

## Reformation der Zahnwellen-Verbindung

Schäfer, G.

*Die Zahnwellenverbindungen mit Evolventenflanken sind ein Forschungsschwerpunkt des IMW. Die vorhandenen Erfahrungen lassen die Generierung eines neuen Flankenprofils, auch unter Berücksichtigung der spanlosen Herstellungsverfahren, sinnvoll erscheinen.*

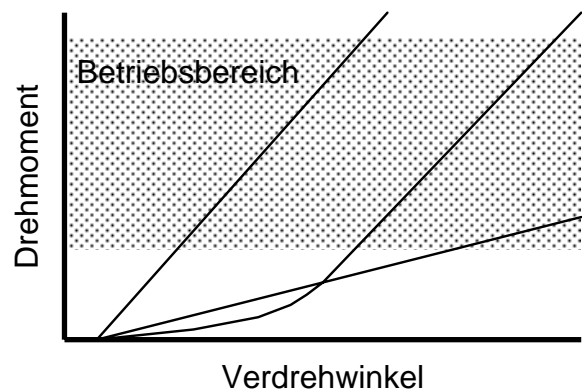
*Shaft hub interfaces with involute splines are the focus of research activity at the IMW. One of the results of this activities is, that it is wise to create a new spline geometry for special conditions, considering the filin-gless processes as well.*

### 1. Einführung

Die Forschungsaktivitäten auf dem Bereich der form-schlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen, speziell der Zahnwellen-Verbindungen, stellen seit vielen Jahren einen Schwerpunkt im Bereich der experimentellen und theoretischen Forschung des Institutes dar. An den Anfängen standen grundsätzliche Untersuchungen der Tragfähigkeit und des Verschleißverhaltens von Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5480. Als aktueller Abschluß dieser Arbeiten entsteht zur Zeit eine darauf aufbauende Berechnungsvorschrift für Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, die DIN 5466. Neben diesen Untersuchungen, der klassischerweise mit Schiebesitz versehenen Zahnwellen-Verbindungen, werden seit ca. zwei Jahren, mit finanzieller Unterstützung der Forschungsvereinigung Antriebs-technik (FVA), Anstrengungen unternommen, den bei großen Stückzahlen auftretenden "Sonderfall" der axial nichtverschieblichen Zahnwellen-Verbindung mit Preßsitz zu untersuchen.

Ein erstes Ergebnis dieser Untersuchungen ist die ansteigende Empfindlichkeit der Verbindung gegenüber Fertigungstoleranzen wie z.B. Flankenrichtungs- und Teilungsabweichungen. Diese Abweichungen machen sich zunächst bei der Montage durch stark schwankende Montagekräfte bis hin zur Nichtmontierbarkeit bemerkbar. Im späteren Betrieb kommt es dann häufig zu einem verschleißbedingten Ausgleich

dieser Abweichungen. Gleichzeitig wird bei Flankenkontaktgeometrien mit sehr steiler Federkennlinie, **Bild 1**, der Preßsitz aufgehoben und es kommt zum Lockern und damit zum Ausfall der Verbindung.



**Bild 1** Verdrehwinkel als Funktion des Drehmomentes für verschiedene Verdrehfedersteifigkeiten.

Der andere Extremfall einer sehr flachen Federkennlinie wirkt sich günstig auf den Ausgleich der Flankenrichtungs- und Teilungsabweichungen aus, er hat aber den Nachteil einer sehr begrenzten Drehmomentenübertragungsfähigkeit bei begrenztem Verdrehwinkel. Ideal wäre eine progressive Federkennlinie des Flankenkontaktes, damit würde eine gute Fähigkeit zum Ausgleich von Abweichungen bei gleichzeitig hoher Drehmomentenübertragungsfähigkeit erreicht.

Grundvoraussetzung für eine solche progressive Federkennlinie wäre eine gegenüber der DIN 5480 geänderte Flankenform. Eine solche Änderung sollte in der Serienfertigung nicht unbesehen abgelehnt werden. Über die angesprochenen Verbesserungen hinaus lassen sich mit der neuen Zahnform allgemein funktions-, fertigungs- und montagegerechtere form-schlüssige Welle-Nabe-Verbindungen realisieren. Im folgenden sollen diese Schlagworte genauer ausgeführt und im Zusammenhang erläutert werden.

## 2. Funktionsgerecht

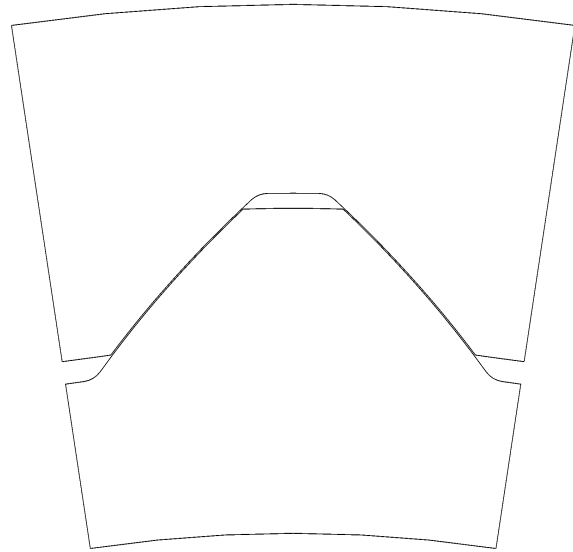
Die Funktionsanforderungen an formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen spiegeln den weiten Einsatzbereich dieses Maschinenelementes wieder. Beginnend bei der einfachen Drehmomentübertragung von einer Welle auf eine Nabe kommt z.B. bei Riemenscheiben oder Schieberädern eine Querkraftübertragung hinzu. Bei fehlender oder unzureichender Zentrierwirkung erzeugen die angreifenden Querkräfte Relativbewegungen zwischen Welle und Nabe, die durch Reibungsverschleiß zum vorzeitigen Versagen der Verbindung führen. Die Schieberäder stellen außerdem höhere Anforderungen an die Zentrierfähigkeit der Welle-Nabe-Verbindung, da die Laufgüte der Außenverzahnung entscheidend vom Rundlauf des Zahnrades abhängt.

Der notwendigerweise vorhandene Schiebesitz macht z.B. bei Schieberädern mit flankenzentrierten Zahnwellen-Verbindungen eine zusätzliche Durchmesserzentrierung zur Übertragung der Querkräfte nahezu unmöglich. Der Grund dafür liegt in der sich verschärfenden Problematik der Doppelpassung zwischen den beiden Zentrierungen. Die verzahnungsinernen Abweichungen, wie z.B. Teilungsabweichungen, können bei sehr kleinem Verdrehspiel bereits zum Klemmen der Verbindung führen. Durch eine zusätzliche Durchmesserzentrierung kommt es, im Fall größerer Abweichungen zwischen Verzahnungs- und Wellenmitte, zu einer erheblichen Verspannung von Welle und Nabe mit dem Ergebnis einer axialen Bewegungsbehinderung. Diese Funktionbeschränkung könnte durch vergrößertes Verdrehspiel aufgehoben werden. Bei wechselnder Drehmomentbelastung ist diese Lösung aber dringend zu vermeiden, da durch das Spiel die dynamische Beanspruchung (Flankenschlagen) vergrößert werden.

Für den Fall einer Zahnwellen-Verbindung mit Preßsitz behindert die zusätzliche Durchmesserzentrierung nicht die Funktion, da hier die axiale Fixierung eine Aufgabe der Verbindung ist. Solange die Beanspruchungen aus der Verspannung der beiden Zentrierungen unterhalb der Festigkeitsgrenzen von Welle und Nabe bleiben, sollte die Durchmesserzentrierung zur Querkraftübertragung genutzt werden.

Aus diesen Beispielen wird deutlich, wie umfassend die Auswahl und Auslegung von Zahnwellen-Verbindungen sein kann. Bei diesem Vorgang müssen auch Flankengeometrievariationen bewertet werden. Eine in der Norm vorgesehene Variation zur Verbesserung

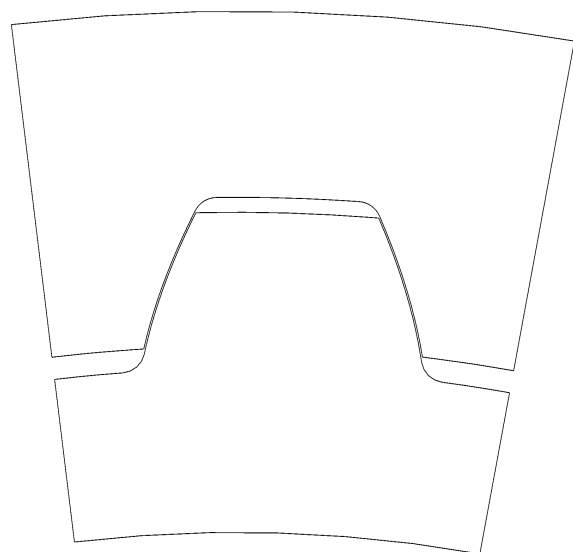
des Zentrierverhaltens ist die Vergrößerung des Flankenwinkels von  $30^\circ$  auf  $45^\circ$ , **Bild 2.1**.



**Bild 2.1** Zahn mit Evolventenflanke und  $45^\circ$  Flankenwinkel.

Durch die Vergrößerung des Flankenwinkels werden die aus der Drehmomentbeanspruchung resultierenden Radialkräfte größer. Der Vorteil ist eine höhere Zentrierfähigkeit der Verbindung, dies ist jedoch mit dem Nachteil der ansteigenden Nabenbeanspruchung durch Sprengkräfte verbunden. Bei der Wahl größerer Flankenwinkel ist also auf ausreichende Nabenwandstärken zu achten.

Werden nur geringe Anforderungen an die Zentrierfähigkeit der Verbindung bei geringen Nabenwandstärken gestellt, so empfiehlt es sich, auf geringere Flankenwinkel bis hin zu  $\alpha=20^\circ$ , **Bild 2.2**, auszuweichen.

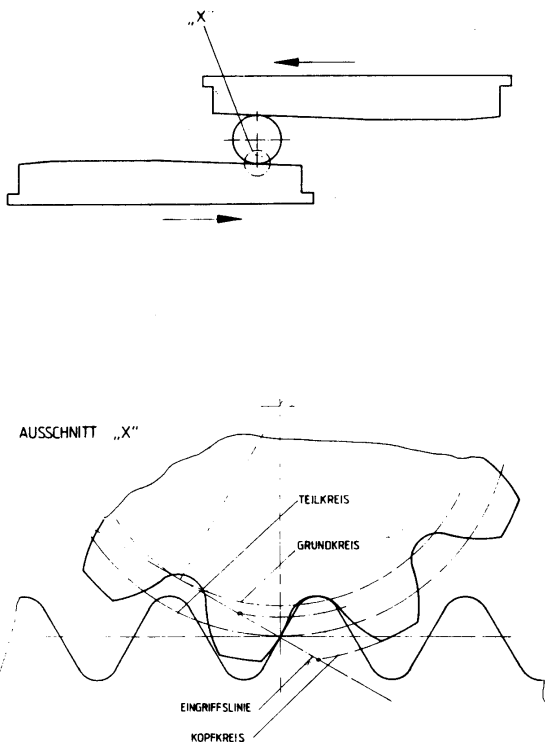


**Bild 2.2** Zahn mit Evolventenflanke und  $20^\circ$  Flankenwinkel.

Ein weiter Aspekt bei der Wahl des Flankenwinkels und der Flanken­geometrie ist das Fertigungs­ver­fahren.

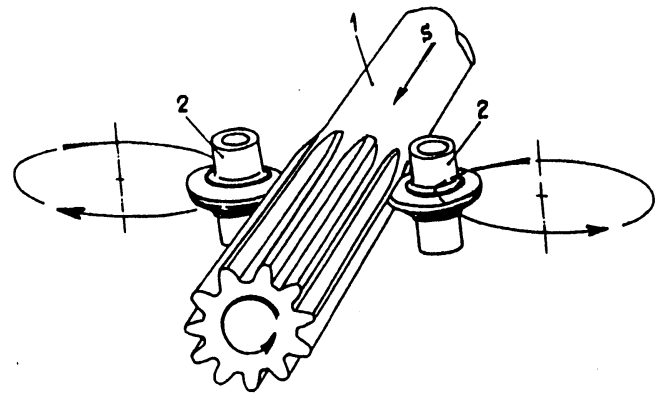
**3. Fertigungsgerecht**

Für die Herstellung von Zahn­wellen­Verbindungen werden heute sowohl spanende als auch spanlose Verfahren eingesetzt. Der Einsatzbereich der spanlosen Verfahren liegt zur Zeit hauptsächlich in der Großserienfertigung. Die spannenden Verfahren, wie z.B. das Wälzfräsen und das Wälzstoßen, sind aus der Laufverzahnungsherstellung heraus eingeführte Verfahren. Aufgrund der abwälzenden Arbeitsweise sind sie zur Herstellung von evolventischen Flanken­geometrien geeignet. Bei den konkurrierenden Verfahren der spanlosen Herstellung gibt es längs- und querarbeitende Verfahren. Die Geometrie­beschränkungen sind bei dem querarbeitenden Verfahren durch die Wälzbewegung zwischen zwei Zahnstangen, **Bild 3.1**, denen der spannenden Abwälzverfahren ähnlich.



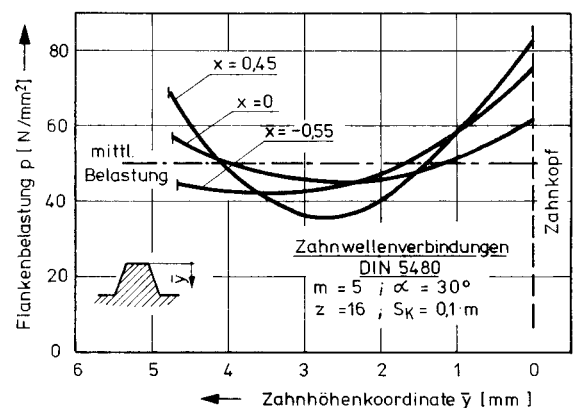
**Bild 3.1** Querwalzverfahren, Zahnstange und Ritzel im Eingriff /2/

Das längsarbeitende Verfahren, **Bild 3.2**, erlaubt beliebige Flanken­formen. Die spanlosen Verfahren haben durch den Umformvorgang bedingt Grenzen bei dem Verhältnis Zahn­höhe zu Zahn­breite. Das Fließverhalten des Werkstoffes setzt dabei die Grenze fest,



**Bild 3.2** GROB-Walzverfahren für Außenverzahnungen. Die Walzrollen haben das Lückenprofil und erlauben so jede beliebige Profilform. /2/

darüberhinaus würde der Werkstoff nicht mehr bis in den Wellenzahnkopf fließen können. Für den Fließvorgang beim Umformen sind grundsätzlich größere Radien günstiger als z.B. die Kerbe im Zahnfuß der DIN 5480 Flanken­geometrie. Die Zahnfußausrundung stellt eine erhebliche Fließ­behinderung dar. Die ANSI B92.2 sieht aus diesem Grund auch die Möglichkeit der vollen Fußausrundung vor. Der zweite Ansatzpunkt wäre eine Rücknahme im Kopfbereich, sowie eine generelle Kopfkürzung. Beide Maßnahmen würden den Umformvorgang erleichtern, indem der Bereich hoher Umformgrade reduziert würde. Bei Betrachtung der Flanken­tragfähigkeit ist eine leichte Kopfrücknahme positiv zu bewerten. Ohne Kopfrücknahme ergeben sich die in **Bild 3.3** dargestellten Belastungsverläufe über der Zahn­höhe.



**Bild 3.3** Abhängigkeit der Lastverteilung über der Zahn­höhe von der Profilverschiebung /1/

Die Lastüberhöhung im Zahnkopf kann durch eine leichte Kopfrücknahme wirksam vermindert werden. Die generelle Kopfkürzung geht mit einer Reduzierung der wirksamen Flanken­fläche einher. Dieser Nachteil könnte durch eine sowohl fertigungs- als

auch tragfähigkeitsoptimierte Flankengeometrie ausgeglichen werden. Für eine Quantifizierung sind noch entsprechende Berechnungen und Versuche durchzuführen. Die Tragfähigkeitsoptimierung muß zum einen auf eine Vergleichmäßigung der Lastverteilung, sowohl in Zahnhöhenrichtung und über dem Verbindungsumfang als auch in Richtung der Verbindungsbreite, und zum anderen auf die Verbesserung der elastischen Eigenschaften des Flankenkontaktes zum Ausgleich von Verzahnungsabweichungen zielen. Die notwendige Flankenformoptimierung sollte neben der Tragfähigkeit und der Fertigung, die Montierbarkeit als weiteren Parameter beinhalten.

#### 4. Montagegerecht

Wie weiter oben beschrieben wurde, kommt es aufgrund von Fertigungsabweichungen bei der Standardevolventengeometrie DIN 5480 und ANSI B92.2 durch den Flächenkontakt zu erheblichen Problemen. Der Flächenkontakt hat den in Bild 1 schematisch dargestellten steilen Verlauf. Die Verbindung reagiert insgesamt sehr hart, minimale Geometrieabweichungen führen zu erheblichen Flankenkräften und entsprechender Beanspruchung. Diese Charakteristik führt bei der Montage von Verbindungen mit Übergangs- und Preßpassungen zu den Problemen der stark schwankenden Montagekräfte, der teilweisen Nichtmontierbarkeit und dem "Späne ziehen" beim Aufschieben. Eine Lösungsmöglichkeit für dieses Problem ist die gezielte Montage in der idealen Fügstellung. Dazu werden die Wellen und Naben vermessen und nach festgelegten Regeln gepaart. Dieser Vorgang ist sehr zeit- und kostenintensiv, er ist aber dennoch in der Großserienfertigung Standard. An dem betriebenen Aufwand ist das Ausmaß der Probleme gut abzuschätzen, die durch die bestehenden Verzahnungsgeometrien tagtäglich an tausenden von Verzahnungen anfallen.

Aus Kenntnis dieser Sachlage heraus scheint die Zeit reif zu sein eine neue Verzahnungsgeometrie zu entwickeln, die den heutigen Anforderungen und Gegebenheiten durch die Funktion, die Fertigung, die Montage und die Festigkeit entspricht. Diese Geometrie kann die zur Zeit etablierten Normgeometrien nicht vollständig ablösen, aber in den mit sehr großen Stückzahlen belegten Bereichen der kaltverformten und Preßsitz-Verbindungen eine Lösung für die dort anstehenden Probleme sein. Die Berechtigung für eine solche Geometrie ergibt sich aus der gefertigten

Stückzahl und dem momentanen Aufwand zur Beherrschung des Montageprozesses.

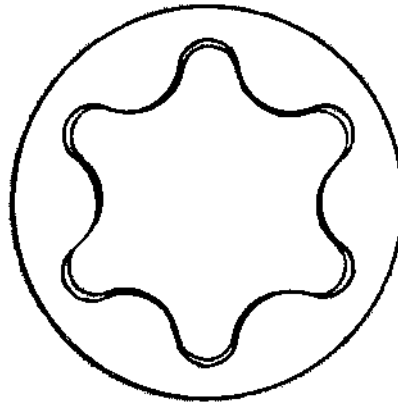


Bild 4.1 TORX-Geometrie

Ein denkbarer Ansatz für die neue Zahnwellen-Geometrie kann die von den Schrauben bekannte TORX-Geometrie sein. Die Anforderungen durch den Umformprozeß werden hier vorbildlich erfüllt. Eine Durchmesserzentrierung kann über den Nabenzahnkopf und den durch den Walzvorgang kalibrierten Wellenzahnfuß erreicht werden, so daß diese Geometrie schon einen Teil der Funktionsanforderungen erfüllen kann. Bezüglich der Montageanforderungen kann momentan nur eine Aussage aus den Flankenwinkel-Untersuchungen abgeleitet werden, die mit größer werdenden Flankenwinkeln einen positiven Einfluß auf die Abweichungstoleranz der Verbindung nachgewiesen haben. Die Sprengwirkung auf die Nabe ist dabei gesondert zu betrachten.

Abschließend kann gesagt werden, daß hier eine Möglichkeit zur Innovation der Zahnwellenverbindung gegeben ist, die es in Zukunft zu nutzen und auszubauen gilt.

#### 5. Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen, Selbstverlag des Verfassers, 1978
- /2/ Bausch, Th.: Moderne Zahnradfertigung 2.Aufl., expert Verlag, 1994