

Osnabrück, Januar 2022

Mitteilungen der Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik

> Communications of the Faculty Engineering and Computer Science

Festigkeit von Schwalbenschwanzverbindungen unter Reibermüdung – Ein Vergleich der Lebensdauercharakteristik

Durability of Dovetail Joints under Fretting Fatigue – A Comparison of Life Characteristic

F. Kümper, B. Sc.¹ P. Gerken, M. Sc.² Prof. Dr.-Ing. C. H. Richter¹

¹ Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück

² Rheinmetall Electronics GmbH, Brüggeweg 54, 28309 Bremen

Schlüsselwörter: Reibermüdung, Lebensdauercharakteristik, Sines-Kriterium

Zusammenfassung. Reibermüdung ist ein Phänomen, welches an den Kontakträndern von in Berührung stehenden, kraftübertragenden Bauteilen beobachtet werden kann. Typische Maschinenelemente, die in diesem Mode versagen können, sind z. B. die Schwalbenschwanzverbindung sowie ihre Ableger, die mehrzahnigen Tannenbaumfixierungen. In der Literatur beschriebene Untersuchungen weisen für Flachproben mit Reibbrücken ein Lebensdauerverhalten mit einem lokalen Minimum über der Anpresskraft der Reibbrücken aus. Die vorliegende Arbeit untersucht mithilfe des Sines-Ermüdungskriteriums, kombiniert mit Grenzwerten gemäß FKM-Richtlinie, ob ein solches Verhalten auch für die Schwalbenschwanzverbindung zutrifft. Im Gegensatz zur Reibbrückenanordnung mit separater Einleitung von konstanter Pressung und Längslastamplitude fluktuieren bei der Schwalbenschwanzverbindung die Anpresskraft und Zugkraft mit der einzigen am Hals eingeleiteten Last.

Key words: fretting fatigue, life characteristic, Sines criterion

Abstract. Friction fatigue is a phenomenon that can be observed at the contact edges of components that transfer load over the contact. Typical machine elements that may fail in this mode are the dovetail joint and its scions such as multi-tooth fir-tree fixations. Studies described in the literature show a fatigue life behavior for flat specimens with friction bridges with a local minimum over the normal contact force of the friction bridges. Using the Sines fatigue criterion, combined with limit values according to the FKM guideline, the present work investigates whether such behavior also applies to the dovetail joint. In contrast to the friction bridge arrangement with separate introduction of constant pressure and longitudinal load amplitude, the contact force and tensile force fluctuate with single load introduced at the neck of the dovetail.

Inhalt

1	Reibermüdung – Wirkung, Untersuchungen und Beobachtungen	. 2
2	Untersuchungsansatz	. 3
3	Modellierung und Ergebnisauswertungen	.4
4	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	. 6
5	Zusammenfassung und Fazit	.7
6	Referenzen	. 8

1 Reibermüdung – Wirkung, Untersuchungen und Beobachtungen

Durch Reibermüdung potenziell gefährdete Bauteile. Im Maschinenbau sind häufig rezessartige Verbindungen von Bauteilen anzutreffen. Bei diesen greifen Komponenten ineinander und übertragen Kraft über die Berührfläche. Es handelt sich somit um formschlüssige Verbindungen. Hierzu gehören beispielsweise die Schwalbenschwanzverbindung (Engl.: Dovetail) und die tannenbaumartige Verbindung (Engl.: Fir-tree) einer Turbinenschaufel mit dem Läufer. Letztere ist eine mehrfach in Lastrichtung übereinander angeordnete Schwalbenbenschwanzverbindung. Solche Verbindungen können durch Schwingungen – bei Turbomaschinen z. B. durch Rotorunwuchten oder aus dem Arbeitsfluid angefachte Schaufelschwingungen – eine fluktuierende Belastung erfahren.

Reibermüdung. Wechselnde Belastungen in den rezessartigen Verbindungen können auf Reibermüdung führen. Reibermüdung (Engl.: Fretting fatigue) ist ein Versagensmodus, bei dem im Kontakt zwischen zwei Komponenten hochzyklisch fluktuierende Spannungen auftreten. Erfahrung und Simulation zeigen, dass der Kontaktrand (Engl.: Edge of Contact, EOC) oft der gefährdetste Ort ist, Abbildung 1 oben.

Typischerweise tritt am EOC eine sehr große Spannungskonzentration auf, dessen Maximum mit den äußeren Lasten fluktuiert. Diese Amplitude des Maximalwertes wird begleitet von einer Hin- und Her-Bewegung der Spannungsspitze. Die Bewegung geht auf Fluktuationen in der Abplattung der Kontaktpartner zurück, als auch auf eine ggf. stattfindende Relativverschiebung der Kontaktpartner. Insbesondere die fluktuierende Ortsveränderung der Spannungsspitze führt zu sehr großen Spannungsamplituden im Bereich des EOC. Diese Amplituden können größer sein als die Spannungsamplitude des Maximalwertes, Abbildung 1 unten.

Bei fortgeschrittener Ermüdung formiert sich ein Anriss an der Bauteiloberfläche am EOC, da die Ermüdungswirkung der Kombination aus statischen und fluktuierenden Spannungen dort ihr Maximum erreicht. Bei weiterhin fortgesetzter Ermüdungsbelas-





tung kann der Riss wachsen und bis zum Versagen des Bauteiles führen. Liegt die Kombination der statischen und fluktuierenden Belastungen unter einer bestimmten Grenze, wird kein Riss initiiert. Diese Dauerfestigkeitsgrenze steht im Fokus der folgend beschriebenen Untersuchungen.

Kugelstrahlen. Reibermüdung kann durch verschiedene Faktoren wie Schmiermittel, Temperatur, Oxidation, Eigenspannung und anderen Faktoren beeinflusst werden. Durch kontrolliertes Kugelstrahlen einer oder beider

kontaktierender Oberflächen kann die Reibermüdung positiv beeinflusst werden. Beim Kugelstrahlen werden z. B. Stahlkugeln mit kontrollierter Geschwindigkeit auf die Oberfläche geschossen. Der Anprall des Strahlgutes zieht eine Kaltverfestigung im Rahmen der ausgelösten plastischen Verformung nach sich. Die irreversibel parallel zur Oberfläche gedehnten Fasern des Materials werden von dem darunterliegenden, nur elastisch verformten Material zurückgedrückt. So entsteht oberflächennah eine Schicht mit Druckeigenspannungen parallel zur Oberfläche. Der Maximalwert der Druckspannungen befindet sich dabei nicht direkt an der Oberfläche, sondern in einer von den Strahlparametern (Strahlgut, Intensität) abhängigen Tiefenlage im Material. Typischerweise sind dies wenige zehntel Millimeter.

Auch bei kugelgestrahlten Kontaktflächen entsteht der Riss an der Oberfläche. Wenn dieser unter fortgesetzter fluktuierender Beanspruchung der Komponenten in die Druckeigenspannungsschicht hineinwächst, wird das Risswachstum durch die Entlastung der Rissfront verlangsamt. Ist die Amplitude niedrig genug (größer als der Wert, der für die Rissinitiierung erforderlich ist), kann es zu einem Rissstopp kommen. Ein solcher Riss kann für den Betrieb des Bauteils tolerierbar sein. Durch das Kugelstrahlen ergibt sich demnach eine Erhöhung der dauerfest ertragbaren Belastung. [1]

Versuchsergebnisse des Reibbrückenversuchs.

Bei der experimentellen Untersuchung von Reibermüdung kommen unteranderem rechteckige Probenkörper zum Einsatz. Die Kontaktpartner, aufgrund ihrer Form als Reibbrücken bezeichnet, werden beidseitig der Probe mit verschiedenen, während des Versuchs konstanten Lasten aufgepresst. An den Enden der Probe findet die Einleitung der axialen Lasten mit einem statischen und einem fluktuierenden Anteil statt. [2]

Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung sind in Abbildung 2 zu sehen. Dieser liegen kugelgestrahlte wie auch ungestrahlte Proben aus einer aushärtbaren Aluminiumknetlegierung (EN AW 2024-T351) zugrunde. Die axialen Lasten wurden bei allen Versu-



Abbildung 2: Lebensdauerkurve über dem Anpressdruck der Reibbrücken. Die nicht gestrahlten Proben zeigen ein lokales Minimum. (reproduziert nach [2]).

chen mit einer Nennspannungsamplitude von 70 MPa und einer Mittelspannung von null MPa eingeleitet, während der Anpressdruck der Reibbrücken variiert wurde. Das Ergebnis des Versuchs ist der Graph der ertragbaren Lastwechselzahl als Funktion des Anpressdrucks. Bei nicht kugelgestrahlten Proben zeigt sich ein lokales Minimum; bei kugelgestrahlten Proben ist eine deutlich gesteigerte Lebensdauer zu verzeichnen, wobei der Graph quasi konstant verläuft.

Fragestellung dieser Arbeit. Im Gegensatz zur Reibbrückenanordnung fluktuiert bei der Schwalbenschwanzverbindung die Anpresskraft mit der eingeleiteten Zuglast. Daher kann es sein, dass sich die Festigkeitscharakteristiken beim Reibbrückenversuch und bei der Schwalbenschwanzverbindung voneinander unterscheiden. Es soll mit Simulationen untersucht werden, ob der beim Reibbrückenversuch beobachtbare talförmige Verlauf der Lebensdauerkurve auch bei einer Schwalbenschwanzverbindung anzutreffen ist.

2 Untersuchungsansatz

Zur Untersuchung der Fragestellung wird ein Finite-Elemente-Modell eines Schwalbenschwanzes mit 45° Halbwinkel aufgebaut, Abbildung 3 links. Die Komponenten bestehen aus dem Stahl 40NiCrMo6 (AISI 4340) mit einer Zugfestigkeit von 1860 MPa und einer Bruchdehnung von 6 % [1, 3]. Das verwendete Schwalbenschwanzmodell, das Materialmodell mitsamt Materialdaten und die in Kapitel 3 beschriebenen Auswertungen wurden im Rahmen von [1] erstellt und für den hier vorgesehenen Zweck adaptiert. Im Unterschied

zu [2] werden die Auswertungen nicht in Form der ertragbaren Lastwechselzahl bei gegebener Schwingungsamplitude vorgenommen, sondern es wird die dauerhaft ertragbare Amplitude iterativ ermittelt. Dabei wird das in [1, 4] beschriebene Ermüdungskriterium nach Sines auf der Basis der lokalen Spannungsfelder am EOC herangezogen. Es erfolgt die Auftragung der dauerfest ertragbaren Amplitude über dem statischen Anteil der Zugspannung in Form der am Hals des Schwalbenschwanzes als homogene Last eingeleiteten Spannung. Die hier vorgenommene Betrachtung der Dauerfestigkeit ist vergleichbar zu der in [2] dargestellten Analyse der ertragbaren Lastwechselzahl. Eine über der Pressung ab-/zunehmende Lastwechselzahl bei konstanten Amplituden korrespondiert mit einer ab-/zunehmenden Dauerfestigkeit. Damit würde also ggf. ein lokales Minimum in der vorgesehenen Auftragung der dauerfest ertragbaren Amplitude über der statischen Mittellast sichtbar werden.

Feld der zu untersuchenden Lasten. Der Suchbereich in der statischen Last erstreckt sich von nahe null bis zu einem versuchsmäßig ermittelten Oberwert, bei dem die ertragbare Lastamplitude praktisch null ist. In diesem Rahmen ergibt sich der zu untersuchende Bereich der Lastamplitude aus einfachen Grenzen der Schwalbenschwanzanordnung. So kann die Lastamplitude nicht größer als die statische Last werden, da die Kontaktpaarung andernfalls abheben würde. Die kleinste Amplitude ist null. Innerhalb dieses abgesteckten Feldes erfolgen Simulationen und Bewertungen der Spannungen bzgl. Ermüdung und statischem Bruch mit ggf. adaptiven Verfeinerungen der untersuchten Punkte bzgl. ihrer statischen Last.

3 Modellierung und Ergebnisauswertungen

Aufbau des Simulationsmodells. Der Aufbau des Simulationsmodells entstammt einer vorangegangenen Arbeit [1]. Es handelt sich um ein Modell im ebenen Verzerrungszustand eines 90° Schwalbenschwanzes. Seine Symmetrie wird zur Modellreduktion genutzt, Abbildung 3 links. Die Krafteinleitung erfolgt am Hals des Schwalbenschwanzes als über die Kantenlänge gleichmäßig verteilte Last. Der Kontaktpartner des Schwalbenschwanzes ist mit einer festen Lagerung entlang seiner oberen Kante versehen, welche weit genug von der Kontaktfläche entfernt ist, um ungewollte Einflüsse auszuschließen. Das Modell muss aufgrund der sehr großen Spannungsgradienten mit extrem unterschiedlich großen Elementen arbeiten. Die Kontaktflächen, insbesondere im Bereich des Anrissortes, weisen eine deutlich feinere Vernetzung (15 μ m) als die übrigen Kontaktbereiche abseits des EOC auf (bis zu 0,15 mm).



Abbildung 3: Links: Finite-Elemente-Modell der Schwalbenschwanzverbindung, Randbedingungen und Lasteinleitung. <u>Rechts</u>: Modellierung der Zeitfunktion mit zwei Schwingzyklen.

Der Kontakt zwischen den beiden Körpern wird mit Coulomb'scher Reibung beschrieben. In [1] wurde mit einer Parameterstudie der Einfluss des Reibkoeffizienten untersucht. Die vorliegende Arbeit legt einen Wert von μ =0,3 zugrunde. Das für beide Komponenten verwendete elastisch-plastische, multilineare Materialmodell bildet das Fließverhalten des Stahls mithilfe zweier Geraden ab; je eine für den elastischen und eine für den plastischen Bereich. Die Materialverfestigung wird isotrop beschrieben. Die Kombination aus statischer und dynamischer Last wird mittels einer Zeitfunktion gesteuert. Dabei wird die statische Last zunächst bis auf den voreingestellten Wert hochgefahren und dann um die Amplitude schwingend verändert, wobei zwei Schwingzyklen modelliert werden, Abbildung 3 rechts. Ein Einfluss von möglichem Setzverhalten auf die Ergebnisse konnte anhand von Berechnungen über weitere Zyklen überprüft und ausgeschlossen werden.

Dauerfest ertragbare Last. Durch Reibermüdung können im Laufe der Bauteillebensdauer Mikrorisse an der Oberfläche entstehen, an welchen das Bauteilversagen beginnt. Um diesen versagensführenden Ort zu identifizieren, werden die von-Mises-Spannungsamplitude und die hydrostatische Spannung entlang einer Linie im Bereich des EOC mithilfe des Sines-Kriteriums ausgewertet. Im Sines-Kriterium quantifiziert die hydrostatische Spannung zu dem Zeitpunkt des Zyklus, an dem der fluktuierende Lastanteil null ist, die Mittelspannung, $\sigma_{h,Mittel}$. Die Spannungsamplitude $\sigma_{Mises ampl}$ wird durch die Hälfte der von-Mises-Spannung der Differenz der Spannungstensoren zum Zeitpunkt der oberen und unteren Belastung des Schwingungszyklus dargestellt [6].

$$\sigma_{\text{Mises ampl}} = \frac{1}{2} \mathcal{M} \big[\boldsymbol{\sigma}(t^{\text{u}}) - \boldsymbol{\sigma}(t^{\text{l}}) \big] \leq L \big(\sigma_{\text{h,Mittel}} \big)$$

Darin ist \mathcal{M} der von-Mises-Operator. Jeder Punkt der Auswertungslinie am EOC liefert damit einen Datenpunkt im Sines-Diagramm.

Dauerfestigkeit liegt vor, wenn alle Datenpunkte unter der ihnen individuell zugeordneten Grenzkurve $L(\sigma_{h,Mittel})$ liegen. Die Grenzkurve ist eine Funktion der Mittelspannung $\sigma_{h,Mittel}$ und gemäß FKM-Richtlinie [7] auch eine Funktion des Spannungsgradienten, welcher über die Stützziffer die Grenze beeinflusst. Daher ist die Grenzkurve ortsabhängig und für jeden Datenpunkt individuell. Ferner unterscheidet sich die Konstruktion der Grenzkurve vom Sines'schen Original dadurch, dass sie der FKM-Richtlinie folgend multilinear ist. Abbildung 4 zeigt beispielhaft eines der Sines-Dauerfestigkeitsdiagramme. Dieses enthält der Übersicht wegen nur die Grenzlinie für den lebensdauerführenden Punkt (grün eingekreist), der auf ihr liegt. Alle anderen Punkte liegen unterhalb ihrer (nicht dargestellten) Grenzkurven.



Abbildung 4: Sines-Diagramm für den Fall von 300 MPa statischer Zuglast und 21 MPa (7,13 %) Amplitude am Hals des Schwalbenschwanzes. Die Kreuze sind Punkte des oben links dargestellten Pfades. Der versagensführende Punkt ist grün eingekreist; auf ihn bezieht sich die Grenzlinie (rot).

Die dauerfest ertragbare Lastamplitude wird iterativ durch Veränderung der Lastamplitude im FE-Modell, Neuberechnung sowie Auswertung bestimmt. Neben ihrem Wert wird die Lastamplitude nachfolgend auch dimensionslos als Prozentsatz der statischen Last angegeben.

Versagensmode statischer Bruch. Über die Beurteilung des Ermüdungsverhaltens hinaus ist zu überprüfen, ob das Material bei den vorliegenden Spannungen einen Bruch unter statischen Gesichtspunkten erleiden könnte. Hierzu wird ein Kriterium in der Hauptspannung σ_{P1} und eines in der akkumulierten plastischen Dehnung $\varepsilon_{acc_{Pl}}$ herangezogen. Bei Letzterem wird der elastische Verzerrungsanteil vernachlässigt, da er im Vergleich klein ist. Beide Kriterien werden zum Zeitpunkt der Oberlast des Zyklus ausgewertet, da zu diesem Zeitpunkt die Spannungen als auch die Dehnungen am lebensdauerführenden Ort maximal sind. Die genannten Größen sind durch die Zugfestigkeit bzw. die Bruchdehnung des Materials begrenzt.

4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen zur Reibermüdung und zum statischen Bruch werden so aufbereitet dargestellt, dass das Versagensverhalten über der statischen Last erkennbar wird. Dies soll erlauben, eine ggf. vorhandene lokale Absenkung zu identifizieren.

Ermüdungsfestigkeit. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der dauerfest ertragbaren Lastamplitude über der statischen Zuglast, beide als Nennspannung angreifend am Schwalbenschwanzhals. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf in ein Plateau einmündet. Dieses Plateau ist auf das Ermüdungsverhalten bei großen, (fiktiv-elastischen) Spannungsgradienten zurückzuführen, da es aufgrund makroskopischer Stützwirkung zu Lastumverteilungen kommt. Diese Lastumverteilungen sind in der FE-Berechnung durch Verwendung des elasto-plastischen Materialmodells reflektiert. Die Lastumverteilung geht mit nur schwach ansteigenden Spannungen im Rahmen der Verfestigung einher. Darüber hinaus ergibt sich aus der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes ein makroskopischer Stützeffekt. Neben diesen makroskopischen Stützeffekten kommt es zu mikroskopischer Stützwirkung, bei der einzelne Körner orientierungsabhängig mehr Last ertragen können als Nachbarkörner. So bildet sich auch hier eine Lastumverteilung aus, welche mit dem FE-Modell jedoch nicht adressiert wird.

Statische Bruchfestigkeit. Abbildung 6 zeigt die Verläufe der maximalen Hauptspannung σ_{P1} und der akkumulierten plastischen Dehnung ε_{acc_P1} über der statischen Last, jeweils am versagensführenden Ort. Darüber hinaus sind deren Begrenzungen, die Zugfestigkeit bzw. Bruchdehnung, dargestellt. Beide Kriterien weisen verträglich ungefähr die gleiche statische Grenzlast aus. Im Mittel ergibt sich ein zulässiger Beanspruchungsbereich bis 330 MPa statischer Last.



Abbildung 5: Dauerfest ertragbare Lastpaare: Lastamplitude über der statischen Zuglast, Nennspannungen am Hals des Schwalbenschwanzes.



Abbildung 6: Bewertung der Festigkeit gegen statischen Bruch: Erste Hauptspannung und akkumulierte plastische Dehnung über der statischen Zuglast.

Ergebnisinterpretation. Auf Basis der gezeigten Ergebnisse ist die Beantwortung der formulierten Fragestellung möglich: Der Verlauf der dauerfesten Lastpaare gemäß Abbildung 5 zeigt, anders als bei der in [2] verwendeten Reibbrückenanordnung bei den untersuchten Schwalbenschwanzverbindungen keinen Verlauf mit einem lokalen Minimum.

Lage des Anrissortes. Zusätzlich wird die Lage des Anrissortes über der statischen Last betrachtet. Zum einen bewirkt die zunehmende statische Last ein weiteres Herausgleiten des Schwalbenschwanzes aus seinen Gegenlagern, was den EOC in positiver *Y*-Richtung verschiebt. Zum anderen finden eine Abplattung der Verrundungen der Gegenlager statt sowie Eindrücke in die Kontaktfläche des Schwalbenschwanzes. Dieses Verhalten verschiebt den EOC in negativer *Y*-Richtung. Es handelt sich um zwei gegenläufige Effekte. Die Simulationen weisen letztlich aus, dass sich der lebensdauerführende Ort mit steigender statischer Last entlang der Kontaktfläche in



Abbildung 7: *Y*-Koordinate des versagensführenden Punktes über der statischen Last. Die Orte beziehen sich auf das unverformte Netz.

negativer *Y*-Richtung verschiebt, Abb. 7. Ergänzend werden die **Gleitwege** im Bereich des Anrissortes ausgewertet. Diese ergeben sich auf dem Hin- und Rückweg des letzten Schwingzykluses mit weniger als 0,1 µm.

5 Zusammenfassung und Fazit

Reibermüdung ist ein oftmals unterschätzter Versagensmechanismus an kontaktierenden Bauteilen. Methoden zur Auslegung sind für industrielle Anwendungen gesucht; ebenso grundlegende Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten unter Reibermüdung.

In der Literatur finden sich Reibbrückenversuche an Aluminiumproben. Diese zeigen ein lokales Minimum in der Auftragung der ertragbaren Lastwechselzahl über der Bandbreite der Anpressdrücke [2]. Rezessartige Verbindungen wie der Schwalbenschwanz zeigen möglicherweise ein anderes Verhalten, da hier die Anpresskraft

nicht unabhängig von der Lastamplitude ist. Ziel dieser Arbeit war es, Reibermüdung an Schwalbenschwanzverbindungen im Hinblick auf die Dauerfestigkeit über einer Bandbreite statischer Lasten zu untersuchen.

Diese Problemstellung wurde mit einem Finite-Elemente-Modell eines 90°-Schwalbenschwanzes, an dessen Hals eine schwellende Last angreift, adressiert. Durch iterative Berechnung ließ sich mittels Sines-Ermüdungskriterium die dauerfest ertragbare Lastamplitude ermitteln. Die Auftragung der dauerfest ertragbaren Amplitude über der statischen Last zeigt einen monoton fallenden Verlauf, der bei steigender statischer Last in ein Plateau mündet. Eine Begrenzung erfolgt durch die statischen Bruchkriterien. Im Gegensatz zur Reibbrückenanordnung zeigt sich kein lokales Minimum in der Dauerfestigkeit.

Ausblick. Bei der Entwicklung, beispielsweise einer schwalbenschwanzartigen Turbinenschaufelverbindung, ist es von besonderem Interesse, Kenntnisse über deren dauerfesten Belastungsbereich zu erlangen. Mittels der präsentierten Ergebnisse kann es möglich werden, die dauerfest ertragbaren Belastungen, beispielsweise aus Maximaldrehzahl und zulässiger Unwucht stammend, direkt abzulesen. Durch ergänzende ähnlichkeitsmechanische Betrachtungen könnten Variationen solcher Verbindungen abgebildet und Berechnungszeiten eingespart werden, was eine Kostenreduktion während des Entwicklungsprozesses ermöglicht. Ferner soll der Reibbrückenversuch mit einem FE-Modell nachgebildet werden. Ziel ist die rechnerische Erfassung der Lebensdauercharakteristik mit dem lokalen Minimum des Reibbrückenversuchs.

Danksagung. Diese Arbeit wurde im Rahmen der Projektarbeit im Modul *Höhere Finite Elemente Methoden* von erstgenanntem Autor bearbeitet. Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Richter für die Bereitstellung der außerordentlichen Aufgabe. Darüber hinaus danke ich ihm und meinem Kommilitonen, Herrn Gerken, für die stets hilfsbereite Begleitung der Arbeiten, für Denkanstöße bei auftretenden Schwierigkeiten sowie für die aktive Mitarbeit an diesem Bericht.

6 Referenzen

- P. Gerken, C. H. Richter: Fretting Fatigue an Integral Simulation Approach to Strengthening by Shot-Peening, Proceedings of ASME Turbo Expo 2021, Turbomachinery Technical Conference and Exposition, GT2021, paper no. GT2021-59905.
- [2] C. A. Rodopoulos, M. W. Brown, Sp. Pantelakis, S. Gardiner, R. Edwards, *The use of controlled shot peening to improve the fretting fatigue behaviour of flat on flat aluminum contact*, 11th International Conference on Fracture, 2005.
- [3] Böhler Edelstahl BmbH & Co. KG: *Böhler V124SC 40NiCrMo6 Vergütungsstahl*. (Online). Verfügbar unter: <u>https://irp-cdn.multiscreensite.com/7899ad40/files/uploaded/V124SC.pdf</u>, Zugriff: 01.11.2021.
- [4] C.H. Richter, U. Krupp, M. Zeißig, G. Telljohann, *Plastic Effects on High Cycle Fatigue at the Edge of Contact of Turbine Blades Fixtures*, J. Eng. Gas Turb. Power. 140 (4) (2018) 042501 -1 -042501 -11, https://doi.org/10.1115/1.4038040.
- [5] L. Panning: *Auslegung von Reibelementen zur Schwingungsdämpfung von Turbinenschaufeln*. Universität Hannover, Dissertation, 2005, <u>https://doi.org/10.15488/6592</u>
- [6] G. Sines, *Behavior of metals under complex static and alternating stresses*, in: G. Sines, J.L. Waisman, Metal Fatigue, McGraw Hill, New York, 1959, pp. 145-169.
- [7] R. Rennert, *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen*, sixth ed., Frankfurt, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) and Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), 2012.