

# Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19125 BG

## Thema

»Bewertung der Zuverlässigkeit von keramischen Federn für korrosive Umgebungen und hohe Temperaturen«

– Endursprung –

## Berichtszeitraum

01.06.2016-31.05.2019

## Forschungsvereinigung

[Forschungsgemeinschaft der Deutschen Keramischen Gesellschaft e.V. - FDKG

## Forschungseinrichtung(en)

1: Fraunhofer-Gesellschaft e.V.  
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

2: Fraunhofer-Gesellschaft. e.V.  
Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS

Freiburg, 14.10.2019

Dresden, 07.10.2019

Ort, Datum

Andreas Kailer<sup>1</sup>

Jens Stockmann<sup>2</sup>

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

*A. Kailer*  
*Jens Stockmann*

Gefördert durch:

## 1. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Vergleich mit den Zielen

### Zusammenfassung

Korrosion ist eine der Hauptursachen für das Versagen von Federn. Bei Reibung metallischer Federn wird die Passivierung ständig aufgebrochen und die Korrosion dadurch verstärkt. Angesichts der vielfältigen Vorteile und technischen Möglichkeiten keramischer Federn ist es verwunderlich, dass in den letzten 30 Jahren, seit in Japan die ersten Spiralfedern aus technischer Keramik entwickelt wurden, solche Federn nicht weiter für den bestehenden Markt entwickelt wurden. Als Grund hierfür wird die mangelnde Erfahrung und Kenntnis der Entwickler und Konstrukteure im Maschinen- und Anlagenbau gesehen, und deren Skepsis für den Einsatz von keramischen Werkstoffen bei den etablierten Standards und Anforderungen der Federn. Ziel des Projekts war somit die Entwicklung der Grundlagen eines Technologiesystems zur Auslegung und Herstellung von keramischen Schraubdruck- und Tellerfedern für die Demonstration Ihres Einsatzes unter korrosiven Bedingungen und im Temperaturbereich von 600 bis 1000 °C. Aus der breiten Palette der technischen Keramikwerkstoffe wird schwerpunktmäßig das gasdruckgesinterte Siliziumnitrid in die Untersuchungen einbezogen, sowie Zirkonoxid als hochfeste weitverbreitete Keramik. Diese Auswahl wird durch ihre gute Bruchzähigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Hochtemperaturfestigkeit und Kriechbeständigkeit begründet. Durch eine enge Kopplung von Simulationsmethoden mit experimentellen Methoden sollen Keramikfedern entwickelt und deren hohe Belastbarkeit und Stabilität demonstriert werden. Den Konstrukteuren und Anwendern sollen auch über Einbindung der Verbandsmitglieder der Federanbieter die für die Auslegung von Keramikfedern notwendigen Methoden und Instrumente zur Verfügung gestellt werden. Von den Ergebnissen dieses Projekts profitieren sowohl die industriellen Hersteller als auch die Sonderanwender dieser Federn, die überwiegend KMU sind.

Damit seitens der Industrie eine zügige Umsetzung in technische Anwendungen erfolgen kann, wurde folgender Entwicklungsbedarf ermittelt und erfüllt:

- Auslegungstools, mit denen keramische Federn mit den gewünschten Federkonstanten für den Einsatz zuverlässig ausgelegt und hergestellt werden können, wurden erstellt. Es wurden der keramischen Industrie und den Anwendern Parameterkorrelationen an die Hand gegeben, mit denen sie selbständig anhand der etablierten und in den Normen festgehaltenen Berechnungsformeln keramische Federn auslegen und Systeme mit keramischen Federn konstruieren können.
- Die Entwicklung der Grundlagen einer Technologie zur Herstellung keramischer Federelemente für Prototypen und kleinere Serien wurde geleistet.
- Die Charakterisierung der Federwerkstoffe durch thermisch-mechanische Werkstoff- und Bauteilprüfungen, mit denen die temperatur- und umgebungsabhängigen Kennwerte (die elastischen Eigenschaften, wie z.B. Elastizitätsmodul, Schubmodul, dynamische Festigkeit und unterkritisches Risswachstum, die Korrosionsbeständigkeiten und die Versagenswahrscheinlichkeiten) bestimmt werden können, wurde durchgeführt.
- Eine Charakterisierung der oszillatorisch belasteten mechanischen Kontakte, die insbesondere für Tellerfederpakete aber auch für Schraubendruckfedern und deren Aufnahmen festigkeitsmindernd auf das Bauteil wirken, wurde innerhalb des Projektes begonnen, stellt aber ein deutliches Entwicklungspotential für die Zukunft dar.
- Eine Methodik zur Messung der temperaturabhängigen Federkennwerte wurde erprobt.

- Eine Anpassung von Simulationskonzepten zur Beschreibung der zeit- und belastungsabhängigen Zuverlässigkeit wurde vorgenommen
- Schließlich wurde anhand von Demonstratoren gezeigt, dass auch mit vermeintlich spröden keramischen Werkstoffen Federn hergestellt und technisch genutzt werden können, die den Stahlfedern hinsichtlich Einsatztemperaturbereich und Langzeitbeständigkeit deutlich überlegen sind und damit die höheren Herstellungskosten rechtfertigen.

Die herausfordernde Zielstellung des Projektes lässt sich an der Entwicklung einer Plattform zur Dimensionierung und Zuverlässigkeitsbewertung keramischer Schraubendruckfedern beschreiben, denn zusätzlich galt es für diese entsprechend vorgegebenen Kundenspezifikationen (Federrate, Bauraum, Nennlast) unter Berücksichtigung der Belastungsgrenzen des Werkstoffes Lösungen zu finden. Dieses Ziel wurde durch die Erstellung und die erfolgreiche prototypische Anwendung sowohl eines Stand-Alone Grobdimensionierungstools (axial belastete Feder) auf Excel-Basis als auch universell einsatzbereiter, makrobasierter, vollparametrisierter 3D-Finite Elemente Modelle (ANSYS) für verschiedene Vollfedervarianten (Varianten Federendgestaltung) zur Analyse komplexerer Belastungsaspekte (schiefe Belastung, Federend-Geometrie und Lagerungs-Details, Stabilität, Eigenfrequenzen) im Rahmen der Feindimensionierung vollumfänglich erfüllt.

Die Gültigkeit der entwickelten, vereinfachten Beschreibung für Federrate und Beanspruchung/ Zuverlässigkeit im Rahmen des Excel-Werkzeuges wurde durch den Vergleich mit den Ergebnissen der detaillierten 3D-FE-Analysen an mehreren Beispielen mit guter Genauigkeit validiert und übersteigt bei Weitem die Vorhersagegüte bisher zur Verfügung bestehender ingenieurmäßiger Beschreibungen (etwa DIN 2090).

Für die keramische Schraubendruckfeder konnte, wie im Antrag als Ziel formuliert, ein ingenieurmäßig anwendbarer Formalismus (auf Grundlage eines effektiven Weibull-Volumens) zur statistischen Zuverlässigkeitsanalyse entwickelt werden, der dem statistischen Charakter des durch sprödes Versagen gekennzeichneten keramischen Materials auf Basis der Weibull-Theorie mittels  $P_{(rinciple)}I_{(ndependent)}A_{(ction)}$ -Kriterium und der Weakest-Link Bauteil-Versagens-Hypothese Rechnung trägt. Dieser Formalismus wurde im Projekt auch hinsichtlich einer Analyse des statischen, dynamischen und zyklischen Zeitstandsverhaltens unter Voraussetzungen der Annahmen und Konzepte des unterkritischen Risswachstums erweitert. Die Methodik wurde im Excel-Werkzeug unmittelbar integriert. Für die Feindimensionierung auf Basis der 3D-FE-Modelle wurden Makros, Prozeduren sowie Schnittstellen entwickelt, um die Zuverlässigkeitsanalyse sowohl Volumendefekt-basiert (innerhalb der FE-Analyse) als auch Oberflächen-Defekt basiert (nach Export der FE-Ergebnisse in externe Zuverlässigkeitsanalyse-Werkzeuge) auch auf diesem Modell-Level durchführen zu können.

Eine notwendige Voraussetzung zur statistischen Zuverlässigkeitsbewertung ist die Kenntnis der dafür benötigten speziellen Parameter (Weibull-Modul + -festigkeit, Rissausbreitungsrate, -exponent), die material-, bearbeitungs- und belastungs-(Lastmode-, Temperatur, chem. Umgebung)-spezifisch aus aufwändigen statistischen Versuchsreihen ermittelt werden müssen. Hier konnte, wie ebenfalls im Antrag als Zielstellung vermerkt, für die projektrelevanten Materialien ( $Si_3N_4$ ,  $ZrO_2$ ) sowie Herstellungs- und Anwendungs-Bedingungen (Raumtemperatur,  $1000^\circ C$ ) umfangreiche Datensätze ermittelt werden, die eine Durchführung der Zuverlässigkeitsanalysen im Rahmen der Federdimensionierung ermöglichen. Die Parameterermittlung kann als andauernde Aufgabe verstanden werden, die mit dem Projektende nicht abgeschlossen ist, sondern- für neue Werkstoffe und Anwendungsszenarien aber auch für die bestehenden Materialien zur Erweiterung und Stärkung der statistischen Basis- im Rahmen

zukünftiger Aufträge kontinuierlich fortgeführt werden wird. Dafür konnte im Rahmen des Projektes nun auch am IKTS eine entsprechende experimentelle und auswertungstechnische Methodik zur Ermittlung der Parameter der unterkritischen Rissausbreitung (auf Basis dynamischer 4-Punkt-Biegestabprüfung) grundhaft etabliert werden, die zukünftig zur Erweiterung des Materialspektrums und des Datenbestandes genutzt werden kann. Am IWM ist die entsprechende Methodik, mit besonderem Hinblick auch auf anspruchsvolle Umgebungsbedingungen (Hochtemperatur, chem. Medienumgebung) und Lastmoden (z.B. Torsion) bereits umfassend etabliert und wurde im Projekt intensiv genutzt.

Ein zentraler Zielaspekt des Projektantrages war der Nachweis der Einsatzfähigkeit der entwickelten Auslegungs-Werkzeuge an Hand deren erfolgreicher Anwendung und Validierung im Rahmen der praktischen Auslegung und Fertigung materieller keramischer Schraubendruckfeder-Prototypen für ein reales Anwendungsszenario. Hier wurden durch die Firmen des projektbegleitenden Ausschusses eine Anzahl von Federanwendungen eingebracht, aus denen nach einer initialen Bewertung (Machbarkeit, Relevanz hinsichtlich Materialanforderungen und Projektthema „korrosive Medien + Hochtemperatur“) ein favorisiertes Anwendungsbeispiel ausgewählt wurde. Dieses besteht aus einem Federelement für von der Firma CeraSystem hergestellte Hochtemperatur-Prozess-Armaturen, welches im Einsatz korrosiven Medien und hohen Temperaturen jenseits von 600°C ausgesetzt ist. Für dieses Anwendungsszenario kommen nur keramische Federelemente in Betracht.

Innerhalb der praktischen Prototypen-Entwicklungsphase des Projektes wurde über mehrere Iterationsstufen auf Basis der praktischen Erfahrungen das Design der Feder angepasst und wertvolle Erkenntnisse für den Auslegungsprozess erarbeitet. Dafür erwiesen sich insbesondere die Modellwerkzeuge zur Feindimensionierung hilfreich, mit deren Hilfe es gelang die Federendgestaltung hinsichtlich der Stabilität der Lasteinleitung deutlich zu verbessern. Anfängliche Probleme bei der Belastbarkeit der Federn konnten mit den Auslegungstools auf Grundlage der Zuverlässigkeitsanalyse mit der Qualität der Oberflächenbearbeitung der axialen Windungsflächen korreliert werden und durch Anpassungen im Design und in der Bearbeitungstechnologie abgestellt werden. Im Ergebnis der Projektarbeit wurde eine Charge funktionsfähiger Schraubendruckfeder-Elemente hergestellt, deren Eigenschaften den Zielspezifikationen entsprechen und die auch den zyklischen Tests bei 1000°C unter der geforderten Last standhielten.