

Statistische Toleranzanalyse mithilfe von Familientabellen-basierten Skelettmodellen

Andreas Winkler

winkler@mfk.fau.de

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

1 Potentiale einer CAD-basierten Toleranzanalyse in frühen Produktentwicklungsphasen

Aufgrund zunehmend kürzerer Produktlebenszyklen und Entwicklungszeiten sowie möglicher Kostensenkungen durch rechtzeitige Fehlererkennung und Toleranzoptimierung wird bereits in frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses eine Absicherung der Auswirkungen von Fertigungsabweichungen auf die Funktionsfähigkeit und die Herstellungskosten technischer Systeme angestrebt. Allgemein gebräuchliche rechnergestützte Analysewerkzeuge (CAT-Systeme) existieren typischerweise in Form von eigenständigen Applikationen oder als Zusatzmodule innerhalb der CAD-Umgebung. Sie ermöglichen damit Toleranzanalysen auf Basis von 3D-CAD-Modellen. Allgemein lässt sich jedoch feststellen, dass der sinnvolle Einsatz kommerzieller CAT-Software, wie CETOL[®], VisVSA[®], 3DCS[®] und weiterer lediglich späteren Produktentwicklungsphasen vorbehalten ist, da hierfür idealerweise bereits detaillierte 3D-Volumenmodelle zur Abbildung von Form- und Lagetoleranzen erforderlich sind. [1]

Typischerweise liegen in frühen Produktentwicklungsphasen zunächst grobe Entwürfe in Form von Skelettmodellen vor, welche eine Abbildung von Form- und Lagetoleranzen erschweren. Zudem würden häufige Entwurfsände-

rungen, welche für frühe Konstruktionsphasen typisch sind, zu erheblichem Aufwand bei der Aktualisierung des Toleranzmodells von CAT-Systemen führen.

In dem vorliegenden Artikel soll folglich eine auf Skelettmodelle anwendbare und mittels CAD-Familientabellen realisierte Methode der statistisch numerischen Toleranzanalyse vorgestellt werden, welche insbesondere auch eine Abbildung von Form- und Lagetoleranzen erlaubt.

2 Methodischer Ablauf der statistischen Toleranzanalyse von CAD-Skelettmodellen

2.1 Allgemeines Vorgehen

Der in Bild 1 dargestellte Ablaufplan zeigt die erforderlichen Schritte zur Durchführung von Familientabellen-basierten statistischen Toleranzanalysen mittels CAD-Skelettmodellen auf.

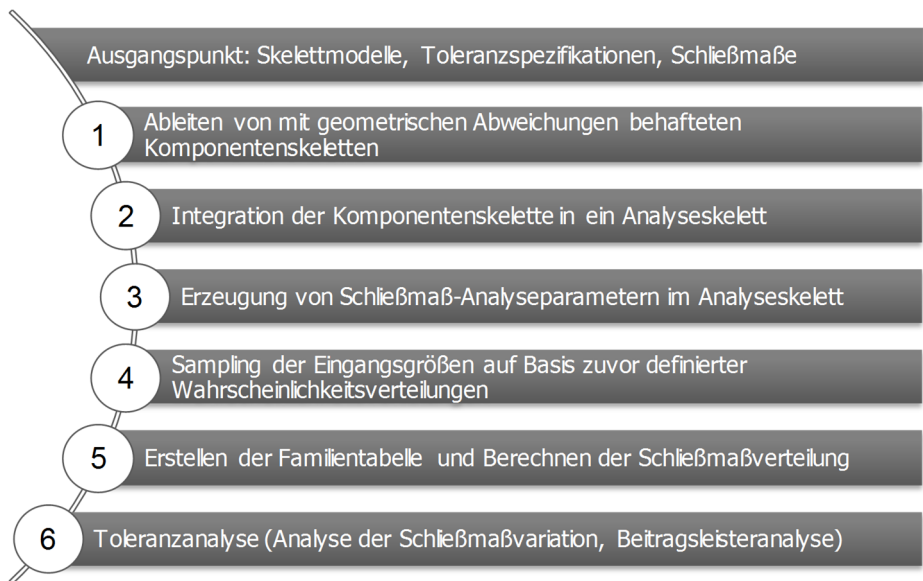


Bild 1: Ablaufplan der Familientabellen-basierten Toleranzanalyse von Skelettmodellen

Ausgehend von bereits bestehenden Skelettmodellen werden zunächst Komponentenskelette abgeleitet, mithilfe derer entsprechend definierte Toleranzen durch Abweichungen von der Nominalgeometrie dargestellt werden

können. Die so modifizierten Part-Skelette werden im nächsten Schritt in ein übergeordnetes Analyseskelett integriert, welches die Familientabelle enthält. Diese beinhaltet alle zur Abbildung der vorgesehenen Toleranzen erforderlichen Eingangsgrößen aus den Komponentenskeletten und weist diesen Parametern zufällig generierte Abweichungsmaße entsprechend der zugrunde gelegten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zu.

Weiterhin sind im Analyseskelett die zu analysierenden Schließmaße, beispielsweise anhand von Analysewerkzeugen, zu definieren und ebenfalls als Parameter in die Familientabelle zu übernehmen und zu berechnen. Die so bestimmten Schließmaßverteilungen dienen im Folgenden zur Analyse der Schließmaßvariation sowie zur Aufstellung eines Beitragsleister-Rankings auf Grundlage von Sensitivitätsanalysen.

2.2 Darstellung von Maß-, Form- und Lagetoleranzen

Die Abbildung von Maßtoleranzen in CAD-Skelettmodellen erfolgt über die direkte Steuerung der in den Part-Skeletten definierten Bemaßungen Parameter. In einem nächsten Schritt werden alle abweichungsbehafteten Maße und Parameter in die Familientabelle des Assembly-Skeletts übernommen, sodass ein Set an Stichproben unter Beachtung der zuvor definierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt werden kann.

Die zutreffende Abbildung von Form- und Lagetoleranzen in Skelettmodellen die weitaus größere Herausforderung dar. Jeder Form- und Lagetoleranz können spezifische Toleranzzonen zugeordnet werden, welche die zulässigen Abweichungen des tolerierten Elementes beschreiben. Die betreffenden Toleranzzonen sind im Einzelnen in Bild 2 dargestellt.

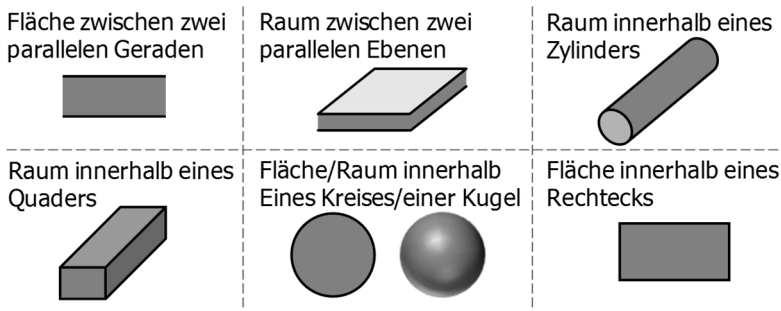


Bild 2: Für die Skelettmodellierung relevante Toleranzzonen, nach [2]

Grundsätzlich sind für eine Abbildung in Skelettmodellen alle Toleranzen auszuschließen, welche sich auf die Mantelfläche von axialsymmetrischen



Bauteilen beziehen sowie Profiltoleranzen, da die Abbildung von nicht-ebenen Bauteilflächen für die Skelettmodellierung als untypisch einzustufen ist und mit erhöhtem Modellierungsaufwand verbunden wäre.

Allgemein wird folgendes Vorgehen zur Abbildung von Form- und Lagetoleranzen in Analyseskeletten empfohlen:

- Stellt das tolerierte Element einen **Punkt** dar, so ist dessen Abweichung von seiner Nominallage durch eine geeignete Wahl eines Koordinatensystems in Abhängigkeit der zulässigen Toleranzzone zu definieren.
- Wird die Form oder Lage von **Linien** bzw. **Achsen** toleriert, so empfiehlt es sich, lediglich an den Kontaktstellen zu anderen Bauteilen Punkte innerhalb der Toleranzzone zu definieren, um die Anzahl der zu variierenden Variablen so gering wie möglich zu halten. Die abweichungsbehafteten Punkte sind anschließend über eine Kurve innerhalb des CAD-Systems zu verbinden.
- Stellt das tolerierte Element eine **Ebene** oder **plane Fläche** dar, ist es zweckmäßig, entweder drei Punkte innerhalb der Toleranzzone idealerweise an relevanten Kontaktstellen zu anderen Bauteilen zu erzeugen und somit eine schiefe Ebene als Repräsentant der abweichungsbehafteten Fläche bzw. Ebene zu definieren. Alternativ kann die abweichungsbehaftete Ebene auch über die Angabe eines Neigungswinkels zur ideal gelegenen Ebene sowie einen Polwinkel, welcher die Orientierung eindeutig festlegt, erzeugt werden.

Nach der Modellierung der abweichungsbehafteten Komponentenskelette, erfolgt deren Synthese zu einem Analyseskelett. Das Analyseskelett beinhaltet neben Komponentenskeletten und globalen Referenzen, wie Bauraumgrenzen, ebenfalls die Definition von Schließmaßen.

Alle Parameter einschließlich der auszuwertenden Schließmaße werden in einem nächsten Schritt in Form einer Familientabelle angelegt. Die Familientabelle ermöglicht es hierbei, eine extern definierte statistisch zu analysierende Kombination abweichungsbehafteter Komponentenskelette zu vereinen sowie die jeweils resultierenden Schließmaße zu berechnen.

Bild 3 verdeutlicht schematisch das zur Erstellung eines Analyseskeletts erforderliche Vorgehen sowie die sich daran anschließenden Schritte bis hin zur Toleranzanalyse, welche sich in die Analyse der Schließmaßvariation einerseits und die Beitragsleisteranalyse andererseits untergliedern lässt.

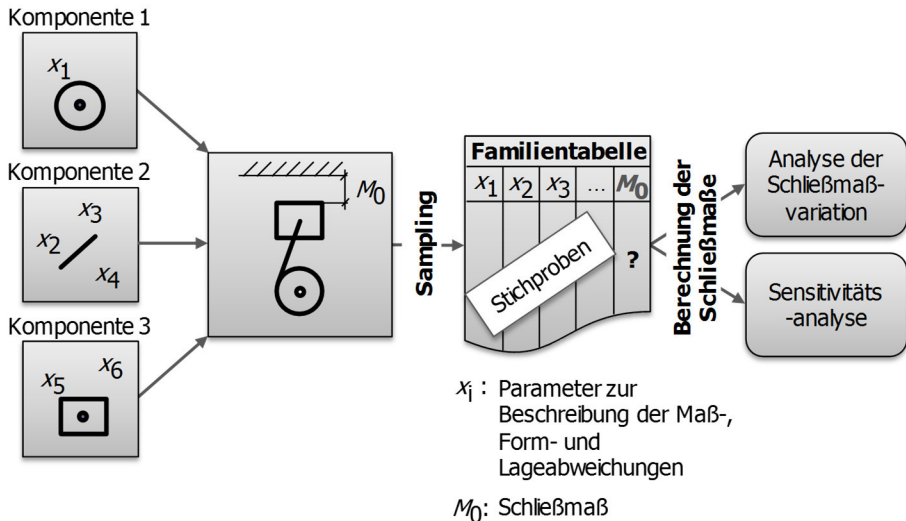


Bild 3: Ablaufplan für die Erstellung von Analyseskett-Modellen bis hin zur Toleranzanalyse

In dem folgenden Abschnitt wird anhand des bisher erläuterten methodischen Vorgehens auf die praktische Durchführung der Familientabellenbasierten statistischen Toleranzanalyse mittels CAD-Skelettmodellen eingegangen.

3 Praktische Durchführung einer Toleranzanalyse

Als einführendes Beispiel dient ein Kurbeltrieb im zweidimensionalen Raum. Abgebildet werden soll ein statisches Modell bei einem Kurbelwinkel von 45°, in welchem rein dimensionelle Abweichungen betrachtet werden sollen. Alle im CAD-Skelettmodell definierten Parameter und deren Verteilungsfunktionen können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Abweichungsparameter für das Kurbeltrieb-Modell

| Parameter | Beschreibung | Sampling |
|-----------|--|--|
| KW_D | Umlaufender Durchmesser der Kurbelwellen-Kröpfung | Normalverteilung $\mu = 90$ $\sigma = 1$ |
| PL_L | Länge des Pleuels (von Bohrungsmittelpunkt zu Bohrungsmittelpunkt) | Normalverteilung $\mu = 150$ $\sigma = 1$ |
| K_B | Vertikale Lage der Bolzen-Bohrung des Kolbens | Normalverteilung $\mu = 0$ $\sigma = 1$ |

Das den oben aufgeführten Parametern zugrundeliegende Analyseskelettmodell ist dabei in Bild 4 dargestellt. Dieses beinhaltet jeweils ein Komponentenskelett für die Pleuelwelle, das Pleuel und den Pleuellagerbolzen. Als Schließmaß wird innerhalb des Analyseskeletts der vertikale Abstand von der Pleuellagerbolzen-Oberseite zu einer Referenzebene definiert, welche etwa der Position der Ventile entspricht.

Die Aufstellung eines Beitragsleister-Rankings auf Basis der Extended-FAST-Methode nach Saltelli [3] erfordert ein für diese Methode der varianz-basierten Sensitivitätsanalyse spezifisches Verfahren der Stichprobengenerierung. Zutreffende Sensitivitätsindizes können bei dem hier vorliegenden Modell mit drei Eingangsparametern bereits bei verhältnismäßig geringen Stichprobenumfängen erzielt werden. Den nachfolgenden Analysen liegt ein Sampling mit $N_S = 1491$ Stichproben zugrunde.

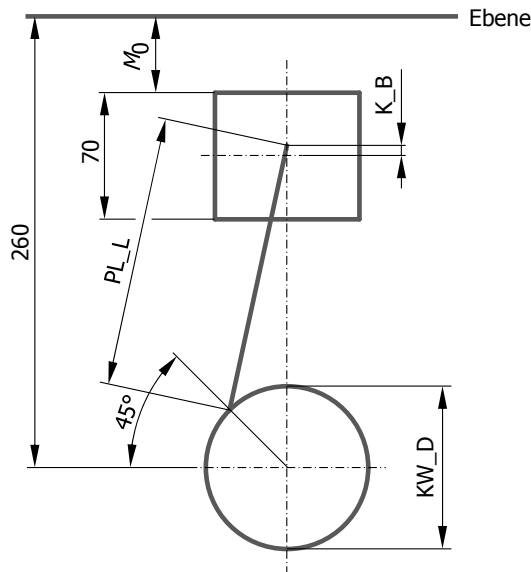


Bild 4: 2D-Analyseskelettmodell des Pleuellagerbolzens

Die Auswertung der Schließmaßverteilung ergibt auf Basis des EFAST-Samplings das in Bild 5 dargestellte Histogramm. Die Häufigkeitsverteilung entspricht dabei in guter Näherung einer Normalverteilung mit einer Standardabweichung von $\sigma = 1,457$.

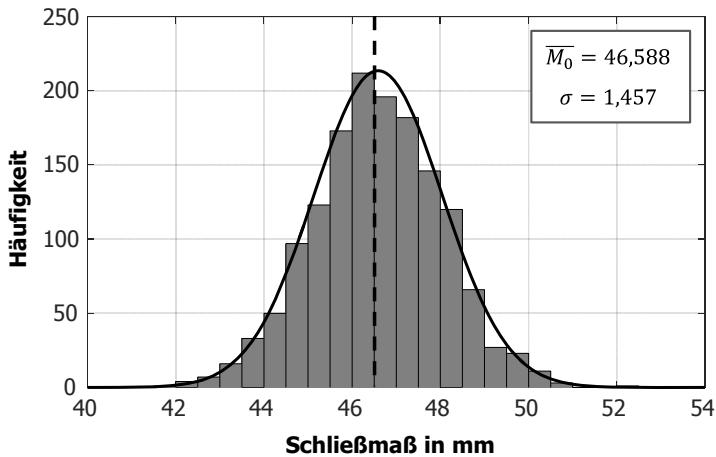


Bild 5: Histogramm der Schließmaßverteilung mit EFAST-Sampling

Die Berechnung der Sensitivitätsindizes nach der Extended-FAST-Methode führt schließlich zu dem in Bild 6 veranschaulichten Beitragsleister-Ranking.

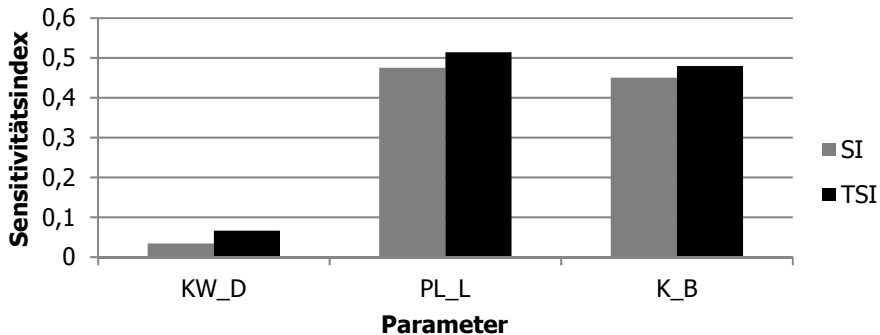


Bild 6: Beitragsleister-Ranking (EFAST)

Grau dargestellt sind die nach der EFAST-Methode berechneten Haupteffekte, schwarze Balken stellen die Totaleffekte dar, welche auch Wechselwirkungen mit einbeziehen. Es wird deutlich, dass der Durchmesser der Kurbelwellen-Kröpfung den geringsten Einfluss auf das Schließmaß besitzt und die Pleuellänge sowie die vertikale Verschiebung der Kolben-Bohrung annähernd gleiche Sensitivitätsindizes bezüglich des Schließmaßes aufweisen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wurde ein methodisches Vorgehen zur Abbildung und Analyse von Maß-, Form- und Lagetoleranzen in Skelettmodellen dargelegt. Weiterhin wurde die praktische Durchführung von statistischen numerischen Toleranzanalysen anhand eines simplen 2D-Skelettmodells eines Kurbeltriebs beispielhaft erläutert.

Das hier betrachtete Skelettmodell beinhaltet jedoch ausschließlich Maßtoleranzen. Eine Familientabellen-basierte Toleranzanalyse von Skelettmodellen, welche zudem Form- und Lagetoleranzen abbilden, ist grundsätzlich ebenso möglich. Allerdings erfordert hierbei die Aufstellung eines Beitragsleisterankings ein gesondertes Vorgehen. Dies ist darin begründet, dass für die Beschreibung *einer* Form- oder Lagetoleranz *mehrere* Parameter benötigt werden. Somit würden mehrere Sensitivitätsindizes für lediglich eine Toleranz resultieren. Diesbezüglich wurde eine Methode zur Reduktion aller zur Beschreibung einer Form- oder Lagetoleranz benötigten Parameter auf *einen* der Toleranz entsprechenden Sensitivitätsindex auf Basis von Deviation Domains nach Ziegler [4] entwickelt.

Literatur

- [1] Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: CAx für Ingenieure. Eine praxisbezogene Einführung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
- [2] Klein, B.: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. Form- und Lagetoleranzen – Tolerierungsprinzipien – Tolerierungsverknüpfungen – Maßketten – Oberflächen. München: Oldenbourg-Verlag, 2006.
- [3] Saltelli, A.; Chan, K.; Scott, E. M.: Sensitivity Analysis. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2000.
- [4] Ziegler, P.; Wartzack, S.: Sensitivity Analysis of Tolerances which Restrict Multiple Similar Features. In: Proceedings of the International Symposium on Robust Design - ISoRD14. 14.08.-15.08.2014. Kopenhagen/Dänemark. S. 91–101.