 DOI 10.1002/mawe.201000676

Vermeidung von Bimetallkorrosion – Systematische Entwicklung eines Magnesium Karosseriebauteils

Preventing galvanic corrosion – Systematic development of a magnesium car body component

H. Schreckenberger[1], P. Izquierdo[1], S. G. Klose[1], C. Blawert[2], Volker Heitmann[2], D. Höche[2], K. U. Kainer[2]

Die Rückwandtür des neuen Mercedes-Benz E-Klasse T-Modells ist ein Beispiel für eine Hybridbauweise bestehend aus einem Innenteil aus Magnesiumdruckguss und einer Beplankung aus Aluminiumblech. Dabei muss das Bauteil eine Reihe von Anforderungen hinsichtlich Maßhaltigkeit, Gewicht, Steifigkeit, Crash- und Korrosionsverhalten erfüllen. Das Hybridkonzept im Allgemeinen, diverse Anbindungspunkte und Berührungsflächen erfordern eine sorgfältige Konstruktion, um Bimetallkorrosion zu vermeiden. Kritische Punkte werden angesprochen und anhand von zwei Beispielen (Gasdruckfeder und Türscharnier) werden die konstruktiven Kriterien diskutiert. Abschließend wird das Konzept der Korrosionsschutzmaßnahmen vorgestellt und Ergebnisse von verschiedenen Korrosions- und Funktionserprobungen präsentiert.

Schlüsselwörter: Magnesium / Magnesiumdruckguss / Bimetallkorrosion / Korrosionsschutz

The hatch back of the new Mercedes-Benz E-Class T-Model is one example for a hybrid design with inner magnesium high pressure die casting liner and outer aluminium sheet. The hybrid lift gate has to fulfil a variety of requirements corresponding to dimensional stability, weight, stiffness, crash and corrosion performance. The hybrid concept in general as well as various interfaces and connecting points require a careful design to prevent galvanic corrosion. Critical points are introduced and for two examples (gas pressure spring and hinge) the constructive criterions are discussed. Finally, the concept of corrosion protection measures and results of various testing trials of the component are presented.

Keywords: Magnesium / magnesium high pressure die casting / galvanic corrosion / corrosion protection

1 Einleitung

Der Einsatz von Magnesium hat bei Mercedes-Benz eine langjährige Tradition und wird definitionsgemäß als werkstofflicher Leichtbau bezeichnet. Größenordnungsmäßig trägt eine Verringerung der Fahrzeugmasse um 100 kg zu einer Einsparung von ca. 0,3 bis 0,4 l Kraftstoff bei. Dies entspricht einer Reduzierung von etwa 7 bis 9 g CO_2 je 100 km in der Bilanz der Abgasemissionen.

Magnesium ist dabei der leichteste und gleichzeitig der elektrochemisch unedelste metallische Konstruktionswerkstoff [1, 2]. In Form eines Bauteiles sind Magnesium und seine Legierungen immer im Verbund mit anderen Werkstoffen zu betrachten. Dieser Verbund aus unterschiedlich edlen Werkstoffen stellt im Falle einer korrosiven Beanspruchung die eigentliche Herausforderung für die Konstruktion und die zugehörigen Fertigungsprozesse dar. Das Risiko von Bimetallkorrosion ist hier von zentraler Bedeutung und muss konzeptionell und über den gesamten Entwicklungsprozess des Bauteiles hinweg systematisch ausgeschlossen werden.

Prominente Beispiele für den Einsatz von Magnesium sind beispielsweise die Türinnenteile beim Mercedes Benz SL (AM50), des S-Klasse Coupes CL (AM50) [3] sowie das baureihenübergreifend eingesetzte 7-Gang-Automatikgetriebe NAG2 (AS31). Die genannten drei Bauteile werden jeweils im Druckgussverfahren hergestellt. Diese Tradition wird in Form einer Magnesium-Hybrid-Rückwandtür beim T-Modell der neuen E-Klasse fortgesetzt. Die an der Entstehung des Bauteiles beteiligten Konstrukteure, Fertigungsplaner, Qualitätssicherer und Gießereifachleute konnten daher an einen breiten Erfahrungsschatz in der Entwicklung, Fertigung als auch im langjährigen Kundenfahrbetrieb anknüpfen.

2 Bauteilbeschreibung

Die Hybridbauweise bietet für mehrteilige Karosseriebauteile einerseits den Vorteil die Anforderung Einteiligkeit mit hoher

[1] Daimler AG, Stuttgart
[2] GKSS, Geesthacht

Korrespondenzautor: Dr.-Ing. Carsten Blawert, GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Institut für Werkstoffforschung, MaxPlanck-Straße 1, 21502 Geesthacht
E-Mail: carsten.blawert@gkss.de

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Funktionsintegration in Form eines Druckgussbauteils umzusetzen, andererseits lässt sich die Forderung nach einer optisch ansprechenden Oberfläche nur mittels herkömmlicher Blechbauweise darstellen. Ist gleichzeitig Leichtbau gefragt, ist für das Innenteil Magnesiumdruckguss mit einer Dichte von 1,8 g/cm^3 erste Wahl, und für die Beplankung ist Aluminiumblech mit einer Dichte von 2,7 g/cm^3 zu wählen [4], da zur Zeit Magnesium-Druckgussbauteile nicht in Außenhautqualität darstellbar sind.

Diese Aluminium-Magnesium-Hybridbauweise kam bei Mercedes Benz erstmalig für eine Rückwandtür im aktuellen T-Modell der E-Klasse S212 im Herbst 2009 zur Großserienanwendung. Die Herstellung des 7,1 kg schweren Magnesium-Innenteils erfolgt in der firmeneigenen Gießerei in Mettingen auf einer 4200 t Kaltkammerdruckgussmaschine. Nach Abguss wird über Grobstanzen, Feinstanzen und Schleifen die Maßhaltigkeit erzielt. Das 1400 × 1100 mm große Innenteil weist Wandstärken von 2 bis 5 mm auf und ist an mehreren Bereichen mit Rippen verstärkt. Die integrierten Lampentöpfe stellen gießtechnisch sowohl bei der Formfüllung als auch beim Ausformen hohe Anforderungen an den Formenbau und die Prozessführung. Der gesamte Aluminium-Magnesium-Zusammenbau bietet gegenüber der Stahlblechbauweise einen Gewichtsvorteil von ca. 5 kg.

Die im Automobilbau zu erfüllenden Crashanforderungen schränken die Wahl der möglichen Magnesiumlegierungen der Hybrid-Rückwandtür ein, da neben hoher Festigkeit auch ausreichende Duktilität erforderlich ist. Die Duktilität nimmt einerseits mit Erhöhung des Aluminiumanteils ab, während andererseits die Gießfähigkeit der Legierung verbessert wird. Die bei der Entwicklung der Rückwandtür untersuchten Legierungen unterscheiden sich in den mechanischen Eigenschaften Zugfestigkeit R_m, Streckgrenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A5 nur gering (siehe Tab. 1). Die tabellierten Werte aus der Liefervorschrift stellen Mindestanforderungen dar. Die mechanischen Eigenschaften von AMZ30 und AM50 sind in etwa vergleichbar, während sich bei AM60 die Streckgrenze schon deutlich erhöht und die Duktilität sich entsprechend auf ca. 8% verringert. Zur Anwendung kommt bei der Rückwandtür die Magnesiumlegierungen AM50 mit relativ niedrigem Aluminiumanteil.

Aluminium als Legierungselement beeinflusst zusätzlich das Korrosionsverhalten positiv durch eine Stabilisierung der Passivschichten aufgrund der Bildung von Aluminiumoxid. Bei dem niedrigen Al-Gehalt der Legierung AM50 bildet sich die β-Phase ($Mg_{17}Al_{12}$) meist nur in Form von einzelnen Ausscheidungen aus. Es bildet sich kein geschlossenes Netzwerk entlang der Korngrenzen und somit besteht keine schützende Korrosionsbarriere. Im Gegenteil muss über die Bildung von mikrogalvanischen Zellen im Gefüge mit einer Verschlechterung der Korrosionseigenschaften bei Anwesenheit der edleren β-Phase gerechnet werden [5, 6, 7]. Die Bimetallkorrosion in Kombination mit anderen Metallen lässt sich jedoch kaum über die Wahl der Legierung beeinflussen.

Der Korrosionsschutz erfordert es somit, das bearbeitete Magnesium-Innenteil mit 20 µm KTL (kathodische Tauchlackierung) und 80 µm Pulverlack zu beschichten, bevor die Aluminiumbeplankung aus AC170 (Legierung AA6014) mittels Rollfalzen und Kleben gefügt wird. Aufgrund der geringen Wandstärken des Druckgussbauteils ist keine Direktverschraubung von Montageteilen möglich und es kommen nach der Pulverbeschichtung Blindnietmuttern aus Aluminium zur Anwendung. Im Anschluss an den Falzvorgang durchläuft die Rückwandtür zusammen mit dem Karosserierohbau die Lackierung und erhält zusätzlich eine Nahtabdichtung und Hohlraumkonservierung.

Tabelle 1. Mechanische Kennwerte der Legierungen AMZ30, AM50 und AM60 im Druckguss [17, 18]

Table 1. Mechanical properties of high pressure die casted alloys AMZ30, AM50 and AM60

Legierung	R_m [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	A5 [%]
AMZ30	> 200	> 100	> 12
AM50A	200	110	10
AM60A	220	130	8

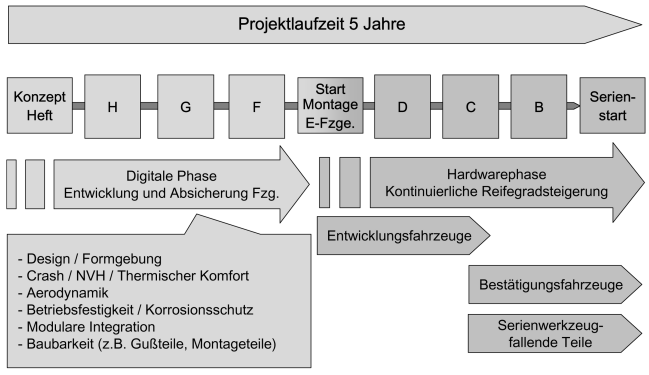

Bild 1. Darstellung des Mercedes Developing System [8].

Figure 1. Representation of the Mercedes Developing System [8].

3 Entwicklungssystematik

Der typische Produktzyklus in der Automobilindustrie beträgt bei fast allen Herstellern etwa 7 Jahre. Der Entwicklungsablauf zur Produktentstehung ist bei Mercedes-Benz im Mercedes-Benz-Development-System (MDS) standardisiert und durchläuft mehrere Phasen, *Bild 1* [8].

Frühzeitig, schon etwa 3 Jahre vor dem Start der Serienfertigung, müssen bei Mercedes-Benz die Funktionalanforderungen z.B. zum Korrosionsschutz festgelegt sein. Nach der Festlegung erfolgt die versuchsseitige Validierung, d. h. die Prüfung, ob die festgelegten Anforderungen auch erfüllt werden. Innerhalb der Entwicklungsphase werden Entwicklungsfahrzeuge im dynamischen Mercedes-Benz-Korrosionsdauerlauf (MEKO-D) für Gesamtfahrzeuge geprüft. Die entwicklungsbegleitende Prüfung einzelner Komponenten im statischen Mercedes-Benz-Korrosionsdauerlauf (MEKO-S) ergänzt zusätzlich die Absicherung.

Für alle notwendigen Prüfungen der Magnesium-Hybrid-Rückwandtür galt es, sie in diesen koordinierten und systematischen Entwicklungsprozess einzubetten und iterativ den Korrosionsschutz zu entwickeln. Trotz der ausgeprägten Anfälligkeit für Bimetallkorrosion des Werkstoffs Magnesium müssen im

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Anwendungsfall der Rückwandtür eine Vielzahl von Anbindungspunkten (z. B. Scharnier, Schlossverstärkung) realisiert werden. Die meisten im Automobilbau verwendeten Werkstoffe und Beschichtungen (z. B. Zink-Nickel, Zinklamelle) sind gegenüber Magnesium kathodisch wirksam und führen zu ausgeprägter Bimetallkorrosion [9]. Durch eine eng abgestimmte Zusammenarbeit zwischen allen Bereichen lässt sich der Werkstoff Magnesium trotzdem im Automobilbau beherrschen, was im folgenden gezeigt werden soll.

4 Kritische Anbindungspunkte

Der im Korrosionsschutz häufig betrachtete Begriff des Korrosionsschutzsystems spielt beim Ermitteln der kritischen Anbindungspunkte der Rückwandtür eine entscheidende Rolle. Der Systemgedanke beinhaltet nicht nur die Wechselwirkungen einzelner Werkstoffe und Beschichtungen untereinander (z. B. können Elastomerbauteile durch Rußzuschläge Bimetallkorrosion an Leichtmetallen bewirken), sondern berücksichtigt auch Angebot und Verteilung des Elektrolyten.

Ein Fahrzeug ist im Betrieb den äußeren Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Niederschlägen, hoher Luftfeuchtigkeit und im Winter Streusalzen ausgesetzt. Eine Rückwandtür hat als bewegliches Karosseriebauteil im Wesentlichen die Aufgabe den Fahrzeuginnenraum vor Umwelteinflüssen zu schützen. Mittels der Dichtlinie der umlaufenden Elastomerdichtung, die am Magnesiuminnenteil aufliegt, entsteht der Trockenbereich. Zusätzlich gibt es noch den Hohlkörper zwischen Innenteil und Beplankung, der z. B. durch Kondenswasserbildung belastet ist. Die systematische Einteilung in Bereiche, die einer unterschiedlichen Feuchte und somit einer unterschiedlichen Korrosionsbelastung ausgesetzt sind, ermöglicht es, für die Anbindungspunkte entsprechend der Belastungsklassen einen geringen oder starken Korrosionsschutz vorzusehen, *Bild 2*. Das Schichtsystem zum Korrosionsschutz des Magnesium-Innenteils ist jedoch auf der gesamten Fläche gleich. Mittels einer Schnittstellentabelle ließ sich jeder Anbindungspunkt des Magnesium-Innenteils erfassen, einer Belastungsklasse zuordnen und die getroffene Werkstoffauswahl mit zugehöriger Beschichtung fixieren. Somit wurde sichergestellt, dass die fast 60 Anbindungspunkte über den dreijährigen Entwicklungsprozess systematisch verfolgt wurden.

5 Grundlagen der Bimetallkorrosion von Magnesium

Magnesium und seine Legierungen sind elektrochemisch gesehen die unedelsten metallischen Konstruktionswerkstoffe. Das zugehörige Freie Korrosionspotenzial liegt bei etwa −1,5 V in neutralen chloridhaltigen Medien. Selbst gegenüber dem sonst als unedel betrachteten Zink ergibt sich noch eine Potenzialdifferenz von etwa 0,7 V. Bei Anwendung von Magnesium im korrosionsgeschützten Fahrzeuginneren ist der Verbund mit elektrochemisch edleren Werkstoffen unkritisch. Bei Anwendungen im korrosionsbelasteten Außenbereich hingegen ist ein wirksamer Schutz gegen Bimetallkorrosion notwendig.

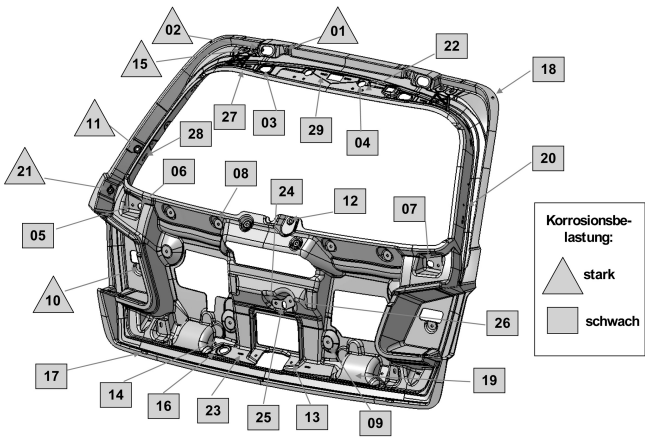

Bild 2. Anbindungspunkte des Magnesium-Innenteils mit Kennzeichnung der korrosiven Belastungsklassen (schwach und stark).

Figure 2. Connecting points of the magnesium inner component labelled according to the classes of corrosive load (low and strong).

Die Verträglichkeit zwischen Magnesium und einem „Fügepartner“ (zweites Metall) wird u.a. durch die Differenz der Freien Korrosionspotenziale der Kathode $U_{R,k}$ und Anode $U_{R,a}$ bestimmt. Die Korrosionsabtragsrate, d. h. die Auflösungsgeschwindigkeit des als Anode wirkenden Magnesiums ist proportional zum lokalen fließenden Elementstrom I_e.

Der lokale Elementstrom I_e setzt sich wie folgt zusammen [10]:

$$I_e = (U_{R,k} - U_{R,a})/(R_a + R_k + R_M) \quad (1)$$

mit $U_{R,k}$: Freies Korrosionspotenzial der Kathode
$U_{R,a}$: Freies Korrosionspotenzial der Anode
R_a: Polarisationswiderstand der Anode
R_k: Polarisationswiderstand der Kathode
R_M: Widerstand des Elektrolyten

Der Elektrolytwiderstand R_M ergibt sich aus der Beziehung:

$$R_M = l/(\sigma_M \cdot A) \quad (2)$$

mit σ_M spezifische Leitfähigkeit des Elektrolyten
l Länge des Ionenweges im Elektrolyten
A Fläche des elektrisch leitenden Querschnitts

Für den konkreten Anwendungsfall der Magnesium-Hybridrückwandtür sind die zugehörigen lokalen korrosionsverursachenden Elementströme I_e zu minimieren oder im Idealfall völlig zu unterbinden. Gleichung 1 setzt voraus, dass es zwischen dem anodisch wirkenden Magnesium und dem kathodisch wirkenden edleren Werkstoff des Fügepartners eine elektrisch leitende Verbindung über einen Elektrolyten gibt. Lässt sich das Auftreten eines Elektrolyten (korrosives Medium) nicht verhindern, ergeben sich nach Gleichung 2 trotzdem Möglichkeiten, den Widerstand des Elektrolyten zumindest zu erhöhen. Insgesamt lassen sich so die in *Tabelle 1* zusammengefassten Strategien ableiten.

Wie beschrieben, werden bei der Magnesium-Hybrid-Rückwandtür des T-Modelles der E-Klasse verschiedene Verfahren

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

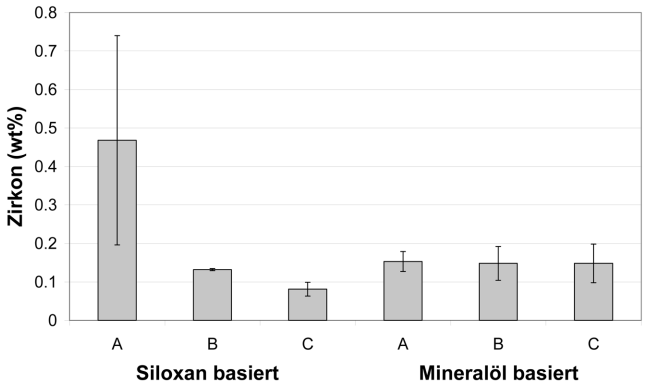

Bild 3. Zirkongehalt der Türoberflächen gemessen an drei ausgewählten Stellen nach der Konversionsbehandlung, als Indikator für die Qualität und Gleichmäßigkeit der Konversionsschicht. Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Trennmitteln beim Druckguss, die zum einen auf Mineralöl und zum andern auf Siloxan basieren. Der Zirkongehalt wurde mit Funkenspektralanalyse ermittelt und repräsentiert einen Mittelwert über eine Analysentiefe von ca. 0,15 mm.

Figure 3. Zirconium content of the surface of the doors determined at three selected areas after the conversion treatment as an indicator for quality and uniformity of the conversion coating. Comparison between two different high pressure die casting lubricants based either on mineral oil or siloxane. The zirconium content was measured by spark emission analysis representing an average value over a depth of analysis of ca. 0.15 mm.

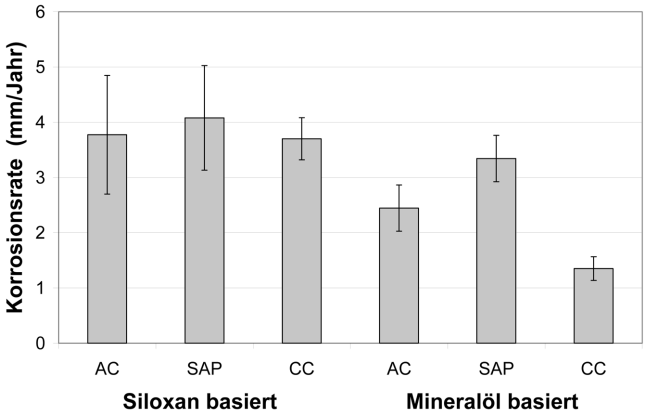

Bild 4. Korrosionsrate von Probekörpern im neutralen Salzsprühtest (48 h, DIN EN ISO9227). Die Probekörper wurden Türen entnommen, die entweder mit einem Mineralöl- oder Siloxan-basierten Trennmittel im Druckguss hergestellt und anschließend unterschiedlich behandelt wurden (AC: Gusszustand, SAP: Beize mit Schwefelsäure und CC: Konversionsbehandlung mit H_2ZrF_6).

Figure 4. Corrosion rate of specimens determined in neutral salt spray test (48 h, DIN EN ISO9227). The specimens were taken from doors which were either produced with siloxane or mineral oil based high pressure die cast lubricant and subsequently differently treated (AC: as cast, SAP: sulphuric acid pickling, CC: conversion treatment based on H_2ZrF_6).

und Kombinationen zur Vermeidung von Bimetallkorrosion eingesetzt. Zur elektrochemischen Verträglichkeit zwischen Werkstoffen und Beschichtungen im direkten Verbau mit Magnesium liegen eine Vielzahl von Felderfahrungen und Untersuchungen an Prüfkörpern und Realbauteilen vor, auf die zurückgegriffen werden kann [4, 11–15].

6 Optimierung der unbeschichteten Bauteile

Im Gesamtkonzept zur Optimierung der Bimetallkorrosion spielt schon die Optimierung des unbeschichteten Bauteiles eine wesentliche Rolle. Neben der selbstverständlichen „high-purity“ Qualität der Legierung zur Minimierung der Grundwerkstoffkorrosion, sind als weitere Anforderungen eine defekt- und verunreinigungsfreie Oberfläche zu nennen, um einen problemlosen Aufbau der Korrosionsschutzschichten zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde auch der Druckguss als Herstellungsverfahren und die Vorbehandlung vor der eigentlichen Beschichtung in den Optimierungsprozess einbezogen.

Ein optimaler Korrosionsschutz bedarf einer gleichmäßig und reproduzierbar gereinigten Oberfläche mit definierter Zusammensetzung. Nur so kann eine homogene Konversionsschicht aufgebracht werden, die als Haftbasis für den späteren Lackaufbau entscheidend auch das Korrosionsverhalten des gesamten Schichtsystems beeinflussen kann. Mögliche Wechselwirkungen zwischen Trennmitteltyp / Rückständen und den nachfolgenden Reinigungs- und Beschichtungsprozessen wurden sehr intensiv untersucht, um mögliche Probleme rechtzeitig zu identifizieren und abzustellen [16]. Das folgende *Bild 3* ist ein Beispiel dafür, wie schon die Wahl des Trennmittels einen wesentlichen Einfluss auf die Reinigung und die Ausbildung der Konversionsschicht als Haftvermittler haben kann. In diesem Fall zeigt sich ein deutlicher Vorteil, wenn im Druckguss ein Trennmittel verwendet wird, das anstatt von Siloxan auf Mineralöl basiert. Auswirkungen des Trennmittels auf die Korrosionsbeständigkeit des unbeschichteten Bauteiles sind über alle Vorbehandlungsschritte zu identifizieren, *Bild 4*.

Ein weiteres Problem für eine Beschichtung stellen Oberflächendefekte dar. Dabei handelte es sich überwiegend um Kavitäten (tiefe Kaltläufer), Erstarrungsrisse und oberflächennahe Mikroporosität, die bis zu einem gewissen Grad typisch für den Druckguss sind, *Bild 5*a–c. Durch Beiz- und Konversionslösungsrückstände in den Defekten kann es zu verstärkter Oxidbildung (Korrosion) und reduzierter Konversionsschichtbildung kommen, Bild 5d. Dies kann negative Auswirkungen auf die Haftfestigkeit und die Unterwanderungsneigung eines Schichtsystems haben. Durch die gezielte Verfolgung der Oberflächenbeschaffenheit und Optimierung der Prozessparameter im Druckguss konnte die Defektdichte auf ein nicht kritisches Maß reduziert werden. Insgesamt führten die Maßnahmen zu einer verbesserten Reproduzierbarkeit und Homogenität bei der Konversionsschichtausbildung und einer deutlich verbesserten Haftfestigkeit des darauf aufgebauten Schichtsystems aus KTL (20 µm) und Pulverlack (80 µm).

7 Beispielhafte Betrachtung zweier kritischer Anbindungspunkte

Die bei einer Regenfahrt auf das Fahrzeugdach einwirkende Wasserbelastung wird unter anderem zwischen den Scharnieren

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

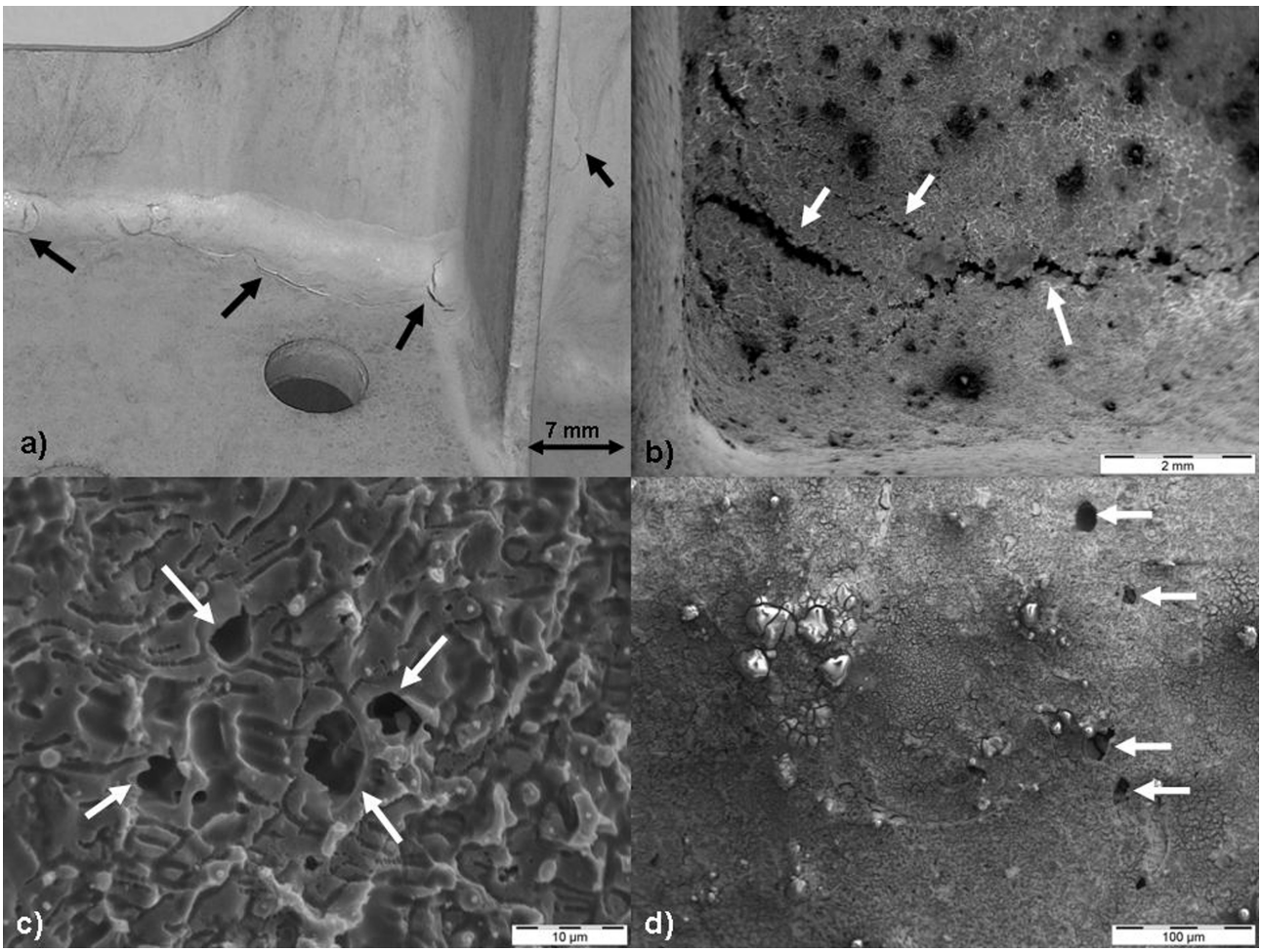

Bild 5. Typische Fehler auf der Oberfläche der Türen a) Kaltläufe und Riss, b) Erstarrungsrisse c) durch den Beizprozess geöffnete Poren d) Poren und ihre Umgebung nach der Konversionsbehandlung.

Figure 5. Typical defects on the surface of the doors a) cold shuts and cracks, b) solidification cracks, c) opened pores by the pickling process d) pores and their surrounding after conversion treatment.

und über die Flanken der Rückwandtür abgeleitet. Zusätzlich sorgen Verwirbelungen am Fahrzeugheck für eine erhöhte Schmutz und Schadstoffbelastung. Eine schnelle Wasserableitung minimiert nach *Tabelle 2* die Einwirkzeit des Elektrolyten, aber trotzdem zählen die Scharnieranbindung und der Kugelzapfen der Gasdruckfeder zu den für Bimetallkorrosion kritischsten Anbindungspunkten. Aufgrund der Dünnwandigkeit des Mg-Innenteils ist die Anbindung von Montageteilen nicht direkt über Innengewinde möglich, sondern erfolgt über Blindnietmuttern oder als Durchsteckverschraubung.

Die beiden Gasdruckfedern fixieren seitlich die Rückwandtür im geöffneten Zustand und sind über Kugelzapfen gelenkig mit dieser verbunden. Der Kugelzapfen ist dabei nicht direkt in das Mg-Innenteil geschraubt, sondern sitzt in einer Blindnietmutter mit Innengewinde bestehend aus der Aluminiumlegierung AlMg3. Das Freie Korrosionspotenzial (Kathode) von AlMg3 der Blindnietmutter liegt damit deutlich näher beim Magnesium, als bei direkter Anbindung von Stahl, Tabelle 2. Die in den noch folgenden Absätzen beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass nur durch eine zusätzliche KTL-Beschichtung der Aluminium-Blindnietmutter ausreichender Schutz vor Bimetallkorrosion besteht. Über die zugehörige Barrierewirkung wird der Polarisationswiderstand der als Kathode wirkenden Blindnietmutter maximal, Tabelle 2. Der Bund der Blindnietmutter weist einen größeren Durchmesser auf als die Auflagefläche des Kugelzapfens, um direkten Kontakt mit dem Mg-Innenteil zu vermeiden. In der Praxis bedeutet dies einen möglichst langen Ionenweg zum Ladungsaustausch zwischen Magnesium und Stahl. Der Nietprozess erfolgt nach dem Beschichten des Mg-Innenteils wobei ein zusätzlicher O-Ring für Dichtheit sorgt und den Zutritt von korrosiven Medien verhindert.

Die beiden Scharniere verbinden die Rückwandtür gelenkig mit dem hinteren Dachrahmen und sind als galvanisch verzinktes Stahlschmiedeteil ausgeführt. Die Befestigung erfolgt als Durchsteckverschraubung, wobei die Muttern über Löcher in der Aluminiumbeplankung von außen angezogen werden, die später ein Spoiler verdeckt. Um den direkten Kontakt des Mg-Innenteils mit dem Stahlscharnier zu vermeiden, sitzt dieses

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

Tabelle 2. Strategien zur Vermeidung von Kontaktkorrosion bei Bauteilen in Magnesium-Hybrid-Bauweise

Table 2. Strategies for preventing galvanic corrosion of components in magnesium hybrid constructions

Stellhebel	Strategie	Maßnahme
Freies Korrosionspotenzial Anode (Magnesium), $U_{R,a}$	Kaum beeinflussbar, bei Einsatz von Magnesium näherungsweise konstant	Keine
Freies Korrosionspotenzial Kathode (edlerer Fügepartner), $U_{R,k}$	Angleichung an das freies Korrosionspotenzial des unedlen Magnesiums	Auswahl der Werkstoffe bzw. Beschichtungen so nahe wie möglich an Magnesium anpassen
Polarisationswiderstand der Anode (Magnesium), R_a	Widerstand maximal auslegen	Barrierewirkung durch eine Beschichtung des Magnesiums aufbauen
Polarisationswiderstand der Kathode (edlerer Fügepartner), $U_{R,k}$	Widerstand maximal auslegen	Barrierewirkung durch eine Beschichtung des Fügepartners mit möglichst großer Wasserstoffüberspannung
spezifische Leitfähigkeit (Elektrolyt), σ_M	nicht beeinflussbar, da abhängig vom Einsatzort des Bauteiles	Keine
Länge des Ionenweges im Elektrolyten, l	Ionenweg maximal auslegen	geometrischen Abstand des Magnesiums zum edleren Fügepartner so groß wie möglich auslegen
Fläche des elektrisch leitenden Querschnitts der Anode (Magnesium), A	gilt nur bei Einsatz metallisch blanken Magnesiums: Maximale Angriffsfläche des anodisch wirkenden Werkstoffes	geometrisch große Angriffsfläche im Kontaktbereich zum edleren Fügepartner bieten
Einwirkzeit des Elektrolyten	Einwirkzeit minimieren	für schnelles Ablaufen bzw. Abtrocknen eines Elektrolyten sorgen
Zugang von Elektrolyt	Zugang verhindern	Hybridverbindungen mit Magnesium in nicht korrosiv belastete Bereiche legen Barrierewirkung durch eine Beschichtung des Magnesiums aufbauen

zusätzlich auf einer Aluminiumplatte der Legierung AlMg1Si1,5, die eine Potenzialangleichung an Magnesium ermöglicht. Diese weist einen Überstand auf, der zur Verlängerung des Ionenweges beiträgt. Die Fixierung mit dem Mg-Innenteil erfolgt mit einem Aluminium-Popniet (Potenzialangleichung). Der folgende Abschnitt zeigt, dass es ohne zusätzliche KTL-Beschichtung (Barrierewirkung) von gleitgeschliffener Aluminiumplatte und des Popniets zu Bimetallkorrosion kommt.

8 Erprobung und Ergebnisse des beschichteten Bauteils

Im Betrieb eines Fahrzeugs werden die integral wirkenden kritischen Klimate (Hitze, Kälte, Feuchte, Salze) durch die lokal wirkenden, bauraumbedingten Mikroklimate und dynamischen Beanspruchungen überlagert. Das zugehörige Zusammenspiel der Einzeleinflüsse im gerafften Prüfbetrieb – das Erprobungskollektiv – gibt der dynamische Mercedes-Benz Korrosionsdauerlauf (MeKo-D) wieder. Im Falle der Rückwandtür ist das Bauteil nicht, wie beispielsweise beim klassischen Salzsprühtest, permanent mit einem Elektrolyt beaufschlagt, sondern erfährt eine realistische zyklische Wechselbelastung aus Salzen, Schmutz, Feuchte, unterschiedlichen Temperaturen sowie mechanischen Einflüssen.

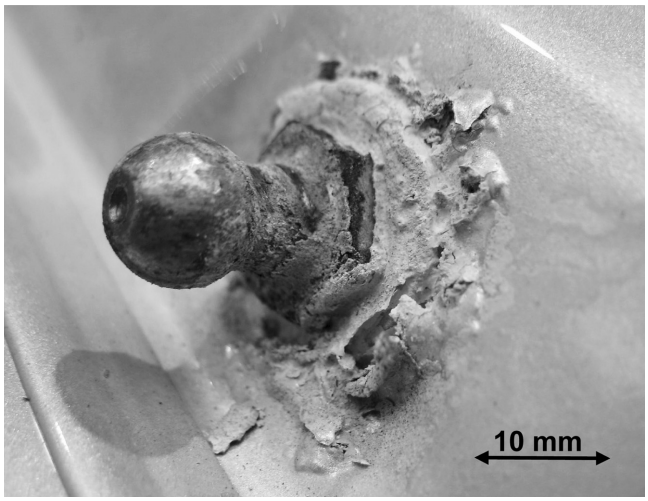

Bild 6. Anbindung der Gasdruckfeder im Versuchsaufbau nach Korrosionstest: Aluminium-Blindnietmutter ohne Vorbeschichtung.

Figure 6. Connecting point of the gas pressure spring specimen after corrosion test: aluminium blind rivet nut without pre-coating.

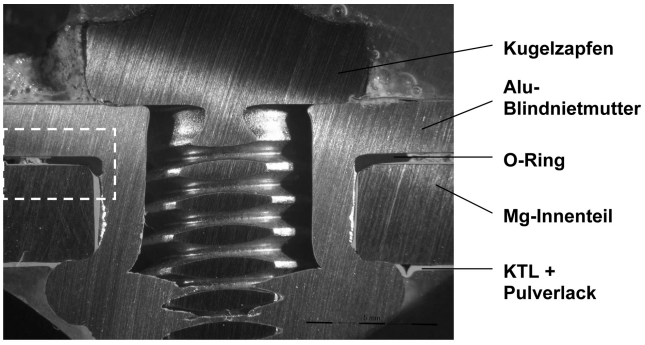

Bild 7. Schliffbild Versuchsaufbau mit Aluminium-Bildnietmutter und Kugelzapfen nach Korrosionstest.

Figure 7. Cross-section micrograph of specimen of assembled blind rivet nut and ball pin after corrosion test.

Wie schon beschrieben, ist der Kugelzapfen der Gasdruckfeder im Fahrbetrieb einer hohen korrosiven Belastung ausgesetzt. Die Anbindung zum Innenteil erfolgt über Blindnietmuttern, deren Werkstoff AlMg3 als galvanisch verträglich zu Magnesium gilt [15]. *Bild 6* zeigt den verbauten Kugelzapfen in einem Versuchsaufbau nach Belastung im Korrosionstest.

Auffällig ist neben der Grundwerkstoffkorrosion des Kugelzapfens der ringförmige Korrosionsangriff des Magnesium-Innenteils um die Bundauflage der Blindnietmutter. Der Angriff ist so stark, dass es neben Blasenbildung und Lackablösung zu ausgeprägter Bimetallkorrosion mit Materialabtrag kommt. Bei Betrachtung des Schliffbilds zeigt sich, dass die Blindnietmutter beim Nietvorgang die KTL- und Pulverbeschichtung durchdringt und es zu direktem Kontakt zum Magnesium-Innenteil kommt, *Bild 7*. Es bildet sich ein galvanisches Kontaktelement zwischen

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

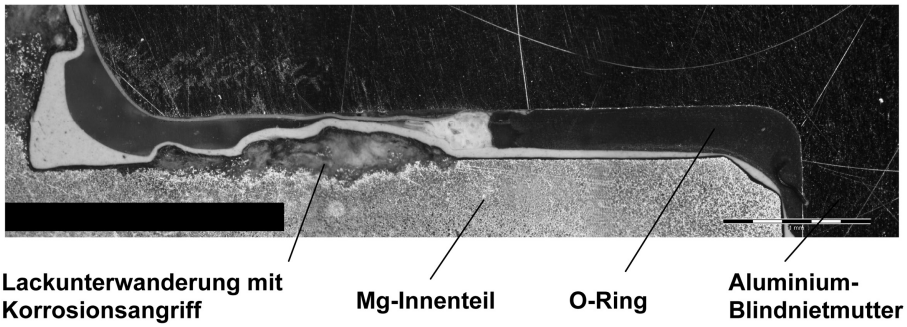

Bild 8. Vergrößerter Bildausschnitt (von Bild 7) des Versuchsaufbaus mit Alu-Blindnietmutter zur Verdeutlichung der Lackunterwanderung.

Figure 8. Magnified section (of Fig. 7) of the specimen with blind rivet nut revealing the sub-surface migration of the coating.

Aluminium und Magnesium. Die teilweise unbeschichtete Bundauflage der Blindnietmutter bildet dabei eine relativ große Kathodenfläche, der eine nur gering freiliegende Magnesiumoberfläche gegenüber steht. Entsprechend der Flächenregel, die besagt, dass die anodische Teilstromdichte dem Flächenverhältnis der Kathode zu Anode proportional ist, kommt es zu einer hohen lokalen Stromdichte. *Bild 8* zeigt die Morphologie des Korrosionsangriffs, der unterhalb der Aluminiumbundauflage beginnt und zur Unterwanderung der Beschichtung führt.

Entwicklungsziel ist es gewesen, die Bimetallkorrosion zwischen Blindnietmutter und Magnesium-Innenteil unter Nutzung von Barrierewirkungen und Potenzialanpassung gemäß Tabelle 2 zu vermeiden. Sowohl konstruktive Maßnahmen (b) und (c) als auch Beschichtungen der Aluminium-Blindnietmuttern (a) und (d) kamen in einem Screeningtest zur Anwendung:

(a) Blindnietmutter + KTL (15 bis 20 µm)
(b) Blindnietmutter + Kunststoffunterlegscheibe
(c) Blindnietmutter + Verklebung Mikroverkapselung
(d) Blindnietmutter anodisiert (3 bis 4 µm)

Der Prüfkörper bestand aus einer unbeschichteten Magnesiumplatte mit gefügten Aluminium-Blindnietmuttern der Varianten (a) bis (d), der im VDA-Wechseltest mild korrosiv belastet wurde. Mild bedeutete, dass die Natriumchlorid-Konzentration bei 0,5 g/l lag anstelle der üblichen 50 g/l. Die Abwandlung des genormten Tests VDA 621-415 ermöglichte eine genauere Unterscheidung zwischen Eigen- und Bimetallkorrosion. Den besten Schutz vor Bimetallkorrosion bot nach Auswertung des Screeningtests die KTL-Beschichtung. Ausgehend von diesen Ergebnissen erfolgte die Absicherung im dynamischen Korrosionsdauerlauf. Die KTL-Beschichtung der Aluminium-Blindnietmutter schützte das beschichtete Magnesium-Innenteil wirksam vor Bimetallkorrosion, *Bild 9*.

Die Befestigung des Scharniers ist, wie schon beschrieben, ein weiterer kritischer Anbindungspunkt. *Bild 10* zeigt Korrosionserscheinungen des Magnesium-Innenteils im Bereich der Kante der Aluminiumplatte nach 8 Wochen im MeKo-S Test. Obwohl dessen Legierung galvanisch verträglich mit Magnesium ist und zusätzlich eine KTL appliziert wurde, kommt es zu Bimetallkorrosion. Ursache ist der Stanzgrat, der im Fertigungsprozess der Aluminiumplatte entsteht. Dieser führt zur Beschädigung der KTL- und Pulverbeschichtung des Mg-Innenteils. Durch zusätzliches Gleitschleifen der Aluminiumplatte lässt sich die Kante brechen und in Folge Korrosion erfolgreich vermeiden.

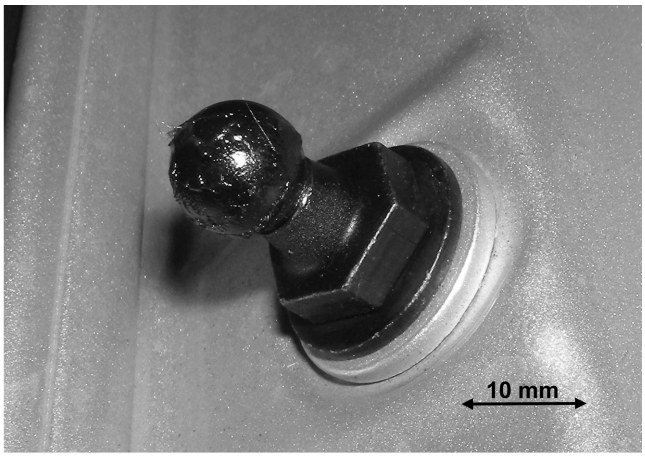

Bild 9. Anbindung der Gasdruckfeder im Versuchsaufbau nach Korrosionstest: Maßnahme Alu-Blindnietmutter mit KTL beschichtet.

Figure 9. Specimen of connecting point of the gas pressure spring after 16 weeks dynamic long-term corrosion test: measure aluminium blind rivet nut with e-coating.

Die Anbindungen der Gasdruckfedern und der Scharniere zeigen beispielhaft und sehr eingehend die systematische Vorgehensweise zur Vermeidung von Bimetallkorrosion eines Karosseriebauteils aus Magnesium und ist auch für andere Anwendungen von Mg unter Belastung (korrosive, etc.) stets durchzuführen.

10 Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung der Rückwandtür ist es gelungen, ein funktional hochintegriertes Bauteil in Hybridbauweise gegen Bimetallkorrosionseinflüsse zu schützen. Dabei mussten alle Anforderungsprofile gleichzeitig erfüllt werden, die der Einsatz von Magnesium in Verbindung mit anderen bimetallkorrosionskritischen Werkstoffen erfordert. Dies beginnt bei der Gießtechnik, den Reinigungsverfahren und der anschließenden mechanischen Weiterbearbeitung bis hin zu den Anbindungskonzepten in der Montage im Rahmen einer Serienfertigung.

Dies konnte nur gelingen, indem während der Entwicklungsphase frühzeitig alle kritischen Anbindungspunkte zum Magne-

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

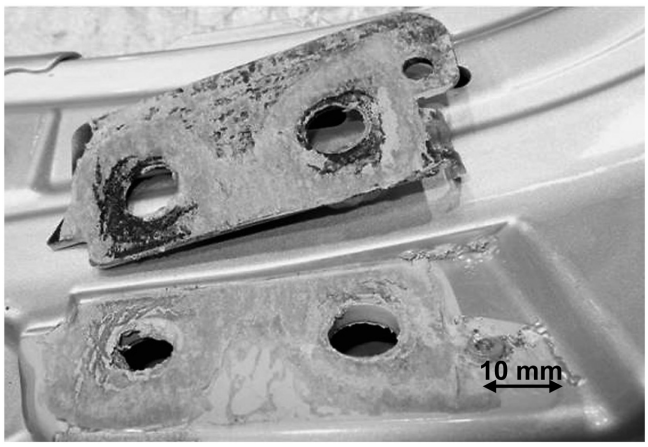

Bild 10. Anbindung des Scharniers mit der Aluminiumplatte im Versuchsaufbau nach Korrosionstest ohne Gleitschleifen und Beschichten des Popniets.

Figure 10. Specimen of connecting point of the hinge with the aluminium plate after corrosion test without vibratory grinding and coating of the pop-rivet.

siuminnenteil erfasst, systematisch verfolgt und erprobt wurden. Da sich das Korrosionsverhalten von Bauteilen nicht „eindimensional" über eine einzige Testprozedur realistisch abbilden lässt, kam eine Kombination von Grundlagenuntersuchungen im Labor, speziellen Komponententests und der Prüfbetrieb am Gesamtfahrzeug zum Einsatz. Diese Vorgehensweise setzt eine disziplinierte und enge Zusammenarbeit zwischen den Konstrukteuren, Funktionalverantwortlichen, Werkstoff- bzw. Verfahrensspezialisten und Qualitätsbeauftragten voraus.

Gegenüber einer Rückwandtür in konventioneller Stahlbauweise wurde mit der anspruchsvollen Kombination aus Aluminium und Magnesium eine Gewichtseinsparung von ca. 5 kg erreicht. Für das neue T-Modell leistet die Rückwandtür damit einen nicht unerheblichen Beitrag zur CO_2-Vermeidung.

11 Literaturverzeichnis

[1] C. Blawert, N. Hort, K.U. Kainer, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, **2004**, *57*, 397.

[2] K. U. Kainer, P. B. Srinivasan, C. Blawert, W. Dietzel, Corrosion of Magnesium and its Alloys, In: Shreir's Corrosion, 4th edition, Vol. 3, Edited by T. Richardson, B. Cottis, R. Lindsay, S. Lyon, D. Scantlebury, H. Stott and M. Graham, Academic Press, Elsevier **2009**.

[3] U. Walther, Auswirkungen aktueller Trends auf die Korrosionsschutzentwicklung der Karosserie, Tagungsband Materials in Car Body Engineering 2010, Bad Nauheim, 18.–19. Mai **2010**.

[4] H. Schreckenberger, Korrosion und Korrosionsschutz von Magnesiumwerkstoffen für den Automobilbau – Problematik der Kontaktkorrosion, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5, Nr. 613, VDI Verlag, Düsseldorf, **2001**.

[5] M. D. Bharadwaj, S. M. Tiwari, Y. M. Wang, V. Mani, Micro galvanic corrosion behavior of Mg alloys as a function of aluminum content, in: Magnesium Technology 2008, **2008**, 389.

[6] S. Maddela, Y. M. Wang, A. K. Sachdev, R. Balasubramaniam, The Influence of Beta ($Mg_{17}Al_{12}$) Phase Distribution on Corrosion Behavior of AM50 Alloy in NaCl Solution, in: Magnesium Technology 2009, **2009**, 321.

[7] S. Sundarraj, M. D. Bharadwaj, S. M. Tiwari, Effect of composition and cooling rate on the beta phase formation in Mg-Al alloy, in: Magnesium Technology 2008, **2008**, 329.

[8] H. Kellermann, S. Tritschler: The New E-Class, EuroCarBody, Bad Nauheim, Oktober **2009**.

[9] B. Reinhold, J. Kopp, S.G. Klose, Korrosionsschutz bei Leichtmetallverschraubungen: Tagungsband DVM-Tag 1998 – Bauteil 98 – Konstruktiver Korrosionsschutz. Berlin, 6.–8. Mai **1998**, S. 59–71.

[10] DIN 50919, Korrosionsuntersuchungen der Kontaktkorrosion in Elektrolytlösungen.

[11] A. Froats, T. K. Aune, D. Hawke, W. Unsworth, J. Hillis, Corrosion of Magnesium and Magnesium Alloys: ASM Metals Handbook Volume 13. USA: **1987**, p. 740–754, ISBN 0-87170-007-7.

[12] D. L. Hawke, J. Davis, R. Fekete, Field Corrosion Performance of Magnesium Powertrain Components in Light Truck. SAE Technical Paper No. 890206, Detroit.

[13] H. Haferkamp, V. Kaese, M. Niemeyer, Phan-tan Tai, M. Bußmann, K. Möhwald, H. Schreckenberger, Magnesiumkorrosion – Prozesse, Schutz von Anode und Kathode: Moderne Beschichtungsverfahren. DGM, Weinheim: Wiley–VCH Verlag **2000**, Hrsg. Bach, Fr.-W, Duda, T., ISBN 3-527-30117-8.

[14] E. Boese, J. Göllner, A. Heyn, J. Strunz, C. Baierl, H. Schreckenberger, *Materials and Corrosion*, **2001**, *52*, 247.

[15] H. Schreckenberger, M. Papke, S. Eisenberg, The magnesium hatchback of the 3-Liter Car – Processing and corrosion protection. SAE Technical Paper No. 2000-01-1123, Detroit, **2000**.

[16] C. Blawert, D. Höche, T. Ferreira de Conceicao, K. U. Kainer, H. Schreckenberger, P. Izquierdo, S. G. Klose, Influence of die lubricants on pickling and conversion treatment of high pressure die cast AM30 magnesium alloy, submitted for publication to Surface & Coatings Technology.

[17] ASTM B94 – 07, standard specification for magnesium-alloy die castings.

[18] Daimler Benz Lieferspezifikation 5011.

Eingegangen in endgültiger Form: 16.07.2010 T676

© 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim