

# 1 Einleitung

Aktuelle Bestrebungen zur effizienten und ressourcenschonenden Auslegung von Zahnradgetrieben verfolgen das Ziel einer Gewichts- und Baugrößenreduktion. Infolge dessen steigt die Leistungsdichte des Getriebes, da entweder höhere Leistungen bei gleicher Baugröße oder gleichbleibende Leistungen über ein kompakteres Getriebe gewandelt werden. Es resultieren erhöhte Anforderungen an die Tragfähigkeit der Zahnradstufen. Die oberflächennahe Anstrengung der Zahnflanke wurde in Forschung und Industrie umfassend untersucht und erfolgreich reduziert. Es existieren Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Beanspruchung im Bereich der oberflächennahen Randzone (z.B. Gleit-/Polierschleifen, Verfestigungsstrahlen, hochadditivierte Schmierstoffe etc.). Die Maßnahmen zur Beanspruchungsreduktion im oberflächennahen Bereich der Zahnflanke führten zu einer Verschiebung des Anrisses hin zu hohen Werkstofftiefen und dem vermehrten Auftreten von Zahnflankenbrüchen.

Zahnflankenbrüche sind ein Ermüdungsschaden im hohen Lastspielzahlbereich und führen zu einem Totalausfall des Getriebes. Zur Vermeidung von Zahnflankenbrüchen adressieren jüngste Forschungsaktivitäten die Erhöhung der *Beanspruchbarkeit* in der Werkstofftiefe (z.B. Erhöhung der Werkstofffreiheit, Optimierung der Einsatzhärtetiefe etc.). Eine reproduzierbare Erzeugung von Zahnflankenbrüchen ist aktuell nur auf dem Zwei-Wellen-Verspannungsprüfstand unter Verwendung spezieller Zahnradgeometrien möglich, da die zum Zahnflankenbruch führenden Mechanismen der *Beanspruchung* unzureichend erforscht sind. Daher gibt es weder die Möglichkeit der Auslegung einer gezielt zahnflankenbruchkritischen Prüfverzahnung, noch die Möglichkeit der geometrischen Optimierung einer Praxisverzahnung zur Vermeidung von Zahnflankenbrüchen. Die Kenntnis über den Beanspruchungszustand der Zahnflanke in hoher Werkstofftiefe ist notwendig, um geeignete Berechnungsmethoden zu entwickeln und eine gezielte Optimierung hinsichtlich der Schadensart zu ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit wird diese Wissenslücke geschlossen, indem die zahnflankenbruchkritische Beanspruchung analysiert und in einen Analogieversuch überführt wird. Dazu wird ein Berechnungsmodell zur Vorhersage der Zahnflankenbruchtragfähigkeit entwickelt und validiert. Das theoretische Fundament wird durch den Aufbau und die Inbetriebnahme eines Analogieprüfstandes untermauert. Der wissenschaftliche Mehrwert des Analogieversuches besteht in der von anderen Schadensarten losgelösten Untersuchung des Zahnflankenbruches. Durch den Analogieversuch kann die Beanspruchung der Zahnflanke in hoher Werkstofftiefe ohne tribologische Einflüsse auf die oberflächennahe Randzone reproduziert werden. Der wirtschaftliche Mehrwert des Analogieversuches besteht in der Möglichkeit einer effizienten, kosten-günstigen und statistisch abgesicherten Prüfung der Zahnflankenbruchtragfähigkeit. Insbesondere für die Prüfung von Großgetrieben bietet der Analogieversuch einen erheblichen Mehrwert, da sie aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit großer Fehlstellen im Gefüge vermehrt von Zahnflankenbrüchen betroffen sind und eine experimentelle Prüfung wirtschaftlich nicht umsetzbar ist.

## 1 Introduction

Current efforts to design efficient and resource-saving gearboxes aim the reduction of weight and size. As a result, the power density of the gearbox increases, since either higher power is to be converted within the same size or the same power is to be converted via a more compact gearbox. This results in increased demands on the load-carrying capacity of the gear stages. The near-surface stress on the tooth flank has been extensively investigated and successfully reduced in research and industry. There are guidelines for reducing the flank stress in the area of the near-surface zone (e.g. superfinishing/polishing, shot peening, highly additive lubricants etc.). The measures taken to reduce stress in the near-surface zone of the tooth flank led to a shift in the crack nucleation towards high material depths and consequently to an increased occurrence of tooth flank fractures.

Tooth flank fractures are fatigue damages in the high load cycle range and lead to a total gearbox failure. To avoid tooth flank fractures, recent research activities address the increase of the material strength in high material depth (e.g. increase of the material cleanliness, optimization of the case hardening depth etc.). Reproducible generation of tooth flank fractures is currently only possible when using a back-to-back test rig with special gear geometries, since the stress mechanisms leading to tooth flank fracture have not been sufficiently investigated. Therefore, there is neither the possibility of designing a test gear that is specifically critical to tooth flank fracture, nor the possibility of optimizing a gear geometry in application in order to avoid tooth flank fractures. The knowledge of the flank stress state in high material depth is necessary to develop suitable calculation methods in order to enable a targeted optimization with respect to this type of damage.

In the present work, this knowledge gap is closed by analyzing the tooth flank fracture critical stress and transferring it to an analogy test. For this purpose, a calculation model for predicting the tooth flank fracture load-carrying capacity is developed and validated. The theoretical basis is extended by the construction and commissioning of an analogy test rig. The scientific added value of the analogy test consists of the experimental investigation of tooth flank fractures detached from other types of damage. The analogy test allows the stress reproduction on the tooth flank in high material depth without tribological influences on the surface-near flank zone. The economic added value of the analogy test lies in the possibility of efficient, cost-effective and statistically validated testing of the tooth flank fracture load-carrying capacity. The analogy test offers considerable added value, particularly for testing large gearboxes, since they are more affected by tooth flank fractures due to the higher probability of large defects in the material and experimental testing is not economically feasible.