

Indirekte Volumenvisualisierung

Christof Rezk-Salama

Visualisierung WS 03/04, 16.12.2003

computergraphik und multimedia systeme
universität siegen



Letzte Stunde

3D Strömungsvisualisierung

● Verfahren mit Integration

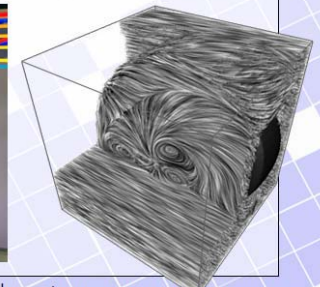
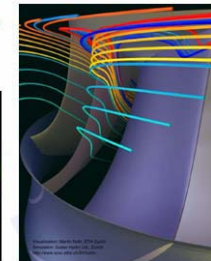
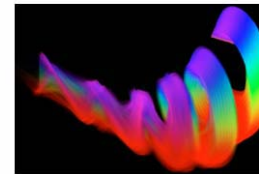
Flächenbasierte Verfahren:

3D: Stream Surfaces mit Texturen,

Time Surfaces:

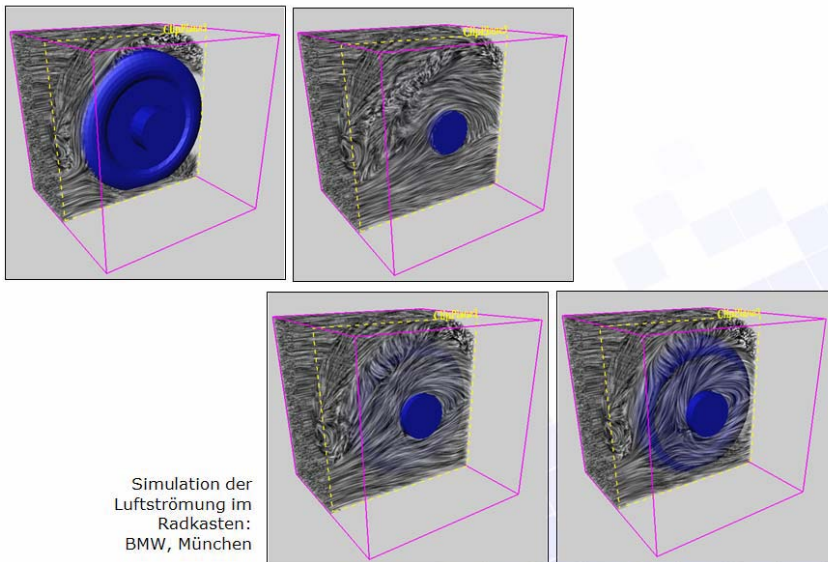
Volumenbasierte Verfahren:

3D: Volume Flow



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Volumenvisualisierung



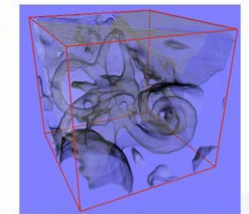
Simulation der
Luftströmung im
Radkasten:
BMW, München

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Anwendungen

Woher stammen Volumendaten?

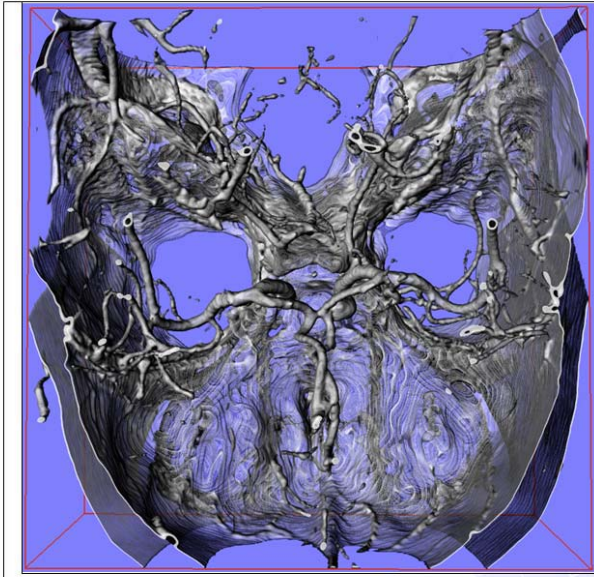
● Medizinische Bildgebung zur
Diagnose und Therapieplanung



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Anwendungen: Medizin

5



CT Human Head:
Visible Human Project,
US National Library of
Medicine, Maryland,
USA

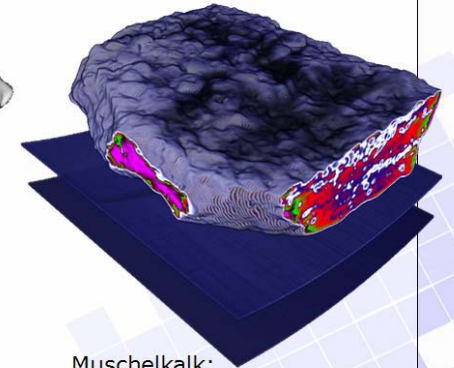
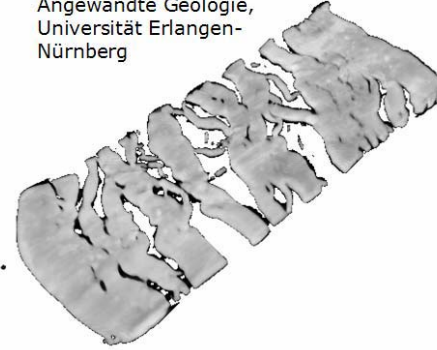
CT Angiographie:
Abt. f. Neuroradiologie
Uni-Klinik, Erlangen

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Anwendungen: Geologie

6

Deformiertes Plastilinmodell,
Angewandte Geologie,
Universität Erlangen-
Nürnberg



Muschelkalk:
Paläontologie,
Arbeitskreis Virtual
Reality, Erlangen

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Anwendungen: Archäologie

7



Helenische Statue der Isis,
3. Jh. v. Chr.
ARTIS, Antikensammlung
der Universität Erlangen-
Nürnberg



Sotades Pygmäen-Statue,
5. Jh. v. Chr.,
ARTIS, Antikensammlung
der Universität Erlangen-
Nürnberg

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Anwendungen:

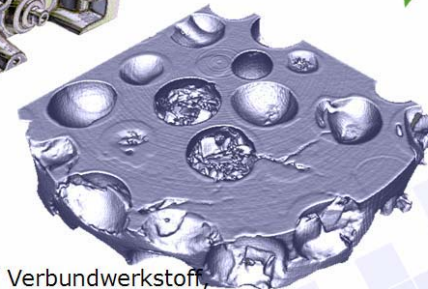
8

Werkstoffwissenschaften
Qualitätssicherung

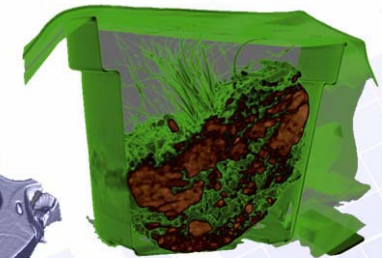


Engine Block,
General Electric

Micro CT Verbundwerkstoff,
Werkstoffwissenschaften
Universität Erlangen-Nürnberg



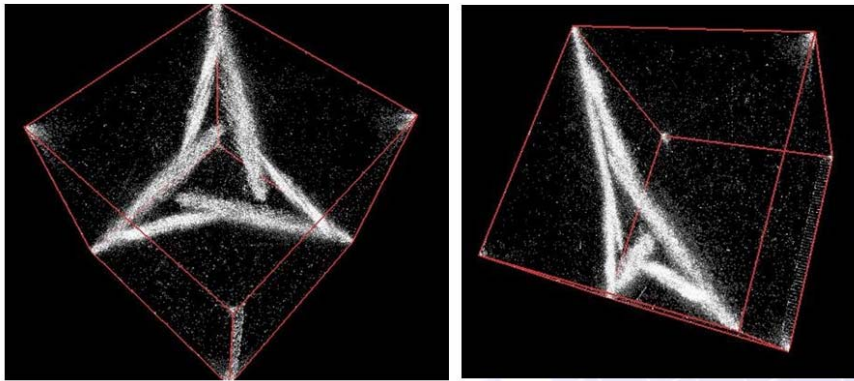
Biologie



Biologische Bodenprobe, CT,
Arbeitskreis Virtual Reality,
Universität Erlangen-Nürnberg

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

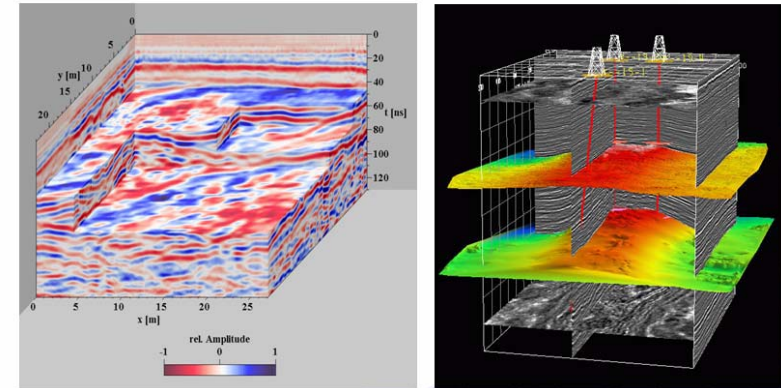
● Entropie-Visualisierung für Zufallszahlen



Entropie von Zufallszahlen-Generatoren,
Dan Kaminsky, Doxpara Research, USA,
www.doxpara.com

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

- Geoseismische Daten
- Erdölindustrie



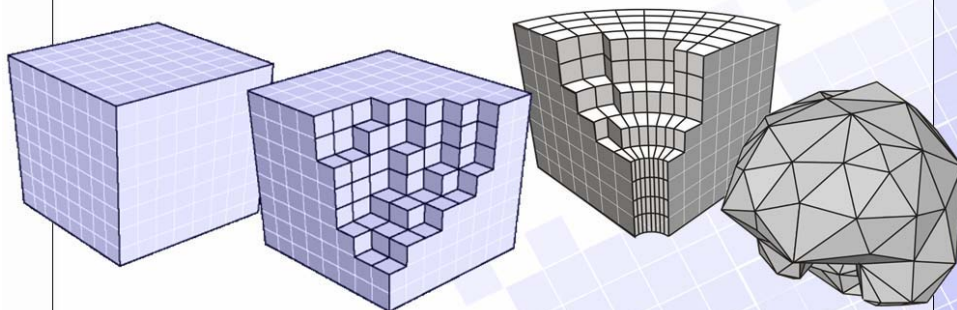
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

3D Skalarfelder

Input Daten: Kontinuierliches 3D Skalarfeld:

$$s = f(x, y, z); \quad x, y, z \in \mathbb{R}$$

abgetastet auf diskretem Gitter.



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Überblick

Volumenvisualisierung

- Indirekte Verfahren
Bestimme Oberflächen innerhalb des Skalarfeldes und stelle diese dar.
- Direkte Verfahren
Interpretiere das Skalarfeld als transparentes Medium und verwende physikalisch basierte Strahlungsberechnung.

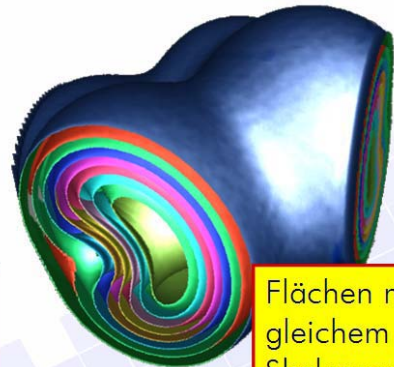
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Isoflächen

● Analog zu Isolinien:
Regionen mit gleichem Skalarwert

2D: Isolinien

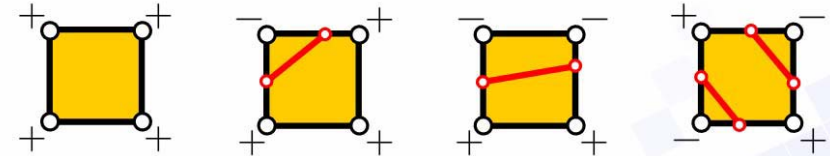
3D: Isoflächen



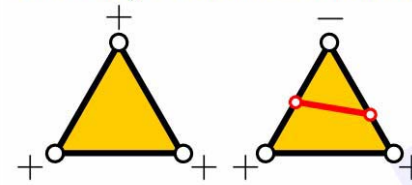
Isolinien

Sequentieller Algorithmus: Betrachte einzelne Zellen:

Rechteckige Zellen: 4 unterschiedliche Fälle:



Dreieckige Zellen: 2 unterschiedliche Fälle:



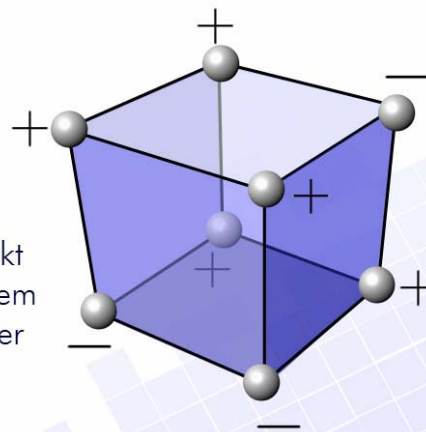
Isoflächenbestimmung

Vorgehensweise

Wähle einen Isowert

Betrachte Zellen, die aus je 8 Datenpunkten bestehen (Cubes)

Klassifiziere jeden Datenpunkt mit „+“ oder „-“, je nachdem ob der Datenwert größer oder kleiner als der Isowert ist.



Isoflächenbestimmung

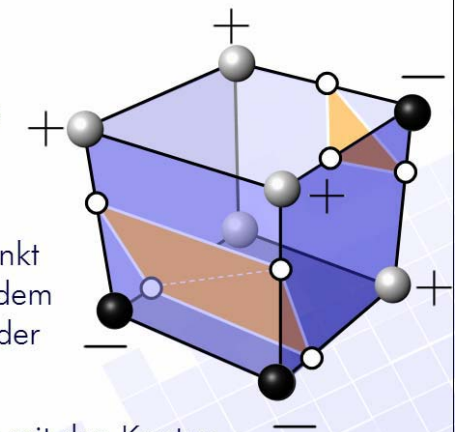
Vorgehensweise

Wähle einen Isowert

Betrachte Zellen, die aus je 8 Datenpunkten bestehen (Cubes)

Klassifiziere jeden Datenpunkt mit „+“ oder „-“, je nachdem ob der Datenwert größer oder kleiner als der Isowert ist.

Berechne die Schnittpunkte mit den Kanten
Bestimme eine Triangulierung



Isoflächenbestimmung

● Marching Cubes -Algorithmus

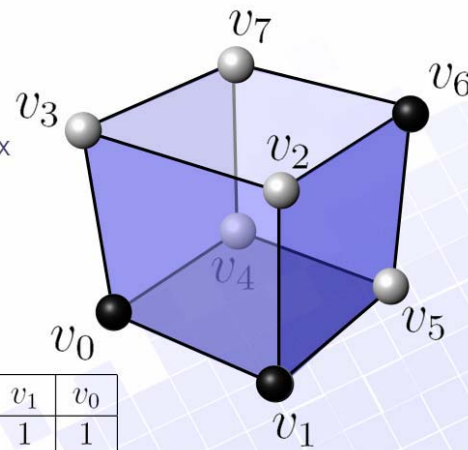
nach Bill Lorensen und Harvey Cline

Jede Zellkonfiguration hat einen bestimmten Index.

Zu einem bestimmten Index kann die *Triangulierung* in der Tabelle nachgeschaut werden.

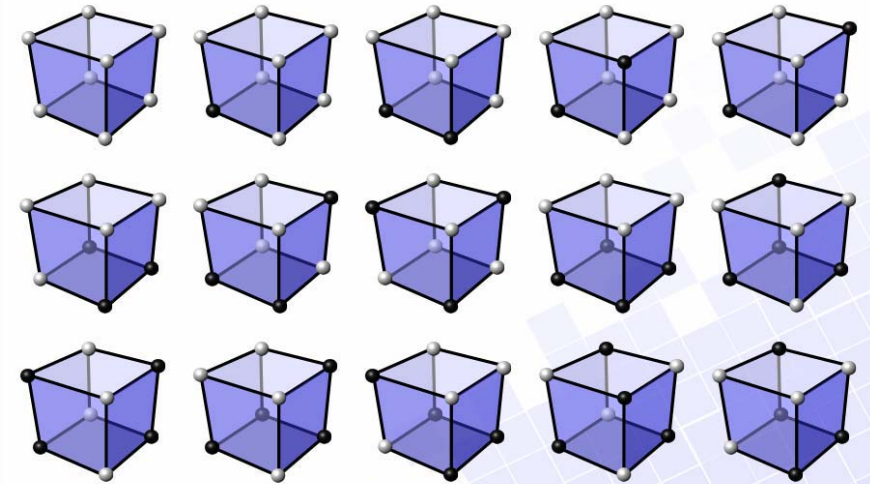
Erstelle eine Tabelle

v_7	v_6	v_5	v_4	v_3	v_2	v_1	v_0
0	1	0	0	0	0	1	1



Marching Cubes

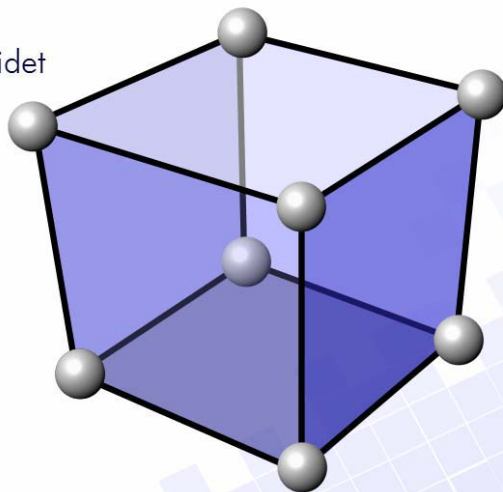
● 15 mögliche Fälle (Symmetrie, Rotation)



Marching Cubes

Fall 0

Isofläche schneidet die Zelle nicht

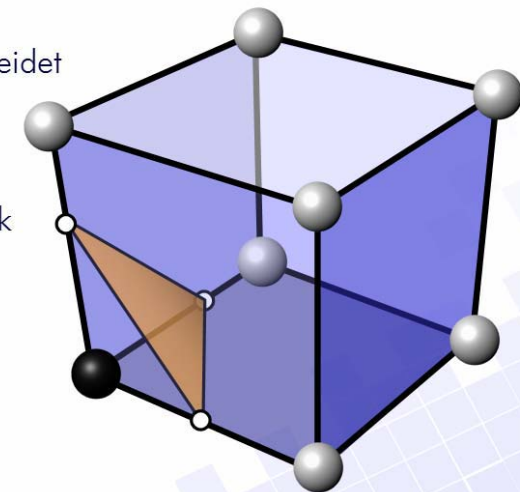


Marching Cubes

Fall 1

Isofläche schneidet 3 Kanten der Zelle

Füge 1 Dreieck ein.

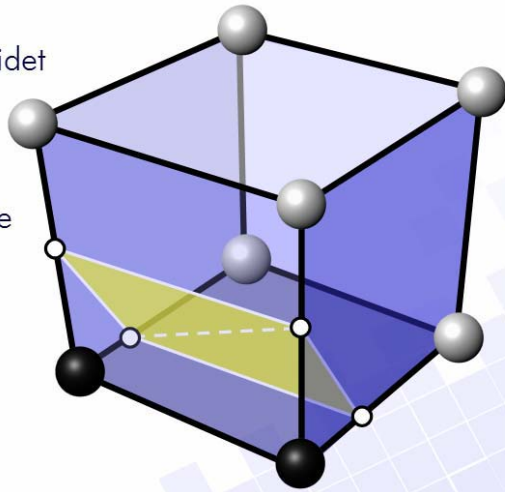


Marching Cubes

Fall 2

Isofläche schneidet
4 Kanten der
Zelle

Füge 2 Dreiecke
ein.



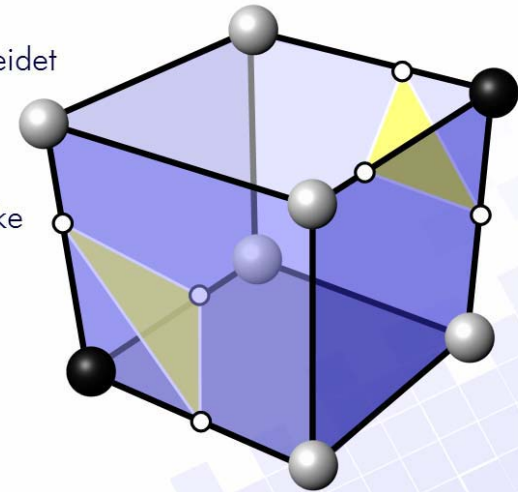
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

Fall 4

Isofläche schneidet
6 Kanten der
Zelle

Füge 2 Dreiecke
ein.



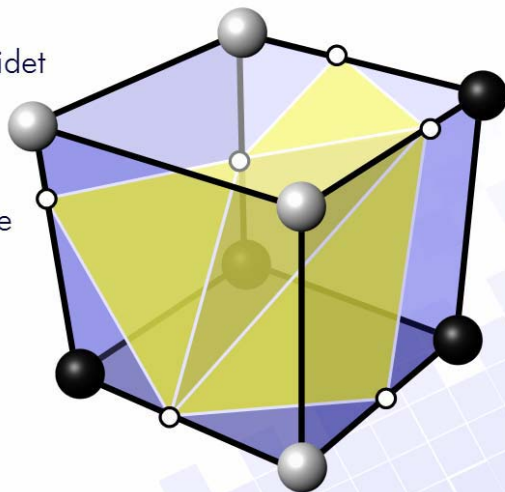
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

Fall 11

Isofläche schneidet
6 Kanten der
Zelle

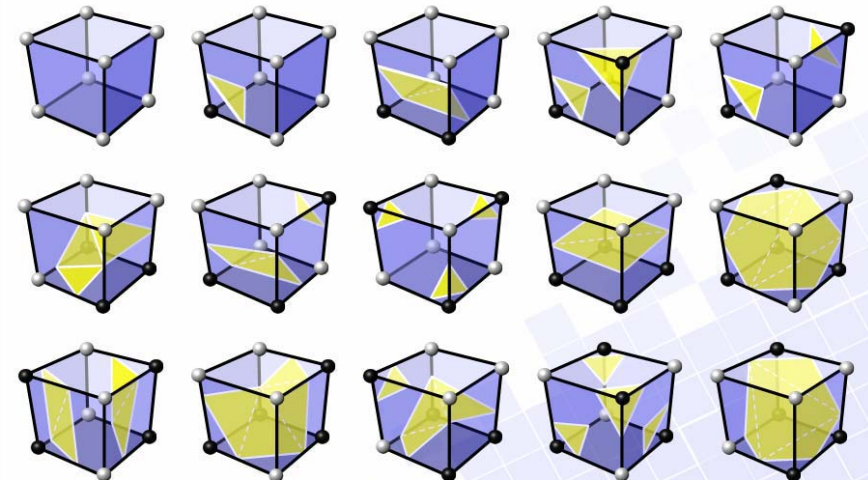
Füge 4 Dreiecke
ein.



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

● Triangulierung nach Lorensen & Cline

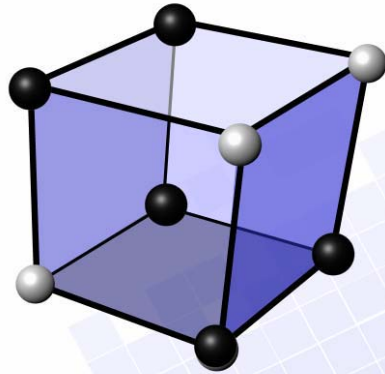


christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

23

● Triangulierung nach Lorensen & Cline



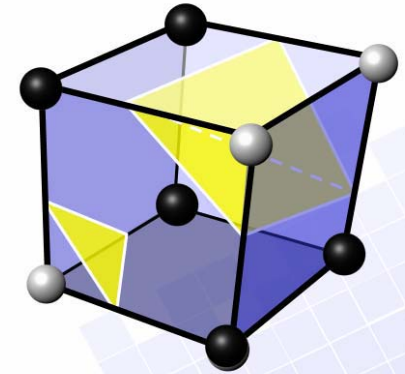
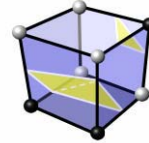
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

23

● Triangulierung nach Lorensen & Cline

Fall 6:



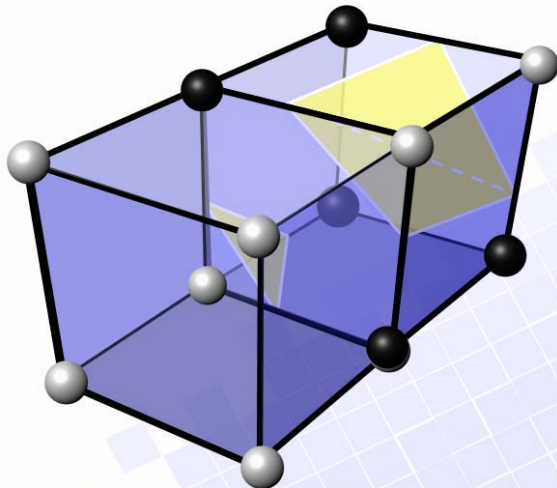
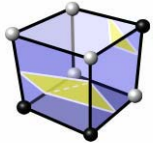
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

23

● Triangulierung nach Lorensen & Cline

Fall 6:



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

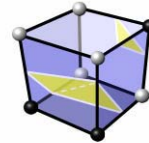
Marching Cubes

23

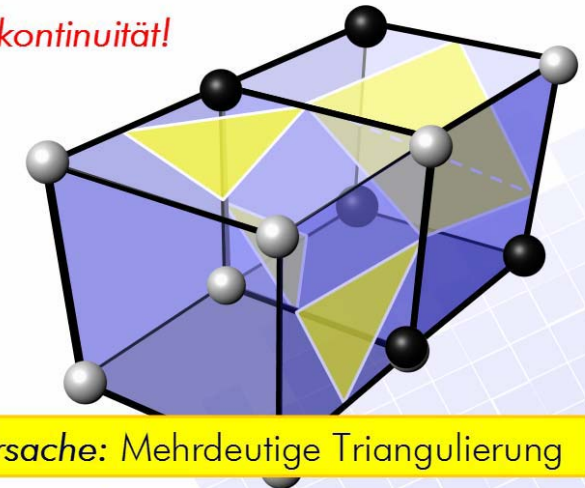
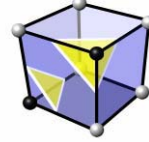
● Triangulierung nach Lorensen & Cline

Fall 6:

Diskontinuität!



Fall 3:

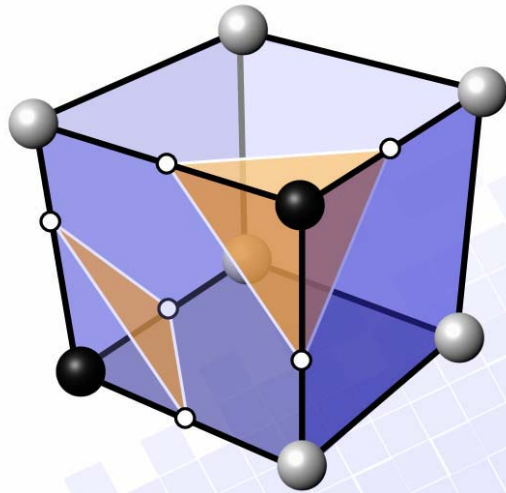


Ursache: Mehrdeutige Triangulierung

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Mehrdeutigkeiten

Fall 3

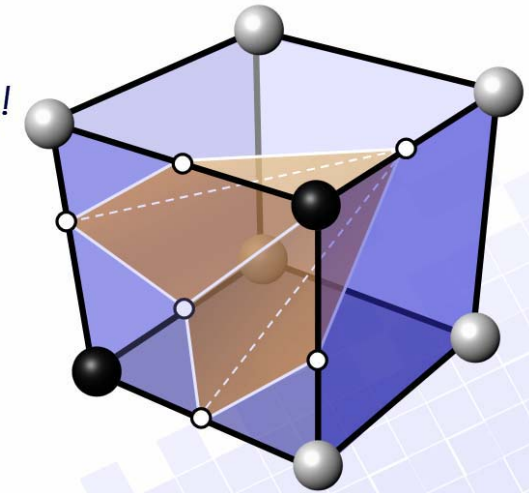


christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Mehrdeutigkeiten

Fall 3

Mehrdeutigkeit
der Triangulierung!



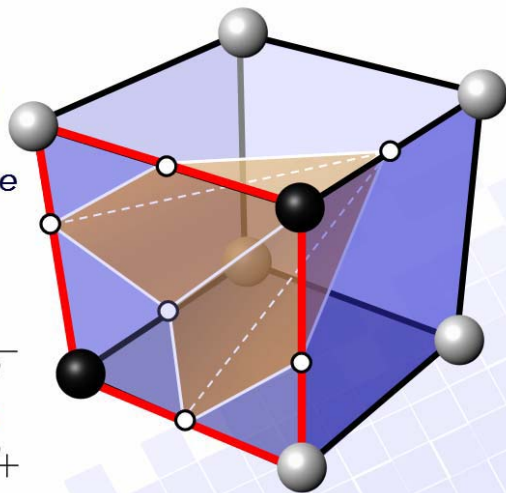
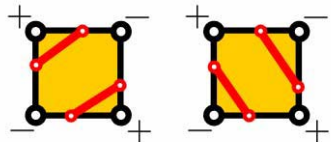
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Mehrdeutigkeiten

Fall 3

Mehrdeutigkeit
der Triangulierung!

Wie kann man diese
Mehrdeutigkeit
auflösen?

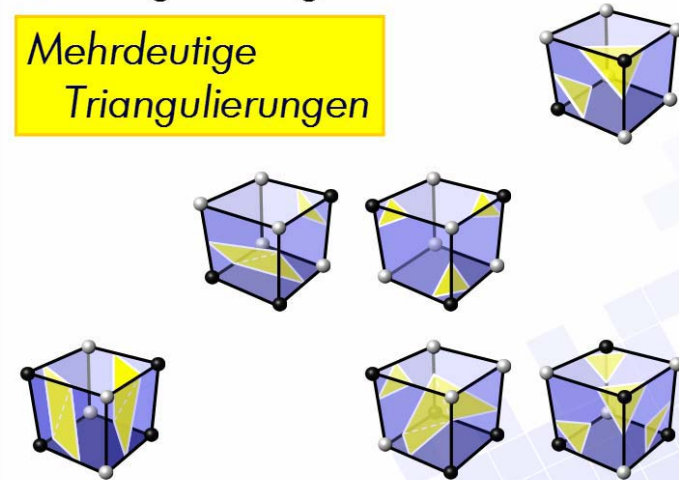


christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

● Triangulierung nach Lorensen & Cline

Mehrdeutige
Triangulierungen



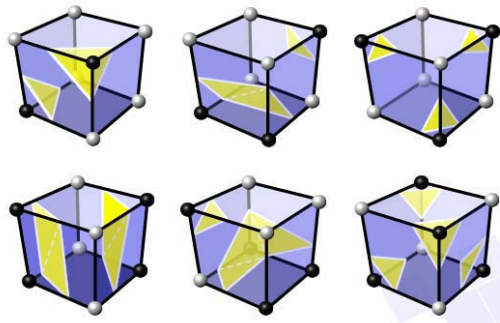
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

● Triangulierung nach *Lorensen & Cline*

Mehrdeutige Triangulierungen

Mehrdeutige Flächen:
Flächen, bei denen *jede* Kante durch die Isofläche geschnitten wird.

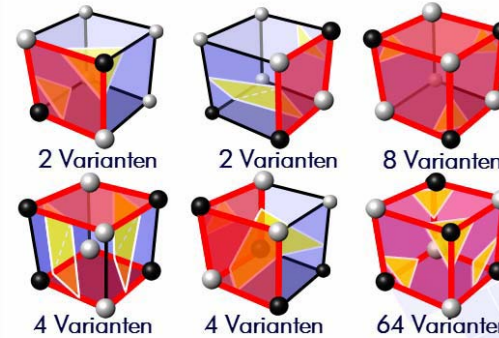


Marching Cubes

● Triangulierung nach *Lorensen & Cline*

Mehrdeutige Triangulierungen

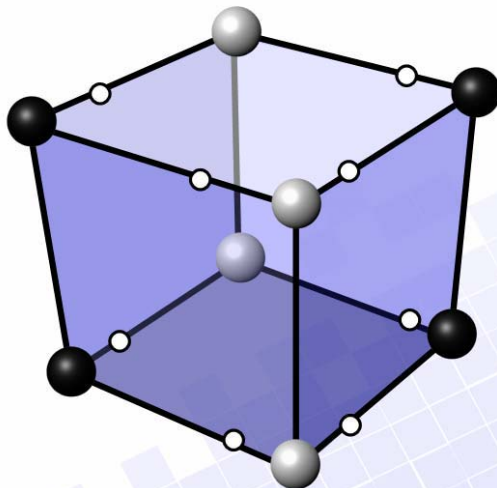
Mehrdeutige Flächen:
Flächen, bei denen *jede* Kante durch die Isofläche geschnitten wird.



Die Anzahl der mehrdeutigen Flächen einer Zelle bestimmt die Anzahl der möglichen Triangulierungs-Varianten

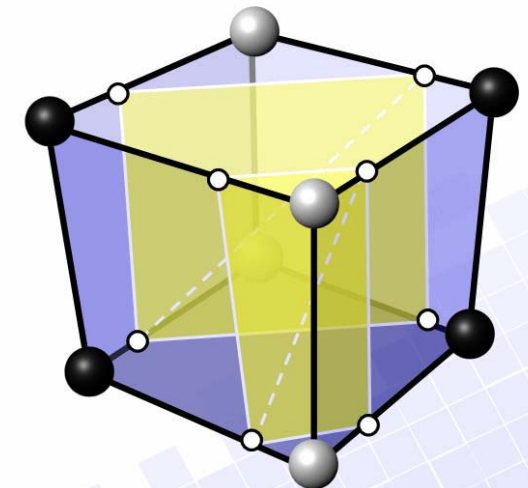
Marching Cubes

Beispiel: Fall 10 mit Mehrdeutigkeit



Marching Cubes

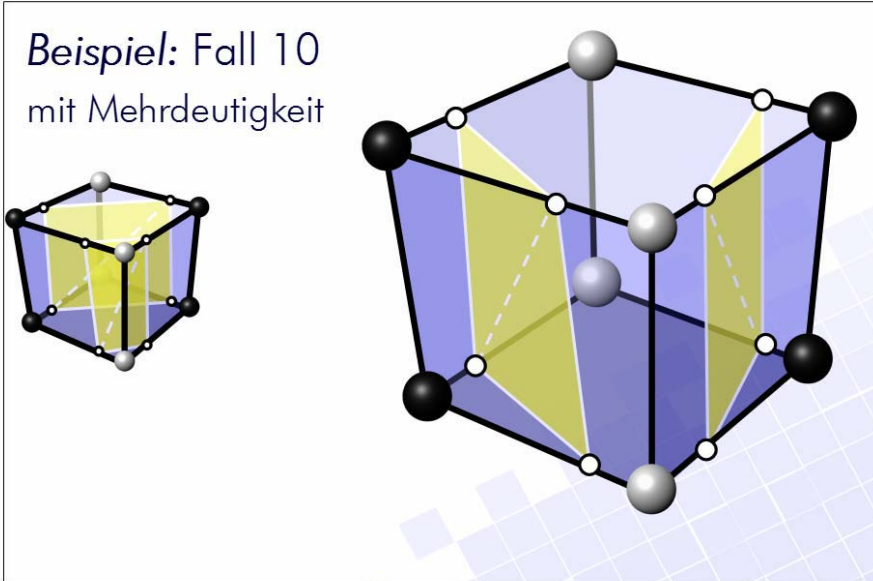
Beispiel: Fall 10 mit Mehrdeutigkeit



Marching Cubes

27

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit

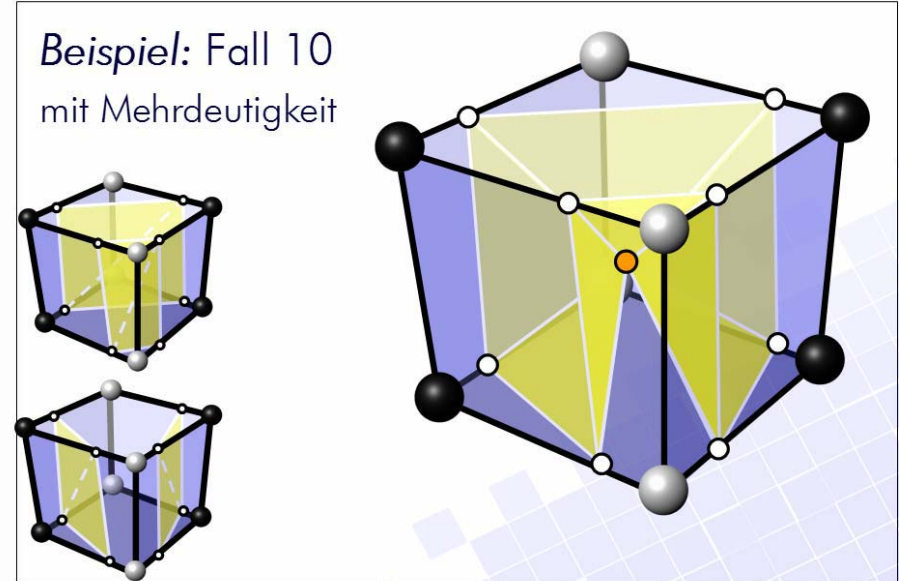


christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

28

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit

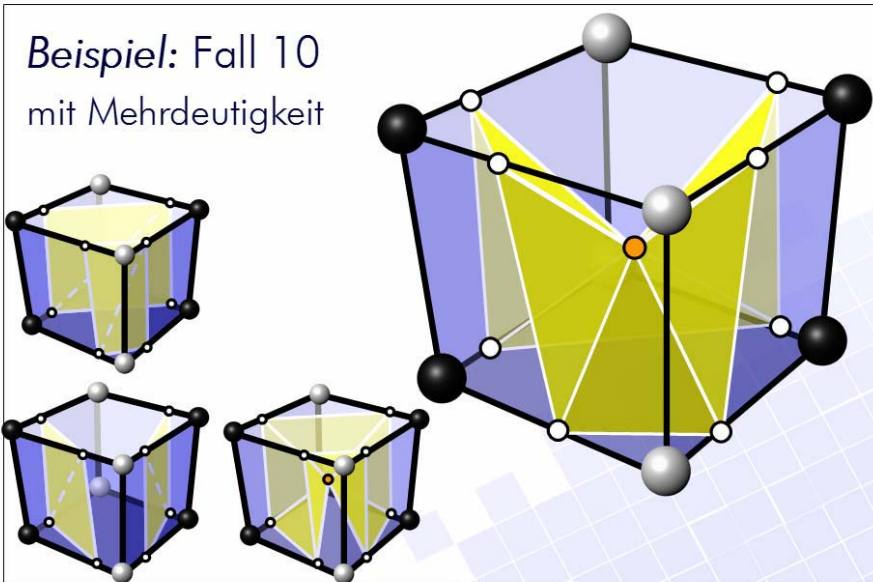


christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

29

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

30

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit



Allgemeine Vorgehensweise:

Betrachte mehrdeutige Flächen

Verwende *2D Decider* zur
Entscheidung der Schnitt-
Kanten

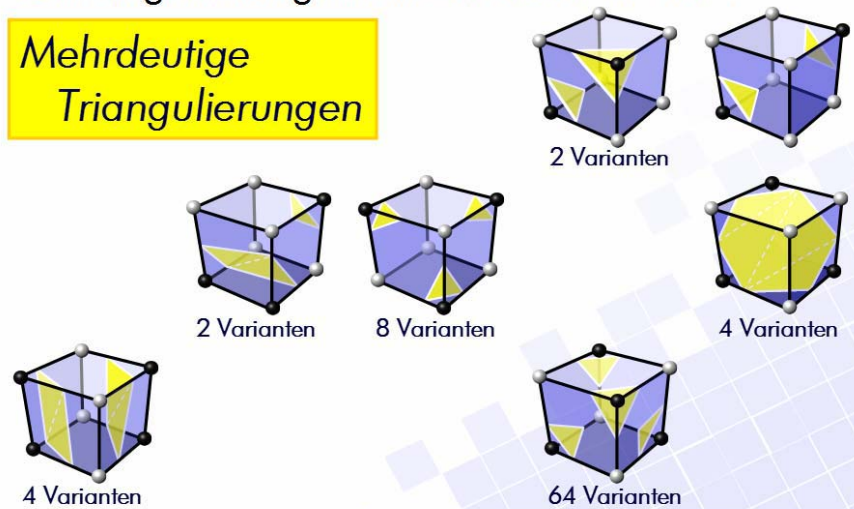
Tesselliere (Trianguliere) die
entstehende(n) Randkurve(n)
(Füge dazu evtl. zusätzliche
Vertices ein.)

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Marching Cubes

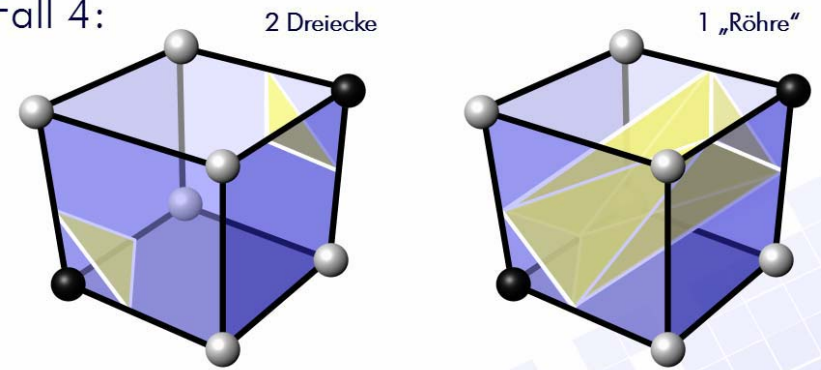
Triangulierung nach Lorensen & Cline

Mehrdeutige
Triangulierungen



Marching Cubes

Fall 4:



In diesem Fall liegt eine *Mehrdeutigkeit der Zelle* vor, keine Mehrdeutigkeit der Fläche.
Es entsteht hier keine *Diskontinuität der Gesamfläche*.

Marching Cubes

Für jede Zelle: Bestimme den Index der Zelle
(aus den Vorzeichen „+“ und „-“ der Vertices)

Eindeutige Zelle

Mehrdeutige Zelle

Die Tabelle enthält direkt eine Liste der Kanten/Dreiecke für die Triangulierung der Zelle.

Die Tabelle enthält eine Liste mehrdeutiger Flächen.

Für diese Flächen werden Entscheidungen für die Kanten getroffen.
(Midpoint/Asymptotic Decider)

Bestimme Sub-Index.

Beispiel: 2 Mehrdeutige Flächen:
00: Mitte negativ in beiden Flächen
10: Mitte positiv in erster Fläche
01: Mitte positiv in zweiter Fläche
11: Mitte positiv in beiden Flächen

Marching Cubes

Für jede Zelle: Bestimme den Index der Zelle
(aus den Vorzeichen „+“ und „-“ der Vertices)

Eindeutige Zelle

Mehrdeutige Zelle

Die Tabelle enthält direkt eine Liste der Kanten/Dreiecke für die Triangulierung der Zelle.

Die Tabelle enthält eine Liste mehrdeutiger Flächen.

Für diese Flächen werden Entscheidungen für die Kanten getroffen.
(Midpoint/Asymptotic Decider)

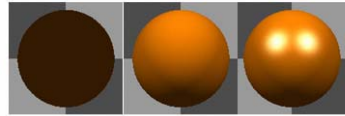
Bestimme Sub-Index.

Eine Sub-Tabelle enthält die Kanten/Dreiecke für die einzelnen Varianten.

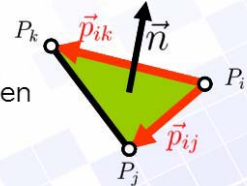
Marching Cubes

Ergänzungen:

Die extrahierten Oberflächen sollen später *beleuchtet* dargestellt werden. Dazu werden die *Normalenvektoren* der Oberfläche benötigt.



Methode 1: Bestimme zuerst die Isofläche und berechne anschließend die Normalen des entstandenen Dreiecksnetzes (per Face oder per Vertex)



Methode 2 (genauer): Berechne während der Generierung der Isofläche für jeden Vertex den *Gradientenvektor* des Skalarfeldes. (Zentr. Differenzen + Interpolation)

Marching Cubes

Schwachpunkte bei Marching Cubes:

- Es entstehen sehr viele kleine Dreiecke.
- Relativ lange Berechnungszeiten.

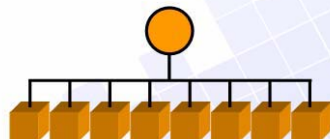
30–70 % der Rechenzeit wird bei der Bearbeitung von *leeren Zellen* benötigt.

Beschleunigungsverfahren:

Techniken, die es erlauben, große Bereiche im Skalarfeld, die von der Isofläche nicht geschnitten werden, gleich zu überspringen.

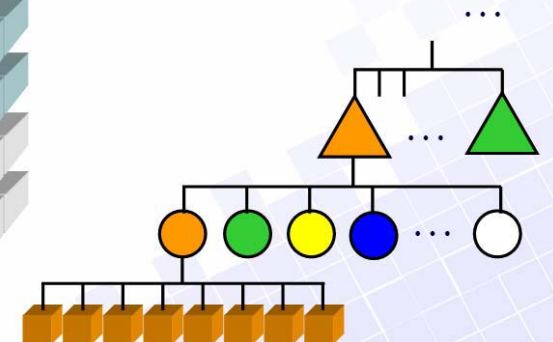
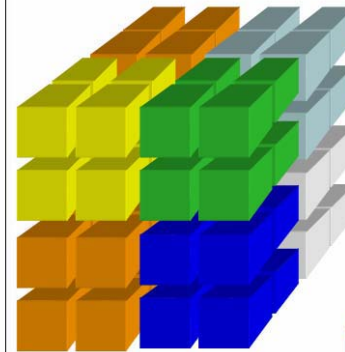
Beschleunigung

- **Idee:** Verwende eine Baum-Hierarchie (Octree), Fasse 8 Zellen zu einem Block zusammen



Beschleunigung

- **Idee:** Verwende eine Baum-Hierarchie (Octree), Fasse 8 Zellen zu einem Block zusammen Fasse 8 Blöcke zu einem neuen Block zusammen

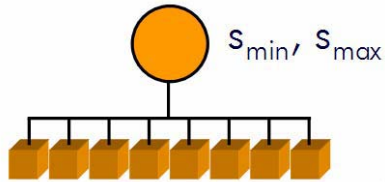


Octree-Verfahren

Beschleunigte Isoflächenberechnung:

Vorbereitung

Speichere in jedem Knoten den *minimalen* und *maximalen Skalarwert* seiner Kinder.



Isoflächenbestimmung

Traversiere den Baum (top-down) für einen bestimmten Isowert *s*.

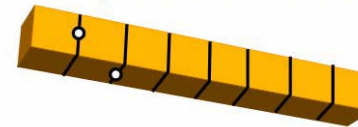
Knoten mit $s < s_{min}$ oder $s > s_{max}$ können sofort übersprungen werden.

Octree-Verfahren

Problematik: keine sequentielle Abarbeitung der Zellen mehr.

Wiederverwendbarkeit der berechneten Schnittpunkte (Position und Gradient)

Bei sequentieller Abarbeitung ist das kein Problem:



Bei sequentieller Reihenfolge, weiß ich genau wann eine bestimmte Zelle bearbeitet wird.

Bei jedem Schnittpunkt, den ich berechne, weiß ich sofort ob und wann er wieder gebraucht wird.

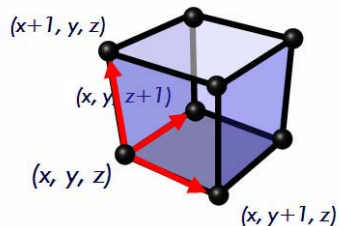
Bei Abarbeitung in beliebiger Reihenfolge müssen alle Schnittpunkte gespeichert werden.



Hashing-Tabelle

Beispiel einer Hashing Tabelle für Kantenschnittpunkte.
Datenpunkte werden in einem linearen Array gespeichert.

Schlüssel einer Kante:



Die Kante geht von einem Punkt (x, y, z) in eine der positiven Koordinatenrichtungen

offset: Index des Datenpunkts (x, y, z)

direction-code:
1 für x, 2 für y, 3 für z

$$\text{edge_key} = 4 * \text{offset} + \text{direction_code}$$

Hashing-Tabelle

Beispiel einer Hashing-Funktion:

Größe der Hashing-Tabelle für ein Volumen der Größe *N*:

$$F = 8 \cdot \sqrt{N}$$


Für die Schlüssel *K* der Kanten gilt:

$$K < 8 F^2$$

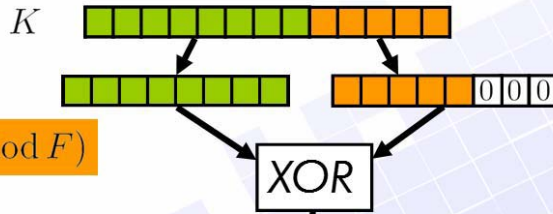
Hashing-Tabelle

Beispiel einer Hashing-Funktion:

Größe der Hashing-Tabelle für ein Volumen der Größe N :

$$F = 8 \cdot \sqrt{N}$$


Für die Schlüssel K der Kanten gilt: $K < 8 F^2$



Hash-Index:

$$(K/F) \oplus 8(K \bmod F)$$

Kollision:

Rehashing mit $(hash_index+1)$ $hash_index$

Marching Tetrahedra

● Gleicher Ansatz für Tetraeder statt Hexaeder

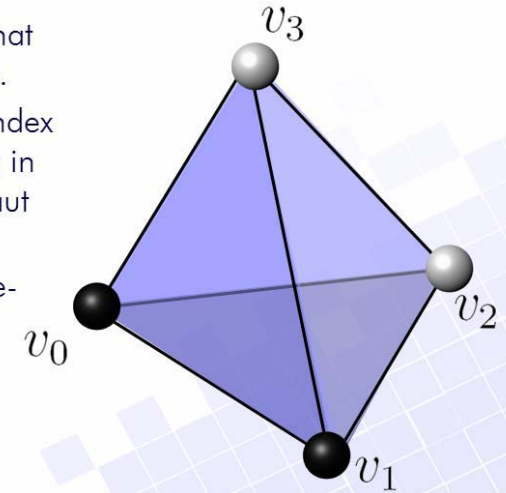
Jede Zellkonfiguration hat einen bestimmten Index.

Zu einem bestimmten Index kann die *Triangulierung* in der Tabelle nachgeschaut werden.

Es gibt $2^4 = 16$ verschiedene Möglichkeiten.

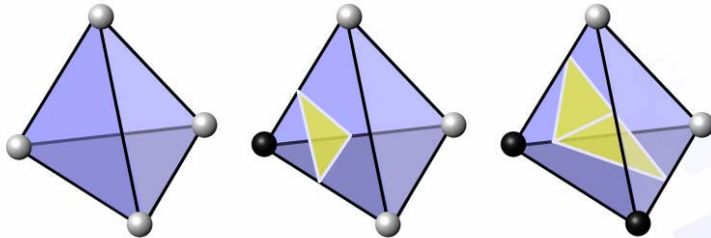
Erstelle eine Tabelle

v_3	v_2	v_1	v_0
0	0	1	1



Marching Tetrahedra

● 3 mögliche Fälle (Symmetrie, Rotation)



● keine mehrdeutigkeiten Flächen

● keine mehrdeutigen Zellen

Literatur

● *Marching Cubes:*

W. Lorensen and H. Cline.

Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm.

Computer Graphics, 21(4):163-169, July 1987.

A. van Gelder and J. Wilhelms.

Topological Considerations in Isosurface Generation.

ACM Transactions on Graphics, 13(4):337-375, October 1994.

J. Wilhelms and A. van Gelder.

Octrees for Faster Isosurface Generation.

ACM Transactions on Graphics, 11(3): 201-227, July 1992

● Weiterführende Literatur:

K. Engel, R. Westermann, T. Ertl.
Isosurface Extraction Techniques for Web-Based Volume Visualization.
Proc. IEEE Visualization 1999

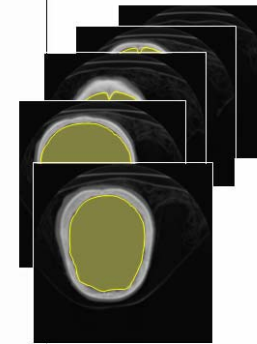
C. Montani, R. Scateni, R. Scopigno.
Discretized Marching Cubes.
Proc. IEEE Visualization 1994

R. Shekhar, E. Fayyad, R. Yagel, F. Cornhill.
Octree-Based Decimation of Marching Cubes Surfaces.
Proc. IEEE Visualization 1996

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

In vielen Anwendungsfällen soll aus dem Volumendatensatz eine Oberfläche extrahiert werden, die *keine Isofläche* ist.

● Konturbasierte Segmentierung:



Ein bestimmtes im Datensatz enthaltenes Objekt (z.B. das Gehirn) soll dargestellt werden.

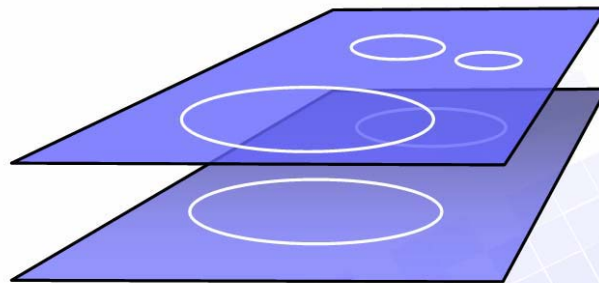
Ein Segmentierungsverfahren liefert für jedes Schichtbild die Kontur des Objekts.

Aus diesen Konturlinien soll die Oberfläche des Objekts rekonstruiert werden.

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

● Surface from Contours:

3 verschiedene Probleme zu sind zu lösen:

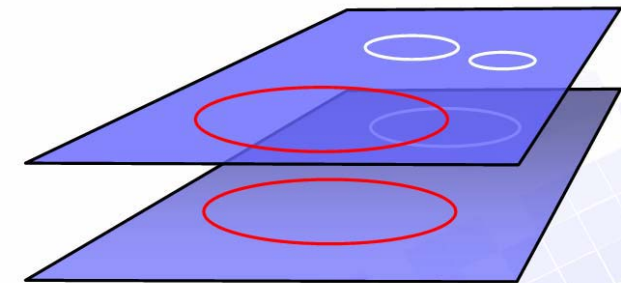


1. **Korrespondenz:** Welche Konturen in einer Schicht gehören zu welchen Konturen in der nächsten Schicht?

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

● Surface from Contours:

3 verschiedene Probleme zu sind zu lösen:



Wenn zwei korrespondierende Konturen gefunden wurden:

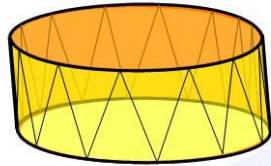
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Oberflächenrekonstruktion

47

● Surface from Contours:

3 verschiedene Probleme zu sind zu lösen:



Wenn zwei korrespondierende Konturen gefunden wurden:

2. Tiling: Wie konstruiere ich die Mantelfläche zwischen den Konturen?

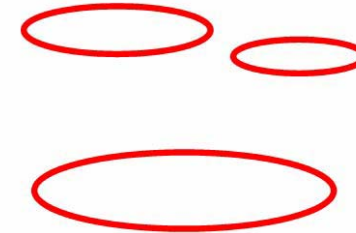
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Oberflächenrekonstruktion

48

● Surface from Contours:

3 verschiedene Probleme zu sind zu lösen:



Wenn eine Kontur zwei Konturen in der nächsten Schicht entspricht:

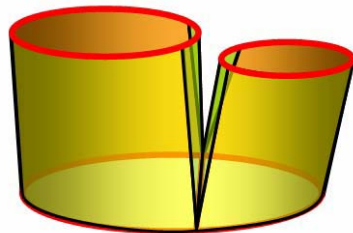
christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Oberflächenrekonstruktion

48

● Surface from Contours:

3 verschiedene Probleme zu sind zu lösen:



Wenn eine Kontur zwei Konturen in der nächsten Schicht entspricht:

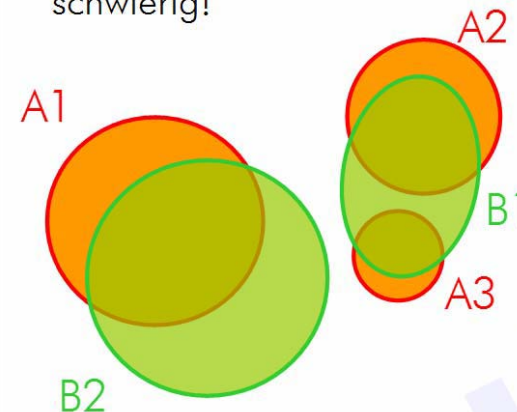
3. Branching: Wie konstruiere ich die Mantelfläche im Falle einer Verzweigung?

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Korrespondenz

49

● Automatische Lösung des Problems ist sehr schwierig!



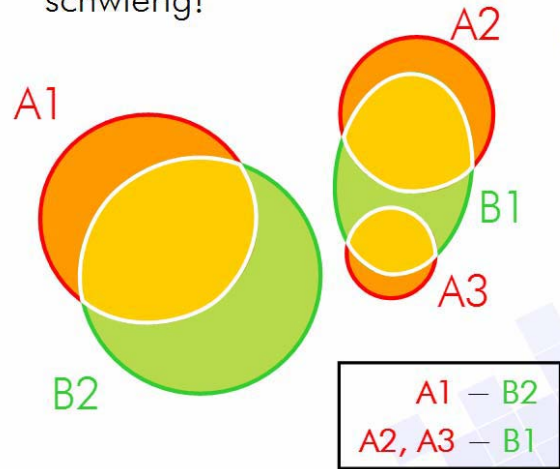
Einfache Methode:

- Überlagere die Konturen aus beiden Schichten und bestimme die Überlappungen.

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Korrespondenz

- Automatische Lösung des Problems ist sehr schwierig!



Einfache Methode:

- Überlagere die Konturen aus beiden Schichten und bestimme die Überlappungen.
- Überlappende Kurven werden miteinander verbunden (im Tiling-Schritt)

Korrespondenz

- Reale Probleme sind schwieriger und sehr stark abhängig von der Auflösung der Daten.

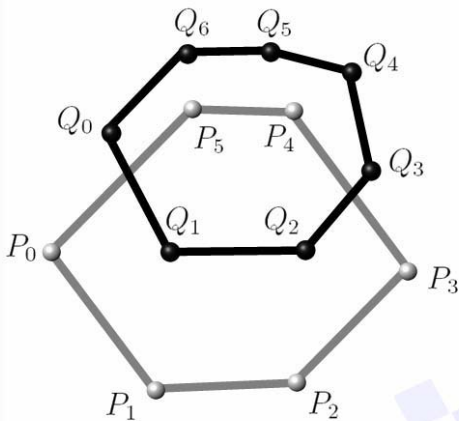
Problematik:



- Unterschiedliche Lösungsansätze in der Literatur
- Offt auch mit Benutzerinteraktion

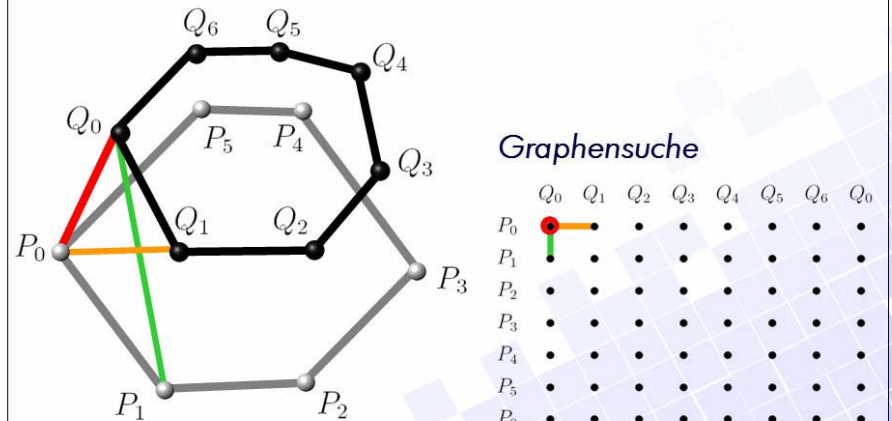
Tiling

- Finde die Triangulierung der Mantelfläche, die die Summe der Kantenlängen minimiert.



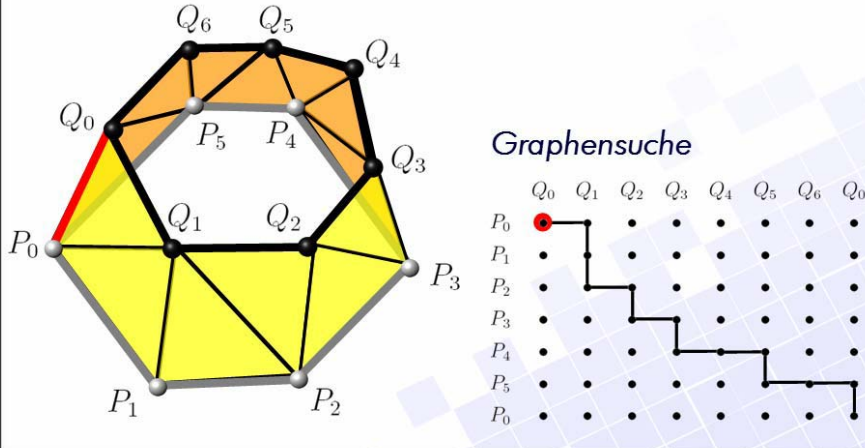
Tiling

- Finde die Triangulierung der Mantelfläche, die die Summe der Kantenlängen minimiert.



Tiling

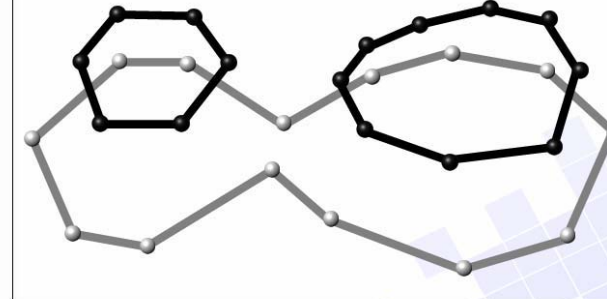
- Finde die Triangulierung der Mantelfläche, die die Summe der Kantenlängen minimiert.



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Branching

- Wie konstruiere ich die Mantelfläche bei Verzweigungen?

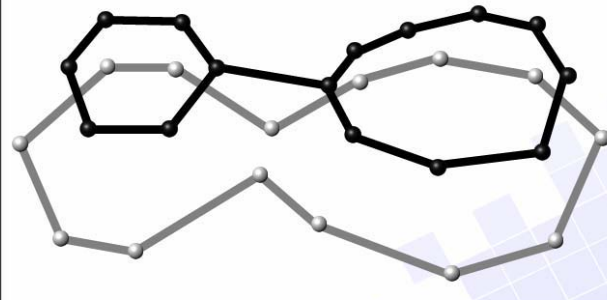


christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Branching

- Wie konstruiere ich die Mantelfläche bei Verzweigungen?

Einfache Methode:
Verbinde die getrennten Konturen durch eine „virtuelle“ Verbindungskante (Verdoppelung der Vertices)

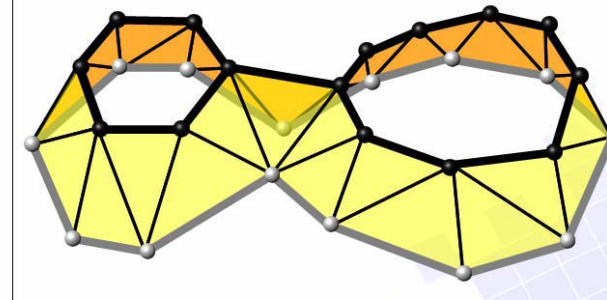


christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Branching

- Wie konstruiere ich die Mantelfläche bei Verzweigungen?

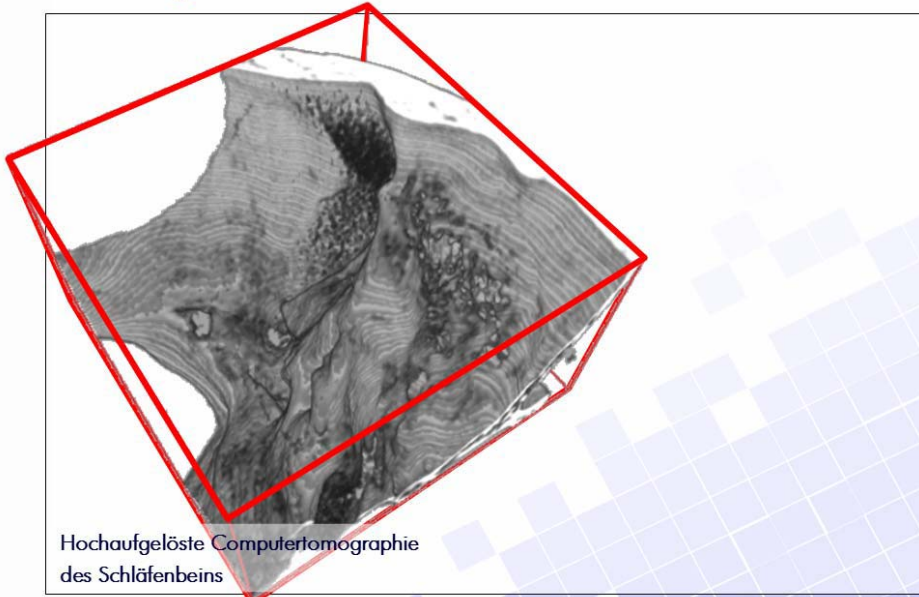
Einfache Methode:
Verbinde die getrennten Konturen durch eine „virtuelle“ Verbindungskante (Verdoppelung der Vertices)



Führe Tiling auf der erweiterten Kontur durch

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

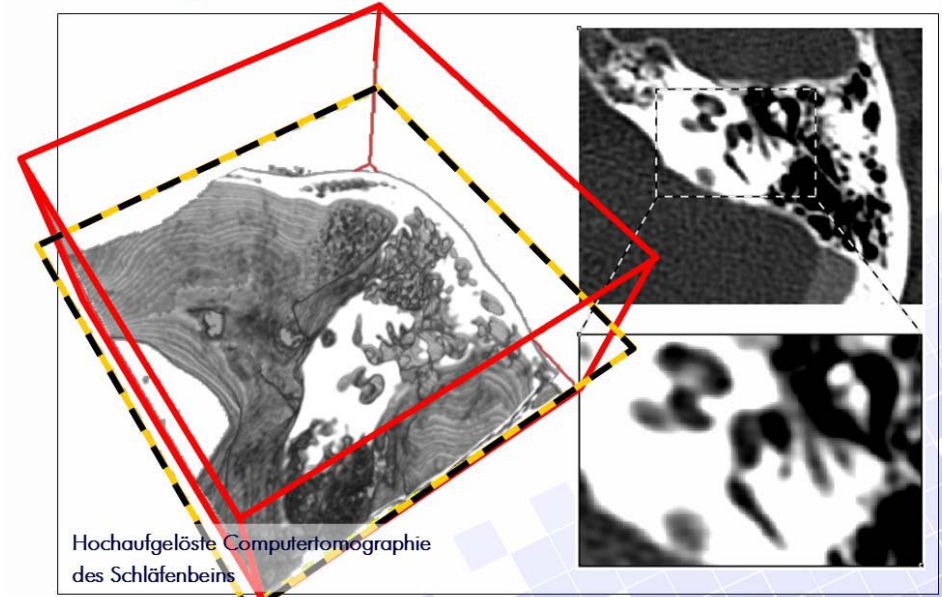
Beispiel



Hochaufgelöste Computertomographie des Schläfenbeins

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

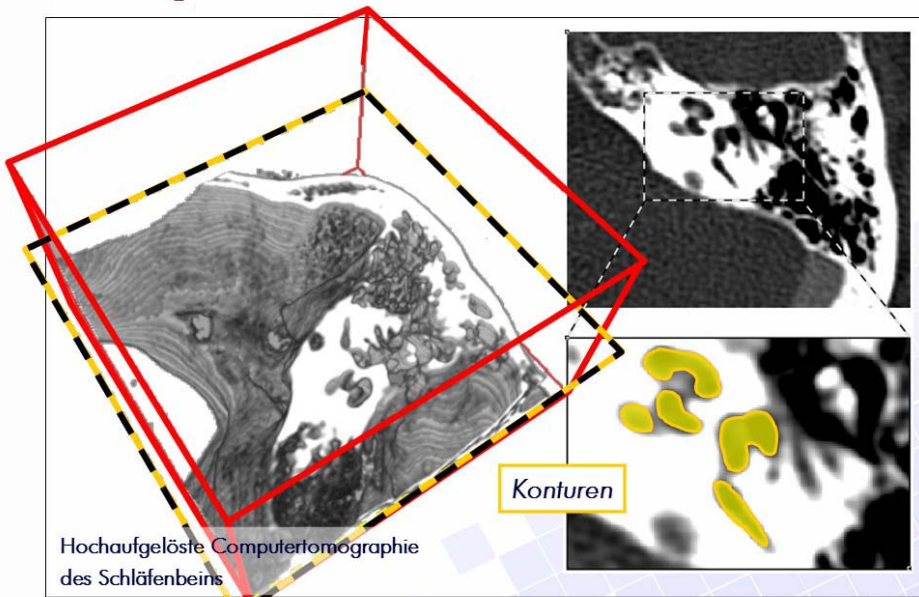
Beispiel



Hochaufgelöste Computertomographie des Schläfenbeins

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

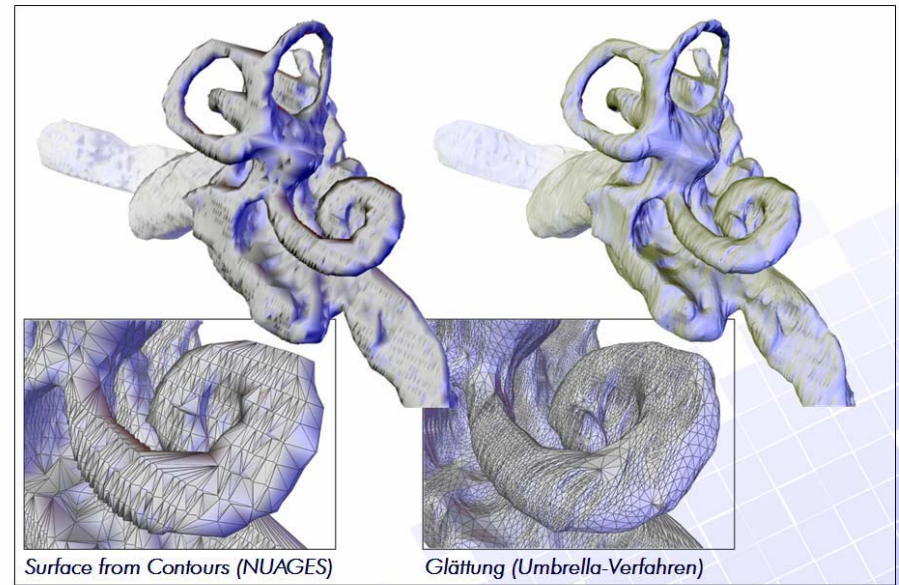
Beispiel



Hochaufgelöste Computertomographie des Schläfenbeins

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Beispiel:



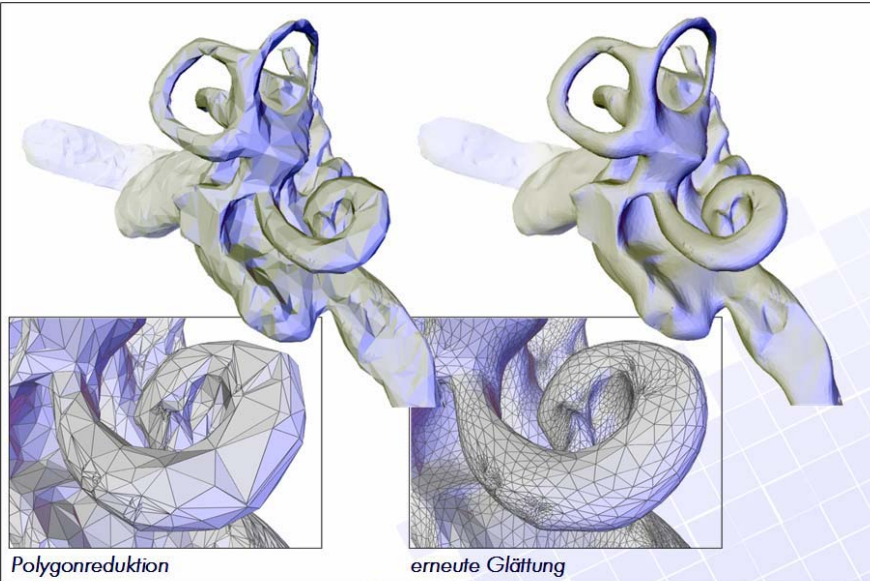
Surface from Contours (NUAGES)

Glättung (Umbrella-Verfahren)

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Beispiel:

55



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

Literatur

56

● Oberflächenrekonstruktion aus Kontur:

D. Meyers and S. Skinner.

Surface from Contours.

ACM Transactions on Graphics, Vol.11, No.3, July 1992, pp 201-227

Bernhard Geiger and J. Boissonnat

Three dimensional reconstruction of complex shapes based on the Delaunay triangulation

Technical Report 1607, INRIA, France, 1992

Rekonstruktions-Software NUAGES:

<http://www-sop.inria.fr/prisme/logiciel/nuages.html.en>

christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

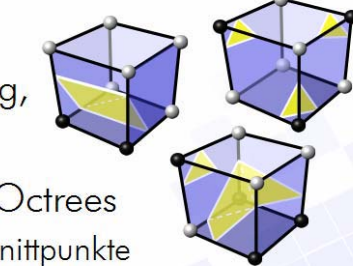
Zusammenfassung

57

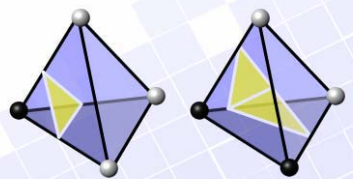
Indirekte Volumenvisualisierung

● Marching Cubes

- Tabellen, Triangulierung,
- Mehrdeutige Fälle
- Beschleunigung durch Octrees
 - Hashing-Tabelle für Schnittpunkte



● Marching Tetrahedra



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

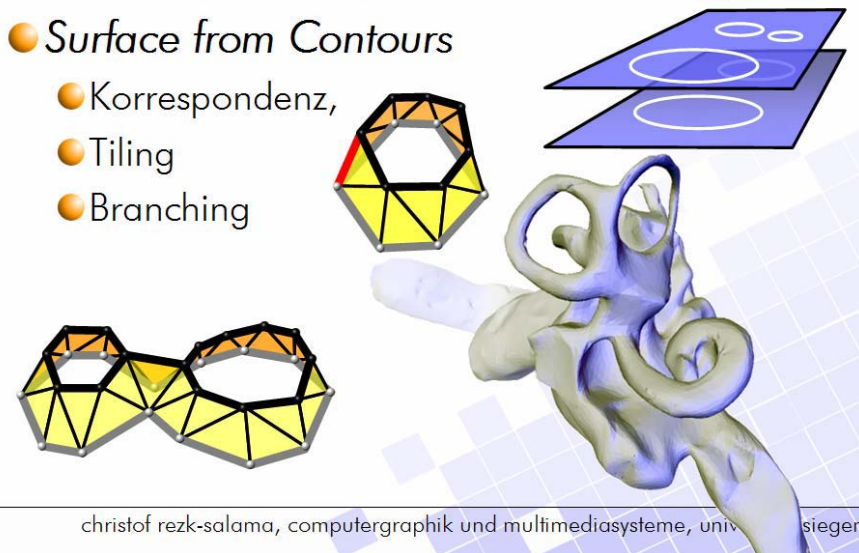
Zusammenfassung

58

Indirekte Volumenvisualisierung

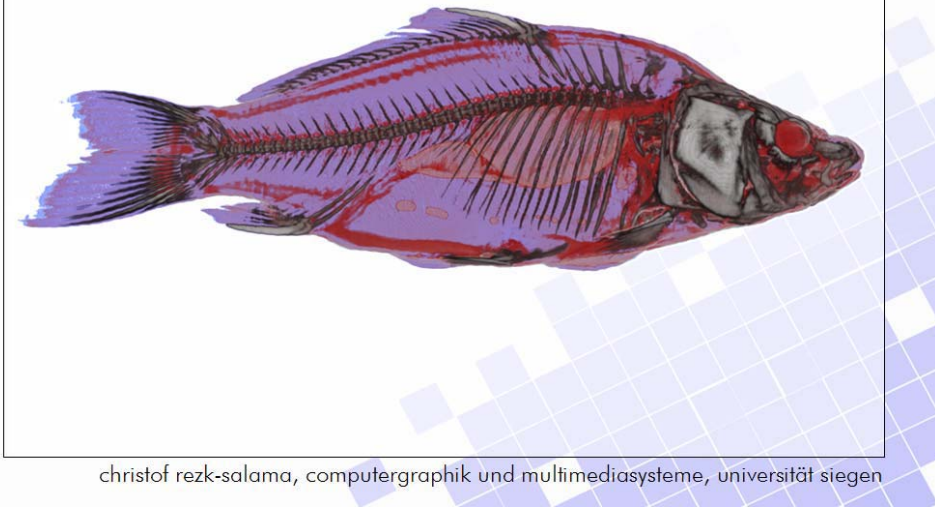
● Surface from Contours

- Korrespondenz,
- Tiling
- Branching



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen

- Direkte Volumenvisualisierung
Standardverfahren



christof rezk-salama, computergraphik und multimediasysteme, universität siegen