

Zur Simulation der Beanspruchung einer drehmomentbelasteten Zahnwellen-Verbindung mit Verzahnungsauslauf unter Verwendung des Finite-Elemente-Programmsystems ANSYS

Qingsong, H.

Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen wird am IMW mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente u.a. mit dem Programmsystem ANSYS und MARC/MMENTAT analysiert. Um die Simulation von Zahnwellen-Verbindungen mit Verzahnungsauslauf zu ermöglichen, wurden dreidimensionale FE-Modelle entwickelt.

Bisher gibt es nur wenig Literatur über die Beanspruchungen von Zahnwellen-Verbindungen mit Verzahnungsauslauf. Der Artikel beschreibt eine Methode zur Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen mit Zahnlückenauslauf mit dem Programmsystem ANSYS, dass am Zahnfuß oder beim Zahnlückenauslauf Spannungsspitzen auftreten können.

1 Schadensfälle an Zahnwellen-Verbindungen

Die Übertragung von Drehmomenten macht eine Verbindung von Welle und Nabe erforderlich. Die Schadensfälle an Zahnwellen-Verbindungen können allgemein in zwei Kategorien unterteilt werden:

1. Flankenverschleiß: Verschleißvorgänge auf den Zahnflanken entstehen durch Relativbewegungen im Betrieb zwischen Welle und Nabe.

2. Versagen durch Bruch: Versagen durch Bruch ist meist 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. Die Ursache für den Bruch ist häufig in der Kerbwirkung der Verzahnungsgeometrie zu suchen. Es kann zwischen statischem Gewaltbruch und dynamischer Werkstoffermüdung unterschieden werden.

2 Stand der Forschung

In der Literatur liegen bisher nur wenige Untersuchungsergebnisse zur Ermittlung der Beanspruchungen im Zahnfuß der Welle oder Nabe einer drehmomentbelasteten Zahnwellen-Verbindung vor. Ein Teil der vorliegenden Forschungen befasst sich mit Detaillösungen für Spezialfälle, wie z.B. der reinen Wellentorsion oder ebenen Wellenzahnscheiben unter gleichmäßiger Flankenlast. Die tat-

sächliche Zahnfußbeanspruchung der drehmomentbelasteten Zahnwellen-Verbindung hängt entscheidend von der Lastverteilung auf den Zahnflanken und der Zusammensetzung der Teilbeanspruchungen aus der Flankenbelastung und der Torsion ab. Tatur /1/ untersuchte die Lastverteilung über der Verbindungsbreite einer Keilwellen-Verbindung.

Untersuchungen ergaben einen über der Verbindungsbreite charakteristischen Verlauf der Spannungsüberhöhung, die Schöpf /2/ als Kerbfaktor definierte. Die Spannungen erreichten immer am Übergang der Welle in die Welle-Nabe-Verbindung einen maximalen Wert und nahmen dann zum Ende der Verbindung hin stetig ab. Bezugsspannung war hierbei die aus der Wellentorsion resultierende Schubspannung, die am imaginären Wellendurchmesser ermittelt wurde, **Bild 1**.

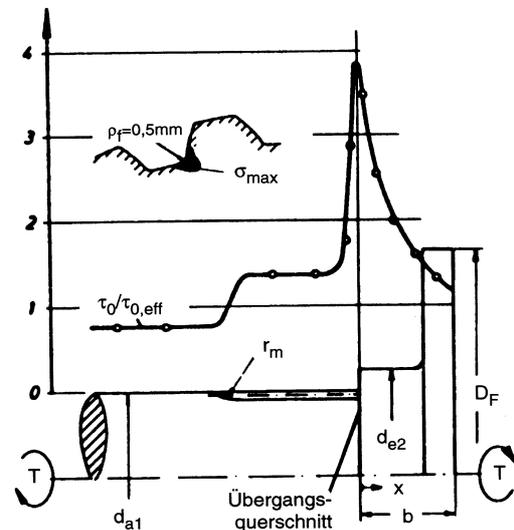


Bild 1: Charakteristischer Spannungsverlauf im Zahnfuß in Abhängigkeit von der Axialen Koordinate x von Zahnwellen-Verbindungen

Untersuchungen der dreidimensionalen Beanspruchungszustände von Zahnscheiben wurden von Wesolowski /3/ und Garzke /5/ durch theoretische Rechnungen und FEM Simulationen bestätigt. Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweise drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen wurden ebenfalls von

Wesolowski /3/ und Garzke /5/ untersucht. Bei der Berechnung der maximalen Zahnfuß-Vergleichungsspannung muss zwischen dem Bereich der ungestörten Torsion und dem Bereich unmittelbar am Verbindungsanfang unterschieden werden.

Zahnfuß-Vergleichsspannung im ungestörten Bereich, reine Torsion:

$$\sigma_{v1,u} = \sqrt{3 \cdot \tau_{tmax1}^2} \quad (2.1)$$

Zahnfuß-Vergleichsspannung am Verbindungsanfang

$$\sigma_{v1,u,a} = \sqrt{(k_{s1,z} \cdot \sigma_{s1,z})^2 + 3 \cdot (k_{t1,z} \cdot \tau_{tmax1})^2} \quad (2.2)$$

Zugseite

$$\sigma_{v1,d,a} = \sqrt{(k_{s1,d} \cdot \sigma_{s1,d})^2 + 3 \cdot (k_{t1,d} \cdot \tau_{tmax1})^2} \quad (2.3)$$

Druckseite

$$\sigma_{v1} = \text{Maximum} \{ \sigma_{v1,u}, \sigma_{v1,z,a}, \sigma_{v1,d,a} \} \quad (2.4)$$

Maximale Zahnfuß-Vergleichsspannung der Welle Beim Projekt „Einfluss des Kugelstrahlens auf die Schwingfestigkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter dynamischer Torsionsbelastung“ wurden die nachfolgend dargestellten Ergebnisse erarbeitet.

Für die Schwingversuche stehen 10 Wellen und Naben DIN 5480-27x1x1.25x20 zur Verfügung. Alle Bauteile sind aus dem Einsatzstahl 17 CrNiMo 6 (1.65879) gefertigt. Abgesehen von den makroskopisch sichtbaren Rissen konnten mittels eines Farbeindringverfahren keine weiteren Risse in allen 10 Wellen festgestellt werden, Beschädigungen der Naben waren nicht zu verzeichnen, **Tab. 1**.

ZWV-Nr.	Rißort	Bemerkung
1	Verzahnungsauslauf	Bild 2.1 (links und mittel)
2	Verzahnungsauslauf	
3	Verzahnungsauslauf	
4	Verzahnungsauslauf	
5	Verzahnungsauslauf	
6	Verzahnungsauslauf	Bild 2.1 (rechts)
7	Verzahnungsauslauf	
8	Verzahnungsauslauf	
9	Verzahnungsauslauf	
10	Verzahnungsauslauf	

Tab. 1: Auflistung der Versagensorten an den untersuchten Zahnwellen-Verbindungen

Das praktische Ergebnis zeigt die Möglichkeit, dass im Zahnlückenauslauf Spannungsspitzen auftreten, **Bild 2**.

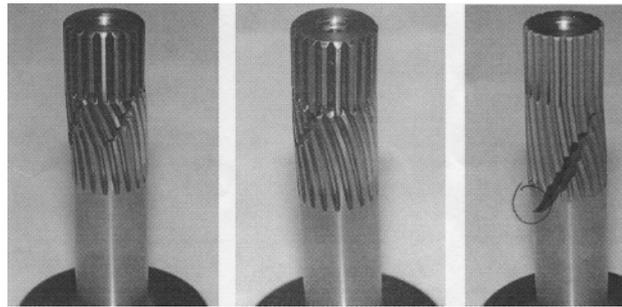


Bild 2: Versagensorte; links und mittel: Bruch der Verbindung am Verbindungsbeginn/Nabenbeginn; rechts: Bruch der Verbindung 6 im Bereich ungestörter Torsion Verzahnungsauslauf

3 FEM-Modell zur Simulation der Beanspruchungen einer drehmomentbelasteten Verbindung nach DIN 5480

3.1 Modellierung und Vernetzung

Für die drehmomentbelastete Zahnwellen-Verbindungen kann die Beanspruchung an räumlichen FEM Simulation ermittelt werden. Ein Zahnwellensektor mit zwei Zähnen nach DIN 5480-45x2x21 mit Zahnlückenauslauf wird Mit dem Programm ANSYS modelliert, **Bild 3**.

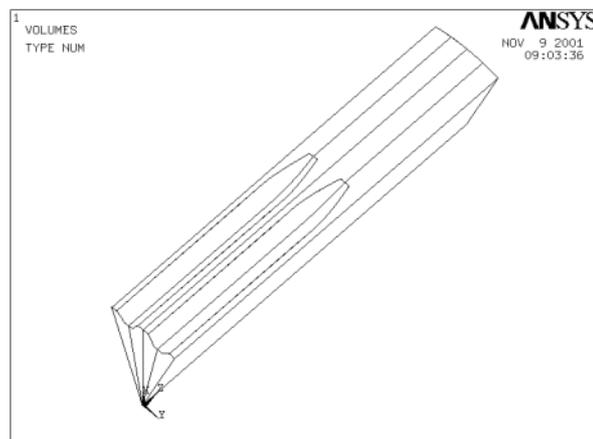


Bild 3: Dreidimensionales Modell des Zahnwellensektors mit Verzahnungsauslauf

Der Zahnwellensektor wurde mit dem Elementtyp Tet 92 vernetzt, **Bild 4**. Zahnfuß und Verzahnungsauslauf wurden dabei sehr fein vernetzt, **Bild 5**.

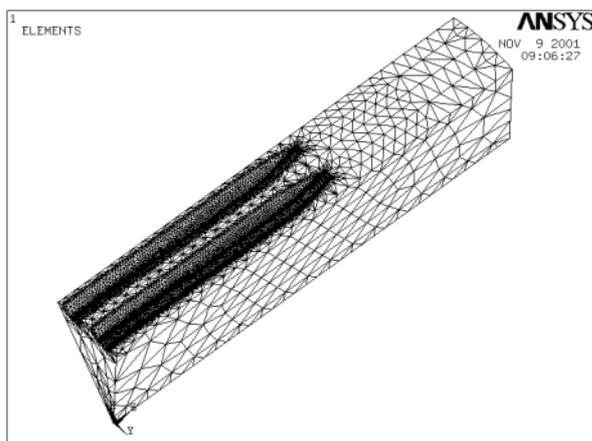


Bild 4: Die Vernetzung des Wellensektors mit dem Elementtyp Tet 92

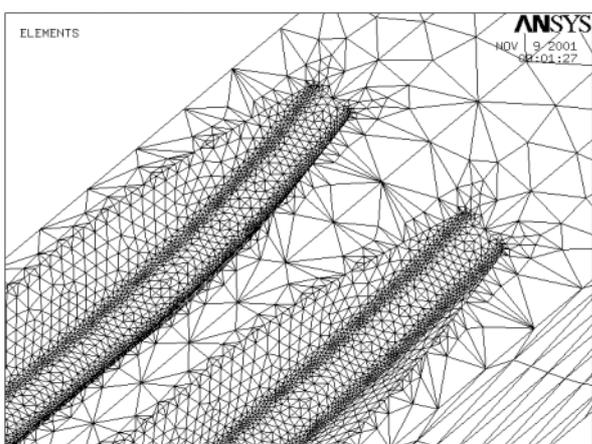


Bild 5: Vernetzung des Zahnlückenauslaufs und des Zahnfußes

3.2 Randbedingungen

In Anlehnung an die Simulationsmethode von Wesolowski /4/ wurden auch hier folgende Randbedingungen angewendet.

- Der Öffnungswinkel des Wellesektors beträgt $360^\circ/z$. Die Sektorränder fallen mit den Symmetrielinien des Zahns oder der Zahnücke zusammen.
- Punktepaare auf den Sektorrändern mit der gleichen radialen und axialen Koordinate werden in allen Freiheitsgraden gekoppelt.
- Der Abgriff der Last erfolgt bei Welleneinspannung an der Einspannebene, auf der alle Punkte in radialer und tangentialer Richtung festgelegt werden. Die Sektorränder der Einspannebene werden zusätzlich in axialer Richtung festgelegt.
- Momentenleitung durch Umfangslast.

Zur Überprüfung der angeführten Randbedingungen, entwickelte Wesolowski ein Sektormodell von Zahnwelle und Zahnnahe einer Zahnwellenverbindungen mit 6 Zähnen (Öffnungswinkel 60°) und ein Kompletmodell abgebildet mit den gleichen äußeren Belastungen, **Bild 6**. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigte eine gute Übereinstimmung und bestätigt die Gültigkeit der Randbedingungen, s.d. die Verwendung eines Sektormodells auch für die Untersuchungen am Verzahnungsauslauf zulässig ist.

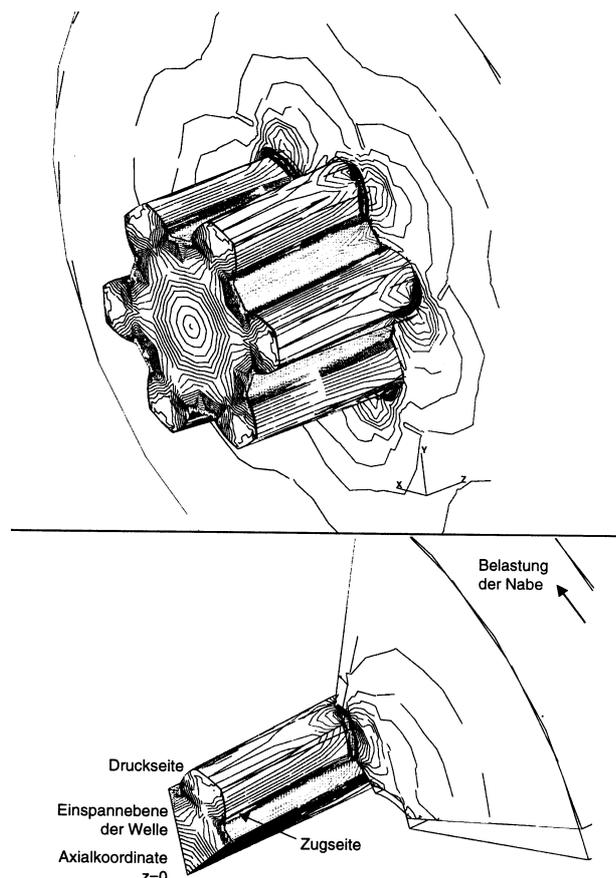


Bild 6: Vergleich des Spannungs- und Verformungsverhaltens eines vollständigen FEM-Modells und eines FEM-Sektormodells einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 15X2X30X6

3.3 Berechnungsergebnisse

Das FEM Ergebnis bestätigt, dass im Bereich des Zahnlückenauslaufs und des Zahnfußes hohe Spannungsspitzen auftreten, **Bild 7**. Es wurden 5 verschiedene Schnittebenen betrachtet, und die Vergleichsspannungen am Zahnfuß und Zahnlückenauslauf verglichen, **Tab 2**.

Ab.	10	15	20	25	30
σ (N/m ²)	60.224	61.331	62.482	63.012	64.332

Tab. 2: Zahnfußvergleichsspannung in 5 Schnittebenen mit unterschiedlichem Abstand von der freien Seite des Wellensektors

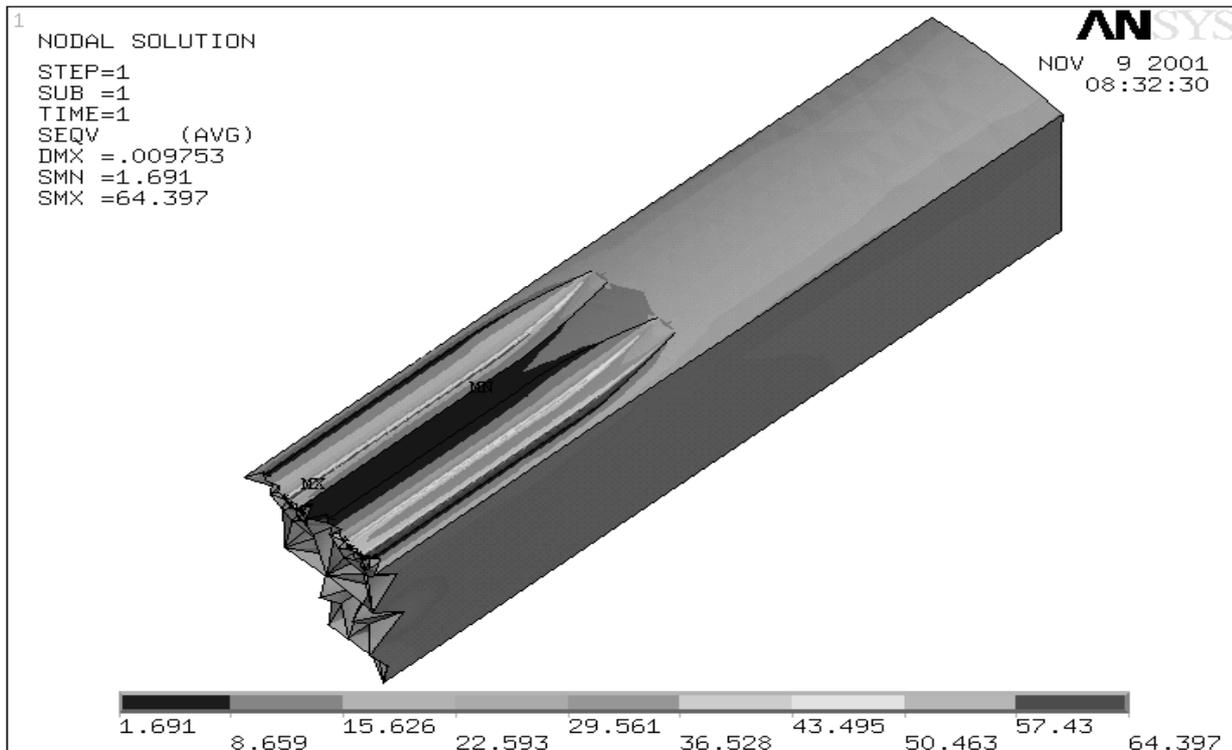


Bild 7: Verlauf der Vergleichsspannung in der Zahnwellen-Verbindung im gesamten Sektor

4 Zusammenfassung und weitere Untersuchungsaufgaben

Die in diesem Artikel angezeigten FE-Modelle bilden lediglich den Wellektor der gesamten Verbindung ab. Die Einleitung des Drehmomentes erfolgte dabei über Tangentialkräfte auf die Knoten der Zahnflanken. Das Berechnungsergebnis zeigt, dass es unter einer solchen Belastung zu größeren Vergleichsspannungen im Zahnfuß und dem Verzahnungsauslauf kommt als es mit den analytischen Berechnungsansätzen von Wesolowski und Garzke vorhergesagt werden kann. Für die folgenden Untersuchungen soll der Wellensektor mit dem Nabesektor kombiniert und mit Hilfe von Kontaktrechnungen analysiert werden. Als Lastfunktion werden dabei die von Schöpf /2/ angegebenen Verhältnisse angenommen.

Literatur

- /1/ Tatur, G.K. und Vygonnyi, A.G.: Irregularity of load distribution along a splined coupling, Russ. Eng. Jour. 49 (1969), Nr. 4, S. 23-27
- /2/ Schöpf, H.J.: Festigkeitsuntersuchungen an Zahnwellen-Verbindungen mit Spannungsoptik und Dauerschwingversuchen, Diss. TU München 1976
- /3/ Wesolowski: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweise drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung, Fortschrittberichte VDI Düsseldorf 1997
- /4/ Wesolowski: Ausnutzung von Symmetrieebenen zur Berechnung drehmomentbeanspruchter Bauteile, Mitteilungen aus dem IMW der TU Clausthal 1994
- /5/ Garzke: Einfluß des Kugelstrahlens auf die Schwingfestigkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter dynamischer Torsionsbelastung, Clausthal 1999