

## The Influence of the Production Process on Operational Stability

The production process has a decisive influence on the vibration resistance behavior of a material as well as the operational stability of a component. Essential influencing factors on vibration

resistance that are determined by the production are the type, fineness and distribution of the microstructure as well as possible excretions, size and distribution of possible structural discontinuity such as pores and oxide inclusions. Furthermore there are induced residual volume stress and the characteristics of near-surface areas, characterized by residual stress distribution, surface roughness as well as the occurrence of possible structural degeneration. In order to now enable holistic optimization of operational stability and thus lightweight construction of a component, it is absolutely essential to set up a continuous simulation chain – from thermomechanical manufacturing simulation all the way to computer-supported durability forecasts.

# Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Betriebsfestigkeit

Dipl.-Ing. Dr. mont. Bernd Oberwinkler,  
Leoben

Der Fertigungsprozess ist einer der maßgeblichen Einflüsse auf das Schwingfestigkeitsverhalten eines Werkstoffs und

die Betriebsfestigkeit eines Bauteils. Wesentliche Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit, die durch die Fertigung festgelegt werden, sind die Art, Feinheit und Verteilung der Mikrostruktur und mögliche Ausscheidungen, Größe und Verteilung eventuell auftretender Gefügeengängen wie zum Beispiel Poren und Oxideinschlüsse. Weiterhin können induzierte Volumeneigenstressungen, die Eigenschaften oberflächennaher Gebiete, charakterisiert durch Eigenspannungsverteilung, Oberflächenrauheit oder dem Auftreten etwaiger Gefügeentartungen zu den Einflussgrößen gezählt werden. Um eine ganzheitliche Optimierung der Betriebsfestigkeit und somit den Leichtbau eines Bauteils zu ermöglichen, ist es unumgänglich, eine durchgängige Simulationskette – von der thermomechanischen Fertigungssimulation bis zur computerunterstützten Lebensdauervorhersage – aufzubauen.

### Einflüsse auf die Betriebsfestigkeit

Das Betriebsfestigkeitsverhalten von Bauteilen und deren Lebensdauer im Betrieb wird durch eine Vielzahl von Einflüssen bestimmt (Bild 1), von denen einige wiederum maßgeblich durch den Fertigungsprozess gesteuert werden. Als erster wesentlicher Einfluss auf die Betriebsfestigkeit ist der gewählte Werkstoff beziehungsweise die Legierung zu sehen. Mit dem Werkstoff spielt auch die eingestellte Mikrostruktur inklusive möglicher Ausscheidungen, charakterisiert durch ihre Art, Feinheit, Form, Textur und Verteilung, eine zentrale Rolle. So führen zum Beispiel kleinere Korngrößen in der Regel zu höheren

Schwingfestigkeiten, wohingegen größere Körner die Kriechbeständigkeit erhöhen können. Sowohl die Mikrostruktur als auch die Ausscheidungen werden dabei durch den Fertigungsprozess und speziell durch gezielte Wärmebehandlungen eingestellt, weshalb sie als erster wichtiger Fertigungseinfluss auf die Betriebsfestigkeit angesehen werden können.

Als weiterer maßgeblich durch den Fertigungsprozess gesteuerter Einfluss sind etwaige Inhomogenitäten, wie beispielsweise Poren, nichtmetallische Einschlüsse oder Seigerungen zu nennen. Häufigkeit,

Größe, Lage und Form solcher Fehlstellen, die entscheidend das Betriebsfestigkeitsverhalten beeinflussen, werden durch die Ur- und Umformprozesse, die ein Bauteil während seiner Fertigung erfährt, bestimmt. Zum Beispiel wirken im Gießprozess entstandene Poren als Anrissstelle bei Ermüdungsvorgängen und senken damit die Betriebsfestigkeit. Bei geschmiedeten Bauteilen kann unter anderem die Lage von Mikrosegmenten in Bezug auf die Hauptbelastungsrichtung die Schwingfestigkeit im zeitfesten und im dauerfesten Bereich maßgeblich beeinflussen [Fro06].

## Einflüsse auf die Betriebsfestigkeit eines Bauteils

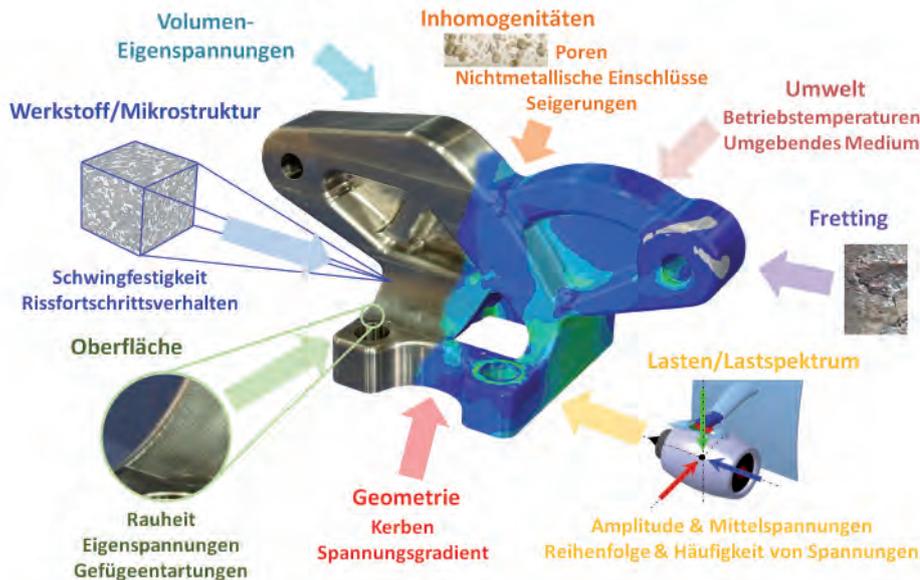


Bild 1: Einflüsse auf die Betriebsfestigkeit eines Bauteils.

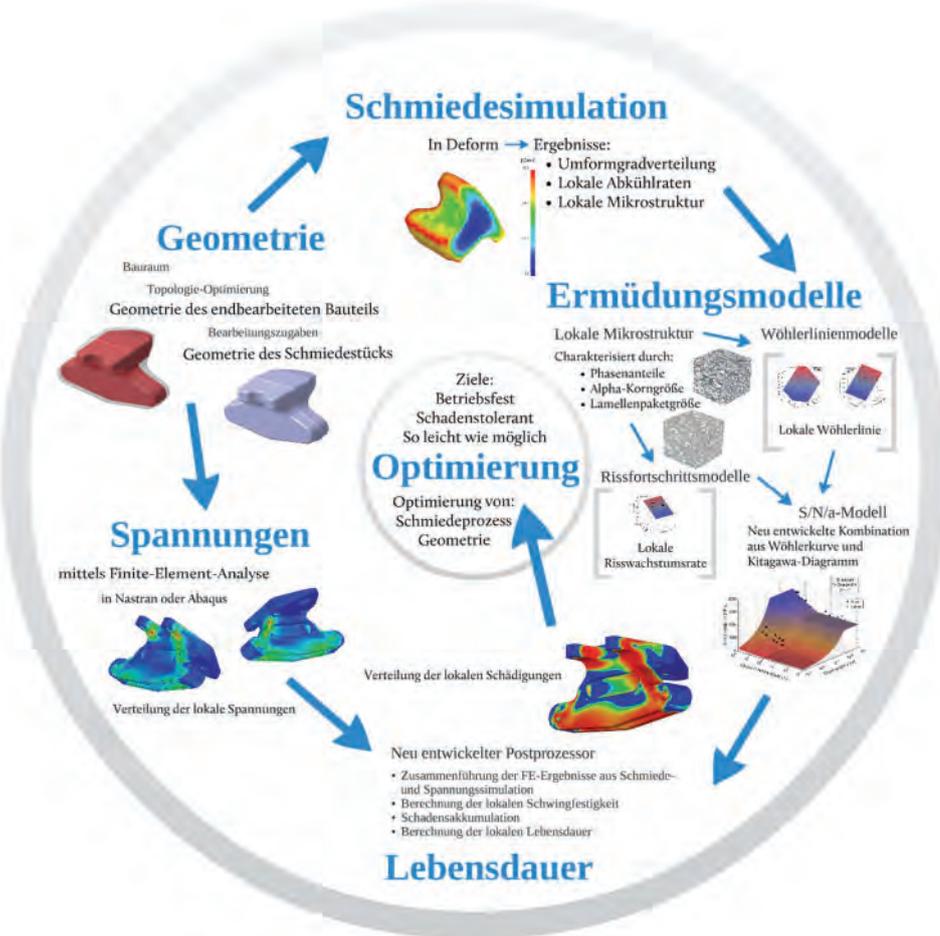
Während des Fertigungsprozesses können, speziell im Zug von Abkühlvorgängen nach Wärmebehandlungen oder nach Urbeziehungsweise Umformprozessen bei erhöhten Temperaturen, Volumeneigenspannungen in einem Bauteil induziert werden. Diese Volumeneigenspannungsfelder können sich nicht nur ungünstig im Falle einer abschließenden mechanischen Bearbeitung eines Bauteils in Form von Verzug bemerkbar machen, sondern auch die Betriebsfestigkeit negativ beeinflussen. Speziell in Bereichen mit Zugeigenspannungen kann sich das Spannungsverhältnis  $R$  (Verhältnis aus Unter- zu Oberspannung), ein Maß für die Höhe der Mittelspannung einer schwingenden Beanspruchung, zu höheren Werten verschieben, was in der Regel zu einer kleineren Spannungsamplitude, das heißt zu einer niedrigeren Schwingfestigkeit, führt.

Als letzter direkter Einfluss des Fertigungsprozesses auf die Betriebsfestigkeit ist die Oberflächenbearbeitung beziehungsweise der daraus resultierende Zustand der oberflächennahen Randzone zu nennen. Dieser wird durch Rauheit, Eigenspannungsverteilung, Versetzungsdichte und Gefügestand, beziehungsweise das Vorhandensein von Beschichtungen charakterisiert. Der oberflächennahen Randzone kommt in der Betriebsfestigkeit eine besondere Bedeutung zu, da Ermüdungsanrisse oftmals in diesen Bereichen, bedingt beispielsweise durch Spannungsüberhöhungen infolge von Kerben oder Biegelastfälle, entstehen. Daher wirken sich zum Beispiel Druckeigenspannungen in der Randschicht besonders positiv auf die Zeitfestigkeit aus, da der Anriss unter die Oberfläche verlagert wird und die Ermüdungsrissausbreitung durch die Eigenspannungen, eventuell auch durch die Rissausbreitung, ohne Kontakt zu dem „korrosiven“ Medium Umgebungsluft

(relevant zum Beispiel bei Titanlegierungen), verlangsamt wird [Obe11].

Die Geometrie des Bauteils wirkt sich ebenfalls maßgeblich auf die Betriebsfestigkeit aus. So resultieren beispielsweise Kerben in einer Spannungskonzentration und in einem Spannungsgradienten. Die Spannungsüberhöhung führt zu einer höheren lokalen Beanspruchung des Werkstoffs, gleichzeitig kann aber auch die Beanspruchbarkeit des Werkstoffs infolge einer Stützwirkung durch den Spannungsgradienten steigen. Diese beiden Effekte überlagern sich und beeinflussen so die Betriebsfestigkeit eines Bauteils. Das Design eines Bauteils wird auch durch die Fertigung beeinflusst, da dem Konstrukteur je nach gewähltem Fertigungsprozess unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen.

Alle übrigen Einflüsse auf die Betriebsfestigkeit eines Bauteils haben keinen direkten Bezug mehr zu dessen Fertigung, dafür aber zu dessen Einsatz. Hier ist in erster Linie das Lastspektrum – auftretende Amplituden- und Mittelspannungen, sowie deren Häufigkeit, Frequenz, Reihenfolge und Schwingform – zu nennen. Des Weiteren haben Umwelteinflüsse wie Temperatur oder umgebendes Medium – inklusive etwaiger Korrosionsvorgänge – einen maßgeblichen Einfluss auf das Betriebsfestigkeitsverhalten. An Verbindungsstellen zu anderen Bauteilen kann zudem noch Fretting-Wear, -Fatigue, oder -Corrosion auftreten [Kap05]. Darunter versteht man Verschleißprozesse, die durch oszillatorische Mikrorelativbewegungen zweier Kontaktflächen verursacht werden. Zusätzlich können diese noch mit Ermüdungs- und/oder Korrosionsprozessen überlagert sein. Letztere können beispielsweise die Rissbildungsphase erheblich beschleunigen und dadurch die Lebensdauer eines Bauteils



Bauteils in der computerunterstützten Lebensdauerprognose zu integrieren und dessen Optimierungspotenzial zu nutzen. Dies wurde am Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau der Montanuniversität Leoben in Zusammenarbeit mit Böhler Schmiedetechnik GmbH & CO. KG Kapfenberg am Beispiel von geschmiedeten Strukturbauteilen aus der Titanlegierung Ti-6Al-4V (Bild 2) sowie für Triebwerkskomponenten aus der Nickelbasislegierung IN718 realisiert [Obe10], [Mad11].

Idealerweise startet man die Entwicklung eines Struktur(leicht)bauteils mit der Definition des Bauraums und der entsprechenden Randbedingungen, zum Beispiel der Anschlussmaße an angrenzende Bauteile, sowie mit einer anschließenden Topologieoptimierung (Bild 2). Letztere setzt das Vorhandensein von Lastdaten voraus. Durch konstruktive Überarbeitung der optimierten Geometrie unter Berücksichtigung der jeweiligen Fertigungsmöglichkeiten erhält man schließlich die Geometrie des Bauteils und nach Berücksichtigung der Bearbeitungsangaben die Geometrie des Schmiedestücks. Auf Basis der Lastdaten und der Bauteilgeometrie lässt sich die Spannungsverteilung im Bauteil für verschiedene Lastfälle mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode berechnen. Somit erhält man die lokale Beanspruchung in jedem Punkt des Bauteils.

Bild 2: Bauteiloptimierung unter Einbeziehung des Fertigungsprozesses am Beispiel von geschmiedeten Strukturteilen aus Ti-6Al-4V.

stark verkürzen. Da der Oberflächenzustand auch bei Fretting eine entscheidende Rolle spielt, ist hier auch ein indirekter Einfluss der Fertigung gegeben.

**Bauteiloptimierung**

Um eine ganzheitliche Optimierung und

damit den Leichtbau eines Bauteils zu gewährleisten, ist es notwendig, sämtliche relevanten Einflüsse auf die Betriebsfestigkeit simulationstechnisch zu berücksichtigen. Durch den maßgeblichen Einfluss der Fertigung auf die Betriebsfestigkeit ist es unumgänglich, auch den Herstellprozess eines

Zur Ermittlung der Lebensdauer des Bauteils muss dieser lokalen Beanspruchung eine lokale Beanspruchbarkeit des Werkstoffs gegenübergestellt werden. Letztgenannte muss sämtliche relevanten Einflüsse, insbesondere auch jene der Fertigung, mitberücksichtigen. Dazu wurden alle essenziellen Einflüsse auf das Schwingfestigkeitsverhalten – in diesem Fall Mikrostruktur, Spannungsgradient, Mittelspannung, Oberflächenzustand, mehrachsiger Spannungszustand, Temperaturen von minus 50 °C bis plus 350 °C – anhand von Probenversuchen charakterisiert und in entsprechenden Ermüdungsmodellen eingebunden.

Auf Basis einer Schmiedesimulation – inklusive etwaiger Wärmebehandlungen – lässt sich neben Abkühlraten, Umformgradverteilung oder Eigenspannungen auch die lokale Mikrostruktur berechnen [Sto04]. Die Simulation der Mikrostruktur erfolgt in Deform auf Basis von semi-empirischen Modellen. Diese haben den Vorteil gegenüber physikalischen Modellen, innerhalb ihrer Grenzen gut zu konvergieren und die FE-Simulation nicht signifikant zu verlangsamen. Die dazu notwendigen werkstoffabhängigen Parameter stammen aus experimentellen Untersuchungen wie beispielsweise Wärmebehandlungsversuchen, Druck- beziehungsweise Zugversuchen mit konstanter Dehnrate sowie quantitativer Gefügeanalysen.

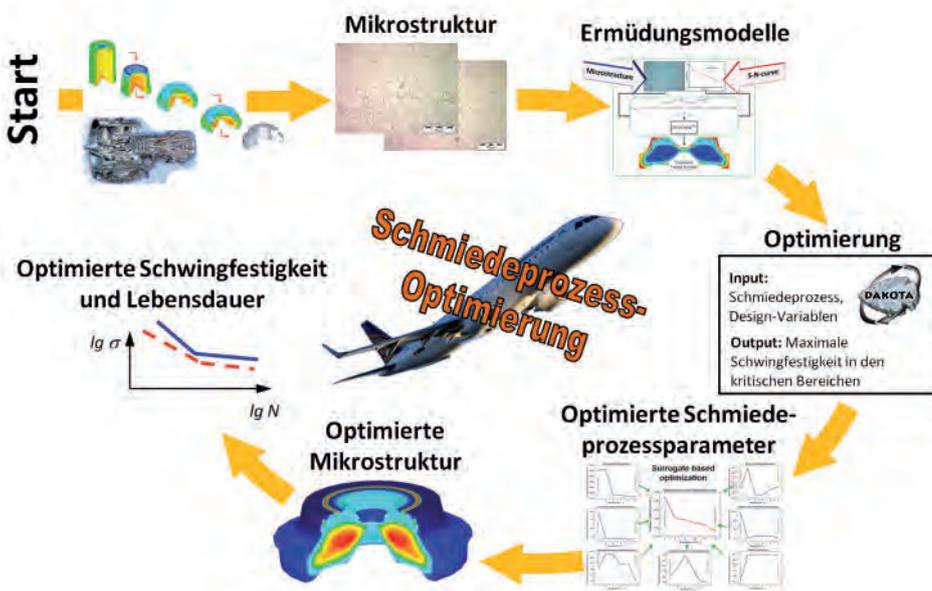


Bild 3: Schmiedeprozessoptimierung am Beispiel einer IN718 Turbinenscheibe.

Bilder: Autor

Diese Informationen – Phasenanteile, Korngröße, Lamellengröße – dienen als Input für die Ermüdungsmodelle, die diese mikrostrukturellen Kenngrößen mit der Schwingfestigkeit verknüpfen. So erhält man für jeden Knoten des Finite-Elemente-Netzes eine mikrostrukturabhängige Wöhlerlinie, die noch entsprechend der anderen Einflussgrößen, zum Beispiel lokales Spannungsverhältnis, modifiziert wird und in der lokalen Beanspruchbarkeit des Werkstoffs resultiert. In einer Schädigungsrechnung werden nun die lokale Beanspruchung und die lokale Beanspruchbarkeit gegenübergestellt und eine Schädigungsverteilung im Bauteil berechnet. Die Stellen mit der höchsten Schädigung sind als kritisch anzusehen und bestimmen die Lebensdauer des Bauteils. Zur bestmöglichen Nutzbarmachung für den Kunden wurde dazu ein eigener Postprozessor entwickelt, der die Finite-Elemente-Ergebnisse aus Schmiede- und Spannungssimulation zusammenführt, die lokale Schwingfestigkeit ermittelt und abschließend die Schädigungsverteilung im Bauteil berechnet.

Diese Schädigungsverteilung dient nun als Grundlage für die Optimierung des Bauteils hinsichtlich der Lebensdauer. Durch den geschlossenen Optimierungskreislauf kann der Fertigungsprozess, in diesem Fall der Schmiedeprozess, hinsichtlich Bauteillebensdauer optimiert und so die lokale Beanspruchbarkeit gesteigert werden (Bild 3). Gleichzeitig kann mittels Gestaltoptimierung an kritischen Stellen die Spannungskonzentration und damit die lokale Beanspruchung reduziert werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, mittels weiterer Topologieoptimierungen ein kosteneffizientes Optimum zwischen Lebensdauer und Bauteilgewicht zu finden.

## Fazit

Der Fertigungsprozess bestimmt maßgeblich das Betriebsfestigkeitsverhalten eines Bauteils – sei es durch die resultierende Mikrostruktur, durch Eigenspannungen, oder auch durch Inhomogenitäten. Daher ist es im Sinne von ganzheitlichem Leichtbau zwingend notwendig, bei der computerunterstützten Optimierung der Betriebsfestigkeit auch den Fertigungsprozess detailliert einzubeziehen. Dazu ist der Aufbau einer durchgängigen Simulationskette von der thermomechanischen Fertigungssimulation bis zur computerunterstützten Lebensdauer vorhersage erforderlich. Das Resultat sind Bauteile, die die widersprüchlichen Ziele der maximalen Kosteneffizienz, des minimalen Gewichts und der maximalen Lebensdauer bestmöglich erfüllen. ■



Dipl.-Ing. Dr. mont.  
Bernd Oberwinkler

Das hier vorgestellte Forschungsprojekt wurde mit dem Lufthansa Cargo Climate CareAward 2011 ausgezeichnet.

## Literatur

[Fro06] Froeschl, J.; Lamik, A.; Eichlseder, W.: The influence of technological effects and multiaxial loading on the fatigue strength of QT-steels. In: Fatigue 2006, Proceedings of the 9th International Fatigue Congress, Atlanta, Georgia, USA, 14.-19.05.2006, Elsevier

[Kap05] Kapsa, P.; Fouvry, S.; Vincent, L.: Basic Principles of Fretting. In: Wear – Materials, Mechanisms and Practice, Ed. Stachowiak G.W., 2005, S. 317–338

[Mad11] Maderbacher, H.; Riedler, M.; Oberwinkler, B.; Gaenser, H.-P.; Tan, W.; Eichlseder, W.: Generating a closed simulation chain for hot forged aerospace components to optimize fatigue behaviour. In: Ti-2011, Proceedings of the 12th World Conference on Titanium, Beijing, China, 19.-24.06.2011

[Obe10] Oberwinkler, B.: Fatigue-Proof and Damage Tolerant Lightweight Design of Ti-6Al-4V Forgings”, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2010

[Obe11] Oberwinkler, B.; Riedler, M.; Eichlseder, W.: Importance of Residual Stresses and Surface Roughness Regarding Fatigue of Titanium Forgings, Fatigue and Fracture Mechanics, 37th Volume, STP 1526, S. 489-503, ASTM International, 2011

[Sto04] Stockinger, M.; Tockner, J.: Microstructure modeling as a tool to optimize forging of critical aircraft parts. In: Materials Science Forum, Vols. 467-470 (2004), S. 683-688

## Weiterführende Literatur zum Forschungsprojekt

M. Stockinger; J. Tockner; „Optimizing the Forging of Critical Aircraft Parts by the Use of Finite Element Coupled Microstructure Modeling“, Proceedings of the Sixth International Special Emphasis Symposium on Superalloys 718, 625, 706 & Derivatives, eds. E.A. Loria (Warrendale, PA, USA: The Minerals, Metals and Materials Society, 2005), S. 87-95.

M. Stockinger; M. Riedler; D. Huber; „Effect of Process Modeling on Product Quality of Superalloy Forgings“, Proceedings of the 7th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives, Warrendale, PA: The Minerals, Metals and Materials Society, 2010, published on CD-ROM.