

**Programm der gemeinsamen Herbstsitzung 2016  
der DGM/DVM-AG Materialermüdung und des  
DGM-AK Verformung und Bruch**

am 27. und 28. Oktober 2016 an der Technischen Universität Kaiserslautern

---

Donnerstag, 27. Oktober 2016

---

13:00

T. Beck und E. Kerscher (TU Kaiserslautern), U. Krupp (Hochschule Osnabrück), G. Biallas (HAW Hamburg)

Begrüßung – Organisatorisches – Vorstellung der TU Kaiserslautern und der werkstofftechnischen Fachgebiete

13:15

S. Backe, A. Pokhlestova, F. Balle (TU Kaiserslautern)

Ermüdungsverhalten von multifunktionalen CFK-Laminaten und intrinsische Möglichkeiten zur Schädigungsüberwachung

Als Konstruktionswerkstoff finden konventionelle kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (CFK), aktuell vor allem in der Luft- und Raumfahrtindustrie, häufige und zunehmende Verwendung. Der Einsatz bringt auf Grund geringer elektrischer Leitfähigkeit sowie Schadenstoleranz und aufwändiger Detektion von kaum sichtbaren Schädigungen (so genannte BVID = barely visible impact damage) auch konstruktive Herausforderungen mit sich. Durch die direkte Integration metastabiler CrNi-Stahlfasern sollen die Eigenschaften klassischer CFK-Laminaten im Rahmen eines DFG-Vorhabens verbessert werden. Neben der Verbesserung der Schadenstoleranz soll auch die Ermüdungsfestigkeit im LCF-Bereich vergleichend betrachtet werden. Ferner soll die verformungsinduzierte Phasenumwandlung der Stahlfasern genutzt werden, um mittels magnetinduktiver Messverfahren eine beginnende und fortschreitende Schädigung in Folge zyklischer Beanspruchung zu detektieren.

13:45

B. Engel (TU Kaiserslautern)

Hochtemperaturermüdung der Nickelbasis Superlegierung René 80

Beim konventionellen Gießen von polykristallinen Turbinenschaufeln entstehen durch unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten, bedingt durch unterschiedliche Geometrien und Wandstärken, verschiedene Korngrößen. Eine gesteigerte Abkühlgeschwindigkeit resultiert in geringeren Korngrößen. Im vorliegenden Projekt wird der Korngrößeneinfluss auf das Ermüdungsverhalten der Nickelbasis Superlegierung René 80 untersucht. Proben mit gleichen Geometrien aber unterschiedlichen Korngrößen werden in dehnungsgeregelten LCF Versuchen mit  $R=-1$  bei einer Temperatur von 850 °C beansprucht. Aufgrund der geringen Anzahl an Körnern im relevanten Probenvolumen sind neben der Korngröße vor allem die elastische und plastische Anisotropie, also die Kornorientierung sowie der statistische Größeneinfluss von Bedeutung. Die Ergebnisse liefern eine experimentelle Datenbasis, auf deren Grundlage probabilistische Modelle zur Lebensdauerberechnung erstellt werden.

14:15

B. Jost, M. Klein, T. Beck, D. Eifler (TU Kaiserslautern)

Physikalisch basierte Lebensdauerberechnung im LCF-Bereich sowie Verformungsgeschwindigkeitseinfluss von EN-GJS-600

Gusseisenwerkstoffe zeigen bei erhöhten Temperaturen Reckalterungseffekte, welche das Wechselverformungs- sowie Lebensdauerverhalten maßgeblich beeinflussen. Da der Temperaturbereich dynamischer Reckalterung maßgeblich durch verschiedene Dehnraten beeinflusst wird, wurde bei totaldehnungskontrollierten Versuchen die Frequenz von 0,005 Hz bis 92 Hz variiert. Hierfür musste ein

geeigneter Wegaufnehmer entwickelt werden, der einerseits eine dehnungskontrollierte Versuchsführung und andererseits die Erfassung der plastischen Dehnungsamplitude bei diesen hohen Frequenzen und erhöhten Temperaturen ermöglicht. Für die Berechnung der Lebensdauer im LCF-Bereich wurde die physikalisch basierte Lebensdauerberechnungsmethode PhyBaL<sub>SIT</sub> angepasst und verifiziert.

### **14:45-15:15 Kaffeepause**

15:15

B. Blinn, M. Klein, T. Beck, D. Eifler (TU Kaiserslautern)

Additive Manufacturing: Auswirkungen auf die Konstruktions-, Fertigungs- und Werkstofftechnik

Enorme Fortschritte im Bereich der additiven Fertigungsverfahren wurden überwiegend innerhalb der letzten beiden Dekaden durch die Weiterentwicklung der Lasertechnik erzielt. Aktuell liegt der Fokus in der Fertigung metallischer Ersatzteile, die in geringster Stückzahl und/oder sehr zeitnah benötigt werden. Perspektivisch sollen die additiven Fertigungsverfahren zur Serienreife weiterentwickelt werden. Für die Konstruktions- und Fertigungsstrategien ergeben sich mit diesen auftragenden Fertigungsverfahren bislang ungeahnte Möglichkeiten. Gewichtsoptimierte Hohl- / Stützstrukturen, Multimaterialkonzepte oder gezielt gradierte Bauteilvolumina seien hier stellvertretend als Ansätze genannt. Dieser Kurzvortrag überblickt den aktuellen Stand der Technik. Des Weiteren werden ermüdungsrelevante Fragestellungen an unterschiedlich additiv gefertigten Ermüdungsproben diskutiert.

15:45

F. Bülbül, H.-J. Christ, T. Kirsten, M. Zimmermann, T. Stein, A. Brückner-Foit (Uni Siegen)

Risswachstumsverhalten der Aluminiumknetlegierungen EN-AW 6082 sowie 5083 unter zyklischer Beanspruchung im Bereich Very High Cycle Fatigue

Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass die Rissinitiierung für die Aluminiumknetlegierungen EN-AW 6082 und 5083 im Bereich "Very High Cycle Fatigue" (VHCF) unterhalb der Materialoberfläche erfolgt. Das Langrisswachstum im Materialinneren ist derzeit noch nicht vollständig erforscht und ein Teil der Forschungsarbeit. Um den Risswachstumscharakter bei sehr niedrigen Spannungsamplituden genauer untersuchen zu können, werden Ultraschallprüfexperimente unter Vakuumbedingung durchgeführt. Hierfür ermöglichen eine spezielle Vakuum-Probenkammer für das Ultraschallprüfsystem sowie die Fernfeldmikroskopie die Erfassung des Langrisswachstums bei einer Resonanzfrequenz von etwa 20 kHz. Darüber hinaus erlaubt ein speziell für das Rasterelektronenmikroskop (REM) konstruiertes Miniaturprüfsystem eine in-situ Beobachtung sowie Charakterisierung der Schädigung sowohl unter Vakuumbedingung des REM's als auch ex-situ an Luft. Um Risse im Untersuchungsgebiet einleiten und unkompliziert erfassen zu können, werden vor den Ermüdungsexperimenten Mikrokerben in die Proben eingebracht. Erste Ergebnisse verdeutlichen, dass das Risswachstum aufgrund der sehr niedrigen Spannungsamplituden und der Vakuumbedingung sehr langsam voranschreitet. Bei einer initiierten Risslänge von etwa 200 µm und einer gewählten Spannungsamplitude von 130 MPa erträgt die Probe  $1,77 \times 10^7$  Lastzyklen bis zum endgültigen Versagen. Mikrostrukturelle Untersuchungen zeigen, dass der Rissverlauf überwiegend transkristallin erfolgt und dabei Gleitspuren aufweist. Des Weiteren deutet eine Schwankung der Rissgeschwindigkeit über die Risslänge daraufhin, dass Korngrenzen eine entschleunigende Wirkung auf das Risswachstum trotz Langrisswachstum-Situation besitzen.

16:15

K. Koschella, A. Giertler, U. Krupp (Hochschule Osnabrück)

Bewertung mikrostrukturell kurzer Ermüdungsrisse zur Lebensdauervorhersage des martensitischen Vergütungsstahls 50CrMo4

Die heutigen Konstruktionswerkstoffe, speziell die hochfesten Vergütungsstähle, finden in einer Vielzahl alltäglicher Bauteile, beispielsweise in Windkraftanlagen oder Otto- und Dieselmotoren, ihre An-

wendung und unterliegen hohen schwingenden Beanspruchungen. Die bei Zyklenzahlen von mehr als  $10^7$  Lastspielen (VHCF-Bereich) dominanten Ermüdungs- bzw. Schädigungsmechanismen werden in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH anhand definierter Ermüdungsversuche und mithilfe mikrostrukturbasierter Simulationsmethoden nachvollzogen. Ziel dieser Arbeit ist damit die für diesen Werkstoff erstmalige Entwicklung eines Simulationswerkzeugs auf Basis der Randelementemethode, welches explizit den Einfluss des mikrostrukturellen Gefügebraus, der Werkstoffeigenschaften im VHCF-Bereich und der Rissinitiierung auf die mikrostrukturelle Rissausbreitung quantifiziert und beschreibt. In Verbindung mit entscheidenden Werkstoffparametern, wie ehemalige Austenitkorngröße, Ausrichtung und Größe der Martensitpakete, Größe der Karbidausscheidungen sowie Größe und Form der nichtmetallischen Einschlüsse soll das Werkstoffverhalten zuverlässig vorhergesagt werden. In diesem Beitrag werden die Simulationsmethode des Rissfortschrittsmodells innerhalb eines definierten morphologischen Gefügebraus vorgestellt und die Eingangsvariablen aus Mikrostruktur und Wechselverformungsverhalten des Werkstoffs näher betrachtet.

anschließend:

Führung durch die Labore der werkstofftechnischen Fachgebiete der TU Kaiserslautern

### **19:30 Uhr: Gemeinsames Abendessen im "Twentyone"**

---

Freitag, 28. Oktober 2016

---

8:30

I. Müller (TU Kaiserslautern), R. Rementeria, L. Morales-Rivas, F. G. Caballero (CENIM Madrid), T. Sourmail (Asco Industries CREAS, Hagondange Cedex), M. Kuntz (Robert Bosch GmbH, Stuttgart), E. Kerscher (TU Kaiserslautern)

Nanobainitischer Stahl: Korrelation zwischen Mikrostruktur und Ermüdungseigenschaften

Die kürzlich entwickelten nanobainitischen Stähle weisen eine hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Duktilität auf und scheinen mit der Kombination dieser Eigenschaften sehr gut geeignet für die Auslegung zyklisch beanspruchter Bauteile. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die Dauerfestigkeiten dieser Stähle häufig überraschend niedrig sind.

Um die Dauerfestigkeit zu erhöhen ist es notwendig den Einfluss der nanobainitischen Mikrostruktur auf diese und das Ermüdungsrisswachstum zu verstehen. Dazu wurden Ermüdungsversuche und Rissausbreitungsversuche durchgeführt und deren Ergebnisse mit mikrostrukturellen Größen in Beziehung gebracht. Auf diese Weise konnten mikrostrukturelle Merkmale bestimmt werden, die das Ermüdungsrisswachstum und somit auch die Dauerfestigkeit nanobainitischer Stähle beeinflussen.

9:00

K. Burkamp (RWTH Aachen)

Mechanische Eigenschaften von NdFeB-Werkstoffen

Bisher wurden Magnetwerkstoffe hauptsächlich in ihren magnetischen Eigenschaften optimiert. Die in den 80er Jahren entwickelten Neodym-Eisen-Bor Hochleistungsmagnete erreichen dabei die höchste Energiedichte bei relativ geringen Kosten. Die mechanischen Eigenschaften wurden bisher nur als resultierend hingenommen und kaum untersucht. Da die Anforderungen an die Festigkeit der Magnete z.B. in schnell drehenden Elektromotoren steigen, lohnt es diese Werkstoffgruppe genauer zu betrachten. Eine Optimierung des Werkstoffs ist aufgrund der zu erhaltenden NdFeB Phase, die Träger der magnetischen Eigenschaften ist, eine große Herausforderung. Hier soll der Stand der Technik, sowie erste Untersuchungen an kommerziell erhältlichen Magneten vorgestellt werden.

9:30

L.-M. Heine (RWTH Aachen)

Rissausbreitung in hochfestem Gusseisen mit Kugelgraphit

Hochbeanspruchte, großvolumige Bauteile, wie beispielsweise Strukturkomponenten des Hauptgetriebes einer Windenergieanlage, werden häufig aus hochfestem Gusseisen mit Kugelgraphit herge-

stellt. Fertigungsbedingt können Gefügeungängen nicht ausgeschlossen werden, die in hochbeanspruchten Bauteilbereichen Ausgangspunkt eines Ermüdungsrissses sein können. Diese Gefahr muss im Auslegungsprozess beurteilt und das nachfolgende Rissausbreitungsverhalten beschrieben werden. Hierzu genügt es nicht einzig Werkstoffkennwerte zu ermitteln, vielmehr ist ein umfassendes Verständnis des Schädigungsprozesses und der ihn beeinflussenden Faktoren notwendig. Im Rahmen des Vortrags werden zunächst Möglichkeiten zur mathematischen Beschreibung des Rissausbreitungsverhaltens vorgestellt. Anschließend werden relevante Einflussfaktoren beleuchtet und die Ebene der makroskopischen Betrachtung verlassen, um Phänomene auf der Mikroebene zu diskutieren.

10:00

M. Thielen, F. Schäfer, P. Grünewald, M. Laub, M. Marx, C. Motz (Uni Saarbrücken)

Materialermüdung im Synchrotron: tiefere Einblicke durch hochaufgelöste Spannungsanalyse

Ermüdungsrissausbreitung ist getrieben durch die lokale Spannungsüberhöhung vor der Risspitze. Sämtliche Mechanismen, die zu Änderungen im Risswachstumsverhalten führen, gehen mit Änderungen in den Spannungsfeldern einher. Eine experimentelle Ermittlung der Felder ist jedoch alles andere als einfach, da der lokale Spannungsgradient ein sehr kleines Messvolumen erfordert. Eine Möglichkeit der Messung ist die röntgenographische Spannungsanalyse in Nutzung eines stark reduzierten Strahlquerschnitts an einer Strahlenquelle hoher Brillanz. Wir zeigen anhand von in-situ Experimenten und Spannungsmappings am Synchrotron, wie sich in Abhängigkeit verschiedener Lasten Spannungsfelder vor Rissen aufbauen, und wie diese durch Überlagerung mit lokalen Eigenspannungsfeldern variiert werden. Die Auswertung verschiedener Beugungspeaks unter Ausnutzung der Dispersion erlaubt zudem eine Auswertung der Tiefenverläufe der Spannungen. Aus Korrelationen mit Risswachstumsänderungen durch überlastinduzierte Eigenspannungsfelder und in-situ Messungen im Rasterelektronenmikroskop werden abschließend Mechanismen, die das Risswachstum beeinflussen, diskutiert.

### 10:30-11:00 Kaffeepause

11:00

M. Schwarz (MPA Stuttgart)

Kurzrisswachstum in 10 MPa Druckwasserstoffatmosphäre

Im Rahmen von zug-druck-wechsel Ermüdungsversuchen mit 1 Hz in 10 MPa Druckwasserstoffatmosphäre wird die Rissinitiierung und das Kurzrisswachstumsverhalten analysiert. Die kraftkontrollierten Experimente werden alle bei Raumtemperatur durchgeführt. Als Referenz dienen Ermüdungsversuche in Helium. Die Untersuchung der elektroplierten Oberfläche erfolgt mit der Replikamethode. Zur Entnahme der Replika wird der Versuch unterbrochen und der Autoklav geöffnet. Bei den analysierten Werkstoffen handelt es sich um den martensitischen Stahl X3CrNiMo13-4 und den metastabilen austenitischen Edelstahl X2CrNi19-11. Der Martensit zeigt dabei parallele Kurzrissfelder, welche im Referenzmedium Helium nicht entstanden sind. Der Fokus bei der Analyse des Kurzrisswachstums des Austenits liegt auf der verformungsinduzierten Austenitumwandlung.

11:30

S. Brück, H.-J. Christ, V. Schippl, C.-P. Fritzen (Uni Siegen)

In-situ Beobachtung der Kurzrissausbreitung in einem metastabilen austenitischen Edelstahl (304L) im LCF/HCF-Bereich unter dem Einfluss von Wasserstoff

In der Arbeit wird der Einfluss einer Wasserstoffvorbelastung auf die Rissinitiierung und das Risswachstum sowie auf die Veränderung der verformungsinduzierten Phasenumwandlung behandelt. Das Ziel der Arbeit ist die Charakterisierung der dominierenden Wasserstoffversprödungsmechanismen. Hierfür werden in-situ Ermüdungsversuche mit dem metastabilen austenitischen Edelstahl auf Basis des X2CrNi19-X (Varianten mit 9% und 12% Nickel) im LCF/HCF-Bereich durchgeführt. Die Beobachtung erfolgt mit Hilfe eines konfokalen Lasermikroskops an Laborluft mit unbelasteten und

vorbeladenen Proben. Die Ergebnisse zeigen einen Einfluss von Wasserstoff auf die Rissinitiierung und Rissmorphologie. Des Weiteren lässt sich hinsichtlich der Gleitband- und Martensitbildung ein Unterschied aufgrund der Vorbelastung mit Wasserstoff feststellen.

12:00

G. Kripak (Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen)

Erarbeitung und experimentelle Verifizierung einer Methodik zur Absicherung von zyklisch hochbelasteten Motorkomponenten in korrosiven Kraftstoffen

Ziel des Vorhabens ist es, den sicheren Einsatz von Bauteilen mit Beanspruchungen im VHCF Bereich, in korrosiver Umgebung durch neue schädigungsgerechte Absicherungs- und Auslegungsansätze zu ermöglichen. In der Auslegungspraxis im HCF- und VHCF-Bereich zyklisch beanspruchter Bauteile werden Fragestellungen zur Auswirkung der Korrosion derzeit nur unzureichend durch pragmatische Ansätze berücksichtigt, woraus sehr hohe Sicherheitsfaktoren resultieren. Im Zuge einer Bauteiloptimierung stellt sich die Frage nach Relevanz und Treffsicherheit, insbesondere bei zunehmend steigenden Leistungsdichten und entsprechend hoch belasteten Bauteilen. Im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Debatte und den Trend zum vermehrten Einsatz von Bio-Kraftstoffen wird sich diese Problematik noch weiter verschärfen. Biogene Kraftstoffblends stellen hierbei ein korrosives Umgebungsmedium dar, das im Gegensatz zu fossilen Kraftstoffen kritischer in Bezug auf eine Rissbildung unter äußerer Belastung einzuschätzen ist. Für fossile, wasser- und nahezu verunreinigungsfreie Kraftstoffe existieren aus der Praxis (Feldeinsatz) langjährige Erfahrungen bei zyklischer Beanspruchung im realen Einsatz (VHCF), welche nun zur Sicherstellung einer effizienten Bauteilauslegung genutzt werden können. Diese können nicht ohne weitere systematische Untersuchungen zum Verhalten bei korrosiver Beanspruchung auf andere Medien und Werkstoffe übertragen werden. Ähnliche Fragestellungen existieren auch bei anderen Werkstoffsystemen, die bislang nur an Luft oder sehr korrosiven Medien im HCF Bereich untersucht wurden, welche aber im VHCF-Bereich eingesetzt werden. Die Extrapolation aus dem HCF Bereich erscheint hier nicht sicher. Auf der anderen Seite erscheinen die Vorgaben bezüglich der Beanspruchbarkeit von Werkstoffen in korrosiven Medien unrealistisch niedrig, da Prüfungen hierzu mit sehr korrosiv gewählten Lösungen (vielfach ohne Praxisbezug zu den real wirkenden Medien) erfolgten.

12:30

P. Grünewald, F. Schäfer, M. Marx, C. Motz (Uni Saarbrücken)

Bruchmechanische Bewertung des statischen Versagens angerissener Mikrobiegebalken

Eine Vielzahl von Arbeitsgruppen hat im vergangenen Jahrzehnt die Grenzen der Bruchmechanik hin zu Probengrößen im unteren  $\mu\text{m}$ -Bereich erweitert. Die Versuche wurden mittels FIB-gekerbten Mikrobiegebalken an zumeist spröden Werkstoffen durchgeführt. Diese zeigten Mikroplastizität und wurden mittels eines J-Integralansatzes charakterisiert. Bei den vorgestellten Experimenten handelt es sich um eine Erweiterung der bisherigen Arbeiten hin zu duktilem Werkstoffverhalten an Mikrobiegeproben aus der Nickelbasissuperlegierung CMSX-4, in die unter Aufzeichnung der Compliance ein transkristalliner Ermüdungsriss als Startriss eingebracht wurde. Die statische Belastung erfolgte in-situ im REM. Der Moment der Rissinitiierung wurde anhand der Abbildungen sowie durch CTOD-Analyse mittels Digitaler Bildkorrelation bestimmt und die Kraft-Verschiebungskurven ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass das Bruchverhalten von gekerbten und angerissenen Mikroproben unterschiedlich ist und dass der J-Integralansatz nicht geeignet ist, um das bruchmechanische Werkstoffverhalten duktiler Proben auf dieser Größenskala zu erklären.

Anschließend:

U. Krupp (Hochschule Osnabrück), G. Biallas (HAW Hamburg), E. Kerscher (TU Kaiserslautern)

Fazit der gemeinsamen Arbeitskreissitzung (Materialermüdung / Verformung und Bruch) – abschließende Diskussion – nächste Sitzung

**Mittagsimbiss und Ende der Sitzung**