



Leichtbau im Antriebsstrang durch Warmwalzen von Schrägverzahnungen auf präzisionsgeschmiedete Halbzeuge

Durch die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse der vergangenen zwanzig Jahre am Fraunhofer IWU Chemnitz war es möglich, getriebetypische Pkw-Laufverzahnungen ins volle Material kalt zu walzen. Bei gleichzeitiger Nutzung der Vorteile der Warmumformung konnte dem Verzahnungswalzen die Chance auf ein industriell interessantes Teilesortiment in Form von großmoduligeren Schrägverzahnungen aus dem Nutzfahrzeugsektor erschlossen werden.

AUTOREN



Dr.-Ing. Udo Hellfritsch

ist Gruppenleiter Präzisionsverfahren am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz,



Dipl.-Ing. Matthias Milbrandt

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz,



Dipl.-Ing. Mike Lahl

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz

Im Forschungsvorhaben WWSV hat das Fraunhofer IWU Chemnitz zwei Demonstratoren (D1: Welle m4 z22 sowie D2: Losrad m4 z49) mit Halbzeugen aus 20MnCr(B)5 der Schmiedeunternehmen Schmiedetechnik Plettenberg GmbH & Co. KG sowie Hammerwerk Fridingen GmbH ermittelt. Durch eine Vielzahl weiterer vorhabenbezogener Aufwendungen der Wirtschaft innerhalb des projektbegleitenden Ausschusses ließen sich alle Werkzeug- und Vorrichtungsfertigungsprozesse, Hilfsmedien, Beratungen sowie notwendige Veredelungs- und Fertigbearbeitungsprozesse sicherstellen. Das Ziel war, die resultierenden Fertigteileneigenschaften, speziell die Zahnfußdauerfestigkeit, unter dem Aspekt einer neuen, warmumformintegrierten Prozesskette der Verzahnungsherstellung zu untersuchen und mit der herkömmlichen, rein zerspanenden Prozesskette zu vergleichen. Von entscheidender Bedeutung der fertigbearbeiteten Verzahnungen (nach anschließender Wärmebehandlung, dem Einsatzhärten sowie Hartfeinbearbeitung, dem Schleifen) war der Einsatzfall unter Last. Dieser wurde im Vorhaben durch Untersuchungen auf einem Hydropulser mit speziell konzipierter Vorrichtung für den Demonstrator D1 umgesetzt.

AUSGANGSPOSITION

Das bisher eingesetzte Verzahnungswalzen [1], [2], [3] zählt zu den abwälzenden Querwalzverfahren, speziell zum Profil-Querwalzen mit außenverzahnten, runden Werkzeugen. Hierbei wird der Umformvorgang durch eine Achsabstandreduzierung zwischen zwei symmetrisch ausgebildeten und synchron laufenden Zahnwalzen eingeleitet. Die Abwälzbewegung zwischen dem Werkzeugprofil und der zu walzenden Evolventenflanke realisiert die Formgebung des zu walzenden Zahnrads.

Der Walzprozess im Rundrollenverfahren wird in drei Phasen gegliedert: (1) das Anwalzen der Werkzeugkopfteilung auf den Vordrehdurchmesser des Werkstücks, (2) das Eindringen der Walzwerkzeuge in die Werkstückausgangsform bis zum geforderten Parameterbereich (Fußkreis- und Kopfkreisdurchmesser) der Werkstück-Verzahnung sowie (3) das Kalibrieren der fertigen Verzahnung, um eine vollständige Ausformung aller Zähne der Verzahnung über den Werkstückumfang symmetrisch und konzentrisch zu realisieren.

**THEORETISCHE BETRACHTUNGEN/
VERSUCHSDURCHFÜHRUNG**

Im Vorfeld der Konstruktion, der Werkzeugfertigung sowie der Umformversuche wurden FEM-Simulationen (Software Transvalor Forge) bezüglich der Erwärmungs- sowie Warmwalzprozesse beider Demonstratoren D1 und D2 durchgeführt. Um die Rechenzeit im Sinne eines dreidimensional geometrisch vereinfachten Ersatzmodells für den Eingriffsbereich eines 45°-Segments der Werkzeuge (Realisierung der kontaktbedingten Gesamtüberdeckung) mit den umzuformenden Demonstratoren D1 und D2 während des Warmwalzens zu minimieren, wurde die Ähnlichkeit von Zyklus zu Zyklus hinsichtlich der Belastungs- beziehungsweise Umformgeschichte im Eindringprozess ausgenutzt. Dabei wurden die drehmomentabhängigen Temperaturfelder als netzbezogene Settings von beiden 360°-Modellen auf die Segmente der Vorformen übertragen. Es war hierbei von Bedeutung, diese Temperaturfelder an beiden Demonstratorsegmenten für das Warmwalzen an die Geometrien zu koppeln. Eine anschließende, vollständige 3D-Simulation der Warmwalzprozesse mit hochverbundener



Bild 1: Warmwalzprozesse D1 – Welle (links) sowie D2 – Losrad (rechts)

Auflösung (Re-Meshing-Elementlänge 0,5 mm) hätte in beiden Fällen zu einer exorbitanten Rechenzeit (4 Monate für D1 und 9 Monate für D2) bei Verwendung aller 32 zur Verfügung stehenden Kerne geführt. Das Hauptaugenmerk der FEM-Simulationen der Warmwalzprozesse lag auf einer optimalen Gesamtvernetzung bei gleichzeitiger Geometrieminimierung, um ebenso exakte Lösungen wie in den vorangeführten Erwärmungen zu erzielen. Mit Bezug zur Maschinenkinematik sowie im Zuge der Implementierung der neuen FEM-Modelle wurden folgende Annahmen getroffen:

- Ausnutzung physikalisch zulässiger Vereinfachungen der wandernden Umformzonen (Extrapolationsverfahren: 1/8-Segment der Gesamtumformzone mit Innenbohrungen),
- Verwendung verbesserter Kontakt- und Reibmodelle durch prozessnahe Mischreibung ($\mu = 0,2$ Coulomb, $m = 0,4$ Reibfaktor),
- Vernetzungsreduktion durch umformungsangepasste Grob- und Feinvernetzung (Elementanzahl Werkstücke $nD1 < 150.000/nD2 < 300.000$),
- Berechnung mit starren Werkzeugen ($fWZ = 0,125$ mms⁻¹, $nWZ = 20 \dots 40$ min⁻¹, $nR = 6$, degressiver Eindringverlauf).

Für den Demonstrator D1 ließ sich die Rechenzeit des später 62 Sekunden dauernden Realprozesses auf zirka 150 Stunden reduzieren. Analog wurde auch für den Demonstrator D2 mit einer vereinfachten Kinematik sowie 3D-Segmentmodellen gearbeitet. Damit konnte die Rechenzeit (Realprozess: ebenfalls 62 Sekunden) auf ca. 350 Stunden reduziert werden.

Im Anschluss an die Fertigung aller notwendigen Werkzeuge, Spannmittel sowie Halbzeuge wurde mit der umformtechnischen Herstellung der Demonstratoren D1 begonnen. Bei einer Erwärmungszeit von 90 Sekunden konnte eine Oberflächentemperatur von 1250 °C erreicht werden. Der reine Umformprozess variierte bei den Versuchen zwischen 52 und 62 Sekunden bei einer Gesamtzykluszeit (Werkstückenspannung/induktive Erwärmung/Transfer z-Achse/Warmwalzprozess/Rücktransfer z-Achse/Werkstückentspannung) von 187 Sekunden (siehe Warmumformprozess in Bild 1, links). Nach verschiedenen prozessseitigen Optimierungen wurden 20 identisch warm-



Bild 2: Warmgewalzte Demonstratoren D1 – m4 z22 (links) sowie D2 – m4 z49 (rechts)



Bild 3: Fertigverzahnte Demonstratoren D1 – warmgewalzt/einsatzgehärtet und geschliffen (links) sowie gefräst/einsatzgehärtet und geschliffen (rechts)

gewalzte Demonstratoren D1 realisiert ($t_{\text{walz}} = 62 \text{ s}/t_{\text{zyklus}} = 190 \text{ s}/F_{\text{max}} = 215 \text{ kN}/M_{\text{max}} = 1200 \text{ Nm}$), zudem wurde die Festlegung der vergleichenden Fertigteilzeichnung (Warmwalzen vs. Fräsen/Einsatzhärten/Schleifen) geplant.

Mit der umformtechnischen Herstellung der Demonstratoren D2 wurde nach Abschluss aller Umformversuche D1 begonnen. Dabei konnte eine Oberflächentemperatur von zirka 875 °C in einer Erwärmungszeit von 100 Sekunden erreicht werden. Der reine Umformprozess dauerte ebenfalls 62 Sekunden bei einer Gesamtzykluszeit (vergleiche D1) von 190 Sekunden (siehe Warmumformprozess in Bild 1, rechts). Nach weiteren prozess-

bedingten Anpassungen wurden sechs Serien warmgewalzter Demonstratoren D2 zu je fünf Bauteilen realisiert [4]. Mit Hilfe der Anpassung der Eindringtiefe der Walzwerkzeuge in Kombination mit einer konkaven Auslegung der Vorformaußenkontur konnten die Verzahnungen von zirka 40 auf zirka 70 Prozent der Bauteilbreite ($b = 77 \text{ mm}$) vollständig ausgeformt werden ($t_{\text{walz}} = 62 \text{ s}/t_{\text{zyklus}} = 185 \text{ s}/F_{\text{max}} = 267 \text{ kN}/M_{\text{max}} = 750 \text{ Nm}$). Bezogen auf eine maximale Auslastung der Walzmaschine bei 100 Prozent entsprechend $F = 400 \text{ kN}$ sowie $M = 1400 \text{ Nm}$ wurden die Versuche ohne Zusatzmedien mit zirka 65 Prozent der Maximalkraft sowie zirka 45 Prozent des Maximalmoments gefahren. Das realisierte Bauteilspektrum sowie das Größenverhältnis der warmumge-

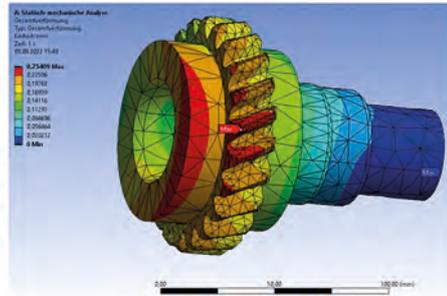
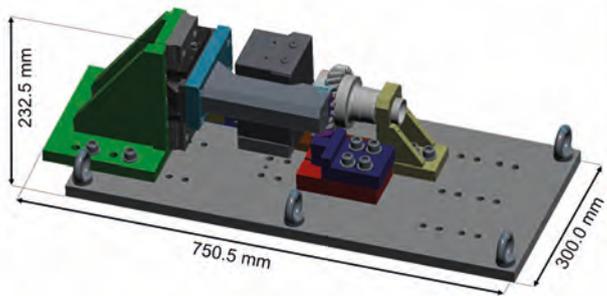


Bild 4: Pulsator-Prüfvorrichtung – CAD-Modell (links) sowie FEM der Verformung (rechts), Bilder: Autoren

formten beziehungsweise vorverzahnten Demonstratoren D1 und D2 wird in Bild 2 ersichtlich.

ZAHNFUSSFESTIGKEITSERMITTLUNG

Für die Prüfung der Zahnfußfestigkeit beziehungsweise der maximal zur Verfügung stehende Pulsator-Nennkraft]] sowie die angepasste Prozesskette wurde eine Verzahnungsbreite von 20 Millimeter sowie ein maximaler Außendurchmesser von 104,4 Millimeter festgelegt, da die vorgefrästen Demonstratoren D1 ebenfalls aus den gleichen Schmiedevorformen (max. Außendurchmesser 105,4 Millimeter) hergestellt werden mussten. Die spanende Vorverzahnungsfertigung der Demonstratoren D1 erfolgte für die folgenden Vergleichsuntersuchungen (Zahnfußfestigkeit) auf dem Drehfräszentrum, ebenfalls am Fraunhofer IWU Chemnitz. In Bild 3 sind die umformtechnisch sowie zerspanend vorverzahnten Demonstratoren D1 nach erfolgter Wärmebehandlung und Fertigbearbeitung gegenübergestellt. Gemäß taktiler Verzahnungsmessungen nach DIN 3962 [5] konnten identische Verzahnungsqualitäten über alle Demonstratoren D1 dokumentiert werden.

Um den Prozesskettenvergleich am Demonstrator D1 durchzuführen, musste eine Vorrichtung zur Bestimmung der Zahnfußfestigkeiten beziehungsweise für Pulsatortests konstruiert, gefertigt und montiert werden. Die zugrunde liegende theoretische Berechnung beruhte auf einer Kombination der DIN 3990-3 [6] mit dem FVA-Heft 833 [7]. Entsprechend der zu erstellenden Wöhlerkurven sowie zu nutzender Oberstempelbewegung mussten folgende Rand beziehungsweise Prüfbedingungen berücksichtigt werden:

- Fertigungsprüfreihe m4 z22 (ZR-Walzteile/ZR-Frästeile),
- konstante Unterkraft: $F_U = 2000 \text{ N}$,
- Variation der Oberkraft/Schwingbreite: $F_O - F_U = 2000 \text{ bis } 25000 \text{ N}$ (Beispiel: Laststufe 8000 N: $F_U = 2000 \text{ N}$, $F_O = 10000 \text{ N}$),
- Instron Hydropulser (25 ... 50 Hz)/dynamische Oberkraft (50 ... 25 kN),

- symmetrische Zahnradspannung zwischen Stempeln,
- sinusförmig definiertes Kraftverhältnis (Druck schwellend $R = 0,1$),
- Testende: maximal 5×10^6 Lastwechsel beziehungsweise Zahnfußbruch/minimal 10000 Lastwechsel,
- Erstellung von zwei Wöhlerkurven aus den Bauteilen.

Im Rahmen einer Studienarbeit erfolgte die Auslegung und Konstruktion der einzelnen Vorrichtungsbaugruppen [8] (Bild 4, links). Für das Forschungsvorhaben konnten die notwendigen Vorrichtungsteile für die Zahnfußfestigkeitsprüfung an den Demonstratoren D1 gefertigt und am Fraunhofer IWU Chemnitz montiert werden.

Anschließend wurde die fertig montierte Pulsatorvorrichtung entsprechend der zu prüfenden Biegewechselbelastungen für die Demonstratorverzahnung D1 - m4 z22 in den Hydropulser PL 100 (Instron) eingebaut sowie folgend alle elastischen Ausgangsverschiebungen/Setzkräfte zwischen den Einzelbaugruppen und -teilen vor den Prüfläufen genullt. Für insgesamt drei Testreihen wurden sowohl im Kurzzeit- als auch im Dauerfestigkeitsbereich Werte für die Demonstratoren D1 ermittelt. Im Vorfeld wurde aufgrund der besseren thermischen Stabilität des Hydraulikaggregates eine maximale Oberkraft von 25 kN sowie eine Frequenz von 50 Hz festgelegt. In den ersten beiden Testreihen erfolgten jeweils 24 Prüfzyklen an gewalzten Demonstratoren D1. In der dritten Testreihe erfolgten ebenfalls 24 Prüfzyklen, jedoch an konturgleich gefrästen Demonstratoren D1. Die maximal zu steigende Verschiebung pro Laststufe (Treppenstufenversuch) des oberen Drückstempels beziehungsweise der Prüfzahngeometrien wurde vorab mittels Software ANSYS simuliert (Bild 4, rechts) und später in das Steuerungsprogramm des Hydropulsers übertragen. Im Ergebnis der vergleichenden Untersuchungen hat sich für die warmgewalzten Demonstratoren D1 eine 14 Prozenthöhere Zahnfußdauerfestigkeit ergeben. Als Nebenergebnis der Treppenstufenversuche ergab

sich außerdem eine vier Prozent höhere Kurzzeitfestigkeit. Bei der Messdatenaufnahme wurden jeweils zwölf Prüfläufe im Kurz- sowie Dauerfestigkeitsbereich durchgeführt. Die identische Ausgangsprüfwellen-Position wurde vor jedem Testzyklus mit festen Anschlaglinealen beziehungsweise -schablonen überprüft.

LEICHTBAU- UND ENERGIESPARPOTENTIAL

Im durchgeführten Forschungsvorhaben wurden zwei relevante Nfz-Getriebe-schrägverzahnungen der Normalmodulgröße von 4,0 Millimetern mittels Warmwalzen als innovativem Vorverzahnungsprozess hergestellt (Bild 2). Bei den Demonstratoren D1 (Wellen) wurden Pulsatorversuche zur Zahnfußtragfähigkeit durchgeführt. Dabei wurde eine um 14 Prozent höhere Dauerfestigkeit an warmgewalzten im Vergleich zu gefrästen Zahnradern bei fertigbearbeitetem Zahngrund ermittelt, welche für zukünftige Prozessketten- und damit Geometrieanpassungen als Downsizing-Potenzial genutzt werden könnte. Bezüglich der Materialeinsparung infolge verringerter Durchmesserdimensionen bei Walz- zu Frästeilvorformen konnte beim Demonstrator D1 eine Masse von $m_1 = 0,703$ kg sowie beim Demonstrator D2 eine Masse von $m_2 = 0,851$ kg nachgewiesen werden. Bezogen auf eine charakteristische Serie der Demonstratoren D1 von 50.000 Stück könnten insgesamt etwa 35 t Stahl eingespart werden. Dies würde gleichermaßen zu einer Reduzierung von 59,5 t CO₂ führen. Außerdem

könnte ein dazugehöriger Energiebedarf von 623 MJ eingespart werden [9]. Bezogen auf eine charakteristische Serie der Demonstratoren D2 von 30.000 Stück könnten insgesamt ca. 25 t Stahl eingespart werden. Dies würde gleichermaßen zu einer Reduzierung von 43,2 t CO₂ führen. Dementsprechend könnte ein dazugehöriger Energiebedarf von 452 MJ eingespart werden [9]



[1] Hellfritsch, U; Lorenz, B; Quaas, J.: Werkzeug und Verfahren zum Querwalzen von Verzahnungen sowie Verfahren zur Herstellung eines Walzwerkzeuges, Patentnummer DE 2000-10066177 A: 20000629

[2] Diekmann, U; Schmicker, H; Goldau, H; Hellfritsch, U; Glaß, R.: Verfahren zur Herstellung einer Getriebehohlwelle und Getriebehohlwelle, Patentnummer DE 10 2006 016 099.1

[3] Hellfritsch, U.: Optimierung von Verzahnungsqualitäten beim Walzen von Stirnradverzahnungen, Dissertation: Berichte aus dem IWU, Band 32, Verlag Wissenschaftliche Skripten, Zwickau, 2005

[4] Rabbaa, M.: Betriebspraktikumsbericht (im technischen Bereich). TU Chemnitz – Fakultät für Maschinenbau/ Fraunhofer IWU, 31.12.2022

[5] DIN 3692: Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen von Stirnrädern mit Evolventenverzahnungen, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1978

[6] DIN 3990-3: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit, Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1987

[7] FVA-Heft 833: Zahnfußtragfähigkeit von Hoch- und Schrägverzahnungen. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V., Frankfurt/Main, 2007

[8] Arnold, E.: Auslegung, Konstruktion und Bau einer Vorrichtung zur Zahnfußfestigkeitsbestimmung an schrägverzahnnten Großverzahnungen. Studienarbeit. TU Chemnitz – Fakultät für Maschinenbau, 10.08.2022

[9] FfE München: CO₂-Verminderung in der Metallerzeugung, https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/08/CO2-Verminderung_in_der_Metallerzeugung.pdf, abgerufen am 30.01.2024



Das IGF-Vorhaben IGF 21698 BR der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Forschungsnetzwerk
Mittelstand

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages