

Indirekte Volumenvisualisierung

Andreas Kolb und Martin Lambers

computergraphik und multimedia systeme
universität siegen



Letzte Stunde

2

3D Strömungsvisualisierung

Verfahren mit Integration

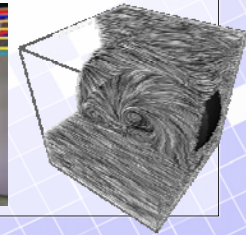
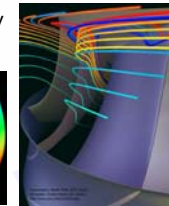
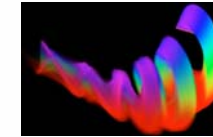
Flächenbasierte Verfahren:

3D: Stream Surfaces mit Texturen,

Time Surfaces:

Volumenbasierte Verfahren:

3D: Volume Flow

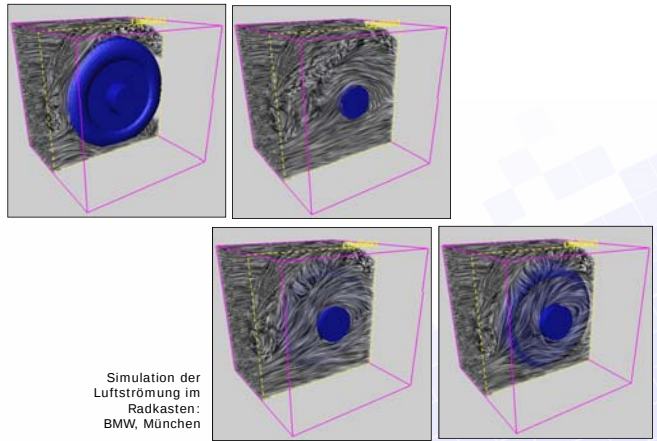


Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Volumenvisualisierung

3



Simulation der
Luftströmung im
Radkasten:
BMW, München

Andreas Kolb, Martin Lambers

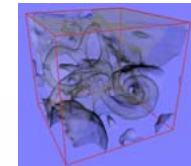
Visualisierung

Anwendungen

4

Woher stammen Volumendaten?

- Medizinische Bildgebung zur Diagnose und Therapieplanung

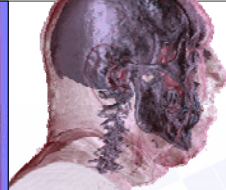
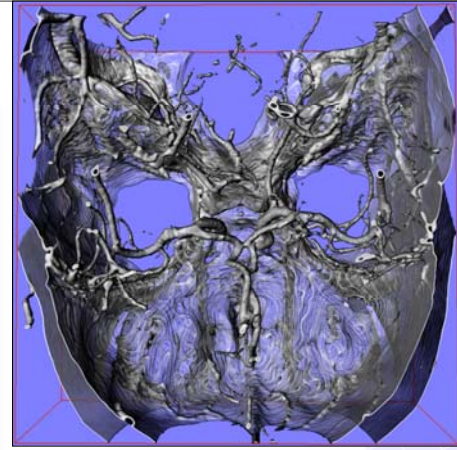


Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Anwendungen: Medizin

5



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

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

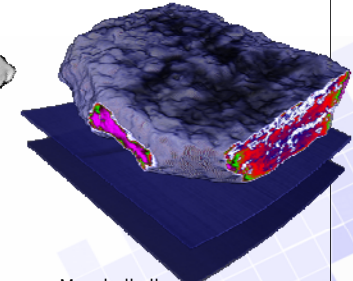
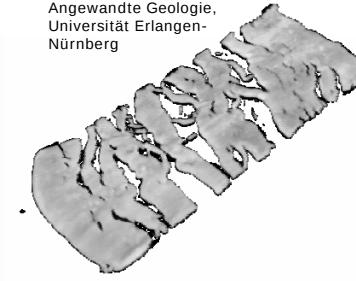
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Anwendungen: Geologie

6

Deformiertes Plastilinmodell,
Angewandte Geologie,
Universität Erlangen-
Nürnberg



Muschelkalk:
Paläontologie,
Arbeitskreis Virtual
Reality, Erlangen

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

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

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Anwendungen:

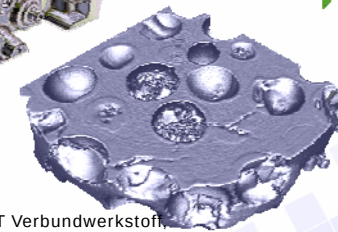
8

Werkstoffwissenschaften
Qualitätssicherung

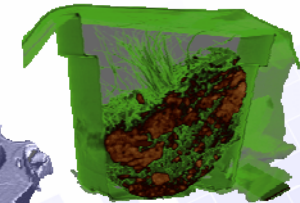
Biologie



Engine Block,
General Electric



Micro CT Verbundwerkstoff,
Werkstoffwissenschaften
Universität Erlangen-Nürnberg



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

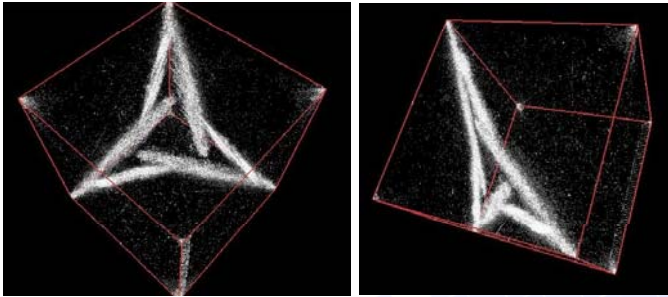
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Anwendungen: Informatik

9

● Entropie-Visualisierung für Zufallszahlen



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

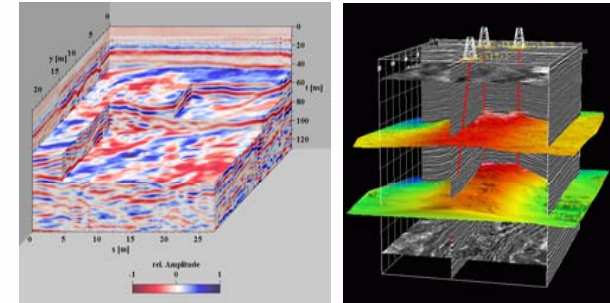
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Anwendungen

10

- Geoseismische Daten
- Erdölindustrie



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

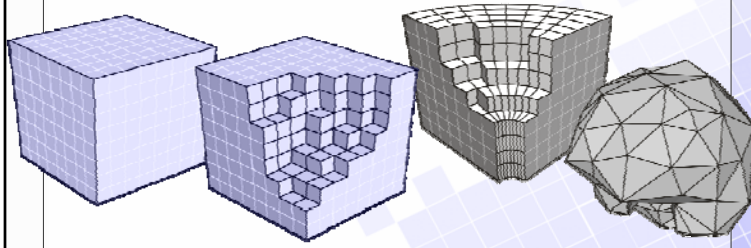
3D Skalarfelder

11

Input Daten: Kontinuierliches 3D Skalarfeld:

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

abgetastet auf diskretem Gitter.



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Überblick

12

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.

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

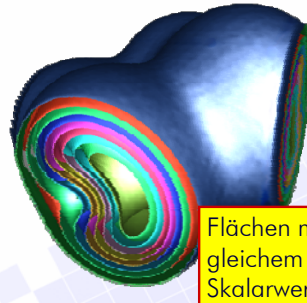
Isoflächen

13

- Analog zu Isolinen:
Regionen mit gleichem Skalarwert

2D: Isolinen

3D: Isoflächen

Linien mit
gleichem
SkalarwertFlächen mit
gleichem
Skalarwert

Andreas Kolb, Martin Lambers

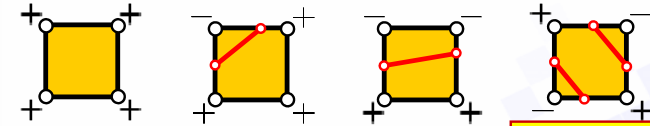
Visualisierung

Erinnerung: Isolinen

14

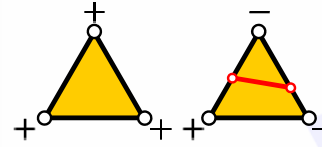
Sequentieller Algorithmus: Betrachte einzelne Zellen:

Rechteckige Zellen: 4 unterschiedliche Fälle:



Mehrdeutiger Fall

Dreieckige Zellen: 2 unterschiedliche Fälle:



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Isoflächenbestimmung

15

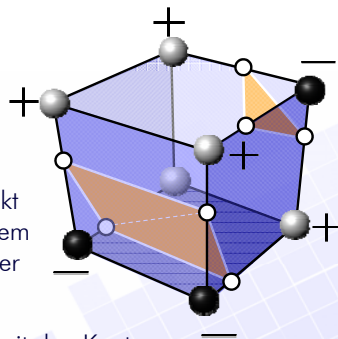
Vorgehensweise

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



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Isoflächenbestimmung

16

Marching Cubes -Algorithmus

nach Bill Lorensen und Harvey Cline

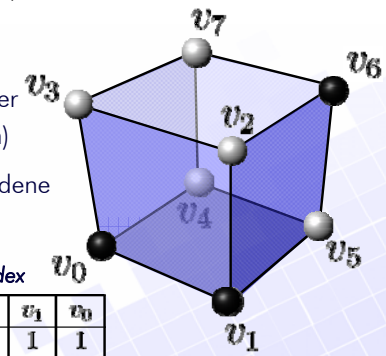
Die Zelle hat 8 Vertices

Jeder Vertex kann „+“ oder
„-“ sein (2 Möglichkeiten)

Es gibt $2^8 = 256$ verschiedene
Möglichkeiten.

I/O Klassifikation = Tabellenindex

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



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Isoflächenbestimmung

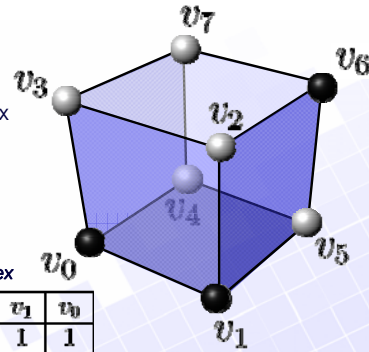
17

● 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.

I/O Klassifikation = Tabellenindex

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



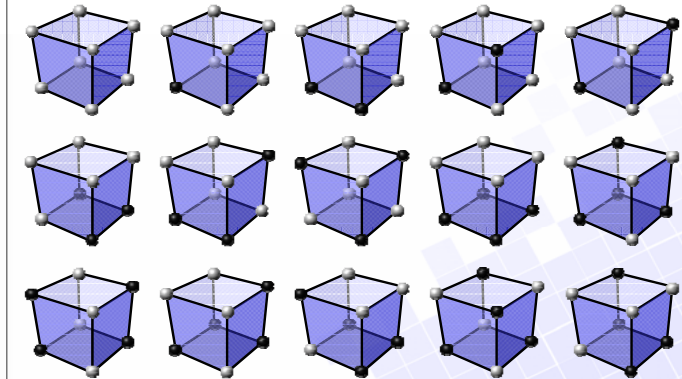
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

18

● Grundsätzlich 15 Fälle (Symmetrie, Rotation)



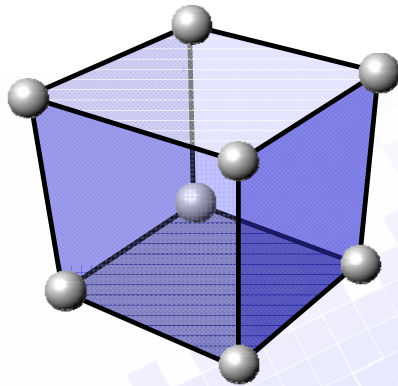
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

19

Fall 0



Andreas Kolb, Martin Lambers

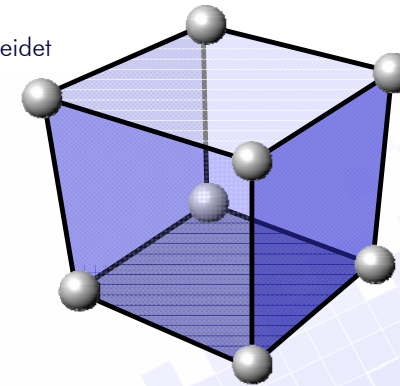
Visualisierung

Marching Cubes

20

Fall 0

Isofläche schneidet
die Zelle nicht



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

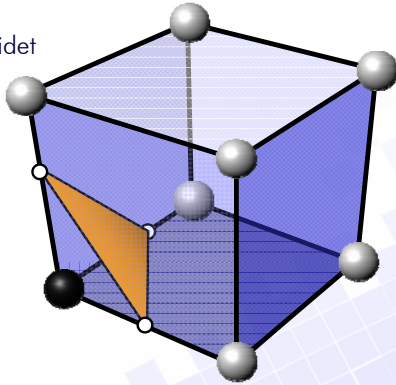
Marching Cubes

21

Fall 1

Isofläche schneidet
3 Kanten der
Zelle

Füge 1 Dreieck
ein.



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

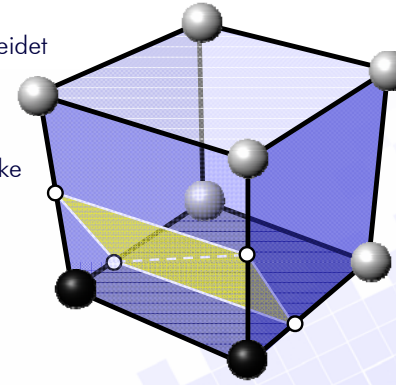
Marching Cubes

22

Fall 2

Isofläche schneidet
4 Kanten der
Zelle

Füge 2 Dreiecke
ein.



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

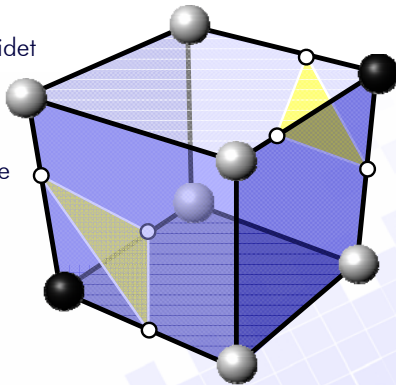
Marching Cubes

23

Fall 4

Isofläche schneidet
6 Kanten der
Zelle

Füge 2 Dreiecke
ein.



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

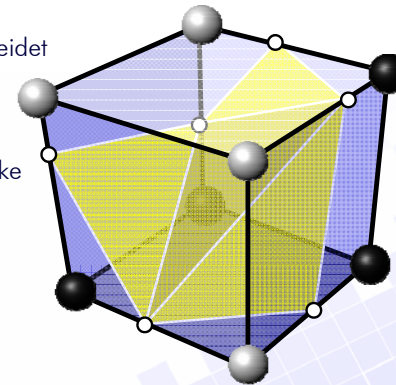
Marching Cubes

24

Fall 11

Isofläche schneidet
6 Kanten der
Zelle

Füge 4 Dreiecke
ein.



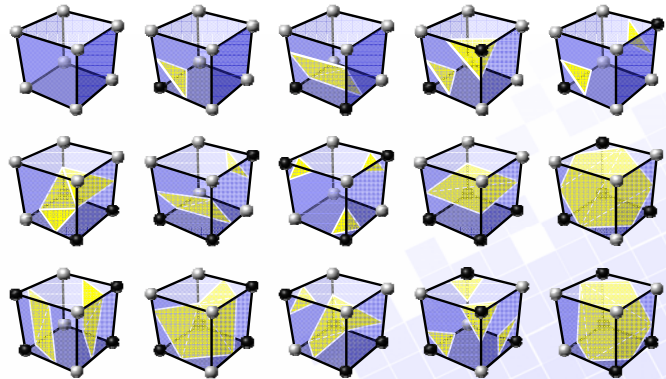
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

25

● Triangulierung nach *Lorensen & Cline*



Andreas Kolb, Martin Lambers

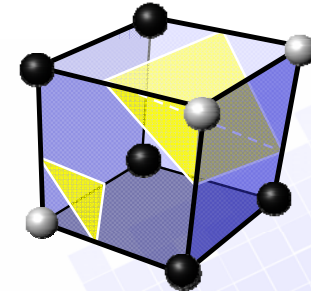
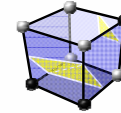
Visualisierung

Marching Cubes

26

● Triangulierung nach *Lorensen & Cline*

Fall 6:



Andreas Kolb, Martin Lambers

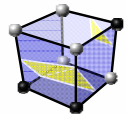
Visualisierung

Marching Cubes

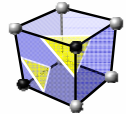
27

● Triangulierung nach *Lorensen & Cline*

Fall 6: *Diskontinuität!*



Fall 3:



Ursache: Mehrdeutige Triangulierung

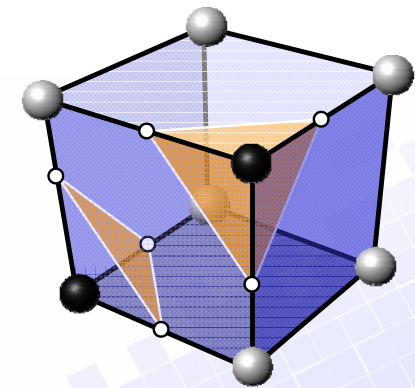
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Mehrdeutigkeiten

28

Fall 3



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

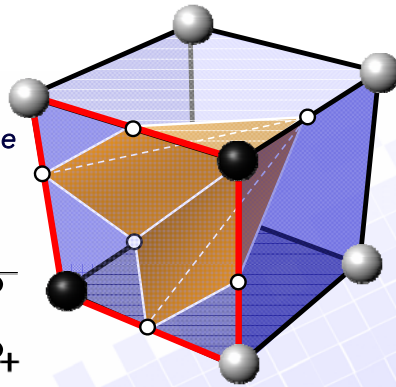
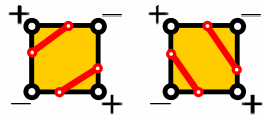
Mehrdeutigkeiten

29

Fall 3

Mehrdeutigkeit
der Triangulierung!

Wie kann man diese
Mehrdeutigkeit
auflösen?



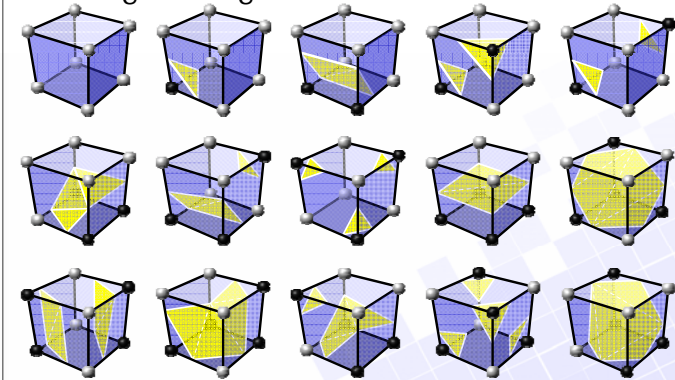
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

30

● Triangulierung nach Lorensen & Cline



Andreas Kolb, Martin Lambers

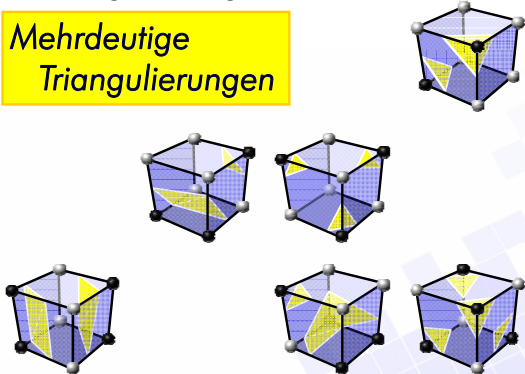
Visualisierung

Marching Cubes

31

● Triangulierung nach Lorensen & Cline

Mehrdeutige
Triangulierungen



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

32

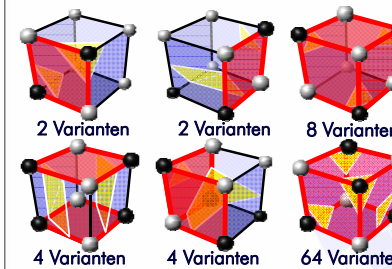
● Triangulierung nach Lorensen & Cline

Mehrdeutige
Triangulierungen

Mehrdeutige Flächen:

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

Die **Anzahl der mehr-
deutigen Flächen**
einer Zelle bestimmt
die **Anzahl der
möglichen** Triangu-
lierungs-Varianten



2 Varianten

2 Varianten

8 Varianten

4 Varianten

4 Varianten

64 Varianten

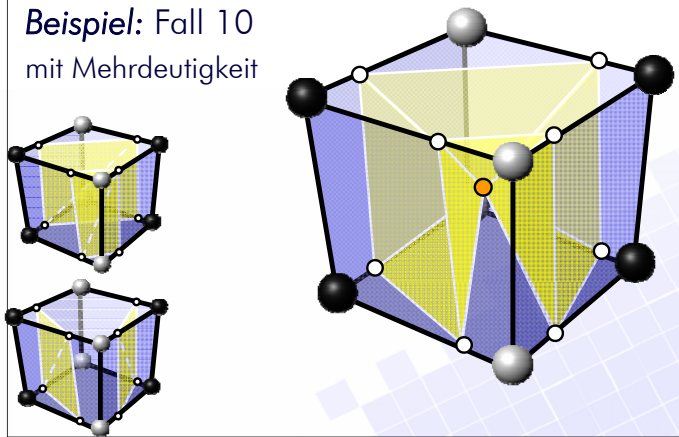
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

33

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit



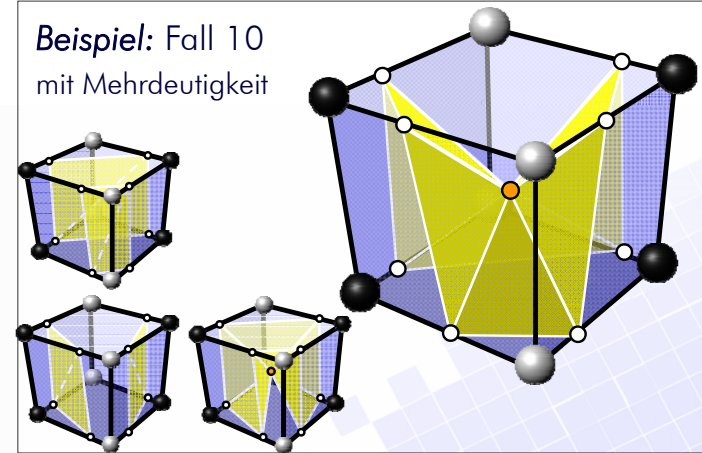
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

34

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit



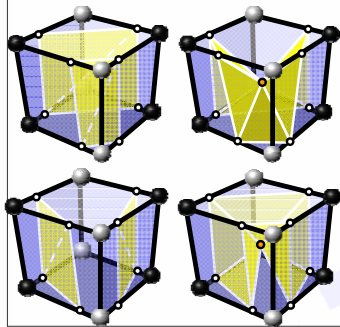
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

35

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

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.)

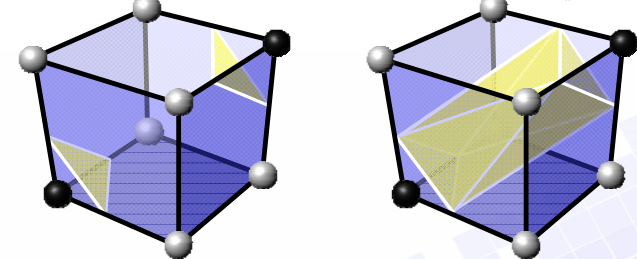
Marching Cubes

36

Fall 4:

2 Dreiecke

1 „Röhre“



In diesem Fall liegt eine **Mehrdeutigkeit der Zelle** vor, keine
Mehrdeutigkeit der Fläche.

Es entsteht hier keine Diskontinuität der Gesamtfläche.

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

37

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

Eindeutige Zelle

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

Mehrdeutige 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

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

38

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

Eindeutige Zelle

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

Mehrdeutige 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.

Andreas Kolb, Martin Lambers

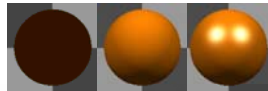
Visualisierung

Marching Cubes

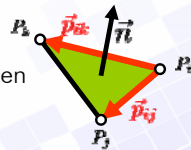
39

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)

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Cubes

40

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.

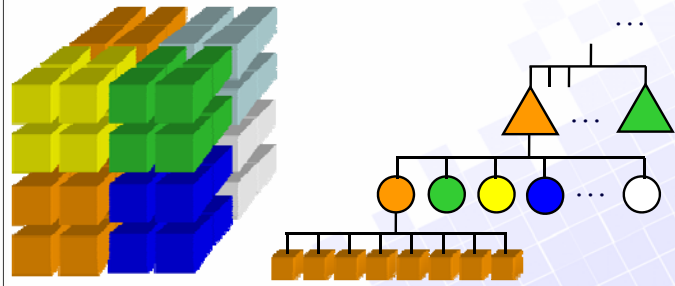
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Beschleunigung

41

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



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

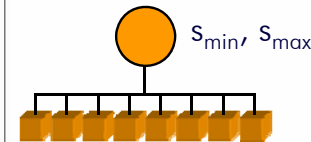
Octree-Verfahren

42

Beschleunigte Isoflächenberechnung:

Vorbereitung

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



Andreas Kolb, Martin Lambers

Isoflächenbestimmung

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

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

Visualisierung

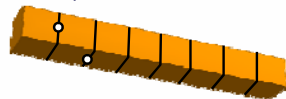
Octree-Verfahren

43

Problematik: keine sequentielle Abarbeitung der Zellen mehr.

Wiederverwendbarkeit der berechneten Schnittpunkte (Position *und* Gradient)

Bei sequentieller Abarbeitung ist das kein Problem:



Bei sequentieller Reihenfolge ist die Bearbeitungsreihenfolge fest.

Bei jedem Schnittpunkt ist unmittelbar klar, ob er zuvor schon berechnet wurde oder ob er noch später gebraucht wird.

Bei Abarbeitung in beliebiger Reihenfolge müssen alle Schnittpunkte gespeichert werden.



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

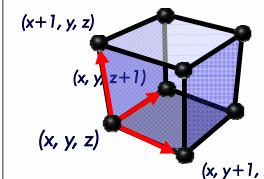
Hashing-Tabelle

44

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

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

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Tetrahedra

45

● Gleicher Ansatz für Tetraeder statt Hexaeder

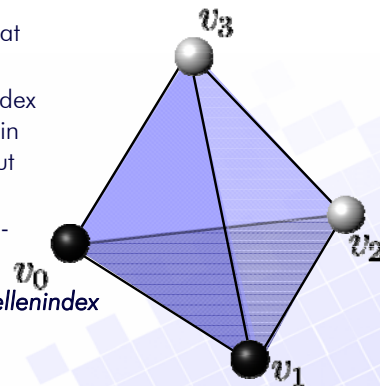
Jede Zellkonfiguration hat einen bestimmten Index.

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

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

I/O Klassifikation = Tabellenindex

v_3	v_2	v_1	v_0
0	0	1	1



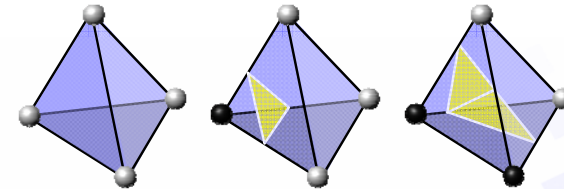
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Marching Tetrahedra

46

● 3 mögliche Fälle (Symmetrie, Rotation)



● keine mehrdeutigkeiten Flächen

● keine mehrdeutigen Zellen

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Literatur

47

● 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

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Literatur

48

● 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

Andreas Kolb, Martin Lambers

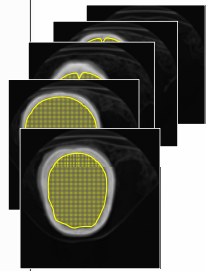
Visualisierung

Oberflächenrekonstruktion

49

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.

Andreas Kolb, Martin Lambers

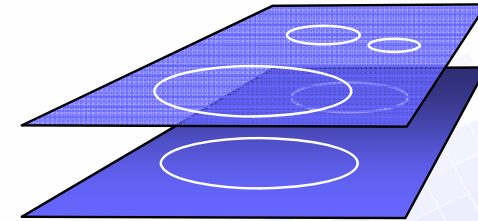
Visualisierung

Oberflächenrekonstruktion

50

● 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?

Andreas Kolb, Martin Lambers

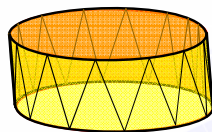
Visualisierung

Oberflächenrekonstruktion

51

● 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?

Andreas Kolb, Martin Lambers

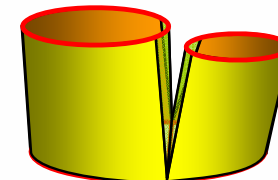
Visualisierung

Oberflächenrekonstruktion

52

● 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?

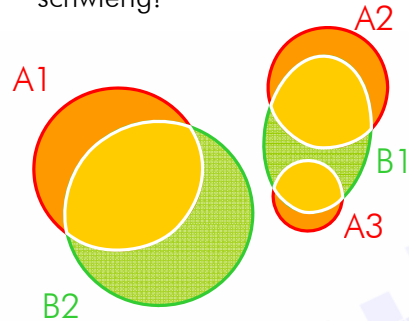
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Korrespondenz

53

- 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)

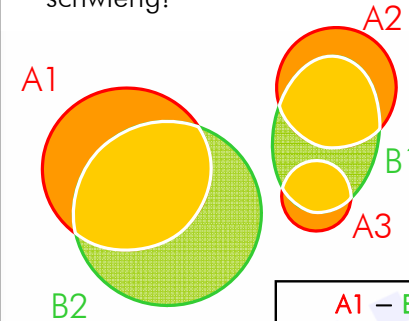
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Korrespondenz

54

- 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)

A1 – B2
A2, A3 – B1

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Korrespondenz

55

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

Problematik:



keine Überlappung unerwünschte Überlappung

- Unterschiedliche Lösungsansätze in der Literatur
- Oft auch mit Benutzerinteraktion

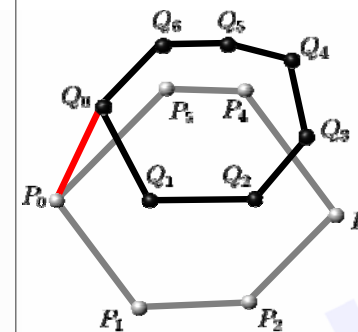
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Tiling

56

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



Graphensuche

	Q ₀	Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄	Q ₅	Q ₆
P ₀	•	•	•	•	•	•	•
P ₁	•	•	•	•	•	•	•
P ₂	•	•	•	•	•	•	•
P ₃	•	•	•	•	•	•	•
P ₄	•	•	•	•	•	•	•
P ₅	•	•	•	•	•	•	•
P ₆	•	•	•	•	•	•	•

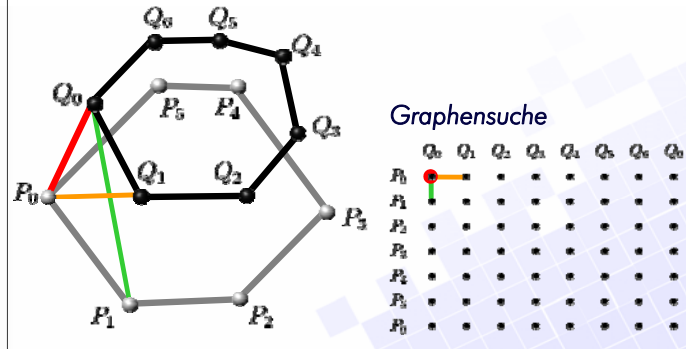
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Tiling

57

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



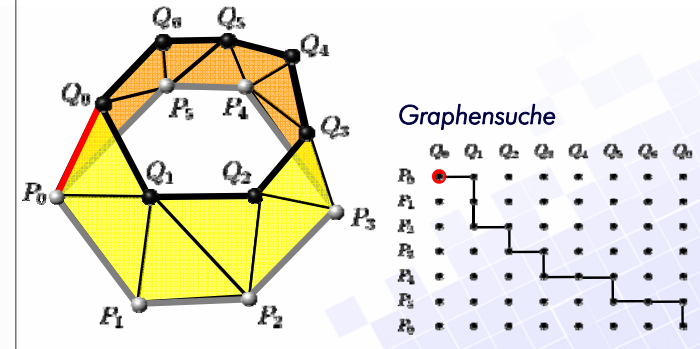
Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Tiling

58

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



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

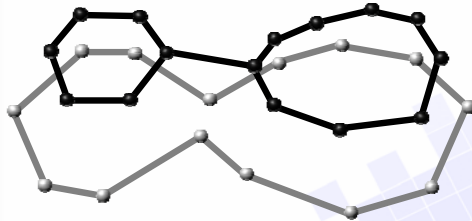
Branching

59

- Wie konstruiere ich die Mantelfläche bei Verzweigungen?

Einfache Methode:

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



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

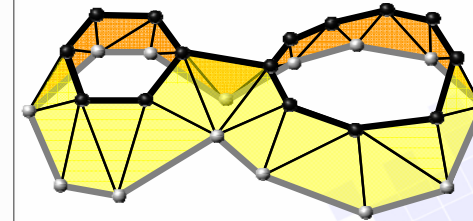
Branching

60

- Wie konstruiere ich die Mantelfläche bei Verzweigungen?

Einfache Methode:

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



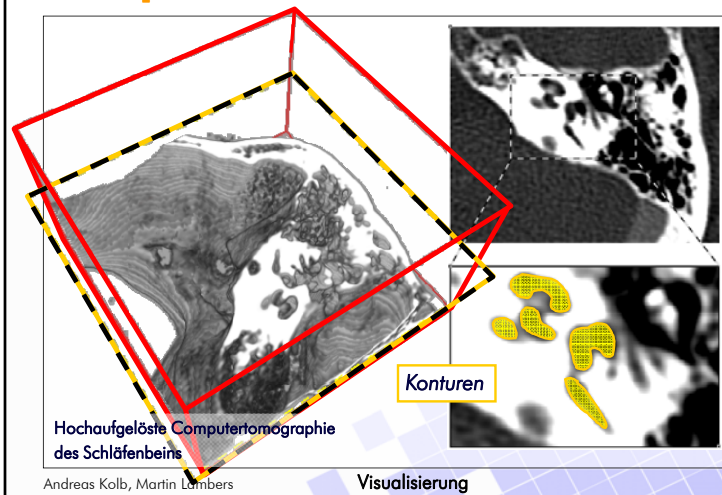
Führe Tiling auf der erweiterten Kontur durch

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

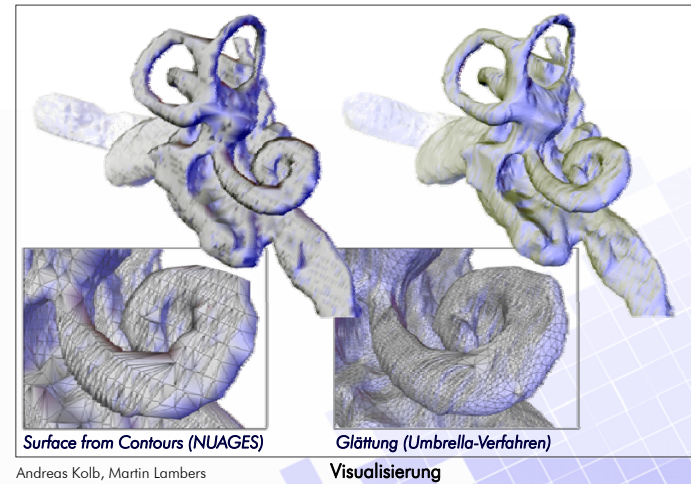
Beispiel

61



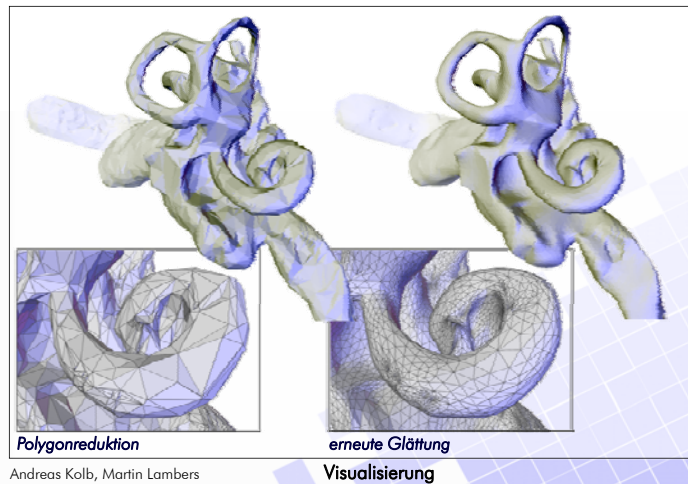
Beispiel:

62



Beispiel:

63



Literatur

64

● 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>

Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

Zusammenfassung

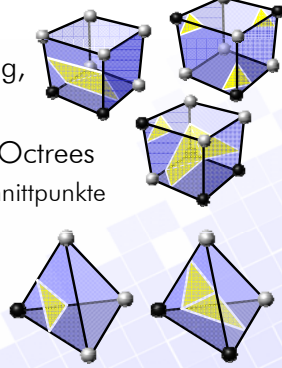
65

Indirekte Volumenvisualisierung

● Marching Cubes

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

● Marching Tetrahedra



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung

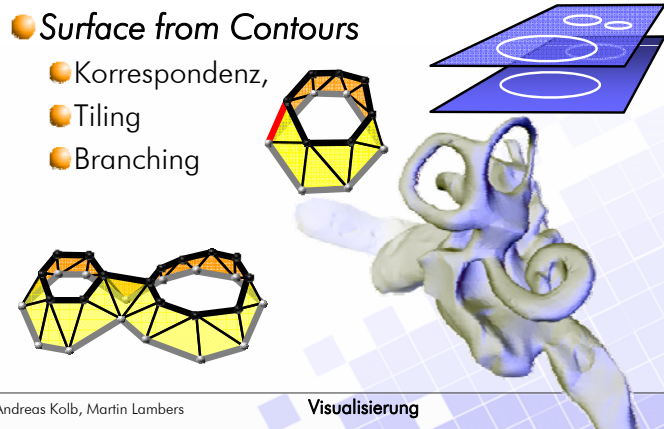
Zusammenfassung

66

Indirekte Volumenvisualisierung

● Surface from Contours

- Korrespondenz,
- Tiling
- Branching



Andreas Kolb, Martin Lambers

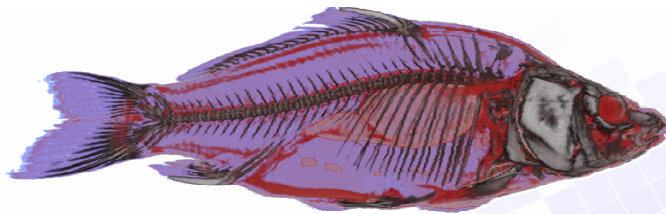
Visualisierung

Nächste Stunde

67

● Direkte Volumenvisualisierung

Standardverfahren



Andreas Kolb, Martin Lambers

Visualisierung