

Martin Klein

Mikrostrukturbasierte
Bewertung des
Korrosionsermüdungs-
verhaltens der
Magnesiumlegierungen
DieMag422 und AE42

Werkstofftechnische Berichte | Reports of Materials Science and Engineering

Reihe herausgegeben von
Frank Walther, Dortmund, Deutschland

In den Werkstofftechnischen Berichten werden Ergebnisse aus Forschungsprojekten veröffentlicht, die am Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT) der Technischen Universität Dortmund in den Bereichen Materialwissenschaft und Werkstofftechnik sowie Mess- und Prüftechnik bearbeitet wurden. Die Forschungsergebnisse bilden eine zuverlässige Datenbasis für die Konstruktion, Fertigung und Überwachung von Hochleistungsprodukten für unterschiedliche wirtschaftliche Branchen. Die Arbeiten geben Einblick in wissenschaftliche und anwendungsorientierte Fragestellungen, mit dem Ziel, strukturelle Integrität durch Werkstoffverständnis unter Berücksichtigung von Ressourceneffizienz zu gewährleisten.

Optimierte Analyse-, Auswerte- und Inspektionsverfahren werden als Entscheidungshilfe bei der Werkstoffauswahl und -charakterisierung, Qualitätskontrolle und Bauteilüberwachung sowie Schadensanalyse genutzt. Neben der Werkstoffqualifizierung und Fertigungsprozessoptimierung gewinnen Maßnahmen des Structural Health Monitorings und der Lebensdauervorhersage an Bedeutung. Bewährte Techniken der Werkstoff- und Bauteilcharakterisierung werden weiterentwickelt und ergänzt, um den hohen Ansprüchen neuentwickelter Produktionsprozesse und Werkstoffsysteme gerecht zu werden.

Reports of Materials Science and Engineering aims at the publication of results of research projects carried out at the Department of Materials Test Engineering (WPT) at TU Dortmund University in the fields of materials science and engineering as well as measurement and testing technologies. The research results contribute to a reliable database for the design, production and monitoring of high-performance products for different industries. The findings provide an insight to scientific and applied issues, targeted to achieve structural integrity based on materials understanding while considering resource efficiency.

Optimized analysis, evaluation and inspection techniques serve as decision guidance for material selection and characterization, quality control and component monitoring, and damage analysis. Apart from material qualification and production process optimization, activities concerning structural health monitoring and service life prediction are in focus. Established techniques for material and component characterization are aimed to be improved and completed, to match the high demands of novel production processes and material systems.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/16102>

Martin Klein

Mikrostrukturbasierte
Bewertung des
Korrosionsermüdungs-
verhaltens der
Magnesiumlegierungen
DieMag422 und AE42

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Frank Walther

 Springer Vieweg

Martin Klein
Fachgebiet Werkstoffprüftechnik
TU Dortmund
Dortmund, Deutschland

Dissertation, TU Dortmund, 2018

ISSN 2524-4809 ISSN 2524-4817 (electronic)
Werkstofftechnische Berichte | Reports of Materials Science and Engineering
ISBN 978-3-658-25309-7 ISBN 978-3-658-25310-3 (eBook)
<http://doi.org/10.1007/978-3-658-25310-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Geleitwort

Die Forschungsaktivitäten des Fachgebiets Werkstoffprüftechnik (WPT) an der Technischen Universität Dortmund im Bereich Magnesiumlegierungen umfassen insbesondere die anwendungsorientierte Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens unter verschiedensten Umgebungsrandbedingungen, mit dem Ziel, Magnesiumlegierungen für verschiedene Anwendungen aus den Bereichen Leichtbau und Medzintechnik zu qualifizieren. Die Untersuchungen zielen grundsätzlich auf ein werkstoffspezifisches Verständnis zwischen Gefügeeigenschaften und den sich daraus ergebenden Gebrauchseigenschaften wie der mechanischen, chemischen Zuverlässigkeit ab.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Korrosionsermüdungsverhalten der beiden kriechbeständigen Magnesiumlegierungen DieMag422 und AE42. Die durchgeführten grundlagenorientierten Untersuchungen hatten in erster Linie zum Ziel, die generelle Wechselwirkung zwischen zyklisch-mechanischer und medial-korrosiver Beanspruchung zu charakterisieren. Hierbei wurde ein innovativer methodischer Ansatz etabliert, beide Legierungen bei gezielt eingestellten, äquivalenten korrosiven Beanspruchungen zu prüfen und so insbesondere den Einfluss der Korrosionsrate und -morphologie aufzuzeigen. Mittels eines selbstentwickelten mechanisch-elektrochemischen Sensorsystems konnten zudem charakteristische Korrosionsermüdungsschädigungsvorgänge identifiziert und verfolgt werden. Die Arbeit vermittelt ein tiefgreifendes Verständnis über die korrosionsermüdungsfestigkeits- und -lebensdauerbestimmenden Schädigungsmechanismen in Abhängigkeit der korrosiven und mechanischen Beanspruchungen.

Dortmund, Dezember 2018

Frank Walther

Technische Universität Dortmund
Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT)
Baroper Str. 303, 44227 Dortmund

Telefon +49 231 755 8028
E-Mail frank.walther@tu-dortmund.de
Web www.wpt-info.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT) der Technischen Universität Dortmund, wobei die erzielten Ergebnisse aus dem DFG-geförderten Projekt „Mikrostruktur- und mechanismenkorrelierte Charakterisierung des Korrosionsermüdungsverhaltens der kriechfesten Magnesiumlegierungen DieMag422 und AE42“ (WA 1672/10-1) stammen. An dieser Stelle möchte ich mich bei der DFG für die Förderung dieses Projektes sowie auch bei allen Personen, die direkt oder indirekt zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther, dem Leiter des WPT, für die engagierte Betreuung dieser Arbeit als Doktorvater sowie für seine zahlreichen konstruktiven Anregungen und die fachlichen Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl Ulrich Kainer, dem Leiter des Magnesium Innovations Center (MagIC) des Helmholtz-Zentrums Geesthacht (HZG), möchte ich ausdrücklich dafür danken, dass er die Aufgabe des Zweitgutachters und die damit verbundenen Mühen bereitwillig übernommen hat. Weiterhin möchte ich noch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann und Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Andreas Zabel für deren Bereitschaft danken als Mitglieder Prüfungskommission zu fungieren.

Besonders danken möchte ich auch meinem langjährigen Arbeitskollegen Gerrit Frieling, der mich in allen experimentellen Fragen immer außerordentlich unterstützt hat, und unserem Techniker Martin Leuker, der mir immer äußerst hilfsbereit mit Rat und Tat zur Seite stand. Weiterhin danke ich allen HiWis, die mich über die Jahre begleitet und unterstützt haben – Torben Becker, Patrick Buhr, Sebastian Böttcher und Frederik Kuhlmann. Nicht zuletzt möchte ich auch allen Kollegen am WPT für die gute Zusammenarbeit und das kollegiale Miteinander danken.

Abschließend möchte ich herzlich meinen Eltern für die immerwährende Unterstützung und das Vertrauen danken.

Dortmund, Dezember 2018

Martin Klein

Kurzfassung

Magnesiumlegierungen sind aufgrund ihrer geringen Dichte und hohen spezifischen Festigkeit sehr attraktiv für Leichtbauanwendungen, bspw. im Automobilbau. Insbesondere kriechbeständige Magnesiumlegierungen können auch im Motorbereich von Automobilen, wie bspw. in Zylinderkurbel- oder Getriebegehäusen, eingesetzt werden und bieten daher enormes Potential zur Gewichtseinsparung. Der Einsatz von Magnesiumlegierungen in solchen Anwendungen im Außenbereich von Automobilen, in denen neben korrosiven auch zyklische Lasten auf die Bauteile wirken, wird allerdings bis heute durch deren geringe Korrosionsbeständigkeit begrenzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der Korrosion auf die Mikrostruktur und die davon abhängigen mechanischen Eigenschaften unter zyklischer Last für die kriechbeständigen Magnesiumlegierungen DieMag422 und AE42 charakterisiert und verglichen. Ziel der Untersuchungen war eine mechanismenorientierte Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Korrosions- und Ermüdungseffekten auf die Korrosionsermüdungslebensdauer und -festigkeit. Zu diesem Zweck wurden Einstufenversuche mit beiden Legierungen bei verschiedenen, äquivalenten Korrosionsraten durchgeführt, die durch gezielte Wahl der Elektrolyten sowie galvanostatische, anodische Polarisation eingestellt wurden. Die Ergebnisse dieser lebensdauerorientierten Versuche wurden mit dem jeweiligen Korrosionsverhalten beider Legierungen korreliert, welches mittels potentiodynamischer Polarisationsmessungen, Immersionstests sowie elektrochemischer Impedanzspektroskopie charakterisiert wurde. Darüber hinaus wurden vorgangsorientierte Einstufenversuche unter Einsatz eines mechanisch-elektrochemischen Sensorsystems durchgeführt, um die Ergebnisse der lebensdauerorientierten Untersuchungen zu begründen. Dasselbe Sensorsystem wurde zudem auch in Laststeigerungsversuchen eingesetzt, um die Korrosionsermüdungsfestigkeit basierend auf den aufgezeichneten Werkstoffreaktionen abzuschätzen. Zur Überprüfung des Einflusses von Spannungsrisskorrosionseffekten auf das Korrosionsermüdungsverhalten wurden abschließend Slow-Strain-Rate-Tests unter verschiedenen Polarisationsbedingungen durchgeführt.

In den lebensdauerorientierten Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Korrosionsermüdungsfestigkeit mit der Korrosionsrate bzw. der Kerbwirkung der durch korrosiven Werkstoffabtrag gebildeten Korrosionsnarben korreliert, wodurch das Korrosionsermüdungsverhalten im HCF-Bereich durch das Korrosionsverhalten bestimmt ist. Demgegenüber wurde festgestellt, dass im LCF-Bereich eine starke Wechselwirkung zwischen verformungsinduzierten Änderungen der Mikrostruktur und der korrosiven Beanspruchung stattfindet sowie

auch eine Beeinflussung des Korrosionsermüdungsverhaltens aufgrund von Spannungsrissskorrosionseffekten durch Wasserstoffversprödung, was im Rahmen eines Bruchflächenvergleichs zwischen Proben aus den LCF-Versuchen und den Slow-Strain-Rate-Tests gezeigt werden konnte. Die Wechselwirkung zwischen mikrostrukturellen Änderungen und überlagerter Korrosionsbeanspruchung konnte zudem in den vorgangsorientierten Versuchen mittels des mechanisch-elektrochemischen Sensorsystems belegt werden und klare Unterschiede in den Schädigungs- und Versagensmechanismen zwischen LCF- und HCF-Bereich auf Grundlage simultan aufgezeichneter Dehnungs- und Korrosionspotentialkennwerte aufgezeigt werden. In intermittierenden Versuchen wurden zudem diese charakteristischen Werkstoffreaktionen mit den real auftretenden korrosions- und ermüdungsinduzierten mikrostrukturellen Vorgängen korreliert, wodurch diese im Sinne eines Condition-Monitoring-Systems identifiziert und verfolgt werden konnten. Basierend auf dieser Korrelation zwischen Werkstoffreaktionsgrößen und ablaufenden Schädigungsvorgängen war in den Laststeigerungsversuchen eine Abschätzung der Korrosionsermüdungsfestigkeit auf allen Korrosionsstufen möglich.

Abstract

Magnesium alloys are very attractive for light-weight applications due to their low density and high strength-to-weight-ratio. Especially creep-resistant magnesium alloys can also be used in applications in the engine area of automobiles, such as engine blocks or gear boxes, and therefore offer high potential for weight reduction. However, their application range in the outer area of automobiles is still strongly limited due to their low corrosion resistance, since components are exposed to corrosive as well as cyclic loads.

In the present study, the influence of corrosion on the microstructure and the correspondent mechanical behavior under cyclic loading for the creep-resistant magnesium alloys DieMag422 and AE42 was characterized and compared. The investigations aimed at a mechanism-oriented description of the interdependency of corrosion and fatigue effects on the corrosion fatigue lifetime and strength. For this purpose, the corrosion fatigue behavior was investigated in constant amplitude tests at equivalent corrosion rates, which were adjusted using different environments and targeted polarization of the alloys. Results of these lifetime-oriented tests were correlated with the corrosion behavior of the alloys, which was investigated by means of potentiodynamic polarization measurements, immersion tests as well as electrochemical impedance spectroscopy. Furthermore, process-oriented constant amplitude tests were performed using a mechanical-electrochemical sensor system to interpret the results of the lifetime-oriented tests. The same sensor system was also applied in load increase tests for an estimation of the corrosion fatigue strength based on the recorded material reactions. Finally, the influence of stress corrosion cracking effects on the corrosion fatigue behavior was checked in slow-strain-rate-tests under different polarization conditions.

The lifetime-oriented tests revealed, that the corrosion fatigue strength is a function of the corrosion rate and the stress concentration due to corrosively formed pits, respectively. Therefore, the corrosion fatigue behavior in HCF-regime is dependent of the corrosion behavior. In contrast, in LCF-regime a strong interdependency between deformation-induced microstructural changes and the superimposed corrosive load was observed as well as influence of stress corrosion cracking effects on the corrosion fatigue behavior due to hydrogen embrittlement, which was shown in the framework of a fracture surface comparison between failed specimens from LCF- and slow-strain-rate-tests. Furthermore, the interdependency between microstructural changes and the corrosive load was proven in the process-oriented tests by means of the mechanical-electrochemical sensor system, which revealed significant differences in the deterioration and

failure mechanisms between LCF- and HCF-regime based on simultaneously recorded strain and corrosion potential responses as well. These characteristic material responses were additionally correlated with the occurring corrosion and fatigue induced microstructural processes in the framework of intermittent tests, whereby these processes could be identified in terms of a condition monitoring system. Based on this relationship between material responses and occurring deterioration processes, an estimation of the corrosion fatigue strength by means of load increase tests on all corrosion stages was enabled.

Inhaltsverzeichnis

- Abkürzungsverzeichnis XV
- Formelzeichenverzeichnis XVII
- 1 Einleitung..... 1**
- 2 Stand der Technik..... 5**
 - 2.1 Magnesium und Magnesiumlegierungen 5
 - 2.2 Kriechbeständige Magnesiumlegierungen 10
 - 2.3 Korrosionsverhalten 13
 - 2.3.1 Korrosionsverhalten metallischer Werkstoffe 13
 - 2.3.2 Korrosionsverhalten von Magnesiumlegierungen 29
 - 2.4 Ermüdungsverhalten 38
 - 2.4.1 Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe..... 38
 - 2.4.2 Ermüdungsverhalten von Magnesiumlegierungen 53
 - 2.5 Korrosionsermüdungsverhalten 57
 - 2.5.1 Korrosionsermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe..... 57
 - 2.5.2 Korrosionsermüdungsverhalten von Magnesiumlegierungen ... 64
- 3 Experimentelle Verfahren 69**
 - 3.1 Korrosionsuntersuchungen 69
 - 3.1.1 Potentiodynamische Polarisation..... 69
 - 3.1.2 Immersionstests 70
 - 3.1.3 Elektrochemische Impedanzspektroskopie..... 71
 - 3.2 Korrosionsermüdungsuntersuchungen 72
 - 3.2.1 Lebensdauerorientierte Charakterisierung
(Einstufenversuche)..... 72
 - 3.2.2 Vorgangsorientierte Charakterisierung..... 76
 - 3.2.3 Kurzzeit-Korrosionsermüdungsprüfverfahren
(Laststeigerungsversuche) 76
 - 3.2.4 Slow-Strain-Rate-Tests..... 77
 - 3.3 Mikrostrukturelle Analytik 78

4 Werkstoffe DieMag422 und AE42	81
5 Ergebnisse	91
5.1 Korrosionsuntersuchungen	91
5.1.1 Potentiodynamische Polarisation.....	91
5.1.2 Immersionstests	94
5.1.3 Mikrostrukturelle Charakterisierung nach korrosiver Vorbeanspruchung	96
5.1.4 Elektrochemische Impedanzspektroskopie.....	98
5.2 Korrosionsermüdungsuntersuchungen.....	104
5.2.1 Lebensdauerorientierte Charakterisierung (Einstufenversuche).....	104
5.2.2 Vorgangorientierte Charakterisierung	124
5.2.3 Kurzzeit-Korrosionsermüdungsprüfverfahren (Laststeigerungsversuche)	152
5.2.4 Slow-Strain-Rate-Tests	164
6 Zusammenfassung und Ausblick	177
Literaturverzeichnis	183
Curriculum Vitae.....	197
Erschienene Bände	199

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
Al	Aluminium
Ar	Argon
Au	Gold
Ba	Barium
Ca	Calcium
Ce	Cer
Cl	Chlor
Cu	Kupfer
e ⁻	Elektron
EA	Erdalkalimetalle
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie
Fe	Eisen
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₃ O ⁺	Hydronium-Ion
HCF	High Cycle Fatigue
LCF	Low Cycle Fatigue
LiMi	Lichtmikroskop
LLF	Long Life Fatigue
μ-Ct	Mikro-Computertomographie
Me	Metall
Mg	Magnesium
Mg(OH) ₂	Magnesiumhydroxid

Mn	Mangan
Nd	Neodym
NDE	Negative Difference Effect
OH ⁻	Hydroxid-Ion
PBV	Pilling-Bedworth-Verhältnis
Pr	Praesodym
Pt	Platin
REM	Rasterelektronenmikroskop
SE	Seltene Erden
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SpRK	Spannungsrisskorrosion
Sr	Stromtium
VHCF	Very High Cycle Fatigue
Zn	Zink

Formelzeichenverzeichnis

Lateinische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	cm^{-2}	Fläche
a	M	Risslänge
$A_{t,\text{nom}}$	-	Nominelle Bruchdehnung
b	-	Ermüdungsfestigkeitsexponent
C	-	Materialkonstante
c_{NaCl}	mol L^{-1}	NaCl-Konzentration
da/dN	m/Lastspiel	Risswachstumsrate
$d\sigma_a/dN$	MPa/Lastspiel	Laststeigerungsrate
U^0	V	Standardpotential
E_A	J	Aktivierungsenergie
F	C mol^{-1}	Faraday-Konstante
f	Hz	Frequenz
HV0,005	-	Vickers-Härte bei Prüfkraft von 0,005 kp
i	A cm^{-2}	Stromdichte
I	A	Strom
i_0	A cm^{-2}	Austauschstromdichte
i_a	A cm^{-2}	Anodische Stromdichte
I_a	A	Wechselstromamplitude
i_{ang}	A cm^{-2}	Angelegter Polarisationsstrom
i_k	A cm^{-2}	Kathodische Stromdichte
i_{pas}	A cm^{-2}	Passivierungsstromdichte
i_{pRD}	A cm^{-2}	Passive Reststromdichte
m	-	Steigung
\dot{m}_{korr}	$\text{mg a}^{-1} \text{cm}^{-2}$	Korrosionsrate
M	g mol^{-1}	Molare Masse
n	-	Stützziffer

N	-	Lastspielzahl
N_B	-	Bruchlastspielzahl
N_G	-	Grenzlastspielzahl
N_K	-	Knicklastspielzahl
R	Ω / -	Elektrischer Widerstand / Spannungsverhältnis
R_m	MPa	Zugfestigkeit
R_z	μm	Rauhtiefe
t	s; min; h; d / mm	Zeit / Kerbtiefe
T	K	Temperatur
T_S	K	Schmelztemperatur
U	V	Spannung, Potential, Freies Korrosionspotential
U_A	V	Aktivierungspotential
U_a	V / mV	Wechselspannungsamplitude / Korrosionspotentialamplitude
U_D	V	Durchbruchpotential
U_m	V	Korrosionspotentialmittelwert
U_P	V	Passivierungspotential
U_R	V	Ruhepotential
$V_{\text{H}_2, \text{spez}}$	ml cm^{-2}	Spezifisches Wasserstoffvolumen
Y	-	Geometriefaktor
z	-	Ladungszahl
Z	Ω	Impedanz

Griechische Symbole

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
α	-	Symmetriefaktor
α_k	-	Kerbformzahl
β_k	-	Kerbwirkungszahl
$\beta_{k,korr}$	-	Korrosionskerbwirkungszahl
ΔE_{aq}	J	Hydratisierungsenergie
ΔK	MPa m ^{-1/2}	Zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
Δm	kg	Massenverlust
$\Delta \sigma$	MPa	Schwingbreite der zyklischen Spannung
ΔU_{max}	V	Maximaler Potentialabfall bei Entfestigung
$\varepsilon_{a,p}$	-	Plastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,p,max}$	-	Maximale plastische Dehnungsamplitude bei Entfestigung
$\dot{\varepsilon}$	s ⁻¹	Dehnrate
$\dot{\varepsilon}_{nom}$	s ⁻¹	Nominelle Dehnrate
ε_t	-	Totaldehnung
$\varepsilon_{t,nom}$	-	Nominelle Totaldehnung
η	V	Überspannung
ρ	m	Kerbkrümmungsradius
σ	MPa	Spannung
σ_a	MPa	Spannungsamplitude
$\sigma_{a,wahr}$	MPa	Wahre Spannungsamplitude
$\sigma_{a,B}$	MPa	Bruchspannungsamplitude
$\sigma_{a,e}$	MPa	Ermüdungsfestigkeit
$\sigma_{a,e,komp}$	MPa	Um Kerbwirkung kompensierte Ermü-

		dungsfestigkeit
$\sigma_{a,e,korr}$	MPa	Korrosionsermüdungsfestigkeit
$\sigma_{a,e,LSV}$	MPa	In Laststeigerungsversuch abgeschätzte Ermüdungsfestigkeit
$\sigma_{a,e,wahr}$	MPa	Wahre Ermüdungsfestigkeit
σ'_B	MPa	Ermüdungsfestigkeitskoeffizient
$\sigma_{k,max}$	MPa	Spannung im Kerbgrund
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_n	MPa	Nennspannung
σ_o	MPa	Oberspannung
σ_u	MPa	Unterspannung
τ	MPa	Schubspannung
φ	°	Phasenwinkel



1 Einleitung

Magnesiumlegierungen sind aufgrund ihrer geringen Dichte und hohen spezifischen Festigkeit sehr attraktiv für Leichtbauanwendungen, bspw. im Automobilbau [1-4]. Da mit geeigneten Magnesiumlegierungen bei gleicher Funktion eine Gewichtsreduktion von 50% gegenüber Stahl und 20% gegenüber Aluminium erreichbar ist, nimmt, vor dem Hintergrund der zunehmenden Bedeutung des Klimaschutzes und gestiegener Primärenergiekosten, das Interesse an dieser Werkstoffgruppe seit etwa 20 Jahren wieder deutlich zu [1, 5-7]. Insbesondere kriechbeständige Magnesiumlegierungen können auch im Motorbereich von Automobilen, wie bspw. in Zylinderkurbel- oder Getriebegehäusen, eingesetzt werden, wobei die Substitution typischer, derzeit hierfür verwendeter, Werkstoffe, wie Stahl oder Aluminium, ein enormes Potential zur Gewichtsreduktion bietet. Da allerdings die eingesetzten Werkstoffe in solchen Anwendungen im Außenbereich von Automobilen auch potentiell einer korrosiven Beanspruchung ausgesetzt sind, ist die Anwendung von Magnesiumlegierungen in solchen Bauteilen aufgrund der geringen Korrosionsbeständigkeit immer noch stark eingeschränkt [8-11]. Neben der korrosiven Beanspruchung wirken zeitgleich auch zyklische Lasten auf die Bauteile, wodurch eine starke Beeinflussung der strukturellen Integrität hervorgerufen werden kann. Zum sicheren und effizienten Einsatz in solchen Anwendungsbereichen müssen die Legierungen also sowohl eine gute Ermüdungsfestigkeit als auch eine gute Korrosions- und Kriechbeständigkeit aufweisen.

Werkstoffe zum Einsatz im Motorbereich von Automobilen müssen Temperaturen bis etwa 200 °C standhalten. Derzeit verfügbare Magnesiumlegierungen für Einsatztemperaturen von bis zu 300 °C enthalten häufig Seltene Erden als Legierungselemente und sind daher relativ teuer. Von verschiedenen Forschungseinrichtungen wurde deshalb über die letzten Jahre die Entwicklung kostengünstiger, warmfester Magnesiumlegierungen ohne den Zusatz von Seltenen Erden vorangetrieben [3, 7, 12, 13]. In diesem Zusammenhang wurde am Magnesium Innovation Center des Helmholtz-Zentrums Geesthacht die kriechbeständige Magnesiumlegierung DieMag422 (Mg-4Al-2Ba-2Ca) entwickelt, deren verbessertes Kriechverhalten durch den Zusatz der Erdalkalimetalle Barium und Calcium erreicht wird.

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss gleichzeitig wirkender korrosiver und zyklischer Beanspruchung (Korrosionsermüdung) auf die Mikrostruktur und das sich daraus ergebende Ermüdungsverhalten für die neuentwickelte Magnesiumlegierung DieMag422 und die Seltene Erden-haltige Legierung AE42 (Mg-4Al-2SE) vergleichend charakterisiert. Ziel der Untersuchungen ist eine mecha-

nismenbasierte Beschreibung der Abhängigkeit zwischen Korrosions- und Ermüdungseinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit und -lebensdauer, wozu neben begleitenden Untersuchungen der Mikrostruktur auch ein adaptiertes mechanisch-elektrochemisches Sensorsystem eingesetzt wird, um Schädigungsvorgänge detektieren und identifizieren zu können. Im Sinne einer möglichst allgemeingültigen Beschreibung werden beide Legierungen unter Anwendung eines innovativen methodischen Ansatzes, der sich von bisherigen Studien abhebt, bei verschiedenen starken, äquivalenten korrosiven Beanspruchungen geprüft und hierdurch auch der Einfluss der Korrosionsrate und -mechanismen mit in die Betrachtung einbezogen, die gerade bei Magnesiumlegierungen aufgrund der intrinsischen Korrosionsanfälligkeit eine entscheidende Rolle in Bezug auf das Korrosionsermüdungsverhalten spielen. Die für die Untersuchungen gewählten kriechbeständigen Legierungen sind in diesem Zusammenhang eher als Demonstratorlegierungen anzusehen, die zwar im Rahmen der Arbeit umfassend charakterisiert werden, aber die hierbei aufgestellte Beziehung zwischen Korrosions- und Ermüdungseinfluss universell auf verschiedenste Anwendungsszenarien von Magnesiumlegierungen übertragbar ist und auch für eine Lebensdauerabschätzung in Abhängigkeit der korrosiven Beanspruchung nutzbar gemacht werden kann.

Ausgehend von einer grundlegenden quantitativen sowie auch qualitativen Charakterisierung des reinen Korrosionsverhaltens hinsichtlich der für das Korrosionsermüdungsverhalten entscheidenden Faktoren, wie Korrosionsrate, Korrosionsmorphologie und Passivierungsverhalten, wird die Brücke zum Korrosionsermüdungsverhalten geschlagen, indem die ermittelten, lebensdauerbasierten Ermüdungskennwerte mit dem Korrosionsverhalten (quantitativ sowie auch mikrostrukturell-qualitativ) korreliert werden. Ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit ist die Etablierung des selbstentwickelten mechanisch-elektrochemischen Sensorsystems, das die vorgangorientierte Charakterisierung des Korrosionsermüdungsverhaltens im Sinne eines Condition-Monitoring-Systems ermöglichen soll. Hierzu werden Korrosionsermüdungsversuche unter Anwendung dieses Sensorsystems und begleitenden mikrostrukturellen Untersuchungen durchgeführt, um die erfassten Signale mit tatsächlich ablaufenden mikrostrukturellen Schädigungsvorgängen zu korrelieren. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend genutzt, um zu überprüfen, ob das Sensorsystem auch auf ein Kurzzeit-Ermüdungsprüfverfahren angewendet werden kann, welches eine zeitgeraffte vorgangorientierte Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens ermöglicht und dadurch eine ideale Ergänzung zum oben beschriebenen Ansatz der Ermüdungsuntersuchungen unter variiert korrosiver Beanspruchung darstellt, da mittels weniger und schnell durchzuführender Versuche eine umfassende Abschätzung der Korrosionsermüdungsfestigkeit über ein breites Korrosionsratenspektrum erfolgen kann. Um das Korrosionsermüdungsverhalten möglichst

ganzheitlich zu beschreiben, wird die Arbeit mit quasi-statischen Untersuchungen zum Spannungsrissskorrosionsverhalten beider Legierungen abgeschlossen, wobei insbesondere ein Vergleich der Bruchcharakteristika mit den Korrosionsermüdungsuntersuchungen zeigen soll, ob auch unter Korrosionsermüdungsbeanspruchung Spannungsrissskorrosion eine Rolle spielt.