

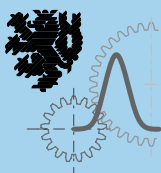
## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 436

Christoph Schluer, M.Sc.,  
Solingen

## Ein geometriebasierter Ansatz zur Toleranz- analyse: Beitrag zum robusten Design flexibler Baugruppen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des  
**Lehrstuhls für Konstruktion**  
an der Bergischen Universität Wuppertal



# **Ein geometriebasierter Ansatz zur Toleranzanalyse: Beitrag zum robusten Design flexibler Baugruppen**

Von der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
der Bergischen Universität Wuppertal  
genehmigte Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von  
**Christoph Schluer**  
aus Solingen

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Gust  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Flörkemeier

Wuppertal 2016

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Friederike Deuerler  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Gust  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Flörkemeier  
Beisitzer: Prof. Dr.-Ing. Udo Pietzsch  
Tag der mündlichen Prüfung: 20.09.2016

# Fortschritt-Berichte VDI

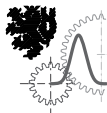
Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Christoph Schluer, M. Sc.,  
Solingen

Nr. 436

Ein geometriebasierter  
Ansatz zur Toleranz-  
analyse: Beitrag zum  
robusten Design flexibler  
Baugruppen



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des  
**Lehrstuhls für Konstruktion**  
an der Bergischen Universität Wuppertal

Schluer, Christoph

## **Ein geometriebasierter Ansatz zur Toleranzanalyse: Beitrag zum robusten Design flexibler Baugruppen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 436. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

156 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen.

ISBN 978-3-18-343601-9, ISSN 0178-949X,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Geometriebasierte Toleranzanalyse – Toleranzsimulation – Nichtideale Geometrie – Flexible Baugruppen – Robuste Auslegung

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieurinnen und Ingenieure aus dem Bereich der Produktentwicklung und Simulation. Sie befasst sich mit einem geometriebasierten Ansatz zur Toleranzanalyse. Dieser stellt die toleranzbedingten Abweichungen der Bauteile schon im 3D-Datensatz als realitätsnahe Abweichungen von der idealen Geometrie dar. Somit wird eine effektive Abschätzung des Toleranzeinflusses auf die Funktion von Baugruppen ermöglicht. Daneben werden die numerischen Ergebnisse durch Untersuchungen auf einem Prüfstand validiert.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

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

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 468

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-343601-9

---

## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktiv der Bergischen Universität Wuppertal.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Gust für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Förderung der Arbeit durch seine fortwährenden Anregungen und den Freiraum, den er mir bei der Forschung ermöglichte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K.-H. Flörkemeier danke ich herzlich für das entgegengebrachte Interesse und die kritische Durchsicht dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Korreferats.

Frau Prof. Dr.-Ing. F. Deuerler gilt mein Dank für ihre Bereitschaft, den Vorsitz der Prüfungskommission zu übernehmen, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Pietzsch für den Beisitz in der Kommission.

Bedanken möchte ich mich auch bei all meinen Kollegen für die vielen konstruktiven Gespräche über zahlreiche Themen der Arbeit. Besonders bedanken möchte ich mich bei Matthias Obrig für die engagierte und sehr gute Arbeit als wissenschaftliche Hilfskraft im Bereich der experimentellen Validierung, sowie bei Johannes Litz für die stets interessanten Diskussionen.

Bedanken möchte ich mich vor allem bei meinen Eltern, meiner Frau Yvonne und meinen Söhnen Luca und Fynn, die durch den Verzicht auf viele gemeinsame Stunden einen erheblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit tragen.

Solingen, im Juli 2016

Christoph Schluer

---

*Für meine Familie*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>XI</b>
<b>Kurzzusammenfassung</b>	<b>XIII</b>
<b>Brief summary</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation . . . . .	1
1.2 Ziele und Gliederung dieser Arbeit . . . . .	4
<b>2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse</b>	<b>7</b>
2.1 Robustes Design in der Produktentwicklung . . . . .	7
2.1.1 Das Grundprinzip des robusten Designs . . . . .	7
2.1.2 Robust Design Methodologie . . . . .	8
2.2 Methoden der analytischen Festigkeitsberechnung . . . . .	11
2.2.1 Praktische Festigkeitsberechnung . . . . .	13
2.2.2 Festigkeitsberechnung nach Norm DIN 743 Teil 1-4 . . . . .	14
2.2.3 Bauteilauslegung mit der FKM Richtlinie . . . . .	17
2.3 Stand der geometrischen Produktspezifikation . . . . .	23
2.3.1 Das GPS-Matrix System nach ISO 14638:2015 . . . . .	24
2.4 Toleranzanalysen . . . . .	28
2.4.1 Grundlagen für die statistische Tolerierung . . . . .	28
2.4.2 Arithmetische Toleranzanalyse . . . . .	31

2.4.3	Statistische Toleranzanalyse . . . . .	33
2.4.4	Umsetzung in kommerziellen Programmen zur Toleranzanalyse	36
2.4.5	Geometriebasierte Toleranzsimulation . . . . .	38
2.5	Simulationsgestützte Dimensionierung . . . . .	42
2.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Bedeutung / Einfluss von Geometrieabweichungen</b>	<b>45</b>
3.1	Einfluss der Geometrieabweichungen an einem grundlegenden Beispiel . . . . .	47
3.1.1	Geometrieerstellung und Modellaufbau . . . . .	47
3.1.2	Auswertung und Erkenntnisse . . . . .	49
3.2	Beispiel Heckschloss mit Zuziehhilfe . . . . .	50
3.2.1	Problemstellung Heckschloss mit ZZH . . . . .	50
3.2.2	Geometriaufbereitung und Diskretisierung Schlossbaugruppe	52
3.2.3	Modellbildung und Simulation Heckschloss . . . . .	54
3.2.4	Statistische Betrachtung am Beispiel Heckschloss . . . . .	54
3.2.5	Ergebnisse Beispiel Heckschloss . . . . .	55
3.3	Beispiel Viergelenkscharnier Porsche 981 . . . . .	57
3.3.1	Problemstellung Beispiel Viergelenkscharnier Porsche 981 . .	57
3.3.2	Geometriaufbereitung Viergelenkscharnier Porsche 981 . .	58
3.3.3	Modellbildung und statistische Simulation VGS Porsche 981	60
3.3.4	Ergebnisse Viergelenkscharnier Porsche 981 . . . . .	60
3.4	Schlussfolgerungen . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung von toleranzbedingten Abweichungen</b>	<b>63</b>
4.1	Workflow der neuen Methode . . . . .	63
4.2	Bolzen-Gelenkverbindung als Versuchsbaugruppe . . . . .	65
4.3	Analytische Auslegung des Bolzendurchmessers . . . . .	65
4.4	Simulieren der Bolzen-Gelenkverbindung mit CAx Software . . . . .	70
4.4.1	Berechnung mit der Finiten Elemente Methode . . . . .	70
4.4.2	Toleranzsimulation mit der Software VisVSA® . . . . .	73

4.5	Umsetzung des Workflows am Beispiel der Bolzen-Gelenkverbindung	73
4.5.1	Erzeugen der nichtidealen Geometriedaten . . . . .	73
4.5.2	Modellbildung Bolzenbaugruppe . . . . .	77
4.5.3	Sensitivitätsanalyse Bolzenbaugruppe . . . . .	77
4.5.4	Simulation und Auswertung ausgewählter Baugruppen . . .	79
4.5.5	Schlussfolgerungen bezüglich der numerischen Simulationen	83
<b>5</b>	<b>Experimentelle Validierung der numerischen Simulationen</b>	<b>84</b>
5.1	Prüfstands Aufbau und Versuchsdurchführung . . . . .	84
5.2	Messkette und Messdatenerfassung . . . . .	89
5.2.1	Sensorik und Aktorik . . . . .	90
5.2.2	Regelungstechnik und Messdatenaufnahme . . . . .	91
5.3	Prüfkonzept und Versuchsdurchführung . . . . .	96
5.4	Ergebnisse der Versuchsreihen . . . . .	100
5.5	Abgleich der Versuchsergebnisse mit den numerischen Simulationen	102
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>104</b>
<b>A</b>	<b>Technische Zeichnungen der Bolzenverbindung</b>	<b>107</b>
<b>B</b>	<b>Auswertungen</b>	<b>115</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>

# Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$A$	Bruchdehnung	%
$a_{BK}$	zyklischer Auslastungsgrad für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis	
$a_{SKb}$	statischer Auslastungsgrad	
$d$	Bauteildurchmesser	mm
$d_{eff}$	für die Wärmebehandlung maßgebender Durchmesser	mm
$F$	Kraft	N
$f_{\sigma}$	Druckfestigkeitsfaktor	
$f_{w,\sigma}$	Zug- / Druck Wechselfestigkeitsfaktor	
$j_D$	Gesamtsicherheit	
$K_A$	Anwendungsfaktor	
$K_{AK,b}$	Mittelspannungsfaktor	
$K_{BK,b}$	Betriebsfestigkeitsfaktor	
$K_{fb}$	Kerbwirkungszahl	
$K_{NL,E}$	Faktor für Gusswerkstoff GJL	
$K_{R,\sigma}$	Rauheitsfaktor	
$K_S$	Schutzschichtfaktor	
$K_{WK,b}$	Konstruktionsfaktor	
$K_V$	Randschichtfaktor	
$M_b$	Biegemoment	Nm

Symbol	Bedeutung	Einheit
$M_t$	Torsionsmoment	Nm
$N$	Zyklenzahl	
$n_\sigma, n_\tau$	Stützzahl	
$n_{pl}$	Konstruktionskennwert	
$P_{\bar{U}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit	%
$R$	Spannungsverhältnis	
$R_m$	Zugfestigkeit, „Bauteil-Normwert“ für $d_{eff}$	N/mm <sup>2</sup>
$R_{m,N}$	Normwert von $R_m$ für $d_{eff}$	N/mm <sup>2</sup>
$R_p$	Fließgrenze als Verallgemeinerung von $R_e$ oder $R_{p0,2}$ „Bauteil-Normwert“ für $d_{eff}$	N/mm <sup>2</sup>
$R_{p,N}$	Normwert von $R_p$ für $d_{eff}$	N/mm <sup>2</sup>
$R_{p0,2}$	0,2-Dehngrenze	N/mm <sup>2</sup>
$R_z$	mittlere Rauheit der Oberfläche	$\mu\text{m}$
$S$	Normalspannung bei Nennspannungen	N/mm <sup>2</sup>
$S_{AK}$	ertragbare Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit für $S_m$ bzw. für $S_{m,v}$	N/mm <sup>2</sup>
$S_a$	Spannungsamplitude	N/mm <sup>2</sup>
$S_{BK}$	Amplitude der Bauteilbetriebsfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$S_b$	Biegespannung	N/mm <sup>2</sup>
$S_D$	Sicherheit gegen Dauerbruch	
$S_F$	Sicherheit gegen Fließen	
$S_{KB}$	statische Bauteilfestigkeit	
$S_m$	Mittelspannung	N/mm <sup>2</sup>
$S_{max}$	Maximalspannung im Spannungskollektiv	N/mm <sup>2</sup>
$S_{min}$	Minimalspannung im Spannungskollektiv	N/mm <sup>2</sup>
$S_{m,v}$	Vergleichsmittelspannung	N/mm <sup>2</sup>
$S_{WK}$	Bauteil-Wechselfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$T$	Temperatur	K
$t$	Zeit	s

Symbol	Bedeutung	Einheit
$W_b$	Widerstandsmoment gegen Biegung	$\text{mm}^3$
$\sigma$	Normalbeanspruchung, örtliche Spannung	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_D$	Normalbeanspruchung, Dauerfestigkeit	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{ba}$	Amplitude der Biegespannung	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{baADK}$	ertragbare Amplitude der Biegespannung	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{BK}$	Bauteilbetriebsspannung	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{Sch,zd}$	Zugdruckschwellfestigkeit	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_W$	Werkstoff-Wechselfestigkeit für Normalspannung, „Bauteil-Normwert“ für $d_{eff}$	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{W,N}$	Normwert von $\sigma_W$ für $d_{eff}$	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{zda}$	Amplitude der Zug-/Druckspannung	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{zdADK}$	ertragbare Amplitude der Zug-/Druckspannung	$\text{N/mm}^2$
$\sigma_{zul}, \tau_{zul}$	zulässige Beanspruchungswerte	$\text{N/mm}^2$
$\tau_D$	Tangentialbeanspruchung, Dauerfestigkeit	$\text{N/mm}^2$
$\tau_{ta}$	Amplitude der Tangentialspannungen	$\text{N/mm}^2$
$\tau_{ta}$	Amplitude der Tangentialspannungen	$\text{N/mm}^2$
$\tau_{tADK}$	ertragbare Amplitude der Tangentialspannungen	$\text{N/mm}^2$
$\tau_W$	Werkstoff-Wechselfestigkeit für Schubspannungen (Schubwechselfestigkeit), „Bauteil-Normwert“ für $d_{eff}$	$\text{N/mm}^2$
$\tau_{W,N}$	Normwert von $\tau_W$ für $d_{eff}$	$\text{N/mm}^2$

---

# Abkürzungen

B	Bruch
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer aided design
CAX	Computer aided x, d.h. nahezu beliebige CA-Unterstützungsmethoden
CSG	Constructive Solid Geometry
D	Durchläufer
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMA	Direct memory access
DMU	Digital mock-up
DoE	Design of experiments
DOF	Degrees of freedom
EDX	Energy dispersive X-ray
EN	Europäische Normung
FAT	Bauteilklassen nach FKM
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
FIFO	First in first out
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
FMEA	Failure mode and effects analysis
FPGA	Field programmable gate array
GEH	Gestaltänderungsenergie Hypothese
GPS	Geometrische Produktspezifikation
GUI	Graphical user interface

HCF	High Cycle Fatigue
HLM	High Low Median
HMI	Human machine interface
ISO	International Organization for Standardization
LCF	Low Cycle Fatigue
LLF	Long Life Fatigue
LVDT	Linear variable differential transformer
LW	Lastwechsel
MCS	Monte-Carlo sampling
MKS	Mehrkörpersimulation
OEM	Original equipment manufacturer
OTG	Obere Toleranzgrenze
PEP	Produktentstehungsprozess
RD	Robust Design
RDO	Robust Design Optimization
REM	Rasterelektronenmikroskop
RPO	Relativer Positionierungsoperator
SoS	Statistics on Structure
SPC	Statistical process control
STEP	Standard for the exchange of product model data
STL	Surface Tessellation Language
TPD	Technische Produktdokumentation
TPS	Technische Produktspezifikation
TTRS	Topological and technological related surfaces
UTG	Untere Toleranzgrenze
ZB	Zusammenbau
ZZH	Zuziehhilfe



---

# Kurzzusammenfassung

Toleranzanalysen sind ein wichtiger Bestandteil der virtuellen Produktentwicklung und ermöglichen es, die Auswirkungen von zulässigen Abweichungen auf die Funktion komplexer Baugruppen zu erfassen. Die Bauteilabweichungen werden in den kommerziellen 3D-Toleranzanalyse Programmen jedoch stark vereinfacht dargestellt und auch elastische Deformationen von Baugruppen sowie komplexe Kontaktstellen sind nur begrenzt darstellbar.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen geometriebasierten Ansatz der Toleranzanalyse vorzustellen. Dieser stellt die toleranzbedingten Abweichungen der Bauteile schon im 3D-Datensatz als realitätsnahe Abweichungen von der idealen Geometrie dar.

Die These, dass die Abweichungen einen signifikanten Einfluss haben, wird durch die Anwendung an einer Bolzen-Gelenkverbindung belegt. Die numerischen Ergebnisse werden anschließend experimentell validiert. Hierfür wird ein Prüfstand konzipiert und es werden verschiedene Versuchsreihen mit realen Bolzen-Gelenkverbindungen untersucht.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen die Relevanz der realitätsnahen Berücksichtigung von Toleranzen im Produktentstehungsprozess und stellen somit einen Baustein für das robuste Design von flexiblen Baugruppen dar.

## Brief summary

Tolerance analysis is an important element for virtual product development. It makes it possible to record the effects of permissible deviations for the complex assemblies. The component deviations will only be represented by a significantly simplified structure in commercially available 3D tolerance analysis programs and elastic deformations in the components, as well as complex contact regions, can only be partially represented.

The objective of this work is therefore to present a geometric-based approach for tolerance analysis. This already represents the tolerance-related deviations for components in a 3D data set as realistic imperfections.

The assertion, that the geometric imperfections have a significant impact, will be verified on the basis of a bolted articulated joint assembly. The numerical results will be subsequently validated experimentally. A test bench will be designed for this purpose and various test sequences with realistic bolted articulated joints will be examined.

The results from this work indicate the relevance of realistic consideration of tolerances in product engineering processes and therefore create an element for the robust design of flexible assemblies.