

Abschlusszusammenfassung zum Forschungsprojekt IGF 20412 N  
Korrosionsschutz zyklisch

**Projektdaten:**

Projekttitel:	Ermüdungsverhalten zyklisch beanspruchter Schrauben mit Zinkbasiertem Korrosionsschutz
Projektnummer:	IGF 20412 N
Laufzeit:	01.11.2018 - 30.04.2022
Berichtszeitraum:	01.11.2018 - 30.04.2022
Gesamtmittel Euro:	313.110,92 €
Forschungseinrichtung(en):	Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde Technische Universität Darmstadt Grafenstr. 2 64283 Darmstadt

Leiter der Forschungseinrichtung:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Sachbearbeiter:	Dr.-Ing. Fabian Kraemer Tel. 06151 16 25346

**Inhaltsverzeichnis**

	Seite
1 Thema	1
2 Problemstellung	1
3 Ziele	2
4 Vorgehensweise	2
5 Ergebnisse	2
6 Praktischer Nutzen/Wirtschaftlichkeit	4
7 Umsetzung und Ergebnistransfer	5
8 Dokumentation	6

**Kurzfassung**

**1. Thema**

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde das Ermüdungsverhalten von Schraubenverbindungen hinsichtlich des Schmierstoff- und Beschichtungseinflusses auf Basis experimenteller Untersuchungen, unterstützt von numerischen Berechnungen, analysiert.

**2. Problemstellung**

Aktuell angewandte Regelwerke, wie beispielsweise die VDI-Richtlinie 2230, berücksichtigen keinen Schmierstoff- und Oberflächeneinfluss in der Auslegung der Ermüdungsfestigkeit. Ausnahme stellt die Feuerverzinkung dar, die über eine Abminderung von -20 % Berücksichtigung findet. Die Berechnung erfolgt ausschließlich auf Basis des Nenndurchmessers. Die praxisrelevanten galvanischen Korrosionsschutzsysteme und die nicht-elektrolytischen

erzeugten Zinklamellensysteme zeigen hingegen ebenfalls einen Einfluss auf die Ermüdungsbeanspruchbarkeit (KREMER, WEBER, SIMONSEN, u.a.). Das Schmierstoffe, die den Einfluss der aus dem Schichtsystem hervorgeht überlagern, die Lebensdauer ebenfalls beeinflussen, findet keinerlei Berücksichtigung. Schraubenverbindungen bilden infolge der funktionsbedingten Gestaltung, der Lasteinleitung über Kontaktflächen und der daraus resultierenden Lastverteilung eine hochkomplexe Beanspruchungssituation ab. Die Fragestellung beinhaltet daher eine differenzierte Betrachtungsweise, in der Form, dass eine isolierte Bewertung des Oberflächeneinflusses, wie auch eine Bewertung des komplexen Systems Schraube-Mutter-Verbindung mit Schmierstoff- und Oberflächeneinfluss möglich sein soll.

### 3. Ziele

Ziel des Forschungsvorhabens war es, das Ermüdungsverhalten in Abhängigkeit der Auswahl des Oberflächensystems in Bezug auf die einsetzende Schädigung durch Anriss und das Lebensdauerende durch Bruch zu beschreiben.

### 4. Vorgehensweise

Das Bearbeitungskonzept unterteilt die Fragestellung in drei Schwerpunkte. Zunächst wurde in einem ersten Schwerpunkt (Kapitel 3) der „Schmierstoffeinfluss“ auf das Ermüdungsverhalten für einen ausgewählten Basecoat in sieben unterschiedlichen Schmierzuständen untersucht. In einem zweiten Schwerpunkt (Kapitel 5) wurde der „Oberflächeneinfluss“ an Kerbproben für sieben unterschiedliche Korrosionsschutzsysteme bewertet. Die Kerbprobe, die eine umlaufend ohne Gewindesteigung hergestellte und schlussvergütete Kerbe kennzeichnet, ermöglicht eine isolierte Bewertung des Schichteinflusses auf die Ermüdungsfestigkeit. In einem dritten Schwerpunkt (Kapitel 6) wurden die Erkenntnisse der ersten beiden Schwerpunkte zusammengeführt und das komplexe System durch Versuche an ungeschmierten und mit MoS<sub>2</sub>-Fett geschmierten Schraube-Mutter-Verbindungen in Bezug auf den „Oberflächen- und Schmierstoffeinfluss“ bewertet. Eine Übersicht des Bearbeitungskonzepts und den drei Untersuchungsschwerpunkten zeigt **Abbildung 1**.

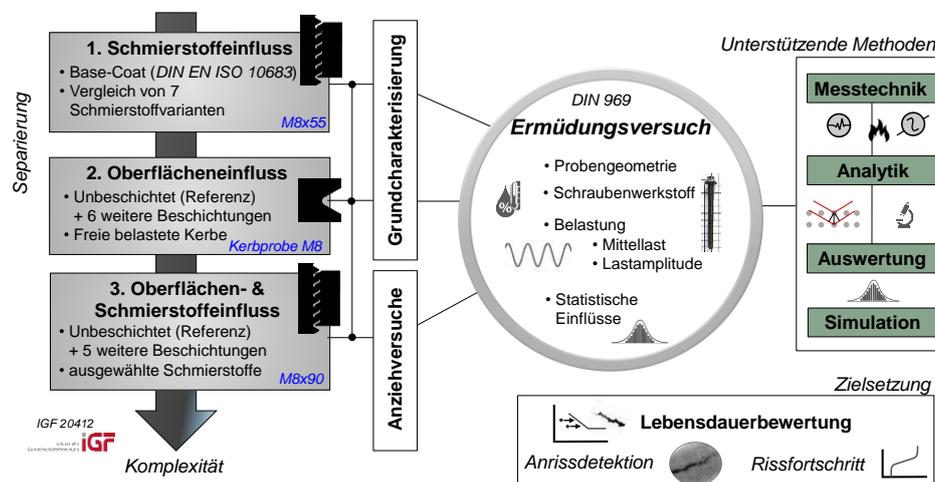


Abbildung 1: Bearbeitungskonzept und Untersuchungsschwerpunkte

### 5. Ergebnisse

Basierend auf experimentellen und numerischen Untersuchungen wurden die Ermüdungseigenschaften, durch die Bestimmung des Anrisszeitpunktes und dem Rissfortschritt bis zum Versagen durch Bruch, für anwendungsbezogen ausgewählte Beschichtungssysteme bewertet. Unter einstufigen Belastungen wurden an Kerbproben und Schrauben der Abmessung M8, ausgeführt in der Festigkeitsklasse 10.9 nach DIN EN ISO 898-1, umfangreiche experimentelle Untersuchungen in Form des axialen Schwingversuches nach DIN 969

durchgeführt. Die zu bewertenden Beschichtungssysteme bilden galvanische Zink- und Zink-Nickeloberflächen nach DIN EN ISO 4042, nicht-elektrolytisch aufgetragene Zinklamellenüberzüge nach DIN EN ISO 10683, und eine Zn-phosphatiert geölte Beschichtung. Die Referenz bildet eine blank vergütete, unbeschichtete Oberfläche. Ein weiteres untersuchtes System stellt die Variante  $\delta$ -Ferrit dar, bei der phosphatiert vergütete Bauteile untersucht wurden. Für alle Varianten wurden die mechanischen Eigenschaften der beschichteten Bauteile mithilfe der Methoden der Werkstoffanalytik bestimmt. Ein Fokus lag auf den Veränderungen des Randbereiches infolge des Beschichtungsprozesses und der Ausführung des Beschichtungssystems. Da Schraubenverbindungen in der Regel mithilfe von Schmierstoffen eingesetzt werden, wurden die Beschichtungen sowohl trocken als auch geschmiert im Ermüdungsversuch bewertet. Für die Möglichkeit einer separierten Betrachtung des Einflusses der Korrosionsschutzschicht und der Schmierung auf das Ermüdungsverhalten wurde zunächst an einer Schraube M8x55-8.8 ein Basecoat exemplarisch gewählt und mit sieben ausgewählten Schmierstoffsystemen bewertet. Diese bilden Öle, Fette, Gleitlacke und in die Beschichtung integrierte Schmierung. Zur Eingangscharakterisierung wurden für die ausgewählten Varianten im Drehmoment/Vorspannkraft-Versuch nach DIN EN ISO 16047 Gewindereibungszahlen bestimmt. Diese liegen in einem Bereich von  $\mu_{th} = 0,085$  (Versiegelung) bis  $\mu_{th} = 0,200$  (ohne Schmierung). Die Schmierung im Gewindekontakt beeinflusst die Lebensdauer wie auch die Beanspruchbarkeit signifikant. Unabhängig von der Art des Schmierstoffsystems konnten durch Schmierung die Lebensdauer und die Beanspruchbarkeit gegenüber der ungeschmierten Schraubenverbindung erhöht werden. Eine niedrige Gewindereibung reduziert die lokale Beanspruchung der Schraube und verschiebt den Anrisszeitpunkt zu höheren Lastspielzahlen. Durch die Gewindeschmierung wird ein Wechselgleiten zwischen Schrauben- und Muttergewinde vereinfacht. Diese Relativbewegung wird durch die aus der wechselnden axialen Betriebslast resultierenden Radialkraft auf die Gewindeflanken erzwungen. Wird das Wechselgleiten durch gleichbleibende Schmierungseigenschaften unter ermüdender Last kontinuierlich ermöglicht, kann die lokale Schraubenbeanspruchung reduziert und der Anrisszeitpunkt verschoben werden. Für die experimentelle Bewertung der Anrisszeitpunkte wurde eine Methode mittels Frequenzanalyse entwickelt. Aufgrund der Schwingungseigenschaften des Prüfsystems kann eine Zunahme der Nachgiebigkeit, die mit sich bildendem Anriss und zunehmendem Rissfortschritt eintritt, einem Frequenzabfall zugeordnet werden. Über die entwickelte Analysemethode konnte für eine kritische Frequenzänderungsrate eine reproduzierbar gleichgroße bereits geschädigte Fläche für ein hier beispielhaft betrachtetes Belastungsniveau nachgewiesen werden. Die Unterschiede der ermittelten Anrisszeitpunkte reichen nicht aus, um die unterschiedlichen Lebensdauern zu begründen. Flüssigschmierung beeinflusst durch die Mobilitätseigenschaften des Schmiermittels das Rissfortschrittsverhalten und führt hier zu den längsten Lebensdauern und der größten Beanspruchbarkeit. Durch eine hohe Kriechfähigkeit des Öls, setzt sich bei Rissinitiierung das Schmieröl durch Kapillarwirkung an die Rissfront und verlangsamt den Rissfortschritt. Zugrundeliegende Mechanismen stellen beispielsweise Risssschließeffekte, die dämpfende Wirkung des Öls und die dadurch für den Rissfortschritt beeinflusste lokale Beanspruchung des Schwellenwertes dar.

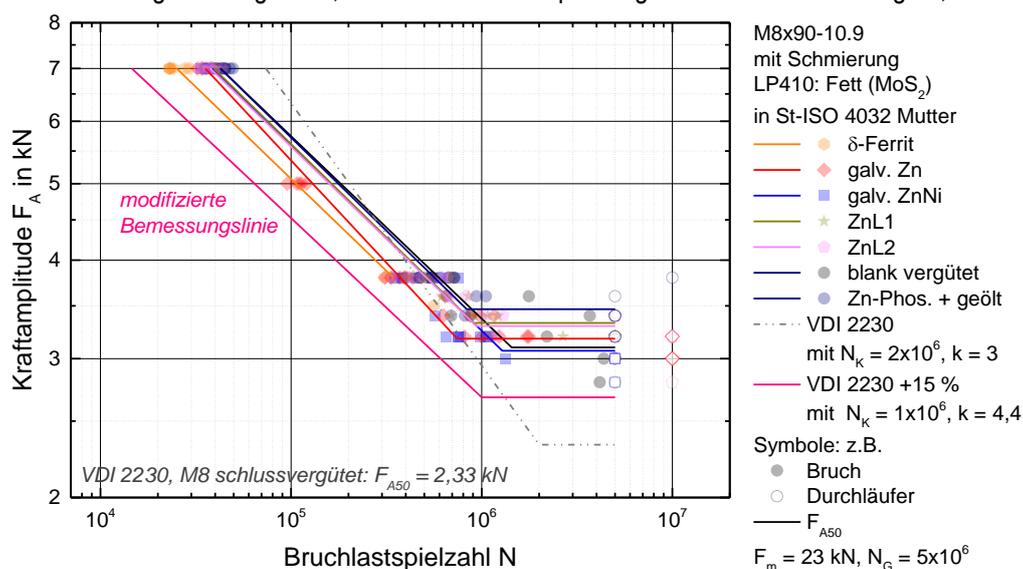
Basierend auf den Erkenntnissen des Schmierstoffeinfluss wurden die sieben ausgewählten Beschichtungssysteme zunächst ungeschmiert geprüft. Mithilfe der Kerbproben ist es möglich, das Ermüdungsversagen ausschließlich auf die Eigenschaften der Beschichtung und den möglichen randnahen Veränderungen aus Beschichtungsprozesses zu bewerten. In der Zeitfestigkeit ist die Abminderung der Lebensdauer lastunabhängig ca. -40 % für galvanische und Zinklamellenoberflächen gegenüber der unbeschichteten Referenz „blank vergütet“. Im Übergangsbereich ist die Beanspruchbarkeit max. 8 % reduziert. Bei der Schraubenverbindung, die im Ermüdungsversuch aus der Paarung M8x90-10.9 und Standardmutter nach DIN EN ISO 4032 (M8-10) besteht, überlagern durch die Lastübertragung mittels Kontakt die schraubenspezifischen Besonderheiten den Einfluss des Beschichtungssystems. Die Lastverteilung, die Lasteinleitungsbedingungen in der Kontaktfläche und die hohe Kerbwirkung sind die Lebensdauer bestimmenden Faktoren. Da die Beschichtungseigenschaften in Form der Härte, der Elastizität, der Oberflächenrauigkeit und durch den vorliegenden Reibungskoeffizienten im Gewinde das Kontaktverhalten bestimmen, wird die lokale Beanspruchung in der Schraube und dadurch der Zeitpunkt einsetzenden Schädigung durch Anriss beeinflusst. Es

werden ausgeprägte und lastabhängige Unterschiede in der Lebensdauer festgestellt, von ca. -15 % bei 7 kN bis ca. -60% bei 3,8 kN Lastamplitude. Je kleiner die Lastamplitude desto besser ist die Beanspruchbarkeit für nicht-elektrolytisch erzeugte Oberflächen gegenüber galvanischen Beschichtungen. Abhängig vom Beschichtungssystem können die Zeitfestigkeitsgeraden gruppiert werden ( $k = 2,6$  für galv.,  $k = 3,2$  für ZnL,  $k = 4,1$  für blank). Im Übergangsgebiet ist Beanspruchbarkeit ebenfalls ca. max. -8 % reduziert. Die Variante  $\delta$ -Ferrit, mit interkristallinem Ausgangsrissnetzwerk infolge der Phosphordiffusion zeigt die geringste Beanspruchbarkeit. Dem folgen die galvanischen Beschichtungen mit hohen Gewindereibungszahlen (ungeschmiert). Die nicht-elektrolytisch Zinklamellensysteme haben spätere Anrisszeitpunkte, bei identischem Rissfortschritt. Höhere Lebensdauern erzielen die unbeschichtete Referenz und die Zn-phosphatiert geölte Schraube.

Durch Schmierung des Gewindes, kann der Einfluss aus dem Beschichtungssystem in der Zeitfestigkeit reduziert und im Übergangsgebiet sogar positiv genutzt werden. In der Zeitfestigkeit ergeben sich durch Schmierung annähernd identische Steigungen ( $k \approx 4,3$ ) der Zeitfestigkeitsgerade im Wöhlerschaubild, bei geringfügig reduzierter Lebensdauer gegenüber unbeschichteten Schrauben. Die dauerhaft ertragbare Beanspruchbarkeit kann durch Schmierung angehoben werden, sogar über das Niveau von unbeschichteten Schrauben. Beschichtete Schrauben, insbesondere Zinklamellensysteme können den Schmierstoff (hier:  $\text{MoS}_2$ -Fett) aufnehmen und auch bei zyklischer Belastung die Kontaktbedingungen aufrechterhalten. Eine in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2230 modifizierte Wöhlerlinie ermöglicht eine konservative Auslegung der Zeitfestigkeit und eine verbesserte Ausnutzung im Bereich der dauerhaft ertragbaren Beanspruchbarkeit.

## 6. Praktischer Nutzen/ Wirtschaftlichkeit

In diesem Forschungsvorhaben wurden sehr umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die sowohl den Schmierungseinfluss wie auch den Einfluss des Oberflächensystems auf die Ermüdungsbeanspruchbarkeit untersuchten. Insgesamt wurden 887 Einzelversuche im axialen Schwingversuch nach DIN 969 durchgeführt. Die an ISO-metrischen M8-Schrauben genierten Versuchsergebnisse zeigen, dass durch Anwendung der etablierten Bemessungsrichtlinie VDI 2230 für die dauerhafte Beanspruchbarkeit eine sehr konservative Abschätzung erfolgt. Die Zeitfestigkeit wird unabhängig von aufgetragener Gewindeschmierung und dem gewählten Beschichtungssystem durchgängig überschätzt. Dieses Phänomen stellt nicht nur bei der Bemusterung von Neuteilen, sondern grundsätzlich für den Festigkeitsnachweis die industriellen Anwender vor das Problem, dass die Forderung nach VDI 2230 nicht erfüllt werden kann. Um eine konservative Abschätzung und dennoch eine möglichst hohe Ausnutzung der Schraubenbeanspruchbarkeit zu ermöglichen, wird hier ein modifizierte Bemessungslinie abgeleitet, die aus den hier empirisch gewonnen Daten hervorgeht, **Abbildung 2**.



**Abbildung 2:** Versuchsergebnisse M8 mit Schmierung und modifizierte Bemessungslinie

Da  $\delta$ -Ferrit als unerwünschter Randeffect in der praktischen Anwendung möglichst ausgeschlossen werden soll, wurde diese Variante zur Bestimmung der dauerhaft ertragbaren Beanspruchbarkeit ausgenommen. Anhand der mit MoS<sub>2</sub>-Fett geschmierten Versuche wurde die geringste Beanspruchbarkeit für die Variante „galv. ZnNi“ mit  $F_{A50} = 3,07$  kN abgeleitet. Die hier bestimmten Beanspruchbarkeiten liegen mindestens 30 % oberhalb der Forderung nach VDI 2230 von  $F_{A50} = 2,33$  kN für den Nenndurchmesser 8 mm. Die modifizierte Bemessungslinie (-) schreibt der nach VDI 2230 geforderten Ermüdungsfestigkeit durch Schmierung eine Verbesserung von 15 % zu. Die Reduzierung der beobachteten 30 % auf nur 15 % erfolgt für eine konservative Betrachtung und einer damit verbundenen Sicherheit in der Schraubenauslegung. Der Knickpunkt wird von  $N_K = 2$  Mio. Schwingspiele auf  $N_K = 1$  Mio. Schwingspiele verschoben. Dieser Wert entspricht der in der praktischen Anwendung üblichen Schwingspielzahl experimentell bestimmter Knickpunkte. Für eine konservative Abschätzung wird zudem die Steigung an die hier abgeleiteten Werte für k angepasst. Die Berechnung erfolgt mit  $k = 4,4$ . Die Übertragbarkeit auf weitere Schmierstoffe sowie andere Schraubenabmessungen (im Projekt exemplarisch für M12) wurde überprüft. Die modifizierte Auslegung ermöglicht eine sichere Abschätzung und zugleich die Möglichkeit Abmessungen zu verschlanken. Darüber hinaus ergibt sich Innovationspotential für die Entwicklung von Schmierstoffen und Beschichtungen, die gezielt die Anrisszeitpunkte verzögern und den Rissfortschritt verlängern.

## 7. Umsetzung und Ergebnistransfer

Tabelle1: Status - Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum
<b>Gepplante und durchgeführte Transfermaßnahmen gem. Antrag</b>			
Sitzung Information des Pro- jektbegleitenden Aus- schusses (PA)	Vorstellung und Diskussion des geplanten Forschungsvorhabens	MPA-IfW Darmstadt	Vorbesprechung 21.06.2018 1. PA
	Ergebnisbesprechung und weiteres Vorgehen	MPA-IfW Darmstadt	28.08.2019 2. PA
	Ergebnisbesprechung und weiteres Vorgehen	Web-Meeting per Zoom	01.12.2020 3.PA
		Web-Meeting per Zoom	18.03.2021 4.PA
		Web-Meeting per Zoom	02.12.2021 5. PA 19.10.2022
Fachtagungen	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	DVM Fachtagung, MSE Konferenz, DSV Fachtagung, VDI Fachkonferenzen DSV Informations- und Diskussionsveranstaltung	Termine offen  23. und 24.6.2021
Veröffentlichungen	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	Fachzeitschriften z.B. Materialwiss. & Werkstofftechnik, International Journal of Fatigue	Mind. 2, PM 18-24, PM 24-30
		MDPI applied sciences Materialwiss. Werkstofftech.	1/22 Wird veröffentlicht
Sitzungen des AK Gemeinschafts- forschung des DSV Fachkongresse/ Vorträge	Wissenstransfer in die Wirtschaft und Fachwelt	Sitzung des Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung in Hösbach	2x pro Jahr 25.03.2019 07.10.2019 23.03.2020 21.09.2020 19.04.2021 27.09.2021 04.04.2022 17.10.2022
Lehre	Wissenstransfer an Studierende	Bachelor- und Masterarbeiten	kontinuierlich
Forschungsreport	Zwischenberichte zum Forschungsprojekt	Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. FSV	Jährlich: Juli 2019 August 2020 2021
Homepage MPA-IfW	Zusammenfassung des Projektfortschritts	mpa-ifw.tu- darmstadt.de/forschung_mpaifw/projekte_mpa ifw	kontinuierlich

## 8. Dokumentation

Für das vorliegende Forschungsvorhaben wurden die Ergebnisse in Form von Zwischenberichten an die Forschungsvereinigung FSV jährlich dokumentiert. Die im Rahmen des Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung vorgestellten Zwischenergebnisse wurden zweimal pro Jahr in Form von Präsentationen an den Schraubenverband und deren Mitglieder kommuniziert. Vor dem Projektstart hat am 21.06.2018 ein Kick-Off Meeting stattgefunden. In der Laufzeit wurden insgesamt 4 PA-Sitzungen abgehalten sowie eine abschließende 5. PA-Sitzung nach Ende des Bewilligungszeitraumes. Alle Sitzungen wurden dokumentiert und protokolliert. Im Rahmen der 12. „Informations- und Diskussionsveranstaltung“ des Deutschen Schraubenverbands e.V. wurden die Ergebnisse gemeinsam mit einem PA-Teilnehmer großem Fachauditorium präsentiert. Die gewonnenen Forschungsergebnisse wurden in zwei Journals mit Peer-Review Verfahren veröffentlicht. Eines davon in englischer Sprache im Journal „Applied Sciences“, um eine internationale Reichweite in der Ergebniskommunikation zu erzielen. Die Abschlussveröffentlichung befindet sich in Produktion und erfolgt über den Wiley Verlag im Journal „Materialwissenschaft und Werkstofftechnik“.

Die ausführliche Dokumentation des Forschungsprojektes erfolgte in einem Abschlussbericht.

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20412 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

