

Tabellenkalkulationsprogramm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen

Burgtorf, U.

Zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen wurde ein Tabellenkalkulationsprogramm erstellt, das auf DIN 5466E "Tragfähigkeitsberechnungen von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen" basiert. Zur Weiterentwicklung der Norm - insbesondere des geometriespezifischen zweiten Teils für Verzahnungen nach DIN 5480 - werden die Ergebnisse aus dem DFG-Vorhaben Zahnwellenfestigkeit verwendet und in die Berechnung eingearbeitet, so daß die Tabellenkalkulation jeweils den aktuellsten Erkenntnisstand widerspiegelt. Der Artikel gibt einen Überblick über den Programmaufbau und die Berechnungsmöglichkeiten.

A spreadsheet program is developed for calculating the load capacities of involute splines. The calculation method conforms to the german standard DIN 5466E "Splined joints: calculation of load capacity". Results of the ongoing research to develop the second part of this standard, that will set geometric specifications for involute splines according to DIN 5480, will be built into the program, ensuring that the calculation methods continue to meet this developing and advancing standard. This article describes the program structure and its areas of application.

1 Berechnung von Zahnwellen-Verbindungen

Ein Forschungsschwerpunkt am Institut für Maschinenwesen ist die Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen /1-6/. Im Rahmen der Mitarbeit im DIN-Arbeitsausschuß AA 2.7 "Berechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen" wird an der Weiterentwicklung der DIN 5466E "Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen" /9/ gearbeitet. In Teil 1 der Norm, der inzwischen den Status eines Gelbdrucks erreicht hat, sind die grundlegenden, geometrieunabhängigen Berechnungsgleichungen beschrieben. Der zweite Teil enthält die geometriespezifischen Kenngrößen für Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken nach DIN 5480 /10/. Dieser Teil befindet sich in der Entwicklung, da noch nicht alle

Kenngrößen abschließend ermittelt worden sind. Die aus dem DFG-Forschungsvorhaben Di 289 /9-2 "Zahnwellenfestigkeit" resultierenden Ergebnisse werden jeweils aktuell in den zweiten Normteil eingearbeitet.

Der erste Teil von DIN 5466E ist auch für Zahnwellen-Verbindungen mit einer von DIN 5480 abweichenden Zahnform verwendbar. Die zur Berechnung erforderlichen Kenngrößen können jedoch nicht mit Hilfe des zweiten Teils bestimmt werden, da dieser ausschließlich für Verzahnungen nach DIN 5480 gültig ist. Die Kennwerte müssen auf eine andere Art (z.B. mit der Finiten-Elemente-Methode) bestimmt werden.

2 Berechnungsprogramm

Anhand DIN 5466E wurde ein Tabellenkalkulationsprogramm auf Basis von Microsoft EXCEL[®], Version 5.0 erstellt. Die Verwendung dieser weit verbreiteten Programmplattform ermöglicht nahezu jedem PC-Benutzer den Zugang zu diesem Berechnungsprogramm. Aktuelle Erkenntnisse bezüglich der geometriespezifischen Werte werden jeweils eingearbeitet, die Tabellenkalkulation ist somit immer auf dem neuesten Stand der Forschung. Erfahrungswerte aus dem industriellen Einsatz haben gezeigt, daß die berechneten Geometrie Kenngrößen eine sichere Auslegung der Zahnwellen-Verbindungen ermöglichen. Im Zuge weiterer Untersuchungen erfolgt eine Überarbeitung der Kennwerte, so daß eine noch größere Ausnutzung der Verbindungen möglich sein wird.

Obwohl der nur für Verzahnungen nach DIN 5480 gültige zweite Normenteil implementiert wurde, ist die Verwendung des Programms auch für abweichende Zahnformen möglich. Dies läßt sich durch eine Überarbeitung des geometriespezifischen Programmteils oder aber auch durch die manuelle Eingabe anderweitig bestimmter Geometrie Kenngrößen erreichen. Aufgrund der Komplexität des Berechnungsvorgangs und der zu verwendenden Verzahnungsparameter ist die Kenntnis der DIN 5466E zur Anwendung des Pro-

gramms unbedingt erforderlich. Die Berechnungsmöglichkeiten und die Handhabung des Programms werden im folgenden dargestellt.

2.1 Programmaufbau

Das Berechnungsprogramm kann grundsätzlich in drei Blöcke unterteilt werden:

Block 1:

Eingabe der Verzahnungsgeometrie, der Belastungen, der Zentrierart und der Verbindungsform

Block 2:

Berechnung der erforderlichen Kenngrößen und der Beanspruchungen

Block 3:

Ausgabeteil der Beanspruchungen aus Drehmoment, Biegemoment, Querkraft, Fliehkraft ...

Eine abgewandelte Programmversion enthält als vierten Block einen Berechnungs- und Ausgabeteil für Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Die Untersuchungen zur Entwicklung dieses Berechnungsabschnittes werden durch das Forschungsvorhaben Nr. 250 "Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz" /6/ der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) gefördert, daher ist dieser Programmteil nur für FVA-Mitgliedsfirmen verfügbar.

Das Programmlayout weist 6 Spalten mit folgendem Inhalt auf (Zeilen mit Überschriften oder Schaltfeldern ausgenommen):

Spalte 1:

Bezeichnung der jeweiligen Variablen

Spalte 2:

für diese Variable verwendetes Kurzzeichen

Spalte 3:

Gleichheitszeichen

Spalte 4:

Zahlenwert oder logischer Wert der jeweiligen Variablen

Spalte 5:

Leerspalte als Abstandhalter

Spalte 6:

Einheit der Variablen

In dem Programm werden einige besonders gekennzeichnete Felder eingesetzt. Dies sind zum einen die in Spalte 4 grundsätzlich grau hinterlegten Eingabefelder. Die Eingabe der Zahlenwerte bzw. der Buch-

staben bei Toleranzen erfolgt von oben nach unten, mit Hilfe der Tabulatortaste kann direkt zum nächsten Eingabefeld gesprungen werden. Einige Eingabefeldern enthalten bereits einen Vorschlag, der übernommen oder überschrieben werden kann. In den restlichen Eingabefeldern steht in der Regel das Variablenkurzzeichen, das durch einen Zahlenwert der entsprechenden, in Spalte 6 angegebenen Einheit ersetzt werden muß.

Zum anderen handelt es sich bei den in Spalte 2 und 4 umrandeten Feldern um Schaltflächen. Mit diesen Feldern ist eine Auswahl (z.B. ja, nein, wälzgefräst, wälzgestoßen usw.) auf die entsprechende Fragestellung aus Spalte 1 möglich. Durch Anklicken der Schaltfelder mit der Maustaste wird ein Makroprogramm aufgerufen, das eine zu dieser Antwort gehörende Zuordnung durchführt. Die gewählte Antwort bzw. die Voreinstellung wird einer darauffolgenden Zeile mit "derzeitige Einstellung" angegeben.

Zur Information werden beim Ausdruck der Programmblätter Dateiname, Datum und Seitenzahlen als Fußnoten angegeben.

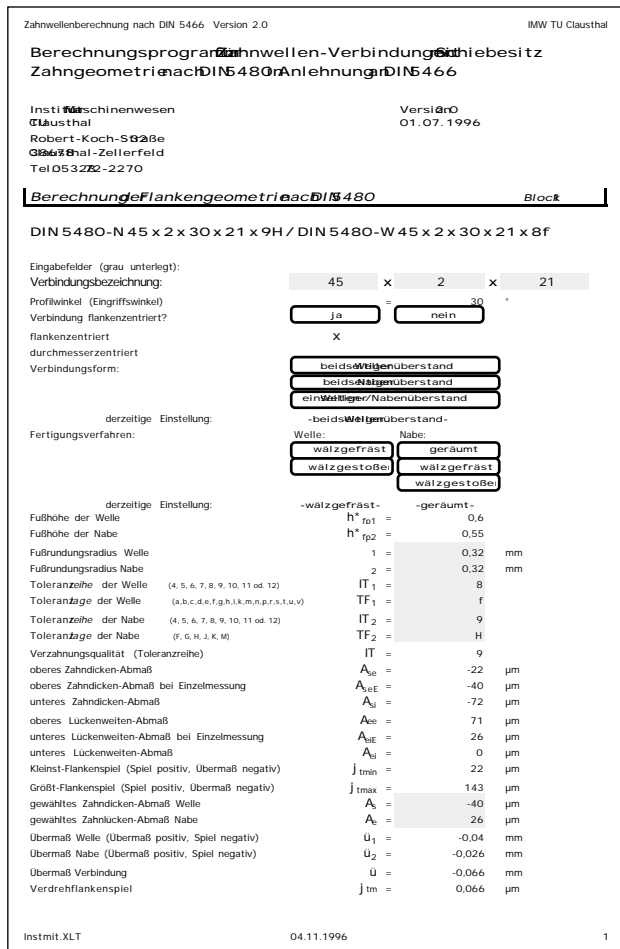


Bild 1: Darstellung eines Ausschnittes aus dem Eingabebereich des Programms

In **Bild 1** und **Bild 2** sind Ausschnitte aus dem Programm am Beispiel einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 - 45 x 2 x 30 x 21 9H 8f dargestellt. In Bild 1 handelt es sich um den Beginn des Eingabebereiches und in Bild 2 um den Beginn des Ausgabebereiches.

Zahnwellenberechnung nach DIN 5466 Version 2.0		IMW TU Clausthal	
Zahnwellenberechnung nach DIN 5466		Block 2	
DIN 5480-N 45 x 2 x 30 x 21 x 9H / DIN 5480-W 45 x 2 x 30 x 21 x 8f			
Geometrie			
Bezugsdurchmesser	$d_b =$	45	mm
Modul	$m =$	2	mm
Zahnezahl	$z =$	21	
Zahnfußausrundung	$r =$	0,32	mm
Verhältnis Zahnfußausrundung/Modul	$r/m =$	0,16	
Welleninnendurchmesser	$d_{i1} =$	0	mm
Nabenaußendurchmesser	$d_{e2} =$	67,5	mm
Gemeinsame Zahnbreite	$b =$	27	mm
Verzahnungsqualität	$IT =$	9	
Verdrehtflankenspiel	$j_{tm} =$	0,066	mm
Spannungskorrekturfaktor Zugseite	$Y_{1,z} =$	1	
Zahnfußfaktor	$Y_{1,d} =$	1	
Teilungsgesamtabweichung (plastisch)	$F_{\sigma,pl} =$	35,25	μm
Zentrierungsart (Flanke/Durchmesser)			Flanke
Betriebszustand			III
Umfangsfaktor (plastisch)	$k_{\sigma,pl} =$	10,50	
Breitenfaktor (plastisch)	$k_{b,pl} =$	2,83	
Werkstoff			
Werkstoff Welle			
Werkstoff Nabe			
E-Modul Welle	$E_1 =$	210	kN/mm ²
E-Modul Nabe	$E_2 =$	210	kN/mm ²
Ersatz-E-Modul	$E =$	210	kN/mm ²
Reibungskoeffizient	$\mu =$	0,15	
Belastung			
Querkraft	$Q =$	0,01	N
Axialkraft	$F_{ax} =$	0	N
Drehmoment	$T =$	100	Nm
Drehzahl	$n =$	1000	min ⁻¹
Biegemoment am Verbindungsbeginn Welle	$M_{b1,a} =$	0	Nm
Biegemoment im ungestörten Bereich Welle	$M_{b1,u} =$	0	Nm
Biegemoment am Verbindungsende Nabe	$M_{b2,e} =$	0	Nm
Axialkraft zum Verschieben unter Last	$F_{j,ax} =$	824,79	N
Vergleichsspannung Welle			
Zugseite (Verbindungsbeginn)	$v_{1,z,a} =$	80,95	N/mm ²
Druckseite (Verbindungsbeginn)	$v_{1,d,a} =$	67,62	N/mm ²
ungestörter Bereich	$v_{1,u} =$	23,13	N/mm ²
Zulässige Vergleichsspannung Welle	$v_{1,zul} =$		N/mm ²
Vergleichsspannung Nabe			
Verbindungsbeginn	$v_{2,a} =$	260,50	N/mm ²
Verbindungsende	$v_{2,e} =$	0,00	N/mm ²
Zulässige Vergleichsspannung Nabe	$v_{2,zul} =$		N/mm ²

Bild 2: Darstellung eines Ausschnittes aus dem Ausgabebereich des Programms

2.2 Block 1: Eingabe der Verzahnungsgeometrie und der Belastungen

Außer den Angaben zur Verzahnungsgeometrie, den Toleranzen und Belastungen wird in diesem Bereich die Zentrierart festgelegt (Bild 1). Die Zentrierung beeinflusst die möglichen Betriebszustände und die Lastüberhöhung infolge von Teilungsabweichungen. Mit der Auswahl der Verbindungsform werden die Auswirkungen des Verzahnungsüberstandes auf die Zahnfußbeanspruchungen der Verbindungen berücksichtigt. Je nach Verbindungsform erfolgt die Auswahl verschiedener Berechnungsgleichungen und -faktoren. Durch weitere Schaltfelder ist das Fertigungsverfahren auswählbar mit Auswirkungen auf die Durchmesser der Fußkreise von Welle und Nabe.

2.3 Block 2: Berechnung der erforderlichen Kenngrößen und Beanspruchungen

Aus den eingegebenen Daten werden im zweiten Programmblock die Betriebszustände, die maximalen Belastungen, die geometriespezifischen Kenngrößen, die einzelnen Beanspruchungskomponenten und die resultierenden Beanspruchungen berechnet. Die Reihenfolge der Berechnung und die Einteilung der Abschnitte entspricht der DIN 5466E, Teil 1. In diesem Block gibt es keine Eingabe- oder Schaltfelder, da alle Größen nach DIN 5466E, Teil 2 automatisch berechnet werden können.

2.4 Block 3: Ausgabebereich

Alle wichtigen Berechnungsdaten werden in diesem Bereich geordnet nach charakteristischen Geometrie- und Passungsgrößen der Zahnwellen-Verbindung, nach Werkstoff, Belastung und Beanspruchung ausgegeben (Bild 2). In den Datenblöcken Werkstoff und Beanspruchungen sind zu Kontroll- und Protokollierungszwecken Eingabefelder für die Bezeichnung der Werkstoffe und der zulässigen Beanspruchungen vorgesehen. Diese Eingaben sind optional und haben keinen Einfluß auf die Berechnungsergebnisse.

3 Hinweise zu Forschungsergebnisse am IMW

Die am IMW zum Thema Zahnwellen-Verbindungen durchgeführten Forschungsvorhaben haben bisher zu zahlreichen Erfahrungswerten bzw. Konstruktions- oder Auslegungsregeln geführt, die sich nicht mit einer formelmäßigen Beschreibung nachvollziehen lassen. Daher folgen einige Hinweise zu einzelnen Auswahl- bzw. Berechnungskriterien.

3.1 Qualität und Passung

Die Qualität der Wellen- (Außenverzahnung) und der Nabenverzahnung (Innenverzahnung) wird nach der für Laufverzahnungen aufgestellten Norm 3962 "Toleranzen für Stirnradverzahnungen" /8/ ermittelt, die eine tabellarische bzw. rechnerische Beziehung zwischen der Qualität und der Teilungs-Gesamtabweichung F_p angibt. Welle und Nabe weisen im allgemeinen unterschiedliche Verzahnungsqualitäten auf. Bei der Passung von Welle und Nabe überlagern sich die Verzahnungsabweichungen /1,3/, in erster Näherung

ist die Qualität des schlechteren Partners maßgebend zur Ermittlung der resultierenden Teilungs-Gesamtabweichung der Zahnwellen-Verbindung.

Aus fertigungstechnischen Gründen läßt sich eine Exzentrizität zwischen Wellenachse und Außenverzahnungsachse bzw. Naben- und Innenverzahnungsachse nicht vermeiden. Bei der Vermessung von Zahnwellen-Verbindungen wird in der Regel der Ursprung auf die Achse einer zylindrischen Fläche des Wellen- bzw. Nabenkörpers gelegt. Die gemessene Teilungs-Gesamtabweichung der Zahnwelle bzw. Zahnnahe ist abhängig von diesem Koordinatenursprung, so daß die gemessenen Werte die Exzentrizität e zwischen Verzahnungsachse und Wellen- bzw. Nabenachse beinhalten.

Mittels Fourier-Transformation kann die erste harmonische Schwingung der Einzelabweichungen (Einfluß der Exzentrizität) unterdrückt und die exzenterkorrigierte Teilungs-Gesamtabweichung F_p - e ermittelt werden. Dieser exzenterkorrigierte Wert entspricht der auf die Verzahnungsachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung. Die Verzahnungsqualität, die aus der exzenterkorrigierten Teilungs-Gesamtabweichung F_p - e ermittelt werden kann, ist im statistischen Mittel um ca. 2 Qualitäten besser als die Qualität der auf die Wellen- bzw. Nabenachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung F_p /2/.

Bei flankenzentrierten Zahnwellen-Verbindungen erfolgt die Positionierung der Verbindungspartner über die Zentrierkräfte auf der Zahnflanke. Die sich einstellende Exzentrizität zwischen den Verzahnungsachsen wird durch die Verzahnungsabweichungen, die Einbaustellung, die Exzentrizität zwischen der Verzahnungsachse und Wellen- bzw. Nabenachse sowie der Belastung beeinflusst. Da die Ausrichtung dieser Verbindungsart an den Zahnflanken erfolgt, ist bei flankenzentrierten Zahnwellen-Verbindungen die Verzahnungsqualität aus der auf die Verzahnungsachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung F_p - e zu ermitteln.

Bei durchmesserzentrierten Zahnwellen-Verbindungen laufen Wellen- und Nabenachse nahezu zentrisch. Den Achsen der Verzahnungen wird eine Exzentrizität aufgezwungen, die größer sein kann als die Exzentrizität zwischen der Wellen- bzw. Nabenachse und der Innen- bzw. Außenverzahnung. Sie verursacht in der Regel relativ hohe Zwangskräfte inner-

halb der Verbindung. Bei Durchmesserzentrierung ist daher die Verzahnungsqualität aus der auf die Wellen- bzw. Nabenachse bezogenen Teilungs-Gesamtabweichung F_p zu bestimmen. Für identische Zahnwellen-Verbindungen ist die effektive Teilungs-Gesamtabweichung (-> effektive Qualität) und damit die Lastverteilung bei Flankenzentrierung grundsätzlich besser als bei Durchmesserzentrierung.

Das Berechnungsprogramm ermittelt aus der effektiven Qualität des schlechteren Partners von Welle und Nabe (Eingabefelder Toleranzreihe) die Teilungs-Gesamtabweichung F_p für die Zahnwellen-Verbindung entsprechend der Berechnungsformel nach DIN 3962. Die Teilungs-Gesamtabweichung beeinflusst entscheidend die - durch den Umfangsfaktor k gekennzeichnete - Lastverteilung der Verbindung. Die sich real einstellende Lastverteilung der Verbindung hängt von der Einbaustellung ab und streut statistisch um den berechneten Wert.

Neben der Lastverteilung wird vor allem bei Übergangs- und Preßsitzen das Passungsverhalten einer Zahnwellen-Verbindung entscheidend durch die Verzahnungsabweichungen beeinflusst. Weitere Erläuterungen siehe DIN 5480, Teil 14.

3.2 Einlaufverhalten und Plastifizierung

Zahnflanke

Die Zahnflanken weisen im Lieferzustand vom Herstellungsverfahren abhängige Oberflächenrauigkeiten und Formabweichungen auf. Die Qualität und die damit in Beziehung stehende Teilungs-Gesamtabweichung F_p (siehe 3.1) wird in der Regel für den Lieferzustand angegeben. Beim Zusammenfügen von Welle und Nabe einer Zahnwellen-Verbindung mit Spiel, wird das Anfangs-Drehflankenspiel j_0 durch die erste lastfreie Flankenberührung begrenzt. Durch die Belastungen im Betrieb, kommt es zu einem Einlaufvorgang auf den Zahnflanken, bei dem sich Wellen- und Nabenverzahnung aneinander anpassen. In Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis aus Drehmoment zu Querkraft (Hebelarm $H = T/Q$, siehe /1/) entstehen unterschiedlich stark ausgeprägte Relativbewegungen zwischen den Flanken der Verzahnung, die zur Glättung der Oberflächenrauigkeiten und zum Einläppen der Flanken beitragen. Das Drehflankenspiel der Verbindung nimmt dabei zu, der Einlauf-

vorgang ist jedoch unabhängig vom Betriebszustand nach ca. 1×10^5 Umdrehungen abgeschlossen. Bei Preßsitzen kann eine entsprechende Anpassung bereits durch den Fügevorgang erfolgen.

Im Betrieb können sich die Teilungs-Gesamt- und Einzelabweichungen der Wellen- und Nabenverzahnung und damit deren Qualitäten durch den zunehmenden Flankenverschleiß ständig ändern (verbessern oder verschlechtern), die Größenordnung ist dabei vom Betriebs- und Schmierungszustand abhängig. Bleibt die Zahnwellen-Verbindung immer in der gleichen Einbaustellung, führt der Anpaßvorgang von Außen- und Innenverzahnung während des Einlaufs zu einer effektiven Qualitätssteigerung der gepaarten Verbindung, die in diesem Maße durch eine Vermessung der einzelnen Verzahnungen nicht feststellbar ist. Diese erzielte Qualitätssteigerung bleibt bei überwiegendem Drehmoment ($H > H_{\text{grenz}}$, Betriebszustand III /9/) im weiteren Betrieb erhalten.

Im Berechnungsprogramm kann der Einlaufvorgang mit Hilfe des "Plastifizierungsfaktors Zahnflanke" p_F berücksichtigt werden (Wertebereich 0% p_F 100%). Dieser Faktor beeinflusst den Tragbreitenfaktor $k_{b,pl}$ (Lastverteilung über der Verbindungsbreite) und die effektive Teilungs-Gesamtabweichung $F_{p,pl}$. Die Voreinstellung $p_F = 25\%$ entspricht ungefähr der Verbesserung des Tragverhaltens durch den Einlauf der Verbindung bei spanender Herstellung der Zahnflanken. Aus der effektiven Teilungs-Gesamtabweichung $F_{p,pl}$ wird im Programm die durch den Einlauf verbesserte effektive Qualität der gepaarten Zahnwellen-Verbindung berechnet. Ein Plastifizierungsfaktor von $p_F = 25\%$ bewirkt eine Steigerung dieser Qualität um ca. 2 Stufen. Für umformtechnisch (z.B. Walzen oder Rollen) hergestellte Verzahnungen, sollte zur Simulation des Einlaufs ein geringerer Plastifizierungsfaktor Zahnflanke eingesetzt werden.

Durch eine sehr hohe Belastung, z.B. einen Momentenstoß (seltenes Ereignis), kann es zu plastischen Verformungen auf den Flanken kommen. Auch diese Verformungen lassen sich mit Hilfe des Plastifizierungsfaktors simulieren.

Zahnfußbereich

Die Berechnung der Spannungen im Kerbbereich nach DIN 5466E geht von einer rein elastischen Werk-

stoffbeanspruchung aus. Die maximalen Spannungen in den Kerbbereichen berechnen sich vereinfacht ausgedrückt mit $\sigma_{\text{max}} = k \cdot \sigma_{\text{nenn}}$, wobei k von der Verbindungsgeometrie abhängige Formfaktoren und σ_{nenn} die Nennspannungen der jeweiligen Berechnungsansätze darstellen. Für den Fall elastischen Werkstoffverhaltens sind Nennspannung und die nur in einem lokal sehr eng begrenzten Bereich der Kerbe auftretende Maximalspannung direkt proportional zur Last. Sobald die maximale Spannung die Fließgrenze übersteigt, hat σ_{max} die Proportionalitätsgrenze erreicht. Bei weiterhin proportional zur Last ansteigender Nennspannung σ_{nenn} und teilweise plastischen Verformungen im Kerbbereich muß sich der Formfaktor in der Berechnung verringern. Dieses wird im Berechnungsprogramm durch den "Plastifizierungsfaktor Zahnfuß p " berücksichtigt:

Die Einführung des Plastifizierungsfaktors ist eine dem heutigen, noch unvollständigen Kenntnisstand entsprechende theoretische Definition. Bei rein elastischem Werkstoffverhalten gilt für den Plastifizierungsfaktor $p = 0$ und für den Formfaktor $k_{p,pl} = k$, mit $k =$ Formfaktor der rein elastischen Auslegung. Überschreitet die maximale Kerbspannung die Fließgrenze des Werkstoffs, muß der Formfaktor aufgrund des plastischen Fließens reduziert werden. Der Grenzfall der Berechnung ist bei einem Plastifizierungsfaktor von 1 (Eingabe im Programm $p = 100\%$) erreicht, bei dem für dem Formfaktor $k_{p,pl} = 1$ folgt. In grober Abschätzung ist beim Erreichen von $p = 1$ der Einfluß der Kerbe auf die Spannungsüberhöhung im Zahnfuß nahezu abgeklungen, d.h., der gesamte Kerbbereich ist plastifiziert. Bei einer weiteren Laststeigerung ist bei einem Werkstoff, der genügend große plastische Dehnungen zuläßt, von einer Ausdehnung der plastischen Zone in den Wellengrundkörper auszugehen /2/. Diese Simulation kann mit dem Berechnungsprogramm nicht nachvollzogen werden.

Der hier vorgestellte unvollkommene Berechnungsansatz dient zu einer groben Abschätzung der Beanspruchungen im Kerbbereich, wenn die maximale Spannung die Fließgrenze übersteigt. Vorausgesetzt wird ein Werkstoff, der gutes plastisches Fließvermögen aufweist. Nach den bisherigen Erfahrungen liegt die maximale plastische Dehnung bei ausreichendem Wellenüberstand im Fall $p = 100\%$ im Kerbbereich unter 5%. Als Auslegungskriterium muß daher die größte auftretende plastische Dehnung herangezogen

gen werden, die nicht größer als die zulässige plastische Dehnung des Werkstoffs sein darf. Eine Belastung, die erfaßbare plastische Verformungen hervorruft, kann vom Bauteil jedoch nicht dauerhaft ertragen werden. Eine wechselnde Beanspruchung mit $p = 1$ kann höchstens im Bereich des Low Cycle Fatigue ertragen werden!

Beim Erreichen der Streckgrenze $R_{P0,2}$ weist ein Werkstoff bereits 0,2% plastische Dehnung auf. Unter der Voraussetzung, daß als maximale Spannung im Zahnfuß $\sigma_{\max} = R_{P0,2}$ zugelassen wird, kann eine Zahnwelle unter Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens und des plastischen Spannungsabbaus in der Kerbe bei maximal 0,2% plastischer Dehnung ein um ca. 1,5 mal größeres Drehmoment T_{pl} übertragen als elastisch berechnet.

Der im Berechnungsprogramm voreingestellte Wert $p = 25\%$ läßt einen sehr geringen, technisch nicht erfaßbaren, plastischen Spannungsabbau im Zahnfußbereich zu, der nach dem derzeitigen Kenntnisstand bei Fußrundungsradien mit $r = 0,16 \cdot m$ keine Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit der Verbindung hat. Für größere Fußausrundungen sollte wegen des geringeren Spannungsgradienten im Kerbbereich der Plastifizierungsfaktor p zur dauerhaftesten Auslegung etwas reduziert werden (Hinweise zur dauerhaftesten Auslegung in /2,9/).

Literatur

- /1/ Dietz, P.: Die Berechnung von Zahn- und Keilwellenverbindungen. Büttelborn, Juli 1978, Selbstverlag des Verfassers
- /2/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung, Dissertation TU Clausthal 1996
- /3/ Schäfer, G.: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebesitz. Dissertation TU Clausthal 1996
- /4/ Dietz, P.; Wesolowski, K.: DFG-Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Zahnwellenfestigkeit, Di 289 /9-1, IMW TU Clausthal 1994

- /5/ Dietz, P.; Schäfer, G., Wesolowski, K.: Zahnwellenverbindungen - Beanspruchungs- und Verschleißverhalten. Konstruktion, Heft 7/8, Juli/August 1993, S. 227 - 234, Springer Verlag
- /6/ Burgtorf, U.: Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz bezüglich ihrer Montage- und Betriebseigenschaften. Institutsmitteilung Nr. 20, IMW TU Clausthal 1995
- /7/ Burgtorf, U.; Garzke, M.: Anleitung zum Berechnungsprogramm zur Tragfähigkeitsberechnung von Zahnwellen-Verbindungen nach DIN 5466E, Geometrie nach DIN 5480. IMW TU Clausthal 1996
- /8/ DIN 3962: Toleranzen für Stirnradverzahnungen, Teil 1, Beuth-Verlag, Berlin 1978
- /9/ DIN 5466E: Tragfähigkeitsberechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, Teil 1 und 2, Beuth-Verlag, Berlin 1994/1995
- /10/ DIN 5480: Zahnwellen-Verbindungen mit Evolventenflanken, Teil 1 bis 14 Beuth-Verlag, Berlin 1991