

## Teilprojekt A2: Bauteilrandzonen – Herstellung beanspruchungsangepasster Eigenschaftsprofile

Projektleiter:

Prof. Dr. – Ing. Thomas Niendorf

Tel.: +49 561 804-7018

Email: niendorf@uni-kassel.de

Prof. Dr. - Ing. habil. Berthold Scholtes

Tel.: +49 561 804-3660

Email: scholtes@uni-kassel.de

Projektmitarbeiter

Torben Oevermann, M.Sc.

Tel.: +49 561 804-3701

Email: oevermann@uni-kassel.de

Universität Kassel

Mönchebergstraße 3

34125 Kassel

Fax: +49 561 804-3662

### Zusammenfassung:

Bauteilrandzonen sind bei der Schädigungsentwicklung von zentraler Bedeutung, da sie die höchstbeanspruchten Bereiche von Komponenten darstellen und aufgrund verschiedener Einflüsse (Kerbwirkung durch Oberflächenrauheit, Korrosion, etc.) somit in der Regel Ausgangspunkt für folgenreiche Schädigungsmechanismen sind. Durch Wärmebehandlungsverfahren und mechanische Oberflächenbehandlungen, wie z.B. dem Festwalzen, kann der Widerstand gegen das Versagen der Bauteilrandzonen gesteigert werden. Eine Kombination der genannten Prozesse führt aufgrund gekoppelter Effekte zur Stabilisierung günstiger Eigenspannungszustände und einer Steigerung der Bauteillebensdauer, so dass Sicherheit und Zuverlässigkeit der behandelten Komponenten erhöht werden. Allerdings bedeutet eine konsekutive oder auch simultane Kombination zweier Prozesse auch immer einen erhöhten Aufwand und damit verbundene Kosten. Aus diesem Grund steht eine systematische Untersuchung gekoppelter thermischer und mechanischer Prozesse im Hinblick auf ihren Einfluss auf das Werkstoffgefüge und eine Funktionsintegration zur Verkürzung der Prozesskette im Mittelpunkt dieses Projekts.

### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Ein zentraler Aspekt des Teilprojektes ist die Charakterisierung der durch die Kombination von erhöhter Temperatur und plastischer Verformung der Randschicht erzeugten Werkstoffrandzone hinsichtlich ihres Einflusses auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit. Maßgebliche Prozessparameter, wie z.B. die Festwalzkraft und die Festwalztemperatur, aber auch Veränderungen des Werkstoffzustandes durch Anlassen bei höheren Temperaturen werden dabei betrachtet. Als Modellwerkstoff wird bei allen Versuchen der niedriglegierte Vergütungsstahl 42 CrMo4 eingesetzt, der in der Praxis überwiegend im Automobilbau bei schwingend belasteten Komponenten angewendet wird. Essentielle Randschichteigenschaften, die im bisherigen Verlauf des Projektes untersucht wurden, sind bspw. röntgenographisch gemessene Tiefenverläufe von Eigenspannungen und Integralbreiten, die Entwicklung der Werkstoffhärte über dem Probenquerschnitt und die Beschaffenheit der Bauteiloberfläche (Rauheit). Die ermittelten Ergebnisse werden dabei in Bezug auf die Bauteillebensdauer bewertet, welche durch Wöhler – Kurven aus Schwingfestigkeitsuntersuchungen unter Zug – Druckbeanspruchung ermittelt wird.

Des Weiteren ist die Integration von induktiver Wärmebehandlung und Festwalzen bei erhöhter Temperatur in einen gemeinsamen, integrierten Prozess ein Kernthema des Teilprojektes. Zu diesem Zweck wurde eine Prozesskette entwickelt, bei der die drei bisher örtlich und zeitlich getrennten Prozesse (Härten, Anlassen und Hochtemperaturfestwalzen) sowohl konsekutiv als auch simultan ausgeführt werden können. Diese Prozesskette stellt damit die Grundlage für weiterführende Untersuchungen hinsichtlich Prozessparameteroptimierungen auf Basis von Prozess – Gefüge – Eigenschaft – Zusammenhängen dar. Weiterhin wird der Einfluss des Faktors Mensch bspw. mit Hilfe von Eye – Tracking – Systemen untersucht, da die genannten Prozesse zwei unterschiedliche Disziplinen der Werkstofftechnik vereinen und dadurch besondere Anforderungen an den Menschen gestellt werden.



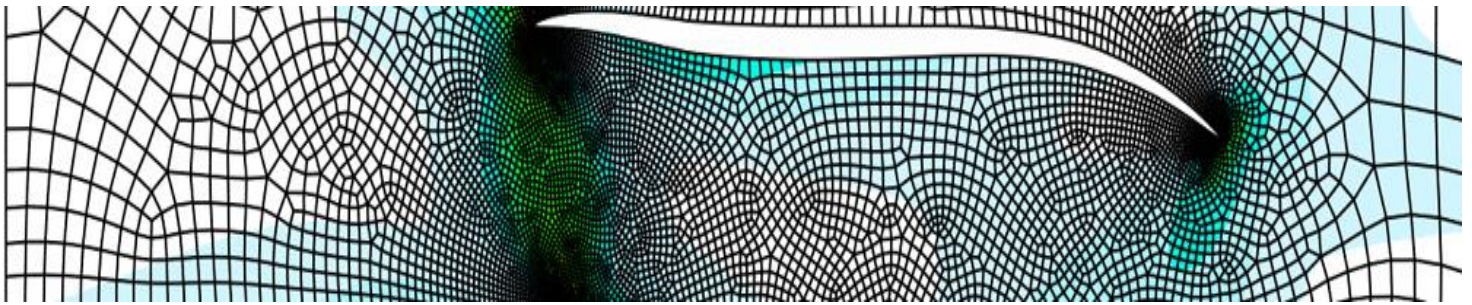
**LOEWE**

Exzellente Forschung für  
Hessens Zukunft



**SAFER MATERIALS**  
sichere und zuverlässigere Werkstoffe

**UNI KASSEL**  
**V E R S I T Ä T**



## Teilprojekt A3: Mineralische Klebstoffe für Hochleistungsbetone

Projektleiter:

Prof. Dr. rer. nat.

Bernhard Middendorf

FB 14 – Institut für konstruktiven

Ingenieurbau

Werkstoffe des Bauwesens und

Bauchemie

Universität Kassel

Mönchebergstr. 7

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804 - 2601

Fax: +49 561 804 - 2662

E-Mail: baustk@uni-kassel.de

Projektmitarbeiter:

Dipl.-Ing. Benjamin Scheffler

Tel.: +49 561 804 - 7122

E-Mail: benjamin.scheffler@uni-kassel.de

### Zusammenfassung:

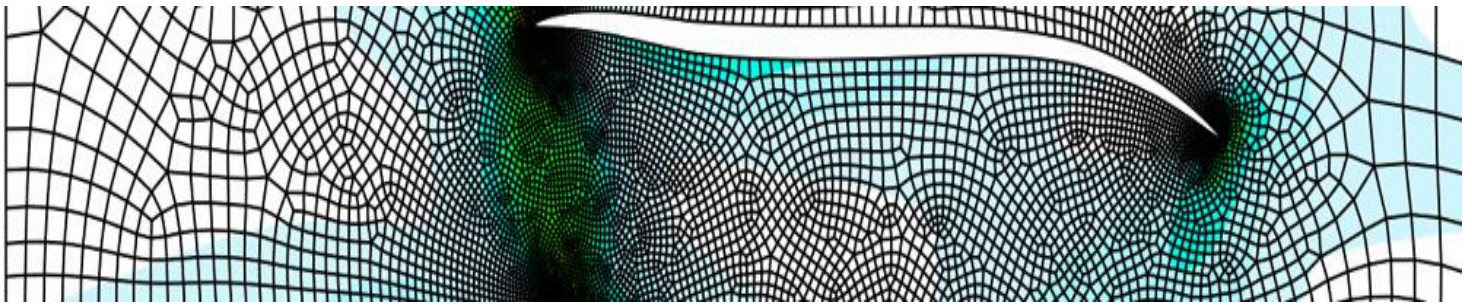
Bereits seit Mitte des letzten Jahrhunderts wird das Kleben erfolgreich in der Flugzeugindustrie und Raumfahrt eingesetzt. In der Vergangenheit führte darüber hinaus die Notwendigkeit der Energieeinsparungen („Leichtbau“) auch im straßen- und schienengebundenen Fahrzeugbau zur Etablierung klebtechnischer Fertigungsverfahren. Im Bauwesen bietet sich insbesondere durch die immer breitere Anwendung ultra-hochfester Betone (UHPC) enormes Potential für das strukturelle Kleben. Die herausragenden Eigenschaften dieses Hightech-Werkstoffes ermöglichen filigrane, materialsparende und dennoch hochbelastbare Konstruktionen, die in Modulbauweise als Fertigteile besonders wirtschaftlich produziert werden können. Durch die Klebtechnik können diese Bauteile nach Anlieferung auf der Baustelle zusammengefügt werden, wodurch das Potenzial des UHPC konstruktiv sowie wirtschaftlich wesentlich besser ausgenutzt werden kann.

Anwendungen des konstruktiven Klebens sind der Brückenbau, hier können z. B. die vorgefertigten UHPC-Platten des Brückendecks auf die Obergurte aus UHPC oder Stahl aufgeklebt werden (siehe Gärtnerplatzbrücke in Kassel). Ferner kann die Tragfähigkeit und die Dauerhaftigkeit von Massiv- oder Stahlbrücken wiederhergestellt oder gar erhöht werden, indem dünne vorgefertigte Platten aus UHPC zur Erfüchtigung aufgeklebt werden. Der Aufwand für Instandsetzungen geschädigter Brückendecks könnte so drastisch verringert werden. Ebenso ist im modularen Wohnungsbau mit UHPC-Fertigteilen die Verwendung von mineralischen Hochleistungsklebstoffen denkbar.

### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Ziel des TP A3 ist die Lastübertragung zwischen Bauteilen zu erreichen, welche mittels mineralischem Klebstoff gefügt wurden. Konkret soll die Verbundzone nachhaltig gestärkt werden, sodass das Versagen im bewehrten Substrat erfolgt. In Versuchen mit Epoxidharz-Klebstoffen konnte ein eben solches Verhalten nachgewiesen werden, jedoch sind diese Produkte nur unter gravierenden Einschränkungen einsetzbar. Die erzielten Projektergebnisse bei der werkstofftechnischen Materialanpassung, der Optimierung des Fügezonenslayouts, der Quantifizierung des menschlichen Einflussfaktors (in Kooperation mit TP A1/B4) sowie den Versuchen zur richtungsabhängigen Festigkeitsbestimmung (in Kooperation mit TP B3) mündeten in der Erkenntnis, wie ein möglichst duktiler Nachbruchverhalten gefügter Werkstoffverbindungen erreicht werden kann. Das übergeordnete Ziel der sicheren und zuverlässigen Werkstoffe wurde durch die definierte Mikrobewehrung der Fügezone weitestgehend sichergestellt.

Die finale Modifikation des mineralischen Klebstoffsystems sieht vor deren Adhäsionseigenschaften auf das Performanceniveau der Klebstoffe auf Epoxidharzbasis anzuheben. Die Verarbeitungseigenschaften wurden eingestellt und das Spektrum an zu untersuchenden redispersierbaren Polymerdispersionen (RPP) nochmals erweitert. Es konnte erstmals gezeigt werden, dass der Verbund zwischen materialtechnisch modifiziertem mineralischen Klebstoff und definierter Substratoberfläche die Matrixzugfestigkeit des UHPC-Substrates übersteigt. Diesen sehr vielversprechenden Resultaten schließen sich Versuchsreihen an, bei denen unter anderem mechanische Kennwerte unter Normal-klima sowie unter variierenden Konditionen überprüft werden.



## Teilprojekt B2: Charakterisierung von Bio-Verbundwerkstoffen zur Simulation der mechanischen Eigenschaften

Projektleiter:

Dr.-Ing. Maik Feldmann

Universität Kassel

Mönchebergstraße 3

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-2867

Fax: +49 561 804-3672

E-Mail: feldmann@uni-kassel.de

Projektmitarbeiter

Dipl.-Ing. Jan-Christoph Zarges

Tel.: +49 561 804-2544

Email: zarges@uni-kassel.de

### Zusammenfassung:

Mit einem steigenden Umweltbewusstsein tritt die werkstoffliche Nutzung nachwachsender Verstärkungsfasern wie z. B. Hanf, Jute oder auch Cellulose regeneratfasern (CRF) immer mehr in den Vordergrund. Bereits jetzt ist das Eigenschaftsniveau einer Glasfaserverstärkung erreichbar, wobei die Naturfasern in Ihren Strukturen und Eigenschaften deutlich von konventionellen Verstärkungsfasern abweichen.

Aufgrund der deutlich geringeren Biegesteifigkeit weichen die Naturfasern nicht nur in ihrer Orientierung und Ausrichtung, sondern auch hinsichtlich der Faserlängenverteilung, des Bruchverhaltens und der Faser-Matrix-Interaktion deutlich von Glasfasern (GF) ab. Zur Simulation des Bruchverhaltens der Bio-Verbundwerkstoffe ist eine Berücksichtigung und Charakterisierung dieser einflussnehmenden Faktoren unabdingbar.

In diesem Teilprojekt wird das bislang nur integral betrachtete Bruchverhalten der Bio-Verbundwerkstoffe hinsichtlich der Mikromechanik untersucht und die Ergebnisse für die Modellbildung des Verbundwerkstoffs in Kooperation mit Teilprojekt C3 herangezogen. Diese Simulation ist für eine Übertragung der Eigenschaften auf komplexe Bauteile notwendig, um sicheres und zuverlässiges Werkstoffverhalten gewährleisten zu können.

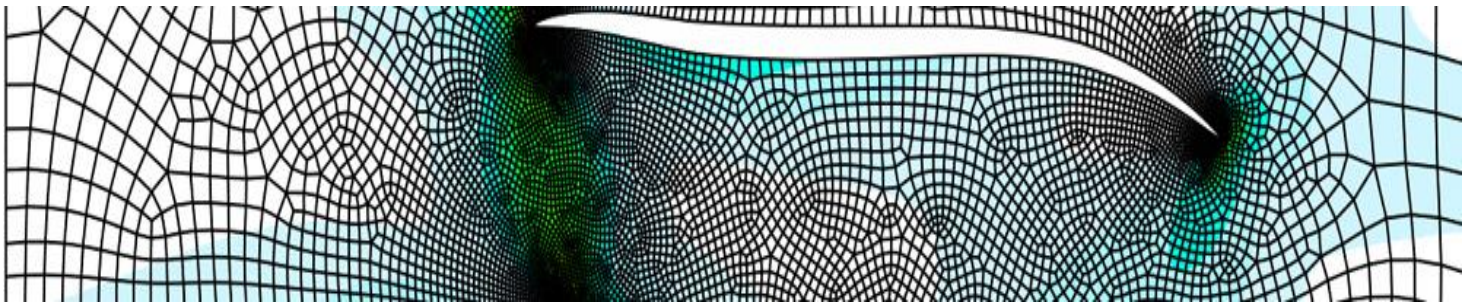
### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Eines der wesentlichen Ziele des Teilprojekts ist die Simulation und Modellbildung der mechanischen Eigenschaften hinsichtlich sicherer und zuverlässiger Werkstoffe, um die Anwendungsgebiete alternativer Ressourcen in technischen Bereichen zu erweitern. Besonders die geringe Biegesteifigkeit und die nicht-lineare Ausrichtung der cellulosischen Fasern erlauben aktuell nur eine ungenügende Aussage über die zugrundeliegende Mikromechanik in Naturfaserverstärkten Kunststoffen.

Um diese quantitativ zu ermitteln, wird ein Modellwerkstoff aus Polypropylen mit 30 Gew.-% CRF betrachtet und mit dem standardmäßig verwendeten PP 30GF verglichen. Bei der Charakterisierung der Bruchzähigkeit mittels J-Integral an spritzgegossenen CT-Prüfkörpern zeigt dieser Modellwerkstoff im Vergleich zum PP 30GF neben deutlich höheren Werten eine signifikante Richtungsabhängigkeit (Anisotropie). Diese führt neben Unterschieden in der Bruchzähigkeit auch zu abweichenden Risspfaden. Genauer gesagt führt eine computertomographisch ermittelte Faserorientierung parallel zur Belastungsrichtung zu einer höheren Bruchzähigkeit und einer Rissablenkung von ca. 60°, die in der modellbasierten Simulation ebenfalls sehr gut dargestellt wird.

Neben der Faserorientierung, die bei den GF und CRF sehr ähnlich ist, liefert das Verhältnis der vorliegenden Faserlängenverteilung und der kritischen Faserlänge eine Erklärung für die Unterschiede im Materialverhalten. Dieses zeigt, dass mehr lange CRF im Verbund vorliegen, die die kritische Faserlänge überschreiten und zu einer hohen Verstärkungswirkung führen oder die bei einem Auszug mehr Energie verzehren. In diesem Zusammenhang wird ein Grenzwert für eine eingebettete Faserlänge charakterisiert, ab dem ein Faserauszug mehr Energie verzehrt als ein Faserbruch. Im Vergleich dieses Wertes mit den vorliegenden Faserlängenverteilungen zeigt sich, dass erheblich mehr CRF- als GF-Auszüge mit höherer Energieaufnahme auftreten.

Diese Ergebnisse liefern somit eine mikrostrukturelle Erklärung für die höhere Bruchzähigkeit der CRF-Verbunde, sowie für die im Vergleich zum GF-verstärkten PP abweichenden Rissverläufe und tragen damit neben einem besseren Materialverständnis erheblich zur Vorhersage des Versagensverhaltens bei.



## Teilprojekt B3: Einfluss der Geometrie biogener Füllstoffe

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim

FB 15 – Institut für Werkstofftechnik

Kunststofftechnik

Universität Kassel

Mönchebergstr. 3

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-3670

Fax: +49 561 804-3672

Email: heim@uni-kassel.de

Projektmitarbeiter:

Dipl.-Ing. Philipp Sälzer

Tel.: +49 561 804-2544

Email: saelzer@uni-kassel.de

### Zusammenfassung:

Füll- und Verstärkungsstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen bieten in der in der Kunststofftechnik vielfältige Verwendungsmöglichkeiten. Im Gegensatz zu synthetischen Füllstoffen weisen sie jedoch keine gleichbleibenden Eigenschaften auf, sondern variieren je nach Erntejahr, Anbaugebiet oder Sorte. Zusammen mit den unterschiedlichen Verarbeitungsparametern ergibt sich ein signifikanter Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils.

Im Rahmen des Teilprojektes wurden die Zusammenhänge zwischen der Partikelgeometrie biogener Füllstoffe und der mechanischen Eigenschaften der Composite untersucht. Als Matrixwerkstoff wurde Polypropylen verwendet, das mit Holzmehl compoundingiert wurde. Durch eine Fraktionierung der Füllstoffe nach Größe vor der Compoundingierung wurden gezielt Blends mit unterschiedlichen mittleren Partikelgrößen hergestellt und untersucht. Dabei wurden Füllstoffe aus unterschiedlichen pflanzlichen Quellen mit variablen Prozessparametern verarbeitet.

In Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten wurden die Einflüsse des Menschen auf die Eigenschaften biogener Füllstoffe ermittelt und ein Modell für die Simulation des Einflusses unterschiedlicher Partikelgeometrien erarbeitet. Die Untersuchungen im Teilprojekt sollen zu einer genauen Aussage über das Werkstoffverhalten führen und somit einen Beitrag zu sicheren und zuverlässigen Werkstoffen leisten.

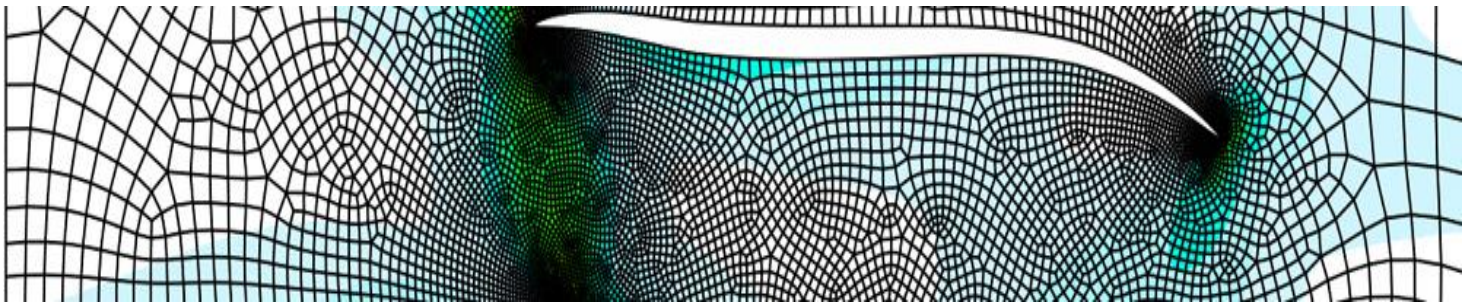
### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Übergeordnetes Ziel des Projekts ist es, die Zusammenhänge zwischen Partikelgeometrie der Füllstoffe und den mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe im Hinblick auf sichere und zuverlässige Werkstoffeigenschaften zu untersuchen.

Unter Verwendung eines teilkristallinen thermoplastischen Matrixwerkstoffs und des Füllstoffs Holzmehl konnte gezeigt werden, dass die Schlagzähigkeit solcher Verbundwerkstoffe in einem linearen Zusammenhang mit der Partikelgröße der verwendeten Füllstoffe steht. Die Partikelform hat auf diese Eigenschaften keinen signifikanten Effekt. Im Gegensatz dazu hängt die Festigkeit des Werkstoffs (z. B. bei einer Zugbelastung) deutlich von der Partikelform der verwendeten Füllstoffe ab. Diese Erkenntnisse konnten auch durch Untersuchungen des Schädigungsverhaltens (Rissuntersuchung) mittels computertomographischer Methoden ergänzt werden.

Die Untersuchung der verwendeten Prozessparameter zeigt, dass Temperatur und Scherung während der Verarbeitung zur Homogenisierung des Materials beitragen und bis zu einem gewissen Grad die Verbundeigenschaften verbessern können. Der Materialabbau bedingt durch erhöhte Temperatur wirkt sich erst bei längeren Zeiträumen, z. B. Stillstandszeiten beim Spritzgießen, negativ auf die Werkstoffe aus.

In Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Arbeits- und Organisationspsychologie wird außerdem der Einfluss des Menschen bei Rohstoffauswahl und Verarbeitung untersucht. Zu diesem Zweck wurde eine Methode zur Planungs- und Entscheidungsunterstützung



## Teilprojekt B5: Recycled Al-Gusswerkstoffe, sichere Werkstoffe trotz Recycling

Projektleiter:

Prof. Dr. rer. nat. Angelika

Brückner-Foitt

FB 15 – Institut für Werkstofftechnik

Qualität und Zuverlässigkeit

Universität Kassel

Mönchebergstr. 3

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-3680

Fax: +49 561 804-3650

Email: a.brueckner-foitt@uni-kassel.de

### Zusammenfassung:

Ziel des Vorhabens ist es, von Recyclingprodukten verunreinigte Al-Legierungen so zu qualifizieren, dass daraus Aluminiumgussteile mit hoher Zuverlässigkeit bei immer höheren Anforderungen gefertigt werden können. Dazu wurde der Einfluss der Recyclingprodukte auf die einzelnen Prozessschritte genau untersucht und die Wechselwirkung zwischen Prozessbedingungen, Gefüge und eingebrachten Gefügestörungen untersucht. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der dem Gussprozess nachgeschalteten Wärmebehandlung. Zur Ableitung geeigneter Korrelationen wurde die statistische Versuchsplanung eingesetzt, so dass damit eine Prozessoptimierung durchgeführt werden konnte. Neben den technisch sinnvollen Parametervariationen wurden auch Missbrauchsuntersuchungen durchgeführt, um untere Grenzwerte für die Werkstoffqualität festzulegen. Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurden Gussbauteile mit unterschiedlichen Beimischungen (Variation chem. Zusammensetzung) unter realen Bedingungen und unter Variation wichtiger Prozessparameter hergestellt und untersucht. Es wurde anschließend festgelegt, welche Reinheitsanforderungen an die Ausgangswerkstoffe gestellt werden müssen, um Gussbauteile mit verlässlicher Qualität herzustellen. In methodischer Hinsicht wurde es untersucht, wie sich die räumliche Verteilung von Gussfehlern darstellen lässt. Hierzu wurde neben den üblichen metallographischen Untersuchungen, das hochauflösende Micro-CT eingesetzt.

Projektmitarbeiter:

Dipl.-Ing. Inigo Bacaicoa

Tel.: +49 561 804-3505

Email: i.bacaicoa@uni-kassel.de

### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Ermüdungsversuche wurden mit recycelten Proben durchgeführt und die REM-Analyse der Bruchflächen zeigen, dass die  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi Einschlüsse keinen direkten Einfluss auf dem Schädigungsmechanismus besitzen. Darüber hinaus wurde eine höhere Anzahl dieser Partikel in dem inneren Material gefunden, was ihre begrenzte Wirkung auf die Ermüdungslebensdauer erklären kann. Die 3D-Rekonstruktionen zeigen die Anordnung dieser Fe-reichen Partikel in Agglomerationen komplexer Cluster von Einschlüssen, die entlang der Proben verteilt sind. Daher können die Einschlüsse, die in den metallographischen 2D-Bildern als einzelne nadelartige Partikel angesehen werden, tatsächlich zu einem größeren, einzelnen Einschluss gehören, der aus plattenartigen Partikeln besteht. Die Größe dieser Partikel nimmt exponentiell mit dem Fe-Gehalt zu, was zu einer dramatischen Abnahme der mechanischen Eigenschaften führt. Dennoch kann eine signifikante Zunahme der mechanischen Eigenschaften nach der Wärmebehandlung als Folge der Fragmentierung und Auflösung dieser Partikel gesehen werden. Dieses Phänomen kann auch in den REM-Analysen der Bruchflächen von Proben mit hohem Fe-Gehalt vor und nach der Wärmebehandlung festgestellt werden. Es zeigte sich ein Spaltbruch von massiven, spröden  $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi Einschlüsse in einer nicht wärmebehandelten Probe mit 1,85% Fe-Gehalt sowie ein duktiler Bruch mit einer deutlichen Reduktion des Anteils an Fe-reichen Einschlüssen.



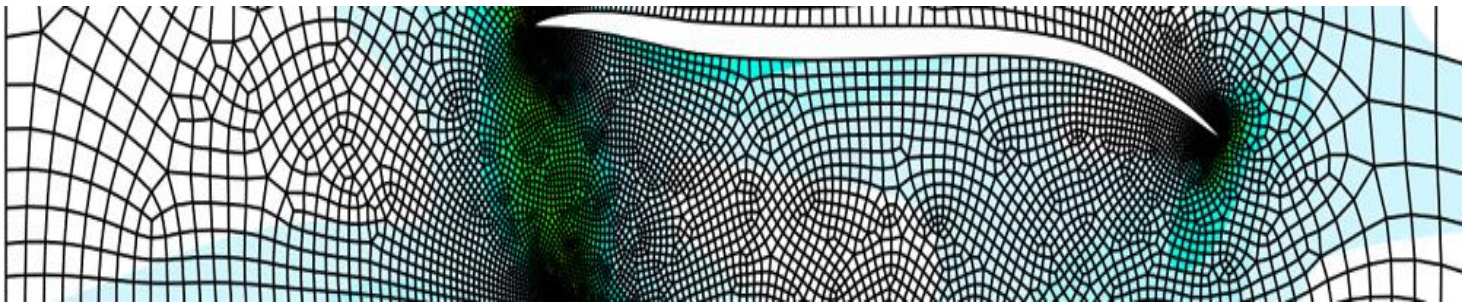
**LOEWE**

Exzellente Forschung für  
Hessens Zukunft



**SAFER MATERIALS**  
sichere und zuverlässigere Werkstoffe

**UNI KASSEL**  
**V E R S I T Ä T**



## Teilprojekt C1: Thermisch stabile Hochleistungsbetone

Projektleiter:

Prof. Dr. rer. nat.

Bernhard Middendorf

FB 14 – Institut für konstruktiven

Ingenieurbau

Werkstoffe des Bauwesens und

Bauchemie

Universität Kassel

Mönchebergstr. 7

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804 - 2601

Fax: +49 561 804 - 2662

E-Mail: baustk@uni-kassel.de

Projektmitarbeiter:

Dipl.-Ing. Benjamin Scheffler

Tel.: +49 561 804 - 7122

E-Mail: benjamin.scheffler@uni-kassel.de

### Zusammenfassung:

Ultra-hochfester Beton zeigt mit einem Wert von  $> 150 \text{ N/mm}^2$  eine gegenüber Normalbeton deutlich erhöhte Druckfestigkeit und ist durch einen sehr geringen Flüssigkeitsanteil, eine hohe Konzentration dicht gelagerter Feststoffe sowie eine in Folge dessen nahezu kapillarporenfreie, undurchlässige Mikrostruktur gekennzeichnet. Diese Gefügedichte erhöht die Festigkeit und Dauerhaftigkeit einerseits in wünschenswerter Weise. Andererseits verringert sie den Widerstand des ultra-hochfesten Betons bei Temperaturbelastungen im Temperaturbereich insbesondere von  $> 250 \text{ °C}$ , sodass der Werkstoff bei Überschreiten einer kritischen Temperatur spröde, ja geradezu explosionsartig und vor allem nicht vorhersehbar versagt. Neben Phasenumwandlungen im Mikrogefüge führt hierbei vor allem der sich aufbauende Wasserdampfpartialdruck bei Übersteigen der lokalen Zugfestigkeit des Mikrogefüges zur Formation von Mikrorissen, die sich bei fortlaufender Belastung zu Makrorissen vereinen und so zum Verlust der mechanischen Festigkeit des Betonbauteils führen.

Die spezifischen Versagensmechanismen im Brandfall mit Maximaltemperaturen bis  $1.000 \text{ °C}$  sind dabei weitestgehend bekannt. Bedarfssfelder des speziellen Maschinenbaus und des industriellen Anlagenbaus erfordern hingegen Bauteile aus ultra-hochfestem Beton, die zyklischen Belastungen im Temperaturbereich bis  $500 \text{ °C}$  langfristig unter Erhalt der mechanischen Festigkeit widerstehen können. Dabei versagen bekannte Maßnahmen zur Erhöhung des Widerstands im Brandfall. So ist z.B. die Zugabe von PP-Fasern in der Regel mit Festigkeitseinbußen des ultra-hochfesten Betons verbunden.

### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Die Sicherheit und Zuverlässigkeit von UHPC unter thermischer Beanspruchung wird durch zwei zentrale Strategien sichergestellt. Erstens, der Einsatz einer innovativen Faserbewehrung, welche aus der Kooperation mit dem TP B2 hervorgegangen ist. Sie bewirkt eine Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit des UHPC. Zweitens, die gezielte Modifikation des Bindemittels der UHPC-Formulierung zur Reduzierung des Wasserdampfpartialdrucks bei gleichzeitiger Erhöhung der Matrixzugfestigkeit.

Im Falle der Faserbewehrung kann der entstehende Wasserdampfpartialdruck durch ein dichtes Netzwerk feiner Kanäle, ohne das Auftreten von Mikrorissen, abgeleitet werden, was innerhalb des beobachteten Temperaturbereichs bis  $500 \text{ °C}$  insgesamt nicht zur Destabilisierung des Gefüges führt. Für den Fall der gezielten Beeinflussung der Bindemittelzusammensetzung werden die für die Schädigung maßgebenden Reaktionsprodukte reduziert und somit die Beständigkeit gegen thermische Beanspruchung erhöht. Damit wurde eine dramatische Verbesserung der thermischen Stabilität von UHPC nachgewiesen, da die Referenz nur bis maximal  $300 \text{ °C}$  stabil war.

Das Projektziel eines thermisch stabilen Hochleistungsbetons mit einer erhöhten Schadenstoleranz sowie einem weitestgehend vorhersehbareren Versagensverhalten, wurde im Labormaßstab erreicht. Ferner konnten durch die Arbeiten zusätzliche Anwendungsfelder, insbesondere im Hochtemperaturbereich, erschlossen werden. In Zusammenarbeit mit weiteren Projektbeteiligten spielt jedoch die vertiefte Analyse des Einflussfaktors „Mensch“ im Rahmen des Herstellungsprozesses eine entscheidende Rolle für die Sicherstellung einer gleichbleibend hohen und vor allem reproduzierbaren Qualität dieses Hochleistungswerkstoffes.



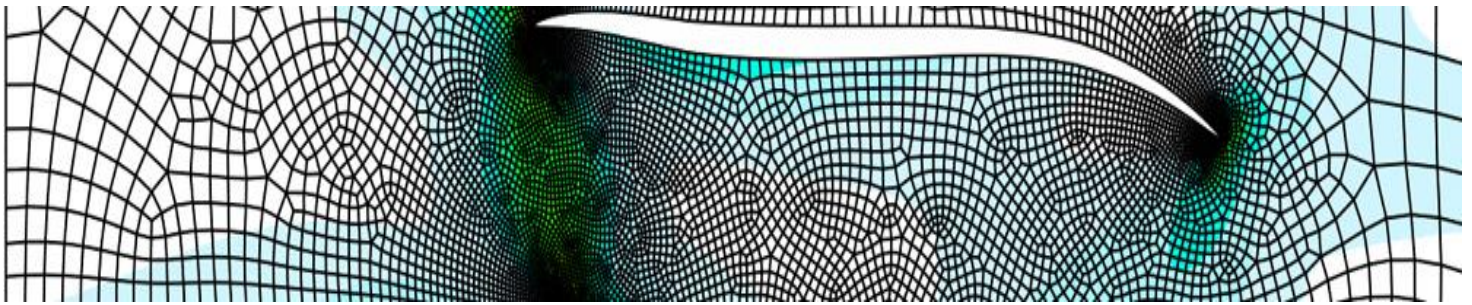
**LOEWE**

Exzellente Forschung für  
Hessens Zukunft



**SAFER MATERIALS**  
sichere und zuverlässigere Werkstoffe

**UNI KASSEL**  
**V E R S I T Ä T**



## Teilprojekt C2: Beurteilung von Festigkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer mittels numerischer Methoden: mehrskalige schädigungsmechanische Ansätze

### Zusammenfassung:

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Ricoeur

FB15 – Institut für Mechanik

Technische Mechanik /

Kontinuumsmechanik

Universität Kassel

Mönchebergstraße 7

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-2820

Fax: +49 561 804-2720

Email: andreas.ricoeur@uni-kassel.de

Projekt Mitarbeiter:

Dr.-Ing. Paul Judt

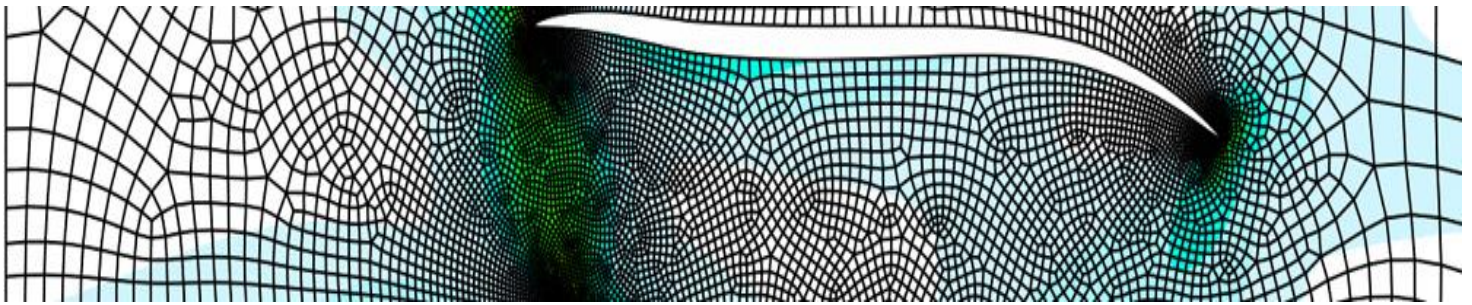
Tel.: +49 561 804-2852

Email: judt@uni-kassel.de

Es werden Berechnungswerkzeuge entwickelt, die Vorhersagen zur Anrissbildung und Schädigungsentwicklung ermöglichen und auf dem Konzept der Kontinuumschädigungsmechanik basieren. Das Wachstum von Defekten wird einerseits auf mikroskopischen und mesoskopischen Ebenen beschrieben. Hier können, je nach Werkstoff, u. a. trans- und interkristalline Mikrorisse, Poren oder Einschlüsse eine Rolle spielen. Die numerischen Simulationen werden grundsätzlich auf makroskopischer Ebene durchgeführt, wobei gegebenenfalls die Verknüpfung der Skalen durch Homogenisierungsansätze erfolgt. Anrisse liegen beim mikromechanischen Modell dort vor, wo das Wachstum von Mikrodefekten schließlich zu deren Koaleszenz führt. Die Abbildung von Mikro- und Mesostrukturen erfolgt in Zellmodellen, welche ein repräsentatives Volumenelement darstellen. Die Homogenisierung liefert dann, im Sinne einer Mittelung, effektive Materialkonstanten. Auch rein phänomenologisch basierte numerische Verfahren zur Anrissbildung werden entwickelt und erprobt. Besonders vielversprechend ist die Theorie der Konfigurationskräfte im materiellen Raum, die neben der Beanspruchung eines vorhandenen Risses auch Informationen über Position und Richtung eines neu entstehenden Risses liefern und sowohl bei ebenen als auch bei räumlichen Randwertproblemen sehr effizient umgesetzt werden können. Damit eignen sich materielle Kräfte, um die sequentiell ablaufenden Vorgänge der Anrissbildung und des Risswachstums zu beschreiben. Ein zentraler Punkt besteht in der Verknüpfung bruch- und schädigungsmechanischer Ansätze und der damit verbundenen Verbesserung von Vorhersagen zur Festigkeit und Zuverlässigkeit technischer Strukturen.

### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Arbeiten zur mikromechanisch motivierten Schädigungsmechanik und mehrskaligen Schädigungsmodellierung wurden durchgeführt. Dabei wurden u. A. Ansätze zur mehrskaligen FE-Simulation und zur numerischen und analytischen Homogenisierung weiterentwickelt und umgesetzt. Auf der Mikroskala spielen insbesondere Mikrorisse und Korngrenzendelamination zentrale Rollen. Ziel des Teilprojektes ist die modellbasierte Untersuchung der Mechanismen der Anrissbildung und der Schädigungsentwicklung in inhomogenen anisotropen Strukturen. Das Anwendungsspektrum reicht von hochfesten Werkstoffen mit geringen Fehlertoleranzen bis hin zu heterogenen Strukturen aus nachwachsenden Rohstoffen mit ausgeprägten Eigenschaftsschwankungen. Auf der Mikroskala steht u. A. die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Zellmodelle für Risse im Vordergrund. Die effektiven Steifigkeiten verschiedene Modelle werden z.B. semi-analytisch auf Basis der Versetzungsmethode ermittelt und verglichen. Ein weiterer Punkt bei der modellbasierten Festigkeitsbewertung ist die Verknüpfung von Bruch- und Schädigungsmechanik. Schädigungsmechanische Berechnungen liefern Aussagen zur Anrissbildung in einem Bauteil, Vorhersagen zum Wachstum eines Risses auf Basis bruchmechanische Ansätze sind andererseits genauer. Eine Verknüpfung beider Berechnungsmethoden in der Bruchprozesszone ermöglicht zudem die Betrachtung mikrostruktureller Prozesse, z.B. das trans- oder interkristalline Wachstum von Mikrorissen, an der Spitze eines Makrorisses in Verbindung mit Makrorisswachstum. Materielle Kräfte werden am makroskopischen Modell berechnet und zur Vorhersage der Anrissbildung eingesetzt. Die berechnete Position und Richtung stimmt mit den Vorhersagen spannungs- und energiebasierter Kriterien überein. Das Berechnungskonzept wird aktuell auf 3D-Anwendungen erweitert.



## Teilprojekt C3: Beurteilung von Festigkeit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer mittels numerischer Methoden: bruchmechanische Ansätze

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Ricoeur

Universität Kassel

Möncheberg Str. 7

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-2820

Fax: +49 561 804-2720

Email: ricoeur@uni-kassel.de

### Zusammenfassung:

Das Wachstum eines Risses wird klassischerweise mit Methoden der Bruchmechanik untersucht. Hier wird der Riss durch eine Paarung innerer Oberflächen modelliert. Um das Wachstum eines Risses unter Anwendung numerischer Diskretisierungsverfahren zu simulieren, sind drei Teilaufgaben zu behandeln. Zunächst erfolgt eine bruchmechanische Beanspruchungsanalyse, z. B. durch Berechnung wegunabhängiger Erhaltungsintegrale. Eine weitere Aufgabe besteht in der Bestimmung der Richtung eines inkrementellen Rissfortschritts auf Basis der ermittelten Beanspruchungsgrößen. Schließlich müssen beim Risswachstum neue Oberflächen im Modell geschaffen werden. Liegen Inhomogenitäten auf der Mikroskala vor, dann kommt es innerhalb einer Prozesszone zu Interaktionen mit der Rissspitze. Hier kann es zur Abschirmung infolge von Phasenumwandlungen, Delamination kleinster Einschlüsse oder Mikrorisswachstum kommen. In heterogenen Strukturen oder Materialverbänden spielt die Interaktion zwischen Rissen und starke oder schwache Grenzflächen eine wichtige Rolle, ebenso wie die Anisotropie des Risswiderstandes. Es werden erweiterte Methoden der numerischen Beanspruchungsanalyse entwickelt. Insbesondere der Interaktion zwischen imperfekten Grenzflächen, z. B. zwischen Mikrofasern und einer Matrix, einerseits und Matrixrissen andererseits kommt eine zentrale Bedeutung zu. Bei zeitlich versetzten, überlagerten Schub- und Zugbelastungen kommt es zur nicht-proportionalen Rissbeanspruchung. Für solche Lastsituationen werden adäquate Rissablenkungskriterien untersucht und an Versuchen validiert.

### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Auf dem Gebiet der numerischen und analytischen Bruchmechanik wurden bereits einige Arbeiten veröffentlicht. Verschiedene Methoden zur numerischen Beanspruchungsanalyse gekrümmter, auch mehrfacher Risse, wurden entwickelt. Untersuchungen an Rissen in anisotropen Materialien haben gezeigt, dass herkömmliche Risswachstums- und Ablenkungskriterien versagen. Mit einer neuen Herangehensweise konnten in Proben einer Aluminiumlegierung, die eine bruchmechanische Anisotropie aufweisen, Risspfade sehr genau vorhergesagt werden. Als Ursache für die Anisotropie wurden mechanische Prozesse bei der Materialherstellung identifiziert, wie das Walzen, Extrudieren oder Spritzgießen, welche eine Textur und i. A. eine bruchmechanische Vorzugsrichtung hervorrufen.

Auch in den Modellwerkstoffen des Teilprojekts B2 (glas- oder zellulosefaserverstärktes Polypropylen), lässt sich eine deutliche Anisotropie feststellen, die auf das verwendete Spritzgussverfahren und den Füllvorgang des Werkzeugs zurückzuführen ist. Mit dem entwickelten Verfahren ist es möglich, in Abhängigkeit der Lage des Risses zur Vorzugsrichtung, eine Vorhersage über den Verlauf des Risspfades zu machen.

Eigenspannungen, wie sie in den Teilprojekten A2 und C4 untersucht werden, führen zu einer Steigerung der Festigkeit einer Struktur, sind aber auch die Ursache für eine nicht-proportionale Beanspruchung vorhandener Risse. Das Ermüdungsrisswachstum in Strukturen mit Eigenspannungen ist Gegenstand der aktuellen Forschung, insbesondere die genaue Vorhersage von Risspfaden bei nicht-proportionalen Lasten stellt eine große Herausforderung dar. Eine neuartige Probe wurde entwickelt, um experimentell reproduzierbare Eigenspannungszustände sowie Risspfade zu erzeugen und daran verschiedene Hypothesen der Rissablenkung zu bewerten.



**LOEWE**

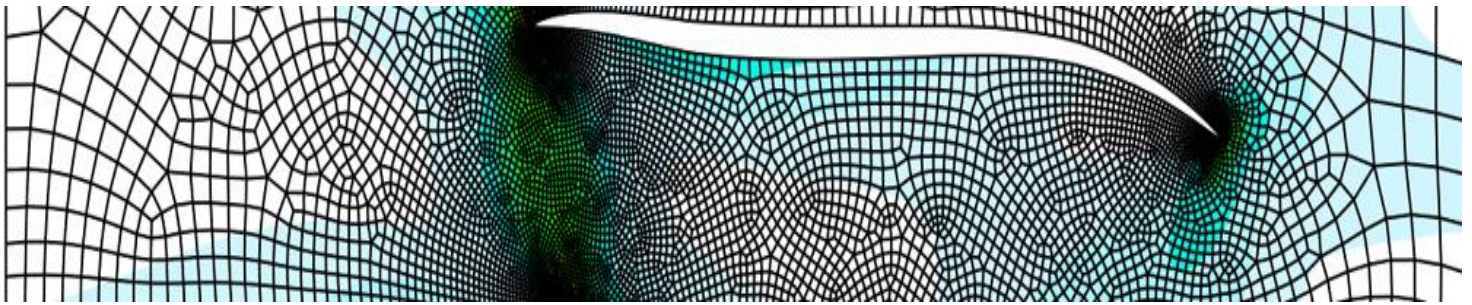
Exzellente Forschung für  
Hessens Zukunft



**SAFER MATERIALS**  
sichere und zuverlässigere Werkstoffe

**UNI KASSEL**  
**V E R S I T Ä T**





## Teilprojekt C4: Bauteilrandzonen – Zuverlässige Materialeigenschaften unter komplexen Beanspruchungen

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Niendorf

Universität Kassel

Mönchebergstraße 3

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-7018

Fax: +49 561 804-3662

Email: niendorf@uni-kassel.de

### Zusammenfassung:

Es ist allgemein bekannt, dass randnahe Bauteilbereiche lebensdauerbestimmend sind. Durch konsekutive bzw. simultane thermisch-mechanische Oberflächenbehandlungsverfahren (z.B. Kugelstrahlen, Festwalzen, Laserschockverfestigen) können die Randschichteigenschaften beeinflusst und ein stabiles Versetzungsnetzwerk erzeugt werden. Hieraus resultiert eine Steigerung der Festigkeit unter schwingender Beanspruchung. Bisher existieren nur unzureichende vertiefende Kenntnisse über die Effekte von Randschichtzuständen auf das Wechselverformungsverhalten sowie die vorliegende Mikrostruktur- und Eigenspannungsverteilung. Besonders im Bereich hoher Lastspielzahlen und für Überlasten liegen kaum Ergebnisse vor.

Als zentrale Fragestellung wird daher untersucht, inwieweit randnahe Mikrostrukturen unter komplexen Beanspruchungen stabil bleiben bzw. welche Veränderungen in Abhängigkeit der Beanspruchungsparameter auftreten.

### Stand des Projektes – Ziele und Perspektiven:

Das Projekt verfolgt das Ziel, ein Grundverständnis über die Stabilität randnaher Mikrostrukturen unter komplexen schwingenden Beanspruchungen zu erlangen. Im Rahmen dessen gilt es, den Einfluss einer mechanischen Oberflächenbehandlung auf die Mikrostrukturen und die Eigenspannungsstabilität der Bauteilrandschicht zu erforschen. Zudem soll untersucht werden, inwieweit die Wirksamkeit von Randschichtverfestigungsverfahren für Komponenten unter komplexen Beanspruchungsbedingungen zur Steigerung der Sicherheit und Zuverlässigkeit beiträgt. In Wöhlerversuchen hat sich gezeigt, dass das Festwalzen bei Raumtemperatur zu einer Festigkeitssteigerung um 40% und das Festwalzen bei 250°C zu einer Steigerung um 50% führt. Im Bereich geringer Lastspielzahlen bzw. hoher Beanspruchungsamplituden konnte keine Lebensdauersteigerung beobachtet werden, was auf einen erhöhten Eigenspannungsabbau zurückzuführen ist (siehe Abbildungen).

Prof. Dr.-Ing. habil. Berthold

Scholtes

Universität Kassel

Mönchebergstraße 3

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-3660

Fax: +49 561 804-3662

Email: scholtes@uni-kassel.de

Projektbearbeiter:

Stephanie Saalfeld M.Sc.

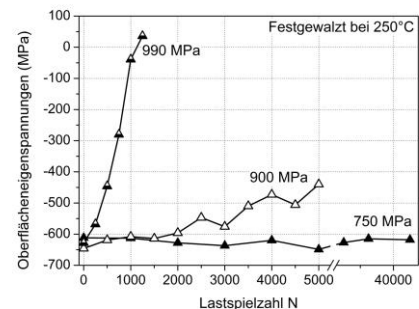
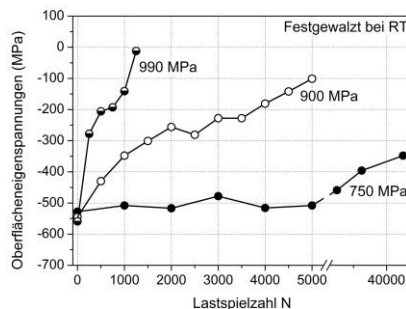
Universität Kassel

Mönchebergstraße 3

34125 Kassel

Tel.: +49 561 804-3701

Fax: +49 561 804-3662



Überlastversuche haben gezeigt, dass im Vergleich zu unbehandelten Oberflächen festgewalzte Strukturen Überlasten schlechter „verarbeiten“ können. Hierbei spielen die Überlasthöhe und die Anzahl an Überlasten eine entscheidende Rolle. Während im unverfestigten Zustand eine geringe Lebensdauersteigerung erzielt werden konnte, zeigten sich für die festgewalzten Zustände (Raumtemperatur und 250°C) starke Entfestigungsvorgänge während der Beanspruchung und somit teils deutlich reduzierte Lebensdauern. Im weiteren Verlauf des Projektes wird die randnahe Mikrostruktur auf Basis von Untersuchungen zum thermischen Eigenspannungsabbau und der Ermittlung des Werkstoffverhaltens im Bereich hoher Schwingspielzahlen analysiert.