

## Maß- und Formänderungen von Leichtbauzahnradern

AiF-Nr.:  
17995N

Obmann:  
Dr.-Ing. Axel Majorek

beteiligte Unternehmen  
 ALD Vacuum-Technologies; Daimler AG; ESI GmbH; Georgsmarienhütte GmbH; Hanomag Lohnhärterei GmbH; Härterei Tandler GmbH & Co. KG; Härterei Technotherm GmbH & Co. KG; Kistler Automotive GmbH; MAP GmbH; Renk AG Augsburg; Wittmann Härterei GmbH & Co. KG; ZF Friedrichshafen AG

Laufzeit:  
01.12.2013 – 31.05.2016

Erstelldatum:  
29.09.2016

Forschungsstelle:  
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:  
Thomas Lübben

Sachbearbeiter:  
Holger Surm, Thomas Lübben

Forschungsvereinigung:  
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss  
FA 15 (Maß- und Formänderungen)

### Zielsetzung und Lösungsweg

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde durch systematische Geometrievariationen untersucht, welche Auswirkung die Gewichtsreduzierung von Zahnradern auf die Maß- und Formänderungen nach dem Einsatzhärten hat. Zur Erreichung dieses Ziels wurden experimentelle Untersuchungen und Simulationen einander ergänzend eingesetzt.

Der Verzug wurde im Wesentlichen an unverzahnten Grundkörpern untersucht. Diese Festlegung führt zu einer deutlichen Reduzierung des Fertigungs- und Messaufwands, ohne den angestrebten Erkenntnisgewinn deutlich einzuschränken, da der mittlere Verzahnungsverzug im Wesentlichen aus dem Grundkörperverzug resultiert. Zur Charakterisierung dieses Effekts wurde an ausgewählten Varianten eine Verzahnung eingebracht und deren Einfluss untersucht.

Die zu untersuchenden Geometrievariationen wurden auf zwei Ebenen systematisiert. Zum einen wurden Untersuchungen an zwei praxisrelevanten Größenklassen durchgeführt. Dazu wurde je ein Typ Schmiederohling mit den Abmessungen typischer Räder aus dem PKW-Bereich (Personenkraftwagen) und einer aus dem NFZ-Bereich (Nutzfahrzeug) gefertigt. Zum anderen wurden für beide Größenbereiche Geometrievariationen mit unterschiedlichen Symmetriegraden untersucht (Bild 1):

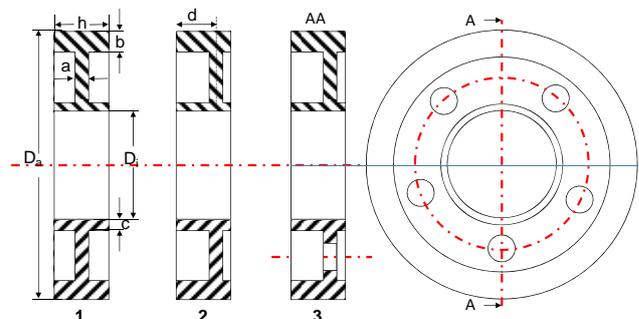


Bild 1: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Symmetrieebenen

Auf dem Symmetrieebene 1 wurden Stegbreite  $a$  und Zahnkranzbreite  $b$  mit Massereduzierungen von bis zu 20% variiert. Auf dem Level 2 wurde die Stegposition  $d$  verändert und ein verkippter Steg analysiert. Hintergrund dabei war eine Bauraumoptimierung. Ferner wurde der Einfluss von Bohrungen im Steg analysiert (zusätzlich realisierte Masseinsparung von bis zu 5,3 %).

Untersucht wurde die Einsatzhärtung in den Varianten Niederdruckaufkohlung mit Hochdruckgasabschreckung in einer Anlage Bauart ALD Modultherm (nur Größenklasse PKW) und Gasaufkohlung mit Ölabschreckung in einem Mehrzweckkammerofen

Bauart Aichelin (PKW und NFZ). Die Chargen bestanden immer aus acht Teilen einer Geometrie, die liegend chargiert waren. Die Abkühlverläufe zur Ermittlung des Wärmeübergangs wurden mittels Datenlogger erfasst, wobei die Versuche im Öl mit einem neu entwickelten Schutzgehäuse der Fa. Phoenix TM durchgeführt wurden.

Zur Durchführung der Wärmebehandlungssimulation stand ein umfangreicher Datensatz aus den Arbeiten des SFB 570 zur Verfügung. Das Umwandlungsverhalten musste allerdings für die hier vorliegende Schmelze bestimmt werden.

Weiterhin wurde der Faserverlauf aus den Universalrohlingen in die Modellierung einbezogen, um den Effekt der Verzugspezialträger Seigerungen und Gefüge in Relation zum Geometrieinfluss bewerten zu können. Dieser wurde für beide Rohlingstypen aus Umformsimulationen durch die Firma Kistler Automotive GmbH ermittelt.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die kompletten Wärmebehandlungszyklen für ausgewählte

experimentell untersuchte Geometrien simuliert. Die resultierenden Ergebnisse wurden mit den experimentellen Befunden verglichen und bewertet. Dabei zeigte sich, dass selbst unter Variation des Umwandlungsmodells und des Wärmeübergangs die Maßänderungen nicht für alle Geometrietyper korrekt vorhergesagt werden konnte. Allerdings konnte die größte und damit kritischste Formänderung, die Verkippung des Zahnkranzes, ausreichend vorhergesagt werden.

Im nächsten Schritt wurden ausgehend von den experimentell untersuchten Basisgeometrien systematische Geometrievariationen in der Simulation analysiert. Dazu wurden statistische Versuchspläne eingesetzt. Die Zielgrößen dieser Rechnungen waren die Formänderungen wie Verkippung und Balligkeit der äußeren Mantelfläche. Im letzten Schritt wurden die Ergebnisse in Form von Regressionsmodellen, die aus der Analyse der Versuchspläne resultierten, zusammengefasst.

## Ergebnisse

Aus den **experimentellen Verzugsuntersuchungen** ergeben sich folgende Ergebnisse:

Hinsichtlich der mittleren Maßänderungen werden nur Effekte für die äußere Mantelfläche identifiziert. Allerdings ist das Verzugsverhalten der drei Größenklassen / Wärmebehandlungsvarianten nicht einheitlich, so dass keine generellen Aussagen über die Abhängigkeit von Abmessungsvarianten getroffen werden können. Die konstruktive Gestaltung des Steges beeinflusst ebenso wenig die mittleren Maßänderungen wie das Einbringen von Löchern im Bereich des Steges. Die Effekte auf die Änderungen des mittleren Bohrungsdurchmessers und der mittleren Höhenänderung sind für das Verzugsverhalten nicht relevant. Diese Aussagen sind auch auf das Maßänderungsverhalten der Zahnräder übertragbar.

Die Rundheitsabweichungen der äußeren Mantelfläche werden durch eine Änderung der Ovalität und der Viereckigkeit bestimmt. Da diese aber eher unabhängig von den untersuchten Varianten sind, können wiederum keine signifikanten Effekte auf die Rundheitsabweichungen festgestellt werden. Bei der konstruktiven Gestaltung des Steges zeigt sich, dass das Einbringen von Löchern sich auf die Rundheitsabweichung der äußeren Mantelfläche abbildet. Wenn über diese Maßnahme das Leichtbaupotenzial ausgeschöpft werden soll, sollte der Konstrukteur viele kleinere Löcher gleichmäßig über den Umfang des Steges vorsehen (Bild 2). Für die Geometrieklasse PKW wurde bei verzahnten Bauteilen eine leicht erhöhte Ovalität im Vergleich zu unverzahnten Grundkörpern gefunden.

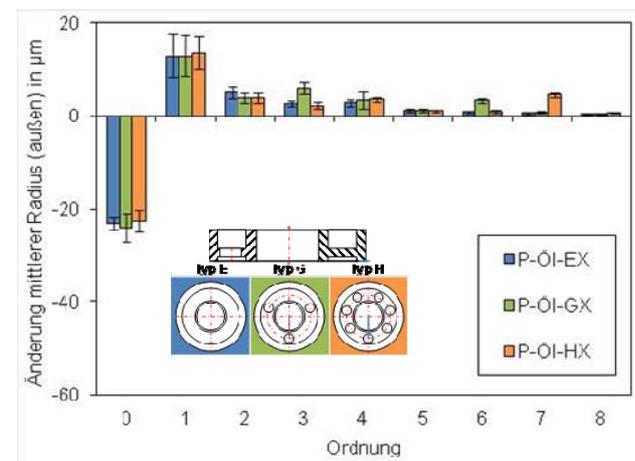


Bild 2: Fourier-Spektrum der Rundheitsänderungen der äußeren Mantelfläche für die Größenklasse PKW mit Ölabschreckung

Es wurden bei allen Varianten relevante Werte hinsichtlich der Exzentrizität der äußeren Mantelfläche in Bezug zur Bohrung gefunden. Dieser Fehler beeinflusst den Rundlauf der Bauteile in einer zu beachtenden Größenordnung.

Desweiteren weist die äußere Mantelfläche eine höhenabhängige Radiusänderung auf, die bei der Auswertung in die beiden Anteile Verkippung und Balligkeit getrennt wurde. Das Verkappen wird dabei in erster Linie von der konstruktiven Gestaltung des Steges bestimmt (Bild 3). Wird dieser symmetrisch angeordnet, ist bei allen Varianten nahezu keine Verkippung nachweisbar. Ein Verschieben bzw. Neigen des Steges wirkt allerdings sofort auf die Verkippung. Ein zusätzliches Einbringen von Bohrungen zeigt kei-

nen weiteren Effekt. Dagegen können Effekte auf die Verkippung durch die Verzahnung beobachtet werden.

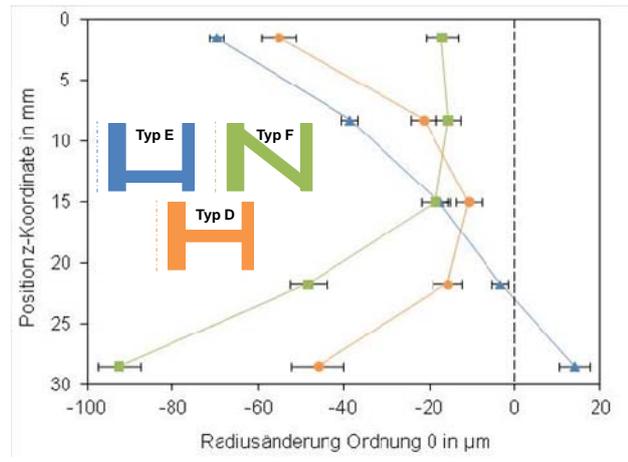


Bild 3: Ortsaufgelöste Radiusänderung der äußeren Mantelfläche für die Größenklasse PKW mit Ölabschreckung

In den experimentellen Untersuchungsergebnissen konnten keine eindeutigen Effekte auf die Balligkeit herausgearbeitet werden. Bei einigen Varianten erreichte die Balligkeit aber eine zu beachtende Größenordnung.

Die erzielten Ergebnisse aus dem Bereich der **FE-Analyse** zeigen auf, dass das relevanteste Verzugs-kriterium, die Verkippung der äußeren Mantelfläche, in der Regel mit ausreichender Güte in den Simulations-rechnungen abgebildet werden kann (Bild 4). Allerdings offenbart der Vergleich zwischen experimentel-len Befunden und den Ergebnissen der FE-Analyse

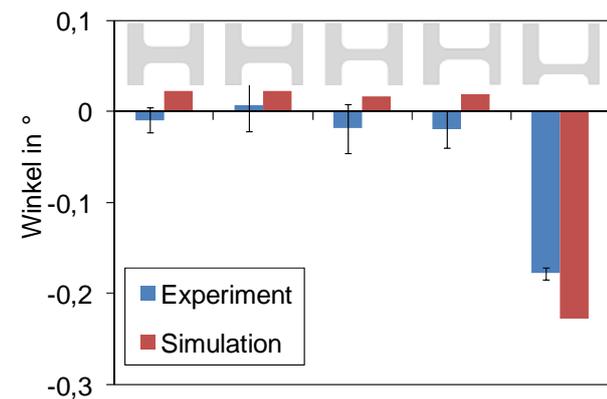


Bild 4: Vergleich der berechneten Kippwinkel der äußeren Mantelfläche mit dem Experiment

auch Differenzen hinsichtlich anderer Verzugs-kriterien in einer Größenordnung, die für eine sichere Verzugs-vorhersage nicht akzeptiert werden können. Aus den weiterführenden Analysen der Verzugsmechanismen deutet sich an, dass insbesondere die Verzugs-kriterien, die maßgeblich von Mechanismen bestimmt werden, die in Verbindung mit Phasenumwandlungen stehen, als kritisch zu bewerten sind. Das hat sich

zum Beispiel in Bezug auf die berechnete Balligkeit der äußeren Mantelfläche gezeigt, die im Vergleich zum Experiment eine viel größere Sensitivität auf eine Variation der betrachteten Eingangsgrößen gezeigt hat. Die Gründe für die Unterschiede können noch nicht eindeutig benannt werden: Trotz der Verwendung eines Werkstoffes mit ähnlicher Chemie und Härtebarkeit im Vergleich zum Werkstoff, mit dem der Datensatz aus dem SFB 570 erstellt worden ist, mussten erhebliche Unterschiede im Umwandlungs-verhalten registriert werden. Die Umwandlungskinetik der Bainitumwandung kann mit dem verwendeten Modell-ansatz trotz mehrfacher Modifikationen nicht ausrei-chend gut beschrieben werden. Obwohl im For-schungsvorhaben ein großer Aufwand zur experi-mentellen Bestimmung der transienten Temperat-urfelder während der Wärmebehandlung betrieben worden ist, liegt sicherlich auch noch Verbesserungspo-tenzial im Bereich der Beschreibung des Wärmeüber-gangs vor, die über die Temperaturverteilung im Bau-teil auch das Umwandlungsverhalten mit bestimmt.

Das Verzugsverhalten hinsichtlich der Verkippung wird dagegen in erster Linie durch das Überschreiten der Streckgrenze bestimmt. In dieser Beziehung scheint der verwendete Datensatz eine ausreichende Genauigkeit bezüglich der mechanischen Kenn-werte zu haben, so dass in diesem Fall die Erarbei-tung von Optimierungsmaßnahmen mithilfe der Si-mulationsstudien möglich ist. Aus den entsprechen- den Regressionsanalysen konnte abgeleitet werden, dass unter dem Aspekt des Leichtbaus eine mög-lichst symmetrische Masseverteilung angestrebt werden muss, um ein unzureichendes Verzugsver-halten zu vermeiden. Falls das Hauptaugenmerk auf die geometrischen Randbedingungen gelegt werden muss, können die Verzüge aufgrund der asymmetri-schen Bauteilgeometrie durch angepasste Abmes-sungen kompensiert werden (Bild 5). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens konnte die erarbeitete Optimierungsstrategie aber leider nicht mehr experi-mentell überprüft werden.

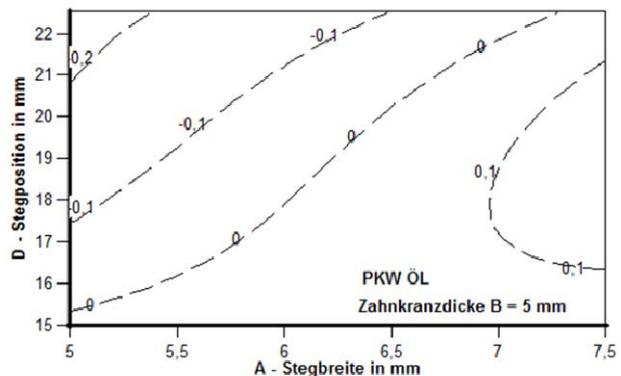


Bild 5: Berechnete Verkippung [°] in Abhängigkeit von Stegbreite und Stegposition für die Größenklasse PKW mit Ölabschreckung (Zahnkranzdicke 5 mm)

## Zusammenfassung

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Bauteilen mit bezüglich der Mittelebene symmetrischer Masseverteilung eine Reduktion von Steg- und Zahnkranzdicke mit einer Gewichtsreduzierung von 20% möglich ist, die hinsichtlich der resultierenden Maß- und Formänderungen als unkritisch einzustufen sind. Weitere 5% können unter den genannten Bedingungen durch die Einbringung von Bohrungen in den Steg erzielt werden, wobei eine höhere Anzahl an kleinen Bohrungen einer niedrigen Anzahl mit größerem Durchmesser vorzuziehen sind. Wenn der Steg aus seiner symmetrischen Position bauraumbedingt verschoben werden muss, entsteht eine Verkipfung der Außenfläche und damit der Verzahnung, die die Toleranzgrenze überschreiten kann. Zur Festlegung von möglichen Kombinationen von Stegposition und Stegbreite, die eine Einhaltung der

Toleranzgrenze sicherstellen, wurde eine simulationsbasierte Methode entwickelt, die entsprechende Vorgaben für Konstrukteure bereitstellt. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge kann diese Methode aber nicht auf einfach abzuleitenden Kennzahlen wie bspw. Widerstands- oder Trägheitsmoment aufsetzen. Vielmehr ist eine problemabhängige Anzahl an Wärmebehandlungssimulationen durchzuführen, aus denen dann Schaubilder für die möglichen Kombinationen für Stegverschiebung und -breite abgeleitet werden können.

**„Das Ziel dieses Vorhabens wurde erreicht.“**

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 17995 N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des Projektes und für die vielfältige Unterstützung durch die Mitglieder des projektbegleitenden Arbeitskreises.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Veröffentlichungen

Lübben, Th.; Surm, H.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Identification of design related distortion of gear base bodies by experimental investigations. Proc. 5th Int. Conf. On Distortion Engineering IDE 2015, 23.-25. September 2015, Bremen, Germany, Zoch, H.-W.; Lübben, Th. (Eds.), 2015, p. 59-69. - ISBN 978-3-88722-749-4.

Surm, H.; Hunkel, M.; Lübben, Th.: Identification of Design Related Distortion of Gear Base Bodies by Finite Element Computations. Proc. 5th Int. Conf. On Distortion Engineering IDE 2015, 23.-25. September 2015, Bremen, Germany, Zoch, H.-W.; Lübben, Th. (Eds.), 2015, p. 71-83. - ISBN 978-3-88722-749-4.

Lübben, Th., Surm, H.: Influence of Design on Distortion of Gas and Oil Quenched Gear Base Bodies. Proc. 23rd IFHTSE Congress, Savannah, Georgia, USA, 2016, p. 411-420.

Lübben, Th.; Surm, H.; Hoffmann, F.; Zoch, H.-W.: Identification of design related distortion of gear base bodies by experimental investigations. Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik, 47 (2016) 8, p. 678 – 687.

Surm, H.; Hunkel, M.; Lübben, Th.: Identification of design related distortion of gear base bodies by Finite Element Computations. Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik, 47 (2016) 8, p. 688 – 698.

Lübben, Th., Surm, H.: Größeneinfluss von ölabgeschreckten Zahnradgrundkörpern. geplant für HTM J. Heat Treatm. Mat. 72 (2017)

Surm, H.; Hunkel, M.; Lübben, Th.: Methodenentwicklung zur verzugsgerechten Auslegung von Leichtbauzahnradern. geplant für HTM J. Heat Treatm. Mat. 72 (2017)

## Kontakt

Dr.-Ing. Thomas Lübben  
Badgasteiner Straße 3  
D-28359 Bremen  
Tel.: +(49)-421-218-51321  
luebben@iwt-bremen.de

Dr.-Ing. Holger Surm  
Badgasteiner Straße 3  
D-28359 Bremen  
Tel.: +(49)-421-218-51342  
surm@iwt-bremen.de