

## Zahnkantenabdachungen - Fertigungsgerechte Gestaltung und Prozeßauslegung mit CAD-basierter Simulation

Schiedeck, N.

Für die Fertigung von Zahnkantenabdachungen werden aus wirtschaftlichen Gründen Verfahren mit einem kontinuierlichen Wälzprinzip eingesetzt. Aufgrund der komplexen Prozeßkinematik ist die Konstruktion von fertigen Abdachungen sowie die Ermittlung der Kinematikparameter und der Werkzeuggeometrie schwierig. Bisher wurden zeit- und kostenintensive Versuche durchgeführt. Um diesen Aufwand zu verringern, ist eine Methode entwickelt worden, die mit Hilfe einer CAD-basierten Simulation die gewünschten Ergebnisse vergleichsweise zügig und zuverlässig liefert. Diese Entwicklung erfolgte in Zusammenarbeit mit der Präwema GmbH in Eschwege und der Bosch GmbH in Hildesheim.

*This article describes a methodology of how to design and manufacture tooth chamfers. The main engineering problem is caused by the complex kinematics of the special manufacturing process for chamfering.*

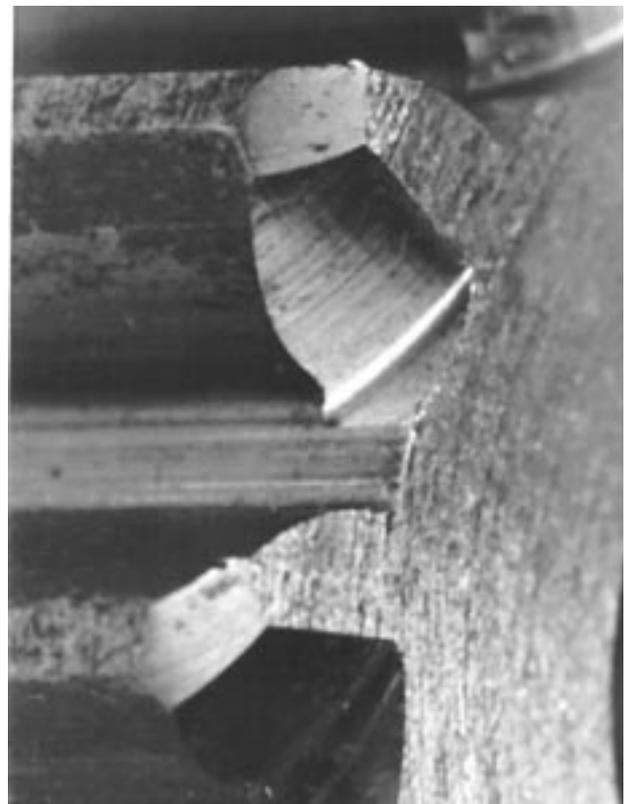
*Until now cost and time intensive experiments were needed for the specification of a manufacturable chamfer geometry and the determination of the kinematic parameter. Therefore a CAD-based simulation tool has been developed. These results were achieved in a partnership project of PRÄWEMA GmbH in Eschwege and BOSCH GmbH in Hildesheim.*

### 1 Zahnkantenabdachungen

Um in Schaltgetrieben die Übersetzungswechsel möglichst leichtgängig, geräusch- und verschleißarm durchzuführen, werden die Zahnkanten der bewegten Zahnräder abgedacht. Dadurch wird die Synchronisierung der ineinandergleitenden verzahnten Teile erleichtert. Die Abdachungen lassen sich anhand der Facettenanzahl pro Zahn und deren Anordnung sowie der Abdachgeometrie ordnen. Eingesetzt werden



**Bild 1:** Zahnkantenabdachungen an einem Anlasserritzel



**Bild 2:** Detailaufnahme der Zahnkantenabdachungen

derzeit geradflächige und ballig geformte Abdachungen, jeweils ein oder zwei Abdachungen pro Zahn. Bei einem zweifacettig abgedachten Zahn gibt es sowohl die symmetrische Anordnung, d. h. die linke wie auch rechte Abdachung sind geometrisch identisch, als auch die asymmetrische Anordnung mit unterschiedlichen Abdachungen.

Die Geometriefestlegung der Zahnkantenabdachungen erfolgt nach funktionalen Kriterien. Gewonnen werden die Geometrieformen in empirischen Untersuchungen. Ob die sehr engen Toleranzen, die seitens der Konstruktion vorgegeben werden und die Fertigung vor nicht unerhebliche Schwierigkeiten stellt, tatsächlich erforderlich sind, sei dahingestellt.

Als Anwendungsbeispiel sind hier die Abdachungen an Anlasserritzeln gewählt. Sie stellen insofern einen Sonderfall dar, da hier eine Zahnkante und der Zahnkopf abgedacht wird, **Bild 1 und 2**.

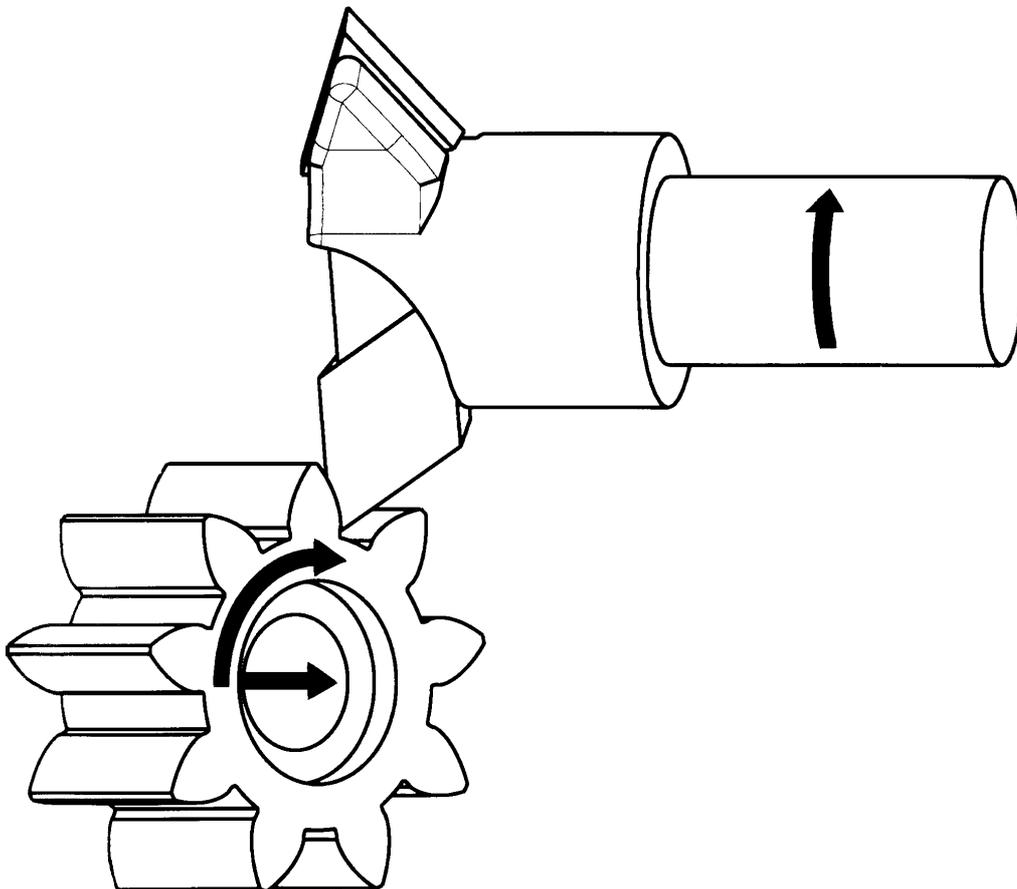
## 2 Verfahren zur Fertigung von Zahnkantenabdachungen

In der Vergangenheit wurden für geradflächige Abda-

chungen Stoßverfahren, für ballige Formen Fingerfräser eingesetzt. Nachteil dieser intermittierenden Verfahren ist ihre relativ hohe Hauptzeit, die die Kosten für derartige Massenteile in die Höhe treiben. Da die Automobilzulieferindustrie unter einem großen Kostendruck steht, werden heutzutage überwiegend Verfahren mit kontinuierlichem Wälzprinzip eingesetzt, **Bild 3**. Bekannt sind diese Verfahren auch unter dem Begriff „Schaltformfräsen“.

Dieses Verfahren weist eine komplexe Prozeßkinematik auf, die entsprechenden Werkzeugmaschinen besitzen bis zu acht NC-Achsen und eine elektronische Wälzkopplung.

Das Zahnrad befindet sich in einer Spindel, die mit der Frässpindel wälzgekoppelt ist. Die Frässpindel ist in allen sechs Freiheitsgraden einstellbar, d. h. der Fräser kann jede beliebige Position zum Werkstück einnehmen. Für dieses Verfahren wird ein Glockenfräser mit gekrümmter oder gerader Schneide genutzt, je nach gewünschter Abdachform. Die Schneide steht in einer bestimmten Stellung zum Werkstück. Während der Bearbeitung sind die rotierenden Fräser- und Werkstückspindeln synchronisiert. Während einer



**Bild 3:** Darstellung der Prozeßkinematik des Abdachverfahrens

Fräserumdrehung ist das Zahnrad um genau eine Teilung weitergedreht worden, so daß die Schneide jeden Zahn exakt auf gleiche Weise bearbeitet. Es ist anzumerken, daß sich die Schneidengeometrie nicht direkt aus der Geometrie der Abdachung ableiten läßt.

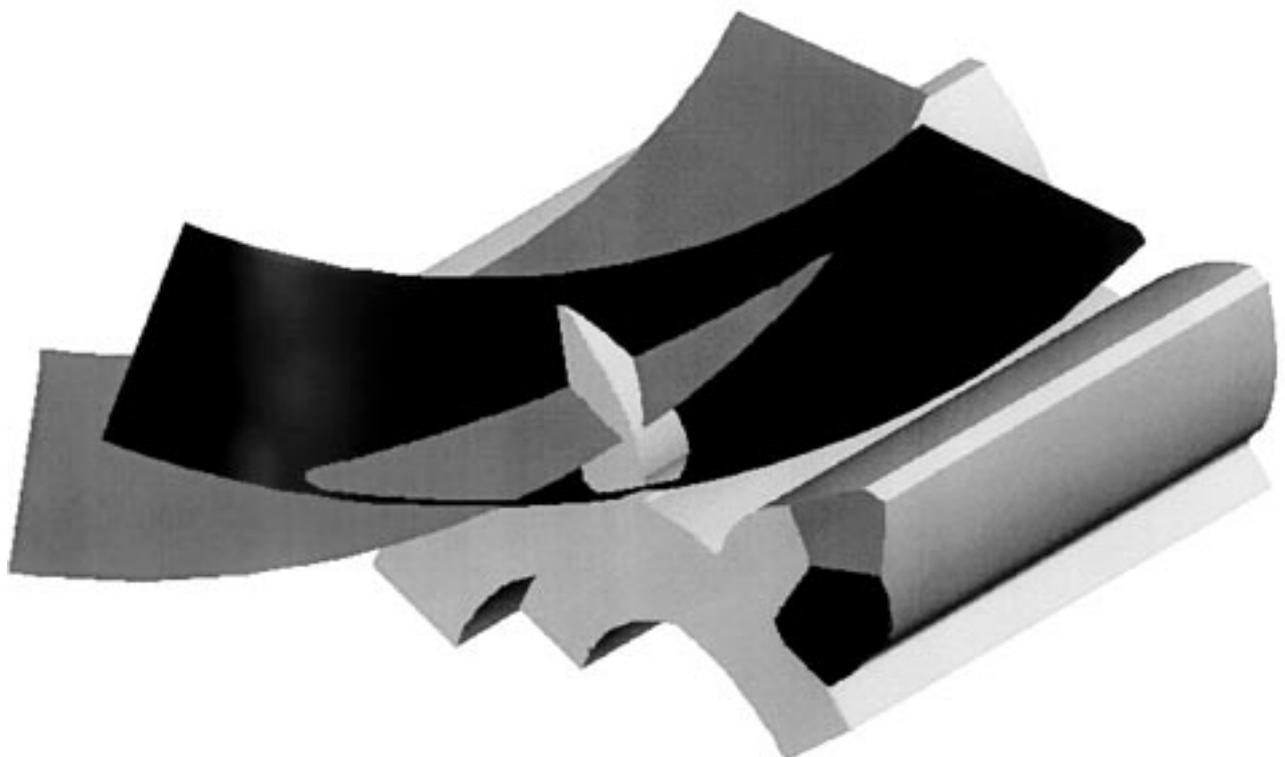
Für das Herstellen der Abdachungen an einem Anlaseritzel wird ein Glockenfräser mit zwei unterschiedliche Schneiden eingesetzt, eine geneigte Dreieckplatte für die Kopffacette und eine Rhombusplatte für die Hauptfacette. Die Ermittlung der Kinematikparameter und der Werkzeuggeometrie ist bei diesen Abdachungen mit großem Aufwand verbunden.

Kennzeichnend für auf diesem Prinzip basierende Verfahren ist die Steuerung der Fräterschneide im dreidimensionalen Raum. Dadurch erzeugt die Fräterschneide Hüllkurven, von denen Ausschnitte zur Formgebung der Funktionsflächen genutzt werden. Diese Hüllflächen entziehen sich aufgrund ihrer Komplexität einer anschaulichen, analytisch beschreibbaren Betrachtung, sie können in alle Raumrichtungen gekrümmt sein und sich in einer beliebigen Lage zu dem Werkstück befinden.

Diese Verfahren stehen im Gegensatz zu konventionellen Fräs- oder Drehverfahren, bei denen eine Steuerung der Fräserachse erfolgt. Bei den konven-

tionellen Verfahren wird die Formgebung durch die rotationssymmetrische Hüllfläche des Fräfers oder des zu drehenden Werkstücks festgelegt, damit sind bei der Konstruktion der Teile neben der Beachtung allgemeiner Regeln zum fertigungsgerechten Konstruieren nur relativ einfache Betrachtungen bezüglich der Fertigung anzustellen - oft auf Kollisionsbetrachtungen beschränkt.

Die Erkenntnisse der Zerspanungstechnik gelten für diese Sonderverfahren genauso wie für die konventionellen spanenden Verfahren wie Drehen und Fräsen etc. Während des Zerspanungsvorganges sind bestimmte Schnittbedingungen wie Freiwinkel, Spanwinkel, Schnittgeschwindigkeit etc. einzuhalten. Aufgrund der komplexen Kinematik dieser Verfahren sind Werkzeug-Bezugssystem und Wirk-Bezugssystem jedoch unterschiedlich. Im Gegensatz zum Drehen stellt sich kein konstanter Wirkrichtungswinkel ein. Damit ist z.B. die Einhaltung der Schnittwinkel nur durch eine über den gesamten Schnittverlauf reichende Betrachtung bei sich ständig ändernden Schnittbedingungen sicherzustellen. Hinzu kommen kinematische Betrachtungen der bewegten Werkzeuge und Werkstücke zur Vermeidung von Kollision und - besonders im Verzahnungsbereich - die Forderung nach hohen Genauigkeiten und Wiederholgenauigkeiten bei hohen Werkzeugstandzeiten.



**Bild 4:** CAD-basierte Simulation des Verfahrens: auf einen Zahn projizierte Darstellung der von den Fräterschneiden erzeugten Flächen; rechts ein fertig bearbeiteter Zahn.

### 3. Problem: Fertigungsgerechte Detailkonstruktion und Prozeßauslegung

Für den Produktentwickler stellen sich bei Einsatz der Verfahren mit gesteuerter Schneide zwei Aufgaben:

- Auswählen einer funktional geeigneten und fertigen Abdachgeometrie,
- Auslegen der Prozeßkinematik und Werkzeuggeometrie.

Nicht alle Formen lassen sich mit diesen wirtschaftlichen Verfahren fertigen, ein Umstand, der während der Detailgestaltung der Abdachungen zu berücksichtigen ist und gegebenenfalls zu Kompromissen in der Gestaltung führt.

Die Fräuserschneiden beschreiben bei diesen Verfahren eine Fläche, die sich um die Zähne herumwickelt und sich einer anschaulichen Betrachtung entzieht. Aus den angewandten Kinematikparametern ist daher die mit ihnen erzielte Fläche nicht direkt ableitbar.

In der betrieblichen Praxis führt dies dazu, daß eine Abdachgeometrie, für die die Kinematikparameter einmal bekannt sind, nicht mehr geändert werden, wenn es sich irgendwie vermeiden läßt. Dadurch ergeben sich erhebliche Restriktionen für die Konstruktion. Auf der anderen Seite steht die Fertigungsplanung bei der Einführung einer neuen Abdachgeometrie vor dem Problem, die geeigneten Kinematikparameter und die geeignete Werkzeuggeometrie zu ermitteln. Insgesamt sind 27 von einander abhängige Kinematik- und Werkzeugparameter zu bestimmen.

### 4. CAD-basierte Simulation

Um die kinematischen Verhältnisse des Abdachvorgangs näher untersuchen zu können, wurde ein CAD-basiertes Simulationstool geschaffen. Der Fertigungsvorgang wird dabei simuliert und das erzielte Fertigungsergebnis als 3D-CAD-Geometriemodell dargestellt. Ein Simulationslauf hat folgende Schritte:

- Erzeugung eines Geometriemodells für das zu bearbeitende Zahnrad,
- Darstellung der Sollgeometrie der Abdachungen als Hilfsgeometrie,
- Vorgabe der Kinematik- und Werkzeugparameter,
- Auswertung des Simulationsergebnisses.

Die Prozeßkinematik und eine parametrische Beschreibung des Werkzeugs ist in einem Programmmodul bereits vordefiniert. Die Eingabeparameter werden genutzt, um die Bewegung von Werkstück und Werkzeug im CAD-System zu steuern. Für die Auswertung steht ein vollständiges Geometriemodell zur Verfügung. Damit kann die Einhaltung der Form- und Lagetoleranzen auf vielfältige Weise überprüft werden.

Ein alternativer Lösungsweg ist die Berechnung der entsprechenden Parameter ohne Simulation. Eine direkte analytische Lösung ist in keinem Fall möglich, da die Form der Flächen, die die Fräuserschneiden im Raum erzeugen, mathematisch unterschiedlich von der Form der vorgegebenen Abdachung ist. Daher können nur numerische Verfahren eingesetzt werden. Eine geschlossene Lösung ist theoretisch denkbar, erschien jedoch aus hauptsächlich zwei Gründen in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht machbar. Zum einen sind die Produkte so unterschiedlich, daß eine einheitliche Darstellung ausgeschlossen war. Zum anderen können Ergebnisse eines Berechnungsprogramms mit numerischer Lösung nur mit großem zeitlichen und wirtschaftlichen Aufwand in Fertigungsversuchen getestet werden, da für jedes Werkstück ein eigenes Werkzeug angefertigt werden muß.

### 5. Ausblick und weitere Entwicklungen

Für Teilefamilien, die bestimmten Ähnlichkeitskriterien gehorchen, werden Programme entwickelt, die die erforderlichen Parameter ohne Simulation errechnen. Das CAD-basierte Simulationstool wird dabei zum Testen der Software genutzt.

Es werden CAD-Simulationen für weitere Verfahren erstellt, die ebenfalls mit dem Prinzip der gesteuerter Schneide arbeiten, z. B. dem Wirbelfräsen.

Ein Entwicklungsschritt in eine andere Richtung ist die Verbindung des Simulationstools mit einem intelligenten System, wodurch dem Anwender der immer noch zeitaufwendige und vor allem monotone Iterationsprozeß bei der Wahl der Kinematik- und Werkzeugparameter abgenommen wird. Damit wird die Produktentwicklung beim Einsatz dieser hochwirtschaftlichen aber kinematisch komplexen Verfahren erheblich unterstützt, sowohl in technischer wie auch wirtschaftlicher Hinsicht.