

***Forschungsberichte***

---

***iwb***

***Band 171***

***Stefan von Praun***

***Toleranzanalyse nachgiebiger  
Baugruppen im Produkt-  
entstehungsprozess***

---

***herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

---

***Herbert Utz Verlag***

**UTZ**

# Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des  
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe  
auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der  
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei  
nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2003

ISBN 3-8316-0202-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen	xiii
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Handlungsbedarf . . . . .	2
1.2 Zielsetzung . . . . .	4
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse</b>	<b>9</b>
2.1 Analyse des Produktentstehungsprozesses . . . . .	9
2.1.1 Integrierte Produkt- und Prozessentwicklung . . . . .	9
2.1.2 Die Digital Mock-up Strategie . . . . .	12
2.1.3 Qualität im Produktentstehungsprozess . . . . .	14
2.1.4 Tolerierung im Produktentstehungsprozess . . . . .	16
2.2 Modellbildung für die Darstellung von Geometrieabweichungen . . . . .	18
2.2.1 Analyse der Normen und Richtlinien zur Tolerierung	19
2.2.2 Attributive Repräsentation von Toleranzinformation	22
2.2.3 Darstellung von Toleranzen in mathematischen Modellen . . . . .	23
2.3 Methoden der Toleranzsynthese . . . . .	26
2.4 Methoden der Toleranzanalyse . . . . .	29

---

2.4.1	Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen . . . . .	33
2.4.2	Arithmetische Toleranzanalyse . . . . .	35
2.4.3	Statistische Toleranzanalyse . . . . .	36
2.4.4	Weitere wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden	37
2.5	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen</b>	<b>41</b>
3.1	Charakterisierung der grundlegenden Idee . . . . .	42
3.2	Biegebalkenmodelle zur Analyse von Montageprozessen .	44
3.2.1	Annahmen . . . . .	45
3.2.2	Biegebalkenmodell . . . . .	46
3.2.3	Einfluss der Blechdicke . . . . .	47
3.2.4	Einfluss der Fügereihenfolge . . . . .	51
3.2.5	Auswirkung der Lage und Anzahl der Schweißpunkte	54
3.2.6	Zusammenfassung allgemeiner Erkenntnisse . . . . .	56
3.3	Grundlegende Konzepte des Fügens nachgiebiger Bauteile	57
3.3.1	Idealisierung des Systems . . . . .	57
3.3.2	Auswirkung von Verformungen im Montageprozess	59
3.4	Repräsentation nachgiebiger Baugruppen . . . . .	60
3.4.1	Geometrie und Werkstoffeigenschaften . . . . .	61
3.4.2	Paarungs- und Funktionselemente . . . . .	63
3.4.3	Abweichungen . . . . .	67
3.4.4	Kräfte, Verformungen und Gleichgewichtsbedin- gungen . . . . .	68
3.5	Modellierung des Montageprozesses . . . . .	69

---

3.5.1	Strukturierung des Montageprozesses . . . . .	70
3.5.2	Bausteine einer Fügeoperation . . . . .	72
3.5.3	Positionieren . . . . .	74
3.5.4	Einspannen . . . . .	74
3.5.5	Fügen . . . . .	79
3.5.6	Ausspannen . . . . .	81
3.5.7	Analyse der Reihenfolge der Fügemethoden . . . . .	83
3.6	Mathematisch mechanisches Modell zur Toleranzanalyse . . . . .	90
3.6.1	Monte Carlo Simulation . . . . .	91
3.6.2	Gegenüberstellung des mathematischen und me- chanischen Modells . . . . .	92
3.6.3	Ablauf der Toleranzanalyse . . . . .	93
3.7	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	94
<b>4</b>	<b>Toleranzmanagement im Produktentstehungsprozess</b>	<b>97</b>
4.1	Ursachen für Toleranzprobleme . . . . .	97
4.2	Grundlagen und Begriffsbestimmung . . . . .	98
4.2.1	Toleranzmanagement . . . . .	99
4.2.2	Idealprozess . . . . .	100
4.3	Iterationszyklus der Toleranzsynthese . . . . .	102
4.3.1	Funktions- und Qualitätsanforderungen . . . . .	103
4.3.2	Montage- und Fertigungsprozess . . . . .	104
4.4	Nominalgeometrie und Toleranzanalyse . . . . .	104
4.4.1	Statisch bestimmte Baugruppen . . . . .	105
4.4.2	Statisch unterbestimmte Baugruppen . . . . .	106

4.4.3	Statisch überbestimmte Baugruppen . . . . .	106
4.5	Toleranzmanagement im Produktentstehungsprozess . . .	108
4.5.1	Definitionsphase Nominalgeometrie . . . . .	108
4.5.2	Definitionsphase Toleranzen . . . . .	111
4.5.3	Diagnosephase . . . . .	112
4.6	Bereichsübergreifender Informationsfluss . . . . .	113
4.7	Phasen der Produktentstehung . . . . .	115
4.7.1	Produktplanung . . . . .	116
4.7.2	Produktkonstruktion . . . . .	118
4.7.3	Produkterprobung . . . . .	121
4.7.4	Produktherstellung . . . . .	123
4.8	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Exemplarische Anwendung</b>	<b>127</b>
5.1	Definition der Formelemente . . . . .	127
5.2	Bedeutung von Vorrichtungen . . . . .	129
5.3	Konflikt von Funktionseigenschaften . . . . .	134
5.4	Analyse von Konzepten . . . . .	136
5.5	Bedeutung der Nachgiebigkeit für die Baugruppenfunktion	138
5.6	Bedeutung der Nachgiebigkeit für den Montageprozess . .	139
5.7	Exemplarische Berechnung für nachgiebige Baugruppen .	142
<b>6</b>	<b>Potential und Nutzen für die Produktionstechnik</b>	<b>147</b>
6.1	Begriffsbestimmung . . . . .	147
6.2	Technisch-Wirtschaftliche Bewertung . . . . .	148

---

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>
<b>A Steifigkeitsmatrix eines Biegebalkenelementes</b>	<b>183</b>
<b>B Analyse der Blechdicke</b>	<b>188</b>
<b>C Analyse der Fügereihenfolge</b>	<b>192</b>
<b>D Analyse der Lage und Anzahl der Schweißpunkte</b>	<b>195</b>
<b>E Analyse grundlegender Ausrichtkonzepte</b>	<b>198</b>
<b>F Repräsentation nachgiebiger Baugruppen</b>	<b>201</b>
<b>G Modellierung des Montageprozesses</b>	<b>211</b>

# 1 Einführung

Neue Technologien bestimmen zunehmend den Erfolg vieler Unternehmen und ganzer Märkte. War in der Vergangenheit die Technologie ein abgeleitetes Ergebnis aus der Unternehmensstrategie, so öffnen heute moderne Technologien wie das Internet weitere Geschäftsfelder und -ideen, durch die neue Märkte erschlossen werden. Damit wird beispielsweise die Informationstechnologie ein treibender Faktor für Unternehmensstrategien. Die Leistungsfähigkeit von Computern und Softwareanwendungen ist in den letzten Jahren enorm gewachsen und ermöglicht uns heute, völlig neue Wege in der Produktentwicklung zu gehen. Die bewährten Strategien müssen einer kritischen Betrachtung unterzogen werden.

Informationstechnologie darf jedoch in diesem Zusammenhang nie als alleinstehender Faktor gesehen werden. Nur das integrierte, gesamtheitliche Betrachten von Strategien, Prozessen, Mitarbeitern und Technologien sichert das Überleben und erlaubt wirkungsvolles Agieren von Unternehmen in sich ständig ändernden Märkten. Die Fähigkeit schnell und kostengünstig neue Produkte zu entwickeln ist heute auf den globalen Märkten ein Schlüssel zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie.

Der Einsatz von Informationstechnologie ist nie die Ursache für revolutionäre Veränderungen, kann jedoch der Auslöser für eine Neugestaltung von Geschäftsprozessen sein, um einen effizienten Einsatz der neuen Technologien zu ermöglichen (HOLMES 1998). Die nicht widerspruchsfreie Wechselwirkung zwischen Geschäftsprozess und Nutzung von Informationstechnologie spielt dabei eine fundamentale Rolle: Einerseits ist Informationstechnologie ein unverzichtbares Werkzeug für eine effiziente Implementierung von Geschäftsprozessen, andererseits können mit Informationssystemen, wie vor allem in großen Unternehmen in den letzten Jahrzehnten häufig anzutreffen, einmal eingeführte und nicht mehr zeitgemäße Abläufe zementiert werden. Eine strategisch und technisch ausgewogene und kontinuierliche Evolution der Geschäftsprozesse und der Nutzung von Informationstechnologie wird zunehmend als einer der entscheidenden Erfolgsfaktoren im heutigen weltweiten Wettbewerb er-



kannt. Unternehmen, welche in der Lage sind schnell und flexibel die Nutzung von Informationstechnologie basierend auf Best-in-Class Software umzusetzen, werden gegenüber der Konkurrenz einen entscheidenden Vorsprung erringen.

Informationstechnologie wird im Rahmen einer Digital Mock-up Strategie zur Absicherung von Produkt und Produktionsprozess in der Produktentwicklung eingesetzt. Die bisher im Entwicklungsprozess benötigten physischen Modelle sollen soweit wie möglich durch Simulation und Berechnung mit Hilfe von digitalen Modellen ersetzt werden. Die Verifikation von Produkteigenschaften, wie Design, Qualität oder Funktion, sowie Montage- und Fertigungsprozessen mit Hilfe der Toleranzsimulation als ein Baustein einer Digital Mock-up Strategie ist das Thema der vorliegenden Arbeit.

## 1.1 Motivation und Handlungsbedarf

Die Wettbewerbssituation für Produktionsunternehmen hat sich in den letzten Jahren durch die zunehmende Globalisierung der Märkte und aufgrund steigender Innovationsdynamik grundlegend verändert. Die Herausforderungen durch kürzere Entwicklungszeiten, zunehmende Variantenvielfalt und steigende Produktkomplexität sowie hohe Qualitätsanforderungen bei gleichzeitiger Reduzierung der Kosten spiegeln sich in der steigenden Komplexität der Produktionssysteme und deren Planung wieder. Der verstärkte Einsatz von Informationstechnologie in Kombination mit einer Neugestaltung von Geschäftsprozessen ermöglicht die effiziente Beherrschung dieser Komplexität (REINHART & PRAUN 1998) und die Verkürzung der Entwicklungszeit. Der Wert der Entwicklungsgeschwindigkeit wurde 1983 erstmals durch REINERTSEN (1983, 1998) in einer von McKinsey durchgeführten Studie quantifiziert. Danach kann eine sechsmonatige Verzögerung der Produktentwicklung 33 Prozent der Lebenszyklusprofite eines Produktes kosten. Eine Steigerung der Entwicklungskosten um 50 Prozent führt jedoch lediglich zu einer Einbuße der durch die Vermarktung eines Produktes erzielten Gewinne von unter 4

Prozent. Die Aufwendungen für den Einsatz von Informationstechnologie lassen sich daher durch Effizienzsteigerungen in der Produktentwicklung rechtfertigen.

Vor diesem Hintergrund sind neue Ansätze für den Einsatz von Informationstechnologie im Produktentstehungsprozess erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Technologie der Toleranzsimulation betrachtet. Die in Abbildung 1.1 dargestellten Zielkonflikte sind für das Management von Toleranzen im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen. Die gestiegenen Anforderungen an neue, innovative Produkte resultieren in zunehmender Funktionalität und verbesserter Qualität. Dies führt zu einer steigenden Komplexität der Produkte aber auch der Produktionsprozesse. Trotzdem müssen die Entwicklungszeiten reduziert werden. Die Kosten für eine sichere und zuverlässige Serienfertigung und -montage steigen durch die hohen Qualitätsanforderungen und die steigende Komplexität. Dennoch fordert der Kunde niedrige Preise unterstützt durch die Globalisierung der Märkte und den dadurch zunehmenden weltweiten Wettbewerb.

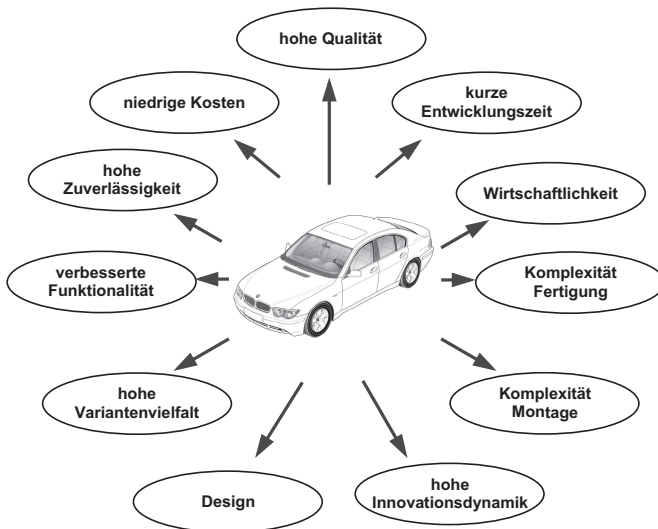


Abbildung 1.1: Spannungsfeld des Toleranzmanagements

Um diese konkurrierenden Ziele zu berücksichtigen, ist nicht nur eine Weiterentwicklung der Methoden für die Analyse von Toleranzen erforderlich, sondern eine angepasste systematische Vorgehensweise zum Einsatz dieser Technologie im Produktentstehungsprozess. Es ist ein Konzept für das Management von Toleranzen zu entwickeln, welches das ganze Spektrum der bisher unabhängigen Entwicklungen in den Bereichen Konstruktion und Entwicklung, Versuch, Fertigung, Montage und Qualitätssicherung in seiner Gesamtheit betrachtet und nutzbar macht. Dieses Konzept soll sowohl bekannte Entwicklungen als auch zukünftig zu erwartende Fortschritte in den genannten Bereichen berücksichtigen.

## 1.2 Zielsetzung

Zukünftige Toleranzmanagementsysteme sollen im Produktentstehungsprozess im Rahmen einer Digital Mock-up Strategie effizient genutzt werden können. Dazu sind zum einen neue Methoden zur Toleranzanalyse und -synthese zu entwickeln, zum anderen ist die Anwendung der Methoden und die Umsetzung im Produktentstehungsprozess zu klären.

Das Verständnis und die Basis für eine Weiterentwicklung der Methoden und deren Anwendung in der Produktentstehung soll durch eine Analyse der Grundlagen und der bisherigen Forschungsarbeiten auf den Gebieten der Produktentstehung, der Modellierung von Toleranzen, der Toleranzsynthese und der Toleranzanalyse geschaffen werden.

Aufbauend auf diesen Grundlagen ist es das zentrale Ziel der Arbeit, ein Modell und eine Methode zur Toleranzanalyse nachgiebiger, d. h. linear elastischer, Baugruppen zu erarbeiten. Diese neue Methode zur Toleranzsimulation nachgiebiger Baugruppen bildet neben den existierenden Methoden zur Analyse starrer Baugruppen den Kristallisationskern eines durchgängigen Toleranzmanagementprozesses. Die Realisierbarkeit des Konzeptes und die Umsetzung im Produktentstehungsprozess soll durch eine Analyse der Modellparameter anhand von einfachen Beispielen (Biegebalken) veranschaulicht werden.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, Konzepte für eine Integration des Toleranzmanagements in den Produktentstehungsprozess zu entwickeln und vorzuschlagen. Dazu müssen zum einen allgemeine methodische Grundlagen für die Anwendung der Toleranzsimulation im Produktentstehungsprozess geschaffen werden, zum anderen ist die Bedeutung der Methoden zur Toleranzanalyse für das Management von Toleranzen und die Auswirkungen auf die unterschiedlichen Bereiche eines Unternehmens zu klären.

Das integrierte Management von Toleranzen im Produktentstehungsprozess muss an die Stelle der separaten Betrachtung unterschiedlicher Aspekte in verschiedenen Phasen der Produktentstehung treten. Sowohl die neuen Methoden als auch die organisatorischen Abläufe sind als Randbedingungen zu berücksichtigen.

Schließlich ist es auch Ziel der Arbeit, das Potential für zukünftige Entwicklungen aufzuzeigen und die Voraussetzungen für weitere Arbeiten auf dem vielschichtigen Gebiet des Digital Mock-up und des Toleranzmanagements zu schaffen. Die Integration der Toleranzanalysemethoden in ein Digital Mock-up Konzept ist beispielsweise nicht Zielsetzung der vorliegenden Arbeit und bietet sicherlich großes Potential für weitere Forschungstätigkeit.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht **Kapitel 3** mit der Entwicklung eines Modells und einer Methode zur Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen und **Kapitel 4** mit der Konzeption eines Toleranzmanagementprozesses und der Integration in den Produktentstehungsprozess. Die anderen Kapitel arbeiten auf dieses zentrale Thema hin bzw. gehen von ihm aus. Abbildung 1.2 veranschaulicht die Gliederung der Arbeit.

**Kapitel 1** gibt eine **Einführung** und zeigt die Motivation für das Thema dieser Arbeit.

**Kapitel 2** beschreibt die **Grundlagen und den Stand der Erkenntnisse**. Mit Hilfe einer Analyse des Produktentstehungsprozesses

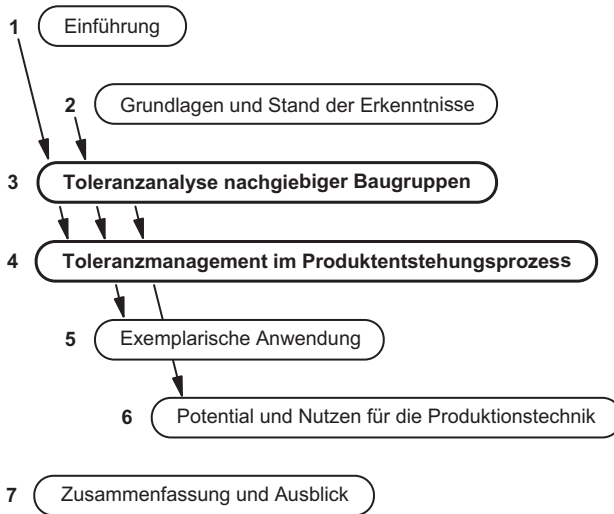


Abbildung 1.2: Gliederung der Arbeit

werden Problemfelder und Herausforderungen für die Entwicklung eines integrierten Toleranzmanagements aufgezeigt. Neben der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung sind die Randbedingungen einer Digital Mock-up Strategie und des Qualitätsmanagements zu betrachten. Die Modellbildung für die Darstellung von Geometrieabweichungen wird behandelt. Die Analyse der DIN ISO Normen zur Tolerierung ist Ausgangspunkt für die Vorstellung unterschiedlicher Forschungsarbeiten zur attributiven Repräsentation von Toleranzinformation und zur Darstellung von Toleranzen in mathematischen Modellen. Auf dieser Grundlage erfolgt die Darstellung der Methoden der Toleranzsynthese, wobei u. a. die Defizite von Toleranzkostenmodellen und deren zunehmende Komplexität bei der Anwendung von Form- und Lagetoleranzen aufgezeigt wird. Die bisher entwickelten Methoden der Toleranzanalyse werden nachfolgend untersucht. Dazu erfolgt zunächst ein Hinweis auf die erforderlichen mathematischen Grundlagen. Auf dieser Basis werden die grundlegenden Toleranzanalysemethoden chronologisch bzw. nach zunehmender Komplexität geordnet kurz vorgestellt bzw. angeführt.

**Kapitel 3** beschreibt das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell zur **Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen**. Zunächst wird die grundlegende Idee mit Hilfe eines einfachen eindimensionalen Beispiels charakterisiert. Anschließend ist der Einfluss der unterschiedlichen Parameter der Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen anhand von Biegebalkenmodellen zu untersuchen. Die Betrachtung grundlegender Konzepte des Fügens nachgiebiger Bauteile bildet die Grundlage für die Repräsentation nachgiebiger Baugruppen. Auf dieser Basis wird ein Modell des Montageprozesses entwickelt, welches die Berechnung der Fortpflanzung von Abweichungen in nachgiebigen Baugruppen ermöglicht. Abschließend wird die stochastische Natur der Fertigungstoleranzen mit Hilfe eines mathematisch-mechanischen Modells abgebildet.

**Kapitel 4** stellt ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Konzept für ein integriertes **Toleranzmanagement im Produktentstehungsprozess** vor. Die Ursachen für Toleranzprobleme in der Produktentstehung werden erörtert. Nach der Vorstellung der erforderlichen Grundlagen und der Bestimmung der Begriffe wird ein Iterationszyklus der Toleranzsynthese entwickelt. Der Zusammenhang zwischen der Definition der Nominalgeometrie und der geeigneten Wahl der Toleranzanalysemethode wird durch eine Klassifizierung der Baugruppen anhand der statischen Bestimmtheit aufgezeigt. Auf dieser Basis wird ein Toleranzmanagementprozess vorgestellt, welcher die Mikro-Logik für die Anwendung der entwickelten Methoden in den unterschiedlichen Phasen der Produktentstehung beschreibt. Der bereichsübergreifende Informationsfluss und die Anwendung dieser Mikro-Logik in den Phasen der Produktentstehung wird abschließend betrachtet.

**Kapitel 5** zeigt die **exemplarische Anwendung** der entwickelten Modelle, Methoden und Konzepte anhand von unterschiedlichen Beispielen.

**Kapitel 6** erläutert explizit das **Potential und den Nutzen für die Produktionstechnik**, wobei eine Integration eines durchgängigen Toleranzmanagements in den Produktentstehungsprozess natürlich weit darüberhinausgehende Vorteile verspricht. Die Analyse des Begriffs Produktionstechnik führt zu einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung der

Arbeit.

**Kapitel 7** gibt eine **Zusammenfassung und einen Ausblick** auf zukünftige Entwicklungen, Forschungsziele und Forschungsfelder.