

## Zahnwellenforschung am IMW

Schäfer, G.; Ring, C.

*Die Zahnwellen-Verbindung ist eines der Schwerpunktthemen am IMW. Der folgende Artikel versucht diese inzwischen über 20-jährige Forschungstätigkeit zusammen zu fassen und einen Ausblick auf die zukünftigen Arbeiten zu geben.*

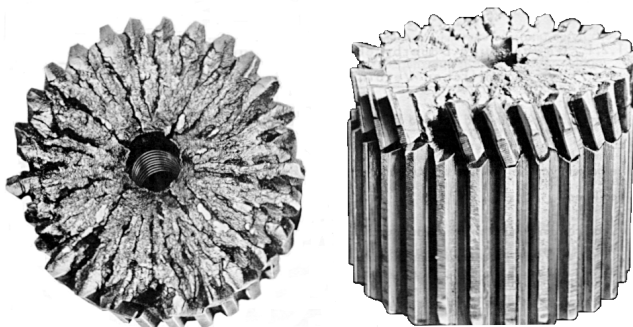
*Spline-hub-connections are one of the keyobjects in the IMW. A 20 years overview and a look into the future of research work will be given in this article.*

### 1 Ausgangssituation

Zahn- und Keilwellen-Verbindungen sind klassische formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen. Neben der Drehmomentübertragung erlauben sie axiale Verschiebungen, ein entscheidender Vorzug gegenüber Preßverbindungen. Die Kombination dieser Eigenschaften eröffnet viele Einsatzfälle in der Antriebstechnik, u.a. Bereichen wie z.B. in Lenksäulen. Schadensfälle an solchen Verbindung führen meist zu einem Ausfall der Gesamtanlage, teilweise mit schweren Folgen.

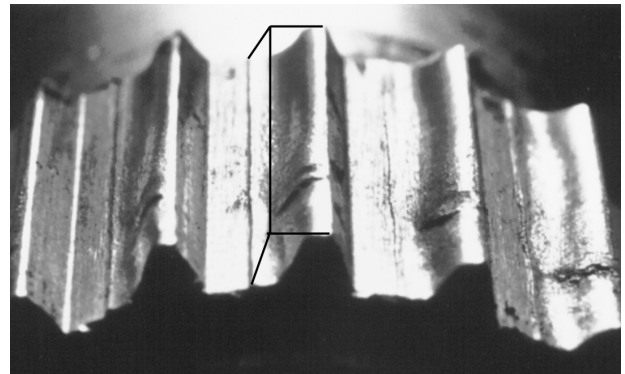
Schadensfälle an Zahnwellen-Verbindungen (ZWV) können allgemein in zwei Kategorien unterteilt werden:

**Versagen durch Bruch:** Die Ursache ist eine Beanspruchungsüberhöhung im Zahnfuß, die in Abhängigkeit von der Verbindungsgeometrie und der Belastung zum Abscheren der Zähne, zum Bruch der Welle oder zum Platzen der Nabe führen kann. Dabei kann zwischen statischem Gewalt- (**Bild 1**) und Dauerbruch infolge Schwingbeanspruchung unterschieden werden.



**Bild 1:** Gewaltbrüche an Zahn- und Keilwellen-Verbindungen; Beanspruchung deutlich oberhalb der Streckgrenze

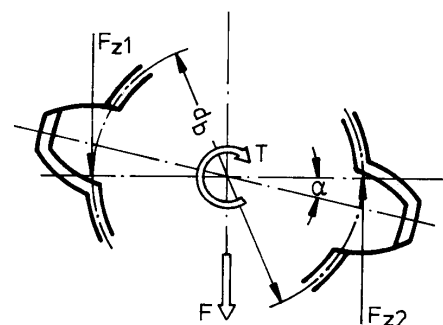
**Flankenverschleiß:** Verschleißvorgänge auf den Zahnflanken entstehen durch die Relativbewegungen im Betrieb zwischen Welle und Nabe, **Bild 2**. Deutlich zu erkennen ist eine reduzierte Zahndicke.



**Bild 2:** Verschleißerscheinung an einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480

Die für den Verschleiß notwendigen Relativbewegungen sind von zahlreichen Parametern abhängig: Größe und zeitliches Verhalten von Drehmoment und Biegemoment, Werkstoffpaarung, Umgebungseinflüsse (Medium, Temperatur) etc. Die Aufzählung verdeutlicht die komplexe Dimensionierungsproblematik und erklärt, weshalb die meisten Schadensfälle auf Verschleiß zurückzuführen sind /1/.

Huber /2/ führte Untersuchungen an ZWV durch, um den Grenzzustand bei kombinierter Belastung durch Drehmoment und Radialkraft zu ermitteln, bei dem die Verbindung nicht mehr selbstzentrierend wirkt und in ihrem Spiel umschlägt. Bei überschreiten einer bestimmten Radiallast schlägt der Zahn mit  $F_{z1}$  auf die Gegenseite um, **Bild 3**. Durch die einsetzenden Relativbewegungen tritt erhöhter Verschleiß auf.

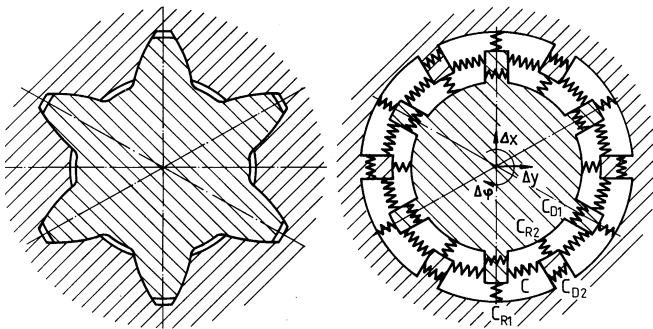


**Bild 3:** Schema zur Ableitung des Kippeffektes von Huber /2/

Festigkeitsuntersuchungen an ZWV wurden von Schöpf /3/ u.a. mit dem Ergebnis durchgeführt, dass die maximale Zahnfußspannung weitgehend vom Verhältnis der Verbindungslänge zum Kopfkreisdurchmesser ( $L/d_{a1}$ ) abhängt. Verbindungen mit  $L/d_{a1} \geq 0,5$  bringen bei reiner Drehmomentübertragung keinen Vorteil.

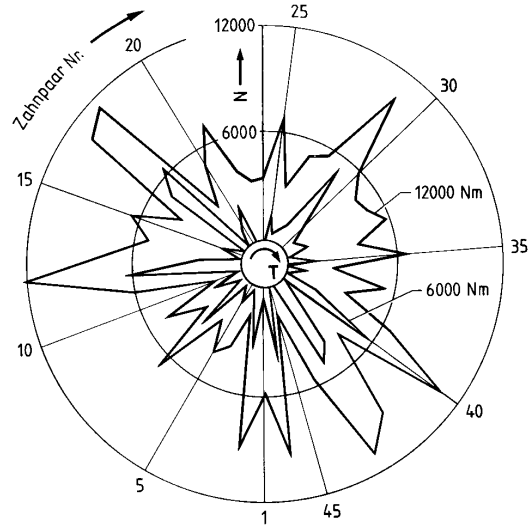
**2 Die Arbeiten von Dietz - "Die weiße Bibel"**

Mit der Veröffentlichung von Dietz /1/ wurde eine umfangreiche Abhandlung über das Lastaufteilungs- und Zentrierverhalten von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen vorgestellt. Er benutzte dazu zunächst ein ebenes elastisches Ersatzmodell, **Bild 4**. Später erfolgte die Erweiterung auf räumliche Modelle.

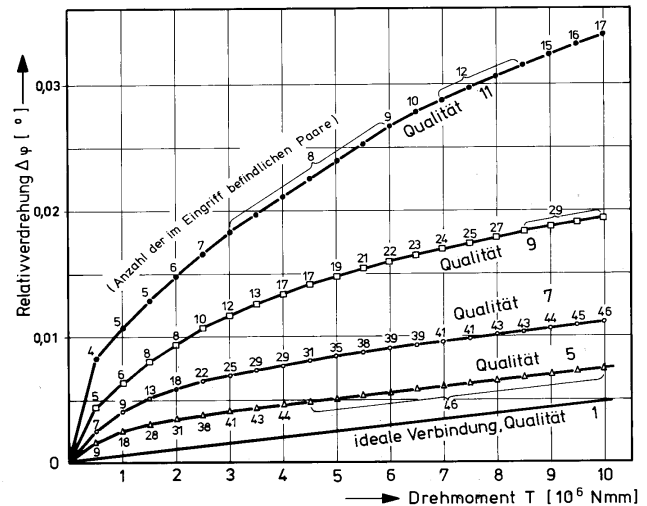


**Bild 4:** Prinzipieller Aufbau und mechanisches Ersatzsystem einer ZWV zur Lastaufteilungsrechnung /1/

Maßgebend für das von ihm entwickelte Berechnungsverfahren ist, dass der Einfluß der Teilungsabweichungen und Einbaustellung berücksichtigt wird. Durch die äußere Belastung "Drehmoment(T)" und "Querkr(Q)"; verformen sich die ersten anliegenden Zahnpaare so lange, bis das nächste kleinere Flankenspiel überwunden ist. Dadurch kommt ein weiteres Zahnpaar in Eingriff und übernimmt einen Teil der Belastung. Aus den äußeren Lasten (T, Q) werden mittels eines von Dietz entwickelten Iterationsverfahrens mit analytisch berechneten Zahnsteifigkeiten alle Verschiebungen  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \phi$  eines jeden Zahnpaares in der Scheibenebene bestimmt. Ein weiteres Ergebnis der Iterationsrechnungen ist die Lastverteilung (Flankennormalkräfte und Reibkräfte) über dem Umfang der Verbindung, **Bild 5**. Deutlich ist zu erkennen, wie sich mit steigender Drehmomentbelastung die Zahl der im Eingriff befindlichen Zahnpaare erhöht, **Bild 6**.



**Bild 6:** Lastaufteilung mit normalverteilten Abweichungen bei reinem Torsionsmoment, DIN 5480 – 95x2x30x46, Einbaustellung 1/1, Qualität 7 /1/



**Bild 6:** Relativverdrehung und Anzahl der tragenden Zähne in Abhängigkeit von Drehmoment und Qualität, DIN 5480 – 95x2x30x46 /1/

**3 Weiterführende Arbeiten am IMW**

Mit der Übernahme der Professur an der TU Clausthal wurde durch Dietz der neue Forschungsschwerpunkt "Zahn- und Keilwellen-Verbindungen" am IMW aufgebaut. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) förderte Projekte, die sich thematisch mit der Festigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindung befassten, die Volkswagen-Stiftung eines zum Einfluss von Verzahnungsabweichungen auf das Passungs- und Laufverhalten von ZWV. Die anwendungsnahen Untersuchungen wurden und werden aktiv von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) be-

treut und finanziell gefördert. Hierunter fallen alle Verschleißuntersuchungen an ZWV, z.B. Einfluss von Herstelltoleranzen, kombinierter Lasten (T, Q), Schmierung sowie Untersuchungen zur Kerbwirkung von ZWV in Zusammenarbeit mit der TU Dresden.

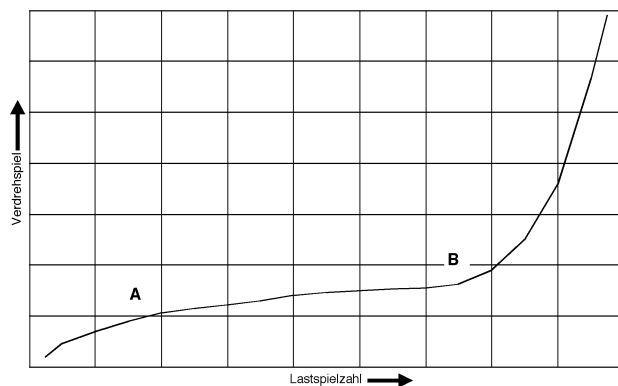
Aus diesen Forschungen sind bereits viele Studien-, Diplom- und Doktor-Arbeiten am IMW hervorgegangen /4-10/, deren Ergebnisse sich in den entsprechenden Berechnungs- und Dimensionierungsvorschriften z.B. DIN 5466 widerspiegeln.

Villmer /4/ variierte die Gestalt der Nabe (Außendurchmesser  $d_{e2}$ , Breite  $b$ ) und kam zu folgenden Ergebnissen:

- Seine FEM-Berechnungen und DMS-Messungen bestätigten die Aussage von Schöpf, mit steigender Verbindungsbreite sinkt die Flächenpressung bei reinem Drehmoment bis zu einem Verhältnis  $b/d_B=0,5$ .
- Die axiale Lastverteilung kann bei  $d_{e2} \leq 2 \cdot d_B$  durch die Einspannung der Nabe am Verbindungsende günstig beeinflusst werden.

Zapf, Mendel und Schäfer /5,7,8/ führten am IMW umfangreiche Verschleißuntersuchungen an ZWV mit Schiebesitz durch. Dabei wurden folgenden Untersuchungsparametern gefahren:

- Verzahnungsqualität/Passung
- Belastungskombination Drehmoment/Querkraft
- Fett- bzw. Ölschmierung
- Axialbewegungen zwischen Welle und Nabe
- Werkstoffkombination Welle/Nabe
- Oberflächenbehandlung (Härten, Beschichten)

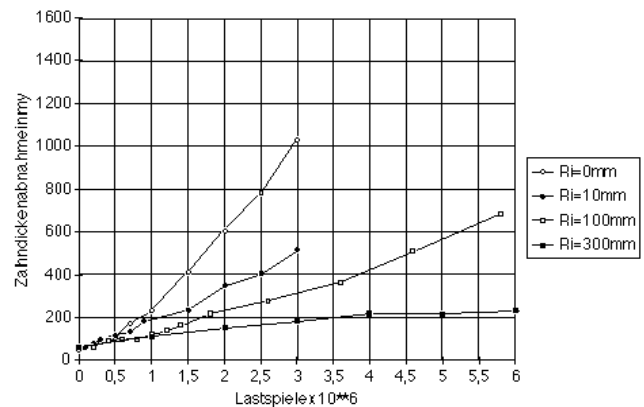


**Bild 7:** Verschleißphasen einer ZWV

Die Lebensdauer einer ZWV ist durch das Erreichen bestimmter Verschleißbeträge begrenzt. **Bild 7** zeigt das prinzipielle Verschleißverhalten. Punkt A markiert das Ende des Einlaufverschleißes, es

schließt sich ein Bereich konst. mäßigen Verschleißes an. Punkt B verkörpert die Grenze der Lebensdauer, an diesem Punkt beginnt der Endverschleiß mit exp. zunehmenden Verschleißraten. Die Erfahrungen, die durch die FVA-Vorhaben und die Untersuchungen von Schadensfällen gewonnen wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

**Belastungskombination Drehmoment/Querkraft:** Hohe Querkraft sorgt für einen exzentrischen Lauf und große radiale Relativbewegungen mit entsprechendem Verschleiß auch bei geringen Zahnlasten, **Bild 8**. Bei großen Querkräften sollte daher eine konstruktive Aufgabenteilung in "Drehmoment und Querkraft übertragen" vorgenommen werden.



**Bild 8:** Verschleißverhalten bei unterschiedlichen idealen Radien  $R_i = T/Q$

**Überlagerte Axialbewegungen:** Sie verursachen hohen Verschleiß, es hilft die Flächenpressung zu reduzieren und eine Ölschmierung zu verwenden. Es gibt gelenkwellenspezifische Lösungen.

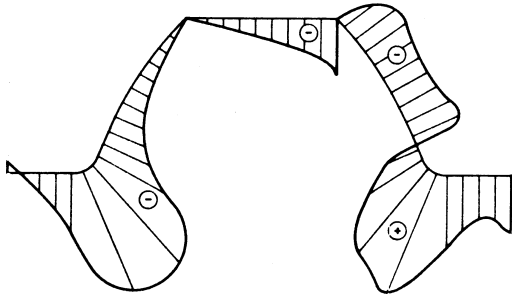
**Verzahnungsqualität/Passung:** Die Toleranzlage und -größe hat eine untergeordnete Bedeutung.

**Fett- bzw. Ölschmierung:** Grundsätzlich ist eine Ölschmierung zu bevorzugen, da das Öl Verschleißpartikel aus der Kontaktzone entfernt. Beim Einsatz von Fett sollten die Ergebnisse des aktuellen FVA-Vorhabens 99/V beachtet werden.

**Oberflächenhärte:** Die Härtung der Flanken ist bei abrasivem Verschleiß eine geeignete Maßnahme. Beachtet werden müssen jedoch die Effekte der Durchhärtung und des Härteverzugs.

**Beschichtung:** Beschichtungen stellen technisch-wirtschaftliche Lösungen für Spezialfälle dar, da sie nicht die Wirksamkeit einer Ölschmierung haben.

Kohl /6/ wertete das Tragverhalten Zahn-/Gegenzahn entlang der Randkontur aus, **Bild 9**. Gegenüber Laufverzahnungen ist das Tragverhalten von ZWV durch einen parabolischen Pressungsverlauf über der Zahnflanke gekennzeichnet.



**Bild 9:** Spannungsverteilung entlang der Randkontur, Verzahnung DIN 5480; "+" : Zugspannungen, "-" : Druckspannungen

Wesolowski /9/ gelang durch FEM-Rechnungen an ebenen und räumlichen Modelle die Aufteilung der Zahnfußspannung in drehmomentbelasteten Verbindungen in einen Torsions- und einen Zahnbiegeanteil, wodurch u.a. neue Erkenntnisse zum Einfluß des Parameters Zähnezahl auf die Gesamtbeanspruchung erzielt wurden. Seine systematischen Untersuchungen von Zähnezahl, Profilverschiebung, Fußausrundungsradius, Verbindungsbreite, Welleninnendurchmesser und Nabenaußendurchmesser führten zu erweiterten Berechnungsgleichungen für den Tragfähigkeitsnachweis von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. Der derzeitige Normentwurf DIN 5466E /11/ basiert im wesentlichen auf seinen Berechnungsgleichungen.

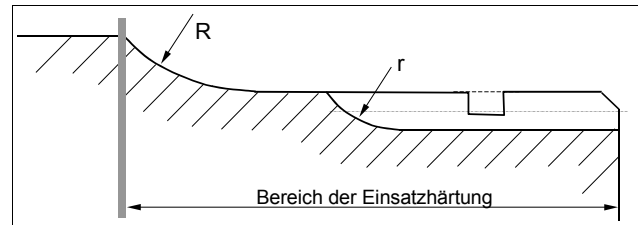
ZWV mit Presssitz werden zur Vermeidung der Axialbewegungen angewendet. Burgtorf /10/ entwickelte im Rahmen eines FVA-Vorhabens einen entsprechenden Berechnungsansatz.

#### 4 Aktuelle Arbeiten und Ausblick

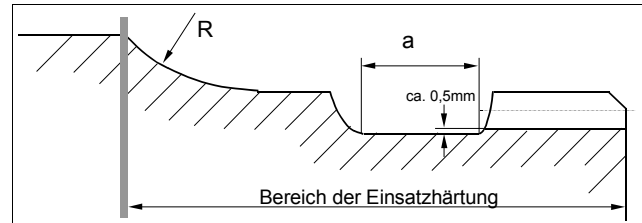
Das noch bis Mitte 2005 laufende FVA-Vorhaben 99/V beschäftigt sich mit der experimentellen Untersuchung neuartiger Schmierstoffe für ZWV.

Die für den internationalen industriellen Wettbewerb wichtige Normungsarbeit wird auf der Basis der ZWV-Erfahrungen vom IMW im ISO TC60/WG1 wahrgenommen. Als Ergebnis dieser, mit den Firmen FRENCO und GWB durchgeführten Tätigkeit liegt jetzt ein neuer Entwurf der ISO 4156 vor, der auch in Deutschland gültig werden soll.

Im gerade begonnenen FVA-Vorhaben 467 wird gemeinsam mit der TU Dresden an der Erarbeitung von Grundlagen zur dauerhaftesten Dimensionierung von ZWV unter schwingender Drehmomentbelastung gearbeitet. Besonders der Verzahnungsauslauf mit seinen verschiedenen industriell üblichen Kerbradien (**Bild 10**), wird dabei umfangreich numerisch und experimentell untersucht.



**Bild 10a:** Zahnwelle mit gebundenem Auslauf und optionaler Sicherungsringnut



**Bild 10b:** Zahnwelle mit freiem Auslauf

Da ZWV lediglich aufgrund der gleichen Werkzeuge und Verfahren wie Laufverzahnungen evolventisch hergestellt werden, die Evolvente aber kinematisch nicht zwingend ist und eine Aufgabentrennung (T, Q) sinnfällig ist, wird in einem DFG-Vorhaben an der Entwicklung einer tragfähigeren Flankenform mit der Möglichkeit einer wirtschaftlichen Fertigung durch umformende Herstellverfahren gearbeitet.

#### 5 Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen. Selbstverlag des Verfassers, Büttelborn 1978
- /2/ Huber, H.: Untersuchungen über die Zentrierkräfte flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen. Untersuchungsbericht der Fa. John Deere Werke Mannheim, 1965
- /3/ Schöpf, H.-J.: Festigkeitsuntersuchung an Zahnwellenverbindungen mit Spannungsoptik und Dauerschwingversuchen. Dissertation TU München 1976
- /4/ Villmer, F.-J.: Zum Mechanismus der Lastverteilung in Zahnwellenverbindungen. Dissertation TU Clausthal 1984
- /5/ Zapf, R.: Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebeseitz. Dissertation TU Clausthal 1986
- /6/ Kohl, G.: Ein Ansatz zur Berechnung der Zahnfußspannungen in Zahnwellenverbindungen. Dissertation TU Clausthal 1986
- /7/ Mendel, J.: Das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebeseitz. Dissertation TU Clausthal 1990
- /8/ Schäfer, G.: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebeseitz. Dissertation TU Clausthal 1995
- /9/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation TU Clausthal 1996
- /10/ Burgtorf, U.: Montage- und Betriebseigenschaften von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Dissertation TU Clausthal 1998
- /11/ DIN 5466E, Teil 1 und 2: Normentwurf "Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen", 1998