

Zahnwellenverbindungen – Beanspruchungs- und Verschleißverhalten

Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.

Für die Drehmomentenübertragung bei gleichzeitiger axialer Verschieblichkeit von Welle und Nabe werden häufig Zahnwellenverbindungen mit Profilen nach DIN 5480 eingesetzt, die aufgrund der im Einsatz befindlichen Vielzahl von Formelementen (Zahnpaaren) hohe Drehmomente bei geringen Nabenaußendurchmessern übertragen können. Spanende und spanlose Herstellungsverfahren erschließen insbesondere im Bereich der Herstellung in großen Stückzahlen kostengünstige Anwendungen.

Die Auslegung von Zahnwellenverbindungen hängt außer von den Betriebsbedingungen von einer Reihe geometrischer Kenngrößen und von dem Verformungsverhalten der Paarung ab. Eines der größten Probleme ist dabei die Toleranz der Verzahnungsgeometrie und die sich daraus ergebenden Folgerungen für Übertragungsfähigkeit und Betriebsverhalten. Der Grund dafür liegt in der Teilungsgesamtabweichung, die bei Zahnwellenverbindungen das wichtigste Kriterium für die Fügbarkeit und die Lastverteilung über dem Umfang ist.

1 Schäden an Zahnwellenverbindungen

Lebensdauer und Tragfähigkeit von Zahnwellenverbindungen werden durch zwei grundsätzlich verschiedene Vorgänge beeinflusst: Einerseits wird durch das verschleißbedingte Abtragen von Bereichen der Zahnflanken und die damit einhergehende Spiel- und Exzentrizitätsvergrößerung der Formschluß "aufgebraucht", andererseits führen dynamische Beanspruchungen unter dem Einfluß geometriebedingter Kerben zum Dauerbruch. Die Abhängigkeiten der Ausfälle untersuchter Verbindungen führen zu folgenden Schlüssen:

- Die Anrisse von Gewalt- und Dauerbrüchen gehen meist von einer Kerbe im Zahnfuß am Rand oder von einem Ort in unmittelbarer Nähe des Randes innerhalb der Verbindung aus /1/, **Bild 1.1**
- Das Verformungsverhalten von Welle und Nabe und insbesondere der Steifigkeitssprung am

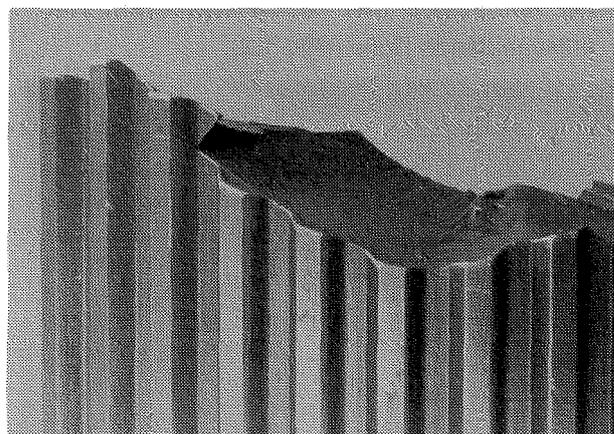


Bild 1.1 Gewaltbruch einer Zahnwellenverbindung

Verbindungsende bewirken eine ungleichförmige Beanspruchungsverteilung über der Verbindungslänge mit einer Lastüberhöhung am Verbindungsanfang /2/. Die sich dabei überlagernden Wirkungen der Belastungsspitze an der Lasteinleitungsstelle und der durch die Verzahnungsgeometrie bedingten Kerbwirkungen am Zahnfuß von Welle und Nabe bedingen einen komplizierten dreiachsigen Spannungszustand, der den Dauerbruch fördern kann /3,4/.

- Die Untersuchungen nach /1/ zeigen, daß die Lastaufteilung auf die einzelnen Zahnpaare einer Verbindung stark von Spiel und Qualität der Verbindung abhängen. Die Summenteilungsabweichungen sind demnach maßgebend für die Zahl und die Belastung der tragenden Zahnpaare, ferner für das Verformungsverhalten der Verbindung
- Die Belastungszusammensetzung aus Drehmoment und Querkraft hat einen entscheidenden Einfluß auf die Lastverteilung über dem Umfang der Verbindung und die Relativbewegungen zwischen Welle und Nabe /1/. Diese Belastungskombination prägt daher entscheidend die Lastaufteilung auf die einzelnen Zahnpaare, die Relativbewegungen bei dynamischen Belastungen und damit das Verschleißverhalten der Verbindung /5,6/.
- Zahnwellenverbindungen unter Relativbewegungen stellen tribologische Systeme dar, bei

denen alle wichtigen Verschleißmechanismen - Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und Tribooxidation - vorhanden sind /5/. Neben den Oberflächenreaktionen im Kontaktbereich spielt der Abtransport der Verschleißprodukte eine entscheidende Rolle (**Bild 1.2**).

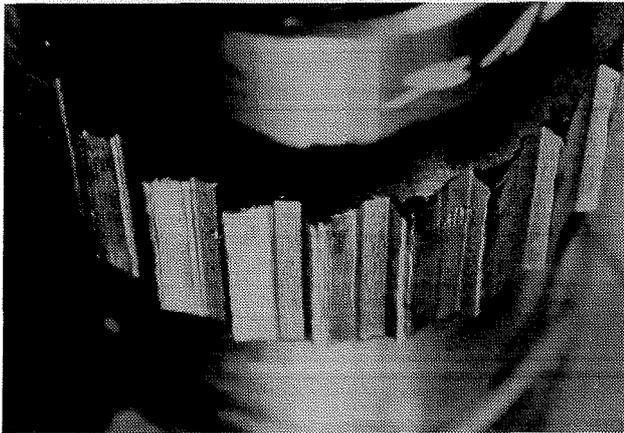


Bild 1.2 Verschleiß an einer überwiegend durch Drehmoment beanspruchten Zahnwellenverbindung

2 Betriebszustände

Unter Last treten charakteristische Betriebszustände auf, die durch das Verhältnis von Drehmoment und Querkraft gekennzeichnet sind. Huber, wiedergegeben in /1/, führt dafür als Kenngröße den ideellen Radius $R_i = T/Q$ ein. Diese Größe gibt an, an welchem Hebelarm die Querkraft Q angreifen müßte, um das Drehmoment T zu erzeugen, **Bild 2.1**.

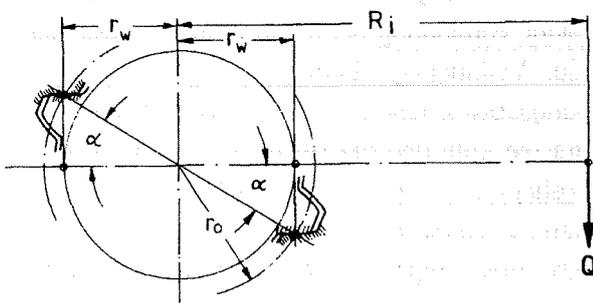


Bild 2.1 Kräftegleichgewicht an einer starren Zahnwellenverbindung, DIN 5480

Damit ergeben sich in Abhängigkeit von dem Verhältnis des ideellen Radius R_i zum Wirkradius r_w (Abstand der jeweiligen Flankenkraft zur Achse der Verbindung) unterschiedliche Betriebszustände.:

a. Reine Drehmomentbelastung: Alle Zahnflanken werden gleichmäßig und rein statisch belastet (**Bild 2.2**)

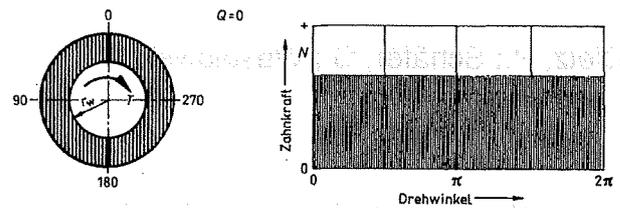


Bild 2.2 Lastaufteilung und Lastfunktion für reine Drehmomentbelastung; $R_i / r_w = \infty$

b. Überwiegende Drehmomentbelastung: Der statischen Mittellast durch das Drehmoment ist eine Wechsellast, hervorgerufen durch die Querkraft, überlagert, die Größe der Amplitude ist eine Funktion der Querkraftgröße (**Bild 2.3**).

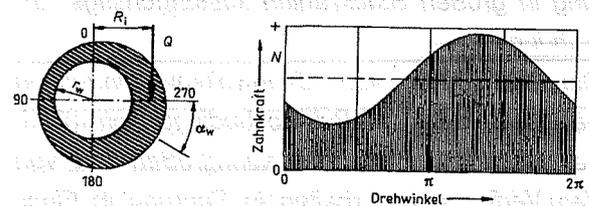


Bild 2.3 Lastaufteilung und Lastfunktion für Mischbelastung; $R_i / r_w > 1$

c. Überwiegende Querkraftbelastung: Da beim Umkippen auf die Zahnrückflanken das Spiel durchfahren werden muß, sinkt die Flankennormalkraft bereichsweise auf Null, Welle und Nabe laufen exzentrisch (**Bild 2.4**). Dieser Betriebszustand gefährdet die Verbindung durch hohe Lastwechsel und Verschleiß.

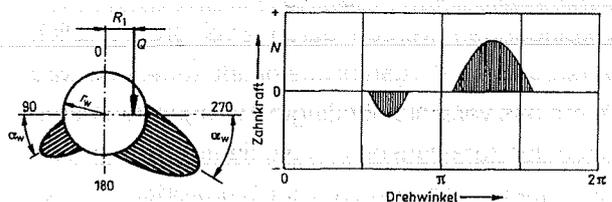


Bild 2.4 Lastaufteilung und Lastfunktion für Mischbelastung; $R_i / r_w < 1$, spielbehafet

Eine mathematische Formulierung der Last- und Verformungsverhältnisse in den einzelnen Betriebszuständen und damit eine Bestimmung der einzelnen Zahnkräfte bei Annahme von Spiel- und Fehlerfreiheit der Verzahnung ist möglich /1,2/. Für die Beurteilung des Beanspruchungs- und Verschleißverhaltens interessiert dabei besonders der Zustand, bei dem ein Rutschen der Flanken gerade

einsetzt. Geht man davon aus, daß nur die Zahnflanken in Drehmomentrichtung tragen, so ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen nach Bild 2.5 die einer aufgebrachtten Querkraft entgegenstehende Reaktionskraft:

$$R_x = \mu \cdot F_r \cdot \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \sum_{j=1}^z |\cos(\alpha_{Fj} - \alpha)| = Q$$

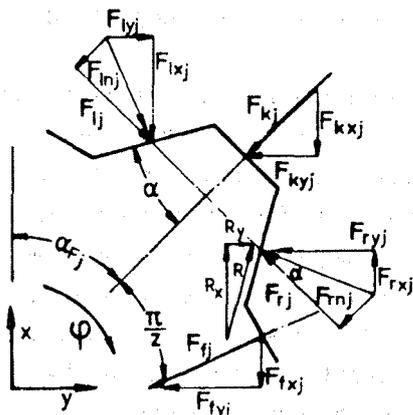


Bild 2.5 Komponenten der Zahnkräfte mit Reibung

Hieraus erhält man eine Beziehung zur Bestimmung eines Grenzwertes für den ideellen Radius $R_{i,gr\text{enz}}$, für den die Reibungskräfte eine exzentrische Auslenkung von Welle und Nabe gerade verhindern.

$$R_{i,gr} = \frac{r_w \cdot \cos \alpha}{\mu} \cdot \frac{z}{\sum_{j=1}^z \cos(\alpha_{Fj} - \alpha)}$$

Oberhalb dieses ideellen Grenzradius findet bei idealen Verzahnungen keine Bewegung zwischen Wellen- und Nabenzahnflanke mehr statt.

Unter Einsetzen der Werte für Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480 gilt überschlägig bei Zähnezahlen über $z=10$ nach /6/

$$R_{i,gr\text{enz}} = r_w \cdot \cos \alpha \cdot 1,58 / \mu$$

3 Berechnung der Flankenbelastung bei spiel- und fehlerbehafteter Verzahnung

Die oben entwickelten Zusammenhänge zur Berechnung der Zahnlasten genügen für die Beurteilung realer Zahnwellenverbindungen nicht. Da sowohl Spiel wie auch Teilungsabweichungen in der Größenordnung der sich unter Last einstellenden Zahnverformungen liegen, ist die ungleichmäßige Lastverteilung auf die einzelnen Zahnpaare im wesentlichen eine Funktion der Teilungsabwei-

chungen und des Spiels, die von den Herstellungsbedingungen bestimmt werden, /1/.

Zur praktischen Berechnung von Zahnwellenverbindungen in DIN 5466E wird ein halbempirisches Verfahren vorgeschlagen, das den Einfluß von Spiel, Verzahnungsfehlern, Betriebszustand und Lasteinleitung über der Verbindungslänge durch einfach zu handhabende Faktoren berücksichtigt. Durch die Wechselwirkung von Drehmoment- und Querkraftbelastung auf die Lastverteilung einer Verbindung muß zur Berechnung der maximalen Flankenkraft F_{max} zwischen verschiedenen Betriebszuständen unterschieden werden. Zur rechnerische Erfassung der realen Lastverteilung über dem Umfang wird ein Korrekturfaktor k_R und für den Einfluß der Lastverteilung über der Verbindungslänge der Faktor k_L eingeführt.

In Abhängigkeit des Verhältnisses $R_i = T/Q$ kann die maximale Flankennormalkraft F_{max} aus drei Betriebszuständen berechnet werden:

Betriebszustand I: $R_i / r_w < 1$: Überwiegende Querkraftbelastung

$$F_{max} = \left[\frac{T}{r_w} \cdot k_L + (1-G) \cdot \frac{Q}{f_G} \right] \cdot \frac{1}{z} \cdot k_R$$

Betriebszustand II: $R_{i,gr\text{enz}} > R_i > r_w$: Überwiegende Drehmomentbelastung, Relativbewegungen unter Reibung

$$F_{max} = \left[\frac{T}{r_w} \cdot k_L + (1-\mu) \cdot \frac{Q}{f_G} \right] \cdot \frac{1}{z} \cdot k_R$$

Betriebszustand III: $R_i > R_{i,gr\text{enz}}$: Überwiegende oder ausschließliche Drehmomentbelastung, keine Relativbewegungen

$$F_{max} = \frac{T}{r_w \cdot z} \cdot k_L \cdot k_R$$

Der Reibkraft-Aufteilungsfaktor G steht für den Anteil der Flankenreibkräfte an der Querkraftübertragung in der Verbindung. Eine Reihe von numerischen Untersuchungen über den gesamten Bereich genormter Zahnwellenverbindungen nach DIN 5480 ergibt die halbempirischen Gleichung:

$$G = 0,46 \cdot \mu \cdot (1 + 0,36 \cdot R_i / r_w)$$

$$f_G = 0,63$$

Die maximale Flankenpressung wird berechnet

mit:
$$p_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot \cos \alpha_w}{L \cdot h_w}$$

Dabei ist L die Länge der Verbindung, h_w die wirk-
same Zahnhöhe in Radialrichtung (= Differenz der
Kopfkreisradien von Welle und Nabe) und α_w der
wirksame Flankenwinkel (bei DIN 5480 $\alpha_w \approx \alpha$).

3.1 Lastaufteilung über dem Umfang der Verbindung. Berechnungsfaktor k_R

Der Einfluß der Lastaufteilung über dem Verbindungs-
umfang kann nach heutigem Kenntnisstand
durch eine Formel berücksichtigt werden, die für
alle drei Betriebszustände gültig ist /7/:

$$k_R = 1 + \left[\frac{a \cdot Q}{Q_{\text{Bez}}} \cdot \left(1 + \frac{b \cdot j_{\text{tm}}}{p} \right) \right] + \left(\frac{c \cdot F_p}{p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{d \cdot T}{T_{\text{Bez}}}} \right)$$

Die Konstanten a, b, c und d geben die Größe des
Einflusses der Querkraft (a), des Verdrehflankenspiels (b), der Teilungsgesamtabweichung (c) und
des Drehmoments (d) an. Um die Gleichung di-
mensionslos zu machen werden drei Bezugsgrö-
ßen eingeführt:

Bei der Bezugsquerkraft $Q_{\text{Bez}} = T / r_w$ sind gerade
die resultierenden Flankenbelastungen aus Quer-
kraft und Drehmoment im Gleichgewicht. Dies ent-
spricht dem Betriebszustand $R_i / r_w = 1$. Über das
Bezugsdrehmoment $T_{\text{Bez}} = E \cdot z \cdot h_w \cdot L \cdot r_w$ fließen
die elastischen Eigenschaften der Verbindung zum
Ausgleich von Verzahnungsabweichungen in die
Berechnung ein. Die Teilung p dient als Referenz
für das Verdrehflankenspiel j_{tm} und die Teilungs-
gesamtabweichung F_p .

Zur Zeit laufen umfangreiche numerische und ex-
perimentelle Untersuchungen auf statistischer Ba-
sis zur Bestimmung der Einflußfaktoren a, b, c und
 d . Die bisherigen Ergebnisse und ihre Koinzidenz
mit Erfahrungen aus Schadensfällen rechtfertigen
den Aufbau der Abschätzungsgleichung nach der
obigen Form. Verbunden mit diesen Untersuchun-
gen ist die Frage nach einer Überarbeitung des To-
leranzwerkes DIN 5480 Teil 14 bis 16 bzw. ISO 14,
das nach vorliegenden Erkenntnissen nicht den Er-
fordernissen der hier vorliegenden Steckverzäh-
nungen entspricht.

3.2 Räumliche Untersuchungen zur Flächen- pressung, Berechnungsfaktor k_L

Aufgrund des von den Verformungen in Welle und
Nabe abhängigen Lasteinleitungsvorganges in
Zahnwellenverbindungen kommt es zu einer un-
gleichmäßigen Verteilung der Flankenbelastung
über der Zahnlänge, die nach /1,2/ durch einen me-
chanischen Modellansatz abgeschätzt werden
kann:

Anhand eines federnd eingespannten, belasteten
Balkenmodells des Zahns können die Verformun-
gen der Zähne, die Verdrehungen der Wellen- und
Nabenkörper und die Flankenbelastung miteinan-
der in Beziehung gesetzt werden. Werden die Bal-
kenmodelle einer in Kontakt stehenden Zahnpaar-
ung durch eine entsprechende Kompatibilitätsbe-
dingung (Nichtdurchdringen der Zahnflanken unter
Last) verknüpft, so kann die Lösung der Differenti-
algleichungen über Iterationsverfahren mit Über-
tragungsmatrizen unter anderem den Verlauf der
Flächenpressung über der Verbindungslänge in
Abhängigkeit der Verbindungskennwerte Werk-
stoff, Modul, Länge, Nabenaußendurchmesser,
Einspannung der Nabe und Belastung angeben.
Bild 3.1 zeigt beispielsweise den auf eine mittlere
Flankenlast normierten Verlauf der Flankenbela-
stung von drei nur in der Länge unterschiedlichen
Zahnwellenverbindungen unter reiner Dreh-
momentbelastung. Beim Vergleich der Kurvenver-
läufe wird erkennbar, daß die maximale Lastüber-
höhung am Verbindungsanfang mit zunehmender
Verbindungslänge ansteigt. Kurze Verbindungen
besitzen demnach eine gleichmäßigere Lastvertei-
lung über der Verbindungslänge als lange.

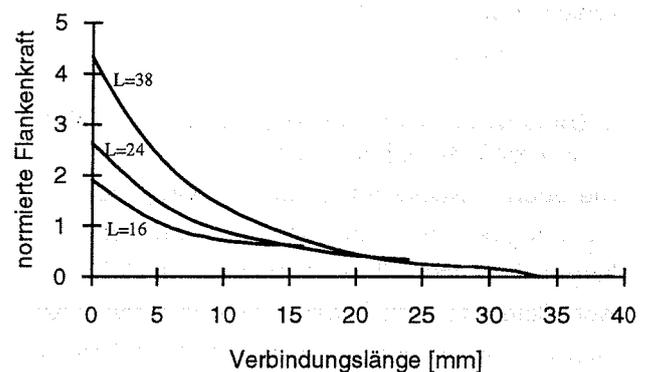


Bild 3.1 Verlauf der normierten Flankenlast über der
Verbindungslänge, Belastung durch reines
Drehmoment. DIN 5480 45x2x21

Durch eine Vielzahl von Parameterrechnungen konnten allgemeingültige Abhängigkeiten für die Lastüberhöhung am Verbindungsanfang ermittelt werden. Dabei ergibt sich ein für alle Verbindungsgeometrien charakteristischer Grenzwert des Verbindungsängen/Bezugsdurchmesserverhältnisses von $(L/d_B) = 0,5$. Bei Verbindungen länger als $L = 0,5 \cdot d_B$ kann der Maximalwert der Flankenbelastung bei konstantem Drehmoment durch eine Verlängerung der Verzahnungslänge nicht weiter gesenkt werden. Dies bedeutet bei Einhaltung einer maximalen Flankenlast als Grenzkriterium, daß eine Steigerung der Verbindungslänge über $L = 0,5 \cdot d_B$ keine Steigerung des maximal übertragbaren Drehmoments zuläßt.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse parametrischer Berechnungen /2/ führt zu einem Lastaufteilungsfaktor, mit dem die maximale Flankenpressung einer idealen Verzahnung mit gleichen Elastizitätsmoduln von Welle und Nabe unter reiner Drehmomentenbeanspruchung berechnet werden kann:

$$k_{L0,5} = 1,2 + \frac{1}{15} \cdot \left(\frac{d_B}{m}\right)$$

Der Zahlenwert $k_{L0,5}$ beschreibt die maximale Lastüberhöhung am Verbindungsanfang in Abhängigkeit von Modul m und Bezugsdurchmesser d_B für das optimale Länge/Bezugsdurchmesserverhältnis $(L/d_B) = 0,5$.

Für beliebige Verbindungslängen kann die maximale Pressungsüberhöhung am Verbindungsanfang durch den Faktor k_L bestimmt werden:

$$k_L = 2 \cdot k_{L0,5} \quad \text{für } L > 0,5 \cdot d_B$$

$$k_L = 1 + (2 \cdot k_{L0,5} - 4) \cdot \left(\frac{L}{d_B}\right) + 4 \cdot \left(\frac{L}{d_B}\right)^2 \quad \text{für } L < 0,5 \cdot d_B$$

Der Lastüberhöhungsfaktor über der Verbindungslänge gilt für Nabenaußendurchmesser d_N , die größer als der dreifache Bezugsdurchmesser sind. Die Steifigkeit einer Nabe mit $d_N = 3 \cdot d_B$ ist nach /2/ im Vergleich zur Wellen- und Zahnsteifigkeit so groß, daß eine Variation der Nabeneinspannstelle oder eine Vergrößerung des Nabenaußendurchmessers keine Auswirkungen auf den Längenfaktor k_L zeigen. Für dünnwandige Naben, deren technische Grenze bei $d_N \approx 1,2 \cdot d_B$ liegt, kann der Faktor k_L je nach Einspannstelle und Verbindungslänge im

Extremfall um bis zu 25% zu große Werte liefern.

4 Ermittlung der Zahnfußspannungen

Die maximale Zahnfußspannung einer drehmomentbelasteten Zahnwellenverbindung entsteht aus der Überlagerung von Torsions- und ebener Zahnfußspannung, die durch den Steifigkeitsprung am Verbindungsrand zusätzlich erhöht wird. Überlegungen zur maximalen Beanspruchung infolge Torsion außerhalb des Verbindungsbereichs sind in /1/ aufgeführt. Im folgenden werden die Ergebnisse von Untersuchungen zur Darstellung des Anteils einer "ebenen Zahnfußspannung" (dünne Zahnscheibe) nach /3/ dargestellt. Derzeit laufende Untersuchungen zur Überlagerung der Spannungsanteile zu einem dreidimensionalen Spannungszustand und seiner Beurteilung durch Dauerversuche /4/ sind noch nicht abgeschlossen.

Die Belastung der Zähne durch die Flankenpressung führt im Gegensatz zur Laufverzahnung, bei der die Last über einen Linienkontakt auf der Zahnflanke eingeleitet wird, zu einer Belastung über eine Fläche, die durch die Zahnkopfkreise von Welle und Nabe begrenzt wird. Die Pressungsverteilung über der Zahnhöhe wird durch einen von der Profilverschiebung abhängigen, parabolischen Verlauf gekennzeichnet, Bild 4.1.

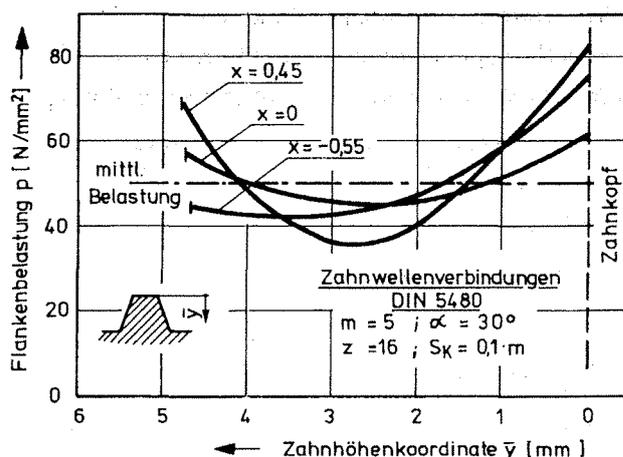


Bild 4.1 Abhängigkeit der Lastverteilung über der Zahnhöhe von der Profilverschiebung

Dieses Tragverhalten der idealen, fehlerfreien Verzahnung wird mit "Normalträger" bezeichnet. Daneben kann es bei realen Verzahnungen durch Flankenformfehler zu einer Verschiebung der Bela-

stungsverteilung über der Zahnhöhe kommen, die z.B. mit "Kopfträger" oder "Fußträger" bezeichnet werden.

Zur Ermittlung der Spannungsüberhöhung im Zahnfuß unter Berücksichtigung des Tragverhaltens wurden mit der Methode der Finiten Elemente und der ebenen Spannungsoptik Scheibenmodelle von Zahnwellen untersucht. Unabhängig von Tragverhalten und Profilverschiebung ergeben sich auf der belasteten Zahnseite im Zahnfußbereich Zug-, auf der entlasteten Druckspannungen. **Bild 4.2** zeigt die Spannungsverteilung im Wellenzahn eines Normalträgers nach Hauptspannungen getrennt – deutlich wird die Kerbwirkung im Bereich der Fußausrundung.

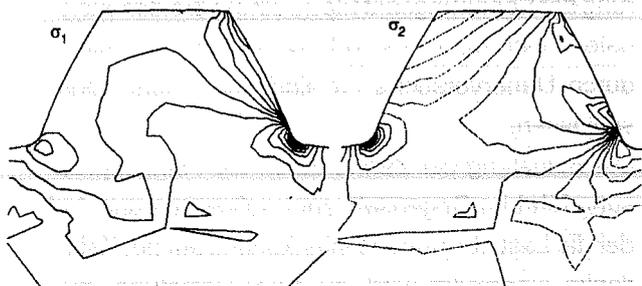


Bild 4.2 Verlauf der Hauptspannungen im Wellenzahn eines Normalträgers, DIN 5480 45x2x21

Den Einfluß der Tragverhaltens auf die Spannungen im Wellenzahn zeigt **Bild 4.3**, in dem der qualitative Spannungsverlauf entlang der Zahn-Randkontur für Kopf-, Normal- und Fußträger dargestellt wird. Der Maximalwert der Spannungsüberhöhung

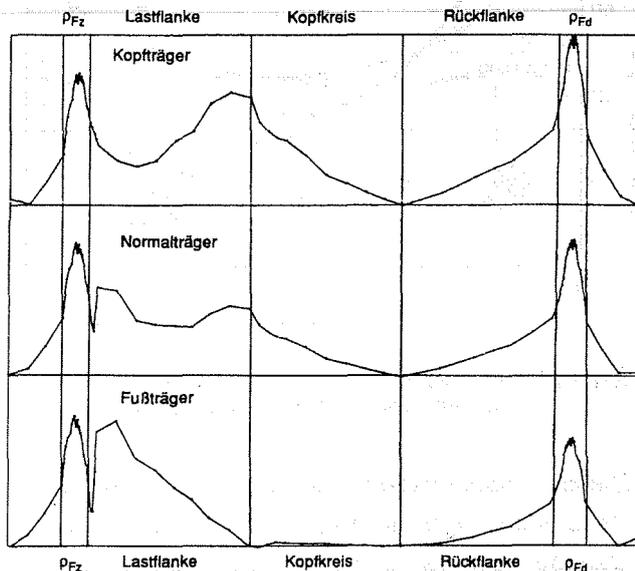


Bild 4.3 Vergleichsspannung (nach v. Mises) entlang der Randkontur in Abhängigkeit der Tragart

im Zahnfußbereich ist auf der belasteten Flankenseite (ρ_{Fz}) praktisch unabhängig vom Tragverhalten. In der Zahnfußausrundung auf der lastfreien Flankenseite (ρ_{Dz}) steigt die Spannung mit zunehmendem Angriffsradius der resultierenden Flankenkraft.

Eine Zusammenfassung der rechnerischen und experimentellen Ergebnisse führt zu einem ingenieurmäßigen Ansatz zur Berechnung der maximalen Zahnfußspannung σ_F einer dünnen Scheibe in Abhängigkeit des Verhältnisses Zahnfußausrundungsradius zu Modul (ρ/m), **Bild 4.4**.

$$\sigma_F = \alpha_F \cdot Y_F \cdot p_{max}$$

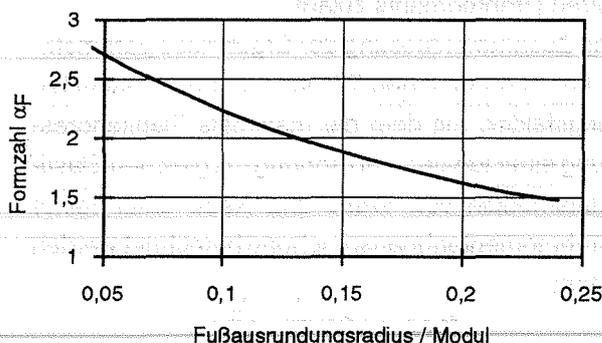


Bild 4.4 Formzahl α_F in Abhängigkeit von (ρ/m)

Der Zahnfußfaktor $Y_F = 1,0 \dots 1,2$ berücksichtigt den Einfluß des Tragverhaltens und der Zahnseite (Bild 4.3). Bei dieser Berechnungsart wird der Einfluß der Lastverteilung über dem Umfang k_R und der Verbindungslänge k_L überbewertet, da die Spannungsspitze im Zahnfußbereich, die durch den Pressungspeak auf der Zahnflanke entsteht, aufgrund der "mitragenden Zahnbreiten" links und rechts des Peaks abgeschwächt wird. Der durch die Überlagerung der Torsionskomponente sich einstellende dreidimensionale Spannungszustand am Rand der Verbindung wird zur Zeit untersucht /4/.

5 Verschleißverhalten von Zahnwellenverbindungen

Die meisten Schadensfälle an flankenzentrierten Zahnwellenverbindungen sind auf Verschleiß zurückzuführen. Aufgrund der in Abschnitt 1 bis 3 dargestellten Zusammenhänge zu den Betriebszuständen und Lastaufteilungen wird klar, daß ein

kompliziertes Tribosystem vorliegt, das von den Belastungen und konstruktiven Gegebenheiten ebenso abhängt wie von den Eigenschaften der in Kontakt befindlichen Oberflächen und den Schmierbedingungen. Dabei erfolgt der Verschleiß in Abhängigkeit von der Reibdauer prinzipiell in drei Stadien gemäß **Bild 5.1** (Kurve B): Einem zeitlich verschwindend kleinen Einlaufprozeß ("Einläppen") folgt ein Stadium mit annähernd konstanter Verschleißrate. Die dritte Phase mit stark zerstörender Wirkung ist durch Oberflächenzerrüttung infolge Ermüdung gekennzeichnet. Verschleißversuche in Verspannungsprüfständen, in denen durch die Aufgabe von Querkräften in die Verbindung die unterschiedlichen Betriebszustände verwirklicht werden konnten, ergaben, daß nicht immer alle drei Phasen durchlaufen werden (Kurven A und C in Bild 5.1).

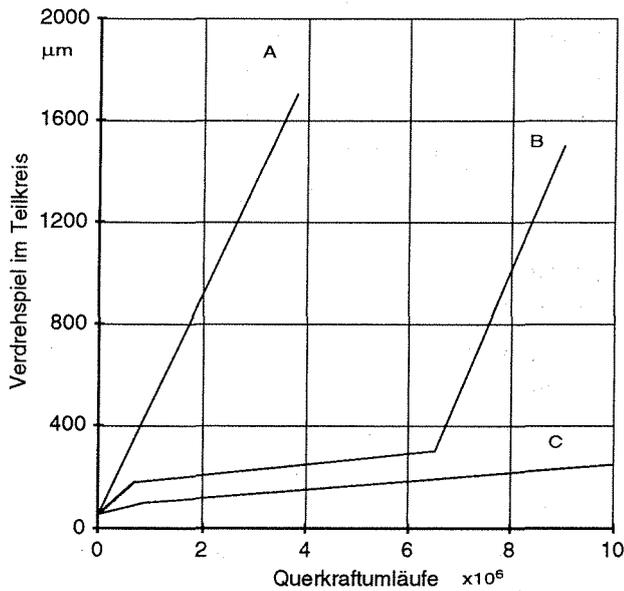


Bild 5.1 Prinzipieller Verschleißverlauf

Die durchgeführten Verschleißversuche zeigen eindeutig, daß neben den üblichen tribologischen Parametern die Art des Betriebszustandes eine überragende Rolle spielt (**Bild 5.2**). Verbindungen mit überwiegender Querkraft ($R_i/r_w < 1$) laufen mit größeren spezifischen Flankenbeanspruchungen und Verschleißwegen und sind daher wesentlich gefährdeter als Verbindungen mit überwiegender Drehmomentbelastung. Nur Verbindungen mit $R_i > R_{i,grenz}$ erreichten bei den Versuchen die Endverschleißphase nicht.

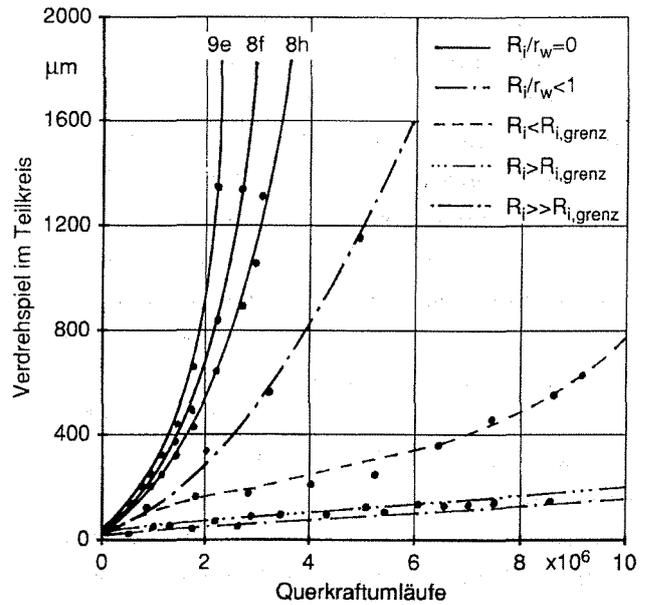


Bild 5.2 Verschleißverhalten bei unterschiedlichen Betriebszuständen und Verzahnungsqualitäten. Verbindung DIN 5480 50x2x24 8f/9H, gleiche rechnerische Flankenbelastung

Bild 5.2 macht auch deutlich, daß gegenüber dem Betriebszustand die Verzahnungsqualität eine untergeordnete Rolle spielt (Variation bei $R_i/r_w = 0$). Bei etwa gleichen Verzahnungsspielen bewirkt der Einlaufverschleiß offensichtlich einen Ausgleich der Teilungsfehler.

Der Einfluß unterschiedlicher Schmierung ist in **Bild 5.3** zu erkennen: Fettschmierung hat grundsätzlich keine positive Wirkung, wenn sie als Lebensdauerschmierung angelegt ist. Im Bereich mittlerer Drehmomente bewirkt sie sogar eine Ver-

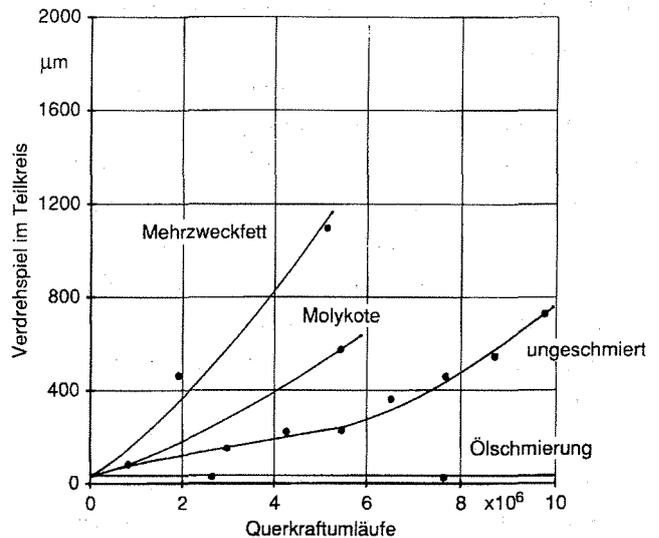


Bild 5.3 Verschleißverhalten von Verbindungen mit unterschiedlicher Schmierung. Verbindungen DIN 5480 50x2x24 und 45x2x21, $R_i=100$, gleiche rechnerische Flankenbelastung

kürzung der Lebensdauer, weil der Schmierstoff die Verschleißpartikel festhält und somit zu einer Schmirgelwirkung führt. Durch häufiges Nachschmieren läßt sich die Lebensdauer verbessern. Auch die Schmierung mit MoS₂-Fetten ergab gegenüber der ungeschmierten Verbindung schlechtere Ergebnisse, Festschmierstoffe sowie Spezialfette scheinen nach neueren Untersuchungen positiver zu wirken. Beträchtliche Verbesserungen können nur durch Schmierung mit Öl bewirkt werden, wobei neben den tribologischen Eigenschaften das Ausspülen der Verschleißprodukte eine wesentliche Rolle spielt.

Das Austragen der Verschleißpartikel aus dem Verbindungsbereich ist auch deshalb besonders wichtig, weil diese sich in der Verbindung "zusammenklumpen" und damit örtlich begrenzte Lastüberhöhungen bewirken, die wiederum der Ausgangspunkt von Dauerbrüchen sein können. Bild 1.2 zeigt eine solche Ansammlung kaltverschweißter Verschleißpartikel.

Gehärtete Verbindungen bewirken bei großen Querkräften und bei Axialbewegungen eine Verbesserung des Verschleißverhaltens. Aufgrund des Härteverzuges wirken sie sich aber ungünstig auf die Lastaufteilung aus, sie sollten daher nachbearbeitet werden. Tritt Verschleiß ein, so bewirkt die Oberflächenhärtung eine Beschleunigung der Endverschleißphase.

6 Zusammenfassung und Konstruktionsregeln

Festigkeits- und Verschleißuntersuchungen an Zahnwellenverbindungen haben gezeigt, daß eine Reihe konstruktions-, fertigungs- und betriebsbedingter Einflüsse das Verhalten dieser Verbindungen entscheidend bestimmen. Hieraus werden Ansätze für eine Berechnungsnorm DIN 5466 abgeleitet, daneben können einige grundlegende Zusammenhänge als Konstruktionsregeln aufbereitet werden:

- Für das Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Verbindungen spielt die wirkende Querkraft eine maßgebliche Rolle. Bei überwiegender Querkraftbelastung läuft die Verbindung exzentrisch, die äußere Belastung verteilt sich auf wenige Flankenpaare mit entsprechend

hoher Belastung, die größeren Reibwege rufen verstärkten Verschleiß hervor. Bei Lastfällen mit überwiegender Querkraft ist daher eine Gestaltung der Verbindung zu empfehlen, bei der die Querkraft durch andere Funktionsflächen aufgenommen wird (z.B. durchmesserzentrierte Verbindungen).

- Die Wahl der Qualität ist infolge des "Einlappvorgangs" von untergeordneter Bedeutung. Die Passung sollte so eng gewählt werden, daß die Montage noch ungehindert möglich ist – der Anfangsverschleiß bewirkt eine Spielzunahme.
- Aufgrund des Lasteinleitungsvorgangs ergibt sich eine über der Länge der Verbindung ungleichmäßige Belastungsverteilung der Zahnflanken. Bei reiner Drehmomentübertragung stellt eine Verbindung mit dem Verhältnis Länge/Verbindungsdurchmesser (L/d_B) = 0,5 eine optimale Gestaltung dar, eine Verlängerung bewirkt keine Tragfähigkeitssteigerung.
- Die Schmierung der Verbindungen muß dem Tribosystem entsprechen. Fettschmierung ist wegen der verstopfenden Wirkung ohne hinreichende Schmierfristen nicht zu empfehlen.

Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen. Büttelborn, Juli 1978, Selbstverlag des Verfassers.
- /2/ Villmer, F. J.: Zum Mechanismus der Lastverteilung in Zahnwellenverbindungen. Dissertation TU Clausthal 1984.
- /3/ Kohl, G.: Ein Ansatz zur Berechnung der Zahnfußspannungen an Zahnwellenverbindungen, Dissertation TU Clausthal 1986
- /4/ Dietz, P.; Wesolowski, K.: DFG-Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben Zahnwellenfestigkeit, Di 289 /9-1, TU Clausthal 1993
- /5/ Zapf, R.: Betriebs- und Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz. Dissertation TU Clausthal 1986
- /6/ Mendel, J.: Das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen mit Schiebesitz. Dissertation TU Clausthal, 1990
- /7/ Dietz, P.; Schäfer, G.: FVA-Forschungsreport. 19./20. November, Bad Soden, 1992