

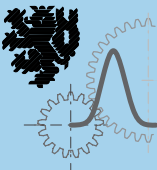
Reihe 1

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

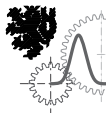
Reihe 1

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

Formelzeichen	VIII
Abkürzungen	XI
Kurzzusammenfassung	XIII
Brief summary	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Ziele und Gliederung dieser Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Erkenntnisse	7
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
3	Bedeutung / Einfluss von Geometrieabweichungen	45
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
4	Entwicklung einer Methode zur Berücksichtigung von toleranzbedingten Abweichungen	63
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
5	Experimentelle Validierung der numerischen Simulationen	84
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
6	Zusammenfassung und Ausblick	104
A	Technische Zeichnungen der Bolzenverbindung	107
B	Auswertungen	115
	Literaturverzeichnis	127

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_{σ}	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
VIII		

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

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

Abkürzungen

B	Bruch
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer aided design
CAs	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.