

## VOLUMENVISUALISIERUNG VON ABWEICHUNGSBEHAFTETER GEOMETRIE

*Stefan Wittmann, Andreas Stockinger*

### Zusammenfassung

Reale Bauteile besitzen stets Abweichungen von ihrer im CAD-System festgelegten Idealgestalt. Geometrisch eingeschränkt werden die zulässigen Abweichungen vom Produktentwickler durch die Vergabe von Toleranzen. Die Bestimmung von geeigneten Toleranzen ist hoch komplex und erfordert sowohl Erfahrung als auch den Einsatz geeigneter Software. Toleranzsimulationen liefern zum Beispiel als Ergebnis Verteilungskurven an definierten Messpunkten, allerdings ist es anschließend nicht möglich, die gewonnenen Ergebnisse visuell darzustellen. Der hier vorgestellte Ansatz soll eine geometrische Interpretation der zulässigen Ausprägungen eines Bauteils in Abhängigkeit ihrer Entstehungswahrscheinlichkeit erlauben. Dazu werden alle Eingangsdaten in einen einzigen Volumendatensatz überführt, auf den verschiedenste Visualisierungsmethoden angewendet werden können. Einsetzbar ist das Verfahren für jegliche Oberflächendaten, so dass neben Toleranzsimulationen auch Fertigungssimulationen und reale Messungen als Datenquelle geeignet sind. Ziel ist hierbei die visuelle, geometrische Interpretation jener großen Datenmengen, die bei statistisch repräsentativen abweichungsbehafteten Eingangsdaten vorliegen.

### 1 Motivation und Stand der Entwicklung

Wird ein Produkt gefertigt, entspricht seine Ist-Gestalt nie der im CAD-System abgebildeten Bauteil-Sollgestalt. Ursprung der Abweichungen von der Idealgestalt sind Produktionsfehler und -ungenauigkeiten, die sich bei der Montage von Baugruppen kumulieren. Dies hat zur Folge, dass das Produkt schlimmstenfalls seine funktionalen oder ästhetischen Anforderungen nicht erfüllt [6]. Um derartigen qualitativen Produktmängeln vorzubeugen, wird über die Vergabe von Toleranzen der zulässige Rahmen der Abweichungen angegeben. Toleranzen stellen somit geometrische Zwangsbedingungen dar. Üblicherweise liegen bei funktional relevanten Bauteilen mehrere Toleranzarten gleichzeitig vor. Da jede einzelne Toleranzart durch teilweise komplexe Definitionen festgelegt ist und sich die vergebenen Maß-, Form- und Lagetoleranzen gegenseitig beeinflussen, ist die Auswirkung von Toleranzen auf die möglichen Bauteilgestalten sehr schwer vorstellbar und durch ungünstige Abweichungskombinationen resultierende Fehlfunktionen in den frühen Phasen der Produktgestaltung nur schwer erkennbar.

Die Vergabe von Toleranzen bestimmt die Kosten eines Produktes maßgeblich. Im Allgemeinen steigen die Kosten eines Prozesses, wenn die Genauigkeit erhöht werden soll. Daher wird über statistische Toleranzanalyseprogramme versucht, möglichst optimale Vorgabewerte für Toleranzen zu bestimmen. Ergebnis dieser Systeme sind u.a. Verteilungskurven, die angeben, in welcher Spannbreite ein untersuchtes kritisches Maß variiert. Verteilungskurven und Hauptbeitragsleister-Analyseergebnisse liefern wichtige Informationen für den Produktentwickler während des Ausarbeitungsprozesses, sind jedoch von den geometrischen Objekten losgelöste, statistische Daten (siehe Bild 1).

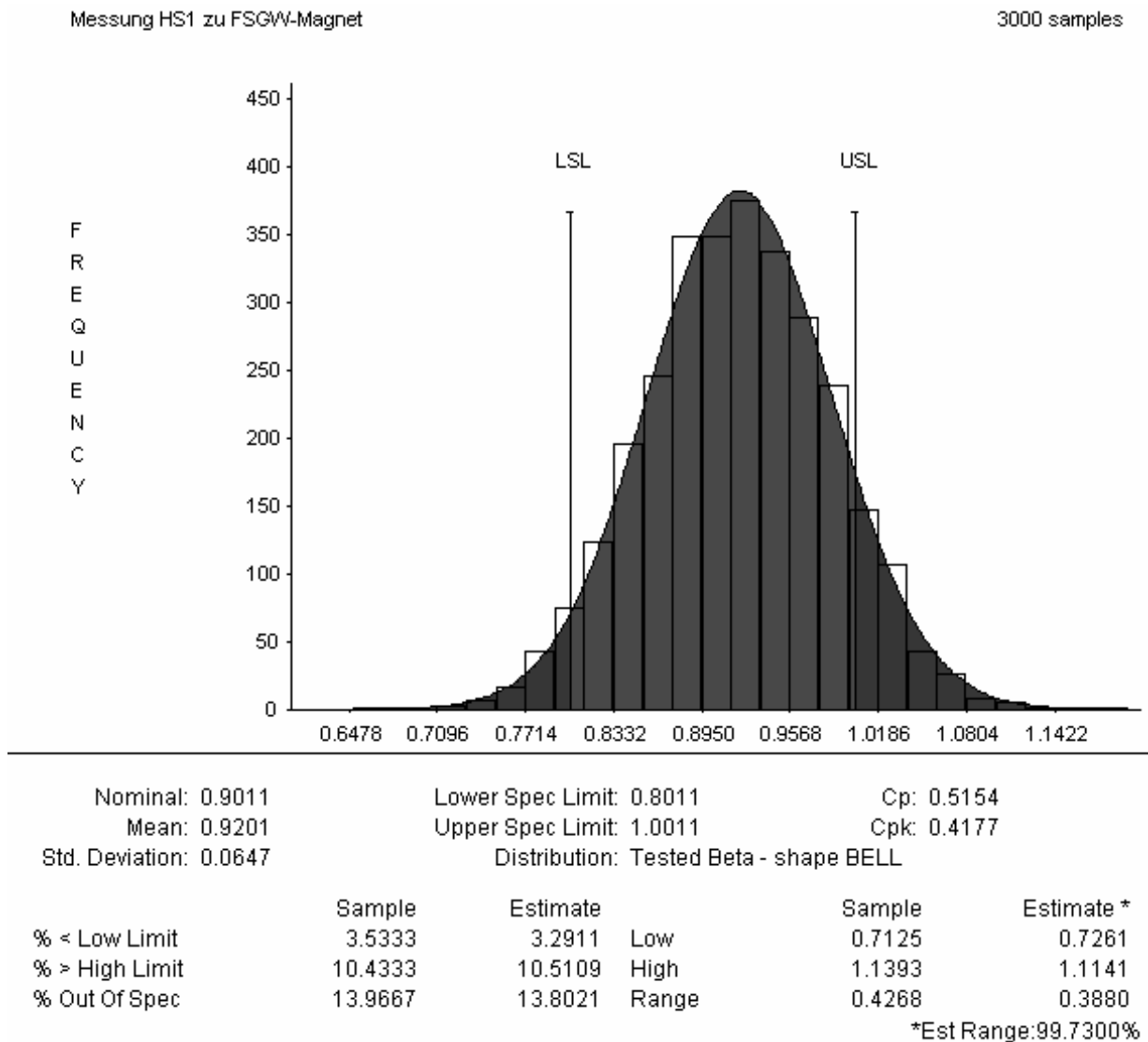


Bild 1: Typisches Ergebnis einer Toleranzanalyse dargestellt mit statistischen Kenngrößen und Häufigkeitsverteilung [Quelle: DaimlerChrysler/VisVSA]

Großes Potential den Produktentwickler bei der Vergabe von Toleranzen zu unterstützen besteht jedoch darin, die geometrischen Auswirkungen der vergebenen Toleranzen und die resultierenden Zusammenhänge innerhalb der Baugruppen visuell darzustellen. Ansätze in diese Richtung bestehen bei *aesthetica™*, einem Produkt der Firma Icona Solutions. Hier wird versucht, die für den Kunden sichtbaren Abweichungen möglichst realistisch vorherzusagen [2]. Derartige Programme sind aber nicht primär für die Toleranzsynthese konzipiert. Söderberg et. Al. [1] stellen verschiedene Methoden vor, um das maximale Volumen von Teilen und Baugruppen zu berechnen. Im Gegensatz zu diesen Verfahren soll hier eine Methode vorgestellt werden, die die Summe von Simulations- oder Messergebnissen visualisiert, nicht einzelne mögliche Ausprägungen wie bei *aesthetica™*. Anders als bei [1] wird nicht eine Hüllgeometrie aller Daten generiert, sondern die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten bleiben weiterhin geometrisch interpretierbar. Ziel ist nicht photorealistische Darstellung oder statistische Analyse eines bestehenden Toleranzkonzepts, sondern die aussagekräftige Visualisierung der gesamten Daten zur frühen Unterstützung der Toleranzsynthese.

## 2 Erstellen von 3D-Skalardaten

Im Folgenden wird ein – gegenüber den genannten bestehenden Lösungen – universeller Visualisierungsansatz vorgestellt (siehe Bild 2). Ziel dieses Ansatzes ist die Visualisierung eines Volumendatensatzes, dessen Informationsgehalt aus einer Reihe von Daten abweichungsbehafteter Geometrie besteht. Diese Daten können aus Simulation oder Messung stammen und erlauben die Ableitung einer Bounding Box als Diskretisierungsbasis. Im weiteren Ablauf der Visualisierungsvorbereitung werden die Eingangsdaten, die in einem festgelegten Datenformat vorliegen müssen, einer Registrierung unterzogen. In der anschließenden Diskretisierung unter Zuhilfenahme der Bounding Box werden die zu visualisierenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen der auftretenden Abweichungen ermittelt. Dieser Vorgang wird für alle  $n$  Datensätze durchgeführt. Der vollständige Volumendatensatz kann anschließend visualisiert werden.

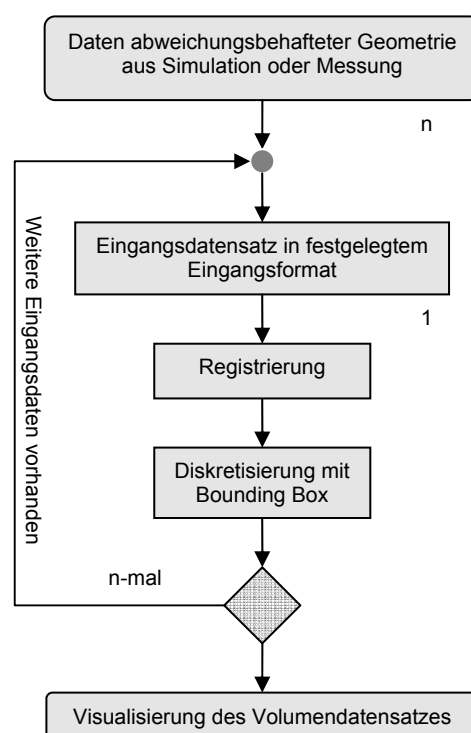


Bild 2: Ablauf der 3D-Skalardatensatzgenerierung

### 2.1 Geeignete Eingangsdaten

Als Eingangsdaten für dieses Verfahren eignen sich sämtliche Arten von Oberflächendaten, die mögliche, realistische Ausprägungen eines modellierten Bauteils oder einer in 3D-CAD-Systemen abgebildeten Baugruppe beschreiben. Folgende Voraussetzungen müssen von diesen Daten erfüllt werden:

- Die Daten müssen eine Abstandsberechnung "Punkt – Oberfläche" zulassen.
- Sie müssen in einer hohen Genauigkeit und Dichte (Anzahl an Messpunkten) vorliegen.
- Es müssen mehrere Datensätze des gleichen Bauteils mit abweichungsbehafteter Geometrieinformation (Größenordnung >100) vorhanden sein.
- Die Idealgeometrie und -position der untersuchten Bauteile muss bekannt sein.

- Es darf nur das zu untersuchende Bauteil vorliegen, keine Umgebungsgeometrie.

Beispiele für geeignete Datenquellen sind daher Flächenmessungen, zum Beispiel aus Streifenprojektionsmessungen, die triangulierte Oberflächendaten liefern. Die Geometriedaten sind so aufzubereiten, dass ausschließlich die zu untersuchenden Geometrieelemente Bestandteil des Datensatzes sind, d.h. zum Beispiel dass Spannvorrichtungen von Projektionsmessungen entfernt werden müssen. Außerdem bietet es sich an, Simulationsergebnisse zu verwenden, zum Beispiel aus Fertigungssimulationen oder Toleranzsimulation, da hier die Exportauflösung, -format und -inhalt ausgewählt werden kann.

## 2.2 Registrierung

Liegen die Eingangsdaten entsprechend 2.1 vor, so kann für jeden einzelnen Datensatz (d.h. ein Simulations-/Messergebnis) eine Registrierung durchgeführt werden. Dieser Vorgang wird in der Literatur auch als Fitting bezeichnet. Ziel der Registrierung ist es, die Geometrie durch Translation und Rotation so zu positionieren, dass sie unter bestimmten, vorgegebenen Kriterien ideal liegt. Die Geometrie an sich wird bei diesem Vorgang als Festkörper betrachtet und somit nicht verändert, d.h. sie wird weder skaliert noch geschert. Sollen die Daten eines einzelnen Bauteils unter der Minimierung des quadratischen, summierten Abstands registriert werden, lässt sich das schnelle Iterative-Closest-Point Verfahren (ICP) anwenden [3]. Wesentlich mehr Flexibilität und Anwendungsmöglichkeiten bietet die Registrierung anhand von heuristischen Optimierungsverfahren. Diese erlauben es dem Benutzer, selbst eine so genannte Kostenfunktion zu formulieren, die dann vom Algorithmus automatisch minimiert wird. Eine derartige Kostenfunktion kann zum Beispiel sein: „Verschiebe das Bauteil möglichst weit in positive x-Richtung“ oder „Es darf dabei zu keinen Kollisionen mit der Bauteil-Umgebung kommen“. Die frei definierbaren Kostenfunktionen sind außerdem beliebig kombinierbar, so dass sie sich schnell auf die jeweilige Problemstellung anpassen lassen. In den bisher durchgeführten Experimenten hat sich das Optimierungsverfahren „Partikelschwarmoptimierung“ (PSO) [4] als ein für diesen Anwendungsfall gut geeignetes Verfahren herausgestellt. Der PSO imitiert bei der Lösungssuche das Sozialverhalten von Lebewesen. Einzelne Partikel (Suchobjekte) orientieren sich bei ihrer Bewegung im Lösungsraum an ihrer eigenen besten bisher gefundenen Lösung und der bisher besten Lösung ihrer Nachbarpartikel. Nachteilig an der Registrierung mit diesem heuristischen Optimierungsverfahren ist der erheblich höhere Zeitbedarf im Vergleich zum ICP.

## 2.3 Diskretisierung

Wurde für jeden Datensatz die Idealposition ermittelt, so können diese in einen Volumendatensatz eingefügt werden. Dazu wird für die gesamte Geometrie ein umschreibendes Rechteck (Bounding Box) erzeugt. Dieses wird wiederum in eine große Anzahl von Würfeln mit der gleichen Kantenlänge zerlegt. Die Würfel werden als „Voxel“ (Volumenelement, analog zum zweidimensionalen Pixel) bezeichnet und sollten für das beschriebene Verfahren eine Auflösung von unter 0,01 mm besitzen. Alle registrierten Oberflächen-Datensätze werden nun sukzessive in einen einzigen Volumendatensatz eingefügt. Schneidet eine Oberfläche einen Voxel, so wird ein interner Zähler des Voxels erhöht. Jeder einzelne Datensatz kann den Zähler nur um 0 oder 1 erhöhen, damit das Ergebnis unabhängig von der Vernetzung der Daten ist, d.h. schneiden zwei oder mehr Dreiecke des selben Datensatzes den Voxel, wird der Zähler dennoch nur um 1 erhöht. Resultat ist eine „Trefferzahl“ der nichtidealen Geometriedaten pro Voxel. Die einzelnen Schritte der Trefferzahlermittlung sind in Bild 3(a-d) vereinfacht zweidimensional dargestellt.

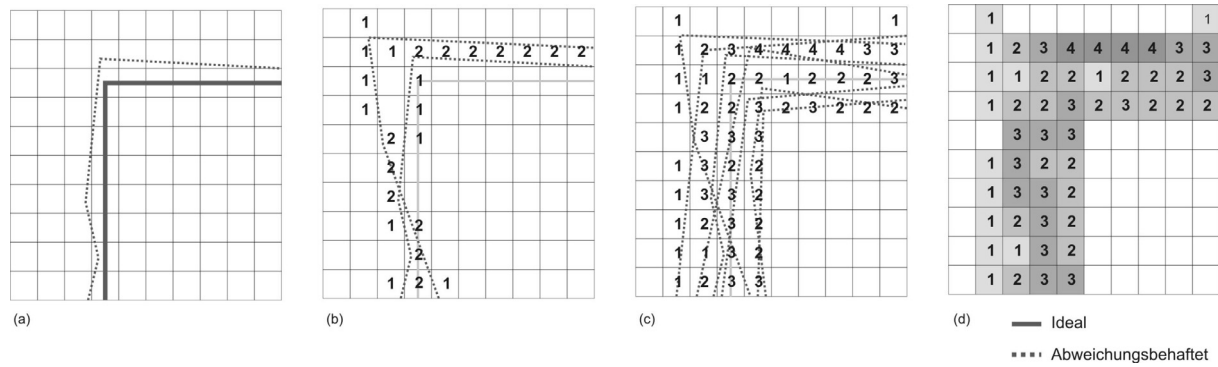


Bild 3: Sukzessive Diskretisierung der Eingangsdaten

Im Anschluss lässt sich die Trefferzahl normieren, danach stellt der Zahlenwert die "Aufenthaltswahrscheinlichkeit" der Geometrie pro Voxel im Raum dar.

### 3 Visualisierung

Die in Abschnitt 2 erzeugten Daten entsprechen in ihrem Format den Volumendaten der Computertomographie, daher lassen sich ähnliche Visualisierungsverfahren anwenden. Im Folgenden werden ausgewählte Verfahren der Volumenvisualisierung aufgezeigt, die für die Anwendung im Bereich der Toleranzanalyse geeignet sind.

#### 3.1 Transferfunktion

Die Skalarwerte der Voxel lassen sich anhand einer Transferfunktion in graphisch darstellbare Daten übertragen. Dabei wird jedem Wert zwischen 0 und 1 beispielsweise ein Rot-, Grün-, Blau- und Transparenzwert zugewiesen (siehe Bild 4). Die Zuweisung erlaubt es dem Benutzer, die Daten nach seinen Vorstellungen zu visualisieren, etwa durch Transparenz Teilbereiche auszublenken. Durch die RGB-Farbzuweisung können einzelne Gruppen separat markiert werden, um so eine Auftrennung zu erreichen.

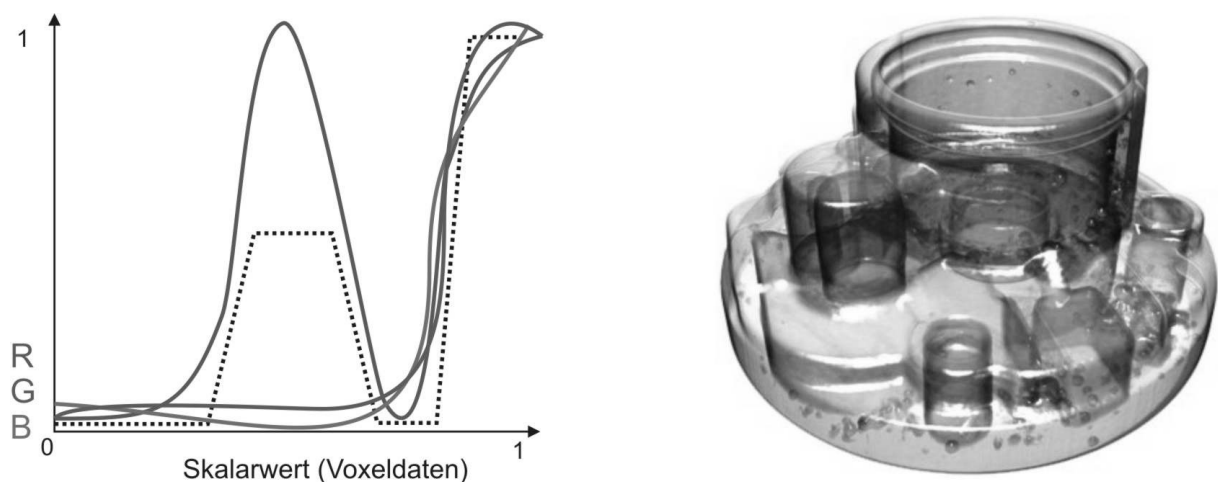


Bild 4: Transferfunktion und Visualisierungsergebnis [Quelle: LGD Uni Erlangen]

Im hier vorgestellten Verfahren können dadurch Voxel mit einer sehr geringen Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Geometrie bei der Ausgabe ignoriert werden, um nur die Konturen zu zeigen, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit entstehen. Durch eine lineare Abbildung der

Skalarwerte auf die Transparenz werden häufig geschnittene Voxel opak dargestellt, selten geschnittene sind nahezu durchsichtig.

### 3.2 Indirekte Volumenvisualisierung

Indirekte Volumenvisualisierung bedeutet, dass vor der Darstellung eine Konvertierung der 3D-Skalardaten in konventionelle Daten stattfindet. Vorteil der indirekten Verfahren ist, dass die Konvertierung vorherberechnet werden kann und somit weniger Rechenleistung zur Visualisierung nötig ist, bzw. dass größere Datenmengen verarbeitet werden können. Ein Ansatz ist es, einen Schnitt des Volumens mit einer Ebene zu berechnen, so dass ein zweidimensionales Bild entsteht. Die jeweilige Schnittebene kann vom Benutzer beliebig im Raum gewählt werden, d.h. sie muss nicht parallel zu den Koordinatenebenen liegen. Bild 5 zeigt exemplarisch vier verschiedene Schnittbilder eines Computertomographie-Datensatzes.

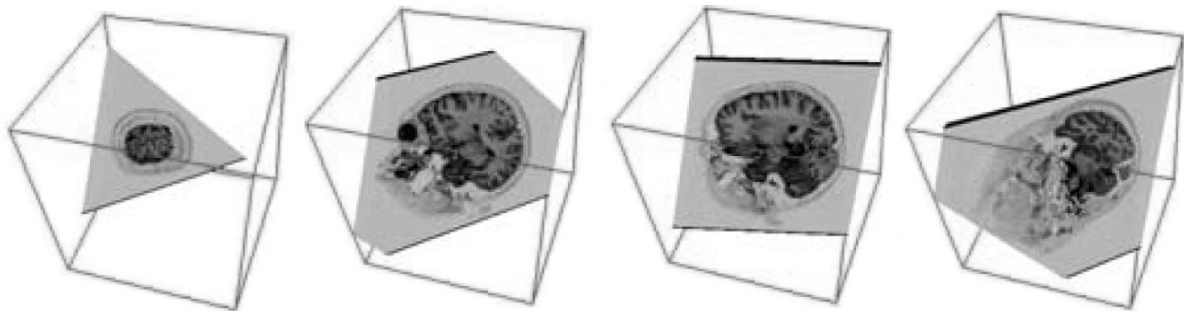


Bild 5: Generieren von Schnittbildern [Quelle: LGD Uni Erlangen]

Eine weitere Möglichkeit ist es, aus den Volumendaten Dreiecksnetze zu generieren. So kann mithilfe des Marching Cube Algorithmus [8] die Oberfläche für einen vorgegebenen Skalarwert rekonstruiert werden. Der Benutzer kann einen Schwellwert wählen, der bestimmt, welche Bereiche des Datensatzes angezeigt werden.

### 3.3 Direkte Volumenvisualisierung

Direkte Volumenvisualisierung bezeichnet die Darstellung der Daten als Volumenobjekt. Mit direkten Methoden kann der gesamte Datensatz dargestellt werden, ohne dass eine Beschränkung auf Teilbereiche nötig ist. Durch die fortwährende Leistungssteigerung der Grafikkarten in den letzten Jahren ist es möglich geworden, die 3D-Daten direkt zu rendern, indem diese als dreidimensionale Texturen gespeichert werden. Die Transferfunktion lässt sich als 2D-Textur speichern, so dass der endgültige Wert durch Kombination der beiden Texturen entsteht [7]. Anschließend lassen sich mehrere Scheiben des Texturwürfels erzeugen und durch Kombination anzeigen. Dadurch lässt sich der Datensatz mit interaktiver Bildwiederholrate begutachten. Nachteilig an den hardwarebasierten Verfahren ist der hohe Texturspeicherbedarf, so sind mit aktuellen Grafikkarten maximal 256 MB Volumendaten darstellbar.

## 4 Zusammenfassung und Weiterentwicklung

Die vorgestellte Methode soll dem Produktentwickler Unterstützung in Ausarbeitungsphase bieten, denn durch die dreidimensionale Darstellung verbessert sich das Verständnis für die Wirkung vergebener Toleranzen. Darüber hinaus lassen sich die Zusammenhänge zwischen den Toleranzarten besser verstehen und anders als bei Toleranzanalyseprogrammen zuverlässiger identifizieren, da sie nicht von der Definition einzelner Messungen abhängig sind. Die Visualisierung soll damit helfen, bei Neukonstruktionen sinnvolle, aufeinander abge-

stimmte Toleranzen zu vergeben, beziehungsweise bestehende Tolerierungskonzepte zu überdenken. Durch die graphische Aufbereitung der Wahrscheinlichkeiten (zum Beispiel durch Transparenz) wird der Zusammenhang zwischen statistischen Ergebnissen und Bauteilgeometrie hergestellt.

In der Qualitätssicherung lässt sich das Verfahren einsetzen, um die großen Datenmengen mehrerer Flächenmessungen zu analysieren. Ergebnisse aus hunderten oder tausenden Messungen lassen sich verständlich in einem einzigen Bild zusammenführen, was einen Fortschritt gegenüber der momentan üblichen Analyse von Verteilungskurven einzelner Messpunkte darstellt. Somit lassen sich Probleme der Produktion aufdecken und deren Wahrscheinlichkeit und Position zuordnen. Die Ergebnisse von Messung und Simulation lassen sich visuell oder durch Berechnung miteinander vergleichen. So lässt sich überprüfen, inwieweit die Simulationsergebnisse den realen Ergebnissen entsprechen und an welchen Stellen die erwarteten Schwankungen nicht zutreffen. Dadurch können die Simulationsergebnisse abgesichert werden und Erfahrungswissen für ähnliche Problemstellungen aufgebaut werden.

Hauptfokus zukünftiger Arbeiten wird die Erweiterung der Methode zur Betrachtung komplexer Baugruppen sein. Die Kopplung der Einzelteile stellt hierbei eine Herausforderung dar, die beispielsweise über die heuristische Registrierung mit geeigneten Kostenfunktionen gelöst werden kann. Die hierzu erarbeiteten Ansätze werden im Rahmen der Forschungsaktivitäten des SFB 396 umgesetzt und evaluiert. Ein mögliches Szenario zur praktischen Untersuchung der Methode kann hierbei das technische Teilsystem Nockenwelle – Schleppebel – Tassenstößel eines Verbrennungsmotors sein. Ein Analyseziel wäre hierbei, Auswirkungen der Fertigungsabweichungen auf die dynamischen Vorgänge beim Zusammenspiel dieser Bauteile zu ermitteln. Eine Interpretation der dabei erhaltenen Ergebnisse kann bei der Einschätzung dieser Auswirkungen auf Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit eines Verbrennungsmotors helfen.

Die Autoren danken dem Lehrstuhl für Grafische Datenverarbeitung der Universität Erlangen Nürnberg, insbesondere Marco Winter und Michael Bauer für die freundliche Unterstützung und die Bereitstellung von Bildmaterial.

## 5 Literatur

- [1] Lööf, J.; Söderberg, R.; Lindkvist, L.: Visualization of variation in early design phases: A convex hull approach. In: DESIGN 2006, Dubrovnik, 2006
- [2] Maxfield, J.; Dew, P.; Zhao, J.; Juster, N.; Fitchie, M.: A Virtual Environment for Aesthetic Quality Assessment of Flexible Assemblies in the Automotive Design Process, SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, 2002
- [3] Besl, J.; McKay, D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 14, No. 2, 1992
- [4] Kennedy, J.; Eberhart, R.C.: Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann Academic Press, 2001
- [5] Akenine-Möller, T.; Haines, E.: Real-Time Rendering, Second Edition. A K Peters Verlag, Natick, Massachusetts, 2003
- [6] Söderberg, R.; Lindkvist, L.; Carlson, J.: Virtual geometry assurance for effective product realization. NordPLM 2006, Göteborg, 2006
- [7] Botch, M.; Bommes, D.; Vogel, C.; Kobbelt, L.: GPU-based Tolerance Volumes for Mesh Processing, Proc. Pacific Graphics, 2004

- [8] Lorensen, W.; Cline, H.: Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In: SIGGRAPH 1987

Dipl.-Inf. Stefan Wittmann  
Dipl.-Ing. Andreas Stockinger  
Lehrstuhl für Konstruktionstechnik  
FAU Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 9, D-91058 Erlangen  
Tel: +49-9131-85-23218  
Fax: +49-9131-85-27988  
Email: wittmann@mfk.uni-erlangen.de  
stockinger@mfk.uni-erlangen.de  
URL: <http://www.mfk.uni-erlangen.de>