

Toleranzmanagement in Konzept- und früher Entwurfsphase: Erste Ansätze und Potentiale

Stefan Goetz, Benjamin Schleich, Sandro Wartzack

*Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Abstract

Accompanied by the frontloading efforts in product development, tolerancing becomes more and more important in early design stages. Motivated by the lack of methods for early phases of the design process, three approaches for considering tolerances in conceptual and preliminary design stages are presented in this paper. The first allows assessing the robustness of concepts with the help of a tolerance-specific FMEA. A subsequent method enables a tolerance specification and analysis based on a graphical visualization of the product structure. Furthermore, a sensitivity analysis for skeleton models is presented. By using these methods the design and tolerancing process runs simultaneously. Hence, a robust design and reliable tolerances already exist at the beginning of the detail design.

Keywords: Conceptual Design, Preliminary Design, Robust Design, Tolerance Analysis

1 Toleranzmanagement im Kontext des Frontloading

Die Funktionalität von Produkten wird durch die konstruktive Gestaltung festgelegt, aber maßgebend durch unvermeidbare, herstellungsbedingte Gestaltabweichungen beeinflusst [1]. Zur Absicherung der Qualität müssen diese

unter Berücksichtigung der Fertigungskosten durch eine geeignete Tolerierung eingeschränkt werden. Bislang erfolgt dieser Schritt meist erst bei der finalen Ausarbeitung gegen Ende der Produktentwicklung.

Im Sinne des Frontloading lassen sich jedoch durch die Einbindung des Toleranzmanagements in die Konzept- und Entwurfsphase iterative Rücksprünge im Tolerierungsprozess entsprechend der Maxime „Right-First-Time“ vermeiden und somit kürzere Entwicklungszeiten realisieren. Unter Berücksichtigung der „Rule of Ten“, die den exponentiellen Anstieg der Änderungskosten im fortschreitenden Entwicklungsprozess beschreibt [2], ist eine erste Toleranzbetrachtung besonders in den Phasen, in denen die Geometrie noch nicht final definiert ist, sinnvoll. Neben einer frühzeitigen Absicherung elementarer Toleranzen besteht besonders hier die Möglichkeit, die Geometrie sowie den konzeptuellen Aufbau einer Baugruppe mit geringem Änderungsaufwand hinsichtlich einer robusten Produktgestaltung anzupassen. Somit lassen sich unnötig enge Toleranzen, sogenannte Angsttoleranzen, als wesentlicher Produktkostenfaktor vermeiden.

Allerdings bleibt das große Potential eines frühzeitigen Toleranzmanagements in der Industrie meist ungenutzt [3]. Im vorliegenden Beitrag werden deshalb Ansätze vorgestellt, die eine praxisorientierte Toleranzbetrachtung bereits in der Konzept- und Entwurfsphase der Produktentwicklung ermöglichen.

2 Bestehende Ansätze zur konstruktionsprozessbegleitenden Toleranzbetrachtung

Für die Entwicklung eines frühzeitigen, durchgängigen Toleranzmanagements dienen die Vorgehensmodelle nach Pahl/Beitz [4] sowie VDI 2221 [5] als Grundlage. Demnach werden im Entwicklungsprozess ausgehend von den Anforderungen für die verschiedenen Funktionen Lösungsprinzipien gefunden und diese entsprechend gegliedert, sodass zu Beginn der Entwurfsphase eine Produktstruktur vorliegt [5]. Auf Basis dieser Struktur lässt sich unter Zuhilfenahme wesentlicher Abmessungen eine erste Grobgestaltung und räumliche Anordnung der maßgebenden Module vornehmen [5]. In Bild 1 ist jeweils eine mögliche Darstellungsart der in den wesentlichen Schritten der Konzept- und Entwurfsphase vorliegenden Informationen dargestellt. Hervorzuheben ist hierbei das Skelettmodell, das eine anwendungsnahe Repräsentationsform einer Grobgestalt bzw. eines Vorentwurfs darstellt [6].

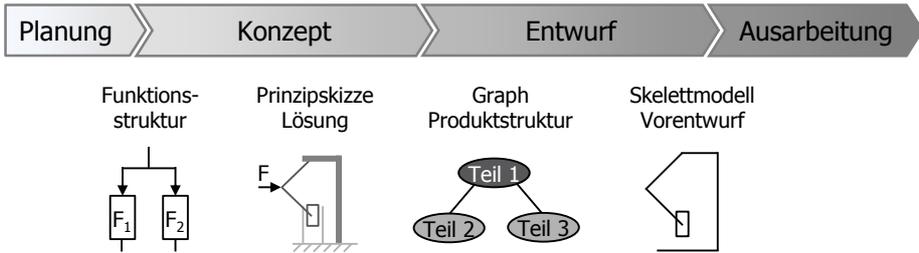


Bild 1: Mögliche Ergebnisrepräsentationsformen aus Konzept- und Entwurfsphase

Bislang dienen diese und weitere Ergebnisse der einzelnen Schritte des Produktentwicklungsprozesses bereits als Grundlage für die üblicherweise während der Ausarbeitung durchgeführte Tolerierung. So nehmen beispielsweise die in der Planungsphase festzulegenden Produkthanforderungen erheblichen Einfluss auf die Toleranzstruktur sowie die Absicherung der Produktqualität [7]. Es liegt daher nahe, diese Informationen aus den frühen Entwicklungsphasen bereits vor der Ausarbeitung für eine Toleranzbetrachtung zu nutzen und gegebenenfalls frühzeitig notwendige Iterationen auszulösen.

So setzen sich bereits zahlreiche Arbeiten mit der Tolerierung auf Basis elementarer funktioneller Produkthanforderungen auseinander. Für die Übertragung der Anforderungen auf eine funktionelle Tolerierung erfordern einige der Ansätze jedoch Informationen zu Herstellungs- und Montageprozessen [8–10], die jedoch in frühen Entwicklungsphasen häufig noch unbestimmt sind. In einem alternativen, sehr abstrakt formulierten Vorgehen wird die Verknüpfung zwischen Produktfunktion und Form beschrieben, jedoch nicht genauer auf die integrierte Toleranzvergabe eingegangen [11]. Das Problem fehlender konkreter Hinweise zur Umsetzung einer frühzeitigen Tolerierung ergibt sich auch bei der Anwendung der Geometrischen Produktspezifikation (GSP), die sich nach Erweiterung der Tolerierungssprache um „GeoSpelling“ grundsätzlich während des gesamten Entwicklungsprozesses anwenden lässt [12].

Da sich die existierenden Tolerierungsansätze nicht durchgängig im Konstruktionsprozess einsetzen lassen, dies aber große Bedeutung hat, wird in [13] ein integrierter Tolerierungsprozess vorgestellt, welcher von der Konzeptphase bis zur Ausarbeitung Anwendung finden soll. Darin wird das Konzept eines sich parallel zur Entwicklung erweiternden Graphen zur Informationsverwaltung und Toleranzanalyse vorgestellt [13]. Neben einer graphischen Visualisierung werden in [14] Matrizen eingeführt, welche die Zusammenhänge zwischen funktionellen und geometrischen Anforderungen sowie deren

mögliche Realisierung beschreiben und damit bereits in der Konzeptphase eine Analyse hinsichtlich der sich ergebenden Toleranzketten des Produkts ermöglichen.

Die zahlreichen auf dem Gebiet des frühzeitigen Toleranzmanagements existierenden Arbeiten zeigen bereits dessen Bedeutung und verdeutlichen zugleich den weiterhin erforderlichen Forschungsbedarf. Wenngleich einige Ansätze und grundlegende Konzepte existieren, fehlt derzeit ein konkretes Vorgehen, das parallel zum Entwicklungsprozess vom Konstruktionsteam genutzt werden kann.

3 Ansätze des frühzeitigen Toleranzmanagements

Zur Beschreibung eines möglichst praxisnahen Vorgehens werden in diesem Kapitel drei grundlegende Ansätze vorgestellt, die den Konstrukteur bei der Toleranzbetrachtung von der frühen Konzept- bis in die späte Entwurfsphase unterstützen. Auf Grund der adäquaten Granularität sind diese Ansätze den einzelnen Schritten der VDI 2221 zugeordnet. Für die Phase der Lösungsfindung werden ausgehend von der Funktionsstruktur relevante Funktionsmaße abgeleitet und daraufhin unterschiedliche Konzeptvarianten hinsichtlich der Tolerierungssituation bewertet. Anschließend lässt sich parallel zur Erstellung der Produktstruktur nach VDI 2221 mit dem in Kapitel 3.2 vorgestellten Ansatz eine Toleranzstruktur ableiten und analysieren. Darauf aufbauend wird am Ende der Entwurfsphase der Vorentwurf, verkörpert durch ein Skelettmmodell, als Basis für eine quantitative Toleranzanalyse genutzt. Diese verschiedenen Ansätze werden im Folgenden anhand eines durchgängigen Beispiels einer handbetriebenen, weggesteuerten Münzprägemaschine erläutert.

3.1 Robustheitsbewertung von Konzepten

Ausgehend von der zu Beginn der Konzeptphase vorliegenden Funktionsstruktur lassen sich mit Hilfe von Erfahrungswissen des Produktentwicklungsteams, Brainstorming-Techniken, Literaturrecherche oder weiteren Quellen streuungssensitive Funktionen, die durch auftretende Gestaltabweichungen stark beeinflusst werden, identifizieren. Für das Beispiel der Münzprägemaschine ist in Bild 2 ein Auszug der Funktionsstruktur mit hervorgehobener streuungssensitiver Funktion dargestellt. Unter Berücksichtigung der Anforderung, dass die Tiefe der Münzprägung über den Weg der Handbewegung gesteuert wird und die Handkraft variabel ist, gilt die Funktion „Stempel führen“ als besonders streuungssensitiv hinsichtlich der Prägefunktion.

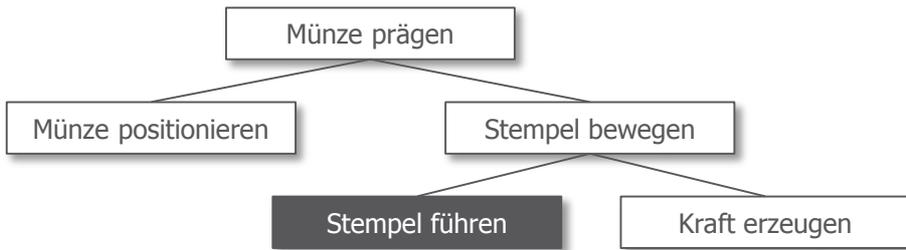


Bild 2: Auszug aus der Funktionsstruktur einer Münzprägemaschine mit hervorgehobener streuungssensitiver Funktion „Stempel führen“

Zur quantitativen Erfassung der relevanten Funktionen gilt es möglichst repräsentative und eindeutige Funktionsmaße festzulegen. Wie das Beispiel in Bild 3 verdeutlicht, sind jedoch selbst zur Beschreibung relativ einfacher Funktionen mehrere Funktionsgrößen nötig. So wird die Qualität der Münzprägung neben der Positionsabweichung Δd maßgebend durch die Verkippung α zwischen Stempel und Auflagefläche definiert. Eine vollständige Reduktion der Toleranzbetrachtung auf die Verkippung und damit auf die Funktion „Stempel führen“ ist somit nicht ohne weiteres möglich. Um beurteilen zu können, inwiefern eine solche Reduktion zulässig bzw. sinnvoll ist, sind die Funktionsmaße wie in Bild 3 entsprechend ihrer Bedeutung für die Gesamtfunktion zu gewichten.

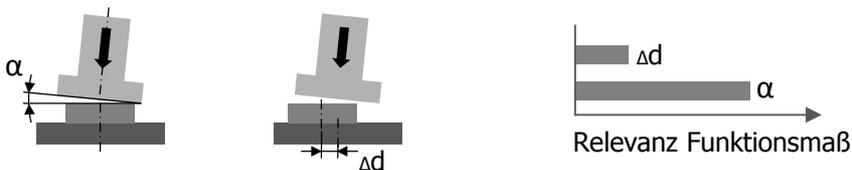


Bild 3: Darstellung der beiden Funktionsmaße Verkippung und Positionsabweichung sowie deren Bedeutung für die Gesamtfunktion

Diese Informationen lassen sich anschließend in einer toleranzspezifisch angepassten Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA) nutzen, um erste Aussagen über die notwendige Genauigkeit des späteren Produkts im Hinblick auf Fertigung, Montage und Qualität zu treffen. Dabei sind die drei erforderlichen Kennzahlen für Auftrittswahrscheinlichkeit (A), Bedeutung (B) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) an die Gegebenheiten der Toleranzanalyse anzupassen. Zur Bestimmung der Kennzahl A, welche die Streuungssensitivität der Funktion abbildet, muss eine Bewertung der Tolerierungssituation mit Kriterien wie z. B. der Toleranzkettenlänge oder der statischen Bestimmtheit erfolgen. Die Bedeutung (B) ist hingegen bereits durch die in

Bild 3 dargestellte Beurteilung der Relevanz eines Funktionsmaßes festgelegt. Die dritte Größe E beurteilt, wie wahrscheinlich die Entdeckung eines tolerierungstechnischen Mangels (z. B. die Überschreitung der Spezifikationsgrenzen) bereits vor der Auslieferung des Produkts ist. Hierbei ist u. a. zu prüfen ob zur Sicherstellung der Funktion eine Messung nötig ist oder ob diese bereits durch beispielsweise die Fügbarkeit von Komponenten in der Montage gewährleistet wird.

Durch Multiplikation der ermittelten Kennzahlen A, B und E ergibt sich in der Toleranz-FMEA ein charakteristischer Wert, der die objektive, toleranzgerichtete Gegenüberstellung verschiedener Lösungskonzepte erlaubt. Damit lassen sich bereits im konstruktiven Umfeld angewandte Evaluierungsmethoden, wie die Nutzwertanalyse, um den Aspekt der Tolerierung erweitern und Lösungen für kostengünstige und robuste Gesamtprodukte auswählen.

3.2 Graphenbasierte Toleranzbetrachtung auf Basis der Produktstruktur

Im Konstruktionsprozess nach VDI 2221 lassen sich die prinzipiellen Lösungen entsprechend der Funktionsstruktur u. a. in einer Prinzipskizze darstellen und daraus die Baustruktur des Produkts ableiten (vgl. Bild 4).

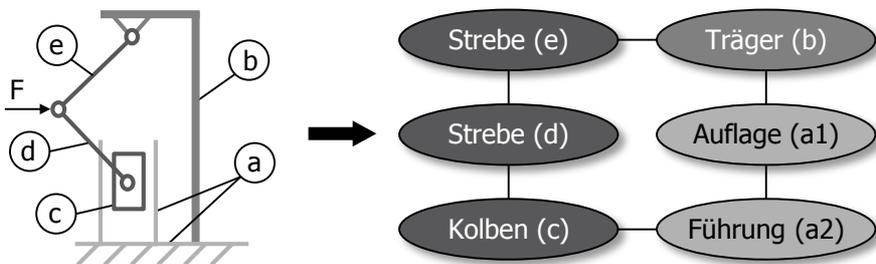


Bild 4: Prinzipskizze (links) und graphische Darstellung der Baustruktur (rechts) exemplarisch für eine Münzprägemaschine

Zur Einbindung von Toleranzinformationen wird der aus dem Entwicklungsprozess hervorgehende Graph zunächst um Informationen zu den Verbindungsbeziehungen zwischen den Bauteilen bzw. Baugruppen der Baustruktur erweitert. Analog zu den Platzierungsbedingungen von Komponenten aus der CAD-Umgebung können neben starren Verbindungen auch Gelenke und Lager, die nur einen Teil der Freiheitsgrade (FHG) einschränken, definiert werden.

Da die Anzahl üblicherweise auftretender Verbindungsbeziehungen relativ gering ist, lassen sich die Bezeichnungen hierfür vereinheitlichen und mit semantischen Informationen zu den im Kontakt beteiligten Funktionsflächen sowie dessen mögliche geometrische Tolerierung hinterlegen. So sind an einem Drehgelenk beispielsweise stets zwei Zylinderflächen beteiligt, die entsprechend mit einer Zylindrizitätstoleranz versehen werden können. Bedingt durch die Semantik lässt sich nach Festlegung der Verbindungsbeziehungen automatisch ein Geometrielemente-Graph mit den relevanten Funktionsflächen ableiten (vgl. Bild 5).

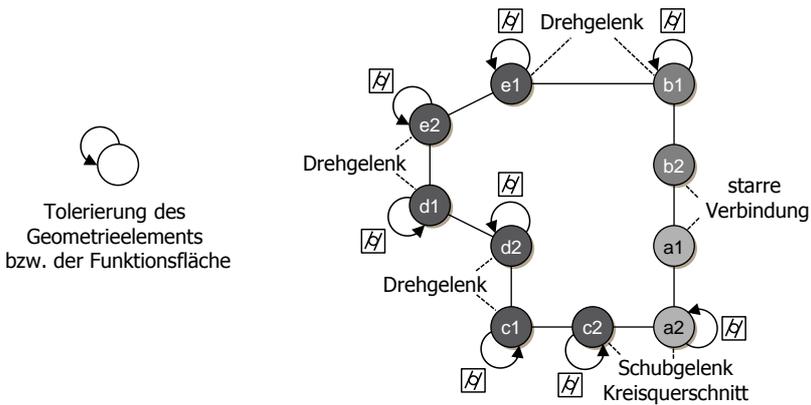


Bild 5: Abgeleiteter Geometrieelemente-Graph aus semantischen Informationen der Verbindungsbeziehungen

Anschließend hat der Konstrukteur die Möglichkeit, den Graphen um weitere Geometrieelemente sowie zusätzliche Toleranzen zu ergänzen, wobei vordefinierte Auswahllisten bei der Toleranzvergabe unterstützen. Die u. a. bei Lagetoleranzen erforderlichen Bezüge lassen sich dabei entsprechend der Legende in Bild 6 durch einen Pfeil repräsentieren. Da neben wirklichen auch abgeleitete Geometrieelemente für die Tolerierung erforderlich sind, werden die Knoten im Graphen zur Darstellung der abgeleiteten Elemente durch eine gestrichelte Umrandung dargestellt.

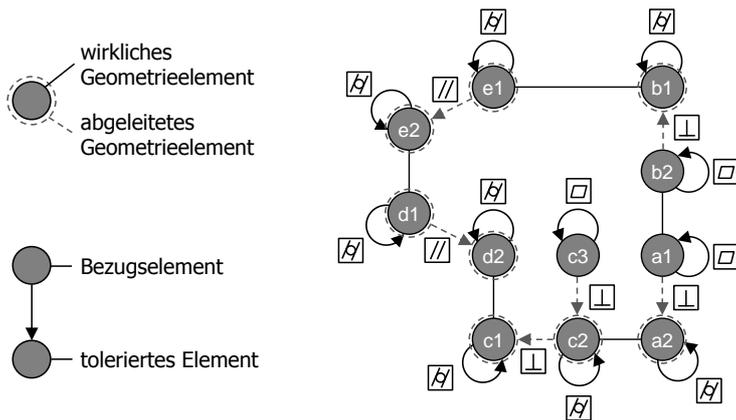


Bild 6: Graphische Darstellung der Toleranzstruktur einer Münzprägemaschine

Das in Bild 6 zusätzlich eingefügte Geometrieelement c3 entspricht der Stempelfläche, die zusammen mit der Auflagefläche a1 den funktionsabsichernden Spalt (vgl. Kapitel 3.1) bildet. Durch Einbezug dieser Fläche ist es möglich, eine funktionsmaßorientierte Schließmaßstruktur aus der Toleranzstruktur (vgl. Bild 6) (teil-)automatisiert abzuleiten und die sich ergebende Toleranzkettenlänge als Basis für eine Bewertung der Tolerierungssituation zu nutzen. So lassen sich, wie in Bild 7 dargestellt, verschiedene modulare Strukturen des Produkts gegenüberstellen. Durch die Anbindung der Führungsfläche für den Kolben an die Auflagefläche (Struktur 1), anstatt an das dunkelgrau dargestellte Trägerbauteil (Struktur 2), reduziert sich die Toleranzkette für die Verkippung zwischen den Flächen a1 und c3 um ein Element, sodass die Funktion später leichter abzusichern ist.

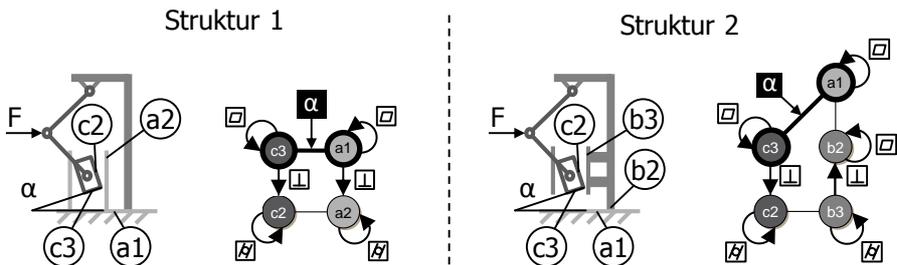


Bild 7: Prinzipskizze und sich ergebende Schließmaßstruktur für die Verkippung α von zwei unterschiedlichen Produktstrukturen

Das in diesem Kapitel vorgestellte Vorgehen ermöglicht parallel zum Entwicklungsprozess eine erste Toleranzspezifikation auf Basis der Baustuktur.

Durch die anschließende Reduktion auf Schließmaßstrukturen lassen sich selbst bei großen Baugruppen schnell die an einem Funktionsmaß beteiligten Komponenten identifizieren und damit die Absicherungssituation der modularen Produktstruktur bewerten.

3.3 Toleranzanalyse am Skelettmodell

Basierend auf der modularen Struktur werden nach der VDI 2221 die maßgebenden Module gestaltet, sodass ein Vorentwurf der relevanten Komponenten mit elementaren Maßen vorliegt. In der CAD-Umgebung lässt sich diese Grobgestalt mit Skelettmodellen darstellen, die für eine statistische Toleranzanalyse allerdings entsprechend aufbereitet werden müssen.

So werden die zum Teil unbewusst festgelegten Zwangsbedingungen wie die Rechtwinkligkeit zwischen zwei Elementen - sofern diese bei der Toleranzanalyse berücksichtigt werden sollen - gelöscht und durch eine entsprechende Bemaßung (z. B. 90°) ersetzt. Diese und weitere bereits im Skelettmodell hinterlegten Bemaßungen werden parametrisiert und in eine Familientabelle übernommen. Darüber hinaus werden die sich ergebenden Funktionsmaße des Skeletts in die Familientabelle aufgenommen. Für die jeweils parametrisierten Bemaßungsparameter lässt sich auf Basis bereits festgelegter Wahrscheinlichkeitsverteilungen ein Sampling der Eingangsgrößen in der Familientabelle hinterlegen und nach Berechnung eine Verteilung der sich ergebenden Funktions- bzw. Schließmaße ableiten. Neben der Absicherung der Funktion lassen sich diese Ergebnisse für eine Sensitivitätsanalyse nutzen, mit Hilfe derer sich ein Beitragsleister-Ranking erstellen lässt.

Wenngleich das beschriebene Vorgehen die CAD-basierte Toleranzanalyse fokussiert, lassen sich die grundsätzlichen Aufbereitungsschritte sowie die im Nachfolgenden erläuterten Besonderheiten bei dieser Methode auf jede vektormodellbasierte statistische Toleranzanalyse übertragen. So stellt die geeignete Repräsentation verschiedener Toleranzzonen im Skelett- bzw. Vektormodell eine wesentliche Herausforderung dar. Während (eindimensionale) Maßtoleranzen durch einen Maßparameter in der Familientabelle abgebildet werden können, sind zur Beschreibung mehrdimensionaler Toleranzzonen v. a. bei Formtoleranzen sehr viele Parameter nötig (vgl. Bild 8). Neben einer umfangreichen Aufbereitung des Modells ist für eine aussagekräftige statistische Toleranzanalyse bei vielen Eingangsparametern eine hohe Anzahl an Samples nötig, die wiederum zu einer langen Rechenzeit führt. Darüber hinaus ist die Auswertung der Sensitivitätsanalyse bei Toleranzen, die durch mehrere Parameter beschrieben werden müssen und somit mehrere Sensitivitätswerte aufweisen, schwierig.

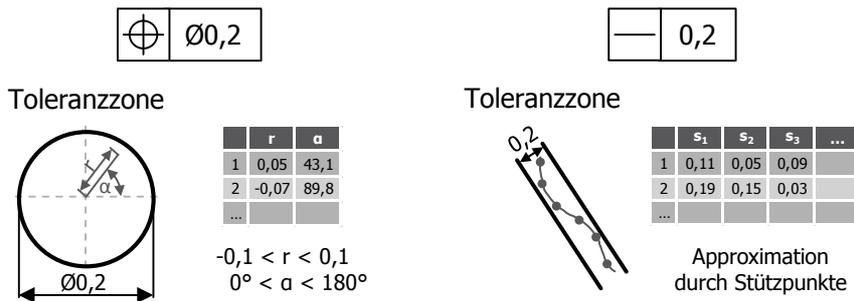


Bild 8: Toleranzzone sowie Ausschnitt aus zugehöriger Familientabelle mit Sampling für eine Positionstoleranz (links) und eine Lagetoleranz (rechts)

Eine reine Summation der Sensitivitätsindizes ist auf Grund möglicher Wechselwirkungen zwischen den Eingangsparametern nicht zielführend. Stattdessen lässt sich bei kreis- bzw. kugelförmigen Toleranzzonen (vgl. links in Bild 8) nach dem Vorbild der Arbeit von Wu [15] eine Mittelung über den Azimut- und Polarwinkel vornehmen, sodass sich jeweils ein relevanter Sensitivitätswert für die untersuchte Toleranz ergibt. Die Beschreibung weiterer Toleranzzonen (vgl. rechts in Bild 8) lässt sich durch den Einsatz von sogenannten Deviation Domains [3] auf einen zugeordneten Eingangsparameter reduzieren. Trotz dieser Möglichkeiten ist fraglich, inwiefern beispielsweise die Berücksichtigung von Formtoleranzen im Skelettmodell sinnvoll ist. Sofern es sich um in Kontakt stehende Funktionsflächen handelt, sollte sich die Sensitivitätsanalyse anstatt mit den eigentlichen Formabweichungen bevorzugt mit idealen Anlageelementen auseinandersetzen. Damit lassen sich die Auswirkungen von Formabweichungen auf angrenzende Bauteile (z. B. Neigungsabweichungen) in frühen Phasen zumindest stark vereinfacht abbilden. Durch Nutzung weiterer Ansätze zur Toleranzsimulation [16] lässt sich die Formtolerierung in späteren Phasen final ausarbeiten.

Die so in der Sensitivitätsanalyse ermittelten Ergebnisse ermöglichen ein Ranking der Beitragsleister und damit eine zielgerechte Anpassung der Toleranzen. Neben einer frühzeitigen Absicherung auf Basis der Grobgestalt stehen damit zu Beginn der Ausarbeitungsphase verlässliche Eingangsgrößen für Kinematiksimulationen zur Verfügung.

4 Fazit und Ausblick

Mit den im Beitrag vorgestellten Ansätzen steht dem Produktentwickler ein Vorgehen zur Verfügung, das komplementär zu den einzelnen Schritten des Konstruktionsprozesses durchgängig in der Konzept- und Entwurfsphase

angewendet werden kann. Da diese Methode eine simultane Festlegung von Geometrieelementen und zugehöriger Tolerierung ermöglicht, lassen sich große Iterationsschleifen in der Entwicklung vermeiden. Neben einer robusten, konstruktiven Lösung liegen somit zu Beginn der Ausarbeitungsphase wesentliche bereits durch eine Toleranzanalyse verifizierte Toleranzen vor.

Wenngleich sich die vorgestellte Tolerierungsmethode stark am Entwicklungsprozess orientiert, ist insbesondere bei den in Kapitel 3.2 und 3.3 beschriebenen Schritten eine (Teil-)Automatisierung nötig, um die Benutzerfreundlichkeit und so die Akzeptanz im konstruktiven Umfeld zu verbessern. Neben einer Reduzierung des Aufwands bei der Ausarbeitung führt die konsequente Anwendung des Vorgehens zu einer zunehmenden Sensibilisierung des Konstrukteurs hinsichtlich Toleranzen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens „Toleranzmanagement in frühen Produktentwicklungsphasen“ (WA 2913/17-1).

Literatur

- [1] Walter, M. et al.: "Simulation based generation of an initial design taking into account geometric deviations and deformations", ICED 11, Culley, S. J. et al., The Design Society Copenhagen, 2011, pages 78-90
- [2] Wartzack, S. et al.: "Lebenszyklusorientierte Toleranzsimulation zur funktionalen und ästhetischen Produktabsicherung", Konstruktion, 06-2011, pages 63-74
- [3] Ziegler, P.; Wartzack, S.: "Concept for tolerance design in early design stages based on skeleton models", Design for harmonies ICED 13, Lindemann, U. et al., The Design Society Castle Carry, 2013, pages 1-10.
- [4] Pahl, G.; Beitz, W.: "Konstruktionslehre, Handbuch für Studium und Praxis", Springer-Verlag, Berlin, 1977.
- [5] VDI 2221: "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte", Beuth, Berlin, 1993.

-
- [6] Bossmann, M.: "Feature-basierte Produkt- und Prozessmodelle in der integrierten Produktentstehung", Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2007.
- [7] Stark, R.: "Entwicklung eines mathematischen Toleranzmodells zur Integration in (3D-) CAD-Systeme", Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1994.
- [8] Srinivasan, R. S.; Wood, K. L.; McAdams, D. A.: "Functional tolerancing, A design for manufacturing methodology", *Research in Engineering Design*, 8, 1996, pages 99–115.
- [9] Anselmetti, B.: "Generation of functional tolerancing based on positioning features", *Computer-Aided Design*, 38, 2006, pages 902–919.
- [10] Malmiry, R. B. et al.: "From Functions to Tolerance Analysis Models by Using Energy Flow Model in Characteristics-Properties Modelling", *Procedia CIRP*, 43, 2016, pages 100–105.
- [11] Roy, U. et al.: "Function-to-form mapping, Model, representation and applications in design synthesis", *Computer-Aided Design*, 33, 2001, pages 699–719.
- [12] Dantan, J.-Y.; Ballu, A.; Mathieu, L.: "Geometrical product specifications — model for product life cycle", *Computer-Aided Design*, 40, 2008, pages 493–501.
- [13] Dantan, J.-Y.; Anwer, N.; Mathieu, L.: "Integrated Tolerancing Process for conceptual design", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52, 2003, pages 135–138.
- [14] Johannesson, H.; Söderberg, R.: "Structure and Matrix Models for Tolerance Analysis from Configuration to Detail Design", *Research in Engineering Design*, 12, 2000, pages 112–125.
- [15] Wu, Z.: "Sensitive factor for position tolerance", *Research in Engineering Design*, 9, 1997, pages 228–234.
- [16] Schleich, B.; Wartzack, S.: "Skin Model Shapes: ein neuer Ansatz zur Toleranzsimulation auf Basis von Punktwolken und Oberflächennetzen", *Konstruktion*, 04-2017, pages 86-90