



Summer School Toleranzmanagement

Beiträge zur 4. Summer School
September 2020

Sandro Wartzack
(Hrsg.)



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Impressum

Druck+Verlag Ernst Vögel GmbH
Kalvarienbergstraße 22
93491 Stamsried
Tel.: 0 94 66 / 9400-0
Fax: 0 94 66 / 12 76
voegel@voegel.com
www.voegel.com

Nachdruck, Vervielfältigung, Speicherung oder Übertragung in elektronische, optische, chemische oder mechanische Datenhaltungs- oder Datenverarbeitungssysteme sind – auch auszugsweise – ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung von Druck+Verlag Ernst Vögel GmbH verboten.

Die Verwertung von Informationen aus *Summer School Toleranzmanagement / Beiträge zur 4. Summer School September 2020* zum Zweck der gewerblichen Informationsvermittlung ist nicht zulässig.

Alle Rechte vorbehalten.

© Ernst Vögel, D-93491 Stamsried, 2020

ISBN 978-3-89650-504-0

Die in diesem Band wiedergegebenen Inhalte liegen in der alleinigen Verantwortung des/der jeweiligen Autors/Autoren und spiegeln nicht die Meinung des Herausgebers wieder.

Vorwort

Nach einer kleinen Verschnaufpause richtet der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg dieses Jahr bereits zum vierten Mal die *Summer School Toleranzmanagement* aus. Das Toleranzmanagement stellt dabei seit knapp 30 Jahren mit seinen unterschiedlichen Facetten einen zentralen Pfeiler der Forschungs- und Lehrtätigkeiten des KTmfk dar. Neben nationalen und internationalen Kooperationen mit Universitäten und Unternehmen, werden dabei in unterschiedlichen Lehrveranstaltungen verschiedene Aspekte des Toleranzmanagements beleuchtet.



Die erste *Summer School Toleranzmanagement* wurde im Jahr 2013 durchgeführt, motiviert durch den regen Austausch mit Industrievertretern, die eine höhere Präsenz des Themas „Toleranzen“ für den Nachwuchs an deutschen Hochschulen wünschen. Im Rahmen der rege besuchten Veranstaltung wurde deutlich, dass die Bedeutung des Toleranzmanagements in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Um dabei den Nachwuchs für diese Entwicklung zu sensibilisieren, soll auch in diesem Jahr der direkte und offene Austausch in der kommunikativen Atmosphäre der Veranstaltung im Fokus stehen. Wie in den vergangenen Ausgaben der *Summer School Toleranzmanagement*, wird auch in diesem Jahr interessierten Studierenden ein Einblick in unterschiedliche Problemstellungen und Vorgehensweisen aus der Praxis ermöglicht. Außerdem wird Studierenden, Wissenschaftlern und Industrievertretern eine Plattform geboten werden, sich über **Methoden** und **Werkzeuge** des **virtuellen Toleranzmanagements** auszutauschen.

Sowohl die Vorbereitung, als auch die Durchführung einer solchen Veranstaltung bedarf der tatkräftigen Unterstützung vieler engagierter Personen, bei denen ich mich hiermit herzlichst bedanken möchte. Weiterhin gilt mein Dank allen Autoren und Vortragenden, die unsere Summer School mit Beiträgen bereichern werden. Obwohl die Summer School als Folge der COVID-19-Pandemie erstmalig virtuell stattfindet, freue ich mich auch im neuen Webformat auf die vielfältigen, interessanten Vorträge und die sicherlich lebhaften Diskussionen!

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Sandro Wartzack'. The signature is fluid and cursive, written on a light background.

Sandro Wartzack

Erlangen, September 2020

Rückblick auf die dritte Summer School Toleranzmanagement im September 2017

Sandro Wartzack*, Benjamin Schleich, Stefan Goetz,
Martin Hallmann

*wartzack@mfk.de

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Fertigungsprozesse führen unweigerlich zu geometrischen Bauteilabweichungen, die maßgeblich sowohl die Qualität als auch die Funktion technischer Produkte beeinflussen. Die Vergabe von Toleranzen zur Einschränkung zulässiger Bauteilabweichungen stellt eine Kernaufgabe der Konstruktion und Produktentwicklung dar. Aufgrund der hohen Kostenverantwortung und der vielfältigen Schnittstellen zu Fertigung, Qualitätssicherung und Vertrieb sind neben dem Einsatz geeigneter Methoden besonders fachkundige Mitarbeiter erforderlich. Gerade in Zeiten des Fachkräftemangels und sich rasch ändernder Anforderungen sind sowohl die Nachwuchsförderung als auch der Dialog zwischen Lehre, Forschung und Industrie von immenser Bedeutung.

Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU) hat bereits zum dritten Mal mit der Summer School „Toleranzmanagement“ vom 20. bis 21. September 2017 eine geeignete Plattform geschaffen, um einen Austausch zu unterschiedlichen Themen und Herausforderungen des Toleranzmanagements zu ermöglichen. Vor allem die sehr abwechslungsreichen Industrie- und Forschungsvorträge sowie Workshops trugen dabei zu einem intensiven Dialog zwischen Industrievertretern, Wissenschaftlern und Studierenden bei. Im Rahmen von Industriebvorträgen wurden unter anderem die Herausforderungen des Toleranzmanagements

im Automobilbau betrachtet. Neben der virtuellen Absicherung des gesamten Produktlebenszyklus wurde außerdem gezielt auf die simulative Abbildung von Montageprozessen eingegangen.



Bild 1: Vorträge aus Forschung und Industrie boten den Teilnehmenden eine große Themenvielfalt

In zahlreichen Forschungsvorträgen wurden die Herausforderungen und Chancen neuer Fertigungsverfahren sowie zunehmender Digitalisierung thematisiert. Insbesondere die Keynote „Toleranzmanagement im Kontext von Industrie 4.0“ war dabei für die Teilnehmenden von großem Interesse. Die fortschreitende Vernetzung vereinfacht den interdisziplinären Informationsaustausch und fördert das prozessorientierte Toleranzmanagement. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die fertigungsspezifischen Einflüsse. So sind beispielsweise die Besonderheiten bei der Tolerierung additiv gefertigter Bauteile zu berücksichtigen. Aus einer weiteren Vortragsrunde ging hervor, dass die Vielzahl der GPS-Normen sowie deren innerbetriebliche Umsetzung häufig zu Unstimmigkeiten und Fehlinterpretationen im Toleranzmanagement führen. Zudem wurden das Potential und die Umsetzung der Toleranzvergabe in frühen Phasen der Produktentwicklung aufgezeigt.

Vor Fachpublikum konnten Studierende mit der Vorstellung ihrer studentischen Arbeiten überzeugen. Im Fokus standen hier unter anderem die Toleranzoptimierung von technischen Produkten, die Toleranzanalyse in der frühen Produktentwicklung und die Simulation abweichungsbedingter Vibrationen in Wälzlagern. Im Rahmen von Workshops hatten die Teilnehmenden darüber hinaus die Möglichkeit zur praktischen und kommunikativen Auseinandersetzung mit Themen des Toleranzmanagements. Dabei erarbeiteten sie in Teams Illustrationen, um eine möglichst breite Zielgruppe für den häufig schwer greif-

baren Themenkomplex zu sensibilisieren. Zudem wurde anschaulich am Beispiel eines Verbrennungsmotors (Bild 2) gezeigt, dass vor dem Einsatz von rechnergestützten Methoden eine ingenieurtechnische Auseinandersetzung mit der Problemstellung notwendig ist.



Bild 2: Praxisnahe Workshops stießen bei den Teilnehmenden auf reges Interesse

Insbesondere die verschiedenen Vortragsformate sowie die heterogene Zusammensetzung der Gruppe trugen zum Erfolg der Veranstaltung bei. Das positive Feedback der Teilnehmenden ist wie bereits in den Vorjahren auf die große Themenvielfalt zurückzuführen. Sowohl im offiziellen Teil als auch bei der Abendveranstaltung konnten die „sehr guten und interessanten Diskussionen“ zum Networking der Teilnehmenden beitragen.



Bild 3: Die knapp 50 Teilnehmenden präsentierten und diskutierten Fragen des Toleranzmanagements aus Forschung und Industrie

Wir bedanken uns bei allen Teilnehmenden, welche die Summer School „Toleranzmanagement“ 2017 zu einem vollen Erfolg gemacht haben, und freuen uns darauf, Sie zur vierten Summer School Toleranzmanagement 2020 erst- und einmalig in digitaler Form begrüßen zu dürfen.

Programm 2020 – Vormittag

ab 08:00	Welcome Reception mit Get-together und informellem Austausch
09:00	Begrüßung, Vorstellung der Teilnehmenden und der Agenda Sandro Wartzack
09:15	Keynote <i>GPS-Normung im Wandel / Alles neu oder nur anders?</i> Wolfgang Schütte
09:45	Industrievortrag <i>Modellbasierte Entwicklung mit Digital Master</i> Stefan Gliniorz
10:15	Konferenzblock I – Lehre und Studium <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Integration kommerzieller Toleranzanalysesoftware in die Toleranz-Kosten-Optimierung</i> Natalja Haigis ■ <i>Metamodelle in der Anwendung: Abbildung von Fertigungseinflüssen auf die geometrische Genauigkeit additiv gefertigter Bauteile</i> Vincent Kelber ■ <i>RDTol: Konzeption und Aufbau einer Lehrveranstaltung zum Robust Design und Toleranzmanagement</i> Benjamin Schleich
10:45	Interaktiver Austausch zu den Themen aus Konferenzblock I
11:00	Konferenzblock II – Studium und Forschung <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Robustheitsbewertung von Produktkonzepten auf Basis von Graphen</i> Philipp Kirchner ■ <i>Ontologie-basierte Tolerierung von Produktkonzepten</i> Matthias Meixner ■ <i>Herausforderungen bei der Verknüpfung von Gestaltungs- und Toleranzdomäne zur Robustheitsbewertung von Produktkonzepten</i> Frank Bremer ■ <i>Robust Design durch Vermeidung von Design Trade-offs – grundlegende Idee und Praxisanwendung</i> Tobias Eifler
11:40	Interaktiver Austausch zu den Themen aus Konferenzblock II
12:00	Mittagspause mit optionalem Austausch

Programm 2020 – Nachmittag

13:30	<p>Industrievortrag <i>Kritische Betrachtung bei der Anwendung der geometrischen Produktspezifikation Hüllbedingung</i> Frank Langner</p>
14:00	<p>Konferenzblock III – Forschung</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Entwicklung eines Vorgehens zur Toleranzoptimierung an Faser-Kunststoff-Verbund Bauteilen</i> Michael Franz ■ <i>Statistische Toleranzanalyse additiv gefertigter montagefreier Mechanismen unter Berücksichtigung von Gelenkspiel</i> Paul Schächtl ■ <i>Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden</i> Christoph Bode ■ <i>Prozessorientiertes Toleranzmanagement in der Montage</i> Anne Blum
14:40	Interaktiver Austausch zu den Themen aus Konferenzblock III
15:00	Kaffeepause mit optionalem Austausch
15:15	<p>Industrievortrag <i>360° - Toleranzmanagement bei BSH</i> Steffen Klein</p>
15:45	<p>Konferenzblock IV – Industrie</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ <i>Potenzial und Herausforderung der Toleranzanalyse von Rohbauteilen basierend auf der Zusammenbausimulation im Fertigungsprozess</i> Hanchen Zheng ■ <i>Digitale Toleranzanalyse von komplexen Fragestellungen in der Getriebeauslegung</i> Tobias Nuißl ■ <i>Toleranzangaben durch Farbcodierung</i> Jan Stothfang
16:15	Interaktiver Austausch zu den Themen aus Konferenzblock IV
16:30	<p>Zusammenfassung, Resümee und Verabschiedung Sandro Wartzack</p>
ab 16:45	weitere Möglichkeiten für informellen Austausch im Plenum oder Dialog

Inhaltsverzeichnis

Durchgängiges Toleranzmanagement aus Sicht des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik <i>Sandro Wartzack</i> FAU Erlangen-Nürnberg	3
1 Keynote	
GPS-Normung im Wandel / Alles neu oder nur anders? <i>Wolfgang Schütte</i> Fachhochschule Südwestfalen	15
2 Industrievortrag	
Modellbasierte Entwicklung mit Digital Master <i>Stefan Gliniorz</i> tätig bei Robert Bosch GmbH	21
3 Konferenzblock I – Lehre und Studium	
Integration kommerzieller Toleranzanalysesoftware in die Toleranz- Kosten-Optimierung <i>Natalja Haigis</i> FAU Erlangen-Nürnberg	29
Metamodelle in der Anwendung: Abbildung von Fertigungseinflüssen auf die geometrische Genauigkeit additiv gefertigter Bauteile <i>Vincent Kelber</i> FAU Erlangen-Nürnberg	37
RDTol: Konzeption und Aufbau einer Lehrveranstaltung zum Robust Design und Toleranzmanagement <i>Benjamin Schleich</i> FAU Erlangen-Nürnberg	45

4 Konferenzblock II – Studium und Forschung

Robustheitsbewertung von Produktkonzepten auf Basis von Graphen <i>Philipp Kirchner</i> FAU Erlangen-Nürnberg	53
Ontologie-basierte Tolerierung von Produktkonzepten <i>Matthias Meixner</i> FAU Erlangen-Nürnberg	61
Herausforderungen bei der Verknüpfung von Gestaltungs- und Toleranzdomäne zur Robustheitsbewertung von Produktkonzepten <i>Patric Grauberger</i> Karlsruher Institut für Technologie	69

5 Konferenzblock III – Forschung

Entwicklung eines Vorgehens zur Toleranzoptimierung an Faser-Kunststoff-Verbund Bauteilen <i>Michael Franz</i> FAU Erlangen-Nürnberg	75
Statistische Toleranzanalyse additiv gefertigter montagefreier Mechanismen unter Berücksichtigung von Gelenkspiel <i>Paul Schächtl</i> FAU Erlangen-Nürnberg	83
Bestimmung und Berücksichtigung der Einzelpunktmessunsicherheit in virtuellen Toleranzanalysen <i>Björn Heling</i> FAU Erlangen-Nürnberg	91
Ausgewählte Einflussgrößen auf die erzielbaren Verzahnungstoleranzen beim Kaltfließpressen <i>Andreas Rohrmoser</i> FAU Erlangen-Nürnberg	99
Verschleißmodellierung am Beispiel einer Polyamid-Stahl- Getriebepaarung für das prozessorientierte Toleranzmanagement <i>Dominik Schubert</i> FAU Erlangen-Nürnberg	107
Prozessorientiertes Toleranzmanagement in der Montage <i>Rainer Müller</i> Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH.....	117

6 Konferenzblock IV

Potenzial und Herausforderung der Toleranzanalyse von Rohbauteilen basierend auf der Zusammenbausimulation im Fertigungsprozess <i>Hanchen Zheng</i> tätig bei Daimler AG	125
Digitale Toleranzanalyse von komplexen Fragestellungen in der Getriebeauslegung <i>Tobias Nuißl</i> tätig bei Schaeffler Technologies AG & Co. KG	133
Toleranzangaben durch Farbcodierung <i>Jan Stothfang</i> tätig bei B&W Software GmbH	141



Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

- Seit 2009 Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik
- 2000-2009 BROSE GmbH & Co. KG,
zuletzt als Leiter Simulation & Wissensmanagement
- 2000 Promotion zum Dr.-Ing. bei Prof. Meerkamm
- Mitglied des DFG-Fachkollegiums 402 (Mechanik und Konstruktiver Maschinenbau), Fach 402-01 Konstruktion, Maschinenelemente, Produktentwicklung
- Stellvertretender Vorsitzender der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP – Berliner Kreis & WGMK e.V.)
- Ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften
- Sprecher der Doppelplattform Digital Engineering & Production des Zentrums für Digitalisierung Bayern (ZD.B)
- Vorsitzender des VDI-Richtlinienausschusses „Wissensbasiertes Konstruieren“
- Mitglied des Stiftungsrats der SCHAEFFLER FAG Stiftung
- Herausgeber der Zeitschrift „Konstruktion“
- Veranstalter des „DFX-Symposiums“, „Lightweight Design in Product Development“ und der „Summer School Toleranzmanagement“
- Mitglied im wissenschaftlichen Ausschuss nationaler und internationaler Fachkonferenzen:
„Entwerfen Entwickeln Erleben“
„Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung“
„International Conference on Engineering Design“ (ICED)
„International Conference on Computer Aided Tolerancing“ (CIRP-CAT)
„International Design Conference“ (DESIGN)

Durchgängiges Toleranzmanagement aus Sicht des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik

Sandro Wartzack*, Benjamin Schleich, Björn Heling,
Stefan Goetz, Martin Hallmann, Paul Schächtl, Michael Franz,
Vincent Kramer

*wartzack@mfk.fau.de

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

1 Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der FAU Erlangen-Nürnberg

Der Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) ist einer von neun Lehrstühlen des Department Maschinenbaus der Technischen Fakultät der FAU Erlangen-Nürnberg. Aktuell lehren und forschen dort rund 40 wissenschaftliche Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Fachrichtungen Maschinenbau, Mechatronik, Wirtschaftsingenieurwesen, Materialwissenschaften und Informatik, die von 10 Verwaltungs- und technischen Angestellten unterstützt werden. Der Lehrstuhl gliedert sich in die drei wissenschaftlichen Fachabteilungen „Methodische und rechnerunterstützte Produktentwicklung“, „Leichtbau“ und „Maschinenelemente und Tribologie“. Die Fachgruppe „Toleranzmanagement“ ist dabei ein wesentlicher Bestandteil der Abteilung „Methodische und rechnerunterstützte Produktentwicklung“. Die derzeit sechs Mitarbeiter setzen sich in verschiedenen Forschungsprojekten vertieft mit den diversen, interdisziplinären Facetten des Toleranzmanagements auseinander und arbeiten dabei bereichsübergreifend mit den anderen Fachgruppen des KTmfk an Fragestellungen des integrativen Toleranzmanagements und des Robust Designs.

2 Das Toleranzmanagement als Forschungsschwerpunkt am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Die Vergabe von Toleranzen zur Einschränkung unvermeidbarer Bauteilabweichungen stellt für Produktentwicklungsteams eine verantwortungsvolle Aufgabe dar, um die Funktionserfüllung des gesamten Produktes und zugleich dessen kostenbewusste Herstellung zu gewährleisten [1]. Dabei zeichnet sich ein ganzheitliches Toleranzmanagement durch weit mehr als nur der Unterstützung bei der Eintragung von Toleranzwerten in Fertigungszeichnungen aus. Es ist vielmehr als eine ganzheitliche, interdisziplinäre Tätigkeit zu verstehen, die den gesamten Produktentstehungsprozess – von der frühen Planungsphase bis hin zur Fertigung – durchgängig mit Methoden und Werkzeugen begleitet und dabei alle wichtigen Aspekte des Produktlebenszyklus miteinbezieht [1] (siehe Bild 1).

Der zunehmende Kosten- und Qualitätsdruck durch die steigende Zahl konkurrenzfähiger Wettbewerber auf international dynamischen Märkten trägt dazu bei, dass dem Toleranzmanagement eine immer größere Rolle in der Produktentwicklung zuteilwird und so einen elementaren Beitrag zur erfolgreichen Vermarktung und dem wirtschaftlichen Gesamterfolg eines Produkts leistet.

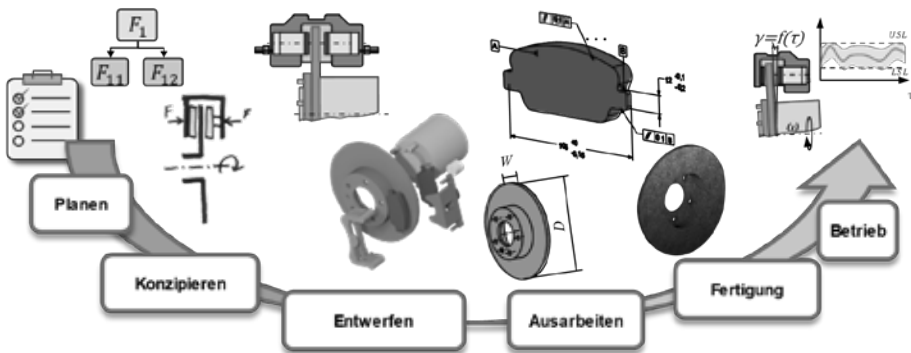


Bild 1: Durchgängige Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses durch Methoden und Werkzeuge des Toleranzmanagements

Aufgrund seiner enormen Bedeutung stellt das integrative Toleranzmanagement seit mehr als 30 Jahren einen elementaren Schwerpunkt in den Forschungs- und Lehrtätigkeiten des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik dar. Dabei konzentriert sich der KTmfk insbesondere auf die in Bild 2 dargestellten, vier wesentlichen Forschungsfelder, die nachfolgend kurz beleuchtet werden.

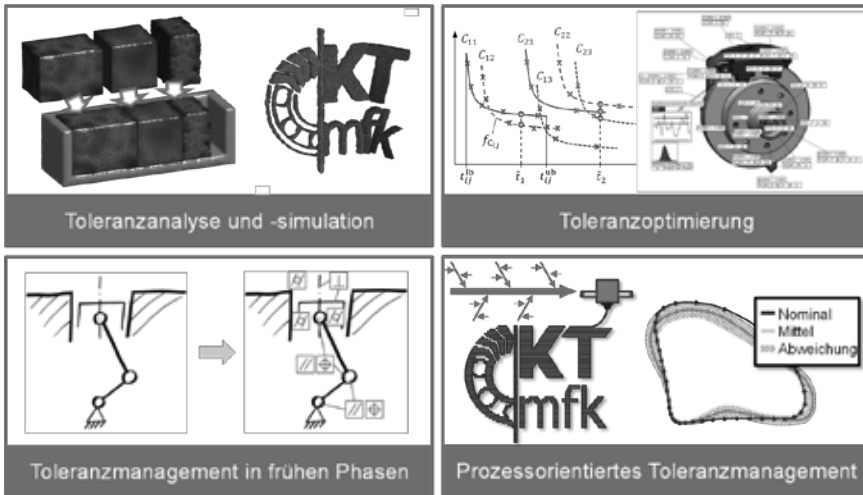


Bild 2: Forschungsschwerpunkte der Fachgruppe „Toleranzmanagement“ am KTmfk

Toleranzanalyse und -simulation

Die Toleranzvergabe ist im Produktentwicklungsprozess von großer Bedeutung [2]. Um auch bei der Tolerierung von komplexen Baugruppen (z. B. Getrieben) – deren Komponenten aufgrund des Herstellprozesses zudem unvermeidbare Abweichungen von ihrer idealen Form aufweisen – qualifizierte Entscheidungen treffen zu können, werden entsprechende rechnergestützte Simulations- und Analysemethoden benötigt. Die Ergebnisse aus der Toleranzsimulation ermöglichen neben einer virtuellen Absicherung der Funktion unter Zuhilfenahme von Sensitivitätsanalysen eine gezielte Anpassung der Toleranzwerte. Auf Grund der umfassenden Anwendbarkeit sowie der hohen Ergebnisgüte setzt der KTmfk primär auf eine Sampling-basierte Toleranzrechnung beispielsweise mit Monte-Carlo oder Latin-Hypercube-Sampling. Als Toleranzanalysemodell kommen hierbei neben etablierten Modellen, wie dem Vektormodell, auch eigens entwickelte Ansätze, wie Skin Model Shapes [3], zum Einsatz. Dieses auf Punktwolken und Oberflächennetzen basierende Vorgehen ermöglicht eine detaillierte, realitätsnahe Toleranzsimulation sowie eine Kombination mit Messdaten oder Fertigungsprozesssimulationen. Nachdem damit zahlreiche Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad vorliegen, wird derzeit an hybriden (orts aufgelösten) Toleranzanalysemodellen geforscht. In Kombination mit Untersuchungen zur geeigneten Wahl der Samplingpunkte trägt dies dazu bei, den Konflikt zwischen hoher Ergebnisgüte und geringer Berechnungsdauer zu lösen.

Toleranzoptimierung

Bei der geeigneten Wahl der einzelnen Toleranzwerte ergibt sich stets ein Zielkonflikt. Während zu groß gewählte Toleranzen die Funktionserfüllung nicht gewährleisten können, haben zu klein gewählte hohe Kosten zur Folge. In der Praxis ist es dabei nach wie vor üblich, Toleranzwerte auf Basis von Erfahrungswerten zu wählen oder iterativ auf Basis von Ergebnissen aus Toleranz- und Sensitivitätsanalysen gemäß dem Leitsatz „so eng wie nötig, so weit wie möglich“ anzupassen. Allerdings kann dadurch der Kostenaspekt lediglich qualitativ berücksichtigt werden. Weitaus größeres Potential bietet die Methode der Toleranzoptimierung, welche die Suche nach einer geeigneten Kombination an Toleranzwerten in ein mathematisches Optimierungsproblem überführt und automatisiert unter Zuhilfenahme von Optimierungsalgorithmen das globale Kostenoptimum ermittelt. [2]

Neben einer realitätsnahen Abbildung des mathematischen Zusammenhangs zwischen den Toleranzwerten und den resultierenden Fertigungskosten stellt die statistische Absicherung der Funktionserfüllung eine große Herausforderung dar [2]. So ist für die Optimierung bewegter Systeme eine Absicherung des gesamten Bewegungsverlaufs unter Berücksichtigung interner und externer Einflussgrößen, wie z. B. Temperatur oder Kraft, und ihren Wechselwirkungen erforderlich [4]. Über- und unterbestimmte Baugruppen hingegen haben sprunghaft wechselnde Baugruppenzustände mit mehreren Schließmaßen sowie Montagekonflikte zur Folge, die über erweiterte Analyseverfahren in der Toleranzoptimierung abgebildet werden müssen [5]. Neben Toleranzwerten können auch Nennmaße so festgelegt werden, dass eine robuste Funktionserfüllung im Sinne des Robust Designs gewährleistet wird [6].

Toleranzmanagement in frühen Phasen

Die Forschung im Bereich des frühzeitigen Toleranzmanagements orientiert sich stark am Robust Design. Die dabei entwickelten Methoden unterstützen den Konstrukteur in den frühen Phasen der Produktentwicklung von Planung über Konzept bis hin zum Entwurf - noch vor der finalen Produktgestaltung - bei der integrativen Berücksichtigung von Abweichungen sowie den erforderlichen Toleranzen. Die Herausforderung besteht dabei vor allem in der Entwicklung konkreter, anwendbarer Methoden auf Basis der in frühen Phasen häufig schwammigen Informationen. [7] Zu Beginn der Methodik lässt sich bereits auf Basis der Funktionsstruktur eine Identifikation und Priorisierung der relevanten Funktionsgrößen, die die Basis für die weiteren Tolerierungsaktivitäten bilden, durchführen. Diese Bewertung ist Grundlage für eine quantitative Robustheitsbewertung von Lösungsprinzipien, wie Kniehebel oder Spindel, und unterstützt