN 8839 die Toleranzen einiger Legierungselemente gegenüber der DIN EN 573 - 3 erheblich einschränkt (z.B. Cu & Zn). Ferner hat sich für die EN AW 6056-T6-Schrauben in den o. g. Werknormen das Kurzzeichen „Al9“ durchgesetzt.

Für die Legierung EN AW 7075 wird in der ISO 8839 jedoch keine Angabe zum Wärmebehandlungszustand gemacht. Nach Ostermann [19] gilt:

Werkstoff- kurzname	Werkstoff- Nr.	WB- Zustand	R <sub>m</sub> min [MPa]	R <sub>p0,2</sub> min [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	A <sub>50</sub> [%]	HBS [-]
ENAW- AlZn5,5MgCu	EN AW- 7075	T6	570	495	10	10	160
ENAW- AlZn5,5MgCu	EN AW- 7075	T76	515	450	10	10	150

**Tabelle 3: R<sub>m</sub>, R<sub>p0,2</sub> und Bruchdehnungen EN AW 7075 im T6 und T76 – Zustand [19]**

Insofern wird deutlich, dass sich die Vorgabe zur EN AW 7075 in Tabelle 2 nach ISO 8839 nur auf den Zustand T7x ~ T76 beziehen kann, wobei aber ISO 8839 eine um 3 % geringere Bruchdehnung angibt wie [19].

Inwieweit diese Vorgaben nach der ISO 8839 eingehalten werden können, wird im Kapitel Prüfmethodik bei den eigenen Untersuchungen dargestellt.

Die EN AW 7075-Legierung weist nach Tabelle 2 eine um 130 MPa höhere Mindestzugfestigkeit auf als EN AW 6056 – T6. Die ca. 30% höhere Festigkeit der EN AW 7075-Schrauben gegenüber den EN AW 6056-Schrauben bewirkt eine signifikant höhere Prozesssicherheit bei Gewindefurchprozessen in typischen Magnesiumlegierungen (z.B. AZ91, AE44, MRI153).

## 2.2 Korrosion verschraubter Magnesiumkomponenten

### 2.2.1 Grundlagen zu Magnesiumlegierungen

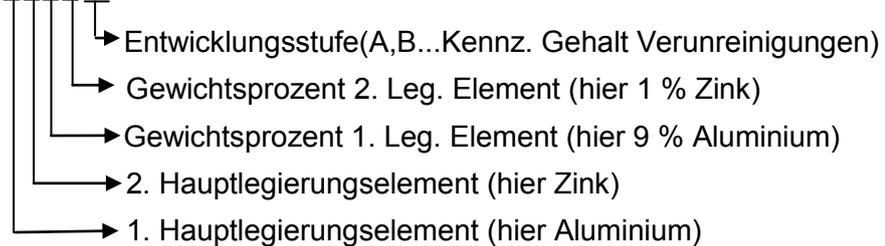
Im Bereich metallischer Werkstoffe weist Magnesium mit 1,8 kg/dm<sup>3</sup> die geringste Dichte auf. Somit bietet Magnesium in Verbindung mit einer hohen spezifischen Festigkeit ein großes Potenzial zur Gewichtsreduktion. Weitere Eigenschaften wie gute Vergießbarkeit, gute Dämpfungseigenschaften, Recyclierbarkeit und gute Bearbeitbarkeit durch spanabhebende Verfahren haben in den letzten Jahren zu einer verstärkten Zunahme des Mg-Einsatzes im Fahrzeugbau geführt.

Nach [21] ging in den letzten Jahren die Entwicklung von Mg-Legierungen immer mehr in die Richtung von HP Legierungen (high purity), welche einen sehr geringen Gehalt an Eisen, Kupfer und Nickel aufweisen. Fe, Cu und Ni bewirken bei der Mg-Erstarrung die Ausscheidung kathodischer Verbindungen, welche die Korrosionsrate stark erhöhen.

Bedeutsam ist bei nahezu allen techn. genutzten Mg-Legierungen das Hinzulegieren von Aluminium (i.d.R. 3% - 10%). Grund hierfür ist die Festigkeits- und Härtezunahme durch Bildung intermetallischer Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>-Phasen. Ferner bewirkt Aluminium eine Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit sowie der Vergießbarkeit. Die Mg-Legierungen werden gem. [21]

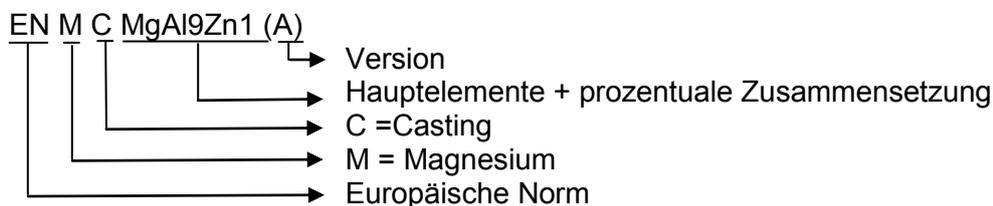
nach der ASTM- Norm B - 94 durch einen Kurzbuchstaben für die Hauptlegierungselemente gefolgt von den Leg.-Gehalten in Gewichtsprozent bezeichnet.

Bezeichnungsbeispiel: AZ 91 D:



**Abbildung 2: Bezeichnungsbeispiele Mg-Legierung nach der ASTM-Norm B – 94 [21]**

Weitere Bezeichnungsformen nach Honsel [22]:



**Abbildung 3: Bezeichnungsbeispiel Mg-Legierung [22]**

## 2.2.2 Eigenschaften von wichtigen Mg-Legierungen

Der größte Teil der Mg-Legierungen wird im Druckguss verarbeitet. Wie bereits erwähnt, wirkt sich der Al-Gehalt (i.d.R. 3% - 10%) positiv auf die Vergießbarkeit aus.

Am häufigsten ist die Mg-Legierung AZ91, welche in der Automobilindustrie einen Marktanteil von etwa 60% hat (Stand 2004). Mit dieser Legierung können auch sehr komplizierte dünnwandige Teile gegossen werden. Nachteile von AZ91 sind eine geringe Warmfestigkeit (interdentritische Korngrenzenphasen führen ab 120°C zu einem verstärkten Festigkeitsabfall) sowie eine geringe Bruchdehnung.

AM-Legierungen (mit Mangan legiert) weisen eine deutlich bessere Duktilität auf.

AS-Legierungen (mit Silizium legiert) hingegen zeichnen sich durch eine erhöhte Warmfestigkeit infolge der Mg-Si-Ausscheidungen aus, jedoch mit einer eingeschränkten Gießbarkeit.

Ähnlich verhält sich die AE-Legierungen (legiert mit Yttrium, Neodym, Cer)

Im Bereich von Powertrain-Applikationen – insbesondere bei Verschraubung von Getriebegehäusen – bestehen i. d. R. gehobene Anforderungen an Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit.

Bei der Daimler AG ist das 7G-Tronic-Automatikgetriebe mit einem Magnesiumdruckgussgehäuse (AS31 High Purity) in Verbindung mit metrischen Aluminiumschrauben (EN AW 6056 – T6), welche in ein vorgeschchnittenes metrisches Gewinde verschraubt werden, im Großserieneinsatz. Seitens der Daimler AG wurden nach

[23] die Eigenschaften der relevanten Mg-Legierungen für Getriebeapplikationen wie in Tabelle 4 folgt dargestellt:

Mg/Al DC alloys	Yield strength	Elongation (dynamic strength)	Mechanical values & bolt load retention at 150°C	Surface-corrosion performance*	Wear Resistance
AZ 91 HP	very good	satisfying	not sufficient (high bolt load retention loss, brittle alloy)	excellent	satisfying
AS 31 HP	good	excellent	good (high bolt load retention, keeps ductile and hardens at 150°C)	excellent	good (Mg <sub>2</sub> Si, Mn <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> )
AJ 52 HP	good	excellent	good (high bolt load retention, keeps ductile and hardens at 150°C)	poor	satisfying
MRI 153 HP	very good	excellent	satisfying (satisfying bolt load retention, becomes brittle at 150°C)	good	satisfying
Al Si9Cu3(Fe)	excellent	poor	good (very high yield strength and bolt load retention, but brittle alloy)	poor	excellent (Al/Si eutectic)

Tabelle 4: Eigenschaftsbewertung wichtiger Mg-Legierungen nach [23]

In Tabelle 5 werden nach [23] die Festigkeiten und Bruchdehnungen der o. g. Mg-Legierungen beschrieben.

Mg or Al DC alloy	As cast condition			After 2000 hrs aging at 150°C		
	UTS [MPa]	YS [MPa]	Elongation [%]	UTS [MPa]	YS [MPa]	Elongation [%]
AZ 91 HP	200 - 230	140 - 160	2,0 - 3,0	210 - 225	140 - 185	0,5 - 1,5
AS 31 HP	180 - 220	105 - 125	6,0 - 7,5	200 - 225	125 - 150	4,5 - 6,0
AJ 52 HP	205 - 215	110 - 120	6,0 - 7,0	210 - 220	125 - 135	5,5 - 6,5
MRI 153**	240 - 250	140 - 150	6,0 - 7,0	225 - 235	140 - 150	2,0 - 3,0
Al Si9Cu3(Fe)	220 - 295	155 - 180	0,5 - 2,5	265 - 290	205 - 225	0,5 - 1,0

Tabelle 5: Rm, Rp0.2 und Bruchdehnung [23]

Im Rahmen des Forschungsförderprojektes [13] nahm das Projektteam folgende Bewertung im Rahmen einer Magnesiumstudie nach Willekens & Schendera gem. [24] vor.

High Creep Resistant Mg-Alloy (based on)	AZ91	AS31 (Si)	AJ62 (Sr)	MRI153 (Sr + Ca)	AE44 (RE)
Strength @ RT (UTS)	++ (248 MPa)	- (210 MPa)	o (225 Mpa)	++ (250 MPa)	+ (240 MPa)
Ductility @ RT (A)	o (6%)	o (6%)	+ (7%)	- (5%)	++ (10%)
Creep Resistance (max. Temperature)	- (<120°C)	- (150°C)	+ (170°C)	o (150°C)	++ (>170°C)
Castability	++	+	-	o	++
Corrosion Properties (mg/cm <sup>2</sup> *day)	++ (0,04)	- (0,15)	+ (0,06)	o (0,09)	++ (0,04)
Recycling	++	+	o	-	++
	best	good	fair	poor	

Tabelle 6: Eigenschaftsbewertung wichtiger Mg-Legierungen nach [24]

Chem. Zusammensetzung: Relevanter Magnesiumdruckgusslegierungen für Powertrain-Komponenten												
Legierung	% Al	%Mn	%Zn (max)	%Si (max)	%Cu (max)	%Ni (max)	%Fe (max)	%RE	Sr	TRE	Ca	Andere (max)
AZ91	8,5- 9,5	0,17- 0,40	0,45- 0,9	0,05	0,025	0,001	0,004					0,01
AE44	3,5- 4,5	0,15- 0,50	0,2	0,1	0,01	0,001	0,004	3,5- 4,5				0,01
AJ62	5,6- 6,4	0,3- 0,5	0,2	0,05	0,008	0,001			2,0- 2,4			
MRI153	4,5- 10	0,15- 1,0							0,01- 0,2	0,05- 1,0	0,5- 1,2	

**Tabelle 7: Mg-Legierungen, die vom Projektteam näher untersucht wurden [13]**

Das Projektteam [13] untersuchte Mg-Legierungen gem. Tabelle 7 weiter.

Im Rahmen der eigenen Korrosionsuntersuchungen (Prüfmethodik gem. Kapitel 3.1) wurden Korrosionstests mit verschraubten AZ91-Gehäusen durchgeführt. Die Mg-Legierung AZ91 weist nach Tabelle 3 und Tabelle 5 im Vergleich zu anderen Mg-Legierungen relativ gute Korrosionseigenschaften auf.

### 2.2.3 Einteilung von Korrosionsarten

Der Begriff Korrosion bezeichnet eine allmähliche Zerstörung eines Stoffes durch Einwirkung anderer ihn umgebender Stoffe.

Laut DIN 50900 Teil 1 ist:

*„Korrosion die Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann.“*

Nach neuerer Definition gem. EN ISO 8044 ist Korrosion die

*„[...] physikochemische Wechselwirkung zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und die zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalls, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann.“*

Wesentliche Korrosionsmechanismen sind:

1. Chemische Korrosion
2. Metallphysikalisch-chemische Korrosion
3. Elektrochemische Korrosion

Diese Korrosionsmechanismen können gem. [18] wie folgt beschrieben werden:

**Zu 1.) Chemische Korrosion:**

Unter chemischer Korrosion versteht man die Bildung von Passivschichten. Bei Aluminium z.B.:



*Formel 1: Passivschichtbildung bei Aluminium*

Außerdem gehören die Hochtemperaturkorrosion (Stahlverzunderung), die Korrosion von Kunststoffen und die Umwandlung keramischer Werkstoffe zu den chemischen Korrosionen.

**Zu 2.) Metallphysikalische Korrosion:**

Darunter fällt die wasserstoffinduzierte Korrosion, wobei der Wasserstoff verschiedene Schädigungen verursachen kann. Durch eine Versprödung des Werkstoffes infolge von Wasserstoffaufnahme können Risse, Brüche, etc. auftreten.

Wasserstoffaufnahme durch Diffusion von atomar gelöstem Wasserstoff kann zu Bereichen mit größerer Löslichkeit (Fallen: Versetzungen, Korngrenzen, Ausscheidungen, Einschlüsse) führen.

**Zu 3.) Elektrochemische Korrosion:**

Für die elektrochemische Reaktion ist ein Stromkreislauf Voraussetzung, wobei Elektronen von der Anode zur Kathode wandern und ein Ladungsausgleich durch Ionenwanderung im Elektrolyten erfolgt. Unter Elektrolyten versteht man Ionenleiter (wässrige Lösungen, dünne Filme wässriger Lösungen, Salzschnmelzen, etc.). Man unterscheidet zwischen anodischer und kathodischer Teilreaktion. Bei der anodischen Teilreaktion können feste und lösliche Korrosionsprodukte entstehen, wobei folgende chem. Reaktionsgleichungen maßgebend sind:



*Formel 2: Metallkorrosion – anodische Teilreaktion*



*Formel 3: Metallkorrosion – anodische Teilreaktion*

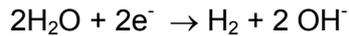


*Formel 4: Metallkorrosion – anodische Teilreaktion*

Bei der kathodischen Teilreaktion kommt es entweder zur Wasserstoffentwicklung nach:

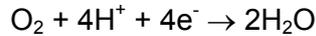


*Formel 5: Metallkorrosion – kathodische Teilreaktion bei sauren Medien*

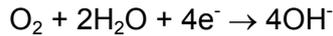


*Formel 6: Metallkorrosion – kathodische Teilreaktion bei alkalischen Medien*

oder zum Verbrauch von gelöstem Sauerstoff nach:



*Formel 7: Metallkorrosion – mit Verbrauch von gelöstem Sauerstoff*



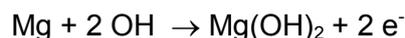
*Formel 8: Metallkorrosion – bei alkalischem Medium*

## 2.2.4 Korrosion von Magnesiumkomponenten

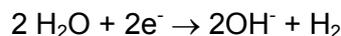
Die Korrosivität im Bereich der Flächenkorrosion von konventionellen Legierungen konnte durch die Einführung der HP-Legierungen schon deutlich verringert werden. Die Reduzierung der kritischen Gehalte von Ni, Fe und Cu brachte starke Impulse hinsichtlich der Verwendbarkeit der Legierungen. Für eine Passivierbarkeit fehlt bei Magnesiumlegierungen aber nach wie vor ein selbstaushheilender Passivierungsfilm [21].

Zum Passivierungsverhalten von Magnesium wird nach [21] folgendes ergänzt:

Magnesium bildet in reinem oder alkalischem Wasser auf der Oberfläche aus  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  passivierende kristalline Filme. Dabei läuft folgende chemische Reaktion ab:



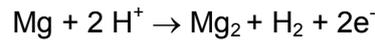
*Formel 9: Chemische Reaktion von Mg in reinem Wasser bei Bildung passiver Filme*



*Formel 10: Wasserstoffbildung bei Reaktion nach Formel 9*

Dieser Passivfilm ist in einer wässrigen Lösung mit einem pH-Wert < 10 nicht beständig. Die Ursache dafür liegt darin, dass in der Passivschicht große Druckspannungen (geometrische Fehlanpassung zum Mg-Gitter) vorliegen und dadurch Risse entstehen. Die Folge ist ein „Freilegen“ des Mg und die Korrosion des Metalles. In reinen alkalischen wässrigen Lösungen mit einem pH-Wert von > 10,5 ist die Passivschicht sehr stabil (markanter Unterschied zum Werkstoff Aluminium), da die Risse wieder mit  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  zugesezt werden (ausheilen).

In wässrigen Lösungen, die Chlorid-, Sulfat-, Carbonat-Ionen u.a. (außer Fluorid-Ionen) enthalten, wird die Passivschicht  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  aufgelöst und der Werkstoff Magnesium geht in Lösung:



Formel 11: Mg – Passivschichtauflösung in wässrigen Lösungen

Ungeschütztes Mg ist vielfach dieser Korrosion ausgesetzt (Umweltverschmutzung durch Abgase, saurer Regen, Salze u.a.). Der Korrosionsangriff erfolgt gleichmäßig über die gesamte Passivschicht. Dabei ist die Korrosionsgeschwindigkeit von Mg in Lösungen, die Chlorid- oder Sulfat-Ionen enthalten, zwei Größenordnungen höher als in reinem destillierten H<sub>2</sub>O. Die vorherrschende kathodische Reaktion zu diesem Korrosionsmechanismus ist die Wasserstoffentwicklung.

In [28] wird auch erwähnt, dass der Korrosionswiderstand bereits bei der gießtechnischen Herstellung beeinflusst werden kann. So ist die Einhaltung von Toleranzgrenzen für korrosionsfördernde Elemente mit den High Purity Legierungen (HP) Stand der Technik.

Außerdem ist bis zur Verfügbarkeit eines aktiven Korrosionsschutzes im Bauteilverbund die Trennung von Anode und Kathode sorgfältig vorzusehen. Dabei ist aus technologischer Sicht für gering belastete Mg-Bauteile die Beschichtung der Kathode zu bevorzugen, da sich das Magnesiumsubstrat bei einer nicht ausheilenden Deckschichtverletzung durch das schlechte Anoden-Kathoden-Verhältnis hinsichtlich Korrosionspotenzial und Fläche beschleunigt auflösen wird.

In [28] wird diesbezüglich weiter ausgeführt, dass in einem technisch relevanten Bereich von z.B. pH 4,5 – 8,5 (Stabilitätsbereich von Aluminiumdeckschichten) bei Mg keine Schutzschicht vorliegt.

Der Auflösungsprozess kann bis zu 70 % von intermetallischer Korrosion dominiert sein, so dass ein kathodischer Korrosionsschutz uneffektiv bleibt. Die intermetallische Korrosion (anomale Selbstauflösung) geht aus der elektrochemischen Korrosion hervor und läuft dann ohne messbaren Außenstrom ab.

In [29] wird unter Pkt.4.1 auch auf den Massenabtrag von unterschiedlichen Magnesiumlegierungen im Salzsprühnebeltest DIN 50021-SS (96h) hingewiesen.

Dabei wurde jeweils folgender Flächenabtrag [g/m<sup>2</sup>] gemessen:

Legierung	AS21HP	AE42HP	AM60HP	AZ91Hp	St1405
Flächenabtrag [g/cm <sup>2</sup> ]	1536,1	43,0	141,6	146,3	140 ±20

**Tabelle 8: Massenabtrag von Mg-Legierungen nach Salzsprühnebeltest [29]**

AE42 erwies sich als die Hp-Legierung, die gegenüber Flächenkorrosion mit Abstand am beständigsten ist. Aber auch AM60 und AZ91 zeigen noch eine mit dem Stahlblech vergleichbare, gute Korrosionsbeständigkeit. Dagegen ist der Abtrag bei AS21 um eine ganze Größenordnung höher. AS21 erzielt auch bei Versuchen mit eingedrehten Schrauben

die mit Abstand die schlechtesten Ergebnisse. Dagegen sind die Unterschiede bei den anderen drei Legierungen nur noch gering und hängen im Einzelfall von der gewählten Schraubenbeschichtung ab. [29]

Der Einfluß der Mg-Legierungselemente auf den Korrosionswiderstand kann gem. [28] mit Hilfe der folgenden Formel dargestellt werden:

$$\text{Korrosionsgeschwindigkeit} = ( 0,04 \cdot \text{Mg} - 0,04 \cdot \text{Al} - 0,16 \cdot \text{Zn} - 2,06 \cdot \text{Mn} + 0,24 \cdot \text{Si} + 0,28 \cdot \text{Fe} \\ + 121,5 \cdot \text{Ni} + 11,7 \cdot \text{Cu} )$$

*Formel 12: Korrosionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Leg. Elementen [28]*

Formel 12 zeigt den korrosionsfördernden Einfluss von Ni, Cu + Fe auf und stellt zugleich der korrosionsmindernden Einfluss von Mn, Zn, Al dar.

## 2.2.5 Kontaktkorrosion von verschraubten Mg-Komponenten

Gem. [32] tritt bei Mischbaukonstruktionen – hier Magnesiumgehäuse mit Stahl- oder Aluminiumschrauben – häufig Kontaktkorrosion auf. Eine Kontaktkorrosion ist eine beschleunigte Korrosion eines Metalles (Anode), die bei einem Korrosionselement aus einer Paarung Metall / Metall oder Metall / elektronenleitender Festkörper auftreten kann. Die Ionenleitung kann von allen leitenden Flüssigkeiten (Elektrolyten) übernommen werden. Die Elektronenleitung erfolgt durch die Kontaktstellen der Festkörper.

Die beiden verschiedenen Metalle stehen unter Einfluss eines Elektrolyten miteinander in Kontakt und bilden ein galvanisches Element, durch das ein Korrosionsstrom fließt.

An der Anode (hier Magnesium) gehen Mg-Atome unter Abgabe von Elektronen in den oxidierten Zustand über, im Elektrolyten in Lösung (Oxidationsvorgang). In der Folge werden diese Elektronen an der Kathode von Wasserstoffionen oder von in Elektrolyten gelöstem Sauerstoff aufgenommen (Reduktionsvorgang).

Das unedlere Metall Mg (Anode) wird umso mehr aufgelöst, je größer die Potenzialdifferenz zwischen den beiden Metallen ist.

Die Auflösung des Metalles Mg erfolgt dann im Elektrolyten, der sich an der Kontaktstelle angesammelt hat.

Nach [25] sind die Korrosionsmechanismen von Magnesium, vor allem die der anodischen Teilreaktion in wässrigen Medien, nicht vollständig geklärt (gem. Song und Atrens [26]).

Das freie Korrosionspotenzial von Magnesium in verdünnten chloridhaltigen Lösungen (3% – 6% NaCl-Lösung) beträgt nach [25]  $U_R = -1,73$  [V vs. SCE], bei verzinktem Stahl hingegen  $U_R = -1,14$  [V vs. SCE] und bei blankem Stahl bei  $U_R = -0,78$  [V vs. SCE].

Nach Koch [25] und Makar und Kruger [27] setzt sich die allgemeine Korrosionsreaktion aus mehreren Teilreaktionen zusammen:



*Formel 13: Allgemeine Korrosionsreaktion von Mg*

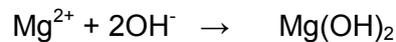


*Formel 14: Anodische Teilreaktion bei der Mg-Korrosionsreaktion*



*Formel 15: Kathodische Teilreaktion bei der Mg-Korrosionsreaktion*

Nach [25] reagieren das Magnesium-Ion und das Hydroxid-Ion weiter:



*Formel 16: Folgereaktion des Magnesium-Ions und des Hydroxid-Ions zu Mg-Hydroxid*

Gemäß [30] wird die Kontaktkorrosion ausgeführt:

$$I_e = (U_{R,k} - U_{R,A}) / (R_A + R_K + R_M)$$

*Formel 17: Korrosionsstrom bei verschraubten Mg-Komponenten nach [30]*

$I_e$  = Elementstrom (Korrosionsstrom)

$U_{R,k}$  = Ruhepotenzial Kathode

$U_{R,A}$  = Ruhepotenzial Anode

$R_A$  = Elektr. Widerstand Anode

$R_K$  = Elektr. Widerstand Kathode

$R_M$  = Elektr. Widerstand Medium

Der Zähler in Formel 17 wird von der Potenzialdifferenz zwischen den Ruhepotenzialen der beiden Kontaktmetalle gebildet. Durch geeignete Paarung der Kontaktmetalle sollte diese Differenz möglichst klein gehalten werden. Ein korrosionsgünstiger Kontaktpartner für Magnesium sollte eine möglichst große Wasserstoffüberspannung aufweisen, um die Wasserstoffabscheidung bei der kathodischen Teilreaktion zu hemmen.

Der Nenner-Wert von Formel 17 wird durch die Summe der Widerstände der beiden Kontaktmetalle sowie des Elektrolyten gebildet, welcher möglichst groß sein sollte.

Im Idealfall, wenn kein Elektrolyt vorhanden ist, wird der Nenner unendlich groß, so dass kein spezieller Korrosionsschutz notwendig ist. In exponierten Einbaulagen, wie z.B. bei Getrieben, ist eine Kontaminierung mit Spritzwasser jedoch nicht zu vermeiden, was den elektrischen Widerstand der Schraube sowie des Magnesiums und des Elektrolyten verringert.

Nach [30] beschränken sich die möglichen Korrosionsschutzmaßnahmen somit überwiegend auf die Beeinflussung des Ruhepotenzials und des elektrischen Widerstandes der

Schraubenoberfläche. Das Ruhepotenzial wird weitestgehend von der (meist) metallischen Oberflächenbeschichtung der Schraube bestimmt, wobei durch diese Beschichtung der Schraubengrundwerkstoff auch vor Eigenkorrosion geschützt wird.

Nach [30] kann der elektrische Widerstand der Schraubenoberfläche durch anschließende anorganische Versiegelung oder durch Aufbringung eines organischen Top-Coats erhöht und somit die Kontaktkorrosion gemindert werden.

Untersuchungen gem. [30] haben gezeigt, dass zink- und aluminiumhaltige Lamellenüberzüge für den Kontakt mit Mg AZ91 ungeeignet sind (der Massenverlust nach 15 Zyklen der zinklamellenbeschichteten Schrauben ist bis zu 7 Mal so hoch wie bei verzinkten Systemen). Ferner wird eine silikatische Versiegelung (nichtleitende Beschichtung) der elektrolytisch verzinkten und chromatierten (passivierten) Oberfläche empfohlen. Dabei wird erwähnt, dass die Versiegelung nach dem Anzug der Schraube im Schraubenkopfauflagebereich partiell zerstört wird. Die Wirksamkeit der Versiegelung beruht jedoch in der Unterdrückung der kathodischen Teilreaktion und somit auf dem Ionenaustausch im Elektrolyten. Bei Fehlstellen in der Versiegelung läuft die Korrosionsreaktion daher wegen der kleineren Kathodenoberfläche deutlich langsamer ab.

Weitere Untersuchungen gem. [30] empfehlen für den Schraubenkontakt mit Mg Alu-Unterlegscheiben aus kupferarmen Legierungen auf AlMg- oder AlMgSi-Basis, wobei die Scheiben möglichst weit überstehen sollten. Ferner wurden unter korrosionskritischen Bedingungen Delta Seal-Beschichtungen (nicht leitfähig pigmentiert) sowie Zn-Gelbchromatierungen [Cr (VI)-haltig, inzwischen durch Cr(III) haltige Passivierungen ersetzt] mit zusätzlicher silikatischer Versiegelung empfohlen.

Im Zuge der Prüfungen gem. [29] wurden in Laborversuchen Mg-Klötzchen aus AZ91 (aus einem Gussbarren gefräst und mit 4 Gewindebohrungen versehen) mit je 4 typgleichen Schrauben verspannt (Anziehmoment 10 Nm).

Vor der Prüfung wurden die Mg-Klötzchen in einem Isopropanol-Ultraschallbad gereinigt und trocken gewogen. Dann wurde der durch Kontaktkorrosion verursachte Massenverlust nach 120 h Salzsprühnebeltest (DIN 50021 SS) gemessen. Die Blindwerte zur Bestimmung der Eigenkorrosion wurden mit Hilfe von PTFE-Schrauben ermittelt. Korrosionsprodukte wurden durch das Tauchen in Chromsäure (180 g CrO<sub>3</sub> in 1 Liter wässriger Lösung, 85°C) entfernt.

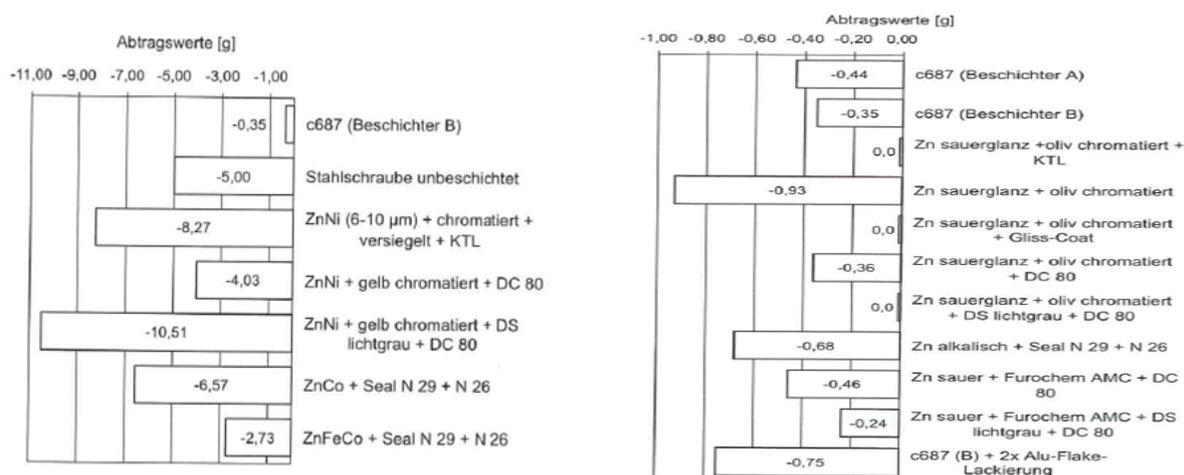
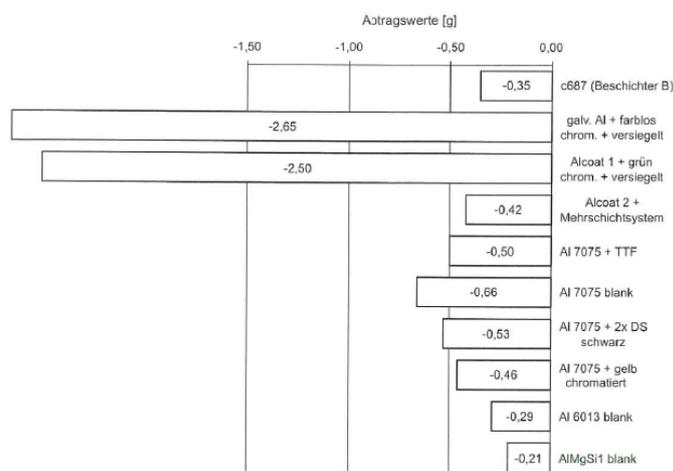


Abbildung 4: Abtragswerte von AZ91-Platten nach 120 h DIN 50021 gem. [29]

Abbildung 4 macht deutlich, dass bei Zink-Nickel basierten Schrauben-Oberflächensystemen ein signifikant höherer korrosiver Angriff auf die verspannten AZ91-Platten aufgetreten ist als bei den zinkbasierten Schraubenoberflächen.

In [30] wurden ebenso Mg-AZ91-Klötzchen mit Aluminiumschrauben verschraubt und der 120 h Salzsprühnebeltest durchgeführt.



**Abbildung 5: Abtrag AZ91 verschraubt mit Al- und Stahlschrauben nach 120 h SST [30]**

Entsprechend dem 120 h Salzsprühnebeltest hat gem. [30] das Mg-Blech mit der EN AW 7075-Schraube einen ca. doppelt so hohen Massenverlust wie die EN AW 6013-Schraube. Interessant ist auch, dass selbst die Stahlschraube mit der VW-Oberfläche C687 (verzinkt gelb chromatiert + silikatische Versiegelung) einen deutlich geringeren korrosiven Mg-Massenverlust generiert hat als die Al – EN AW 7075-Schraube. Dies ist vermutlich auf die geringe Dauer des Korrosionstests zurückzuführen.

Ein genereller Hinweis bzgl. Al-Schrauben zum Fügen von Mg-Komponenten wird in [51] gegeben. Demnach führen Mg-Korrosionsprodukte zu einer Alkalisierung der Oberfläche, wobei Aluminium als amphoter Metall im alkalischen Bereich angegriffen wird. Dadurch wird die korrosionsschützende Oxidschicht delaminiert. Somit können gewisse Kontaktkorrosionsraten in korrosionskritischen Einbaufällen nicht ausgeschlossen werden.

Weitere Untersuchungen mit höchstfesten Al-Schrauben EN AW 7075, 7349 und 7449 wurden im Rahmen des Projektes Forschungsvorhaben Antriebstechnik (FVA-Projekt) an der TU Darmstadt durchgeführt [31]. Dafür wurden quadratische, 4 mm dicke Mg-Platten (GD AZ91) mit Schrauben (MA = 4 Nm) auf POM - Kunststoffklötzchen verspannt und 96 h im Salzsprühnebeltest (5% NaCl-Lösung) bei 35°C getestet. Die -Klötzchen dienten als Halter der Mg-Platten.

Die Proben waren dabei um 60° geneigt, sodass eine gute Benetzung der Proben ohne eine Elektrolytenansammlung erfolgen konnte.

Vor Versuchsbeginn und nach der abschließenden Reinigung in Chromsäure bei Versuchsende wurden die Mg-Platten gewogen und so der Mg-Massenabtrag ermittelt.

Abbildung 6 zeigt die Abtragswerte an den AZ91-Mg-Platten, welche mit den hochfesten 7000-Al-Schrauben verspannt wurden, wobei EG3 M8x50 metrisch furchend dem Wärmebehandlungszustand T6 und RG7 metrisch M8x50 metrisch T79 entspricht.

Abbildung 7 zeigt den Vergleich der verspannten Mg-Platten mit 6000-Schrauben.

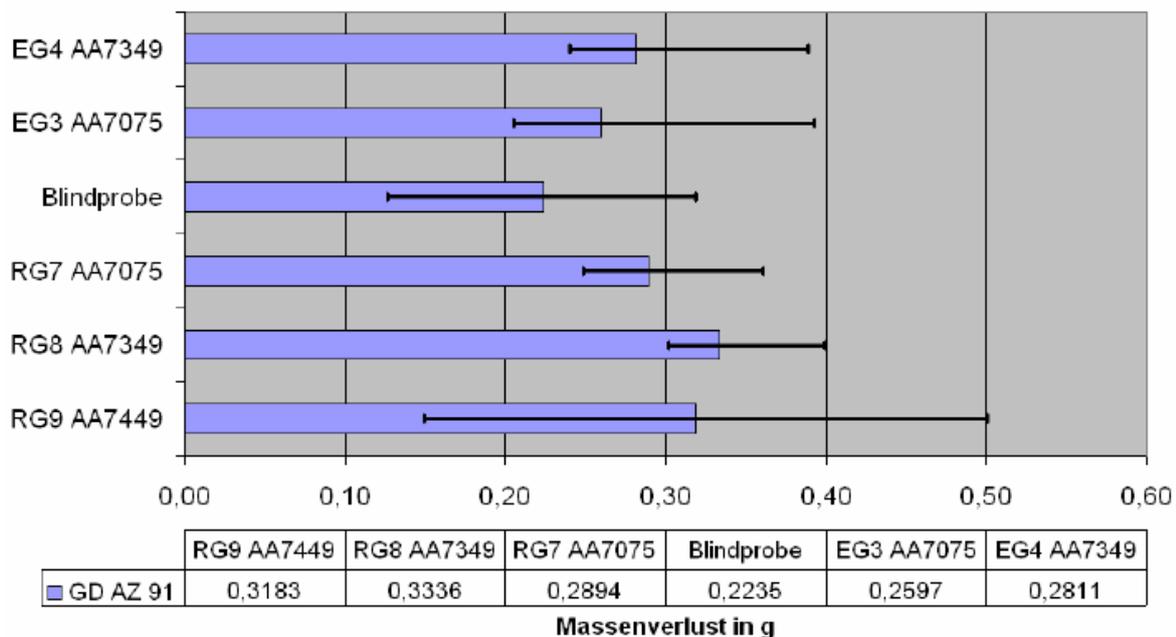


Abbildung 6: Abtragswerte an Mg-Platten mit Al-Schrauben Leg. 7x verspannt [31]

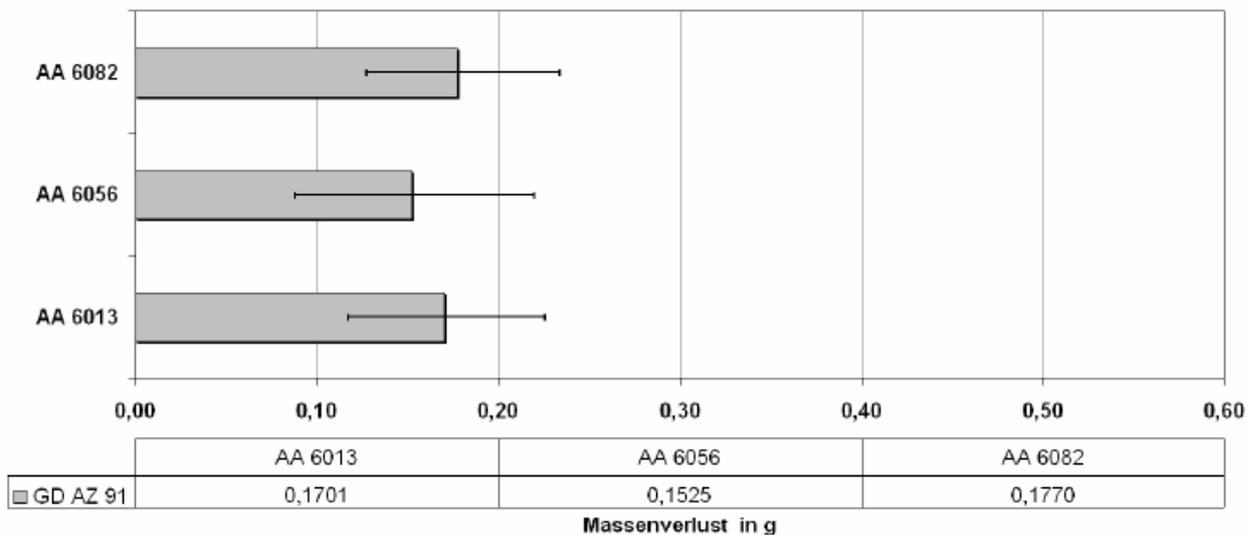
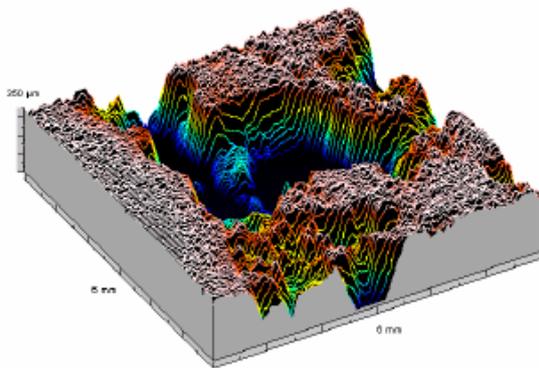


Abbildung 7: Abtragswerte an Mg-Platten mit Al-Schrauben Leg. 6xxx verspannt [31]

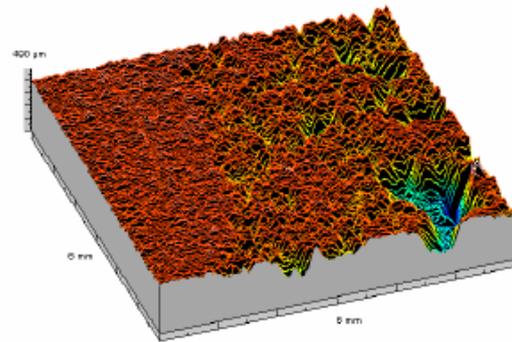
Die deutlich höheren Abtragsraten an den Mg-AZ91-Platten bei den Legierungen AA 7xxx sind auf den hohen Kupfergehalt dieser Legierung zurückzuführen.

Die mittels Oberflächentaster gemessenen Rauheiten werden gem. [31] in Abb. 8 dargestellt.



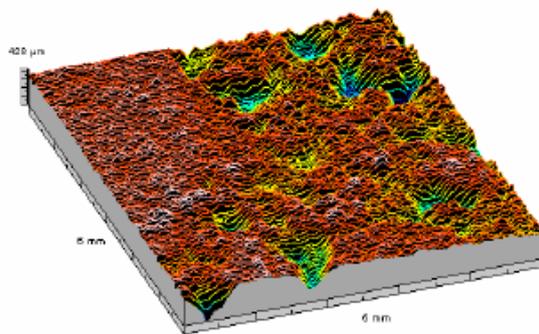
GD AZ91 + Stahlschraube

Alpha = 20° Beta = 20°

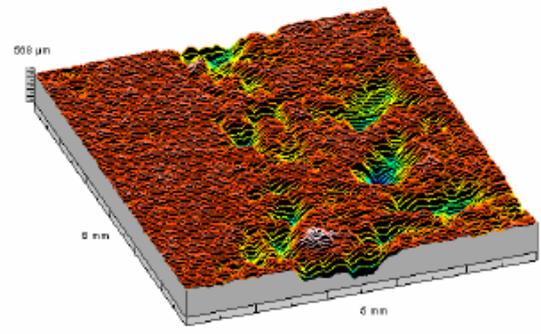


GD AZ91 + Aluminiumschraube AA6056

Alpha = 20° Beta = 20°



GD AZ91 + Aluminiumschraube AA7349



GD AZ91 + Aluminiumschraube AA7449

Abbildung 8: Rauheitsprofil der Mg-Platten nach 96 h SST mit Al- und Stahl-Schrauben [31]

Das Rauheitsprofil nach 96 h SST von Mg-Platten im Kontakt mit Schrauben aus der Legierung EN AW 7075 wurde nicht dargestellt. Gem. Abbildung 6 war war aber dort die Korrosion tendenziell geringer als bei Leg. EN AW 7349 und EN AW 7449.

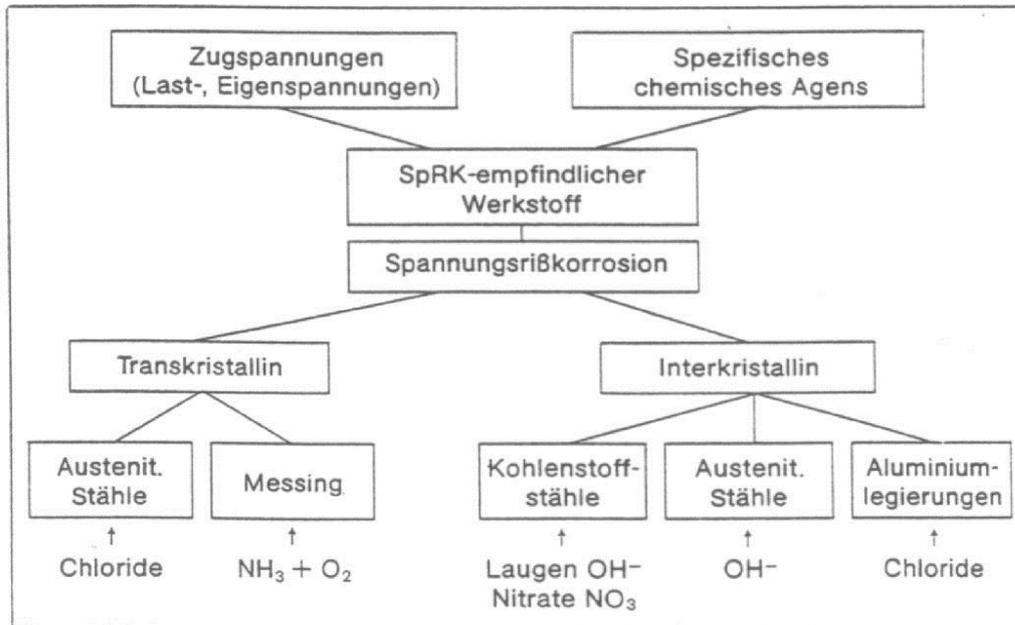
## 2.2.6 Spannungsrisskorrosion von hochfesten Aluminiumschrauben

Nach [32] kann Spannungsrisskorrosion (SpRK) als anodische (Metallauflösung an der Risspitze) oder kathodische (wasserstoffinduzierte) Spannungsrisskorrosion auftreten.

Die Gefahr einer Spannungsrisskorrosion ist unter folgenden Voraussetzungen gegeben.

Werkstoff mit erhöhter Empfindlichkeit gegen SpRK

- Einwirkung eines spezifischen Korrosionsmediums auf den Werkstoff . Der Werkstoff hat eine besondere SpRK-Empfindlichkeit gegen dem Medium (meist innerhalb bestimmter Potenzialbereiche).
- Werkstoff muss der mechanischen Beanspruchung durch Zugspannungen und/oder Zugeigenspannungen ausgesetzt sein.



**Abbildung 9: Wesentliche Voraussetzungen für das Auftreten von SpRK gem. [32]**

Nach Abbildung 9 kann in chloridhaltigen Umgebungen SpRK bei Al-Legierungen auftreten. Diese Bedingungen sind bei Powertrainkomponenten sicherlich gegeben.

In [18] wird zur anodischen SpRK ergänzt, dass das Metall meist mit einer oxidischen Deckschicht belegt und die Risspitze blank ist. Dabei findet dort eine anodische Polarisation und ein beschleunigter Angriff auf das Metall statt.

Zur kathodischen SpRK wird in [18] angemerkt, dass im Riss Korrosion auftritt. Dabei werden im kathodischen Teilschritt  $H^+$ -Ionen entladen, die zu einer örtlichen Versprödung führen (wasserstoffinduzierte SpRK).

Ursächlich für SpRK ist i.d.R. ein örtliches Aufbrechen der Schutzschichten in Folge der Dehnung oder Bildung von Versetzungsstufen (auch unterhalb der Dehngrenze).

Bei der SpRK treten keine Korrosionsprodukte auf und der Anriss erfolgt verformungsarm.

Nach [18] ist auch interkristalline Korrosion infolge einer selektiven Oxidation der Korngrenzen vorstellbar.

Nach [19] kann SpRK bei AlZnMg-, AlCuMg- und AlLi-Legierungen auftreten, ist aber hauptsächlich ein Versagensphänomen bei AlZnMg(Cu)-Legierungen, wie also auch bei der EN AW 7075-Legierung.

Gem. [33] wird das Risswachstum bei SpRK neuerdings mit dem Wasserstoffgehalt und den Poren im Gefüge in Zusammenhang gebracht. Als Ursache für SpRK wird laut [33] bei ungünstigen Gefügeständen bei AlZnMg(Cu)-Legierungen eine Korngrenzenversprödung durch eindiffundierenden Wasserstoff angesehen, der durch Korrosionsreaktionen gebildet und unter Einfluss von Zugspannungen an die Korngrenzen der Kristallite geleitet wurde. Dabei verläuft die SpRK bei Al immer interkristallin.

Altenpohl [33] gibt einen Hinweis auf DIN 50908 zur Prüfung auf SpRK, wobei C-Ringproben, U-Proben und runde Zugstäbe zugelassen sind.

In [34] ist das Korrosionsverhalten von 7xxx (Al-Zn-Mg-Cu)-Legierungen nicht im Detail untersucht worden, weil die Ausscheidungen keine hinreichende Größe für Analysen haben. Es war bisher möglich, größere Partikel von  $\text{CuAl}_3$  und  $\text{CuMgAl}_3$ -Ausscheidungen zu produzieren und deren Korrosionspotenziale zu messen. Dabei wurden durch die Zugabe von Kupfer die Korrosionspotenziale zum Reinaluminium um 0,14 V erhöht. Ferner weist [34] auf analoge Korrosionsmechanismen wie bei den 2xxx-Legierungen (Al-Cu) hin. Dabei wurden bei 2xxx-Legierungen Korrosionspotenziale zwischen den kupferarmen Zonen und den Cu-reichen Matrix von ca. 0,12 V gemessen, was eine hohe Antriebskraft für die Spannungsrissskorrosion bedeutet. Laut [34] wird das elektrochemische Potenzial durch die Zugabe von Zink und die Auflösung in  $\text{MgZn}_2$ -Phasen in anodische Richtung verschoben, so dass eine max. Potenzialdifferenz zwischen Reinaluminium und diesen Phasen von 0,24 V auftreten kann. Entsprechend [34] treten die Ausscheidungen zuerst an den Korngrenzen auf und verursachen ausscheidungsarme Zonen, was eine galvanische Zelle zwischen den ausscheidungsarmen Zonen und den Zink-Magnesiumreichen Körnern bewirkt. Diese Bedingungen existieren beide im T6-Zustand, also dem Zustand der höchsten Festigkeit.

In der Literatur finden sich insbesondere Hinweise zu AA 7075 – T651-Blechen.

In [35] wurden Versuche mit konstanten Dehnungsgeschwindigkeiten von ungekerbten EN AW 7075 – T651-Probekörpern in 3 % NaCl-Lösung, welche aus Blechen hergestellt wurden, durchgeführt. Bei der Blechherstellung ist die Zuglastrichtung im Verhältnis zur Walzrichtungen für die Anfälligkeit für SpRK sehr bedeutsam, wobei folgende Bezeichnungen gewählt werden: in Blechwalzrichtung (L), quer zur Blechwalzrichtung (LT) und senkrecht zur Blechwalzrichtung (ST). Dabei wurde der pH-Wert zwischen pH = 2 bis pH = 12 mit folgenden Ergebnissen variiert:

- a) In (ST)-Blechwalzrichtung besteht größte Anfälligkeit für SpRK: Bei pH = 10 lag ST bei 70% der Bruchlast ohne Korrosionsbeanspruchung und (LT) sowie (L) bei 100%. Bei pH = 2 hingegen war (ST) bei ~ 40%, während (L) und (LT) bei ~ 70% der Bruchlast ohne Korrosionsbeanspruchung lagen.
- b) Die Bruchdehnungen sind gegenüber den Probekörpern ohne Korrosionsbelastung bei (LT) & (L) bei pH = 2 auf ca. 5% abgefallen, bei pH = 6 trat ein Abfall von lediglich 45% – 50% auf.
- c) Auch die Bruchenergie lag bei pH = 2 bei ca. 5 % und bei pH = 6 bei (L) und (LT) bei ca. 50 %, während bei (ST) nur ca. 15 % von dem nicht korrosiv belasteten Probekörper erreicht wurden.
- d) SpRK-Anfälligkeit wird bei Zunahme von Chlorid-Ionen stärker

Die größte Anfälligkeit für SpRK tritt bei pH = 2 bis pH = 3 auf, also im stark sauren Bereich. Der stabilste Bereich gegenüber SpRK liegt ca. bei pH = 6.

Laut [35] ist die Rissfortschrittsrate abhängig vom Ausmaß der Stresskomponenten normal zu den Korngrenzen, wobei in ST-Richtung (senkrecht zur Blechwalzrichtung) auch primär

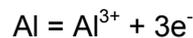
eine Belastung normal zu den Korngrenzen besteht. In direkter Ausrichtung der Korngrenzen, also in Blechwalzrichtung (ST), wird das Wachstum von Rissen behindert.

Gem. [36] nimmt die Risswachstumsrate bei Auslagerung von AA 7075 - T651 in Perchlorat 1N NaClO<sub>4</sub> gegenüber 1N NaCl um den Faktor 1,77 zu. Die Rissrate in schwefelhaltiger Umgebung ist sehr gering, wobei angenommen werden kann, dass mit Schwefel Passivierungseffekte des Aluminiums generiert werden.

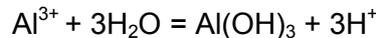
Im Bereich der Raumfahrt-Produktsicherung werden gem. [38] Prüflinge über dreißig Tage bei konstanter Belastung und intermittierendem Eintauchen in eine 3,5%-Natriumchlorid-Lösung geprüft. Empfohlen werden bestimmte Zugstabgeometrien bzw. bei Blechproben entsprechende Flachprobengeometrien. Bei ungeschweißten Werkstoffen wird die Zugbelastung aus der mittleren 0,2%-Dehngrenze berechnet, welche zuvor mit Hilfe von drei Zugproben ermittelt wurde. Für eine Werkstoffklassifizierung sind zusätzlich auch Prüfungen bei 75% der Dehngrenze und in der kurzen Querrichtung bei 50% der 0,2 % -Dehngrenze durchzuführen. Zur Prüfungsdurchführung sind neun Proben erforderlich, wobei drei Proben für die Prüfung der Anfangszugfestigkeit und der 0,2%-Dehngrenze verwendet werden. Drei weitere Proben werden in einer Prüfvorrichtung in einer Zelle auf das erforderliche Spannungsniveau gespannt. Die Zelle wird in jeder Stunde 10 Minuten lang mit einer 3,5%-Natriumchlorid-Lösung gefüllt. Die drei letzten Proben werden ohne Vorspannung senkrecht in einer Zelle angeordnet, welche ebenfalls jede Stunde über ein Zeitrum von 10 Min. mit einer 3,5%-Natriumchlorid-Lösung gefüllt wird. Die Prüflösung ist gem. [38] nach ASTM G 44-99 hergestellt, wobei für jedes Probenpaar 1 Ltr. Lösung vorgesehen ist, welche nach sieben, vierzehn und einundzwanzig Tagen erneuert werden muss. Nach Abschluss der Prüfung sollten die in der Zelle gelagerten ungespannten Kontrollproben einer Zugprüfung unterzogen werden. Der Festigkeitsvergleich der Anfangsproben (ohne Korrosionslast) und der unter Zugspannung gelagerten Proben mit Korrosionslast sowie der Proben mit Korrosionslast (ohne Lagerung unter Zugspannung) lässt darauf schließen, in welchem Maß Spannungsrisskorrosion und in welchem Maß andere Korrosionsformen auftreten. Gem. [38] wird die Beständigkeit gegen SpRK in drei Klassen unterteilt:

- a) **Klasse 1 – Hohe Beständigkeit:** Keine der drei Proben versagt während der Prüfdauer versagt, die mittlere Zugfestigkeit der drei gespannten Proben ist nicht geringer als 90% des R<sub>m</sub> der ungespannten Kontrollproben und keine der drei gespannten Proben weist bei metallographischer Untersuchung bei 50facher Vergrößerung SpRK auf.
- b) **Klasse 2 – Mittlere Beständigkeit:** Wie Klasse 1, jedoch weist bei der metallographischen Untersuchung eine der drei gespannten Proben SpRK auf.
- c) **Klasse 3 – Geringe Beständigkeit:** Eine der drei gespannten Proben bricht während der Prüfdauer und / oder die mittlere Zugfestigkeit der gespannten Proben ist nach der Prüfung < 90 % R<sub>m</sub> der ungespannten Kontrollproben und bei der metallographischen Untersuchung ist bei 50facher Vergrößerung SpRK an den Proben zu erkennen.

Nach [39] bilden Aluminiumlegierungen Oxidschichten, welche Korrosion i.d.R. vermeiden. Diese Oxidschicht wird jedoch bei  $\text{pH} < 4$  und  $\text{pH} > 9$  instabil. Aggressive Ionen von Chloriden und Fluoriden können diese Oxidschicht lokal schädigen. Bestimmte Elemente wie Ga, Tl, In, Sn, oder Pb können die Oxidschicht destabilisieren. Typische Aluminiumlegierungen bestehen aus verschiedenen Arten von intermetallischen Phasen. Korrosion ist lt. [39] primär ein mikrogalvanischer Prozess zwischen diesen intermetallischen Phasen und der Aluminiumgrundmatrix. Weil die intermetallischen Phasen oft als lokale Kathoden wirken, wird an den Korngrenzen die umgebende Aluminiumgrundmatrix lokal korrosiv angegriffen. Aktive Phasen korrodieren bevorzugt. Eine korrodierende Phase hat einen sich opfernden anodischen Bereich, welcher kathodischen Schutz für den umgebenden Bereich generiert. Bedingt durch die chemische Korrosion kann sich der pH-Wert des Elektrolytes, der an die korrodierende Phase angrenzt, lokal ändern. Dieser lokale pH-Wert kann deutlich vom Basis-pH-Wert des Elektrolyten abweichen. Aktive Phasen der Matrix und der intermetallischen Phasen korrodieren selektiv. Mögliche Formen der selektiven Korrosion sind die Interkristalline Korrosion oder die Pitting Korrosion. Bei der Pitting Korrosion treten folgende chemischen Reaktionen auf (vgl. Abbildung 10).



Formel 18 Pitting Korrosion – Teilreaktion vom Al



Formel 19 Pitting Korrosion – Weiterreaktion vom Al



Formel 20 Pitting Korrosion – Reaktion im Bereich des intermetallischen Partikels

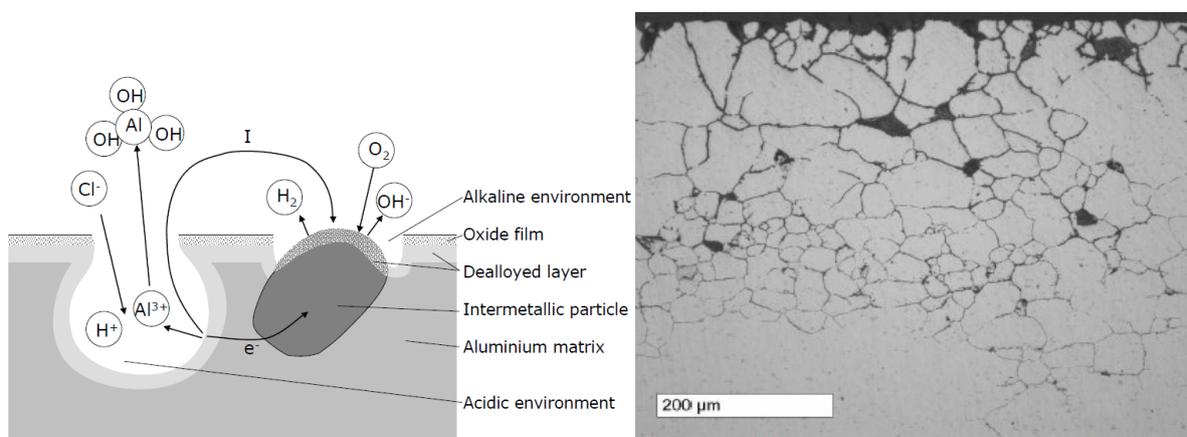


Abbildung 10 a): Pitting Korrosion

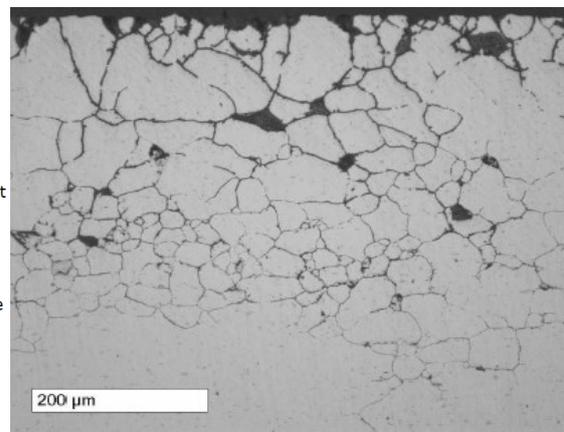


Abbildung 10 b): IKK von AA6005 nach [39]

Gem. [19] ist die interkristalline Korrosion (IK) eine spezielle Erscheinungsform der selektiven Korrosion. Die Ausscheidungen weisen ein niedrigeres Lösungspotenzial auf als die Aluminiummatrix, so dass die Ausscheidungen an den Korngrenzen oder in korngrenzennahen Bereichen einem selektiven Korrosionsangriff ausgesetzt sind. Die Neigung zu IK ist vorrangig eine Folge der Legierungszusammensetzung und der Herstellbedingungen. Siliziumüberschuss verursacht in höher legierten AlMgSi-Werkstoffen eine gewisse Empfindlichkeit gegenüber IK. Daher schreiben z.B. einige Automobilhersteller für die etablierte Legierung EN AW 6056 (AlSi1MgCuMn) einen IK-Test vor, wie z.B. der Volkswagenkonzern mit seiner Prüfvorschrift PV 1113 [40]. In [40] wird ein Schnelltest für 2 h + 0,5 h in einer Prüflösung 1Ltr H<sub>2</sub>O + 20 g NaCl + 100 ml HCL (25 %) vorgeschrieben. Schrauben mit vereinzelter IK (Feststellung IK-Angriff über Mikroschliffe bei Betrachtung mit 20 facher bis 50 facher Vergrößerung) können bei einem positiven Vergleich mit festgelegten Grenzmustern noch freigegeben werden.

Ferner wird IK durch ungenügende Abschreckgeschwindigkeiten nach dem Lösungsglühen gefördert.

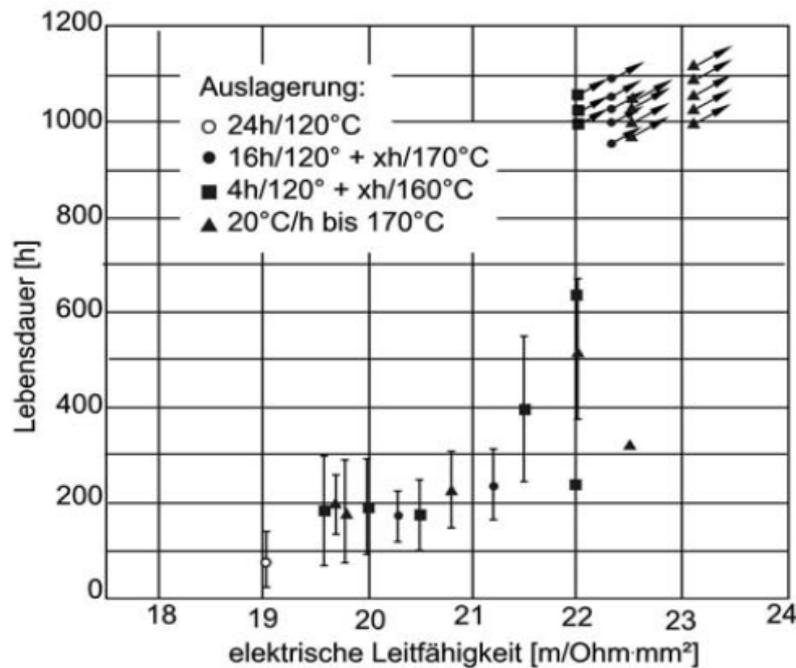
In der Literatur z.B. [19] wird in erster Linie auf das SpRK-Risiko der Legierung EN AW 7075 hingewiesen. Ostermann [19] hat im Buch "Anwendungstechnologie Aluminium" im Anhang in Tabelle A.1.4 einen Vergleich gängiger Aluminiumlegierungen vorgenommen. Dementsprechend wird die Resistenz der Legierung EN AW 7075 - T6 gegenüber IK mit gut und im T76- und T3Zustand mit annehmbar bewertet.

Im Vergleich dazu wird die Resistenz von EN AW 6056 - T78 gegenüber IK mit gut bewertet und von ENAW 6013 im T6-Zustand als annehmbar bewertet.

Insofern liegt nahe, dass auch bei EN AW 7075 die Anfälligkeit für IK eine Rolle spielen kann, insbesondere in den überalterten Zuständen (T76, T73), welche wiederum die Anfälligkeit für SpRK reduzieren.

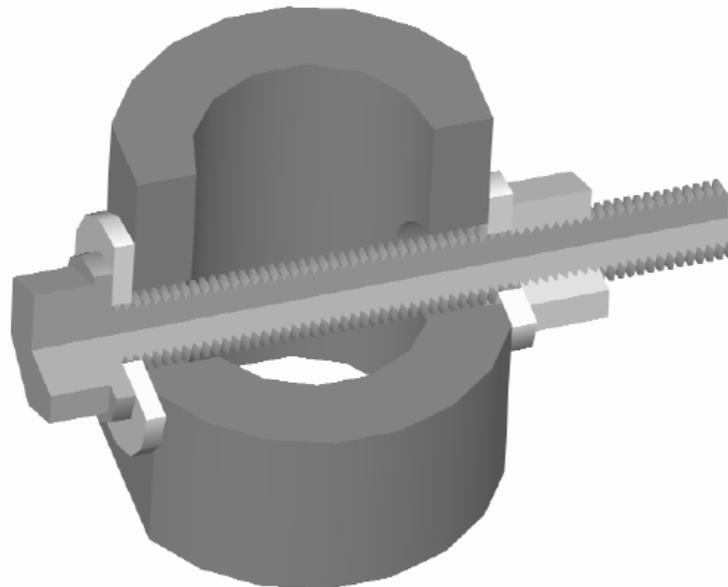
Entsprechend [19] kann SpRK durch eine geeignete Wärmebehandlung vermieden werden.

Bei AlZnMgCu- Legierungen ist eine zweistufige Aushärtung bei 120°C und 165°C bzw. eine Überalterung in den T73-Zustand mit einem Verweis auf die Normen der Luftfahrt wie z.B. DIN 29850 zu empfehlen. Durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit ergeben sich Hinweise auf die Sicherheit gegenüber SpRK. Bei einer Leitfähigkeit von 22 m / Ωmm<sup>2</sup> steigt die Lebensdauer sprunghaft an. Der SpRK-beständige Wärmebehandlungszustand T73 entspricht entsprechend der DIN EN 2004 einer Leitfähigkeit von 23 m / Ωmm<sup>2</sup>.



**Abbildung 11: Einfluss der Auslagerung auf die SpRK-Empfindlichkeit EN AW 7075 [19]**

Systematische Untersuchungen an hochfesten Al-Schrauben aus den Legierungen EN AW 7349, EN AW 7449 sowie EN AW 7075 wurden gem. [31] durchgeführt. Dabei wurden M8-Schrauben aus diesen Legierungen im T6-Zustand sowie in überalterten Zuständen T79 sowie T73 gem. Abbildung 12 überelastisch in Prüfkörpern verspannt.



**Abbildung 12: Schema eines SpRK-Tests an ENAW 7x-Schrauben mit Auslagerung im Wechselklimatetest VDA 621 - 415 [31]**

In [31] erfolgte die Auslagerung der verschraubten Stahlrohre gem. Abbildung 12 im Klimawechseltest nach VDA 621- 415. Mutterseitig wurde eine Al-Scheibe verwendet und kopfseitig mit einer Edelscheibe kathodisch polarisiert. Dabei wurden metrische Al-Schrauben sowie gewindefurchende Schrauben (Gefu) verwendet.

Bezeichnung	Abmessung	Werkstoff	Zustand	MA [Nm]	Bemerkung
RG7	M8 x 50	EN AW 7075	T79	20	
RG8	M8 x 50	EN AW 7349	T79	31	
RG9	M8 x 50	EN AW 7449	T79	32	
RG13	M8 x 50	EN AW 7075	T76	20	
RG14	M8 x 50	EN AW 7075	T6	20	
EG1	M8 x 50	EN AW 7075	T6	15	Gefu mit Gleitmittel
EG2	M8 x 50	EN AW 7349	T6	15	Gefu mit Gleitmittel
EG3	M8 x 50	EN AW 7075	T6	15	Gefu ohne Gleitmittel
EG4	M8 x 50	EN AW 7349	T6	15	Gefu ohne Gleitmittel

**Tabelle 9: Anziehungsmomente (MA) der Al-Schrauben zur Verschraubung gem. Abbildung 12**

Da für die Legierungen EN AW 7349 und EN AW 7449 in [31] keine normativen Vorgaben hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung ermittelt werden konnten, wurde eine chemische Analyse (Funken-Emission-Spektral-Analyse) mit diesen Schrauben durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt.

Bei der hochfesten Legierung EN AW 7075 hingegen werden in DIN 573 – 3 normative Vorgaben zur chemischen Zusammensetzung gemacht.

Element	Werkstoff			
	EN AW 7349		EN AW 7449	
	Gehalt in %	±u	Gehalt in %	±u
Si	0,057	0,004	0,046	0,003
Fe	0,074	0,003	0,086	0,003
Cu	1,81	0,017	1,64	0,015
Mn	0,009	0,001	0,015	0,001
Mg	2,58	0,09	2,42	0,08
Zn	7,38	0,24	8,18	0,27
Ni	0,006	0,001	0,006	0,001
Cr	0,008	0,001	0,015	0,001
Ti	0,019	0,001	0,026	0,001
Ga	< 0,005	---	< 0,005	---
V	0,008	0,001	0,008	0,001
Zr	0,080	0,003	0,092	0,003

**Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung der EN AW 7349- und EN AW 7449-Schrauben [31]**

Der Vergleich in Tabelle 10 zeigt, dass die Cu-Anteile der beiden höchstfesten Al-Legierungen innerhalb der Toleranz nach DIN 573 - 3 für die Legierung EN AW 7075 liegen (1,2 % – 2,0 % Cu). Auch die Mg-Anteile liegen in der Toleranz von DIN 573 - 3 (2,1 % – 2,9 % Mg). Es ist auffällig, dass die EN AW 7349 mit 7,38 % Zn und die EN AW 7449 mit 8,18 % Zn relativ hohe Zinkanteile aufweist. Vergleichsweise wird in der DIN EN 573 - 3 der Zinkanteil für EN AW 7075 auf 5,1 % Zn - 6,1 % Zn beschränkt.

Laut [33] wirken bei AlZnMgCu-Legierungen in erster Linie MgZn<sub>2</sub>-Ausscheidungen aushärtend. Im Vergleich zur EN AW 7075 scheinen die erhöhten Zn-Anteile der EN AW 7349 und EN AW 7449 ein erhöhtes Festigkeitsniveau zu generieren, welches im T6-Zustand entsprechend der Abbildung 13 [31] um ca. 100 MPa über der EN AW 7075 liegt.

In Abbildung 15 zeigt sich bei der Legierung EN AW 7075, dass im T6-Zustand bereits nach einem Zyklus des Korrosionstests entsprechend VDA 621 – 415 der erste Bruch aufgetreten ist. Nach dem fünften Zyklus waren bereits 70% der T6-Prüflinge gebrochen. Bei den begrenzt überalterten (T79) und im überalterten Zustand (T76) sind hingegen keine Schrauben gebrochen.

In [31] wurde das Anziehdrehmoment bei der Verspannung des SpRK-Prüfkörpers so gewählt, dass die Streckgrenze best möglichst ausgenutzt wird. Gem. Tabelle 9 lag das Anziehdrehmoment beim SpRK-Test entsprechend Abbildung 15 bei MA = 20 Nm. Vermutlich waren dort die Schrauben noch nicht überelastisch vorgespannt. Dennoch traten im T6-Zustand die Brüche bei der EN AW 7075-Schraube - Schlussgerollt (SG) auf.

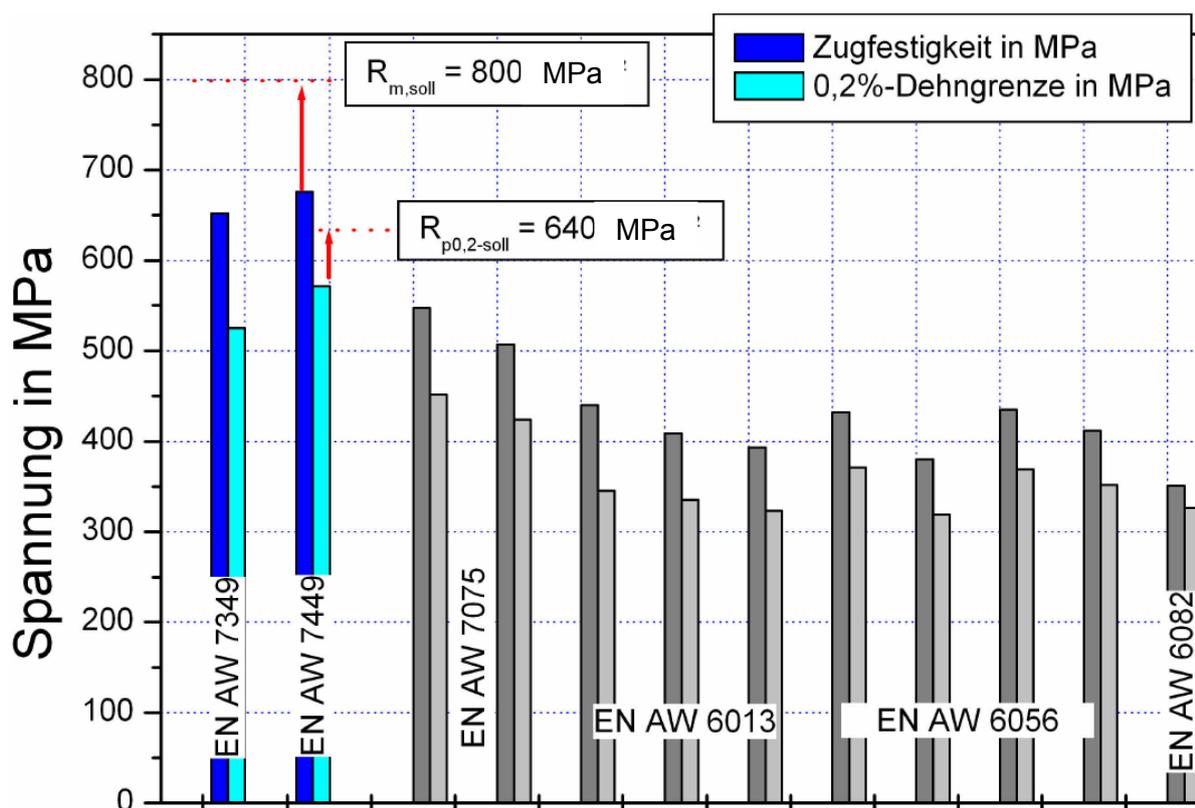


Abbildung 13: Maximal erreichbare Festigkeiten von Al-Legierungen 7xx und 6xx nach [31]

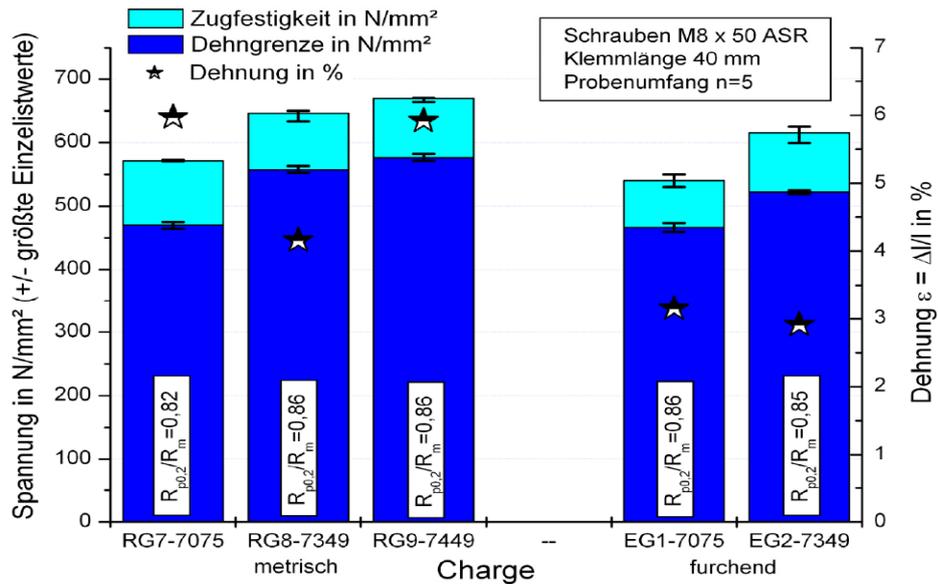


Abbildung 14: R<sub>m</sub>, R<sub>p0.2</sub> und Dehnung aus Zugversuch der SpRK-Prüfschrauben nach Tabelle 9 [31]

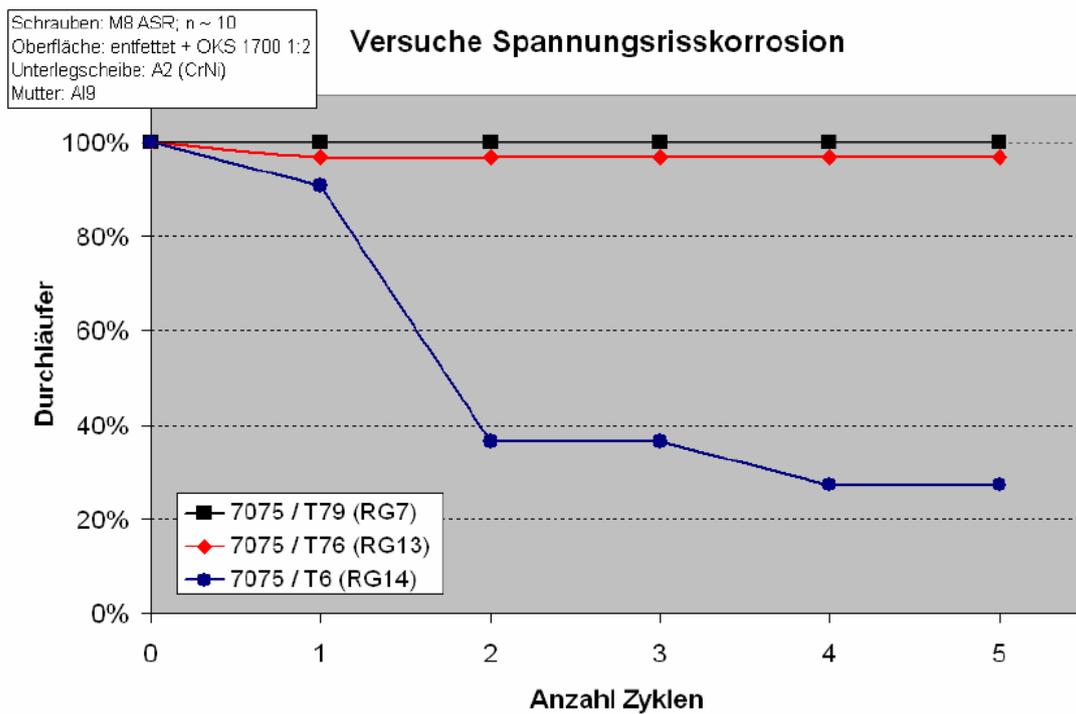


Abbildung 15: SpRK-Test nach [31], EN AW 7075 - schlussgerollt im Zustand T6, T76 und T79

Gem. Abbildung 16 reagierten im Prüfaufbau gemäß Abbildung 12 die höchstfesten Al-Legierungen EN AW 7349 und EN AW 7449 auch in den überalterten Zuständen wesentlich empfindlicher gegenüber SpRK. Das Anziehdrehmoment (MA) wurde bei EN AW 7349 auf 31 Nm und bei 7449 auf 32 Nm erhöht.

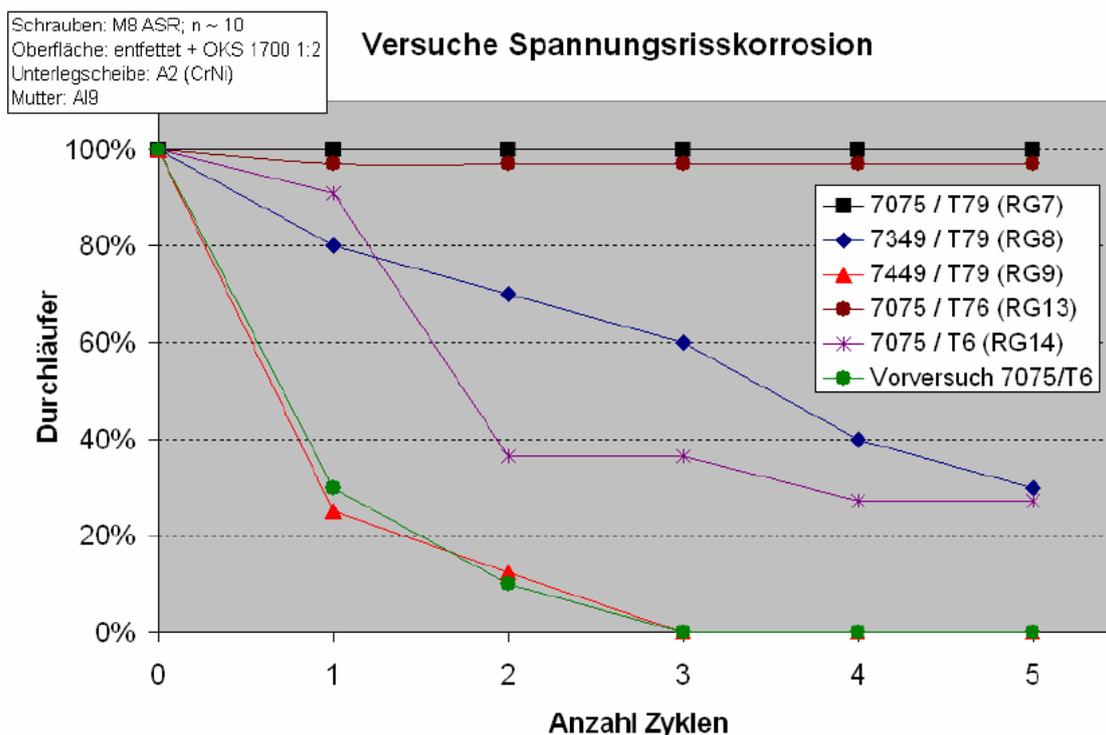


Abbildung 16: SpRK-Test nach [31]: EN AW 7x - schlussgerollt im Zustand T6, T76 und T79

Bei Abbildung 14 fällt ferner auf, dass bei EN AW 7449 - T79 - SG bereits nach dem dritten Zyklus VDA 621 - 415 alle 10 Prüflinge gebrochen waren. Bei EN AW 7349 - T79 - SG gab es hingegen noch drei Durchläufe und somit eine Ausfallrate von 70%.

Aus Abbildung 13 könnte man ableiten, dass der Wärmebehandlungszustand ein maßgebendes Kriterium bei AlZnMgCu-Legierungen ist und das Risiko für SpRK – wie häufig in der Literatur formuliert – in überalterten Zuständen erheblich reduziert wird, da EN AW 7075 in T79 und T76 nicht gebrochen waren.

Dieses Kriterium allein scheint jedoch nicht ausreichend zu sein, da entsprechend der Abbildung 16 die Schrauben aus den Legierungen EN AW 7349 - T79 - SG und EN AW 7449 - T79 - SG gebrochen waren. Die Bruchdehnung dieser beiden Legierungen war entsprechend der Abbildung 14 ähnlich der EN AW 7075 - T79 - SG und lag bei ca. 6%.

Ferner wird nach [31] ausgeführt, dass bei der EN AW 7349 und 7449 selbst bei einer Reduktion des Vorspannkraftniveaus um 50 % fast in gleicher Weise wieder Brüche aufgetreten waren.

Nach [46] zeigt sich bei Al-Legierungen 7xxx der Zustand T7 gegenüber T6 (max. ausgehärtet) und T4 (unteraltert) ein überlegenes Korrosionsverhalten [Oliveira et al. 2004].

Im T6-Zustand dominieren fein verteilte Guinier-Preston-Zonen (GP) und  $\eta'$ -Ausscheidungen in der  $\alpha$ -Matrix. Nach Überalterung hingegen wird die  $\eta$ -Gleichgewichtsphase ( $\text{MgZn}_2$ ) primär an den Korngrenzen ausgeschieden.

Ferner kommt es nach [46] im Kontakt mit wässrigen Elektrolyten (z.B. 7xxx – Schraube im Kontakt mit Salzwasser) zur Bildung von Mg-H-Phasen [Song et al.1996]. Daraus resultiert

eine Wasserstoffversprödung, welche sich im T4-Zustand (Unteralterung) auf im übersättigten Mischkristall gelöste Mg oder im T7-Zustand (Überalterung) auf Mg-Ausscheidungen an den Korngrenzen auswirkt. Der korrosive Angriff erfolgt also je nach Auslagerungszustand großflächig über das gesamte Gefüge verteilt oder mit lokaler Beschränkung auf die Korngrenzen. In [46] wird weiter ausgeführt, dass bei elektrochemischen Untersuchungen an 7xxx-Al-Legierungen zwei Durchbruchpotenziale festgestellt werden, wobei das erste Durchbruchpotenzial vom Cu-Gehalt der feinen T6-Ausscheidung abhängig ist. Das zweite Durchbruchpotenzial hängt von der intergranularen Korrosion und dem selektiven Kornangriff sowie vom Cu-Gehalt in der Matrix ab [Meng und Frankel, 2004].

Nach [46] ist bei Betrachtung der Legierung EN AW 7050 der T7-Zustand derjenige, welcher die geringste Korrosionsrate aufweist. EN AW 7050 hat gegenüber ENAW 7075 mit max. 2,6% einen etwas höheren Cu-Anteil. Der Mg-Anteil ist ähnlich, jedoch mit etwas größerer Toleranz. Der Zn-Anteil liegt mit max. 6,7 % etwas höher. Der Grund für die geringeren Korrosionsraten im T7xxx-Zustand ist, dass das korrosionsanfällige Magnesium in diesem Auslagerungszustand als Gleichgewichtsphase  $\eta$  ( $\text{MgZn}_2$ ) an den Korngrenzen ausgeschieden wird. Dadurch wirkt sich das Magnesium weniger schädlich auf die inhärenten Korrosionseigenschaften aus.

Laut [47] bilden sich bei der Al-Legierung EN AW 7075 je nach Höhe der Auslagerungstemperatur metastabile Phasen in der folgenden Reihenfolge:

**Übersättigter  $\alpha$  - Mischkristall** (Ansammlung von Legierungs-Atomen ohne erkennbare Struktur)  $\rightarrow$  **Cluster** (Kugel-Plättchen od. stäbchenförmige Anordnung von Legierungs-Atomen mit einer bestimmten Orientierung zum Kristallgitter der Matrix)  $\rightarrow$  **kohärente GP(II)-Zonen**  $\rightarrow$  **teilkohärente metastabile Übergangsphase**  $\rightarrow$  **Gleichgewichtsphase**  $\{\text{MgZn}_2$  und  $(\text{AlZn})_{49}\text{Mg}_{32}\}$

Das eine Ausscheidungsstadium geht durch Vergrößerung wachstumsfähiger Ausscheidungen zum nächsten über, wobei Teilchen mit unterkritischer Größe reduziert werden. Nach [47] erfolgt nach hoher Auslagerungstemperatur und langer Auslagerungszeit eine Umwandlung teilkohärenter Ausscheidungen in stabile Gleichgewichtsphasen. Sind die Auslagerungszeiten entsprechend lang, kommt es zur Überalterung durch Vergrößerung und zum vollständigen Kohärenzverlust der Phasen, was mit einem Festigkeitsverlust einhergeht. Entsprechend [47] ist das erreichbare Härtemaximum bei AlZnMg(Cu)-Legierungen, wie bei EN AW 7075, von teilkohärenten Übergangsphasen bestimmt. Die höchste Härtesteigerung erfordert eine möglichst hohe Teilchenzahl, einen geringen Teilchenabstand, eine gleichmäßige Verteilung und eine hohe Kohärenz.

Ferner wird in [47] beschrieben, dass Mg und Cu die Löslichkeit von Zn im  $\alpha$ -MK verringert. Dadurch wird die Aushärtbarkeit der Legierung EN AW 7075 erhöht. Je nach Zn / Mg-Verhältnis besteht ein Gleichgewicht zwischen dem  $\alpha$ -MK und der  $\text{MgZn}_2$ -Phase ( $\eta$ -Phase) und der T-Phase  $(\text{Al,Zn})_{49}\text{Mg}_{32}$ . Die meisten AlZnMg(Cu)-Legierungen weisen beide Gleichgewichtsphasen auf.

### 3. Prüfmethodik

Ziel ist die Erstellung einer Auslegungsrichtlinie für hochfeste gewindefurchende Al-Schrauben für einen Serieneinsatz von Magnesium-Antriebsstrangkomponenten.

Im Rahmen der Korrosionstests werden folgende Teilbereiche näher untersucht:

- a) *Prüfung von Al-Schrauben mit Hilfe von Kontaktkorrosionstests mit Magnesium und SpRK-Tests:* Vergleich von hochfesten EN AW 7xxx-Schrauben mit etablierten EN AW 6056-Schrauben, Einfluss von Top Coats und Versiegelungen, Einfluss der zu fügenden Werkstoffe (Klemm- und Einschraubteil) auf die SpRK (Polarisierung)
- b) *Kontaktkorrosionstests von Stahlschrauben mit Magnesium:*  
Stahlschrauben mit unterschiedlichen Schutzsystemen / Oberflächensystemen: Kopfisolierung mit Hilfe von Nylon oder Al-Scheiben, Vergleich von galvanischen und Zinkflakebeschichtungen, Einfluss von Top Coats / Versiegelungen
- c) *Entwicklung einer Testmethodik zum Nachweis von SpRK für EN AW 7xxx-Schrauben*
- d) *Detektion von Einflussfaktoren auf die SpRK von EN AW 7xxx-Schrauben*

Das Projektteam, das sich aus dem Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbauinstitut (AMB) und dem Institut für allgemeine und analytische Chemie der Montanuniversität Leoben sowie der ARNOLD Umformtechnik (AUT) und MAGNA Powertrain (MPT) zusammensetzte, hat über einen Zeitraum von ca. zwei Jahren verschiedene Korrosionstests entwickelt, durchgeführt und ausgewertet.



Abbildung 17: Projektteam zur Definition & Durchführung von Korrosionstests

Seitens der ARNOLD Umformtechnik nahm der Verfasser dieser Diplomarbeit im Rahmen dieses Projektes folgende Aktivitäten im Bereich der Prüfmethodik vor:

- a) Legierungsauswahl der zu untersuchenden Aluminiumschrauben
- b) Auswahl der Wärmebehandlungsparameter, Umformparameter sowie der Fertigungsfolge (Schlussgerollt und Schlusswärmebehandelt)
- c) Auswahl und Festlegung der Oberflächen- und Schutzsysteme für Stahlschrauben
- d) Fertigung der jeweiligen Schraubentypen aus Aluminium und Stahl durch AUT
- e) Mitwirkung bei der Erstellung des Prüfkörperkonzepts
- f) Aufbau der Prüfkörper und Prüfvorrichtungen mit Festlegung der Montageparameter

- g) Mitwirkung bei der Auswertung, Ergebnisinterpretation und Mitgestaltung weiterführender Korrosionstests

## 3.1 Galvanische Korrosion

### 3.1.1 1. Voruntersuchung von verschraubten Mg-Gehäusen aus AZ91HP

Im Vorfeld des FFG-Förderungsprojekts [13] wurde von der ARNOLD Umformtechnik eine Voruntersuchung beim Institut für Chemie an der MU Leoben beauftragt [48]. Ziel der Voruntersuchung war die Feststellung der Maßnahmen, durch welche das Korrosionsverhalten von verschraubten Magnesiumgehäusen optimiert werden kann. Dabei sollte der Einfluss des sich ergebenden Oberflächensystems bei Stahl- und Al-Schrauben sowie die Auswirkung einer zusätzlichen Isolierung durch Aluminiumscheiben oder Umspritzung des Schraubenkopfes mit Kunststoff zwischen Schrauben- und Grundkörper untersucht werden. Durch diese Untersuchung soll ein Oberflächensystem gefunden werden, welches entsprechend der Salzsprühnebeltest-Auslagerung laut DIN EN ISO 9227 bzw. DIN 50021 nur eine geringe Korrosion an Schrauben und Gehäuse zeigt.

Im FVA-Vorhaben 470 (Forschungsvorhaben Antriebstechnik) wurden Mg-Platten auf Kunststoffklötze verschraubt und der Mg-Massenverlust nach 96 h Salzsprühnebeltest gemessen [31]. Eine ähnliche Vorgehensweise wie beim FVA-Vorhaben 470 wird in der VW PV 1201 beschrieben [41]. Diese Verfahren sind jedoch für hohe Korrosionsanforderungen von Powertrainanwendungen nur bedingt aussagefähig, weil die Dauer des Korrosionstestes mit 96 h Salzsprühnebeltest zu kurz ist. Ferner werden bei PV 1201 relativ geringe Anziehmomente zum Verspannen von bearbeiteten Mg-Klemmplatten verwendet. Dadurch werden eventuell vorhandene Beschichtungen im Auflagebereich des Schraubenkopfes nicht abgeschabt.

Im Gegensatz zu den zuvor genannten Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit folgende praxisorientierte Ansätze für die Voruntersuchung gewählt:

- a) Verwendung von Originalgetriebegehäuse von MAGNA Powertrain AG & Co. KG aus der Mg-Legierung AZ91HP mit entsprechenden Gusshäuten auf dem Deckel
- b) Montage der Schrauben mit den üblichen Drehmomenten. Dadurch würden sich evtl. nicht ausreichend anhaftende Beschichtungen (Versiegelungen oder Kunststoffbeschichtungen wie Nylon) vom Schraubenkopf bei der Montage auf den Gusshäuten des Getriebegehäusedeckels abreiben
- c) Korrosionstestdauer 720 h im Salzsprühnebeltest nach DIN 50021 (für Powertrain-Komponenten üblich)

#### 3.1.1.1 Vorauswahl von Schraubenwerkstoffen und Oberflächensystemen

Die gewählten Oberflächensysteme für die Stahl – und Aluminiumschrauben haben einen großen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit des verschraubten Magnesiumgehäuses.

In Tabelle 11 werden Fachbegriffe aus dem Bereich Schraubenoberflächentechnik erläutert.

Begriff	Definition
Zinklamellenbeschichtung	Primär anorganische, dünne Beschichtung mit kathodischer Korrosionsschutzfähigkeit. Zink- und im geringen Maß Aluminiumlamellen aus einer Dispersion werden auf der Bauteiloberfläche aufgebracht. Beim Einbrennen verdunsten und polymerisieren Beschichtungsbestandteile.
Deckschichten / Top Coats	Organische oder anorganische Schutzschicht für Zinklamellen, Zink oder Zinklegierungsüberzüge mit Schichtdicken > 2 µm. Die Deckschicht kann Zink oder Aluminium enthalten und zur Farbgebung mit Pigmenten versehen sein. Zur Einstellung von Reibzahlen können die Deckschichten geeignete Zusätze enthalten.
Passivieren	Laut DBL 9440 Herstellen von Konversationsschichten auf frisch abgeschiedenen Zink- oder Zinklegierungsüberzügen durch Behandeln mit geeigneten Cr(VI)-freien Lösungen.
Konversationsschicht	Nicht metallische, meist anorganische, sehr dünne Schichten auf einer Metalloberfläche, welche i.d.R. durch die chemische Reaktion einer wässrigen Behandlungslösung mit dem metallischen Untergrund erzeugt werden.
Versiegelungen	Organische oder anorganische Schutzschichten von etwa 0,5 µm - 2 µm Schichtstärke auf Zinklamellen, Zink- oder Zinklegierungsüberzügen, welche die Korrosionsbeständigkeit erhöhen. Die Versiegelungen auf Zink- oder Zinklegierungsüberzügen erfolgt i.d.R. auf passivierten Oberflächen, wobei die Versiegelung in die Passivierung eindringt und eine Verbundschicht bildet. Top Coats oder Lackierungen mit höheren Schichtdicken sind keine Versiegelung. Zur Einstellung definierter Reibungszahlen können Versiegelungen integrierte Schmierstoffe enthalten. Früher wurden meist in Wasser gelöste organische Harze verwendet. Heute werden häufig Produkte eingesetzt, die nanoskaliertes SiO <sub>2</sub> in Verbindung mit organischen Harzen enthalten.
Separates grifffestes Schmiermittel	Ein zusätzlich aufgebracht Schmiermittel, das die Aufgabe hat, die Reibzahlspanne einzustellen. Die Messung erfolgt entsprechend DIN EN ISO 16047 mit angestrebten Reibzahlen nach VDA 235 – 101: $\mu_{ges} = 0,09 - 0,14$ und $\mu_G = \mu_k = 0,08 - 0,16$ [62]

**Tabelle 11: Begriffsdefinitionen von Schraubenoberflächen, DBL 9440 [63] und DBL 8451 [64]**

Im Vorfeld der Korrosionsuntersuchung wählte das Projektteam die Schraubenwerkstoffe sowie die Oberflächen aus. Für die Korrosionstests wurden vergütete Stahlschrauben der Festigkeitsklasse 8.8 und 10.9 mit folgenden Oberflächensystemen ausgewählt:

a) Delta Protekt KL 100 (Zink Lamellenschicht) + Delta Seal Lichtgrau (Deckschicht)

Delta Protekt = DELTA - PROTEKT® KL 100 ist eine weitgehend anorganische, mikroschichtbildende Grundbeschichtung und hochgefüllt mit Zink und Aluminiumlamellen [49]. Die Zink- und Aluminiumflocken in einer Dispersion werden über die Arbeitsgänge Tauchen – Abschleudern – Trocknen – Einbrennen aufgebracht.

Delta Seal ist eine organisch hochvernetzte, mikroschichtbildende Deckbeschichtung. Nach einem entsprechenden Beschichtungs- und Einbrennprozess entsteht eine haftfeste, chemikalienresistente Beschichtung [50]. Auch bei der Delta Seal-Beschichtung erfolgen die Arbeitsgänge Tauchen – Abschleudern – Trocknen – Einbrennen (180°C – 220°C). Delta Seal ist nicht elektrisch leitfähig, somit wird eine optimierte Beständigkeit gegen Kontaktkorrosion erwartet. Die Produkte Delta Protekt KL100 und Delta Seal sowie Delta Tone wurden von der Dörken MKS – Systeme GmbH & Co. KG entwickelt [58] und werden über lizenzierte Beschichtungsunternehmen appliziert. Der Schichtaufbau ist ähnlich der Abbildung 18, wobei dort die Deckbeschichtung Delta Seal organisch ist.

b) Das System Delta Tone + Delta Seal

Delta Tone ist eine anorganische, mikroschichtbildende Grundbeschichtung, hochgefüllt mit Zink- und Aluminiumlamellen. Nach dem Einbrennprozess werden silbermetallisch glänzende Überzüge mit hohen Korrosionsschutzeigenschaften erzielt [50].

c) Magni B46 + Magni T06EGZ. (s. Tabelle 14) Zinklamellenbeschichtung mit anorganischen Top Coat. Die anorganische Zinklamellenbeschichtung wird mit einer aluminiumreichen reibungsmodifizierten Deckschicht kombiniert. Beide Beschichtungen werden durch die Arbeitsgänge Tauchen – Schleudern – Einbrennen appliziert. Die Kombination aus Zinklamellenbeschichtung und Deckbeschichtung wird als MAGNI 594 bezeichnet. Die MAGNI Europe GmbH & Co. KG hat die MAGNI Produkte entwickelt. Die Beschichtung von Schrauben erfolgt von lizenzierten Beschichtungsunternehmen.

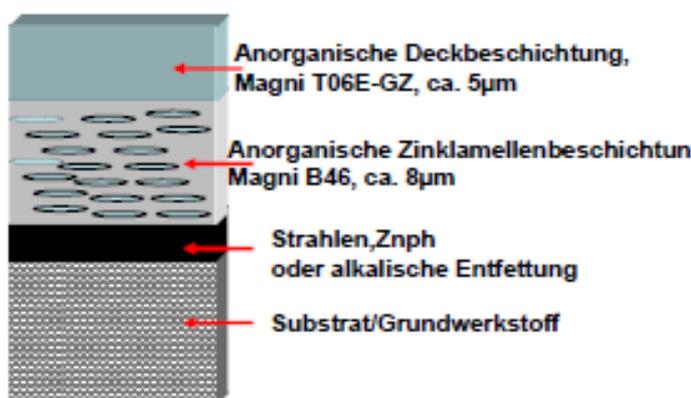


Abbildung 18: Schichtaufbau von Magni 594, Zinklamelle mit Deckschicht [57]

- d) Die REMFORM<sup>®</sup> 4 x 14 Schraube hat eine Oberfläche entsprechend VW TL 194 [42] und wird in dieser VW-Werknorm für Stahlschrauben für die Verschraubung von Magnesiumbauteilen empfohlen. Der Oberflächensystemaufbau basiert auf einer galvanischen Verzinkung + Dickschichtpassivierung + Zinklad Versiegelung der Fa. Mc Dermid (silikatisch). Die verwendete REMFORM<sup>®</sup>-Schraube 4 x 14 hat ein Grobgewinde, welches üblicherweise zur Kunststoffdirektverschraubung verwendet wird. Dabei erfolgt eine gewindefurchende Verschraubung in AZ91HP.

Tabelle 12 zeigt das Versuchskonzept des ersten Vorversuches zur Prüfung der Kontaktkorrosion. Entsprechend diesem Konzept wurden die AZ91HP-Gehäuse im Labor Anwendungstechnik der AUT montiert und zur Durchführung des Salzsprühnebeltestes an das Institut für allgemeine und analytische Chemie der Montanuniversität Leoben gesendet.

Montage von Mg - Gehäusen AZ91HP mit TAPTITE 2000 (TT2k) M8 x 60 - EN AW 7075 - T6 + Gleitmittel OKS 1300: Anziehmoment MA = 22 Nm						
Geh-Nr	Schr/Geh.	Schraube	Werkst	Beschichtung	Besch.-Position	Al-Topf / Al-Scheibe
1	4	TT2kM8x60	Al-7075	Delta Seal	komplett Schraube	ohne
1	4	TT2kM8x60	Al-7075	Delta Seal	komplett Schraube	Al-Scheibe
5	4	Liko M8x18	8.8	Del.Prot.+DSealLichtgrau	komplett Schraube	ohne
5	4	Liko M8x18	8.8	Del.Prot.+DSealLichtgrau	komplett Schraube	Al-Scheibe
3	4	TT2kM8x60	Al-7075	ohne	ohne	ohne
3	4	TT2kM8x60	Al-7075	ohne	ohne	Al-Scheibe
2	3	TT2kM8x60	Al-7075	Aluminal	komplett Schraube	ohne
2	1	TT2kM8x60	Al-7075	Aluminal	komplett Schraube	Al-Scheibe
2	4	Metr.M8x60	Al-6056	ohne	ohne	ohne
4	3	Metr.M8x35	10.9	DeltaTone+Seal	komplett Schraube	ohne
4	3	Metr.M8x35	10.9	DeltaTone+Seal	komplett Schraube	Al-Scheibe
4	2	Metr.M8x35	10.9	DeltaTone+Seal	komplett Schraube	Al-Topf
6	3	TT2kM8x60	Al-7075	CompCote (Harteloxal)	komplett Schraube	ohne
6	1	TT2kM8x60	Al-7075	CompCote (Harteloxal)	komplett Schraube	Al-Scheibe
6	3	TT2kM8x60	Al-7075	elektrostat. NylonBesch	komplett Kopf	ohne
6	1	TT2kM8x60	Al-7075	elektrostat. NylonBesch	komplett Kopf	Al-Scheibe
*	5	Remform4x14	FK 10	Zink dickschichtpassiviert + Versiegelung VW TL 194	komplett Schraube	
Vorgehensweise beim Aufbau der Prüfkörper:						
1.	Ablängen der Al-Schrauben + Lackieren der Schraubenspitzen mit Versiegelung*					
2.	Vorfurchen in Kernlöcher und Schrauben herausdrehen					
3.	Abgelängte Schrauben in vorgefurchtes Gewinde (AZ91HP) einschrauben					
Vorgehensweise bei der Montage der REMFORM - Schraube:						
*	Vorloch in AZ91 - Deckel bohren & gewindeförmig die Schraube bis zur Kopfauflage in Deckel drehen					

**Tabelle 12: Schraubenwerkstoff- und Oberflächenauswahl für 1. galvanischen Korrosionstest**

Ziel der Korrosionsuntersuchungen mit den Prüfaufbauten gemäß Tabelle 12 war es, festzustellen, wie stark der korrosive Angriff nach 720 h Salzsprühnebeltest nach DIN 50021 auf das Magnesiumgehäuse AZ91HP sowie auf die Schrauben ist:

Als Referenz für ein anzustrebendes Korrosionsverhalten dienen Aluminiumschrauben aus der Legierung EN AW 6056 - T6 (gleitmittelbeschichtet mit OKS 1700).

Für die Legierung EN AW 7075 wird in der Literatur laut Reinhold [14] und Heinrich [15] eine schlechtere Korrosionsbeständigkeit angegeben. Ziel dieser Voruntersuchung war es, festzustellen, ob überhaupt ein zusätzlicher Korrosionsschutz für diese Legierung erforderlich ist. Daher wurde die EN AW 7075 - T6 - SG-Ausführung lediglich mit einer Gleitbeschichtung (OKS 1300) als Basis verwendet. Als weitere Varianten dieser Ausführung erfolgte zusätzlich noch eine Beschichtung der EN AW 7075 - T6 - SG - Ausführung mit

- a) Delta Seal (organischer Top Coat)
- b) Aluminal (Aluminierung der kompletten Schraube)
- c) Nylon – Schraubenkopfbeschichtung

### 3.1.1.2 Erstellung der Prüfaufbauten

Die Mg-Achsgetriebegehäuse aus AZ91HP wurden für die Untersuchungen gemäß [6] mit vorgegossenen Kernlöchern für Gewindefurchschrauben M7 und M8 abgegossen. Da diese Gehäuse als Lagerbestand des anwendungstechnischen Labors der AUT zur Verfügung standen, wurden diese auch für die Prüfaufbauten gemäß Tabelle 12 verwendet.

Auch für die Diplomarbeit von Kaltenegger [6] wurden die gleichen TAPTITE 2000®-Schrauben M8 EN AW 7075 sowie M8 EN AW 6056 verwendet. Basierend auf Überdrehversuchen wurde für die TAPTITE 2000® M8 EN AW 7075 - T6 ein max. Anziehmoment  $M_{Amax} = 22 \text{ Nm}$  festgelegt. Bei analogen Versuchen gemäß [6] mit M8 – EN AW 6056 – T6 wurde  $M_{Amax} = 16 \text{ Nm}$  festgelegt. Das Konzept laut [6] für die Prüfaufbauten (AZ91HP-Gehäuse, EN AW 7075-Schrauben, EN AW 6056-Schrauben sowie die Anziehmomente) wurde für diese galvanischen Korrosionstests übernommen.

Die für M7-Gewindefurchschrauben vorgegossenen Kernlöcher wurden auf 7,3 mm aufgebohrt, damit sie für TAPTITE 2000® M8 passend sind. Das Gewinde wurde mit Hilfe von TAPTITE 2000® M8-Schrauben gefurcht. Für die Verschraubung wurden eine geschliffene Stahlklemmleiste plus Scheiben plus 20 kN-Kraftmessdose zusätzlich als Klemmteile verklemmt. Im AZ91HP wurde eine Einschraubtiefe von ca. 16 mm (entsprechend 2 x Schrauben-Nenn Durchmesser) realisiert. Die Drehmomentkurve (blaue Kurve) der Vormontage mit  $M_A = 22 \text{ Nm}$  und dem Losbrechen sowie dem Ausschrauben ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Vorfurchung war deswegen notwendig, weil alle verfügbaren Aluschrauben 60 mm lang waren. Da der AZ91HP-Deckel des Getriebegehäuses (Klemmteil) eine Dicke von 14 mm hat, mussten die Aluschrauben für die Korrosionsuntersuchungen auf ca. 35 mm abgelängt werden.

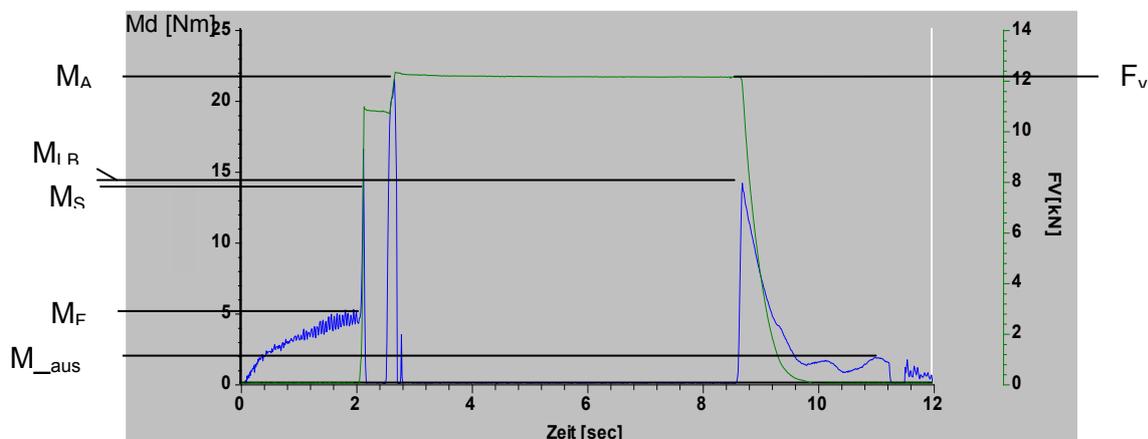
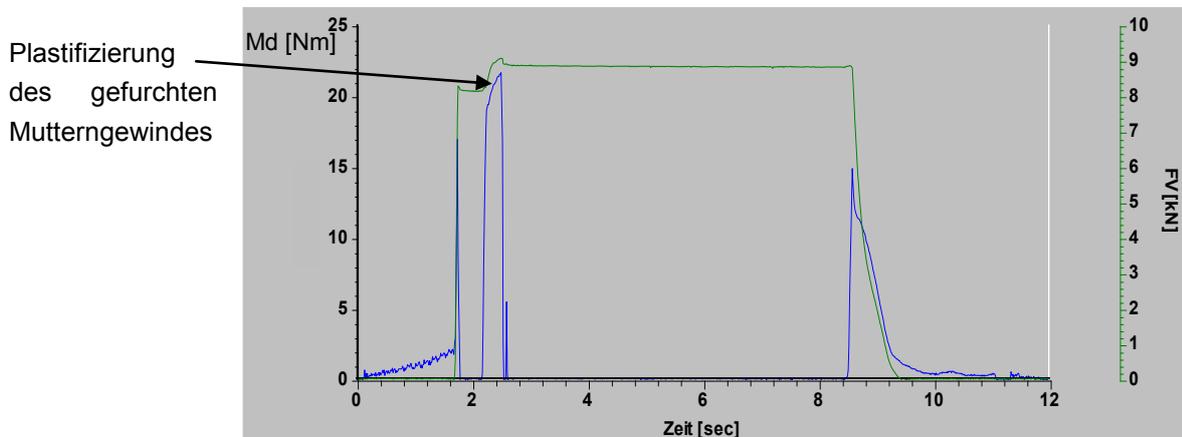


Abbildung 19: Vormontage in Kernloch 7,30 mm mit TAPTITE 2000® M8 x 60 - 10.9

Bei der Vormontage war ein Furchmoment (Moment, welches beim Furchen des Muttergewindes auftritt)  $M_F \sim 5,0 \text{ Nm}$  aufgetreten. Bis zum Schwellmoment  $M_S \sim 14,0 \text{ Nm}$  wurde mit erhöhter Drehzahl ( $n \sim 200 \text{ U. p. m.}$ ) verschraubt. Danach erfolgte ein langsamer Endanzug ( $n \sim 30 \text{ U. p. M.}$ ) bis zum Anziehmoment  $M_A = 22,0 \text{ Nm}$ . Dabei wurde eine Montagevorspannkraft  $F_V \sim 12,0 \text{ kN}$  generiert (s. grüne Kurve). Nach ca. 3 sec. wurde die Furchschraube gelöst, wobei zunächst ein Losbrechmoment  $M_{LB} \sim 14,5 \text{ Nm}$  auftrat. Nach dem Überwinden der Haftreibung beim Lösen wurde ein Ausschraubmoment von  $M_{aus} \sim 2,0 \text{ Nm}$  gemessen.

Bei dem Vorfurchprozess gemäß Abbildung 19 wurden für alle Verschraubungen entsprechend der Tabelle 12 Montagevorspannkraften  $F_V = 7,9 \text{ kN} - 14,3 \text{ kN}$  gemessen.

Die geringsten Vorspannkraften traten beim vorgegossenen Kernloch Nr. 7 auf (vgl. Abbildung 23) mit einem Lochdurchmesser oben  $7,79 \text{ mm}$  und einer Gesamtentformungsschräge  $\sim 1,4^\circ$ . Dieses Kernloch wurde für im Zuge von [6] für Gewindefurchschrauben ALTRACS<sup>®</sup> M8 für die obere Kernlochtoleranz abgegossen. Die hier verwendeten TAPTITE 2000<sup>®</sup> benötigen etwas engere Kernlöcher. Laut dem TAPTITE 2000<sup>®</sup>-Prospekt der REMINC Inc. wird für gegossene Kernlöcher von TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 in Leichtmetalle im oberen Lochbereich ein max. Durchmesser von  $7,69 \text{ mm}$  empfohlen [59]. Damit alle vorhandenen Kernlöcher der AZ91HP-Gehäuse verwendet werden, vereinbarte das Projektteam, dass auch Kernloch 7 (vgl. Abbildung 23) für TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 mit verwendet wird.



**Abbildung 20: Vormontage mit TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 x 60 - 10.9 in AZ91HP**

In Abbildung 20 ist ein extrem niedriges Furchmoment von  $M_F \sim 2,2 \text{ Nm}$  auffällig. Das eingestellte Anziehmoment  $M_A = 22,0 \text{ Nm}$  wird erreicht, aber ab ca.  $18,0 \text{ Nm}$  kommt es zu einer verstärkten Plastifizierung des gefurchten Muttergewindes im Magnesiumgehäuse. Daher wird bei diesen „zu großen Kernlöchern“ eine geringere Vorspannkraft generiert.

Für die niederfesteren metrischen Aluminiumschrauben (EN AW 6056 mit  $R_m \sim 400 \text{ MPa}$ ) wurden die abgelängten Schrauben M8 in das vorgefurchte Gewinde im AZ91-Gehäuse mit einem Anziehdrehmoment  $M_A \sim 16,0 \text{ Nm}$  (vgl. Abbildung 21a) entsprechend [6] verschraubt, die EN AW 7075 – T6-Schrauben wurden mit  $M_A \sim 22,0 \text{ Nm}$  montiert (vgl. Abbildung 21 b).

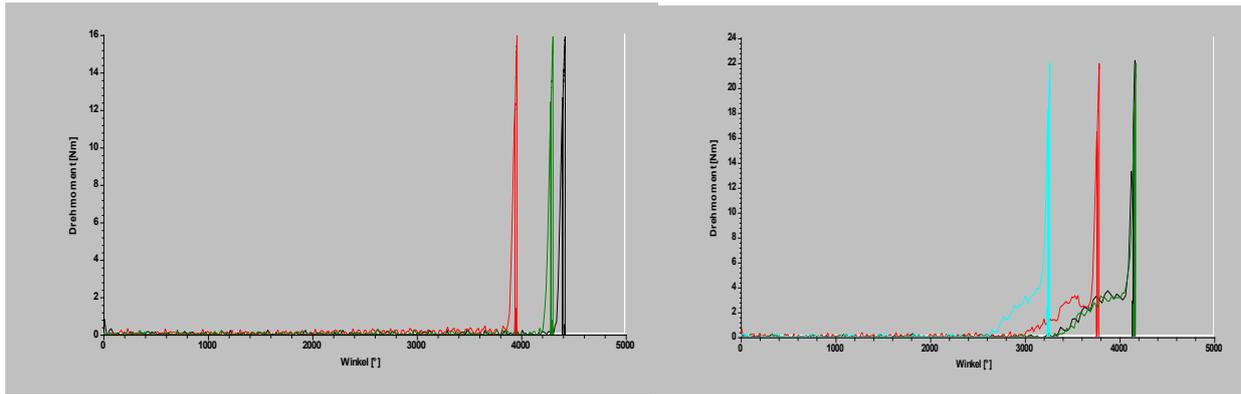


Abbildung 21 a): Montage M8 EN AW 6056

Abbildung 21 b): TT2000® M8 EN AW 7075

Bei der Montage gem. Abbildung 21 a) und 21 b) ist keine Gewindeplastifizierung aufgetreten. Alle Schrauben für die Montage entsprechend der Abbildung 21 waren mit dem Gleitmittel OKS 1300 beschichtet.

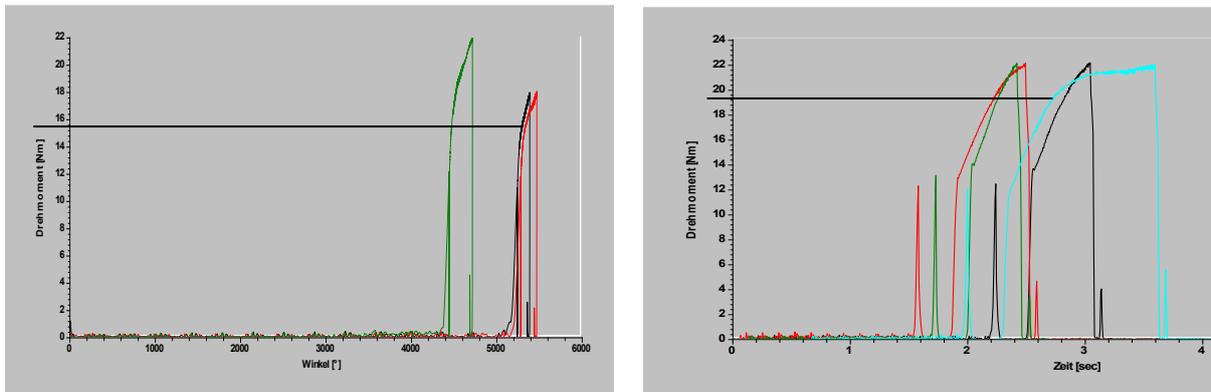


Abbildung 22 a) M8 EN AW 7075 + DeltaSeal

Abbildung 22 b) M8 EN AW 7075 + Nylon

In Abbildung 22 a) wird TT2k® EN AW 7075 – T6 mit Delta Seal schwarz (nicht leitende Deckbeschichtung) verwendet. Die Schraubenstreckgrenze wird bereits ab ca. 17 Nm erreicht. In Abbildung 22 b) der TAPTITE2000® EN AW 7075 - T6 mit der Schraubenkopfrundumbeschichtung aus elektrostatischem Nylon wurde die Schraubenstreckgrenze bereits bei ~ 19 Nm erreicht. Bedingt durch die erhöhten Einbrenntemperaturen bei Delta Seal (max. 260°C nach [49]) und Nylon (max. 210°C gem. [52]) wurden offensichtlich die Schraubenfestigkeiten reduziert.

### 3.1.1.3 Durchführung der galvanischen Korrosionstest

In [48] wurde die Durchführung der Salzsprühnebeltests nach DIN EN 50021 bzw. DIN EN ISO 92027 dokumentiert.

Die folgenden markanten Versuchsergebnisse sind hervorzuheben:

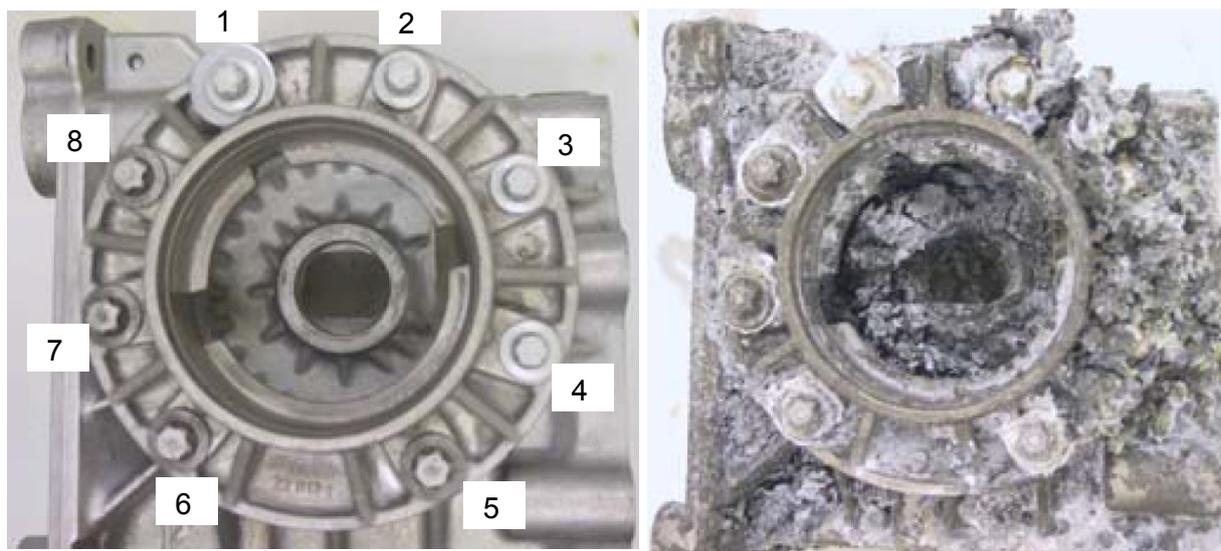


Abbildung 23 a): AZ91HP-Gehäuse vor SST

23 b): AZ91HP-Gehäuse nach 720 h SST

Die Verschraubung an den Pos. 5 - 8 entsprechend der Abbildung 23 a) ist mit EN AW 6056 – T6 erfolgt und an den Pos. 1 - 4 mit TT2K® M8 EN AW 7075 - T6 mit Aluminalbeschichtung, welche bei der Firma Aluminal (zugehörig zur Friedhelm Loh Gruppe in Haiger) beschichtet wurde. Ein signifikanter korrosiver Mg-Angriff ist bei der EN AW 7075 – T6 + Aluminalbeschichtung nach 720 h Salzsprühnebeltest (SST) gemäß DIN 50021 aufgetreten. Vermutlich wurde zur Verbesserung der Haftung eine Ni- oder Cu-Grundmetallbeschichtung vorgenommen. Dies ist gem. VW TL243 [43] zulässig. Leider konnte das im Nachgang die Vorbehandlung der EN AW 7075-Schrauben nicht mehr nachvollzogen werden, da die Firma Aluminal im Jahr 2009 geschlossen wurde. Wahrscheinlich ist, dass diese verstärkte Korrosion weniger auf die elektrolytisch abgeschiedene Al-Schicht zurückzuführen ist, als vielmehr auf die Ni- oder Cu-Grundbeschichtung.

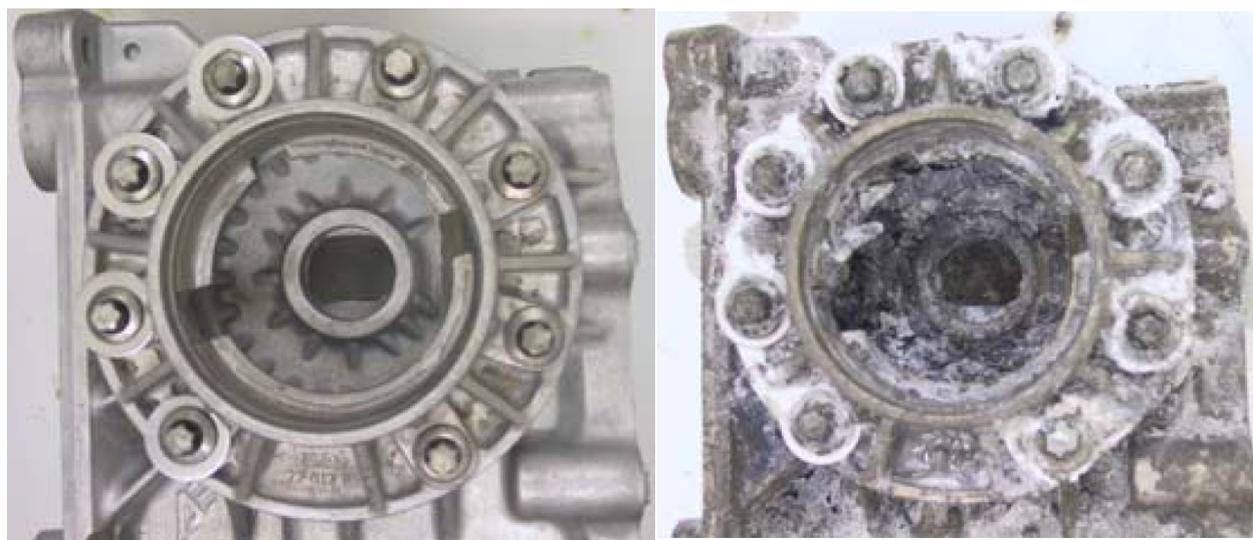


Abbildung 24 a) AZ91HP-Gehäuse vor SST

b) AZ91HP-Geh. nach 720 h SST

Das AZ 91-Gehäuse gem. Abbildung 24 a) und b) wurde an den Pos. 2 - 5 mit EN AW 7075 - T6 verschraubt und an den Pos. 1, 6, 7, 8 mit EN AW 7075 – T6 + Al-Scheibe.



Abbildung 25 a): EN AW 6056 nach 720 h SST

b): EN AW 7075 nach 720 h SST



Abbildung 26 a): gereinigt EN AW 6056, 720 h SST

b): gereinigt EN AW 7075, 720 h SST

Sowohl bei der metrischen M8 – EN AW 6056 – T6 als auch bei der TAPTITE 2000® EN AW 7075 - T6 trat nach 720 h SSN eine korrosive Angriffstiefe im AZ91 von maximal 1,0 mm auf. Die Schraube EN AW 7075 – T6 zeigte eine etwas stärkere korrosive Angriffstiefe von 0,1 mm – 0,3 mm, was zum Ablättern der Schraubenoberfläche führte.



**Abbildung 27 a) EN AW 7075 + AlMg3-Scheibe b) EN AW 7075 + Delta Seal + AlMg3-Scheibe**

Die korrosiven Angriffstiefen nach 720 h SST bei Verwendung der TAPTITE 2000® EN AW 7075 + Al - Scheibe gemäß Abbildung 27 a) werden bei beiden Ausführungen gemäß Abbildung 27 a) auf 0,1 mm - 0,3 mm im Mg sowie auf 0,1 mm bei der Schraube reduziert.



**Abbildung 28: EN AW 7075 + Delta Seal, 720 h SST**

Die Delta Seal-Beschichtung der EN AW 7075-Schraube zeigte nach 720 h SST bei der korrosiven Angriffstiefe im AZ91HP gegenüber der unbeschichteten EN AW 7075-Schraube keine nennenswerte Verbesserung (beide Ausführungen generierten eine maximal 1 mm Angriffstiefe in AZ91HP).

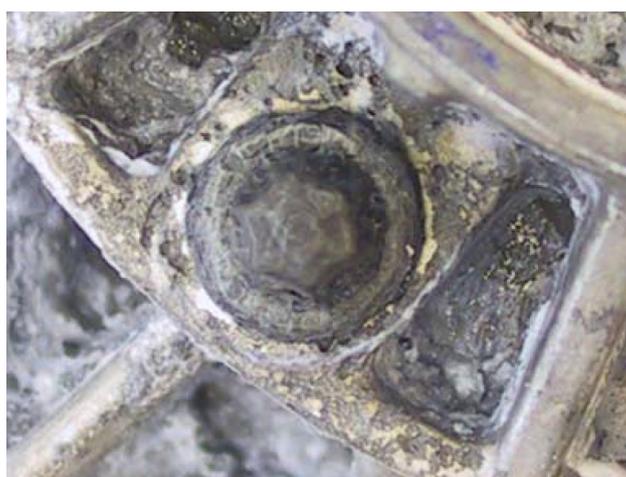
Eine signifikante Verbesserung der Korrosionsperformance der EN AW 7075-Schrauben brachte eine zusätzliche Schraubenkopfbeschichtung mit elektrostatischem Nylon [52] als Kopfrundumbeschichtung gemäß Abbildung 29.



**Abbildung 29 a): EN AW 7075 + Nylon**

**b): EN AW 7075 + Nylon + AlMg3 - Scheibe**

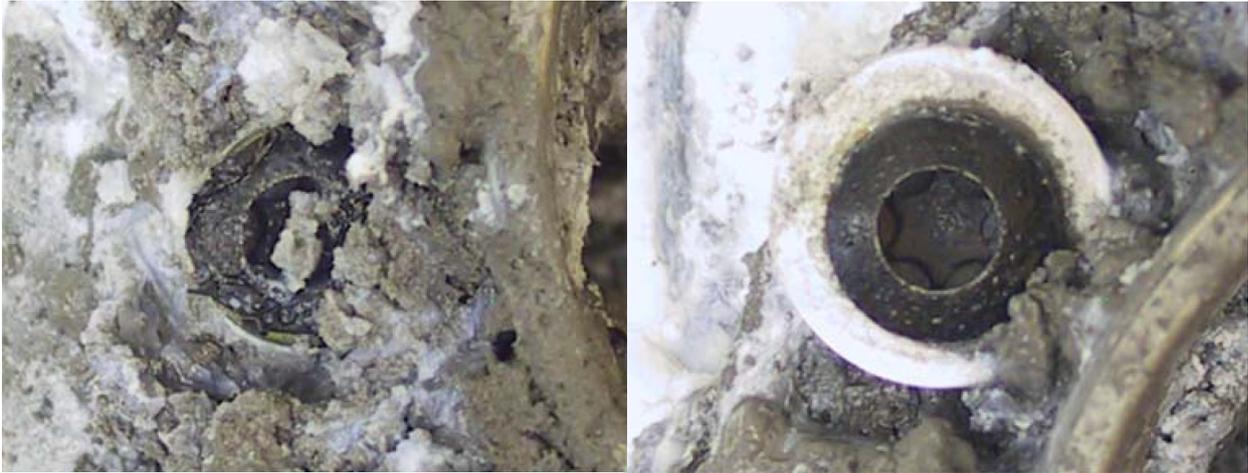
Bei der Beschichtung EN AW 7075 mit elektrostatischem Nylon mit Kopfrundumbeschichtung wurde nach 720 h SST eine korrosive Angriffstiefe im AZ91HP von 0,1 mm - 0,2 mm gemessen und mit zusätzlicher Al - Scheibe von < 0,1 mm.



**Abbildung 30: EN AW 7075 + Comp Cote nach Reinigung**

Die korrosiven Angriffstiefen nach 720 h SST im AZ91HP bei Verwendung der TAPTITE 2000® EN AW 7075 + Comp Cote-Harteloxalschicht gem. Abbildung 30 werden auf max. 0,5 mm im Mg reduziert. Die korrosive Angriffstiefe der Schraube bleibt auf demselben Niveau wie ohne Verwendung von Comp Cote bei max. 0,3 mm.

Bei den Salzsprühnebeltests der mit Stahlschrauben verschraubten AZ91HP-Gehäuse wurden im Vergleich zu den Al-Schrauben sehr hohe korrosive Angriffstiefen im AZ91HP-Gehäuse gemessen (vgl. Abbildung 31 – 33).



**Abbildung 31 a): M8 - 8.8 + DeltaTone DeltaSeal    b): M8 - 8.8 + D.Tone D.Seal + AlMg3-Scheibe**

Abbildung 31 a) dokumentiert die Korrosion nach 720 h SST vor der Abreinigung der Korrosionsprodukte. Abbildung 31 b) zeigt, dass die Schraube in der Nähe einer Kante positioniert ist. Dadurch konnte sich während des Salzsprühnebeltests Feuchtigkeit ansammeln und sich somit eine Elektrolytenbrücke über die Al-Scheibe zum Schraubenkopf bilden.



**Abbildung 32 a): M8 - 8.8 + DeltaTone DeltaSeal    b): M8 - 8.8 + D.Tone D.Seal + AlMg3-Scheibe**

Die Stahlschraube mit Delta Tone Delta Seal-Beschichtung generierte entsprechend der Abbildung 32 a) trotz der nicht-leitfähigen Deckschicht korrosive Angriffstiefen bis zu 5 mm in AZ91HP. Bei der zusätzlichen Verwendung der AlMg3-Scheibe traten noch weitere 2 mm bis 3 mm Angriffstiefe in AZ91HP auf.

Außerdem, wurden bei den Stahlschrauben galvanisch verzinkte REMFORM<sup>®</sup>-Schrauben 4 x 14 verwendet (s. Abbildung 33). REMFORM<sup>®</sup> ist ein asymmetrisches Grobgewinde und wird üblicherweise für Kunststoffdirektverschraubungen eingesetzt. Hier wurde REMFORM<sup>®</sup> in den Deckel des AZ91HP-Gehäuses direkt gewindefurchend in ein gebohrtes Vorloch eingeschraubt (ohne Klemnteil). Auf der Zinkschicht wurde eine Dickschichtpassivierung und eine Zinklad-Versiegelung entsprechend der VW TL 194 [42] aufgebracht. Die Zinklad-Versiegelung ist silikatisch und wurde von der Fa. MacDermid (Anachrome Group)

entwickelt. Die Beschichtung wurde vom Lizenznehmer Leist Oberflächentechnik vorgenommen. Diese REMFORM<sup>®</sup>-Schrauben waren der einzige Artikel im Lagerbestand der AUT, welcher das Oberflächensystem gemäß VW TL 194 hatte. Daher wurde auch diese Schraube getestet.



**Abbildung 33 a): REMFORM<sup>®</sup> 4 x 14 b): REMFORM<sup>®</sup> nach Reinigung c): Prinzipskizze REMFORM<sup>®</sup>**

Beim Aufbau gemäß der Abbildung 33 wurde nach 720 h SST eine korrosive Angriffstiefe von maximal 1 mm in AZ91HP gemessen. Allerdings war auch die Schraube und somit die Kathodenfläche wesentlich kleiner als die der anderen Schraubenausführungen mit einem Nenndurchmesser von 8 mm.

#### **3.1.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des 1. Galvanischen Korrosionstests**

Folgende korrosive Angriffstiefen wurden in den verschraubten Mg-Gehäusen (AZ91HP) gemessen:

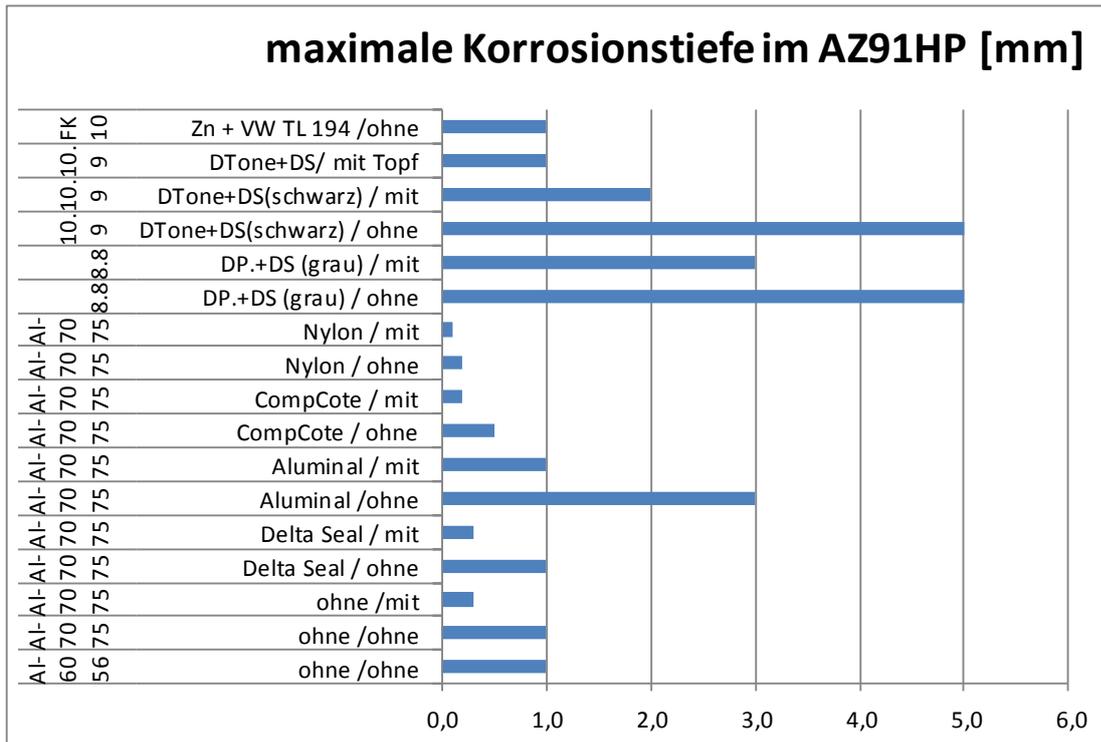


Tabelle 13: Korrosionstiefen in den verschraubten AZ91HP-Gehäusen nach 720 h SST

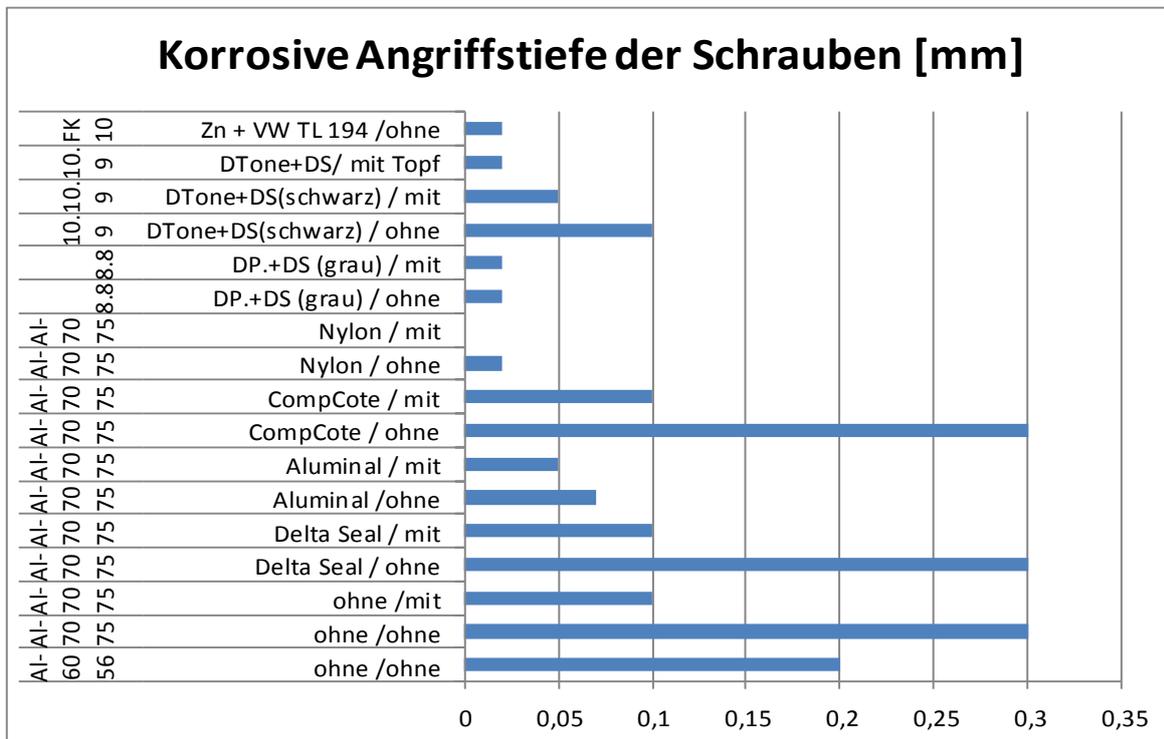


Tabelle 14: Korrosionstiefen der Schrauben nach 720 h SST im Kontakt mit AZ91HP

### 3.1.1.5 Ergebnisinterpretation des 1. Galvanischen Korrosionstests

In Tabelle 14 sind die korrosiven Angriffstiefen der getesteten Schraubensysteme in Magnesium nach 720 h Salzsprühnebeltest dargestellt.

Erläuterung zu Tabelle 12 anhand der zwei Bezeichnungsbeispiele der EN AW 70xx.

*Al 7075 ohne / ohne:*

EN AW 7075 - T6-Schraube ohne Korrosionsschutzbeschichtung und ohne AlMg3-Scheibe

*Al 7075 Nylon / mit:*

EN AW 7075 – T6 – mit Nylon-Kopfrundumbeschichtung und mit AlMg3-Scheibe

Wie zu erwarten war, zeigen die Aluminiumschrauben im Vergleich zu den Stahlschrauben eine deutlich bessere korrosive Verträglichkeit mit dem Mg-Gehäuse.

Generell wurde die Korrosionsbeständigkeit sowohl bei den Stahl- als auch bei den Al-Schrauben durch die AlMg3-Scheiben verbessert.

Bei den Stahlschrauben zeigte sich bei den anorganischen Zinklamellenbeschichtungen Delta Tone und Delta Protakt mit den organischen Top Coats (Delta Seal schwarz & Delta Seal Lichtgrau) mit korrosiven Angriffstiefen von **5 mm** in Mg eine relativ schlechte Verträglichkeit mit den Mg-Gehäusen. Teilweise trat bereits nach 720 h Rotrost an den Schrauben auf. Dank der zusätzlichen Verwendung der Al-Scheiben wurde die Korrosionstiefe auf 2 - 3 mm in AZ91HP reduziert. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit bietet der Al-Topf (vgl. Abbildung 37), welcher im Versuch noch zusätzlich durch Loctite-Kleber zwischen Schraubenkopf und Schaft abgedichtet wurde.

Bei den Stahlschrauben zeigte die REMFORM<sup>®</sup>-Schraube mit verzinkter Oberfläche mit Dickschichtpassivierung und Zinklad-Versiegelung gemäß VW TL194 eine bessere Korrosions-Performance, wobei dort **1 mm** Angriffstiefe in Magnesium gemessen wurde. Allerdings ist zu beachten, dass hier eine kleinere Schraube (Nenn Durchmesser 4 mm) verwendet wurde und die Ergebnisse somit nicht vergleichbar sind mit denen der anderen in diesem Test verwendeten M8-Stahlschrauben.

Bei den Aluminiumschrauben zeigten sich zwischen der etablierten metrischen Schraube M8 EN AW 6056 - T6 und der eher als kritisch eingestuften Schraube TAPTITE 2000<sup>®</sup> EN AW 7075 - T6 bzgl. der korrosiven Angriffstiefe in AZ91HP keine signifikanten Unterschiede (jeweils max. bis 1 mm Tiefe). Die Angriffstiefe auf die EN AW 7075-Schraube lag mit 0,3 mm um 50% höher als bei den EN AW 6056-Schrauben. Zusätzliche Al-Scheiben bei den EN AW 6056-Schrauben würden zwar die korrosiven Angriffstiefen reduzieren, jedoch wäre diese Lösung wegen der hohen Kosten für die zusätzlichen Al-Scheiben nicht mehr wirtschaftlich. Bei den Delta Seal- und Nylon-Beschichtungen der EN AW 7075-Schrauben sind in Folge erhöhter Einbrenntemperaturen Festigkeitsreduzierungen aufgetreten. Daher ist der Einsatz dieser Oberflächen für EN AW 7075-Schrauben nicht zielführend.

### 3.1.2 2. Salzsprühnebeltest von verschraubten Mg-Gehäusen aus AZ91HP

Basierend auf den Voruntersuchungen der galvanischen Korrosionstests gem. Kapitel 3.1.1 wurden im Zuge des Förderungsprojekt [13] weitere galvanische Korrosionstests durchgeführt, wobei markante Ergebnisse bereits in [9] dargestellt wurden.

#### 3.1.2.1 Auswahl der Schraubenwerkstoffe und Oberflächen

Die Schraubenwerkstoff- und Oberflächensysteme für den 2. Korrosionstest werden in Tabelle 14 definiert. Ziel dieses Korrosionstests war zunächst die Verbesserung der Korrosionsperformance der hochfesten Gewindefurchschraube TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 – EN AW 7075 unter kostenoptimalen Gesichtspunkten und ohne negative Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften (Festigkeitsabfall durch hohe Einbrenntemperaturen von Deckschichten). Daher wurden für diesen *Korrosionstest* unter anderen spezielle Versiegelungen (Schichtdicke 0,5 µm bis 2 µm) oder Deckschichten (bis 8 µm) auf den EN AW 7075-Schrauben aufgebracht.

- a) Technikum MAGNI EUROPE GmbH [57]: **Surtec 650** (Cr<sup>3+</sup>-haltige Passivierung, die besonders für hochlegierte Al-Teile geeignet ist) + **T06E – GZ** (aluminiumreiche Deckschicht kombiniert mit Titananteilen und Schmierstoffzusätzen zur Reibwerteeinstellung, Schichtdicke ca. 2 - 8 µm, welche im Tauch-, Schleuder- und Einbrennverfahren (T ~ 170°C) aufgebracht wird).
- b) Technikum MAGNI EUROPE GmbH [57]: **Surtec 650** (Cr<sup>3+</sup>-haltige Passivierung, die besonders für hochlegierte Al-Teile geeignet ist) + **K14**-Versiegelung
- c) Mac Dermid GmbH [61]: **Iride NCP** (Cr-freie Passivierung, die besonders für hochlegierte Al-Teile geeignet ist) + **Torq'n Tension 11** (Versiegelung mit integrierten Schmiermittel)

Korrosionstests in 7 Mg-Gehäuse Az91-HP (W203 kleines Gehäuse) + 1 GMT 800-Gehäuse Az91 (MPT Syracuse-Serie)									
Geh-Nr	Pos.-Nr.	Schraube	Werkst	Beschichtung	Besch.-Position	zus. Koor-Maßn.	Gleitmittel	MA [Nm]	
1	1,2,3,4,5	TT2kM8x40*	Al-7075	2xT06E-GZ	komplett Schraube	ohne	ohne	22	
1	6,7,8	TT2kM8x40*	Al-7075	ohne	komplett Schraube	ohne	OKS1300	22	
2	3,4,5,6,8	TT2kM8x40*	Al-7075	Versi. MAGNI 1 x K14	komplett Schraube	ohne	ohne	22	
2	1,2,7	TT2kM8x35*	Al-6056	ohne (nur OKS 1700)	komplett Schraube	ohne	ohne	16	
3	1	TT2kM8x45	10.9	AUT-ZnDickschichtpass. + MAGNI Versiegelung 2x E10a	komplett Schraube	ohne	ohne	30	
3	3, 4, 5	TT2kM8x45	10.9	AUT-ZnDickschichtpass. + MAGNI Versiegelung 2x E10a	komplett Schraube	ohne	Gleitmo 605	30	
3	2	TT2kM8x45	10.9	AUT-ZnDickschichtpass. + MAGNI Versiegelung 2x E10a	komplett Schraube	Al-Topf	Gleitmo 605	30	
3		TT2kM8x45	10.9	AUT-ZnDickschichtpass. + MAGNI Versiegelung 2x E10a + Elektrostat. Nylon	komplett Schraube / Unterkopf	ohne	Gleitmo 605	30	
4	1	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2 x B18	komplett Schraube	ohne	ohne	30	
4	2,3	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2 x B18	komplett Schraube	ohne	Gleitmo605	30	
4	4,5	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2 x B18	komplett Schraube	Al-Topf	Gleitmo605	30	
4	6, 7, 8	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2 x B18 + Elektrostat. Nylon	komplett Schraube / Unterkopf	ohne	Gleitmo 605	30	
5	1	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2xT06E GZ	komplett Schraube	ohne	ohne	30	
5	2,3	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2xT06E GZ	komplett Schraube	ohne	Gleitmo 605	30	
5	4,5	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2xT06E GZ	komplett Schraube	Al-Topf	Gleitmo 605	30	
5	6,7,8	TT2kM8x45	10.9	MAGNI B46 + 2xT06E GZ + Elektrostat. Nylon	komplett Schraube / Unterkopf	ohne	Gleitmo 605	30	
6	1, 2	TT2kM8x45	10.9	VW C696 / TL 194	komplett Schraube	ohne	ohne	30	
6	5, 8	TT2kM8x45	10.9	VW C696 / TL 194	komplett Schraube	ohne	Gleitmo 605	30	
6	3, 4	TT2kM8x45	10.9	VW C696 / TL 194 + Elektrostat. Nylon	Kopf - rundum	ohne	ohne	30	
6	7	TT2kM8x45	10.9	VW C696 / TL 194 + Elektrostat. Nylon	Kopf - rundum	ohne	Gleitmo 605	30	
6	6	TT2kM8x45	10.9	VW C696 / TL 194	komplett Schraube	ohne	Gleitmo 605	30	
7	1,2,3,4,	TT2kM8x40	Al-7075	McDer: IridideNCP + 1 x TorTens.11 (1x)	komplett Schraube	ohne	ohne	22	
7	5,6,7,8	TT2kM8x40	Al-7075	McDer: IridideNCP + 1 x TorTens.11 (2x)	komplett Schraube	ohne	ohne	22	
8	GMT 800	Metr. M10	9.8	verzinkt + MIK	MIK Gewinde	Al-Topf	ohne	40	
8	GMT 800	Metr. M10	9.8	verzinkt + MIK	MIK Gewinde	ohne	ohne	40	

**Tabelle 15 Schraubenwerkstoff- und Oberflächenauswahl für 2. galvanischen Korrosionstest**

Weitere Erläuterungen zu den im 2. Galvanischen Korrosionstest verwendeten Beschichtungen gemäß Tabelle 15 folgen in Tabelle 16.

Nr.	Markenname	Lizenzgeber	Beschichtung	Verfahren	Schichtdicke	Beständigkeit [h] im SST nach DIN 50021
1	Delta Protekt KL 100	Dörken MKS Systeme GmbH & Co. KG	Base Coat - Zink - Lamelle	Tauchen Abschleudern Einbrennen	4 - 15 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$ erreichen 720 h
2	Delta Tone 9000	Dörken MKS Systeme GmbH & Co. KG	Base Coat - Zink - Lamelle	s. Nr. 1	s. Nr.1	8 $\mu\text{m}$ erreichen 480 h
3	Delta Seal	Dörken MKS Systeme GmbH & Co. KG	Top Coat - Deckschicht	s. Nr. 1	> 2 $\mu\text{m}$	mit Base Coat 8 $\mu\text{m}$ + 4 $\mu\text{m}$ Delta Seal: 960h
4	B46	MAGNI Europe GmbH	Base Coat: Zink - Lamelle	s. Nr. 1	ca. 8 $\mu\text{m}$	
5	T06E - GZ	MAGNI Europe GmbH	Top Coat - Deckschicht	s. Nr. 1	ca. 5 $\mu\text{m}$	
6	MAGNI 594	MAGNI Europe GmbH	Base Coat: Zink - Lamelle B46 + anorganisches Top Coat T06EGZ	Base Coat + Top Coat jeweils Nr. 1	12 $\mu\text{m}$ - 18 $\mu\text{m}$	720h - 1000h
7	B18	MAGNI Europe GmbH	Top Coat - Organische Deckbeschichtung	s. Nr. 1	ca. 6 $\mu\text{m}$	
8	MAGNI 564	MAGNI Europe GmbH	Base Coat: Zink - Lamelle B46 + organisches Top Coat B18	s. Nr. 1	ca. 14 $\mu\text{m}$	> 1000 h
9	SurTec 650	Surtec Deutschland GmbH	Cr (VI) - freie Passivierung für Aluminium, wurde als Haftgrund für die weitere Beschichtung T06E-GZ verwendet	Tauch- oder Spritz- oder Wischverfahren	dünnschicht < 1 $\mu\text{m}$	
10	Iridite NCP	Mac Dermid Industrial Solutions	Cr (III) - haltige Passivierung für Aluminium, wurde als Haftgrund für die weitere Beschichtung Torq'n Tension 11 verwendet			
11	Torq'n Tension 11	Mac Dermid Industrial Solutions	Top Coat - Deckschicht speziell entwickelt für Zink- und Zink- legierungen zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit und zur Einstellung von Reibzahlen			

**Tabelle 16: Erläuterungen zu den Beschichtungen des 2. Galvanischen Korrosionstestes**

Als Vergleichsbasis dient wieder die etablierte metrische Schraube EN AW 6056 mit dem Gleitmittel OKS 1700. Dieser spezielle OKS 1700-Gleitstoff ist ein synthetisches Wachs auf wässriger Basis und dient zur Reibwerteeinstellung der Schrauben [60]. OKS 1700 wurde zum Versuchszeitpunkt von einigen OEM's speziell für die metrischen EN AW 6056-Schrauben vorgeschrieben.

Bei den Stahlschrauben dient als Referenz die Serienverschraubung des MAGNA-Getriebes GMT 800 (AZ91HP-Gehäuse) mit M10 - 9.8 -Schrauben, die blau verzinkt mit einem aufgepressten Alutopf sind (vgl. Abbildung 37). Bei den Stahlschrauben wurden für diesen Versuch als Basisoberfläche galvanisch verzinkte Oberflächen sowie die MAGNI-Zinklamellenbeschichtung B46 in Kombination mit Versiegelungen / Deckschichten verwendet. *Da bei den Al-Schrauben die elektrostatische Nylon-Kopfrundumbeschichtung positiv war (korrosive Angriffstiefe in AZ1HP nach 720h SST ~ 0,02 mm), soll diese auch für die Stahlschrauben getestet werden.*

### 3.1.2.2 Erstellung der Prüfaufbauten

Die Versuchsaufbauten bei ARNOLD Umformtechnik sind im Zuge von [13] im Zeitraum von Oktober 2007 bis November 2007 erfolgt. Auch in diesem 2. Galvanischen Korrosionstest wurde basierend auf den Erfahrungen des ersten Tests ein praxisnahes Anziehdrehmoment der Schrauben verwendet, welches in der rechten Spalte der Tabelle 15 aufgeführt ist.

### 3.1.2.3 Durchführung des 2. Galvanischen Korrosionstests

Wie beim ersten Galvanischen Korrosionstest wurden mit den verschraubten AZ91HP-Gehäusen gemäß DIN 50021 Salzsprühnebeltests über eine Dauer von 720 h durchgeführt. Danach erfolgte eine fotografische Dokumentation der Schraubstellen mit nachfolgender Abreinigung der Korrosionsprodukte. Außerdem wurden zur Vermessung und Darstellung der korrosiven Angriffstiefen das AZ91HP-Gehäuse an den Stellen der augenscheinlich tiefsten korrosiven Angriffstiefe aufgeschnitten.

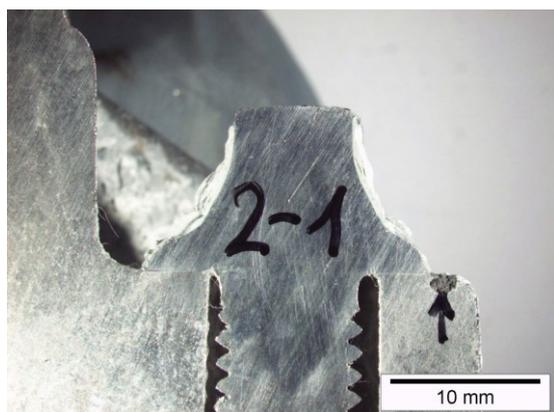
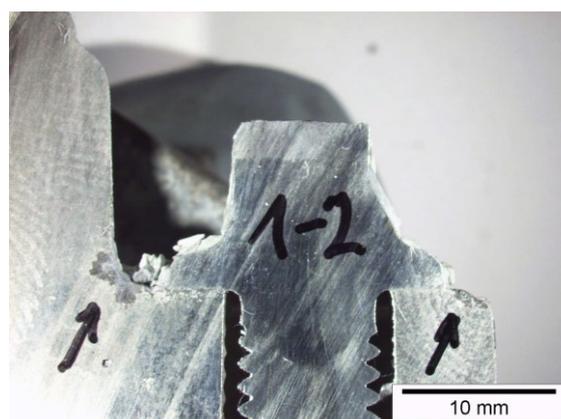


Abbildung 34 a) M8 EN AW 6056



b) TAPTITE 2000® M8 EN AW 7075

In Abbildung 34 a) und b) erfolgt nochmals der Vergleich der etablierten EN AW 6056 zur EN AW 7075, wobei die Angriffstiefen auf das AZ91HP-Gehäuse bei beiden Al-Legierungen im Bereich 1 - 3mm lagen. Jedoch ist erkennbar, dass bei der TAPTITE 2000® EN AW 7075 um den Schraubenkopf herum eine größere Fläche vom AZ91HP korrosiv angegriffen wurde.

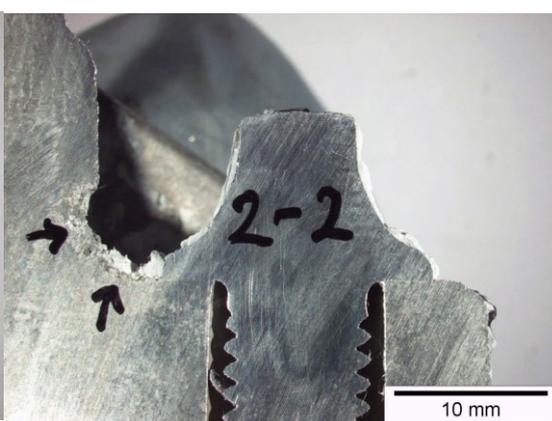
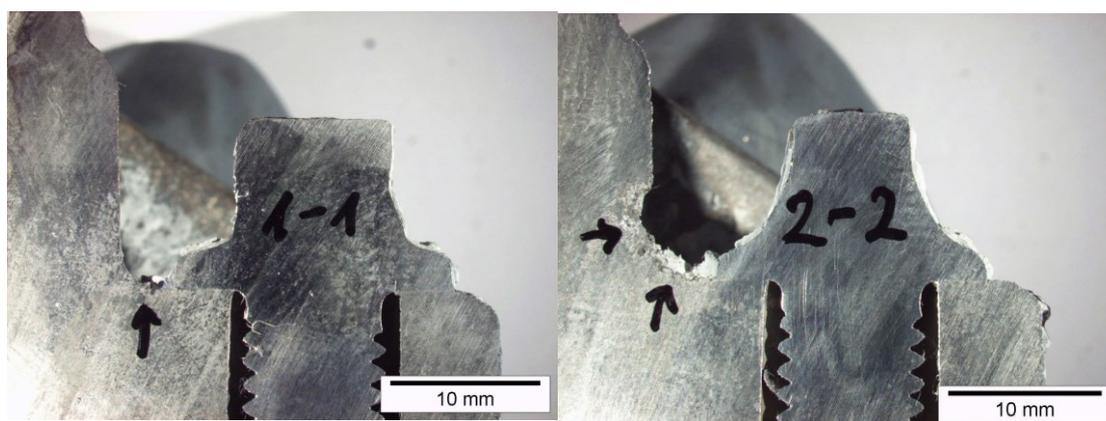
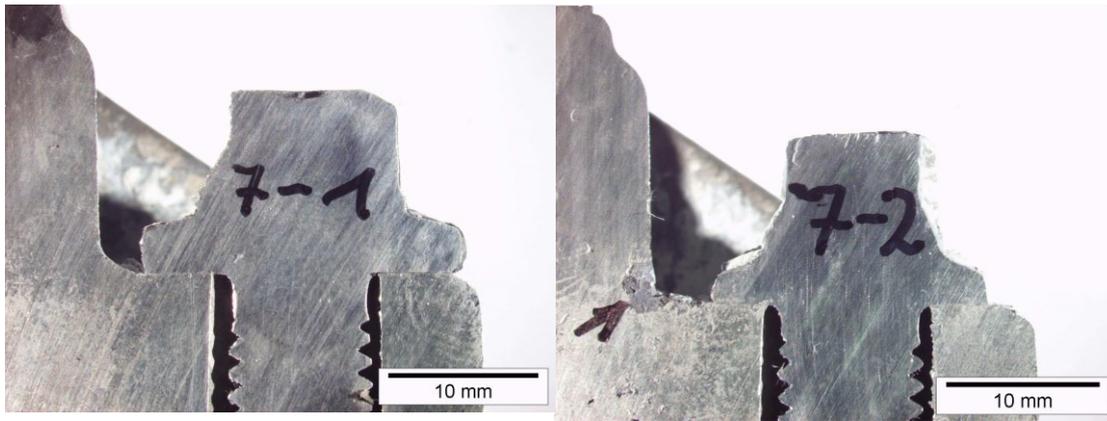
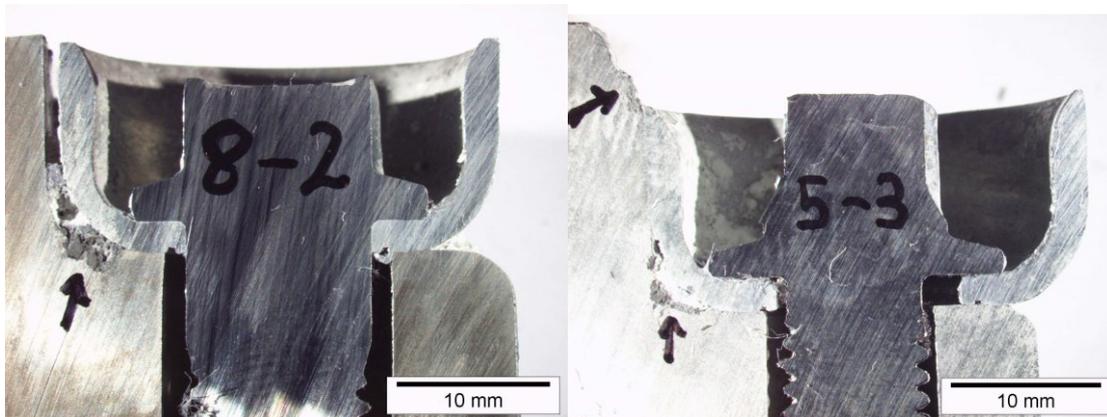


Abbildung 35 a) TT2k® EN AW 7075 + T06E-GZ b) TT2k® EN AW 7075 + K14-Versiegelung



**Abbildung 36 a) TT2k® EN AW 7075 + Iride NCP b) TT2k® EN AW 7075 + Torq'n Tension 11**

Abbildung 35 a) zeigt, dass bei EN AW 7075 mit MAGNI-Versiegelung T06E - GZ (zweifach, zwei Mal Tauchen, Schleudern und Einbrennen) die Angriffstiefe in AZ91HP auf 0,1 mm – 0,3 mm reduziert wird. Ein ähnlich gutes Resultat liefert die Beschichtung Iride NCP + Torq'n Tension 11 gemäß Abbildung 36 a), wobei die Versiegelung Torq'n Tension 11 zweifach aufgebracht wurde. Die MAGNI-Versiegelung K14 gemäß Abbildung 35 b) hingegen hat mit einer korrosiven Angriffstiefe in AZ91HP von 1 mm – 3 mm keine Verbesserung gebracht.



**Abbildung 37 a) Stahl-Schraube + Zn mit Al-Topf b) Stahl-Schraube + B46 + 2 x T06E-GZ**

Abbildung 37 a) zeigt eine galvanisch verzinkte M10-Schraube mit aufgespresstem Al-Topf und Abbildung 37 b) eine M8-Schraube mit Zinklamellenbeschichtung B46 und Top Coat T06E-GZ (zweifach beschichtet) mit aufgestecktem Al-Topf. Der Al-Topf auf den St-Schrauben reduzierte die korrosive Angriffstiefe in AZ91HP erheblich.

Bei Stahlschrauben mit elektrostatischer Nylon-Kopfrundumbeschichtung gemäß Abbildung 35 war hingegen bereits ein stärkerer korrosiver Angriff auf das AZ91HP-Gehäuse erfolgt (1 mm – 3 mm).

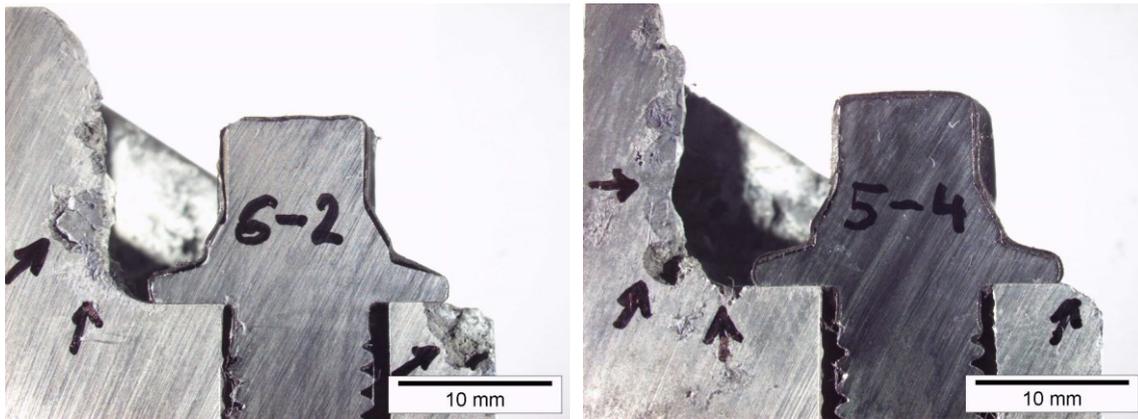


Abbildung 38 a): Stahl-Schraube+VW C696 +Nylon b): Stahl-Schraube+B46+2xT06E-GZ + Nylon



Abbildung 39 a): Stahl-Schraube + VW C696

b): Stahl-Schraube + B46 + 2xT06E-GZ

Abbildung 37 zeigt, dass bei den Stahlschrauben die besten Ergebnisse mit der Kopfkapselung durch den Aluminiumtopf erzielt werden (korrosive Angriffstiefe im AZ91HP 0,1 mm – 0,3 mm).

Bei der elektrostatischen Nylon-Kopfrundumbeschichtung war hingegen bereits ein stärkerer korrosiver Angriff auf das Magnesiumgehäuse erfolgt (1 mm – 3 mm; Ausnahme B46 + Versiegelung E10a + Nylon).

Ohne zusätzliche Schutzmaßnahme (Topf oder Nylon) ist sowohl bei den zinkbasierten Oberflächen als auch bei den Zinklamellensystemen (B46) ein signifikanter Anstieg der korrosiven Angriffstiefe in AZ91HP zu verzeichnen (3 mm – 10 mm), obwohl bereits optimierte Deckschichten diesen Effekt reduzieren sollten (Zinclud bei VW C696 sowie 2 x T06E-GZ bei B46).

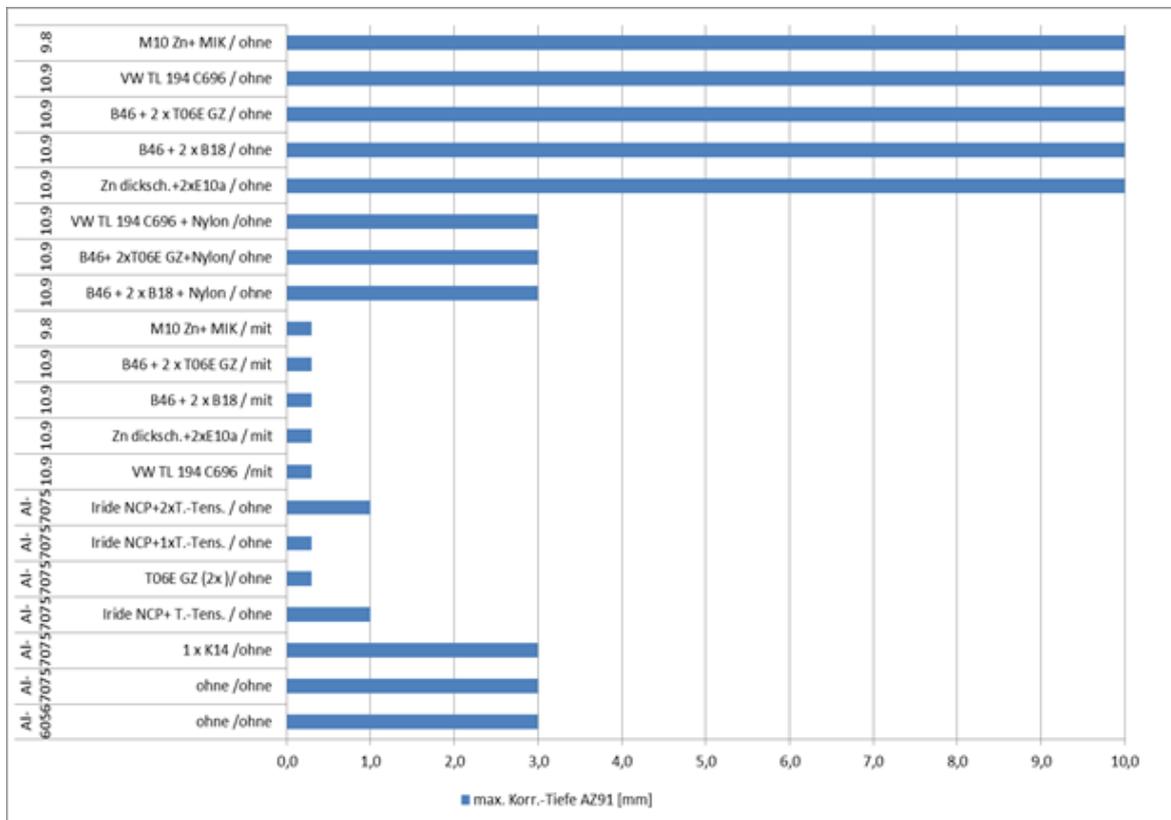
Die korrosive Angriffstiefe der Schrauben *betrug bei allen Stahlschraubenausführungen < 0,1 mm.*

Bei den Aluminiumschrauben lag die Angriffstiefe hingegen zwischen 0,3 mm – 1 mm.

### 3.1.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des 2. Galvanischen Korrosionstests

In [9] wurden die Ergebnisse des 2. Galvanischen Korrosionstestes nur auszugsweise dargestellt.

Eine umfassende Ergebnisdarstellung der galvanischen Korrosionstests erfolgt in Tabelle 17.



**Tabelle 17: Max. korrosive Angriffstiefe verschraubter AZ91HP-Gehäuse nach 720 h SST: /ohne = ohne Al-Topf unter dem Schraubenkopf, /mit = mit Al-Topf unter dem Schraubenkopf**

### 3.1.2.5 Ergebnisinterpretation des 2. Galvanischen Korrosionstests

Tendenziell waren die maximalen Korrosionstiefen in AZ91HP im zweiten Salzsprühnebeltest höher als im ersten Salzsprühnebeltest (1. Test EN AW 6056 und EN AW 7075 max. 1 mm sowie 10.9 mit verschiedenen Oberflächen ohne Topf max. 5 mm). Aber auch in diesem 2. Test hat sich bestätigt, dass beim Salzsprühnebeltest nach DIN 50021 bzw. DIN EN ISO 9227 (5 % NaCl bei 35°C) keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Mg-Korrosionstiefe bei Verwendung der Al-Schrauben der Legierung EN AW 6056 und EN AW 7075 auftreten (beide maximale korrosive Angriffstiefe 3 mm).

Bezüglich der Korrosionstiefe in Mg vergleichbar sind die Stahlschraubensysteme mit zink- oder zinklamellenbasierter Oberfläche jeweils mit zusätzlicher Versiegelung sowie zusätzlicher elektrostatischer Nylon-Kopfrundumbeschichtung.

Der Ansatz nach dem *ersten Korrosions-Test*, dass der korrosive Angriff auf das AZ91HP bei Verwendung der Aluminiumschraube EN AW 7075 noch weiter verbessert werden kann,

wenn angepasste Versiegelungssysteme verwendet werden, hat sich bestätigt (Reduktion der Angriffstiefe auf max. 0,3 mm bei den Deckschichten T06E-GZ oder Torque'n Tension 11).

Auf gleichem Niveau lag auch die korrosive Angriffstiefe (max. 0,3 mm im AZ91HP) bei Verwendung von galvanisch verzinkten und versiegelten Stahlschrauben mit dem zusätzlich aufgepressten Aluminiumtopf zur Abschirmung des Schraubenkopfes.

Der Ansatz, aus dem 1. galvanischen Korrosionstest, dass galvanisch verzinkte Stahlschrauben mit Dickschichtpassivierung und Zinklad-Versiegelung den Korrosionsangriff auf das AZ91HP reduzieren könnten, hat sich in diesem 2. galvanischen Kossosionstest nicht bestätigt. Alle Stahlvarianten mit Zink- und auch mit Zinklamellen-Basisoberfläche mit jeweils optimierten Versiegelungen zeigten eine signifikant hohe Angriffstiefe von max. 10 mm in AZ91HP.

### 3.1.3 Elektrochemische Potenzialmessungen

Weitere Aufschlüsse über das Korrosionsverhalten von Stahl- und Aluminiumschrauben brachten elektrochemische Potenzialmessungen nach Gerstmayr [9].

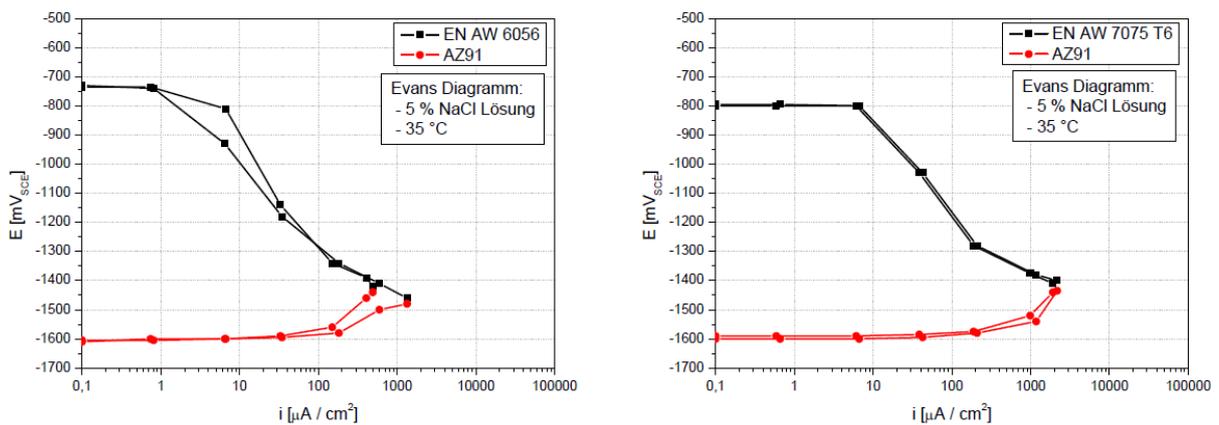


Abbildung 40 a): Evans-Diagramm AZ91 und EN AW 6056      b): AZ91 und EN AW 7075 [9]

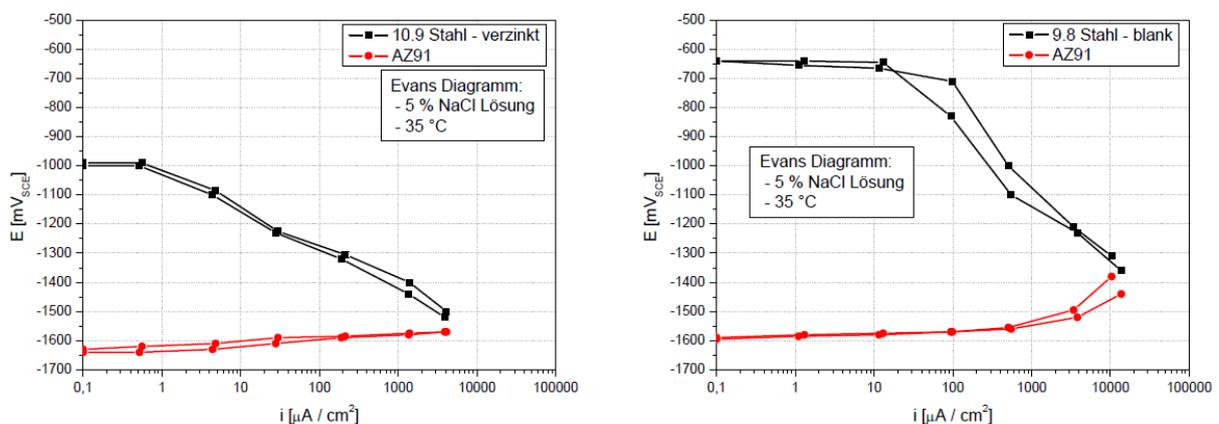


Abbildung 41 a): Evans-Diagramm AZ91 und Stahl verzinkt      b): AZ91 und Stahl blank [9]

Bei den Evans-Diagrammen gemäß Abbildung 40 und Abbildung 41 ist auf der Ordinate das Ruhepotenzial bei quasi unendlich großem Widerstand zwischen Schraubenwerkstoff und der Magnesiumelektrode ablesbar. Bei Reduktion des Widerstandes nimmt die Stromdichte bis zum Kurzschluss zu. An diesem Punkt treffen die Potenzial-Stromdichte-Kurven von Schraube und Magnesium (AZ91HP) zusammen. Diese Stromdichte bei Kurzschluss ist maßgebend für das Kontaktkorrosionsverhalten des Systems bestehend aus Magnesium (AZ91HP) und Schraube. Nach Abbildung 40 a) ist sowohl das Ruhepotenzial als auch die Kurzschlußstromdichte mit  $\sim 2000 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  zwischen EN AW 6065-Schraube und EN AW 7075-Schraube (Abbildung 40 b) zum AZ91HP auf ähnlichem Niveau. Auch die verzinkte Stahlschraube lag mit einer Kurzschlußstromdichte mit  $\sim 4000 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  nur geringfügig höher. Die blanke Stahlschraube lag mit  $10000 - 14000 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  um den Faktor 3 höher als die unverzinkte Schraube, was auch die deutlich schlechtere Korrosionsbeständigkeit bei der üblichen Versuchsdauer von 720 h Salzsprühnebeltest erklärt.

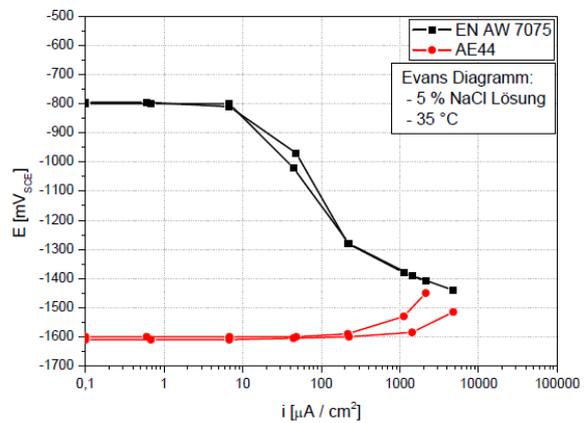
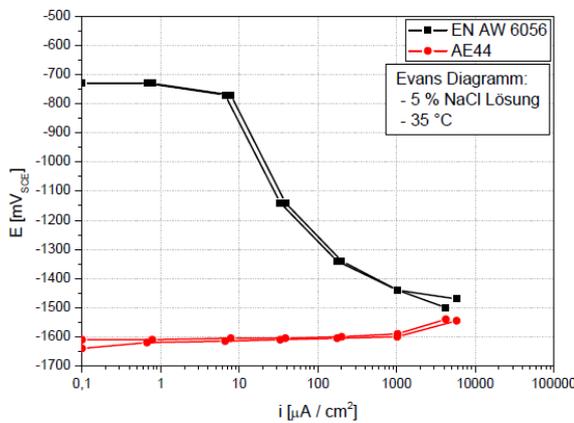


Abbildung 42 a): Evans-Diagramm AE44 und EN AW 6056

b): AE44 und EN AW 7075

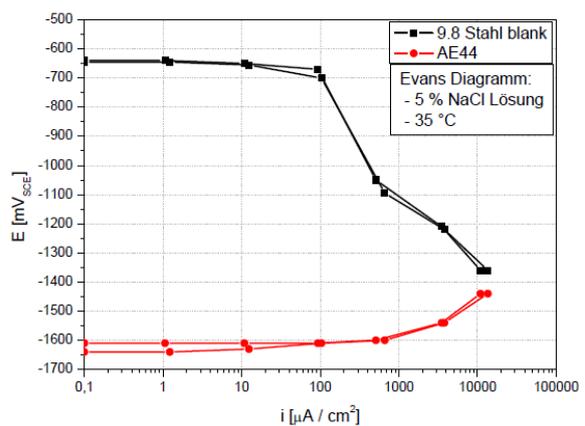
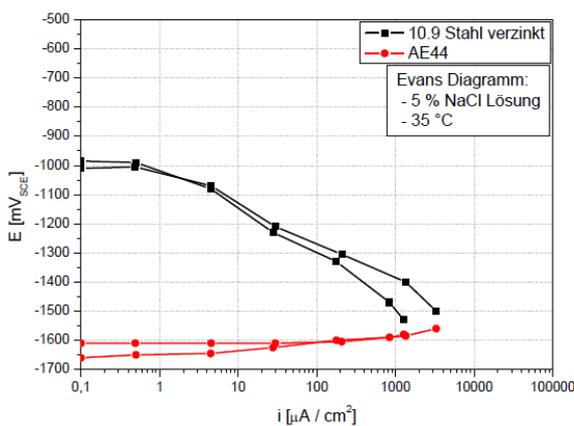


Abbildung 43 a): Evans-Diagramm AE 44 und Stahl verzinkt

b): AE 44 und Stahl blank

Die Kurzschlussstromdichten in Abbildung 42 a) unter Verwendung der Magnesiumlegierung AE44 (s. Tabelle 6 und Tabelle 7) und EN AW 6056 lagen auf einem Niveau von ca.  $4200$  bis  $5800 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  und damit tendenziell etwas höher als bei AZ91. EN AW 6056 und EN AW 7075 lagen hinsichtlich der Kurzschlussstromdichte wieder auf ähnlichem Niveau. Die

verzinkte Schraube hatte im Kontakt zu AR44 in etwa das gleiche Korrosionsverhalten gezeigt wie im Kontakt zu AZ91HP.

## 3.2 Spannungsrisskorrosionstest

### 3.2.1 1. Voruntersuchung der SpRK von verschraubten AZ91HP-Platten

Im Vorfeld zu [13] wurde von der ARNOLD Umformtechnik eine Voruntersuchung beim Institut für Chemie an der MU Leoben beauftragt. Ziel der Voruntersuchung war festzustellen, wie hoch die Spannungsrisskorrosionsempfindlichkeit von gewindefurchenden Schrauben TT2K<sup>®</sup> EN AW 7075 – T6 im mit Magnesiumkomponenten verschraubten Zustand ist.

#### 3.2.1.1 Erstellung der SprK-Test-Prüfaufbauten für EN AW 7075-T6 TT2K<sup>®</sup> M8

Diesem ersten Spannungsrisskorrosionstest lagen folgende Überlegungen zu Grunde:

- Aufbau unterschiedlicher Spannungszustände in der Schraube. Falls SpRK auftritt, dann soll erarbeitet werden, bei welchen Spannungen (respektive bei welchen Vorspannkraftniveaus) die EN AW 7075-Schrauben eine erhöhte Anfälligkeit aufweisen.
- Da die Ursachen für SpRK nicht eindeutig geklärt sind (Wasserstoffinduktion oder Auflösung an den Korngrenzen), wurde zur besseren Abschätzung des Risikos, dem zu verschraubende Magnesiumkomponenten unterliegen, auch für den Prüfaufbau (Einschraub- und Klemnteile) Magnesium verwendet.
- Zur Beschleunigung der Korrosion wurden die vorgespannten Schrauben mit einer 3 % NaCl-Lösung umspült.

Zur Verfügung standen Aussentorxschrauben TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 x 60 EN AW 7075 – T6, sowohl schlussgerollt (SG) als auch gleitmittelbeschichtet (mit OKS 1300). Da es sich um gewindefurchende Schrauben handelt, musste im Prüfaufbau auch die zusätzliche Torsionsspannung infolge der Gewindefurchmomente berücksichtigt werden. Daher wurden als Prüfaufbau drei verschraubte Magnesiumprüfplatten unter Korrosionsbelastung vorgesehen. Der Schraubenkopf liegt beim Prüfaufbau auf der Oberplatte auf:

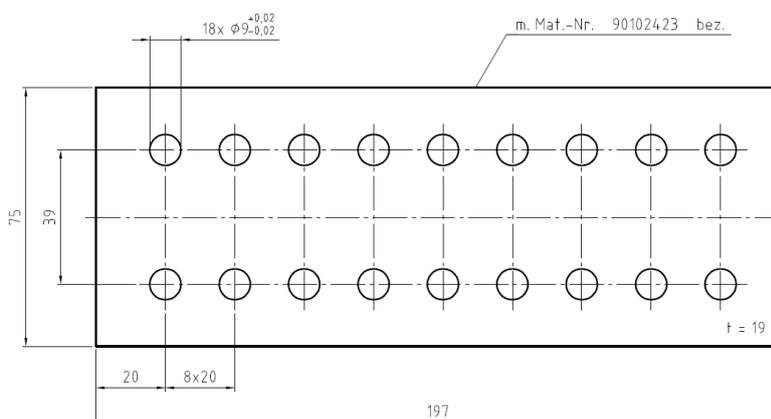
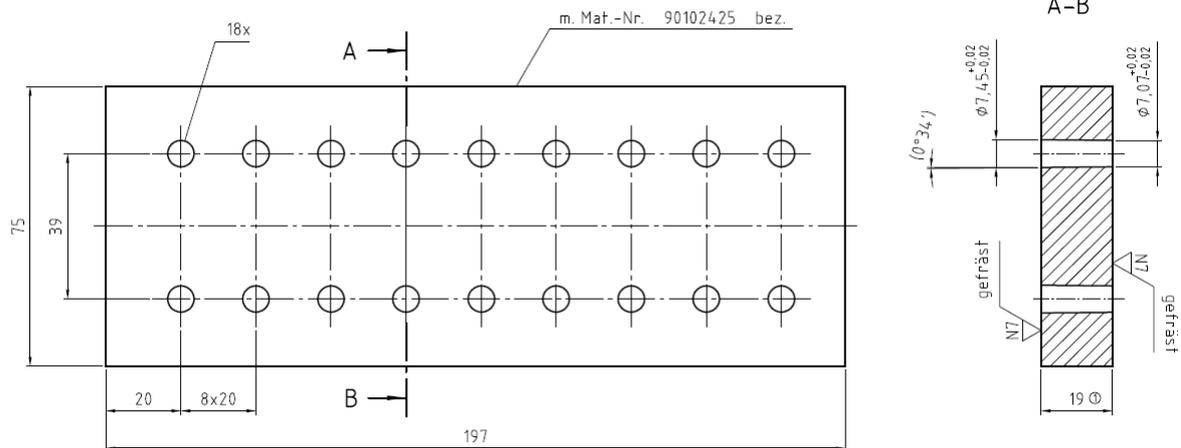
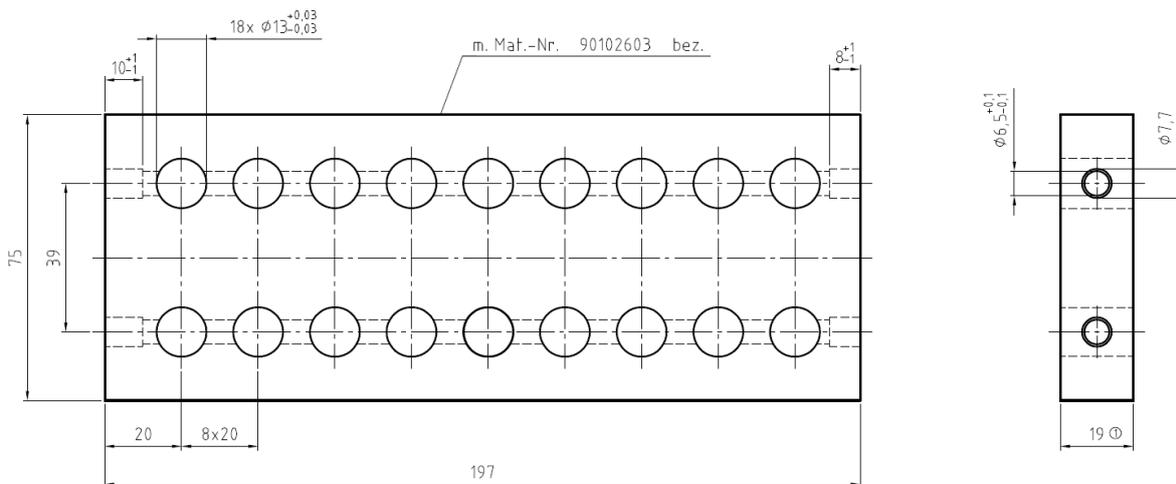


Abbildung 44: Mg-Klemmplatte (AZ91HP) als Oberplatte gemäß ARNOLD Z. Nr. 00-05-411



**Abbildung 45: Mg-Einschraubplatte (AZ91HP) als Unterplatte gemäß ARNOLD Z.Nr. 00-05-412**

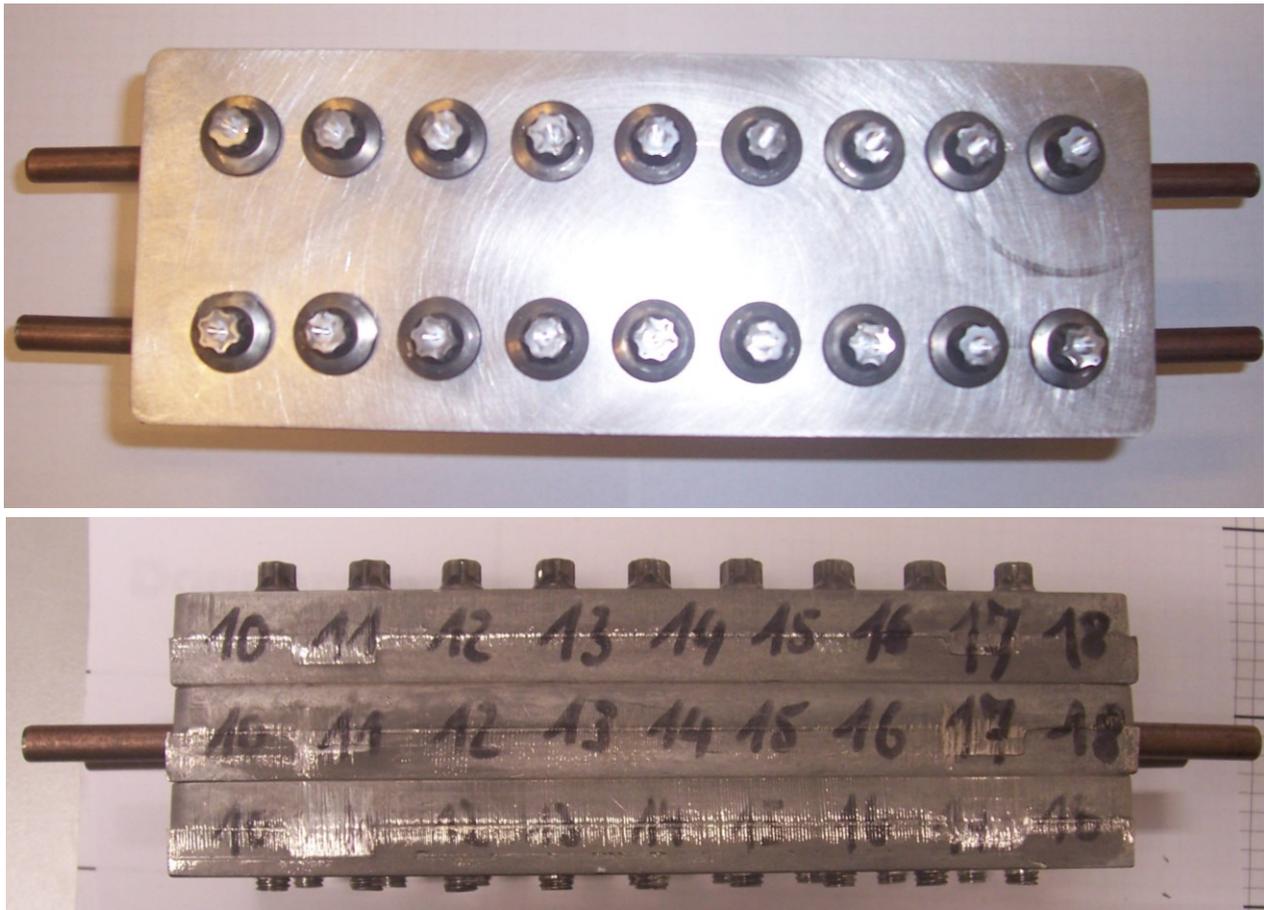
Für die Einschraubplatte wurden konische Kernlöcher vorgesehen, da auch in Magnesium-Getriebegehäusen ein Vorgießen der Kernlöcher zur Kostenoptimierung vorgesehen ist. Die hochfeste TAPTITE 2000® M8 x 60 EN AW 7075 furcht ein metrisches Gewinde in die Einschraubplatte, wobei die Klemmplatte gemäß Abbildung 44 und die Mittelplatte gemäß Abbildung 46 geklemmt werden.



**Abbildung 46: Mg-Klemmplatte (AZ 91) als Mittelplatte gemäß ARNOLD Z.Nr. 00-05-415**

Der Zusammenbau der 3 Platten gemäß der Abbildungen 44 – 46 ist in Abbildung 47 dargestellt.

Sowohl die Oberplatte als auch die Mittelplatte werden geklemmt, beide Platten sind mit Durchgangslöchern für die M8-Furchschrauben versehen. In der Mittelplatte befinden sich gemäß Abbildung 46 zwei zusätzliche Querbohrungen mit einem Durchmesser von 6,5 mm. Diese beiden Querlochbohrungen wurden auf der rechten und der linken Plattenseite jeweils auf einer Länge von 10 mm mit einem Lochdurchmesser von 7,7 mm aufgebohrt, damit an diesen 4 Positionen jeweils eine Anschluss-hülse für den Schlauch eingepresst werden konnte.



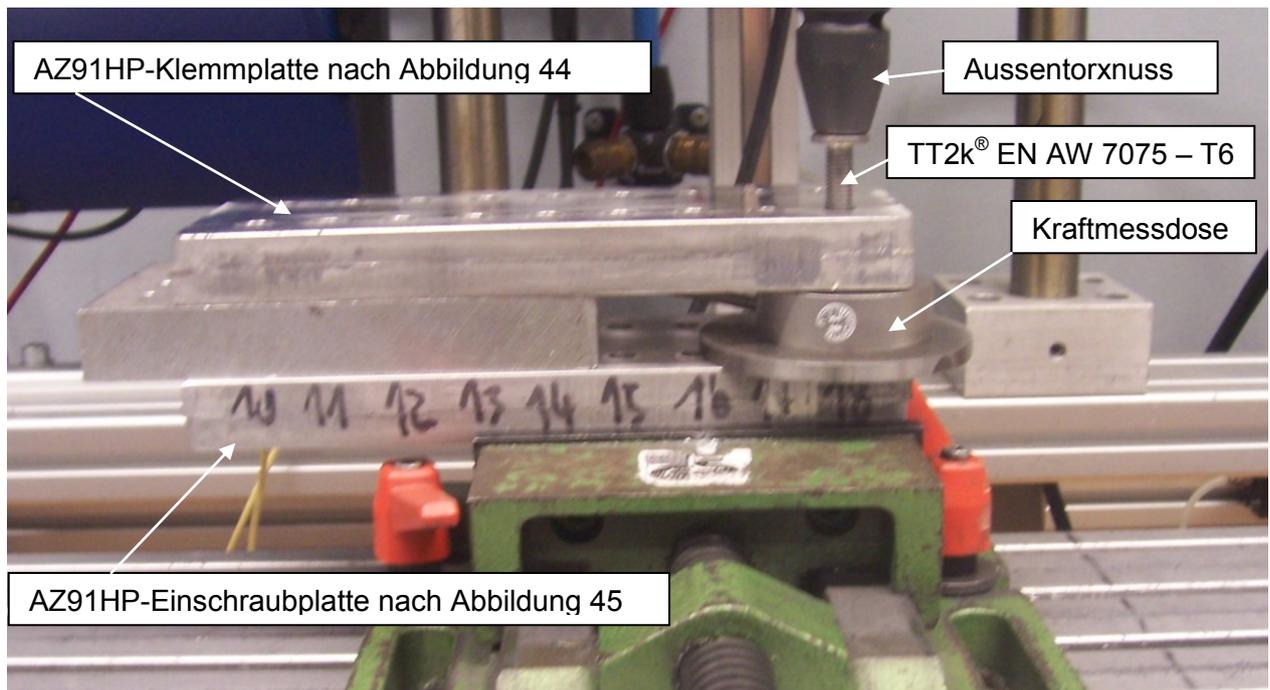
**Abbildung 47: 1. SpRK-Test an drei verschraubten AZ91HP-Platten mit TT2k® EN AW 7075 - T6**

Durch die beiden Querlochbohrungen wurde NaCl-Lösung gepumpt, was zu einer Umspülung der verspannten Schrauben führte.

Eine Elektrolytenpumpe pumpte eine 3 %-NaCl-Lösung bei 80°C über Schläuche in zwei Anschlußröhrchen und von dort aus in die Querbohrung der Mittelplatte. Die Gewinde (freier Dehnbereich) der unter Zug- und Torsionsspannung stehenden Gewindefurchschrauben TT2k® M8 EN AW 7075 - T6 wurden somit permanent umspült. Nach dem Umspülen der Schrauben trat die NaCl-Lösung auf der anderen Seite der Platten über die Anschlußröhrchen wieder aus und wurde über Schläuche so wieder dem Kreislauf mit der Elektrolytenpumpe zugeführt.

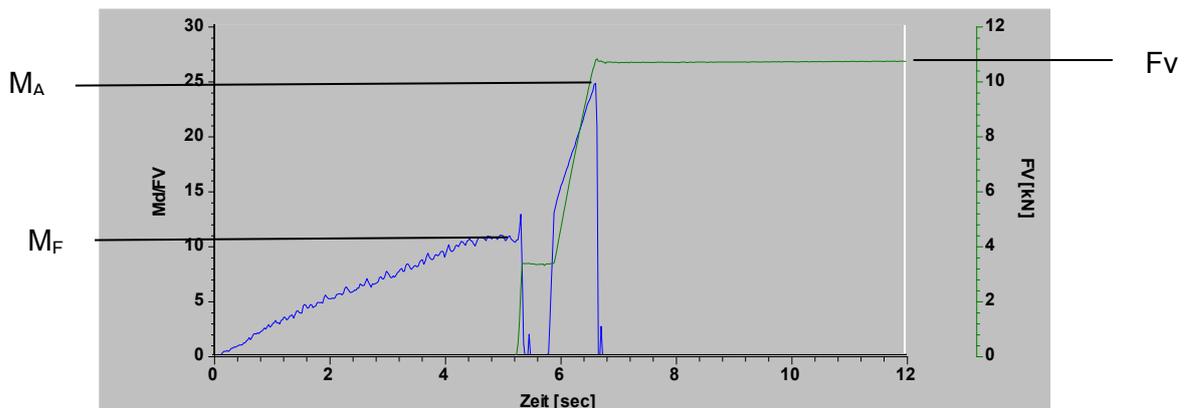
Bei der Erstellung des Prüfaufbaus wurde darauf geachtet, in den Schrauben unterschiedlich hohe Spannungszustände einzubringen. Daher wurden gewindefurchende Verschraubungen mit verschiedenen hohen Drehmomenten verwendet. Folgende Anziehdrehmomente ( $M_A$ ) wurden dafür verwendet:  $M_A = 15 \text{ Nm}$ ,  $M_A = 20 \text{ Nm}$ ,  $M_A = 25 \text{ Nm}$

Für die Abschätzung der bei den drei verschiedenen Anziehdrehmomenten generierten Vorspannkräfte wurde folgender Prüfaufbau gewählt.



**Abbildung 48: AZ91HP-Verschraubung mit TT2k® EN AW 7075 - T6 mit Vorspannkraftmessung**

Die Messergebnisse des Drehmomentsensors (Positionierung oberhalb der Aussentorxnuss) und der Kraftmessdose werden in graphischer Form in Abbildung 49 dargestellt:



**Abbildung 49: Graphische Darstellung der Drehmoment- und Vorspannkraftmessung gemäß Abb. 48**

Die blaue Kurve in Abbildung 49 zeigt den gemessenen Verlauf der Drehmomente an der Schraube in einem zweistufigen Anziehprozess mit dem Anziehdrehmoment  $M_A \sim 25,0$  Nm, wobei das Furchmoment  $M_F$  auf einem Niveau von ca. 11 Nm lag. Dabei wurde eine Montagevorspannkraft von  $F_v \sim 10,6$  kN generiert. Mit der Kraftmessdose (vgl. Abbildung 48) wurden die Vorspannkraft gemessen, die in Tabelle 18 dargestellt sind.

Untere Kernlochtoleranz: TT2k M8 EN AW 7075-T6 in Mg-Platten (AZ91HP)					
Loch-Nr.:	MF [Nm]	MA [Nm]	Fv [kN]	MLB [Nm]	MLB / MA
18	10,95	25,07	9,78	18,97	0,76
1	11,06	24,86	10,72	20,06	0,81
2	11,11	19,68	7,49	14,86	0,76
17	11,78	19,93	7,61	15,62	0,78
3	11,13	14,84	3,98	11,19	0,75
16	11,87	14,88	3,43	12,03	0,81
Obere Kernlochtoleranz: TT2k M8 EN AW 7075-T6 in Mg-Platten (AZ91HP)					
Loch-Nr.:	MF [Nm]	MA [Nm]	Fv [kN]	MLB [Nm]	MLB / MA
5	7,64	24,77	9,69	18,42	0,74
15	6,55	24,84	11,00	18,81	0,76
6	6,46	19,90	8,81	15,82	0,79
13	5,50	19,84	8,39	15,25	0,77
14	6,61	20,06	8,89	15,12	0,75
7	6,46	14,88	6,09	11,72	0,79
12	6,20	15,13	6,51	11,83	0,78

**Tabelle 18: Vorspannkkräfte und Drehmomente bei Versuchsaufbau gemäß Abbildung 48**

Die Zugfestigkeit der geprüften TT2k<sup>®</sup> EN AW 7075 – T6 lag bei ca. 570 MPa. Bezogen auf den normierten Spannungsquerschnitt einer M8-Schraube  $A_s = 36,6 \text{ mm}^2$  ergeben sich bei 10 kN Montagevorspannkraft ca. 273 MPa als axiale Zugspannung.

Dies würde einer Auslastung von ~53% von Rp0,2 und ~ 48 % der Zugbruchkraft bei einer reinen Zugbelastung entsprechen.

Tatsächlich wird die Schraube aber zusätzlich durch die Gewindereibung und den Gewindefurchmoment auf Torsion beansprucht. Gem. [4] lag die gemessene Montagevorspannkraft bei einem drehwinkelgesteuerten Anziehverfahren bis Rp0,2 bei mindestens 10,5 kN.

Insofern war mit ~ 10 kN bei  $M_A = 25 \text{ Nm}$  ein Anziehdrehmoment gewählt worden, der die Schraube bis kurz vor der Streckgrenze (Rp0,2) verspannt. Weitere Lastniveaus bei den Prüfaufbauten waren  $M_A = 20 \text{ Nm}$  ( $F_v \sim 8 \text{ kN}$ ) sowie  $M_A = 15 \text{ Nm}$  ( $F_v = 3,5 \text{ kN} - 6,5 \text{ kN}$ ).

Falls bei  $M_A = 25 \text{ Nm}$  beim SpRK-Test nur Brüche auftreten, dann muss ermittelt werden, bei welchem Lastniveau die Durchläufe erfolgen.

### 3.2.1.2 1. SpRK-Testdurchführung verschraubter AZ91HP-Platten

Eine detaillierte Beschreibung des Korrosionstestes erfolgt in [53] im Laborbericht LAB 916-06. Aus diesem Laborbericht sollen folgende markante Punkte hervorgehoben werden:

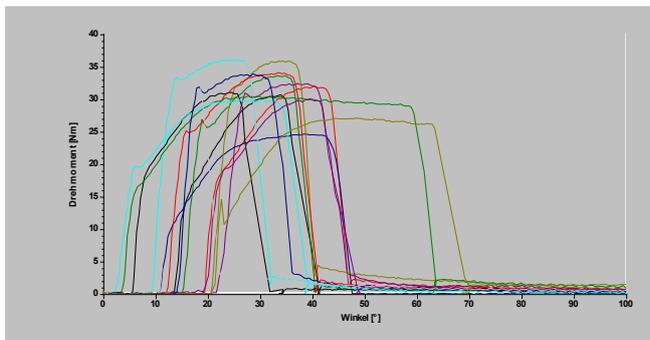
Nachdem die AZ91HP-Mittelplatte ca. 2 h lang von einer NaCl-Lösung durchströmt worden war, wobei die TT2k<sup>®</sup> EN AW 7075-Schrauben umspült wurden, kam es in Folge des ausfallenden Magnesiumhydroxid zu einer massiven Änderung des Elektrolyten. Daher konnten die geplanten 500 h Versuchsdauer nicht eingehalten werden. Der Versuchsabbruch erfolgte nach 100 h.

Die Versuchsaufbauten wurden von AUT demontiert, wobei versucht wurde, die Schrauben zu lösen.



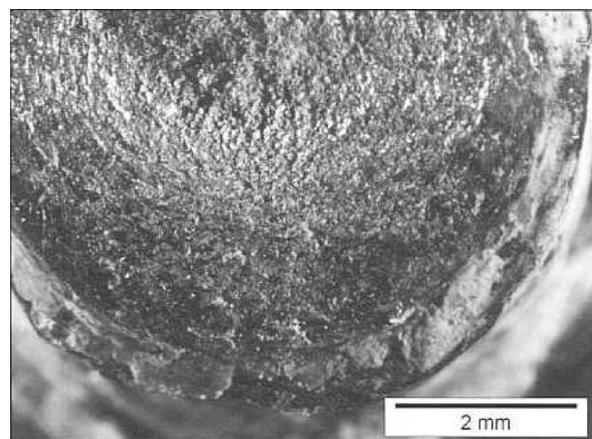
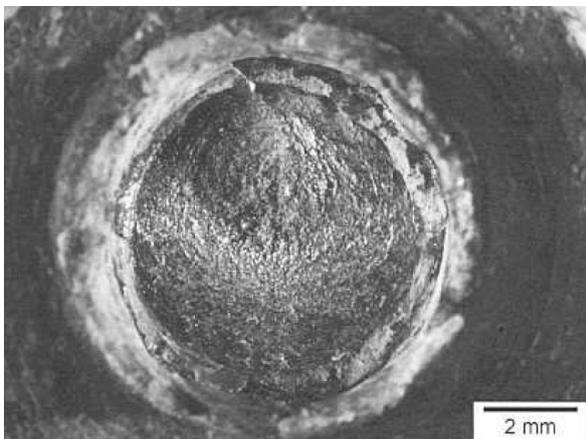
**Abbildung 50 a): Nach 100 h SpRK-Test Prüfaufbauoberseite b): Prüfaufbauunterseite**

Abbildung 50 b) zeigt, dass das Mg um die Schraube herum korrodiert ist. Dies hat dazu geführt, dass die Schrauben durch die Mg-Korrosionsprodukte festgeklemmt wurden, was schließlich beim Löseversuch zum Brechen aller Schrauben geführt hat.



**Abbildung 51 a) Nach 100 h SpRK-Test Drehmomentenverlauf beim Lösen b) Schraubenbrüche**

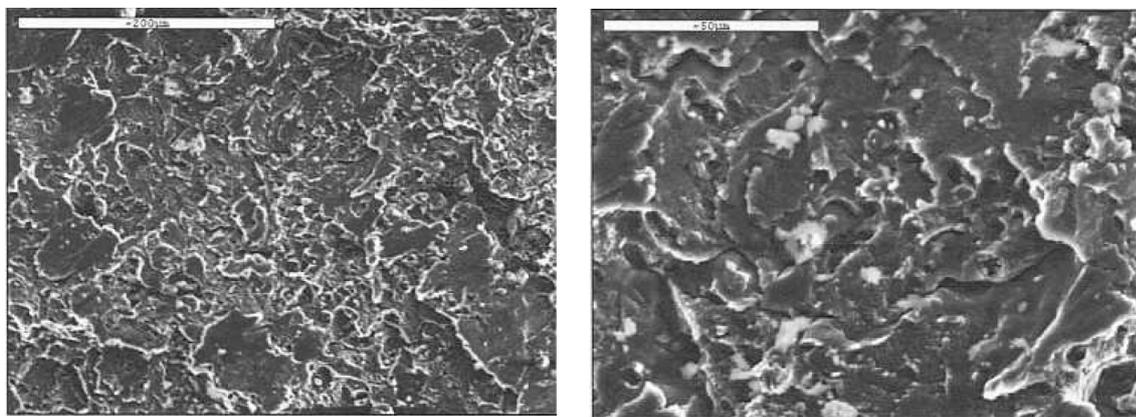
Die gemessenen Bruchmomente beim Lösen lagen zwischen 24,7 Nm und 36,14 Nm. Die NaCl-Lösung ist in das verschraubte Gewinde der Einschraubplatte eingedrungen und hat zu einer starken Magnesiumkorrosion geführt.



**Abbildung 52: Lichtoptische Vergrößerung einer beim Lösen gebrochenen Schraube [53]**

Gemäß [53] wird der Bruch (in der Nähe des Schraubenkopfes) nach Abbildung 52 als Torsionsbruch mit Bruchausgang in 6-Uhr-Position interpretiert, wobei hier lichtoptisch kein örtlicher Korrosionsangriff auf das Gewinde oder die Bruchfläche nachweisbar war.

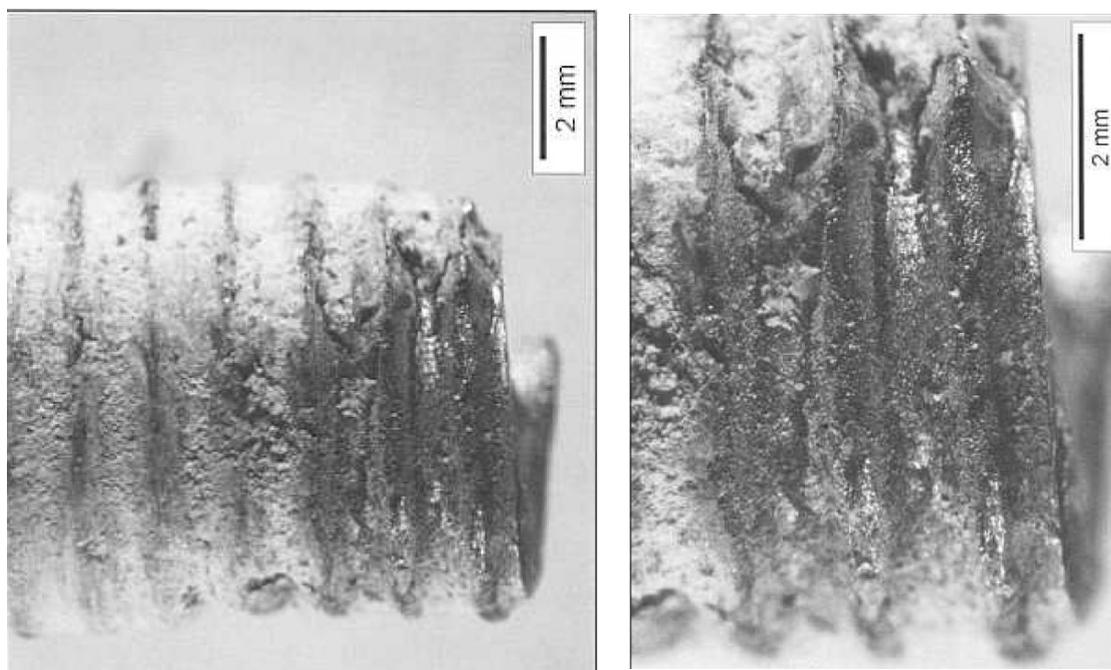
Ferner wurden an weiteren Bruchfragmenten der Schrauben (Abbildung 51b) zwei Schraubenbruchflächen aus dem Löseversuch (Schraube nahe bei Kopf gebrochen) elektronenoptisch untersucht und in Abbildung 53 dargestellt.



**Abbildung 53: Elektronenoptische Vergrößerung einer beim Lösen gebrochenen Schraube [53]**

Gemäß [53] wird Abbildung 53 als zäher Schubgewaltbruch interpretiert, welcher vor allem im Zentrum der Bruchfläche erhalten ist. Am Gewindegrund war kein Hinweis auf eine Kerbwirkung durch Korrosion nachweisbar.

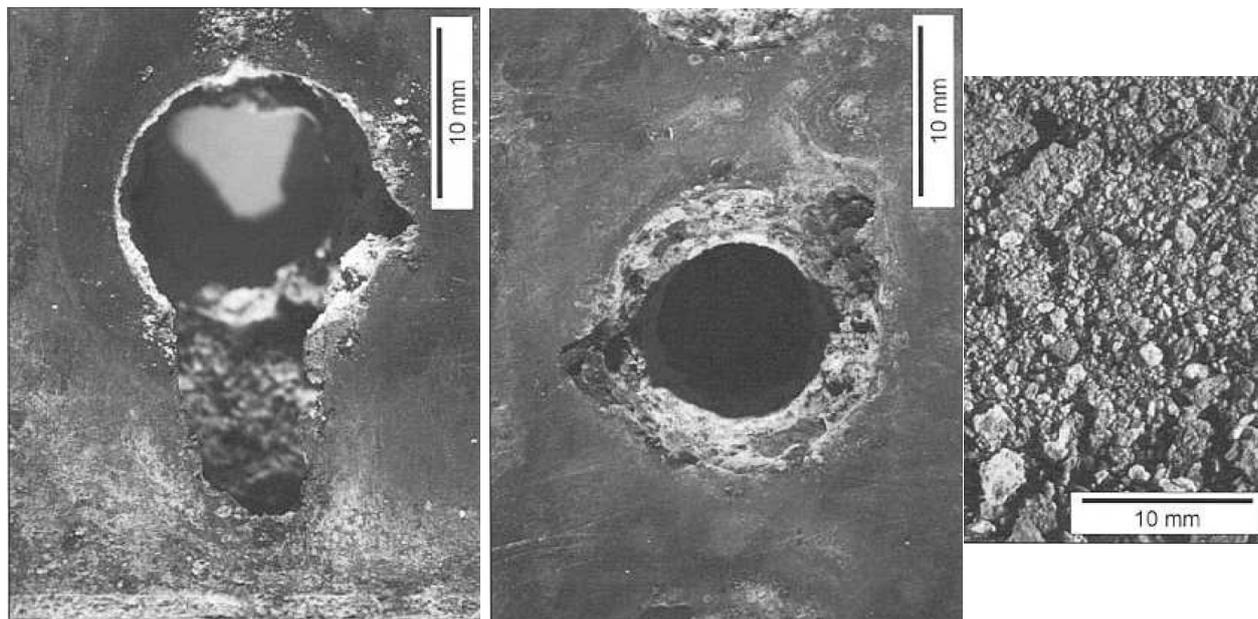
Ebenso zeigte die nach dem Löseversuch gebrochene Schraube mit einem Gewindestumpf mittlerer Länge (s. Abbildung 51 b) eine ähnliche Torsionsbruchscharakteristik.



**Abbildung 54: Lichtoptische Vergrößerung vom Gewinde mit Bruch nahe Schraubenmitte**

In [53] ist ein deutlich erkennbarer Korrosionsabtrag der Gewindeoberfläche erkennbar, einhergehend mit einer Reduktion der Gewindetiefe, wobei keine ausgeprägte Kerbung durch den Korrosionsangriff stattgefunden hat.

Nach der Demontage des Versuchsaufbaus gemäß Abbildung 50 wurden auch die Klemm- und Einschraubplatten aus der Magnesiumlegierung AZ91HP untersucht.



**Abbildung 55 a) und b) Mittlere AZ91HP-Klemmplatte c) Ausgefallenes Magnesiumhydroxid**

Abbildung 55 wird gem. [53] so interpretiert: Die einzelnen AZ91HP-Platten zeigten bereits nach dem 100 h-SprK-Test einen massiven Angriff in Form gleichförmiger und galvanischer Korrosion. Insbesondere bei den Lochbohrungen der mittleren AZ91HP-Platte liegen erhebliche Materialverluste vor, welche schließlich zu dem vorzeitigen Versuchsabbruch geführt hatten. Abbildung 55 c) zeigt die Körnung des ausgefallenen Mg-Hydroxids, welches hochporös und überwiegend kleiner als 1 mm ist.

### **3.2.1.3 Ergebnisse 1. SprK-Voruntersuchung mit AZ91HP-Platten**

Nach [53] versagten alle Schrauben in Folge des Torsionsgewaltbruchs beim Lösen der Schrauben. Keine Schraube zeigte Anteile eines spröden Bruchgeschehens infolge einer Spannungsrisskorrosion. Vielmehr kam es zu einer Reduktion der Schraubenschaftquerschnitte in Folge der Korrosion, was bei zwei Schrauben zu Brüchen geführt hatte.

Wegen der reduzierten Versuchsdauer von 100 h ist zu empfehlen, den gleichen Versuchsaufbau mit Aluminiumplatten nochmals durchzuführen.

### **3.2.2 2. SprK - Test mit AMgSi0,5-Prüfplatten**

Für diesen Versuch wurden entsprechend der Empfehlung in [53] geometrisch dieselben Prüfaufbauten wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben verwendet, jedoch mit Aluminiumplatten aus dem Werkstoff AlMgSi0,5.

### 3.2.2.1 Erstellung der Prüfaufbauten für den 2. SpRK-Test

Als Werkstoff für die Prüfplatten wurde die Al-Legierung AlMgSi0,5 ausgewählt. Diese Legierung EN AW 6060 hat eine Härte von ca. 70 HB und ist somit noch zum Gewindefurchen mit hochfesten TAPTITE 2000® M8 EN AW 7075 – T6 geeignet. Außerdem weist sie eine relativ gute Korrosionsbeständigkeit auf, die wegen der Plattendurchspülung mit der 80°C warmen 3 %-NaCl-Lösung erforderlich ist.

Eine detaillierte Beschreibung der Erstellung der Prüfaufbauten erfolgt im Prüfbericht gemäß [54]. Im Vergleich zur AZ91HP-Einschraubplatte gemäß Abbildung 45 wurden für die AlMgSi0,5-Einschraubplatte größere Kernlöcher verwendet. Das konische Kernloch hatte an der Plattenunterseite einen Lochdurchmesser von ~ 7,19 mm und in Höhe der oberen Plattenseite einen Lochdurchmesser von ~ 7,53 mm. Basierend auf den Schraubengewindemaßen ergab sich bei der Verschraubung eine mittlere radiale Gewindeüberdeckung von ~ 60 %.

Eine weitere Überlegung bei der Erstellung der Prüfaufbauten war, dass die Schraubenvorspannkraft sowohl bei der Montage als auch nach Versuchsende relevant ist. Daher wurde zwecks indirekter Vorspannkraftmessung für die Aufnahme einer geschliffenen Messkugel eine konische Ansenkung in den Schraubenkopf und in das Gewindeende eingebracht. Mit Hilfe einer speziellen Messuhr wurde zunächst die ursprüngliche Schraubenlänge ohne Vorspannung  $l_0$  ermittelt. Nach der Verspannung mit den definierten Drehmomenten  $M_1 = 15 \text{ Nm}$ ,  $M_2 = 20 \text{ Nm}$  sowie  $M_3 = 25 \text{ Nm}$  wurde die Verlängerung der Schrauben gemessen. Entsprechend der VDI 2230 gelten folgende Zusammenhänge zwischen der elastischen Schraubennachgiebigkeit  $\delta_s$ , der Schraubenverlängerung  $f_s$  sowie der Vorspannkraft  $F_v$ .

Aus der Schraubenlängung lassen sich die Montagevorspannkraft (Abweichung < 5 %) bestimmen:

$$F_v = (l_1 - l_0) / \delta_s$$

*Formel 21: Zusammenhang zwischen Vorspannkraft, Längenänderung und elastischer Nachgiebigkeit*

$l_1$ : Schraubenlänge nach dem Anziehen in verspanntem Zustand [mm]

$l_0$ : Schraubenlänge in unverspanntem Zustand [mm]

$\delta_s$ : Elastische Nachgiebigkeit der Schraube [mm/N]

Die Schraube kann in zylindrische Einzelemente zerlegt werden. Für die Längung  $f$  eines solchen Einzelementes gilt allgemein:

$$f = l \cdot F / E \cdot A$$

*Formel 22: Längung des zylindrischen Einzelementes*

$$\delta_i = f_i / F = l_i / E_s \cdot A_i$$

Formel 23: Elastische Nachgiebigkeit der Einzelemente:

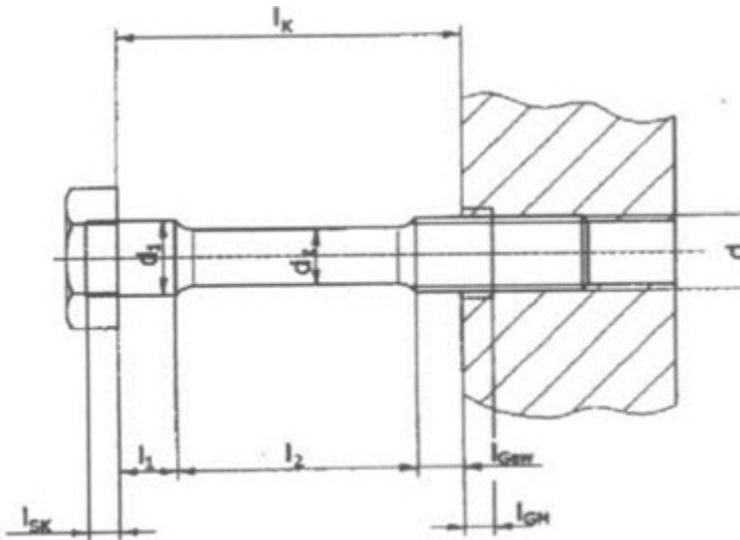


Abbildung 56: Schematische Schraubendarstellung in Anlehnung an VDI 2230, S. 28 [66]

Bezogen auf die gewindefurchende TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 – ENAW 7075 – T6 ergibt sich durch Aufsummierung der jeweiligen Schraubeneinzelnachgiebigkeiten folgende Formel zur Bestimmung der Gesamtschraubennachgiebigkeit:

$$\delta_S = \delta_1 + \delta_{\text{Gew}} + \delta_{\text{SK}} + \delta_G + \delta_M$$

Formel 24: Berechnung der elastischen Schraubengesamtnachgiebigkeit

$$\delta_1 = 4/(\pi \cdot E_s) \cdot (l_1/d_1^2):$$

Formel 25: Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit der gewindefreien Zone unter dem Schraubenkopf

mit  $\delta_1$  als gewindefreie Zone im Bereich der Klemmdicke  $l_k$

$$\delta_{\text{Gew}} = 4/(\pi \cdot E_s) \cdot (l_{\text{Gew}}/d_3^2):$$

Formel 26: Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit des nicht-ingeschraubten Gewindes

mit  $\delta_{\text{Gew}}$  als Länge des nicht-ingeschraubten Gewindes

$$\delta_{\text{SK}} = 4/(\pi \cdot E_s) \cdot (l_{\text{SK}}/d^2):$$

Formel 27: Berechnung  $\delta_{\text{SK}}$  als Schraubenkopfnachgiebigkeit

$\delta_{SK}$  als Kopfnachgiebigkeit mit  $l_{sk} = 0,5 * d$  für Sechskantschrauben  $l_{sk} = 0,4 * d$  für Zylinderschrauben mit Innenkraftangriff

$$\delta_G = 4/(\pi * E_s) * (l_G/d_3^2):$$

*Formel 28: Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit des eingeschraubten Schraubengewindes*

$\delta_G$  als Nachgiebigkeit des eingeschraubten Gewindes

$d_3$ : Kerndurchmesser vom Schraubengewinde

$l_G$ : nach VDI 2230  $l_G = 0,5 * d$

$$\delta_M = 4/(\pi * E_M) * (l_M/d^2)$$

*Formel 29 Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit des Mutterngewindes*

$\delta_M$  als elastische Nachgiebigkeit des Mutterngewindes

$d$ : Schraubennennendurchmesser

$l_M$ : Länge des eingeschraubten Gewindes

$l_M = 0,4 * d$  für Durchsteckschraubenverbindungen

$l_M = 0,33 * d$  für Einschraubverbindungen

Abbildung 57 zeigt den Prüfaufbau der gewindefurchend verschraubten AlMgSi0,5-Platten. In der Draufsicht ist die eingedrehte konische Ansenkung im Aussentorx-Schraubenkopf erkennbar. Auch in der Unteransicht ist diese Ansenkung im Gewindeende der Schraube erkennbar.

Die Ansenkungen dienen für die Aufnahme und Positionierung von Messkugeln, die geschliffen und gehärtet sind (vgl. Abbildung 58).



Abbildung 57: AlMgSi<sub>0,5</sub>-Platten (oben Draufsicht, Mitte Seitenansicht, unten Unteransicht)

Abbildung 58 zeigt den Messaufbau zur Längenmessung, wobei links die Schraubenlänge ohne Vorspannung gemessen wird, rechts nach der Verschraubung in die Prüfvorrichtung (mit Vorspannung). Nach der Verschraubung wird die Montagevorspannkraft mit Hilfe der Formeln Formel 24 – Formel 29 berechnet.

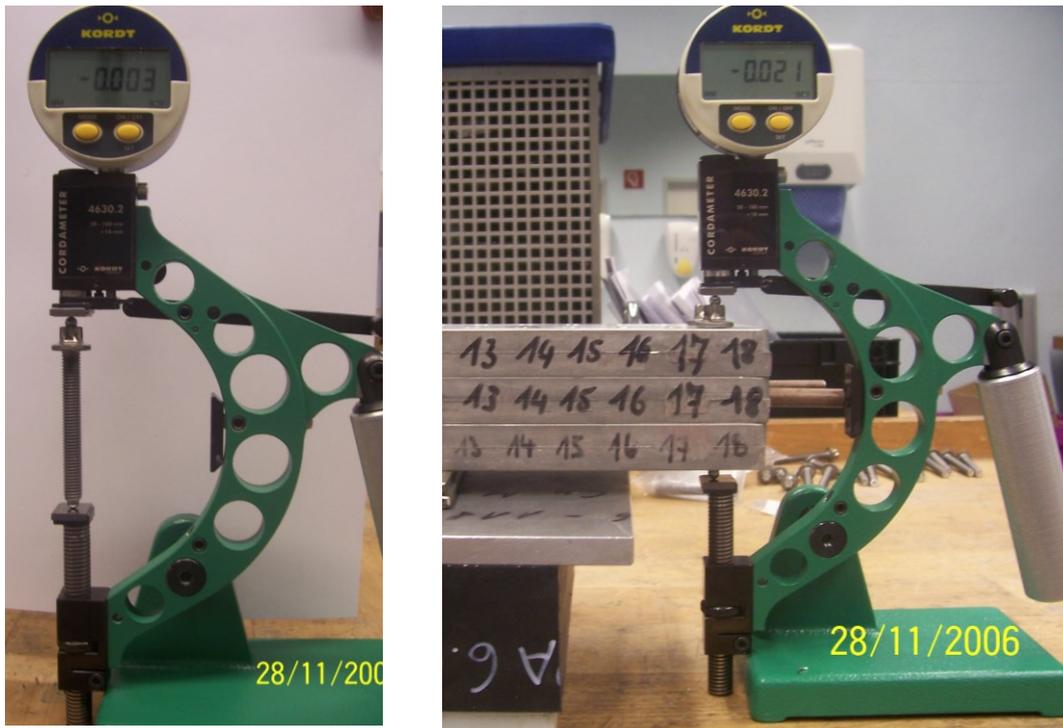


Abbildung 58 a): Schraubenlängenmessung ohne Vorspannkraft b): Mit Vorspannkraft

Analog zu den Versuchsaufbauten in Abschnitt 3.2.1 (verschraubte Mg-Platten aus AZ91HP) wurden für die AlMgSi0,5-Platten mit  $M_{A1} = 15 \text{ Nm}$ ,  $M_{A2} = 20 \text{ Nm}$  und  $M_{A3} = 25 \text{ Nm}$  die gleichen Anziehdrehmomente verwendet.

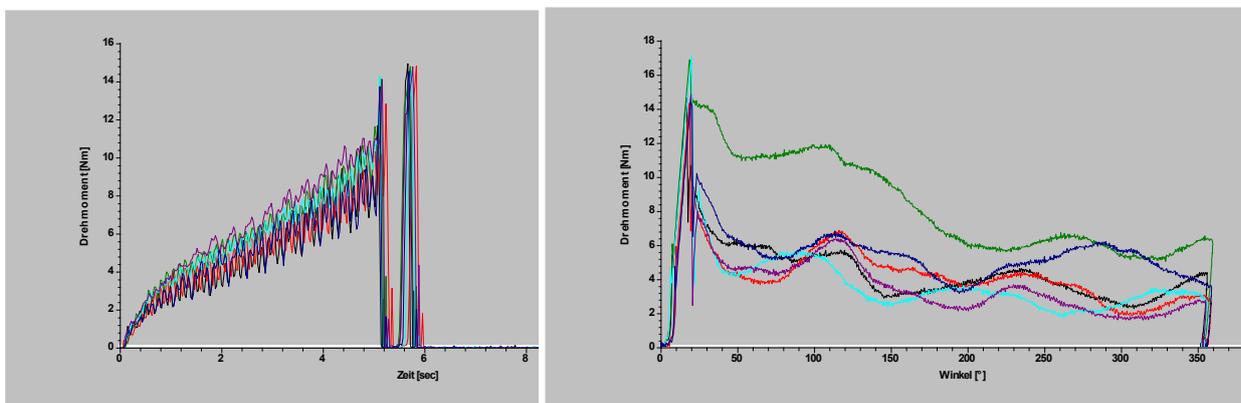


Abbildung 59 a) Furchen in AlMgSi0,5 mit  $M_A \sim 15 \text{ Nm}$  b): Lösen nach 500 h Korrosionstest

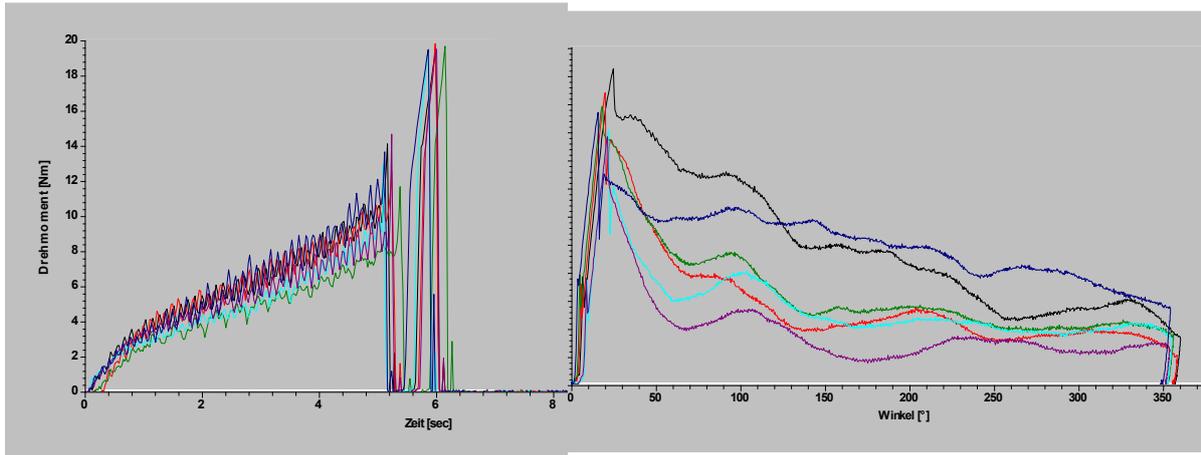


Abbildung 60 a): Furchen in AlMgSi0,5 und  $M_A \sim 20 \text{ Nm}$  b): Lösen nach 500 h Korrosionstest

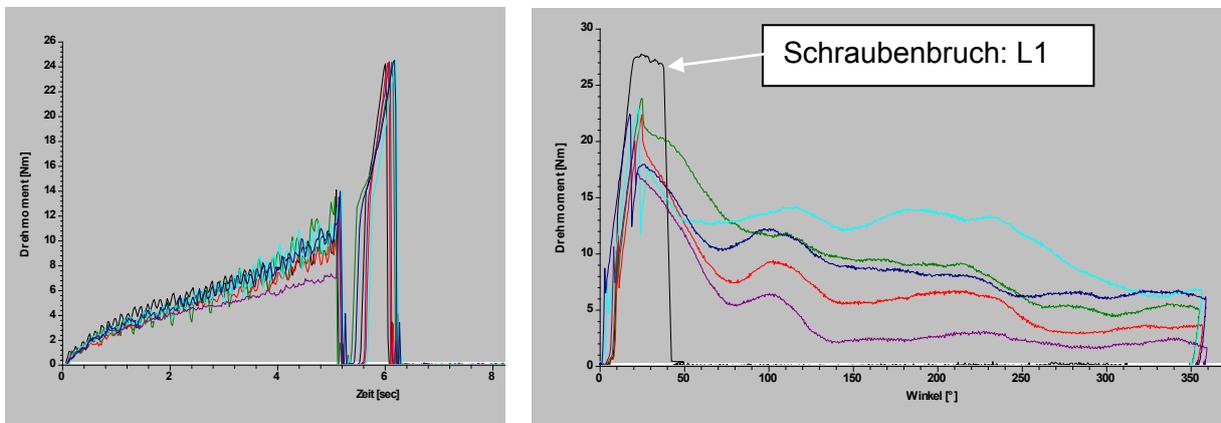


Abbildung 61 a): Furchen in AlMgSi0,5 und  $M_A \sim 25 \text{ Nm}$  b): Lösen nach 500 h Korrosionstest

<b>MA = 15 Nm</b>	<b>Best. d.Relaxation nach Längenmeßmethode</b>						
<b>MLB n. 500 h SprK-Test</b>	<b>TT 2000 M8 x60-Al7075 in Al-Prüfplatten AlMgSi0,5</b>						
<b>Io-I1: 23.01.07</b>	L4	L6	L7	L13	L15	L16	
<b>MFmax</b>	10,59	10,32	11,63	10,87	11,02	9,58	
<b>MFend</b>	7,42	8,01	10,43	10,63	10,46	6,94	
<b>MA</b>	14,93	14,8	14,78	14,54	14,77	14,53	
<b>Lo bei RT ohne Fv</b>	0,290	0,154	0,274	0,280	0,156	0,227	
<b>L1 sofort nach MA</b>	0,334	0,195	0,329	0,343	0,183	0,283	
<b>L1 - Lo (RT) (Messende)</b>	0,044	0,041	0,055	0,063	0,027	0,056	xqFv
<b>Fv nach MA (RT) [N]</b>	2237	2085	2797	3204	1373	2848	2424
<b>L2 n. 500h SprK-Test</b>	0,334	0,195	0,329	0,343	0,181	0,283	
<b>L1-Lo am 13.03.07</b>	0,044	0,041	0,055	0,063	0,025	0,056	xqFv
<b>Fv bei Mess L2</b>	2237	2085	2797	3204	1271	2848	2407
<b>Fv-Abfall [%]</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	7,41	0,00	
<b>MLB am 13.03.07</b>	14,62	14,34	16,88	17,06	14,86	14,44	
<b>MLB / MA [%]</b>	97,92	96,89	114,21	117,33	100,61	99,38	

Tabelle 19: SprK-Test in AlMgSi0,5 mit TT2k<sup>®</sup> EN AW 7075 – T6 und  $M_A = 15 \text{ Nm}$

<b>MA = 20 Nm</b>	<b>Bestimmung d. Relaxation n. Längenmeßmethode</b>						
<b>MLB n. 500 h SprK-Test</b>	TT 2000 M8 x60-AI7075 in Al-Prüfplatten AlMgSi0,5						
<b>Io-I1: 23.01.07</b>	L2	L3	L8	L11	L12	L17	
<b>MFmax</b>	10,72	11,19	8,45	9,88	9,95	12,13	
<b>MFend</b>	9,65	9,73	7,71	9,12	8,05	10,69	
<b>MA</b>	19,42	19,84	19,69	19,45	19,53	19,51	
<b>Lo bei RT ohne Fv</b>	0,209	0,057	-0,012	-0,027	0,473	0,237	
<b>L1 sofort nach MA</b>	0,311	0,158	0,087	0,060	0,582	0,326	
<b>L1 - Lo (RT) (Messende)</b>	0,102	0,101	0,099	0,130	0,109	0,089	xqFV
<b>Fv nach MA (RT) [N]</b>	5187	5136	5034	6611	5543	4526	5339
<b>L2 nach 500h SprK-Test</b>	0,311	0,154	0,087	0,060	0,579	0,309	
<b>L1-Lo am 13.03.07</b>	0,102	0,097	0,099	0,087	0,106	0,072	xqFV
<b>Fv bei Mess L2</b>	5187	4932	5034	4424	5390	3661	4771
<b>Fv-Abfall [%]</b>	0,00	3,96	0,00	33,08	2,75	19,10	
<b>MLB am 13.03.07</b>	22,50	20,81	19,83	18,19	17,67	19,41	
<b>MLB / MA [%]</b>	115,86	104,89	100,71	93,52	90,48	99,49	

Tabelle 20: SprK-Test in AlMgSi0,5 mit TT2k® EN AW 7075 – T6 und MA = 20 Nm

<b>MA = 25 Nm</b>	<b>Bestimm. d. Relaxation n. Längenmeßmethode</b>						
<b>MLB n. 500 h SprK-Test</b>	TT 2000 M8 x60-AI7075 in Al-Prüfplatten AlMgSi0,5						
<b>Io-I1: 23.01.07</b>	L1	L5	L9	L10	L14	L18	
<b>MFmax</b>	10,83	10,02	13,55	12,72	7,35	11,02	
<b>MFend</b>	9,04	8,88	13,55	12,09	7,01	9,76	
<b>MA</b>	24,25	24,33	24,36	24,59	24,42	24,53	
<b>Lo bei RT ohne Fv</b>	-0,029	0,234	0,035	0,631	0,308	0,159	
<b>L1 sofort nach MA</b>	0,110	0,379	0,193	0,749	0,481	0,297	
<b>L1 - Lo (RT) (Messende)</b>	0,139	0,145	0,158	0,118	0,173	0,138	xqFV
<b>Fv nach MA (RT) [N]</b>	7068	7373	8034	6000	8797	7017	7382
<b>L2 nach 500h SprK-Test</b>	0,109	0,369	0,193	0,740	0,478	0,288	
<b>L1-Lo am 13.03.07</b>	0,138	0,135	0,158	0,109	0,17	0,129	xqFV
<b>Fv bei Mess L2</b>	7017	6865	8034	5543	8645	6560	7111
<b>Fv-Abfall [%]</b>	0,72	6,90	0,00	7,63	1,73	6,52	
<b>MLB am 13.03.07</b>	27,75	22,36	23,81	22,97	20,02	22,41	
<b>MLB / MA [%]</b>	114,43	91,90	97,74	93,41	81,98	91,36	

Tabelle 21: SprK-Test in AlMgSi0,5 mit TT2k® EN AW 7075 – T6 und MA = 25 Nm

Die Messwertdokumentation der Schraubenlänge ohne Verspannung ( $l_0$ ), der Furchmomente ( $M_F$ ), der Anziehmomente ( $M_A$ ), der Schraubenlänge nach der Verschraubung mit  $M_A$  ( $L_1$ ) sowie der Schraubenlänge nach 500 h Korrosionstest ( $l_2$ ) erfolgt in den Tabellen 19- 21.

In den Tabellen 19 - 21 wurde außerdem die Montagevorspannkraft ( $F_v$  nach  $M_A$ ) sowie die Restvorspannkraft nach 500 h Korrosionstest ( $F_v$  bei Messung L2) basierend auf den Formeln 24 - 29 bestimmt.

Gemäß den Abbildungen 59 - 61 wurden die AlMgSi0,5-Platten insgesamt 18 Mal mit TAPTITE 2000® EN AW 7075 – T6 mit 6 x  $M_A \sim 15$  Nm, 6 x  $M_A \sim 20$  Nm und 6 x  $M_A \sim 25$  Nm gewindefurchend verschraubt. Beim Löseversuch ist lediglich eine Schraube bei  $M_A = 24,25$  Nm (siehe Tabelle 21, Position L1 mit einem Bruchmoment beim Lösen  $M_{LB} = 27,75$  Nm) gebrochen.

Wegen der relativ hohen Furchmomente ( $M_{F_{\max}}$  bis 13,55 Nm) wurden über die Verlängerungsmeßmethode gemäß Formel 24 geringere Vorspannkkräfte gemessen wie im 1. SpRK-Versuch mit den Mg-Platten aus AZ91HP.

Unmittelbar nach dem Anziehen wurden über die Verlängerungsmeßmethode mittlere Montagevorspannkkräfte berechnet bei

$$M_A \sim 15 \text{ Nm} \rightarrow F_v \sim 2,4 \text{ kN}$$

$$M_A \sim 20 \text{ Nm} \rightarrow F_v \sim 5,3 \text{ kN}$$

$$M_A \sim 25 \text{ Nm} \rightarrow F_v \sim 7,3 \text{ kN}$$

Die Vorspannkraftabfälle nach dem 500h-Korrosionstest waren relativ gering.

### 3.2.2.2 Durchführung des 2. SpRK-Tests mit verschraubten AlMgSi0,5-Platten

Eine detaillierte Beschreibung des Korrosionstests erfolgt in [54].

Folgende markante Punkte zu diesem Laborbericht sollen hier nochmals hervorgehoben werden:

Im Gegensatz zu [53] sind in diesem SpRK-Test 500 h Versuchsdauer erreicht worden. Der Versuchsaufbau erfolgte analog zu [53] mit einer Umströmung der unter Zug- und Torsionsspannung stehenden TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 x 60 – EN AW 7075 – T6.

Von 18 Schrauben ließen sich 17 mit vom Anziehmoment prozentual abhängigen Lösemomenten von 82 % (Tabelle 21, L14) bis 117 % (Tabelle 19, L13) lösen. Diese Lösemomente sind relativ hoch, daher sind sie ein Indikator für eine relativ hohe Reibung. Die Schraube L1 in Tabelle 21 ( $M_A = 24,25 \text{ Nm}$ ) ist beim Löseversuch bei  $M_B = 27,75 \text{ Nm}$  (114 % von  $M_A$ ) gebrochen. Der Gewindestumpf wurde abgetrennt und mikroskopisch untersucht.

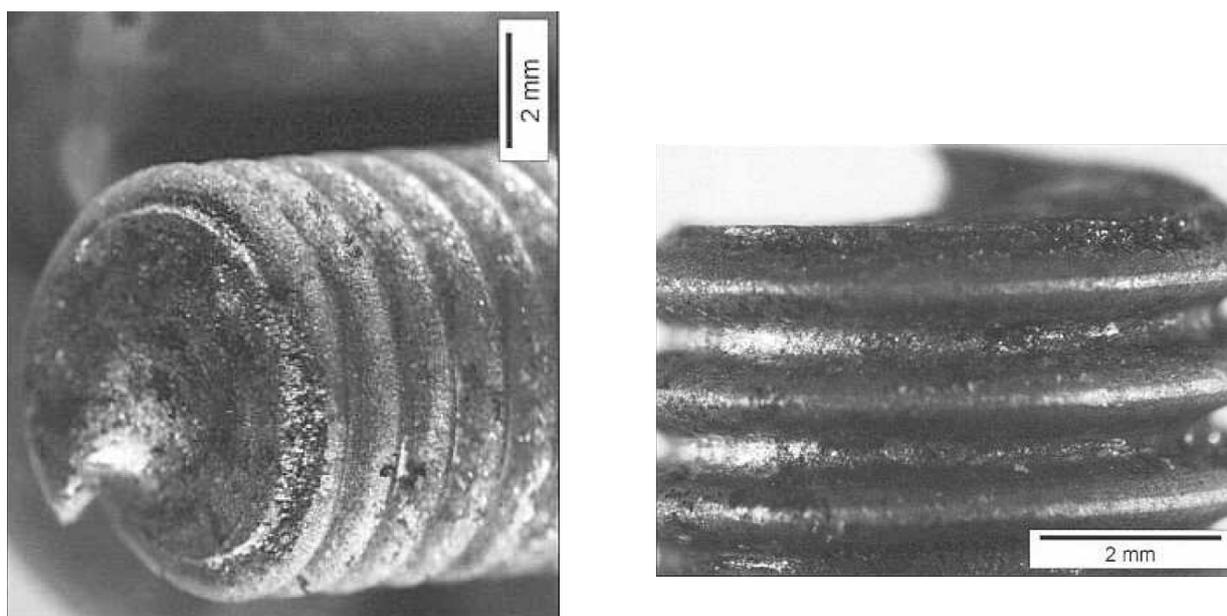
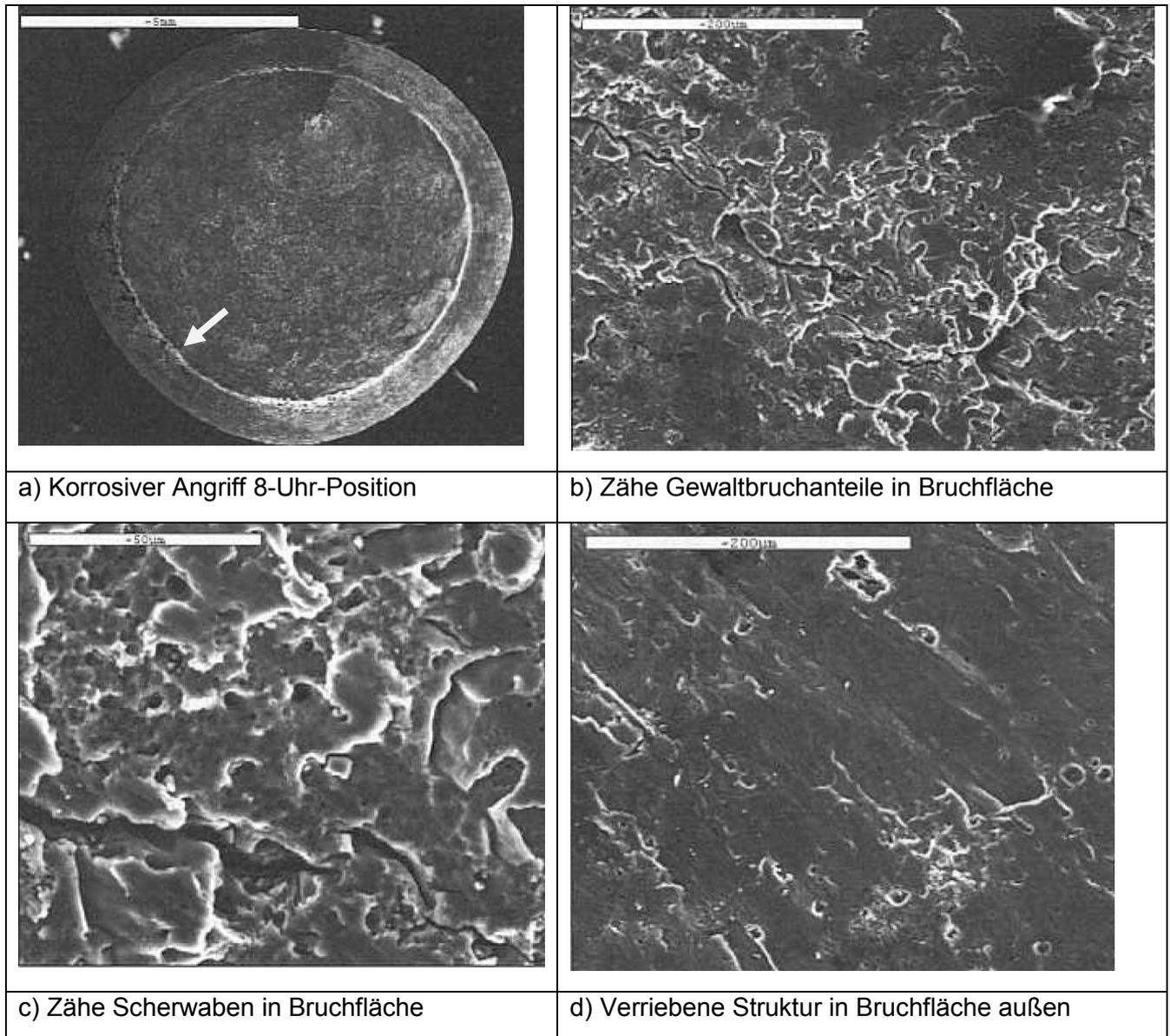


Abbildung 62: Beim Lösen gebrochene Schraube L1 (Tabelle 21) nach 500 h SpRK-Test

Gem. [54] lag ein scharfer und ausgeprägter korrosiver Angriff auf das Gewinde vor, wobei in jedem der betrachteten Gewindgänge ein örtlicher, in die Tiefe gehender Materialangriff vorhanden war. Tabelle 22 zeigt die weitere elektronenmikroskopische Untersuchung.

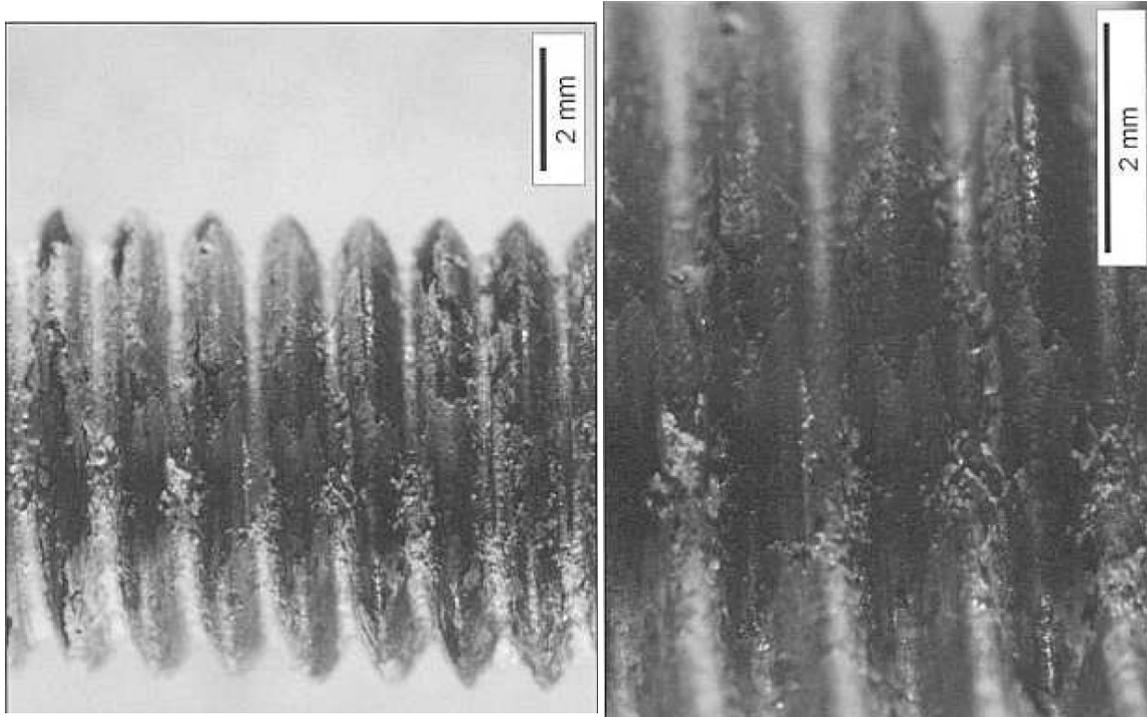


**Tabelle 22: Beim Lösen gebrochene TT2k<sup>®</sup> EN AW 7075 - T6 (Pos L1) nach 500 h SpRK-Test [54]**

Gemäß [54] lag in Tabelle 22 a) am Gewindegrund in 8.00h-Position ein korrosiver Angriff vor. Die Bruchfläche weist ausschließlich zähe Gewaltbruchanteile (s. Tabelle 22 b, c) auf, während der Außenbereich der Bruchfläche überwiegend eine verriebene Struktur mit vereinzelt zähen Scherwaben zeigt.

Ferner wurden für die beim Lösen nicht gebrochenen Schrauben L9 und L14 entsprechend der Tabelle 21 untersucht. Die Schrauben L9 und L14 wurden ebenfalls mit  $M_A \sim 25 \text{ Nm}$  verschraubt. Die Losbrechmomente beim Ausschraubversuch lagen bei 23,8 Nm und 20 Nm.

Laut [54] war bei diesen beiden Schrauben nach der Entfernung der Salzsicht unter dieser kein Angriff auf das Gewinde vorhanden, wie Abbildung 63 für L14 zeigt. Dies gilt auch für weitere punktuell untersuchte Schrauben.



**Abbildung 63: Nicht-gebrochene TT2k® EN AW 7075 – T6-Schraube, Tabelle 21, L14 [54]**

### **3.2.2.3 Ergebnisse des 2. SpRK-Tests mit verschraubten AlMgSi0,5-Platten**

Laut [54] zeigte keine der 18 Schrauben Spannungsrisskorrosion. Die gebrochene Schraube L1 versagte durch einen zähen Gewaltbruch infolge der hohen Torsionsspannung beim Lösen, wobei das Losbrechmoment 15 % höher lag als  $M_A$ . Bei allen anderen Löseversuchen war das Losbrechmoment niedriger als  $M_A$ . Bei dieser Schraube lag ein korrosiver Angriff auf das Gewinde vor, was eine erhöhte Kerbwirkung zur Folge hatte. Die Zugspannungen lagen unter 50 % von  $R_{p0,2}$ .

Im entsprechenden Prüfbericht [54] wurde empfohlen, weitere Versuche mit einem deutlich erhöhten Zugspannungsniveau der Schrauben durchzuführen.

### **3.2.3 SpRK-Tests im Rahmen des FFG-Förderungsprojektes**

Die Dissertation [9] wurde im Rahmen des FFG-Förderungsprojektes 814268 / 13073 erstellt. In dieser Arbeit wurden bereits die wesentlichen Ergebnisse der verschiedenen Spannungsrisskorrosionstests dargestellt. Ergänzend zu dieser Dissertation werden in dieser Diplomarbeit insbesondere die Prüfaufbauten, die Werkstoff- und Wärmebehandlungszustände sowie die Schraubengeometrie und Oberflächenzustände der Prüfschrauben detaillierter beschrieben. In [54] wurde empfohlen, die Zugspannungsniveaus

im SpRK-Test deutlich zu erhöhen. Diese Zugspannungsniveaus sollen in dieser Diplomarbeit detaillierter dargestellt werden.

### 3.2.3.1 Zielsetzungen der weiterführenden SpRK-Tests

Folgende Einflussfaktoren sollen bewertet werden:

- elektrochemisches Potenzial der zu fügenden Werkstoffe
- Wärmebehandlungszustand der EN AW 7075-Schrauben (T6, T7x ...)
- Eigenspannungszustand (schlussgerollt, schlusswärmehandelt)
- Zugspannungsniveau

Ziel ist, eine Empfehlung für einen Werkstoffzustand zu erarbeiten, der das Risiko für SpRK minimiert und notwendige Festigkeitseigenschaften für das Gewindefurchen in gängigen Mg-Legierungen beibehält. Ferner sollen auch kritische Werkstoffzustände aufgezeigt werden.

Abbildung 14 gibt gemäß [31] für eine M8 EN AW 7075 - T79 folgende Daten an: Rm ~ 570 MPa, Rp ~ 470 MPa, Bruchdehnung ~ 6 %. Leider werden in diesem FVA-Abschlussbericht keine Angaben zu den Wärmebehandlungsparametern sowie zur chemischen Zusammensetzung des Drahtes gemacht. Da in diesem FVA-Abschlussbericht Schrauben dieser Festigkeit gemäß Abbildung 15 und 16 im SpRK-Test nicht ausgefallen sind, war das Ziel dieses Tests die Produktion eines ähnlichen Werkstoffzustands und die Definition der Werkstoff- und Wärmebehandlungsparameter.

Eine weitere Orientierungsmöglichkeit bietet ISO 8839.

ISO 8839 [12] definiert für die Legierung ENAW 7075 die Kennzeichnung Al6 mit folgenden mechanischen Eigenschaften: Rm ≥ 510 N/mm<sup>2</sup>, Rp ≥ 440 N/mm<sup>2</sup>, A ≥ 7 %, Zugbruchkraft M8 ≥ 18,67 kN.

### 3.2.3.2 Eigenschaften der EN AW 7075-Prüfschrauben

Die bisher in dieser Diplomarbeit in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 erläuterten SpRK-Tests sind in Tabelle 23 unter Test Nr. 1, 2, 3 und 4 dargestellt, wobei eine ältere Produktions-charge TAPTITE 2000® M8 – EN AW 7075 – T6 von 2004 verwendet wurde.

SpRK-Tests mit Al 7075 - M8 - Schrauben - Febr. 2007											
Test-Nr.	Schraubentyp	Produktionsjahr	Klemmplatten	Einschraubplatte	MA	Verschraubung	Testzeit	Testart	Testtemp.	Versuchsdauer	Ergebnis
1	TT2000 M8-T6-SG	2004	2 x Az91	1 x Az91	15, 20, 25 Nm	furchend	Dez 06	3% NaCl-Lösung	80°C	100 h	keine SpRK
2	TT2000 M8-T6-SG	2004	2 x AlMgSi0,5	1 x AlMgSi0,5	15, 20, 25 Nm	furchend	Jan -Febr. 07	3% NaCl-Lösung	80°C	500 h	keine SpRK
3	TT2000 M8-T6-SG	2004	2 x AlMgSi0,5	1 x AlMgSi0,5	20Nm+65° 20Nm+40° 20Nm+65°	furchend M8 vorgesch. M8 vorgesch.	Mai-Juni07	3% NaCl-Lösung	80°C	500 h	keine SpRK
4	TT2000 M8-T6-SG	2004	2 x AlMgSi0,5	1 x AlMgSi0,5	20Nm+65° 20Nm 15Nm	M8 vorgesch. M8 vorgesch. M8 vorgesch.	Jan -Febr. 07	SSN	80°C	500 h	

**Tabelle 23: Übersichtstabelle SpRK-Tests bis Februar 2007**

Ab August 2007 erfolgte eine Neuproduktion, wobei folgende Zielsetzungen verfolgt wurden:

- I. Bewertung produktionstechnischer Einflussgrößen bei der Schraubenproduktion
- II. Dokumentation und Bewertung der verwendeten Aluminiumwerkstoffe
- III. Verschärfung der Prüfbedingungen, um SpRK zu erzeugen

Zu I.: Im Rahmen der Neuproduktion ab August 2007 wurde eine TAPTITE 2000® M8 x 60 mit Aussentorx gem. der ARNOLD – Z.Nr. G8-06-139 aus der Al-Legierung EN AW – 7075 als neue Prüfschraube definiert, welche in Abbildung 64 dargestellt ist.

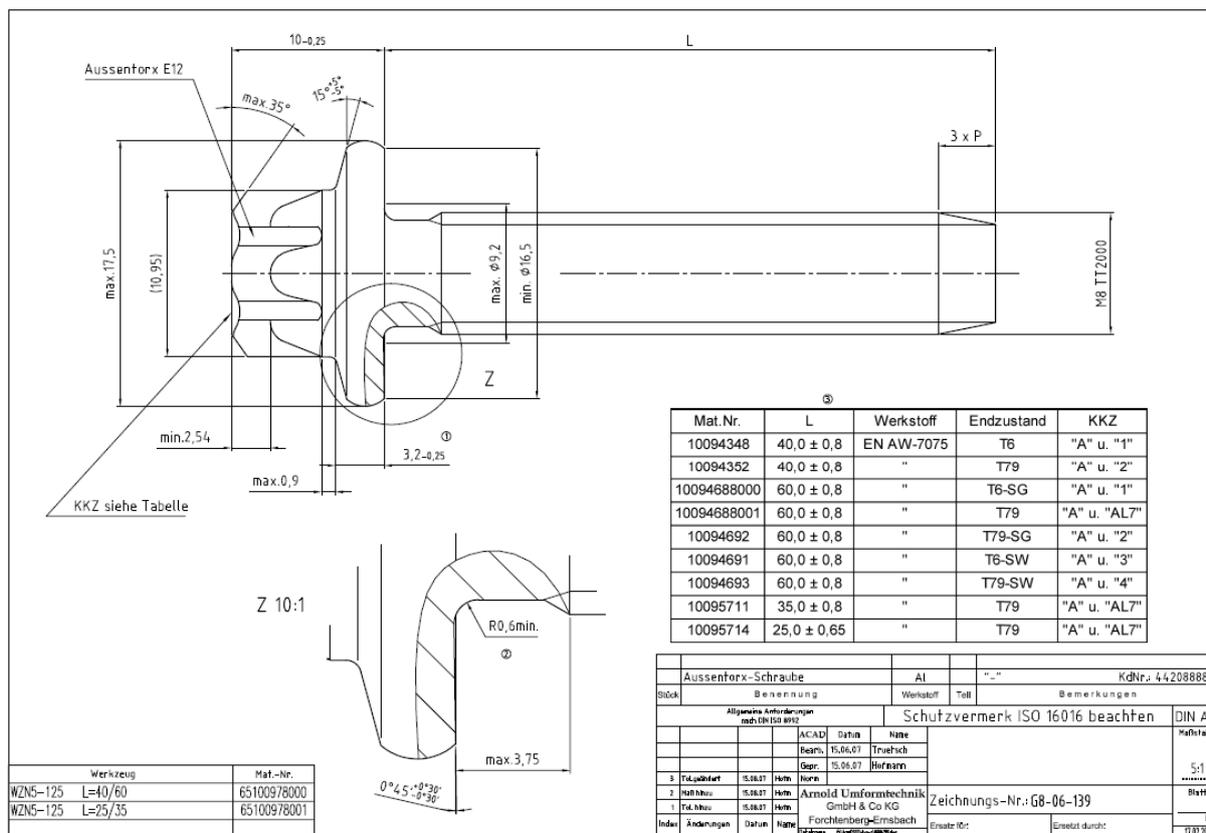


Abbildung 64: Prüfschraube mit Aussentorx für SpRK-Tests ab August 2007

Um Einflussfaktoren wie das Schlussrollen und die Wärmebehandlung bewerten zu können, wurden die Prüfschrauben mit verschiedenen Wärmbehandlungszuständen sowie schlussgerollt und schlusswärmebehandelt produziert. Im Detail wurden folgende Kombinationen des Walzprozesses und der Wärmebehandlungszustände angestrebt:

- T6 – SG
- T6 – SW
- T76 / T79 - SG
- T76 / T79 - SW

Ziel war, einen Schraubenzustand herzustellen, der eine SpRK-Resistenz entsprechend Abbildung 15 (T79 - SG) generiert und Festigkeitseigenschaften wie in Abbildung 14 gezeigt

(RG7 - 7075 = T79 - SG) basierend auf den Untersuchungen vom FVA-Vorhaben [31]. Demnach wären folgende Festigkeitskennwerte für M8 anzustreben:

Rm ~ 570 MPa, Rp ~ 470 MPa, A ~ 6,0 %

Folgende Mindestanforderungen sollten entsprechend der ISO 8839 für M8 erreicht werden:

Rm<sub>min</sub> = 510 MPa, Rp<sub>min</sub> = 440 MPa, A<sub>min</sub> = 7 %, F<sub>Bmin</sub> = 18,67 kN.

### 3.2.3.3 Chemische Zusammensetzung der Versuchsschrauben

Laut Literatur ist auch die chemische Zusammensetzung der jeweiligen EN AW 7075-Legierung bedeutsam. Insbesondere hohe Zink- und Kupferanteile fördern die Empfindlichkeit gegenüber SpRK. Der Drahthersteller gab in seinem Prüfzeugnis folgende chemische Zusammensetzung an:

```

Chargennummer      : 839993-307   Werte in %
Si      Fe      Cu      Mn      Mg      Cr      Zn      Ti
0,06    0,13    1,4    0,02    2,6    0,18    5,8    0,01

Zr      AB      AZ      Al
0,01    max.0,05 max.0,15 Rest

Ihre Artikel-/Sachnummer : 700.64069.000
Unsere Artikelnummer : 19843   Draht EN AW-7075 (AlZn5,5MgCu) EN 573-3,
                               Ringe / max. 50 kg
    
```

**Tabelle 24 Chemische Zusammensetzung der 2007 von AUT gefertigten Prüfschrauben**

Die chemische Zusammensetzung entspricht den Vorgaben für die Legierung EN AW- 7075 gem. DIN EN 573 - 3

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
<b>MIN.</b>	-	-	1,2	-	2,1	0,18	5,1	-	Rest
<b>MAX.</b>	0,4	0,5	2,0	0,30	2,9	0,28	6,1	0,20	

**Tabelle 25 Chemische Zusammensetzung EN AW 7075-Vorgabe gem. DIN 573 – 3 [55]**

In Tabelle 24 ist die chemische Zusammensetzung des Aluminiumdrahtes der TAPTITE 2000® M8 x 60 aufgeführt, welche im SpRK-Test in den Jahren 2007 und 2008 verwendet wurde. Die chemische Zusammensetzung des Drahtes entspricht auch den Vorgaben von EN AW 573 - 3 [55], wobei der Cu-Anteil eher im unteren Drittel und der Zn-Anteil im oberen Drittel lag.

### 3.2.3.4 Prüfkonzept SpRK-Test ab September 2007 bzgl. Schraubenwerkstoffzustand

Ein Teilziel der SpRK-Tests (ab Sept. 2007) war es, den Einfluss des Schraubenwärmebehandlungszustandes auf die SpRK-Empfindlichkeit zu bestimmen. Daher war es erforderlich, die Schrauben in verschiedenen Wärmebehandlungszuständen sowohl im Zustand T6 (T6 = Zustand höchster Festigkeit) als auch im Zustand T7x bzw. T79 (T79 = begrenzt überalterte Zustand) herzustellen. Ferner sollte auch der Einfluss der Fertigungsreihenfolge auf die SpRK-Empfindlichkeit geprüft werden:

- a) Gewindewalzprozess nach der Wärmebehandlung (SG = Schlussgerollt)
- b) Gewindewalzprozess vor der Wärmebehandlung (SW = Schlusswärmebehandelt)

Ab September 2007 wurden gewindenfurchende Schrauben TAPTITE 2000® EN AW 7075 mit Aussentorx gemäß Abbildung 64 in Wärmebehandlungszuständen gemäß Abbildung 65 produziert. Hierzu wurden bei der ARNOLD UMFORMTECHNIK verschiedene Fertigungsaufträge (FEAU) eingelastet.

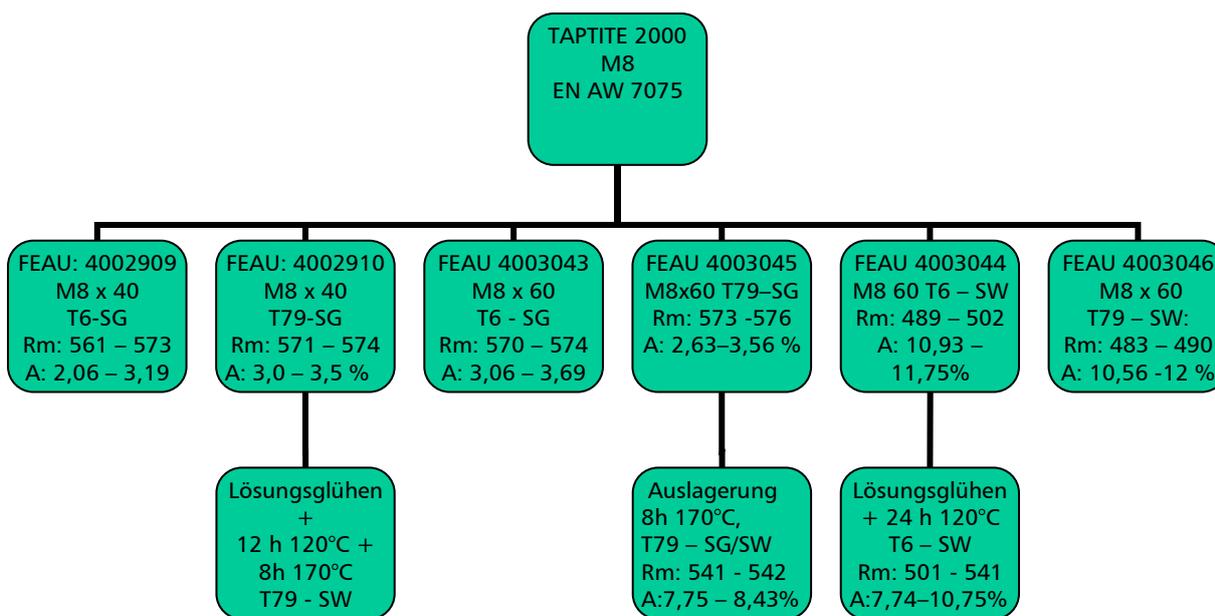


Abbildung 65 Übersicht der Fertigungsaufträge M8 EN AW 7075 für die SpRK-Tests ab 09 / 2007

FEAU	Zustand	SG / SW	T - Lösungs-glügen [°C]	Dauer - L- Glühen [h]	T - Aus-lagern [°C]	Dauer - Auslagern [h]	T - Aus-lagern [°C] (2. Stufe)	Dauer - Aus-lag. [h] (2.St.)	Rm_min [Mpa]	Rm_max [Mpa]	Rp_min [Mpa]	Rp_max [Mpa]	A_min [%]	A_max [%]
alt von 2004	T6	SG	472° +- 3°C	min. 45 Min.	120°C	24 h	/	/						
4003043	T6	SG	472° +- 3°C	min. 45 Min.	120°C	24 h	/	/	570	574	524	532	3,06	3,69
4003044	T6	SW	472° +- 3°C	min. 45 Min.	120°C	24 h	/	/	500	541	444	505	7,44	10,75
4003045	T79	SG	472° +- 3°C	min. 45 Min.	120°C	12 h	170° C	8 h	541	543	486	512	7,75	8,43
4003046	T79	SW	472° +- 3°C	min. 45 Min.	120°C	12 h	170° C	4 h	482	490	417	428	10,56	12,00

Tabelle 26: Einfluss der Wärmebehandlung bei EN AW 7075 M8 x 60 auf Rm, Rp0,2 und A

Die in Abbildung 65 dargestellte M8 x 40 wurde für den SpRK-Test nicht verwendet und daher nicht weiter betrachtet. Im SpRK-Test wurde die TAPTITE 2000® M8 x 60 – EN AW 7075 gem. Tabelle 26 geprüft. Dabei wurden überwiegend Schrauben im Zustand T6 – schlussgerollt (FEAU 4003043) verwendet.

Bei der M8 x 60 - T79 - SG gem. FEAU 4003045 hingegen ist zu bemerken, dass bei der ersten Wärmebehandlung beim externen Dienstleister (Fa. Alte in Plettenberg) ein Fehler passiert ist. Daher wurde bei diesem Fertigungsauftrag eine weitere Warmauslagerung über 8 h bei 170°C (2. Stufe der Warmauslagerung) vorgenommen. Da aber bei dieser 2. Warmauslagerung bereits das Gewinde auf die T79 - SG-Schrauben aufgerollt war, ist denkbar, dass sich möglicherweise die durch den Fertigungsprozess vorliegenden Druckeigenspannungen in der Gewindeoberfläche reduziert haben.

Tabelle 26 zeigt die Zugfestigkeiten ( $R_m$ ) und Streckgrenzen ( $R_p$ ) sowie die Bruchdehnungen ( $A$ ) in Abhängigkeit des Wärmebehandlungszustandes und des Fertigungszustandes (SG / SW) der EN AW 7075-Schrauben. Dabei wird deutlich, dass bei Verwendung von T79 - SG die Zugfestigkeit  $R_{m_{\min}}$  um nur ~ 5% reduziert wurde, jedoch die Bruchdehnung  $A_{\min}$  um ~ 150% erhöht wurde.

### **3.2.3.5 Prüfkonzept SpRK-Test ab September 2007 zur Erfassung des Werkstoffeinflusses des Klemm- und Einschraubteiles (Polarisierung)**

In Tabelle 27 sind die Prüfaufbauten zur Erfassung des Einflusses der verschraubten Bauteile (Polarisierung) auf die SprK mit Beschreibung der Prüfkörper sowie der durchgeführten Testbedingungen dargestellt.

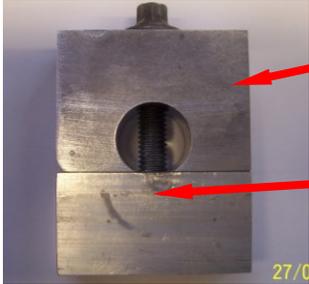
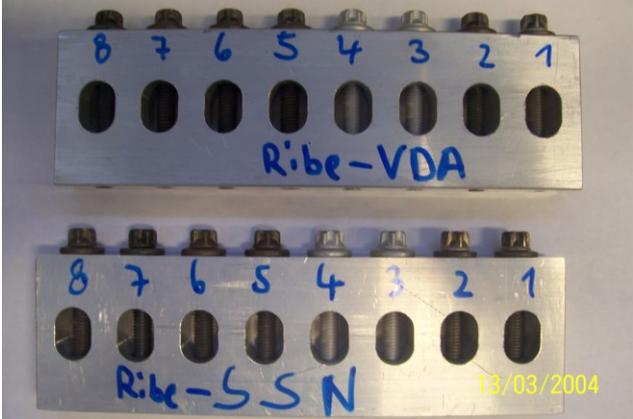
	<p>Prüfkonzept: <b>A2</b>                  Prüfschrauben: 14 x ENAW 7075                  2 x ENAW 6056                  Klemmteil Edelstahl A2 – 1.4301                  Klemmteilmaße: 40 x 40 x 25 mm                  Querlochdurchmesser ~ 20 mm, damit die verspannte Schraube im Dehnbereich mit Salzsprühnebel kontaminiert wird                  Durchgangslochdurchmesser für die TAPTITE 2000-Schraube M8: ~ 9 mm                  Mutter: Edelstahl A2                  Wechselklimatest: VDA 621-415, 1008 h</p>
 <p>Klemmteil AZ91HP                  Einschraubteil: AlMgSi0,5</p>	<p>Prüfkonzept: <b>Mg</b> (16 Prüflinge)                  Prüfschrauben: 14 x ENAW 7075                  2 x ENAW 6056                  Klemmteil: Mg – AZ 91 HP                  35 x 35 x 20 mm, Querlochdurchmesser: 18 mm                  Durchgangslochdurchmesser für M8: 9 mm                  Einschraubteil: AlMgSi5 25 x 35 x 20 mit geschnittenen M8-Innengewinde                  Wechselklimatest: VDA 621-415, 1008 h</p>
	<p>Prüfkonzept: <b>Ribe - SSN / Ribe - VDA</b>                  Klemm- &amp; Einschraubleiste nach Ribe, Werkstoff: AlMgSi0,5,                  Leistenhöhe ~ 60 mm = Schraubenlänge, Leistenbreite ~ 20 mm, Langquerloch: h ~ 20mm, b ~ 14 mm,                  Durchgangslochdurchmesser: oberhalb des Langlochs für M8: ~ 9 mm, Höhe ~20 mm, unterhalb des Langlochs: geschnittenes Gewinde M8 ~ 20 mm tief                  Wechselklimatest: VDA 621-415, 1008 h                  SST: Schrauben 14 x 7075 / 2 x 6056                  Salzsprühnebeltest, 5% NaCl bei 30°C, 1512 h gem. DIN 50021, 14 x 7075</p>
	<p>Prüfkonzept: <b>Al-Block – 80°C</b>                  Alle Platten aus AlMgSi0,5, Dicke je 20 mm, Mittelplatte mit Querbohrung, durch welche warmes Glyzerin gepumpt wurde, damit Prüfkörpertemperatur ~ 80°C                  Prüfumfang 8 Schrauben 7075 – T6                  Salzsprühnebeltest, 5% NaCl bei 30°C,</p>
	<p>Prüfkonzept: <b>VV (Vorversuch)</b>                  Zur Messung der Vorspannkraft mittels Kraftmessdose.                  Ribe-Platte gedreht und in das geschnittene Mutterngewinde M8 verschraubt, wobei die max. möglichen Vorspannkraften gemessen wurden.</p>

Tabelle 27: Prüfkonzepte der SpRK-Tests ab September 2007

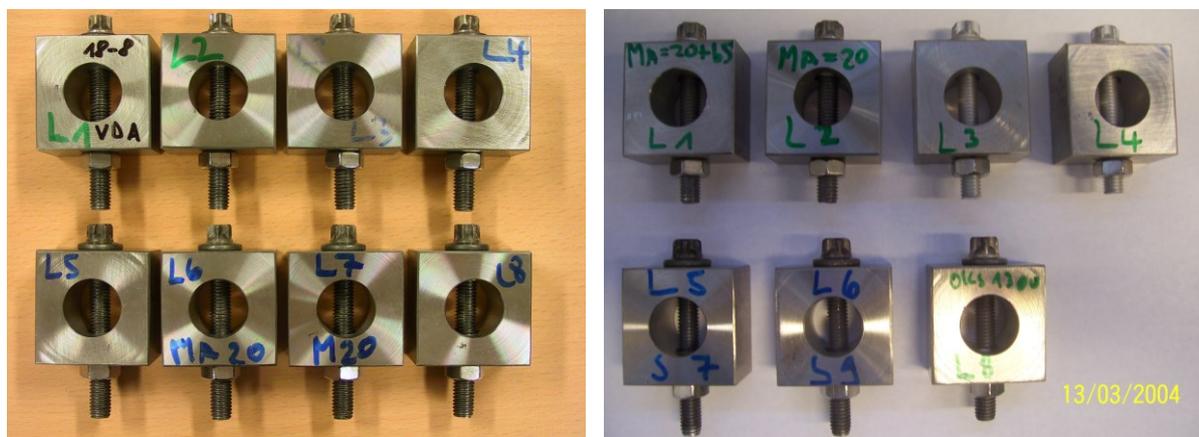
SpRK-Tests mit TT2k M8 EN AW 7075 - Schrauben - Stand 21.01.2008										
Test-Nr.	Schraubentype	Produktionsjahr	Klemmplatten	Einschraubplatte	MA	Verschraubung	Testzeit	Testart	Testtemp.	Versuchsdauer
1	TT2000 M8-T6-SG	2007	AZ91HP	1xAlMgSi0,5	20Nm+ 65°	M8 vorgeschn.	Okt07-Jan08	VDA 621	18°-37°C	min 5 Zyklen
2	TT2000 M8-T6-SG	2007	A2	A2-Mutter	20Nm+ 65° 20 Nm (2Stck)	M8 vorgeschn.	Okt07-Jan08	VDA 621	18°-37°C	min 5 Zyklen
3	TT2000 M8-T6-SG	2007	Ribe-Leiste AlMgSi 0,5		20Nm + 65°	M8 vorgeschn.	Okt07-Jan08	SSN	33°-37°C	min 500 h
4	TT2000 M8-T6-SG	2007	Ribe-Leiste AlMgSi 0,5		20Nm + 65°	M8 vorgeschn.	Okt07-Jan08	VDA 621	18°-37°C	min 5 Zyklen
8	TT2000 M8-T6-SG	2004	2 x AlMgSi0,5	1 x AlMgSi0,5	20Nm+65° 20Nm 15Nm	M8 vorgeschn. M8 vorgeschn. M8 vorgeschn.	Jan -Febr. 07	SSN	80°C	500 h

**Tabelle 28: Planungskonzept der SpRK-Tests ab September 2007**

Tabelle 28 bietet eine Kurzübersicht zum Prüfkörperkonzept mit einer zusätzlichen Darstellung der verwendeten Montagemethode.

### 3.2.3.6 SpRK-Testaufbauten: Prüfkörperkonzept A2

Dieser Aufbau mit Edelstahlrahmen und A2-Muttern wurde als eher nicht praxisrelevanter Verbaufall gewählt, welcher jedoch Aufschluss über die Korrosionsmechanismen geben soll. Sollten bei diesem Aufbau mehrere Schrauben aus der Legierung EN AW 7075 brechen, dann wäre die anodische Auflösung an den Korngrenzen ein wesentlicher SpRK-Mechanismus.



**Abbildung 66 a) Prüfkörperkonzept A2 M8 7075-T6 (TT2k von 2004) b) Prüfkörperkonzept A2 (TT2k von 2007)**

Die Montage der Prüfkörper erfolgte am 27.08.07 und am 10.01.08.

Die SpRK-Tests mit dem Prüfkörperkonzept A2 wurden mit TAPTITE 2000® EN AW 7075 durchgeführt:

- T6 - SG + Gleitmittel OKS 1300 (alte Fertigungsauftrag von 2004) (s. Abbildung 66 a)
- neuer Fertigungsauftrag von 2007 (s. Abbildung 66 b)

Zur Festlegung der Anziehvorschrift der TAPTITE 2000® M8 x 60 – T6 – SG aus der Fertigungscharge von 2004 erfolgte zunächst ein zerstörender Vorversuch (Überdrehtest) entsprechend dem Prüfkörperkonzept A2. Abbildung 67 zeigt die graphische Darstellung des Drehmoments über Drehwinkel (Überdrehversuch) einer exemplarischen Verschraubung.

Beim Brechen der Schraube wurde ein Schraubenbruchmoment von  $M_B = 31,9 \text{ Nm}$  gemessen. Die Cursorposition ( $M_{Rp}$ ) entspricht der Anziehvorschrift  $M_A = 20 \text{ Nm} + 65$ , wobei ein  $M_A = 25,19 \text{ Nm}$  erreicht wurde. Dabei ist die Schraubenstreckgrenze bereits leicht überschritten worden. Diese Anziehvorschrift wird für die Prüfaufbauten „A2“ gem. Tabelle 29 (L1 bis L5 und L8) verwendet.

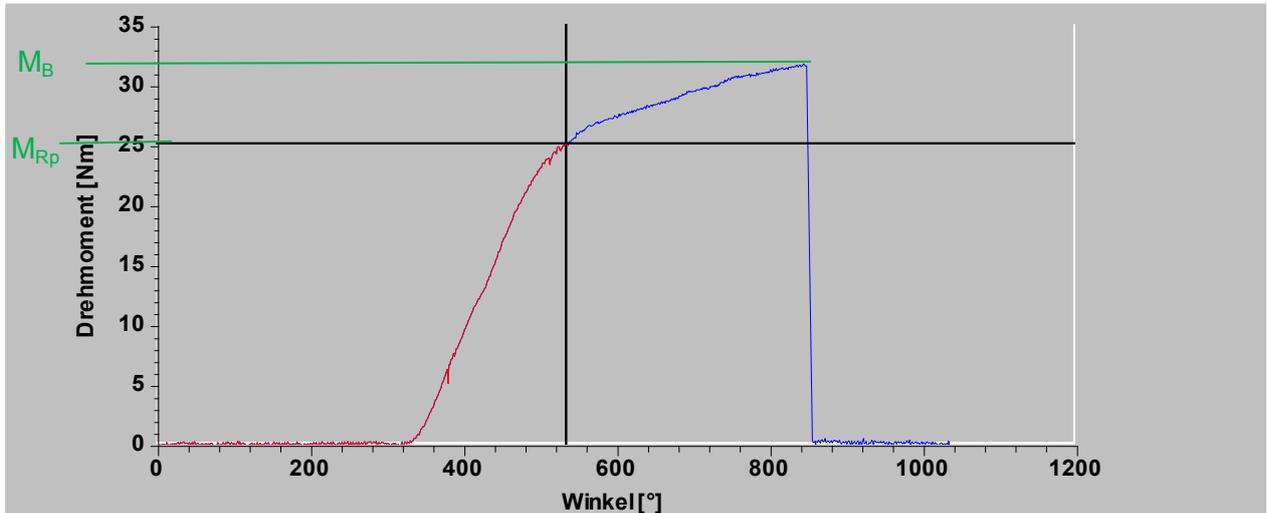


Abbildung 67: Überdrehtest TAPTITE 2000® M8 x 60 – ENAW 7075 – T6 im Prüfaufbau A2

Lediglich bei L6 und L7 (Tabelle 29) erfolgte eine drehmomentgesteuerte Montage mit  $M_A \sim 20 \text{ Nm}$  (entsprechend  $\sim 80 - 90\%$  von  $Rp02$ ).

		Taptite 2000 M8 x60-AI7075-T6 in vorgeschchnittenes Gewinde M8 in A2 Mutter mit A2-Klemmteil								
Io-I1: 04.09.07	Ref.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8*	
MA [Nm]		27,75	25,92	26,625	26,72	27,28	20	20	26,156	
Lo bei RT ohne Fv	0,000	0,052	0,189	0,185	0,224	0,241	0,151	0,195	0,086	
L1 sofort nach MA	0	0,416	0,569	0,538	0,576	0,610	0,351	0,427	0,155	
L1 - Lo (RT) (Messende)		0,364	0,380	0,353	0,352	0,369	0,200	0,232	0,069	
Fv nach MA (RT) [N]		18408,285	19217,440	17851,990	17801,418	18661,146	10114,442	11732,753	3489,483	

Tabelle 29  $M_A$  und Schraubenverlängerung, Prüfkörper A2, TAPTITE 2000® - T6 - SG von 2004

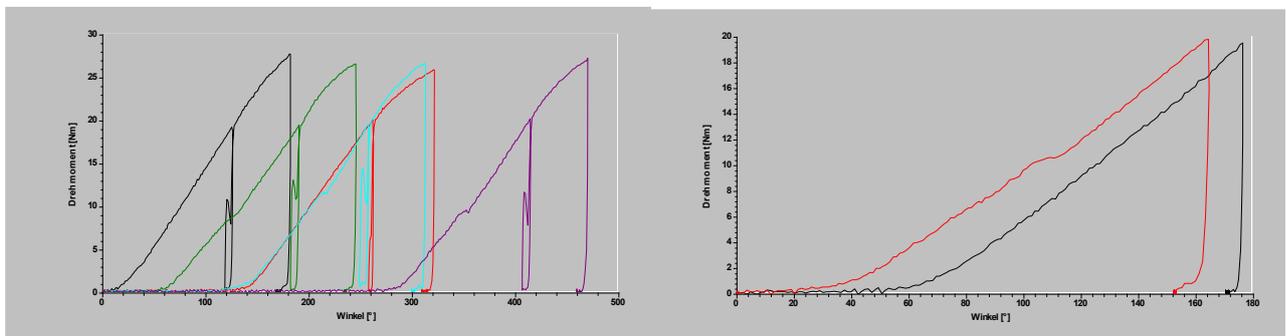


Abbildung 68 a) Drehmomentkurven zu Tab. 29: L1 – L5 b) Tab. 29: Drehmomentkurven L6, L7

Die Abbildungen 68 a) und b) zeigen die Drehmomentkurven zur Dokumentation des Anziehmomentes  $M_A$  (zu Tabelle 29).

Ab Juli 2007 folgte eine Schraubenneuproduktion TAPTITE 2000® M8 x 60 – EN AW 7075 gemäß Abbildung 65 und Tabelle 26 in den Wärmebehandlungszuständen T6 und T7x (begrenzt überaltert). Ferner wurden 2007 auch Schrauben mit verschiedenen Eigenspannungszuständen durch Schlussrollen (SG) und Schlusswärmebehandlung (SW) gefertigt.

Die Dokumentation der Prüfkörpermontage mit den in 2007 hergestellten TT2k (Konzept A2) erfolgt in Tabelle 30.

	M8 A17075 in vorgeschrittenes Gewinde M8 in A2 Mutter mit A2-Klemmteil							
Io-I1: 04.09.07	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
Schraubentype	S 1	S1	S2	S2	S7	S4	S5	S6
MA [Nm] -SpRK-Test	29,06	19,87	24,19	28,08	26,11	23,34		21,47

MA = 20Nm + 65° - Gewinde M8 vorgeschritten

MA = 20Nm - Gewinde M8 vorgeschritten

**Tabelle 30: Prüfkonzept A2, Anziehungsmomente 7075-Schrauben von 2007**

Beim Prüfkörperkonzept wurden TT2k® EN AW – 7075-Schrauben gemäß Tabelle 31 verwendet. Dabei wurden von der TU Darmstadt auch 3 Schrauben (Type S1 und S6) im T6-Zustand mit einer Prüfkörperdarstellung entsprechend der Abbildung 66 b) verbaut.

Type	Schraube	Ausl.	letzer AG	Ofl	Hersteller/Quelle
S1	M8x55	T6	?	blank	TU-Darmstadt
S2	TT2K M8x60	T6	SG	OKS1700	AUT neu Prod.
S3	TT2K M8x60	T6	SW	blank	AUT-neue Prod.
S4	TT2K M8x60	T6	SW	OKS1300	AUT-neue Prod.
S5	TT2K M8x60	T6	SG	OKS1300	AUT-neue Prod.
S6	M8x55	T6	?	OKS1300	TU-Darmstadt
S7	TT2K M8x60	T79	SG		AUT-neue Prod.
S8	TT2K M8x60	T79	SW	blank	AUT-neue Prod.
S9	TT2K M8x60	T79	SW	OKS1300	AUT-neue Prod.

**SG = Schlussgerollt**

**SW = Schlusswärmebehandelt**

**Tabelle 31: Prüfkonzept A2, Schraubentypen (neue Produktion 2007 & TU Darmstadt)**

Tabelle 32 zeigt exemplarisch 3 Drehmomentkurven, welche zu den Schrauben in den Tabellen 30 und 31 gehören.

Aus der nachfolgenden Tabelle 32 ist erkennbar, dass alle Schrauben  $R_{p0,2}$  erreicht bzw. überschritten haben, wobei bei L6 (T79-SW) das Anziehungsmoment mit  $M_A = 23,34$  Nm etwas niedriger liegt (nach  $M_A = 20$  Nm + 65°).

	<p>Zu Tabelle 30 / 31 L3 (T6 - SG) <math>M_A = 24,19 \text{ Nm}</math> FEAU: 4003043</p>
	<p>Zu Tabelle 30 / 31 L5 (T79 - SG) <math>M_A = 26,11 \text{ Nm}</math> FEAU: 4003045</p>
	<p>Zu Tabelle 30 / 31 L6 (T79 - SW) <math>M_A = 23,34 \text{ Nm}</math> FEAU: 4003046</p>

Tabelle 32: Drehmomentgraphen, Prüfkonzept A2, (TT2k<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 Produktion 2007)

### 3.2.3.7 SpRK-Testaufbauten: Prüfkörperkonzept Mg

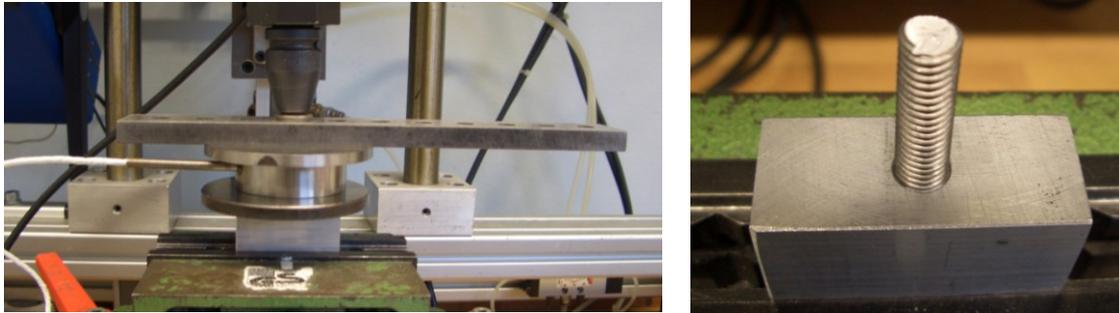
Dieser Aufbau mit einem Mg-Klemmteil (AZ 91) wurde als praxisrelevanter Aufbau gewählt. Ziel war die Verwendung hochfester TT2k<sup>®</sup> EN AW 7075 für Magnesiumgetriebegehäuse. Dabei wirkt bei diesem Prüfkörperkonzept unter dem Schraubenkopf ein ähnliches elektrochemisches Potenzial wie bei der Mg-Getriebegehäuseverschraubung.



Abbildung 69: a) Prüfkonzept Mg TT2k<sup>®</sup> EN AW 7075 von 2004 b) TT2k<sup>®</sup> von Jan. 2008

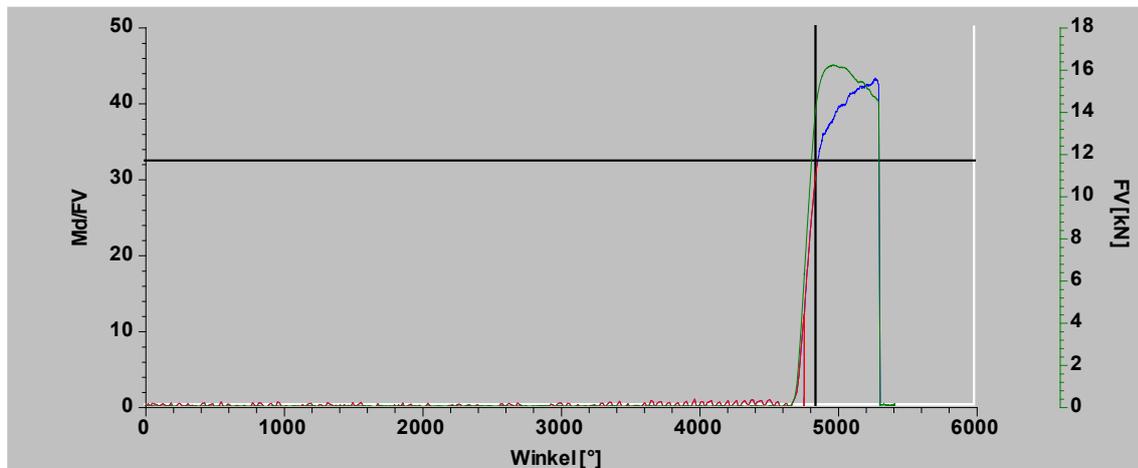
Als Einschraubteil wurde ein Aluklotz mit geschnittenem M6-Innengewinde gewählt, um die Vorspannkraftrelaxation auf geringem Niveau zu halten.

Mit den verschiedenen Schraubentypen sind bei AUT vorab Einschraubversuche durchgeführt worden, um die Vorspannkraftniveaus abzuschätzen.



**Abbildung 70: Vorspannkraft-Messung mit Kraftmessdose in Al-Klotz bis Schraubenbruch**

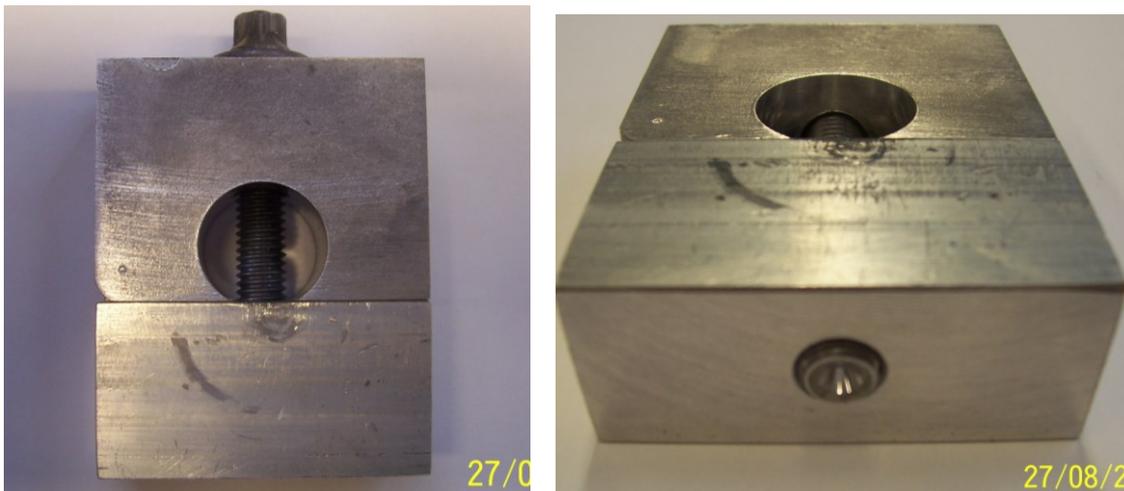
In Abbildung 70 wird mittels Kraftmessdose und geschliffener Beilegscheibe gemessen, welche Vorspannkraft bei der Verschraubung in ein vorgeschliffenes M8-Gewinde eines Al-Klotz an der Schraubenstreckgrenze  $R_{p0,2}$  sowie beim Schraubenbruch generiert werden können.



**Abbildung 71: Graphische Darstellung der Drehmoment- & Vorspannkraftmessung**

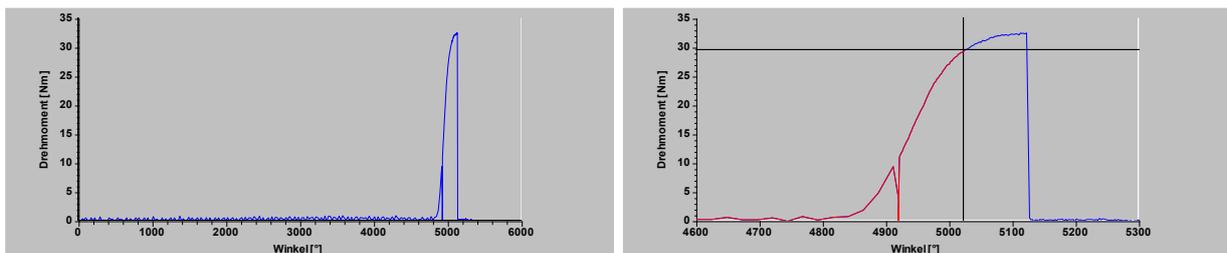
Abbildung 71 zeigte die Messung mit Prüfaufbau gemäß Abbildung 70 der TT2k<sup>®</sup> M8 x 60 EN AW 7075 - T6 - SG – FEAU 4003043. Die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  wurde bei 20 Nm + 65° mit einer Vorspannkraft  $F_{V_{Rp}} \sim 14,8$  kN erreicht. Ferner wurde die Bruchkraft  $F_B \sim 16,23$  kN mit Bruchmoment  $M_B = 44,4$  Nm gemessen.

Ein weiterer Überdrehtest erfolgte später im Originalaufbau entsprechend der Abbildung 72.



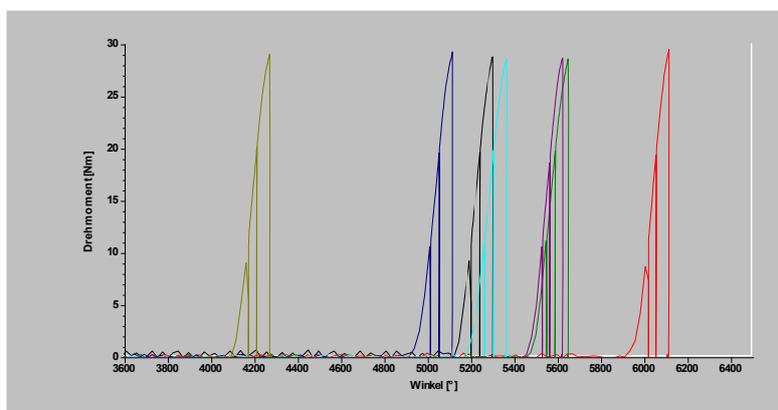
**Abbildung 72: Prüfkonzept Mg: Mg-Klemmteil und Al-Einschraubteil**

Abbildung 73 zeigt einen exemplarischen Drehmomentgraph vom Überdrehversuch beim Prüfaufbau entsprechend der Abbildung 72. Die dazugehörigen Anziehmomente und Verlängerungen werden in Tabelle 33 dokumentiert.



**Abbildung 73 a): Drehmomentgraph Überdrehtest b) Cursor 20Nm + 65° (Abbildung 73 / Tabelle 33)**

In Abbildung 73 b) werden die letzten 700° der Abreißkurve dargestellt. Der Cursor wurde an 20Nm + 65° positioniert. Es ist klar erkennbar, dass bei dieser Anziehvorschrift  $M_A = 20 \text{ Nm} + 65^\circ$  die Schraubenstreckgrenze deutlich überschritten wurde.



**Abbildung 74: 7 Drehmomentgraphen bei der Montage  $M_A = 20 \text{ Nm} + 65^\circ$  zu Tabelle 33**

		Bestimmung der Relaxation bei Schraubenverbindungen nach der Längenmeßmethode							
		TAPTITE 2000 M8x60-AI7075-T6 in vorgeschchnittenes Gewinde M8 in AlMgSi0,5 mit AZ91-Klemmteil							
lo-I1: 27.08.07	Ref.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
MA [Nm]		28,83	29,53	28,64	28,64	28,69	29,3	28,64	29,06
Lo bei RT ohne Fv	0,000	0,198	0,205	0,289	0,022	0,116	0,112	0,478	0,338
L1 sofort nach MA	0	0,520	0,480	0,625	0,344	0,414	0,434	0,792	0,664
L1 - Lo (RT) (Messende)		0,322	0,275	0,336	0,322	0,298	0,322	0,314	0,326
Fv nach MA (RT) [N]		18696,818	15967,780	19509,723	18696,818	17303,267	18696,818	18232,301	18929,077

**Tabelle 33: Anziehdrehmomente und Montagevorspannkkräfte über Verlängerung, TT2k® von 2004**

Tabelle 33 zeigt die gemessenen Anziehdrehmomente ( $M_A$ ) sowie die Schraubenverlängerung infolge  $M_A$  sowie die entsprechend der Formel 24 umgerechneten Montagevorspannkkräfte.

Auffällig ist, dass die die in Tabelle 33 aus der Verlängerung umgerechneten Vorspannkkräfte im Vergleich zu den Messungen mit der Kraftmeßdose gemäß Abbildung 70 relativ hoch erscheinen. Vermutlich ist für diese Abweichung eine plastische Verlängerung nach der überelastischen Anziehvorschrift ursächlich.

Plausibel sind daher eher die mit der Kraftmessdose gemessenen Montagevorspannkkräfte von ca. 15 kN, zumal die in Tabelle 29 ausgewiesenen Vorspannkkräfte bereits fast auf dem Niveau der Zugbruchkräfte (ohne Torsion) liegen. Die große Verlängerung bis zu 0,336 mm lässt auf eine plastische Verlängerung der Schrauben schließen. Formel 24 gilt aber nur für den elastischen Bereich. Einen finalen Aufschluss über eine plastische Schraubenverlängerung hätte eine Schraubenrestlängenmessung nach der Demontage der Prüfkörper gegeben. Wegens des heftigen korrossiven Angriffs auf die Schrauben waren diese Messungen aber nicht mehr möglich.

Ferner wurden Prüfkörper (Konzept Mg) mit ENAW 7075-Schrauben aus der Produktionscharge von 2007 aufgebaut.

	M8- Al7075 in vorgeschn. Gewinde M8 in AlMgSi0,5 mit Az91-Klemmteil									
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Schraubentype	S 1	S1	S2	S2	S3	S4	S5	S6	S8	S9
Bezeichnung bei SpRK	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8		
MA [Nm] - SpRK	29	19,31	26,34	26,3	26,06	21,14	27,23	19,69		
MA1 bei Fv1 (Sensor) [Nm]	40,45		43,36		39,84	35,34	42,28		38,53	34,31
MA2 bei Fv2 (Sensor) [Nm]	40,12					35,72	43,31		39,47	34,08
Fv1 [kN]-Mess.-Sensor	7,89		16,23		7,95	13,47	17,02		6,96	9,93
Fv2 [kN]-Mess.-Sensor	7,61					10,46	16,37		6,99	12,82

MA = 20Nm + 65° - Gewinde M8 vorgeschritten  
 MA = 20 Nm  
 Abreisstest mit St-Klemmpl.

**Tabelle 34 Montage TT2k T6 / T7 (Schraubenfertigung 07): MA u. Verlängerung-Konzept Mg**

Tabelle 35 stellt die Drehmomentkurven zu den Verschraubungen entsprechend der Tabelle 34 dar, wobei deutlich erkennbar ist, dass die Schrauben bereit überelastisch montiert wurden. Die Schraubentypen in Tabelle 34 werden in Tabelle 31 detaillierter beschrieben.

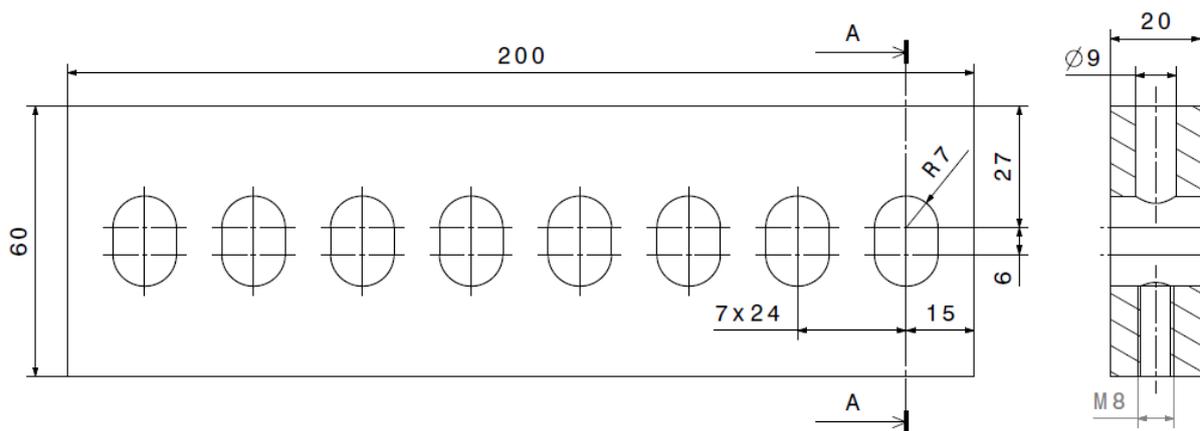
	<p>Zu Tabelle 34: L3 (T6-SG) MA = 26,34 Nm FEAU: 4003043</p>
	<p>Zu Tabelle 34: L4 (T6-SG) MA = 26,3 Nm FEAU: 4003043</p>

**Tabelle 35: Drehmomentkurven Prüfkonzept Mg, Schraubentypen (neue Produktion 2007)**

**3.2.3.8 SpRK-Testaufbauten Prüfkörperkonzept Ribe – SSN / Ribe – VDA**

Auch für die Verschraubung von Aluminiumkomponenten bieten sich hochfeste Aluminiumschrauben an. Bei den Furchschrauben EN AW 7075 - T6 kann es bereits während des Furchprozesses in Al zu Plastifizierungen der Gewindeflanken kommen. In solchen Fällen würde sich dann ggf. der Einsatz metrischer Schrauben EN AW 7075 in vorgefertigte Mutterngewinde anbieten.

Bei der Verschraubung der Al-Leisten (Konzept nach Ribe) würde ein ähnliches elektrochemisches Potenzial vorliegen wie bei der Verschraubung von Aluminiumkomponenten.



**Abbildung 75: Prüfkonzept Ribe-SSN / Ribe-VDA, Zeichnung der AlMgSi0,5-Prüfleiste**

In die Prüfleisten entsprechend der Abbildung 75 wurden M8-Innengewinde geschnitten, damit die TAPTITE 2000® eine möglichst hohe Zugspannung bei der überelastischen Montage generieren.

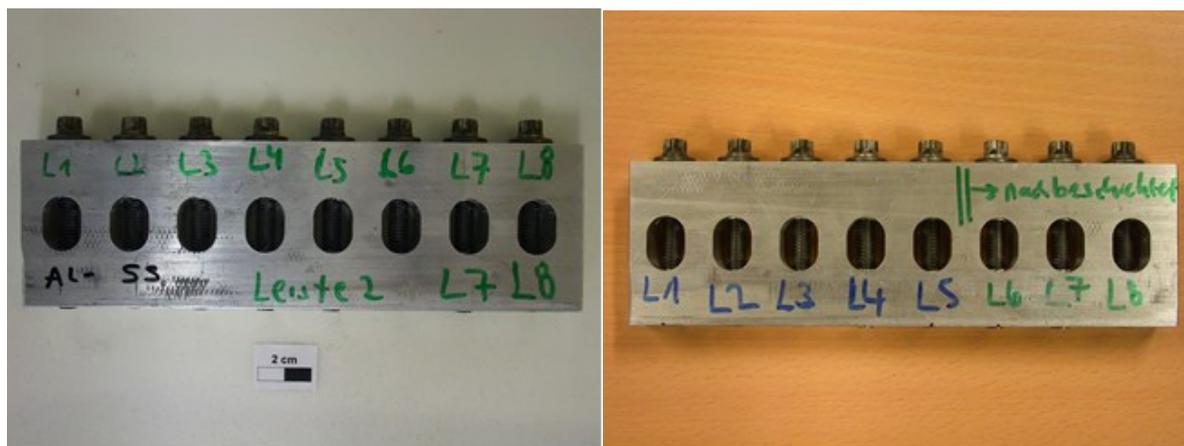


Abbildung 76: a) Prüfkonzept Ribe 7075-T6-SG von 2004      b) SpRK-Test Jan 2008

Wie bei den Prüfkonzepten A2 und Mg werden auch beim Konzept Ribe sowohl Schrauben aus der alten Fertigungscharge von 2004 TT2K<sup>®</sup> - EN AW 7075 - T6 als auch Schrauben aus der Fertigung von 2007 in verschiedenen Zuständen verbaut. Die Prüfleisten wurden für Ribe-SSN (Salzsprühnebeltest nach DIN 50021) und für Ribe-VDA (VDA - Wechselklimatest nach VDA 621 - 415) aufgebaut.

Zunächst wurden basierend auf dem Prüfkonzept VV (Vorversuch) wieder zerstörende Versuche vorgenommen, um die Vorspannkräfte der Schrauben zu messen.

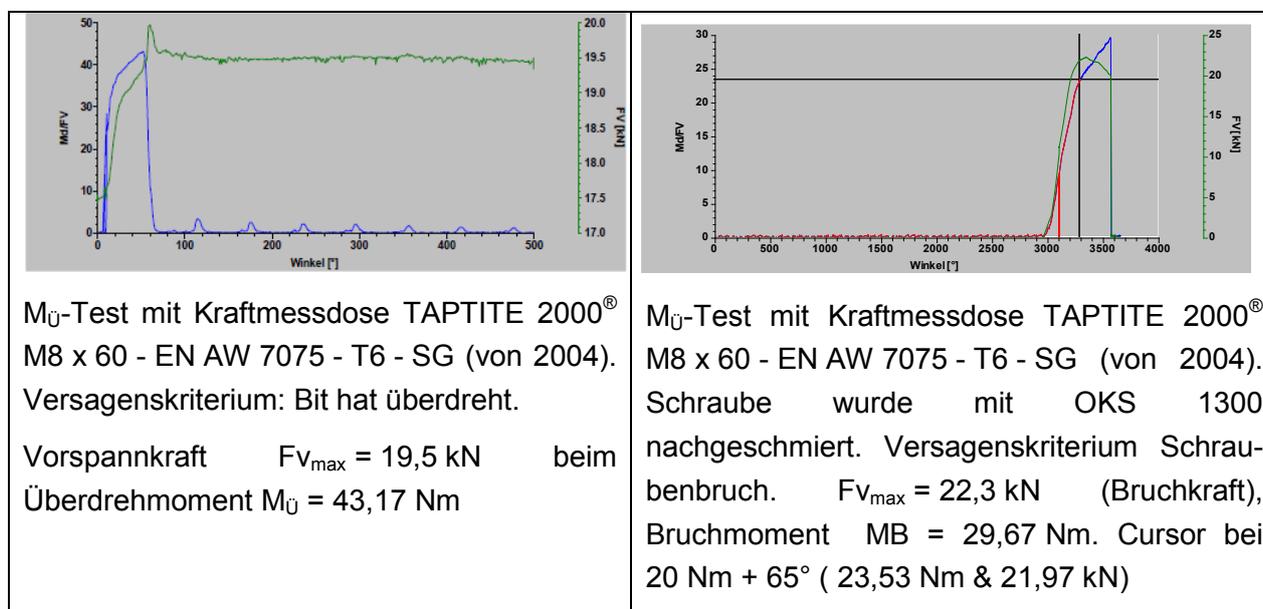


Abbildung 77: Prüfkonzept VV (Ribe-Al-Leiste mit Kraftmessdose, vgl. Tabelle 27)

Durch die intensive Nachschmierung mit OKS 1300 (Abbildung 79 rechts) konnte eine derart hohe Vorspannkraft realisiert werden, dass das Versagemoment um ~ 13 Nm reduziert wurde und dabei extrem hohe Bruchkräfte realisiert wurden.

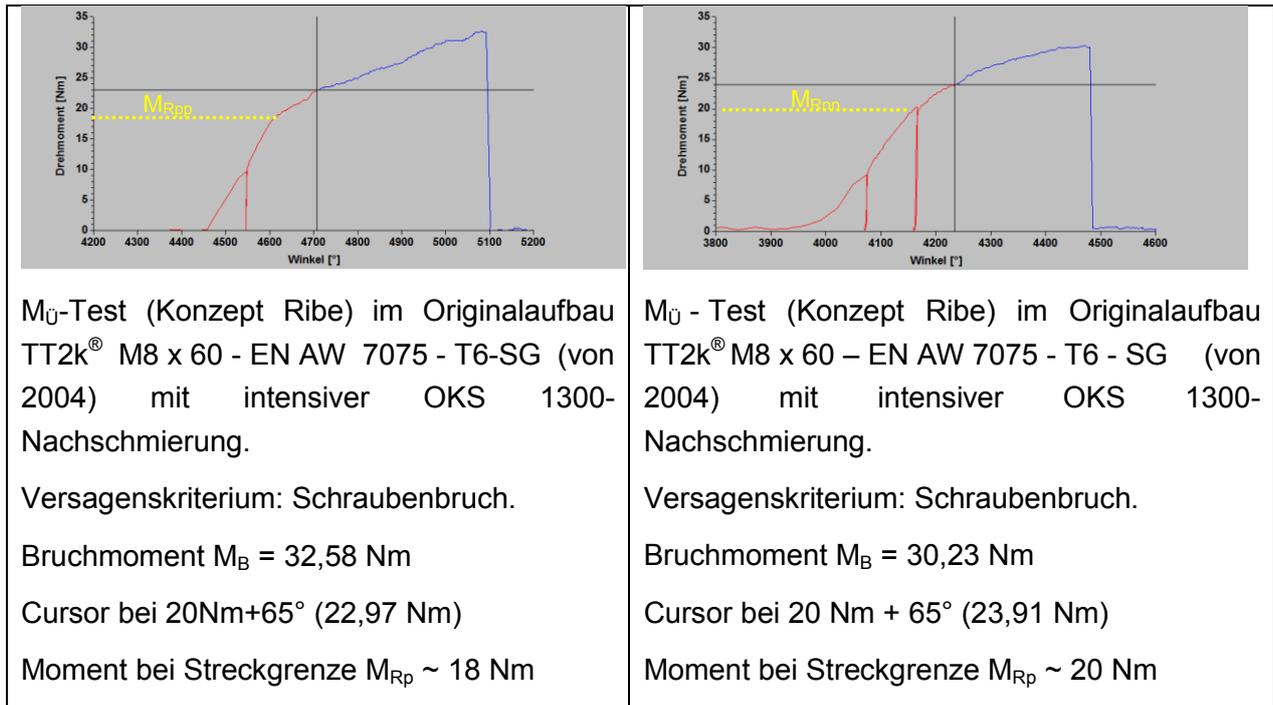


Abbildung 78: Prüfkonzert Ribe-VDA / Ribe-SSN, Überdrehversuch im Originalaufbau

Die Dokumentation der für die Prüfaufbauten Ribe – VDA verwendeten TAPTITE 2000® EN AW 7075 - T6 - SG (Produktionscharge von 2004) erfolgt in Tabelle 36. Die Schrauben L6, L7 und L8 wurden manuell intensiv mit OKS 1300 nachbeschichtet, wodurch eine deutlich größere Schraubenverlängerung nach der Montage auftrat und somit auch höhere Vorspannkräfte erreicht wurden.

Bestimmung der Relaxation bei Schraubenverbindungen nach der Längenmeßmethode									
Taptite 2000 M8 x60-Al7075 OKS-Nachbesch in vorgeschrittenes Gewinde AlMgSi0,5 Klemmleiste Ribe: Leiste 1									
lo-11: 05.09.2007	Ref.)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
MA [Nm]		34,92		40,78	36,47	37,08	23,63	25,08	25,97
Lo bei RT ohne Fv	0,000	0,264	0,137	0,040	0,181	0,044	0,153	0,314	0,147
L1 sofort nach MA	0	0,527	0,393	0,301	0,418	0,344	0,637	0,690	0,471
L1 - Lo (RT) (Messende)	-0,02	0,263	0,256	0,261	0,237	0,300	0,484	0,376	0,324
Fv nach MA (RT) [N]		13373,678	13017,724	13271,977	12051,565	15255,146	24611,635	19119,783	16475,557

MA = 20Nm + 65° - Gewinde M8 vorgeschritten  
 MA = 20Nm + 65° - Gewinde M8 -vorgeschritten, mit extrem-OKS1300 -Nachbeschichtung

Tabelle 36: Dokumentation MA & ΔL Prüfkonzert Ribe-VDA, Schraubenproduktion 2004

Tabelle 37 dokumentiert die zu Tabelle 36 zugehörigen Drehmomentkurven.

	<p>Drehmomentkurven TT2k<sup>®</sup> M8 x 60 EN AW 7075 - T6 L1 – L5 (ohne zusätzliche Nachschmierung mit OKS 1300) <math>M_A = 20 \text{ Nm} + 65^\circ</math> (Abschaltmoment &gt; 34,9Nm)</p>
	<p>Drehmomentkurven TT2k<sup>®</sup> M8 x 60 EN AW 7075 - T6 L6 (mit zusätzlicher Nachschmierung mit OKS 1300) <math>M_A = 20 \text{ Nm} + 65^\circ</math> (Abschaltmoment= 23,6 Nm)</p>
	<p>Drehmomentkurven TT2k<sup>®</sup> M8 x 60 EN AW 7075 - T6 L7 (mit zusätzlicher Nachschmierung mit OKS 1300) <math>M_A = 20 \text{ Nm} + 65^\circ</math> (Abschaltmoment= 25,9 Nm)</p>

**Tabelle 37: Drehmomentkurven Ribe-VDA zu Tabelle 36 (Schraubenproduktion 2004)**

Aus Tabelle 37 ist erkennbar, dass bei L6 und L7 die Schraubenstreckgrenze überschritten wurde, was bei L1 und L5 noch nicht der Fall war.

Die Prüfkörpermontage entsprechend dem Konzept Ribe – SSN wird in Tabelle 38 beschrieben.

Bestimmung der Relaxation bei Schraubenverbindungen nach der Längenmeßmethode									
Taptite 2000 M8 x60-AI7075 in vorgeschrittenes Gewinde AlMgSi0,5 Klemmleiste Ribe: Leiste 2 - SSN - Test									
Io-I1: 29.08.07	Ref.)	L1*	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
MA		25,78	26,62	23,25	22,78	23,72	39,14	33,14	34,69
Lo bei RT ohne Fv	0,000	0,274	0,118	0,145	0,305	0,325	0,137	0,348	0,234
L1 sofort nach MA	0	0,890	0,475	0,636	0,721	0,793	0,411	0,648	0,534
L1 - Lo (RT) (Messende)	-0,02	0,616	0,357	0,491	0,416	0,468	0,274	0,300	0,300
Fv nach MA (RT) [N]		31323,899	18153,623	24967,588	21153,802	23798,027	13933,033	15255,146	15255,146

MA = 20Nm + 60° - Gewinde M8 vorgeschritten, TT2k extrem OKS1300-nachbeschichtet

L1\*: MA = 20 Nm + 120°

MA = 20Nm + 60° - Gewinde M8 -vorgeschritten, ohne Nachbeschichtung

**Tabelle 38: Dokumentation MA & ΔL Prüfkonzept Ribe-SSN, Schraubentypen (Produktion 2004)**

Tabelle 39 stellt die Drehmomentkurven zum Konzept Ribe-SSN gemäß Tabelle 38 dar.

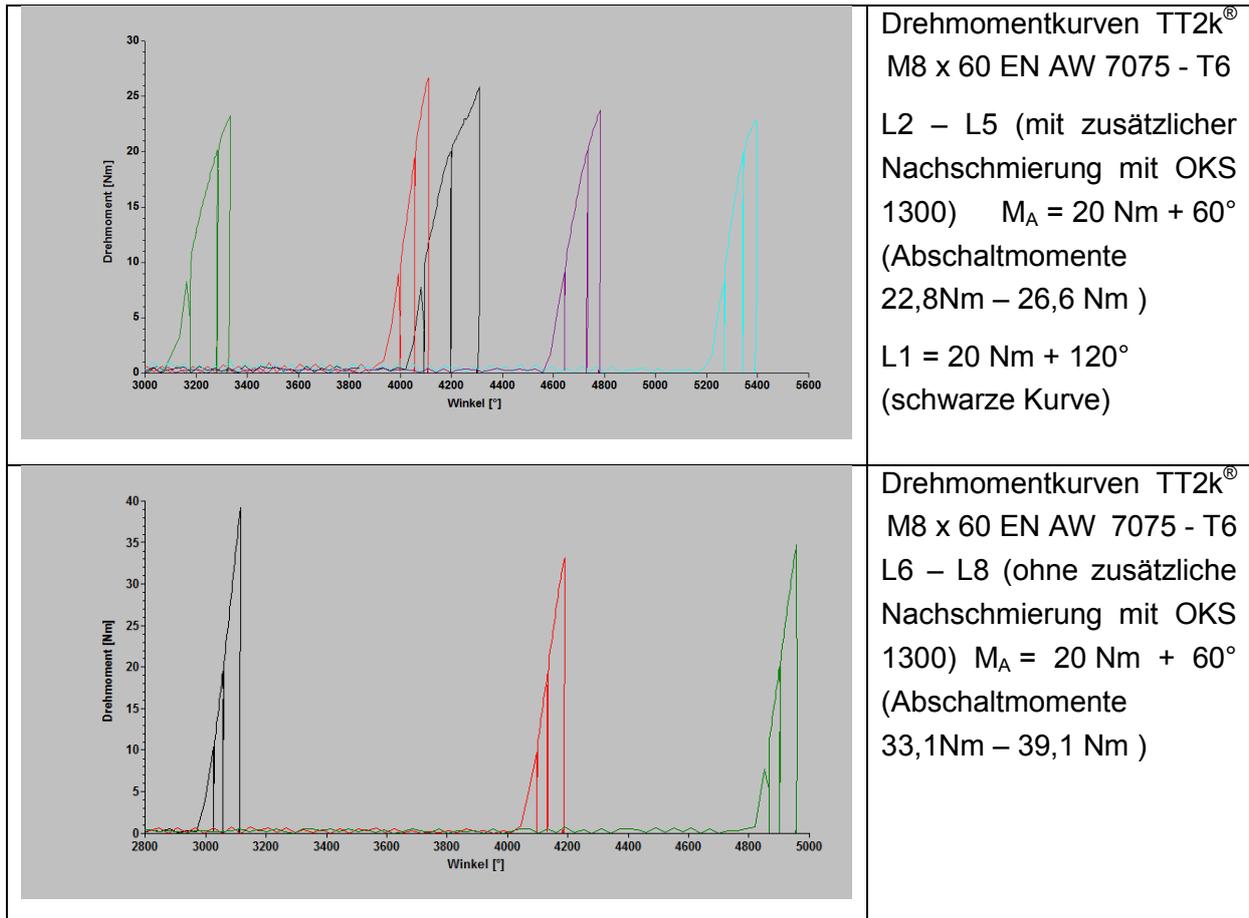


Tabelle 39: Drehmomentkurven-Konzept Ribe - SSN zu Tabelle 38 (Schraubenproduktion 2004)

Für weitere Aufbauten mit den „Ribe-Leisten“ wurden neben den 2004 produzierten TAPTITE 2000<sup>®</sup> EN AW 7075 – T6 – SG die 2007 produzierten TAPTITE 2000<sup>®</sup> EN AW 7075 in den Zuständen T6, T7x, SG (schlussgerollt) und SW (schlusswärmebehandelt) verwendet.

Type	Schraube	Ausl.	letzter AG	Offl.	Hersteller/Quelle
S1	M8x55	T6	?	blank	TU-Darmstadt
S2	TT2K M8x60	T6	SG	OKS1700	AUT neu Prod.
S3	TT2K M8x60	T6	SW	blank	AUT-neue Prod.
S4	TT2K M8x60	T6	SW	OKS1300	AUT-neue Prod.
S5	TT2K M8x60	T6	SG	OKS1300	AUT-neue Prod.
S6	M8x55	T6	?	OKS1300	TU-Darmstadt
S7	TT2K M8x60	T79	SG		AUT-neue Prod.
S8	TT2K M8x60	T79	SW	blank	AUT-neue Prod.
S9	TT2K M8x60	T79	SW	OKS1300	AUT-neue Prod.

SG = Schlussgerollt  
SW = Schlusswärmebehandelt

13/03/2004

Tabelle 40 a) Prüfaufbauten

b) Schraubentypbeschreibung (Schraubenproduktion 07)

Tabelle 41 dokumentiert die für den Prüfaufbau Ribe – SSN verwendeten Anziehmomente entsprechend der Anziehvorschrift  $M_A = 20 \text{ Nm} + 65^\circ$ , wobei sich Abschaltmomente der Schraubspindel zwischen 23,39 Nm – 50,06 Nm ergeben haben. Diese hohe Varianz der Anziehdrehmomente ist darauf zurückzuführen, dass Schrauben in verschiedenen Festigkeits- und Oberflächenzuständen (geschmiert und ungeschmiert) verschraubt wurden. Ferner wurden entsprechend dem Prüfkonzept VV gemäß Tabelle 27 Vorspannkraftmessungen mit Kraftmessdose durchgeführt. Im Zustand S2 (T6 - SG + Gleitmittel OKS 1700) wurden beispielsweise Montagevorspannkraften  $F_v = 13,72 \text{ kN}$  und  $14,46 \text{ kN}$  nach  $MA \sim 20\text{Nm} + 65^\circ$  gemessen. Im Zustand S7 (T7x - SG) ergab eine Messung  $13,68 \text{ kN}$ .

M8-Al7075 in vorgeschn. Gewinde AlMgSi0,5 - Ribe: Leiste 1 - SSN - Test								
Versuch-Nr.	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
Schraubentype	S 1	S6	S2	S2	S4	S3	S7	S8
MA - SpRK-Test	50,06	29,53	32,34	28,12	23,39	46,97	27,42	48,52
MA1 bei Fv1 (Sensor) [Nm]			32,91			36,00	29,39	33,00
MA2 bei Fv2 (Sensor) [Nm]			28,12					
Fv1 [kN]-Mess.-Sensor			14,46			6,17	13,68	5,48
Fv2 [kN]-Mess.-Sensor			13,72					

Tabelle 41: Drehmoment ( $M_A$ ) für Prüfaufbau Ribe – SSN /  $M_A$  und  $F_v$  für Prüfkonzept VV

Die Dokumentation für die Prüfleiste Ribe – VDA erfolgt in Tabelle 42.

M8-Al7075-vorgeschn. Gewinde AlMgSi0,5-Ribe: Leiste 2-VDA-Wechsel- Test								
Schraubentype	S 1	S9	S2	S2	S3	S4	S8	S7
MA - SpRK-Test	50,02	25,5	32,48	29,67	46,31	28,27	46,5	29,48

**MA = 20Nm + 65° - Gewinde M8 vorgeschritten**

Tabelle 42 Drehmoment ( $M_A$ ) für Prüfaufbau Ribe – VDA

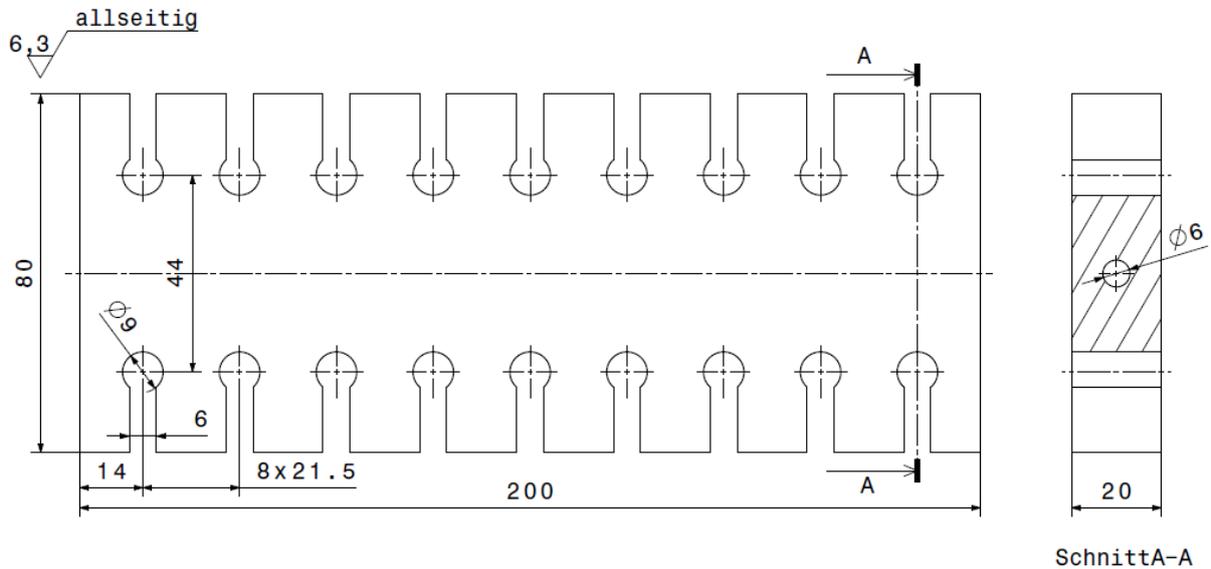
Für das Prüfkonzept Ribe – VDA wurden die gleichen Prüfkörper sowie die gleichen Schraubentypen und das gleiche Montageverfahren verwendet wie für das Konzept Ribe – SSN. Daher wurden ähnliche Abschaltmomente ( $M_A$ ) der Schraubspindel erreicht. Ferner können daher auch ähnliche Montagevorspannkraften ( $F_v$ ) angenommen werden.

### 3.2.3.9 SpRK- Testaufbauten Prüfkörperkonzept Al – Block – 80°C

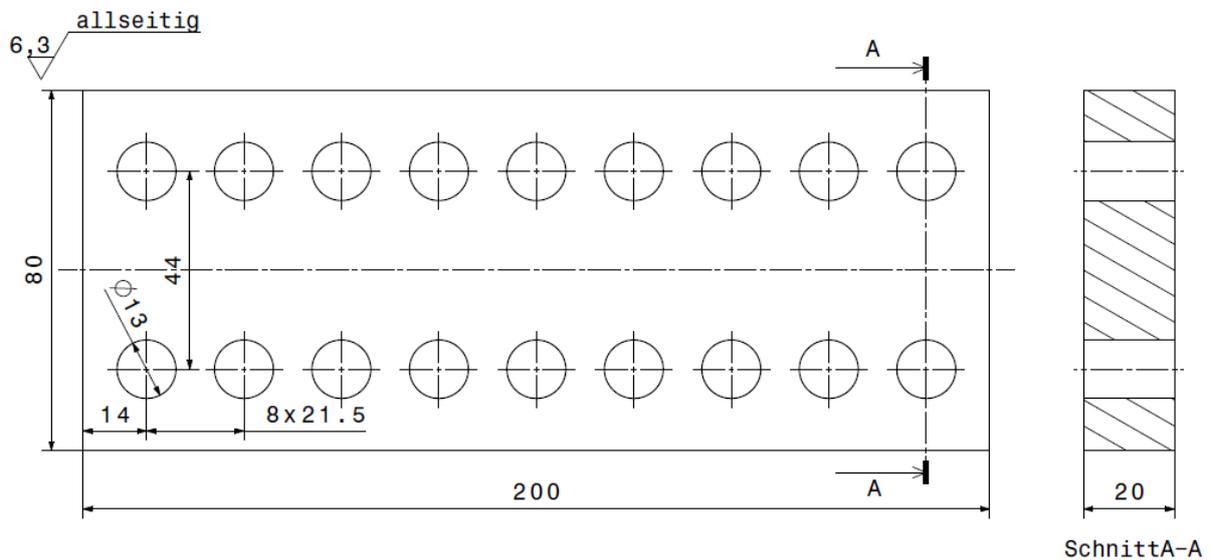
Auch bei diesem Konzept wurde bei Auslagerung im Salzsprühnebeltest M8 – Schrauben mit vorgeschrittenen Innengewinden in AlMgSi0,5-Platten verschraubt. In der oberen Klemmplatte 1 befindet sich jedoch eine Querbohrung, durch welche ca. 80°C heißes Glycerin gepumpt wurde. Korrosion schreitet bei erhöhten Temperaturen schneller voran.

Damit soll geprüft werden, ob durch die Kombination von permanentem Salzsprühnebeltest und einer erhöhten Temperatur eine erhöhte Ausfallrate provoziert werden kann.

Bei der gewindefurchenden Verschraubung von AlMgSi0,5-Platten gemäß Kapitel 3.2. (Umspülung der Schrauben mit erwärmter NaCl-Lösung) konnten keine Brüche provoziert werden, wobei dort das Vorspannkraftniveau mit  $M_{Amax} = 25 \text{ Nm}$  im Mittel mit  $\sim 7,4 \text{ kN}$  auf einem relativ niedrigen Niveau lag.



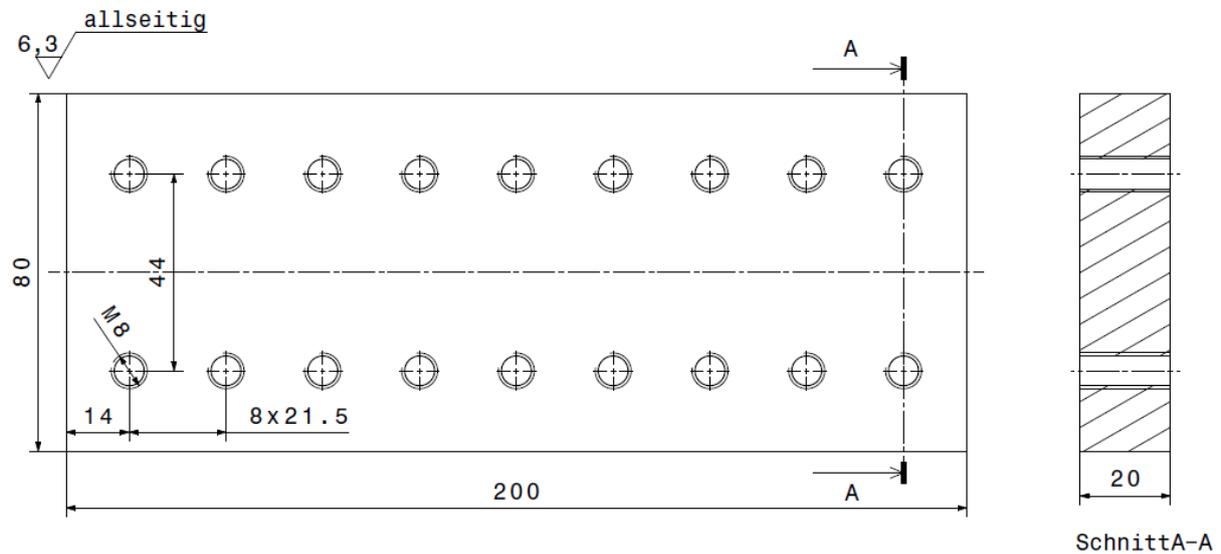
**Abbildung 79: Obere Klemmplatte (Prüfkonzept AI - Block - 80°C) mit Querbohrung**



**Abbildung 80: Mittlere Klemmplatte (Prüfkonzept AI - Block – 80°C)**

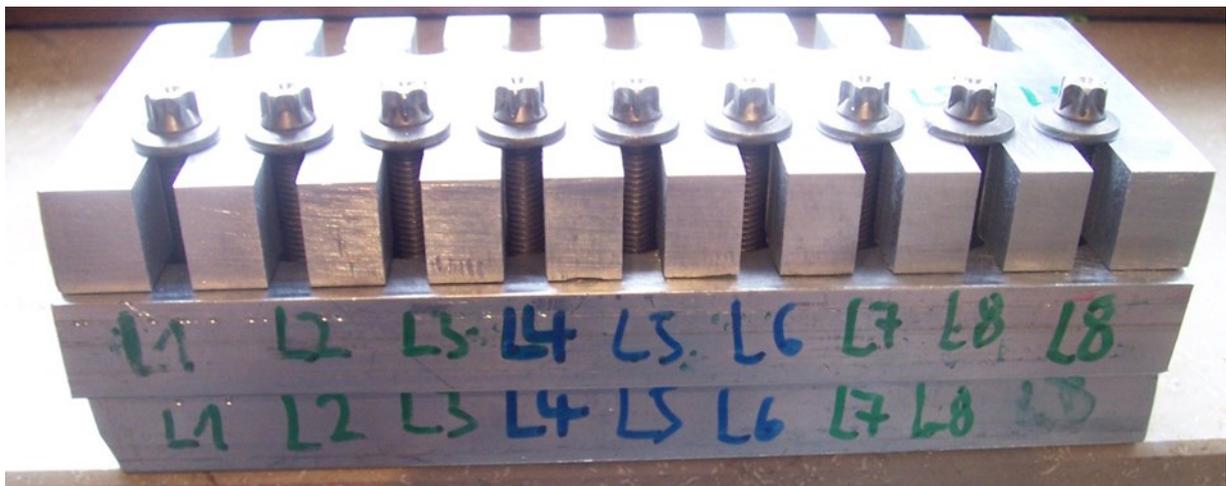
Beim Prüfkonzept AI - Block - 80°C liegt der Schraubenkopf auf der oberen Klemmplatte auf. Dank der seitlichen Einfräsungen in der oberen Klemmplatte mit einer Breite von 6 mm kann der Salzsprühnebel an den Schraubenschaft gelangen und durch die großen Löcher (13mm)

in der Mittelplatte auch im mittleren Klemmbereich die Schraube noch benetzen. In der oberen Klemmplatte befindet sich eine Querbohrung mit  $d = 6 \text{ mm}$ , durch welche fortlaufend  $\sim 80^\circ\text{C}$  heißes Glycerin gepumpt. Dies hatte zur Folge, dass der ganze Plattenverbund wegen der guten Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums aufgewärmt wurde.



**Abbildung 81: Einschraubplatte mit geschnittenem M8-Innengewinde (Konzept AI-Block-80°C)**

Abbildung 82 zeigt den kompletten ZSB der 3 AI-Platten, wobei ausschließlich Schrauben aus der Produktion von 2004 (T6 – SG, Gleitmittel OKS 1300) verwendet wurden.



**Abbildung 82: Prüfkonzept AI-Block - 80°C nach der Montage der 3 Prüfplatten**

Durch die Kombination von Wärme und Salznebelkontamination der Schrauben wird eine gute Näherung an die Bedingungen im Motorbereich von Fahrzeugen erreicht.

Bestimmung der Relaxation bei Schraubenverbindungen nach der Längenmessmethode										
Taptite 2000 M8 x60-Al7075 Klemmleiste aufgefärs, Mittelplatte Loch 13mm, Einschraubplatte M8: alle Platten AlMgSi0,5										
Io-I1: 05.09.2007	Ref.)	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9*
MA [Nm]		32,48	31,59	33,89	20	20	20	15	15	15
Lo bei RT ohne Fv	0,000	0,243	0,265	0,334	0,358	0,078	0,301	-0,002	-0,277	0,348
L1 sofort nach MA	0	0,538	0,583	0,665	0,583	0,302	0,539	0,151	-0,102	0,605
L1 - Lo (RT) (Messende)		0,295	0,318	0,331	0,225	0,224	0,238	0,153	0,175	0,257
Fv nach MA (RT) [N]		15000,893	16170,454	16831,511	11441,359	11390,509	12102,416	7780,124	8898,835	13068,575

MA = 20Nm + 65° - Gewinde M8 vorgefurchtes Gewinde

MA = 20 Nm in vorgefurchtes Gewinde

MA = 15 Nm - Gewinde M8 - vorgefurcht / \*: OKS1300 extrem\_nachbeschichtet

Tabelle 43: Konzept Al-Block - 80°C, TT2k® M8 EN AW 7075 -T6 - SG - OKS 1300 (2004) - MA, Δ

<p>Graph showing torque curves for L1, L2, and L3. The y-axis is Drehmoment [Nm] (0-35) and the x-axis is Winkel [°] (3400-4300). Three curves are shown: L1 (green), L2 (black), and L3 (red), each with a sharp peak.</p>	<p>Drehmomentkurven zu Tabelle 43, L1 - L3: OKS 1300 Serienbeschichtung MA = 20 Nm + 65° Vorspannkraft nach Verlängerungsmessmethode 15 kN - 16,8 kN (tendenziell etwas zu hoch, da vermutlich schon plastische Verlängerung auftrat)</p>
<p>Graph showing torque curves for L4, L5, and L6. The y-axis is Drehmoment [Nm] (0-22) and the x-axis is Winkel [°] (2800-4500). Three curves are shown: L4 (green), L5 (black), and L6 (red), each with a sharp peak.</p>	<p>Drehmomentkurven zu Tabelle 43, L4 - L6: OKS 1300 Serienbeschichtung MA = 20 Nm Vorspannkraft nach Verlängerungsmessmethode 11,4 KN - 12,1 KN (passt ~ zum Fv-Niveau, das mit einer Kraftmessdose gemessen wurde)</p>
<p>Graph showing torque curves for L7, L8, and L9. The y-axis is Drehmoment [Nm] (0-16) and the x-axis is Winkel [°] (3000-4000). Three curves are shown: L7 (green), L8 (black), and L9 (red), each with a sharp peak.</p>	<p>Drehmomentkurven zu Tabelle 43, L7 - L9: L7 und L8: OKS 1300 - Serie L9: OKS1300 nachbeschichtet MA = 15 Nm L7; L8: Fv ~ 7,7 kN; 8,9 kN L9: Fv~13 kN extrem OKS 1300 (L7; L8 passt ~ zum Fv-Niveau, das mit einer Kraftmessdose gemessen wurde)</p>

Tabelle 44: Drehmomentkurven Prüfkonzept Al-Block - 80°C zu Tabelle 43

Tabelle 43 und 44 zeigen, dass wieder 3 verschieden hohe Anziehmomente mit  $M_A = 15 \text{ Nm}$ ,  $M_A = 20 \text{ Nm}$  und  $M_A = 20 \text{ Nm} + 65^\circ$  (Abschaltmomente der Schrauberspindel  $> 30 \text{ Nm}$ ) verwendet wurden. Falls beim nachfolgenden SpRK-Test Ausfälle aufgetreten wären, hätten die unterschiedlichen Anziehmomente ggf. darüber Aufschluss gegeben, ob eine Abhängigkeit des Versagens der Prüfschraube (Bruch oder Anriss) zu den Vorspannkräften in den Prüfschrauben besteht.

### 3.2.3.10 SpRK-Testdurchführung

Die Auslagerung der in Tabelle 27 beschriebenen Prüfaufbauten (ohne Prüfkonzept VV) erfolgte in einer Salzprühnebelkammer am Institut für Chemie an der Montanuniversität Leoben.



**Abbildung 83: Anordnung Prüfaufbauten (galv. Korrosion, SpRK-Test) in Korr.-Prüfkammer**

Abbildung 83 stellt eine Korrosionsprüfkammer für den Salssprühnebeltest nach DIN 50021 dar. Dabei sind die Getriebegehäuse aus Magnesium (Legierung AZ91) und die verschiedenen Prüfkörper des Spannungsrisskorrosionstestes (SpRK-Test) zusehen. Die SpRK-Prüfleisten sind so angeordnet, dass sich niederschlagender Salzsprühndampf

ablaufen kann. Bei den Gehäusen kann es hingegen eher zu einer Ansammlung von Flüssigkeiten im Schraubenkopfbereich kommen.

Gemäß [44] erfolgt der Salzsprühnebeltest entsprechend der DIN 50021 durch kontinuierliches Versprühen einer wässrigen Natrium-Chlorid-Lösung mit einer Massenkonzentration von 5g / 100ml (Hauptbestandteil) als angreifendes Mittel. Der pH-Wert muss dabei zwischen 6,5 und 7,2 liegen, die Prüftemperatur bei 35°C ± 2°C.

Beim VDA-Wechselklimatest nach VDA 621-415 [45] erfolgt die Prüfung eines Zyklus durch:

- d) 1-Tag-Salzsprühnebeltest entsprechend der DIN 50021,
- e) gefolgt von einem 4-Tage-Kondenswasser-Wechselklimatest KFW DIN 50017 (100% Luftfeuchtigkeit bei 50°C ),
- f) gefolgt von 2 Tagen 18° - 28°C (Raumtemperatur) & trockener Luft entsprechend der DIN 50014.

Tabelle 45 zeigt die aufgetretenen Schraubenbrüche (gekennzeichnet durch X) im VDA-Wechselklimatest nach VDA 621 - 415.

Anzahl Testzyklen	Edelstahlrahmen SS 304 mit Schrauben der Legierung AW			Al-Rahmen mit Schrauben der Legierung AW			Mg Rahmen mit Schrauben der Legierung AW		
	6056 T6	7075 T6	7075 T7x	6056 T6	7075 T6	7075 T7x	6056 T6	7075 T6	7075 T7x
1		X							
2		XXX	X						
3		X				X			
4		XX							
5		X							
6									
# Schrauben	2	10	4	2	10	4	2	10	4

**Tabelle 45: Brüche TT2K® EN AW 7075 bei verschraubten Rahmen aus A2, Al & Mg während des Korrosionstests nach VDA 621 - 415 [9]**

Von der ersten Versuchsreihe (Produktion 2004, TAPTITE 2000® EN AW 7075 – T6 – SG) sind 6 von 8 Schrauben im Edelstahlrahmen gebrochen.

Bei der zweiten Versuchsreihe (Produktion 2007) mit Prüfkonzept A2 (Edelstahlrahmen) brachen 2 von 7 Schrauben, nämlich nach 3 Zyklen Schraube L3 TT2K® M8 EN AW 7075 – T6 – SG mit Gleitmittel OKS 1700 (MA = 26,3 Nm) sowie nach 5 Zyklen Schraube L5 (TT2K® M8 EN AW 7075 T79 – SG mit MA = 26,11 Nm). Bei Schraube L5 ist zu beachten, dass eine zweite nachträgliche Warmauslagerung von 8h bei 170° vorgenommen wurde (vgl. Abbildung 65 sowie Tabelle 26), was vermutlich eine Reduktion der Druckeigenstressungen zur Folge hatte.

In der Bilddokumentation der nachfolgenden Tabelle 46 werden u. a. exemplarisch Prüfaufbauten mit gebrochenen Schrauben dargestellt.

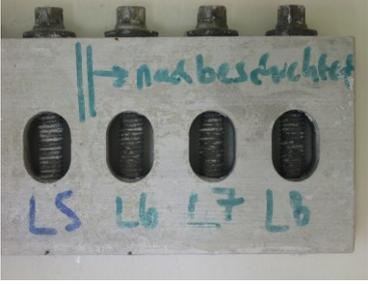
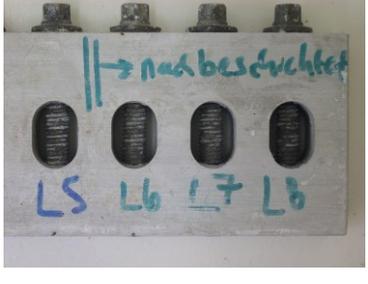
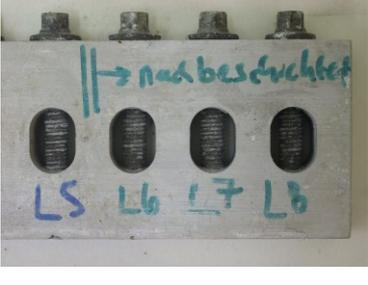
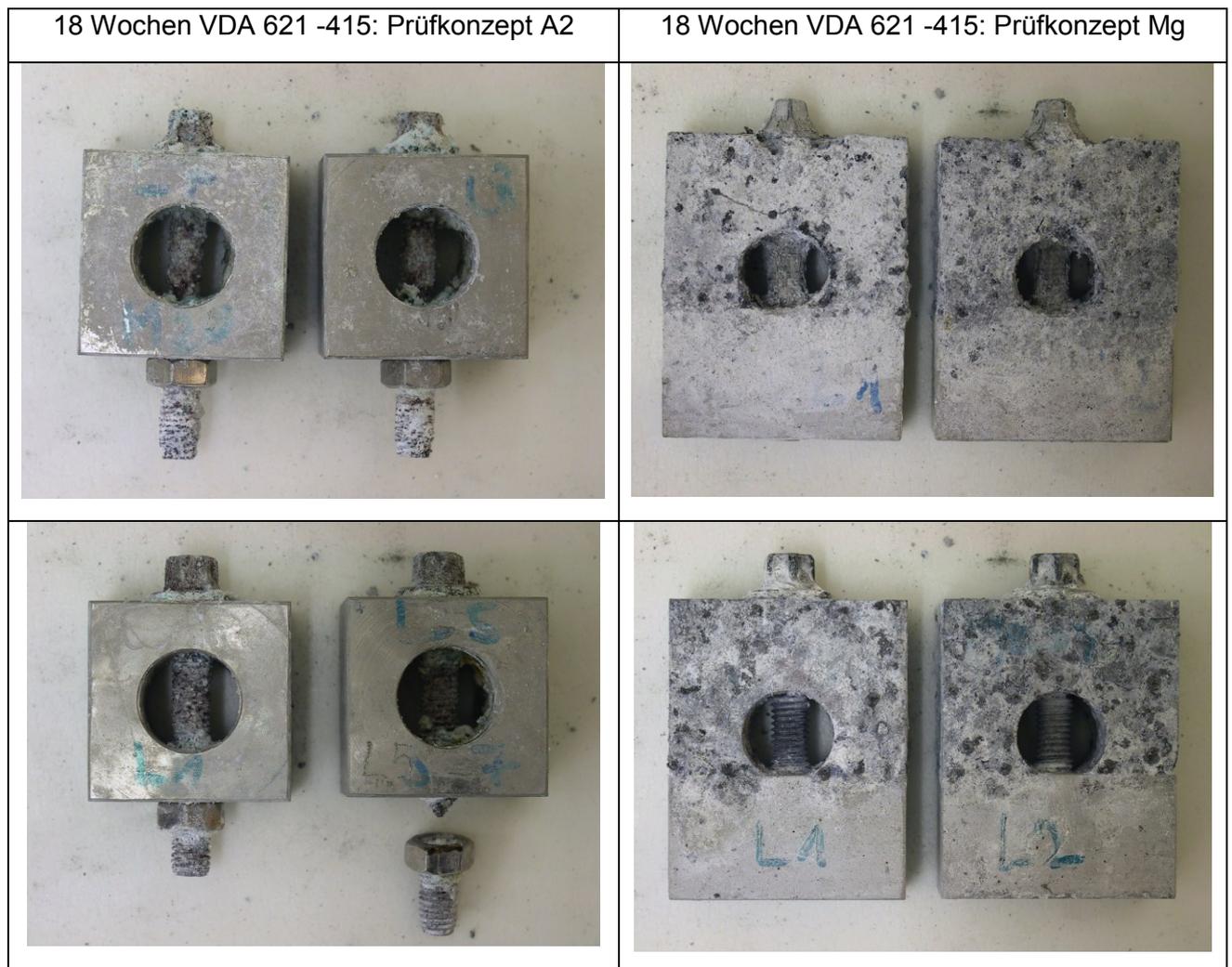
Wo.	A2 18 / 8 – VDA	Mg - VDA	Al (Ribe) – VDA
1			
3			
5			
8			
12			

Tabelle 46: Lichtbildoku. SpRK-Test, VDA 621 – 415 (Konzept A2, Mg, Ribe-Al-Rahmen

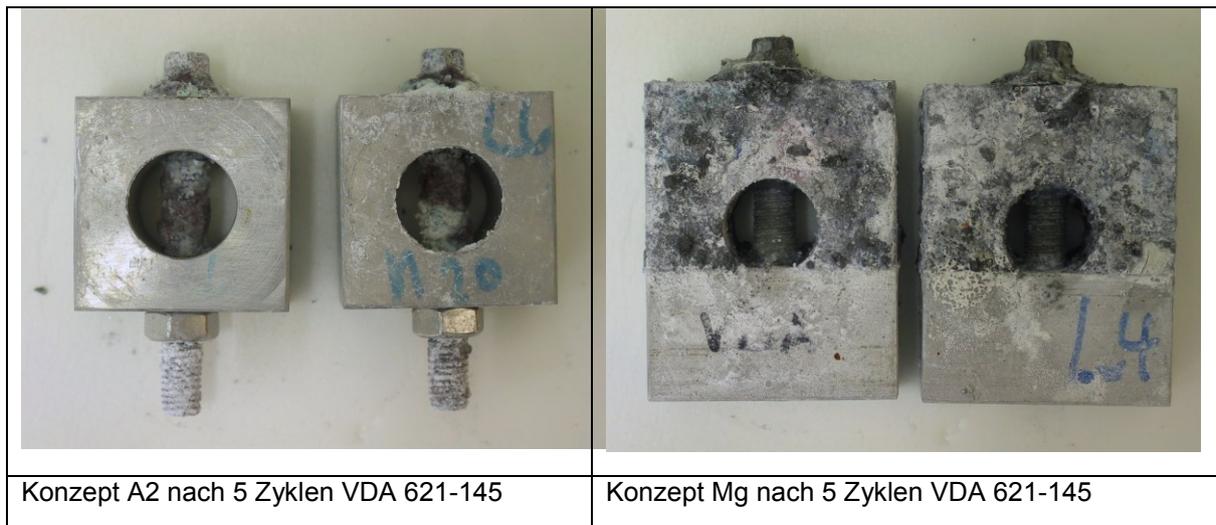
Tabelle 46 zeigt exemplarisch die Prüflinge während der Durchführung des Korrosionstest nach VDA 621 - 415. Dabei ist bereits erkennbar, dass an den TT2K<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 beim Prüfkonzert Mg-Rahmen und beim Prüfkonzert A2 (Edelstahlrahmen) ein relativ starker Korrosionsangriff erfolgte. Auch die Brüche der Schrauben, welche primär beim Prüfkonzert A2 aufgetreten sind, werden exemplarisch dargestellt.

Tabelle 47 stellt die Prüfkörper (Konzept Mg und Konzept A2) nach Testdauer von 18 Wochen dar, wobei ein signifikanter Korrosionsangriff im Gewinde und am Schraubenkopf erkennbar ist. Ein Lösen der Schrauben war nach dieser Zeit nicht mehr möglich.



**Tabelle 47: Lichtbilddokumentation SpRK-Test 18 Wochen VDA 621 – 415, Konzept A2 und Mg**

Beim Prüfkonzert Mg trat selbst nach 22 Zyklen des Wechselklimatests kein Schraubenbruch auf. Jedoch trat eine verstärkte Korrosion des Mg-Klemmteiles sowie auch ein verstärkter korrosiver Angriff auf die Schrauben auf. Auffällig ist dabei, dass beim Aufbau mit Schrauben, die von der TU Darmstadt zur Verfügung gestellt wurden (S. Tabelle 47 rechts unten), eine geringere Korrosion aufgetreten ist. Da aber Werkstoff, Herstellung und Oberfläche der Schrauben von der TU Darmstadt unbekannt ist, kann nur angenommen werden, dass es sich um EN AW 6056-Schrauben handelt.



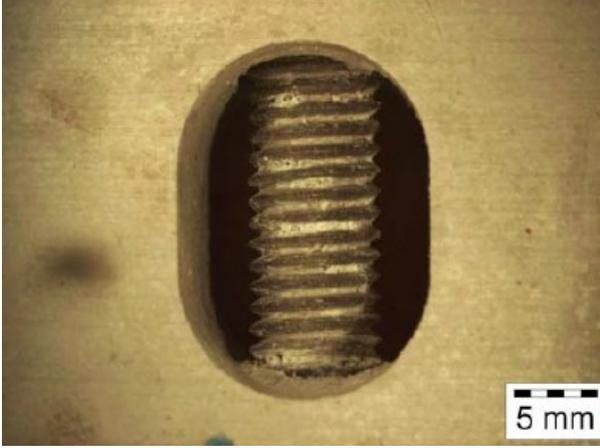
**Tabelle 48: Lichtbilddokumentation SpRK-Test, Konzept A2 und Mg, TT2K® EN AW 7075 – T6**

Um vergleichbare Korrosionsangriffe wie in Kapitel 3.1 (Galvanische Korrosion) zu erreichen, wurde, wie in Tabelle 48 gezeigt, eine Korrosionstestdauer von ca. 844 h gewählt. Während bei den verschraubten Al-Rahmen selbst nach 18 Wochen Korrosionstest VDA 621 - 415 nur ein geringer korrosiver Angriff auf die TT2K® M8 EN AW 7075-Schrauben aufgetreten war (vgl. Tabelle 46 und 47), war der korrosive Angriff auf die EN AW 7075-Schrauben bei den Prüfaufbauten A2 und Mg stark.

Tabelle 49 stellt die für Prüfkonzept A2 und Mg verwendeten Prüfaufbauten nach der Abreinigung der Korrosionsprodukte dar, wobei der korrosive Schraubenangriff verdeutlicht wird.

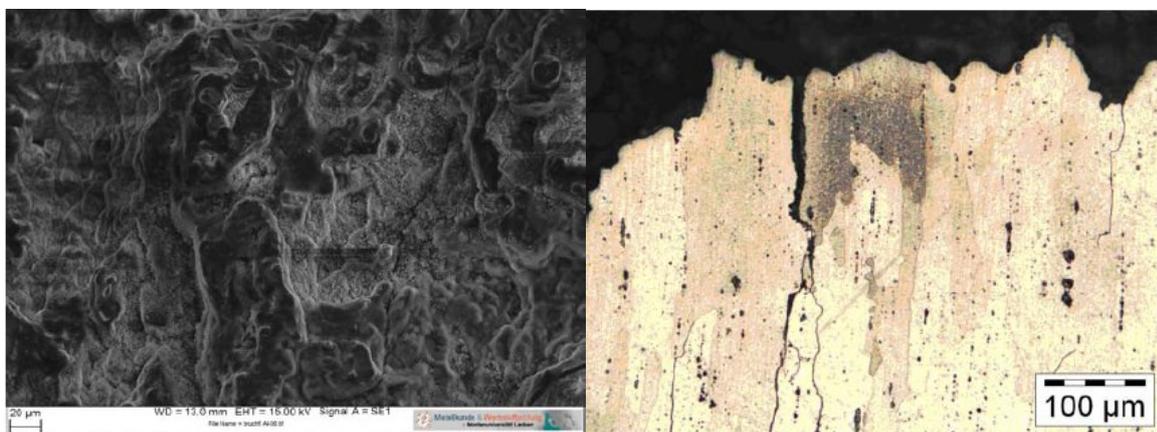
Abbildung 84 zeigt die Bruchfläche einer TT2K® M8 EN AW 7075 – T6-Schraube, welche im VDA-Wechselklimatetest gebrochen war. Die Bruchflächen waren von Korrosionsprodukten belegt, wodurch eine Bruchanalyse durch Rasterelektronenmikroskop nicht möglich war. Bei der Untersuchung von metallographisch erstellten Schliffen konnten verzweigte interkristalline Brüche nachgewiesen werden.

Wie aus Tabelle 45 ersichtlich sind die TT2K® M8 EN AW 7075 – T6-Schrauben bei den verspannten Edelstahlrahmen sehr häufig gebrochen. Ursache dafür ist nach [9] eine massive anodische Auflösung der TT2K® M8 EN AW 7075 - T6-Schrauben. Bei den verschraubten Magnesiumrahmen hingegen ist trotz des massiven Korrosionsangriffs keine der Schrauben gebrochen, was darauf schließen lässt, dass Magnesium die TT2K® M8 EN AW 7075-Schrauben kathodisch geschützt hat. Laut [9] unterstützt die Tatsache, dass beim Prüfkonzept A2 häufige, und beim Prüfkonzept Mg hingegen keine Schraubenbrüche auftraten, die Annahme, dass die anodische Auflösung und nicht die Aufnahme von Wasserstoff der geschwindigkeitsbestimmende Schritt bei der SpRK von Aluminiumlegierungen sind. Gemäß [9] bedeutet die Identifikation der anodischen Auflösung als geschwindigkeitsbestimmender Mechanismus nicht, dass auch die Aufnahme von Wasserstoff den Prozess der SpRK beschleunigt.

	
<p>7075-T6: Edelstahlrahmen 4 Zyklen VDA 621-415</p>	<p>7075-T6: Edelstahlrahmen 10 Zyklen VDA 621-415</p>
	
<p>7075-T6: Al-Rahmen 10 Zyklen VDA 621-415</p>	<p>7075-T6: Mg-Rahmen 10 Zyklen VDA 621-415</p>

**Tabelle 49: SpRK-Test: TT2K<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 – T6 bei Prüfkonzept A2, Mg und Al [9]**

Aus Tabelle 49 oben wird beim Prüfkonzept A2 deutlich, dass durch die anodische Auflösung der Schraube deren Spannungsquerschnitt reduziert wird. Die Spannungen nehmen in dem reduzierten Querschnitt bis zum Versagen durch Schraubenbruch zu.



**Abbildung 84: Bruchfläche TT2K<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 - T6: intergranularer Bruch durch SpRK**

Beim Prüfkonzept mit Aluminiumrahmen sind 2 Schrauben gebrochen. Im VDA-Wechselklimatetest (vgl. Tabelle 45) ist Schraube L8 nach 3 Zyklen gebrochen (EN AW 7075 – T79 – SG, MA = 29,48 Nm, bei der zweiten nachträglicher Warmauslagerung für 8h bei 170°C haben sich vermutlich durch das Schlussrollen entstandene Druckeigenstressungen reduziert).

Dauer [Wochen]	Nicht beheizt (35 °C)		Beheizt (80 °C)
	7075 T6-SG	7075 T7x-SW	7075 T6-SG
1			
2			
3			
4			
5		X	
6			
7			
8			
9			
# Schrauben	10	4	8

**Tabelle 50: Brüche TT2K M8 EN AW 7075, DIN 50021, Konzept Ribe-SSN und Al-Block 80°C [9]**

Beim Al-Rahmen (Prüfaufbau Ribe - SSN) mit Salzsprühnebeltestauslagerung (vgl. Tabelle 50) ist Schraube L8 nach 5 Zyklen gebrochen (EN AW 7075 - T79 - SW, blank mit MA = 48,52 Nm). Das hohe Anziehmoment lässt sich durch die fehlende Gleitbeschichtung erklären. Festzuhalten ist, dass im Al-Rahmen (Prüfkonzept Ribe - SSN und Ribe - VDA) 2 Schrauben gebrochen sind, die keine hinreichend druckinduzierten Eigenstressungen aufwiesen, da kein schlussgerollter Zustand vorlag (vgl. Abbildung 85).

Beim beheizten Al-Rahmen (Prüfkonzept Al - Block - 80°C nach Tabelle 27) sind keine Schraubenbrüche aufgetreten. Zu Beginn wurde 120°C warmes Glycerin durch die Querbohrungen gepumpt, was zu einem schnellen Abtrocknen des Salznebels geführt hat. Dadurch wurde die Glycerintemperatur auf 80°C reduziert, der Al-Block jedoch war immer noch vorwiegend trocken. Infolge der reduzierten Kontaminierungszeiten mit dem Elektrolyt wurde offensichtlich der Korrosionsangriff reduziert.

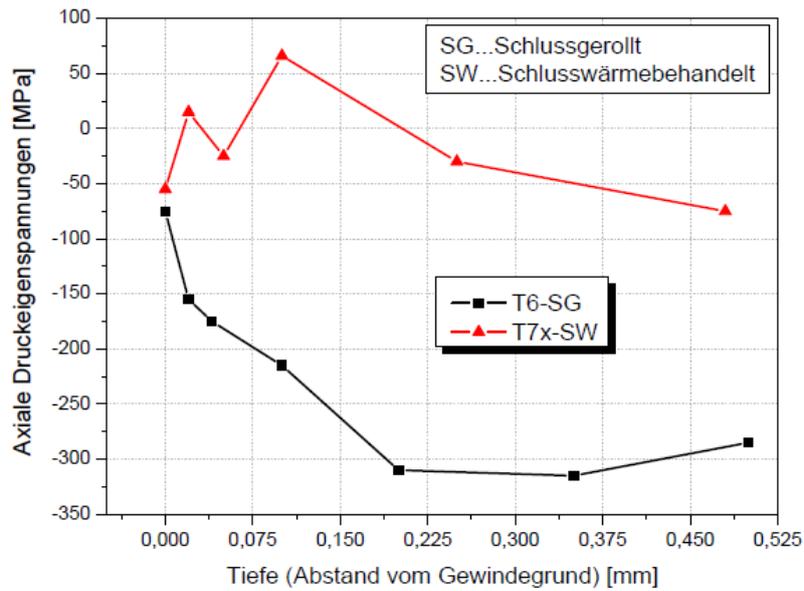


Abbildung 85: Druckeigenspannungen im Gewindegrund, TT2k® EN AW 7075 T6-SG, T7-SW [9]

Der korrosive Angriff auf die TT2K® M8 EN AW 7075-Schrauben bei den verschraubten Al-Rahmen (Konzept Ribe – VDA) war selbst nach 18 Wochen Klimawechseltest gering, wie die nachfolgende Tabelle 51 zeigt:

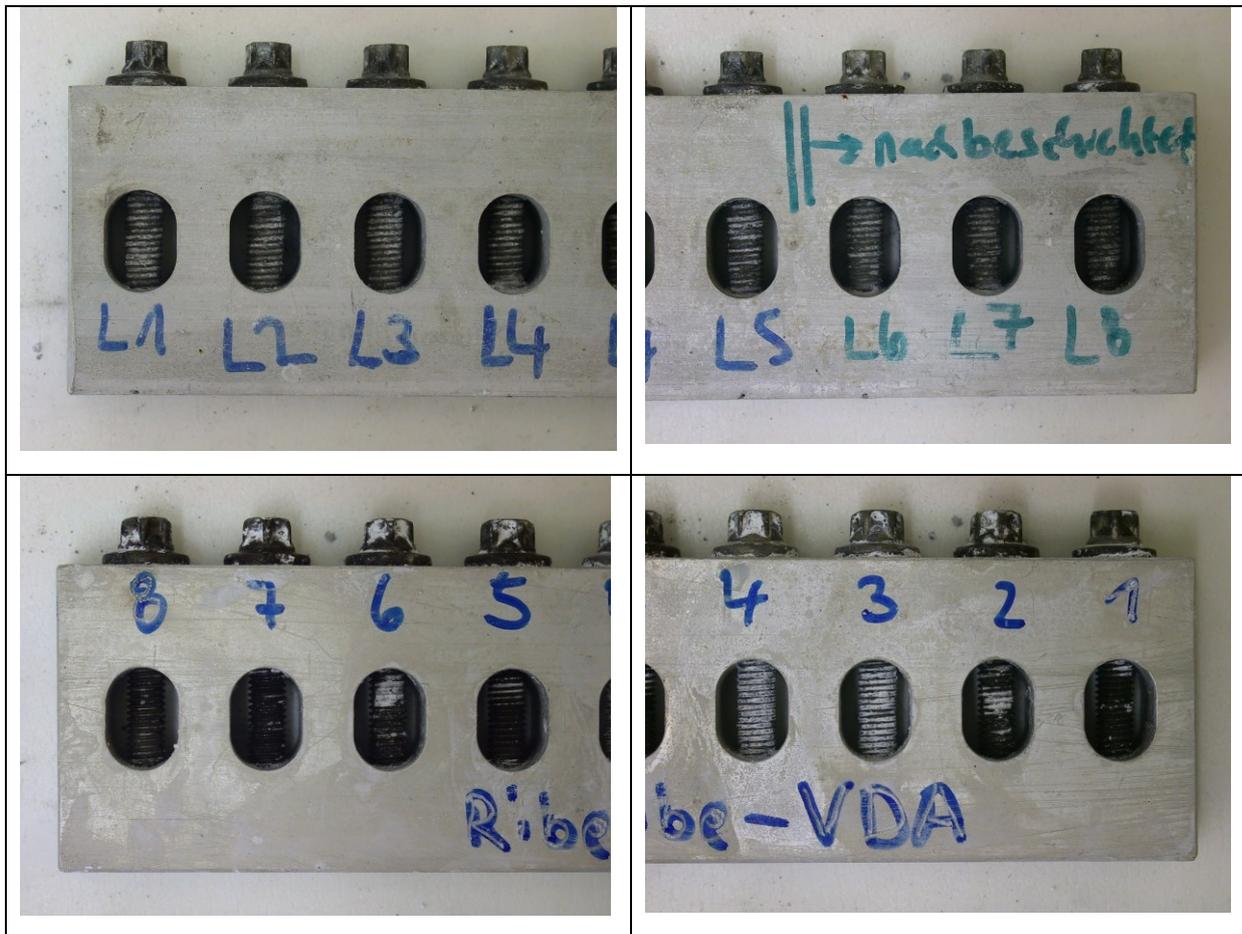


Tabelle 51: Lichtbilddokumentation SpRK-Test, 18 Wochen VDA 621-415: Konzept Ribe - VDA

### 3.2.3.11 Zusammenfassung SpRK -Tests im Rahmen des Förderungsprojektes [13]

Die Ergebnisse der letzten und umfangreichsten SpRK-Tests lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Beim Prüfkonzept Mg (Magnesiumrahmen und Al-Einschraubteil) gab es keine Schraubenbrüche, weil die TT2K<sup>®</sup> M8 EN AW 7075-Schrauben durch den Mg-Rahmen kathodisch geschützt wurden. Dabei trat ein massiver galvanischer Korrosionsangriff auf das Magnesium und die Schrauben auf. Mg(OH)<sub>2</sub>-Korrosionsprodukte haben den Schraubenkopf und das Gewinde bedeckt. In der weiteren Folge griff Spaltkorrosion die Aluminiumschraube an.
- b) 2 Schrauben TT2K<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 – T7x – SW brachen beim Korrosionstest (ein Schraubenbruch beim Prüfkonzept Ribe – VDA und ein Schraubenbruch beim Prüfkonzept Ribe – SSN Salzsprühnebeltest). Beide Schrauben waren schlusswärmebehandelt.
- c) Durch das Schlussrollen werden Druckeigenspannungen erzeugt, welche auf einem Niveau von bis zu 300 MPa liegen. Diese Druckeigenspannungen wirken der Zugspannung, die infolge des Anziehmomentes in der Schraube generiert werden, entgegen. Dadurch wird die resultierende Zugspannung in der Schraubenoberfläche herabgesetzt.
- d) Das Aufheizen des Aluminiumprüfblockes auf 120°C / 80 °C im Salzsprühnebeltest hat nicht zu Brüchen der TT2K<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 – T6-Schrauben geführt, da durch das zeitweise Eintrocknen reduzierte Kontaminierungszeiten der Schraubengewinde mit dem Elektrolyten auftraten.
- e) Bei der Verschraubung des Edelstahlrahmens (Prüfkonzept A2) traten 8 Schraubenbrüche der TT2K<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 – T6 – SG-Schrauben auf, wobei 10 Schrauben geprüft wurden (Ausfallrate 80%). Im Zustand T7x – SW trat bei 4 verschraubten Edelstahlrahmen ein Schraubenbruch auf von (Ausfallquote 25%). Die anodische Polarisation hat zum massiven Korrosionsangriff auf die Schrauben geführt, wodurch der Schraubenquerschnitt reduziert wurde, was eine Erhöhung der Zugspannung bis zum finalen Bruchversagen der Schrauben zur Folge hatte.
- f) Ein hohes Zugspannungsniveau konnte durch die vorgefertigten Gewinde bei allen Prüfaufbauten in Verbindung mit einem überelastischen Montageverfahren unter der Verwendung von geeigneten Schraubenschmiersystemen erreicht werden. Im Zustand T6 - SG mit Gleitmittel (OKS 1300 oder OKS 1700) wurden Montagevorspannkkräfte zwischen 12,49 kN – 14,8 kN entsprechend der Zugspannungen von  $\sigma_{zmin} = 12490 / 36,6 = 341$  MPa bis zu  $\sigma_{zmax} = 14800 / 36,6 = 404$  MPa erreicht. Zum Vergleich kann ISO 8839 betrachtet werden, wonach  $Rp0,2_{min} = 440$  MPa im Zugversuch für EN AW 7075-Schrauben T7x gilt. Durch den Torsionsanteil reduziert sich natürlich für Schraubenverbindungen dieser Wert für Rp0,2.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

### 4.1 Zusammenfassung Galvanische Korrosion:

Galvanische Korrosionstests wurden entsprechend der Literatur mit verschraubten Magnesiumplatten durchgeführt, anschließend wurden die Massenverluste des Magnesiums gemessen. Gemäß [30] betrug die Dauer des Salzsprühnebeltestes 144 h. Dabei generierten einige Stahlschraubensysteme (z.B. verzinkt gelb chromatiert mit silikatischer Versiegelung) einen geringeren Magnesiumabtrag als EN AW 7075-Schrauben.

Diese Meßergebnisse haben nicht zu den eigenen Untersuchungsergebnissen an AZ91-Gehäusen gepasst, nach welchen Al-Schrauben nach 720h SST wesentlich geringere korrosive Angriffstiefen in Mg generiert haben als Stahlschrauben mit Verzinkung oder Zinklamellenbeschichtung.

Eine Erklärung für diese Diskrepanz liefern die Evans-Diagramme gemäß Kapitel 3.1.3, welche bei einer blanken Stahlschraube im Vergleich zu einer verzinkten Schraube eine ca. 3 Mal so hohe Kurzschlußstromdichte gezeigt haben. Da verzinkte Stahlschrauben nur einen leichten bis mittleren Korrosionsschutz bieten, ist die Zinkschicht nach einer längeren Auslagerung im Salzsprühnebeltest korrosiv geschädigt worden, wodurch der blanke Stahl als Schraubengrundmaterial mit dem Magnesium in direkten Kontakt kam. Daher stieg der Korrosionsstrom signifikant an und die Stahlschrauben mit zinkbasierten Oberflächen zeigten nach einer Testdauer von 720 h eine signifikant höhere Korrosion bei den Magnesiumbauteilen als Aluminiumschrauben.

Die eigenen Untersuchungen entsprechend der Tabelle 17 haben gezeigt, dass die TT2K<sup>®</sup> EN AW 7075-Schrauben ebenso wie die EN AW 6056-Schrauben nach einem 720 h Salzsprühnebeltest in AZ91 eine max. korrosive Angriffstiefe von 3 mm generiert haben. Allerdings erschien der Mg-Abtrag bei der EN AW - 6056-Schraube insgesamt geringer als bei der 7075-Schraube. Die Profilverlaufsmessungen im Zuge des FVA-Vorhabens [31] entsprechend der Abbildung 8 zeigen auch bereits nach einem 96 h Salzsprühnebeltest ähnliche korrosive Angriffstiefen in AZ91 sowohl bei EN AW 6056 als auch bei EN AW 7349. Der Massenverlust im Magnesium war jedoch bei den 7000er-Schrauben höher, was auch der Vergleich zwischen den Diagrammen in Abbildung 4 und 5 zeigt (Mittelwert Massenverlust AZ91 bei EN AW 7075: 0,289 g versus EN AW 6056: 0,1525 g nach jeweils 96 h SST). Somit wird deutlich, dass die EN AW 6056 zwar kaum Vorteile bzgl. der korrosiven Angriffstiefe im Magnesium bietet, insgesamt aber etwas besser ist, weil die korrodierte Fläche um den Schraubenkopf herum kleiner ist als bei der Legierung EN AW 7075.

Auch im Kapitel 3.2 (vgl. Tabelle 49) zeigt sich, dass bei der Verschraubung des AZ 91-Klemmrahmens mit einem Al-Einschraubteil im VDA-Klimawechseltest VDA 621-415 verstärkte Korrosion der Schrauben und des Magnesiumrahmens aufgetreten ist.

EN AW 7075-Schrauben haben somit im Bereich der galvanischen Korrosion einen deutlichen Nachteil, der aber durch angepasste Top Coats, wie z.B. durch T06E-GZ, kompensiert werden kann. Gemäß Tabelle 17 hat sich nach einem 720 h Salzsprühnebeltest in AZ91 nur noch eine max. korrosive Angriffstiefe von 0,3 mm ergeben. Durch dieses zusätzliche Top Coat hatte die EN AW 7075-Schraube im Kontakt zu AZ91 eine bessere Korrosionsperformance gezeigt als die in der Autoindustrie etablierte EN AW 6056-Schraube.

Allerdings muss dabei beachtet werden, dass durch die erhöhten Einbrenntemperaturen des T06E-GZ Top Coats bei  $\sim 180^\circ\text{C}$  bereits eine leichte Festigkeitsreduktion der EN AW 7075-Schrauben auftritt.

Bei den Stahlschrauben hat sich gezeigt, dass Zinklamellensysteme und galvanische Zink-Nickelsysteme ungeeignet für den Kontakt mit Magnesium sind.

Für geringe Korrosionsanforderungen kämen galvanisch verzinkte Schrauben mit Dickschichtpassivierung und speziellen silikatischen Versiegelungen in Betracht. Bei hohen Korrosionsanforderungen, wie etwa bei außenliegenden Getriebeverschraubungen üblich, wird häufig eine Beständigkeit von 720 h im Salzsprühnebeltest gefordert. Bei diesen hohen Anforderungen zeigten Stahlschrauben mit aufgesteckten Aluminiumtöpfen / Al-Scheiben die niedrigsten korrosiven Angriffstiefen in Magnesium (vgl. Tabelle 17), gefolgt von Kopfrundumbeschichtungen mit elektrostatischem Nylon.

## 4.2 Zusammenfassung Spannungsrisskorrosion

In der Literatur findet man 2 Theorien zum Thema Spannungsrisskorrosion von hochfesten AlZnMg(Cu)-Aluminiumlegierungen gemäß EN AW 7000:

### 1. These laut Literatur: Wasserstoffinduzierte SpRK

Das Risswachstum bei der SpRK wird mit dem Wasserstoffgehalt und den zugeordneten Poren in Verbindung gebracht. Als Ursache wird laut [33] bei ungünstigen Gefügeständen eine Korngrenzenversprödung durch eindiffundierenden Wasserstoff angesehen. Der Wasserstoff wird infolge von Korrosionsreaktionen und unter Einfluss von Zugspannungen an die Korngrenzen der Kristallite geleitet. Dabei verläuft die SpRK bei Al immer interkristallin. [33]

### 2. These lt. Literatur: Mikrogalvanischer Prozess zwischen intermetallischen Phasen und der Aluminiumgrundmatrix mit anodischer Auflösung im korngrenzennahen Bereich

Kupferreiche Zonen und  $\text{MgZn}_2$ -Phasen führen bei EN AW 7xxx zu einer Erhöhung des elektrochemischen Potentials in anodischer Richtung, so dass zwischen dem Reinaluminium und diesen Phasen eine max. Potentialdifferenz von bis zu 0,24 V auftreten kann. Laut [34] treten die Ausscheidungen zuerst an den Korngrenzen auf und verursachen ausscheidungsarme Zonen, was eine galvanische Zelle zwischen den ausscheidungsarmen

Zonen und den Körnern, die reich an Zink und Magnesium sind, bewirkt. Beide Bedingungen sind im T6-Zustand gegeben, also dem Zustand der höchsten Festigkeit.

In Kapitel 2.2.6 werden Untersuchungen im Bereich von EN AW 7075-Blechen erwähnt. Diese Untersuchungen liefern folgende Erkenntnisse:

- a) Senkrecht zur Blechwalzrichtung besteht eine deutlich höhere Anfälligkeit für SpRK.
- b) Die größte Anfälligkeit besteht bei pH2-pH3 (Dehnungsabfall auf 5% der unbelasteten Korrosionsprobe).
- c) Die SpRK-Empfindlichkeit steigt mit der Zunahme von Chlorid-Ionen.
- d) In Kornwachstumsrichtung (Blechwalzrichtung) wird das Risswachstum behindert-
- e) Die Al-Oxidschicht ist im Bereich pH4 - pH 9 stabil.
- f) In der Literatur wird interkristalline Korrosion (IK) primär für 6000-Legierungen erwähnt, wobei ein Siliziumüberschuss diese fördert. Nach [19] wird die EN AW 7075-Legierung ebenso wie die Legierung EN AW 6056 im T6-Zustand mit gut und im T76- oder T73-Zustand mit annehmbar bewertet. Insofern könnte IK auch bei den Brüchen der EN AW 7075-Schrauben eine Rolle spielen.
- g) Der Wärmebehandlungszustand der EN AW 7075-Schrauben spielt eine signifikante Rolle. Nach [19] wird eine zweistufige Aushärtung bei 120°C bis 165°C in den T73-Zustand empfohlen. Dabei wird eine erhöhte Sicherheit vor der SpRK erreicht, wobei in diesem Zustand die elektrische Leitfähigkeit sprunghaft auf 22 m/Ωmm<sup>2</sup> ansteigt (vgl. Abbildung 11).
- h) Im Bereich der Raumfahrt-Luftsicherung werden laut [38] Proben über 30 Tage hinweg in eine Zelle unter Zugbelastung gesetzt und innerhalb einer Stunde jeweils 10 Min. mit einer 3,5 %igen NaCl-Lösung benetzt. Von 9 Prüflingen werden 3 mit Zuglast und 3 ohne Zuglast in eine Zelle ausgelagert, weitere 3 Prüflinge dienen als Zugprobe ohne Korrosionslast. Dieses Verfahren ermöglicht Rückschlüsse sowohl auf die SpRK als auch auf Schädigungen durch andere Korrosionseinflüsse
- i) Entsprechend [31] erfolgten systematische Untersuchungen an den hochfesten Al-Schrauben M8 (z. T. auch M6) aus AlMgZn(Cu)-Legierungen in den Wärmebehandlungszuständen T6, T79 und T76 mit den Legierungen EN AW 7075, EN AW 7349 sowie EN AW 7449, wobei aber in der DIN 573 – 3 die beiden letzteren Legierungen nicht aufgeführt sind. Im Rahmen dieses FVA-Vorhabens wurden auch Spannungsrisskorrosionstests durchgeführt, wobei gemäß Abbildung 12 die Stahlrohre mit den Al-Schrauben auf einer Seite mit Edstahlscheiben und auf der anderen Seite mit Al-Scheiben verspannt wurden. Diese Rohrabschnitte wurden im VDA-Wechselklimatetest VDA 621-415 ausgelagert. Im T6-Zustand sind alle drei 7000-Legierungen gebrochen. Im T79-Zustand hingegen gab es bei der Legierung EN AW 7075 -SG keine Brüche mehr, während die höchstfesten Legierungen 7349 - SG- und 7449 - SG trotz begrenzter Überalterung durch SpRK versagt haben. Ursachen für die Brüche der EN AW 7349 und 7449-Legierungen können in einer fehlerhaften Wärmebehandlung oder in der chemischen Zusammensetzung liegen. Die Wärmebehandlungsparameter wurden nicht im Rahmen des

Forschungsvorhabens dokumentiert. Bei der chemischen Zusammensetzung der EN AW 7349 und EN AW 7449 ist hingegen der erhöhte Zinkgehalt auffällig.

Chemische Zusammensetzung [%]															
Werkstoff-Nr.	Int. Norm	Norm	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr	Ga	V	Al
EN AW-7075	ISO 8839	DIN EN 573-3	0,4	0,5	1,2 - 2	0,3	2,1- 2,9	0,18- 0,28	/	5,1 - 6,1	0,2*	*	/	/	Rest
EN AW-7349	SpRK - Test gem. FVA [31] - Abb. 16		0,057	0,074	1,81	0,009	2,58	0,008	0,006	7,38	0,019	0,08	<0,005	0,008	Rest
EN AW-7449	SpRK - Test gem. FVA [31] - Abb. 16		0,046	0,086	1,64	0,015	2,42	0,015	0,006	8,18	0,026	0,092	<0,005	0,008	Rest
EN AW 7075	TT2k von AUT gemäß Tabelle 24		0,06	0,13	1,4	0,02	2,6	0,18		5,8	0,01	0,01			Rest

**Tabelle 52: Vergleich der chem. Zusammensetzung, Vorgabe EN AW 7075 vs. Prüfschrauben**

Möglicherweise war bei den Prüfungen im Rahmen des FVA-Vorhabens [31] der erhöhte Zinkgehalt bei der EN AW 7349 und EN AW 7449 ursächlich für verstärkte Ausbildung von edleren  $MgZn_2$ -Phasen. Dieser Umstand könnte Einfluss auf das Versagen dieser beiden Legierungen im T79-Zustand gehabt haben, die EN AW 7075 – T79 hingegen war nicht gebrochen.

#### Die eigenen SpRK-Tests gem. Kapitel 3.2 haben folgende Ergebnisse gezeigt:

- Beim ersten SpRK-Test (Kapitel 3.2.1.2) mit 3 verschraubten Mg-Platten, bei denen das Schraubengewinde mit 3%-NaCl-Lösung bei 80°C umspült wurde, zeigte eine verstärkte Mg-Auflösung und einen starken Korrosionsangriff auf das ENAW 7075 - T6 - Gewinde. SpRK der verspannten Schrauben konnte nicht nachgewiesen werden.
- Beim zweiten SpRK-Test wurden drei AlMgSi0,5-Platten mit hochfesten TAPTITE 2000® EN AW 7075 - T6 - SG gewindefurchend verschraubt und dann bei einer Temperatur von ~ 80°C mit einer NaCl-Lösung (3%) umspült. In diesem Test wurden Anziehmomente von  $M_{A1} = 15 \text{ Nm}$ ,  $M_{A2} = 20 \text{ Nm}$  und  $M_{A3} = 25 \text{ Nm}$  mit Gewindefurchmomenten  $M_F = 7,3 \text{ Nm}$  bis  $11,6 \text{ Nm}$  verwendet, so dass Vorspannkräfte auf einem niedrigen Niveau zwischen ~ 1,3 kN bis 8,6 kN generiert wurden. Während des Tests sind keine Schrauben gebrochen. Auch mit Hilfe von nachträglichen metallographischen Untersuchungen konnte keine SpRK nachgewiesen werden. Die Zugspannungen lagen bei diesem Test unter 50% von Rp0,2. Bei weiterführenden Tests war das Ziel, das Zugspannungsniveau zu erhöhen.
- Beim dritten SpRK-Test im Rahmen des Forschungsprojektes [13] wurden VDA-Wechselklimatests nach VDA 621 - 415 mit verspannten Al-Rahmen, Mg-Rahmen und Edelstahlrahmen durchgeführt. Parallel wurden auch Salzsprühnebeltests entsprechend der DIN 50021 in einen unbeheizten Al-Rahmen und einen beheizten Al-Rahmen verschraubt. Um das Zugspannungsniveau zu erhöhen, wurde ein vorhandenes Muttergewinde überelastisch mit einem drehwinkelgesteuerten Anziehverfahren montiert. Die im Zuge von [13] durchgeführten SpRK-Tests brachten folgende Ergebnisse:

Bei der Edelstahlverschraubung erfolgten zahlreiche Schraubenbrüche, bei der Magnesiumverschraubung keine. Da auch bei der Mg-Verschraubung mit EN AW 7075 zwar verstärkte Korrosion, aber keine Brüche aufgetreten ist, scheint These 2 (anodische Auflösung im Korngrenzenbereich der EN AW 7075 -T6 -Schraube bei der Edelstahlrahmenverschraubung) der geschwindigkeitsbestimmende Mechanismus zu sein. Dadurch kann aber eine Beschleunigung der SpRK durch Wasserstoffaufnahme nicht ausgeschlossen werden. Bei der Mg-Rahmenverschraubung wurde die EN AW 7075-Schraube kathodisch geschützt.

Im Al-Rahmen traten trotz eines überalterten Zustandes der Schraube 2 Brüche auf. Diese Schrauben waren aber schlusswärmebehandelt.

Beim Prüfaufbau mit einer Erwärmung des Al-Rahmens auf 80°C im Salzsprühnebeltest traten keine Brüche der Al-Schrauben auf.

Die druckinduzierten Eigenspannungen infolge des Schlussrollens (SG) haben das Risiko der SpRK deutlich (vgl. Abbildung 85) bis ~ 300 MPa minimiert.

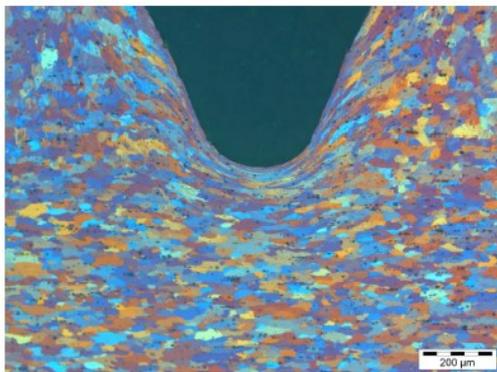
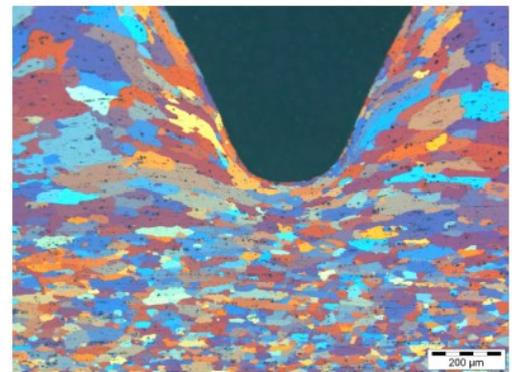


Abbildung 86: a) Schliff EN AW 7075 - T6 - SG



b) Schliff EN AW 7075 - T6 - SW

Im Zustand T6 - SG der EN AW 7075-Schraube gem. Abbildung 86 ist auch erkennbar, dass das Gefüge im Gewindegrund deutlich feinkörniger ist als im Zustand T6 - SW. Diese Feinkörnigkeit im Gewindegrund im Zustand SG wirkt sich sicherlich positiv auf die SpRK-Beständigkeit aus.

## 4.3 Fazit und Ausblick

### 4.3.1 Wirtschaftliche Aspekte

Hochfeste gewindefurchende Aluminiumschrauben (System TAPTITE 2000®) der Legierung EN AW 7075 im Zustand T6 oder T7x ermöglichen Gewindefurchen in typische Magnesiumlegierungen wie AZ91, AE44, MRI153 etc. Mit TAPTITE 2000® aus der Legierung EN AW 6056 - T6 konnten keine prozesssicheren Gewindefurchprozesse ermöglicht werden.

Metrische und gewindefurchende Stahlschrauben mit Al-Scheiben oder Al-Töpfen sind technisch einsetzbar, aber wegen der hohen Kosten für den Al-Topf und die Schrauben unwirtschaftlich.

Des Weiteren werden in der deutschen Automobilindustrie die etablierten metrischen Al9-Schrauben aus der Legierung EN AW 6056 eingesetzt. Der Aluminiumdraht der EN AW 6056-Schrauben ist derzeit kostengünstiger wie der EN AW 7075-Draht. Jedoch fallen in einer gesamtheitlichen Kostenbetrachtung die Kosten für die Erstellung der Mutterngewinde (Bohren & Gewindeschneidprozess & Reinigung.....) stärker ins Gewicht als die Mehrkosten für den EN AW 7075-Draht.

Insofern bietet der Einsatz von hochfesten EN AW 7075-Gewindefurchschrauben Kostenvorteile, wenn die Kernlöcher in Magnesium vorgegossen und nicht mehr mechanisch nachgearbeitet werden müssen.

#### **4.3.2 Montagevorspannkkräfte, Relaxation – Anfangs und Endfestigkeiten**

Vergleichsmessungen der Montagevorspannkraft gemäß [13] zwischen gewindefurchenden TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 EN AW 7075 - T7x und metrischen Schrauben M8 EN AW - 6056 - T6 haben gezeigt, dass bei einer überelastischen Montage der TAPTITE 2000<sup>®</sup> EN AW 7075 in AZ 91 Vorspannkkräfte zwischen 11 - 14 kN deutlich höhere Montagevorspannkkräfte generiert haben als die metrischen M8 Schrauben EN AW 6056 - T6 mit 7 bis 10 kN. Nach dynamischen und Temperaturwechseltests sowie einer zusätzlichen Auslagerung über 100 h bei 120°C lagen die TAPTITE 2000<sup>®</sup> jedoch bei 2 bis 5 kN Restvorspannkraft und die EN AW 6056 zwischen 1 bis 3 kN. Bei der gleichen Testdurchführung mit der kriechfesteren Mg-Legierung AE44 waren die Restvorspannkkräfte höher, wobei die mittlere Restvorspannkraft der EN AW 7075 bei ~ 4 kN und bei der EN AW 6056 bei ~ 5 kN lag. Dies zeigt bereits, dass die EN AW 6056 eine höhere Temperaturbeständigkeit aufweist. Dieser Vorteil kommt bei kriechbeständigeren Mg-Legierungen wie AE44 bereits stärker zur Geltung. Temperaturenlagerungen der Schrauben EN AW 7075 - T6 - SG sowie der EN AW 6056 - T6 bei AUT im Bereich 150° C (ohne Vorspannung) über 1000 h haben gezeigt, dass die EN AW 6056 um ~ 10% von der Ausgangsfestigkeit abgefallen ist und die EN AW 7075 um ca. 30%. Nach 1000 h lagen dann die Endfestigkeiten in etwa auf dem gleichen Niveau. Dieser Umstand ist ein Grund dafür, dass die EN AW 7075-Schrauben nicht in der Automobilindustrie eingesetzt werden, weil diese nach einer längeren Auslagerung bei 150°C keine Festigkeitsvorteile mehr bringen. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass für Gewindefurchprozesse in Magnesium hohe Anfangsfestigkeiten der jeweiligen Al-Legierungen benötigt werden, welche bei der EN AW 6056 - T6 leider nicht ausreichen.

#### **4.3.3 Galvanische Korrosion verschraubter Magnesiumgehäuse**

Bei hohen Korrosionsschutzanforderungen (720 Salzsprühnebeltest entsprechend der DIN 50021) haben bei der Verschraubung von AZ91-Gehäusen die Al-Schrauben nach EN AW

6056 oder EN AW 7075 relativ gute Ergebnisse erzielt. Bei den eigenen Tests zeigte sowohl die EN AW 6056 als auch die EN AW 7075 gemäß Tabelle 17 die gleichen max. korrosive Angriffstiefen von 3 mm in Mg. Der flächenmäßige Angriff auf das AZ91-Gehäuse war jedoch bei der EN AW 6056 geringer als bei der EN AW 7075. Der stärkere Mg-Massenverlust infolge der galvanischen Korrosion wird auch in Abbildung 6 und 7 beschrieben. Somit weist also die EN AW 6056 gegenüber der EN AW 7075 durchaus hinsichtlich der galvanischen Korrosion noch Vorteile auf. Dieses Defizit kann durch angepasste Top Coats wie der T06E-GZ-Beschichtung kompensiert werden. Nach 720 h Salzsprühnebeltest hat sich die max. Angriffstiefe in AZ91 signifikant auf max. 0,3 mm reduziert. Auch beim Prüfkonzept Mg im Rahmen des SpRK-Testes zeigte sich in Tabelle 48 und 49, dass im VDA-Wechselklimatetest bereits nach 5 Zyklen eine relativ starke Korrosion des Magnesiumrahmens und an den EN AW 7075 - T6 - Schrauben aufgetreten ist. Auch dies zeigt, dass bei der Verwendung von EN AW 7075-Schrauben zum Fügen von Magnesiumteilen eine Verwendung von zusätzlichen Top Coats wie T06E-GZ sinnvoll ist.

#### 4.3.4 Spannungsrisskorrosion

Die eigenen Untersuchungen zur Risikobewertung der Spannungsrisskorrosion haben gezeigt, dass ein erhöhtes Risiko der Spannungsrisskorrosion von EN AW 7075 – T6-Schrauben besteht, wenn Stahlteile oder Edelstahlteile gefügt werden. Beim Fügen von Magnesiumteilen jedoch wurden die EN AW 7075 -T6 - SG-Schrauben kathodisch geschützt.

In der Literatur [19] wird zur Vermeidung der SpRK typischerweise eine 2 stufige Warmauslagerung bei 120°C und 165°C auf den T76- oder T73-Zustand empfohlen. Im Zustand der T76 / T73 steigt die elektrische Leitfähigkeit und die Lebensdauer schlagartig an.

Im FVA-Vorhaben [31] sind im SpRK-Test gemäß dem VDA-Wechselklimatetest 621 - 415 die EN AW 7075-Schrauben, mit denen die Stahlrohre verspannt wurden, im T6-Zustand gebrochen, jedoch nicht im Zustand T79. Bei den eigenen Untersuchungen, die in Kapitel 3.2.3.10 dargestellt wurden, sind die schlussgerollten EN AW 7075-Schrauben beim Fügen der Edelstahlrahmen häufig gebrochen, wenn die Schrauben im T6-Zustand waren. Beim Fügen der Al-Rahmen und Mg-Rahmen sind jedoch keine Schrauben dieser Ausführung gebrochen. Bei Schrauben aus der gleichen Drahtcharge im Zustand T7x - SW sind jedoch vereinzelt auch Brüche beim verschraubten Al-Rahmen aufgetreten. Dies zeigt, dass auch der Druckeigenspannungszustand durch den Gewindewalzprozess nach der Wärmebehandlung (schlussrollen) einen signifikanten Einfluss auf die Empfindlichkeit auf SpRK hat.

Leider konnten im Zuge dieser Untersuchungen keine EN AW 7075 - T7x - SG mit druckinduzierten Eigenspannungen hergestellt werden, da im Rahmen der eigenen Untersuchungen für T7x - SG eine zweite Warmauslagerung durchgeführt werden musste. Bei 3 späteren Folgefertigungen von TAPTITE 2000<sup>®</sup> M8 bei AUT konnte der Zustand T79 mit den angestrebten Festigkeitseigenschaften aber hergestellt werden ( $R_m = 510 - 536$  MPa,  $R_p = 455 - 487$  MPa,  $A = 7,4 - 9,1$  %). Dabei wurde eine 2-stufige

Warmauslagerung von 12 h bei 120°C und 8 h bei 170°C verwendet. Diese Eigenschaften korrelieren optimal mit den Vorgaben der ISO 8839 für EN AW 7075 - Al6 ( $R_{m_{\min}} = 510 \text{ MPa}$ ,  $R_{p0,2_{\min}} = 440 \text{ MPa}$  und  $A_{\min} = 7 \%$ ).

Folgende ergänzenden SpRK-Tests würden noch weiteren Aufschluss über die SpRK-Empfindlichkeit der Legierung EN AW 7075 ergeben:

- a) Prüfkörperkonzept A2 (Tabelle 27) mit Schrauben EN AW 7075 M8 - T79 - SG
- b) Prüfkörperkonzept A2 mit Schrauben EN AW 7075 M8 - T79 - SG und Top Coat (T06E-GZ sowie Iride NCP)
- c) Prüfkörperkonzept A2 mit Schrauben EN AW 7075 M8 -T6 - SG (Vergleichsproben)

Ferner könnte auch ein SpRK-Test wie in der Raumfahrt-Produktsicherung gemäß [38] noch einen weiteren Aufschluss über die SpRK-Anfälligkeit geben. Das bedeutet, dass unter einer Zugspannung bis  $R_{p0,2}$  die Schraube in einer Korrosionszelle pro Stunde alle 10 Minuten mit einer 3,5% NaCl-Lösung kontaminiert. Dabei wäre zu empfehlen, auch in diesem Test Proben nach a) – c) zu durchzuführen.

Bei den eigenen SpRK-Tests erfolgte eine überelastische Montage der Prüfkörper im Hause AUT. Während der Montage kann es zu Schädigungen der Passivschicht kommen. Da aber der Korrosionstest bedingt durch den Transport zur Montanuniversität Leoben erst einige Tage später begonnen hat, kann es zu Repassivierungseffekten von angerissenen Passivschichtteilen gekommen sein.

Beim Prüfkörperkonzept in der Korrosionszelle erfolgt unmittelbar nach dem Einleiten der Zugspannung und aufgrund evtl. angerissener Passivschichten der Korrosionsangriff durch die NaCl-Lösung. Dieser Effekt kann durchaus praxisrelevant sein, weil inzwischen viele Aluminiumschrauben überelastisch montiert werden. Bei dem späteren Auftreten von Betriebslasten kann es bei den überelastisch vorgespannten Al-Schrauben evtl. zu erneuten Anrissen in der Passivschicht kommen.

Ein weiterer Punkt, der außerdem für eine weitergehende Absicherung relevant sein könnte ist, dass dem Streusalz zur Erhöhung des Taupunktes zunehmend Calciumchlorid (CaCl) in hohen Konzentrationen beigemischt wird. Durch die hygroscopische Wirkung von CaCl bleibt das Streusalz länger auf der Straße und natürlich auch auf den kontaminierten Fahrzeugbauteilen. Es wäre zu prüfen, ob sich die Bedingungen für SpRK unter den CaCl – Umgebungsbedingungen verschärfen.

Im Zuge evtl. Ergänzungstests wären parallele Messungen der elektrische Widerstände zu empfehlen, um evtl. ein weiteres Prüfkriterium zur Freigabe zu definieren.

Bei gewindefurchenden Verschraubungen mit hochfesten TAPTITE 2000® EN AW 7075 - T7x schlussgerollt mit mechanischen Eigenschaften entsprechend der ISO 8839 - Al6 erscheint das Risiko der Spannungsrisskorrosion beim Verbau von Magnesium- oder Aluminiumkomponenten gering. Inwieweit durch angepasste Top Coats (T06E – GZ oder Iride NCP mit Torq'n Tension) das Risiko der SpRK noch weiter reduziert wird, könnte durch die o. g. ergänzenden Tests nachgewiesen werden.

---

## 5. Literaturverzeichnis

- [1] *Reusch, J.*: Künftige Trends bei Leichtmetall- Getriebekomponenten. Gießerei 97 11/2010, p.74-79
- [2] Mercedes-Benz, Technische Norm, MBN 8839, Technische Eigenschaften von Aluminiumverbindungselementen. Schrauben aus Al9. Ausgabe 08/2004
- [3] Wikipedia - Link: [http://de.wikipedia.org/wiki/Volkswagenwerk\\_Kassel](http://de.wikipedia.org/wiki/Volkswagenwerk_Kassel)
- [4] *Jakob, T., Gerstmayr, G., Leitner, Oberhuber, P., Hinteregger, C.*, Cost and weight optimization of magnesium power train components by using aluminium thread forming fastener. SAE 2009 World Congress, April 20-23, Detroit, Michigan, Paper 09PFL-1013
- [5] *Jakob, T., Oberhuber, P., Hinteregger, C., Leitner, H., Gerstmayr, G.*, Cost and weight optimization of magnesium power train components by using high strength aluminium thread - forming - bolts. 7<sup>th</sup> International CTI-Symposium, 1. - 4. 12.2008 in Berlin.
- [6] *Kaltenegger, B.*, Verschraubung von Magnesium- Getriebegehäusen mit Stahl- und Aluminium - Gewindefurhschrauben. Diplomarbeit FH JOANNEUM durchgeführt bei MAGNA Drivetrain AG & Co.KG, Sept. 2004
- [7] *Eichseder, W., Leitner, H., Godor, I.*, Verschraubung von GD-AZ91- Getriebegehäusen für MAGNA Powertrain. Berichts.Nr.: AMB04B44, Leoben 2005
- [8] *Hinteregger, C.*, Betriebsfestigkeit von innovativen Leichtmetallverschraubungen im Fahrzeuggetriebebau. Dissertation Montanuniversität Leoben 2008
- [9] *Gerstmayr, G.*, Betriebsverhalten höchstfester Aluminiumschrauben in thermisch belasteten Magnesiumkomponenten. Dissertation Montanuniversität Leoben 2009
- [10] *Leitner, H., Godor, I., Hinteregger, C., Jakob, T.*, Einsatz hochfester Gewindefurhschrauben für Antriebsstrangkomponenten aus Magnesium-Legierungen zur Reduktion des Gewichtes und der Kosten. DVM - Tag, Leichtbaustrategien, 24.04.2008, DVM - Bericht 675, S. 187 - S.1 96
- [11] *Jakob, T., Hinteregger, C., Leitner, H.*, Technology of thread forming fasteners for magnesium for magnesium components taking weight, corrosion, and cost efficiency into account. 2<sup>nd</sup> Fatigue Symposium Leoben, Conference transcript p. 12 - 27, Institute of Mechanical Engineering, 23.-24.04.2008
- [12] ISO 8839, Mechanical properties of fasteners – Bolts, screws, studs and nuts made of non- ferrous metals, First edition - 1986-12-15
- [13] Abschlußbericht an die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH, Projekt-Nr.: 814268/13073-Sch/KUG, Projektitel Gewindefurchende Leichtmetallverschraubungen, Förderzeitraum 01.04.2007 - 30.09.2009, Lehrstuhl für Allg. Maschinenbau, Montanuniversität Leoben
- [14] *Reinhold, B., Kopp, J., Klose, S.G.*, Audi AG Ingolstadt, Korrosionsschutz bei Leichtmetallverschraubungen. DVM - Tag Berlin 1998, p. 59 - 71

- 
- [15] *Heinrich, F.*, Aluminiumschrauben mit gesteigerten mechanischen Eigenschaften für höher beanspruchte Leichtmetallverbindungen. 8. DSV Informationsveranstaltung, 10.05.2006, Kongresshotel MARITIM Darmstadt
- [16] *Westphal, K.*, Verschraubung von Magnesiumkomponenten. Metall 56. Jahrgang 1-2/2002, p. 32 - 34
- [17] *Hinteregger, C., Leitner, H., Jakob, T., Godor, I.*, Relaxationsverhalten von ENAW 7075 Gewindefurchschrauben für Antriebsstrangkomponenten aus Magnesium. Fachaufsatz Verbindungstechnik, Konstruktion September 2009,
- [18] *Mori, G.*, Skriptum Korrosionskunde, Montanuniversität Leoben, Department für Allgemeine, Analytische und Physikalische Chemie, Vorlesungs-Nr.: 120.022
- [19] *Ostermann, F.*, Anwendungstechnologie Aluminium. Springer Verlag, 2. Auflage, 2007
- [20] DIN 515, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Halbzeug, Bezeichnung der Werkstoffzustände
- [21] *Kainer, K. U.*, Magnesium Eigenschaften, Anwendungen, Potenziale. Institut für Werkstoffforschung, Zentrum für Magnesiumtechnologie, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, WILEY-VCH,
- [22] Honsel AG, Handbuch der Gusswerkstoffe, [http://www2.honsel.com/uploads/media/Handbuch\\_Gusswerkstoffe\\_01.pdf](http://www2.honsel.com/uploads/media/Handbuch_Gusswerkstoffe_01.pdf)
- [23] *Barth, A., Rückert, Achten*, Daimler AG, 62nd Welt Magnesium Konferenz, 22.05. - 24.05.2005 in Berlin
- [24] *Willekens, J., Schendera, C.*, Präsentation bei MAGNA Powertrain vom 04.07.2007
- [25] *Koch, R.*, Einfluss von Korrosion und Temperatur auf das Ermüdungsverhalten der Magnesium-Druckgusslegierung AZ91 hp. Dissertation TU Darmstadt 2002
- [26] *Song, G., Atrons, A.*, Corrosion mechanism of magnesium alloy, Advanced Engineering Materials, 1999
- [27] *Makar, G.L., Kruger, K.* Corrosion studies of rapidly solidified magnesium Alloys. Electrochem. Soc.137, 414 - 421, 1990,
- [28] *Kainer, K. U.*, Magnesium Eigenschaften, Anwendungen, Potenziale. *Haferkamp, H., Phan-tan, T., Bach, W., Bußmann, M., Möhwald, K., Schreckenberger, H.*, Magnesiumkorrosion – Prozesse von Anode und Kathode. Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Universität Dortmund / VW Zentrallabor Wolfsburg
- [29] *König, Papke*, Kontaktkorrosion an Aluminium/Stahl- und Magnesium/Stahl-Verbindungen. Galvanotechnik D-88348 Saulgau 89 (1998) Nr. 7
- [30] *Koeppen, H. J., Laudien, G., Schreckenberger, H.*, Bewertung von Oberflächenschutzsystemen für Schrauben.
- [31] *Arz, U.*, Sachstandsbericht zum FVA-Projekt Nr. 470; Höchsthafte Aluminiumschrauben, Gebrauchseigenschaften von höchstfesten Aluminiumschrauben, Berichtszeitraum 01.01.2006 – 30.06.2006, Juni 2006
- [32] *Beyer*, Technische Akademie Esslingen, Schraubenverbindungen
- [33] *Altenpohl, D.* Aluminium von innen. 5. Auflage Aluminium-Verlag, 1994
- [34] *Davis, J. R.*, Corrosion of Aluminium and Aluminium Alloys, ASM International

- 
- [35] *De Jong, H.F.*, Influence of Loading Direction and Environment on the SCC Susceptibility of Aluminium 7075-T651. Department of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, Br. Corros. J., 1980, Vol. 15, No.3:
- [36] *ANH, H. L., FOLEY, R.T.*, Stress Corrosion Cracking of AA 7075-T651 in Various Electrolytes - Statistical Treatment of Data Obtained Using DCB Pre-cracked Specimens. National Association of Corrosion Engineers (NACE), Vol.39, No.10, October 1983
- [37] *Ferrer, P. C., Koul, M.G., Connolly, B.J., Moran, A.L.*, Improvements in Strength and Stress Corrosion Cracking Properties in Aluminium Alloy 7075 via Low - Temperature Retrogression and Re-Aging Heat Treatments. 2003 NACE International, CORROSION - June 2003
- [38] *Jain, A. K.*, Bestimmung der Beständigkeit von Metallen gegenüber Spannungsrisskorrosion. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Raumfahrt Produktsicherung
- [39] *Svenningsen, G.*, Corrosion of Aluminium Alloys. Department of Materials Technology. 7491 Trondheim, Norway  
<http://www.sintef.no/static/mt/norlight/seminars/norlight2003/postere/gaute%20svennisen.pdf>,
- [40] VW - Prüfvorschrift PV 1113, Okt. 2007, "AlMgSi - Knetlegierung: Prüfung der Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion"
- [41] VW Prüfvorschrift PV 1201 " Befestigungs- und Anbauteile für Aggregategehäuse aus Magnesiumlegierungen" (Prüfung der Kontaktkorrosion auslösenden Wirkung)
- [42] VW TL 194 " Beschichtung für Verbindungselemente bei Kontakt mit Magnesium" Oberflächenanforderungen - April 2005
- [43] VW TL 243 " Elektrolytisch abgeschiedene Al-Überzüge und Al/Mg-Legierungsüberzüge" - Mai 2008
- [44] DIN 50021, Sprühnebelprüfung mit verschiedenen Natriumchlorid-Lösungen
- [45] VDA 621 – 415, Prüfung des Korrosionsschutzes von Kraftfahrzeuglackierungen bei zyklisch wechselnder Beanspruchung
- [46] *Dindorf, C.*, Ermüdung und Korrosion nach mechanischer Oberflächenbehandlung von Leichtmetallen, Dissertation Universität Darmstadt 2006
- [47] TU Darmstadt, FG Physikalische Metallkunde, Fortgeschrittenen Praktikum: „Aushärtungen von Aluminiumlegierungen“
- [48] Mori, G. Prüfbericht Institut für Chemie, Montanuniversität Leoben, Prüfberichts-Nr.: LAB 931/07
- [49] Internetauftritt der Fa. Dörken - MKS des Lizenzgebers für Zinklamellenoberfläche Delta Protekt. Link: [http://www.doerken-mks.com/de/produkte-systeme/alle-delta-mksprodukte/basecoat.html?tt\\_products%5Bcat%5D=11&tt\\_products%5Bproduct%5D=38&cHash=758ff2b9b0d9f8f7f06a19f2784df11a](http://www.doerken-mks.com/de/produkte-systeme/alle-delta-mksprodukte/basecoat.html?tt_products%5Bcat%5D=11&tt_products%5Bproduct%5D=38&cHash=758ff2b9b0d9f8f7f06a19f2784df11a)
- [50] Internetauftritt Fa. Mubea (Muhr & Bender, D-57427 Attendorn). Link [n/standard-tellerfedern/korrosionsschutz/delta-tone-delta-seal-beschichtung/](http://www.mubea.com/n/standard-tellerfedern/korrosionsschutz/delta-tone-delta-seal-beschichtung/)

- 
- [51] *Reinhold, Klose, Strobel*, Die silikatische Versiegelung elektrolytisch verzinkter Oberflächen – ein Schutzsystem für Bauteile in Kontakt mit Magnesium. *Materials and Corrosion* 50, p. 517 – 522, 1999
- [52] Gesi – Gewindegewissungs GmbH, Datenblatt elektrostatische Nylonbeschichtung mit modifizierten PA 11. Internetauftritt [http://www.gesi-gmbh.de/produktinfos/elektrostatische\\_nylonbeschichtung.htm](http://www.gesi-gmbh.de/produktinfos/elektrostatische_nylonbeschichtung.htm)
- [53] *Mori, G.*, Prüfbericht Institut für Chemie, Montanuniversität Leoben, Prüfberichts-Nr.: LAB 916/06 – selbstfurchende Schrauben mit unterschiedlichen Anzugsmomenten in einem Magnesiumgehäuse bestehend aus drei Platten AZ 91
- [54] *Mori, G.*, Prüfbericht Institut für Chemie, Montanuniversität Leoben, Prüfberichts-Nr.: LAB 916/07II – selbstfurchende Schrauben mit unterschiedlichen Anzugsmomenten in einem Aluminiumgehäuse bestehend aus drei Platten
- [55] DIN EN 573-3 Aluminium und Aluminiumlegierungen – Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug – Teil 3. 2009
- [56] Pechiney Rhenalu, Aluminium Halbzeug, Mai 1997, Druck Garzanti – Verga / Milan R.C.S. Nanterre B 672 014 081
- [57] *Hieber, G., Messing, P.*, MAGNI Europe GmbH & Co. KG, Veranstaltung SV – Verlag, Fachtagung Innovative Verbindungstechnik, Neckarsulm 2012, Internetauftritt <http://www.themagnigroup.com/index-2.html>
- [58] Internetauftritt Ewald Dörken GmbH: <http://www.doerken-mks.de/de/mikroschicht-korrosionsschutz-systeme.html>
- [59] TAPTITE 2000® Prospekt der Fa. Research Engineering & Manufacturing Inc. REMIC and CONTI Fasteners AG Internetauftritt: <http://www.taptite.net/taptite/documents/TAPTITE2000FastenerBrochure-German.pdf>
- [60] OKS Schmierstoffe GmbH, OKS 1700 – Produktinformation, Version: D-04.1/03
- [61] Internetauftritt Mac Dermid GmbH: <http://industrial.macdermid.com/cms/anti-corrosion/zinklad/zinklad-specifications-approvals/vw-audi/index.shtml>
- [62] VDA – Prüfblatt VDA - 235 – 101, November 2009, Reibungszahleinstellung von mechanischen Verbindungselementen mit metrischen Gewinde
- [63] Mercedes - Benz Werknorm DBL 9440, Ausgabe 2012-10, Verbindungselemente mit metrischem Gewinde, Oberflächenschutz und ergänzende Technische Lieferbedingungen
- [64] Mercedes - Benz Werknorm DBL 8451, Ausgabe 2008-9, Galvanisch abgeschiedene Zink-, oder Zinklegierungsschichten für Bauteile aus Eisenwerkstoffen
- [65] SurTec Deutschland GmbH, SurTec® 650, ChromitAl® TCP, Homepage: <http://www.SurTec.com>
- [66] VDI – Richtlinie VDI 2230, Ausgabe Februar 2003, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen, VDI Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Fachbereich Konstruktion, Ausschuss Schraubenverbindungen

---

## 6. Publikationsverzeichnis

Im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit des Verfassers auf dem Gebiet der gewindefurchenden Magnesiumverschraubung unter Berücksichtigung von Korrosionsaspekten wurden folgende Publikationen veröffentlicht (B...schriftlicher Beitrag, V...Vortrag, P...Poster):

B, V *Jakob, T., Gerstmayr, G., Leitner, Oberhuber, P., Hinteregger, C.*, Cost and weight optimization of magnesium power train components by using aluminium thread forming fastener. SAE 2009 World Congress, April 20-23, Detroit, Michigan, Paper 09PFL-1013

B, V *Jakob, T., Oberhuber, P., Hinteregger, C., Leitner, H., Gerstmayr, G.*, Cost and weight optimization of magnesium power train components by using high strength aluminium thread - forming - bolts. 7<sup>th</sup> International CTI-Symposium, 1. - 4. 12.2008 in Berlin.

B, V *Hinteregger, C., Leitner, H., Jakob, T., Oberhuber, P., Gerstmayr, G.*, Einsatz hochfester Alu-Gewindefurchschrauben in kriechbeständigen Mg-Legierungen bei optimaler Korrosionsbeständigkeit für power train Komponenten zur Reduktion des Gewichtes, der Kostenreduktion sowie der ökologischen Umweltbelastung, DVM Tag 2008 in Berlin „Leichtbaustrategien“

B, V: *Jakob, T., Oberhuber, P., Hinteregger, C., Leitner, H., Gerstmayr, G.*, Technology of Aluminium Threadforming Fasteners for Magnesium Powertrain Components Taking Weight, Corrosion and Cost Efficiency into Account, 2<sup>nd</sup> Fatigue Symposium Leoben, 23<sup>rd</sup> – 24<sup>rd</sup> April 2008, Montanuniversität Leoben

B, V: *Jakob, T., Oberhuber, P., Hinteregger, C., Leitner, H., Gerstmayr, G.*, Thread-Forming Fastening Technology for Magnesium Components Taking in Consideration of Weight, Corrosion and Cost, 10<sup>rd</sup> – 11<sup>rd</sup> June 2008, Global Powertrain Congress, Chicago, Vals, Netherlands

B: *Gerstmayr, G., Mori, G., Leitner, H., Eichseder, W.*:" On the applicability of high strength self-tapping aluminium bolts in magnesium nut materials for automotive applications" Materials and Corrosion 2009, 60, No.9999, 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG, Weinheim

## 7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aushärtungszustände nach DIN 515 S.8 [20] .....	7
Abbildung 2: Bezeichnungsbeispiele Mg-Legierung nach der ASTM-Norm B – 94 [21] .....	9
Abbildung 3: Bezeichnungsbeispiel Mg-Legierung [22].....	9
Abbildung 4: Abtragswerte von AZ91-Platten nach 120 h DIN 50021 gem. [29] .....	17
Abbildung 5: Abtrag AZ91 verschraubt mit Al- und Stahlschrauben nach 120 h SST [30]....	18
Abbildung 6: Abtragswerte an Mg-Platten mit Al-Schrauben Leg. 7x verspannt [31].....	19
Abbildung 7: Abtragswerte an Mg-Platten mit Al-Schrauben Leg. 6xxx verspannt [31] .....	19
Abbildung 8: Rauheitsprofil der Mg-Platten nach 96 h SST mit Al- und Stahl-Schrauben [31] .....	20
Abbildung 9: Wesentliche Voraussetzungen für das Auftreten von SpRK gem. [32] .....	21
Abbildung 10 a): Pitting Korrosion [39].....	24
Abbildung 10 b): IKK von AA6005 nach [39].....	24
Abbildung 11: Einfluss der Auslagerung auf die SpRK-Empfindlichkeit EN AW 7075 [19] ...	26
Abbildung 12: Schema eines SpRK-Tests an ENAW 7x-Schrauben mit Auslagerung im Wechselklimatetest VDA 621 - 415 [31] .....	26
Abbildung 13: Maximal erreichbare Festigkeiten von Al-Legierungen 7xx und 6xx nach [31] .....	28
Abbildung 14: R <sub>m</sub> , R <sub>p0,2</sub> und Dehnung aus Zugversuch der SpRK-Prüfschrauben nach Tabelle 9 [31] .....	29
Abbildung 15: SpRK-Test nach [31], EN AW 7075 - schlussgerollt im Zustand T6, T76 und T79.....	29
Abbildung 16: SpRK-Test nach [31]: EN AW 7x - schlussgerollt im Zustand T6, T76 und T79 .....	30
Abbildung 17: Projektteam zur Definition & Durchführung von Korrosionstests .....	32
Abbildung 18: Schichtaufbau von Magni 594, Zinklamelle mit Deckschicht [57] .....	35
Abbildung 19: Vormontage in Kernloch 7,30 mm mit TAPTITE 2000 <sup>®</sup> M8 x 60 - 10.9.....	37
Abbildung 20: Vormontage mit TAPTITE 2000 <sup>®</sup> M8 x 60 - 10.9 in AZ91HP .....	38
Abbildung 21 a): Montage M8 EN AW 6056 .....	39
Abbildung 21 b): TT2000 <sup>®</sup> M8 EN AW 7075.....	39
Abbildung 22 a) M8 EN AW 7075 + DeltaSeal .....	39
Abbildung 22 b) M8 EN AW 7075 + Nylon.....	39
Abbildung 23 a): AZ91HP-Gehäuse vor SST .....	40
Abbildung 23 b): AZ91HP-Gehäuse nach 720 h SST .....	40
Abbildung 24 a) AZ91HP-Gehäuse vor SST .....	40
Abbildung 24 b) AZ91HP-Geh. nach 720 h SST .....	40
Abbildung 25 a): EN AW 6056 nach 720 h SST .....	41
Abbildung 25 b): EN AW 7075 nach 720 h SST .....	41

Abbildung 26 a): gereinigt EN AW 6056, 720 h SST	b): gereinigt EN AW 7075, 720 h SST	41	
Abbildung 27 a) EN AW 7075 + AlMg3-Scheibe	b) EN AW 7075 + Delta Seal + AlMg3-Scheibe	42	
Abbildung 28: EN AW 7075 + Delta Seal, 720 h SST		42	
Abbildung 29 a): EN AW 7075 + Nylon	b): EN AW 7075 + Nylon + AlMg3 - Scheibe	43	
Abbildung 30: EN AW 7075 + Comp Cote nach Reinigung		43	
Abbildung 31 a): M8 - 8.8 + DeltaTone DeltaSeal	b): M8 - 8.8 + D.Tone D.Seal + AlMg3-Scheibe	44	
Abbildung 32 a): M8 - 8.8 + DeltaTone DeltaSeal	b): M8 - 8.8 + D.Tone D.Seal + AlMg3-Scheibe	44	
Abbildung 33 a): REMFORM® 4 x 14	b): REMFORM® nach Reinigung	c): Prinzipskizze REMFORM®	45
Abbildung 34 a) M8 EN AW 6056	b) TAPTITE 2000® M8 EN AW 7075	51	
Abbildung 35 a) TT2k® EN AW 7075 + T06E-GZ	b) TT2k® EN AW 7075 + K14-Versiegelung	51	
Abbildung 36 a) TT2k® EN AW 7075 + Iride NCP	b) TT2k® EN AW 7075 + Torq'n Tension 11	52	
Abbildung 37 a) Stahl-Schraube + Zn mit Al-Topf	b) Stahl-Schraube + B46 + 2 x T06E-GZ	52	
Abbildung 38 a): Stahl-Schraube+VW C696 +Nylon	b): Stahl-Schraube+B46+2xT06E-GZ + Nylon	53	
Abbildung 39 a): Stahl-Schraube + VW C696	b): Stahl-Schraube + B46 + 2xT06E-GZ	53	
Abbildung 40 a): Evans-Diagramm AZ91 und EN AW 6056 [9]	b): AZ91 und EN AW 7075	55	
Abbildung 41 a): Evans-Diagramm AZ91 und Stahl verzinkt [9]	b): AZ91 und Stahl blank	55	
Abbildung 42 a): Evans-Diagramm AE44 und EN AW 6056	b): AE44 und EN AW 7075	56	
Abbildung 43 a): Evans-Diagramm AE 44 und Stahl verzinkt blank	b): AE 44 und Stahl blank	56	
Abbildung 44: Mg-Klemmplatte (AZ91HP) als Oberplatte gemäß ARNOLD Z. Nr. 00-05-411		57	
Abbildung 45: Mg-Einschraubplatte (AZ91HP) als Unterplatte gemäß ARNOLD Z.Nr. 00-05-412		58	
Abbildung 46: Mg-Klemmplatte (AZ 91) als Mittelplatte gemäß ARNOLD Z.Nr. 00-05-415		58	
Abbildung 47: 1. SpRK-Test an drei verschraubten AZ91HP-Platten mit TT2k® EN AW 7075 - T6		59	

Abbildung 48: AZ91HP-Verschraubung mit TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 - T6 mit Vorspannkraftmessung .....	60
Abbildung 49: Graphische Darstellung der Drehmoment- und Vorspannkraftmessung gemäß Abb. 48.....	60
Abbildung 50 a): Nach 100 h SpRK-Test Prüfaufbauoberseite b): Prüfaufbauunterseite ..	62
Abbildung 51 a) Nach 100 h SpRK-Test Drehmomentenverlauf beim Lösen b) Schraubenbrüche.....	62
Abbildung 52: Lichtoptische Vergrößerung einer beim Lösen gebrochenen Schraube [53] ..	62
Abbildung 53: Elektronenoptische Vergrößerung einer beim Lösen gebrochenen Schraube [53].....	63
Abbildung 54: Lichtoptische Vergrößerung vom Gewinde mit Bruch nahe Schraubenmitte ..	63
Abbildung 55 a) und b) Mittlere AZ91HP-Klemmplatte c) Ausgefallenes Magnesiumhydroxid .....	64
Abbildung 56: Schematische Schraubendarstellung in Anlehnung an VDI 2230, S. 28 [66]..	66
Abbildung 57: AlMgSi <sub>0,5</sub> -Platten (oben Draufsicht, Mitte Seitenansicht, unten Unteransicht) .....	68
Abbildung 58 a): Schraubenlängenmessung ohne Vorspannkraft b): Mit Vorspannkraft....	69
Abbildung 59 a) Furchen in AlMgSi <sub>0,5</sub> mit M <sub>A</sub> ~ 15 Nm b): Lösen nach 500 h Korrosionstest .....	69
Abbildung 60 a): Furchen in AlMgSi <sub>0,5</sub> und M <sub>A</sub> ~ 20 Nm b): Lösen nach 500 h Korrosionstest .....	70
Abbildung 61 a): Furchen in AlMgSi <sub>0,5</sub> und M <sub>A</sub> ~ 25 Nm b): Lösen nach 500 h Korrosionstest .....	70
Abbildung 62: Beim Lösen gebrochene Schraube L1 (Tabelle 21) nach 500 h SpRK-Test...72	
Abbildung 63: Nicht-gebrochene TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 – T6-Schraube, Tabelle 21, L14 [54] .....	74
Abbildung 64: Prüfschraube mit Aussentorx für SpRK-Tests ab August 2007 .....	76
Abbildung 65 Übersicht der Fertigungsaufträge M8 EN AW 7075 für die SpRK-Tests ab 09 / 2007.....	78
Abbildung 66 .....	78
Abbildung 67: Überdrehtest TAPTITE 2000 <sup>®</sup> M8 x 60 – ENAW 7075 – T6 im Prüfaufbau A2 .....	82
Abbildung 68 a) Drehmomentkurven zu Tab. 29: L1 – L5 b) Tab. 29: Drehmomentkurven L6, L7 .....	82
Abbildung 69: a) Prüfkonzept Mg TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 von 2004 b) TT2k <sup>®</sup> von Jan. 2008 ..	84
Abbildung 70: Vorspannkraft-Messung mit Kraftmessdose in Al-Klotz bis Schraubenbruch ..	85
Abbildung 71: Graphische Darstellung der Drehmoment- & Vorspannkraftmessung .....	85
Abbildung 72: Prüfkonzept Mg: Mg-Klemmteil und Al-Einschraubteil.....	86
Abbildung 73 a): Drehmomentgraph Überdrehtest b) Cursor 20Nm + 65° (Abbildung 73 / Tabelle 33) .....	86



## 8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Al-Legierungsreihen und deren wichtigsten Legierungselemente [56].....	5
Tabelle 2: Mech. Eigenschaften und chem. Zusammensetzung wichtiger Al-Legierungen ...	7
Tabelle 3: Rm, Rp0,2 und Bruchdehnungen EN AW 7075 im T6 und T76 – Zustand [19] ...	8
Tabelle 4: Eigenschaftsbewertung wichtiger Mg-Legierungen nach [23].....	10
Tabelle 5: Rm, Rp0.2 und Bruchdehnung [23].....	10
Tabelle 6: Eigenschaftsbewertung wichtiger Mg-Legierungen nach [24].....	10
Tabelle 7: Mg-Legierungen, die vom Projektteam näher untersucht wurden [13].....	11
Tabelle 8: Massenabtrag von Mg-Legierungen nach Salzsprühnebeltest [29] .....	14
Tabelle 9: Anziehungsmomente (MA) der Al-Schrauben zur Verschraubung gem. Abbildung 1227	
Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung der EN AW 7349- und EN AW 7449-Schrauben [31].....	27
Tabelle 11: Begriffsdefinitionen von Schraubenoberflächen, DBL 9440 [63] und DBL 8451 [64].....	34
Tabelle 12: Schraubenwerkstoff- und Oberflächenauswahl für 1. galvanischen Korrosionstest .....	36
Tabelle 13: Korrosionstiefen in den verschraubten AZ91HP-Gehäusen nach 720 h SST ....	46
Tabelle 14: Korrosionstiefen der Schrauben nach 720 h SST im Kontakt mit AZ91HP .....	46
Tabelle 15 Schraubenwerkstoff- und Oberflächenauswahl für 2. galvanischen Korrosionstest .....	49
Tabelle 16: Erläuterungen zu den Beschichtungen des 2. Galvanischen Korrosionstestes ..	50
Tabelle 17: Max. korrosive Angriffstiefe verschraubter AZ91HP-Gehäuse nach 720 h SST	54
Tabelle 18: Vorspannkräfte und Drehmomente bei Versuchsaufbau gemäß Abbildung 48..	61
Tabelle 19: SpRK-Test in AlMgSi0,5 mit TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 – T6 und M <sub>A</sub> = 15 Nm.....	70
Tabelle 20: SpRK-Test in AlMgSi0,5 mit TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 – T6 und MA = 20 Nm.....	71
Tabelle 21: SpRK-Test in AlMgSi0,5 mit TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 – T6 und MA = 25 Nm .....	71
Tabelle 22: Beim Lösen gebrochene TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 - T6 (Pos L1) nach 500 h SpRK-Test [54].....	73
Tabelle 23: Übersichtstabelle SpRK-Tests bis Februar 2007.....	75
Tabelle 24 Chemische Zusammensetzung der 2007 von AUT gefertigten Prüfschrauben....	77
Tabelle 25 Chemische Zusammensetzung EN AW 7075-Vorgabe gem. DIN 573 – 3 [55] ..	77
Tabelle 26: Einfluss der Wärmebehandlung bei EN AW 7075 M8 x 60 auf Rm, Rp0,2 und A .....	78
Tabelle 27: Prüfungskonzepte der SpRK-Tests ab September 2007.....	80
Tabelle 28: Planungskonzept der SpRK-Tests ab September 2007 .....	81
Tabelle 29 M <sub>A</sub> und Schraubenverlängerung, Prüfkörper A2, TAPTITE 2000 <sup>®</sup> - T6 - SG von 2004.....	82

Tabelle 30: Prüfkonzept A2, Anziehungsmomente 7075-Schrauben von 2007 .....	83
Tabelle 31: Prüfkonzept A2, Schraubentypen (neue Produktion 2007 & TU Darmstadt).....	83
Tabelle 32: Drehmomentgraphen, Prüfkonzept A2, (TT2k <sup>®</sup> M8 EN AW 7075 Produktion 2007).....	84
Tabelle 33: Anziehdrehmomente und Montagevorspannkraft über Verlängerung, TT2k <sup>®</sup> von 2004 .....	87
Tabelle 34 Montage TT2k T6 / T7 (Schraubenfertigung 07): MA u. Verlängerung-Konzept Mg.....	87
Tabelle 35: Drehmomentkurven Prüfkonzept Mg, Schraubentypen (neue Produktion 2007) .....	88
Tabelle 36: Dokumentation MA & $\Delta L$ Prüfkonzept Ribe-VDA, Schraubenproduktion 2004 ...	90
Tabelle 37: Drehmomentkurven Ribe-VDA zu Tabelle 36 (Schraubenproduktion 2004) .....	91
Tabelle 38: Dokumentation MA & $\Delta L$ Prüfkonzept Ribe-SSN, Schraubentypen (Produktion 2004).....	91
Tabelle 39: Drehmomentkurven-Konzept Ribe - SSN zu Tabelle 38 (Schraubenproduktion 2004).....	92
Tabelle 40 a) Prüfaufbauten                      b) Schraubentypbeschreibung (Schraubenproduktion 07).....	92
Tabelle 41: Drehmoment ( $M_A$ ) für Prüfaufbau Ribe – SSN / $M_A$ und $F_v$ für Prüfkonzept VV.	93
Tabelle 42 Drehmoment ( $M_A$ ) für Prüfaufbau Ribe – VDA .....	93
Tabelle 43: Konzept Al-Block - 80°C, TT2k <sup>®</sup> M8 EN AW 7075 -T6 - SG - OKS 1300 (2004) - $M_A$ , $\Delta l$ .....	96
Tabelle 44: Drehmomentkurven Prüfkonzept Al-Block - 80°C zu Tabelle 43.....	96
Tabelle 45: Brüche TT2K <sup>®</sup> EN AW 7075 bei verschraubten Rahmen aus A2, Al & Mg während des Korrosionstests nach VDA 621 - 415 [9].....	98
Tabelle 46: Lichtbildoku. SpRK-Test, VDA 621 – 415 (Konzept A2, Mg, Ribe-Al-Rahmen ..	99
Tabelle 47: Lichtbilddokumentation SpRK-Test 18 Wochen VDA 621 – 415, Konzept A2 und Mg.....	100
Tabelle 48: Lichtbilddokumentation SpRK-Test, Konzept A2 und Mg, TT2k <sup>®</sup> EN AW 7075 – T6.....	101
Tabelle 49: SpRK-Test: TT2K <sup>®</sup> M8 EN AW 7075 – T6 bei Prüfkonzept A2, Mg und Al [9]	102
Tabelle 50: Brüche TT2K M8 EN AW 7075, DIN 50021, Konzept Ribe-SSN und Al-Block 80°C [9].....	103
Tabelle 51: Lichtbilddokumentation SpRK-Test, 18 Wochen VDA 621-415: Konzept Ribe - VDA .....	104
Tabelle 52: Vergleich der chem. Zusammensetzung, Vorgabe EN AW 7075 vs. Prüfschrauben.....	109

## 9. Formelverzeichnis

Formel 1: Passivschichtbildung bei Aluminium .....	12
Formel 2: Metallkorrosion – anodische Teilreaktion .....	12
Formel 3: Metallkorrosion – anodische Teilreaktion .....	12
Formel 4: Metallkorrosion – anodische Teilreaktion .....	12
Formel 5: Metallkorrosion – kathodische Teilreaktion bei sauren Medien .....	12
Formel 6: Metallkorrosion – kathodische Teilreaktion bei alkalischen Medien .....	13
Formel 7: Metallkorrosion – mit Verbrauch von gelöstem Sauerstoff .....	13
Formel 8: Metallkorrosion – bei alkalischem Medium .....	13
Formel 9: Chemische Reaktion von Mg in reinem Wasser bei Bildung passiver Filme .....	13
Formel 10: Wasserstoffbildung bei Reaktion nach Formel 9 .....	13
Formel 11: Mg – Passivschichtauflösung in wässrigen Lösungen .....	14
Formel 12: Korrosionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Leg. Elementen [28] .....	15
Formel 13: Allgemeine Korrosionsreaktion von Mg .....	16
Formel 14: Anodische Teilreaktion bei der Mg-Korrosionsreaktion .....	16
Formel 15: Kathodische Teilreaktion bei der Mg-Korrosionsreaktion .....	16
Formel 16: Folgereaktion des Magnesium-Ions und des Hydroxid-Ions zu Mg-Hydroxid .....	16
Formel 17: Korrosionsstrom bei verschraubten Mg-Komponenten nach [30] .....	16
Formel 18 Pitting Korrosion – Teilreaktion vom Al .....	24
Formel 19 Pitting Korrosion – Weiterreaktion vom Al .....	24
Formel 20 Pitting Korrosion – Reaktion im Bereich des intermetallischen Partikels .....	24
Formel 21: Zusammenhang zwischen Vorspannkraft, Längenänderung und elastischer Nachgiebigkeit .....	65
Formel 22: Längung des zylindrischen Einzelelements .....	65
Formel 23: Elastische Nachgiebigkeit der Einzelelemente: .....	66
Formel 24: Berechnung der elastischen Schraubengesamtnachgiebigkeit .....	66
Formel 25: Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit der gewindefreien Zone unter dem Schraubenkopf .....	66
Formel 26: Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit des nicht-ingeschraubten Gewindes .....	66
Formel 27: Berechnung $\delta_{sk}$ als Schraubenkopfnachgiebigkeit .....	66
Formel 28: Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit des eingeschraubten Schraubengewindes .....	67
Formel 29 Berechnung der elastischen Nachgiebigkeit des Mutterngewindes .....	67