



## Arbeitsblatt

### **Nachweis verbesserter Werkstoffeigenschaften am Bauteil Zahnrad und Umsetzung in praktisch angewandte Berechnungsverfahren (HiPerComp-Teilprojekt P4)**

AiF-Nr.:  
16688 N

Obmann:  
Dr.-Ing. Simone Lombardo

beteiligte Unternehmen  
Es haben über 40 Unternehmen das Gemeinschaftsvorhaben "HiPerComp" begleitet.

Laufzeit:  
01.06.2012 – 31.05.2015

Erstelldatum:  
15.01.2016

Forschungsstelle:  
Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG), TU München

Projektleiter:  
Dr.-Ing. Thomas Tobie

Sachbearbeiter:  
Dipl.-Ing. Carolin Wickborn

Forschungsvereinigung:  
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss

#### **Zielsetzung und Lösungsweg**

Aufgrund der steigenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Zahnrädern leitet sich die Forderung nach einer Steigerung der Beanspruchbarkeit und/oder einer Erhöhung der Schadenstoleranz der eingesetzten Werkstoffe ab.

Das vorliegende Forschungsvorhaben ist ein Teilprojekt des von der DFG und AiF unter dem Kennzeichen 16688 N gemeinsam geförderten Gemeinschaftsvorhabens „HiPerComp“ (High Performance Components), in dem mehrere Forschungsinstitute grundlagen- sowie anwendungsorientiert in eigenständigen, jedoch aufeinander aufbauenden Forschungsvorhaben zusammenarbeiten, um die eingangs erwähnten übergeordneten Ziele durch neue Werkstoff-/Wärmebehandlungskonzepte zu erreichen.

In dem hier vorliegenden Vorhaben sollen die allgemeinen werkstoffbasierten Modellvorstellungen, die in der ersten Phase des Gesamtvorhabens in

einem interdisziplinären Vorhaben mit dem Kennwort „Berechnungsmodelle Werkstoffbeanspruchbarkeit“ unter Federführung der FZG, insbesondere für die neuen Werkstoff- und Wärmebehandlungskonzepte weiterentwickelt werden, auf das konkrete Bauteil Zahnrad angewandt und verifiziert werden.

Das Potenzial der im Rahmen des Gemeinschaftsvorhabens entwickelten Werkstoff-/Wärmebehandlungskonzepte soll im Weiteren am Bauteil Zahnrad experimentell untersucht und bewertet werden.

Die Erkenntnisse werden in den Stand des Wissens eingeordnet und finden Eingang in genormte und erweiterte Berechnungsverfahren. Dadurch kann sichergestellt werden, dass verbesserte Werkstoffeigenschaften, sowie gegebenenfalls zusätzliche relevante werkstoffspezifische Einflussgrößen zukünftig von Entwicklern und Konstrukteuren bei der Bauteilauslegung berücksichtigt werden können.

#### **Ergebnisse**

Anhand von Voruntersuchungen ergaben sich 3 Werkstoffkonzepte (Kornfeinung, Festigkeit, Ausscheidungshärtung), die in diesem Projekt hinsichtlich ihrer Zahnradtragfähigkeit untersucht werden. Alle Konzepte basieren in ihrer chemischen Zusammensetzung im Wesentlichen auf dem für Zahnräder größerer Baugröße üblichen Werkstoff 18CrNiMo7-6, der je nach Konzept bestimmte

Legierungselemente in modifizierter Zusammensetzung beinhaltet, wie z. B. einen erhöhten Niob-, Nickel-, Silizium- oder Kupferanteil. Das Konzept der Ausscheidungshärtung wurde in 2 Wärmebehandlungsvarianten (J17-180 bzw. J17-480, je nach Anlasstemperatur von 180°C bzw. 480°C) in das Prüfprogramm aufgenommen. Zudem wird eine Referenzvariante J10 untersucht, die sich durch

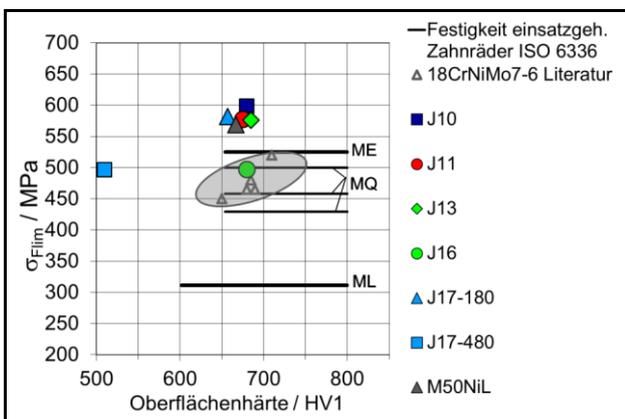
einen hohen Reinheitsgrad des für Zahnräder gängigen Werkstoffs 18CrNiMo7-6 auszeichnet, sowie ein auf dem freien Markt verfügbarer hochlegierter Werkstoff aus der Luftfahrtanwendung, M50NiL, als Benchmark. Es ergeben sich insgesamt 7 Prüfvarianten (s. Tabelle 1).

Bez.	Erläuterung	
J10	18CrNiMo7-6	Referenz
M50NiL	M50NiL	Benchmark
J11	18CrNiMo7-6 + Nb	Kornfeinung
J13	18CrNiMo7-6 + Si + Ni	Festigkeit (Labor)
J16	18CrNiMo7-6 + Si + Ni	Festigkeit (Industrie)
J17-180	18CrNiMo7-6 + Cu (180°C)	Ausscheidungshärtung
J17-480	18CrNiMo7-6 + Cu (480°C)	Ausscheidungshärtung

**Tabelle 1:** Übersicht Prüfvarianten

Diese werden zunächst in Stichversuchen hinsichtlich ihrer Zahnfußtragfähigkeit sowie mit Ausnahme der Varianten J13 und J17 auch hinsichtlich ihrer Zahnflankentragfähigkeit untersucht. Anhand dieser Stichversuche werden anschließend 2 vielversprechende Varianten ausgewählt und als Hauptvarianten mit einer umfangreicheren Versuchsbelegung zur vollständigen Wöhlerlinie zur Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeit ergänzt. Abschließend werden diese 2 Varianten auch hinsichtlich ihrer Grauflecken-, Fress- und Verschleißtragfähigkeit geprüft.

Die Ergebnisse zur Zahnfußtragfähigkeit wurden unter Berücksichtigung von Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie bzw. Baugröße in das Festigkeitskennfeld der Normen DIN 3990, ISO 6336 eingeordnet, das sich ergebende Diagramm zeigt Bild 1.



**Bild 1:** Einordnung der ermittelten Versuchsergebnisse zur Zahnfuß-Dauerfestigkeit in das Festigkeitsfeld nach ISO 6336

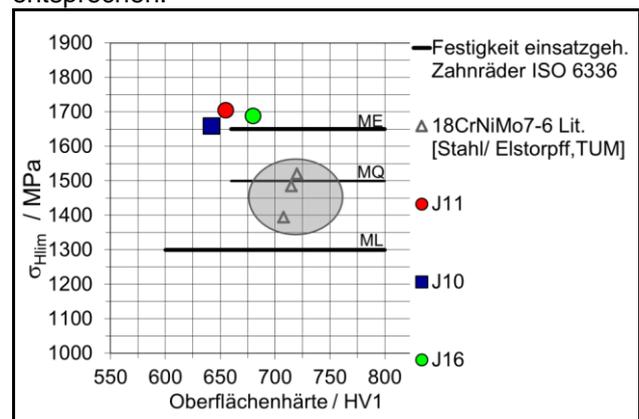
Alle Varianten zeigen eine hohe Zahnfußtragfähigkeit entsprechend der Werkstoffqualität MQ bis z.T. oberhalb der höchsten Werkstoffqualität ME.

Die Varianten J17-480 und J16 liegen mit ca.  $\sigma_{Flim} = 500$  MPa im oberen Bereich der Werkstoffqualität MQ. Die geringe Randhärte der Variante J17-480 ist in den hohen Anlasstemperaturen und -dauern bei der Wärmebehandlung begründet und wurde im Rahmen dieses Projekts für diese Variante vorab wissentlich in Kauf genommen. Die Varianten J10, J11, M50NiL, J13 und J17-180 zeigen eine vergleichbare hohe Zahnfußtragfähigkeit von  $\sigma_{Flim} = 570...600$  MPa.

Bei den Varianten J13 und J16 handelt es sich um das gleiche Werkstoffkonzept in zwei unterschiedlichen Schmelzchargen (J13 Laborschmelze, J16 industriell hergestellt) und unterschiedlichen Baugrößen. Der Unterschied in der Zahnfußtragfähigkeit dieser beiden Varianten ist vermutlich darin begründet, dass die Variante J13 analog den anderen untersuchten Werkstoffen eine sehr hohe Reinheit aufweist, während die Variante J16 einen üblichen Reinheitsgrad aufweist.

Zu beachten ist hierbei, dass alle hier untersuchten Varianten entsprechend der gemessenen Eigenspannungszustände im Zahnfußbereich einem gezielt festigkeitsgestrahlten Zustand entsprechen, während die Angaben des Festigkeitskennfeldes nach Norm unter Berücksichtigung der Werkstoffqualitäten für reinigungsgestrahlte Zustände gelten.

Die Ergebnisse zur Grübchentragfähigkeit wurden unter Berücksichtigung der Kennwerte zu Geometrie und Betriebsbedingungen ausgewertet und in das Festigkeitskennfeld der Norm DIN 3990, ISO 6336 eingeordnet, das sich ergebende Diagramm zeigt Bild 2. Darüber hinaus sind in Bild 2 auch Literaturwerte für übliche einsatzgehärtete Prüfräder dargestellt, die mit einer ermittelten Grübchentragfähigkeit von  $\sigma_{Hlim} = 1400...1500$  MPa den Angaben nach Norm für die mittlere Werkstoffqualität MQ entsprechen.



**Bild 2:** Einordnung der ermittelten Versuchsergebnisse zur Grübchen-Dauerfestigkeit in das Festigkeitsfeld nach ISO 6336

Für die Variante M50NiL wurde aufgrund der geringen Versuchsbelegung keine Umwertung von 50% auf 1% Ausfallwahrscheinlichkeit nach Normbedingungen durchgeführt. Aufgrund der durchgeführten Versuche ist jedoch eine Grübchentragfähigkeit deutlich oberhalb der nach Norm angegebenen

Richtwerte der höchsten Werkstoffqualität ME zu erwarten.

Die Varianten J10, J11 und J16 zeigen eine hohe Grübchentragfähigkeit entsprechend der höchsten Werkstoffqualität ME des Festigkeitskennfelds bzw. darüber. Die Variante J10 ergab eine Grübchentragfähigkeit von  $\sigma_{Hlim} = 1660$  MPa und liegt damit knapp oberhalb der nach Norm angegebenen Richtwerte der höchsten Werkstoffqualität ME. Für die Variante J16 liegt die Grübchentragfähigkeit mit  $\sigma_{Hlim} = 1690$  MPa oberhalb der nach Norm angegebenen Richtwerte der höchsten Werkstoffqualität ME. Die Variante J11 zeigte mit  $\sigma_{Hlim} = 1705$  MPa ebenfalls eine höhere Grübchentragfähigkeit als nach Norm angegeben.

Damit zeigen die hier untersuchten Varianten J10, J11 und J16 insgesamt eine hohe Zahnflanken-tragfähigkeit.

### Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurden modifizierte Werkstoffkonzepte am Bauteil Zahnrad hinsichtlich ihrer Zahnradtragfähigkeit umfassend untersucht und bewertet. Es handelt sich hierbei um insgesamt 7 Prüfvarianten, die sich auf Basis des Werkstoffs 18CrNiMo7-6 durch das gezielte Zulegieren bestimmter Legierungselemente, wie z.B. Niob, Nickel, Silizium oder Kupfer, in ihrer chemischen Zusammensetzung sowie in Kombination mit der jeweils entwickelten Wärmebehandlung hinsichtlich ihres Potentials zur Festigkeitssteigerung und Schadenstoleranz unterscheiden.

Für alle Varianten wurden Zahnfußtragfähigkeitsversuche durchgeführt, sowie für 3 Varianten Versuche zur Grübchentragfähigkeit. Anschließend wurden für die zwei aussichtsreichen Varianten J11 und J16 auch Versuche zur Grauflecken-, Fress- und Verschleißtragfähigkeit durchgeführt.

Es zeigte sich für alle untersuchten Varianten eine hohe Zahnfußtragfähigkeit im Bereich der Werkstoffqualität MQ bzw. ME nach Norm, zum Teil sogar darüber. Damit konnten die nach Norm angegebenen höchsten Tragfähigkeitskennwerte reproduzierbar erreicht werden. Mit den Varianten J10, J11, J13 und J17-180 wurde eine Zahnfuß-Dauerfestigkeit von  $\sigma_{Flim} = \text{ca. } 550 - 600$  MPa im Bereich der höchsten Werkstoffqualität ME nach Norm erreicht. Diese Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit um ca. 10% gegenüber den Festigkeitskennwerten der Werkstoffqualität ME ist jedoch auch maßgeblich in dem vorliegenden Eigenspannungszustand begründet, der dem von gezielt festigkeitsgestrahlten Prüfrädern entspricht. Die Varianten J13 und J16 des Festigkeitskonzepts lassen aufgrund vermehrter Ausfälle durch innere Brüche auf eine geringe Schadenstoleranz schließen. Die kupferlegierte Variante J17-480 zeigt dagegen trotz geringer Randhärte eine gute

Zahnfußtragfähigkeit, sodass sich bei dieser Variante auf eine hohe Schadenstoleranz schließen lässt.

Für die Varianten J10, J11 und J16 wurde eine Grübchen-Dauerfestigkeit von  $\sigma_{Hlim} = \text{ca. } 1650 - 1700$  MPa ermittelt. Damit zeigen alle untersuchten Varianten reproduzierbar eine hohe Grübchentragfähigkeit oberhalb der nach Norm angegebenen Festigkeitskennwerte der höchsten Werkstoffqualität ME. Die für J11 und J16 ergänzend durchgeführten Versuche zur Grauflecken-, Fress- und Verschleißtragfähigkeit ergaben ebenfalls eine hohe Tragfähigkeit.

Ferner wurden im Rahmen dieses Projekts umfangreiche Arbeiten zur Erweiterung der Modellvorstellungen zur lokalen Werkstoffanstrengung durchgeführt. Diese wurden um den Einfluss des Zähigkeits- und Härteverhaltens unterschiedlicher Werkstoffe für die hier untersuchten Konzepte erweitert sowie anhand der durchgeführten Grübchentragfähigkeitsversuche verifiziert.

Zudem wurden umfangreiche theoretische Studien zur Erweiterung der Modellvorstellungen um die Berücksichtigung von Werkstoffdefekten bzw. unterschiedlichen Reinheitsgraden bei der Berechnung der lokalen Werkstoffgefährdung der Zahnflanke im Bauteil Zahnrad, aufbauend auf den Untersuchungen des vorangegangenen Teilprojekts P0, fortgeführt. Zur Berücksichtigung der spannungsüberhöhenden Wirkung von Werkstoffdefekten wurde zum einen der aus der Literatur am weitesten verbreitete Ansatz nach Murakami angewandt und überprüft, sowie ein vereinfachter Ansatz zur möglichen Erweiterung der Modellvorstellungen erarbeitet und vorgestellt. Darüber hinaus wurden bereits erste Untersuchungen mittels Extremwertstatistik durchgeführt, mit der ausgehend von einer erweiterten Reinheitsgradmessung eine Abschätzung des größten zu erwartenden Einschlusses im Bauteil Zahnrad in Abhängigkeit von dessen Baugröße bestimmt werden kann.

Die ermittelten Einschlussgrößen wurden zudem mit den in den Schadensfällen detektierten Einschlüssen verglichen. Es konnte eine gute Korrelation von den in Bruchflächen als schadensauslösende Einschlüsse detektierten Defekten und den mittels Extremwertstatistik ermittelten Kennwerten zu Defektgröße und Defektart ermittelt werden.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen kann in zukünftigen Arbeiten eine Korrelation zwischen ermitteltem Reinheitsgrad und größtem zu erwartenden Einschluss im beanspruchten Werkstoffvolumen eines Zahnrads erarbeitet werden, um den Einfluss verschiedener Werkstoffqualitäten zukünftig bereits in der Getriebeauslegungsphase berücksichtigen zu können.

## **Danksagung**

Das IGF-Vorhaben Nr. 16688 N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde 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.

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Kontakt:

Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG)  
TU München  
Boltzmannstr. 15  
D- 85748 Garching  
[www.fzg.mw.tum.de](http://www.fzg.mw.tum.de)

Dipl.-Ing. Carolin Wickborn  
Tel.: 089/ 289 10410  
Email: [wickborn@fzg.mw.tum.de](mailto:wickborn@fzg.mw.tum.de)