

DURCHGÄNGIGE ANALYSE VON GEOMETRIEABWEICHUNGEN VON DER PRODUKTENTWICKLUNG IN DEN PRODUKTIONSANLAUF

Ralf Voß, Christian Glögger

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird untersucht, welche Methoden und Werkzeuge der Toleranzplanung zu welchem Zeitpunkt in Produktentwicklung und Produktionsanlauf zum Einsatz kommen sollen. Dies hängt vor allem von der jeweils vorliegenden Produktklasse ab. Ein weiteres zentrales Kriterium ist der Aufwand, der für die jeweilige Analyse benötigt wird. Es werden laufende Untersuchungen aus zwei Produktklassen vorgestellt: Zylinderköpfe und Blechbauteile aus dem Karosserierohbau der Automobilindustrie.

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Problemstellung

Die Geometrie real gefertigter Bauteile und Baugruppen weicht stets von der in der Produktentwicklung vorgegebenen Idealgestalt ab. Zur Festlegung der zulässigen Abweichungen werden Toleranzen mit zugehörigen Bezugssystemen vergeben, die als Basis für die Planung des Fertigungsprozesses und der Fertigungsanlagen dienen. Um ein solches Toleranzkonzept zu entwickeln und zu überprüfen, werden verschiedene Methoden und Werkzeuge verwendet. Beispielhaft seien hier die eindimensionale Abbildung von Toleranzketten oder die statistische dreidimensionale Toleranzsimulation genannt. Insbesondere der Einsatz von dreidimensionalen Toleranzsimulationen bedeutet einen hohen Aufwand für die Produktentwicklung. Die Modelle müssen durch Simulationsspezialisten erstellt werden und die Werkzeuge haben beträchtliche Lizenzkosten. Derzeit werden in Forschung und Entwicklung Erweiterungen der dreidimensionalen Toleranzsimulation erarbeitet, bei denen mittels der Integration der Finite-Elemente-Methode [1] auch das elastische Verhalten von Bauteilen berücksichtigt werden soll.

Derzeit werden die Toleranzmodelle meist nur in der Produktentwicklung verwendet und nicht in den Produktionsanlauf weitergeführt. Anpassungen zur Verbesserung der Maßhaltigkeit von Bauteilen und Baugruppen werden oft basierend auf Erfahrungswissen der beteiligten Experten vorgenommen. Ein Rückfluss dieses Produktionswissens in die Produktentwicklung ist nur selten anzutreffen.

1.2 Ziel der Arbeit

Innerhalb dieser Arbeit wird untersucht, zu welchem Zeitpunkt welche Methoden und Werkzeuge der Toleranzanalyse in Produktentwicklung und Produktionsanlauf zum Einsatz kommen sollen. Das hängt davon ab, welchen Aufwand und welchen Nutzen die Anwendung der jeweiligen Methoden und Werkzeuge bedeuten. Die Beantwortung dieser Frage ist sicher nicht allgemeingültig zu treffen. Vielmehr wird es je nach den Eigenschaften der Produktklasse und weiteren Parametern einen angepassten Prozess geben. Aktuell kann zu dieser Fragestellung noch kein abschließendes Ergebnis präsentiert werden. Es werden laufende Untersuchungen, die in zwei verschiedenen Produktklassen durchgeführt werden, vorge-

stellt. Dabei handelt es sich um Zylinderköpfe und Blechbauteile aus dem Karosserierohbau der Automobilindustrie. Die beiden Anwendungsbeispiele unterscheiden sich in ihrer Fertigungstechnologien sowie den jeweils vorhandenen Wissensstand zu Methoden und Werkzeugen der Toleranzanalyse.

Ziel des Beitrags ist es, für die betrachteten Produktklassen aufzuzeigen, welche Toleranzanalysemethoden und –werkzeuge zum Einsatz kommen sollen, um die Toleranzplanung bei ihrer Arbeit zu unterstützen. Die Vision ist dabei die durchgängige Bereitstellung von Methoden und Werkzeugen zur Toleranzanalyse von der Produktentwicklung bis in den Produktionsanlauf. In der Zylinderkopffertigung besteht die Herausforderung darin, einen Toleranzplanungsprozess in einem komplexen, mehrstufigen Fertigungsprozess zu entwickeln. Im Karosserierohbau werden der erweiterte Einsatz und die Weiterentwicklung von Toleranzplanungsmethoden und –werkzeugen evaluiert. Zum einen handelt es sich dabei um die verstärkte Integration von Fertigungsinformationen in die Toleranzmodelle. Zum anderen wird die 3D-Toleranzsimulation elastischer Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode untersucht. Bild 1 gibt einen Überblick über das in diesem Beitrag vorgestellte Thema.

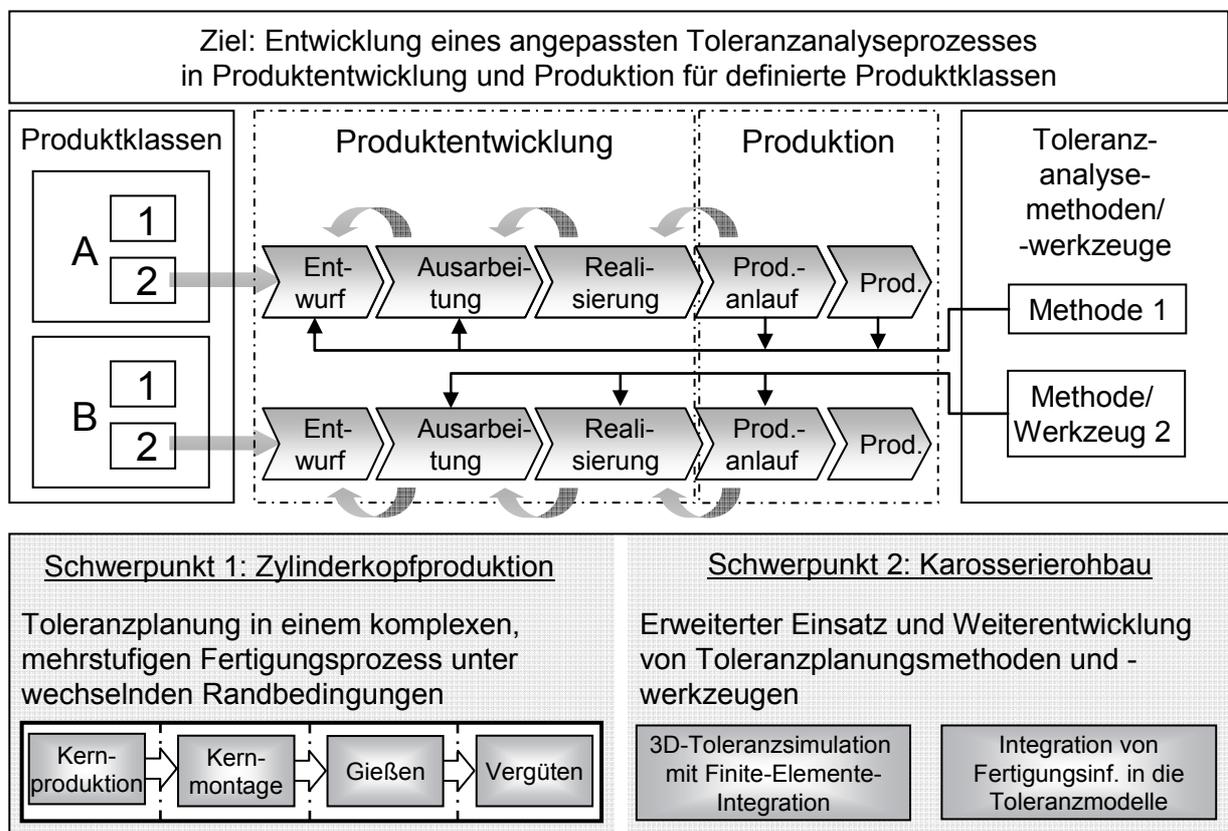


Bild 1: Ziel des Beitrags

Für die Untersuchung wird die folgende Struktur gewählt. Zunächst werden in Kapitel 2 zentrale Begriffe der Arbeit definiert und der für diese Arbeit relevante Stand in Forschung und Technik erläutert. Kapitel 3 stellt eigene Untersuchungen vor, die Ausgangspunkt für die hier formulierte Zielsetzung waren. Kapitel 4 fasst die Arbeit zusammen. In Kapitel 5 werden weitere Schritte beschrieben.

2 Definitionen und Stand der Forschung und Technik

2.1 Definitionen

Toleranzplanung ist ein Arbeitsfeld, das als eigenständiger Bereich in der Produktentwicklung nur in wenigen Unternehmen und Produktbereichen zu finden ist. Unter Toleranzplanung werden alle Aktivitäten verstanden, die zur Festlegung und Überprüfung geeigneter Toleranzen, Fügefolgen, Spann- und Fixierstellen, Messpunkte und Bezüge durchgeführt werden. Sie ist ein übergreifender Begriff, der die Toleranzanalyse (Untersuchung der Auswirkungen von Einzeltoleranzen auf Funktionsmaße [2]) und die Toleranzsynthese (Festlegung von Einzeltoleranzen unter Berücksichtigung eines gegebenen Funktionsmaßes [2]) einschließt. Die Toleranzplanung ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aus Konstruktion, Produktionsplanung, Produktion und Qualitätssicherung.

Der Begriff der **Produktentwicklung** wurde bereits in Kapitel 1 eingeführt. Er beinhaltet alle Tätigkeiten, die zur Erstellung eines herstellbaren und verkaufsfähigen Produktes durchgeführt werden. Hier erfolgt eine Unterteilung in die Phasen Entwurf, Ausarbeitung und Realisierung. Diese Begrifflichkeiten lehnen sich an die Definitionen von Pahl/Beitz [3] an. Ergebnis des Entwurfs ist die gestalterische Festlegung einer Lösung [3]. Resultat des Ausarbeitens ist die herstellungstechnische Festlegung der Lösung [3] mit vollständigen Konstruktionszeichnungen von Produkt und benötigten Produktionswerkzeugen. Die Realisierung schließt ab, wenn alle benötigten Bauteile für das Produkt auf Serienwerkzeugen hergestellt wurden. Als erste Phase der Produktion erfolgt der **Produktionsanlauf**. Dieser wird in der Literatur unterschiedlich definiert [4]. Hier wird darunter die Phase ab der Realisierung bis zum Erreichen der Kammlinie (geplantes Produktionsvolumen) des Produktes verstanden. Die Phasen überschneiden sich in der Regel. Oft werden mehrere Iterationsschritte durchlaufen, um die Ziele zu erreichen. Dies gilt nicht nur innerhalb einer Phase, sondern auch von Phase zu Phase. Bild 2 gibt einen Überblick. Die Iterationsschritte zwischen den Phasen sind in dem Bild als Pfeile dargestellt.

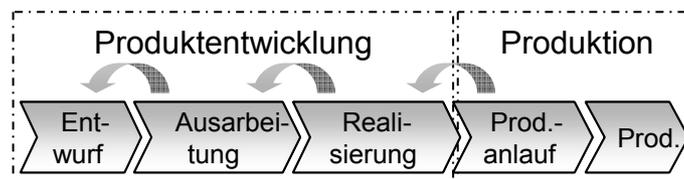


Bild 2: Phasen des betrachteten Produktentwicklungs- und Produktionsprozesses

2.2 Stand der Forschung und Technik

In der Entwurfsphase hat die Toleranzplanung vor allem die Aufgabe, die Konstruktion bei der Festlegung vorteilhafter Gestaltungsprinzipien zu unterstützen. Dies beinhaltet z.B. die Vermeidung langer Toleranzketten und das Vorhalten von Möglichkeiten des Toleranzausgleichs. Ab dem Übergang von der Entwurfs- in die Ausarbeitungsphase kann die Methodik der **eindimensionalen Toleranzanalyse** eingesetzt werden. Dabei werden dreidimensionale Toleranzketten auf ein eindimensionales Problem reduziert. Daraus kann beispielsweise die quadratische Schließtoleranz ermittelt werden. Diese basiert auf dem Konzept der statistischen Tolerierung. Alle in ein Funktionsmaß eingehenden Einzeltoleranzen werden als unabhängig angenommen; dadurch können sie sich teilweise gegenseitig aufheben. Die quadratische Schließtoleranz berechnet sich nach [2]:

$$T_q = \sqrt{\sum_{i=1}^N T_i^2}, \text{ mit } T_q: \text{ quadratische Schließtoleranz und } T_i: \text{ Toleranz von Element } i \quad (1)$$

Eine eindimensionale Toleranzanalyse berücksichtigt keine Verrippungs- und sonstige Geometrieeffekte und kann daher keine quantitativ exakten Aussagen generieren. Für erste, schnelle Evaluierungen von Entwürfen ist sie aber ein sehr probates Hilfsmittel.

In **dreidimensionalen Toleranzsimulationen** wird ermittelt, wie sich die Vergabe geometrischer Toleranzen auf ein zu untersuchendes Funktionsmaß (wie das Spaltmaß zwischen zwei Bauteilen) auswirkt. Voraussetzung für diese Simulationen ist das Vorhandensein einer Bauteilgeometrie. Somit kommen diese Untersuchungen ab der Ausarbeitungsphase zum Einsatz. Die kommerziell erhältlichen Toleranzsimulationswerkzeuge wie z.B. 3DCS [5] oder VisVSA [6] nutzen dabei das Prinzip der Monte-Carlo-Simulation, in der unter Annahme gegebener Häufigkeitsverteilungen der Einzeltoleranzen Zusammenbauten statistisch oft erzeugt werden. Als Ergebnis werden Verteilungskurven an vorher festgelegten Messpunkten ausgegeben. Der Aufwand solcher Simulationen ist im Vergleich zur eindimensionalen Analyse ungleich höher.

Die operativen Werkzeuge zur Toleranzsimulation arbeiten unter der Annahme, dass sich die abgebildeten Bauteile starr verhalten. Gerade bei flächigen, dünnen Strukturen wie Blechteilen einer Rohkarosserie ist diese Annahme jedoch nicht realitätsnah; die Bauteile zeichnen sich vielmehr durch elastisches Verhalten aus. Der Softwarehersteller 3DCS beispielsweise entwickelt aus diesem Grund derzeit eine Erweiterung, mit der auch **elastische Effekte** simuliert werden können. Diese werden abgebildet, indem der Toleranzsimulation eine Finite-Elemente-Analyse (FEA) vorgeschaltet wird. Die in der FEA generierten Steifigkeitsmatrizen $[K]$ werden als Eingangsinformationen für die Toleranzsimulation verwendet. Die folgende Gleichung zeigt den Zusammenhang [1]:

$$\bar{P} = [K] \cdot \bar{U} \quad \text{wobei } \bar{P} : \text{Lastvektor und } \bar{U} : \text{Verschiebungsvektor} \quad (2)$$

Die Steifigkeitsmatrix ist unabhängig von den aufgebrauchten Verschiebungen oder Kräften, beinhaltet aber Geometrieinformationen und Materialeigenschaften des jeweiligen Bauteils.

Am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Universität Erlangen wurde ein alternativer Ansatz zur Berücksichtigung elastischer Effekte in der Toleranzanalyse entwickelt. Dabei werden die Informationen aus der FEA in die Toleranzsimulation einbezogen, indem die angenommene Verteilungsfunktion der berücksichtigten Toleranzen geändert wird [7].

Die Ansätze zur Berücksichtigung von elastischen Effekten basieren auf der Zusammenarbeit mit den Berechnungsingenieuren, welche die Eingangsdaten für die Toleranzanalyse (zum Beispiel FE-Netze) zur Verfügung stellen müssen. Damit verbunden ist ein erhöhter Koordinationsaufwand.

Zur Untersuchung von Fertigungsabweichungen im Produktionsanlauf und Produktion existieren ebenfalls einige Ansätze. Auf vier wird hier kurz eingegangen.

Gerth [8] entwickelte den Begriff des „**Virtual Functional Built**“, der vor allem die Analyse von Blechteilen im Produktionsanlauf des Automobilrohbaus unterstützen soll. Basis für seinen Ansatz ist die Beobachtung, dass auch Bauteile, die außerhalb ihrer Toleranzen liegen, zu Zusammenbauten führen können, die den zuvor festgelegten Toleranzanforderungen entsprechen [8] [9]. Da es aber das Ziel jedes Bauteilverantwortlichen ist, die für „sein“ Teil festgesetzten Toleranzkorridore zu erreichen, werden oft mehrere Verbesserungszyklen durchlaufen, die einen erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand bedeuten. Zur Vermeidung dieser Situation schlägt er vor, reale, digitalisierte Bauteile virtuell zu montieren und so die Funktionsmaße an den Zusammenbauten zu überprüfen. Um die elastischen Deformationen abbilden zu können, wird die Finite-Elemente-Methode eingesetzt. Ziel ist es, reale Testvorrichtungen einzusparen und insbesondere einen Zeitvorteil durch die Verringerung von Logistikaufwänden zu erhalten (reale Prototypenteile müssen nicht mehr vom Zulieferer

beschafft werden). Zur Digitalisierung der Bauteile wird optische Messtechnik verwendet. Gerth hält fest, dass bis zu einem Einsatz dieser Technologie noch Fragen zum Analyseprozess, der Verarbeitungstechnik, etc. geklärt werden müssen. Auch eine Methodik, nach der überprüft werden kann, ob die Abweichungen des analysierten Bauteils „typisch“ für die gesamte Charge sind, ist noch zu entwickeln. Weiterhin wird keine Methodik vorgestellt, mit der entschieden werden kann, an welchen Produktionsmitteln bei eventuellen Geometrieabweichungen Änderungen vorzunehmen sind.

Wie gut die entwickelten Toleranzsimulationsmodelle das reale Verhalten von Baugruppen repräsentieren, wurde bisher nur wenig untersucht. Zu nennen ist hier etwa eine Studie von Dahlström [10]. Er verglich das **reale Abweichungsverhalten** einer Blechbaugruppe aus dem Karosserierohbau mit verschiedenen Simulationsmodellen. Erst mit einem sehr detaillierten Simulationsmodell konnte eine signifikante Übereinstimmung von Simulation und Realität festgestellt werden.

Ceglarek [11] entwickelte ein umfangreiches, ganzheitliches Modell der Analyse von Geometrieabweichungen, das sowohl die Produktentwicklung als auch die Produktion betrachtet. Er nennt das Modell „**Stream of Variation Analysis**“ („Abweichungsstromanalyse“, SOVA). Zentrale Aspekte sind die Unterstützung bei der Vergabe von Messpunkten, ein Werkzeug, mit dem ermittelt werden kann, welche Ursachen für festgestellte Abweichungsfehler verantwortlich sind und ein prozessorientierter Tolerierungsansatz. Anwendungsszenario seiner Untersuchungen ist vorwiegend der Automobilrohbau.

Eine **Rückführung realer Fertigungsdaten** in Toleranzsimulationsmodelle untersucht Herfter [12]. Ziel der Analyse ist es, die Toleranzvergabe an die Güte bestehender Produktionsprozesse anzugleichen.

3 Eigene Untersuchungen

In diesem Kapitel werden aktuelle Ergebnisse eigener Untersuchungen zum oben aufgespannten Themenfeld vorgestellt. Diese beziehen sich auf zwei Schwerpunkte aus der Automobilproduktion: die Fertigung von Zylinderköpfen nach dem Sand- Kokillengussverfahren und den Karosserierohbau.

Bei Zylinderköpfen sind nur geringe Erfahrungen mit Toleranzplanung vorhanden. Daher wird zunächst der bestehende Prozess analysiert. Im Karosserierohbau liegen bereits einige Untersuchungen dazu vor. Eine Auswahl wurde in Kapitel 2 genannt. Daher wird in dieser Arbeit auf die Toleranzsimulation elastischer Baugruppen eingegangen, die mit einem neuen Toleranzsimulationswerkzeug möglich ist.

3.1 Toleranzanalyse bei Zylinderköpfen

Der **Herstellungsprozess von Zylinderköpfen** für Dieselmotoren von Automobilen gestaltet sich im vorliegenden Fall in die folgenden Schritte, die in Bild 3 dargestellt werden. Zunächst werden in Kernformwerkzeugen die für das Gießen benötigten Sandkerne geschossen. Diese werden zu einem Kernpaket mit Hilfe von Nut- und Zapfenverbindungen montiert, die anschließend in eine Kokille eingelegt werden. Hier wird der Gießwerkstoff (in der Automobilproduktion meist Aluminiumlegierungen) in die Kokille eingelassen und es entsteht der eigentliche Zylinderkopf. In einem weiteren Schritt wird der Zylinderkopf entkernt und vergütet, um die entstandenen Eigenspannungen im Bauteil abzubauen. Daran schließt sich eine spanende Bearbeitung bestimmter Funktionsflächen an, die aber nicht mehr Gegenstand der Betrachtungen sind. In Bild 3 wird der Prozess schematisch dargestellt.



Bild 3: Produktionsprozess eines Zylinderkopfes

Ziel der Toleranzuntersuchungen ist die Verbesserung der Qualität der Zylinderköpfe. Dabei sollen die Abweichungen der realen Zylinderkopfgeometrien von den konstruktiv vorgegebenen Werten minimiert werden. Der Prozess besteht, wie oben beschrieben, aus mehreren Prozessschritten, die jeweils Einfluss auf die Geometrieabweichungen haben. Die hergestellten Sandkerne weichen aufgrund von Fertigungsparametern und nicht-idealen Kernmatrizen von ihrer Nominalgeometrie ab. Beim Einlegen der Sandkerne ineinander und in die Kokille entstehen Lageabweichungen durch Lagerluft und Profilabweichungen der Kontaktflächen. Der vergossene Zylinderkopf schwindet beim Abkühlen. In der Vergütung werden im Bauteil vorhandene Eigenspannungen abgebaut, so dass es zu Verzug kommt.

Um die beschriebenen Einflüsse bewerten zu können, wurde ein Zylinderkopf nach den jeweiligen Fertigungsschritten vermessen und eine **Prozessanalyse** durchgeführt. Eine getrennte Untersuchung der Kernmontage war nicht möglich, da diese automatisiert in der Kokille erfolgt. Zunächst wurden charakteristische Punkte der verwendeten Sandkerne vermessen, dann die Projektion dieser Punkte am gegossenen Zylinderkopf und zuletzt der vergütete Kopf. Die Ergebnisse sind in Bild 4 qualitativ aufbereitet. Darin sind Boxplots der Abweichungen in den einzelnen Fertigungsschritten und die am Ende aufgetretene Gesamtabweichung aufgetragen. Der Median beschreibt dabei den Wert, der die geordnete Reihe der Messwerte in zwei gleiche Teile zerlegt. Das untere Quartil gibt an, dass 25 % der Messwerte unterhalb dieser Grenze liegen und 75 % oberhalb. Analog sind das obere Quartil und die beiden angegebenen Perzentile zu interpretieren [13].

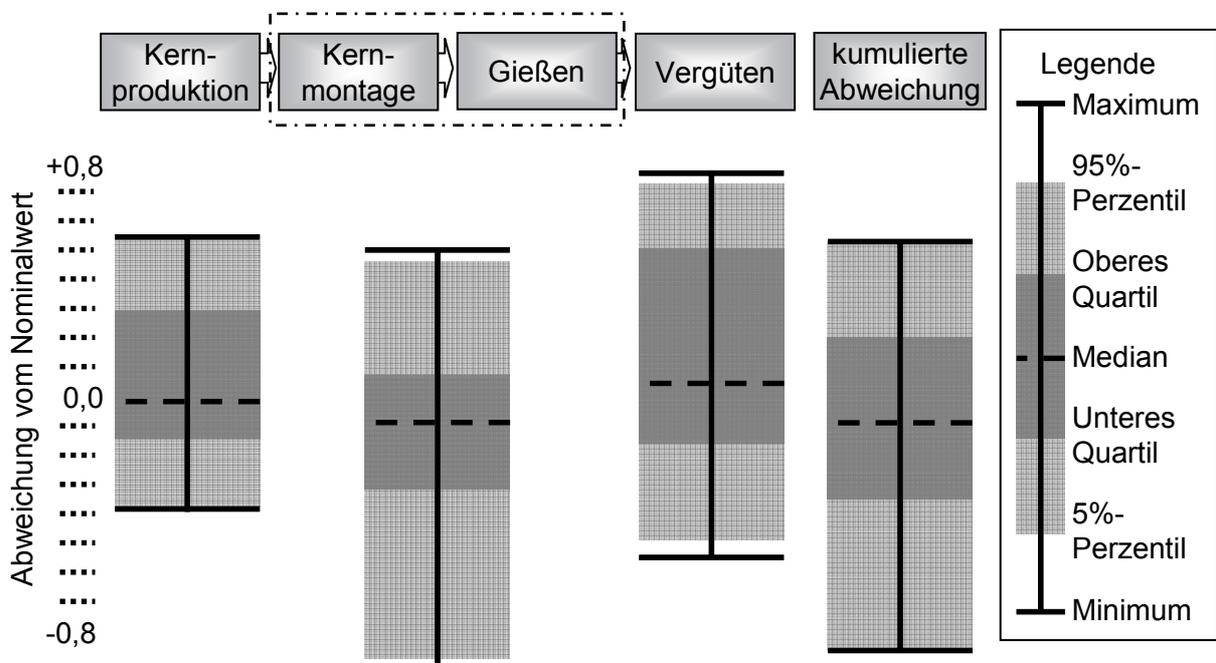


Bild 4: Prozessanalyse Zylinderkopffertigung

Die Untersuchung zeigt, dass die Abweichungen der einzelnen Prozessschritte in einer ähnlichen Dimension liegen. Kumuliert heben sie sich teilweise auf, so dass die Gesamtabweichung sogar etwas kleiner als die größte Einzelabweichung ist. Die einzelnen Prozessschritte sind sehr komplex und werden, wie oben dargestellt, durch viele Einflussparameter beein-

flusst. Zunächst soll daher eine **Tolerierung des Zylinderkopfes** vorgenommen werden, die den Möglichkeiten der Produktion entspricht. Dabei werden die beobachteten Abweichungen einzelner Flächen analysiert. Je nach Lage der Fläche lässt sich ein unterschiedliches Abweichungsverhalten beobachten. Beispielsweise ist anzunehmen, dass schmale Wände, die während des Gießens im oberen Bereich des Kopfes liegen, ein stärkeres Verzugsverhalten aufweisen als die Flächen, die sich direkt auf dem Kokillenboden befinden. Diese Informationen können in der Entwurfsphase und in der Ausführungsphase zukünftiger Bauteilentwicklungen berücksichtigt werden. Zur Verifizierung des Ansatzes werden derzeit weitere Untersuchungen vorgenommen. Bild 5 zeigt die **Einordnung** der angewendeten Methode (Rückführung von Fertigungsinformationen in die Produktentwicklung) in das in Kapitel 1 vorgestellte Ziel der Arbeit.

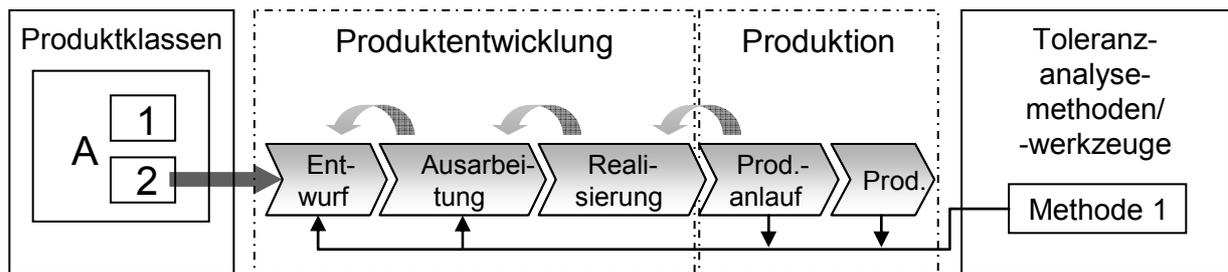


Bild 5: Einordnung der Toleranzanalyse von Zylinderköpfen in das Ziel des Beitrags

3.2 Toleranzanalyse im Karosserierohbau

Im Karosserierohbau werden Blechbauteile zu Baugruppen verarbeitet, indem diese in Montagevorrichtungen eingespannt und gefügt werden. Die Bauteile sind in den Vorrichtungen in der Regel statisch unbestimmt gelagert. Aufgrund ihrer geringen Eigensteifigkeit würden sie sich sonst elastisch verformen. Bisherige Toleranzsimulationswerkzeuge konnte die dargestellte Situation (**statische Unbestimmtheit und elastische Effekte**) nicht vollständig abbilden. Mit der in Kapitel 2 vorgestellten Erweiterung des Werkzeugs 3DCS ist dies jetzt aber möglich. Die Simulation wird derzeit anhand einer exemplarischen Baugruppe evaluiert.

Der **Aufbau des Simulationsmodells** besteht aus drei Schritten. Zunächst wird ein Finite-Elemente-Modell der Baugruppe erstellt. Alle Bauteile werden vernetzt als Schalenelemente abgebildet, weil die Bauteile als dünnwandige Komponenten angenommen werden. Für die Toleranzanalyse relevante Punkte wie Lagerstellen, Mess- oder Schweißpunkte werden als Verbindungselemente modelliert. Im nächsten Schritt wird für die Bauteile eine reduzierte Steifigkeitsmatrix berechnet, die das linear-elastische Verhalten der Bauteile an den relevanten Punkten beschreibt. Diese Information wird im letzten Schritt für die Toleranzsimulation verwendet. Auf Basis der festgelegten Punkte wird ein Toleranzsimulationsmodell erstellt. In einer Monte-Carlo-Simulation wird dann untersucht, wie sich die Messpunkte verhalten, wenn die Bauteile in den Vorrichtungen gespannt, miteinander gefügt und wieder entspannt werden. Es werden also sowohl die Verschiebungen aufgrund aufgebrachtener Toleranzen als auch aufgrund der Bauteilsteifigkeit berücksichtigt. Derzeit wird evaluiert, wie sich die Ergebnisse einer solchen Simulation von einer herkömmlichen Toleranzsimulation mit starren Bauteilen unterscheiden und wie hoch der zusätzliche Aufwand für die Modellierung ist.

In einem nächsten Schritt soll untersucht werden, für welche **Klassen von Bauteilen** eine solche erweiterte Analyse durchzuführen ist. Unter einer Klasse wird hier eine Gruppe gleichartiger Bauteile und Baugruppen verstanden. Die Gleichartigkeit kann sich etwa in Eigenschaften wie Bauteilsteifigkeit, Anforderungen an zu erreichende Funktionsmaße, verwendeter Fertigungsprozess, Stückzahlen, etc. ausdrücken. Weiterhin sollen die Einsatzmöglichkeiten dieser **Toleranzmodelle in der Realisierungsphase** überprüft werden. Messwerte realer Bauteile werden dazu verwendet, einen digitalen Zusammenbau realer

Bauteile abzubilden. Bild 6 zeigt die **Einordnung** der angewendeten Methode (erweiterte Toleranzsimulation mit FE-Integration) und des Werkzeugs (3DCS) in das in Kapitel 1 eingeführte Schema einer durchgängigen Toleranzanalyse.

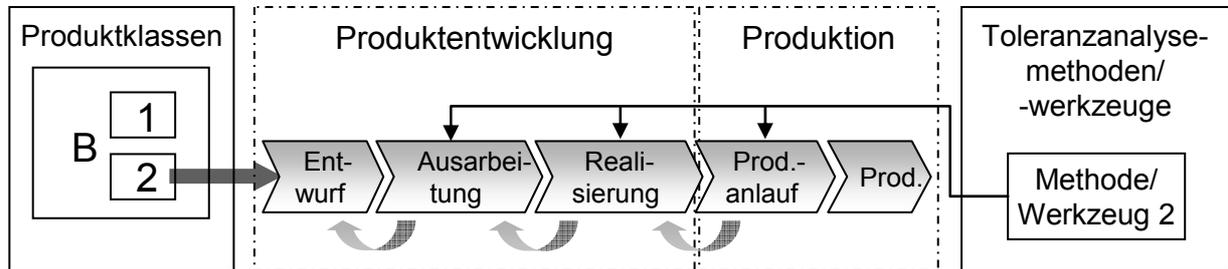


Bild 6: Einordnung der Toleranzanalyse im Karosserierohbau in das Ziel des Beitrags

Weiterhin soll die Verknüpfung der Toleranzanalyse mit anderen Untersuchungen evaluiert werden wie etwa die Berücksichtigung des Verzugs durch die eingebrachte Wärmeenergie beim Schweißen. Resultat soll ein **durchgängiger Toleranzplanungsprozess für den Karosserierohbau** sein, wie er in Bild 7 vorgeschlagen wird. Der dargestellte Toleranzplanungsprozess zeichnet sich durch die sehr enge Interaktion mit den angrenzenden Bereichen aus. Neu an dem Prozess sind der Einsatz der FE-integrierten Toleranzanalyse und die Verwendung der Toleranzmodelle bei der Analyse von digitalen Zusammenbauten realer Einzelteile jeweils für definierte Produktklassen. Die ebenfalls dargestellte Produktionskontrolle könnte Inhalt späterer Arbeiten sein.

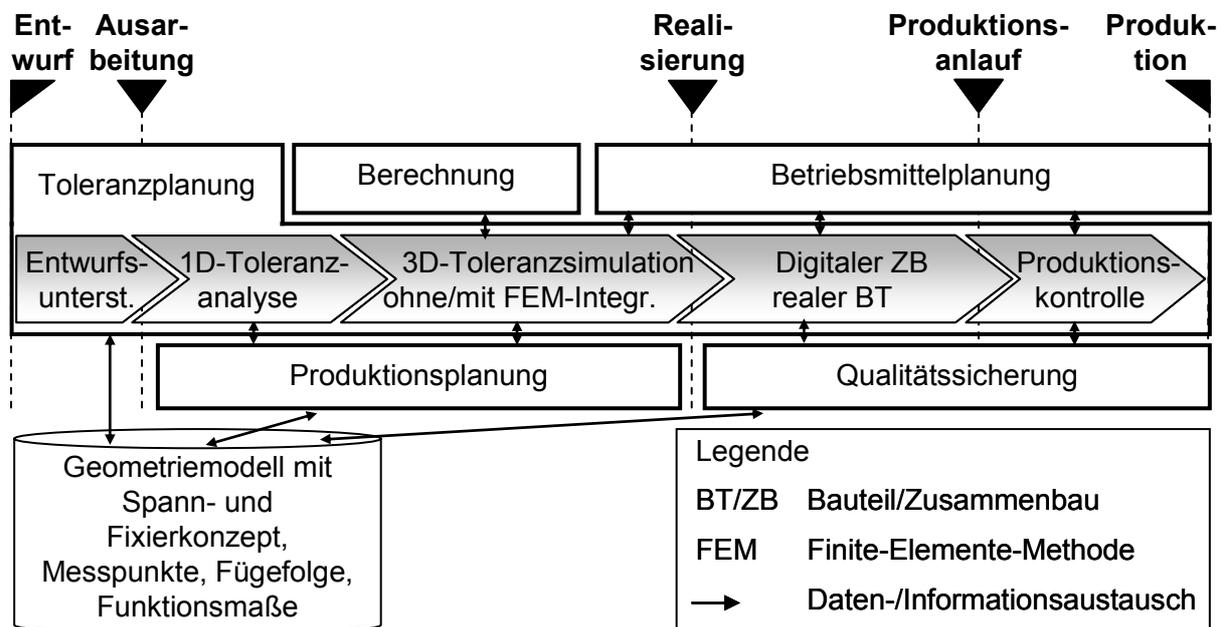


Bild 7: Durchgängiger Toleranzplanungsprozess im Karosserierohbau

4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird untersucht, zu welchem Zeitpunkt welche Methoden und Werkzeuge der Toleranzanalyse in Produktentwicklung und Produktionsanlauf zum Einsatz kommen sollen. Diese Frage kann nur in Abhängigkeit von der jeweils vorliegenden Produktklasse beantwortet werden. Es werden laufende Untersuchungen in zwei Produktklassen vorgestellt: Zylinderköpfe und Blechbauteile aus dem Karosserierohbau der Automobilindustrie.

Im Anwendungsfall der Zylinderköpfe wird zunächst eine Prozessanalyse durchgeführt, um eine Grundlage für folgende Toleranzuntersuchungen zu schaffen. Dazu werden die einzelnen Schritte des Fertigungsprozesses eines Zylinderkopfes darauf hin untersucht, welche Auswirkungen diese auf Geometrieabweichungen an dem Bauteil haben. Ergebnis ist, dass die Abweichungen in einer ähnlichen Dimension liegen und sich teilweise gegenseitig aufheben.

Im Karosserierohbau wird anhand einer exemplarischen Baugruppe ein Toleranzsimulationsmodell aufgebaut, das Informationen aus einer Finite-Elemente-Analyse einbezieht. Damit kann die Nachgiebigkeit der untersuchten Blechbauteile berücksichtigt werden. Auf Basis realisierter und geplanter Untersuchungen wird ein Prozessmodell der Toleranzplanung für den Karosserierohbau vorgestellt.

5 Weitere Schritte

Die vorgestellten Anwendungsfälle werden weiter untersucht. In der Toleranzanalyse von Zylinderköpfen sollen die Abweichungen für einzelne Teilbereiche des Zylinderkopfes genauer analysiert werden. Es ist geplant, diese Informationen der Produktentwicklung zur Verfügung zu stellen, um eine produktionsgerechte Gestaltung neuer Bauteile zu unterstützen. Die Toleranzsimulation nachgiebiger Baugruppen im Karosserierohbau wird noch weiter evaluiert. Insbesondere soll die Integration realer Fertigungsdaten in das Toleranzmodell überprüft werden, um dieses auch in der Realisierungsphase und im Produktionsanlauf einsetzen zu können.

Die Erkenntnisse beider Anwendungsszenarien sollen in die Entwicklung einer Methoden- und Werkzeuglandschaft für die Toleranzplanung definierter Produktklassen einfließen. Diese kann als Grundlage für den Aufbau eines Referenzmodells für die Toleranzplanung dienen, das eine generische Vorgehensweise für den Aufbau von Toleranzplanungsprozessen bietet.

6 Literatur

- [1] SCHWARZ, H. R.: Methode der finiten Elemente. Stuttgart: Teubner, 1980.
- [2] JORDEN, W.: Form- und Lagetoleranzen: Handbuch für Studium und Praxis. München: 3. Aufl. Hanser, 2003.
- [3] PAHL, G.; BEITZ, W.: Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung. Berlin, Heidelberg: 4. Aufl. Springer, 1997.
- [4] BISCHOFF, R.: Anlaufmanagement: Schnittstelle zwischen Projekt und Serie. Hochschule Konstanz Technik, Wirtschaft und Gestaltung, 2007
- [5] Dimensional Control Systems Inc.: www.3dcs.com. recherchiert: 21.08.2007.
- [6] UGS PLM Software: www.ugsplm.de/produkte/tecnomatix/quality/vis_vsa.shtml. recherchiert: 21.08.2007.
- [7] MEERKAMM, H.; LUSTIG, R.: Konzept zur Integration elastischer Deformationen in die Rechnerunterstützte Toleranzanalyse. Design for X. Neukirchen 2003.
- [8] GERTH, R.: Virtual Functional Build: A Case Study. Proceedings of IMECE2005-ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Orlando, Florida USA 2005.
- [9] MAJESKE, K. D.; HAMMETT, P. C.: Predicting assembly dimensions with functional build: A case study using DOE. In: Journal of Manufacturing Processes (2003)

- [10] DAHLSTRÖM, S. ; LINDKVIST, L. ; SÖDERBERG, R.: Practical Implications in Tolerance Analysis of Sheet Metal Assemblies: Experiences from an Automotive Application. In: Springer Netherlands (Hrsg.): Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing. 2007,
- [11] CEGLAREK, D. ; HUANG, W. ; ZHOU, S. ; DING, Y. ; KUMAR, R. ; ZHOU, Y.: Time-Based Competition in Multistage Manufacturing: Stream-of-Variation Analysis (SOVA) Methodology-Review. In: The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 16 (2004) S. 11-44
- [12] HERFTER, M. ; GLÖGGLER, C. ; BÄR, T. ; WURST, D.: Integration von Fertigungsabweichungen zur Optimierung toleranzbehafteter Baugruppen.17. Symposium "Design for X".Neukirchen 2006.
- [13] SCHWARZE, J.: Grundlagen der Statistik I. Herne, Berlin: 8. Aufl. Verl. Neue Wirtschaftsbriefe, 1998.

Dipl.-Ing. Ralf Voß
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
FAU Erlangen-Nürnberg
c/o DaimlerChrysler AG
Group Research and Advanced Engineering
Product and Production Modeling
Wilhelm-Runge-Str. 11
89081 Ulm/Germany
Tel: +49-731-505-2986
Fax: +49-711-305-2185642
Email: uni-erlangen.voss@daimlerchrysler.com