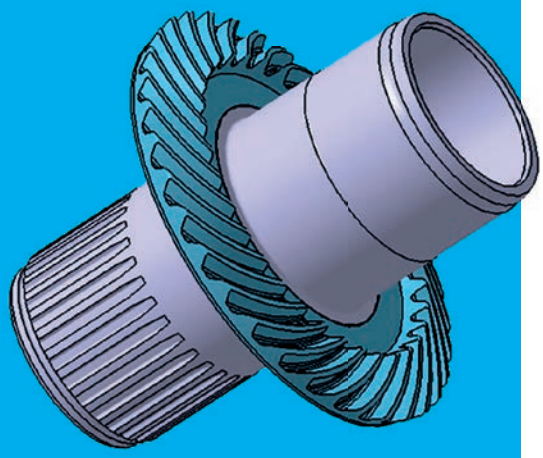


Entwicklungsmethode und Verfahren zum Präzisionsschmieden spiralverzahnter Kegelräder

Winkelgetriebe in Kfz-Achsantrieben haben bei großer Leistungsdichte meist hohe Übersetzungen. Auf der Tellerradseite sind die häufig gefügten Baugruppen mit vom Ring gefertigten Kegelrädern durch große Bauteildurchmesser und Zahnmodule gekennzeichnet. Im vorliegenden Bericht wird das Einbringen komplexer Spiralverzahnungen durch Präzisionsschmieden als integrierbarer Verfahrensschritt einer Ringfertigung untersucht. Die Substitution bisher spanabhebend durchgeführter Bearbeitungsschritte zeigt Einsparpotenziale ohne Qualitätsverluste auf.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Adams

leitet das Labor für Umformtechnik und Werkzeugmaschinen (LUW) der Hochschule Osnabrück

Prof. Dr.-Ing. Bernd Schwarze

ist Professor für Konstruktion, CAD und Maschinenelemente an der Hochschule Osnabrück

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Rauschnabel

ist Geschäftsführer der IFUTEC GmbH, Ingenieurbüro für Umformtechnik in Karlsbad-Langensteinbach

Nahtlose Ringe für Tellerräder werden im Regelfall durch Walzen und/oder Gesenkschmieden hergestellt. Das Verzahnen unter Serienbedingungen erfolgt derzeit spanabhebend, wobei besonders bei den hohen Spanvolumina im Nutzfahrzeugbereich die Spanungskosten über Ringpreis, Bearbeitungszeit und Fräserkosten dominiert werden. Demgegenüber erhöht umformendes Verzahnen die Wertschöpfung und Rohstoffeffizienz der Ringfertigung, reduziert die Zerspanungszeiten und erlaubt wegen freier Werkzeugausläufe eine problemlose Feinbearbeitung. Im Gegensatz zu Stirnrädern, bei denen die Verzahnung eindeutig aus der erzeugenden Zahnstangengeometrie definiert wird, ist die Zahngeometrie bei Kegelrad-Spiralverzahnungen bezüglich der erzeugten Flankenlinien- und Fußgeometrie immer vom verwendeten Herstellverfahren abhängig [1]. Bei der Übertragung spiralverzahnter Kegelradverzahnungen auf abbildende Umformwerkzeuge kann also im CAD nicht wie bei Stirnrädern einfach auf die absoluten Geometriedaten des Bauteils zurückgegriffen werden. Vielmehr muss bei der Entwicklung des Präzisionsschmiedeprozesses berücksichtigt werden, mit welchem Fräsverfahren die zu substituierende Verzahnungsgeometrie (Klingelnberg, Gleason, Oerlikon unter anderem) hergestellt ist, die im Werkzeugbau in die Pressmatrizen implementiert werden soll. Diese Geometrie ist dann als Vorverzahnung mit Spanungsaufmaß zu modifizieren, da im Getriebe eine Verzahnungsqualität 6 bis 7 nach DIN 3962 benötigt wird [2] und

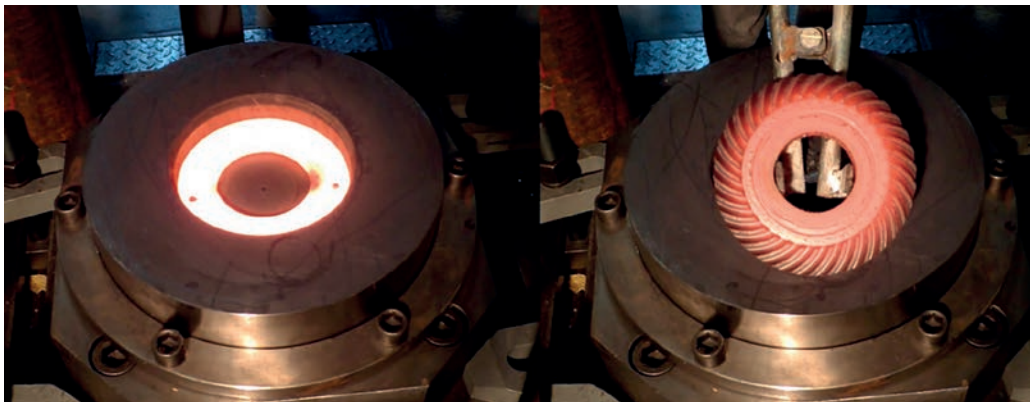


Bild 1: Erwärmter Ringrohling und präzisionsgeschmiedetes Tellerrad nach dem Auswerfen

Bild 2: CAD-Modell und makrogeometrische Merkmale des Tellerrads

die Qualität präzisionsgeschmiedeter Laufverzahnungen in Großserie standmengenbedingt auf bestenfalls Qualität 8 bis 9 begrenzt ist.

Zur Herstellung von Spiralverzahnungen auf Universalfräsmaschinen ist daher die Entwicklung spezieller Strategien zur CAD-Modellierung erforderlich [3]. In diese waren Tools für weitere Verzahnungsmodifikationen aufgrund schmiedeprozessbedingter Fehlerkorrekturen wie thermisches Zahnradschrumpfen und thermisch-elastische Gesenkdeformationen zu implementieren, die dann zur frästechnischen Gesenkherstellung in CAD/CAM-Kopplung benötigt wurden. Aufgrund der Ungenauigkeit der verfügbaren, zur Korrekturwerteberechnung erforderlichen Material- und Prozessgrößen, wie Wärmeübergangskoeffizient unter Druck, spezifische Wärmekapazität, lokale Reibung, temperaturabhängige Fließspannung und Wärmeausdehnungskoeffizienten, ist eine Berechnung der Verzahnungsabweichung in einer Genauigkeit, wie für die angestrebte Verzahnungsqualität 8 bis 9 erforderlich, aber unmöglich. Zur Lösung dieses Problems wurde eine Konstruktionsmethodik entwickelt, mit der die messtechnisch ermittelten Abweichungen einer simulationsgestützten Erstmusterfertigung in die CAD-Verzahnungsmodelle rückgeführt und über eine Automatisierungsroutine in Korrekturwerte umgewandelt werden. Mit den korrigierten CAD-Daten wurden die Erstwerkzeuge überarbeitet, welche danach auf einer 10.000 kN-Spindelpresse des Labors für Umformtechnik und Werkzeugmaschinen (LUW) die Prototypfertigung toleranzhaltiger Verzahnungen erlaubten (Bild 1).

BAUTEILENTWICKLUNG UND ERSTWERKZEUGAUSLEGUNG

Der Versuchsträger wurde vom Tellerrad eines Motorradachsantriebs abgeleitet, das in Serie aus 16MnCr5-Schmiederingen gespant und durch Laserschweißen mit einer Hohlwelle gefügt wird. Die makrogeometrischen Merkmale waren anhand eines zugekauften, gefrästen Radsatzes bekannt. Um das Volumenmodell und die Geometriedaten zu erhalten, wurde das Originalrad mittels 3D-Scanner der Hochschule eingelesen. An die 3D-Punktewolke wurde das im Bild 2 gezeigte Volumenmodell mithilfe des Programms GearEngineer® des Software-Entwicklers GWJ im CAD iterativ angenähert und als Zyklo-Palloid®-Verzahnung (Klingelnberg) generiert. Im Rahmen der Untersuchungen wurden an der konvexen und konkaven Flanke jeweils Protuberanzen und Schleifaufmaße von 0,1 mm vorgesehen und als Flankenäquidistante in den CAD-Modellen implementiert. Zur Bestimmung von Werkstücktemperaturfeld und Werkzeugbeanspruchung sowie zur Absicherung der Machbarkeit des Präzisionsschmiedeprozesses, wurden thermomechanisch gekoppelte Simulationen mit Simufact.forming durchgeführt. Es sind zwei Schläge auf das Bauteil abzugeben, bei einer berechneten Maximalkraft von 7.400 kN. Die Temperaturverteilung am Ende des zweiten Schlags wurde zur rechnerischen Vorkorrektur der Erstwerkzeuge herangezogen. Die Ergebnisse zeigen wie erwartet eine starke Inhomogenität des Temperaturfelds mit Unterschieden bis zu 160 °C an der Oberfläche (Bild 3).

Auf Basis von Stoffflussanalysen und Presskraftberechnungen wurde darüber hinaus die Querschnittsgeometrie des Ringrohlings zur presskraftminimalen Füllung der Verzahnungsgravur optimiert. Für die vorliegende Untersuchung erfolgte die Fertigung der Ringe spanend.

VERFAHREN UND WERKZEUGSYSTEM

Tellerräder bestehen in der Regel aus dem Zahnkranz und einem Innenflansch zur Ableitung der Lastmomente. Bei spanender Verzahnungsfertigung werden Rohteile als Ringe vorgeschmiedet und dann gefräst. Beim Umformen der Verzahnung sollte die Umformzone verfahrenstechnisch von den bereits fertiggestellten Flanschbereichen entkoppelt werden, um die Deformationen des Flansches und die Werkzeugbelastung so gering wie möglich zu gestalten. Diese Verfahrensanforderung wurde mit einem neuen Werkzeugsystem gelöst, das als zusätz-

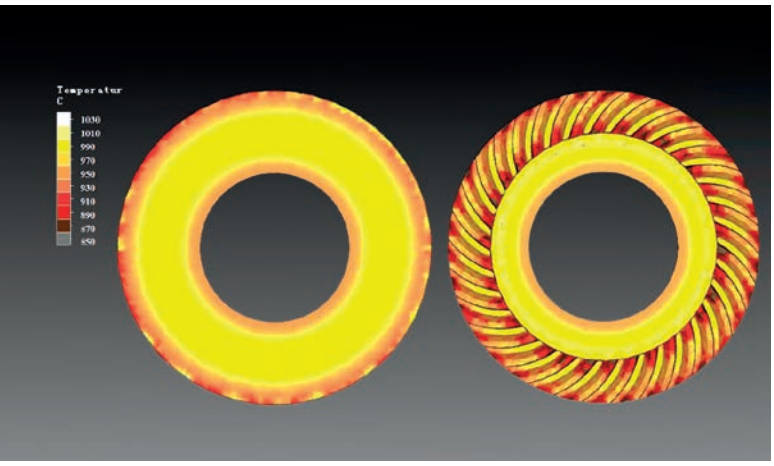


Bild 3: Temperaturfeld beider Tellerradseiten bei Umformende, Ofentemperatur 1.150 °C

liche Operation im Anschluss an die eigentliche Ringfertigung in die Fertigungsfolge integrierbar ist (Bild 4). Der bezüglich Flansch und Außenzylinder vorgeformte Ring (grün) wird innerhalb des Formhohlraums auf einem beweglichen und federnd abgestützten Gegenstempel gelagert. Der Stempel drückt beim Herunterfahren auf die gesamte Planfläche des Rohteils. Dabei wird ausschließlich im Verzahnungsbereich Gegendruck durch die axial festgelegte Verzahnungsmatrize aufgebaut und so der Werkstoff in die Gravur gepresst. Der gesamte Innenbereich der vorgefertigten Flanschfläche erfährt wegen Ausweichen des Gegenstempels keine Umformung. In dieser Phase des Prozesses wird ausschließlich der Zahnkranzbereich des Rads geformt. Kurz vor Umformende setzt der Gegenstempel auf einem Druckstück auf, sodass jetzt die Planfläche des Rads durch Stauchen kalibriert wird. Volumenschwankungen werden dabei in variierende Innendurchmesser des Flansches als Materialüberlauf verlagert.

Das Werkzeugelement, das die Verzahnung abbildet, ist als Ringmatrize ausgelegt. Es wurde in CAD/CAM-Kopplung durch HSC-Fräsen verzahnt, zur Implementierung der Korrekturdaten nach der Erstmusterschmiedung nachgearbeitet und kann bei Verschleiß nachgesetzt werden. Die Ringrohlinge wurden im Kammerofen mit Schutzbehälter zunderarm auf eine Anfangstemperatur von 1.150 °C erwärmt.

BAUTEILQUALITÄT UND KORREKTUR DER VERZAHNUNGSWERKZEUGE

Bei Stirnrädern ist die Flankentopographie als mathematisch geschlossene Fläche bekannt, sodass das Ist-Profil gegen das berechnete Soll-Profil, zum Beispiel eine Evolvente, gemessen werden kann. Dies ist bei Kegelrädern aufgrund der komplexen Flankentopographie nicht möglich. Hier werden nach Norm ISO/TR 10064-6 Messgitter für beide Flanken erzeugt (Bild 5). Die Datei des Messgitters enthält neben der Spalten- und Zeilennummer die Soll-Koordinaten der Messpunkte und die Kom-

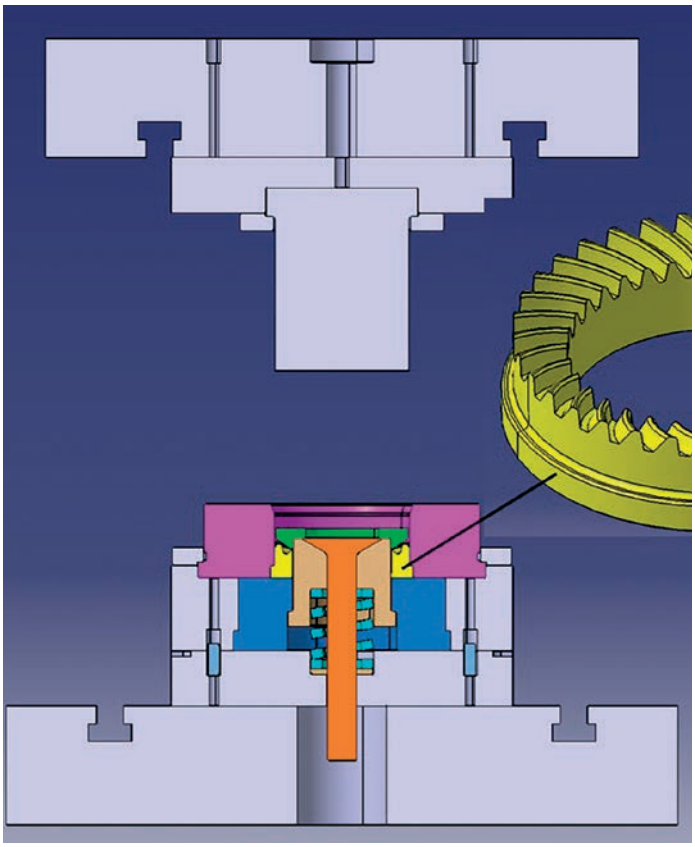


Bild 4: Tellerradwerkzeugsystem

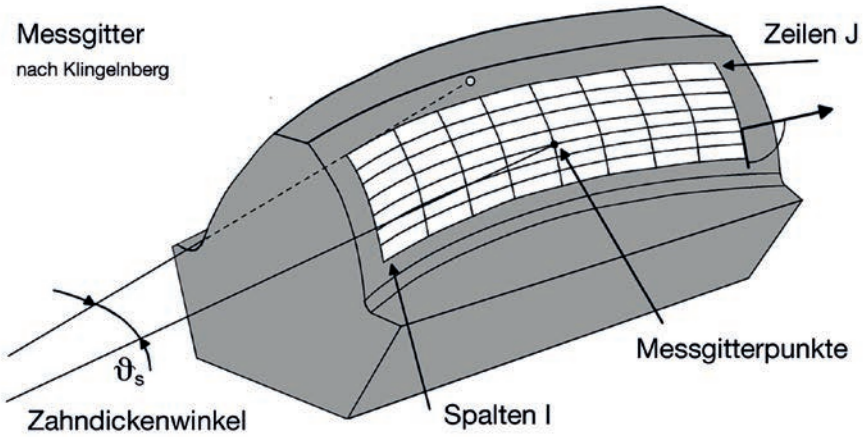
ponenten des Normalenvektors für jeden Messpunkt sowie die Angabe des Zahndickenwinkels [4]. Mit Unterstützung der verwendeten Software GearEngineer® kann das Messgitter des aufmaßbehafteten Versuchsträgers im CAD-System CATIA V5 abgeleitet werden. Diese Daten wurden der Verzahnungsmessmaschine zur Verfügung gestellt, sodass die Messpunkte angetastet und die Abweichungen der Ist- zu den Soll-Koordinaten ermittelt werden können.

Die Erstmusterschmiedungen von IFUTEC und LUW lieferten bezüglich aller Verzahnungs- und Radkörpermerkmale Genauigkeiten bis Qualität 11 nach DIN 3965 und DIN 3962. Lediglich der Kopfkegelwinkel wies eine geringere Genauigkeit auf. Die gemittelten Rauhtiefen betrugen R_z 6,3. Zur Differenzierung der Erstmusterqualität in zu korrigierende prozessbedingte und werkzeugbaubedingte Abweichungen war die Kenntnis der gefertigten Flankentopographie der Verzahnungsmatrize unerlässlich. Die gemessenen Matrizenabweichungen gegenüber CAD-Solldaten ergaben eine hinreichende Qualität 6 des Werkzeugs.

Zur Verbesserung der Verzahnungsgenauigkeit des Prozesses erfolgte die Korrektur der Erstwerkzeuge auf Basis einer Flankenformanpassung. Wie in Bild 5 gezeigt, wird hierzu die gemessene Erstmusterabweichung $a_{gemessen}$ an einem Messgitterpunkt zunächst um die Abweichung der Matrizengeometrie a_{mat} am jeweiligen Punkt vermindert. Es handelt sich hierbei um kleinere, singuläre Fertigungsabweichungen des Werkzeugbaus, die nicht vorgehalten werden können. Die resultierende Restabweichung a_{rest} wird nun am Messgitterpunkt P mittels des Normalenvektors n gespiegelt, sodass sich der Korrekturpunkt K ergibt. Nach der Rückführung aller Korrekturpunkte in das CAD-Modell des Kegelrads wird eine NURBS-Fläche an die Korrekturpunkte angenähert. Dadurch wird eine korrigierte Zahnflanke erzeugt, deren Form durch Grad und Segmentierung der NURBS-Fläche beeinflusst wird. Aus dem korrigierten CAD-Modell des Kegelrads lässt sich dann die Matrizengeometrie als Negativ ableiten. Durch Anwendung der Korrekturmethode und Nachsetzen des Verzahnungswerkzeugs konnte die Verzahnungsqualität um mehr als drei Stufen auf Qualität 8 bis 9 verbessert werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen des Projekts wurde ein Präzisionsschmiedeverfahren zur endkonturnahen Einbringung von Spiralverzahnungen in Ringrohteile entwickelt und umgesetzt. Die erfolgreich bewältigten Herausforderungen lagen in der konstruktionstechnischen Beherrschung der komplexen Flankentopographie, der nicht trivialen messtechnischen Erfassung von Matrizen- und Pressteilqualität sowie der Entwicklung von Strategien zur automatisierten Generierung korrigierter Verzahnungsfreiformfächen in den CAD-Modellen. Die Verzahnungsqualität wurde unter Anwendung der entwickelten Methodik in einer einzigen Rekursion auf Qualität 8 bis 9 verbessert. Damit ist eine Feinbearbeitung mit hinreichend gleichmäßigem Aufmaß durchführbar.



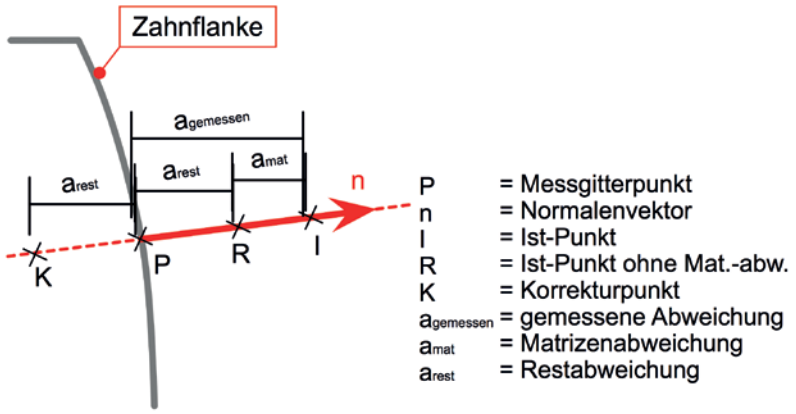


Bild 5: Messgitter und Korrekturmethode für Spiralverzahnungen
Bilder: Autoren

Alternativ zum Verzahnungsfräsen erscheint jedoch auch eine Endfertigung bei vergrößertem Aufmaß durch Fertigwälzfräsen denkbar. Bei diesem neueren Verfahren werden gegenwärtig vorgefräste Verzahnungen mit geometrisch bestimmten Schneiden bei hoher Schnittgeschwindigkeit und kleinem Axialvorschub endbearbeitet. Die Substitution des Vorfräsens durch Vorschmieden der Verzahnungen ist zur Erhöhung der Produktivität dieser Verfahren naheliegend. Materialeinsparungen bei gleichzeitig optimiertem Faserverlauf sowie eine deutlich geringere Bearbeitungszeit gepresster Verzahnungen können dann bei höherer Standmenge der Umformwerkzeuge genutzt werden. Insbesondere im Bereich der Nutzfahrzeuggetriebe erscheint eine Integration des Vorverzahnens in konventionelle Ringschmiedeprozesse wegen der hohen Spanvolumina beim Verzahnungsfräsen vorteilhaft.

Im Bereich der Industriegetriebe könnte es bei geringen Anforderungen an die Laufgeräusche sogar denkbar sein, nur halbwarm oder kalt nachzukalibrieren und dann ein abschließendes Fräsen, Schleifen oder Honen ganz einzusparen.

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt „TubeForging" (02PK2243) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen" gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT), betreut. Projektpartner waren IPG IFUTEC Produktions GmbH in Karlsbad, Anton Müller GmbH Werkzeug- und Formenbau in Malsch sowie die Hochschule Osnabrück.

[1] Schlecht, B.: Getriebeelemente 2 – Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen. 2. Auflage, Pearson Studium, 2010

[2] Felten, K.: Verzahntechnik – Das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahnrädern, 4. Auflage, expert Verlag, 2015

[3] Weser, G.: Zahnradherstellung auf Universal-Mehrachsbearbeitungszentren: Eine Entwicklung im Zeitraffer, 5. FVA-Getriebeproduktionskongress GETPRO, Würzburg 25. – 26.03.2015

[4] Klingelnberg, J.: Kegelräder Grundlagen, Anwendung, 1. Auflage. Heidelberg, Springer-Verlag, 2008