

# Schlussbericht - KavErm

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 17/10

## Thema

Bewertung des Ermüdungsverhaltens von PVD-Beschichtungen mittels schwingungsinduzierter Kavitation Kavitationsermüdung – KavErm

## Berichtszeitraum

01.05.2021 - 30.04.2024

## Forschungsvereinigung

Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung: Technische Universität Darmstadt, MPA-IfW Darmstadt  
Zentrum für Konstruktionswerkstoffe  
Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt  
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde  
Grafenstraße 2  
64283 Darmstadt

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **Danksagung**

Das IGF-Vorhaben **17/10** der Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. (EFDS) zu

Thema:

**„Bewertung des Ermüdungsverhaltens von PVD-Beschichtungen mittels schwingungsinduzierter Kavitation Kavitationsermüdung – KavErm“**

wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt.

Auch für die Unterstützung der EFDS sei gedankt.

Weiterhin danken wir den im projektbegleitenden Ausschuss vertretenen Unternehmen für ihre fachliche Unterstützung.

## Inhalt

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung .....	1
Forschungseinrichtung(en).....	1
Zusammenfassung des Forschungsvorhabens .....	4
Einleitung .....	6
Ausgangssituation .....	6
Wissenschaftliche Problemstellung.....	8
Zielsetzung des Projekts.....	8
Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum .....	11
Arbeitspaket 1: Bereitstellung von Probenmaterial und Herstellung beschichteter Proben ...	11
Arbeitspaket 2.0 u. 2.1: Qualifizierung I – Entwicklung geeigneter Parameterfelder und Bewertung der Wechselwirkung über differenzierte Ableitung des mechanistischen Verständnisses .....	13
Arbeitspaket 2.2: Qualifizierung II – Untersuchungen an konturierten/gekrümmten Oberflächen .....	21
Arbeitspaket 2.3 u. 2.4: Qualifizierung II – Ermittlung der Schädigung in Abhängigkeit der Beanspruchung (Viskosität, Korrosion).....	25
Arbeitspaket 2.4: Analyse der Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen zur Bestimmung der ortsaufgelösten Kavitationsereignisse.....	29
Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten .....	38
Verwendung der Zuwendung.....	38
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	38
Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	39
Literaturverzeichnis .....	42

## Zusammenfassung des Forschungsvorhabens

Als ein wesentliches Arbeitsergebnis des Projekts „KavErm“ gelang die Entwicklung einer Prüfmethode zur flächigen Prüfung von etwaigen Schichtdefekten mittels Kavitation. Im Vergleich zu lokalen Verfahren, wie beispielsweise dem sogenannten „Scratch Test“ (Ritzprüfung), ist eine zuverlässigere Bewertung der Hafteigenschaften und Identifikation von Fehlstellen in der Anbindung von Substrat und Schicht möglich. Neben konstruktiven Anpassungen des Versuchsaufbaus (Ultraschallkoppelschwinger) wurde die Prüfmethode umfassend validiert:

- Variation der Probengeometrie
- Direkt vs. Indirekte Kavitationsbeanspruchung
- Einfluss der Beanspruchungsdauer
- Einfluss der viskosen Eigenschaft des Mediums auf die Kavitationswirkung
- Einbezug von gekrümmten, bauteilähnlichen Oberflächen für den Praxistransfer.

Zu Beginn des Projekts wurden vom projektbegleitenden Ausschuss ebene Proben bereitgestellt und beschichtet, die unterschiedliche Haftungseigenschaften aufwiesen. Die Haftung der Beschichtungen wurde zunächst in Anlehnung an die Norm ASTM G32-16 untersucht. Anschließend erfolgte eine gezielte Einführung von Vorschädigungen in die Proben, um den Einfluss der Kavitation unter definierten Bedingungen beurteilen zu können. Die Untersuchung der Auswirkungen von Kavitationserosion auf funktionelle Oberflächen hat gezeigt, dass die Schichtmikrostruktur und -eigenschaften durch die Ermüdungsbeanspruchung sowohl bei direkter als auch bei indirekter Methode signifikant beeinflusst werden. Die Analyse der Schädigungsmechanismen verdeutlicht, dass diese maßgeblich zur Veränderung der Haftungseigenschaften der Beschichtungen beitragen.

Die erzielten Ergebnisse bieten wichtige Ansätze zur Qualitätssicherung für Beschichter und Anwender, insbesondere zur Optimierung von Haftungseigenschaften und Schichtstabilität. Es konnte nachgewiesen werden, dass Veränderungen in der Schichtstruktur sowie das Vorhandensein von Defekten – beispielsweise bedingt durch Reinigung, den Einsatz von Haftvermittlern oder Substratfehler – das morphologische Schädigungsbild unter Kavitationsermüdung erheblich beeinflussen. Dies wirft die Frage auf, ob flächige Untersuchungsmethoden ausreichend sind, um die Auswirkungen solcher Defekte oder Schwächen in der Substratpräparation präzise zu erfassen.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchungen betraf die simultane Korrosionsbeanspruchung durch das umgebende Medium, wie sie in der Praxis häufig vorkommt. Hier wurde festgestellt, dass Korrosion das Ermüdungsverhalten der Beschichtungen signifikant verschlechtern kann.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss der Kavitation auf verschiedene Probengeometrien untersucht, dafür wurden ebenfalls vom projektbegleitenden Ausschuss Proben zur Verfügung gestellt. Dabei wurden eine gerade Hornprobe und eine gekrümmte Probe verwendet. Die Ergebnisse belegen eine unterschiedliche Kavitationsintensität infolge des variablen Abstands zwischen der gekrümmten Probe und der Sonotrode. Daher ist es nicht möglich, mithilfe der Norm ASTM G32-16 komplexe Bauteile – wie zum Beispiel den Kugelsitz eines Common-Rail-Injektors (siehe Abbildung 1) – unter realitätsnahen Bedingungen zu prüfen.

Im Verlauf der Untersuchungen stellte sich heraus, dass eine geometrische Modifikation des Sonotrodenkopfes nicht erforderlich ist. Stattdessen konnte die Lokalisierung der Kavitation durch die gezielte Veränderung der Viskosität des Mediums erfolgreich gesteuert werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen deutlich, dass mit zunehmender Viskosität des Mediums die Kavitationsblasen lokal konzentrierter auftreten. Dieses Ergebnis konnte sowohl qualitativ als auch quantitativ nachgewiesen werden.

Besonderes Augenmerk wurde auf die gezielte Steuerung der Kavitationserosion gelegt, um eine anwendungsrelevante Abbildung flächiger Haftungseigenschaften zu ermöglichen. Zur quantitativen Auswertung wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Die Auswertung von diesen Aufnahmen bestätigt einen Zusammenhang zwischen dem Blasenbildungsmechanismus und der Beanspruchungsintensität in Abhängigkeit der Viskosität, der sich durch Parameter wie Massenverlust oder Erosionstiefe beschreiben lässt.

## Einleitung

### Ausgangssituation

Die Oberflächen von strömungsbeaufschlagten Bauteilen und Komponenten sind oftmals hohen Belastungen ausgesetzt, die durch Kavitation und erosive Beanspruchung verursacht werden. Diese Belastungen führen zu einer fortwährenden Degradation der funktionalen Oberflächen, die in vielen Anwendungen wie beispielsweise Lagerkomponenten, Ventilen (Düsennadelspitzen), Kraftstoffeinspritzungen, Hydraulik- und Pneumatik-Komponenten, Kompressoren und Schiffsschrauben auftreten, siehe Abbildung 1. Als besonders kritisch zu bewerten ist die Kavitation, die durch den fortwährenden Zerfall von Gasblasen entsteht. Sie verursacht eine Ermüdungsbeanspruchung, die die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit dieser Bauteile erheblich beeinträchtigt [1].

Kavitation tritt auf, wenn der hydrostatische Druck in einer Flüssigkeit unter den Dampfdruck des Mediums abgesenkt wird oder durch Temperaturerhöhung bei konstantem Druck eine Blasenbildung erfolgt. Wenn der hydrostatische Druck unterhalb des Partialdrucks der in der Flüssigkeit gelösten Gase liegt, kommt es zur Bildung von Blasen in der Dampfphase, was als Pseudokavitation bezeichnet wird. Diese Blasen entstehen an Kavitationskeimen wie gelösten Gasen oder kleinen Partikeln in der Flüssigkeit und implodieren, was zu einer hohen lokalen Ermüdungsbeanspruchung der Oberfläche führt [2,3]. Die Implosion der Kavitationsblasen führt zu einer Materialermüdung, die durch die entstehenden Schockwellen und Mikrojets verursacht wird [4]. Diese Phänomene führen zu einer fortschreitenden Materialdegradation, die durch korrosive Komplexbeanspruchungen beschleunigt werden kann [5,6]. Druckschwankungen in strömenden oder schwingenden Flüssigkeiten verstärken diesen Effekt, indem sie ein Wechselladungsfeld an der Grenzfläche zwischen Bauteil und Flüssigkeit erzeugen. Zusätzlich kommt es zu einer Geräuschentwicklung. Es entstehen Strömungsinstabilitäten und Vibrationen. Die Effizienz, der Wirkungsgrad und die Lebensdauer der Bauteile wird reduziert [7].

Um das Risiko von Kavitationsschäden zu verringern, müssen, neben konstruktiven Anpassungen der Bauteile, auch werkstofftechnische Aspekte als Bewertungskriterien berücksichtigt werden. Dabei ist es wichtig, die Veränderungen der Oberflächenfeinstruktur im Hinblick auf den Blasenbildungsmechanismus und die Ermüdungsbeanspruchung zu analysieren. Mit Hilfe der physikalischen Gasphasenabscheidung (PVD) oder der chemischen Gasphasenabscheidung (CVD) können kavitationserosionsbeständige Oberflächen hergestellt werden, die für hochbeanspruchte Funktionsbauteile verwendet werden [7,8].

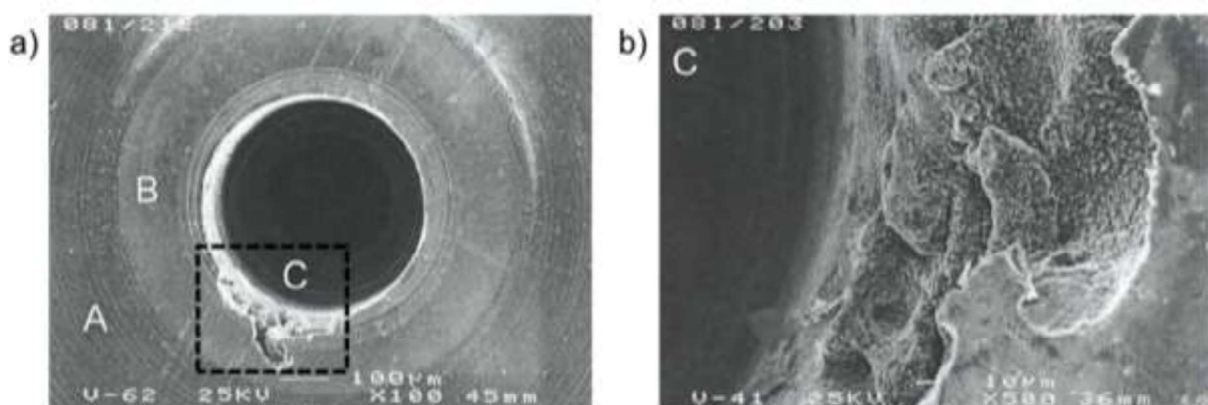
Um die Oberflächen von Bauteilen kavitationsresistenter zu gestalten, müssen die hervorgerufenen Mechanismen, welche die Ermüdungsbeanspruchbarkeit der Oberfläche/Beschichtung beeinflussen, verstanden werden. Ein Fokus liegt auf den anwendungsrelevanten Haftungseigenschaften der unterschiedlichen Beschichtungen. Besonders an der Grenzfläche zwischen Beschichtung und Grundwerkstoff tritt bevorzugt Versagen auf, was die Notwendigkeit betont, die Haftungseigenschaften zu verbessern und eine verlässliche Prüftechnik zu entwickeln, die diese Eigenschaften unter realen Betriebsbedingungen bewerten kann.

Die bisher etablierten Prüfmethode, wie zum Beispiel nach der Norm ASTM G32-16 [9], sind auf ebene Oberflächen beschränkt und können die Beanspruchung an komplexen Geometrien nicht adäquat abbilden. Die Norm ASTM G32-16 beschreibt die Kavitationserosionsprüfung mittels eines sogenannten Ultraschallkoppelschwingers, bei der die Materialoberfläche durch akustische Kavitation ermüdet wird. Dabei werden die durch das Horn induzierten Schwingungen durch das umgebene Medium auf die Probe übertragen, wodurch ein Wechseldruckfeld entsteht, das die Kavitation verursacht.

Die Verbesserung der Prüfmethode ist daher von hoher Relevanz und umfasst vor allem die Prüfung komplexer Geometrien und funktionstragender Oberflächenbereiche. Besonders wichtig ist es, die Haftungseigenschaften der Beschichtungen unter den skizzierten Bedingungen zu überprüfen. Diese nähern das Beanspruchungskollektiv realer Betriebsbedingungen an und ermöglichen dadurch eine verlässliche Aussage über die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Bauteile.

Zusätzlich zu den geometrischen Herausforderungen bei der Beschichtung und Prüfung besteht auch die Notwendigkeit, die Schichtdicke und die Übergänge zwischen unterschiedlichen Schichtlagen zu kontrollieren. Diese Übergänge beeinflussen die Mikrostruktur der Beschichtung und können zu Schwachstellen führen, die die Haftung und die Ermüdungsbeanspruchbarkeit der Beschichtung negativ beeinflussen. Daher müssen die Prozessparameter bei der Herstellung der Beschichtungen sorgfältig optimiert werden, um eine gleichmäßige und dauerhafte Haftung zu gewährleisten.

Es ist notwendig, die Prüftechniken weiterzuentwickeln und anzupassen, um eine realitätsnahe Bewertung der Haftungseigenschaften und der Ermüdungsbeanspruchung der Beschichtungen zu ermöglichen. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie, um die Anforderungen der Praxis zu berücksichtigen und die Prüfmethode entsprechend zu standardisieren. Nur durch die Entwicklung neuer und verbesserter Prüftechniken kann die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Bauteile erhöht und die Effizienz der Anwendungen gesteigert werden.



**Abbildung 1 : a) REM-Aufnahme (Draufsicht) eines Kugelsitzes eines Common Rail Injektors (Position A: Unveränderte Oberfläche, Position B: Ventilsitz der Kugel, Position C: Kante des Pre-Holes); b) Materialabtrag an der Kante aufgrund von Kavitationserosion [10]**