

Verfahren zum Erzeugen eines Oberflächenoffsets eines Voxel-basierten 3D-Modells eines physischen Objekts

5

Gebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bearbeitung eines Voxel-basierten 3D-Modells eines physischen Objekts zum Erzeugen eines Oberflächenoffsets des Voxel-basierten 3D-Modells.

10

Hintergrund der Erfindung

Im Bereich des 3D-Drucks ist es bekannt, physische Objekte durch 3D-Modelle zu repräsentieren, wobei die Form eines Objekts mittels eines Voxel-Modells bzw. eines Voxelfelds repräsentiert werden kann.

15

Ein Voxel-Modell umfasst eine Mehrzahl an Voxeln, also dreidimensionale Raumeinheiten. Um die Form eines Objekts mittels eines Voxel-Modells abzubilden, wird der Abstand einzelner Voxel des Voxel-Modells zur Oberfläche des Objekts ermittelt. Dabei ist es zweckmäßig, nur die Abstandswerte jener Voxel zu speichern, die sich in unmittelbarer Nähe zur Oberfläche des Objekts befinden. Dadurch kann die Komprimierrate und die Geschwindigkeit mancher Algorithmen verbessert werden, denn erhebliche Raumabschnitte in einem ausreichenden Abstand zur Oberfläche des Objekts können übersprungen werden.

20

25

Spärlich besetzte Voxel-Modelle sind jedoch nachteilig für bestimmte Bearbeitungen von 3D-Modellen, insbesondere dem Offsetting (=Erzeugen eines Oberflä-

- 2 -

chenoffsets des Voxel-basierten 3D-Modells). Denn beim Offsetting sind beispielsweise auch Abstandswerte von Voxeln zu bearbeiten, die sich etwas weiter entfernt von der Oberfläche des Objekts befinden. In einem speicheroptimierten, spärlich besetzten Voxel-Modell fehlen jedoch für die vom Offsetting betroffenen Voxel die

5 Abstandswerte.

Aufgabe der Erfindung

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist daher, ein Verfahren zum effizienten Re-

10 konstruieren von fehlenden Informationen in einem speicheroptimierten Voxel-Modell bereitzustellen, wobei das Voxel-Modell ein 3D-Modell eines physischen Objekts zur Steuerung eines 3D-Druckers repräsentiert.

Erfindungsgemäße Lösung

15 Die Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen nach dem unabhängigen Patentanspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den abhängigen Unteransprüchen definiert.

20 Erfindungsgemäß wird ein Computer-implementiertes Verfahren zum Erstellen eines zweiten Voxel-Modells aus einem ersten Voxel-Modell bereitgestellt. Das erste Voxel-Modell, welches erste Voxel aufweist, repräsentiert ein 3D-Modell eines physischen Objekts. Jedem ersten Voxel ist ein Abstandsattribut zugeordnet, wobei in dem Abstandsattribut der Abstand des jeweiligen ersten Voxels zur Oberfläche

25 des Objekts speicherbar ist. Für jedes erste Voxel, dessen betragsmäßiger minimaler Abstand unterhalb eines ersten vorbestimmten Schwellenwertes liegt, ist der betragsmäßig minimale Abstand in dem Abstandsattribut gespeichert. Für jedes erste Voxel, dessen betragsmäßiger minimaler Abstand oberhalb des ersten vorbestimmten Schwellenwertes liegt, ist ein vorbestimmter Abstand in dem Abstandsattribut

30 gespeichert.

Das erste Voxel-Modell weist also eine spärlich besetzte Datenstruktur auf.

In einem ersten Schritt wird das zweite Voxel-Modell erzeugt. Das zweite Voxel-Modell weist zweite Voxel und eine zum ersten Voxel-Modell identische Dimension auf. Jedes erste Voxel korrespondiert mit einem zweiten Voxel. Jedem zweiten Voxel ist ein Abstandsattribut zugeordnet, wobei in dem Abstandsattribut der Abstand des jeweiligen zweiten Voxels zur Oberfläche des Objekts speicherbar ist.

In einem zweiten Schritt wird in einer ersten Richtung durch das erste Voxel-Modell iteriert. Für jedes erste Voxel mit einem gespeicherten vorbestimmten Abstand wird für das korrespondierende zweite Voxel ein erster approximierter Abstand ermittelt und in das Abstandsattribut des korrespondierenden zweiten Voxels gespeichert.

In einem dritten Schritt wird in einer zweiten Richtung durch das erste Voxel-Modell iteriert. Für jedes erste Voxel mit einem gespeicherten vorbestimmten Abstand wird für das korrespondierende zweite Voxel unter Einbezug des ersten approximierten Abstands ein zweiter approximierter Abstand ermittelt. Der zweite approximierter Abstand wird im Abstandsattribut des korrespondierenden zweiten Voxels gespeichert.

Das zweite Voxel-Modell repräsentiert ein 3D-Modell des physischen Objekts zur Steuerung eines 3D-Druckers. Aus den zweiten Voxeln werden Steueranweisungen zur Steuerung des 3D-Druckers abgeleitet. Die Steueranweisungen werden zur Übertragung an den 3D-Drucker bereitgestellt.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren kann also für jedes Voxel, bei welchem die Abstandsinformation fehlt, ein approximierter Abstand zur Oberfläche des physischen Objekts berechnet werden.

Das zweite Voxel-Modell wird unabhängig vom ersten Voxel-Modell im Speicher gehalten, d.h. jedenfalls während der Ausführung des Verfahrens existieren im Speicher zwei Voxel-Modelle. Dies hat auch den Vorteil, dass das originale Voxel-Modell (= das erste Voxel-Modell) unverändert erhalten bleibt.

5

Das erfindungsgemäße Verfahren hat den Vorteil, dass die Geschwindigkeit zur Berechnung der approximierten Abstände linear mit der Größe des Voxel-Modells skaliert. Das bedeutet, dass das erfindungsgemäße Verfahren eine Laufzeitkomplexität von $O(n)$ aufweist, was insbesondere bei Voxel-Modellen mit einer sehr großen Anzahl von Voxeln vorteilhaft ist. Somit kann das erfindungsgemäße Verfahren auch bei Voxel-Modellen, die große physische Objekte repräsentieren, eingesetzt werden. Durch die Berechnung der approximierten Abstände wird ein Offsetting der Form des physischen Objekts, welches durch ein Voxel-Modell repräsentiert wird, ermöglicht. Die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erzeugten approximierten Abstände weisen eine ausreichend gute Genauigkeit auf.

Vorteilhafterweise wird im zweiten Schritt zusätzlich für jedes erste Voxel mit einem gespeicherten Abstand im Abstandsattribut der gespeicherte Abstand in das jeweilige Abstandsattribut des zweiten Voxels kopiert.

20

Erfindungsgemäß ist also vorgesehen, dass die genauen Abstände des spärlich besetzten ersten Voxel-Modells in das zweite Voxel-Modell übernommen werden. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Abstände der Voxel nahe der Oberfläche des Objekts möglichst präzise sind.

25

Alternativ kann im ersten Schritt das zweite Voxel-Modell als eine Kopie des ersten Voxel-Modells initialisiert werden.

Vorzugsweise werden im dritten Schritt erste Voxel, die einen gespeicherten Abstand im Abstandsattribut aufweisen, übersprungen.

30

- 5 -

In einer vorteilhaften Ausgestaltung wird im zweiten Schritt und/oder im dritten Schritt für die jeweiligen zweiten Voxel der erste approximierte Abstand und/oder der zweite approximierte Abstand aus den gespeicherten Abständen jener zweiten Voxel ermittelt, die bis zu einer vorbestimmten Voxelanzahl, vorzugsweise in jede
5 Richtung, mit dem jeweiligen zweiten Voxel benachbart sind.

Diese Ausgestaltung hat den technischen Vorteil, dass die Genauigkeit bei der Ermittlung der approximierten Abstände einstellbar wird. Je mehr benachbarte zweite Voxel zur Berechnung des approximierten Abstands eines Voxels einbezogen werden,
10 den, desto genauer kann der Abstand des Voxels zur Oberfläche des Objekts angenähert werden. Mit der Anzahl der einbezogenen benachbarten zweiten Voxel erhöht sich allerdings auch die Ausführungszeit des Verfahrens. Abhängig von der zu erreichenden Offsetting-Tiefe kann mit der vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens somit ein Kompromiss zwischen Ausführungszeit und
15 Genauigkeit des Offsettings gefunden werden. Das erfindungsgemäße Verfahren weist aber unabhängig von der Anzahl der einbezogenen benachbarten Voxel eine Laufzeitkomplexität von $O(n)$ auf.

Vorzugsweise ist die vorbestimmte Voxelanzahl 2. Das heißt in jeder Richtung werden
20 zwei benachbarte Voxel in die Berechnung des approximierten Abstandes mit einbezogen.

Nach den Erkenntnissen des Erfinders bietet eine Begrenzung der Suche nach approximierten Abständen eines Voxels auf die zu dem Voxel benachbarte zweite
25 Voxel innerhalb eines Radius von zwei Voxel- eine für die Praxis ausreichende Genauigkeit der approximierten Abstände.

Weiter vorzugsweise umfasst der vorbestimmte Abstand im Abstandsattribut eines ersten Voxels einen ersten vorbestimmten Abstand und einen zweiten vorbestimmten Abstand. Für ein erstes Voxel mit einem ersten vorbestimmten Abstand wird
30

- 6 -

der erste approximierte Abstand aus dem Maximum der aus den benachbarten zweiten Voxel ermittelten Abstände ermittelt. Für ein erstes Voxel mit einem zweiten vorbestimmten Abstand wird der zweite approximierte Abstand aus dem Minimum der aus den benachbarten zweiten Voxel ermittelten Abstände ermittelt.

5

Durch einen ersten vorbestimmten Abstand und einen zweiten vorbestimmten Abstand können Bereiche, welche von der Oberfläche des physischen Objekts eingeschlossen werden, und Bereiche außerhalb des physischen Objekts unterschieden werden. Diese Unterscheidung hat den Vorteil, dass die approximierten Abstände
10 nicht nur betragsmäßig ermittelt werden können, sondern auch vorzeichenbehaftet.

Vorteilhafterweise wird der erste und/oder der zweite approximierte Abstand nur aus jenen benachbarten zweiten Voxel ermittelt, über die in der jeweiligen Richtung bereits iteriert wurde.

15

In einer vorteilhaften Ausgestaltung sind das erste Voxel-Modell und das zweite Voxel-Modell jeweils dreidimensional. In der ersten Richtung wird ausgehend von einem Ursprung zuerst über eine erste Dimension, anschließend über eine zweite Dimension und zuletzt über eine dritte Dimension jeweils aufsteigend iteriert.

20

Dieses Verfahren zur Iteration über ein dreidimensionales Voxel-Modell hat den Vorteil, dass jedes Voxel des Voxel-Modells nur einmal besucht wird. Gleichwohl bleibt gewährleistet, dass zur Ermittlung des approximierten Abstands eines Voxels bereits ein erheblicher Anteil der benachbarten Voxel zuvor besucht worden ist.

Somit tragen für jedes Voxel, abgesehen von den Voxeln am Rand des Voxel-Modells, jeweils ähnlich viele benachbarte Voxel zur Ermittlung des approximierten Abstands zur Oberfläche des Objekts bei. Auf diese Weise können systematische Abweichungen bei der Berechnung von approximierten Abständen von Voxel zur Oberfläche des Objekts reduziert werden.

30

- 7 -

Vorteilhaft ist auch, wenn in der zweiten Richtung ausgehend von dem vom Ursprung am weitesten entfernten ersten Voxel zuerst über die erste Dimension, anschließend über die zweite Dimension und zuletzt über die dritte Dimension jeweils absteigend iteriert wird.

5

In einer vorteilhaften Ausgestaltung werden für jedes zweite Voxel der Abstand und/oder der zweite approximierte Abstand nur dann gespeichert, wenn er zusätzlich ein vorbestimmtes Speicherkriterium erfüllt.

- 10 Somit kann schließlich das zweite Voxel-Modell auf die für die Steuerung des 3D-Druckers relevanten Abstandswerte in der Nähe der Oberfläche des Objekts nach der Bearbeitung beschränkt werden.

- 15 In dem erzeugten zweiten Voxel-Modell können demnach anhand der approximierten Abstände beliebige Voxel zur Oberfläche des physischen Objekts hinzugefügt bzw. entfernt werden. Somit kann ein Offset des durch das zweite Voxel-Modell repräsentierten Objekts erzeugt werden, weshalb diese Form der Bearbeitung eines 3D-Modells auch als "Offsetting" bezeichnet wird.

- 20 Insbesondere beim 3D-Druck wird das Offsetting eingesetzt, um ein physisches Objekt mit einer zusätzlichen Hülle zu drucken, wobei die Hülle in einem Nachbearbeitungsschritt, also nach dem 3D-Druck, abgetragen bzw. entfernt wird. Dies hat den Vorteil, dass beispielsweise Auflösungsgrenzen des 3D-Druckers ausgehebelt werden können und eine präzise Realisierung der Form des gedruckten physischen
25 Objekts gewährleistet werden kann. Schließlich ist ein nachträgliches Wegnehmen von Druckmaterial verarbeitungsspezifisch vorteilhaft gegenüber einem nachträglichen Hinzufügen von Druckmaterial.

- 30 Vorzugsweise sind die ersten Voxel und/oder die zweiten Voxel jeweils in einer Baumstruktur gespeichert. Die Baumstruktur umfasst einen Wurzelknoten und eine

- 8 -

vorbestimmte maximale erste Anzahl von Hierarchieebenen. Jedem Knoten einer Hierarchieebene ist eine vorbestimmte zweite Anzahl von Unterknoten zuordenbar.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn die vorbestimmte maximale Anzahl von Hierarchieebenen 3 ist, und die vorbestimmte zweite Anzahl von Unterknoten 4096 ist, sodass jedem Knoten einer Hierarchieebene, mit Ausnahme der untersten Hierarchieebene, 4096 Unterknoten zuordenbar sind.

Vorzugsweise weist das in dem ersten Schritt erzeugte zweite Voxel-Modell gleich-
viele zweite Voxel auf wie das erste Voxel-Modell erste Voxel aufweist.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung kann das Offsetting aus dem erzeugten zweiten Voxel-Modell dadurch umgesetzt werden, dass ein Abstandswert, der in dem Abstandsattribut des jeweiligen zweiten Voxels gespeichert ist, um eine vorbestimmte Offsetdistanz angepasst und im Abstandsattribut gespeichert wird. Für jedes zweite Voxel, dessen angepasster Abstandswert oberhalb des ersten vorbestimmten Schwellenwertes liegt, wird der angepasste Abstandswert durch den vorbestimmten Abstand ersetzt.

Der Abstandswert, der in dem Abstandsattribut des jeweiligen zweiten Voxels gespeichert ist, kann der betragsmäßige minimale Abstand oder der zweite approximierte Abstand sein.

Die vorbestimmte Offsetdistanz kann sowohl positiv als auch negativ sein. Durch eine positive Offsetdistanz werden Voxel zur Oberfläche des physischen Objekts hinzugefügt, wodurch in der Regel auch das Volumen des physischen Objekts zunimmt. Durch eine negative Offsetdistanz werden Voxel von der Oberfläche des physischen Objekts entfernt.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung kann das Offsetting aus dem erzeugten zweiten Voxel-Modell dadurch erzeugt werden, dass ein Abstandswert, der in

dem Abstandsattribut des jeweiligen zweiten Voxels gespeichert ist und kein vorbestimmter Abstand ist, um die vorbestimmte Offsetdistanz angepasst und im Abstandsattribut gespeichert wird. Für jedes zweite Voxel, dessen angepasster Abstandswert oberhalb des ersten vorbestimmten Schwellenwertes liegt, wird der angepasste Abstandswert durch den vorbestimmten Abstand ersetzt.

Diese Ausgestaltung hat den Vorteil, dass die Anpassung der Abstandswerte um die Offsetdistanz lediglich bei denjenigen zweiten Voxeln vorzunehmen ist, dessen betragsmäßiger minimaler Abstand unterhalb des zweiten vorbestimmten Schwellenwertes liegt. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Voxel für welche die Anpassung vorzunehmen ist erheblich.

Mittels des Offsettings kann also die in dem ersten Voxel-Modell implizit definierte Oberfläche in eine zweite implizit definierte Oberfläche transformiert werden, die dann in dem zweiten Voxel-Modell gespeichert ist. Durch die Abstandswerte in den einzelnen Voxeln werden die Oberfläche in dem ersten Voxel-Modell und die Oberfläche in dem zweiten Voxel-Modell implizit definiert.

Kurzbeschreibung der Figuren

Weitere Einzelheiten und Merkmale des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie konkrete, insbesondere vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung in Verbindung mit der Zeichnung. Es zeigt:

- Fig. 1 Eine Ebene eines ersten Voxel-Modells nach einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Fig. 2 Eine zu der Ebene des ersten Voxel-Modells aus Fig. 1 korrespondierende Ebene eines zweiten Voxel-Modells nach dem zweiten Schritt einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens;

- Fig. 3 Die zweite Ebene aus Fig. 2 nach dem dritten Schritt einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Fig. 4a Ermittlung des ersten approximierten Abstands für ein zweites Voxel nach einem Aspekt der Erfindung;
- 5 Fig. 4b Ermittlung des zweiten approximierten Abstands für das zweite Voxel der Fig. 4a nach einem Aspekt der Erfindung;
- Fig. 5 Eine zu der Ebene des ersten Voxel-Modells aus Fig. 1 korrespondierende Ebene des zweiten Voxel-Modells nach dem Offsetting gemäß einem Aspekt der Erfindung;
- 10 Fig. 6a Eine beispielhafte Ausgestaltung der Ebene aus Fig. 3 mit konkreten Abstandswerten; und
- Fig. 6b Die Ebene der Fig. 6a nach Anpassung der Abstandswerte um eine Offsetdistanz.

15 Detaillierte Beschreibung der Erfindung

Der Begriff "Offsetting" im Kontext der Bearbeitung von 3D-Modellen beschreibt in der vorliegenden Erfindung jegliche Bearbeitung eines 3D-Modells, wonach die Form des zu druckenden Objekts zumindest abschnittsweise nach außen und/oder nach innen verändert wird.

Fig. 1 zeigt eine Ebene eines ersten Voxel-Modells nach einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

25 Die in Fig. 1 gezeigte Ebene ist einem nicht gezeigten dreidimensionalen ersten
Voxel-Modell VM entnommen und dient im Folgenden als Beispiel zur Erklärung
des erfindungsgemäßen Verfahrens.

Das typischerweise dreidimensionale erste Voxel-Modell VM weist eine erste Di-
 30 mension X, eine zweite Dimension Y und eine (nicht gezeigte) dritte Dimension Z
 auf. Der Darstellbarkeit halber weist die in Fig. 1 gezeigte Ebene des ersten Voxel-

Modells VM jeweils acht Voxel in der ersten Dimension X und in der zweiten Dimension Y auf. In einem realen Voxel-Modell liegt üblicherweise eine erheblich höhere Voxeldichte vor, etwa um eine möglichst hohe Auflösung bei der Realisierung des Detailreichtums eines physischen Objekts zu erreichen. Im folgenden Beispiel werden spezifische erste Voxel VX1 des ersten Voxel-Modells VM mittels Koordinatenpaaren X, Y referenziert.

In der in Fig. 1 gezeigten Ebene des ersten Voxel-Modells VM stellt das physische Objekt ein "H" dar. Die Oberfläche des physischen Objekts wird durch diejenigen ersten Voxel VX1 gebildet, welche als schräg schraffiert dargestellt sind.

Jedem ersten Voxel VX1 ist ein Abstandsattribut d bzw. $d_{\pm\infty}$ zugeordnet, wobei in dem Abstandsattribut der Abstand des jeweiligen ersten Voxels VX1 zur Oberfläche des Objekts speicherbar ist.

Für jedes erste Voxel VX1, dessen betragsmäßiger minimaler Abstand d unterhalb eines ersten vorbestimmten Schwellenwertes d_{MAX} liegt, ist der betragsmäßig minimale Abstand d in dem Abstandsattribut gespeichert. In dem Beispiel der Fig. 1 ist d_{MAX} gleich der Größe eines ersten Voxels VX1 gewählt. Der vorbestimmte Schwellenwert d_{MAX} kann aber auch größer gewählt werden. Der betragsmäßig minimale Abstand d derjenigen ersten Voxel VX1, welche die Oberfläche des Objekts bilden, ist beispielsweise Null, und daher im Abstandsattribut dieser ersten Voxel VX1 gespeichert. Ebenso ist der betragsmäßig minimale Abstand d derjenigen ersten Voxel VX1 in dem Abstandsattribut gespeichert, deren Abstand zur Oberfläche des Objekts höchstens ein erstes Voxel VX1 beträgt.

Für jedes erste Voxel VX1, dessen betragsmäßiger minimaler Abstand d oberhalb des ersten vorbestimmten Schwellenwertes d_{MAX} liegt, ist ein vorbestimmter Abstand $d_{\pm\infty}$ in dem Abstandsattribut gespeichert. Der vorbestimmte Abstand $d_{\pm\infty}$ markiert also Raumbereiche, welche von dem physischen Objekt nicht belegt sind und daher bei einer Verarbeitung des 3D-Modells übersprungen werden können. Beim

Offsetting der Oberfläche des physischen Objekts sind jedoch mehr als nur die nächsten Voxel zur Oberfläche des physischen Objekts betroffen.

Erfindungsgemäß wird daher in einem ersten Schritt S1 ein zweites Voxel-Modell VM2, das zweite Voxel VX2 aufweist, mit einer zum ersten Voxel-Modell VM identischen Dimension erzeugt. Dabei korrespondiert ein erstes Voxel VX1 zu einem zweiten Voxel VX2. Auch jedem zweiten Voxel VX2 ist ein Abstandsattribut zugeordnet, wobei in dem Abstandsattribut der Abstand d des jeweiligen zweiten Voxels VX2 zur Oberfläche des Objekts speicherbar ist.

10

Fig. 2 zeigt eine zu der Ebene des ersten Voxel-Modells aus Fig. 1 korrespondierende Ebene eines zweiten Voxel-Modells nach Ausführung des zweiten Schritts einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

15 In einem zweiten Schritt S2 wird in einer ersten Richtung durch das erste Voxel-Modell VM iteriert. Die Rekonstruktion des zweiten Voxel-Modells VM2 im zweiten Schritt S2 (und später auch im dritten Schritt S3) erfolgt synchron zur Iteration über das erste Voxel-Modell VM. In der ersten Richtung wird ausgehend von einem Ursprung zuerst über eine erste Dimension X, anschließend über eine zweite Dimension Y und zuletzt über eine dritte Dimension Z jeweils aufsteigend iteriert. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel ist der Ursprung mit dem Koordinatenpaar (1,1) gekennzeichnet. Somit wird zunächst in der ersten Dimension X aufsteigend iteriert, danach in der zweiten Dimension Y aufsteigend. Synchron hierzu werden über die zweiten Voxel VX2 iteriert, wobei die zweiten Voxel VX2 jeweils zu einem ersten Voxel VX1 korrespondieren.

25

Vorteilhaft ist es, wenn das zweite Voxel-Modell VM2 gleich viele zweite Voxel VX2 aufweist, wie das erste Voxel-Modell VM erste Voxel VX1 aufweist.

In dem zweiten Schritt S2 wird für jedes erste Voxel VX1 mit einem gespeicherten vorbestimmten Abstand $d_{\pm\infty}$ ein erster approximierter Abstand $da1$ ermittelt und ins Abstandsattribut des korrespondierenden zweiten Voxels VX2 gespeichert.

- 5 In dem hier gezeigten Ausführungsbeispiel werden im zweiten Schritt S2 zusätzlich für jedes erste Voxel VX1 mit einem gespeicherten Abstand d im Abstandsattribut der gespeicherte Abstand d in das jeweilige Abstandsattribut des zweiten Voxels VX2 kopiert.
- 10 In einem Aspekt der Erfindung, der auch in dem gezeigten Ausführungsbeispiel berücksichtigt ist, werden der erste approximierte Abstand $da1$ und/oder der zweite approximierte Abstand $da2$ (siehe Fig. 3) nur aus jenen benachbarten zweiten Voxeln VX2 ermittelt, über die in der jeweiligen Richtung bereits iteriert wurde. Konkret bedeutet dies, dass für eine Reihe von zweiten Voxeln VX2 zu Beginn der
15 Iteration in der ersten Richtung kein erster approximierter Abstand $da1$ ermittelt werden kann. Für die betroffenen zweiten Voxel VX2 ist nach Abschluss des zweiten Schritts S2 des erfindungsgemäßen Verfahrens kein Abstandswert im Abstandsattribut verfügbar, weshalb die betroffenen zweiten Voxel VX2 mit "n/a" beschriftet sind.
20 Zur Ermittlung der approximierten Abstände $da1$, $da2$ tragen abhängig vom ersten Voxel VX1 also unterschiedlich viele benachbarte zweite Voxel VX2 bei. Beispielsweise wurde in dem gezeigten Ausführungsbeispiel der erste approximierte Abstand $da1$ des Voxels (4,2) lediglich anhand des zuvor in das Abstandsattribut
25 des zweiten Voxels (3,2) kopierten Abstands d ermittelt. Für nachfolgende erste Voxel VX1 kann der erste approximierte Abstand $da1$ aus den ersten approximierten Abständen $da1$ und/oder betragsmäßig minimalen Abständen d von bereits verarbeiteten benachbarten zweiten Voxeln VX2 einbezogen werden.
- 30 Vorteilhaft ist es, wenn nicht jeweils alle verfügbaren benachbarten zweiten Voxel VX2 zur Ermittlung des ersten approximierten Abstands $da1$ einbezogen werden,

sondern nur diejenigen zweiten Voxel VX2, die bis zu einer vorbestimmten Voxelanzahl, vorzugsweise in jede Richtung, mit dem jeweiligen zweiten Voxel VX2 benachbart sind. Eine vorbestimmte Voxelanzahl von zwei ermöglicht für praktische Anwendungen des Offsettings eine ausreichend hohe Genauigkeit.

5

Je kleiner die gewählte vorbestimmte Voxelanzahl, desto weniger benachbarte zweite Voxel VX2 werden zur Ermittlung eines ersten approximierten Abstands da_1 für ein spezifisches zweites Voxel VX2 einbezogen, und desto kürzer wird die Ausführungszeit des Verfahrens. Ein konkretes Beispiel zur Ermittlung des ersten approximierten Abstands da_1 und des zweiten approximierten Abstands da_2 wird in Bezug auf Fig. 4 näher erläutert.

10

Fig. 3 zeigt die zweite Ebene aus Fig. 2 nach Ausführung des dritten Schritts einer Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens.

15

In dem dritten Schritt S3 wird in einer zweiten Richtung durch das erste Voxel-Modell VM iteriert. Für jedes erste Voxel VX1 mit einem gespeicherten vorbestimmten Abstand $d_{\pm\infty}$ wird für das korrespondierende zweite Voxel VX2 unter Einbezug des ersten approximierten Abstands da_1 ein zweiter approximierter Abstand da_2 ermittelt. Folglich ist synchron zur Iteration durch das erste Voxel-Modell VM eine korrespondierende Iteration durch das zweite Voxel-Modell VM2 vorgesehen.

20

Die ermittelten zweiten approximierten Abstände da_2 werden im Abstandsattribut der korrespondierenden zweiten Voxel VX2 gespeichert.

25

In der zweiten Richtung wird vorzugsweise ausgehend von dem vom Ursprung am weitesten entfernten ersten Voxel VX1 zuerst über die erste Dimension X, anschließend über die zweite Dimension Y und zuletzt über die dritte Dimension Z jeweils absteigend iteriert.

30

Im vorliegenden Beispiel weist das vom Ursprung am weitesten entfernte Voxel VX1, VX2 die Koordinaten (8,8) auf. Erfindungsgemäß wird zunächst in der ersten Dimension X absteigend iteriert, und anschließend absteigend in Y-Richtung. Für ein dreidimensionales Voxel-Modell VM, VM2 wird schließlich noch über die
5 dritte Dimension Z absteigend iteriert.

Nach Ausführung des dritten Schritts des erfindungsgemäßen Verfahrens ist im Abstandsattribut eines jeden zweiten Voxels VX2 entweder der betragsmäßig minimale Abstand d oder der zweite approximierte Abstand da2 gespeichert. Dadurch
10 liegt für jedes zweite Voxel VX2 ein Wert für den jeweiligen Abstand zur Oberfläche des physischen Objekts vor, sodass ein Offsetting der Oberfläche des Objekts anwendbar ist.

Nachdem im zweiten Schritt S2 des erfindungsgemäßen Verfahrens bereits die präzisen betragsmäßig minimalen Abstände d in das zweite Voxel-Modell VM2 kopiert wurden, bietet es sich an, im dritten Schritt S3 diejenigen ersten Voxel VX1,
15 die einen gespeicherten Abstand d im Abstandsattribut aufweisen, zu überspringen.

Ein konkretes Beispiel zur Ermittlung des zweiten approximierten Abstands für ein
20 zweites Voxel VX2 im dritten Schritt S3 des erfindungsgemäßen Verfahrens wird in Bezug zur Fig. 4 erläutert.

Fig. 4a und Fig. 4b zeigen die Ermittlung der approximierten Abstände da1, da2 für ein zweites Voxel nach einem Aspekt der Erfindung.

25

Fig. 4a zeigt die Ermittlung des ersten approximierten Abstands da1 und **Fig. 4b** die Ermittlung des zweiten approximierten Abstands da2 für das zweite Voxel.

Fig. 4a zeigt einen Ausschnitt des zweiten Voxel-Modells VM2 während des zweiten Schritts S2 des erfindungsgemäßen Verfahrens bei der Ermittlung des ersten
30

approximierten Abstands d_{a1} des ersten Voxels VX1 mit dem Koordinatenpaar (4,6).

Die in Fig. 4 gezeigten zweiten Voxel VX2 werden durch gestrichelte bzw. gepunktete Quadrate dargestellt. Diejenigen zweiten Voxel VX2, welche dem zweiten Voxel (4,6) benachbart sind und zur Ermittlung des ersten approximierten Abstands d_{a1} beitragen, sind in Fig. 4a mit einer durchgezogenen Linie markiert.

Im gezeigten Ausführungsbeispiel ist die vorbestimmte Voxelanzahl gleich zwei gewählt. Damit tragen in jeder Richtung nur diejenigen zweiten Voxel VX2 zur Abstandsermittlung bei, die höchstens zwei Voxel vom ausgewählten zweiten Voxel VX2, hier (4,6), entfernt sind. Wie in Fig. 4a gezeigt, wird der erste approximierte Abstand d_{a1} des zweiten Voxels (4,6) demnach aus den Abstandswerten von sechs benachbarten zweiten Voxeln VX2 ermittelt, wie durch Pfeile gekennzeichnet.

Das zum zweiten Voxel (4,6) korrespondierende erste Voxel VX1 hat im Abstandssattribut einen vorbestimmten Abstand $d_{\pm\infty}$ gespeichert. Vorteilhaft ist es, wenn jedoch zwischen einem ersten vorbestimmten Abstand $d_{+\infty}$ und einem zweiten vorbestimmten Abstand $d_{-\infty}$ unterschieden wird. So kann der erste vorbestimmte Abstand $d_{+\infty}$ ein erstes Voxel VX1, welches sich außerhalb des physischen Objekts befindet, kennzeichnen. Entsprechend kann der zweite vorbestimmte Abstand $d_{-\infty}$ ein erstes Voxel VX1, welches sich innerhalb des physischen Objekts befindet, kennzeichnen.

In einem Aspekt der Erfindung kann für ein erstes Voxel VX1 mit einem ersten vorbestimmten Abstand $d_{+\infty}$ der erste approximierte Abstand d_{a1} aus dem Minimum der aus den benachbarten zweiten Voxeln VX2 ermittelten Abstände ermittelt werden. Sofern ein erstes Voxel VX1 einen zweiten vorbestimmten Abstand $d_{-\infty}$ aufweist, kann der erste approximierte Abstand d_{a1} aus dem Maximum der aus den

benachbarten zweiten Voxeln VX2 ermittelten Abstände ermittelt werden. Alternativ kann der erste approximierte Abstand da1 auch durch Mittelung der für die benachbarten zweiten Voxeln VX2 ermittelten Abstände berechnet werden.

- 5 Fig. 4b zeigt die Ermittlung des zweiten approximierten Abstands da2 desselben ersten Voxels VX1 (4,6) während dem dritten Schritt S3 des erfindungsgemäßen Verfahrens.

- Im dritten Schritt S3 des erfindungsgemäßen Verfahrens wird in der zweiten Richtung durch das erste Voxel-Modell VM, und synchron hierzu durch das zweite Voxel-Modell VM2 iteriert. Die zweiten Voxel VX2 des in Fig. 4b gezeigten Ausschnitts des beispielhaften zweiten Voxel-Modells VM2 sind wieder durch gepunktete Quadrate gekennzeichnet. Diejenigen zweiten Voxel VX2, welche zur Ermittlung des zweiten approximierten Abstands da2 beitragen, sind zumindest teilweise mit einer durchgezogenen Linie umrandet.
- 10
15

- Aufgrund der abweichenden, etwa entgegengesetzten, Iterationsrichtung im Vergleich zum zweiten Schritt S2 tragen im dritten Schritt S3 andere benachbarte zweite Voxel VX2 zur Ermittlung des zweiten approximierten Abstands da2 des zweiten Voxels (4,6) bei. Darüber hinaus wird auch der im zweiten Schritt S2 ermittelte erste approximierte Abstand da1, welcher bereits im Abstandsattribut des ausgewählten zweiten Voxels (4,6) gespeichert ist, einbezogen.
- 20

- Die Ermittlung des zweiten approximierten Abstands da2 aus den benachbarten zweiten Voxeln VX2 kann analog zur Berechnung des ersten approximierten Abstands da1, also durch Berechnung eines Minimums, eines Maximums, oder einer Mittelung der den benachbarten zweiten Voxeln VX2 zugeordneten Abstände erfolgen.
- 25

Fig. 5 zeigt eine zu der Ebene des ersten Voxel-Modells aus Fig. 1 korrespondierende Ebene des zweiten Voxel-Modells nach einem Offsetting gemäß einem Aspekt der Erfindung.

- 5 Nach Ausführung des dritten Schritts S3 ist in jedem zweiten Voxel ein Abstandswert d , da_2 im Abstandsattribut gespeichert. Somit repräsentiert das zweite Voxel-Modell VM2 ein 3D-Modell des physischen Objekts zur Steuerung eines 3D-Druckers, wobei aus den zweiten Voxeln VX2 Steueranweisungen zur Steuerung des 3D-Druckers abgeleitet werden können, und die Steueranweisungen zur Übertragung an den 3D-Drucker bereitgestellt werden.

Basierend auf dem zweiten Voxel-Modell VM2 kann das 3D-Modell des physischen Objekts vor einem 3D-Druck digital bearbeitet werden. So können die gespeicherten Abstände in Abstandsattributen der zweiten Voxel VX2 derart angepasst werden, dass ausgewählte zweite Voxel VX2 zur Oberfläche des physischen Objekts hinzugefügt werden und/oder entfernt werden. Dadurch wird ein Offsetting der Form bzw. der Oberfläche des physischen Objekts realisiert. Im Beispiel nach Fig. 5 wurden die vertikal schraffiert gekennzeichneten zweiten Voxel VX2 der Oberfläche des physischen Objekts hinzugefügt.

20 Vorteilhaft ist es, wenn, nach der Bearbeitung des 3D-Modells, für jedes zweite Voxel VX2 der Abstand d oder der zweite approximierte Abstand da_2 nur dann gespeichert werden, wenn ein zusätzliches Speicherkriterium erfüllt ist. Das Speicherkriterium kann wiederum etwa als vorbestimmter Schwellenwert für den Abstand der zweiten Voxel VX2 implementiert werden.

Im gezeigten Beispiel der Fig. 5 sind der Übersicht halber jene zweite Voxel VX2, welche das vorbestimmte Speicherkriterium nicht erfüllen, als leere Quadrate dargestellt. Bei jenen zweiten Voxel VX2 dagegen, deren Abstandswert im Abstand-

sattribut unterhalb eines zweiten vorbestimmten Schwellenwertes d_{2MAX} (= vorbestimmtes Speicherkriterium) liegt, wird der Abstand d , $da2$ in dem Abstandsattribut gespeichert.

- 5 Auf diese Weise kann auch ein zweites Voxel-Modell VM2 nach einem Offsetting in einer spärlichen und damit speicheroptimierten Datenstruktur persistiert werden.

Im Folgenden wird ein durch Zahlenwerte konkretisiertes Beispiel des Offsettings ausgehend von dem zweiten Voxel-Modell VM2 nach einem Aspekt der Erfindung
10 erläutert.

Fig. 6a zeigt eine beispielhafte Ausgestaltung der Ebene aus Fig. 3 mit konkreten Abstandswerten.

- 15 Für das in Fig. 6a gezeigte zweite Voxel-Modell VM2 wurde durch Ausführung der Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens jeweils ein Abstandswert für die zweiten Voxel VX2 ermittelt und in dem zugehörigen Abstandsattribut gespeichert. Dabei wurden all diejenigen Abstandswerte, die über dem vorbestimmten zweiten Schwellenwert liegen, durch den ersten vorbestimmten Abstand $d_{+\infty}$, hier "+ ∞ ", ersetzt.
20

Der vorbestimmte zweite Schwellenwert beträgt in diesem Beispiel "2,1" für den Bereich außerhalb der Oberfläche des physischen Objekts und "-0,1" für den Bereich innerhalb des physischen Objekts. Das bedeutet, dass in dem zweiten Voxel-
25 Modell VM2 der Fig. 6a nur für diejenigen zweiten Voxel VX2 Abstandswerte gespeichert sind, deren ermittelter Abstand zwischen "-0,1" und "2,1" liegt.

Fig. 6b zeigt die Ebene der Fig. 6a nach Anpassung der Abstandswerte um eine Offsetdistanz.

30

- In diesem Ausführungsbeispiel beträgt die Offsetdistanz "+1" (beispielsweise 1 mm). Für das Offsetting werden die in dem jeweiligen zweiten Voxel VX2 gespeicherten Abstandswerte um die Offsetdistanz angepasst. In diesem Fall wird von den gespeicherten Abstandswerten jeweils der Wert "1" subtrahiert. Hierbei werden
- 5 in diesem Ausführungsbeispiel die zweiten Voxel VX2, in denen ein vorbestimmter Abstand gespeichert ist, nicht angepasst. Die Anpassung um die Offsetdistanz wird also nur bei denjenigen zweiten Voxel VX2 durchgeführt, in denen kein vorbestimmter Abstandswert gespeichert ist.
- 10 In diesem Beispiel wird demnach für diejenigen zweiten Voxel VX2, die Teil der Oberfläche des physischen Objektes sind, also den Abstandswert "0" in Fig. 6a gespeichert haben, ein angepasster Abstandswert d_0 von "-1" ermittelt. Vorteilhafterweise werden die angepassten Abstandswerte wiederum mit dem vorbestimmten ersten Schwellenwert gefiltert.
- 15 Der vorbestimmte erste Schwellenwert beträgt in diesem Beispiel "1,1" für den Bereich außerhalb der Oberfläche des physischen Objekts und "-0,1" für den Bereich innerhalb des physischen Objekts. Die zweiten Voxel VX2, die einen angepassten Abstandswert von "-1" aufweisen, wurden daher in diesem Beispiel durch den vor-
- 20 bestimmter Abstand $d_{-\infty}$, hier "-∞", ersetzt.
- Fig. 6b veranschaulicht demnach, wie mittels des Offsettings effizient eine Hülle, insbesondere eine gleichmäßige Hülle, um das physische Objekt gelegt werden kann. Auf dieselbe Weise, mit einer negativen Offsetdistanz, kann eine Schicht des
- 25 physischen Objekts, insbesondere eine Schicht mit konstanter Dicke, abgetragen werden. In beiden Fällen wird also eine Transformation der in dem Voxel-Modell beschriebenen Oberfläche durchgeführt.

Bezugszeichenliste

	VM	erstes Voxel-Modell
	VM2	zweites Voxel-Modell
5	VX1	erstes Voxel
	VX2	zweites Voxel
	d	betragsmäßig minimaler Abstand eines Voxels zur Oberfläche des physischen Objekts
	$d_{\pm\infty}$	vorbestimmter Abstand
10	$d_{+\infty}$	erster vorbestimmter Abstand
	$d_{-\infty}$	zweiter vorbestimmter Abstand
	d_o	angepasster Abstandswert
	d_{a1}	erster approximierter Abstand
	d_{a2}	zweiter approximierter Abstand
15	d_{MAX}	vorbestimmter Schwellenwert
	d_{2MAX}	zusätzlich vorbestimmter Schwellenwert
	S1	erster Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens
	S2	zweiter Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens
	S3	dritter Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens

Ansprüche

5

1. Computer-implementiertes Verfahren zum Erstellen eines zweiten Voxel-Modells (VM2) aus einem ersten Voxel-Modell (VM), wobei das erste Voxel-Modell (VM), das erste Voxel (VX1) aufweist, ein 3D-Modell eines physischen Objekts repräsentiert, wobei jedem ersten Voxel (VX1) ein Abstandsattribut zugeordnet ist, wobei in dem Abstandsattribut der Abstand des jeweiligen ersten Voxels (VX1) zur Oberfläche des Objekts speicherbar ist, wobei für jedes erste Voxel (VX1), dessen betragsmäßiger minimaler Abstand (d) unterhalb eines ersten vorbestimmten Schwellenwertes (d_{MAX}) liegt, der betragsmäßig minimale Abstand (d) in dem Abstandsattribut gespeichert ist, und für jedes erste Voxel (VX1), dessen betragsmäßiger minimaler Abstand (d) oberhalb des ersten vorbestimmten Schwellenwertes (d_{MAX}) liegt, ein vorbestimmter Abstand ($d_{\pm\infty}$) in dem Abstandsattribut gespeichert ist, wobei
 - in einem ersten Schritt (S1) das zweite Voxel-Modells (VM2), das zweite Voxel (VX2) aufweist, mit einer zum ersten Voxel-Modell (VM) identischen Dimension erzeugt wird, wobei ein erstes Voxel (VX1) zu einem zweiten Voxel (VX2) korrespondiert, wobei jedem zweiten Voxel (VX2) ein Abstandsattribut zugeordnet ist, wobei in dem Abstandsattribut der Abstand (d2) des jeweiligen zweiten Voxels (VX2) zur Oberfläche des Objekts speicherbar ist,
 - in einem zweiten Schritt (S2) in einer ersten Richtung durch das erste Voxel-Modell (VM) iteriert wird, wobei für jedes erste Voxel (VX1) mit einem gespeicherten vorbestimmten Abstand ($d_{\pm\infty}$) für das korrespondie-

- rende zweite Voxel (VX2) ein erster approximierter Abstand (d_{a1}) ermittelt wird und ins Abstandsattribut des korrespondierenden zweiten Voxels (VX2) gespeichert wird,
- in einem dritten Schritt (S3) in einer zweiten Richtung durch das erste Voxel-Modell (VM) iteriert wird, wobei für jedes erste Voxel (VX1) mit einem gespeicherten vorbestimmten Abstand ($d_{\pm\infty}$) für das korrespondierende zweite Voxel (VX2) unter Einbezug des ersten approximierten Abstands (d_{a1}) ein zweiter approximierter Abstand (d_{a2}) ermittelt wird und im Abstandsattribut des korrespondierenden zweiten Voxels (VX2) gespeichert wird,
- wobei das zweite Voxel-Modell (VM2) ein 3D-Modell des physischen Objekts zur Steuerung eines 3D-Druckers repräsentiert, wobei aus den zweiten Voxeln (VX2) Steueranweisungen zur Steuerung des 3D-Druckers abgeleitet werden, und die Steueranweisungen zur Übertragung an den 3D-Drucker bereitgestellt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei im zweiten Schritt (S2) zusätzlich für jedes erste Voxel (VX1) mit einem gespeicherten Abstand (d) im Abstandsattribut der gespeicherte Abstand (d) in das jeweilige Abstandsattribut des zweiten Voxels (VX2) kopiert wird.
3. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei im dritten Schritt (S3) erste Voxel, die einen gespeicherten Abstand (d) im Abstandsattribut aufweisen, übersprungen werden.
4. Verfahren nach Anspruch 1, wobei im ersten Schritt (S1) das zweite Voxel-Modell (VM2) als eine Kopie des ersten Voxel-Modells (VM) initialisiert wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei im zweiten Schritt (S2) und/oder im dritten Schritt (S3) für die jeweiligen zweiten Voxel (VX2) der erste approximierte Abstand (da1) und/oder der zweite approximierte Abstand (da2) aus den gespeicherten Abständen jener zweiten Voxel (VX2) ermittelt wird, die bis zu einer vorbestimmten Voxelanzahl, vorzugsweise in jede Richtung, mit dem jeweiligen zweiten Voxel (VX2) benachbart sind.
5
6. Verfahren nach Anspruch 4, wobei die vorbestimmte Voxelanzahl zwei ist.
10
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 oder 5, wobei
 - der vorbestimmte Abstand ($d_{\pm\infty}$) im Abstandsattribut eines ersten Voxels (VX1) einen ersten vorbestimmten Abstand ($d_{+\infty}$) und einen zweiten vorbestimmten Abstand ($d_{-\infty}$) umfasst,
 - 15 - für ein erstes Voxel (VX1) mit einem ersten vorbestimmten Abstand ($d_{+\infty}$) der erste approximierte Abstand (da1) und der zweite approximierte Abstand (da2) aus dem Minimum der aus den benachbarten zweiten Voxeln (VX2) ermittelten Abstände ermittelt wird, und
 - 20 - für ein erstes Voxel (VX1) mit einem zweiten vorbestimmten Abstand ($d_{-\infty}$) der erste approximierte Abstand (da1) und der zweite approximierte Abstand (da2) aus dem Maximum der aus den benachbarten zweiten Voxeln (VX2) ermittelten Abstände ermittelt wird.
8. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei der erste und/oder der zweite approximierte Abstand (da1; da2) nur aus jenen benachbarten zweiten Voxeln (VX2) ermittelt werden, über die in der jeweiligen Richtung bereits iteriert wurde.
25
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das erste und das zweite Voxel-Modell (VM; VM2) jeweils dreidimensional ist, wobei in der ersten Richtung ausgehend von einem Ursprung zuerst über eine erste
30

Dimension (X), anschließend über eine zweite Dimension (Y) und zuletzt über eine dritte Dimension (Z) jeweils aufsteigend iteriert wird.

10. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei in der zweiten Richtung ausgehend von dem vom Ursprung am weitesten entfernten ersten Voxel (VX1) zuerst über die erste Dimension (X), anschließend über die zweite Dimension (Y) und zuletzt über die dritte Dimension (Z) jeweils absteigend iteriert wird.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei für jedes zweite Voxel (VX2) der Abstand (d) und/oder der zweite approximierte Abstand (da2) nur dann gespeichert wird, wenn er zusätzlich ein vorbestimmtes Speicherkriterium erfüllt.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei
 - für jedes zweite Voxel (VX2), dessen betragsmäßiger minimale Abstand unterhalb eines zweiten vorbestimmten Schwellenwertes (d_{2MAX}) liegt, der Abstand (d; da2) in dem Abstandsattribut gespeichert wird, und
 - für jedes zweite Voxel (VX2), dessen betragsmäßiger minimaler Abstand oberhalb des zweiten vorbestimmten Schwellenwertes (d_{2MAX}) liegt, ein vorbestimmter Abstand ($d_{\pm\infty}$) in dem Abstandsattribut gespeichert wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die ersten Voxel (VX1) und/oder die zweiten Voxel (VX2) jeweils in einer Baumstruktur gespeichert sind, wobei die Baumstruktur einen Wurzelknoten umfasst, und eine vorbestimmte maximale erste Anzahl von Hierarchieebenen aufweist und jedem Knoten einer Hierarchieebene eine vorbestimmte zweite Anzahl von Unterknoten zuordenbar sind.
14. Verfahren nach dem vorhergehenden Anspruch, wobei
 - die vorbestimmte maximale Anzahl von Hierarchieebenen drei ist,

- die vorbestimmte zweite Anzahl von Unterknoten 4096 ist, sodass jedem Knoten einer Hierarchieebene, mit Ausnahme der untersten Hierarchieebene, 4096 Unterknoten zuordenbar sind.

- 5 15. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das in dem ersten Schritt (S1) erzeugte zweite Voxel-Modell (VM) gleichviele zweite Voxel (VX2) aufweist wie das erste Voxel-Modell (VM) erste Voxel (VX1) aufweist.
- 10 16. Verfahren nach Anspruch 1, wobei ein Abstandswert, der in dem Abstandssattribut des jeweiligen zweiten Voxels (VX2) gespeichert ist, um eine vorbestimmte Offsetdistanz angepasst wird und der angepasste Abstandswert (d_o) im Abstandssattribut gespeichert wird, wobei für jedes zweite Voxel (VX2), dessen angepasster Abstandswert (d_o) oberhalb des ersten vorbestimmten Schwellenwertes (d_{MAX}) liegt, der angepasste Abstandswert (d_o)
- 15 durch den vorbestimmten Abstand ($d_{\pm\infty}$) ersetzt wird.
- 20 17. Verfahren nach Anspruch 12, wobei ein Abstandswert, der in dem Abstandssattribut des jeweiligen zweiten Voxels (VX2) gespeichert ist und kein vorbestimmter Abstand ($d_{\pm\infty}$) ist, um eine vorbestimmte Offsetdistanz angepasst wird und der angepasste Abstandswert (d_o) im Abstandssattribut gespeichert wird, wobei für jedes zweite Voxel (VX2), dessen angepasster Abstandswert (d_o) oberhalb des ersten vorbestimmten Schwellenwertes (d_{MAX}) liegt, der angepasste Abstandswert (d_o) durch den vorbestimmten Abstand ($d_{\pm\infty}$) ersetzt wird.