

## Strukturierte Zusammenfassung der Dissertation

### *Einflussfaktoren auf das Ermüdungsverhalten im Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen (VHCF)*

vorgelegt von

M. Sc. Carsten Wickmann

---

Zahlreiche lasttragende Maschinenbauteile, Komponenten und Medizinprodukte sind aufgrund ihrer Belastungsfrequenzen oder ihrer Betriebszeiten sehr hohen Lastwechselzahlen ausgesetzt. Eine ermüdungsfeste Auslegung dieser Bauteile und Strukturen ist von essenzieller Bedeutung, sollen deren Ausfälle durch Ermüdungsbrüche sowie die finanziellen, wirtschaftlichen und sozialen Folgen verhindert werden. Dabei können auch schon Spannungsamplituden weit unterhalb der in der Vergangenheit als sicher angenommenen Langzeitfestigkeit für Grenzlastspielzahlen von  $10^6$  -  $10^7$  Zyklen zur Schädigung der Materialien beitragen. In gängigen Schwingfestigkeitsnormen und -richtlinien wird den gewonnenen Erkenntnissen bei sehr hohen Lastwechselzahlen teils Rechnung getragen, indem Begriffsänderungen beschlossen, konventionelle Langzeitfestigkeitswerte abgesenkt oder die Unterteilung in unterschiedliche Werkstofftypen vorgenommen wurde. Viele Erscheinungen und Einflüsse im Very High Cycle Fatigue (VHCF) Bereich sind jedoch zum aktuellen Stand der Forschung nicht vollumfänglich geklärt. Um die Phänomene und Einflussgrößen der Rissausbreitung und -initiierung im VHCF-Bereich zu untersuchen, wurden innerhalb dieser Arbeit systematische Experimente und numerische Simulationen durchgeführt.

Zur Untersuchung des Einflusses von Seewasser wurden Ermüdungsversuche im VCHF-Bereich mit unterschiedlichen Stählen bis  $2 \cdot 10^9$  Zyklen durchgeführt. Zur Realisierung der Versuche wurde der vorhandene Ultraschallprüfstand um eine Testkammer für Unterwasserversuche erweitert und die am Lehrstuhl für Strukturmechanik entwickelte Steuerungssoftware UFATES<sup>VAL</sup> optimiert und angepasst.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Bewertung des Spannungsverhältnisses sowie der aufgetragenen Betriebsbelastung anhand der rekonstruierten Standardlastspektren WISPER und FELIX. Die bruchauslösenden Defekte des getesteten Vergütungsstahls wurden untersucht, vermessen und die resultierende Wöhlerlinie nach dem  $\sqrt{\text{area}}$ -Konzept ausgewertet. Mit der Berechnung des Völligkeitsmaßes der Kollektive wurde ein Term zur Erweiterung des  $\sqrt{\text{area}}$ -Konzepts vorgeschlagen, um den Einfluss bei variabler Amplitudenbelastung zu berücksichtigen. Zusätzlich wurden die Bruchflächen einzelner Versuche auf die Ausbildung einer Fine Granular Area (FGA) untersucht, deren Relevanz im VHCF-Bereich damit zu begründen ist, dass in vielen Studien ein Zusammenhang zur Lebensdauer belegt wird. So wird davon ausgegangen, dass 90 % - 99 % der Lastzyklen während der Ermüdungsbelastung im Bereich der FGA stattfinden. Außerdem werden im Bereich der FGA unter der Bruchfläche Veränderungen der Mikrostruktur beobachtet, deren Einfluss auf den Ermüdungsriß nicht geklärt ist.

Mit dem Ziel einen Beitrag zur Klärung des Bildungsmechanismus der FGA zu leisten, wurden mithilfe der additiven Fertigung künstliche Fehlstellen innerhalb von Ermüdungsproben

aus Ti6Al4V positioniert, um sowohl die Rissinitiierung als auch die Bildung einer FGA um den eingebrachten Defekt zu provozieren. Anhand von FIB-Untersuchungen, metallischen Schliffen und dem Cross Section Polishing Verfahren konnten u. a. durch die Ausbildung von Mikroschäden deutliche Hinweise einer FGA-Bildung in der Umgebung einer prozessinduzierten Pore und direkt unter der Bruchfläche des Hauptrisses detektiert werden.

Zur Erklärung der Phänomene im VHCF-Bereich und der Modellansätze zur FGA-Bildung wurde ein rotationssymmetrisches Rissfortschrittsmodell mit elastisch-plastischem Materialverhalten entwickelt, das die Gegebenheiten der Rissausbreitung im Inneren einer VHCF-Probe ausgehend von einer sphärischen Fehlstelle simuliert. Es wurde sowohl der Einfluss des Rissschließens bei unterschiedlichen  $R$ -Verhältnissen als auch die auftretenden lokalen Kontaktspannungen auf den Rissflanken bei konstanter und variabler Amplitudenbelastung untersucht. Zudem wurde ein Schädigungswert vorgeschlagen, der auf den durchschnittlichen Kontaktspannungen und der Kontakthäufigkeit der einzelnen Positionen auf der Rissflanke beruht und damit eine integrale Beurteilung der Rissflankenschädigung zulässt. Die Auswertung der numerisch ermittelten Rissöffnungswerte und der Kontaktspannungen stützen das Numerous Cyclic Pressing (NCP) Modell zur FGA-Bildung von *Hong et al.*