

Dipl.-Ing. Frank Mannewitz, Kaufungen

**Prozeßfähige Tolerierung  
von Bauteilen und  
Baugruppen – ein Lösungs-  
ansatz zur Optimierung der  
Werkstattfertigung  
im Informationsverbund  
zwischen CAD und CAQ**

Reihe **20**: Rechnerunterstützte  
Verfahren

Nr. **256**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Funktions- und prozeßgerechte Tolerierung.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	3
<b>2 Analyse des Standes der Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Kostenverantwortung der Konstruktion .....	4
2.2 Verfahren zur Toleranzanalyse.....	11
2.2.1 Methode der arithmetischen Toleranzanalyse.....	12
2.2.2 Methode der statistischen Toleranzanalyse.....	13
2.2.3 Methode der quadratischen Toleranzanalyse .....	15
2.2.4 Methode zur Toleranzanalyse nach Spotts.....	15
2.2.5 Methode der modifizierten quadratischen Toleranzanalyse.....	15
2.2.6 Methode der geschätzten Mittelwertverschiebung zur Toleranzanalyse .....	16
2.2.7 Methode des Momentenverfahrens zur Toleranzanalyse.....	17
2.2.8 Toleranzanalyse nach der Monte-Carlo-Simulation .....	17
2.2.9 Toleranzanalyse nach der hybriden Methode.....	18
2.3 Verfahren zur Toleranzsynthese .....	21
2.3.1 Toleranzsynthese basierend auf der Toleranzrechnung .....	21
2.3.1.1 Methode der proportionalen Skalierung .....	22
2.3.1.2 Methode des konstanten Präzisionsfaktors.....	22
2.3.2 Toleranzsynthese basierend auf Toleranzkostenmodellen.....	23
2.3.2.1 Methode der Toleranzsynthese nach Spotts .....	25
2.3.2.2 Methode der geometrischen Programmierung.....	25
2.3.3 Toleranzsynthese basierend auf linearisierten Toleranz-Kosten-Funktionen.....	26
2.3.4 Toleranzsynthese basierend auf Kostenfunktionen nach Piwonski's .....	26
2.4 Fertigungsorientierte Abbildung der Toleranzen .....	29
2.4.1 Die Losgröße als Einflußfaktor .....	29
2.4.2 Einfluß der zeitlichen Veränderung von Mittelwerten und Standardabweichung.....	30
2.4.3 Die Rechteck-, Dreieck- und Trapezverteilung in der Praxis .....	32
2.4.4 Linkssteile schiefe Fertigungsverteilungen.....	34
2.4.5 Die Nadelverteilung und deren praktische Bedeutung.....	35
2.5 Systemanforderung zur rechnerunterstützten Tolerierung .....	36
<b>3 Toleranzen zur Sicherung der Funktion und Austauschbarkeit</b>	<b>37</b>
3.1 Semantik von Maßtoleranzen .....	41
3.2 Semantik von Form- und Lagetoleranzen .....	42
3.2.1 Toleranzzonen der Form- und Lagetoleranzen .....	44
3.3 Semantik von Allgmeintoleranzen.....	46
3.3.1 Allgmeintoleranzen für Rechtwinkligkeit und Neigung .....	48
3.4 Semantik der Tolerierungsgrundsätze .....	49
3.4.1 Tolerierungsgrundsatz des Hüllprinzips nach DIN 7167.....	49
3.4.2 Tolerierungsgrundsatz des Unabhängigkeitsprinzips nach DIN ISO 8015 .....	52

<b>4 Theorie der geometrischen Maß- und Toleranzketten</b>	<b>54</b>
4.1 Bemaßung geometrischer Eigenschaften.....	54
4.2 Direkte und indirekte Funktionsmerkmale.....	57
4.3 Der Maßplan zur schematischen Darstellung von linearen Maßketten.....	59
4.4 Toleriertes Maß in einer geometrischen Maßkette.....	61
4.5 Schließmaß in einer linearen geometrischen Maßkette.....	62
4.6 Integration von Form- und Lagetoleranzen in eine lineare Maßkette.....	64
<b>5 Wahrscheinlichkeitsrechnung quantitativer Merkmale zur Abbildung von Toleranzen</b>	<b>67</b>
5.1 Statistische Grundlagen.....	67
5.2 Maßzahlen einer Verteilung.....	71
5.2.1 Mittelwert einer stetigen Verteilung.....	71
5.2.2 Varianz einer stetigen Verteilung.....	72
5.2.3 Momente einer Verteilung.....	72
5.2.4 Schiefe einer Verteilung.....	73
5.3 Normalverteilung.....	73
5.3.1 Zufallsstrebereich hinsichtlich der Normalverteilung.....	75
5.4 Nichtnormale Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	76
5.4.1 Rechteckverteilung und deren Parameter.....	77
5.4.2 Dreieckverteilung und deren Parameter.....	79
5.4.3 Trapezverteilung und deren Parameter.....	81
5.4.4 Histogramm zur Darstellung beliebiger Dichtefunktionen.....	85
5.5 Stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Beschreibung einseitig tolerierter Merkmale.....	90
5.5.1 Lognormalverteilung und deren Parameter.....	91
5.5.2 Rayleigh-Verteilung und deren Parameter.....	92
5.5.3 Nadelverteilung.....	93
5.6 Zufallsstrebereich für Mittelwerte.....	94
5.6.1 Abweichungsfortpflanzungsgesetz.....	94
5.6.2 Der Zentrale Grenzwertsatz.....	95
5.7 Faltung von Verteilungsfunktionen.....	98
5.7.1 Angewandtes Verfahren.....	102
<b>6 Parameterorientiertes Toleranzmodell zur Approximation linearer Maßketten</b>	<b>106</b>
6.1 Herleitung der Gesamtdichtefunktion und Bestimmung der Parameter.....	106
6.2 Toleranzanalyse unter Verwendung des parameterorientierten Modells.....	115
6.3 Toleranzsynthese unter Verwendung des parameterorientierten Modells.....	116
6.3.1 Toleranzsynthese bei Vorgabe der Funktionstoleranz.....	117
6.3.2 Toleranzsynthese bei restriktiver Aufteilung.....	117
6.3.3 Optimierung der Relationsmultiplikatoren.....	119
6.4 Explizite Toleranzanalyse bei Vorlage symmetrischer Einzelverteilungen.....	121
6.4.1 Ergebnisdarstellung aus den gegenwärtigen Methoden zur Toleranzanalyse.....	123
6.4.2 Ergebnisdarstellung der Faltung.....	124
6.4.3 Ergebnisdarstellung des parameterorientierten Toleranzmodells.....	124
6.5 Explizite Toleranzsynthese bei Vorlage symmetrischer Einzelverteilungen.....	127
6.5.1 Toleranzsynthese in Form der Umwichtung der Toleranzfelder.....	128
6.5.2 Toleranzsynthese und die Bedeutung der Relationsmultiplikatoren.....	129

6.5.3 Toleranzsynthese bei restriktiver Aufteilung der Funktionstoleranz .....	132
6.6 Toleranzanalyse und -synthese bei Vorlage asymmetrischer Einzelverteilungen .....	133
6.7 Explizite Toleranzanalyse und -synthese bei Vorlage symmetrischer Einzelverteilungen .....	135
6.8 Aufteilung der statistischen Toleranzpotentiale in Form der Abmaßbestimmung .....	138
6.8.1 Abmaßbestimmung des Schließmaßes und der Einzelmaße .....	138
6.8.2 Abmaßbestimmung bei restriktiver Aufteilung der Funktionstoleranz .....	142
6.8.3 Explizite Abmaßbestimmung für eine Toleranzanalyse am Beispiel der Scheibenkupplung .....	144
<b>7 Parameterorientiertes Toleranzmodell zur Approximation nichtlinearer Maßketten</b> .....	<b>147</b>
7.1 Nichtlineare physikalische Maßketten .....	147
7.2 Herleitung des parameterorientierten Lösungsansatzes zur nichtlinearen Maßkettenapproximation .....	152
7.3 Toleranzanalyse und -synthese nichtlinearer Maßketten .....	155
7.4 Aufteilung der statistischen Toleranzpotentiale in Form der Abmaßbestimmung .....	157
7.4.1 Abmaßbestimmung des Schließmaßes und der Einzelmaße .....	157
7.4.2 Abmaßbestimmung bei restriktiver Aufteilung der Funktionstoleranz .....	159
7.5 Explizite Toleranzanalyse und -synthese einer nichtlinearen Maßkette am Beispiel einer geraden Drehstabfeder .....	160
7.5.1 Toleranzanalyse und -synthese bei Vorlage symmetrischer Einzelverteilungen .....	164
<b>8 Qualitätsverbesserung durch den Informationsfluß zwischen Fertigung und Konstruktion</b> .....	<b>172</b>
8.1 Methoden der Qualitätssicherung .....	172
8.2 Grundlagen der Prozeßsicherheit .....	174
8.3 Ermittlung der statistischen Prozeßkennwerte .....	178
8.3.1 Maschinenfähigkeit .....	179
8.3.2 Prozeßfähigkeit .....	180
8.4 Statistische Prozeßregelung .....	182
8.4.1 Qualitätsregelkarten .....	182
8.4.2 Prozeßregelung mit Qualitätsregelkarten .....	184
<b>9 Strategie zur Implementierung und Handhabung des parameterorientierten Toleranzmodells</b> .....	<b>186</b>
9.1 Programmsystem zur rechnerunterstützten linearen und nichtlinearen Toleranzanalyse und -synthese .....	187
9.2 Programmsystem zur CAD-unterstützten linearen Toleranzanalyse und -synthese .....	191

---

<b>10 Zusammenfassung</b>	<b>195</b>
<b>Anhang A: Wahrscheinlichkeitsintegral</b>	<b>197</b>
<b>Anhang B: Ablaufplan des Rechenmoduls APPROXI</b>	<b>198</b>
<b>Anhang C: Ablaufstruktur des Toleranzmoduls</b>	<b>199</b>
<b>11 Literaturverzeichnis</b>	<b>201</b>