

Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern

Teil 6: Betriebsfestigkeitsrechnung

DIN
3990-6

ICS 21.200

Ersatz für
Ausgabe 1994-02

Deskriptoren: Maschinenbau, Stirnrad, Tragfähigkeitsberechnung, Betriebsfestigkeit

Calculation of load capacity of cylindrical gears – Part 6: Calculation of service strength

Zeitlich veränderliche Belastung durch einen Arbeitsprozeß, Anfahrvorgang oder durch Arbeiten bei oder nahe bei kritischen Drehzahlen verursachen in einem Antriebssystem unterschiedliche Zahnbeanspruchungen. Ihre Größe und ihr zeitlicher Verlauf werden von der Arbeitsmaschine, der Antriebsmaschine (Motor) und der Feder-Masse-Dämpfungsconfiguration beeinflusst.

Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden Beanspruchungen wird als Beanspruchungskollektiv (stress spectrum) bezeichnet.

Wenn ein Beanspruchungskollektiv vorliegt, muß die Wirkung des Kollektivs auf die Lebensdauer des Getriebes durch Anwendung einer geeigneten Schädigungshypothese bestimmt werden. Mögliche Ansätze hierfür sind nachfolgend beschrieben.

Inhalt

	Seite
1 Zeichen, Benennungen und Einheiten	2
2 Grundlagen	2
2.1 Ermittlung des Last- und Beanspruchungskollektivs	2
2.2 Allgemeine Betriebsfestigkeitsrechnung	6
2.3 Palmgren-Miner-Regel	6
3 Methode I: Allgemeine Betriebsfestigkeitsrechnung	6
4 Methode II: Betriebsfestigkeitsrechnung unter Zugrundelegung des Einstufen- Festigkeitsnachweises nach DIN 3990	6
4.1 Grundlagen	6
4.2 Berechnung der Beanspruchungskollektive	7
4.3 Ermittlung der Festigkeits-Kennfunktion	7
4.4 Ermittlung der Sicherheitsfaktoren	7
5 Methode III: Berechnung eines äquivalenten Moments aus einem gegebenen Lastkollektiv	8
6 Methode IV: Anhaltswerte für K_A	9
7 Krafttrichtungskehr – Regellose Gegendrehmomente	11
8 Berechnungsbeispiele	11

Fortsetzung Seite 2 bis 12

Normenausschuß Maschinenbau (NAM) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

1 Zeichen, Benennungen und Einheiten

b	Zahnbreite	mm
d_1	Teilkreisdurchmesser des Ritzels	mm
m_n	Normalmodul	mm
n_i	Lastspielzahl bei Beanspruchungsniveau i	—
n_1	Lastspielzahl in der Kollektivstufe I	—
p	Steigungskennwert	—
u	Zähnezahlverhältnis	—
i	Beanspruchungsniveau	—
I	Kollektivstufe (Klasse)	—
K_v	Dynamikfaktor	—
K_A	Anwendungsfaktor	—
K_{Fa}	Stirnfaktor (Fuß), berücksichtigt die Kraftaufteilung auf mehrere Zähne	—
$K_{F\beta}$	Breitenfaktor (Fuß), berücksichtigt die Kraftaufteilung über die Zahnbreite	—
K_{Ha}	Stirnfaktor (Flanke), berücksichtigt die Kraftaufteilung auf mehrere Zähne	—
$K_{H\beta}$	Breitenfaktor (Flanke), berücksichtigt die Kraftaufteilung über die Zahnbreite	—
N_{eq}	Äquivalente Lastspielzahl	—
N_i	Schadens-Lastspielzahl bei Beanspruchungsniveau i (aus der zugehörigen S-N-Kurve)	—
N_1	Schadens-Lastspielzahl auf dem Niveau der oberen Grenze der Kollektivstufe I	—
N_L	Lastspielzahl	—
N_∞	Dauerfestigkeitslastspielzahl	—
S	Sicherheitsfaktor	—
$S_{F \min}$	Mindest-Sicherheitsfaktor für Zahnfußbeanspruchung	—
$S_{H \min}$	Mindest-Sicherheitsfaktor für Flankenpressung	—
T_{eq}	Äquivalentes Drehmoment	Nm
N_N	Anlagen-Nennmoment	Nm
T_1	Oberes Klassengrenzmoment des Ritzels	Nm
T_{UI}	Unteres Klassengrenzmoment des Ritzels	Nm
T_∞	Dauerfest ertragbares Moment	Nm
U	Schädigungssumme, Miner-Summe	—
U_1	Einzel-Schädigungsanteil der Kollektivstufe I	—
Y_F	Formfaktor	—
Y_{NT}	Lebensdauerfaktor (Zahnfuß) für Standard-Bedingungen	—
$Y_{R \text{ rel T}}$	Relativer Oberflächenfaktor	—
Y_S	Spannungskorrekturfaktor	—
$Y_{ST} = 2$	Spannungskorrekturfaktor für die Abmessungen der Standard-Referenz-Prüfräder	—
Y_X	Größenfaktor (Zahnfuß)	—

Y_β	Schrägenfaktor (Zahnfuß)	—
$Y_{\delta \text{ rel T}}$	Relative Stützziffer des aktuellen Zahnrades, bezogen auf das Standard-Referenz-Prüfrad	—
Z_B	Ritzel-Einzeleingriffsfaktor	—
Z_D	Rad-Einzeleingriffsfaktor	—
Z_v	Geschwindigkeitsfaktor	—
Z_E	Elastizitätsfaktor	$\sqrt{N/mms}$
Z_H	Zonenfaktor	—
Z_L	Schmierstofffaktor	—
Z_{NT}	Lebensdauerfaktor (Flanke) für Standard-Bedingungen	—
Z_R	Rauheitsfaktor für Grübchen-tragfähigkeit	—
Z_W	Werkstoffpaarungsfaktor	—
Z_X	Größenfaktor (Flanke)	—
Z_β	Schrägenfaktor (Flanke)	—
Z_ε	Überdeckungsfaktor (Flanke)	—
σ_{lim}	Dauerfestigkeitswert	N/mm ²
σ_1	Beanspruchung in der Kollektivstufe I	—
$\sigma_{F \text{ lim}}$	Zahnfuß-Dauerfestigkeit (Dauerfestigkeitswert für Zahnfuß-Biegenennspannung)	N/mm ²
$\sigma_{FE} = \sigma_{F \text{ lim}} \cdot Y_{ST}$	Zahnfuß-Grundfestigkeit	N/mm ²
$\sigma_{FG} = \sigma_{FP} \cdot S_{F \min}$	Zahnfuß-Grenzfestigkeit	N/mm ²
σ_{FP}	Zulässige Zahnfußspannung	N/mm ²
σ_{FI}	Zahnfußspannung in der Kollektivstufe I	N/mm ²
$\sigma_{H \text{ lim}}$	Grübchen-Dauerfestigkeit (Dauerfestigkeit für Flankenpressung)	N/mm ²
$\sigma_{HG} = \sigma_{HP} \cdot S_{H \min}$	Grübchen-Grenzfestigkeit	N/mm ²
σ_{HP}	Zulässige Flankenpressung	N/mm ²
σ_{HI}	Flankenpressung in der Kollektivstufe I	N/mm ²
σ_{HO}	Nominelle Flankenpressung	N/mm ²
σ_p	Zulässige Spannung	N/mm ²

2 Grundlagen

2.1 Ermittlung des Last- und Beanspruchungskollektivs

Es muß der Last-Zeit-Verlauf an der zu berechnenden Verzahnung bekannt sein. Seine Bestimmung kann durch eine oder mehrere der folgenden Methoden geschehen:

- Messung der Betriebslasten an der ausgeführten Anlage
- Übernehmen eines bekannten Last-Zeit-Verlaufes für eine ähnliche Anlage mit ähnlichen Betriebsbedingungen
- Simulationsrechnung unter Verwendung der äußeren Anregung und der Feder-Masse-Dämpfungskonfiguration der Anlage

Der Wertebereich der gemessenen (berechneten) Lasten wird in Klassen eingeteilt. Eine gebräuchliche Klassenzahl ist 64. Das Lastkollektiv ist die Häufigkeitsverteilung der aufgetretenen Lasten.

Man bestimmt für jeden Eingriff (Umdrehung) des am höchsten belasteten Zahnes die aktuelle Last und ordnet sie einer Klasse zu. Zu der in dieser Klasse gespeicherten Umdrehungszahl wird eins addiert.



Klasse	unteres Klassen- Grenzmoment T_{ur}	oberes T_r	Lastspielzahl n_r	Klasse	unteres Klassen- Grenzmoment T_{ur}	oberes T_r	Lastspielzahl n_r
I				I			
1	0	< 16	0	33	512	< 528	315 156
2	16	< 32	0	34	528	< 544	1
3	32	< 48	0	35	544	< 560	8
4	48	< 64	0	36	560	< 576	3 405
5	64	< 80	0	37	576	< 592	220 746
6	80	< 96	12	38	592	< 608	19 914
7	96	< 112	1 403	39	608	< 624	11
8	112	< 128	2 442 956	40	624	< 640	0
9	128	< 144	2 389	41	640	< 656	0
10	144	< 160	2 515	42	656	< 672	0
11	160	< 176	79 828	43	672	< 688	0
12	176	< 192	164 240	44	688	< 704	0
13	192	< 208	21	45	704	< 720	0
14	208	< 224	0	46	720	< 736	0
15	224	< 240	7	47	736	< 752	0
16	240	< 256	814 090	48	752	< 768	0
17	256	< 272	1 625 227	49	768	< 784	0
18	272	< 288	903	50	784	< 800	0
19	288	< 304	4	51	800	< 816	0
20	304	< 320	0	52	816	< 832	0
21	320	< 336	0	53	832	< 848	0
22	336	< 352	0	54	848	< 864	0
23	352	< 368	3	55	864	< 880	0
24	368	< 384	602	56	880	< 896	0
25	384	< 400	1 199 709	57	896	< 912	0
26	400	< 416	2 006 441	58	912	< 928	0
27	416	< 432	2 236 449	59	928	< 944	0
28	432	< 448	1 713 430	60	944	< 960	0
29	448	< 464	548 674	61	960	< 976	0
30	464	< 480	666 781	62	976	< 992	0
31	480	< 496	502	63	992	< 1 008	0
32	496	< 512	172 941	64	1 008	< 1 024	0

Bild 1: Beispiel für ein Drehmomentkollektiv der Klassenzahl 64

BEISPIEL: (siehe Bild 1)

- Drehmomentkollektiv für die Lastspielzahl N_x (Auschnitt):

Klasse	unteres Klassen- Grenzmoment T_{U1}	oberes T_1	Lastspielzahl n_1
I			
9	128	< 144	2 389
10	144	< 160	2 515

- Drehmomentmeßwert bei Eingriff des höchstbelasteten Zahnes: $T = 152 \text{ Nm}$.
- Zuordnung zu einer Kollektivklasse:
144 Nm $\leq T < 160 \text{ Nm} \rightarrow$ Klasse 10
- Drehmomentkollektiv für die Lastspielzahl $N_x + 1$ (Auschnitt):

Klasse	unteres Klassen- Grenzmoment T_{U1}	oberes T_1	Lastspielzahl n_1
I			
9	128	< 144	2 389
10	144	< 160	2 515

Der Einfluß unterschiedlicher Drehzahlen auf die dynamischen Zusatzkräfte soll in den verwendeten Drehmomentwerten berücksichtigt sein. Das gemessene oder berechnete Lastkollektiv (siehe auch Bilder 2 und 3) gilt nur für den Meß- oder Berechnungszeitraum. Es ist möglich, daß seltene Lastspitzen (Sonderereignisse) auftreten, die nicht im Lastkollektiv beinhaltet sind. Wird das Kurzzeit-Lastkollektiv auf die volle Betriebszeit extrapoliert, so sind diese Spitzenlasten zu berücksichtigen.

Die Beanspruchungskollektive für Zahnflanke (Flankenpressungskollektiv) und Zahnfuß (Zahnfußspannungskollektiv) erhält man durch Anwendung der Methode II (siehe auch Bilder 4 und 5).

Die Freßtragfähigkeit muß für die ungünstigste Kombination von Last und Drehzahl nachgewiesen werden.

Verschleißprobleme müssen getrennt betrachtet werden.

Das Zahnfußspannungskollektiv kann auch durch Messung mit Dehnmeßstreifen in der Fußrundung bestimmt werden. Dabei muß sichergestellt sein, daß an der am höchsten belasteten Stelle (über Umfang und Zahnbreite) gemessen wird. Bei dem in Bild 4 dargestellten Spannungskollektiv handelt es sich um ein Kollektiv, bei dem Vor- und Rückflanken belastet sind. Teilweise liegt somit eine Wechselbelastung vor. Zur Berechnung der Lebensdauer für die Zahnfußtragfähigkeit bei Lastkollektiven mit Gegendrehmomenten sind mehrere Methoden möglich:

Methode FA:

Die Lebensdauer wird für das gesamte Beanspruchungskollektiv mit Hilfe einer aus Versuchen oder Berechnung

gewonnenen Wöhler- bzw. Schadenslinie berechnet, in der die Einflüsse der Mittelspannung und der Häufigkeit der Lastrichtungsumkehr enthalten sind.

Methode FB:

Die Lebensdauer wird für das gesamte Beanspruchungskollektiv mit Hilfe einer Wöhler- bzw. Schadenslinie berechnet, die in Abhängigkeit von der Mittelspannungsempfindlichkeit des Werkstoffes und der Häufigkeit der Lastrichtungsumkehr modifiziert wird.

Methode FC:

Die Anteile des Beanspruchungskollektives aus der Belastung der Rückflanke werden mit dem Faktor 1:0,7 multipliziert und zu den Anteilen der Vorflanken addiert. Mit dem so zusammengefaßten Kollektiv wird die Lebensdauer gegenüber der Wöhler- bzw. Schadenslinie berechnet.

Methode FD:

Im Kollektiv wird nach dem Betrag der Beanspruchung klassiert. Das Beanspruchungskollektiv wird in der Schädigungsrechnung mit einer mit dem Faktor 0,7 reduzierten Wöhler- bzw. Schadenslinie für den Zahnfuß nach Methode II oder III verglichen.

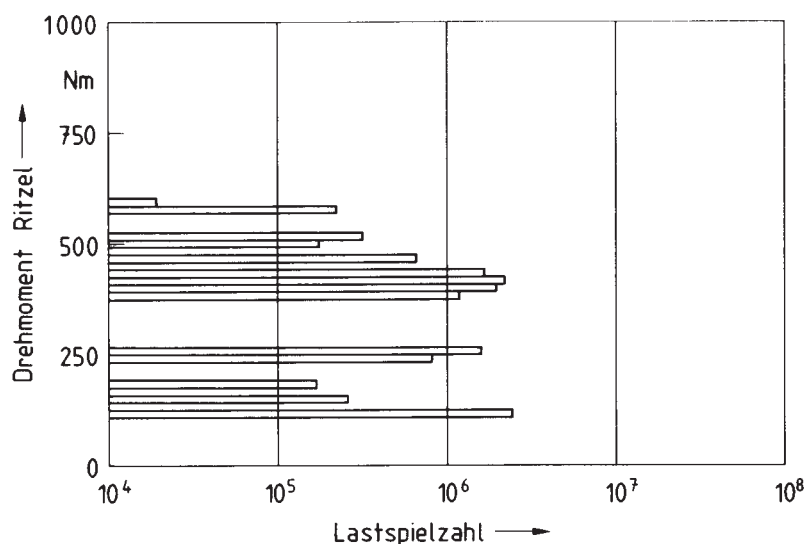


Bild 2: Das Lastkollektiv aus Bild 1 in Einzelhäufigkeitsdarstellung

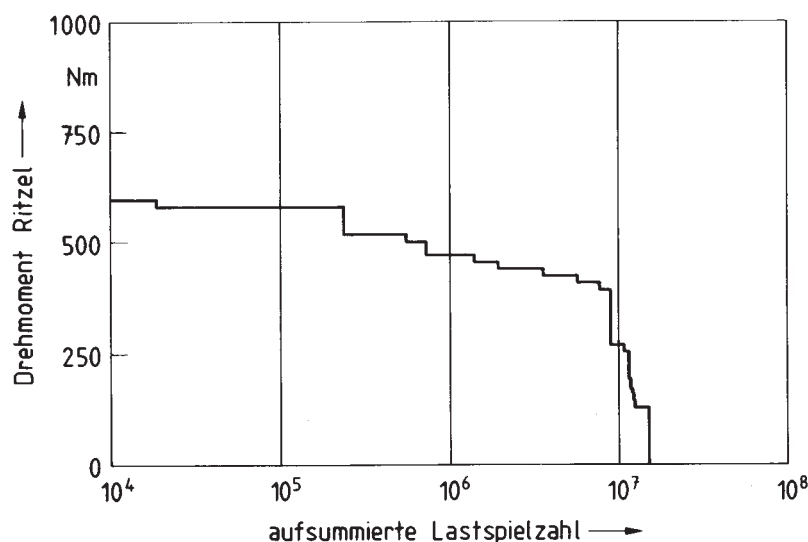


Bild 3: Das Lastkollektiv aus Bild 1 in Summenhäufigkeitsdarstellung