
Betriebsfestigkeit von Schrauben großer Abmessungen unter Berücksichtigung von Randschichteinflüssen

Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde
Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Dr.-Ing. Jörg Beyer
Dipl.-Ing. Fabian Simonsen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Leibniz Universität Hannover
Institut für Stahlbau
Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Dipl.-Ing. Rasmus Eichstädt



Institut für Stahlbau
Leibniz Universität Hannover
Prof. Peter Schaumann

1 Einleitung

Schrauben großer Abmessungen der Größe M36 bis M64 werden bevorzugt in der Windenergie aber auch in anderen Bereichen in Form von HV-Garnituren [1] verwendet. Die in diesen Anwendungsgebieten eingesetzten Schrauben sind zyklisch wirkenden Beanspruchungen mit variablen Amplituden ausgesetzt. Der Korrosionsschutz der Verbindungselemente wird dabei oft durch eine Feuerverzinkung gewährleistet, die ein ökonomisches und langanhaltendes Korrosionsschutzsystem darstellt. Allerdings ist bekannt, dass eine Feuerverzinkung negativen Einfluss auf die zyklische Beanspruchbarkeit von Bauteilen aus Stahl hat [2–4].

Die Auslegung von feuerverzinkten HV-Schrauben gegen Werkstoffermüdung ist seit Ende 2014 nach VDI 2230 möglich [5]. Die nach der VDI 2230 abgeschätzte Dauerfestigkeit ist bei der Verwendung von feuerverzinkten HV-Schraubengarnituren um insgesamt 30 Prozent abzumindern. Die Abminderung setzt sich nach VDI 2230 aus einer 20 prozentigen Abminderung aufgrund der Feuerverzinkung und einer 10 prozentigen Abminderung aufgrund der HV-Ausführung zusammen.

Gemäß Eurocode 3 (DIN EN 1993-1-9) [6], der für den Baubereich maßgeblich ist, werden axialbeanspruchte HV-Schraubengarnituren dem Kerbfall 50 zugeordnet. Eine Berücksichtigung des Randschichtzustandes ist im Eurocode 3 bisher nicht vorgesehen.

Die „Guideline for the Certification of Wind Turbines“ des Germanischen Lloyds [7] empfiehlt auf Basis des Eurocodes für schwarze HV Garnituren den Kerbfall 71 und für eine feuerver-

zinkte Ausführung den Kerbfall 50. Damit ist dem technischen Anwender eine Möglichkeit gegeben, bei der Auslegung von Schrauben auf Basis des Eurocode 3 zwischen einer feuerverzinkten und einer unbeschichteten Ausführung zu differenzieren.

In [4] werden die Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen zum Einfluss einer Normaltemperaturfeuerverzinkung auf das Ermüdungsverhalten von Baustahl vorgestellt. Dabei wird ein Überspringen von Schwindungsrissen in den δ_1 - und ζ -Phasen in den Grundwerkstoff als Ursache einer verfrühten Ermüdungsrissinitiierung und damit der negativen Wirkung der Normaltemperaturfeuerverzinkung auf die zyklische Beanspruchbarkeit des Stahls beschrieben (Bild 1).

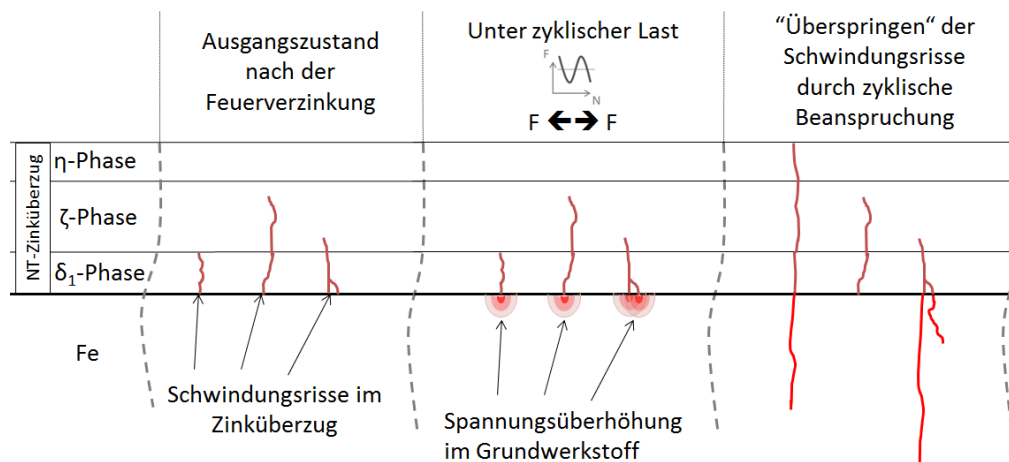


Bild 1: Ermüdungsrissinitiierung bei NT-feuerverzinkten Bauteilen [4]

Der beschriebene Schadensmechanismus kann aktuell noch nicht bezüglich der Bewertung der Betriebsfestigkeit großer Schrauben angewendet werden. Eine experimentell abgesicherte Bewertungsmethode, die eine sichere Abschätzung der Betriebsfestigkeit feuerverzinkter, großer Schrauben ermöglicht, ist nicht bekannt.

Das Ziel des hier vorgestellten Forschungsvorhabens ist somit die Entwicklung einer experimentell abgesicherten Bewertungsmethode der Betriebsfestigkeit von großen Schrauben unter Berücksichtigung des Einflusses der Feuerverzinkung.

Dabei wird zunächst die Auswirkung einer Normaltemperaturfeuerverzinkung und einer Hochtemperaturfeuerverzinkung auf die zyklische Beanspruchbarkeit von Kerbproben mit eingerollter Einzelkerbe sowie M36 HV-Schraubengarnituren der Festigkeitsklasse 10.9. untersucht. Auf Basis der Schwingversuche und des Materialmodells des Schraubenwerkstoffs wird aufbauend auf dem Kerbdehnungskonzept ein Bemessungsmodell zur Berechnung der Lebensdauer von Schraubengarnituren erstellt. Die Wirkung der Zinküberzüge soll über das Modell der dünnen Randschichten [8] abgebildet werden. Der negative Einfluss der Zinküberzüge wird dabei über eine Aufprägung einer virtuellen Eigendehnung simuliert. Das Mo-

dell wird anhand experimenteller Untersuchungen an großen HV-Garnituren verifiziert. Diese umfassen neben den Schwingversuchen mit konstanten Amplituden an Schraubengarnituren M36 auch Betriebslastversuche mit variablen Amplituden an Schrauben M36 sowie weitere Schwingversuche mit konstanten Amplituden an sehr großen Schraubengarnituren M64.

2 Einfluss der Feuerverzinkung auf die zyklische Beanspruchbarkeit

Aus der Literatur und Normung geht hervor, dass die Feuerverzinkung die Dauerfestigkeit von Schrauben negativ beeinflusst. Neue Forschungsarbeiten beschreiben den zugrundeliegenden Schadensmechanismus [4]. Zur Erstellung eines Bewertungsmodells wird zunächst der Einfluss der Feuerverzinkung an Kerbproben und M36 HV-Schraubengarnituren erfasst.

2.1 Grundcharakterisierung

Die isolierte Wirkung eines Normaltemperaturzinküberzugs- und eines Hochtemperaturzinküberzugs auf die zyklische Beanspruchbarkeit wird durch vergleichende Wöhlerversuche an Proben aus hochfestem Stahl 32CrB4 mit einer eingerollten Kerbe untersucht (Bild 2, links). Bei den Kerbproben wurde die Festigkeitsklasse 10.9 nach DIN EN ISO 898-1 [9] eingestellt. Da die Ergebnisse der freien belasteten Einzelkerbe nicht ohne weiteres auf eine HV-Schraubengarnitur übertragbar sind, werden auch feuerverzinkte M36 HV-Schraubengarnituren (DIN EN 14399 [1]) der Festigkeitsklasse 10.9 aus dem gleichen Material im Schwingversuch geprüft (Bild 2, rechts).

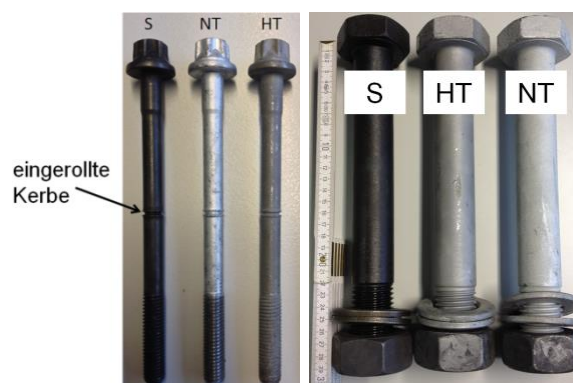


Bild 2: Ausgangszustand der Kerbproben und HV-Schraubengarnituren in den Zuständen Schwarz (S), Normaltemperaturfeuerverzinkt (NT) und Hochtemperaturfeuerverzinkt (HT)

Die Kerbproben und die Schraubengarnituren werden jeweils im vergütungsschwarzen Anlieferungszustand (S), normaltemperaturfeuerverzinkt (NT-feuerverzinkt) und hochtemperaturfeuerverzinkt (HT-feuerverzinkt) untersucht. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die Hochtemperaturfeuerverzinkung für Schrauben der Größe M36 aufgrund der Gefahr einer flüssigmetallinduzierten Rissbildung (Liquid Metal Assisted Cracking – LMAC)

nach der DSV-GAV Richtlinie für feuerverzinkte Schrauben [10] nicht zulässig ist. Der technische Einsatz der HT-Feuerverzinkung ist aktuell auf Schrauben $\leq M24$ beschränkt.

Der oberflächennahe Bereich der schwarzen, NT- und HT-feuerverzinkten M36 HV-Garnituren im Bereich des eingerollten Gewinde ist in Bild 3 dargestellt. Ersichtlich wird bei den schwarzen Schrauben eine leichte Randoxidation. Die NT-Feuerverzinkung zeigt einen typischen 3-phasigen Aufbau. Die HT-Feuerverzinkung besteht komplett aus der durchlegierten δ_1 -Phase. Sowohl bei den NT-feuerverzinkten als auch bei den HT-feuerverzinkten Schrauben lassen sich im Zinküberzug Schwindungsrisse [11] nachweisen.

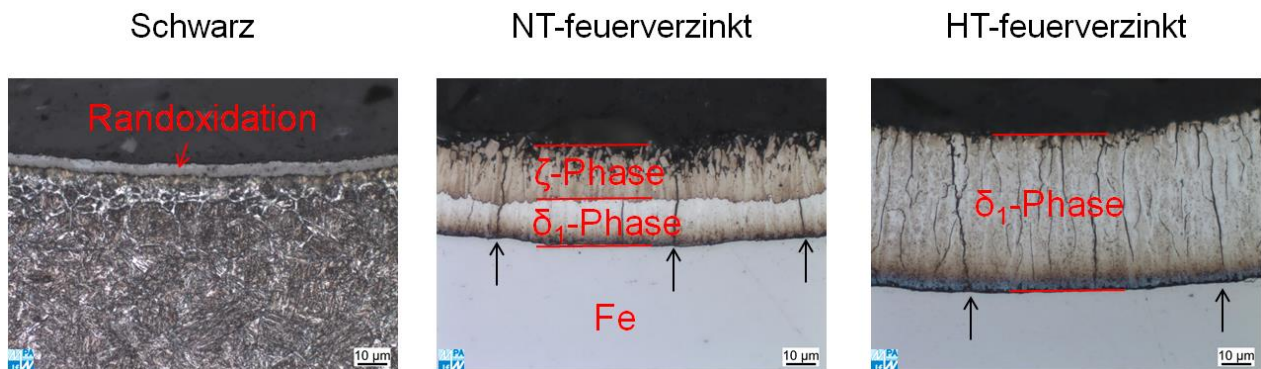


Bild 3: Metallografische Schiffe der Schrauben, die schwarzen Pfeile kennzeichnen Schwindungsrisse in den Zinküberzügen

Die Ergebnisse der instrumentierten Eindringprüfung [12] der NT- und HT-Zinküberzüge zeigen ein mikrofraktografisch „sprödes“ Gesamtbild der Überzugssysteme mit hoher Eindringhärte H_{IT} und geringem Eindringmodul E_{IT} (Bild 4).

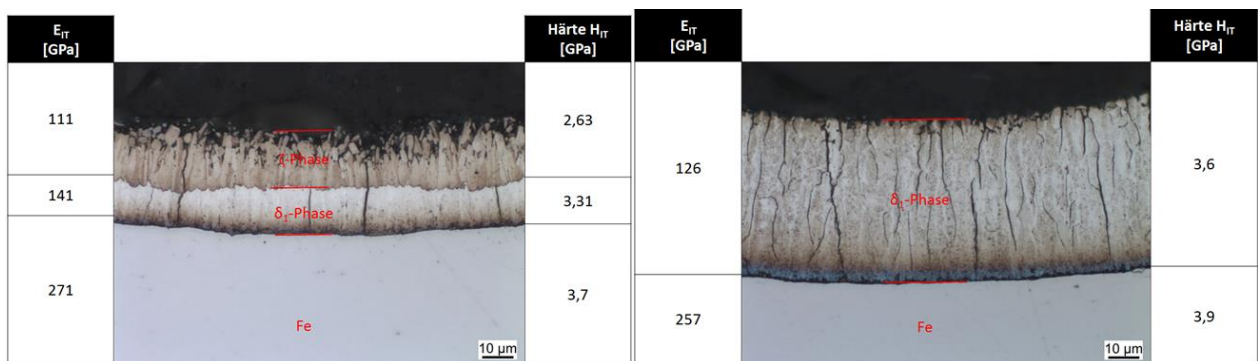


Bild 4: Metallografische Schiffe der Schrauben, phasengenaue Eindringprüfung

Die quasistatische Prüfung der Proben macht deutlich, dass die NT-Feuerverzinkung keine Auswirkungen auf die statischen Festigkeitswerte hat. Bei der HT-Feuerverzinkung lässt sich ein leichter Abfall aller Festigkeitskennwerte beobachten. Dieser Abfall ist auf die Temperaturbelastung während des Hochtemperaturfeuerverzinkungsprozesses zurückzuführen. Die Kernproben wurden bei ca. 500°C angelassen, die Hochtemperaturfeuerverzinkung hat bei höheren Temperaturen stattgefunden. Das heißt, beim Verzinkungsprozess hat ein erneutes

Anlassen der Proben stattgefunden (Bild 5).

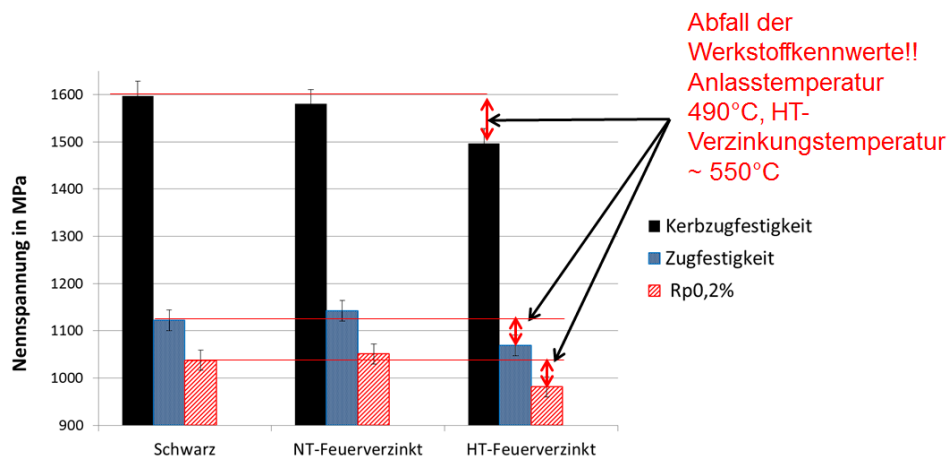


Bild 5: Statische Festigkeitskennwerte im Vergleich

2.2 Einfluss der Feuerverzinkung auf die zyklische Beanspruchbarkeit von Kerbproben

Um die isolierte Wirkung der Zinküberzüge auf die zyklische Beanspruchbarkeit der Kerbproben zu untersuchen werden drei Wöhlerlinien im vergütungsschwarzen Anlieferungszustand (S), normaltemperaturfeuerverzinkt (NT) und hochtemperaturfeuerverzinkt (HT) nach DIN 969 [13] ermittelt. Die Versuche wurden mit einer Mittelspannung von $\sigma_m = 0,7 \cdot R_{p,0,2}$ durchgeführt. Die Ergebnisse der Schwingversuche zeigen, dass sowohl die NT-feuerverzinkten als auch die HT-feuerverzinkten Kerbproben im Vergleich zum unbeschichteten Referenzzustand eine niedrigere zyklische Beanspruchbarkeit aufweisen (Bild 6). Die HT-feuerverzinkten Proben zeigen eine niedrigere Dauerfestigkeit als die NT-feuerverzinkten Proben. Dieses Ergebnis muss differenziert betrachtet werden, denn die HT-feuerverzinkten Proben zeigen - bedingt durch den Temperatureinfluss während des Prozesses der Feuerverzinkung - bereits in der quasistatischen Prüfung einen Abfall gegenüber der NT-feuerverzinkten Proben. Neben der isolierten Wirkung des HT-Zinküberzugs ist die Überschreitung der Anlasstemperatur während des Prozesses der Feuerverzinkung hier ein maßgeblicher Einflussparameter der zu einer weiteren Verschlechterung der zyklischen Beanspruchbarkeit führt.

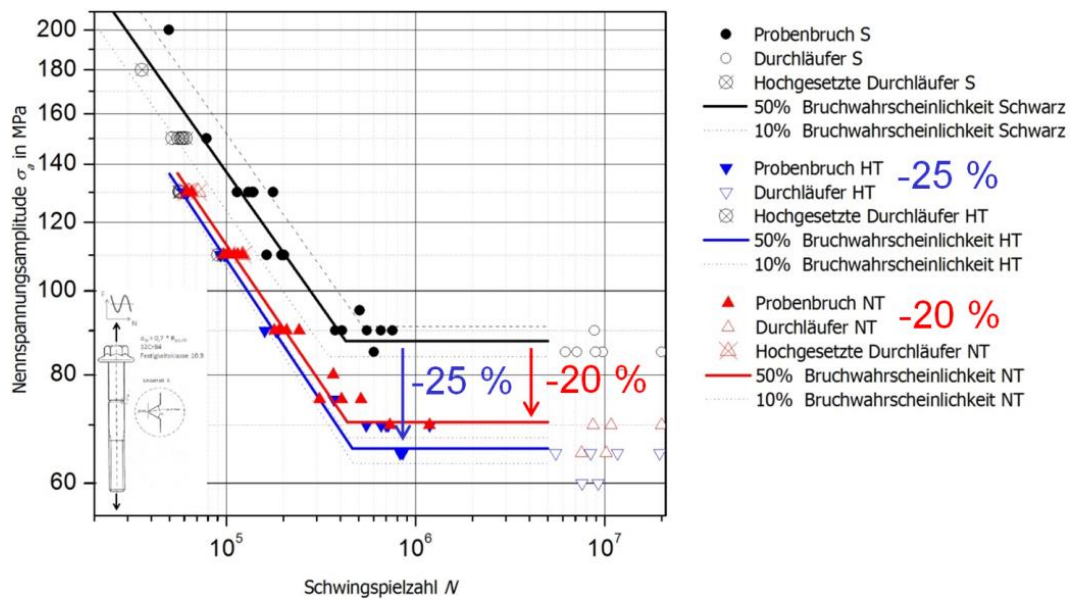


Bild 6: Vergleichende Schwingversuche von vergütungsschwarzen (S) NT-feuerverzinkten (NT) und HT-feuerverzinkten (HT) Kerbproben

Um die Ursache des Abfalls der Dauerfestigkeit zu untersuchen, werden metallografische Schliffe abgebrochener Schwingversuche von NT-feuerverzinkten Kerbproben betrachtet. Für die Versuche wird ein Lasthorizont gewählt, der für die vergütungsschwarzen Proben im Dauerfestigkeitsbereich liegt. Bei den NT-feuerverzinkten Proben sind sicher Brüche zu erwarten. Hier liegt der Lasthorizont im Zeitfestigkeitsbereich.

Die Schwingversuche werden bei unterschiedlichen Schwingspielzahlen abgebrochen und die Ermüdungsrissinitiierung im metallografischen Schliff dokumentiert. Bild 7 zeigt die abgebrochenen Schwingversuche.

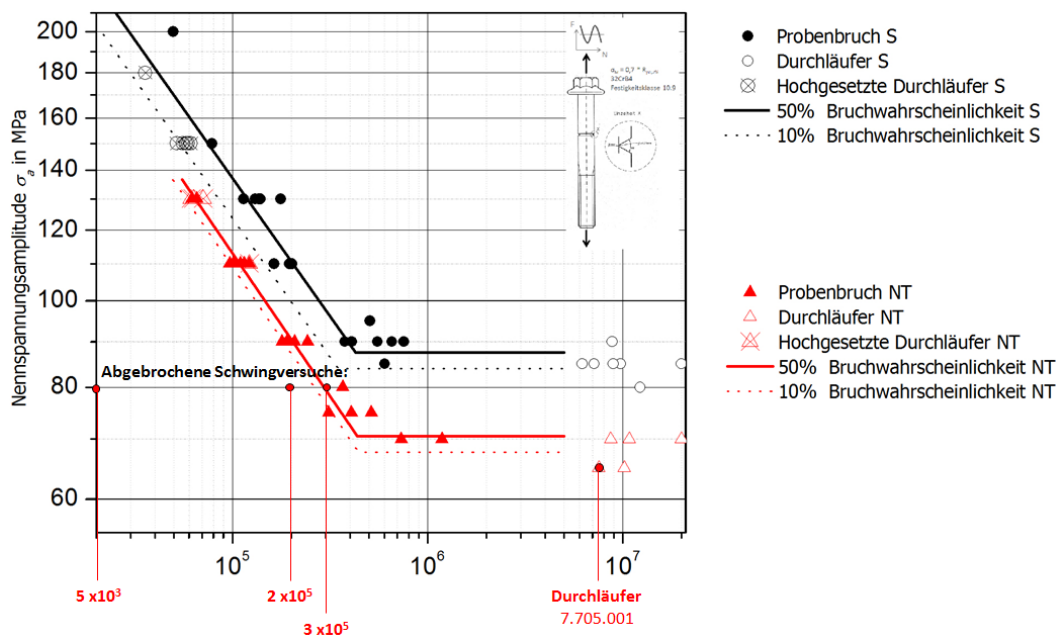


Bild 7: Abgebrochene Schwingversuche zur Dokumentation der Ermüdungsrissinitiierung

Es kann gezeigt werden (Bild 8), dass ausgehend von Schwindungsrissen im Zinküberzug Ermüdungsrisse im Grundmaterial initiiert werden.

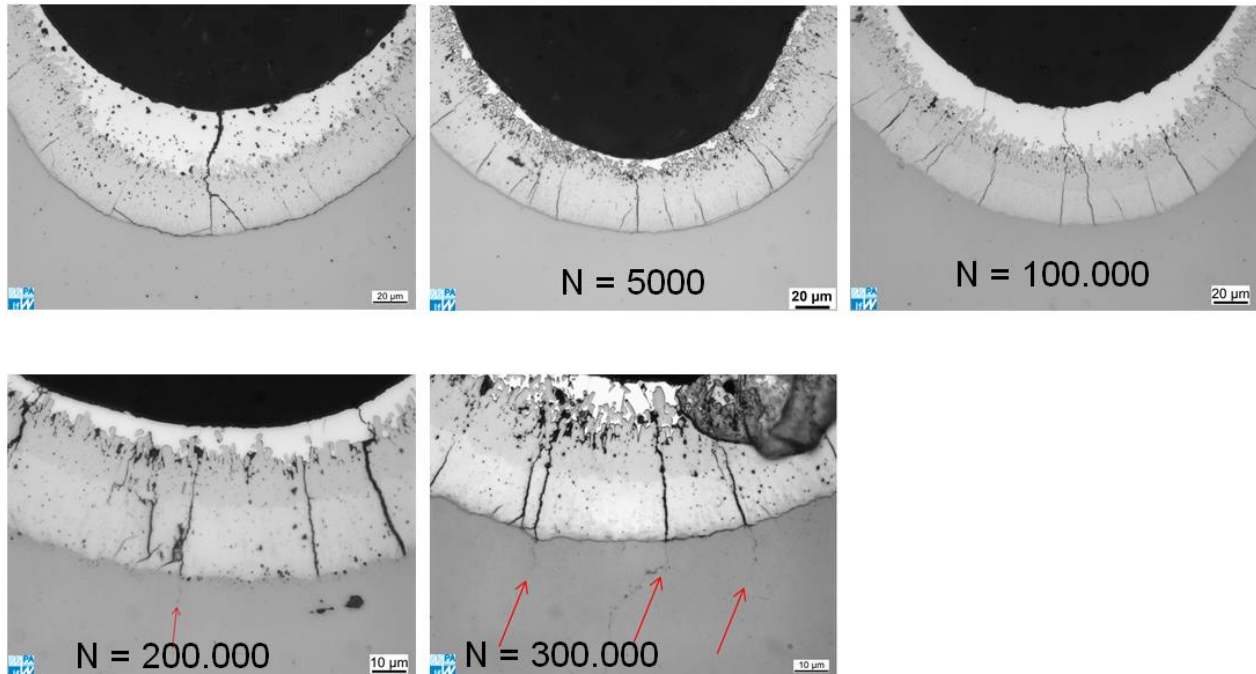


Bild 8: Dokumentation der Ermüdungsrissinitiierung durch Schwindungsrisse im Zinküberzug

2.3 Einfluss der Feuerverzinkung auf die zyklische Beanspruchbarkeit von HV-Schraubengarnituren M36

Die direkte experimentelle Erfassung des Einflusses der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit von großen HV-Garnituren erfolgt zunächst anhand umfangreicher Schwingversuche mit konstanten Amplituden an M36 HV-Garnituren der Festigkeitsklasse 10.9. Die Versuchsserie wurde in einer elektromotorischen Resonanzprüfmaschine (1 MN MOT) im neu errichteten Testzentrum für Tragstrukturen der Leibniz Universität Hannover (TTH) bei einer konstanten Mittelspannung $\sigma_m = 0,7 \cdot R_{p0,2}$ durchgeführt. Dies entspricht bei M36 HV-Garnituren der Regelvorspannkraft $F_{p,C}^*$ von 515 kN. Die Prüffrequenz lag bei ca. 50 Hz. Unter Anwendung genormter statistischer Auswerteverfahren nach DIN 969 [13] wurden drei vollständige Wöhlerlinien für die Zustände „Schwarz“ (S), „Hochtemperaturfeuerverzinkt“ (HT) und „Normaltemperaturfeuerverzinkt“ (NT) erstellt, die sowohl den Zeitfestigkeitsbereich als auch den Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit erfassen. Insgesamt umfasste die Serie über 100 Versuche an M36 HV-Garnituren.

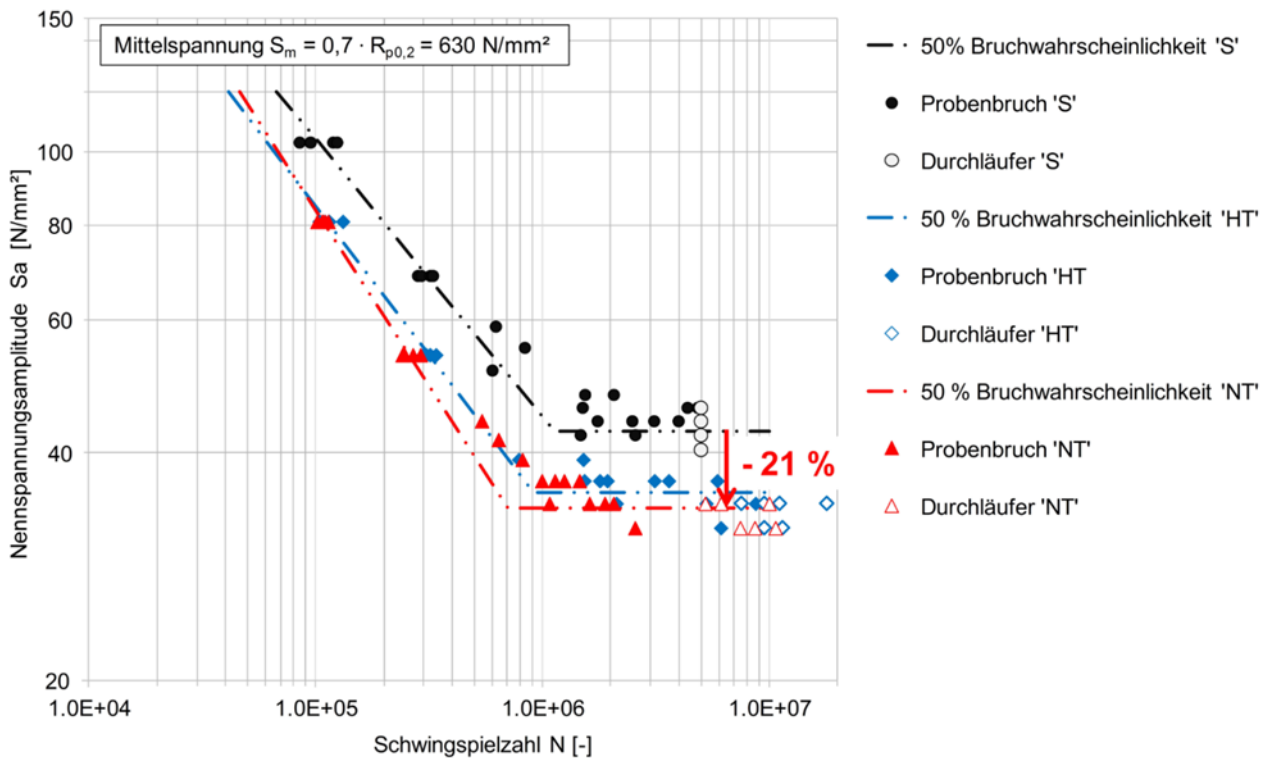


Bild 9: Versuchsergebnisse der Schwingversuche an HV-Garnituren M36 mit konstanten Amplituden

Wie bei den geprüften Kerbproben zeigen auch die Versuchsergebnisse der M36 HV-Garnituren (Abbildung 9) einen Abfall der Dauerfestigkeit infolge der Feuerverzinkung um ca. 20 %. Ein deutlicher Abfall der Schwingfestigkeit ist zudem auch im Zeitfestigkeitsbereich zu erkennen. Anders als bei den Kerbproben liegt die ermittelte Ermüdungsfestigkeit der hochtemperaturverzinkten HV-Garnituren tendenziell oberhalb der Garnituren mit Normaltemperaturverzinkung. Da sich die Streubänder beider Serien jedoch deutlich überschneiden, kann kein wesentlicher, messbarer Unterschied unterstellt werden. Es wird die Schlussfolgerung gezogen, dass hier für Normaltemperatur- und Hochtemperaturverzinkung von einem vergleichbaren Abfall der Ermüdungsfestigkeit auszugehen ist.

Abbildung 10 zeigt den Vergleich der Versuchsergebnisse an feuerverzinkten HV-Garnituren M36 mit den normativen Wöhlerlinien der VDI 2230 [5] und des Eurocode 3 [6]. Wird der Einfluss der besonderen Geometrie von HV-Garnituren gemäß der Empfehlung der neuesten Revision der VDI 2230 berücksichtigt, liefert die in der Richtlinie angegebene Berechnung der Dauerfestigkeit feuerverzinkter Schrauben eine konservative Abschätzung. Im Zeitfestigkeitsbereich liegen jedoch Brüche teilweise unterhalb des Verlaufes der resultierenden Zeitfestigkeitsgraden.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Wöhlerlinie des Eurocode 3 bestätigt eine Einstufung feuerverzinkter Schrauben in den durch Dickeneinfluss reduzierten, Kerbfall 50

(50red). Aus den Versuchsergebnissen ergibt sich zudem, dass eine Einstufung von schwarzen, unverzinkten Schrauben in den Kerbfall 71red, wie in der GL-Richtlinie [7] vorgeschlagen, gerechtfertigt ist.

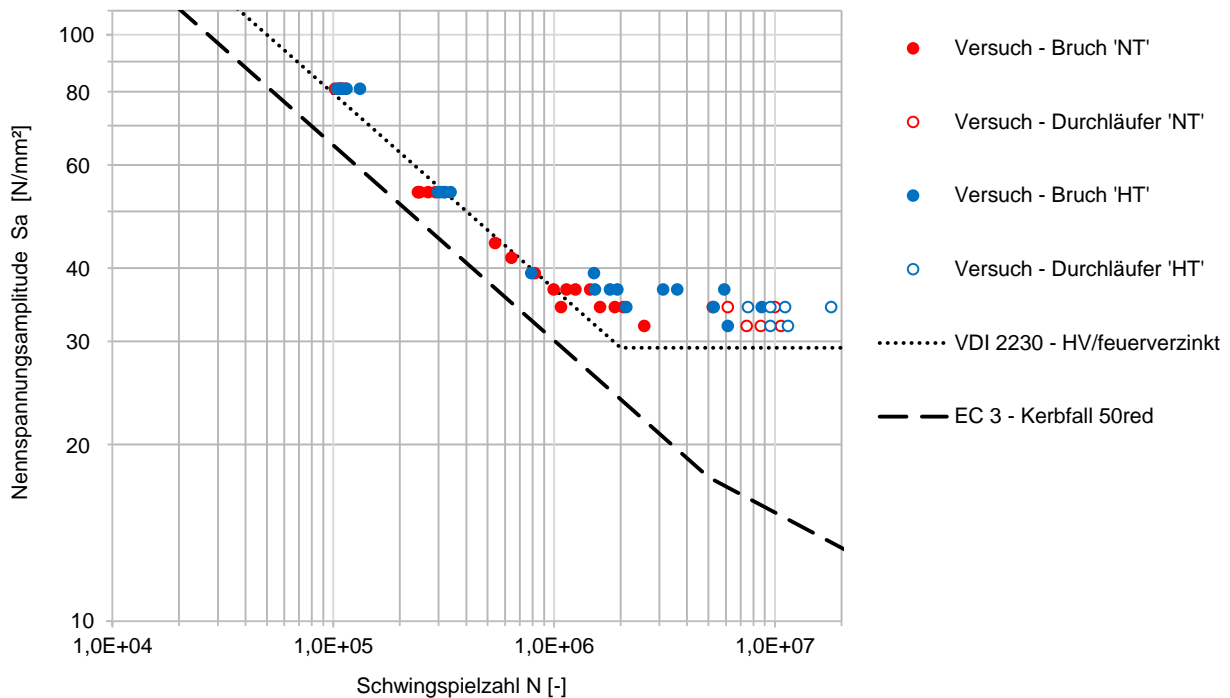


Bild 10: Vergleich der Versuchsergebnisse der Schwingversuche an feuerverzinkten HV-Garnituren M36 mit Bemessungswöhlerlinien nach VDI 2230 und EC3

Aufbauend auf den Ergebnissen der Schwingversuche an HV-Garnituren M36 sollen im Rahmen des Forschungsvorhabens ebenfalls Versuche an HV-Garnituren mit sehr großem Durchmesser M64 durchgeführt werden. Hierdurch soll der Größeneinfluss des Durchmessers auf die Ermüdungsfestigkeit schwarzer und feuerverzinkter Schrauben überprüft und eine Validierung des zu entwickelnden numerischen Bewertungsverfahrens für sehr große Schraubendurchmesser ermöglicht werden. Zur Realisierung eines repräsentativen Mittelspannungsniveaus von $\sigma_m = 0,7 \cdot R_{p0,2}$ werden die Versuche in einer servo-hydraulischen Großprüfmaschine durchgeführt. Wegen der deutlich längeren Prüfdauer und den hohen Prüfkosten wird für den Durchmesser M64 eine stichprobenartigen Validierung der erzielten Erkenntnisse durch eine reduzierte Anzahl an Probekörpern angestrebt, wobei die Versuche vorrangig im Zeitfestigkeitsbereich durchgeführt werden. Wie bei den zuvor beschriebenen Versuchsserien werden vergleichende Prüfungen an schwarzen sowie feuerverzinkten Schrauben vorgenommen. Allerdings wird wegen der Gefahr von LMAC auf eine Prüfung von hochtemperaturverzinkten Schrauben verzichtet.

3 Entwicklung einer rechnerischen Bewertungsmethode

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer abgesicherten Berechnungsmethode für die Betriebsfestigkeit von großen Schrauben unter Berücksichtigung des Einflusses der Feuerverzinkung.

Die angestrebte Berechnungsmethode soll zur weiteren Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit feuerverzinkter, großer HV-Garnituren verwendet werden und wird auf Grundlage des Kerbdehnungskonzeptes entwickelt. In ersten Berechnungen wurden rechnerische Schwingspielzahlen unter konstanten Amplituden bis zum technischen Anriss von M36 Schraubengarnituren ermittelt. Gemäß der Empfehlung von Schneider [14] wird zur Berücksichtigung des statischen Vorspannungszustands der Schrauben für den Erstbelastungspfad der zyklischen Hysterese monotonen Werkstoffverhalten zugrunde gelegt. Mit der zyklischen Hysterese können anhand der Dehnungswöhlerlinie des Schraubenmaterials und unter Anwendung eines geeigneten Schädigungsparameters P Anrisschwingspielzahlen berechnet werden.

Abbildung 11 zeigt den Vergleich der Berechnungsergebnisse mit dem Kerbdehnungskonzept unter Verwendung des Schädigungsparameters P_{SWT} [15] mit den Versuchsergebnissen der schwarzen M36 HV-Garnituren. Für die Berechnung wurden in [14] veröffentlichte zyklische Materialdaten eines hochfesten Schraubenwerkstoff 36CrB4 zu Grunde gelegt. In weiteren Berechnungen sollen direkt aus dem Schraubengrundmaterial experimentell ermittelte Materialkenndaten des tatsächlichen Schraubenwerkstoffes 32CrB4 verwendet werden.

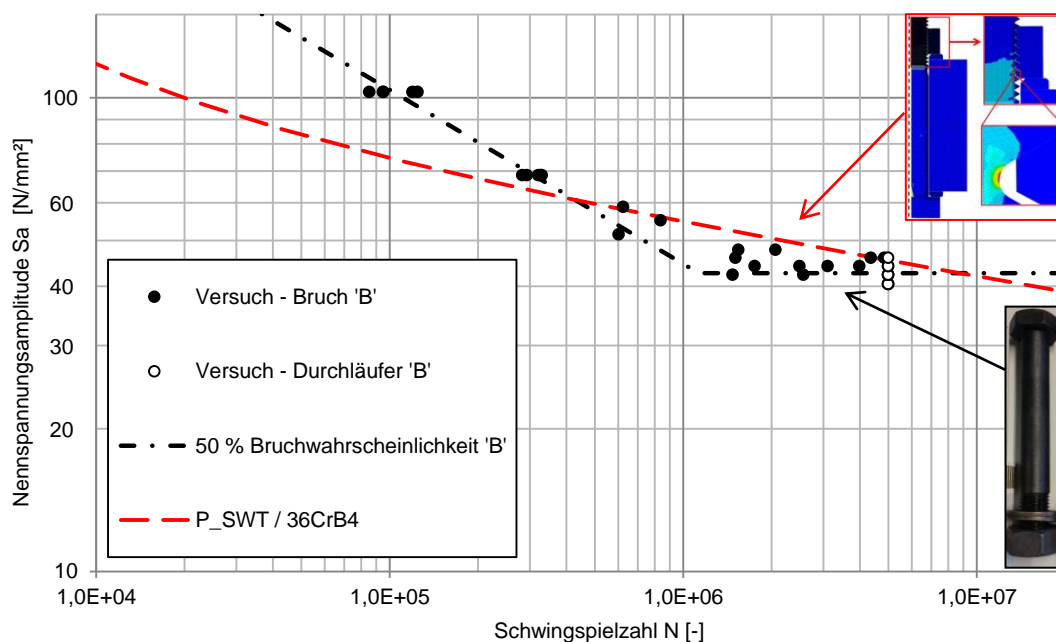


Bild 11: Vergleich der rechnerischen Wöhlerlinie mit den experimentell ermittelten Versuchsdaten

Die Berechnungen mit dem Kerbdehnungskonzept zeigen grundsätzlich eine gute Annäherung an die experimentellen Ergebnisse. Eine weitere Verbesserung wird durch die Anwendung des genaueren Schädigungsparameters P_j [15] und durch die Berücksichtigung zyklischer Relaxationsvorgänge des Schraubenmaterials erwartet. Hierzu werden entsprechende Versuche unter hoher Mitteldehnung am Schraubengrundmaterial durchgeführt. In der weiteren Entwicklung soll die Berechnungsmethodik um die Anwendung des Rissfortschrittconceptes der FKM-Richtlinie [16] erweitern werden, um eine vollständige Berechnung der Lebensdauer zu ermöglichen. Die Berechnung der Betriebsfestigkeit unter variablen Amplituden soll durch Anwendung des Memory-Models erfolgen. Abschließend ist der Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit der Schrauben innerhalb der Berechnungsmethodik zu erfassen. Dies kann mit Hilfe des Modells „Dünne Randschicht“ [8] erfolgen. Hierbei wird der zyklischen Hysterese zusätzlich zu den numerisch ermittelten Dehnungen eine virtuelle Eigendehnung infolge des Randschichteinflusses aufgeprägt. Eine geeignete Anwendungsmethodik dieses Modells für die Ermüdungsberechnung feuerverzinkter Schrauben wird im Fortgang des vorgestellten Forschungsvorhabens untersucht.

Aufbauend auf der entwickelten Berechnungsmethodik und den durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden Empfehlungen für ein vereinfachtes praxistaugliches Nachweisverfahren auf Basis des gängigen Nennspannungskonzeptes entwickelt.

4 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel des in diesem Beitrag vorgestellten Forschungsvorhabens ist die Entwicklung einer experimentell abgesicherten Bewertungsmethode der Betriebsfestigkeit großer Schrauben unter Berücksichtigung der Feuerverzinkung. Es konnte gezeigt werden, dass die Normaltemperaturfeuerverzinkung und die Hochtemperaturfeuerverzinkung die zyklische Beanspruchbarkeit von Kerbproben maßgeblich reduzieren. Die Ursache der Reduktion liegt bei der Normaltemperaturfeuerverzinkung in einer verfrühten Ermüdungsrissinitiierung durch Schwindungsrisse im Zinküberzug. Die Ermüdungsrissinitiierung konnte durch abgebrochene Schwingversuche dokumentiert werden. Die Untersuchungen an Hochtemperaturfeuerverzinkten Proben machen deutlich, dass eine Überschreitung der Anlasstemperatur während des Prozesses der Feuerverzinkung Einfluss auf die quasistatische und zyklische Beanspruchbarkeit der Kerbproben hat.

In Schwingversuchen an M36 HV-Garnituren wurde ebenfalls ein deutlicher Einfluss der Feuerverzinkung auf die Ermüdungsfestigkeit der Schrauben gezeigt. Die Abminderung der Dauerfestigkeit infolge des Randschichteinflusses liegt sowohl bei den Kerbproben als auch bei den HV-Schraubengarnituren in einer Größenordnung von ca. 20 % und bestätigt die hierzu angegebene Empfehlung der VDI 2230. Unter Ansatz einer zusätzlichen Abminderung, begründet durch die spezifische Geometrie von HV-Garnituren, wird die Dauerfestigkeit durch die VDI 2230 zutreffend abgeschätzt. Bezüglich des Eurocode 3 ermöglicht die Zuordnung der feuerverzinkten HV-Garnituren in den Kerbfall 50 eine sichere Auslegungsgrundlage. Erste Berechnungen mit dem Kerbdehnungskonzept als Grundlage für eine analytische Bewertungsmethode zeigen eine gute Annäherung an die experimentellen Ergebnisse. Die Weiterentwicklung der Bewertungsmethode beinhaltet insbesondere die Berücksichtigung des Einflusses des Zinküberzuges über das Modell „Dünne Randschicht“.

5 Dank

Das IGF-Vorhaben 486 ZN der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Den vorgenannten Einrichtungen sei für die Betreuung und Förderung an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 14399-1, Hochfeste planmäßig vorspannbare Schraubenverbindungen für den Metallbau – Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 14399-1:2005, Beuth, Berlin, **2006**.
- [2] K.-H. Kloos, W. Thomala, Schraubenverbindungen: Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung, 5. Aufl, Berlin, Springer, **2007**.
- [3] J. O. Weber, Beitrag zur betriebsfesten Auslegung von Schraubenverbindungen auf Grundlage moderner Betriebsfestigkeitskonzepte, Aachen, Shaker, **2010**.
- [4] D. Ungermann, D. Rademacher, M. Oechsner, F. Simonsen, S. Friedrich, P. Lebelt, Feuerverzinken im Brückenbau, *Stahlbau*, **2015**, Nr. 1, S. 2–9.
- [5] VDI-Richtlinie VDI 2230, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubverbindungen, VDI, Düsseldorf, **12/2014**.
- [6] DIN EN 1993-1-9, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-9: Ermüdung, Beuth, Berlin, **2005**.
- [7] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Hamburg, Guideline for the Certification of Wind Turbine, Hamburg, **2010**.
- [8] T. Seeger, P. Heuler, Ermittlung und Bewertung örtlicher Beanspruchungen zur Lebensdauerabschätzung schwingbelasteter Bauteile, *FF / Fachgebiet Werkstoffmechanik*, Technische Hochschule Darmstadt, **1974**
- [9] DIN EN ISO 898-1, Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde (ISO 898-1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 898-1:2013, Beuth, Berlin, **2013**.
- [10] DSV-GAV, Richtlinie für die Herstellung feuerverzinkter Schrauben, **2009**.

-
- [11] W.-D. Schulz, M. Thiele, Feuerverzinken von Stückgut: Werkstoffe, Technologien, Schichtbildung, Eigenschaften, Fehler, 2. Auflage, Bad Saulgau, Leuze, **2012**.
- [12] Europäische Norm EN ISO 14577-1, Metallische Werkstoffe Instrumentelle Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter Teil 1: Prüfverfahren EN ISO 14577-1:2002, Beuth, Berlin, **2002**.
- [13] DIN 969:1997-12, Verbindungselemente mit Gewinde Schwingfestigkeit bei Axialbelastung Prüfverfahren und Auswertung der Ergebnisse, Beuth, Berlin, **1997**.
- [14] Schneider, Roland, Örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit von Gewindeverbindungen vorgelegt von Roland Schneider. Darmstadt, Techn. Univ., Diss., **2010**
- [15] Smith, K. N. ; Watson, P. ; Topper, T. H., A stress-strain function for the fatigue of metals, *Journal of Materials*, **1970**, S. 767–778.
- [16] R. Rennert, E. Kullig, M. Vormwald, A. Esderts, D. Siegele, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile: aus Stahl, Eisenguss und Aluminiumwerkstoffen, 6., überarb. Ausg., Frankfurt am Main, VDMA-Verl., **2012**.