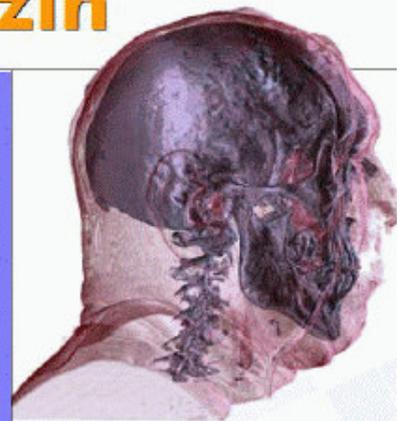
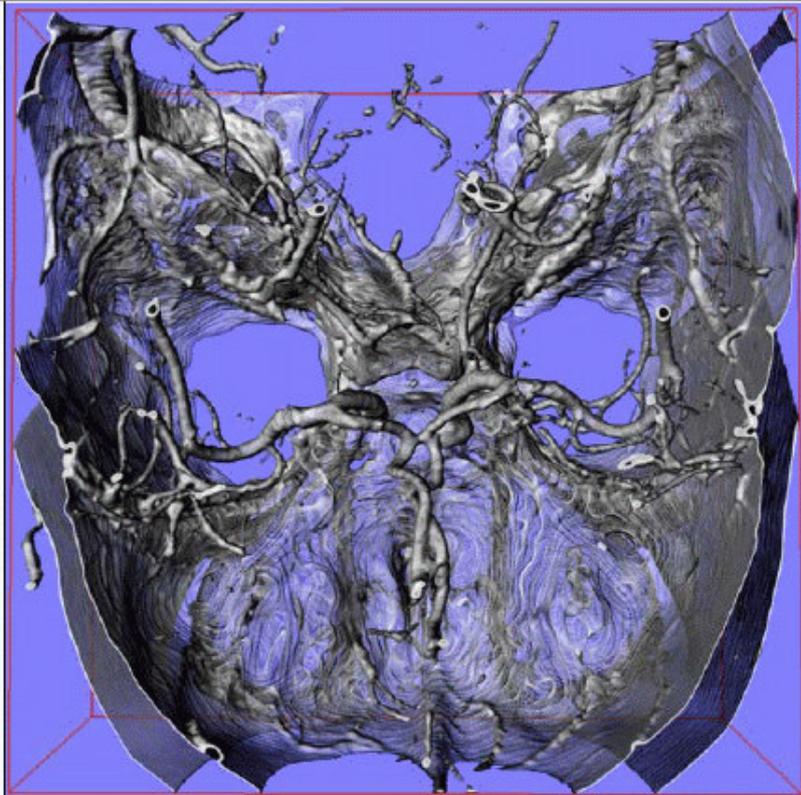


15. Volumen-Rendering

klassische fotorealistische Computergrafik:
normalerweise werden Oberflächen dargestellt
(außer bei Spezialeffekten wie Nebel, Rauch, Feuer...)

in der Visualisierung von Daten:
oft Interesse, in ein Volumen *hineinzusehen*
("Röntgenblick")

Anwendungen: Medizin

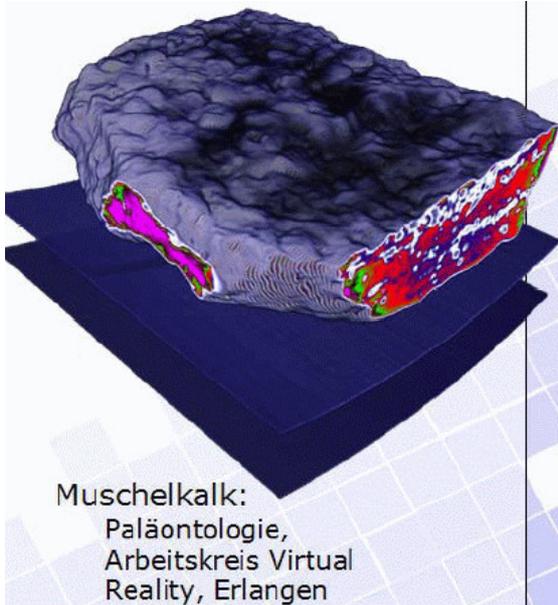


CT Human Head:
Visible Human Project,
US National Library of
Medicine, Maryland,
USA

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

weitere Anwendungen:

Geologie



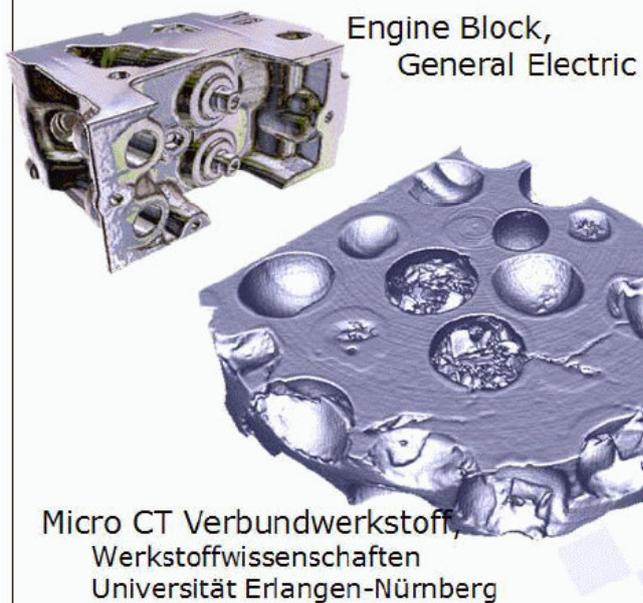
Archäologie



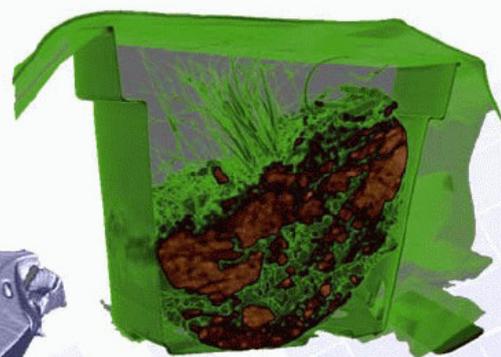
Sotades Pygmäen-Statue,
5. Jh. v. Chr.,
ARTIS, Antikensammlung
der Universität Erlangen-
Nürnberg

Werkstoffwissenschaften

Qualitätssicherung

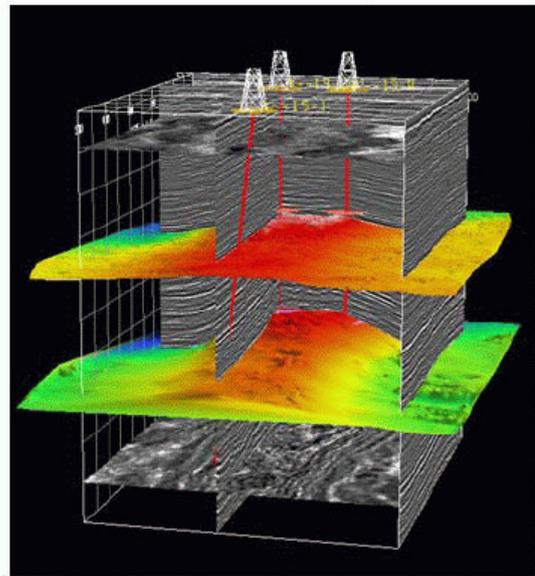
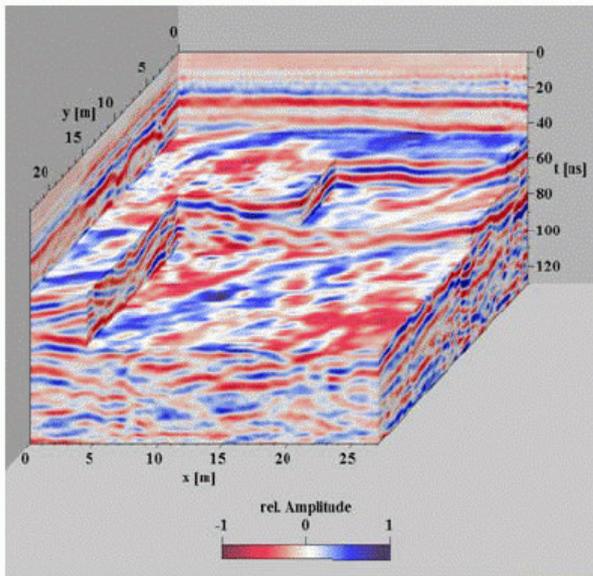


Biologie



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

- Geoseismische Daten
- Erdölindustrie



(Rezk-Salama, o.J.)

Datenspezifikation:

- Beobachtungsraum: \mathbb{R}^3
- Datenverbund:
Oft regelmäßig (Voxelgitter) oder strukturiert
- Merkmalsraum: $[0,1]$
Es wird nur **eine** skalare Größe unterstützt

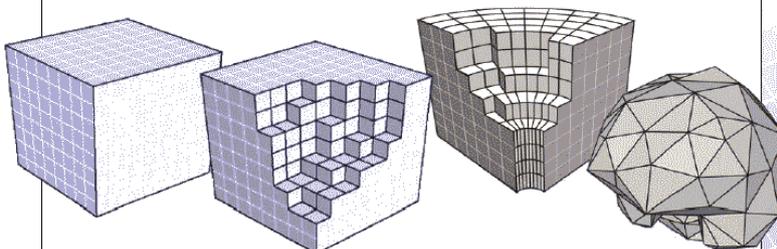
(Bartz 2005)

3D Skalarfelder

Input Daten: Kontinuierliches 3D Skalarfeld:

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

abgetastet auf diskretem Gitter.



Überblick

Volumenvisualisierung

● Indirekte Verfahren

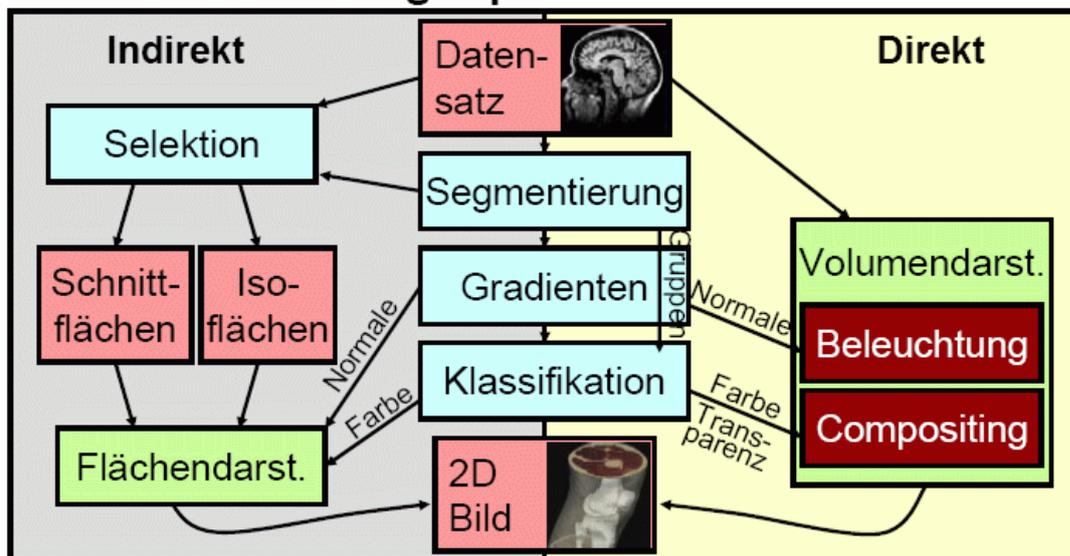
Bestimme Oberflächen innerhalb des Skalarfeldes und stelle diese dar.

● Direkte Verfahren

Interpretiere das Skalarfeld als transparentes Medium und verwende physikalisch basierte Strahlungsberechnung.

(Rezk-Salama, o.J.)

Volume-Rendering Pipeline:



1. Ansatz: Schnittflächen

Schnittflächen (Voxelgitter):

- orthogonal zu x-,y- bzw. z-Achse (re-sample)
- nutze Techniken zur 2D Darstellung (Farbe, Isolinien, Höhenfelder, ...)

CT Datensatz:

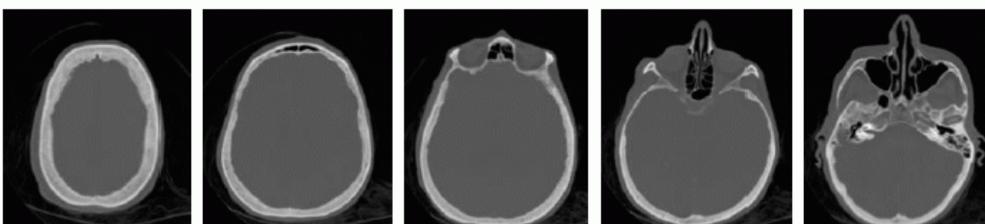
Schicht 20

30

40

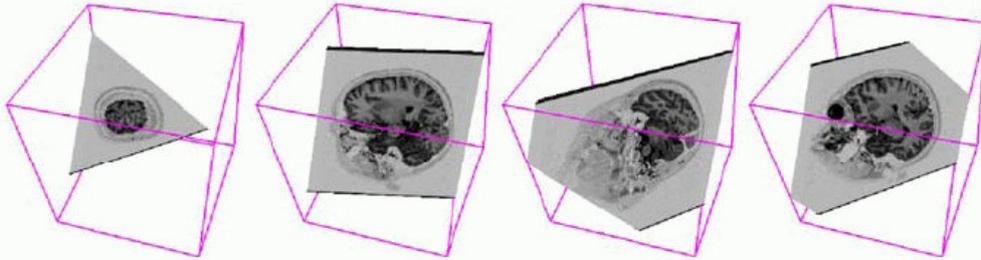
50

60



Schnittflächen (Voxelgitter):

- beliebige Ebenen
- nutze Hardware zum 3D-Texture-Slicing (berechne Schnitt zw. Ebene und Würfel)



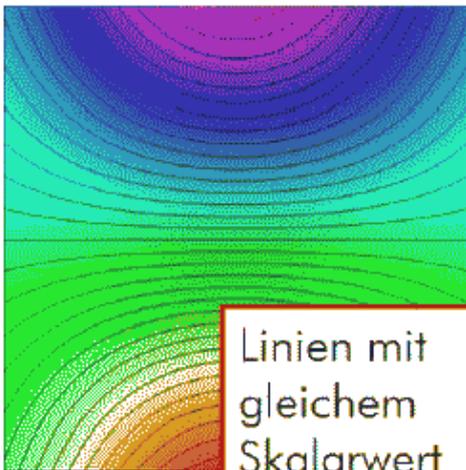
(Bartz 2005)

Isoflächen

- Analog zu Isolines:
Regionen mit gleichem Skalarwert

2D: *Isolinien*

3D: *Isoflächen*



Linien mit
gleichem
Skalarwert

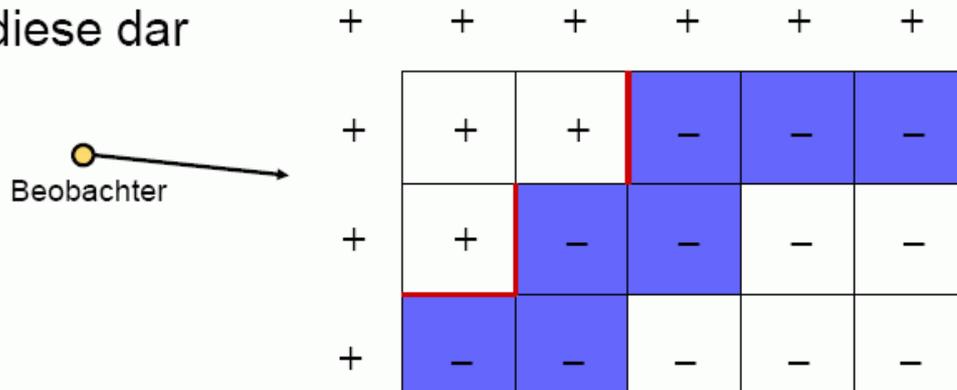


Flächen mit
gleichem
Skalarwert

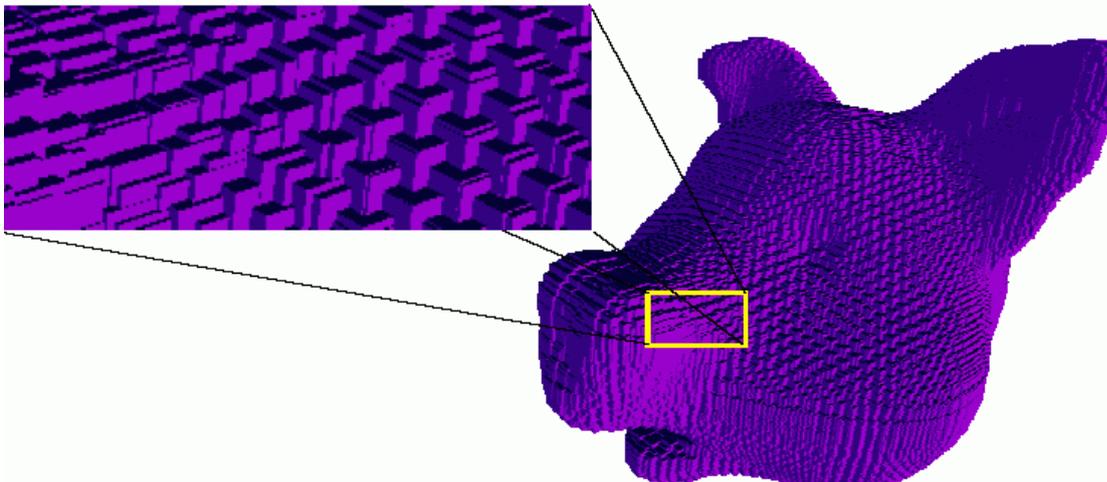
(Rezk-Salama, o.J.)

Binäre Voxelisierung (Cuberille):

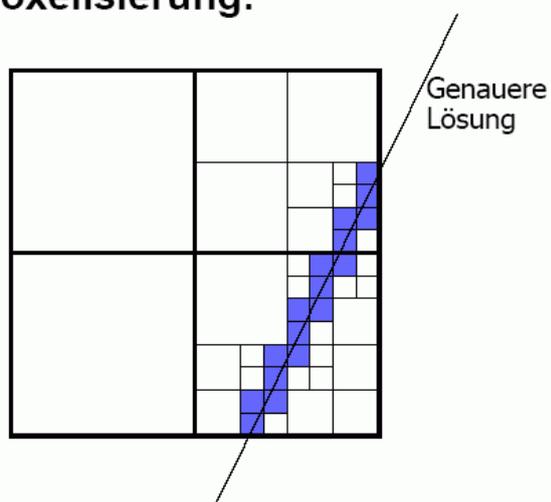
- Klassifiziere Dichte auf + oder -, je nachdem ob $\rho > \tau$ oder $\rho < \tau$
- Bestimme sichtbare Trennflächen und stelle diese dar



Beispiel:



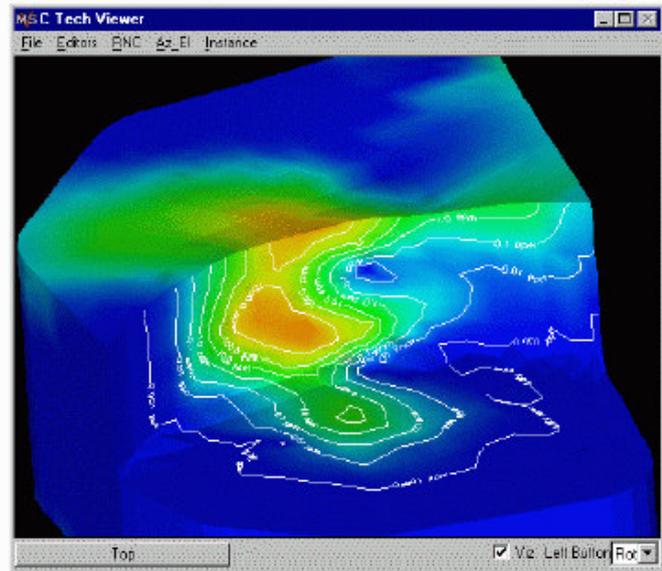
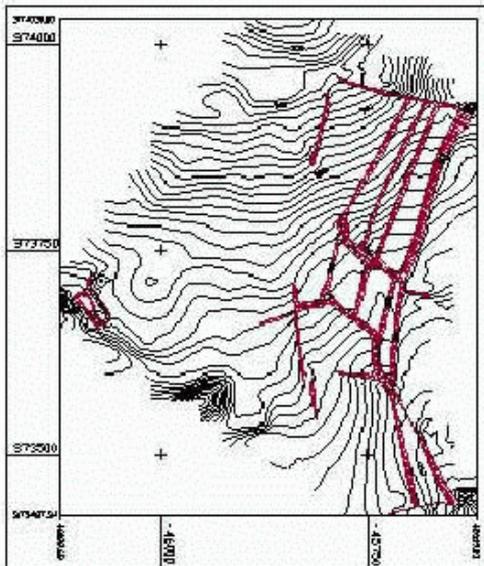
Adaptive Voxelisierung:



(Bartz 2005)

zur Vereinfachung zunächst 2-dimensionaler Fall:
Isolinien

- Gegeben sei ein qualitatives Merkmal über der Ebene: $f(x,y) \rightarrow [a,b]$ (z.B. Höhenfeld) (Skalarfeld)
- **Isolinie** bezeichnet Punktmenge mit $f(x,y) = \text{const.}$
- **Isostreifen** bezeichnet Punktmenge mit $f(x,y) \in [v, v+\Delta v]$.
- Falls $f(x,y)$ auf keinem ausgedehnten Bereich konstant ist, sind Isolinien Linien.



Anwendungen: Höhenlinien, Wetterkarten,...

(Bartz 2005)

wie lassen sich Isolinien erzeugen?

- für alle Pixel überprüfen, ob Isolinie hindurchgeht ("Pixel by pixel contouring") *oder*
- gröberes Gitter verwenden, interpolieren

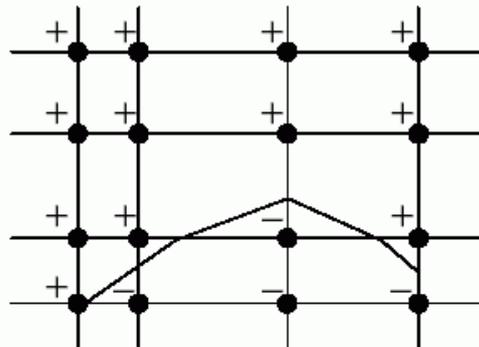
zum zweiten Ansatz:

Marching Squares:

- Die skalare Funktion wird evtl. auf einem gröberem Gitter abgetastet, als dargestellt wird.
- Für gegebenen Isowert werden Schnitte der Isolinien mit den Gitterkanten berechnet.
- In jeder Gitterzelle werden die Schnittpunkte mit Isoliniensegmenten verbunden.
- Bei mehrdeutigen Fällen werden weitere Punkte im Innern der Zellen ausgewertet.

(Bartz 2005)

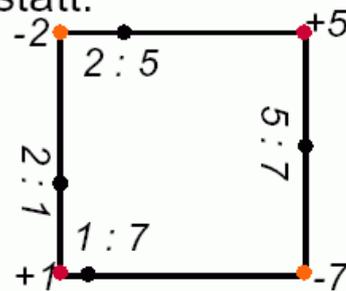
Marching Squares Beispiel:



Marching Squares Schnittberechnung:

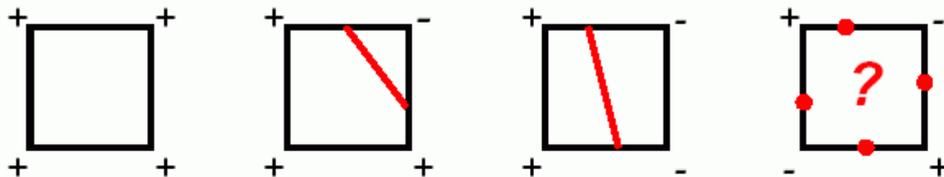
- Für gegebenen Isowert I , werden die Ecken der Zellen mit $+$ oder $-$ markiert, je nachdem, ob der Funktionswert größer oder kleiner I ist.
- Bei Kanten mit Ecken unterschiedlichen Vorzeichens, findet ein Schnitt statt.
- Die Schnittposition x auf der Kante $[0,1]$ geht aus linearer Interpolation hervor:

$$x = (I - f_0) / (f_1 - f_0)$$



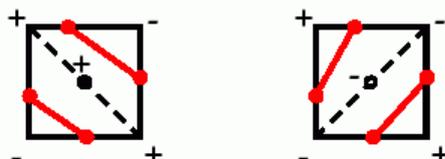
Marching Squares Fallunterscheidung:

Unter Berücksichtigung von Symmetrien (Rotationen und Komplement) bleiben noch vier verschiedenen Vorzeichenzuordnungen:



Auflösung der Mehrdeutigkeit:

- Im Falle von 4 Schnittpunkten gibt es zwei Möglichkeiten, die gültige Isolinien erzeugen:



- Wenn die Isolinien keine Feinstruktur in der Zelle haben, kann über den Funktionswerte im Zellenmittelpunkt zwischen den Fällen unterschieden werden.

Marching Squares Algorithmen:

- **In Zellenreihenfolge:**

Durchlaufe alle Zellen und generiere Segmente → jeder Punkt 2 mal, höhere Interpolation schwierig

- **Linienverfolgung:**

Verfolge Isolinien entlang von Saatzellen bis Rand erreicht wird oder die Linie geschlossen wird

→ Hermite-Interpolation mit Hilfe von Gradienten aus zentralen Differenzen

Problem: Wie können Saatzellen schnell gefunden werden ?

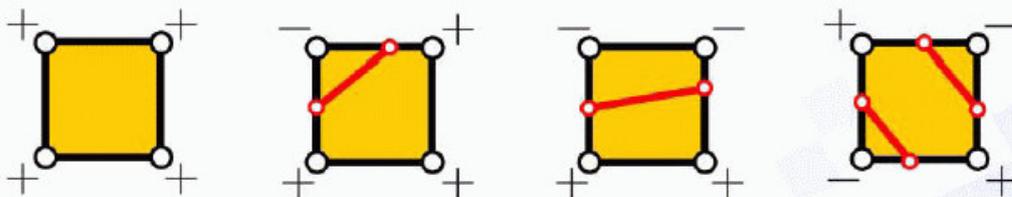
(Bartz 2005)

Zusammenfassung:

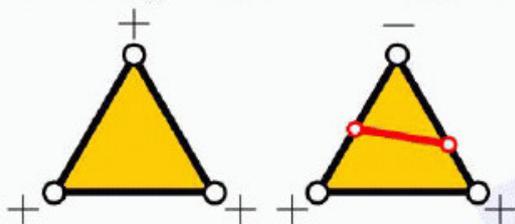
Isolinien

Sequentieller Algorithmus: Betrachte einzelne Zellen:

Rechteckige Zellen: 4 unterschiedliche Fälle:



Dreieckige Zellen: 2 unterschiedliche Fälle:



jetzt:

Isoflächenbestimmung

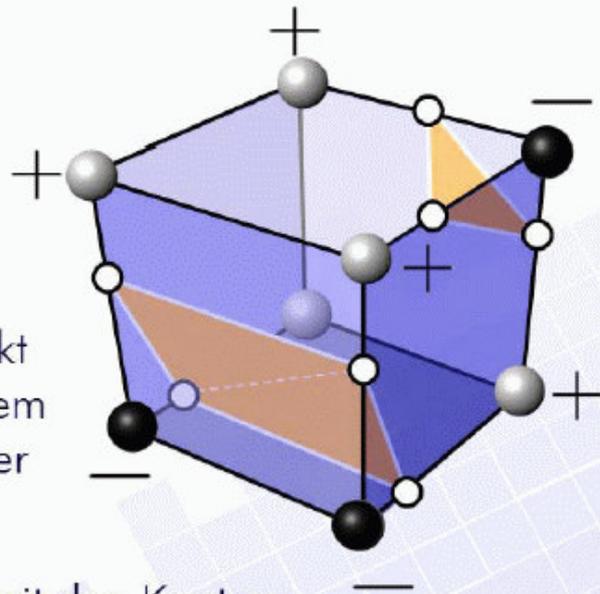
Vorgehensweise

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



(Rezk-Salama, o.J.)

Marching Cubes Algorithmus:

- betrachte **jede Voxelzelle**
- klassifiziere **acht Voxel der Zelle** in innen/außen
- erstelle daraus 8-Bit Index
- schlage Schnittkanten nach
- interpoliere Schnittpositionen und berechne Normale
- schlage Triangulierung nach



Marching Cubes

[Lorensen, Cline, SIGGRAPH 1987]:

- arbeitet auf Originaldaten
- erzeugt Dreiecksnetz (lineare Approximation)
- Oberflächennormalen aus Gradienten
- effiziente Berechnung durch Lookup-Tabelle

(Bartz 2005)

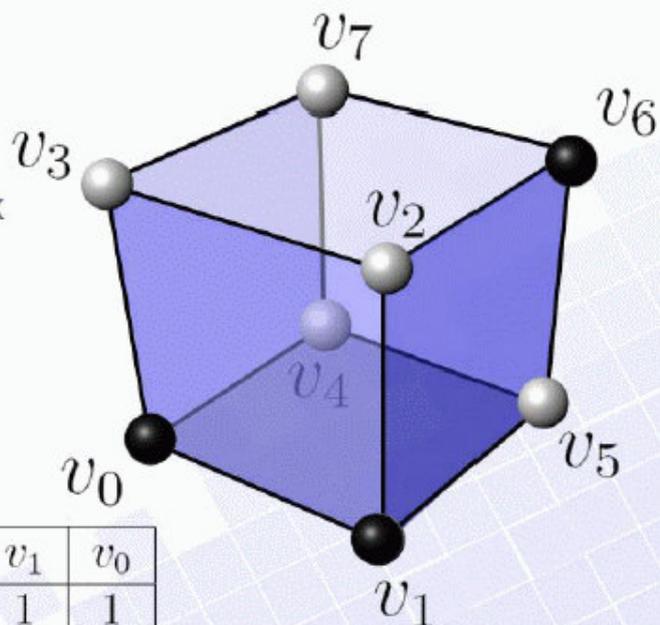
● *Marching Cubes* -Algorithmus

nach Bill Lorensen und Harvey Cline

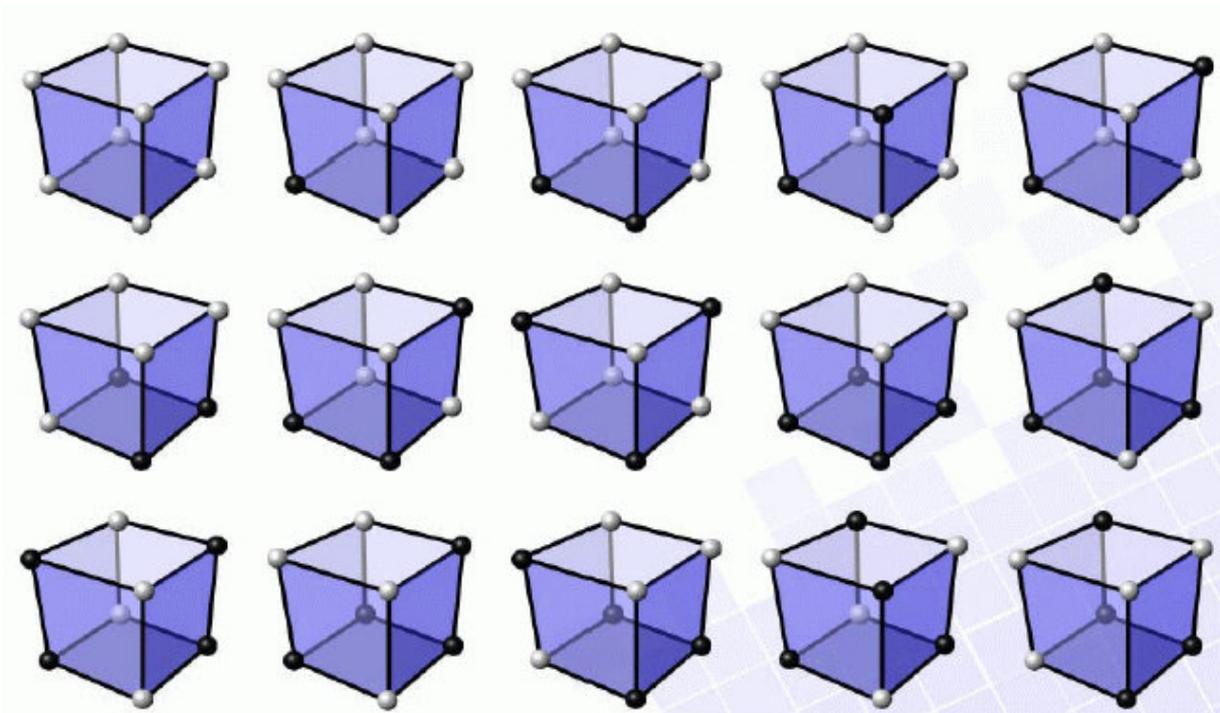
Jede Zellkonfiguration hat einen bestimmten Index.
Zu einem bestimmten Index kann die *Triangulierung* in der Tabelle nachgeschaut werden.

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



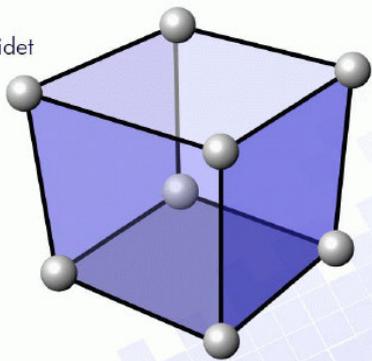
256 mögliche Fälle,
durch Ausnutzung von Symmetrien (01-Flipping,
Rotationen, Spiegelungen) reduzieren sich diese auf
15 Fälle.



Beispiele:

Fall 0

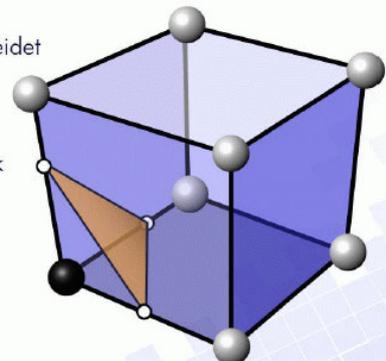
Isofläche schneidet
die Zelle nicht



Fall 1

Isofläche schneidet
3 Kanten der
Zelle

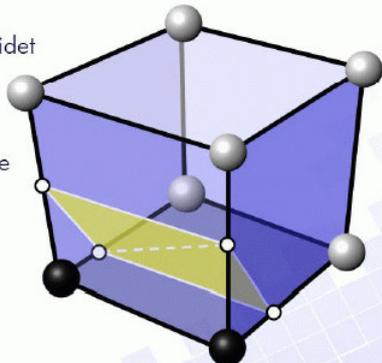
Füge 1 Dreieck
ein.



Fall 2

Isofläche schneidet
4 Kanten der
Zelle

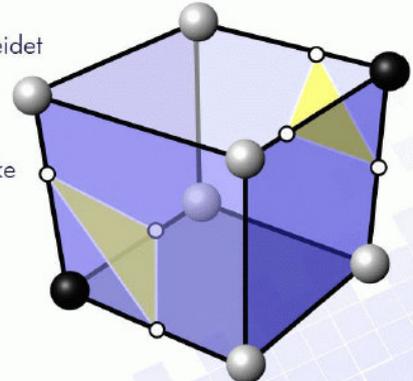
Füge 2 Dreiecke
ein.



Fall 4

Isofläche schneidet
6 Kanten der
Zelle

Füge 2 Dreiecke
ein.

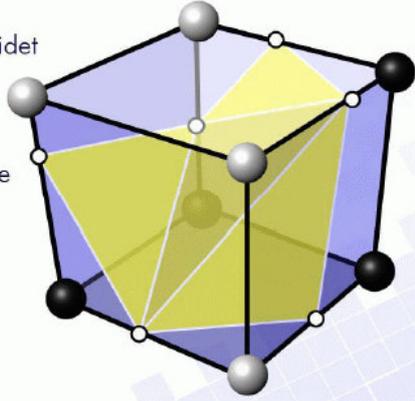


(mehrdeutig – siehe unten!)

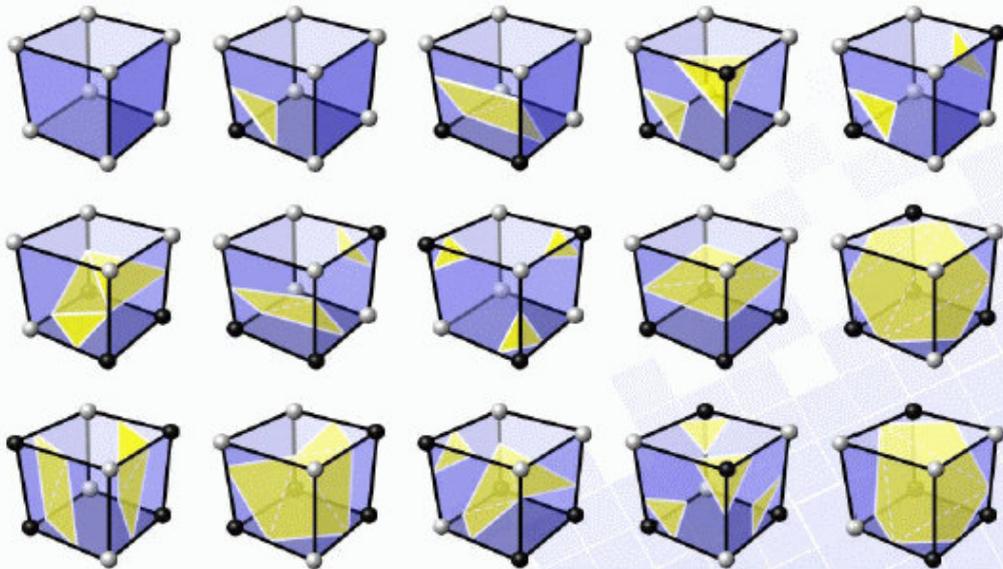
Fall 11

Isofläche schneidet
6 Kanten der
Zelle

Füge 4 Dreiecke
ein.



● Triangulierung nach Lorensen & Cline

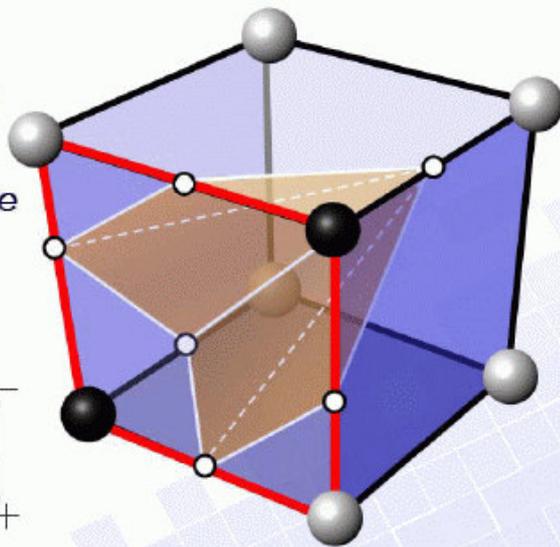
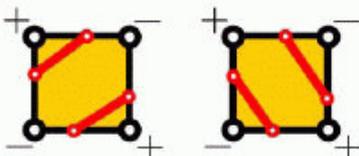


Mehrdeutigkeiten

Fall 3

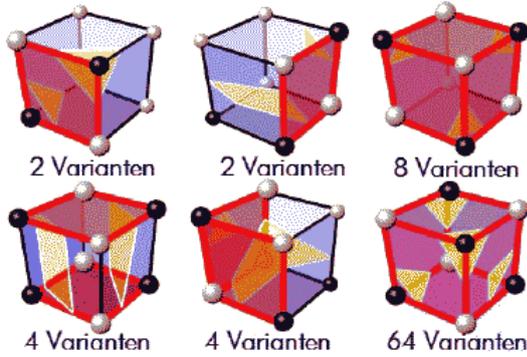
Mehrdeutigkeit
der Triangulierung!

Wie kann man diese
Mehrdeutigkeit
auflösen?



● Triangulierung nach *Lorensen & Cline*

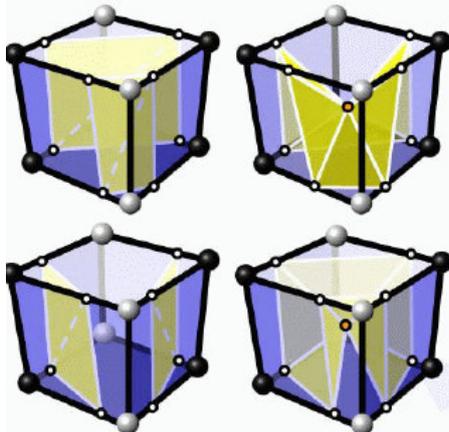
Mehrdeutige Triangulierungen



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*

Beispiel: Fall 10
mit Mehrdeutigkeit



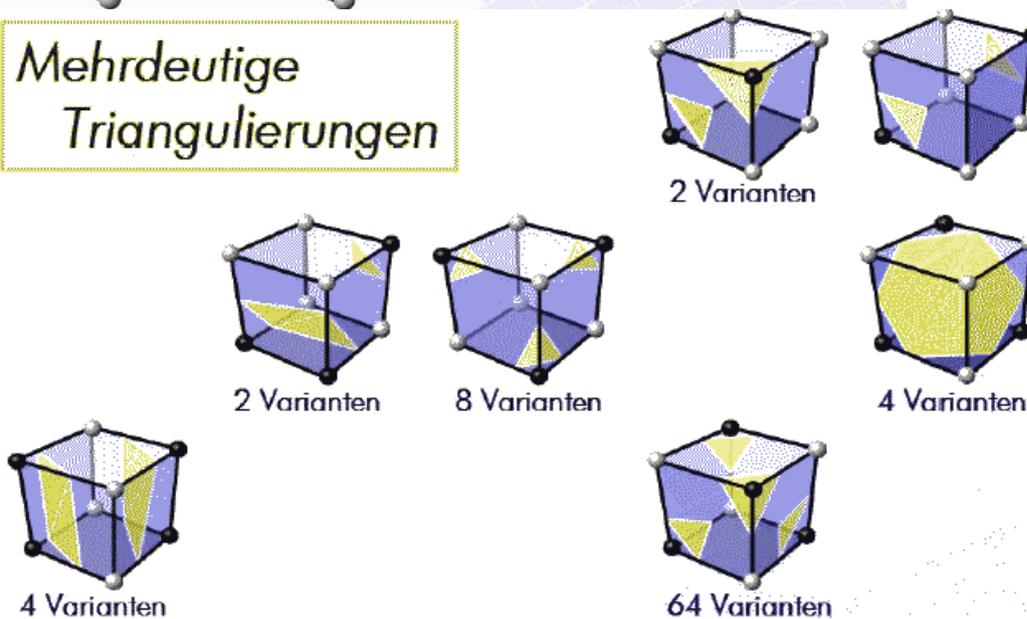
Allgemeine Vorgehensweise:

Betrachte mehrdeutige Flächen

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

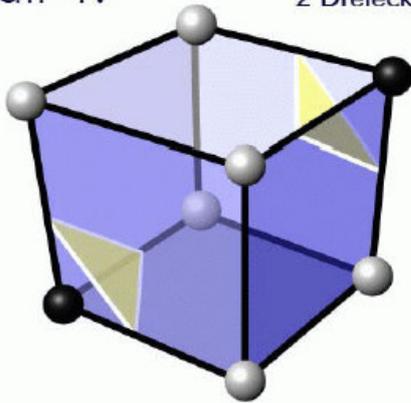
Tesselliere (Trianguliere) die
entstehende(n) Randkurve(n)
(Füge dazu evtl. zusätzliche
Vertices ein.)

Mehrdeutige Triangulierungen

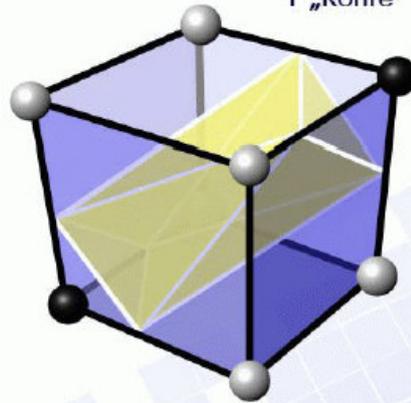


Fall 4:

2 Dreiecke



1 „Röhre“



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

Es entsteht hier keine Diskontinuität der Gesamtfläche.

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.

Beispiel: 2 Mehrdeutige Flächen:

00: Mitte negativ in beiden Flächen

10: Mitte positiv in erster Fläche

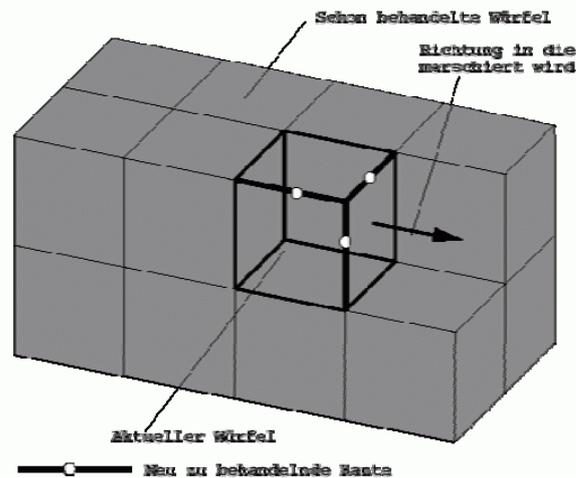
01: Mitte positiv in zweiter Fläche

11: Mitte positiv in beiden Flächen

(Rezk-S.)

"Marching Cubes":

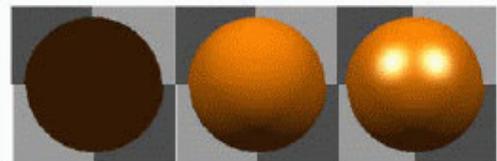
Die **aktuelle Zelle** geht weiter (marches) zur **nächsten Zelle im Gitter** und fährt fort wie im Punkt 2. bzw. 1., bis das ganze Volumen abgelaufen wurde.



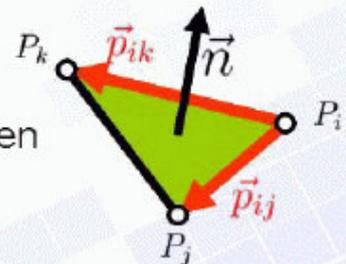
(Bartz 2005)

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)

Schwachpunkte bei Marching Cubes:

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

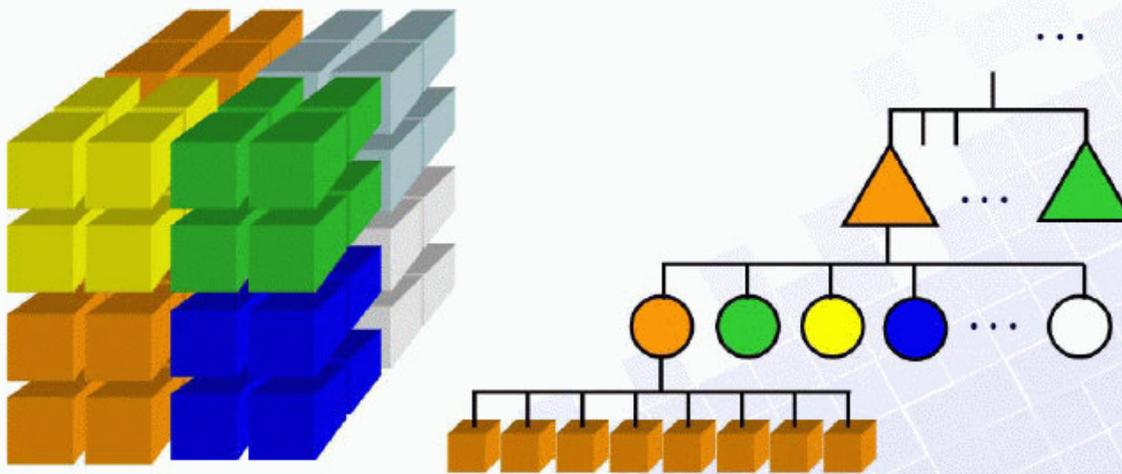
30–70 % der Rechenzeit wird bei der Bearbeitung von *leeren Zellen* benötigt.

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
Fasse 8 Blöcke zu einem neuen Block zusammen

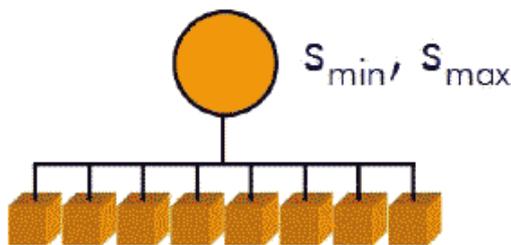


Octree-Verfahren

Beschleunigte Isoflächenberechnung:

Vorbereitung

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



Isoflächenbestimmung

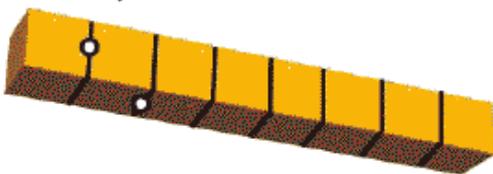
Traversiere den Baum (top-down) für einen bestimmten Isowert s .

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

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.



(Rezk-Salama, o.J.)

Marching Tetrahedra

- Gleicher Ansatz für Tetraeder statt Hexaeder

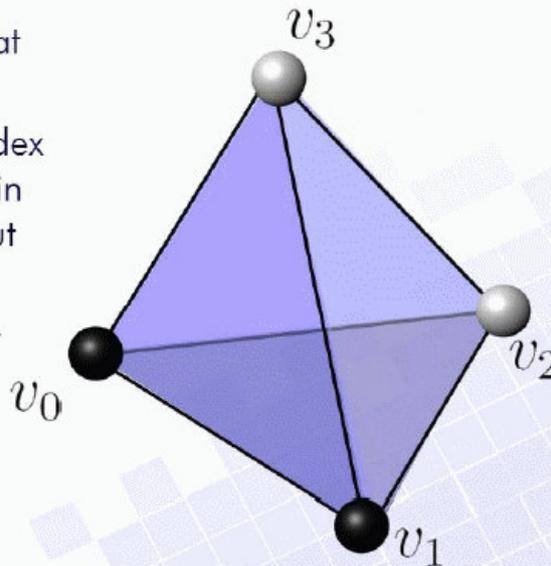
Jede Zellkonfiguration hat einen bestimmten Index.

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

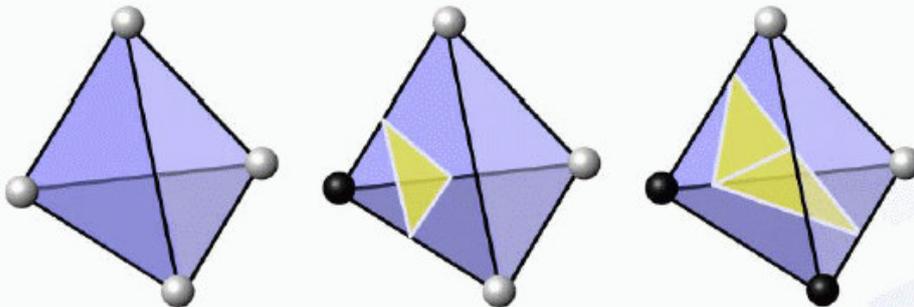
Es gibt $2^4 = 16$ verschiedene Möglichkeiten.

Erstelle eine Tabelle

v_3	v_2	v_1	v_0
0	0	1	1



- 3 mögliche Fälle (Symmetrie, Rotation)



- keine mehrdeutigkeiten Flächen
- keine mehrdeutigen Zellen

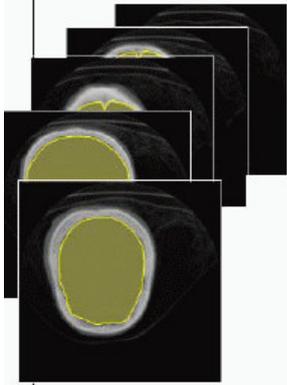
(Rezk-Salama, o.J.)

für Voxelgitter (Hexaeder) erzeugt dieses Verfahren (bei vorheriger Zerlegung der Voxel) mehr Dreiecke als der Marching-Cubes-Algorithmus (ca. doppelt so viele).

Oberflächenrekonstruktion

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

● *Konturbasierte Segmentierung:*



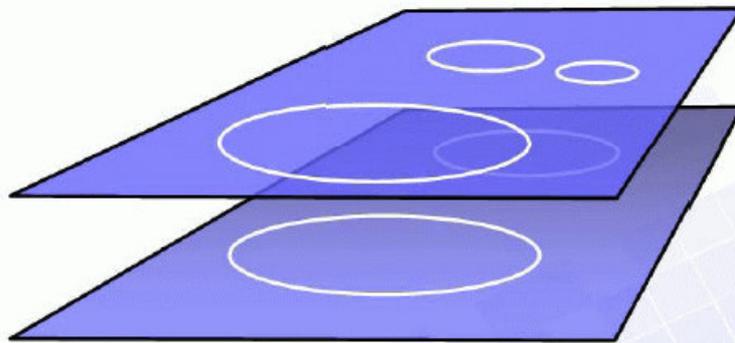
Ein bestimmtes im Datensatz enthaltenes Objekt (z.B. das Gehirn) soll dargestellt werden.

Ein Segmentierungsverfahren liefert für jedes Schichtbild die Kontur des Objekts.

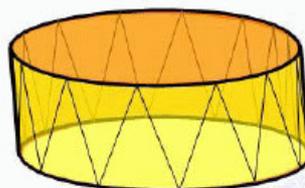
Aus diesen Konturlinien soll die Oberfläche des Objekts rekonstruiert werden.

● *Surface from Contours:*

3 verschiedene Probleme zu sind zu lösen:

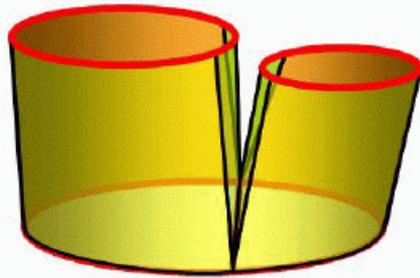


1. *Korrespondenz:* Welche Konturen in einer Schicht gehören zu welchen Konturen in der nächsten Schicht?



Wenn zwei korrespondierende Konturen gefunden wurden:

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

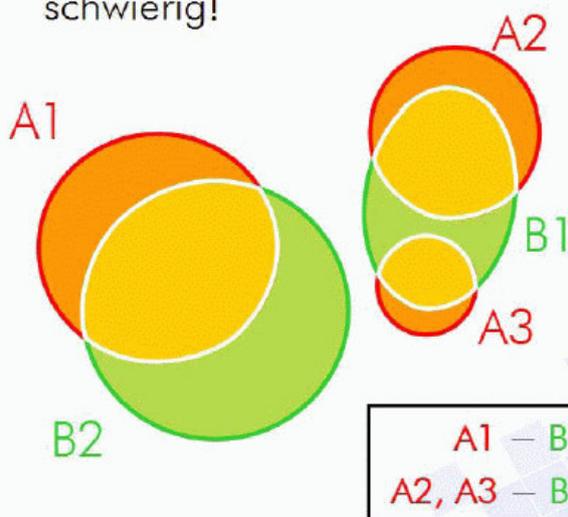


Wenn eine Kontur zwei Konturen in der nächsten Schicht entspricht:

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

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)

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

● *Problematik:*



keine Überlappung



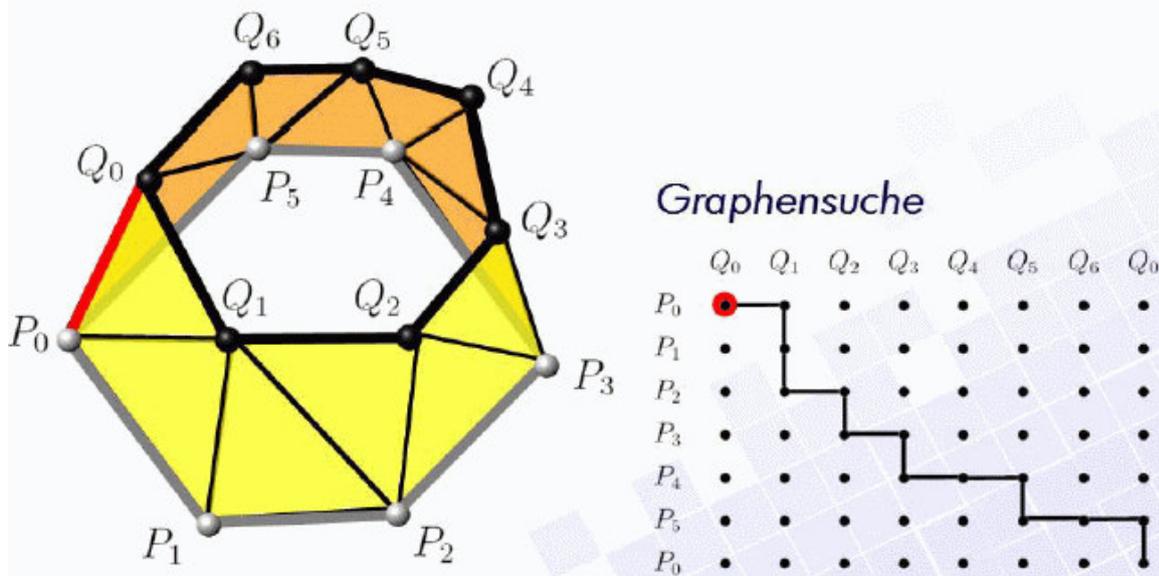
unerwünschte Überlappung

● Unterschiedliche Lösungsansätze in der Literatur

● Oft auch mit Benutzerinteraktion

Tiling

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

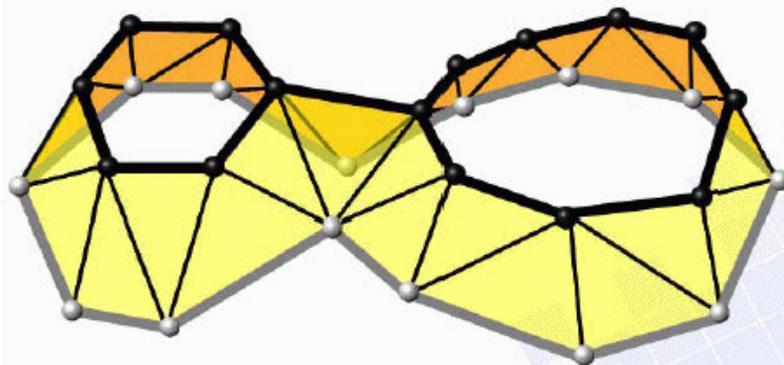


Branching

- 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

Visualisierung von 3D Skalarfeldern

- *bisher:* **Indirekte** Volumenvisualisierung
 - Bestimme eine Oberfläche innerhalb des Skalarfeldes (z.B. Isofläche)
 - Stelle diese Fläche mittels traditionellen (Polygon-basierten) Rendering-Verfahren dar.
- **Das Problem dabei:**
 - Aufwändige Vorverarbeitung
 - Wie finde ich den richtigen Isowert?
 - Informationsverlust

Direkte Volumenvisualisierung

- Interpretiere das Skalarfeld als ein transparentes Medium.
- Betrachte das physikalische Model für die Lichtausbreitung in transparentem Medium. (Emission und Absorption von Licht)
- Verwende diese physikalischen Gleichungen um Bilder zu erzeugen.
- **Vorteil:** Nutze die gesamte Information
 - Transparenz und Semitransparenz
 - Darstellung von „unscharfen“ Objekten

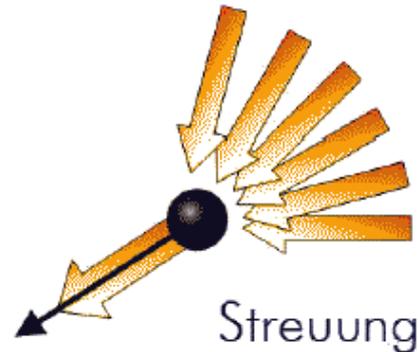
Physikalisches Modell

Betrachte einen Punkt im Raum und eine bestimmte Richtung:

Emission

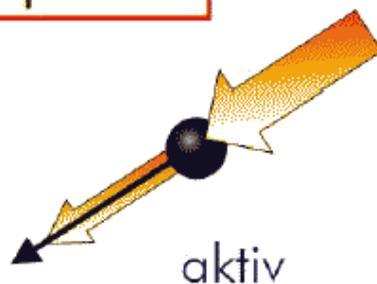


Aktive Emission:
An dem betrachteten Punkt wird Lichtenergie erzeugt und in die betrachtete Richtung ausgesandt (Lichtquelle).

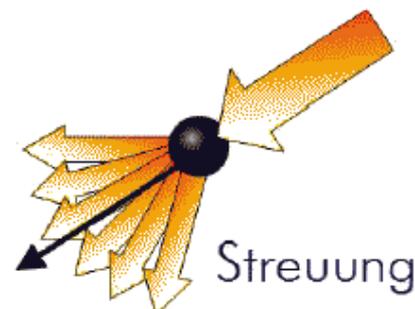


Emission durch Streuung:
Zuwachs an Lichtenergie in der betrachteten Richtung durch Brechung des Lichts, das aus anderen Richtungen einfällt.

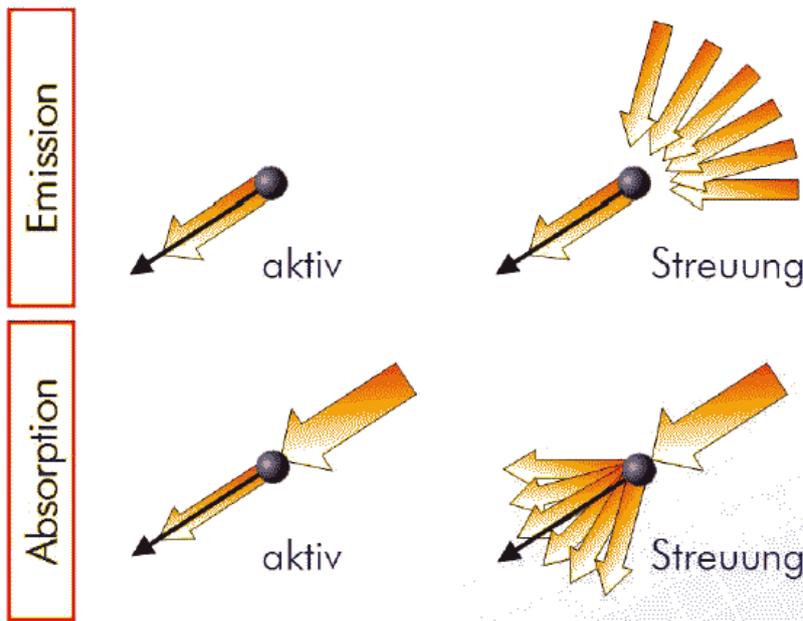
Absorption



Aktive Absorption:
An dem Punkt wird Licht absorbiert. Lichtenergie wird dem sichtbaren Spektrum entzogen und z.B. in Wärmeenergie umgewandelt.



Absorption durch Streuung:
Verringerung der Lichtenergie in der betrachteten Richtung durch Brechung des Lichts in andere Richtungen.



(Rezk-Salama, o.J.)

- Im folgenden beschränken wir uns auf die **1-dimensionale Formulierung**.
- Wir **verzichten auf Streuung**, da sie das Modell verkompliziert und rechnerisch sehr teuer ist (geht sonst in Absorption (Out-Scatter) und Emission (In-Scatter) ein)
- Wir vernachlässigen den Einfluss des Mediums (Participating Media)
- Wir betrachten **keinen Einfluss von Wellenlängen, Beugung, Interferenz, Diffraktion, Polarisation, ...**

- Energieerhaltung
(Emission – Absorption = Energie in Szene)
- Randbedingungen (Hintergrundlicht, ...)
- Außerdem nehmen wir sogenannte **Low-Albedo-Situationen** an:
 - Keine/kaum Reflektion
 - Keine Brechung
- Damit bleiben: **Emission** (nur Quellterm) und **Absorption** (nur „True Absorption“ - ohne Streuung)
- Wird auch **Density-Emitter-Model** genannt
[Sabella, ACM SIGGRAPH 1988]

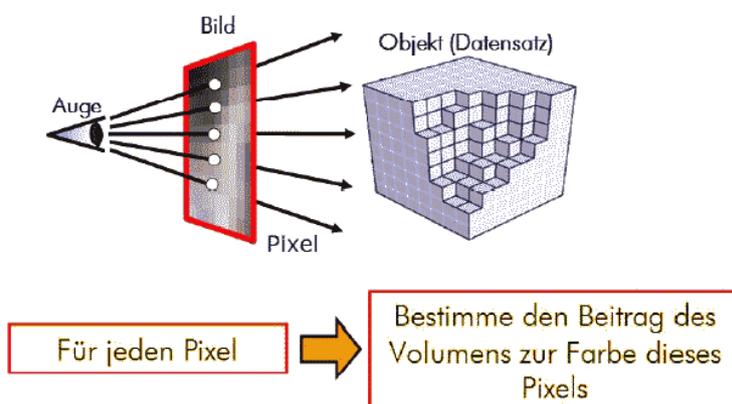
Damit haben wir folgende Hierarchie:

- **Transporttheorie** des Lichts Komplexität
 - **Rendering-Gleichung**: verzichtet auf Streuung/Participating Media; Interaktion nur an Materialgrenzen/Oberflächen (zB. Ray Tracing)
 - **Volume-Rendering-Gleichung**:
Low-Albedo Situationen
(Ray Casting / Volume Rendering)
- ↓
(Bartz 2005)

2 Ansätze zur Lösung: Bildraum- und Objektraumverfahren.

Bildraumverfahren

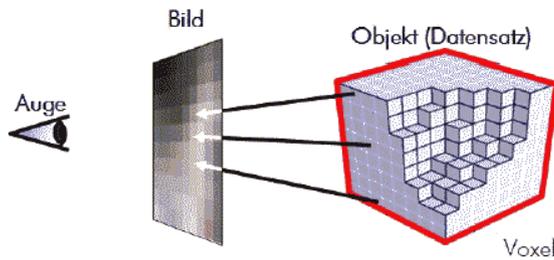
Ansatz: Zerlege das Ergebnisbild in einzelne Pixel



Objektraumverfahren

Alternativer Ansatz:

Zerlege das Objekt in einzelne Voxel



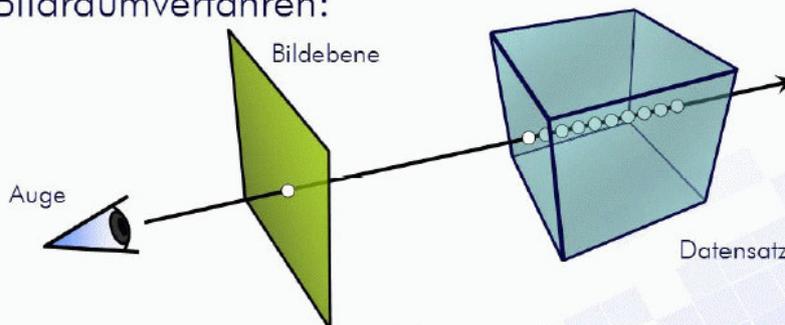
Bestimme den Beitrag des Voxels zum Ergebnisbild



Für jeden Voxel

Ray Casting

Bildraumverfahren:



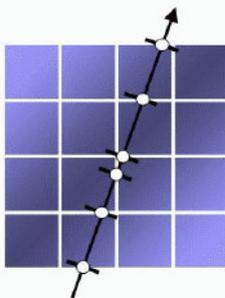
• Numerische Integration

• Neuabtastung

➔ Hoher Rechenaufwand

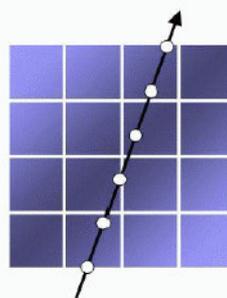
Abtastung (Sampling)

Wie wird entlang des Sehstrahls diskretisiert?



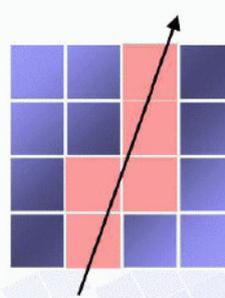
Exakte Bestimmung der Schnittpunkte

Aufwändig



Äquidistante Neuabtastung mit Interpolation

Einfach



Rasterisierung z.B. Bresenham

Einfach, aber ungenau

Integration entlang des Strahls

Was wird integriert?

physikalisch korrekt: Emission und Absorption



Anfangsintensität
(Emission) bei s_0

$$I(s) = I(s_0)$$

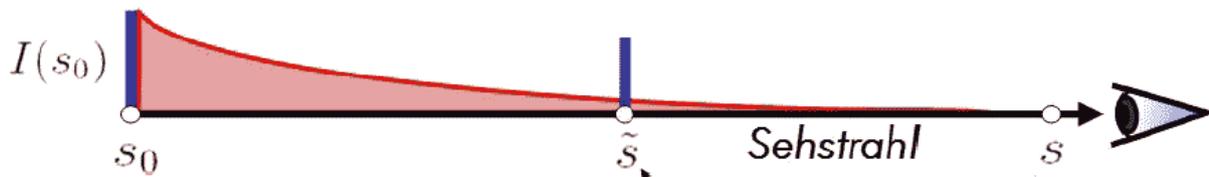
Ohne Absorption würde die Anfangsintensität ohne Verluste am Punkt s ankommen.



$$I(s) = I(s_0) e^{-\tau(s_0, s)}$$

Optische Tiefe τ
Absorption κ

$$\tau(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} \kappa(s) ds.$$

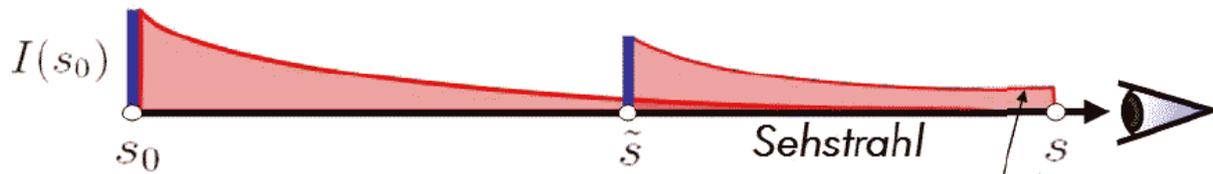


An einem Punkt \tilde{s} entlang des Sehstrahls wird zusätzlich Licht emittiert.

Aktive Emission bei \tilde{s}

$$q(\tilde{s})$$

$$I(s) = I(s_0) e^{-\tau(s_0,s)} +$$



Absorption entlang der Strecke $\tilde{s} - s$

$$q(\tilde{s}) e^{-\tau(\tilde{s},s)}$$

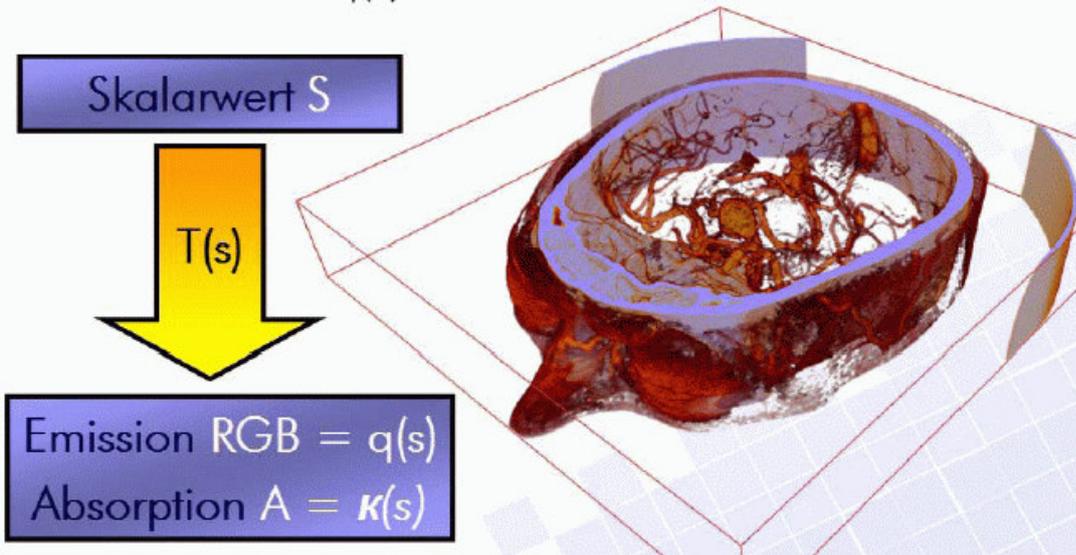
$$I(s) = I(s_0) e^{-\tau(s_0,s)} +$$

An **jedem** Punkt \tilde{s} entlang des Sehstrahls wird zusätzlich Licht emittiert.

$$I(s) = I(s_0) e^{-\tau(s_0,s)} + \int_{s_0}^s q(\tilde{s}) e^{-\tau(\tilde{s},s)} d\tilde{s}$$

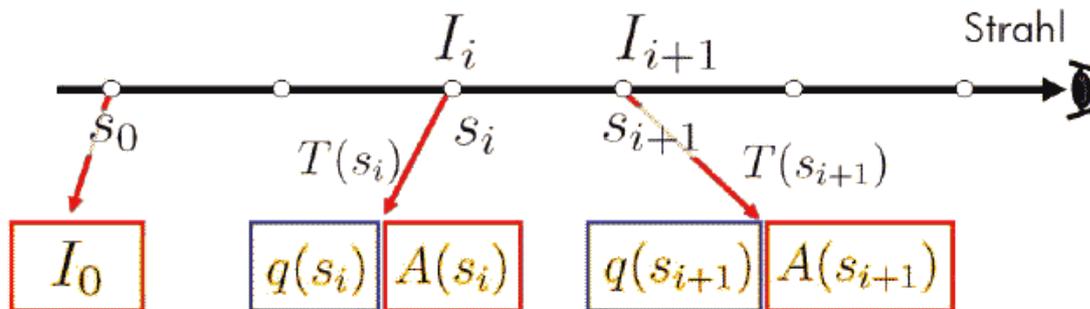
Transferfunktion

Woher bekomme ich Absorption $\kappa(s)$
und Emission $q(s)$?



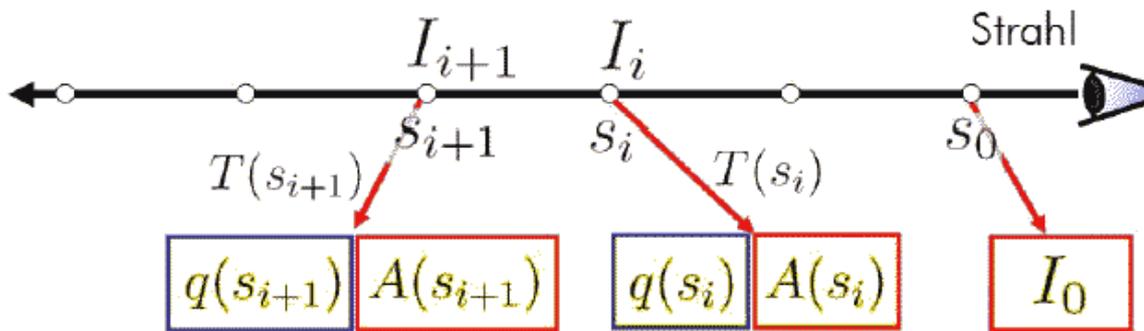
Diskrete Lösung des Integrals

Werte des Skalarfelds an diskreten Punkten entlang des Strahls aus:



Back-to-front Compositing mit $\alpha = A(s_{i+1})$

$$I_{i+1} = \alpha \cdot q(s_{i+1}) + (1 - \alpha) I_i$$
$$= q(s_{i+1}) \text{ OVER } I_i$$



Front-to-back Compositing.

$$I_0 = 0; \quad T_0 = 1;$$

$$I_{i+1} = I_i + T_i \cdot A(s_i) \cdot q(s_i)$$

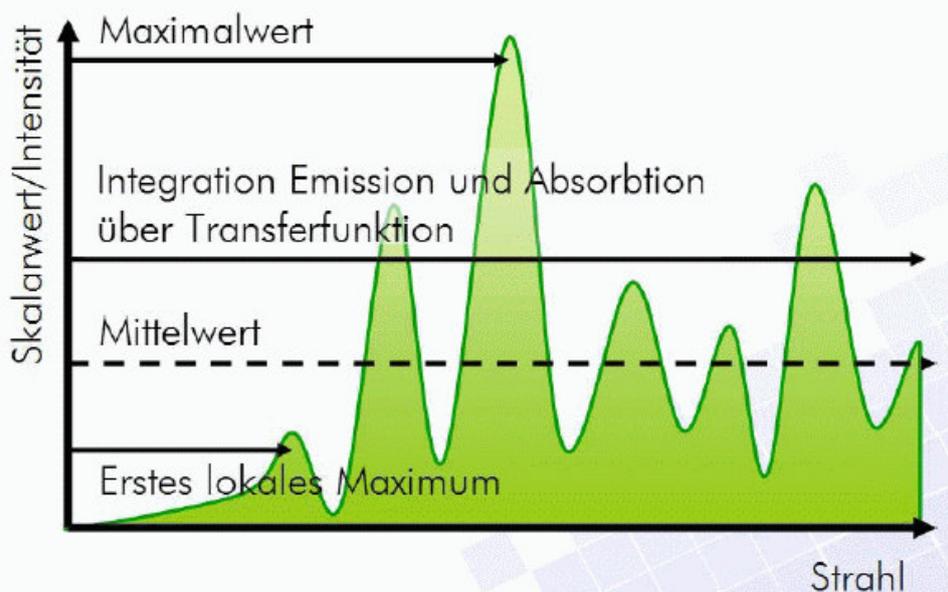
$$T_{i+1} = T_i \cdot (1 - A(s_i))$$

Early Ray Termination

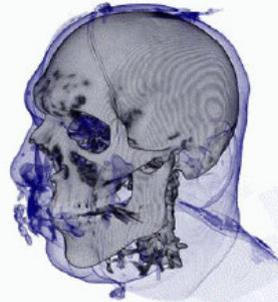
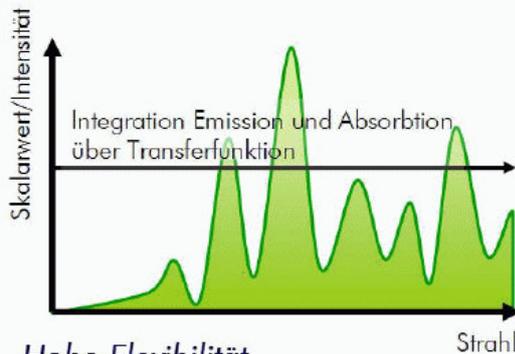
Berechnung abbrechen, wenn

$$T_i \approx 0$$

Alternative Compositing-Verfahren



Compositing - Integration

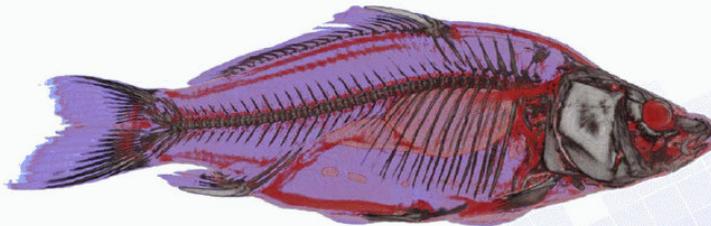


Hohe Flexibilität

- semi-transparente Darstellung, „weiche Kanten“.
- Bereiche im Datensatz können unterschiedlich dargestellt werden.
- **Nachteil:** Einstellung der Transferfunktion ist aufwändig.

Beispiel Transferfunktion

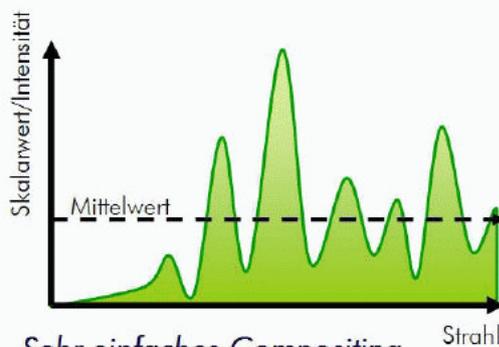
Karpfen (Computertomographie)



Die Transferfunktion erlaubt die **Klassifikation** der Daten.

- Welche Bereiche sollen welche Farbe haben?
- Welche Bereiche sollen transparent/semi-transparent oder opak dargestellt werden?

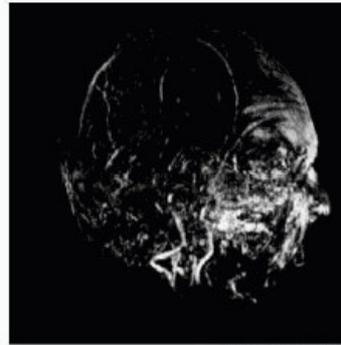
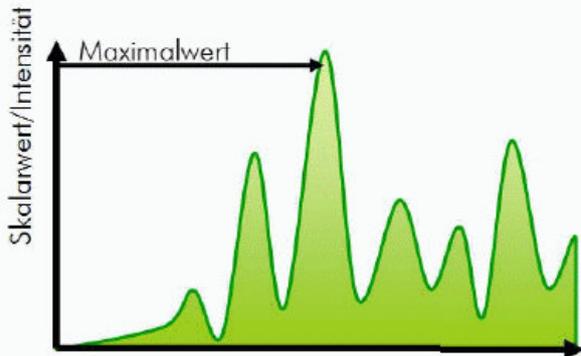
Compositing - Mittelwert



Sehr einfaches Compositing

- Ergebnisbilder sind **Röntgenbildern** sehr ähnlich.
- **Nachteil:** Geringe Flexibilität, keine Klassifikation
- **Vorteil:** Einstellung einer Transferfunktion ist nicht notwendig.

Compositing - MIP



Maximum Intensity Projection (MIP)

- gut geeignet für Blutgefäße mit Kontrastmittel.
- **Vorteil:** Einstellung einer Transferfunktion nicht nötig
- **Nachteil:** Irreführende Tiefenrelationen!
(Tiefeninformation geht verloren!)

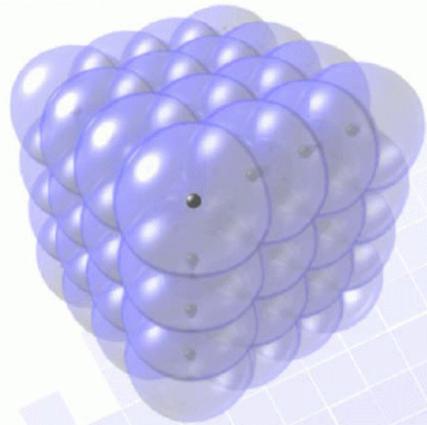
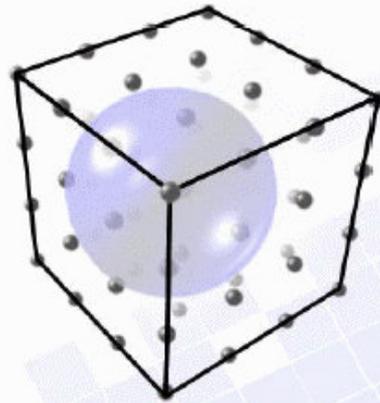
Zusammenfassung Ray-Casting

- **Bildraumverfahren:** Bestimme einen Strahl für jeden Pixel des Ergebnisbildes
 - **Berechne die Farbe des Pixels mittels**
 - Integration von Emission und Absorption
 - Maximum Intensity Projektion ODER
 - Summation der Skalarwerte
 - **Diskretisiere entlang des Strahls**
 - Exakte Bestimmung der Schnittpunkte
 - Resampling äquidistant ODER
 - Rasterisierung (z.B. 3D Bresenham)

Objektraumverfahren

Jeder diskrete Datenpunkt im Volumen beeinflusst die optischen Eigenschaften des Raumes in einem bestimmten Bereich.

Dieser Bereich wird durch seine *charakteristische Funktion* $h(x, y, z)$ beschrieben.
(z.B. durch eine Kugel)



Das komplette Skalarfeld lässt sich beschreiben als:

$$S(\vec{x}) = \sum_{i,j,k} h(\vec{x} - \vec{x}_{ijk}) I_{ijk}$$

Die Transferfunktion wird nun angewendet: $I_{ijk} \rightarrow q_{ijk}$

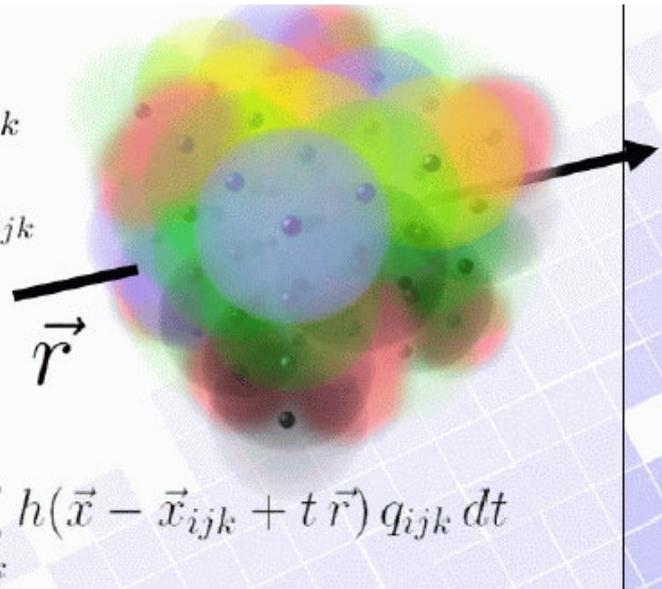
$$S_q(\vec{x}) = \sum_{i,j,k} h(\vec{x} - \vec{x}_{ijk}) q_{ijk}$$

Das Integral der Emissionen entlang eines Sehstrahles:

$$\int S_q(\vec{x} + t \vec{r}) dt = \int \sum_{i,j,k} h(\vec{x} - \vec{x}_{ijk} + t \vec{r}) q_{ijk} dt$$

⇒

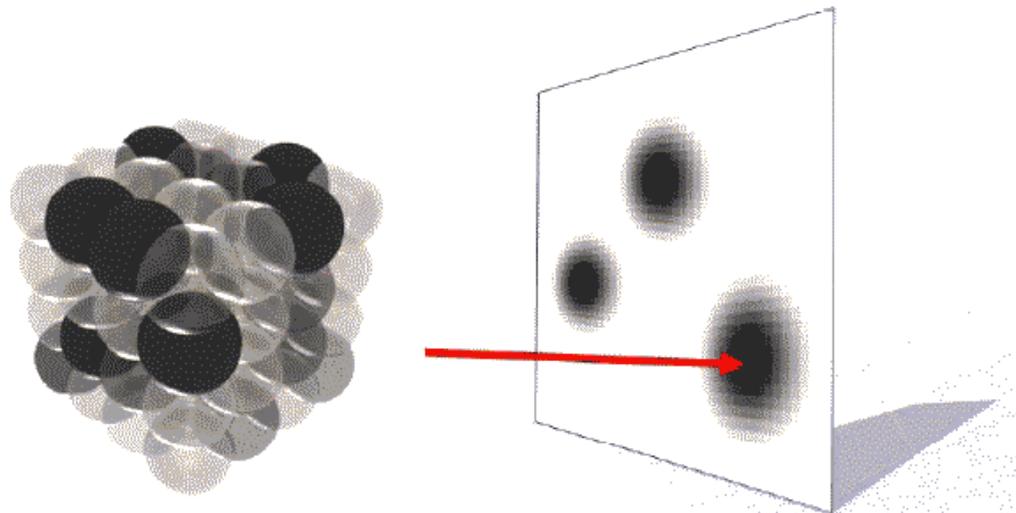
$$\int S_q(\vec{x} + t \vec{r}) dt = \sum_{i,j,k} \left(\int h(\vec{x} - \vec{x}_{ijk} + t \vec{r}) dt \cdot q_{ijk} \right)$$



Splatting

$$\int S_q(\vec{x} + t \vec{r}) dt = \sum_{i,j,k} \left(\int h(\vec{x} - \vec{x}_{ijk} + t \vec{r}) dt \cdot q_{ijk} \right)$$

Der Beitrag eines Abtastpunkts zum Ergebnisbild (**footprint**)



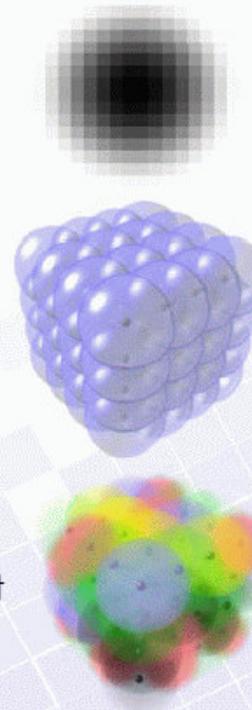
Splatting-Algorithmus

Das Abbild („footprint“) eines einzelnen Voxels kann vorberechnet, und als eine Maske gespeichert werden.

Alle Voxel werden in der Reihenfolge von hinten nach vorne auf die Bildebene projiziert.

Für jeden Voxel wird nun

- der Mittelpunkt auf die Bildebene projiziert,
- die Maske mit dem Emissionswert gewichtet
- mit dem over-Operator verknüpft.



Der Shear-Warp Algorithmus

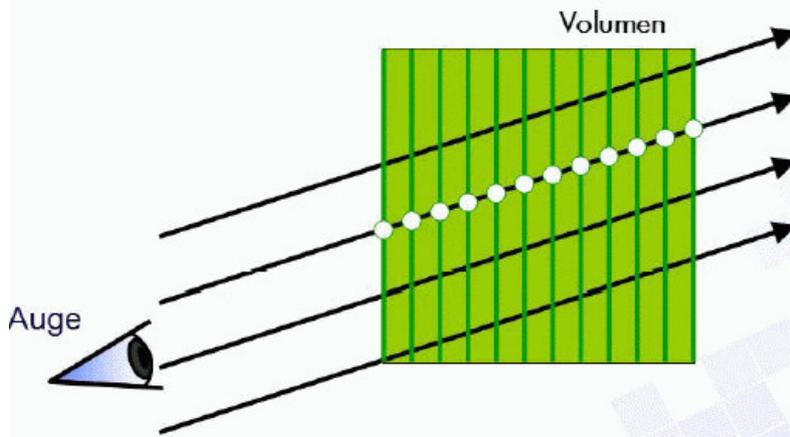
Hybridverfahren: Mischung zwischen Bildraum- und Objektraumverfahren

☐ Das schnellste der reinen Software-Verfahren.

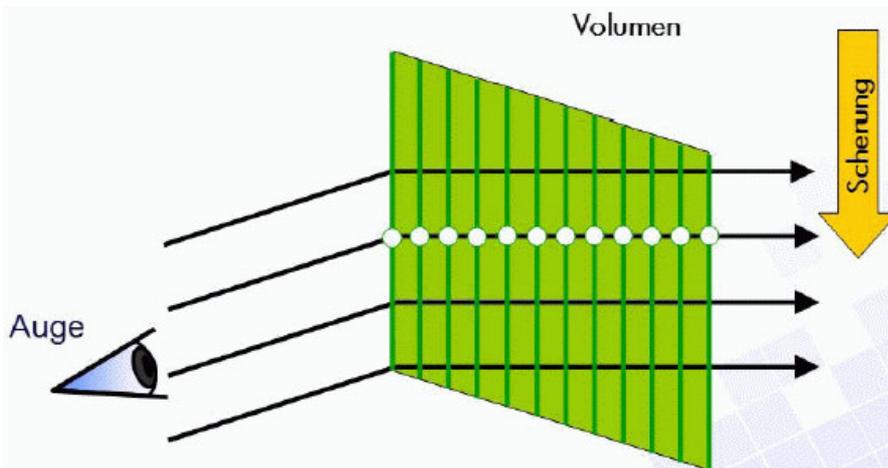
Berechnung des Ergebnisbildes in zwei Schritten:

- **Objektraumverfahren:** Erzeuge zunächst ein verzerrtes Zwischenbild
- **Bildraumverfahren:** Entzerre das Zwischenbild in einem 2D Nachbearbeitungsschritt

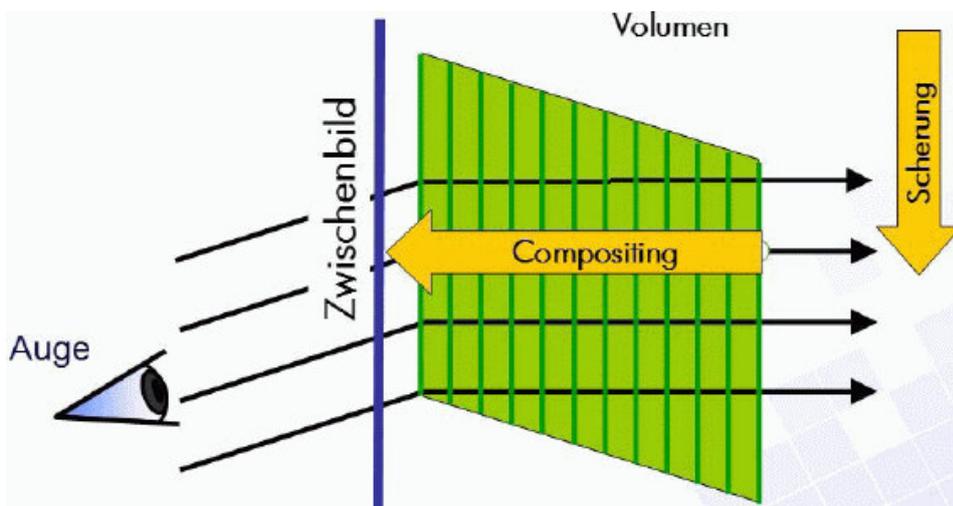
1. Fall: Parallelprojektion



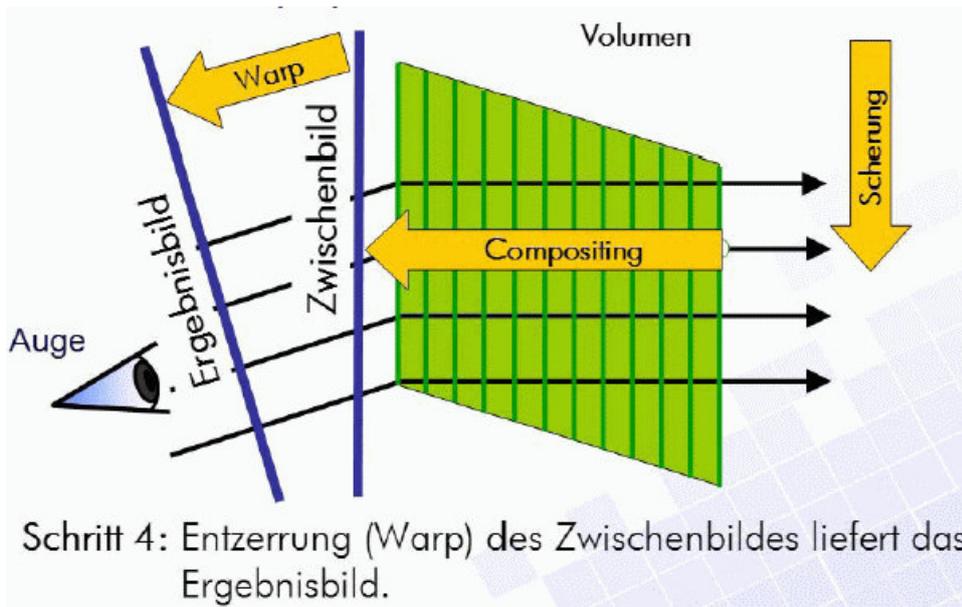
Schritt 1: Zerlege das Volumen in achsenparallele Schichten



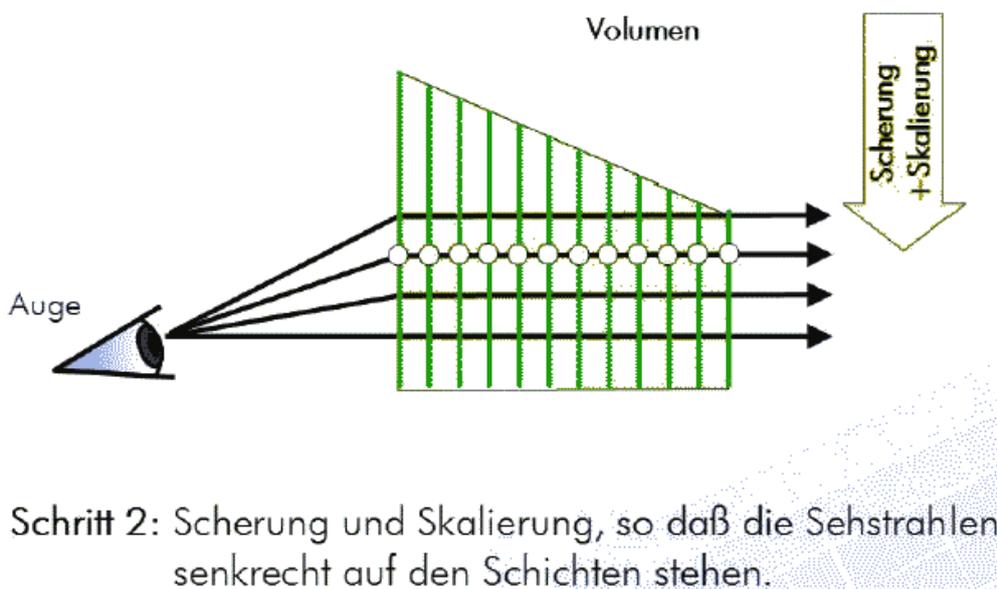
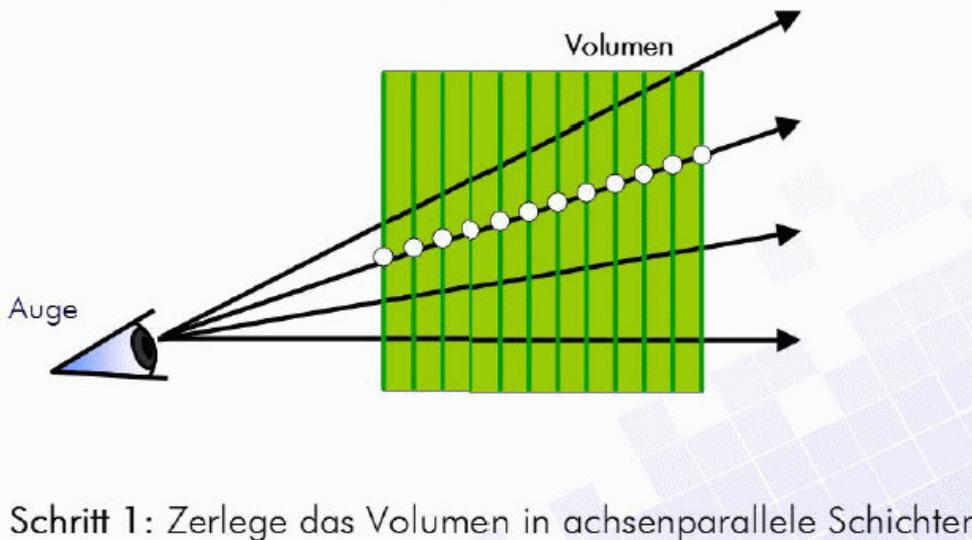
Schritt 2: Bestimme eine Scherung des Raumes so daß die Sehstrahlen senkrecht auf den Schichten stehen.

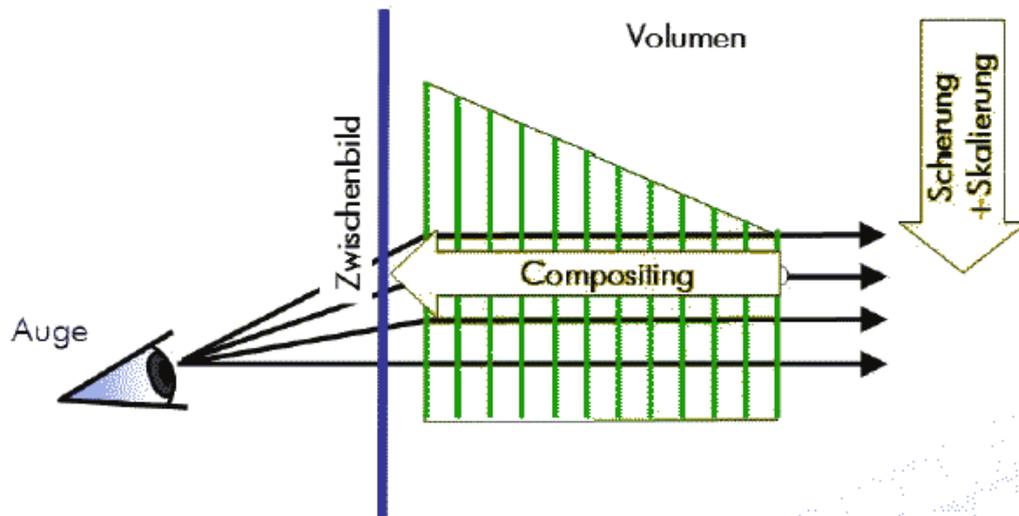


Schritt 3: Erzeugung eines (verzerrten) Bildes als Zwischenergebnis

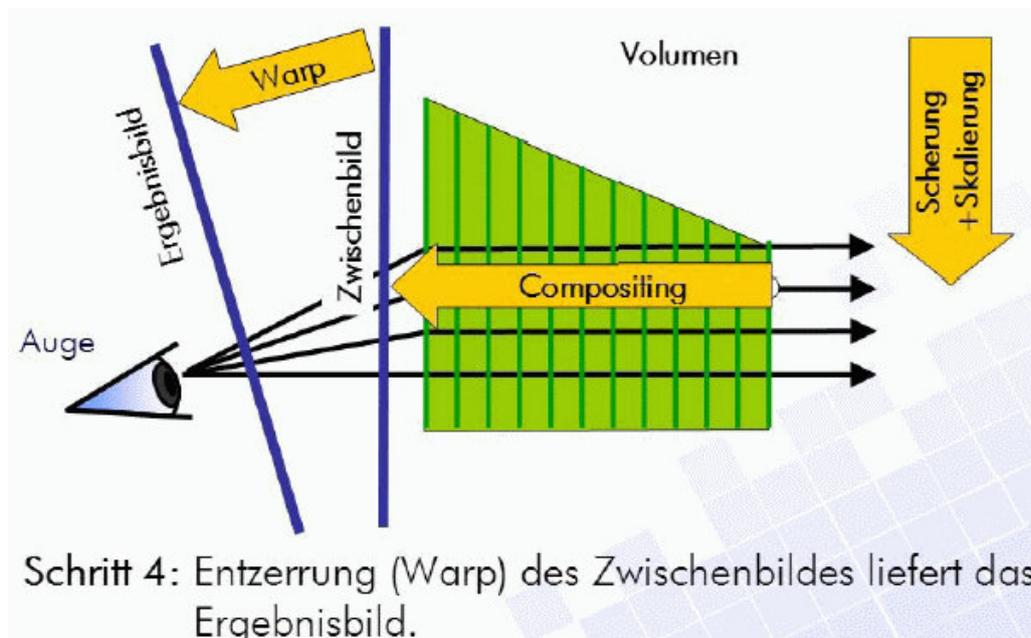


2. Fall: Perspektivische Projektion





Schritt 3: Erzeugung eines (verzerrten) Bildes als Zwischenergebnis



Schritt 4: Entzerrung (Warp) des Zwischenbildes liefert das Ergebnisbild.

Mathematisch gesehen:

- Faktorisierung der Viewing Matrix in eine 3D-Scherung und eine 2D-Verzerrung

$$\mathbf{M}_{\text{view}} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{M}_{\text{warp}}$$

\mathbf{M}_{view} = Viewing Matrix

\mathbf{S} = 3D Scherung

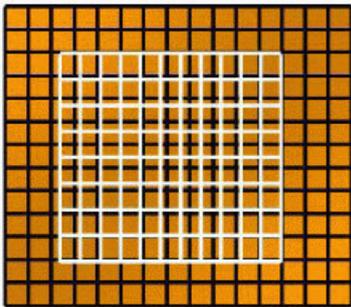
\mathbf{M}_{warp} = 2D Verzerrung

\mathbf{P} = Permutationsmatrix

Was bringt das ganze?

Nützliche Eigenschaften:

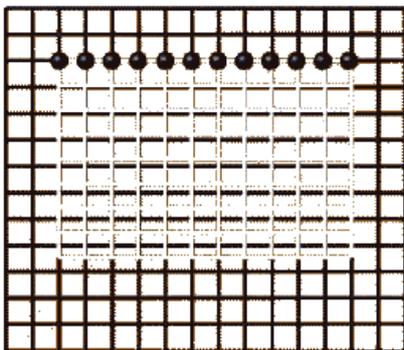
1. Scanlines der Pixel im Zwischenbild verlaufen parallel zu den Scanlines der Voxel im Datensatz.
2. Alle Voxel in einer Schicht werden mit dem gleichen Faktor skaliert.



Vorteil: Interpolationsgewichte müssen nicht für jeden Punkt einzeln berechnet werden.

Sie können Zeilen- und Spaltenweise berechnet werden.

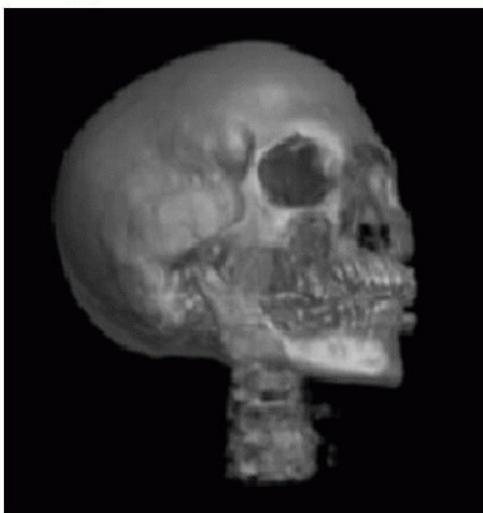
3. *Nur bei Parallelprojektion:* Alle Voxelschichten haben den gleichen Skalierungsfaktor.



Dieser Faktor kann frei gewählt werden.

Wähle den Faktor so, dass für eine bestimmte Voxel-Scanline eine 1-zu-1 Abbildung zwischen Voxeln und Pixeln im Zwischenbild gibt.

Vergleich

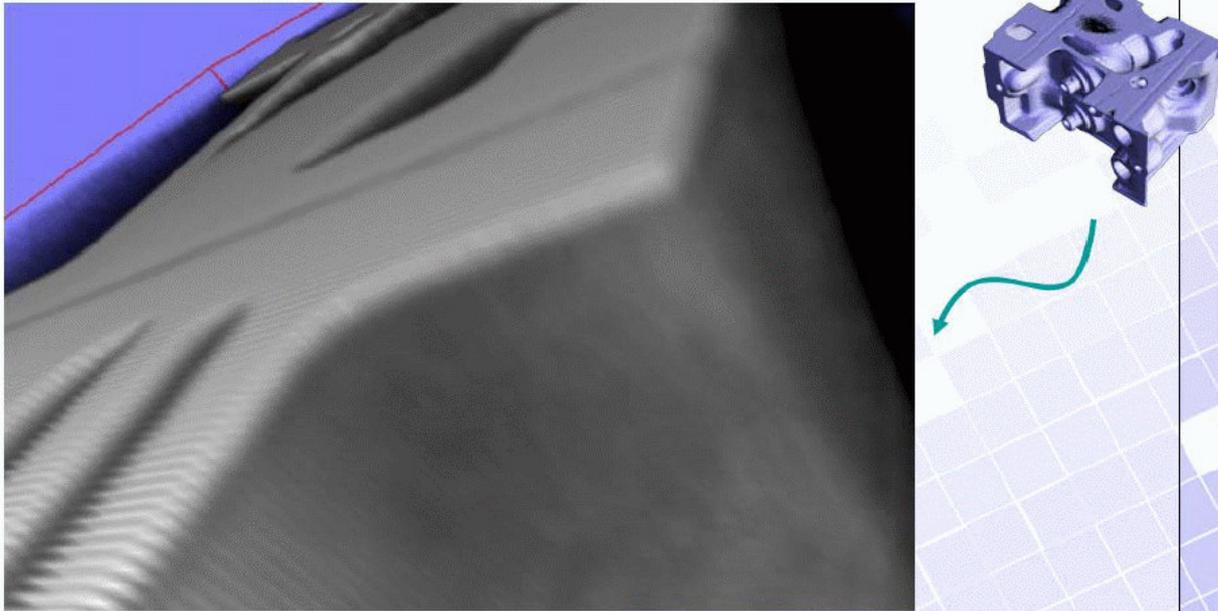


Shear-Warp



Ray-Casting

- **Nachteil – Visuelle Bildartefakte (bei starkem Zoom)**



Zusammenfassung Shear Warp

Mischung aus Bildraum- und Objektraumverfahren:

1. Erzeuge ein verzerrtes Zwischenbild,
2. Entzerre dieses anschließend in einem 2D Schritt.

- **Zerlege die Viewing-Matrix in**

- Scherung (+ Skalierung)
- Permutationsmatrix
- 2D Warp-Matrix

- **Vorteile:**

- Effizientere Interpolationsberechnung
- Schnellstes Software-Verfahren

- **Nachteile:**

- 3-facher Speicherbedarf für 3 Schichtstapel.
- visuelle Artefakte

(Rezk-Salama, o.J.)