

## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 437

Dipl.-Ing. Michael Simon Josef Walter,  
Roth

## Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen

Lehrstuhl für  
**Konstruktionstechnik**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack





# **Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen**

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von  
Michael Simon Josef Walter  
aus Roth

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät der  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 14.09.2016

Vorsitzende des Promotionsorgans: Prof. Dr. Peter Greil

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. S. Wartzack

Prof. Dr.-Ing. C. Weber

# Fortschritt-Berichte VDI

**Reihe 1**

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Michael Simon Josef Walter,  
Roth

**Nr. 437**

**Toleranzanalyse und  
Toleranzsynthese  
abweichungsbehafteter  
Mechanismen**

Lehrstuhl für  
**Konstruktionstechnik**  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Walter, Michael Simon Josef

## **Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 437. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

250 Seiten, 100 Bilder, 11 Tabellen.

ISBN 978-3-18-343701-6, ISSN 0178-949X,

€ 85,00/VDI-Mitgliederpreis € 76,30.

**Für die Dokumentation:** Toleranzmanagement – Toleranzanalyse – Toleranzsynthese – Toleranz-Kosten-Optimierung – Fertigungsabweichungen – Bewegte Systeme

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler, die sich mit der optimalen Vergabe von Fertigungstoleranzen beschäftigen. In der Arbeit wird ein durchgängiger Prozess des Toleranzmanagements vorgestellt, der sowohl für statische als auch bewegte Systeme (sog. Mechanismen) anzuwenden ist. Mit der Toleranzanalyse können die Auswirkungen zufälliger und systematischer Abweichungen auf das Bewegungsverhalten eines Mechanismus statistisch beurteilt werden. Die Visualisierung mit dem Walter-Hiller-Diagramm zeigt ungenutzte Potentiale zur Aufweitung von Toleranzen und damit zur gezielten Kosteneinsparung auf. Schlussendlich lassen sich die kostenoptimalen Bauteiltoleranzen des Mechanismus anhand einer statistischen Toleranz-Kosten-Optimierung berechnen. Am Beispiel eines abweichungsbehafteten Ventiltriebs wird die praktische Anwendung aufgezeigt.

### **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>.

## Vorwort

*live your heart and never follow*

by HOT WATER MUSIC

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Akademischer Rat am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg. Das Gelingen dieser Arbeit wurde erst durch die Unterstützung zahlreicher Personen ermöglicht, denen ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechend möchte.

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack, der mich in den vergangenen sechs Jahren als Freund begleitet und gefördert hat. Seine offene Art und sein steter Zuspruch, sowohl in fachlichen als auch in persönlichen Dingen, sind von wesentlicher Bedeutung für das Gelingen der Arbeit sowie für mein persönliches und berufliches Leben und Wirken. Hierfür besten Dank, Sandro!

Bei Prof. Dr.-Ing. Christian Weber, dem aktuellen Dekan der Fakultät für Maschinenbau der TU Ilmenau und ausgewiesenen Experten im Toleranzmanagement und der Produktentwicklung bedanke ich herzlich für das Interesse an meiner Arbeit sowie für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters. Darüber hinaus gilt Prof. Dr. Michael Stingl und Prof. Dr. sc. ETHZ Alexander Hasse mein herzlicher Dank für Ihr Engagement und Wirken als fachfremder Gutachter und Vorsitzender der Prüfungskommission.

Darüber hinaus gilt den, zumindest für mich, beiden „Urgesteinen“ des Lehrstuhls mein Dank: Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm und Dr.-Ing. Stephan Tremmel haben seit meinen ersten Studiensemester an/mit mir gearbeitet und mich geprägt und schlussendlich zum Ingenieur geformt. Vielen Dank für dieses jahrelange und unermüdliche Zutun.

Mein ganz besonderer Dank gilt allen aktiven und ehemaligen Kollegen, die mir in guten wie in schlechten Zeiten zur Seite standen. Besonders hervorheben möchte ich hier meine Büro-Mitbewohner Julia Husch, Thomas Sander, Georg Gruber, Philipp Ziegler und Kristian Mauser. Für die gute Zusammenarbeit und viele nette Gespräche gilt besonders Bilo Breitsprecher, David Hochrein, Julia Kröner, Bernd Vierneusel, Daniel Klein, Lars Krogschie, Gabi Stingl, Günther Rabenstein und Ute Weitzenfelder mein bester Dank.

Weiterhin möchte ich mich bei den Studierenden bedanken, die mich durch Ihr Engagement bei Forschung und Lehre unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte an dieser Stelle Tim Weikert, Christina Hiller, Markus Storch, Björn Heling, Michael Pribek, Sebastian Epp,

Marcus Romeis, Vitalij Schuller, Peter Zierer, Vincent Mann, Alexander Aschenbrenner, Josef Strohhofer, Frank Litwa und Alexander Rehn.

Für das Feedback zu meiner Arbeit aus industrieller Sicht bin ich Florian Weidenhiller sowie meinen Mitstreitern Stefan Gliniorz, Kai Kasprzak, Andreas Schneider und Wolf-Rüdiger Landschoof des Arbeitskreises AP07 des Toleranz-Forums sehr dankbar.

Meiner Familie und meinen Freunden sei herzlich für die Unterstützung und das Verständnis gedankt. Sowohl meine Eltern Erwin und Rosa Walter als auch meine Schweigereltern Erika und Horst Säckl haben mir Rückhalt gegeben und mich in meinem Vorhaben mit allen Kräften unterstützt.

Meiner geliebten Frau Anja sowie unserem Sohn Simon gilt mein größter Dank.

Abschließend bleibt mir, mich bei Freund und Wegbeleiter Tobias C. Sprügel zu bedanken. Seit seiner ersten Technischen Zeichnung in dessen ersten Studiensemester darf ich mit ihm arbeiten und lernen. Über die Jahre hat er beständig zum Erfolg meiner Forschungsarbeiten und damit dem Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen. Die Zusammenarbeit mit ihm ist für mich die beste Zeit, die ich am Lehrstuhl hatte. Dafür, lieber Tobi, gilt Dir von ganzem Herzen mein tiefster Dank.

Heideck, im September 2016

Michael S. J. Walter

*Meinem Vater Erwin Walter*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Abweichungen und deren Begrenzung durch Toleranzen in der Produktentwicklung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	3
1.2 Aufgabenstellung .....	4
1.3 Der Toleranzingenieur .....	5
<b>2 Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>7</b>
2.1 Geschichte des Toleranzmanagements .....	7
2.1.1 Das Streben nach der vollständigen Austauschbarkeit von Einzelteilen .....	7
2.1.2 Die Begrenzung von Abweichungen durch Toleranzen (1840-1920) .....	8
2.1.3 Der Einzug der Statistik in die Toleranzrechnung und der Aufstieg des Automobilbaus (1900 – 1960) .....	9
2.1.4 Die Rechnerunterstützung in der Toleranzrechnung (seit 1960) .....	11
2.1.5 Toleranzforschung im geeinten Deutschland .....	12
2.1.6 Neue Aspekte und Trends im Toleranzmanagement (Stand 2015) .....	15
2.2 Die drei Kernaktivitäten der rechnerunterstützten Toleranzsimulation .....	16
2.3 Toleranzanalyse .....	18
2.3.1 Statistische Toleranzanalyse .....	19
2.3.2 Bestimmung der Beitragsleister .....	24
2.3.3 Diskussion des Standes der Forschung zur statistischen Toleranzanalyse .....	31
2.4 Toleranzsynthese und Toleranzoptimierung .....	38
2.4.1 Toleranz-Kosten-Modelle .....	39
2.4.2 Bestimmung der optimalen Tolerierung .....	41
2.4.3 Diskussion des Standes der Forschung zur Toleranzsynthese .....	46
2.5 Meta-Modelle .....	49
2.5.1 Response Surface Methodology .....	51
2.5.2 Kriging Interpolation .....	52
2.5.3 Support Vector Regression .....	54
2.5.4 Künstliche Neuronale Netze .....	56
2.5.5 Evaluierung der Prognosegüte von Meta-Modellen .....	58
2.6 Kommerzielle Software-Werkzeuge zur Toleranzanalyse .....	60

<b>3 Ableitung des Handlungsbedarfs.....</b>	<b>63</b>
3.1 Die akademische Sicht: Diskussion des aktuellen Standes der Forschung und Technik	63
3.2 Die industrielle Sicht: Eine Erhebung unter deutschen Unternehmen.....	65
3.2.1 Vorbereitung und Durchführung der Erhebung .....	65
3.2.2 Auswertung und Diskussion .....	67
3.3 Handlungsbedarf zur Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen.....	71
<b>4 Konzept zur Toleranzanalyse und -synthese abweichungsbehafteter Mechanismen.....</b>	<b>73</b>
4.1 Klassifikation von Abweichungen technischer Systeme .....	73
4.1.1 Charakterisierung systematischer Abweichungen anhand der Periodendauer ....	75
4.1.2 Klassifikation möglicher Wechselwirkungen zwischen Abweichungen .....	76
4.2 Vorgehensweise zur statistischen Toleranzanalyse und -synthese des Betriebsverhaltens abweichungsbehafteter Mechanismen.....	80
4.2.1 Die Idee hinter der Toleranzanalyse-Methode zur Berücksichtigung der vollständigen Betriebsdauer eines Mechanismus .....	85
4.3 Vollständige Beschreibung der Aufgabe .....	87
4.4 Die Schließmaßgleichung: Gemeinsamer Kern von Toleranzanalyse und -synthese .....	88
4.4.1 Formulierung der Schließmaßgleichungen mittels Vektorketten.....	89
4.4.2 Bestimmung der systematischen Abweichungen unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen 3. und 4. Art .....	98
4.5 Statistische Toleranzanalyse .....	107
4.5.1 Anwendung der modifizierten Toleranzanalyse-Methode.....	107
4.5.2 Bestimmung, Repräsentation und Interpretation der Ergebnisse .....	108
4.6 Wirtschaftliche Beurteilung anhand des WALTER-HILLER-Diagramms.....	109
4.7 Statistische Toleranzoptimierung.....	112
4.7.1 Formulieren des Toleranz-Optimierungsproblems.....	113
4.7.2 Lösung des Toleranz-Optimierungsproblems .....	117
4.8 Ergebnisvisualisierung und Dokumentation statistischer Toleranzsimulationen abweichungsbehafteter Mechanismen .....	122
4.8.1 Tol/Mech – insight .....	122
4.8.2 Erläuterung der Umfänge von Tol/Mech – insight.....	127

---

<b>5 Anwendungsbeispiel: Abweichungsbehafteter Ventiltrieb .....</b>	<b>129</b>
5.1 Vorstellung des Demonstrators.....	129
5.1.1 Aufbau und Funktionsweise des Ventiltriebs.....	130
5.2 Beschreibung des Toleranzproblems .....	132
5.3 Formulieren der Schließmaßgleichung .....	134
5.4 Statistische Toleranzanalyse.....	143
5.5 Wirtschaftliche Beurteilung der Tolerierung.....	146
5.5.1 Festlegung der Toleranz-Kosten-Modelle .....	146
5.5.2 WALTER-HILLER-Diagramm der bestehenden Tolerierung des Ventiltriebs .....	149
5.6 Statistische Toleranzsynthese.....	150
5.6.1 Formulierung des Toleranz-Optimierungsproblems .....	150
5.6.2 Lösung des Toleranz-Optimierungsproblems .....	151
5.6.3 Diskussion der erzielten Ergebnisse .....	152
<b>6 Beurteilung durch Experten aus der industriellen Praxis.....</b>	<b>157</b>
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>161</b>
<b>8 Anhang .....</b>	<b>164</b>
8.1 Fragebogen.....	164
8.2 Beschreibung des Ventiltriebs und dessen Einzelteile.....	168
8.3 Vollständige Formulierung der Schließmaßgleichung .....	170
8.3.1 Vektorkette des Hauptsystems .....	170
8.3.2 Vektorkette des Nebensystems .....	174
8.3.3 Details zur Berechnung ausgewählter systematischer Abweichungen und relevante Kenngrößen .....	179
8.4 Mehrkosten durch Mittelwertverschiebungen zufälliger Abweichungen.....	186
8.5 WALTER-HILLER-Diagramm der bestehenden Tolerierung .....	187
8.6 Weitere Ausführungen zur Toleranzsynthese des Ventiltriebs .....	188
8.7 Zusammensetzung der resultierenden Fertigungskosten .....	190
8.8 Eingesetzte Hard- und Software .....	192
<b>9 Literatur.....</b>	<b>193</b>

## Nomenklatur

Nachfolgend werden die wichtigsten Abkürzungen, Indizes und Variablen der vorliegenden Arbeit zusammengestellt. Die Einheiten aller mit \* gekennzeichneten Variablen hängt von der jeweils vorliegenden Größe etc. ab und sind damit individuell festzulegen.

### Abkürzungen

Abw	Abweichung
ADCATS	Association for the Development of Computer-Aided Tolerancing Software
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAT	Computer-Aided Tolerancing
COP	Coefficient of Prognosis
DLM	Direct Linearization Method
EFAST	Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test
FAST	Fourier Amplitude Sensitivity Test
FE	Finite Elemente
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FG	Freiheitsgrad
GA	Genetischer Algorithmus
GPS	Geometrische Produktspezifikation
HDMR	High Dimension Model Representation
HLM	High-Low-Median
KFZ	Kraftfahrzeug
KNN	Künstliches Neuronales Netz / Künstliche Neuronale Netze
KOS	Koordinatensystem
LHS	Latin-Hypercube-Sampling
MM	Meta-Modell
MSE	Mean Squared Error (deutsch: mittleres Fehlerquadrat)
MS	Mittelwertverschiebung einer zufälligen Toleranz
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
PSO	Partikelschwarm Optimierung
PKW	Personenkraftwagen
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RRSS	Repeated Random Sub Sampling
RSM	Response Surface Methodology

---

RSS	Root-Sum-Square
SM	Schließmaß
SPC	Statistische Prozesskontrolle
SULEV	Super Ultra Low Emissions Vehicle (KFZ-Emissionsklasse in Kalifornien)
SVR	Support Vector Regression
SW	Schwerpunkt eines massebehafteten Körpers
USG	Untere Spezifikationsgrenze
VDI	Verein deutscher Ingenieure
WW	Wechselwirkung (zwischen zwei Abweichungen)

## Indizes

1, 2, 3, ...	Zählindex
1-B→1-A	Überführung des KOS 1-B in das KOS 1-A (Beispiel)
glob	zugehörig zum globalen Koordinatensystem des Ventiltriebs
Leitpartikel	Leitpartikel (PSO)
opt	optimal
rot	rotatorisch
SM	Schließmaß
sys	systematisch
trans	translatorisch
zuf	zufällig

## Variablen

Symbol	Bedeutung	Einheit
$+3\sigma$	Oberes $+3\sigma$ -Quantil einer Häufigkeitsverteilung	*
$-3\sigma$	Unteres $-3\sigma$ -Quantil einer Häufigkeitsverteilung	*
$Abm_{ideal,i}$	Idealwert der <i>i-ten</i> Abmessung eines Einzelteils	*
$A_j$	Erster Fourier-Koeffizient (EFAST)	-
$B_j$	Zweiter Fourier-Koeffizient (EFAST)	-
$BL_{\$,i}$	Beitragsleister zu den Fertigungskosten der <i>i-ten</i> Toleranz	%
$BL_{i,arith}$	Arithmetischer Beitragsleister der <i>i-ten</i> zufälligen Toleranz	%
$BL_{i,HLM}$	Beitragsleister der <i>i-ten</i> zufälligen Toleranz (nach HLM)	%
$BL_{i,red}$	Beitragsleister der <i>i-ten</i> Toleranz (nach %-Reduction)	%
$BL_{\sigma,i}$	Statistischer Beitragsleister der <i>i-ten</i> zufälligen Toleranz	%

$c, c^*$	Maximal zulässige Ausschussraten im Betrieb	-
$C_i$	Toleranzmittenwert der $i$ -ten zufälligen Toleranz	*
$c_i^k$	Erfahrung des $i$ -ten Partikels bei der $k$ -ten Iteration (PSO)	€
$c_{Neben}$	Grenzwert der Optimierung für die Ausschussrate	-
$Cov$	Kovarianz	*
$c_p$	Prozessfähigkeitsindex $c_p$	-
$c_{pk}$	Prozessfähigkeitsindex $c_{pk}$	-
$c_{pr}$	Prozessrobustheitsindex	-
$c_{ziel}$	Grenzwert der Optimierung für die Fertigungskosten	€
$D$	Steifigkeit der Ventilfeder	N/mm°
$D_0$	Steifigkeit der Ventilfeder bei Betriebsbeginn ( $t_B = 0$ s)	N/mm°
$Def_x, Def_z$	Komponenten der el. Deformation des Schlepphebels	mm
$dF$	Ermüdungsrate der Ventilfeder	%
$d_{GL}$	Innendurchmesser des Gleitlagers im Nockenwellenlager	mm
$d_{VT}$	Durchmesser des Ventiltellers	mm
$E(SM)$	Erwartungswert des Schließmaßes	*
$F$	Kraft	N
$f(\dots)$	Funktion von (...)	-
$F_K$	Kontaktkraft Stöbel/Ventil	N
$F_X$	Komponente der Kraft im Nockenwellenlager	N
$F_Y$	Komponente der Kraft im Nockenwellenlager	N
$g$	Senkrechter Abstand: Kontaktfläche Schlepphebel/Nocke zu Mittelpunkt der Schlepphebellagerung	mm
$j$	Trägheitskonstante (PSO)	-
$k$	Koeffizient der Toleranz-Kosten-Modelle	*
$K$	Kovarianzmatrix	-
$k$	Anzahl der Wiederholungen einer Split Validation (bei Wahl einer k-fold Cross Validation)	-
$k(t_B)$	Verschließ des Schlepphebels zum Betriebszeitpunkt $t_B$	mm
$K(T_i)$	Fertigungskosten der $i$ -ten zufälligen Toleranz	€
$K_{fix}$	Fixkosten der $i$ -ten zufälligen Toleranz	€
$K_{ind}$	Individuelle Kosten der $i$ -ten zufälligen Toleranz	*
$K_{max}$	Kostengrenze	€
$K_{Prozess\#i}$	Anfallende Kosten mit dem $i$ -ten Fertigungsverfahren	*
$K_{total}$	Gesamte Fertigungskosten der Tolerierung	€
$K_{var}$	Variable Kosten der $i$ -ten zufälligen Toleranz	€

$K_{var,ges}$	Summe der variablen Kosten aller zufälligen Toleranzen	€
$k_\beta$	Anzahl der Regressionskoeffizienten (RSM)	-
$l_{rw}$	Betrag der Rechtwinkligkeitsabweichung	mm
$l_{SH}$	Länge des Schlepphebels	mm
$l_V$	Ventillänge	mm
$M$	Anzahl der Oberschwingungen (im Rahmen von EFAST)	-
$m$	Koeffizient der Toleranz-Kosten-Modelle	*
$m$	Anzahl der Wiederholungen (RRSS)	-
$m$	Anzahl der auftretenden Abweichungen	-
$m$	Anzahl der Wiederholungen der Split-Validation bei RRSS	-
$max$	Maximale Prognosegüte der $m$ erzeugten Meta-Modelle	%
$m_g$	Anzahl der Generationen (GA und PSO)	-
$M_i$	$i$ -tes abweichungsbehaftetes Merkmal eines Einzelteils bzw. einer Baugruppe	*
$M_i$	$i$ -te homogene 4x4 Transformationsmatrix	-
$m_i$	Gewichtungsfaktor der Mittelwertverschiebung der $i$ -ten zufälligen Toleranz (Toleranz-Kosten-Optimierung)	*
$m_{Opt}$	Anzahl an Startpunkten (bei Wahl lokaler Optimierung)	-
$MS_{T,d}$	Mittelwertverschiebung der Nockenexzentrizitätstoleranz	mm
$MS_{T,dF}$	Mittelwertverschiebung der Toleranz der Ermüdungsrate	%
$MS_{T,S}$	Mittelwertverschiebung der Toleranz des Spiels im No- ckenwellenlager	mm
$MS_{T,V}$	Mittelwertverschiebung der Toleranz der Ventillänge	mm
$MS_{T,v100}$	Mittelwertverschiebung der Toleranz der Ölviskosität (100°C)	mm <sup>2</sup> /s
$MS_{T,v40}$	Mittelwertverschiebung Toleranz der Ölviskosität (40°C)	mm <sup>2</sup> /s
$MS_{T,\rho V}$	Mittelwertverschiebung der Toleranz der Dichte des Ven- tils (bei 20°C)	kg/dm <sup>3</sup>
$MS_{Ti}$	Mittelwertverschiebung der $i$ -ten zufälligen Toleranz	*
$\mu$	Mittelwert (erstes statistisches Moment)	*
$n$	Anzahl der Samples eines Statistischen Versuchsplans	-
$N_i$	Nennwert der der $i$ -ten zufälligen Toleranz	*
$N_{KW}$	Drehzahl der Kurbelwelle	1/min
$n_{LHS}$	Sampleanzahl (gemäß eines Latin-Hypercube-Samplings)	-
$n_{NW}$	Drehzahl der Nockenwelle	1/min
$n_{steps}$	Anzahl der Zeitschritte (Diskretisierung der Bewegung)	-

$N_{Test}$	Anzahl der Testsamples (Prognosegüte von Meta-Modell)	-
$n_V$	Anzahl verdeckter Schichten (KNN)	-
$P$	Druckbelastung im Kontakt Stößel/Ventil	N/mm <sup>2</sup>
$p(\dots)$	Wahrscheinlichkeitsdichte von (...)	*
$P_K$	Verbrennungsdruck im Brennraum des Motors	bar
$R$	Residuum	*
$r_{NW,gr}$	Radius des Grundkreises der Nockenwelle	mm
$r_{NW,kl}$	Radius der Nocke	mm
$r_{St}$	Stößelradius	mm
$S_i$	Haupteffekt der <i>i-ten</i> zufälligen Toleranz	-
$SM$	Schließmaß (funktionsrelevante Eigenschaft des Produkts)	*
$SM_{Ti,high}$	Oberer Schließmaßwert (für HLM-Analyse)	*
$SM_{Ti,low}$	Unterer Schließmaßwert (für HLM-Analyse)	*
$S_{NW}$	Spiel im Nockenwellenlager	mm
$S_{Ti}$	Totaleffekt der <i>i-ten</i> zufälligen Toleranz	-
$s_V$	Ventilspiel	mm
$t$	Zeit	s
$T_{\rho V}$	Toleranz der Dichte des Ventils (bei 20°C)	kg/dm <sup>3</sup>
$T_{<NW}$	Toleranz der Winkelabweichung der Nockenwelle	°
$T_{\top}$	Rechtwinkligkeitstoleranz des Ventiltellers zur Ventilachse	mm
$t_{Analyse}$	Betrachtete Zeitdauer der Bewegung in der „ <i>Integrierten Toleranzanalyse bewegter Systeme</i> “ nach [Stu11]	s
$t_B$	Betriebszeitpunkt	s
$T_B$	Gesamte Betriebsdauer	s
$T_d$	Toleranz der Nockenexzentrizität	mm
$T_{dF}$	Toleranz der Ermüdungsrate der Ventilfeder	%
$T_i$	Toleranz des <i>i-ten</i> Merkmals eines Einzelteils bzw. einer Baugruppe, das einer zufälligen Abweichung unterliegt	*
$T_{lim}$	Minimal mögliche Toleranz eines Fertigungsverfahrens	*
$T_P$	Periodendauer einer systematischen Abweichung	s
$t_{Pos}$	Betrag der Positionsabweichung	mm
$T_{Pos}$	Positionstoleranz der Schlepphebelrotationsachse	mm
$T_S$	Toleranz des Spiels im Nockenwellenlager	mm
$T_{SM}$	Schließmaßtoleranz	*
$T_V$	Toleranz der Ventillänge	mm
$T_{v100}$	Toleranz der Ölviskosität (bei 100°C)	mm <sup>2</sup> /s

$T_{v40}$	Toleranz der Ölviskosität (bei 40°C)	mm <sup>2</sup> /s
$t_{Verl}$	Betrag der Verlagerung der Nockenwelle im Gleitlager	mm
$t_z$	Zyklusdauer eines Bewegungszyklus eines Mechanismus	s
$V$	Varianz (im Rahmen der globalen Sensitivitätsanalyse)	*
$V_{\sim i}$	Komplementäre Varianz der $i$ -ten Toleranz (EFAST)	*
$v_{100}$	Ölviskosität (bei 100°C)	mm <sup>2</sup> /s
$v_{40}$	Ölviskosität (bei 40°C)	mm <sup>2</sup> /s
$Var_{SM,Ti}$	Schließmaßvarianz aufgrund der $i$ -ten zufälligen Toleranz	*
$v_i^k$	Geschwindigkeit des $i$ -ten Partikels bei der $k$ -ten Iteration (PSO)	*
$v_{x,y,z}$	Translatorische Vorschubgeschwindigkeit	mm/s
$V_{\omega i}$	Partielle Varianz (im Rahmen von EFAST)	*
$w$	Gewichtungsfaktor (SVR)	-
$w$	Stößelabstand	mm
$w_i$	Gewichtungsfaktor der $i$ -ten Eingangsgröße (KNN)	*
$x_{glob,P,ideal}$	x-Koordinate des Punktes $P$ für einen idealen (nicht abweichungsbehafteten) Ventiltrieb im globalen KOS	mm
$x_i$	Wert des Schließmaßes des $i$ -ten Einzelteils bei Fertigung von $n$ Teilen	*
$x_{ideal,i}$	Idealwert des $i$ -ten abweichungsbehafteten Merkmals	*
$x_i^k$	Position des $i$ -ten Partikels bei der $k$ -ten Iteration (PSO)	*
$x_{NW}$	x-Komponente des Abstandes der Schlepphebellagerachse zur Achse des Nockenwellenlagers	mm
$x_P$	x-Koordinate des Punktes $P$ im globalen KOS	mm
$x_{P'}$	x-Koordinate des Punktes $P'$ im globalen KOS	mm
$y_{glob,P,ideal}$	y-Koordinate des Punktes $P$ für einen idealen (nicht abweichungsbehafteten) Ventiltrieb im globalen KOS	mm
$Y_{MM}$	Prognostizierte Zielgröße (durch Meta-Modell)	*
$y_{NW}$	y-Komponente des Abstandes der Schlepphebellagerachse zur Achse des Nockenwellenlagers	mm
$y_P$	y-Koordinate des Punktes $P$ im globalen KOS	mm
$y_{P'}$	y-Koordinate des Punktes $P'$ im globalen KOS	mm
$Y_{Test}$	Tatsächliche Zielgröße (Prognosegüte von Meta-Modell)	*
$Z(x)$	Individuelle lokale Abweichung an der Stelle $x$ (Kriging)	*
$\alpha_i, \alpha_i^*$	Lagrange Multiplikatoren (SVR)	-
$\beta_i$	Regressionskoeffizient (RSM)	*

$\beta_w, \beta_w^*, \delta_w$	Hilfswinkel zur mathematischen Beschreibung des höherwertigen Kontakts Nocke/Schlepphebel	°
$\varepsilon_w^*, \varepsilon_w^{**}$		
$\gamma$	Schiefe (drittes statistisches Moment)	*
$\gamma_w$	Öffnungswinkel der Nocke	°
$\delta$	Richtungswinkel der Verlagerung der Nockenwelle	°
$\Delta d$	Nockenexzentrizität	mm
$\delta_{el}$	Elastische Abplattung des Ventils (Kontakt Stößel/Ventil)	mm°
$\Delta l_{V,Temp}$	Temperaturbedingte Geometrieeänderung des Ventils	mm
$\Delta_{NW}$	Winkelabweichung der Nockenwelle	°
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Translatorische Abstände zweier Koordinatensysteme	mm
$\varepsilon$	Normierter Betrag der Verlagerung der Nockenwelle	-
$\varepsilon(u)$	Globaler Fehler an der Stelle u (kriging)	*
$\vartheta$	Betriebstemperatur	°C
$\lambda_a$	Gewichtungsfaktor (Kriging)	-
$\xi$	Schlupfvariablen (SVR)	-
$\rho_V$	Dichte des Ventils (bei 20°C)	kg/dm <sup>3</sup>
$\sigma$	Standardabweichung (zweites statistisches Moment)	*
$\sigma^2$	Varianz	*
$\tau$	Wölbung (viertes statistisches Moment)	*
$\tau$	Ausrichtwinkel der Nockenwelle gegenüber Schlepphebel	°
$\varphi$	Auslenkungswinkel des Schlepphebels	°
$\varphi_i$	Phasenverschiebung (im Rahmen von EFAST)	-
$\varphi_{KW}$	Kurbelwinkel	°
$\varphi_{NW}$	Nockenwinkel	°
$\varphi_{NW,ab}$	Nockenwinkel (Abheben der Nocke auf Schlepphebel)	°
$\varphi_{NW,auf}$	Nockenwinkel (Aufsetzen der Nocke auf Schlepphebel)	°
$\varphi_{Pos}$	Richtung der Positionsabweichung	°
$\varphi_{rw}$	Richtung der Rechtwinkligkeitsabweichung	°
$\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$	Winkel zwischen den Achsen zweier Koordinatensysteme	°; rad
$\omega_i$	Frequenz der $i$ -ten Oberschwingung (EFAST)	Hz
$\omega_{x,y,z}$	Winkelgeschwindigkeit um x-, y- oder z-Achse eines KOS	rad/s

## Zusammenfassung

Trotz aller technischen Errungenschaften sind Abweichungen von Bauteilen aufgrund der Unerreichbarkeit einer ideal maßhaltigen Fertigung unvermeidbar. Die Montage dieser Einzelteile führt somit zwangsläufig zu einem Produkt, dessen ästhetische Wertigkeit und/oder Funktionserfüllung während der Nutzung vom angestrebten Ideal abweicht. Hieraus erwächst für den Produktentwickler die Verantwortung, maßliche und geometrische Abweichungen der Einzelteile durch die gezielte Vergabe von Toleranzen zu begrenzen. Jedoch ist festzuhalten, dass gegenwärtig bestehende Methoden der statistischen Toleranzrechnung in Leistungsfähigkeit und Anwendbarkeit – insbesondere hinsichtlich des Bewegungsverhaltens abweichungsbehafteter Mechanismen – stark limitiert sind. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es demnach, den Produktentwickler sowohl bei der statistischen Toleranzanalyse (einer bestehenden Tolerierung) als auch bei der statistischen Toleranzsynthese (d.h. der Vergabe kostenoptimaler Toleranzen) eines abweichungsbehafteten Mechanismus zu unterstützen. Der Autor schlägt hierfür eine dreistufige methodische Vorgehensweise vor.

Die vorgestellte *Toleranzanalyse abweichungsbehafteter Mechanismen* ermöglicht neben der Analyse von zufälligen Abweichungen fortan auch die Berücksichtigung möglicher Wechselwirkungen zwischen Abweichungen und deren Auswirkungen auf den Mechanismus. Darüber hinaus ist anhand einer modifizierten Toleranzanalyse-Methode die Toleranzanalyse der gesamten Betriebsdauer des Mechanismus möglich. Zudem können die numerischen Aufwände der Toleranzsimulationen durch den gezielten Einsatz von Meta-Modellen (allen voran Künstliche Neuronale Netze) signifikant reduziert werden.

Auf Basis der Ergebnisse der vorhergehenden *Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen*, lassen sich mittels des WALTER-HILLER-Diagramms, bisher noch ungenutzte Potentiale zur weiteren Reduzierung der Fertigungskosten identifizieren. Die Notwendigkeit zur Modifikation der bestehenden Tolerierung (im Rahmen einer Toleranzsynthese) kann somit abgeleitet und begründet werden.

Die *Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen* erlaubt abschließend die Identifikation der kostenoptimalen Tolerierung durch Lösung eines zeitabhängigen Toleranz-Optimierungsproblems. Der Einsatz mathematischer Algorithmen (z.B. Partikelschwarm Optimierung) dient hier der Lösung des viel zitierten Toleranz-Kosten-Konflikts „so eng wie nötig, so weit wie möglich“. Ein Vorschlag zur Visualisierung und Repräsentation der Ergebnisse statistischer Toleranzsimulationen schließt das Vorgehen.

Die Anwendung der entwickelten Vorgehensweise zur „*Toleranzanalyse und Toleranzsynthese abweichungsbehafteter Mechanismen*“ wird am Beispiel des abweichungsbehafteten Ventiltriebs eines Vier-Takt-Verbrennungsmotors im Detail aufgezeigt und diskutiert.

## Abstract

Imprecise manufacturing processes lead to parts that differ in their dimensions and shape. The assembly of these parts, in consequence, results in products whose aesthetic quality and/or functionality during their use do not meet the ideal that is sought. As a consequence, the product developer has to specify appropriate tolerances to limit these deviations, and thus, to ensure the adequate functional and aesthetic quality of the final products. However, existing and established methods of statistical tolerance simulations are currently still limited concerning performance and possible fields of applications; in particular, the kinematic behavior of non-ideal mechanisms must be highlighted.

The aim of this thesis is to provide adequate support for the product developer in analyzing the effects of deviations (tolerance analysis) as well as in identifying the cost-optimal tolerance design (tolerance synthesis) of time-dependent mechanisms. Therefore, the author proposes a comprehensive methodology consisting of three main steps.

The *tolerance analysis of mechanisms* enables the product developer to analyze the effects of random and systematic deviations as well as the interactions between these deviations and their effects on a certain functional key characteristic of a mechanism. Furthermore, a modified tolerance analysis method allows the consideration of the mechanism's entire use. In order to significantly reduce the time and numerical costs, surrogate models (such as artificial neural networks) of the appearing systematic deviations are integrated into the approach.

In the following step, the results of the previous tolerance analysis are used to establish the so-called WALTER-HILLER-diagram. This visualization provides information about previously unused potential to reduce the resulting manufacturing costs caused by the given tolerance design. Hence, the necessity of a tolerance re-design (using a tolerance synthesis) is justified and the expected cost benefit is illustrated.

Finally, the *tolerance synthesis of mechanisms* provides the cost-optimal tolerance design by finding the best solution for a time-dependent tolerance-optimization problem. Therefore, global optimization techniques (such as particle swarm optimization) are applied. Moreover, a recommendation on the result representation and documentation of tolerance simulations of mechanisms is given.

The thesis concludes with the practical use of the *tolerance analysis and tolerance synthesis of mechanisms* for a valve train inside a four-stroke combustion engine, whose parts are affected by random as well as systematic deviations.