

Getriebe-Paßsystem
Flankenspiel Zahndickenabmaße
Zahndickentoleranzen
 Grundlagen

DIN
3967

System of gear fits; backlash, deviations and tolerances of teeth thickness, general bases

Mit DIN 3962 Teil 1 und Teil 2, DIN 3963 und DIN 3967
 Ersatz für DIN 3967, Ausgabe September 1953x

Système d'ajustement des engrenages; jeu entre dents, écarts et tolérances d'épaisseur, bases d'établissement

Zur Erleichterung der Anwendung dieser Norm wurde als Anhang A die Berechnung der Zahndickenabmaße aufgenommen. Angaben zur Umrechnung der Abmaße für die verschiedenen Meßverfahren sind in Anhang B hinzugefügt worden.

Das DIN-Flankenspiel-Paßsystem von Radpaarungen ermöglicht es, die Grenzabmaße der Zahndicken unter Beachtung aller Erscheinungen beim Betrieb eines Getriebes und aller Abweichungen des gesamten Getriebes festzulegen.

Das Paßsystem besteht deshalb einerseits aus den Abmaßen und Toleranzen der Verzahnungen, bezogen auf deren jeweilige Montageaufnahmen, und andererseits aus den Abmaßen und Toleranzen aller übrigen Bauteile des Getriebes, soweit sie die Lage der Verzahnungen zueinander bestimmen. Diese für eine Bezugstemperatur festgelegten Werte verändern sich beim Betrieb durch Temperaturänderungen nach oben und unten, durch elastische Verformungen unter Last und eventuell durch Quellung oder Schwund.

Das Paßsystem ist als Zahndicken-Paßsystem im Normalschnitt auf dem Teilzylinder festgelegt, d. h. alle Abmaße, Toleranzen und betriebsbedingten Änderungen des Getriebes werden als Zahndickenänderungen aufgefaßt und sind in den Normalschnitt umzurechnen.

Der Normalschnitt wurde gewählt, weil die Fertigungsanstrengung, d. h. die erforderliche Zahndickentoleranz im Normalschnitt, vom Schrägungswinkel unabhängig ist. Außerdem wurde der Normalschnitt aus meßtechnischen Gründen gewählt, weil die Zahndickensehne und die Zahnweite im Normalschnitt gemessen werden.

Die Berechnung der Abmaße erfolgt jedoch über den Stirnschnitt, da am fertigen Getriebe das Spiel als Drehflankenspiel gemessen wird (siehe Anhang A).

Das Paßsystem dient zur Sicherung des Kleinstspieles und zur Begrenzung des Größtspieles.

Die Bezugsbasis des Paßsystems ist der spielfreie Zustand bei Nenn-Achsabstand, Nenn-Profilverschiebung und bei abweichungsfreien Bauteilen.

Die erforderlichen negativen Abmaße der Zahndicke können durch eine zusätzliche negative Profilverschiebung Δx erzeugt werden. Diese wird jedoch bei der Nenn-Profilverschiebung nicht berücksichtigt.

Ob die Schwächung der Zahndicke bei der Tragfähigkeitsberechnung berücksichtigt werden muß, ist im Einzelfall zu

prüfen. Wenn $\left| \frac{A_{sn}}{m_n} \right| > 0,05$, sollte dies auf jeden Fall geschehen.

1 Mitteltende Normen

DIN 3960 Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung

DIN 3961 Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Grundlagen

DIN 3962 Teil 1 Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen

DIN 3964 Achsabstandsabmaße und Achslagetoleranzen von Gehäusen für Stirnradgetriebe

DIN 3999 Kurzzeichen für Verzahnungen

2 Flankenspiel

Der Wert des Flankenspieles sagt nichts über die Verzahnungsqualität aus, wenn auch andererseits die verschiedenen Verzahnungsqualitäten bestimmte Abmaße der

Zahndicke verlangen, um das erforderliche bzw. zulässige Flankenspiel zu gewährleisten.

Das Kleinst-Flankenspiel wird durch die oberen Abmaße bestimmt. Es entspricht jedoch nicht der Summe der oberen Abmaße, weil eine Reihe von Einflüssen das Spiel verändert (siehe Anhang A).

Das Größt-Flankenspiel wird durch die unteren Zahndickenabmaße bestimmt, die sich aus den oberen Abmaßen und den Zahndickentoleranzen ergeben. Es entspricht ebenfalls nicht der Summe der Abmaße, weil auch hier eine Reihe von Einflüssen das Spiel verändert.

2.1 Theoretisches Flankenspiel

Das theoretische Flankenspiel j_t ergibt sich aus den auf den Stirnschnitt umgerechneten Zahndickenabmaßen und den umgerechneten Abmaßen des Achsabstandes.

$$j_t = - \frac{A_{sn1} + A_{sn2}}{\cos \beta} + A_a \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} = - \Sigma A_{st} + \Delta j_a$$

Fortsetzung Seite 2 bis 23
 Erläuterungen Seite 24

Normenausschuß Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

2.2 Abnahme-Flankenspiel

Das Abnahme-Flankenspiel ist das Spiel, das sich bei Bezugstemperatur am unbelasteten Getriebe durch Verdrehen des einen Rades gegenüber dem anderen ergibt. Es ist in der Regel kleiner als das theoretische Flankenspiel, da die spielverkleinernden Einflüsse gewöhnlich größer sind als die spielvergrößernden. Spielverkleinernde Einflüsse sind z. B. Verzahnungsabweichungen sowie Form- und Lageabweichungen, siehe Anhang A.

2.3 Betriebs-Flankenspiel

Das Betriebs-Flankenspiel ist das Spiel, das sich bei Betrieb des Getriebes ergibt. Es ist nicht konstant. Besonders beim Anlaufen des Getriebes kann es durch schnellere Erwärmung der Räder gegenüber dem Gehäuse zu größeren Änderungen des Betriebs-Flankenspieles kommen. Bei Gehäusen mit größerem Längenausdehnungskoeffizienten als dem der Räder ist es gewöhnlich größer

als das Abnahme-Flankenspiel. Durchbiegung und Verlagerung der Wellen beeinflussen es ebenfalls.

3 Zahndickenabmaße und Zahndickentoleranzen

Normalerweise können die Zahndickenabmaße und Zahndickentoleranzen aufgrund vorliegender Erfahrung unmittelbar den Tabellen 1 und 2 entnommen werden, wobei in der Regel die oberen Abmaße für jedes Rad mindestens so groß (Zahlenwert) sein sollten wie das untere Abmaß des Gehäuse-Achsabstandes (ohne Umrechnung). Soweit keine Erfahrungswerte für Flankenspiele und Zahndickenabmaße vorliegen, müssen diese berechnet werden. Eine entsprechende Anleitung wird im Anhang A gegeben. Die berechneten Werte werden in der Regel gerundet und dann ebenfalls den Tabellen 1 und 2 entnommen. Sind aus funktionstechnischen Gründen besonders kleine Spiele erforderlich, so ist eine Berechnung unerlässlich.

Tabelle 1. Obere Zahndickenabmaße A_{sn} in μm

Teilkreisdurchmesser (mm)		Abmaßreihe											
über	bis	a	ab	b	bc	c	cd	d	e	f	g	h	
—	10	— 100	— 85	— 70	— 58	— 48	— 40	— 33	— 22	— 10	— 5	0	
10	50	— 135	— 110	— 95	— 75	— 65	— 54	— 44	— 30	— 14	— 7	0	
50	125	— 180	— 150	— 125	— 105	— 85	— 70	— 60	— 40	— 19	— 9	0	
125	280	— 250	— 200	— 170	— 140	— 115	— 95	— 80	— 56	— 26	— 12	0	
280	560	— 330	— 280	— 230	— 190	— 155	— 130	— 110	— 75	— 35	— 17	0	
560	1 000	— 450	— 370	— 310	— 260	— 210	— 175	— 145	— 100	— 48	— 22	0	
1000	1 600	— 600	— 500	— 420	— 340	— 290	— 240	— 200	— 135	— 64	— 30	0	
1600	2 500	— 820	— 680	— 560	— 460	— 390	— 320	— 270	— 180	— 85	— 41	0	
2500	4 000	— 1100	— 920	— 760	— 620	— 520	— 430	— 360	— 250	— 115	— 56	0	
4000	6 300	— 1500	— 1250	— 1020	— 840	— 700	— 580	— 480	— 330	— 155	— 75	0	
6300	10 000	— 2000	— 1650	— 1350	— 1150	— 940	— 780	— 640	— 450	— 210	— 100	0	

Tabelle 2. Zahndickentoleranzen T_{sn} in μm

Teilkreisdurchmesser (mm)		Toleranzreihe										
über	bis	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
—	10	3	5	8	12	20	30	50	80	130	200	
10	50	5	8	12	20	30	50	80	130	200	300	
50	125	6	10	16	25	40	60	100	160	250	400	
125	280	8	12	20	30	50	80	130	200	300	500	
280	560	10	16	25	40	60	100	160	250	400	600	
560	1 000	12	20	30	50	80	130	200	300	500	800	
1000	1 600	16	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	
1600	2 500	20	30	50	80	130	200	300	500	800	1300	
2500	4 000	25	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	
4000	6 300	30	50	80	130	200	300	500	800	1300	2000	
6300	10 000	40	60	100	160	250	400	600	1000	1600	2400	

3.1 Obere Abmaße

Die oberen Abmaße sind Tabelle 1 abhängig vom Teilkreisdurchmesser und der Abmaßreihe zu entnehmen. Ihre Wahl ist weitgehend unabhängig von der Verzahnungsqualität. In der Regel kann man für Getriebe gleicher Art die oberen Abmaße für Ritzel und Rad stets aus einer Abmaßreihe wählen; es ist jedoch auch zulässig, Werte aus verschiedenen Abmaßreihen zu wählen.

3.2 Untere Abmaße

Die unteren Abmaße werden durch Kombination der oberen Abmaße mit den Zahndickentoleranzen erhalten. Da die oberen und unteren Abmaße stets negativ sind, ist der Betrag der Toleranz von dem oberen Abmaß abzuziehen.

3.3 Zahndickentoleranzen

Die Zahndickentoleranzen sind Tabelle 2 zu entnehmen. Ihre Wahl ist weitgehend unabhängig von der Verzahnungsqualität und sollte sich nach den Fertigungsmöglichkeiten richten, jedoch ist zu beachten, daß die Zahndickentoleranz mindestens doppelt so groß sein muß wie die zulässige Zahndickenschwankung R_s nach DIN 3962 Teil 1. Muß aus funktionstechnischen Gründen ein Größtspiel beachtet werden, so ist eine Berechnung nach Anhang A erforderlich. Ganz allgemein sollte beachtet werden, daß kleine Zahndickentoleranzen die Einhaltung der Verzahnungsqualität ungünstig beeinflussen, da sie die Korrekturmöglichkeiten in der Fertigung unnötig begrenzen (siehe z. B. VDI/VDE 2608).

Um einen deutlichen Unterschied zu den Verzahnungsqualitäten zu zeigen, wurden die Toleranzreihen mit den Zahlen 21 bis 30 benannt. Vorzugsreihen sind 24 bis 27.

3.4 Zeichnungsangabe

Die Angabe der Grenzabmaße in der Zeichnung kann entweder direkt oder durch eine Kurzbezeichnung erfolgen, siehe DIN 3966 Teil 1. Das Kurzzeichen besteht aus der Zahl der Reihe für die Zahndickentoleranz und

dem Buchstaben der Reihe für das obere Zahndickenabmaß. Beispiel: 27cd; diese Bezeichnung ergibt z. B. für $d = 100$ mm die Grenzabmaße $A_{sne} = -70$ μ m und $A_{sni} = -170$ μ m.

4 Umrechnung der Zahndickenabmaße für die verschiedenen Prüfverfahren

Das Paßsystem ist auf einen theoretischen Wert bezogen. Dies ist die Zahndicke im Normalschnitt, die jedoch nicht direkt meßbar ist. Deshalb werden indirekte Messungen mit verschiedenen Methoden vorgenommen, siehe DIN 3960.

Für ein abweichungsfreies Zahnrad bestehen mathematische Beziehungen zwischen den verschiedenen Meßgrößen. Da jedoch die einzelnen Meßgrößen unterschiedlich durch die Einzelabweichungen der Verzahnung beeinflusst werden, gewährleistet eine rein mathematische Umrechnung der Zahndickenabmaße nicht unbedingt das gewünschte Spiel. Wenn genügend Erfahrung vorliegt (z. B. bei Zahndicken-Toleranzfeld 26e oder gröber), können die Zahndickenabmaße unmittelbar in bestimmte Prüfmaßabmaße (z. B. Zahnweitenabmaße) umgerechnet und das Zahnrad damit abgenommen werden. Dann kann aber der Fall eintreten, daß bei Abnahme nach einer anderen Meßmethode (z. B. Bolzenmaßmessung) die Toleranz nicht voll eingehalten ist.

Bei engeren Toleranzfeldern empfiehlt es sich deshalb, bei der Berechnung verschiedener Prüfmaße und deren Abmaße entsprechende Korrekturen anzubringen, die den Einfluß der Einzelabweichungen auf diese Prüfmaße empirisch (statistisch) berücksichtigen. Hinweise für die Bestimmung der Korrekturwerte sind im Anhang B gegeben.

Bei der Berechnung von Abmaßfaktoren nach DIN 3960, Ausgabe Oktober 1976, Abschnitte 4.1.3 und 5, sollte man stets den mittleren Erzeugungs-Profilverschiebungsfaktor x_{Em} entsprechend dem mittleren Abmaß einsetzen.

5 Beispiel

Längenmaße in mm

Schrägstirnräder		außenverzahnt	
		Ritzel	Rad
Normalmodul	m_n	5	
Zähnezahl	z	20	97
Bezugsprofil	Verzahnung	DIN 867	
	Werkzeug	DIN 3972	
Schrägungswinkel	β	9° 53' 49" DIN 3978	
Flankenrichtung		Links	Rechts
Teilkreisdurchmesser	d	101,511	492,326
Profilverschiebungsfaktor nach DIN 3992	x	+ 0,4000	+ 0,2389
Verzahnungsqualität		6	7
Zahnbreite	b	70	
Werkstoff		Ritzel 16 MnCr 5 Rad 42 CrMo 4V	
Gehäusewerkstoff		GG 22	
Gehäuseachsabstand	a	300 js 7	
Gehäusebreite		200	
Achslage-Genauigkeitsklasse		5, $f_{\Sigma\beta} = f_{\Sigma\delta} = 0,02$	

Ritzel gehärtet und geschliffen, Rad vergütet und geätzt. Es wird vorausgesetzt, daß aus Erfahrungen bekannt ist, daß die oberen Abmaße der Zahndicke der Reihe cd für Getriebe dieses Typs zweckentsprechend sind.

Nach Tabelle 1 werden die oberen Abmaße für das Ritzel mit $A_{sne\ 1} = -70\ \mu\text{m}$ und für das Rad mit $A_{sne\ 2} = -130\ \mu\text{m}$ gewählt.

(Diese Werte sind algebraisch kleiner als das untere Abmaß - 26 μm des Achsabstandes.)

Dem Bedarfsfall entsprechend ist die Einhaltung eines funktionsmäßig bedingten Größtspieles nicht erforderlich. Um dem Härteverzug gerecht zu werden, aber auch um die Schleifkosten niedrig zu halten, wird die Toleranz für das Ritzel verhältnismäßig groß gewählt. Aus Tabelle 2 Reihe 27 ergibt sich $T_{sn\ 1} = 100\ \mu\text{m}$ und dementsprechend

$$A_{sne\ 1} = -70\ \mu\text{m} = -0,070\ \text{mm}$$

$$A_{sni\ 1} = -170\ \mu\text{m} = -0,170\ \text{mm}$$

(unteres Abmaß = oberes Abmaß minus Toleranz).

Da das Rad geätzt wird, ist eine Toleranz von 100 μm (Tabelle 2 Reihe 26) ausreichend. Dementsprechend ergibt sich

$$A_{sne\ 2} = -130\ \mu\text{m} = -0,130\ \text{mm}$$

$$A_{sni\ 2} = -230\ \mu\text{m} = -0,230\ \text{mm}$$

Durch diese fertigungsgerechten Toleranzfelder werden die Zahndicken nicht unzulässig geschwächt,

$$\frac{|A_{sni\ 2}|}{m_n} = \frac{0,23}{5} < 0,05.$$

Da die Zahndickenschwankung nach DIN 3962 Teil 1 für das Ritzel 14 μm und das Rad 25 μm betragen darf, sind die Toleranzen auch in dieser Hinsicht richtig gewählt (siehe Abschnitt 3.3).

Aus den Nennmaßen und den Abmaßen werden nach DIN 3960 die Maximal-, Mittel- und Minimalwerte der Zahndicke s bzw. der Profilverschiebung x errechnet:

Längenmaße in mm

Zähnezahl	z	20	97
Zahndicke	s_n nenn	9,3099	8,7235
	s_n max	9,2399	8,5935
	s_n mittel	9,1899	8,5435
	s_n min	9,1399	8,4935
Profilverschiebung	x nenn	+ 0,4000	+ 0,2389
	x max	+ 0,3808	+ 0,2032
	x mittel	+ 0,3670	+ 0,1894
	x min	+ 0,3533	+ 0,1757

Daraus ergeben sich folgende Prüfmaße mit ihren Abmaßen:

Zahnweite	W	$39,619 \pm 0,047$	$177,485 \pm 0,047$
Meßzähnezahl	K	3	12
Abmaßfaktor	A_W^*	0,940	0,940
Maß über Kugeln	M_{dK}	$117,472 \pm 0,099$	$507,604 \pm 0,126$
Maß über Rollen	M_{dR}		$507,670 \pm 0,126$
Kugel- und Rollendurchmesser	D_M	$9,297 \approx 9$	$8,471 \approx 9$
Abmaßfaktor	A_{Md}^*	1,988	2,524
Wälzabstand mit Lehrzahnrad	a''	$129,314 \pm 0,061$	$323,962 \pm 0,066$
Lehrzahnrad Zähnezahl (DIN 3970) 1)	z_L	30	30
Abmaßfaktor	$A_{a''}^*$	1,218	1,325
1) Der Berechnung liegt ein Profilverschiebungsfaktor $x_L = +0,15$ und Null Abmaß der Lehrzahnrad-Zahndicke zugrunde; weiteres hierzu siehe VDI-Richtlinie 2608.			

Die berechneten Abmaße der Meßwerte sind in Bild 1 dargestellt; es sind idealgeometrische Werte. Zur Anwendung bei praktischen Messungen sind sie gegebenenfalls zu korrigieren, siehe Abschnitt 4 und Anhang B (Bild B.1 und B.3).

Das Abnahme-Flankenspiel kann kleiner ausfallen als die Summe der oberen Abmaße, bedingt durch die Toleranz für das Gehäuse und weitere Einflüsse. Es kann aber auch größer ausfallen als die Summe der unteren Abmaße, bedingt durch die Zahnschräge und die Gehäusetoleranz und weitere Einflüsse (siehe Anhang A).

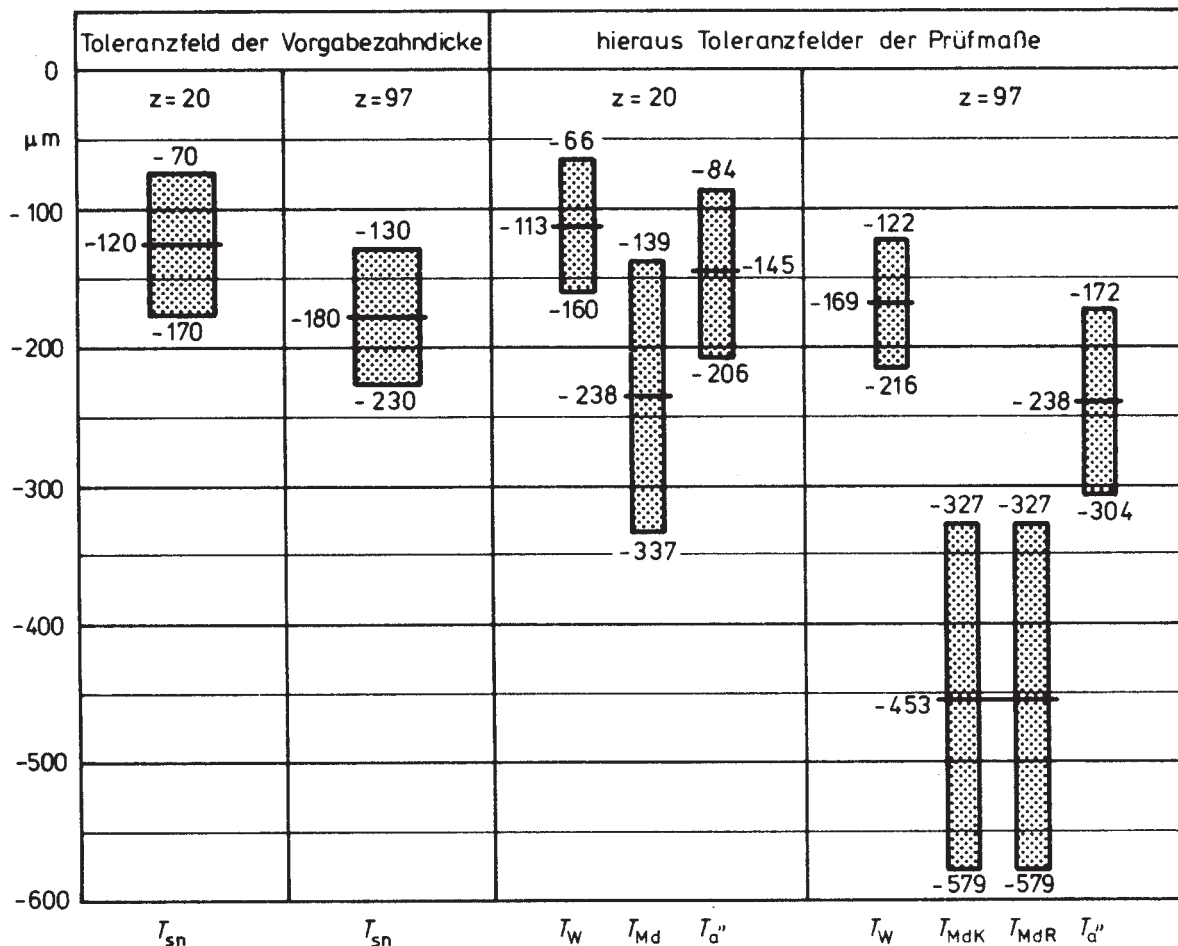


Bild 1. Toleranzfelder der Prüfmaße nach idealgeometrischer Umrechnung des Zahndicken-Toleranzfeldes

Anhang A

Berechnung der Zahndickenabmaße bzw. der Flankenspiele

Inhalt

A.1 Allgemeines	A.5 Berechnung der Summe der oberen Abmaße ΣA_{ste} aus dem Kleinst-Flankenspiel $j_{t\ min}$ und den spielverändernden Einflüssen
A.1.1 Zeichen und Benennungen	
A.1.2 Zusammenhang von Flankenspiel und Abmaßen	A.5.1 Festlegung der oberen Abmaße der Zahndicke im Normalschnitt
A.2 Spielverändernde Einflüsse	A.6 Berechnung der Summe der unteren Abmaße ΣA_{sti} aus dem Größt-Flankenspiel $j_{t\ max}$ und den spielverändernden Einflüssen
A.2.1 Erwärmung	A.6.1 Begriffe
A.2.2 Achsabstandstoleranz des Gehäuses	A.6.2 Größtspiel $j_{t\ max}$
A.2.3 Unparallelität der Bohrungsachsen im Gehäuse	A.6.3 Berechnung
A.2.4 Verzahnungs-Einzelabweichungen	A.6.4 Festlegung der unteren Abmaße der Zahndicke im Normalschnitt
A.2.5 Quellung oder Schwund	
A.2.6 Lage-, Form- und Maßabweichungen der Bauelemente	A.7 Berechnung der Flankenspiele aus den Zahndickenabmaßen und den spielverändernden Einflüssen
A.2.7 Elastizität	A.8 Abmaßschaubild der Zahndicke im Normalschnitt
A.3 Wirkungsweise der spielverändernden Einflüsse	A.9 Beispiel für die Bestimmung von Zahndickenabmaßen
A.4 Berechnung der spielverändernden Einflüsse	A.9.1 Obere Abmaße
A.4.1 Spieländerung durch Erwärmung Δj_θ	A.9.2 Untere Abmaße
A.4.2 Spieländerung durch Achsabstandstoleranz Δj_a	A.9.3 Untere Abmaße ohne Vorschrift eines Größtspieles
A.4.3 Spieländerung durch Unparallelität der Bohrungsachsen $\Delta j_{\Sigma\beta}$	A.9.4 Abmaße bei geänderten Bedingungen
A.4.4 Spieländerung durch Verzahnungs-Einzelabweichungen Δj_F	A.9.5 Abnahme-Flankenspiel
A.4.5 Spieländerung durch Quellung oder Schwund Δj_Q	A.10 Beispiel für die Bestimmung der zu erwartenden Flankenspiele
A.4.6 Spieländerung durch Lage-, Form- und Maßabweichungen der Bauelemente Δj_B	A.10.1 Bestimmung des theoretischen Flankenspieles
A.4.7 Spieländerung durch Elastizität Δj_E	A.10.2 Abnahme-Flankenspiel

A.1 Allgemeines
A.1.1 Zeichen und Benennungen
a Achsabstand
b Zahnbreite
d Teilkreisdurchmesser
f_p Teilungs-Einzelabweichung
$f_{\Sigma\beta}$ Achsschrägung auf die Länge L_G
j_t theoretisches Flankenspiel
j_{ta} Abnahme-Flankenspiel
j_{tw} Betriebs-Flankenspiel
$j_{t\ max}$ größtes Drehflankenspiel
$j_{t\ min}$ kleinstes Drehflankenspiel
m Modul
w rel. Wasseraufnahme (rel. Volumenquellung)
x_{mittel} Profilverschiebungsfaktor bei mittlerem Zahndickenabmaß
A_a Achsabstandsabmaß
A_{ae} oberes Achsabstandsabmaß
A_{ai} unteres Achsabstandsabmaß
A_{sne} oberes Abmaß der Zahndicke im Normalschnitt
A_{sni} unteres Abmaß der Zahndicke im Normalschnitt

A_{ste}	oberes Abmaß der Zahndicke im Stirnschnitt
A_{sti}	unteres Abmaß der Zahndicke im Stirnschnitt
F_f	Profil-Gesamtabweichung 1)
F_{pk}	Teilungs-Spannenabweichung über k Teilungen
F_r	Rundlaufabweichung
F_β	Flankenlinien-Gesamtabweichung 1)
L_G	Abstand der Lagermitteln einer Welle
Q_G	Quellung des Gehäuses
Q_R	Quellung der Räder
R_s	Zahndickenschwankung
T	Toleranz
$T_{a''}$	Toleranz des Zweiflanken-Wälzabstandes
$T_{R\bar{s}}$	Toleranz der Zahndickensehnen-Schwankung
T_{sn}	Zahndickentoleranz im Normalschnitt
T_{Md}	Toleranz des diametralen Zweikugel- oder Zweirollenmaßes
T_{Mr}	Toleranz des radialen Einkugel- oder Einrollenmaßes

1) Gemessen entsprechend DIN 3960 im Stirnschnitt tangential zum Grundzylinder.

T_W	Zahnweitentoleranz
α	Eingriffswinkel
α_n	Normaleingriffswinkel
α_t	Stirneingriffswinkel
α_G	Längenausdehnungskoeffizient des Gehäuses
α_R	Längenausdehnungskoeffizient der Räder bzw. Radbandangen
β	Schrägungswinkel
Δj_a	Spieländerung durch Achsabstandstoleranz
Δj_B	Spieländerung durch Form- und Maßabweichungen der Bauelemente
Δj_E	Spieländerung durch Elastizität
Δj_F	Spieländerung durch Verzahnungs-Einzelabweichungen
Δj_Q	Spieländerung durch Quellung oder Schwund
Δj_θ	Spieländerung durch Erwärmung
$\Delta j_{\Sigma\beta}$	Spieländerung durch Unparallelität der Bohrungsachsen
$\Delta\theta_G$	Temperaturdifferenz des Gehäuses gegen 20 °C
$\Delta\theta_R$	Temperaturdifferenz der Räder gegen 20 °C
ΣA_{sne}	Summe der oberen Abmaße der Zahndicke des Radpaares im Normalschnitt
ΣA_{sni}	Summe der unteren Abmaße der Zahndicke des Radpaares im Normalschnitt
ΣA_{ste}	Summe der oberen Abmaße der Zahndicke des Radpaares im Stirnschnitt
ΣA_{sti}	Summe der unteren Abmaße der Zahndicke des Radpaares im Stirnschnitt

Zusätzliche Indizes:

1	für Größen an dem kleineren Rad einer Radpaarung
2	für Größen an dem größeren Rad einer Radpaarung
K	wenn mit Kugeln gemessen wird
R	wenn mit Rollen gemessen wird

A.1.2 Zusammenhang von Flankenspiel und Abmaßen

Im Gegensatz zu Rundpassungen kann das Spiel bei Verzahnungspassungen nicht direkt aus den Abmaßen berechnet werden, da eine Reihe von Einflüssen spielverändernd wirkt. Wird umgekehrt ein bestimmtes Kleinst- oder Größtspiel verlangt, so kann nicht dieser Betrag einfach auf die Abmaße verteilt werden, sondern es sind die spielverändernden Einflüsse in der Rechnung zu berücksichtigen.

A.2 Spielverändernde Einflüsse

A.2.1 Erwärmung

Eine Spieländerung durch Erwärmung tritt nicht nur auf, wenn Räder und Gehäuse aus Werkstoffen mit verschiedenem Längenausdehnungskoeffizient sind, sondern auch dadurch, daß besonders beim Anlauf des Getriebes die Erwärmung von Rädern und Gehäusen verschieden ist. Dieser Anteil ist häufig von allen Anteilen am größten. Eine Temperaturdifferenz kommt einer Achsabstandsänderung des Gehäuses gleich.

A.2.2 Achsabstandstoleranz des Gehäuses

Durch diese Toleranz wird der theoretische Achsabstand verkleinert oder vergrößert, da nach DIN 3964 mit plus/minus toleriert wird. Hierdurch verringert bzw. vergrößert sich das Spiel.

A.2.3 Unparallelität der Bohrungsachsen im Gehäuse

Die Unparallelität der Bohrungsachsen im Gehäuse kann aus Achsneigung und Achsschränkung bestehen. Achsneigungen brauchen nicht berücksichtigt zu werden, weil sie über die Achsabstandstoleranzen nicht hinausgehen dürfen und somit durch diese bereits erfaßt sind. Achsschränkungen wirken immer spielvermindernd.

A.2.4 Verzahnungs-Einzelabweichungen

Verzahnungs-Einzelabweichungen können am Umfang des Rades verschieden wirken. In jedem Fall ist jedoch an einer oder mehreren Stellen eine Spielverminderung wirksam bei Flankenlinien-, Profil- und Teilungs-Einzelabweichungen sowie bei Zahndickenschwankungen. Diese Abweichungen stehen zum Teil miteinander in Zusammenhang, so daß in keinem Fall eine Addition der größtzulässigen Werte stattfindet.

Die Rundlaufabweichung braucht nicht berücksichtigt zu werden, wenn die Zahndicke toleriert wird, denn die Zahndicke und dementsprechend auch die Zahndickenschwankung sind über den Teilkreis auf die Radachse bezogen.

A.2.5 Quellung oder Schwund

Quellung oder Schwund von Kunststoffen in feuchter Luft, Wasser, Kohlenwasserstoffen oder anderen Chemikalien verändern das Flankenspiel.

Ist der Werkstoff vor der Bearbeitung entsprechend vorbehandelt (vorgequollen), so ist in der Regel die spätere Veränderung so gering, daß sie unberücksichtigt bleiben kann.

A.2.6 Lage-, Form- und Maßabweichungen der Bauelemente

Hier handelt es sich in erster Linie um Rundlaufabweichungen von Lagern (Innen- zu Außendurchmesser) und ineinander gelagerten feststehenden oder drehenden Teilen. Sie können sich addieren oder aufheben, bei zueinander beweglichen (drehenden) Teilen auch periodisch. Sie wirken sowohl spielvergrößernd als auch spielverkleinernd. Zahndickenänderungen durch Formänderungen beim Aufschumpfen von verzahnten Teilen sind gesondert zu behandeln.

A.2.7 Elastizität

Der Einfluß der Elastizität setzt sich hauptsächlich aus einer Verlagerung in den Lagern und Gehäusen und einer Durchbiegung der Wellen und Gehäuse unter Last zusammen. Er wirkt fast stets spielvergrößernd im Betriebszustand. Wird er bei der Berechnung berücksichtigt, so wird das Abnahme-Flankenspiel kleiner.

A.3 Wirkungsweise der spielverändernden Einflüsse

Die Wirkungsweise der spielverändernden Einflüsse ist in Bild A.1 schematisch dargestellt. Sie ist verschieden je nachdem, ob die Berechnung für das Kleinstspiel oder für das Größtspiel erfolgt. Beim Kleinstspiel verlangt jede Spielverminderung eine Vergrößerung der Beträge für die Zahndickenabmaße. Da die Abmaße immer negativ sind, ist dies im Schema durch einen nach unten gerichteten Pfeil dargestellt. Berücksichtigt wird immer der ungünstigste Zustand. Bei der Berechnung für das Größtspiel kann dies ein anderer Zustand sein, so daß dieser kleinere oder umgekehrte Wirkung haben kann.