(2015)

1. Forschungsthema: Untersuchungen zum Fehlstellenversagen an

Zahnrädern und deren Einfluss auf die

Zahnradtragfähigkeit

1.1 Antragsteller/ Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau

Forschende Stelle: (FZ

Technische Universität München

Boltzmannstraße 15 85748 Garching

Institutsleitung: Prof. Dr.-Ing. K. Stahl

fzg@fzg.mw.tum.de

1.2 Vorgelegt von: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA)

Lyoner Straße 18 60528 Frankfurt

über

Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e. V.

(AVIF)

An der Pönt 48 40885 Ratingen

2. Forschungsthema: Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad II

(Kurztitel)

3. Forschungsziel:

In der heutigen industriellen Praxis ermöglichen optimierte Bearbeitungsschritte zur gezielten Einbringung von Druckeigenspannungen in die oberflächennahe Randschicht eine Steigerung der Zahnrad-, insbesondere auch der Zahnfußtragfähigkeit. Deren Auswirkung ist jedoch auf die äußerste Werkstückrandschicht begrenzt, weshalb tieferliegenden Werkstoffbereichen eine erhöhte Bedeutung zukommt. Dabei spielt sowohl hinsichtlich der Zahnfuß- als auch der Zahnflankentragfähigkeit u. a. die Häufigkeit und Verteilung von Fehlstellen (z. B. nichtmetallische Einschlüsse) eine wesentliche Rolle. Diese können - vor allem bei erhöhter Leistungsdichte auf Basis gesteigerter Festigkeitseigenschaften der oberflächennahen Randschicht – zu einer Rissinitiierung unterhalb der Bauteiloberfläche und somit zum Ausfall des Zahnrades führen. Dieses Schadensphänomen ist zwar bereits aus abgeschlossenen Forschungsvorhaben sowie in der Literatur bekannt, jedoch liegen dem Anwender bislang noch keine Kenntnisse zur gezielten Vermeidung dieser Schäden sowie deren Grenzwerten vor, weshalb das durch die eingebrachten Druckeigenspannungen erhoffte Tragfähigkeitspotential nicht zuverlässig genutzt werden kann. Es besteht daher Forschungsbedarf.

4. Gesamtkosten: 338.607,48 €

4.1 Beantragte Fördersum- 242.617,48 €

me:

5. Laufzeit- und Kostenplanung:

5.1 Laufzeit: 30 Monate

Laufzeitbeginn: 01. Juli 2016

5.2 Jahresraten: 1. Jahr: 87.905,21 €

2. Jahr: 154.546,12 € 3. Jahr: 96.156,15 €

6. Ergänzende Forschungs- Nein

förderung:

7. Wurde der Antrag an an- Nein

derer Stelle vorgelegt?



Lehrstuhl für Maschinenelemente Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau Prof. Dr.-Ing. K. Stahl



Abgrenzung der Inhalte des beantragten Forschungsvorhabens "Späte Zahnfußbrüche – Reinheitsgrad II" (A305) zu den abgeschlossenen Forschungsvorhaben AVIF A220, IGF 16662N und AVIF A243

Forschungsvorhaben AVIF A220:

Maßgebendes Ziel des Forschungsvorhabens A220 war die grundlegende Klärung der Fragestellung, inwieweit im Bereich erhöhter Grenzlastspielzahlen Brüche im Zahnfuß mit Rissausgang unterhalb der Oberfläche auftreten, und ob diese Schäden die Zahnfußdauerfestigkeit, die Versuchsstreuungen und den Verlauf der Wöhlerlinie bis in den Bereich höherer Lastspielzahlen gegenüber den bis dato vorliegenden Stand des Wissens beeinflussen. Zudem sollten ggf. maßgebende Einflussgrößen, die das Auftreten von Brüchen bei hohen Lastspielzahlen begünstigen, identifiziert werden.

Die Ergebnisse des Vorhabens belegen, dass für gehärtete Zahnräder mit hoher Leistungsanforderung und entsprechend hohen Druckeigenspannungen in der Randschicht (festigkeitsgestrahlte Zahnräder) die Zahnfußdauerfestigkeit maßgebend durch das Auftreten von Brüchen mit Rissausgang unterhalb der Oberfläche bestimmt wird, wobei diese Schäden in der Regel erst nach höheren Lastspielzahlen auftreten.

Als Haupteinflussgrößen wurden der baugrößenabhängige Lastspannungstiefenverlauf, der Härteverlauf, der Eigenspannungszustand und der Reinheitsgrad des Werkstoffs identifiziert. Die experimentellen Untersuchungen erfolgten an Standard-Einsatzstählen im Pulsatorprüfstand. Variiert wurden in erster Linie die Baugröße der Verzahnung, der Grundwerkstoff (20MnCr5 und 18CrNiMo7-6) und der Eigenspannungszustand bzw. die Strahlbehandlung. Die Ergebnisse der Untersuchungen bildeten die Grundlage für ein erstes Rechenmodell zur lokalen Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit über der Werkstofftiefe. Die Forschungsziele des Vorhabens wurden vollumfänglich erreicht.

Vorhaben "Hochreine Stähle" (IGF Nr. 16662N) - Folgevorhaben zu AVIF A200:

Hauptziel des abgeschlossenen Vorhabens IGF Nr. 16662N war es zu untersuchen, inwieweit durch Verwendung von Einsatzstählen mit hohen und höchsten Reinheitsgraden nach Stand der Technik Zahnfußbrüche mit Rissausgang unterhalb der Oberfläche vermieden und eine Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit erreicht werden kann. Dazu wurden ausgewählte Chargen von Standard-Stählen unterschiedlicher Stahlhersteller in Stichversuchen im Laufund Pulsatorprüfstand untersucht. Das Hauptaugenmerk dieser Untersuchungen lag dabei auf der Fragestellung, bei welchen Varianten "innere" Brüche generell auftreten bzw. zuverlässig vermieden werden können und eine mögliche Korrelation mit dem Reinheitsgrad der eingesetzten Werkstoffe.

Die Ergebnisse belegen, dass bei einem Großteil der untersuchten hochreinen Varianten auch innere Zahnfußbrüche mit Rissausgang an Fehlstellen im Werkstoff auftraten. Zusätzlich in das Untersuchungsprogramm aufgenommene "Sonderstähle" mit modifizierten Herstellweg wiesen dagegen in begrenzten Pulsatorversuchen keine bzw. nur sehr wenige Brüche aufgrund eines Fehlstellenversagens auf und lassen Potential für eine Steigerung der

Tragfähigkeit erkennen. Eine Überprüfung dieser Ergebnisse in Laufversuchen sowie eine Quantifizierung der Festigkeitseigenschaften steht aus. Ebenso konnten die wirksamen Mechanismen dieser Zusatzvarianten im Rahmen des begrenzten Zeit- und Untersuchungsumfangs im Rahmen des Vorhabens nicht weiter geklärt werden.

Die durchgeführten Untersuchungen belegen allerdings, dass die Bestimmung des Reinheitsgrades mit den Messmethoden nach Stand der Technik allein nicht ausreichend ist, die festgestellten Unterschiede im Bauteilversagen und der Zahnfußtragfähigkeit zu beschreiben. Das im Vorhaben AVIF A220 erstellte Berechnungsmodell wurde auf Basis von Literaturangaben grundlegend um den Einfluss von Fehlstellen im Werkstoffgefüge erweitert und durch die Ergebnisse der durchgeführten Stichversuche in begrenztem Umfang verifiziert. Die Zielsetzungen des Forschungsvorhabens wurden vollständig erreicht.

Forschungsvorhaben AVIF A243:

Zielsetzung dieses Vorhabens war die Erstellung eines experimentell abgesicherten Berechnungsverfahrens zur Schadensart "Zahnflankenbruch". Dazu wurden in experimentellen Untersuchungen Flankenbruchschäden gezielt erzeugt und Grenzwerte für die Beanspruchbarkeit des Werkstoffgefüges unterhalb der Zahnflanke ermittelt. Ein erweitertes Berechnungsverfahren auf Basis eines örtlichen Vergleichs der auftretenden Lastspannungen und der vorliegenden Härte unter Berücksichtigung des Druck-Eigenspannungszustands wurde antragsgemäß erstellt und in die praktische Anwendung eingeführt.

Auch bei der Schadensart "Zahnflankenbruch" wird der Rissausgang häufig an Fehlstellen im Werkstoffgefüge beobachtet. Allerdings wird dieser Einfluss im vorliegenden Berechnungsansatz bisher nicht explizit, sondern lediglich pauschal durch Kalibrierung auf die vorliegenden Versuchsergebnisse mit Stählen "üblichen" Reinheitsgrades berücksichtigt. Inwieweit ein erhöhter Reinheitsgrad oder modifizierte Werkstoffeigenschaften zu einer Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit hinsichtlich der Schadensart Flankenbruch mit Rissausgang in großer Werkstofftiefe führen, ist somit offen.

Beantragtes Forschungsvorhaben AVIF A305:

Das hier beantragte Forschungsvorhaben knüpft an die bisher durchgeführten Untersuchungen der o.g. Forschungsvorhaben an und greift offene Punkte sowie neue Fragestellungen, die sich in diesem Zusammenhang ergeben haben, auf.

Wesentliche Ziele sind:

- Ermittlung von Festigkeitskennwerten zur Zahnfußtragfähigkeit hochreiner "Standard"-Stähle unter Berücksichtigung von inneren Brüchen bzw. Fehlstellenversagen: entsprechend abgesicherte Kennwerte, insbesondere auf Basis höherer Grenzlastspielzahlen, liegen bisher nicht vor, sind für den Stahlanwender bzw. Getriebekonstrukteur aber für die zuverlässige Auslegung hochbeanspruchter, festigkeitsgestrahlter Zahnräder notwendig. Gegenüber Werkstoffen mit konventionellem Reinheitsgrad wird ein Tragfähigkeitspotential von ca. 15% erwartet.
- Untersuchungen zur gezielten Vermeidung von inneren Brüchen: hierzu sollen optimierte Werkstoffe eingesetzt werden, die neben einem hohen Reinheitsgrad auch einen modifizierten Herstellweg und/oder eine modifizierte chemische Zusammensetzung aufweisen. Dabei soll geklärt werden, ob entsprechende Sonderstähle durch Vermeidung innerer Brü-

che eine weitere Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit erlauben. Bei Erreichung der Zielsetzung wird ein zusätzliches Tragfähigkeitspotential von bis zu 15% abgeschätzt. Dabei sind insbesondere auch die zugrunde liegenden Mechanismen, die zur Vermeidung von inneren Brüchen führen, zu klären. Bisher liegen hierzu nur wenige Stichversuche vor, die Mechanismen sind noch weitgehend offen.

- In theoretischen Arbeiten sollen statistische Ansätze zur Bewertung der Häufigkeit und Verteilung von Fehlstellen im Werkstoffgefüge zur Anwendung auf Zahnräder und Zahnradwerkstoffe abgeleitet und in das bestehende, erweiterte Berechnungsmodell zur Zahnfußtragfähigkeit eingebracht werden. Damit kann die Aussagekraft von Ergebnissen aus Reinheitsgraduntersuchungen deutlich erhöht und die Ergebnisse einer örtlichen Tragfähigkeitsberechnung im Zusammenhang mit Aussagen zur Ausfallwahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung von Fehlstellen erweitert werden. Dies lässt eine deutlich erhöhte Zuverlässigkeit bei der Bewertung der lokalen Werkstoffeigenschaften und der zu erwartenden Zahnfußtragfähigkeit erwarten. Entsprechende Ansätze liegen im Bereich der Zahnradtragfähigkeitsberechnung bisher nicht vor;
- In ergänzenden Stichversuchen soll insbesondere überprüft werden, ob eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die Schadensart "Zahnflankenbruch" gegeben ist und modifizierte Werkstoffe mit entsprechend hoher Zahnfußtragfähigkeit auch zu einer erhöhten Tragfähigkeit der Zahnflanke führen. Dies dient ggf. als Basis für eine zukünftige Erweiterung des Berechnungsverfahrens zur Zahnflankentragfähigkeit. Untersuchungen zum Einfluss eines erhöhten Reinheitsgrades und/oder modifizierter Werkstoffe auf die Schadensart Zahnflankenbruch liegen bisher nicht vor;

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass im Rahmen der genannten, abgeschlossenen Forschungsvorhaben grundlegende Erkenntnisse zu den Schadensarten "innerer" Zahnfußbruch sowie "Zahnflankenbruch" bei Verwendung üblicher Stähle in der Getriebeanwendung erarbeitet und die Grundlagen einer entsprechend erweiterten Berechnung geschaffen wurden.

In dem hier beantragten Vorhaben sollen nun zum einen statistisch abgesicherte Festigkeitswerte für den (kostengünstigen) Einsatz von Standard-Stahlen, bei denen Fehlstellenversagen die Zahnfußdauerfestigkeit bestimmt, ermittelt werden, zum anderen aber insbesondere auch optimierte bzw. modifizierte Werkstoffe zur gezielten Vermeidung dieser Schäden bzw. zur Anhebung der Tragfähigkeitsgrenzwerte untersucht und die zugrunde liegenden Mechanismen erfasst werden. Dies führt zu einer zuverlässigen Nutzung von Werkstoffpotentialen und zur Weiterentwicklung der vorliegenden Modellansätze für eine zuverlässige Beurteilung der Tragfähigkeit von Stahlzahnrädern in der industriellen Anwendung.

8. Projektbeschreibung

In der Getriebeauslegung spielt die Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeit und damit verbunden die Kenntnis über zuverlässig abgesicherte Festigkeitskennwerte entsprechender Zahnradwerkstoffe, Wärmebehandlungs- und Fertigungszustände eine essentielle Rolle. Zur Erreichung immer höherer Leistungsdichten von hochbeanspruchten Zahnrädern wurden, neben der Erforschung neuer, schadenstoleranterer Werkstoff- und Wärmebehandlungskonzepte [16], [20], [26], die in der praktischen Anwendung gängigen Bearbeitungsmethoden der Bauteiloberfläche optimiert, um damit den oberflächennahen Randbereich der Verzahnungen lokal zu stärken [6], [13], [14], [24]. Entsprechende Bearbeitungsschritte stellen, neben dem gezielten Festigkeitsstrahlen der Zahnfußrundung, z. B. die Kombination aus Festigkeitsstrahlen und Gleitschleifen oder auch ein Feinschleifen der Zahnflanke dar. Die dadurch eingebrachten, zum Teil hohen Druckeigenspannungen an und nahe unterhalb der Zahnradoberfläche wirken den induzierten Lastspannungen entgegen und führen zu einer deutlichen Steigerung der Zahnfuß- bzw. Zahnflankentragfähigkeit. Da die Wirkung dieser eingebrachten Druckeigenspannungen jedoch lediglich auf den oberflächennahen Randbereich beschränkt ist, kommt den tieferliegenden Werkstoffbereichen hinsichtlich der Schadensinitiierung eine größere Bedeutung zu. Eine Rissinitiierung unterhalb der Bauteiloberfläche aufgrund eines Überschreitens der lokalen Beanspruchbarkeit des Werkstoffes kann zum unerwarteten und plötzlichen Ausfall des Zahnrades führen, wodurch das durch die Optimierung der Zahnradoberfläche erhoffte Tragfähigkeitspotential nicht zuverlässig genutzt werden kann. Häufig finden diese Rissinitiierungen in der Bauteiltiefe an Fehlstellen in der Werkstoffmatrix statt, weshalb der Reinheitsgrad des Werkstoffes hier eine wesentliche Rolle spielt. Hinsichtlich der Zahnfußtragfähigkeit sind aus abgeschlossenen Forschungsarbeiten Zahnfußbrüche an einsatzgehärteten, oberflächenverfestigten Zahnrädern mit Rissausgang unterhalb der Oberfläche bekannt. Diese inneren Brüche gehen zumeist von Fehlstellen in der Werkstoffmatrix innerhalb der einsatzgehärteten Randschicht aus und führen zu einer entsprechenden Minderung der Zahnfußtragfähigkeit im Bereich hoher Lastwechselspielzahlen (siehe Abbildung 1). Ein vergleichbares Schädigungsverhalten ist auch im Bereich der Zahnflanke bekannt und wird als Flankenbruch bezeichnet (siehe Abbildung 2). Im Vergleich zum Zahnfußbruch tritt die Rissinitiierung dabei jedoch in deutlich tieferen Werkstoffbereichen und zum Teil auch ohne eine entsprechende Schwächung des Werkstoffes durch Fehlstellen auf.

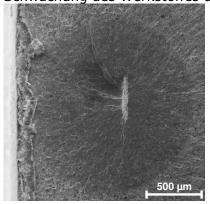


Abbildung 1: Exemplarische Bruchlinse mit rissinitiierendem Einschluss eines Zahnfußbruches mit Rissausgang in der einsatzgehärteten Randschicht unterhalb der Oberfläche aus [22]

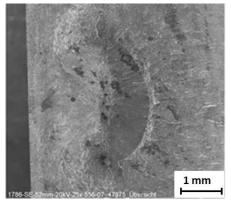


Abbildung 2: Exemplarische Bruchlinse eines Zahnflankenbruches mit Rissausgang in größerer Bauteiltiefe (Übergang Härteschicht-Kern) aus [28]

8.1 Stand der Technik

Nach heutigem Stand des Wissens werden in den genormten Regelwerken zur Zahnfußtragfähigkeit (AGMA 2001 [2], DIN 3990 [9] und ISO 6336 [11]) Festigkeitswerte ausgewiesen, die für ein Zahnfußbruchverhalten mit Rissausgang von der Bauteiloberfläche Gültigkeit besitzen. Im Rahmen mehrerer Forschungsarbeiten (z. B. AVIF-Vorhaben Nr. A146 [24] bzw. [5], [8]) konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Verfestigung der Randschicht aufgrund einer Strahlbehandlung (Reinigungs- und Festigkeitsstrahlen) die Zahnfußtragfähigkeit signifikant gesteigert werden kann. Darüber hinaus konnte aber auch beobachtet werden, dass an einsatzgehärteten,

oberflächenverfestigten Zahnrädern vermehrt Zahnfußbrüche mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche, meist an nichtmetallischen Einschlüssen im Werkstoffgefüge, auftreten, welche das Tragfähigkeitsverhalten – speziell im Bereich hoher Lastspielzahlen – beeinflussen, wodurch das aufgrund der Strahlbehandlung erhoffte Tragfähigkeitspotential nicht vollständig ausgeschöpft werden kann. In weiterführenden Arbeiten wurden darauf aufbauend gezielt der Schadensmechanismus innerer Fußbruch und die entsprechenden Einflussgrößen untersucht, wobei sich zeigte, dass neben dem Verformungsgrad des Ausgangswerkstoffes [25], der Eigenspannungszustand, die Baugröße (und damit der Lastspannungstiefenverlauf) sowie der Reinheitsgrad [6] eine entscheidende Rolle bei der Ausbildung von Zahnfußbrüchen mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche spielen. Der aktuelle Stand des Wissens zum Einfluss innerer Fehlstellen auf das Bauteilversagen (speziell für das Bauteil Zahnrad) ist in [22] zusammenfassend belegt, weshalb an dieser Stelle darauf verwiesen wird. Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem AVIF-Vorhaben Nr. 220 [6] wurden in diesem AiF-Vorhaben Nr. 16662 N [22] einsatzgehärtete, festigkeitsgestrahlte Zahnräder aus üblichen Zahnradwerkstoffen mit hohen und höchsten Reinheitsgraden hinsichtlich ihres Tragfähigkeitspotentials auch unter Berücksichtigung innerer Brüche untersucht. Dabei wurden insgesamt 18 Schmelzen von 8 unterschiedlichen Stahlherstellern aus den beiden im Zahnradbereich üblichen Werkstoffen 20MnCr5 und 18CrNiMo7-6 mit unterschiedlich hohen und höchsten Reinheitsgraden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass an beiden Werkstoffen, sowohl im offen erschmolzenen Zustand als auch an ESU-Güten, Brüche mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche auftreten. Die festgestellten inneren Brüche weisen dabei stets einen nichtmetallischen Einschluss als Rissausgangsort auf, welcher in Abhängigkeit der Baugröße in einer charakteristischen Tiefenlage auftritt und sich hinsichtlich seiner chemischen Zusammensetzung (Sulfide bei 20MnCr5 und Oxide bei 18CrNiMo7-6) unterscheidet. Die Versuchsergebnisse zeigen auch, dass eine gezielte Vermeidung von Brüchen mit Rissausgang an Fehlstellen unterhalb der Bauteiloberfläche zu einer signifikanten Steigerung der Zahnfußtragfähigkeit im Vergleich zu Werkstoffen mit konventionellem Reinheitsgrad führen kann (siehe Abbildung 3). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass diese Varianten zum Teil eine abweichende chemische Zusammensetzung sowie einen nicht vergleichbaren Herstellungsweg aufweisen. Die Gründe für ein Ausbleiben innerer Brüche unter Berücksichtigung des vorliegenden Werkstoffzustandes und Reinheitsgrades konnten im Rahmen dieser Untersuchungen nicht vollständig geklärt werden. Neben den experimentellen Untersuchungen wurden in [6] und [22] bereits erste Modellvorstellungen auf Basis bruchmechanischer und kontinuumsmechanischer Ansätze entwickelt, die eine rechnerische Erfassung des Einflusses von Fehlstellen in der Werkstoffmatrix auf die lokale Dauerfestigkeit erlauben und eine erste Abschätzung der zu erwartenden Zahnfußtragfähigkeit ermöglichen. Darüber hinaus können in der allgemeinen Fachliteratur [1], [7], [15], [17], [19], [21], [29] umfangreiche Untersuchungsergebnisse an Standardproben zum Einfluss und zur Ausbildung von Brüchen unterhalb der Bauteiloberfläche gefunden werden, wobei ein Großteil der dort vorliegenden theoretischen Ansätze auf den grundlegenden Modellvorstellungen von Murakami [18] basiert. Diese Ansätze wurden in [22] auch auf das Bauteil Zahnrad in angepasster Form angewandt und zeigen im Rahmen üblicher Streuungen eine grundsätzliche Übertragbarkeit unter Berücksichtigung der im Versuch aufgetretenen inneren Zahnfußbrüche an Fehlstellen im Werkstoffgefüge (siehe exemplarisch Abbildung 4). Eine weitere Verifizierung dieses Ansatzes steht bislang jedoch aus.

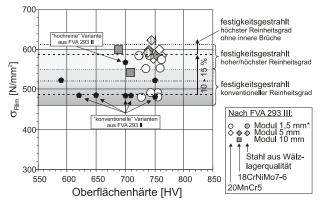


Abbildung 3: Ergebnisse der Zahnfußtragfähigkeitsuntersuchungen hochreiner Stähle aus [22]

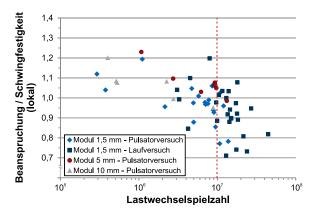


Abbildung 4: Lokale Betrachtung der Zahnfußbrüche durch innere Brüche mit Hilfe der Modellvorstellung nach Murakami [18]

Neben der Schadensart Zahnfußbruch konnten ähnliche Phänomene bzw. Schadensmechanismen auch im Bereich der Zahnflanke beobachtet werden. Abgesehen von typischen Zahnflankenschädigungen (Grauflecken- und Grübchenbildung) können an hochbelasteten Zahnrädern aus höchstfesten Werkstoffzuständen Zahnflankenbrüche auftreten, deren Rissinitiierung in größerer Werkstofftiefe im Werkstoffgefüge, zum Teil an Fehlstellen, zu finden ist. Im Forschungsvorhaben FVA-556/AVIF-243 [28] wurden diesbezüglich neben experimentellen Untersuchungen theoretische Ansätze zu Aussagen über lokale Anstrengungsverhältnisse erarbeitet, die es ermöglichen, eine Verzahnung unter Berücksichtigung der vorliegenden Randbedingungen hinsichtlich der Gefährdung durch Zahnflankenbruch beurteilen zu können. Im DFG-AiF-Gemeinschaftsvorhaben "HiPer-

Comp" [26] wurden zudem alternative, hoch und höchst beanspruchbare Werkstoffkonzepte hinsichtlich deren Schadenstoleranz gegenüber Einschlüssen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine gezielte Anpassung der entsprechenden Wärmebehandlung geeigneter Werkstoffkonzepte neue Stähle für höchstbeanspruchte Bauteile zur Verfügung gestellt werden können, die eine erhöhte lokale Beanspruchbarkeit im Werkstoffgefüge erwarten lassen. Im Rahmen weiterführender theoretischer Untersuchungen wurden die Modellvorstellungen von Murakami auf die bisher vorliegenden Versuchsergebnisse zur Schadensart Zahnflankenbruch angewandt, um auch dieses Schadensbild der Zahnflanke einer weitergehenden Berechnung zugänglich zu machen (siehe Abbildung 5). Die Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich eine Anwendung und ggf. Anpassung der theoretischen Überlegungen von Murakami die Güte der lokalen Berechnungsansätze zur Zahnflankentragfähigkeit steigern kann.

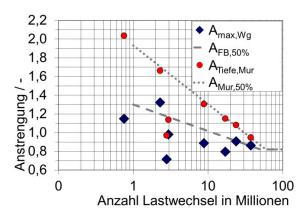


Abbildung 5: Lokale Betrachtung des Anstrengungsverhältnisses der Zahnflanke ohne bzw. mit Berücksichtigung von Fehlstellen im Werkstoffgefüge nach [26]

Die Ergebnisse aus der Literatur und aus abgeschlossenen Forschungsarbeiten zeigen somit, dass eine Schadensinitiierung unterhalb der Bauteiloberfläche und deren zuverlässige Vermeidung beim Bauteil Zahnrad aufgrund der geforderten immer höheren Leistungsdichten von Seiten der Anwendung eine essentielle Rolle spielt. Sowohl den standardisierten als auch erweiterten Berechnungsverfahren zur Zahnradtragfähigkeit ist jedoch gemein, dass der (mikroskopische) Reinheitsgrad bisher nicht oder nur sehr eingeschränkt Berücksichtigung findet und ein Fehlstellenversagen mit Rissinitiierung unterhalb der Bauteiloberfläche daher nur unzureichend einer Berechnung zugänglich ist. In diesem Zusammenhang kommt auch geeigneten Messverfahren und Auswertemethoden zur Bestimmung kritischer Einschlüsse und deren Verteilung im Werkstoffgefüge eine besondere Bedeutung zu. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf.

8.2 Ausgangsbasis

Die Grundlagen zum Thema "innerer Zahnfußbruch" und "Zahnflankenbruch" wurden in den abgeschlossenen Forschungsvorhaben FVA 293 II/AVIF 220 [6] und FVA 293 III/ IGF 16662 N [22] bzw. FVA 556/AVIF 243 [28] erarbeitet. Die Ergebnisse aus [22] haben dabei gezeigt, dass der Reinheitsgrad eine wesentliche Einflussgröße auf die Zahnfußtragfähigkeit darstellt. Danach lässt ein Ausbleiben von Zahnfußbrüchen mit Rissinitiierung an Einschlüssen unterhalb der Oberfläche eine deutliche Steigerung der Tragfähigkeit erwarten. Entsprechende Tragfähigkeitsgrenzwerte dazu basieren jedoch bislang zum Großteil nur auf Stichversuchen. Die Untersuchungsergebnisse belegen jedoch auch, dass eine Vermeidung kritischer Fehlstellen im Werkstoff durch einen hohen Reinheitsgrad allein zuverlässig nicht möglich ist bzw. dass die in der praktischen Anwendung gängigen Methoden zur Reinheitsgradbestimmung keine statistisch abgesicherte Beurteilung des Werkstoffes hinsichtlich der Anzahl und Verteilung kritischer Einschlüsse erlauben. Die Ursache für das Auftreten innerer Brüche bzw. die Mechanismen und Einflussgrößen für ein Fehlstellenversagen und deren zuverlässige Vermeidung konnte im Rahmen der bereits getätigten Forschungsarbeiten noch nicht eindeutig geklärt werden. Dem Anwender stehen daher bislang keine zuverlässigen Aussagen zur Verfügung, inwieweit durch geeignete Maßnahmen innere Brüche zuverlässig vermieden werden können. Zudem kann aktuell nicht abgeschätzt werden, inwieweit aufwendige Stahlerzeugungsprozesse und kostenintensive Stahlerzeugnisse zu einer zuverlässigen

Vermeidung innerer Brüche und damit zu einer zuverlässigen Steigerung der Tragfähigkeit von Zahnrädern führen.

8.3 Zielsetzung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen zunächst die aus dem Vorgängervorhaben [22] bereits vorhandenen Ergebnisse der Laufversuche zur Zahnfußtragfähigkeit ausgewählter Varianten unter Berücksichtigung von Fehlstellenversagen erweitert und statistisch abgesicherte Tragfähigkeitskennwerte hochreiner Stähle abgeleitet werden. In einem weiteren Schritt wird zudem gezielt der Einfluss optimierter Werkstoffzustände auf das Auftreten von Brüchen mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche untersucht. Im Vordergrund stehen dabei Werkstoffe, die auf Basis der Ergebnisse des Vorgängervorhabens [22] sowie der allgemeinen Literatur ein Ausbleiben innerer Brüche im Bereich hoher Lastwechselspielzahlen erwarten lassen. Eine grundlegende Überprüfung der Gesetzmäßigkeiten bzw. der Übertragbarkeit vom Zahnfuß auf die Zahnflanke ist vorgesehen. Des Weiteren sind die im Vorgängervorhaben getroffenen Aussagen hinsichtlich des Zusammenhanges von Rissausgangsort und vorliegendem lokalen Eigenspannungszustand zu überprüfen. Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen werden Empfehlungen zum betriebssicheren Verfahren mit derartigen Stirnrädern in der industriellen Praxis abgeleitet.

Darüber hinaus werden im Rahmen theoretischer Untersuchungen die in der praktischen Anwendung verfügbaren statistischen Verfahren zur Beschreibung von Einschlussverteilungen und häufigkeiten auf die hier untersuchten Versuchsvarianten und die entsprechend verwendeten Werkstoffe angewandt und hinsichtlich deren Eignung zur Abschätzung rissinitiierender Einschlüsse bewertet. Diese und weitere Ergebnisse sollen in die aus dem Vorgängervorhaben vorhandenen Überlegungen und Modellvorstellungen eingebunden und das Modell entsprechend um den Einfluss von Fehlstellen im Werkstoff erweitert werden. Zudem soll eine Validierung der im Vorgängervorhaben [22] angewandten Modellvorstellung mit Hilfe der hier erzielten Versuchsergebnisse erfolgen. Insgesamt wird angestrebt, die zu erwartende Gefährdung hinsichtlich innerer Brüche auf Basis des vorliegenden lokalen Beanspruchungs- und Werkstoffzustandes unter Berücksichtigung nicht-metallischer Einschlüsse abzuleiten. Darüber hinaus wird der Kenntnisstand zum Einfluss von rissinitiierenden Einschlüssen auf die Zahnfußtragfähigkeit bzw. zu den Mechanismen/zur Vermeidung innerer Brüche allgemein erweitert.

8.3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Im Einzelnen werden wissenschaftliche Aussagen zu folgenden Fragestellungen erwartet:

- Zuverlässige, statistisch abgesicherte Aussagen zum (Zahnfuß-)Tragfähigkeitspotential hochreiner Werkstoffe im Bereich hoher Lastwechselspielzahlen unter Berücksichtigung des Auftretens von Brüchen mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche
- Aussagen zu möglichen Einflussgrößen zur Vermeidung kritischer Einschlüsse in der Werkstoffmatrix und der damit verbundenen Vermeidung innerer Brüche im Zahnfuß
- Aussagen zum Potential der Zahnfußtragfähigkeitssteigerung von einsatzgehärteten, festigkeitsgestrahlten Zahnrädern hochreiner Werkstoffe unter Vermeidung innerer Brüche
- Einordung der Ergebnisse im Vergleich zu praxisüblich einsatzgehärteten, festigkeitsgestrahlten Stirnrädern mit konventionellem Reinheitsgrad
- Grundlegende Überprüfung der Übertragbarkeit der Zusammenhänge vom Zahnfuß auf die Zahnflanke (Schadensart Flankenbruch)
- Aussagen zu geeigneten Methoden, um den Werkstoff hinsichtlich einer Gefährdung durch kritische Einschlüsse zu beschreiben und damit das Zahnfußtragfähigkeitspotential auf Basis erweiterter Modellvorstellungen und Rechenvorschriften unter Berücksichtigung von Fehlstellen im Werkstoff abzuschätzen
- Ableitung von Empfehlungen zur praktischen Anwendung

Als wesentliche Ergebnisse mit Umsetzungspotential für die Stahlanwendung werden erwartet:

- Sichere Auslegung von Bauteilen bei vorgegebener Belastung hinsichtlich Ausfällen durch Zahnfußbruch mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche (Reduzierung von Feldrückläufern)
- Aussagen zur Tragfähigkeitssteigerung durch den Einsatz hochreiner, ggf. modifizierter Werkstoffe und modifizierter Prozessrouten bei der Stahlherstellung
- Zuverlässige Beurteilung des Werkstoffzustandes hinsichtlich einer Schadenswahrscheinlichkeit von Einschlüssen

- Entwicklung modifizierter Werkstoffe zur zuverlässigen Vermeidung innerer Brüche
- Ableitung von erweiterten Spezifikationen und Anforderungen an einen optimierten Werkstoffzustand für Zahnradstähle und dem damit verbundenen Wettbewerbsvorteil
- Insgesamt Energie-, Material- und Kosteneinsparung durch ressourceneffiziente Verwendung von Einsatzstählen für Stirnräder höherer Leistungsdichte

8.3.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Die Zahnfußtragfähigkeit stellt eine maßgebliche Einflussgröße für die Betriebssicherheit von Zahnradgetrieben dar. Durch das Auftreten innerer Brüche kommt es insbesondere bei einsatzgehärteten, festigkeitsgestrahlten Zahnrädern im Bereich hoher Lastwechselspielzahlen zum Ausfall. Das durch ein gezieltes Festigkeitsstrahlen gewünschte Tragfähigkeitspotential kann daher durch dieses Fehlstellenversagen im Bereich hoher Lastwechsel nicht zuverlässig genutzt werden. Da eine statistisch abgesicherte Aussage zur möglichen Minderung der Zahnfußtragfähigkeit durch das Auftreten innerer Brüche bzw. systematische Untersuchungen zur Vermeidung innerer Brüche (mit Ausnahme des Reinheitsgrades) bislang nicht vorliegen, leistet dieses Forschungsvorhaben einen Beitrag zur Steigerung der Betriebssicherheit bzw. zur Leistungssteigerung einsatzgehärteter, festigkeitsgestrahlter Stirnräder aus Stahl. Zudem wird das Potential im Hinblick auf die Schadensart "Flankenbruch" grundlegend aufgezeigt. Darüber hinaus erweitern die Ergebnisse des Forschungsvorhabens den Kenntnisstand zur Beschreibung von Werkstoffen hinsichtlich kritischer Einschlüsse sowie deren Auswirkung auf die (lokale) Zahnfußtragfähigkeit unter Berücksichtigung statistischer Methoden. Die hier gewonnenen Ergebnisse dienen insbesondere der Stahlanwendung, um Werkstoffe hinsichtlich der Vermeidung von Fehlstellenversagen zu designen bzw. zu optimieren. Durch eine gezielte Auswahl geeigneter Materialien kann somit das Risiko eines Bauteilversagens durch die Schadensform "innerer Bruch" vermieden bzw. reduziert und somit die Leistungsdichte von Getriebebauteilen durch den Einsatz dieser hochtragfähigen Werkstoffe in der praktischen Anwendung gesteigert werden.

8.4 Vorgesehener Lösungsweg

Zur Erreichung des Forschungszieles sind umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen vorgesehen. Die experimentellen Untersuchungen teilen sich dabei auf insgesamt drei Arbeitspakete auf. Arbeitspaket 1 beschäftigt sich mit der statistischen Absicherung der Zahnfußtragfähigkeitswerte hochreiner Werkstoffe unter Berücksichtigung innerer Brüche aus dem Vorgängervorhaben [22] und knüpft direkt daran an. In Arbeitspaket 2 werden weitere systematische Einflussgrößen auf das Auftreten innerer Brüche bzw. zu deren Vermeidung und das damit verbundene Tragfähigkeitspotential untersucht. Dabei kommen optimierte Werkstoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Anwendung, die eine Beeinflussung der im Werkstoff enthaltenen metallischen Mikroeinschlüsse erlauben. In einem dritten Arbeitspaket sind gezielte, experimentelle Untersuchungen zur Überprüfung theoretischer Modellvorstellungen vorgesehen. Dabei sollen u. a. der Einfluss hoher Druckeigenspannungen in größeren Bauteiltiefen auf die Lage des kritischen Ausgangsortes untersucht sowie exemplarische Untersuchungen zum Einfluss hochreiner Stähle auf den Schadenstyp Flankenbruch durchgeführt werden. Auf Basis der erzielten Ergebnisse werden Empfehlungshinweise für die industrielle Anwendung, welche es ermöglichen, das Tragfähigkeitspotential einsatzgehärteter, festigkeitsgestrahlter Zahnräder im Bereich hoher Lastwechselspielzahlen zuverlässig nutzen zu können, abgeleitet.

Neben diesen experimentellen Untersuchungen sind mittels theoretischer Studien bestehende werkstoffkundliche Verfahren zur statistischen Beschreibung von Einschlüssen und deren Verteilung im Gefüge auf ihre Anwendbarkeit auf innere Brüche in Zusammenarbeit mit den beteiligten Stahlherstellern umfassend und systematisch zu untersuchen sowie zu bewerten. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen an die aus dem Vorgängervorhaben [22] vorhandene lokale Modellvorstellung anknüpfen und das Modell entsprechend erweitern. Ziel ist es letztendlich, auf Basis des vorliegenden Werkstoffzustandes die Zahn(fuß)tragfähigkeit unter Berücksichtigung von Einschlüssen im Werkstoffgefüge zuverlässig beurteilen zu können.

8.4.1 Experimentelle Untersuchungen

Den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen stellen Laufversuche zur Ermittlung der Zahnfußtragfähigkeit von Stirnrädern der Baugröße Modul $m_n=1,5\,$ mm aus den Werkstoffen 20MnCr5 und 18CrNiMo7-6 dar. Diese ermöglichen im Vergleich zum Pulsatorversuch die Überprüfung eines größeren Werkstoffvolumens und erlauben somit die Detektion kritischer Einschlüs-

se im beanspruchten Werkstoffvolumen der gesamten Verzahnung. Diese Laufversuche erfolgen dabei am FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand mit Achsabstand a = 91,5 mm. Die ergänzenden Pulsatorversuche an Zahnrädern der Baugröße Modul m_n = 1,5 bzw. 5 mm dienen als Art Screeningversuch und werden an elektromagnetisch erregten Hochfrequenz-Resonanzpulsatoren durchgeführt. Die Ergebnisse der Pulsatorversuche werden nach dem Stand des Wissens auf die Verhältnisse von Zahnrädern im Laufversuch umgewertet.

Für die in den drei Arbeitspaketen vorgesehenen Zahnfußtragfähigkeitsuntersuchungen kommen in Abhängigkeit der Versuchsdurchführung (Lauf- oder Pulsatorversuch) die in Tabelle 1 aufgeführten Prüfverzahnungen zum Einsatz. Für die vorgesehenen stichpunktartigen Laufversuche zur Schadensart Zahnflankenbruch ist zusätzlich eine entsprechende Prüfverzahnung nach [28] zu wählen. Die aufgeführten Verzahnungsgeometrien wurden bereits in den Vorgängervorhaben bzw. mehrfach in Forschungsvorhaben zur Untersuchung der Zahnradtragfähigkeit herangezogen, weshalb hierzu umfangreiche allg. Kenntnisse und Erfahrungen vorhanden sind. Die experimentellen Zahnradtragfähigkeitsergebnisse können somit direkt mit den Ergebnissen der Vorhaben [22] und [28] verglichen werden. Die verwendeten Werkzeuge sind entsprechend den Vorgaben des Vorgängervorhabens zu wählen und im Rahmen der Fertigung umfassend zu dokumentieren.

Tabelle 1: Hauptverzahnungsdaten der Prüfräder zur	Untersuchung der Zahnfußtragfähigkeit
Drüfradgeometrie	Drüfverzahnungen

-				
Prüfradgeometrie	1		Prüfverzahnungen	
Benennung	Zeicher	n [Einheit]	Laufverzahnung	Pulsatorrad
Normalmodul	m _n	[mm]	1,5	5
Achsabstand	а	[mm]	91,5	-
Zahnbreite	b	[mm]	8	30
Zähnezahl	Z 1/ Z 2	[-]	59 / 61	24
Normaleingriffswinkel	αn	[°]	2	0
Schrägungswinkel	β	[°]	()
(Nenn)Profilverschiebungsfaktor	Х	[-]	-0,1250 / 1,1875	0,55
Kopfkreisdurchmesser	da	[mm]	91,5 / 96,0	134,0

Die erforderlichen Lauf- und Pulsatorprüfstände stehen an der Forschungsstelle zur Untersuchung der Tragfähigkeit von Stirnrädern unterschiedlicher Baugröße zur Verfügung. Die Untersuchungen sollen dabei folgende drei Arbeitspakete abdecken,

- Arbeitspaket 1: Statistische Absicherung bestehender Versuchsergebnisse
- **Arbeitspaket 2:** Optimierte Werkstoffe zur Vermeidung innerer Brüche
- **Arbeitspaket 3:** Klärung der Modellvorstellungen und Übertragbarkeit (Flankenbruch) die nachfolgend im Detail erläutert werden:

Arbeitspaket 1: Statistische Absicherung

In Arbeitspaket 1 stellt die Erweiterung bzw. Ergänzung der bereits aus dem Vorgängervorhaben vorhandenen Versuchsergebnisse der Laufversuche zur Zahnfußtragfähigkeit eine zentrale Rolle dar. Gemäß der in Tabelle 2 dargestellten Versuchsmatrix (die Variantenbezeichnungen wurden aus dem Vorgängervorhaben übernommen) werden Laufversuche an ausgewählten Varianten des Vorgängervorhabens [22] aus unterschiedlichen Erschmelzungsarten (offen erschmolzen, ESU-Güte und mit modifizierter Calciumbehandlung), mit unterschiedlich hohen Reinheitsgraden und mit unterschiedlichem Tragfähigkeitspotential durchgeführt und die bereits vorhandenen Ergebnisse entsprechend ergänzt.

Die Auswahl der Varianten erfolgte in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss und spiegelt das Interesse der industriellen Anwendung direkt wieder. Auf Basis der daraus resultierenden Wöhlerlinien mit umfangreicher Versuchsbelegung sollen statistisch abgesicherte Tragfähigkeitswerte für hochreine, festigkeitsgestrahlte Zahnräder unter Berücksichtigung von Fehlstellen ermittelt werden. Zudem soll geklärt werden, inwieweit für die Variante S9, für die bislang lediglich Ergebnisse aus dem Pulsatorversuch vorliegen, auch im Laufversuch ein Ausbleiben innerer Brüche und ein damit verbundenes hohes Tragfähigkeitspotential bestätigt werden kann.

Hierzu finden Laufversuche auf dem FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand mit der Prüfverzahnung Modul $m_n=1,5\,$ mm statt. Insgesamt sind je Prüfvariante 10-12 (zusätzliche) Versuchspunkte im Bereich der Dauerfestigkeit vorgesehen. Die Versuchspunkte sollen je Variante so gewählt werden, dass die bereits bestehenden Ergebnisse (mit Ausnahme der Variante S9) sinnvoll ergänzt werden. Als Grenzlastspielzahl sind je Versuch einheitlich 50 Mio. Lastwechsel angedacht. In Einzelfällen soll stichpunktartig bis zu einer Grenzlastspielzahl von 100 Mio. Lastwechsel ge-

prüft werden. Um die Ergebnisse mit denen des Vorgängervorhabens direkt vergleichen und einordnen zu können, sind die Versuchsbedingungen und Auswertemethoden des Vorgängervorhabens entsprechend zu übernehmen.

Tabelle 2: Versuchsprogramm des Arbeitspaketes 1

		V	arianten	
	S4	S6	S8	S9
		20MnCr5		Ovako 157Q
Schmelze	Off erschn		ESU-Güte	Modifizierter Herstellungsweg*
Tragfähigkeitsniveau	1		1	1
Reinheitsgrad	↓	1	1	1
Baugröße	Modul m _n = 1,5 mm			
Versuchsart	Laufversuch FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstar			and a = 91,5 mm
Versuchsbelegung			Bereich der Dauerfo 50 (100) Mio. Lastv	

^{*} modifizierte Calciumbehandlung mit zusätzlichem Rekristallisationsglühen

Arbeitspaket 2: Optimierte Werkstoffe

Das Arbeitspaket 2 beschäftigt sich mit möglichen Einflüssen zur Vermeidung von Zahnfußbrüchen mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche. Dabei werden auf Basis der Erkenntnisse des Vorgängervorhabens gezielt eingestellte, optimierte Werkstoffzustände hinsichtlich des Auftretens innerer Brüche untersucht. Die Ergebnisse des Vorgängervorhabens haben gezeigt, dass einzelne Varianten mit abweichender chemischer Zusammensetzung bzw. im Vergleich modifiziertem Herstellungsweg zumindest in den bisher durchgeführten Stichversuchen sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Zahnfußtragfähigkeit aufweisen und zum Teil Brüche mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche ausgeblieben sind.

Zum einen sollen die bereits stichpunkartig untersuchten Werkstoffe aus "Wälzlagerstahl-Qualität" näher betrachtet werden. Diesbezüglich sind hier insgesamt 4 Varianten aus drei Werkstoffen mit modifizierter Calciumbehandlung und zusätzlichem Rekristallisationsglühen vorgesehen, deren Herstellweg besonders hohe Reinheitsgrade und eine homogene Verteilung der verbleibenden Einschlüsse erwarten lassen. Diese Ergebnisse können direkt mit den Ergebnissen des Vorgängervorhabens verglichen werden. Dabei wird neben drei hochqualitativen Stahlvarianten auch eine konventionelle Variante desselben Stahlwerkes untersucht, um die Auswirkung der höherpreisigen Premiumwerkstoffe direkt abschätzen zu können. Zudem soll neben den 20MnCr5bzw. 18CrNiMo7-6-Varianten eine Werkstoffvariante 20NiMo9-7 untersucht werden, deren Spezifikationen einen besonders hohen Reinheitsgrad und sehr gute Festigkeitswerte bei gleichzeitig höheren Anschaffungskosten erwarten lassen.

Zum anderen wird sowohl der Einfluss des Schwefel- als auch des Aluminiumgehaltes auf die Ausbildung innerer Brüche untersucht. Dabei lehnt sich die aluminiumarme Variante (≤ 0,005 Masse-% Aluminium) direkt an die Ergebnisse der Variante S3 des Vorgängervorhabens an. Die Werkstoffbeschaffung erfolgt in Kooperation mit dem bereits laufenden Forschungsvorhaben FVA-Nr. 713/AVIF286 "Al-freier Einsatzstahl" [12] und knüpft direkt an dessen Ergebnisse an. Die schwefelarme Variante (< 0,003 Masse-% Schwefel) erlaubt zudem einen direkten Rückschluss der Auswirkung des Schwefelgehaltes auf die Ausbildung von kritischen Mangansulfiden und den damit verbundenen Ausfällen durch innere Brüche. Darüber hinaus soll hier untersucht werden, inwieweit sich typisch längsgestreckte Mangansulfide im Werkstoff 20MnCr5 mit Hilfe einer angepassten Tellur-Behandlung entsprechend einformen lassen und sich somit schadenstolerant gegenüber der Ausbildung von Rissen unterhalb der Oberfläche zeigen.

Eine Übersicht der daraus abgeleiteten Varianten (OW = Optimierte Werkstoffe) und deren Versuchsbelegung ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Dabei sind für das Arbeitspaket 2 in Abhängigkeit der Versuchsvariante und der entsprechend vorgesehenen Prüfmethode (Lauf- und Pulsatorversuch) zwei unterschiedliche Prüfgeometrien (Modul $m_n=1,5$ und 5 mm) festgelegt. Alle Varianten werden in Teil- oder Wöhlerlinien mit Standardbelegung im Pulsator untersucht. Für die Variante OW1 sind zusätzlich Laufversuche vorgesehen, welche eine direkte Ergänzung der Ergebnisse des Vorgängervorhabens darstellen. Die Pulsatorergebnisse der Variante OW2 werden in Abhängigkeit der Stichversuche im Pulsator ggf. um Laufversuche ergänzt. Auf Basis der Ergebnisse der Pulsatorversuche der Varianten OW3 – OW7 werden in Absprache mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe 2 weitere Varianten ausgewählt und entsprechend zusätzlich im Laufversuch untersucht. Bei allen hier aufgelisteten Varianten gilt zu beachten, dass sich die hier ausgewiesene Baugröße der Prüfräder an den verfügbaren Durchmessern der Werkstoffrohlinge der beteiligten Stahlhersteller orientiert.

Tabelle 3: Versuchsprogramm des Arbeitspaketes 2

Variante	OW1	OW2	OW3	OW4	OW5	OW6	OW7						
Werkstoff	20M hoch- rein	InCr5 kon- vent.	20MnCr5		20MnCr5		20MnCr5		20MnCr5		18CrNiMo7-6		20NiMo9-7
Eigenschaft		izierter ıngsweg*	Tellur Schwefel behandelt arm		Aluminium arm		lifizierter llungsweg*						
Baugröße m _n [mm]	1,5	5 (1,5)	1,5	5	5	5 (1,5)	5 (1,5)						
Pulsatorversuch	TL	TL	TL	WL	WL	TL	TL						
Laufversuch	WL	(WL)	2 × WL										

^{*} modifizierte Calciumbehandlung mit zusätzlichem Rekristallisationsglühen

Arbeitspaket 3: Klärung der Modellvorstellung

In Arbeitspaket 3 (siehe Tabelle 4) sollen die im Vorgängervorhaben [22] aufgestellten wissenschaftlichen Modellvorstellungen hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen lokalem Eigenspannungszustand und Tiefenlage der rissinitiierenden Einschlüsse näher betrachtet werden. Hierzu sind Pulsatorversuche an Prüfzahnrädern der Baugröße Modul $m_n = 5$ mm mit hohen Druckeigenspannungen und großen Tiefenlagen vorgesehen (siehe Varianten ES1 und ES2). Die gezielte Einbringung hoher Druckeigenspannungen erfolgt dabei mit Hilfe des optimierten Kugelstrahlverfahrens (ES1) und mit Laserstrahlen (ES2). Darüber hinaus soll ein hochreiner 18CrNiMo7-6 mit modifizierter Calciumbehandlung und zusätzlichem Rekristallisationsglühen, der auf Basis der Versuchsergebnisse des Vorgängervorhabens [22] keine inneren Brüche erwarten lässt, im Laufversuch hinsichtlich der Gefährdung durch Flankenbruch stichpunktartig untersucht werden. Diesbezüglich wird im Laufversuch die aus dem FVA-Forschungsvorhaben "Flankentragfähigkeit – Werkstofftiefe" [28] bekannte "Referenz"-Verzahnung (a = 200 mm, m = 3 mm) unter vergleichbaren Prüfbedingungen hinsichtlich der Schadensart Flankenbruch stichpunktartig untersucht.

Tabelle 4: Versuchsprogramm des Arbeitspakets 3

	ES1	ES2	FB
Werkstoff	18CrNiMo7-6		18CrNiMo7-6 (hochrein) Modifizierter Herstellungsweg
Eigenschaft	Hohe Eigenspannungen in Werkstofftiefe festigkeitsgestrahlt lasergestrahlt		Flankenbruch
Baugröße m _n	5 r	nm	3 mm
Pulsatorversuch	TL	TL	
Laufversuch			TL

Insgesamt beläuft sich der Versuchsumfang auf 14 Prüfvarianten mit unterschiedlicher Versuchsbelegung. Dabei ergibt sich, unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Prüfräder aus dem

Vorgängervorhaben, folgender neu zu fertigender Prüfradbedarf: 60 Prüfradpaare und 6 Prüfritzel Baugröße Modul $m_0 = 1.5$ mm, 23 Pulsatorräder Modul $m_0 = 5$ mm und 5 Prüfradpaare Baugröße Modul $m_0 = 3$ mm für stichpunktartige Flankenbruchversuche. Eine Prüfradreserve ist hierin noch nicht berücksichtigt. Die Beschaffung der Laufprüfräder Modul $m_n = 1,5$ mm soll dabei in zwei Schritten erfolgen: zunächst werden die Laufprüfräder der Varianten S9 und OW1 sowie die entsprechenden Prüfritzel für die Pulsatorstichversuche gefertigt. Die noch ausstehenden Laufprüfräder werden nach erfolgter Durchführung der Stichversuche im Pulsatorprüfstand und entsprechender Auswahl der Varianten beschafft. Die Prüfräder der Varianten S4, S6 und S8 liegen der Forschungsstelle bereits aus dem Vorgängervorhaben vor. Alle hier benötigten Werkstoffe werden von den beteiligten Stahlherstellern bzw. aus dem FVA-Forschungsvorhaben 713 [12] zur Verfügung gestellt. Die Wärmebehandlung der Prüfräder findet in Anlehnung an das Vorgängervorhaben bei einem Projektpartner statt. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu realisieren, werden die Ofenparameter entsprechend dem Vorgängervorhaben angepasst. Die an die Wärmebehandlung anschließende Strahlbehandlung erfolgt ebenfalls bei den beteiligten Projektpartnern. Neben der Durchführung der Lauf- und Pulsatorversuche zur Zahnfußtragfähigkeit sind umfangreiche begleitende Untersuchungen notwendig, um die Versuchsergebnisse und die sich daraus ableitenden Einflussparameter interpretieren zu können. Die hier verwendeten Werkstoffe und Prüfräder werden dazu vorab umfassend durch versuchsbegleitende, insbesondere werkstoffkundliche Untersuchungen charakterisiert und dokumentiert. Hierzu zählt u. a.:

- Dokumentation von Werkstoff, Wärmebehandlung und Zahnradfertigung (Projektpartner)
 - Qualitätsnachweis der verwendeten Werkstoffe (Abnahmeprüfzeugnis) unter Angabe der kompletten chemischen Zusammensetzung und des Verformungsgrads
 - möglichst umfassende Dokumentation der kompletten Herstellroute der Stahlerzeugung
 - Dokumentation der Werkzeuggeometrie und Fertigungsdaten der Zahnräder
 - Dokumentation der Wärmebehandlungsdaten
 - Dokumentation der Strahlparameter
 - Dokumentation des (Mikro-)Reinheitsgrades (Ringversuch der Stahlhersteller)
- Erfassung der tatsächlichen Zahnradgeometrie (FZG)
- Messung der Oberflächentopographie im Zahnfußbereich (FZG)
- Metallographische und lichtmikroskopische Untersuchungen (FZG)
- Untersuchungen der Bruchflächen hinsichtlich rissinitiierender Einschlüsse im REM + EDX (FZG)
- Röntgenographische Ermittlung des Eigenspannungszustandes im Zahnfußbereich (FZG)

Die Charakterisierung der hier zu untersuchenden Werkstoffe hinsichtlich des vorliegenden Reinheitsgrades soll in Form eines Ringversuches bei den beteiligten Stahlherstellern und in engen Kontakt mit dem Arbeitskreis "Wertekompatible, flächenbasierte mikroskopische Reinheitsgradbestimmung" des VDEh erfolgen. Das dafür notwendige Vorgehen sowie die entsprechenden Auswertemethoden werden in Absprache mit der projektbegleitenden Arbeitsgruppe festgelegt. Ein Hauptaugenmerk der versuchsbegleitenden Untersuchungen liegt allgemein auf lokalen Werkstoffeigenschaften im Bereich der rissauslösenden Einschlüsse. An der Forschungsstelle bestehen aufgrund der vorhandenen Laboreinrichtungen weitreichende Möglichkeiten zur Analyse und Dokumentation von Werkstoffeigenschaften, welche für die Durchführung und Auswertung der genannten versuchsbegleitenden und werkstoffkundlichen Untersuchungsziele notwendig sind. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt im direkten Vergleich zu den Ergebnissen des Vorgängervorhabens [22]. Weiterhin erfolgt eine Einordnung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse in den Stand des Wissens bzw. hinsichtlich den in den Normen DIN 3990-5 [9] bzw. ISO 6336-5 [11] ausgewiesenen Festigkeitskennwerten für einsatzgehärtete, festigkeitsgestrahlte Zahnräder.

8.4.2 Theoretische Untersuchungen

Neben den experimentellen Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit werden umfassende theoretische Untersuchungen zur Beschreibung des vorliegenden Werkstoffzustandes hinsichtlich der Gefährdung durch Zahnfußbrüche mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche durchgeführt. Dabei sollen die aus der praktischen Anwendung bekannten, statistischen Ansätze zur Auswertung und Bewertung der Häufigkeit und Verteilung von nichtmetallischen Einschlüssen (z. B. durch Extremwertanalysen nach ASTM E2283 [3] oder z. B. [4]) im Werkstoffgefüge auf die hier untersuchten Werkstoffchargen angewandt werden. Dazu sollen auch geeignete Messmethoden zur Reinheitsgradcharakterisierung bzw. zur Bestimmung der Einschlussverteilung bewertet und

ausgewählt werden. Die dafür benötigten Kennwerte sollen im Rahmen eines Ringversuches der beteiligten Stahlhersteller in Zusammenarbeit mit dem VDEh-Arbeitskreis "Mikroskopische Reinheitsgradbestimmung bei Stählen" zur Verfügung gestellt werden. Auf Basis dieser Kenngrößen sollen die größten Einschlüsse abgeschätzt und mit der kritischen Einschlussgröße hinsichtlich einer Werkstoffgefährdung verglichen werden. Zielsetzung ist es, geeignete Methoden und Kenngrößen zur Analyse der Schadenswahrscheinlichkeit abzuleiten, um den Werkstoffzustand hinsichtlich der Gefährdung durch Zahnfußbrüche mit Rissausgang unterhalb der Bauteiloberfläche bewerten zu können.

Zusätzlich werden die erzielten Ergebnisse auf die im Vorgängervorhaben [22] abgeleitete Modellvorstellung zur Bauteilgefährdung durch Einschlüsse im Werkstoffgefüge angewandt. Dabei soll zunächst eine Validierung des bestehenden Modells mit Hilfe der neu erzielten experimentellen Ergebnisse der Zahnfußtragfähigkeitsuntersuchungen erfolgen. Zudem sollen die gewonnenen statistischen Kenntnisse zur Werkstoffbeschreibung in das Modell eingebunden und dieses nach Möglichkeit hinsichtlich einer Abschätzung der zu erwartenden Zahnfußtragfähigkeit unter Berücksichtigung des vorliegenden lokalen Beanspruchungszustandes und der vorliegenden Einschlussverteilung und -häufigkeit erweitert werden. Eine Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in Empfehlungen für die industrielle Anwendung ist darüber hinaus anzustreben.

8.5 Umsetzung und Nutzen der Ergebnisse

Die Forschungsstelle wird bei der Durchführung der Forschungsarbeiten von der projektbegleitenden Arbeitsgruppe "Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad II" aus dem betreuenden Arbeitskreis "Werkstoffe" der FVA intensiv beraten, bei deren Mitgliedern es sich überwiegend um Experten aus der industriellen Anwendung handelt. Auf Basis regelmäßiger Projektgruppentreffen sowie der halbjährlichen Vorstellung und Diskussion des Arbeitsfortschrittes und der Ergebnisse im Rahmen der Arbeitskreissitzungen der FVA wird der Kenntnistransfer aus der Wissenschaft in die Praxis sichergestellt. Zudem werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens nach Ende der Laufzeit in Form eines umfassenden Abschlussberichtes, der in die Technische Universitätsbibliothek (TIB) Hannover eingestellt wird, der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Darüber hinaus werden die Ergebnisse auf nationalen sowie internationalen Fachtagungen vorgestellt und in entsprechenden Veröffentlichungen in renommierten Fachzeitschriften publiziert.

Die Ergebnisse des Vorhabens erbringen experimentell abgesicherte Kenntnisse hinsichtlich des Einflusses innerer Brüche auf die zu erwartende Zahnfußdauerfestigkeit sowie ggf. zu möglichen Maßnahmen, diese inneren Brüche gezielt durch optimierte, schadenstolerante Werkstoffkonzepte zu vermeiden und damit das mögliche zusätzliche Tragfähigkeitspotential dieser Werkstoffe abschätzen zu können. Dem Anwender soll auf Basis der hier erzielten Ergebnisse zudem ermöglicht werden, geeignete Kenngrößen zur Beurteilung des vorliegenden Werkstoffgefüges hinsichtlich der Verteilung und Häufigkeit kritischer Einschlüsse und dem daraus resultierenden Beanspruchbarkeitspotential abzuleiten. Diese Kenngrößen fließen direkt in erweiterte Rechenvorschriften und Modellvorstellungen ein, die es erlauben, auf Basis des vorliegenden Reinheitsgrades die Zahnfußtragfähigkeit des verwendeten Werkstoffes in frühen Phasen der Getriebeauslegung entsprechend abschätzen zu können. Durch eine eindeutige Bewertung der zu erwartenden Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter, festigkeitsgestrahlter Zahnräder wird dem Anwender ermöglicht, Schäden durch Rissinitiierung unterhalb der Bauteiloberfläche zu vermeiden und das Tragfähigkeitspotential auch im Bereich hoher Lastwechselspielzahlen voll nutzen zu können. Diese Tragfähigkeitspotentiale ermöglichen höhere Leistungsdichten und damit verbunden eine Kosteneinsparung aufgrund geringerem Materialverbrauch und Gewicht. Eine grundlegende Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Schadensart Flankenbruch zeigt zudem ein mögliches Potential zur Leistungssteigerung auch für die Zahnflanke auf.

Besonderer Nutzen ist im Bereich der Stahlanwendung zu erwarten. Speziell im Fahrzeugbereich und den dort üblicherweise vorliegenden Großserien können die Anforderungen an immer größer werdende Leistungsdichten nur durch hochleistungsfähige, schadenstolerante Werkstoffe und durch das Verständnis der vorherrschenden Schadensmechanismen erzielt werden. Auch im Bereich der Industrie- und Großgetriebe bzw. im Bereich der Windkraftanlagen fordert die Gewähr einer hohen Zuverlässigkeit den Einsatz von entsprechenden Werkstoffen. Für die produzierenden Stahlwerke generiert die Kenntnis zur reproduzierbaren Herstellung entsprechender Werkstoffe einen Wettbewerbsvorteil gegenüber der internationalen Konkurrenz.

Diese schadenstoleranten Werkstoffe ermöglichen somit dem Anwender Mehrkosten aufgrund von Ausfällen in der praktischen Anwendung und den damit verbundenen Regressansprüchen zu ver-

meiden und entsprechende Kosten einzusparen. Die Ergebnisse sollen aufzeigen, dass gewisse Mehrkosten in der Werkstoffherstellung und -beschaffung durch das erhöhte, zu erwartende Leistungspotential ausgeglichen bzw. evtl. kompensiert werden.

8.6 Bisherige Vorarbeiten und Literaturangaben

8.6.1 Bisherige Vorarbeiten

Die Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) der TU München ist seit mehr als 60 Jahren als international renommierte Forschungsstelle im Bereich der mechanischen Antriebstechnik etabliert und nimmt sowohl in der Forschung und Entwicklung als auch im Bereich der Normung national und international eine zentrale Rolle ein. Der Großteil der Forschung beschäftigt sich mit der Tragfähigkeit von Stirnrädern. Dabei liegen, basierend auf tiefgreifender Forschungsarbeit u. a. im Bereich von Verzahnungen, umfangreiche Kenntnisse und Erfahrungen über Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Zahnfußtragfähigkeit vor. Neben theoretischen Modellvorstellungen, Entwicklung und Validierung gängiger Berechnungsansätze und deren Umsetzung in anwendungsnahe Berechnungs- und Simulationsprogramme, steht die metallographische Beurteilung von Gefügezuständen und deren Auswirkungen auf die Zahnfußtragfähigkeit im Fokus. Zur Durchführung von theoretischen und experimentellen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Zahnradtragfähigkeit stehen dem Institut dabei umfangreiche technische Einrichtungen, wie z. B. Zahnradlauf- und Pulsatorprüfstände und ein metallographisches Labor einschließlich Eigenspannungsmessanlage und Rasterelektronenmikroskop zur Verfügung.

Das hier beantragte Forschungsvorhaben basiert im Wesentlichen auf den Erkenntnissen und Ergebnissen der bereits abgeschlossenen Forschungsvorhaben "Zahnfußbruch mit Rissausgang unterhalb der Oberfläche an einsatzgehärteten Zahnrädern" [6], "Entwicklung eines erweiterten Berechnungsverfahrens zur Ermittlung optimaler Zahnflankentragfähigkeit bis in den Bereich großer Werkstofftiefen" [28] und "Tragfähigkeitsgewinn im Zahnfuß durch hochreine Stähle" [22], die an der Forschungsstelle bearbeitet und zum Teil bereits durch die AVIF gefördert wurden.

8.6.2 Literaturverzeichnis

- [1] Agarwal, V.; Zagade, P. R.; Khan, D.; Gautham, B. P.: Fatigue Crack Propagation in Gear Tooth in Presence of inclusion. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanism, Vol. 15, Issue 3, 2014
- [2] ANSI/AGMA 2001-C95: Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth. AGMA, Alexandria, 1994
- [3] ASTM E2283: Standard Practice for Extreme Value Analysis of Nonmetallic Inclusions in Steel and Other Microstructural Features. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014
- [4] Atkinson, H.V.; Shi, G.: Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods. Progress in Materials Science, Vol. 48, S. 457-520, 2003
- [5] Benedetti, M.: Influence of residual stresses on fatigue strength of case hardened 16MnCr5 steel gears. Degree Thesis University of Trento, Italy 2000.
- [6] Bretl, N.: Zahnfußbruch mit Rissausgang unterhalb der Oberfläche an einsatzgehärteten Zahnrädern. Abschlussbericht Heft 851, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 2008 (AVIF-Nr. A220/2003)
- [7] C Chengqi, S.; Zhenqiang, L.; Jijia, X.; Youshi, H.: Effects of inclusion size and stress ratio on fatigue strength for high-strength steels with fish-eye mode failure. International Journal of Fatigue, Vol. 48, p. 19 27, 2013
- [8] Diepart, C.P.; Burrel N.K.: Improved fatigue performance of gears through controlled shot peening. Proc. Third International Conference on Shot Peening, Garmisch-Partenkirchen, S.1 69-177, 1987
- [9] DIN 3990, Teil 1-5: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern. Beuth-Verlag, Berlin, 1987
- [10] Hirsch, T.: Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit kugelgestrahlter Zahnräder. Abschlussbericht Heft 126, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 1983
- [11] ISO 6336, Part 1-5: Calculation of load capacity of spur and helical gears. Beuth-Verlag, Berlin, 2006
- [12] Kripak, G.; Sharma, M.: Aluminiumfreier, niobstabilisierter Einsatzstahl für den Großgetriebebau. FVA Sachstandbericht AK Werkstoffe 22./23.06.2015 zum Forschungsvorhaben FVA-Nr 713 AVIF-Nr. A286

- [13] Koller, P.: Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Kombination von Strahlbehandlung und Finishingprozess. Abschlussbericht FVA-Heft 957, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 2010 (IGF-Vorhaben Nr. 14908 N)
- [14] König, J.: Tragfähigkeit gestrahlter und gleitgeschliffener Zahnflanken unter besonderer Berücksichtigung des Randzonen- und des Schmierfilmzustandes. Forschungsreport FVA Informationstagung, Würzburg, 2015 zu Forschungsvorhaben FVA-Nr. 521/II IGF 17145 N
- [15] Li, S.X.: Effects of inclusions on very high cycle fatigue properties of high strength steels. International Materials Reviews, Vol. 57, p. 92 109, 2012
- [16] Lombardo, S.; Steinbacher, M.: Carbonitrieren von verzahnten Getriebebauteilen. Abschlussbericht FVA-Heft 970, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 2011 (AVIF-Vorhaben Nr. A235)
- [17] Mughrabi, H.: The importance of crack initiation in ultrahigh-cycle fatigue (UHCF). Fifth International Conference on Very High Cycle Fatigue 2011, p. 53 58, 2011
- [18] Murakami, Y.: Metal Fatigue. Effects of Small Defects and nonmetallic Inclusions. Butterworth-Heinemann Ltd, 2002
- [19] Pang, J.C.; Li, S.X.; Wang, Z.G.; Zhang, Z.F.: Relations between fatigue strength and other mechanical properties of metallic materials. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 37, p. 958 976, 2014
- [20] Saddei, P.; Schurer, S.; Güntner, C.: Alternative mehrphasige Randschichtgefüge beim Einsatzhärten zur Steigerung der Festigkeitseigenschaften von verzahnten Getriebebauteilen. Forschungsreport FVA Informationstagung, Würzburg, 2015 zu Forschungsvorhaben FVA-Nr. 513 III IGF 17903 N
- [21] Sakai, T.; Li, W.; Lian, B.; Oguma, N.: Review and new analysis on fatigue crack initiation mechanisms of interior inclusion-induced fracture of high strength steels in very high cycle regime. Fifth International Conference on Very High Cycle Fatigue, p. 19 26, 2011
- [22] Schurer, S.: Tragfähigkeitsgewinn im Zahnfuß durch hochreine Stähle. Abschlussbericht FVA-Heft 1148, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 2015 (IGF-Vorhaben 16662 N)
- [23] Stenico, A.: Werkstoffmechanik der Zahnfußtragfähigkeit. Dissertation TU München, 2007
- [24] Stenico, A.; Krug, T.: Eigenspannungseinfluss auf die Zahnfußtragfähigkeit kleinmoduliger Zahnräder. Abschlussbericht Heft 745, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 2004 (AVIF-Nr. A146/2004)
- [25] Steutzger, M.; Hirsch, T.: Einfluss des Verformungsgrades auf die Zahnfußtragfähigkeit. Abschlussbericht Heft 653, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 2002 (IGF-Nr. 11334)
- [26] Surm, H.; Bambach, M.; Karsch, T.; Klein, M.; Kramer, H.; Wickborn, C.: High Performance Components (HiPerComp): Innovative Konzepte zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit hochbeanspruchter Bauteile. Forschungsreport FVA Informationstagung, Würzburg, 2015
- [27] Weigand, U.: Werkstoff- und Wärmebehandlungseinflüsse auf die Zahnfußtragfähigkeit. Dissertation TU München, 1999
- [28] Witzig, J.: Entwicklung eines erweiterten Berechnungsverfahrens zur Ermittlung optimaler Zahnflankentragfähigkeit bis in den Bereich großer Werkstofftiefen. Abschlussbericht FVA-Heft 1000, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt, 2012 (AVIF-Vorhaben Nr. 243)
- [29] Yang, Z.G.; Zhang, J. M.; Li, S.X.; Li, G.Y.; Wang, Q.Y.; Hui, W.J.; Weng, Y.Q.: On the critical inclusion size of high strength steels under ultra-high cycle fatigue. Materials Science and Engineering A, Vol. 427, p. 167 174, 2006

	Antra	agsnr.: A 305		
Forschungsthema: Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgr	rad			
Laufzeitbeginn: 01.07.2016 Laufzeitende: 31.1) Monate		
	2016	2017	2018	Summe
A GESAMTSUMME Personalausgaben	41.547,14 €	95.236,63 €	70.048,83 €	206.832,60 €
B GESAMTSUMME Gerätebeschaffung	- €	- €	- €	- €
C GESAMTSUMME Ausgaben für Leistungen Dritter	15.000,00 €	11.424,00 €	- €	26.424,00 €
D GESAMTSUMME Pauschale für Sonstige Ausgaben	6.232,07 €	14.285,49 €	10.507,32 €	31.024,88 €
GESAMTSUMME der Ausgaben der				
Forschungsstellen (A+B+C+D)	62.779,21 €	120.946,12 €	80.556,15 €	264.281,48 €
Torschangsstehen (ATDTCTD)	02.779,21 €	120.540,12 €	80.330,13 €	204.281,48 C
E GESAMTBARMITTEL ANDERER				
FÖRDEREINRICHTUNGEN	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen -	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
F GESAMTBARMITTEL DER INDUSTRIE	15.000,00 €	6.664,00 €	- €	21.664,00 €
G BEANTRAGTER GESAMTFÖRDERBETRAG				
((A+B+C+D)-(E+F))	47.779,21 €	114.282,12 €	80.556,15 €	242.617,48 €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
Unternehmen	- €	- €	- €	- €
H SACH-/ EIGENMITTEL DER INDUSTRIE	25.126,00 €	33.600,00 €	15.600,00€	74.326,00 €
I SACH-/ EIGENMITTEL DER FORSCHUNGSSTELLEN	- €	- €	- €	- €
J GESAMTSUMME DES FORSCHUNGVORHABENS für				
alle Forschungsstellen (A+B+C+D+H+I)	87.905,21 €	154.546,12 €	96.156,15€	338.607,48 €

Antragsnr.: A 305

Forschungsthema: Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad
Laufzeitbeginn: 01.07.2016 Laufzeitende: 31.12.2018 Dauer: 30 Monate

Forschungsstelle 1 von 1

Anschrift: Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau Boltzmannstraße 15 85748 Garching

	2016	20	17	20:	18	Summe
Personalausgaben						
A.1 Wisstechn. Personal						
1 Ang.m.abg.wiss.Ausbildung Dr.	., DiplIng. TU o. vglb					
4.715,00 € HPA A 30,0 MM	6,0 MM (1,00	12,0 MM	(1,00)	12,0 MM	(1,00)	
Euro/Monat0 Ang.m.abg.wiss.Ausbildung Dr.	28.290,00 €		56.580,00 €		56.580,00 €	141.450,00 €
HPA bzw.	., DipiIlig. 10 0. vgib					
- € 0,0 MM	0,0 MM (1,00	0,0 MM	(1,00)	0,0 MM	(1,00)	
Euro/Monat	- €		- €		- €	- €
SUMME Bruttogehälter wisstechn. Personal	28.290,00 €		56.580,00€		56.580,00 €	141.450,00 €
A.2 Übriges Fachpersonal						
<u>A.2 Obliges Facilifersonal</u> Ang.m.staatl.Abschluss Technil	ver Meister o valh					
3.470,00 € HPA D 5,3 MM	1,3 MM (1,00	3,0 MM	(1,00)	1,0 MM	(1,00)	
Euro/Monat	4.511,00 €		10.410,00€		3.470,00 €	18.391,00€
1 Ang.m.staatl.Abschluss Technil			(4.00)		(4.00)	
3.320,00 € HPA E 6,0 MM Euro/Monat	1,0 MM (1,00 3.320,00 €	5,0 MM	(1,00) 16.600,00 €	0,0 MM	(1,00) - €	19.920,00€
Euro/ Pioriat	3.320,00 €		10.000,00 C			19.920,00 €
SUMME Bruttogehälter übriges Fachpersonal	7.831,00 €		27.010,00€		3.470,00 €	38.311,00 €
A.3 Hilfskräfte						
1 stud. Hilfskra(e)ft(e) Uni, TU, T	H o.ä.					
451,35 € Hilfskr. 30,0 MM	6,0 MM (1,00	12,0 MM	(1,00)	12,0 MM	(1,00)	
	2.708,10 €		5.416,20 €		5.416,20 €	13.540,50 €
o stud. Hilfskra(e)ft(e) Uni, TU, T			(4.00)		(4.00)	
- € Hilfskr. 0,0 MM	0,0 MM (1,00 - €	0,0 MM	(1,00) - €	0,0 MM	(1,00) - €	- €
	- 6		- 6		- 6	- 6
SUMME Bruttogehälter Hilfskräfte	2.708,10 €		5.416,20 €		5.416,20 €	13.540,50 €
ZWISCHENSUMME Personalausgaben A.1 - A.3	38.829,10 €		89.006,20 €		65.466,20 €	193.301,50 €
A.4 Pauschale für Personalausgaben						
max. 7% (auf A1+ A2 + A3)	2.718,04 €		6.230,43 €		4.582,63 €	13.531,10 €
,						
A SUMME Personalausgaben	41.547,14 €		95.236,63 €		70.048,83 €	206.832,60 €
Ausgaben für Gerätebeschaffung, Umbau, Eigenba	u (nur hoi Anschaffungsho	trägen über 25	(00 00 E)			
Ausgaben für Geratebeschaffung, Ombau, Eigenba	u (Hur bei Alischaffungsbe	tragerruber 23	500,00 €)			
B.1	- €		- €		- €	- €
B.2			- €			
	- €				- €	- €
B.3	- €		- €		- €	- €
B.3 B.4	- € - €		- € - €		- € - €	- € - €
B.3 B.4 B.5	- € - € - €		- € - € - €		- € - € - €	- € - €
B.3 B.4 B.5	- € - €		- € - € - €		- € - €	- € - €
B.3 B.4 B.5 3 SUMME Gerätebeschaffung	- € - € - €		- € - € - €		- € - € - €	- € - €
B.3 B.4 B.5 SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter	- 6 - 6 - 6		- € - € - €		- € - € - €	- € - € - €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt	- € - € - €		- € - € - €		- € - € - €	- € - € - €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß	- 6 - 6 - 6		- € - € - € - € 4.760,00 €		- € - € - €	- € - € - € - €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt	- 6 - 6 - 6		- € - € - €		- € - € - €	- € - €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € 15.000,00 €		- € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - € - €		- € - € - € - €	- € - € - € - € 4.760,00 € 21.664,00 € - €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € 15.000,00 € - €		- € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - €		- 6 - 6 - C	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 21.664,00 € - €
B.3 B.4 B.5 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 C.3 C.4 C.5 C.4 C.5 C.5 C.4 C.5 C.5 C.4 C.5 C.5 C.4 C.5 C.5 C.5 C.6 C.7 C.7 C.7 C.8 C.9	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - €		- € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - € - €		- 6 - 6 - 6 - 6	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 21.664,00 € - €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - € - €		- € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - € - €		- 6 - 6 - 6 - 6	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 21.664,00 € - €
B.3 B.4 B.5 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 C.3 C.4 C.5UMME Ausgaben für Leistungen Dritter	- € - € - € - € 15.000,00 € - € 15.000,00 €		- € - € - € - C 4.760,00 € 6.664,00 € - € - € 11.424,00 €		- 6 - 6 - C	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 21.664,00 € - € - € 26.424,00 €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 Eigenmittelaufstellung C.3 C.4 C SUMME Ausgaben für Leistungen Dritter Pauschale für Sonstige Ausgaben	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - € - €		- € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - € - €		- 6 - 6 - 6 - 6	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 21.664,00 € - €
B.3 B.4 B.5 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 Eigenmittelaufstellung C.3 C.4 C SUMME Ausgaben für Leistungen Dritter Pauschale für Sonstige Ausgaben	- € - € - € - € 15.000,00 € - € 15.000,00 €		- € - € - € - C 4.760,00 € 6.664,00 € - € - € 11.424,00 €		- 6 - 6 - C	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 21.664,00 € - € 26.424,00 €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 Eigenmittelaufstellung C.3 C.4 C SUMME Ausgaben für Leistungen Dritter Pauschale für Sonstige Ausgaben max. 15% (auf Summe Personlausgaben, D SUMME Pauschale für Sonstige Ausgaben SUMME der Ausgaben der	- € - € - € - € 15.000,00 € - € - € 15.000,00 € max. 25.000,00 € pro Jahr) 6.232,07 €		- € - € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - € - € 11.424,00 € 14.285,49 €		- € - € - € - € - € - € 10.507,32 €	- € - € - € - C - C 4.760,00 € 21.664,00 € - € - € 26.424,00 €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - € - 15.000,00 € max. 25.000,00 € pro Jahr) 6.232,07 €	1	- € - € - € - € - € 4.760,00 € - € - € 11.424,00 €		- € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - ∈ - € 26.424,00 €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 Eigenmittelaufstellung C.3 C.4 C SUMME Ausgaben für Leistungen Dritter Pauschale für Sonstige Ausgaben max. 15% (auf Summe Personlausgaben, D SUMME Pauschale für Sonstige Ausgaben SUMME der Ausgaben der Forschungsstelle (A+B+C+D)	- € - € - € - € 15.000,00 € - € - € 15.000,00 € max. 25.000,00 € pro Jahr) 6.232,07 €	1	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - € - € 11.424,00 € 14.285,49 €		- € - € - € - € - € - € 10.507,32 €	- € - € - € - € - € - € - 21.664,00 € € - 26.424,00 € 31.024,88 € - 31.024,88 €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 Eigenmittelaufstellung C.3 C.4 C SUMME Ausgaben für Leistungen Dritter Pauschale für Sonstige Ausgaben max. 15% (auf Summe Personlausgaben, D SUMME Pauschale für Sonstige Ausgaben SUMME der Ausgaben der Forschungsstelle (A+B+C+D) E BARMITTEL ANDERER FÖRDEREINRICHTUNGEN	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - ∈ - ∈ 15.000,00 € max. 25.000,00 € pro Jahr) 6.232,07 € 6.232,07 €	1	- € - € - € - € - € 4.760,00 € 6.664,00 € - € 11.424,00 € 14.285,49 € 14.285,49 € - €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - ∈ - € 26.424,00 € 31.024,88 € 264.281,48 €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - ∈ - ∈ 15.000,00 € max. 25.000,00 € pro Jahr) 6.232,07 € 6.232,07 €	1	- € - € - € - € - € - 6.664,00 € - € € 11.424,00 € 14.285,49 € 14.285,49 € - € € €		- € - € - € - € - € - € 10.507,32 €	- € - € - € - € - € - € - 26.424,00 € 31.024,88 € 31.024,88 € - € - € - € - € - €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - € - € 15.000,00 € - 6.232,07 € - 6.232,07 € - € - € - € - 15.000,00 €	1	- € - € - € - € - € - 6.664,00 € - € - 11.424,00 € - 14.285,49 € - € - € - € - 6.664,00 €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - € - € 26.424,00 € 31.024,88 € 264.281,48 € - € - € - € 21.664,00 €
B.3 B.4 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 Eigenmittelaufstellung C.3 C.4 C SUMME Ausgaben für Leistungen Dritter Pauschale für Sonstige Ausgaben max. 15% (auf Summe Personlausgaben, D SUMME Pauschale für Sonstige Ausgaben SUMME der Ausgaben der Porschungsstelle (A+B+C+D) E BARMITTEL ANDERER FÖRDEREINRICHTUNGEN Zu Position A zu Position A zu Position C Insgesamt	- € - € - € - € - € 15.000,00 € € 15.000,00 € max. 25.000,00 € pro Jahr) 6.232,07 € 6.232,07 € - € € 	1	- € - € - € - € - € - 6.664,00 € - € € 11.424,00 € 14.285,49 € 14.285,49 € - € € €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - € - € 26.424,00 € 31.024,88 € 264.281,48 € - € - € - € 21.664,00 €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € - 15.000,00 € € - 15.000,00 € € - 6.232,07 € - 6.232,07 € € € € 		- € - € - € - € - € - 6.664,00 € - € € 11.424,00 € 14.285,49 € 14.285,49 € - € € 6.664,00 € 6.664,00 €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € - € 21.664,00 € - € 26.424,00 € 31.024,88 € 264.281,48 € - € - € - € 21.664,00 €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € 15.000,00 € - € - € 15.000,00 € - 6.232,07 € - 6.232,07 € - € - € - € - 15.000,00 €		- € - € - € - € - € - 6.664,00 € - € - 11.424,00 € - 14.285,49 € - € - € - € - 6.664,00 €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € - € 21.664,00 € - 6 - 26.424,00 € 31.024,88 € - 264.281,48 € - € - € - 21.664,00 €
B.3 B.4 B.5 B.5 B SUMME Gerätebeschaffung Ausgaben für Leistungen Dritter C.1 Laser Peening inkl. MwSt Prüfradfertigung gemäß C.2 Eigenmittelaufstellung C.3 C.4 C SUMME Ausgaben für Leistungen Dritter Pauschale für Sonstige Ausgaben max. 15% (auf Summe Personlausgaben, D SUMME Pauschale für Sonstige Ausgaben SUMME Pauschale für Sonstige Ausgaben SUMME der Ausgaben der Forschungsstelle (A+B+C+D) E BARMITTEL ANDERER FÖRDEREINRICHTUNGEN ZU Position A ZU Position A ZU Position C Insgesamt G BEANTRAGTER FÖRDERBETRAG (((A+B+C+D)-(E+F))	- € - € - € - € - € - 15.000,00 € € - 15.000,00 € € - 6.232,07 € - 6.232,07 € € € € 		- € - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - € 26.424,00 € 31.024,88 € - € - € 21.664,00 € 21.664,00 € 21.664,00 €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €		- € - € - € - € - € - 6.664,00 € - € € 11.424,00 € 14.285,49 € 14.285,49 € - € € 6.664,00 € 6.664,00 €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - € 26.424,00 € 31.024,88 € - € - € 21.664,00 € 21.664,00 € 21.664,00 €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €		- € - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6 - 6		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - € 26.424,00 € 31.024,88 € 264.281,48 € - € 21.664,00 € 242.617,48 €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € - € - € - € - € - 15.000,00 € - ∈ - € - 15.000,00 € - 6.232,07 € - 7.232,07	1	- € - € - € - € - € - € - € 11.424,00 € 14.285,49 € 14.285,49 € 20.946,12 € - € - 6.664,00 € 14.282,12 € 33.600,00 €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €
B.3 B.4 B.5	- € - € - € - € - € - € - € - € - € - 15.000,00 € - € - € - 15.000,00 € - 6.232,07 € - 7.232,07 € - 7.2322,07 €	1	- € - € - € - € - € - 6.664,00 € - € 11.424,00 € 14.285,49 € 14.285,49 € - € - 6.664,00 € 6.664,00 € 14.282,12 € 33.600,00 €		- € - € - € - € - € - € - € - € - € - €	- € - € - € - € - € 21.664,00 € - € 26.424,00 € 31.024,88 € 264.281,48 € - € 21.664,00 € 21.664,00 €

Anlage zum Finanzierungsplan: Erläuterungen

<u>Personalausgaben</u>

1 Dr.-Ing., Dipl.-Ing. TU oder vglb. (HPA A)

Der Sachbearbeiter ist verantwortlich für die Planung des Vorhabens. Er legt die Prüfräder aus, stellt die Prüfradzeichnungen her und koordiniert die Beschaffung der Prüfräder. Der Sachbearbeiter führt die umfassenden theoretischen Arbeiten durch und ist für die wissenschaftliche Betreuung der Prüfstandsversuche zuständig. Dazu zählt u. a. die Planung, Überwachung und Auswertung der Laufversuche, die umfassende Dokumentation und Analyse der auftretenden Schadensbilder im Licht- und Rasterelektronenmikroskop sowie die statistische Analyse der Versuchsergebnisse. Darüber hinaus ist der Sachbearbeiter für die eigenständige Planung, Durchführung und Auswertung der Pulsatorversuche verantwortlich, die vom wissenschaftlichen Mitarbeiter persönlich durchgeführt werden (unterstützt durch Mechaniker allein für Reparaturarbeiten und Fertigung von Verschleißteilen). Er weist die studentische Hilfskraft bei unterstützenden Tätigkeiten im Rahmen der theoretischen Arbeiten, Versuchsdurchführung und Auswertearbeiten an und überprüft die Arbeiten. Schließlich übernimmt der Sachbearbeiter die Auswertung sowie die wissenschaftliche Diskussion aller theoretischen und experimentellen Ergebnisse, berichtet im projektbegleitenden Ausschuss und verfasst die Berichte und Veröffentlichungen.

• 1 Facharbeiter / Mechaniker (HPA E)

Der Facharbeiter / Mechaniker ist anteilig für das Zahnflankenschleifen der Prüfzahnräder, für die Betreuung und Instandhaltung der Prüfstände, Prüfstandselektronik und Messtechnik, für die Herstellung von Prüfstandsverschleißteilen, für die Hilfe bei Montage und Demontage der Laufprüfräder entsprechend Versuchsplan sowie für die Überwachung der Zahnradlaufversuche und Dokumentation der Versuchsergebnisse zuständig.

1 Facharbeiter / Laborant (HPA D)

Der Facharbeiter / Laborant ist anteilig für die umfassenden metallografischen Untersuchungen der Prüfzahnräder verantwortlich. Dies beinhaltet u. a. das Anfertigen und Dokumentieren von Gefügeschliffen, Messen von Härte- und Eigenspannungstiefenverläufen sowie die Auswertung der Ergebnisse in Zusammenarbeit mit dem verantwortlichen Sachbearbeiter. Zudem kümmert sich der Laborant anteilig auch um die Vermessung und Dokumentation der Prüfzahnräder.

1 studentische Hilfskraft

Die studentische Hilfskraft unterstützt den Sachbearbeiter bei der Durchführung der theoretischen Arbeiten, der Prüfraddokumentation, der Durchführung und Auswertung der Versuche und der versuchsbegleitenden Untersuchungen.

Ausgaben für Gerätebeschaffung

Alle zur Durchführung der im Antrag aufgeführten Tätigkeiten notwendigen Geräte und Prüfapparaturen sind an der Forschungsstelle vorhanden. Eine Beschaffung von Geräten ist daher nicht notwendig.

Ausgaben für Leistungen Dritter

Für die vorgesehenen Tragfähigkeitsuntersuchungen im Pulsator und Laufprüfstand sind einschließlich einer Prüfradreserve 65 Prüfradpaare sowie zusätzlich 10 Prüfritzel Bau-

größe Modul $m_n=1,5\,$ mm, 25 Pulsatorräder Modul $m_n=5\,$ mm und 5 Prüfradpaare Baugröße Modul $m_n=3\,$ mm für stichpunktartige Flankenbruchversuche notwendig. Der Umfang für die Beschaffung wird auf die Gesamtsumme von Euro 21.664,- inkl. Mehrwertsteuer (19 % MwSt.) abgeschätzt. Die kalkulierte Summe umfasst dabei die Kosten für die Wälzfräserbeschaffung, die Halbzeugbearbeitung und das Vorverzahnen sowie entsprechende Transportkosten. Eine externe Beschaffung der Prüfräder ist notwendig, da die entsprechenden Fertigungseinrichtungen an der Forschungsstelle nicht vorhanden sind. Die mechanische Fertigung der Prüfzahnräder erfolgt bei einem mittelständischen Zahnradhersteller, der bereits die Prüfräder zahlreicher Forschungsvorhaben kompetent und zuverlässig gefertigt hat. Entsprechende Angebote der Fa. Windschiegel liegen dem Antrag bei. Die entsprechenden Kosten werden durch Barmittel aus der Industrie (FVA) gedeckt. Die abschließende Hartfeinbearbeitung der Prüfräder erfolgt an der Forschungsstelle.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen des Arbeitspaketes 3 soll u. a. der Einfluss von hohen Druckeigenspannungen in größeren Bauteiltiefen auf das Auftreten innerer Brüche untersucht werden. Die dafür notwendige Bearbeitung der Prüfzahnräder mit Laserstrahlen wird von der Fa. Metal Improvement Company durchgeführt. Die dafür anfallenden Kosten belaufen sich auf 4.760,- inkl. Mehrwertsteuer (19 % MwSt.) und sind in einem beiliegenden Angebot separat ausgewiesen. Die Fa. Metal Improvement Company steht als langjähriger Partner der FZG im Rahmen von Forschungsprojekten bei Themen zur "Verfestigung von Bauteiloberflächen" unterstützend zur Seite und beteiligt sich in diesem Vorhaben darüber hinaus mit einer Eigenleistung in Form einer Kugelstrahlbehandlung von Prüfzahnrädern.

Pauschale für sonstige Ausgaben

Die Pauschale wird im vollen Umfang für die anfallenden Transportkosten der Werkstoffe und Prüfradrohlinge / Prüfräder, für Wartungs- und Reparaturkosten der Prüfeinrichtungen, für die Bereitstellung des notwendigen Schmierstoffes für die Laufversuche, die Deckung von Prüfstandsverbrauchsmaterial (mechanisch u. elektrisch) sowie die Beschaffung der für die Hartfeinbearbeitung der Prüfverzahnungen notwendigen Schleifmittel benötigt. Zudem erfordern die im Versuchsprogramm vorgesehenen umfangreichen metallographischen Untersuchungen entsprechendes Laborverbrauchsmaterial. Dieses wird ebenfalls anteilig über die Pauschale abgedeckt. Alle anfallenden Reisekosten für die vorgesehenen Projekttreffen sind mit dieser Pauschale gedeckt.

Sach-/ Eigenmittel sowie Barleistungen der Industrie

Zudem beteiligen sich, gemäß der beiliegenden Aufstellung, Partner aus der Industrie in nachfolgender Form:

• Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.:

OSK-Kiefer GmbH:

Metal Improvement Company:

Ovako GmbH:

ZF Friedrichshafen AG:

Saarstahl AG:

Lech-Stahlwerke GmbH:

Georgsmarienhütte GmbH:

• Deutsche Edelstahlwerke GmbH:

Kosten für Weichbearbeitung der Prüfzahnräder (s.o.)

Strahlbehandlung der Prüfräder und röntgenographische Eigenspannungsmessungen

Strahlbehandlung der Prüfräder Bereitstellung Werkstoffe und

Reinheitsgradanalyse

Wärmebehandlung Prüfräder

Reinheitsgradanalyse Bereitstellung Werkstoffe Reinheitsgradanalyse Reinheitsgradanalyse

Erläuterungen der Eigenleistungen der Forschungsstelle (FZG)

- Bereitstellung der erforderlichen Rechnerausstattung und Verwendung bereits vorhandener Software zur Erstellung der theoretischen Arbeiten
- Bereitstellung von Pulsatorprüfständen
- Bereitstellung der Zahnradschleifmaschine zur Hartfeinbearbeitung der Prüfräder einschließlich der erforderlichen Schleifscheiben. Abrichtwerkzeuge und Spannmittel
- Eigenfertigung von mechanischen Kleinteilen, Umbau- und Rüstarbeiten
- Spanende Bearbeitung der Prüfradrohlinge und Hartfeinbearbeitung der Prüfräder
- Antriebs- und Kühlenergieverbrauch für den Betrieb des Pulsatorprüfstandes, Prüfstands- und Laborräume
- Einsatz von Metallographie und Fotolabor, Verzahnungsmesseinrichtungen, Röntgendiffraktometer, Rasterelektronenmikroskop (REM)
- Verwendung bereits vorhandener Software zur Auswertung der Versuche
- Verwendung bereits vorhandener Software zur Dokumentation der Schadensbilder



METAL IMPROVEMENT COMPANY, LLC - 59407 UNNA - POSTFACH 1759

Herr Dipl.-Ing. Stefan Schurer

TU München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Leader in Surface Engineering for Critical Components

FZG Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau

Metal Improvement Company, LLC

Werk Unna

Tel: +49(0)2303 9188-0 Fax: +49(0)2303 9188-11 e-mail: micunna@cwst.com

Internet: www.cwst.de

Postanschrift:Lieferanschrift:Postfach 17 59Otto-Hahn-Straße 359407 Unna59423 Unna

Handelsregister: HRB 3159
Amtsgericht Hamm UST-Ident-Nr. DE124795544

 Bankverbindung:
 Konto. 108 5000

 Commerzbank AG, Unna
 BLZ 443 400 37

 IBAN
 DE84 4434 0037 0108 5000 00

 BIC
 COBADEFFXXX

Zulassungen: FAA Repair Station Nr. M3IY439J LBA Instandhaltungsbetrieb DE.145.0327

JK/BS 17.09.2015



Angebot 8630/15

Sehr geehrter Herr Schurer,

wir bedanken uns für Ihre Anfrage, per E-Mail vom 17.09.2015, im Hinblick auf unser Laser Peening und unterbreiten Ihnen folgendes Angebot:

Zahnräder

Abmessungen: *
Zeichnungsnummer: *
Werkstoff: *
Gewicht: *

Bearbeitungskosten

Anlieferungsmenge: 5 Stück 4.000,00 EUR/Anlieferung

Wir sind ab sofort in der Lage, Ihre Teile zu kugelstrahlen.

Wir setzen voraus, dass die Bauteile schmutz- und fettfrei angeliefert werden.

Das Vorliegen Ihrer schriftlichen Bestellung ist Voraussetzung.

Die Preise verstehen sich ohne Mehrwertsteuer.

Zahlung: Spätestens 30 Tage nach Rechnungsdatum ohne Abzug!

An dieses Angebot halten wir uns 3 Monate gebunden. Unsere Leistungen erfolgen aufgrund unserer allgemeinen Geschäfts- und Zahlungsbedingungen.

Transportdisposition und Frachtkosten einschließlich Zustellungskosten und Bankgebühren gehen zu Ihren Lasten.



Metal Improvement Company, LLC

Die Anlieferungsverpackung muss für den Rücktransport wieder verwendbar sein. Zur betriebssicheren Zwischenlagerung verbleiben Transportmittel wie z.B. Europaletten, Gitterboxpaletten oder Kisten während der Kugelstrahlbearbeitung bei uns im Werk.

Mit freundlichen Grüßen

METAL IMPROVEMENT COMPANY, LLC Niederlassung Unna

ppa. Kritzler

Sales Manager

Un-los W

Besuchen Sie uns auch im Internet unter: www.cwst.de





Telefon: +49 (0) 96 81-91434 Telefax: +49 (0) 96 81-91436 Internet: www.windschiegl.de Mail: kontakt@windschiegl.de

Windschiegl Maschinenbau GmbH - Am Bohrturm 1 - 92670 Windischeschenbach

TU München Lehrstuhl für Maschinenelemente Herr Reiner Duschek Boltzmannstrasse 15

85748 Garching bei München

 Datum
 : 22.09.2015

 Sachbearbeiter
 : Sebastian Meierl

 Telefon
 : +49 (0)9681 40024 - 28

 Fax
 : +49 (0)9681 40024 - 9528

 E-mail
 : info-s.meierl@windschiegl.de

 Kunden-Nr.
 : K0675

 Tel. Kunde
 : +49 (0)89 289 15886

Ihre Anfrage : FVA 293 IV

Seite : 1 von 2

Angebot-Nr.: 49871-1-15

Sehr geehrter Herr Duschek,

wir bedanken uns für Ihre Anfrage und bieten wie folgt an: Ihr Ansprechpartner: Herr Sebastian Meierl (Arbeitsvorbereitung)

Tel.: +49 (0)9681 40024 - 28 Email: info-s.meierl@windschiegl.de

Pos.	Artikel-Nr.	Bezeichnung	Menge	Einzelpreis
1		Komplette Anfertigung jedoch ohne Einsatz- härten und ohne Zahnflankenschleifen Prüfritzel FVA 293 IC n.Z. 10047-05-001	75 Stück	73,00 EUR
-		Anteilige Werkzeugkosten (Protuberanzfräser)	1 Stück	700,00 EUR
2		Komplette Anfertigung jedoch ohne Einsatz- härten und ohne Zahnflankenschleifen Prüfrad FVA 293 IC n.Z. 10047-05-002	65 Stück	79,00 EUR
3		Komplette Anfertigung ohne Einsatzhärten mit Zahnflankenschleifen Pulsatorprüfrad FVA 513 III n.Z. 10084-01-001	25 Stück	141,00 EUR

Angebot-Nr.: 49871-1-15





Telefon: +49 (0) 96 81-91434 Telefax: +49 (0) 96 81-91436 Internet: www.windschiegl.de Mail: kontakt@windschiegl.de

Datum : 22.09.2015

Seite : 2 von 2

Pos. Artikel-Nr. Bezeichnung Menge Einzelpreis

- Anteilige Werkzeugkosten (Protuberanzfräser)

Hinweis zu allen Positionen:
hergestellt aus gewalzten Stabstahl mit APZ. 3.1b

Bei obigen Preisen sind die derzeit gültigen Lohn- und Materialkosten zugrunde gelegt. Sollte bis zum Tage der Auftragsvergabe bei obigen Faktoren eine Änderung eintreten, behalten wir uns eine Preisberichtigung vor.

Zahlungsbedingungen:

14 Tage netto

Lieferbedingungen:

ab Werk

Liefetermin nach Absprache

Mit freundlichen Grüßen WINDSCHIEGL Maschinenbau GmbH

i. A. S. Meierl

Es gelten unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen. Diese erhalten Sie im Internet unter http://www.windschiegl.de/typo/de/unternehmen/downloads.html.







Telefon: +49 (0) 96 81-91434 Telefax: +49 (0) 96 81-91436 Internet: www.windschiegl.de Mail: kontakt@windschiegl.de

Windschiegl Maschinenbau GmbH - Am Bohrturm 1 - 92670 Windischeschenbach

TU München Lehrstuhl für Maschinenelemente Herr Reiner Duschek Boltzmannstrasse 15

85748 Garching bei München

Datum : 29.07.2015 Sachbearbeiter : Andreas Fenzl

Telefon : +49 (0)9681 40024 - 15
Fax : +49 (0)9681 40024 - 9515
E-mail : info-a.fenzl@windschiegl.de

Kunden-Nr. : K0675

Tel. Kunde : +49 (0)89 289 15886

Ihre Anfrage : per FAX vom : 28.07.2015

Seite : 1 von 2

Angebot-Nr.: 48814-1-15

Sehr geehrter Herr Duschek,

wir bedanken uns für Ihre Anfrage und bieten wie folgt an: Ihr Ansprechpartner: Herr Andreas Fenzl (Arbeitsvorbereitung)

Tel.: +49 (0)9681 40024 - 15 Email: info-a.fenzl@windschiegl.de

Pos.	Artikel-Nr.	Bezeichnung	Menge	Einzelpreis	Gesamtpreis
		Komplette Weichbearbeitung			
		Bearbeitungsumfang: Sägen, kpl. Drehen, Verzahnen, Entgraten, Nute erodieren, Bohrung und Planparallel schleifen. Das Einsatzhärten und Zahnflanken schleifen wird von Ihnen durchgeführt. Das Stangenmaterial ca. Ø230 und der Protuberanz-Fräser werden von Ihnen kostenfrei beigestellt.			
1		Prüfritzel n.Z. 10011-01-001	5 Stück	248,00 EUR	1.240,00 EUR
2		Prüfrad n.Z. 10011-01-002	5 Stück	248,00 EUR	1.240,00 EUR
3		Anteilige Werkzeugkosten (Zentrierbüchse, Erodieraufnahme)	1 Stück	240,00 EUR	240,00 EUR



Angebot-Nr.: 48814-1-15





Telefon: +49 (0) 96 81-91434 Telefax: +49 (0) 96 81-91436 Internet: www.windschiegl.de Mail: kontakt@windschiegl.de

Datum : 29.07.2015

Seite : 2 von 2

Pos. Artikel-Nr. Bezeichnung Menge Einzelpreis Gesamtpreis

Gesamtsumme	3.236,80 EUR
+ 19,00 % MwSt	516,80 EUR
Nettosumme	2.720,00 EUR

Bei obigen Preisen sind die derzeit gültigen Lohn- und Materialkosten zugrunde gelegt.

Sollte bis zum Tage der Auftragsvergabe bei obigen Faktoren eine Änderung eintreten, behalten wir uns eine Preisberichtigung vor.

Bei Auftragserteilung bitte Zeichnungsunterlagen im *.dxf- und *.step- Format bereitstellen. Mehraufwand durch Programmiertätigkeit oder Zeichnungserstellung wird zusätzlich verrechnet.

Zahlungsbedingungen: 14 Tage netto Lieferbedingungen: ab Werk

Mit freundlichen Grüßen WINDSCHIEGL Maschinenbau GmbH

i. A. A. Fenzl

Es gelten unsere allgemeinen Geschäftsbedingungen. Diese erhalten Sie im Internet unter http://www.windschiegl.de/typo/de/unternehmen/downloads.html.



Aufstellung der Eigenmittel

Anlage 5 (mit dem Finanzierungsplan einzureichen)

zum Forschungsvorhaben (Kurztitel):

4

Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad II

Firma	Sachleistungen	Geräteeinsatz / Retriebskosten	Personalausgaben	Barleistungen	Summe gesamt
	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]	[EUR]
Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.				21.664,00	21.664,00
OSK-Kiefer GmbH	8.000,00				8.000,00
Metal Improvement Company	12.000,00				12.000,00
Ovako GmbH	7.426,00				7.426,00
ZF Friedrichshafen AG	11.000,00				11.000,00
Saarstahl AG	00'000'9				6.000,00
Lech-Stahlwerke GmbH	1.900,00				1.900,00
Georgsmarienhütte GmbH	00'000'9				6.000,00
Deutsche Edelstahlwerke GmbH	8.000,000				8.000,00
	60.326,00	00'0	00'0	21.664,00	81.990,00
		a) Teilnehmer	b) Sitzungen	c) Aufwendungen	Summe gesamt fax b x cl
Aufwendungen für den projektbegleitenden Arbeitskreis	Arbeitskreis	[Anzahl]	[Anzahl]	[EUR]	[EUR]
		14	5	200,00	14.000,00
				Gesamtsumme	95.990,00

Die entsprechenden Zusagen der Beteiligten sind beizufügen.

Die Zusagen sind zu spezifizieren, z. B. durch Angabe von Personalkostensätzen, Art und Wert der durchgeführten Arbeiten bzw. Sachleistungen, genauer Verwendungszweck von Barleistungen.

Zur Ermittlung der Aufwendungen siehe im einzelnen AVIF-Leitfaden, Teil 1, Pkt. II.2.H.

Total Straffe 18, 60528 ~. 74 63 64, 604**6%** Forschungsve



Oberflächentechnik Strahltechnik Kugelstrahlen und Gleitschleifen im Lohnauftrag www.osk-kiefer.com

OSK-Kiefer GmbH
Oberflächen- & Strahltechnik

D-85238 Petershausen

Göppertshausen 5-6

Tel.: 08137/9316-0, Fax: 08137/9316-16

E-Mail: osk-petershausen@osk-kiefer.com

OSK-Kiefer GmbH, D 85238 Petershausen, Göppertshausen 5-6

Lehrstuhl für Maschinenelemente FZG

Bolzmannstr. 15

85748 Garching

Petershausen, 09.09.2015

unser Zeichen: Schl.

Tel.: 08137/9316-11

Vorhabenbezogene Dienstleistung

Sehr geehrte Damen und Herren,

für das Vorhaben "Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad II" stellen wir unsere folgende Dienstleistung unentgeltlich zur Verfügung:

Kugelstrahlen – Gleitschleifen – röntgenografische Eigenspannungsmessung.

Die Dienstleistung hat einen Wert von 8.000,00 €.

Für Rückfragen stehen wir gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

OSK-Kiefer GmbH

Oberflächen- & Strahltechnik

Harry Schlutius

-Geschäftsführung-



METAL IMPROVEMENT COMPANY, LLC - 59407 UNNA - POSTFACH 1759

Herr Dipl.-Ing. Stefan Schurer

TU München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Leader in Surface Engineering for Critical Components

FZG Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau

Metal Improvement Company, LLC

Werk Unna

Tel: +49(0)2303 9188-0 Fax: +49(0)2303 9188-11 e-mail: micunna@cwst.com

Internet: www.cwst.de

Postanschrift: Lieferanschrift: Postfach 17 59 Otto-Hahn-Straße 3

59407 Unna 59423 Unna

Handelsregister: HRB 3159 Amtsgericht Hamm UST-Ident-Nr. DE124795544

Bankverbindung: Konto, 108 5000 Commerzbank AG, Unna BLZ 443 400 37

IBAN DE84 4434 0037 0108 5000 00 BIC **COBADEFFXXX**

FAA Repair Station Nr. M3IY439J Zulassungen:

LBA Instandhaltungsbetrieb DE.145.0327

JK/BS 17.09.2015



Sehr geehrter Herr Schurer.

vielen Dank für Ihre Nachricht vom 17.09.2015.

Gerne teilen wir Ihnen mit, dass wir an den Arbeitsgruppensitzungen teilnehmen werden und das Forschungsvorhaben unterstützen.

Sie erhalten hiermit unsere schriftliche Zusicherung der kostenfreien Kugelstrahlbearbeitung.

Die Gesamtleistung der Bearbeitung für das Forschungsvorhaben von 30 Zahnräder beläuft sich auf 12.000,00 €.

Bei offenen Fragen oder Bedarf an technischer Beratung stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

METAL IMPROVEMENT COMPANY, LLC

Niederlassung Unna

opa. Kritzler59423 Unna

Ofto-Hahn-Str. 3 Postfach 17 59 59407 Unna

Improvedent Company, LLC

Sales Manager

Besuchen Sie uns auch im Internet unter: www.cwst.de



Ovako GmbH, Max Planck Str. 15 b, D-40699 Erkrath

FZG Forschungsstelle für Zahnräder z.Hd. Herrn Schurer Boltzmannstraße 15

D-85748 Garching

Angebot hochreine Stähle für Forschungsvorhaben Ringversuch

Sehr geehrter Herr Schurer,

wie gewünscht erhalten Sie nachfolgend unser Angebot für den nachfolgenden Materialbedarf:

Werkstoff und Abmessung:	Gewicht:	Stückpreis:
157Q: ca. 2000 mm, min. Ø 100 mm	ca. 123 kg	517,44 €
236Q: ca. 2000 mm, min. Ø 100 mm	ca. 123 kg	517,44 €
236F: ca. 1000 mm, min. Ø 100 mm	ca. 62 kg	260,40 €
159Q: ca. 1000 mm, min. Ø 100 mm	ca. 62 kg	260,40 €
159Q: ca. 500 mm, min. Ø 150 mm	ca. 69 kg	310,50 €
159Q: ca. 1000mm, min. Ø 210 mm	ca. 271 kg	1219,50€
158Q: ca. 1000 mm, min. Ø 100 mm	ca. 62 kg	310,50 €
158Q: ca. 500 mm, min. Ø 150 mm	ca. 69	310,50 €

Alle Preise verstehen sich inklusive der aktuellen SZ/LZ Notierungen.

Zwischensumme:	3.706,68 €
Laborkosten (Reinheitsgradbestimmung K1 Wert	
Ermittlung, WZ Erstellung)	2.300,00€
zuzügl. 19% MwSt.	1.141,27 €

Angebotspreis:	7.147,94 €		
Frachtkosten nach Garching	278,00€		
Gesamtsumme:	7.425,94 €		

Die Werkstoffe sowie die Dienstleistungen werden für das Projekt kostenfrei zur Verfügung gestellt.

Mit freundlichem Gruß,

Ovako GmbH

Postfach 12 55 D-40672 Erkrath Max-Planck-Strasse 15 b D-40699 Erkrath

Tel. +49 211 2504-0 Fax. +49 211 2504-244 www.ovako.com ovako.erkrath@ovako.com Geschäftsführer: Carsten Blank Amtsgericht Wuppertal HRB 12679 Steuer Nr. 5147/5856/0299 UST.-Nr. DE 121 643 604 Nordea Frankfurt am Main IBAN DE28 5143 0300 6597 0600 0 BIC NDEADEFF



Forschung & Entwicklung

ZF Friedrichshafen AG · 88038 Friedrichshafen

Abteilung

DTGM3

Von

Baum

Dipl.-Ing. Stefan Schurer

Telefon

+49 7541 77 7263

Lehrstuhl für Maschinenelemente

Technische Universität München

Telefax

ulrich.baum @zf.com

FZG

E-Mail

Ihre Ref.

ine noi.

Unsere Ref.

Boltzmannstrasse 15 85748 Garching

Datum

15.09.15

FVA-Vorhaben Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad II

Sehr geehrter Herr Schurer,

hiermit bestätigen wir, dass die ZF Friedrichshafen AG an der geplanten Arbeitsgruppe zum o.g. Projekt teilnehmen wird und bereit ist, die Wärmebehandlung der 11 geplanten Varianten als Industrieleistung zu übernehmen.

Mit freundlichen Grüßen

ZF Friedrichshafen AG

Raum

i. A. Bee

Sehr geehrter Herr Dr. Tobie,

hiermit bestätige ich entsprechend dem Schreiben der ZF Friedrichshafen AG vom 15.9.2015, dass die ZF bereit ist, die Wärmebehandlungen als Industrieleistung zu übernehmen. Die Kosten für die geplanten Wärmebehandlungen betragen nach derzeitiger Planung 11.000,- € incl. der Dokumentation.

Für weitere Fragen stehe ich jederzeit zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen/Kind regards Ulrich Baum

Forschung und Entwicklung ZF Konzern/Research and Development ZF Group Leiter Metallographie und physikalische Analytik/ Head of Metallography and Physical Analytics

ZF Friedrichshafen AG

88038 Friedrichshafen, Deutschland/Germany Telefon/Phone +49 7541 77-7263, Telefax/Fax +49 7541 77-90 7263 ulrich.baum@zf.com

Vorstand/Board of Management: Dr. Stefan Sommer (Vorsitzender/CEO), Dr. Konstantin Sauer, Jürgen Holeksa, Michael Hankel, Wilhelm Rehm, Rolf Lutz, Dr. Franz Kleiner, Peter Lake

Sitz/Headquarters: Friedrichshafen

Handelsregistereintrag Amtsgericht Ulm HRB 630206/Trade register of the municipal court of Ulm HRB 630206



Saarstahl AG | D-66330 Völklingen

FZG – Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau TU München Herrn Stefan Schurer Boltzmannstrasse 15 85748 Garching

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Unsere Zeichen 551-1 / 54-15 / Scherer Telefon-Durchwahl + 49 (0) 68 98·10-2707 Datum 23.09.2015

Beteiligung am geplanten Forschungsvorhaben "FVA 293 IV – Späte Zahnfußbrüche/ Reinheitsgrad II"

Sehr geehrter Herr Schurer,

wir möchten uns am o. g. Forschungsvorhaben beteiligen und am projektbegleitenden Ausschuss teilnehmen.

Als vorhabenbezogene Aufwendungen der Wirtschaft werden wir für das Projekt

ca. 6000€ in Form von Reinheitsgraduntersuchungen

bereitstellen.

Mit freundlichen Grüßen Saarstahl AG

Dr. G. Doppler

(Leiter Innovation)

M. Scherer (Werkstoffentwicklung)





Lech-Stahlwerke GmbH • Postfach 1111 • D-86400 Meitingen

Technische Universität München FZG Forschungsstelle für Zahnrad- und Getriebebau z.Hd. Prof. Dr.-Ing. K. Stahl Boltzmannstrasse 15 85748 Garching Kontakt: Dr.-Ing. J. Lauscher Telefon: +49 8271 82-325 Telefax: +49 8271 82-405 E-Mail: joerg.lauscher

@lech-stahlwerke.de Steuer-Nr.: 102/115/00021 Ust.ldNr.: DE811 156 195

Datum: 28.09.2015

Projekt 293 IV - Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad

Sehr geehrter Herr Prof. Stahl,

für das Projekt "Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad" stellt die Lech-Stahlwerke GmbH den Werkstoff 20MnCr5+Te zur Verfügung. Die Kosten hierfür belaufen sich auf 1.900 €.

Dr.-Ing. Jörg Lauscher



Georgsmarienhütte GmbH · Postfach 1280 · 49110 Georgsmarienhütte
Lehrstuhl für Maschinenelemente
FZG - Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau
z.H. Herr Dipl.-Ing. Stefan Schurer
Technische Universität München
Boltzmannstrasse 15

85748 Garching

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Telefon (0 54 01) 39 -4644 Abteilung und Zeichen

AE - HD

Datum

07.Oktober 2015

Beteiligung der Georgsmarienhütte GmbH an dem geplanten AVIF-Projekt "Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad IV"

Sehr geehrter Herr Schurer,

diesem Schreiben beiliegend übermittle ich Ihnen die Absichtserklärung der Georgsmarienhütte GmbH zur Beteiligung an o.g. Projekt.

Sollten sich Fragen ergeben, stehe ich Ihnen selbstverständlich gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

i.A. Henning Dickert

Anlage: 1

Unsere St-Nr.: 65/200/08188



Georgsmarienhütte GmbH · Postfach 1280 · 49110 Georgsmarienhütte
Lehrstuhl für Maschinenelemente
FZG - Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau

z.H. Herr Dipl.-Ing. Stefan Schurer

Technische Universität München Boltzmannstrasse 15

85748 Garching

Ihre Zeichen

Ihre Nachricht vom

Telefon (0 54 01) 39 - Abteilung und Zeichen

Datum

<u>Absichtserklärung</u>

Die Firma:

Georgsmarienhütte GmbH

bestätigt hiermit, dass Sie beabsichtigt sich an dem geplanten AVIF Vorhaben

"Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad IV"

zu beteiligen und in dem projektbegleitenden Ausschuss mitzuarbeiten.

Im Falle einer Projektdurchführung beabsichtigen wir uns mit ca. folgendem Umfang an o.g. Projekt zu beteiligen:

• Reinheitsgraduntersuchungen:

6.000.-€

07. Oktober 2015

Georgsmarienhütte GmbH

Datum

Firma / Stempel

Georgsmarienhütte GmbH Neue Hüttenstrasse 1

49124 Georgsmarienhütte

Unterschrift

Georgsmarienhütte GmbH Neue Hüttenstraße 1 49124 Georgsmarienhütte Tel. +49 (0)5401 39-0 Fax +49 (0)5401 39-4425 www.gmh.de Unsere USt-ID: DE194348452

Unsere St-Nr.: 65/200/08188

Aufsichtsratsvorsitzender: Wolfram Thomas Geschäftsführung: Dietmar Hemsath, Prof. Dr. Felix Osterheider, Dr. Knut Schemme, Dr. Henning Schliephake Gesellschaftssitz: Georgsmarienhütte Amtsgericht Osnabrück HRB 110 610 Commerzbank A Sonabrück, Kto.-Nr. 802 1740 00 (BLZ 265 800 70) IBAN: DE86 2658 0070 0802 1740 00; BIC: COBA DE FF 265 Landesbank Baden-Württemberg, Kto.-Nr. 4 2836 72 (BLZ 600 501 01) IBAN: DE27 6005 0101 0004 2836 72; BIC: SOLA DE ST 600 Sparkasse Osnabrück, Kto.-Nr. 1633 1103 64 (BLZ 265 501 05) IBAN: DE52 2655 0105 1633 1103 64; BIC: NO LA DE 22 WGZ Bank Münster, Kto.-Nr. 8925 55 (BLZ 400 600 00) IBAN: DE39 4006 0000 0000 8925 55; BIC: GENO DE MS

SCHMOLZ + BICKENBACH GROUP

FZG-Maschinenelemente

n 2. Nov. 2015

Technische Universität München

DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE

Providing special steel solutions

Datum:



Deutsche Edelstahlwerke GmbH Auestraße 4 · 58452 Witten

Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau

H. Schurer Bolzmannstr. 15 85748 Garching Ihr/e Ansprechpartner/in:
H. van Soest
Telefon- / Fax-Durchwahl
+49 23 02 29-4661 / frankvan.soest@dew-stahl.com

28.10.2015

Absichtserklärung

Hiermit erklären wir uns bereit, das bei der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF) beantragte Forschungsvorhaben

"293 IV - Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad II"

durch die Bereitstellung von Personal- bzw. Sachleistungen zu unterstützen.

Die Firma Deutsche Edelstahlwerke GmbH wird im Rahmen des Projektes die folgenden Leistungen einbringen:

Sachleistungen

Werkstoffprüfungen (Reinheitsgrad)

Die genannten Sachleistungen entsprechen einer geldwerten Leistung von ca. 8.000,--€

Die Firma Deutsche Edelstahlwerk GmbH plant darüber hinaus die Teilnahme an den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses.

Mit freundlichen Grüßen

Deutsche Edelstahlwerke GmbH

www.dew-stahl.com

LAUFZEIT- UND AUSGABENPLAN (LAP)

Anlage 4.3 Stand 24.11.2015

Forschungsthema: Späte Zahnfußbrüche/Reinheitsgrad

Gesamtlaufzeit von 01.07.2016 bis 31.12.2018 Stand:

Antragsnr.: A 305

T-:1		2016			2017		1	2018		Gesamtlaufzeit	
Teilvor- haben Nr.	ARBEITSSCHRITTE	Mona	te	Laufzeit	Planausgaben T-EURO	Monate	Laufzeit	Planausgaben T-EURO	Monate Laufzeit	Planausgaben T-EURO	Planung T-EURO
1	Theoretische Arbeiten				9,91			14,03		16,96	Planung Aktualität 40,90
2	Beschaffung der Werkstoffe				10,56			0,00		0,00	10,56
3	Auswertung der Werkstoffdokumentation				1,32	ШШ		0,00		0,00	1,32
4	Auslegung und Beschaffung der Prüfzahnräder Schleifbearbeitung				30,96			28,67		0,00	59,63
	der Laufprüfräder				0,00			7,10		0,00	7,10
6	Laufversuche AP1				10,53			12,10		0,00	22,63
7	Laufversuche AP2				0,00			8,55		9,50	18,05
8	Pulsatorversuche AP2				0,00			12,03		0,00	12,03
9	Pulsatorversuche AP3				0,00			6,02		0,00	6,02
10	Flankenbruchversuche AP3 Versuchsbegleitende Untersuchungen: - Vermessung/Dokumentation				0,00			2,01		6,02	8,03
11	- Schadensdokumentation im LM + REM - Eigenspannungsmessungen - Metallographie				11,43			23,17		8,71	43,31
12	Anwendung und Bewertung statistischer Methoden zur Charakterisierung von Werkstoffen hinsichtlich Einschlusshäufigkeit und -verteilung				3,96			28,05		27,49	59,50
	Erweiterung bestenender lokaler Berechnungsmodelle zur Berücksichtigung von Fehl- stellen bei der Zahnradtrag- fähigkeitsbestimmung				7,91			10,03		17,49	
14	Erstellung von Zwischen- berichten und des Abschlussberichtes				1,32			2,79		9,99	14,10
				07.00			15455		06.16	0,00	
Gesamtsumme des Forschungsvorhabens über alle Aktivitäten					87,90	<u> </u>		154,55		96,16	338,61

Anhang zum Forschungsantrag:

11. Mitglieder der Arbeitsgruppe "Späte Zahnfußbrüche/ Reinheitsgrad II"

Christian Fuchs RENK Aktiengesellschaft

Jürgen Kritzler Metal Improvement Company, LLC

Harry Schlutius OSK-Kiefer GmbH

Christoph Lehne Siemens AG
Manfred Siefert Siemens AG

Ulrich Baum ZF Friedrichshafen AG

Harald Schwend OVAKO GmbH

Robert Sandner Lech-Stahlwerke GmbH Henning Dickert Georgsmarienhütte GmbH

Markus Scherer Saarstahl AG

Frank van Soest Deutsche Edelstahlwerke GmbH

Dr. Thomas Krug Robert Bosch GmbH

Michael Kreutz RENK Aktiengesellschaft

Jürgen Hoffmeister SEW-Eurodrive GmbH & Co. KG

12 Mitglieder des projektbegleitenden Arbeitskreises "Werkstoffe"

Dr. Uwe Ahrens Claas Industrietechnik GmbH

Burkhard Arens Daimler AG
Dr. Arash Arvand SKF GmbH

Christoph Aßmann Christoph Aßmann Ingenieurdienste

Jakob Aßmann Christoph Aßmann Ingenieurdienste

Dr. Manfred Bacher-Höchst Robert Bosch GmbH

Dr. Robert Baierl Linde Material Handling GmbH

Jürgen BedeyREINTJES GmbHDr.-Ing. Ralf BodeSiemens AGMichaela BrasseurSiemens AGDr.-Ing. Nick BretlBMW Group

Jacob Bryja SCHOTTEL GmbH

Benjamin Burgmaier MTU Friedrichshafen GmbH

Marco Burtchen

David Chiaradia

ZF Wind Power Antwerpen NV

Daniel Chmill

Bonfiglioli Vectron GmbH

Jan Coenen

Bonfiglioli Vectron GmbH

Dominik Dapprich Stresstech GmbH
Pascal Dickmann PIV Drives GmbH

Dr.-Ing. Markus Dinkel Schaeffler Technologies GmbH & Co.KG

Jörg Döllekes Eickhoff Maschinenfabrik GmbH

Wilhelm Dorner WITTENSTEIN AG
Heinz Drescher SIEMENS AG

Alexander Ehrhardt Volkswagen AG
Stefan Emmert Bosch Rexroth AG
Uwe Epler Klingelnberg GmbH

Mara Ewering Siemens AG

Dr. Roman Flesch GETRAG FORD Transmissions GmbH

Friedrich Först Daimler AG

Tilman Froschmeier Robert Bosch GmbH
Christian Fuchs RENK Aktiengesellschaft

Dr. Hansjörg Geiser Liebherr-Verzahntechnik GmbH Holger Graf GFC AntriebsSysteme GmbH

Dr. Winfried Gräfen Hanomag Härtol Gommern Lohnhärterei GmbH

Dr. Carsten Greisert RENK Aktiengesellschaft

Dr. Doris Günther Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Philipp Guth WITTENSTEIN bastian GmbH

Hans-Christian Hartmann Siemens AG

Mathias Heinecke Henschel Antriebstechnik GmbH
Christoph Heinze Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Dr.-Ing. Martin Heitkemper Bosch Rexroth AG

David Herberg Eickhoff Maschinenfabrik GmbH

Dr. Volker Heuer ALD Vacuum Technologies GmbH

Klaus Hölken Härterei Reese Bochum GmbH

Dr. Christian Hollmann ZF Friedrichshafen AG

Dipl.-Ing. Ursel Huber-Gommann Härterei Carl Gommann GmbH

Dr. Uwe Huchel ELTRO GmbH
Frank Hufen REINTJES GmbH

Dr. Michael Jung SKF GmbH

Dr. Markus Karlsohn Härterei Carl Gommann GmbH
Dipl.-Ing. Ulrich Kempter Voith Turbo BHS Getriebe GmbH

Peter Kessler Lindauer DORNIER GmbH
Dr.-Ing. Christoph Keul Stahlinstitut VDEh und

Holger Kirsebauer Kracht GmbH

Thomas Kleiber Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Dr. Hans Koenen Harmonic Drive AG

Rainer Kohlmann

Deutsche Edelstahlwerke GmbH

Dr. Dominik Kotzott

SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG

Dr. Christian Krause

EMAG eldec Induction GmbH

Michael Kreutz RENK Aktiengesellschaft

Jürgen Kritzler Metal Improvement Company, LLC

Dr. Thomas Krug Robert Bosch GmbH

Peter Kühne THIELENHAUS TECHNOLOGIES GmbH
Esther Kunz Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG

Dr. Deniz Kurumlu Eickhoff Antriebstechnik GmbH

Thomas Langer NKE AUSTRIA GmbH

Christoph Lehne Siemens AG

Roger Liedtke Härterei Reese Bochum GmbH

Dr. Michael Lohrmann ZF Friedrichshafen AG

Dr. Simone Lombardo Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Dr. Klaus Lösch KAPP 2 Technologie GmbH

Dr. Klaus Löser ALD Vacuum Technologies GmbH

Johann Lutz ATLANTA Antriebssysteme
Chiara Martini RENK Aktiengesellschaft

Uwe Maschelski ThyssenKrupp Rothe Erde GmbH Romero Andre Medeiros do Nascimento Deutsche Edelstahlwerke GmbH

Jean-André Meis Siemens AG

Dr. Wilfried Michel Bosch Rexroth AG

Claudia Mönius GMN Paul Müller Industrie GmbH & Co. KG
Dr.-Ing. Daniel Münter LIEBHERR-AEROSPACE LINDENBERG GmbH

Dr.-Ing. Yvon Ilaka Mupende Liebherr-Components Biberach GmbH
Dr. Dragomir Nesic GETRAG FORD Transmissions GmbH
Dr. Michael Nimz SEW-Eurodrive GmbH & Co. KG

Stefan Nowak Winterthur Technology GmbH
Marcus Nuding EMAG eldec Induction GmbH

Ralf Offenmüller Adam Opel AG

Joachim Ohlert SMS group GmbH

Dr.-Ing. Steffen Otto REINTJES GmbH

Kai Pahlke Lenze SE

Arne Platzer Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Dr. Matthias John Plötz Linde Material Handling GmbH

Jens Pospischil SONA BLW Präzisionsschmiede GmbH

Dryar Purba SKF GmbH

Herbert Rauer LIEBHERR-AEROSPACE LINDENBERG GmbH

Gerhard Reese Härterei Reese Bochum GmbH

Ulrich Reese Härterei Reese

Dr.-Ing. Frank Reher GKN Driveline International GmbH

Matthias Reichert VDMA

Dr. Tim Rekersdrees Georgsmarienhütte Holding GmbH
Christoph Ridder Zollern Getriebetechnik Dorsten GmbH

Robert Riess BMW AG

Andreas Risse Claas Industrietechnik GmbH

Eva Robens VDMA

Dieter Roempler Forschungsvereinigung

Dr. Jörg Rollmann ThyssenKrupp Rothe Erde GmbH

Oliver Rösch Georgsmarienhütte GmbH

Dr. Jens Rötting Robert Bosch GmbH

Ronald Sanders Adam Opel AG
Steffen Schaefer SCHOTTEL GmbH

Jan Schamp ZF Wind Power Antwerpen NV Dr. Dirk Schaupp John Deere GmbH & Co. KG

Carlo Scheer Stresstech GmbH Harry Schlutius OSK-Kiefer GmbH

Michael Schmedding ThyssenKrupp Industrial Solutions AG
Gunther Schmitt ALD Vacuum Technologies GmbH

Markus Schön ABM Greiffenberger Antriebstechnik GmbH

Norbert Schremb Härterei Reese GmbH & Co. KG

Ingo Schuster SMS group GmbH

Frank Seidenspinner ATLANTA Antriebssysteme

Manfred Siefert Siemens AG

Reinhard Slansky

GKN Walterscheid Getriebe GmbH

Frank van Soest

Deutsche Edelstahlwerke GmbH

Dr. Peter Sommer

Dr. Sommer Werkstofftechnik GmbH

Angelika Spalek BMW AG

Paul Stark ThyssenKrupp Rothe Erde GmbH
Jörg Stausberg Stiebel-Getriebebau GmbH & Co. KG

Peter Steinmetz IMO Holding GmbH

Ernst Strian Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Dr. Werner Trojahn Schaeffler Technologies GmbH & Co.KG

Alexander Vetter Voith Turbo GmbH & Co. KG

Dietmar Voigtländer PlaTeG GmbH Holger Wagner Bosch Rexroth AG

Dr. Manfred Welker Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Dr. Timo Wendt Claas Industrietechnik GmbH

Dr. Egdar Weppelmann GLEASON-PFAUTER

Michael Widmann WITTENSTEIN bastian GmbH

Dr.-Ing. Jochen Witzig ZF Friedrichshafen AG

Johannes Wolfensberger Voith Turbo GmbH & Co. KG
Andreas Wölfing Henschel Antriebstechnik GmbH