

# 3D-Stadtmodelle

Anwendungen, Rekonstruktion und  
kartographische Generalisierung

**Jun.-Prof. Dr. Martin Kada**

Universität Osnabrück

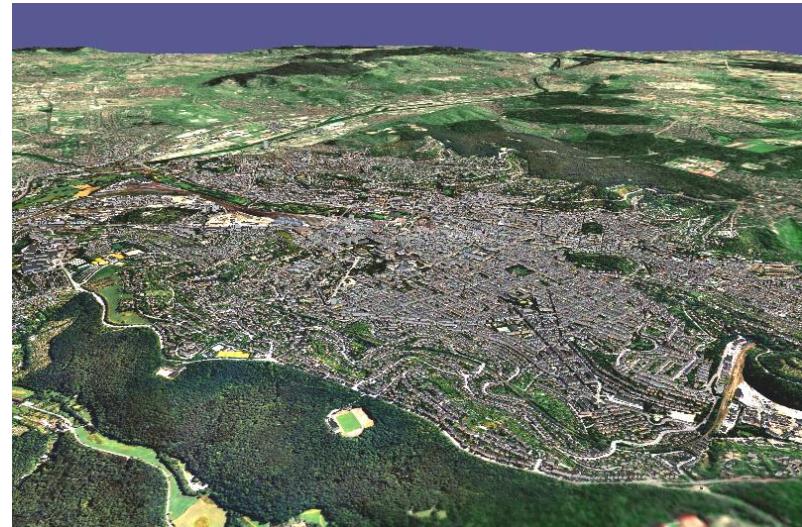
Institut für Geoinformatik und Fernerkundung

## ■ Hannover



## ■ Stuttgart

- ◆ Landschaftsmodell (50 km x 50 km)
  - ◆ Digitales Geländemodell
  - ◆ Luft- und Satellitenbilder
    - 1m Bodenauflösung
- ◆ 180.000 3D-Gebäudemodelle
  - ◆ Geometrie vom  
Stadtmessungsamt Stuttgart
  - ◆ Manuelle Texturierung von  
über 1.000 Gebäuden
    - 7.000 terrestrische Fotos
    - 26 Personenmonate
    - Reduzierte Auflösung zur  
Echtzeitvisualisierung
    - Zufällige Farbe für andere  
Gebäude





## ■ Berlin

- ◆ 472.000 Gebäude auf 857km<sup>2</sup> Fläche
- ◆ Erzeugung in ca. 9 Monaten
  - ◆ Automationsgrad:  
70% - 80% innerstädtischen Bereich  
80% - 85% in Wohngebieten
- ◆ Zur Texturierung wurden ca. 100.000 Schrägluftaufnahmen verwendet
- ◆ 80 Landmarken per Hand modelliert
  - ◆ 5 Gebäude mit Innenräumen:
    - Olympiastadion
    - Sony Center
    - Reichstag
    - DZ Bank
    - Berliner Hauptbahnhof

# 3D-Stadtmodelle



## ■ Berlin



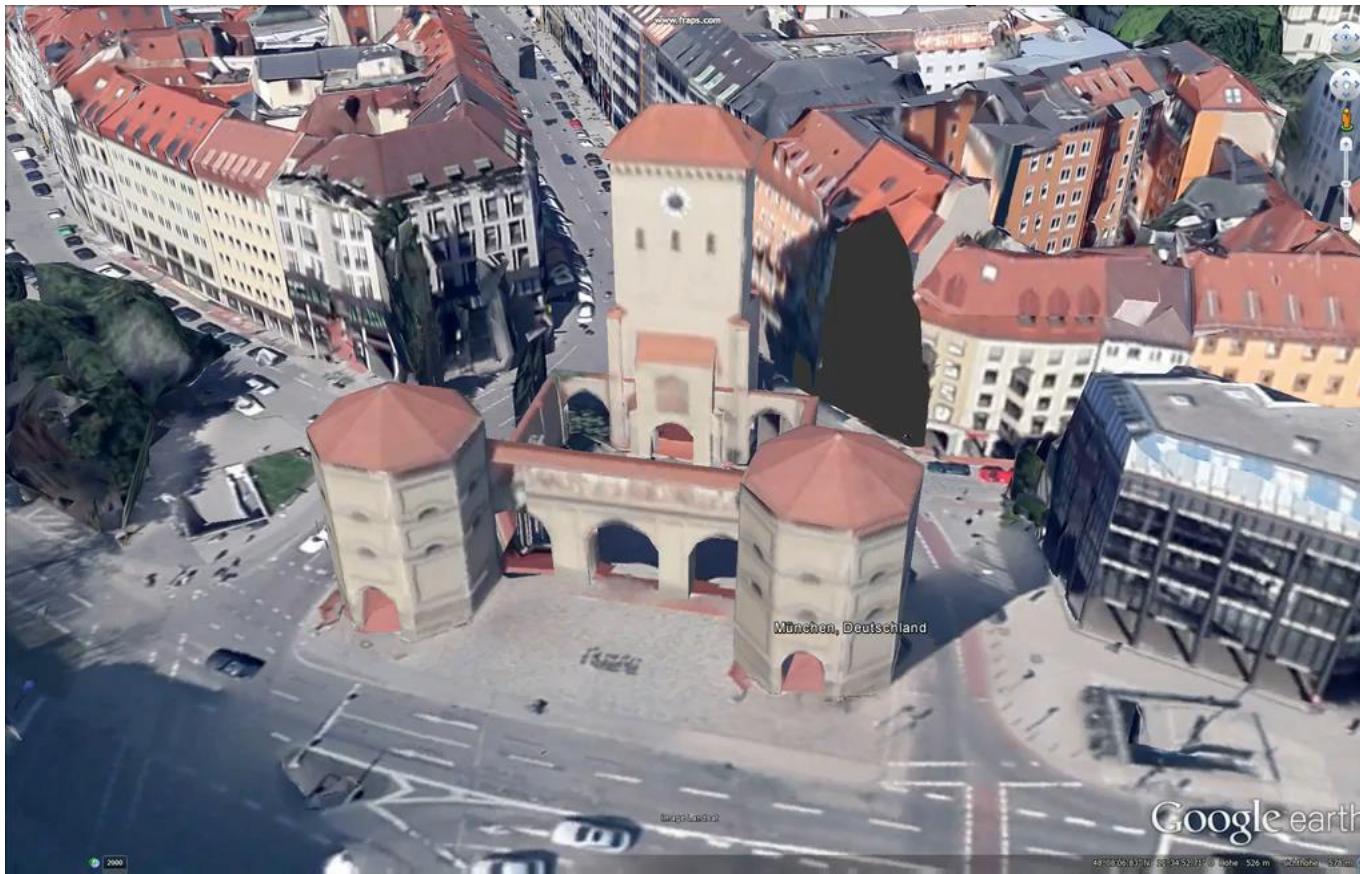
## ■ Frankfurt am Main



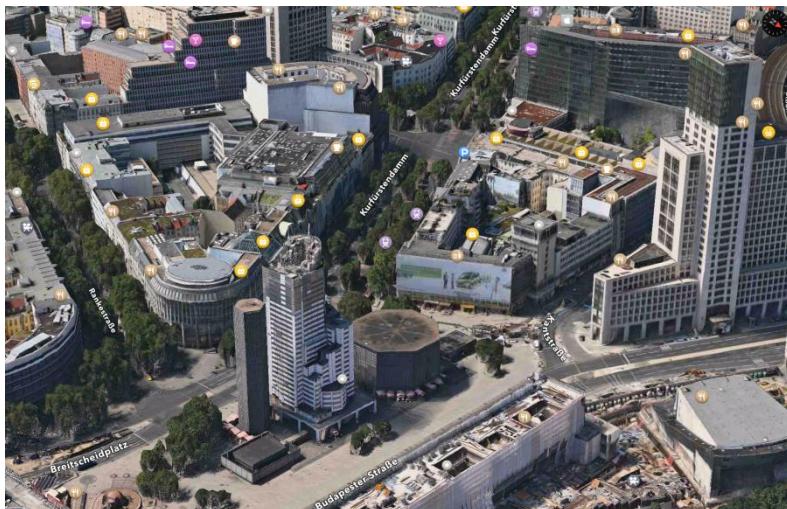
## ■ Google Earth



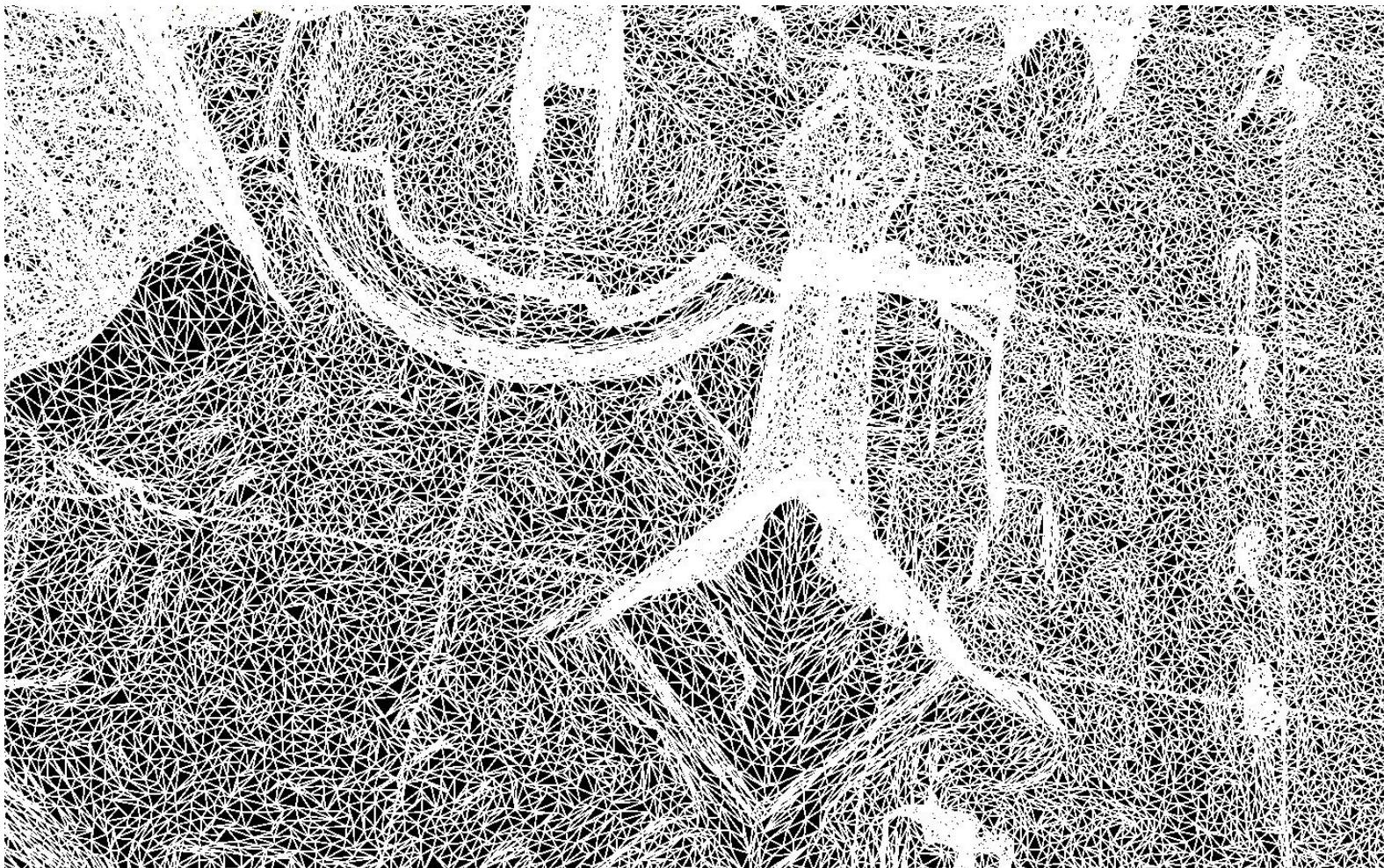
## ■ München (Google Earth)



## ■ Apple 3D Maps (C3 Technologies)



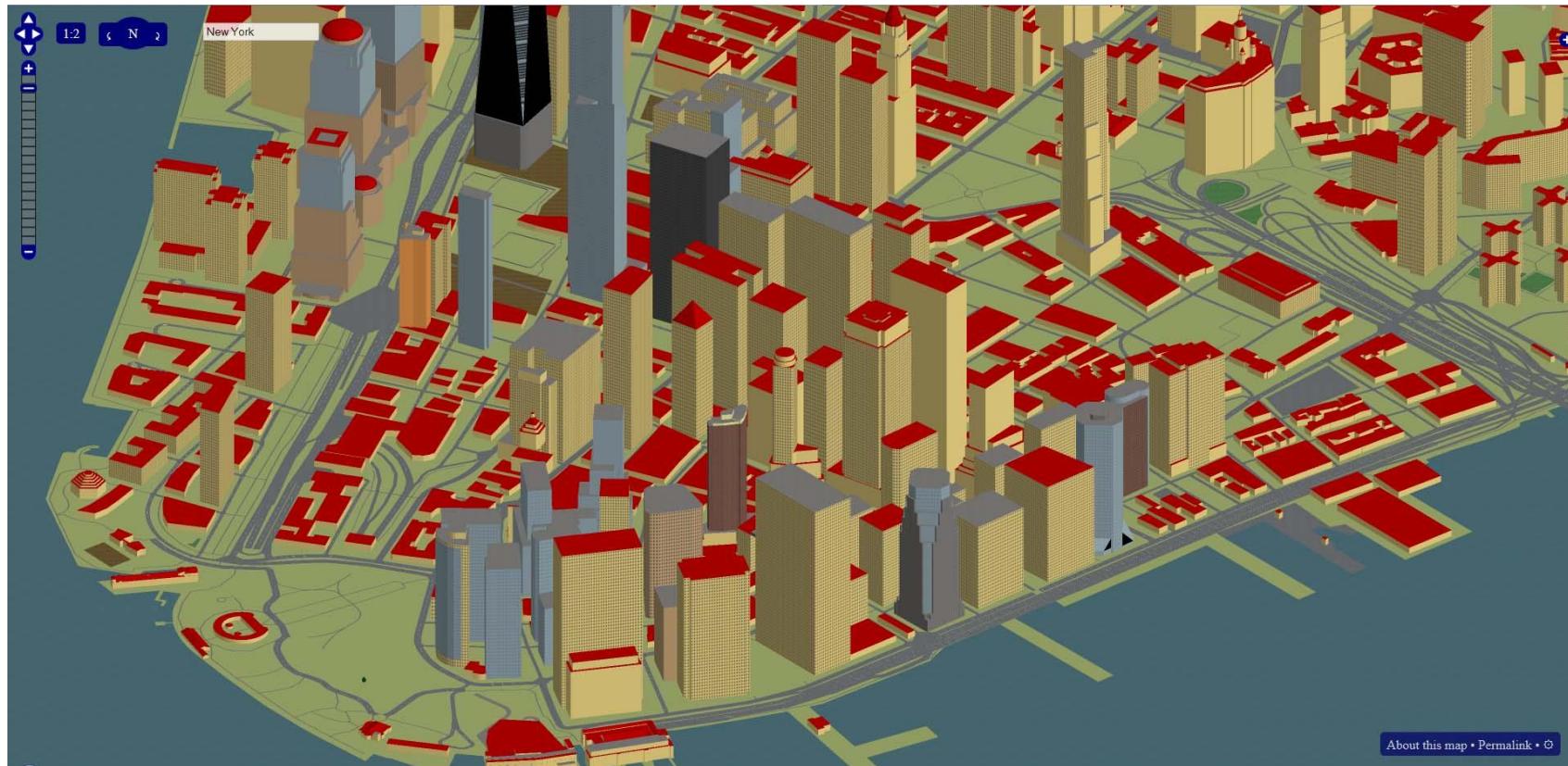
- Apple 3D Maps (C3 Technologies)



## ■ Microsoft Bing Maps



## ■ OSM-3D



- Beschreibt und georeferenziert die dreidimensionale Ausformung eines urbanen Teilbereichs der Erdoberfläche einschließlich aller darauf befindlicher (statischer) Objekte (in digitaler Form)

- Komponenten:

- ◆ Digitales Geländemodell (DGM)
  - ◆ Erdoberfläche ohne topographische Objekte
  - ◆ Satellitenbildern, Orthofotos, Karten
- ◆ 3D-Gebäudemodelle
  - ◆ (Foto-)Texturen



- ◆ Sonstige Bauwerke, Vegetation, Stadtmöblierung etc.

- Standortplanung von Mobilfunkantennen
- Stadtmarketing & Tourismusförderung
- Sichtbarkeitsanalysen
  - ◆ Von wo sind geplante Neubauten sichtbar?
- Verschattungsanalysen
  - ◆ Wie ist die Verschattung von Neubauten?
  - ◆ Stadtklima
- Lärm- und Schadstoffausbreitung
- Solarpotential
- Ausbildung und Training
- Entscheidungs- und Planungsinstrument

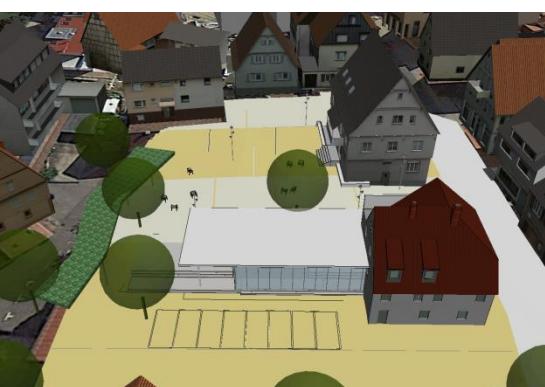


Stadt Stuttgart



Solarkataster Berlin

- Bürgerentscheid *Bührerhaus (mit Platz) in Sielmingen*

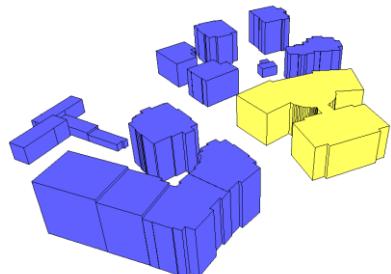


# Detailstufen nach CityGML

- 3D-Stadtmodelle können in unterschiedlichen Detailstufen existieren
  - ◆ Aufgrund der Erfassungsmethode und den unterschiedlichen Anforderungen der Anwendungen



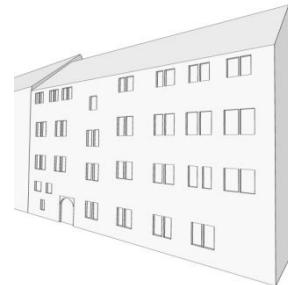
LOD 0 –  
Geländemodell



LOD 1 – Gebäude  
als Blockmodelle



LOD 2 – Modelle mit  
expliziter Dachstruktur

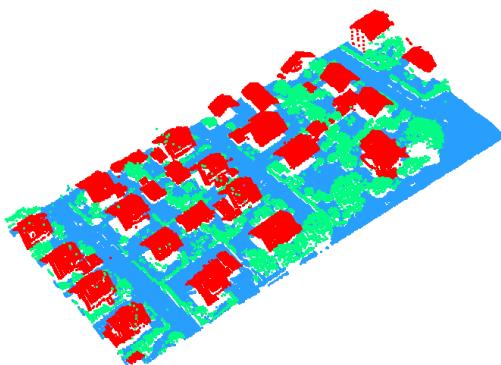


LOD 3 –  
Detaillierte  
Fassaden

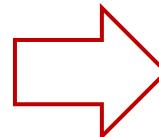


LOD 4 –  
Innenräume

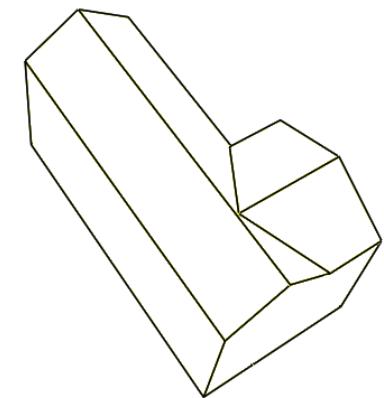
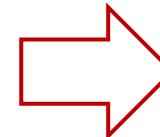
- 3D-Stadtmodelle entstehen vorwiegend
  - ◆ Semi-automatisch – Operateur mit Unterstützung dedizierter Software
    - ◆ Photogrammetrische Stereobildauswertung
  - ◆ Vollautomatisch – **Rekonstruktionsverfahren**
  - ◆ Landmarken werden oft manuell mit 3D-Modellierungssoftware erstellt
- Als Datengrundlage dienen luftgestützt erfasste (3D-)Punktwolken
  - ◆ Laserscanning
  - ◆ Photogrammetrische (Mehrbild-)Auswertung



Klassifizierung



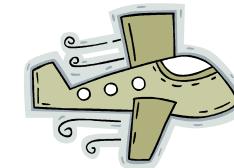
Gebäudeextraktion



Gebäude-  
rekonstruktion

- Flugzeuggetragenes Laserscanning

- ◆ *LiDAR* (engl. *Light Detection and Ranging*)
  - ◆ *Airborne laser scanning (ALS)*
  - ◆ Laseraltimetrie



- Erfassung von Geometrie sichtbarer Oberflächen mittels **Laufzeitmessung** von Laserlicht

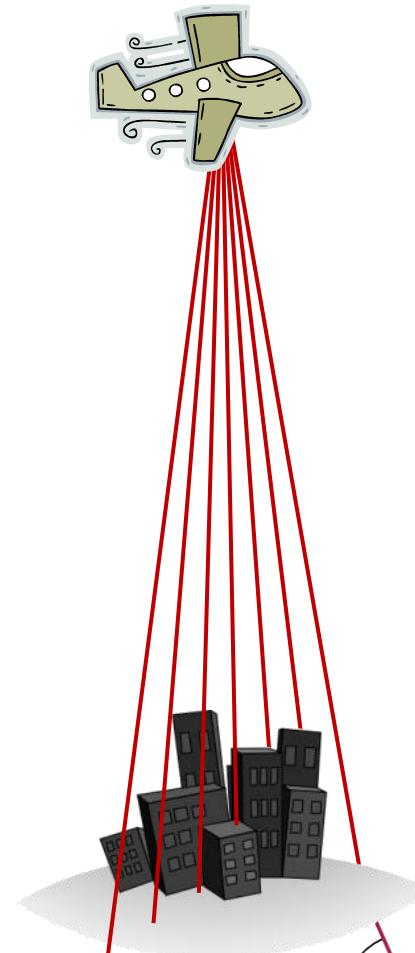
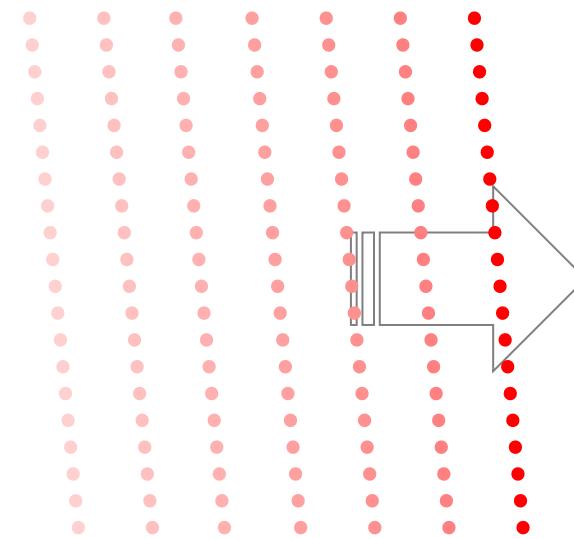
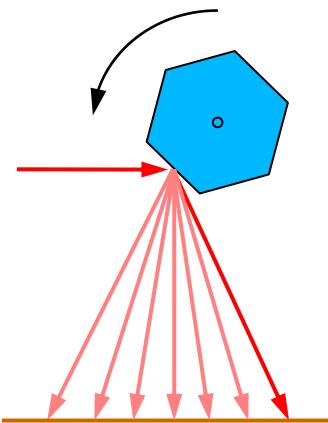
- ◆ Licht bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit c
    - ◆  $c = 299\ 792\ 458 \text{ m/s}$  im Vakuum
    - ◆ In Materie um den Brechungsindex  $n (>1)$  langsamer, d.h.  $c_M = c/n$ 
      - ◆  $n \approx 1,00025$  in Luft
    - ◆ Durch Messung der Zeit  $\tau$  vom Sender zum Objekt und wieder zurück ergibt sich die Strecke  $\rho$

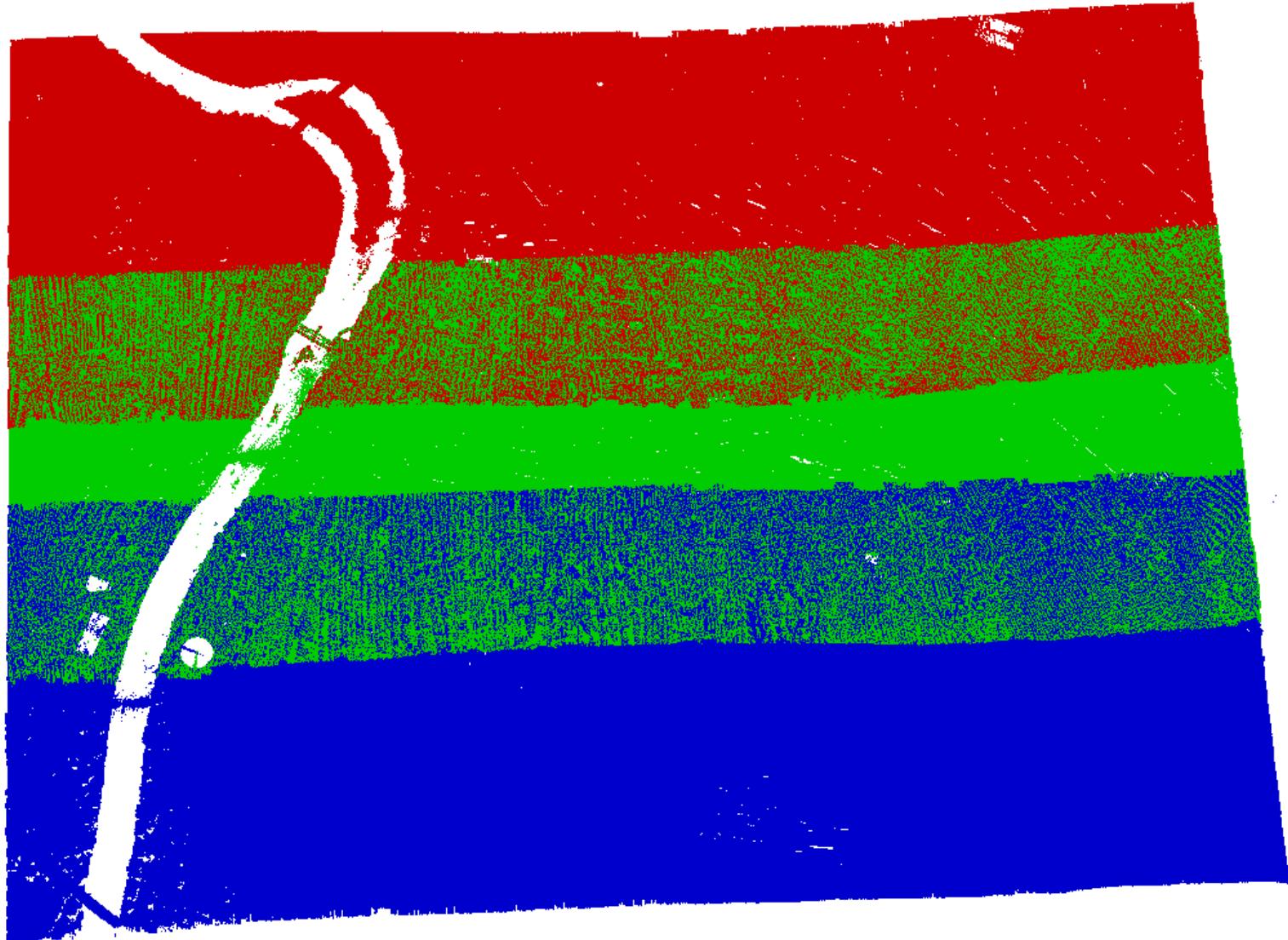
$$\rho = \frac{c}{n} \frac{\tau}{2}$$

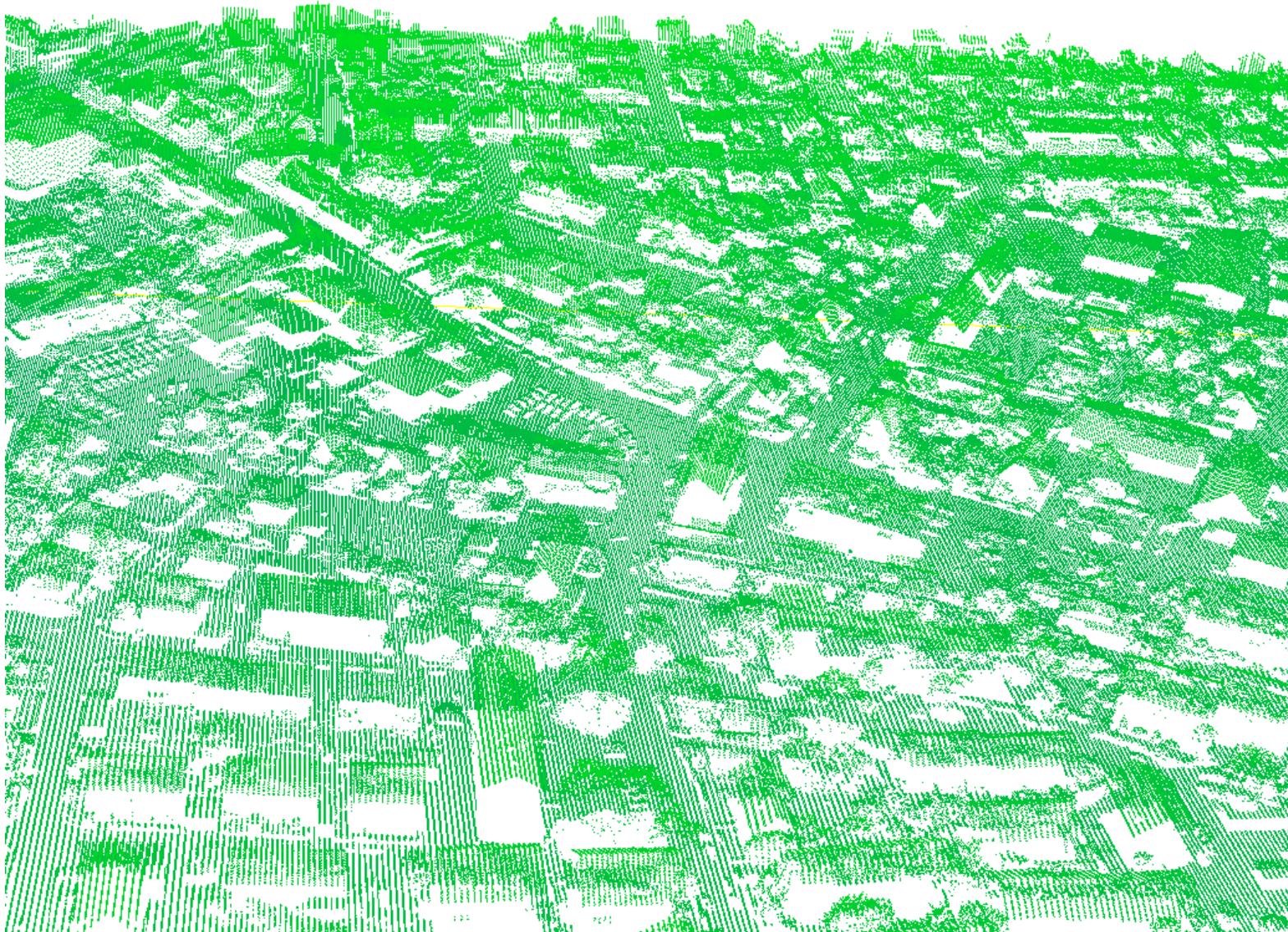


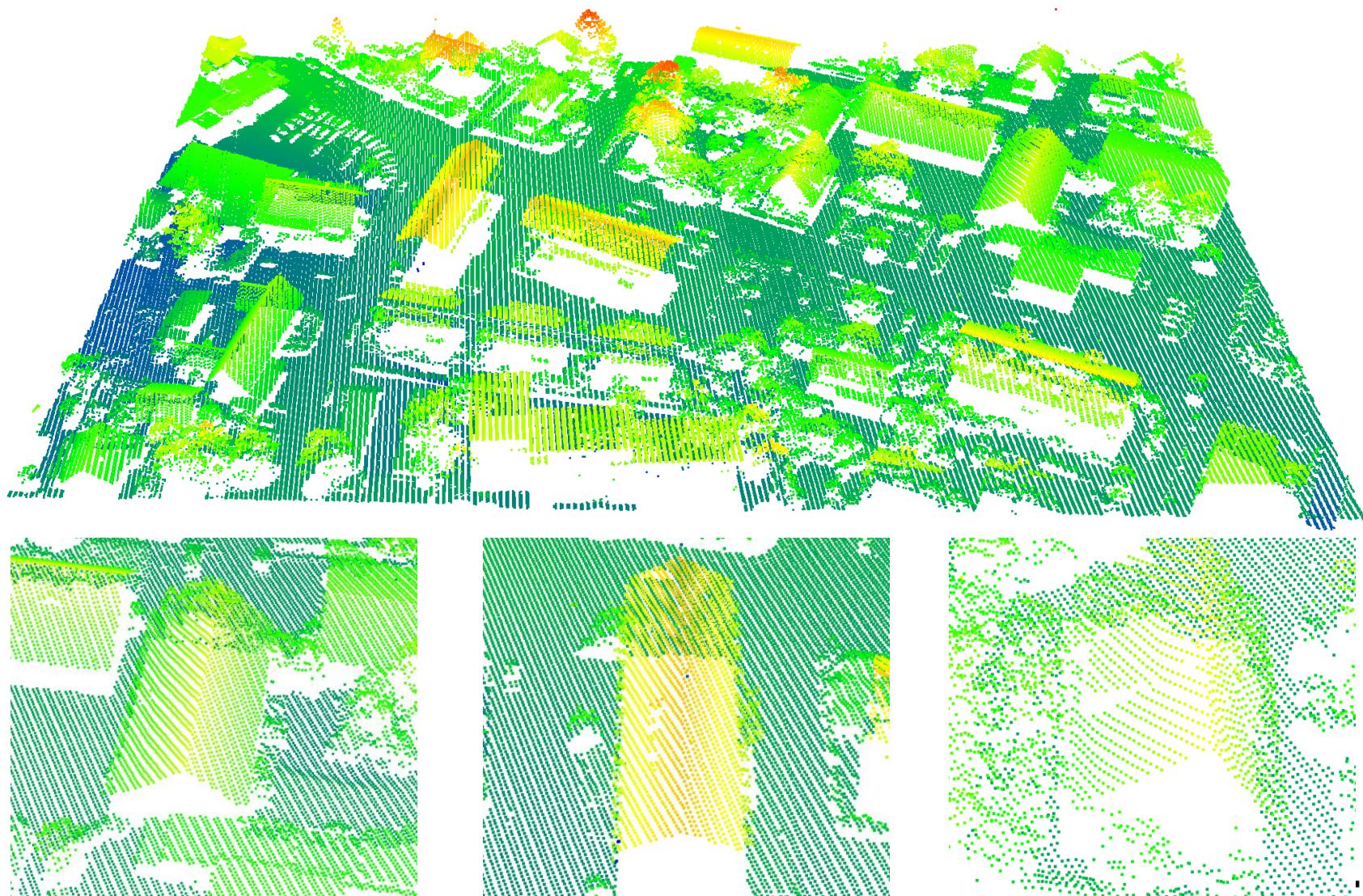
- Flächendeckende Erfassung durch die Bewegung des Flugzeugs und Ablenkung des Laserstrahls senkrecht zur Flugrichtung

Rotierendes  
Prisma









- Multibildauswertung (Photogrammetrie)



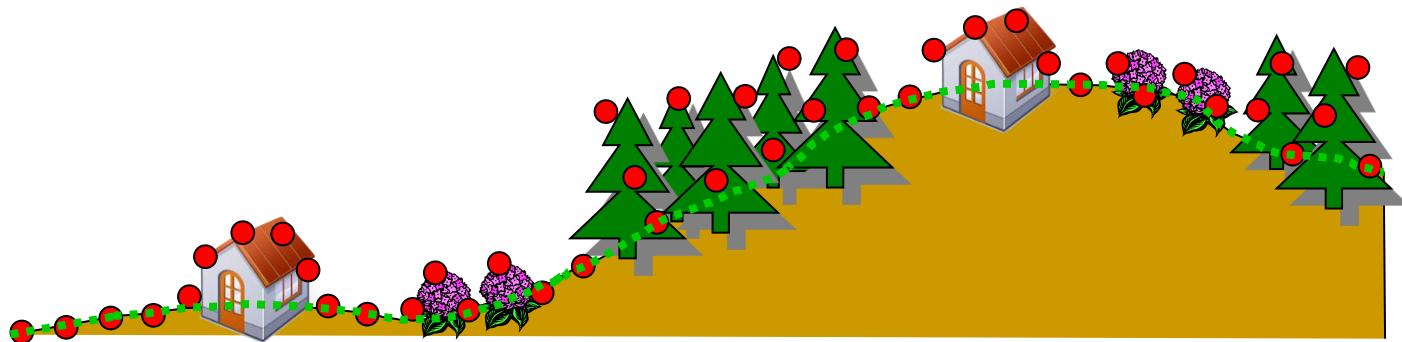
- Multibildauswertung (Photogrammetrie)



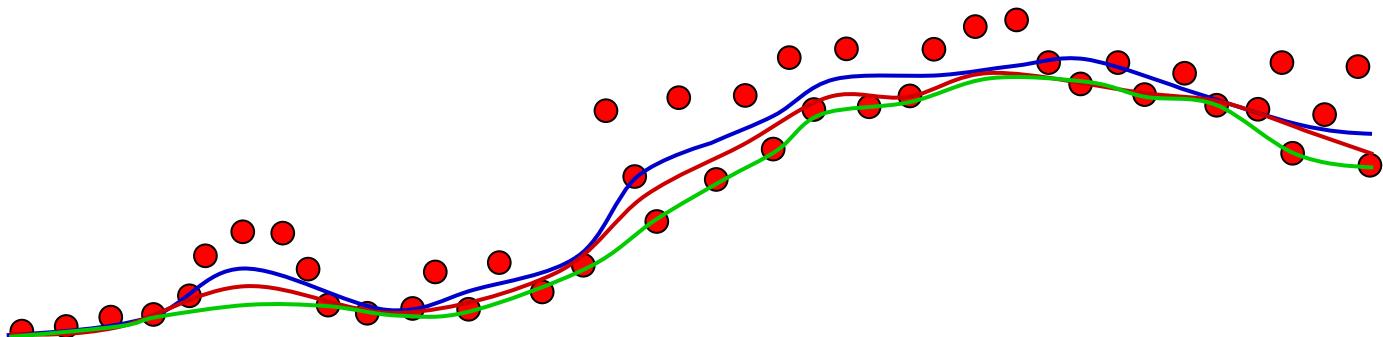
- Aktuelle (Luftbild-)Befliegung der Stadt Berlin:
  - ◆ **890 km<sup>2</sup>** Abdeckung
  - ◆ **100 TB** Bilddaten (mit Schrägluft- und Infrarotbildern)
  - ◆ Daraus **90 Mrd. 3D-Punkte** mit **10 cm Rasterdichte** abgeleitet
    - ◆ (x,y,z)-Koordinaten + Farbe → 16 Bytes pro Punkt → **1,3 TB**
  - ◆ Geliefert auf **50 Festplatten**



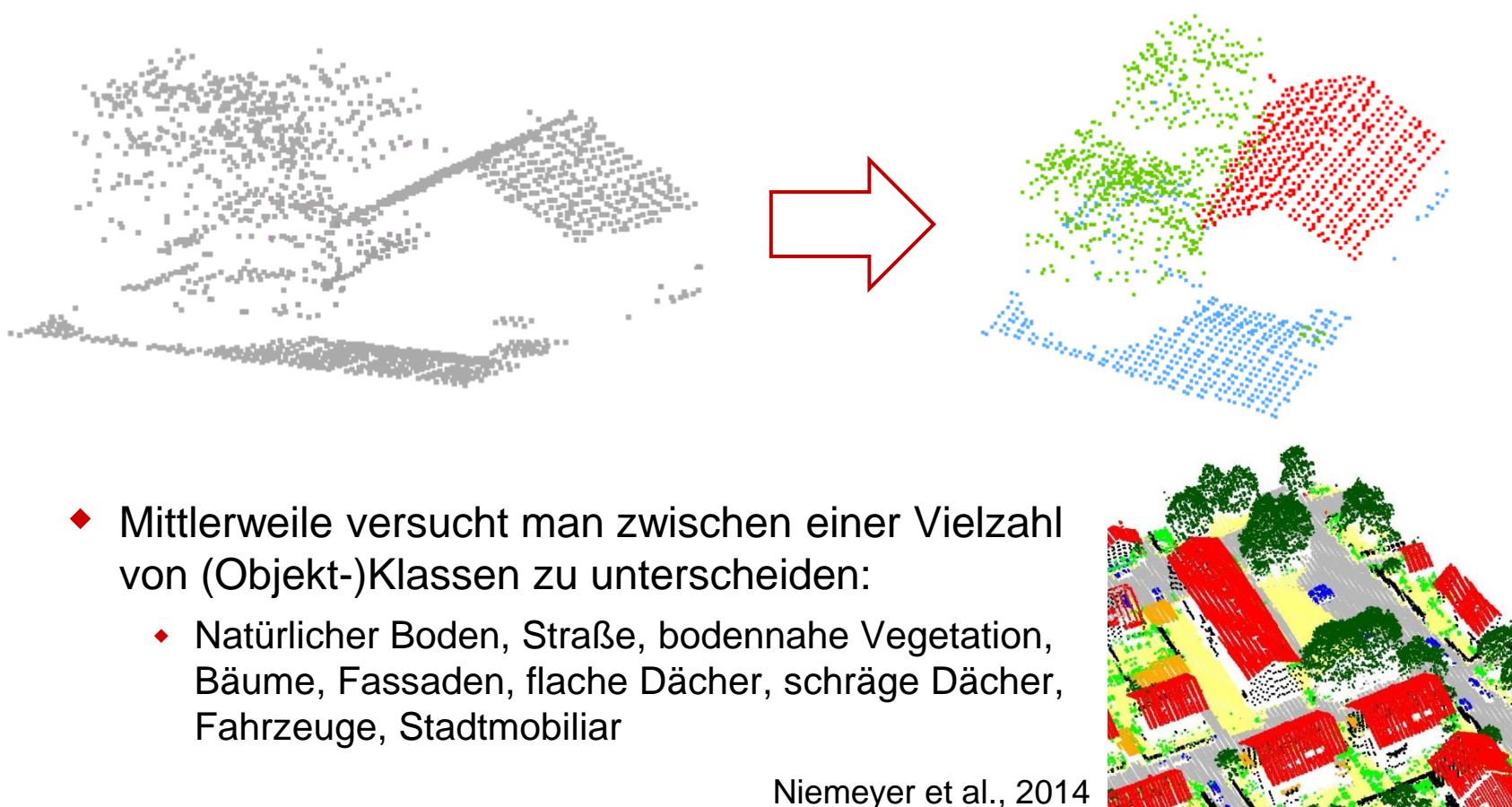
- Erzeugung eines digitalen Geländemodells (DGM)



- ◆ **Schrittweise Interpolation** der Punkte mit einem „*biegsamen*“ Flächenmodell **mit individueller Punktgewichtung**
  - ◆ Punkte über Fläche → geringes Gewicht
  - ◆ Punkte an oder unter Fläche → hohes Gewicht

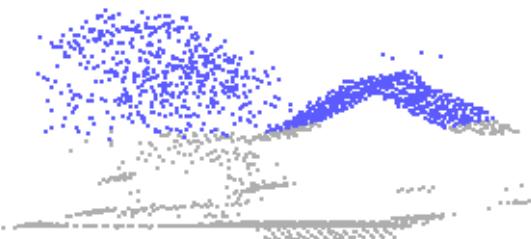
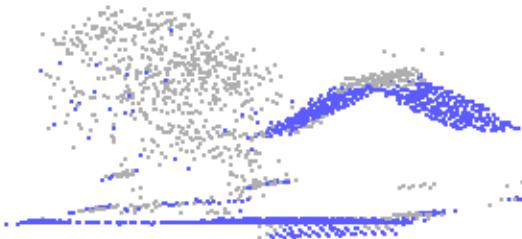
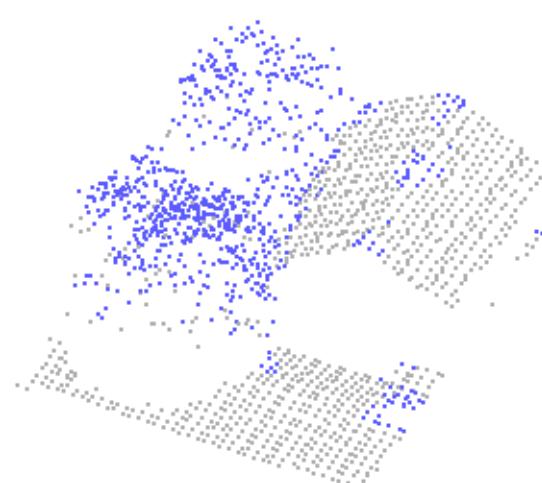
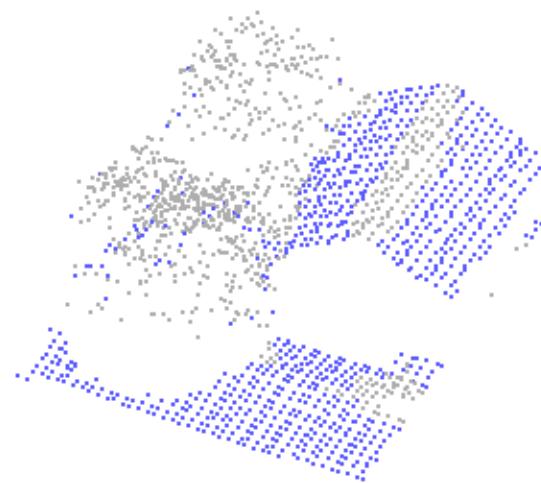
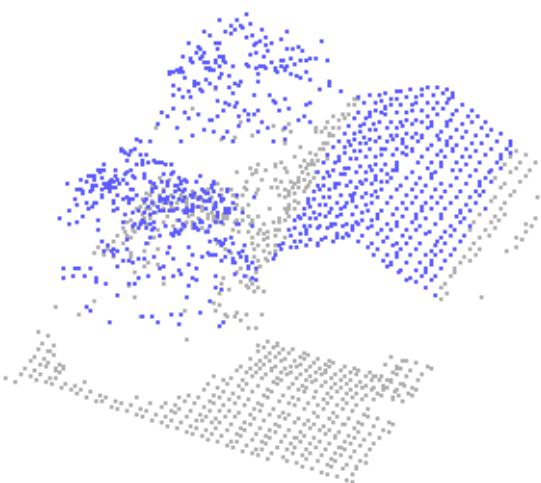
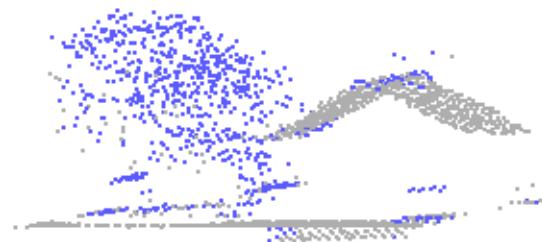


- Die Punkte werden auf Basis ihrer Merkmale in verschiedene Klassen aufgeteilt
  - ◆ Grobe Aufteilung in Gebäude, Boden und Vegetation



Niemeyer et al., 2014

## ■ Merkmale

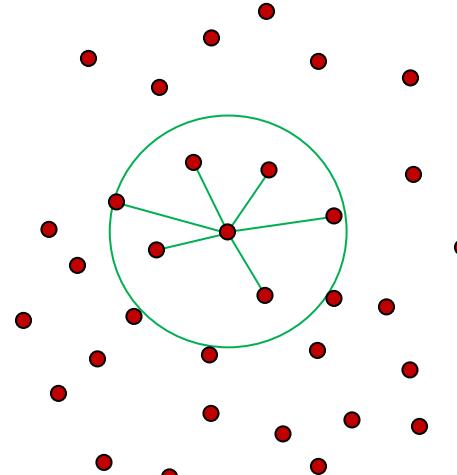
*Höhe über Gelände**Planarität**Streuung*

$$f_h = z - DGM(x, y).$$

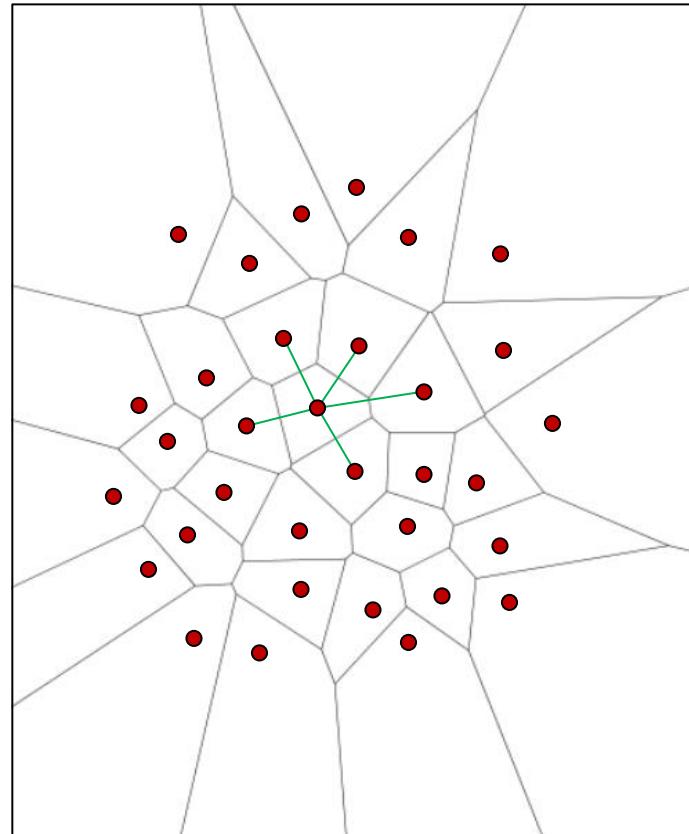
$$f_p = \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_3} \right)$$

$$f_s = \left( \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right)$$

- Punktnachbarschaften  
**(Feststehender) Radius**



## Natürliche Nachbarn (gemäß Voronoi-Diagramm)



## ■ Berechnung von **Eigenwerten** und **lokaler Ebene** eines Punkts:

- ◆ Schätzung der lokalen Ebene eines Punkts unter Einbeziehung der Nachbarpunkte mittels **Hauptkomponentenanalyse**
  - ◆ Minimiert Abstände senkrecht zur Ebene
- ◆ Sei  $\bar{p}$  der **Schwerpunkt** aller Punkte  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ,
- ◆ so erhält man durch Transformation der Punkte  $x' = x - \bar{x}, y' = y - \bar{y}, z' = z - \bar{z}$  die **Matrix der zweiten zentralen Momente**  $m$
- ◆ Die **Eigenwertzerlegung** ergibt die **Eigenwerte**  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  ( $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ) und die dazugehörigen Eigenvektoren  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ 
  - ◆ Normalisierter **Eigenvektor**  $\vec{v}_3$  liefert Normalenvektor der Ebene
  - ◆ Ebene geht durch Schwerpunkt  $\bar{p}$

$$\bar{p} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix}$$

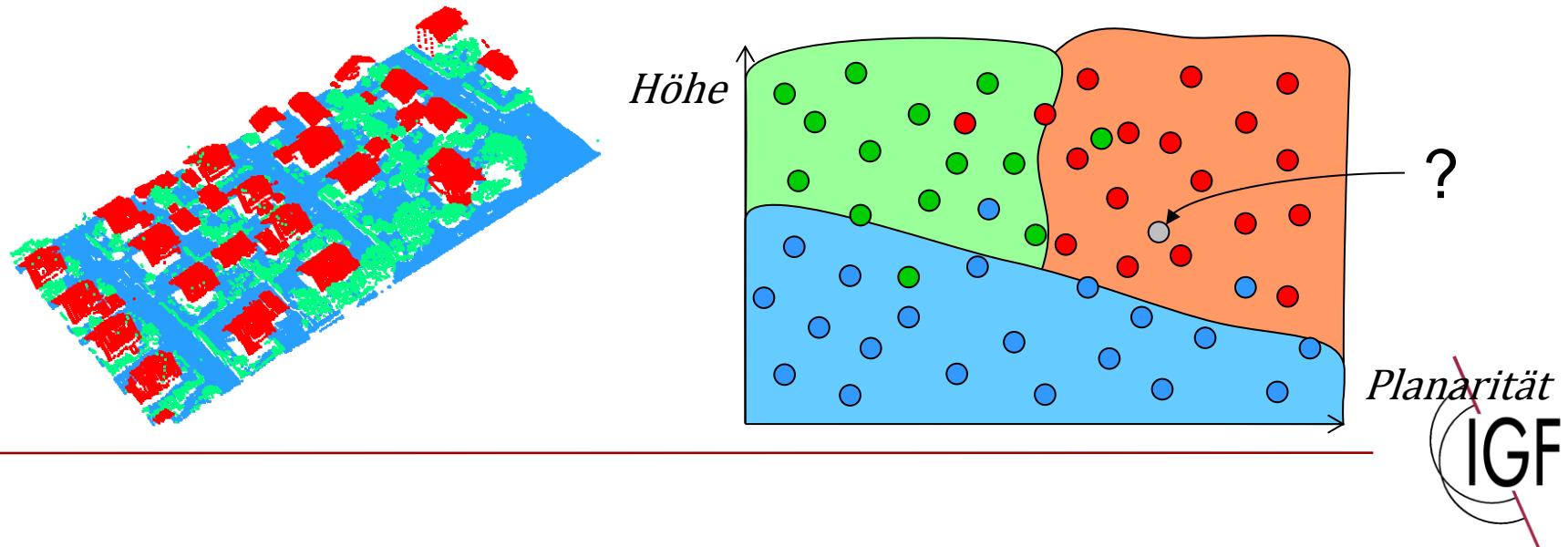
$$m = \begin{bmatrix} \sum (x')^2 & \sum x'y' & \sum x'z' \\ \sum y'x' & \sum (y')^2 & \sum y'z' \\ \sum z'x' & \sum z'y' & \sum (z')^2 \end{bmatrix}$$

- Normalisierung auf Intervall [0,1] zur Vergleichbarkeit:

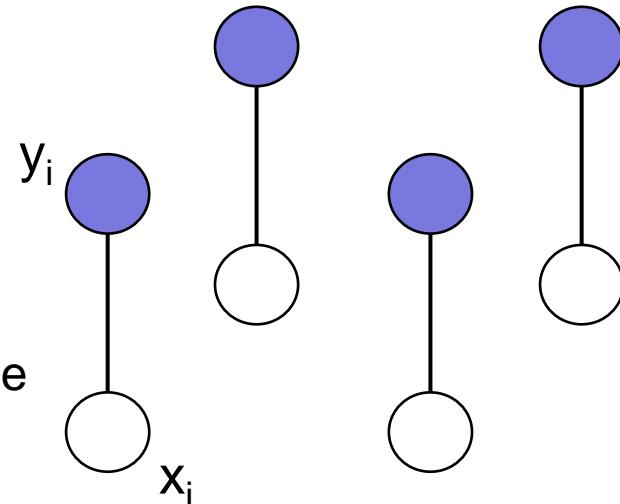
$$f_{\cdot} \leftarrow \min \left( 1, \frac{f}{\sigma} \right)$$

Sensibilitätsparameter  
 $\sigma_h, \sigma_p$  und  $\sigma_s$

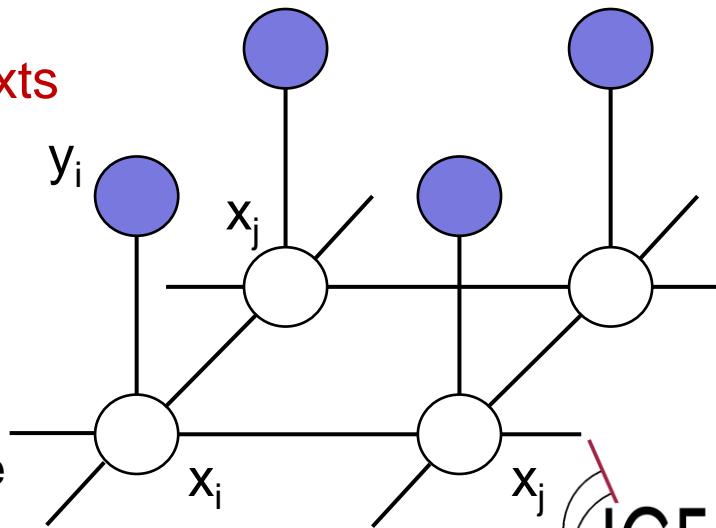
- Überwachte Klassifizierung mit Trainingsdaten
  - ◆ Z.B. Maximum-Likelihood-Methode, Support Vector Machine (SVM)



- Bislang wird die Klasse  $x_i$  eines Punkts ausschließlich basierend auf seinen eigenen Merkmalen  $y_i$  (Beobachtungen) bestimmt
  - ◆ Jedoch gehören dicht beisammen liegende Punkte häufig zur selben Klasse



- Bestimmung der Klassenkonfiguration unter **Einbeziehung des lokalen Kontexts**
  - ◆ Die Bestimmung der Klasse  $x_i$  eines Punkts ist abhängig von den Klassen der benachbarten Punkte  $x_j$
  - ◆ → **Markov Random Fields (MRF)**
  - ◆ Gehört zur Klasse der Probabilistischen Graphischen Modelle

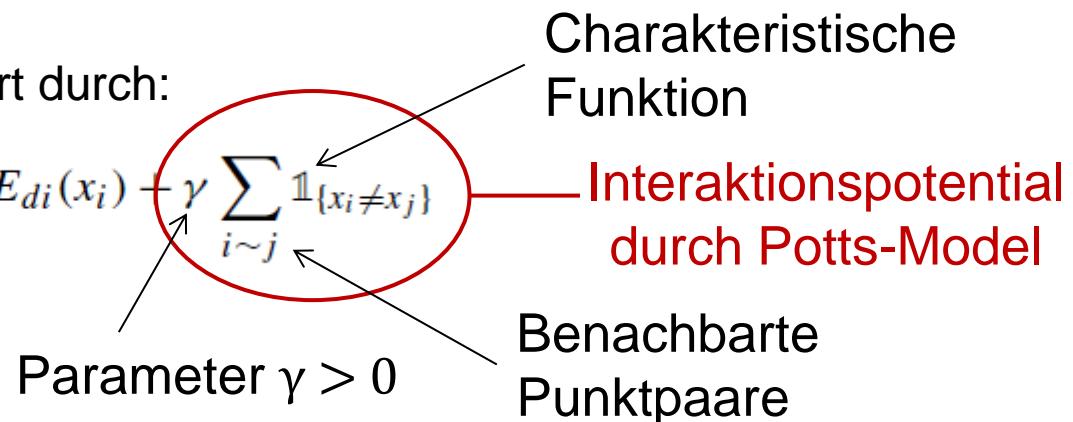


## ■ Energieminimierung zur Klassifizierung der Punktmenge:

- ◆ Sei  $x = (x_i)_{i=1 \dots N_c}$  ein mögliches Klassifizierungsergebnis
  - ◆  $N_c$  = Anzahl der Punkte in der Punktfolge
  - ◆  $x_i \in \{ \text{Gebäude, Vegetation, Boden} \}$  = Klasse i-ter Punkt

- ◆ Energie  $E(x)$  ist definiert durch:

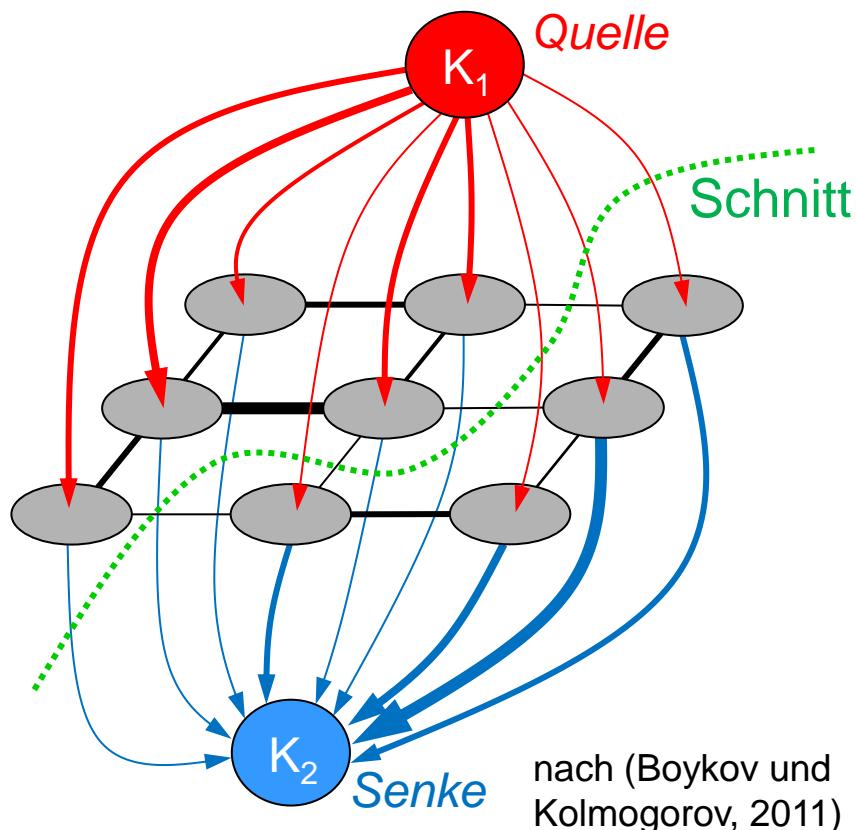
$$E(x) = \sum_{i=1 \dots N_c} E_{di}(x_i) + \gamma \sum_{i \sim j} \mathbb{1}_{\{x_i \neq x_j\}}$$



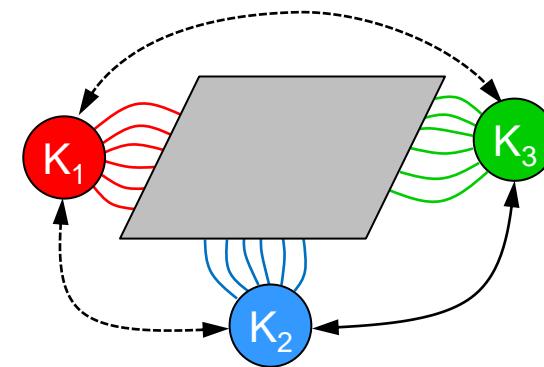
- ◆ Klassenkoherenz:

$$E_{di}(x_i) = \begin{cases} (1 - f_h) \cdot (1 - f_p) \cdot f_s & \text{wenn } x_i = \text{Gebäude} \\ (1 - f_h) \cdot f_p \cdot (1 - f_s) & \text{wenn } x_i = \text{Vegetation} \\ f_h \cdot (1 - f_p) \cdot f_s & \text{wenn } x_i = \text{Boden} \end{cases}$$

- Die Minimierung der Energiefunktion kann durch einen **minimalen Schnitt** des Graphen gelöst werden, der mit Hilfe von Algorithmen zur Bestimmung des **maximalen Flusses** berechnet wird
  - siehe Vorlesung Informatik A (Algorithmus von Ford-Fulkerson)

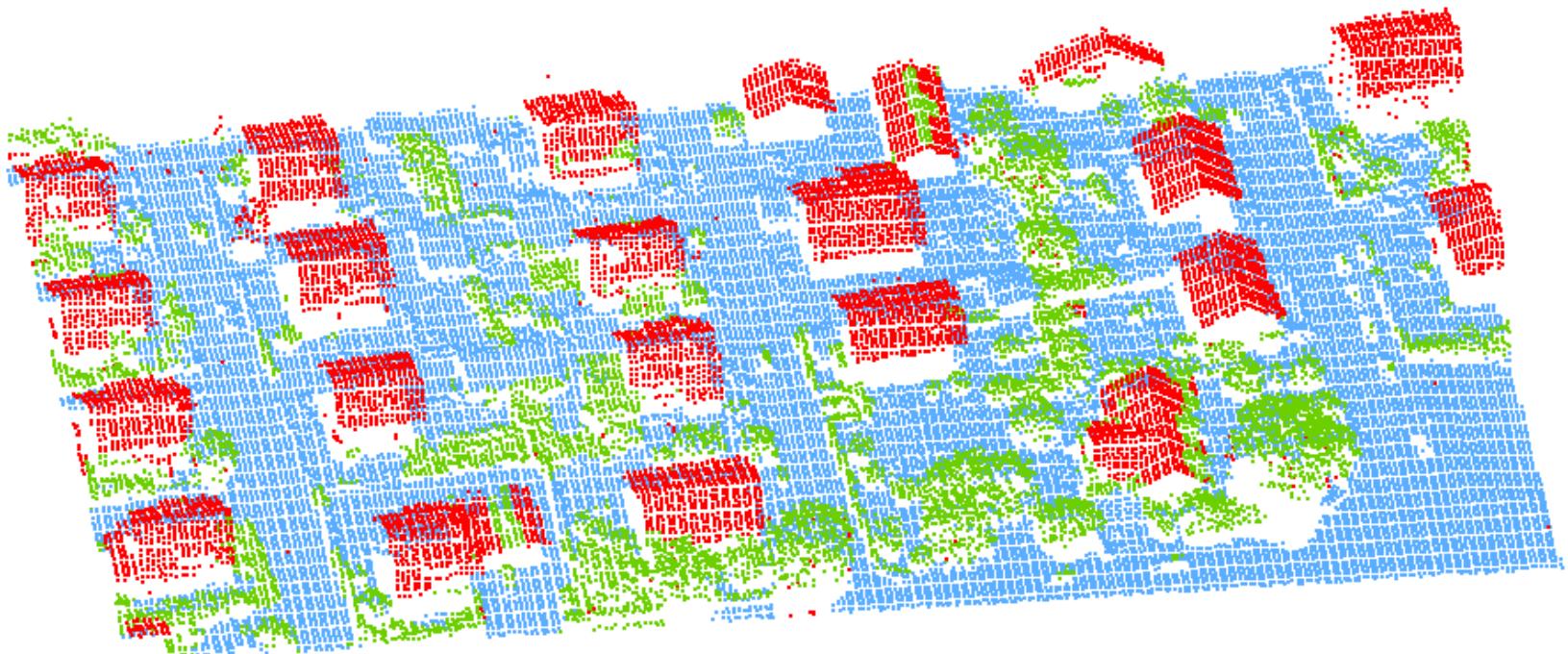


- Erweiterung auf mehrere Klassen bspw. mittels  $\alpha$ - $\beta$ -Swap



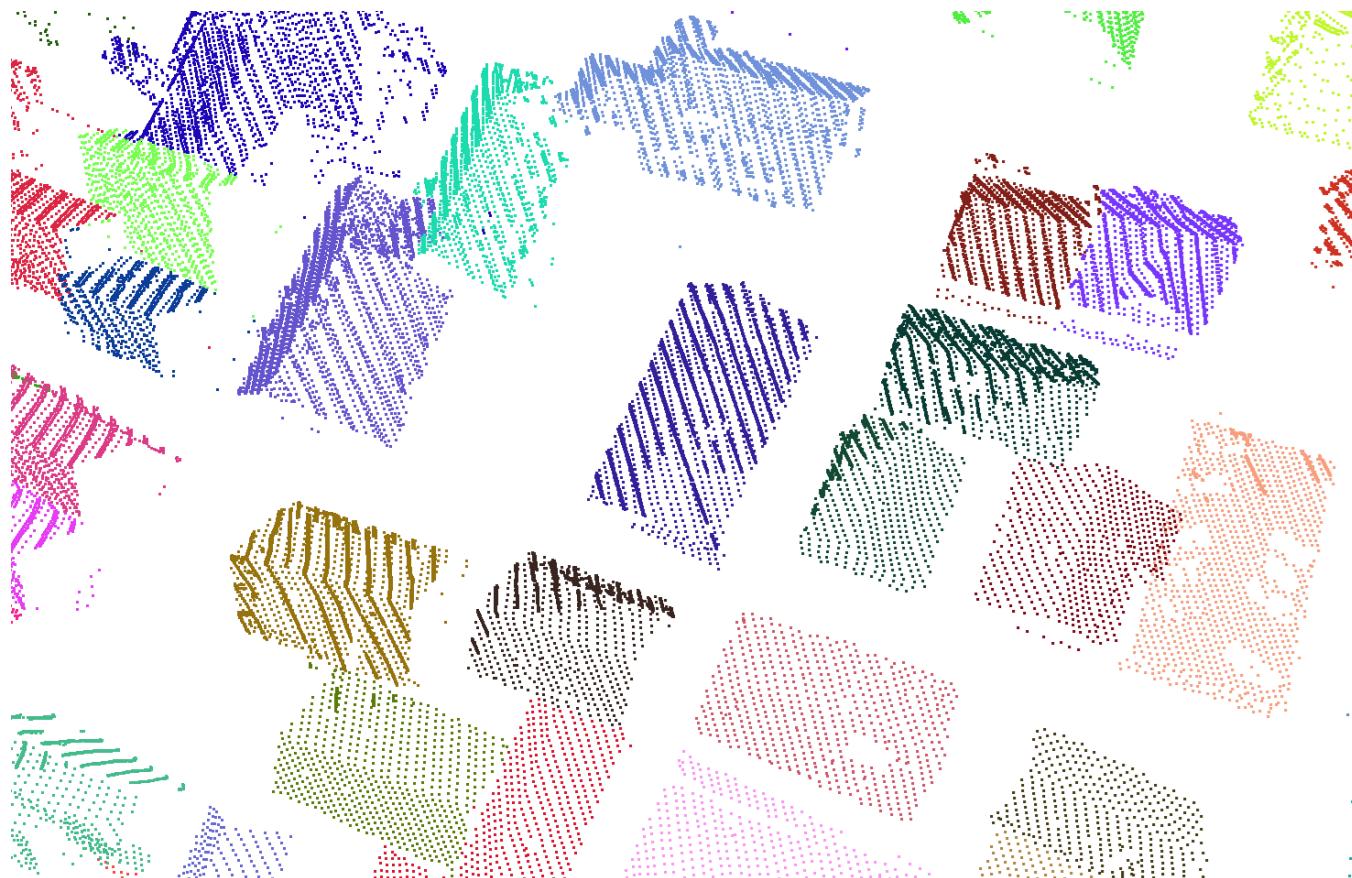
- Wiederholter paarweise Klassentausch bis Energieminimum erreicht

IGF

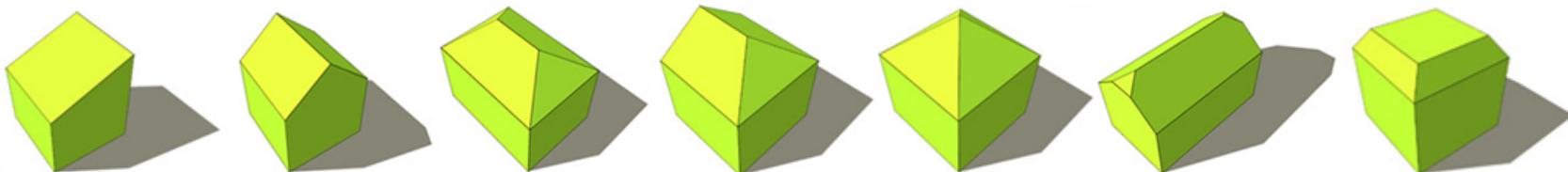


- **Gebäudeextraktion** → Finde alle Punkte eines Gebäudes
  - ◆ Analyse zusammenhängender Komponenten
    - ◆ Punkte sind Knoten in einem Graphen
    - ◆ Zwei Punkte sind durch eine Kante verbunden, wenn sie benachbart sind
    - ◆ Finde Zusammenhangskomponenten bspw. mit Tiefensuche

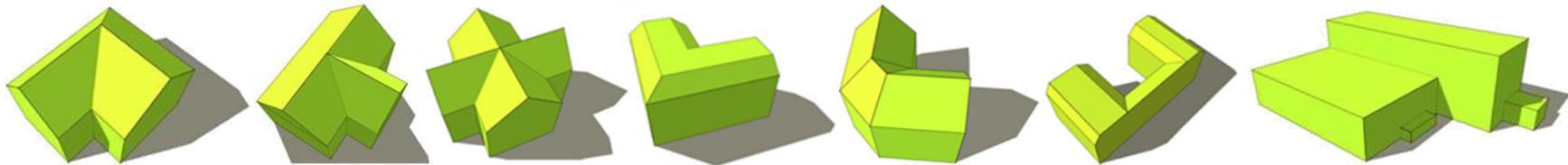
- Gebäudeextraktion mittels amtlicher Grundrisse
  - ◆ Finde alle Punkte, die sich innerhalb eines Grundrisspolygons befinden
  - ◆ Entferne als Boden oder Vegetation klassifizierte Punkte



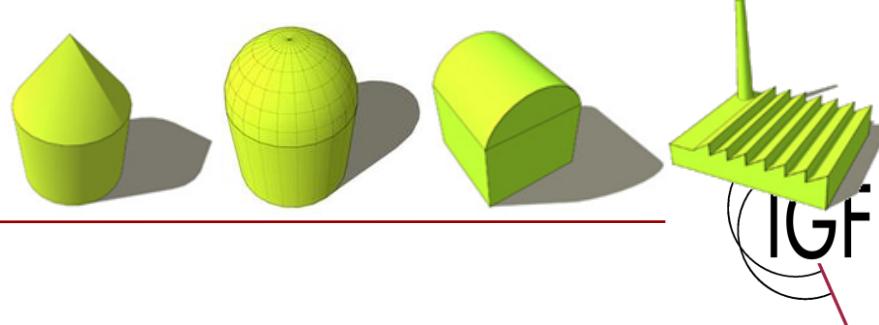
- Aus einer **Bibliothek von parametrisierbaren Vorlagen** wird die am Besten passende Gebäudeform gefunden und deren Parameter an die Eingabepunkte angepasst
  - ◆ Vorlagen (zumeist) auf Basis von rechteckigen Grundrissen



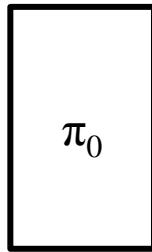
- ◆ Gebäude mit **komplexen Grundrissen** werden aus den Basisvorlagen mit rechteckigen Grundrissen (so gut es geht) zusammengebaut



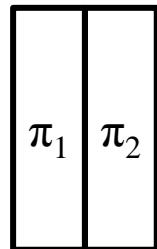
- ◆ **Semi-automatische Werkzeuge** zur produktiven Nachbearbeitung
    - ◆ Weitere nicht automatisch erkennbare Dachformen
    - ◆ Aus Grundriss nicht ableitbare 3D-Gebäudeformen



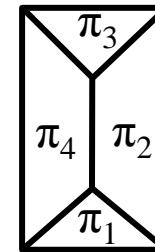
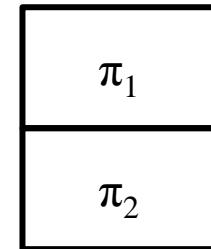
- Gebäude mit (nahezu) rechteckigen Grundrissen:



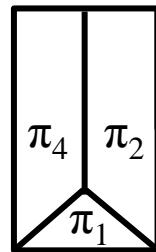
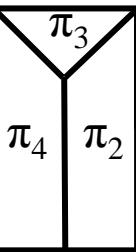
Pult- und  
Flachdach



Satteldach



Walmdach (symmetrisch  
und asymmetrisch)



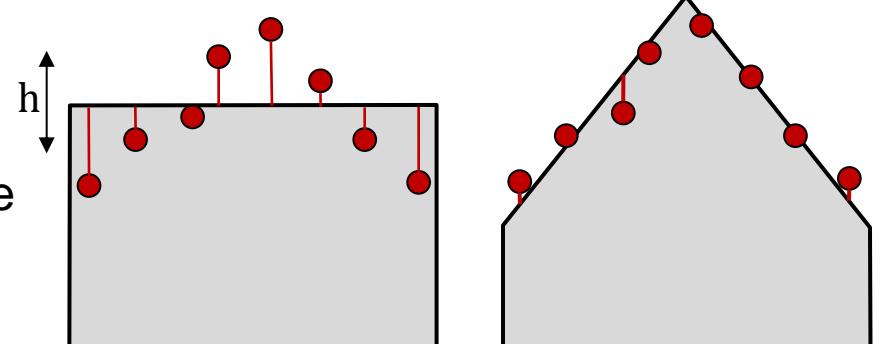
- Annahme: identische Dachneigungen aller Dachflächen
  - ◆ → die Projektion der Dachflächen  $\pi_i$  in die Ebene ist bekannt

- Allgemeine Vorgehensweise:

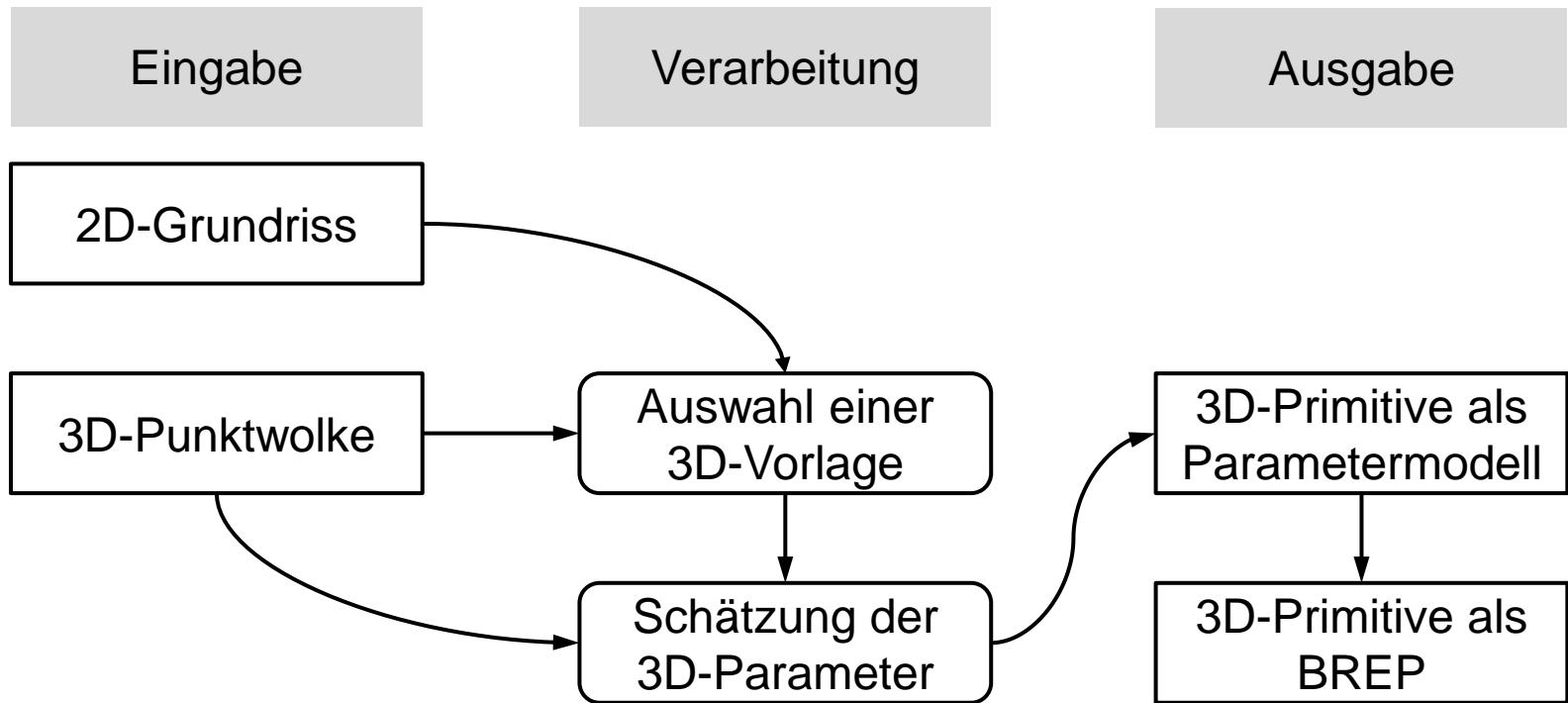
1. Auswahl einer Gebäudevorlage

2. Schätzung der Parameter

→ Summe der quadratischen  
Abstände von Punkten zu Dachform minimieren

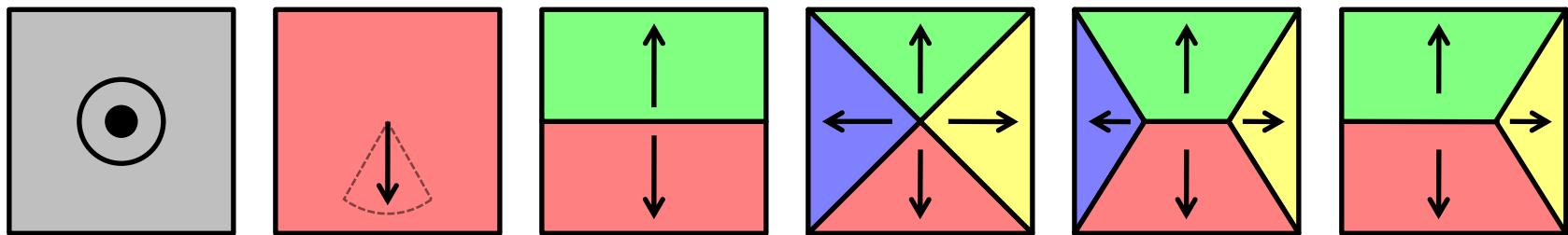


# Modellgetriebene Rekonstruktion



## 1. Auswahl einer Gebäudevorlage:

- ◆ Vergleich zwischen den Normalenvektoren der Punkte, welche sich innerhalb der Projektion einer Dachfläche befinden, und den Normalenvektoren der entsprechenden Dachflächen
  - ◆ Auf die Ebene projizierte Vektoren für geneigte Flächen
  - ◆ Kompatible Punkte unterschreiten einen gegebenen Schwellwert

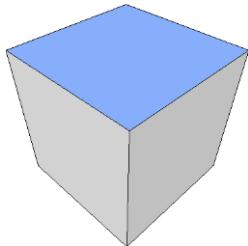


- ◆ Kriterien (nach Brenner, 2000):
  1. Der **relative Anteil flacher Punkte** darf bei geneigten Flächen einen Schwellwert nicht überschreiten
  2. **Zahl der kompatiblen Punkte** darf einen absoluten und relativen Schwellwert nicht unterschreiten (~ Flächeninhalt)
  3. **Mindestneigung** (Parameterbestimmung) für geneigte Dachflächen

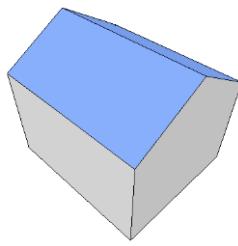
## 2. Schätzung der 3D-Parameter (nach Brenner, 2000):

- ◆ Vermittelnde Ausgleichung nach kleinsten Quadraten, bei der nur Punkte als Beobachtungen herangezogen werden, die kompatibel mit der jeweiligen Fläche sind
  - Robustheit gegen Ausreißer bzw. nicht berücksichtigte Flächen
    - ◆ Parameterschätzung erfolgt in einem lokalen Koordinatensystem

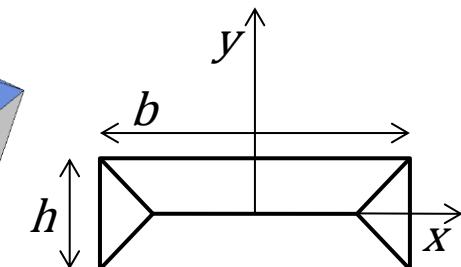
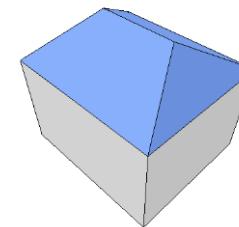
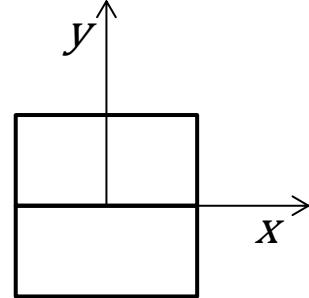
*Flachdach*



*Satteldach*



*Walmdach*



$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i$$

*Verbesserung*

$$z_i + vi = f - s \cdot |y_i|$$

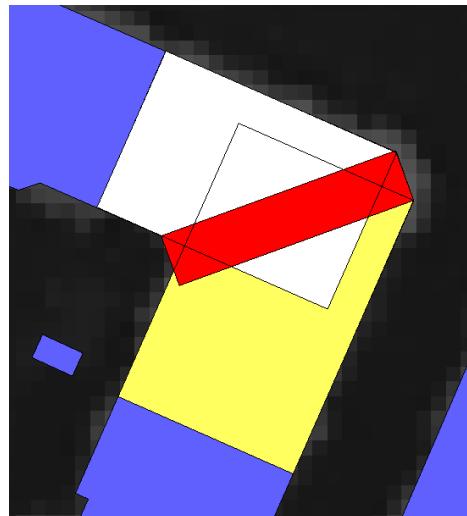
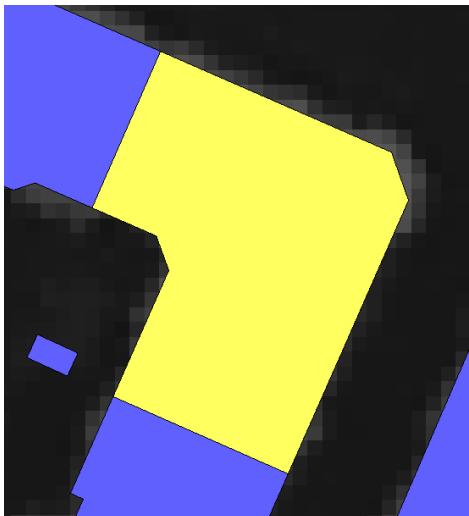
*Firsthöhe*

*Dachsteigung*

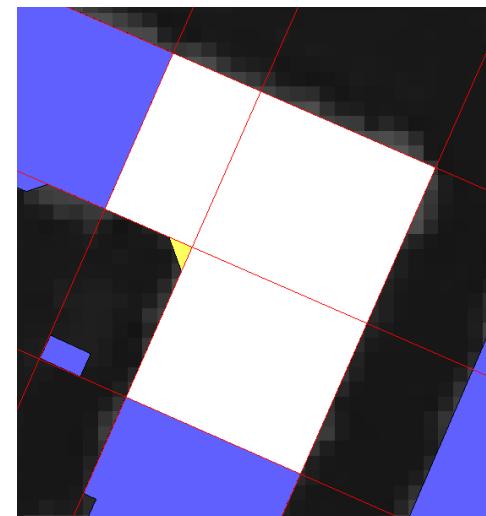
$$z_i + vi = f - s \cdot |y_i|$$

$$z_j + vj = f - s \cdot \left( |x_j| - \frac{b-h}{2} \right)$$

- Ein Großteil der Gebäude weist komplexe Grundrisse auf
  - ◆ Zumeist mit rechtwinkligen und parallelen Strukturen
    - Grundriss in 2D-Grundformen zerlegen und für jede Grundform eine 3D-Dachform einzeln rekonstruieren
- Grundrisszerlegung

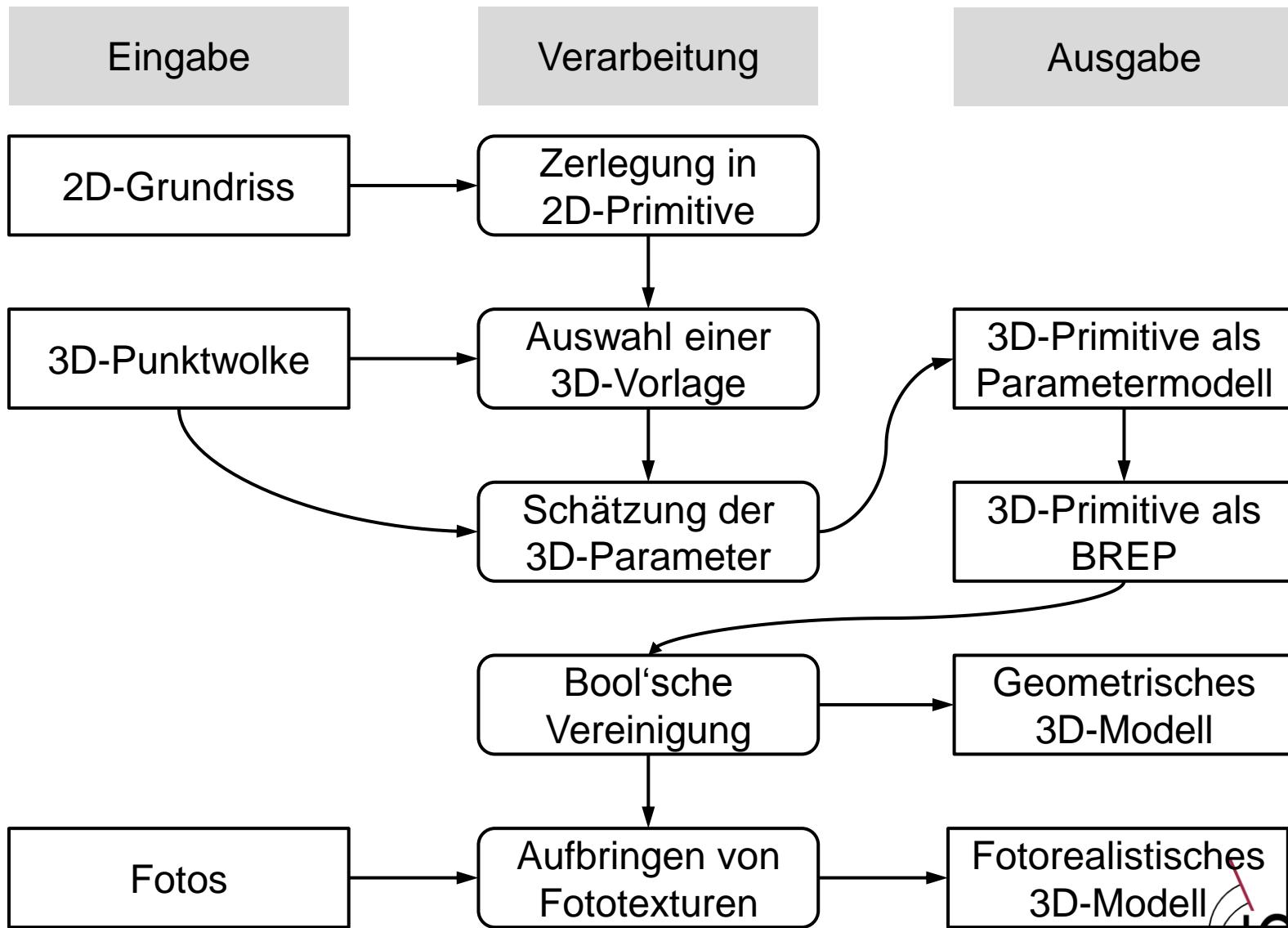


Überlappende  
Rechtecke



Disjunkte (zumeist  
rechteckige) Zellen

# Modellgetriebene Rekonstruktion

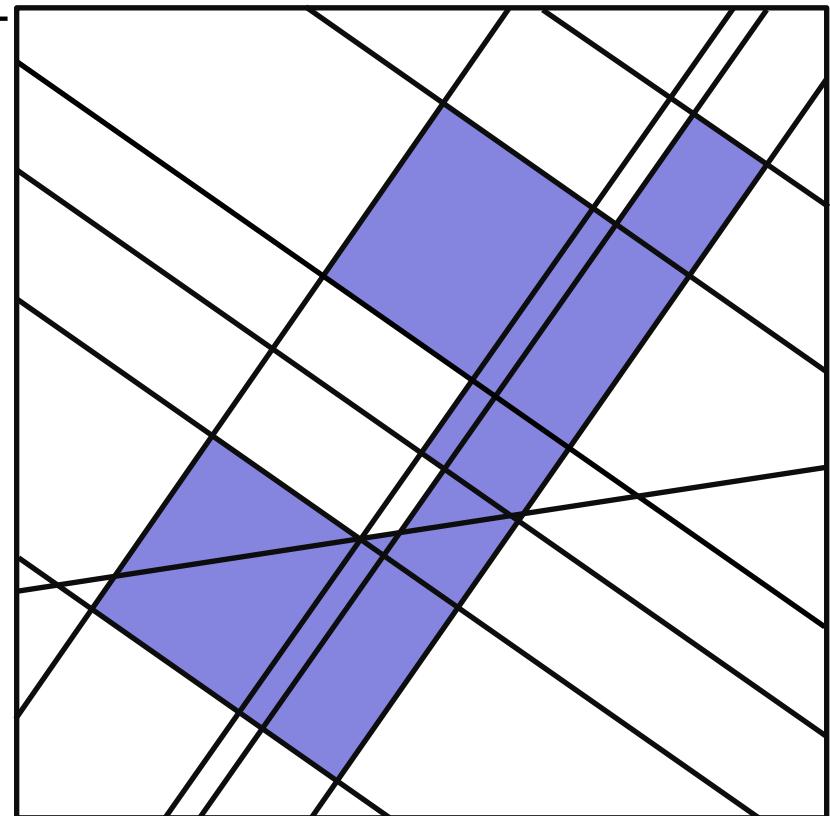


## ■ Zellenzerlegung:

1. Aus den Liniensegmenten des Grundriss werden Dekompositionsgeraden erzeugt ...
2. ... und ein vergrößertes umschließendes Rechteck des Grundrisses an diesen Geraden geschnitten
3. Identifiziere und bewahre Zellen mit einer hohen Überlappung mit dem Grundriss



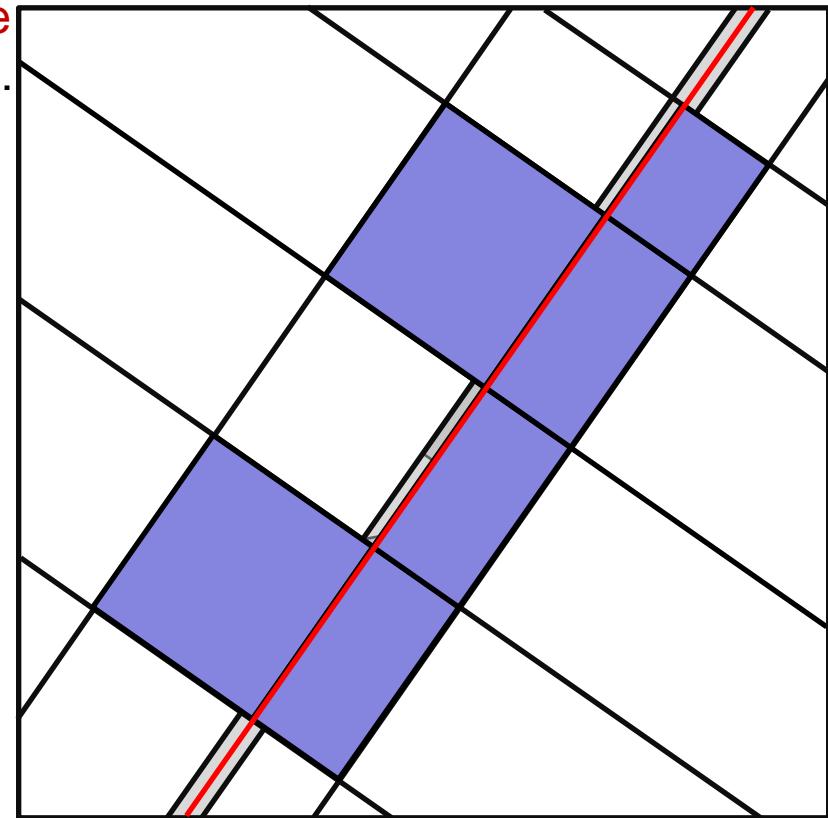
Ergibt viele sehr kleine Zellen  
→ schwierig Primitive sinnvoll  
darin einzupassen



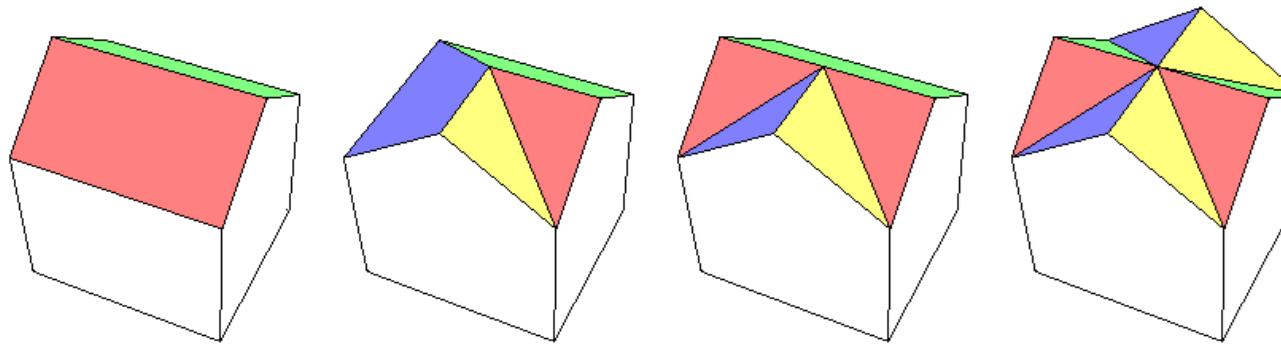
## ■ Zellenzerlegung:

1. Aus den Liniensegmenten des Grundriss werden **approximierende** Dekompositionsgeraden erzeugt ...
2. ... und ein vergrößertes umschließendes Rechteck des Grundrisses an diesen Geraden geschnitten
3. Identifiziere und bewahre Zellen mit einer hohen Überlappung mit dem Grundriss

 Die Abweichung vom Grundriss ist die Hälfte der  Generalisierungsdistanz



- Für komplexe Grundrisse sind weitere 3D-Vorlagen notwendig:
  - ◆ Insbesondere Verbindungsformen



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



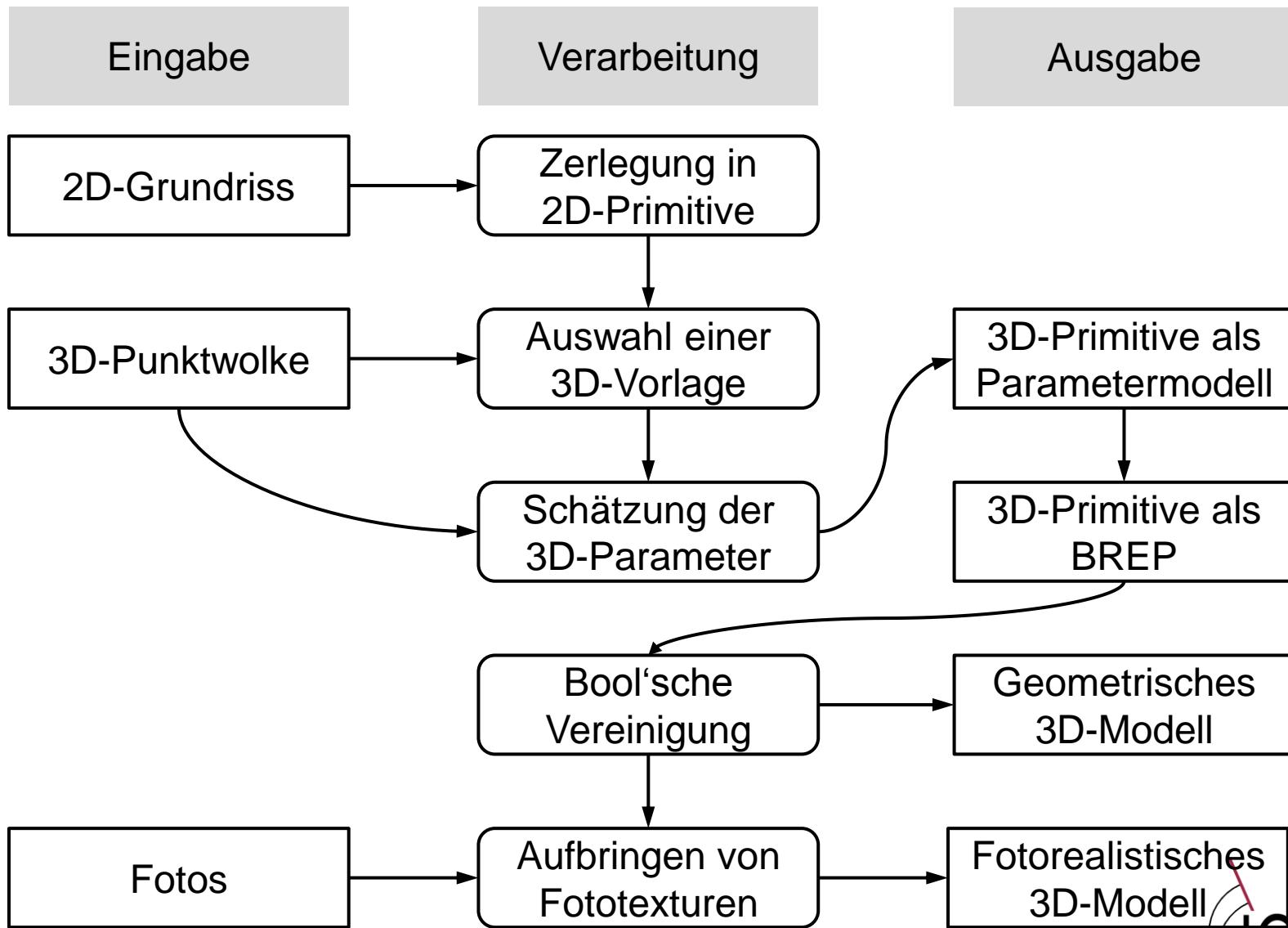
# Modellgetriebene Rekonstruktion



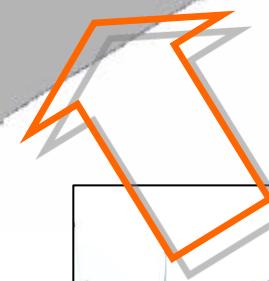
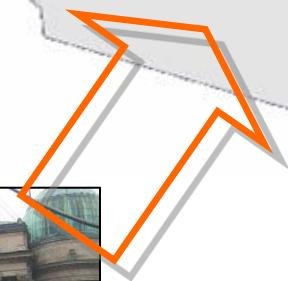
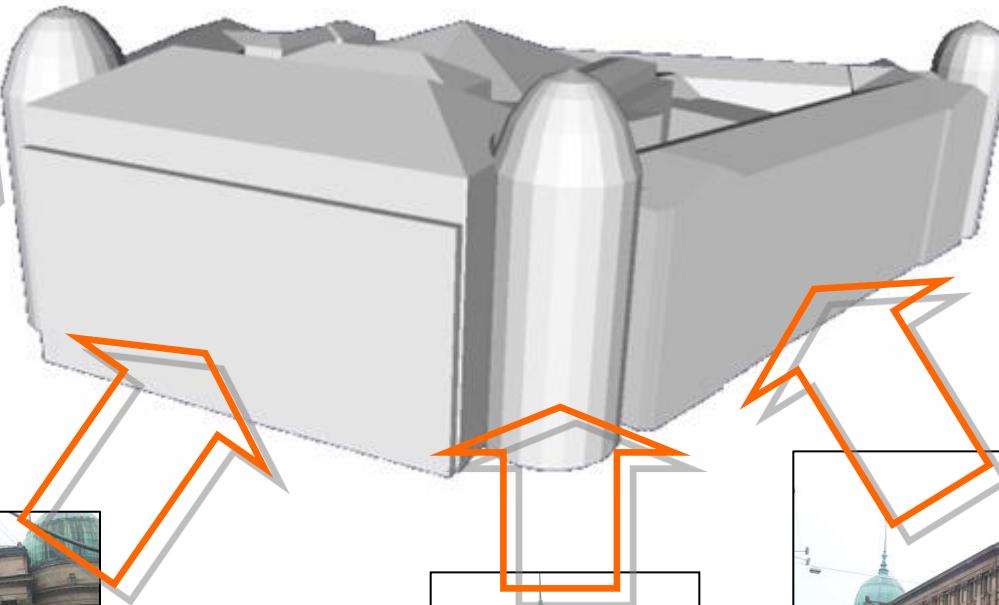
# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Textureextraktion



# Textureextraktion



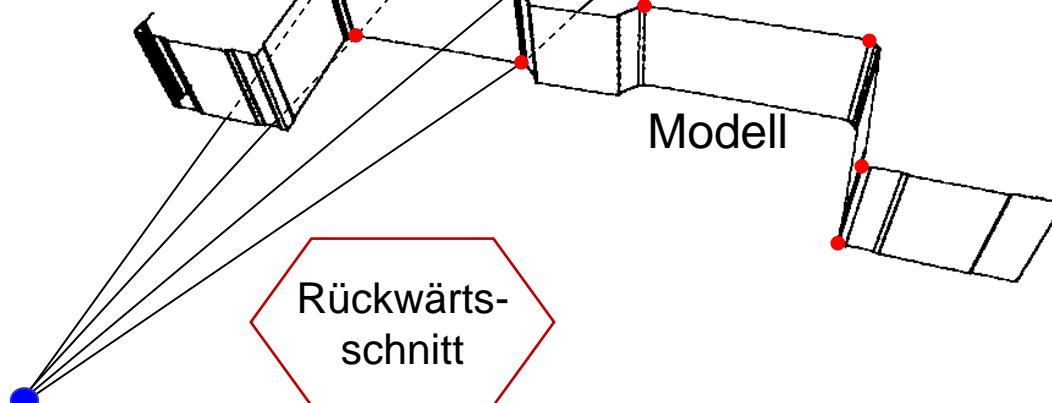
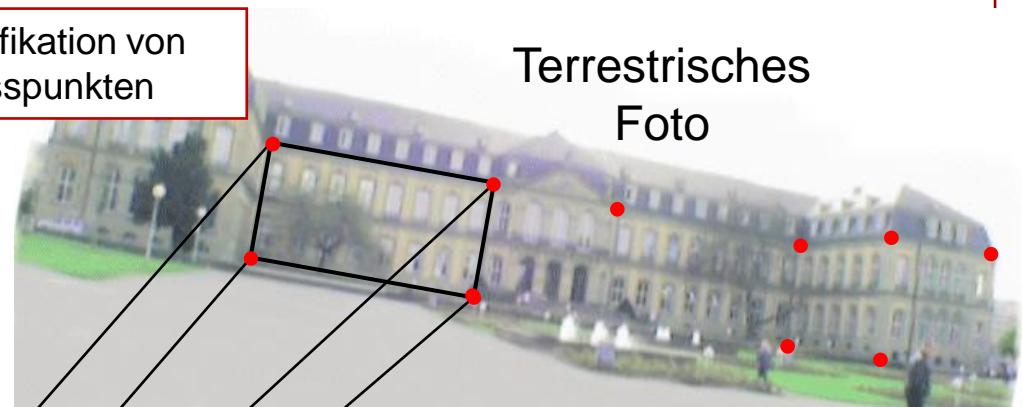
Ungefähr äußere  
Orientierung



GPS  
Kompass  
Kamera

Identifikation von  
Passpunkten

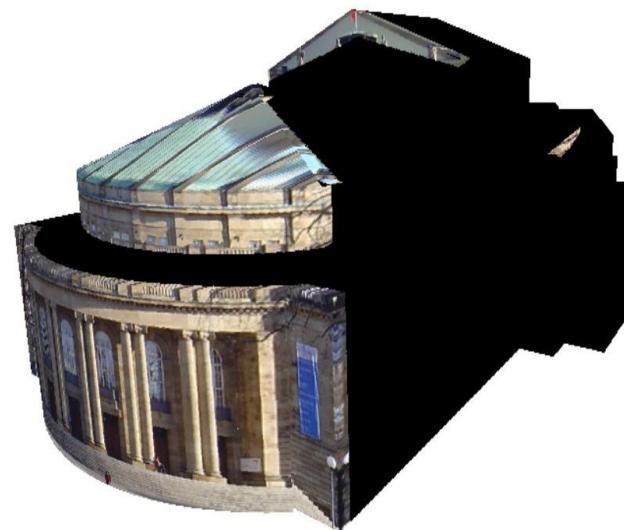
Terrestrisches  
Foto



Genaue äußere  
Orientierung



# Textureextraktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Modellgetriebene Rekonstruktion



# Kartographische Generalisierung

- Kartographische Generalisierung ist die Transformation einer räumlichen Situation, mit dem Ziel, die **Verständlichkeit** zu verbessern

- 2D-Generalisierungsoperatoren (Hake et al., 2002)

- ◆ Vereinfachung / Simplifizierung



- ◆ Vergrößerung / Betonung



- ◆ Verdrängung



- ◆ Zusammenfassung / Aggregation



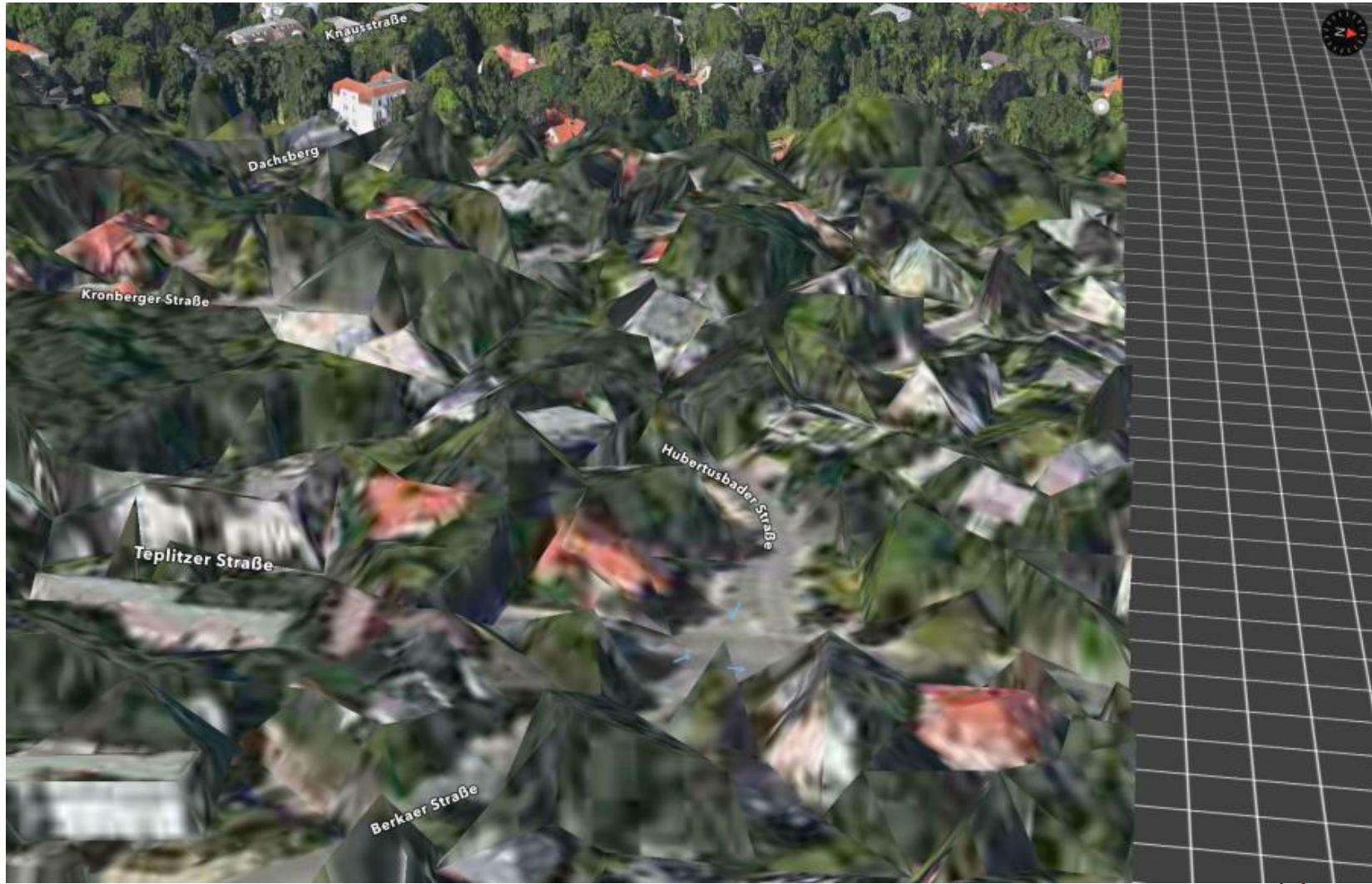
- ◆ Klassifizierung



- ◆ Symbolisierung



# Kartographische Generalisierung



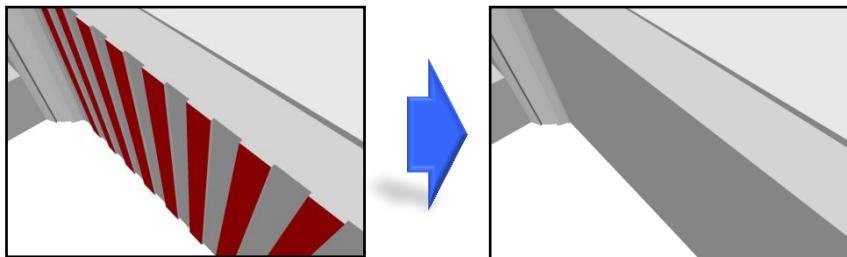
# Kartographische Generalisierung



# Kartographische Generalisierung

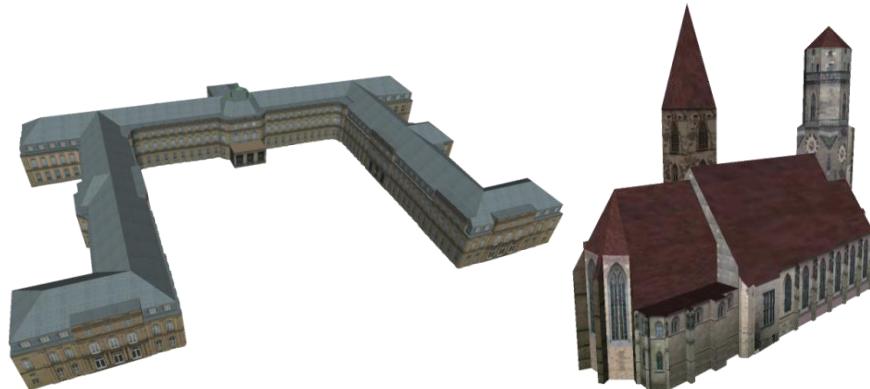
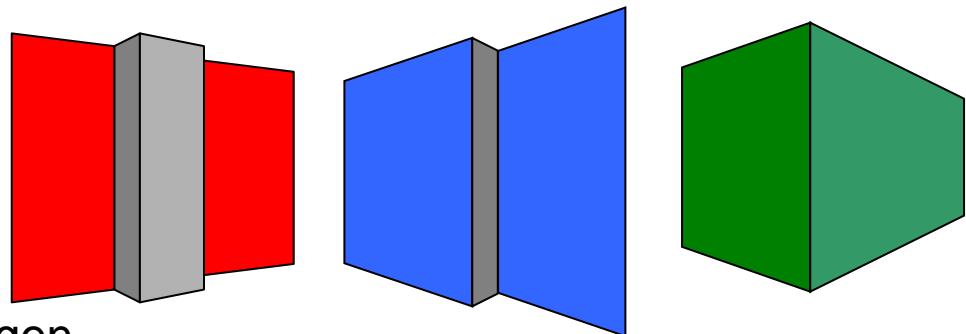


# Simplifizierung für 3D-Gebäude



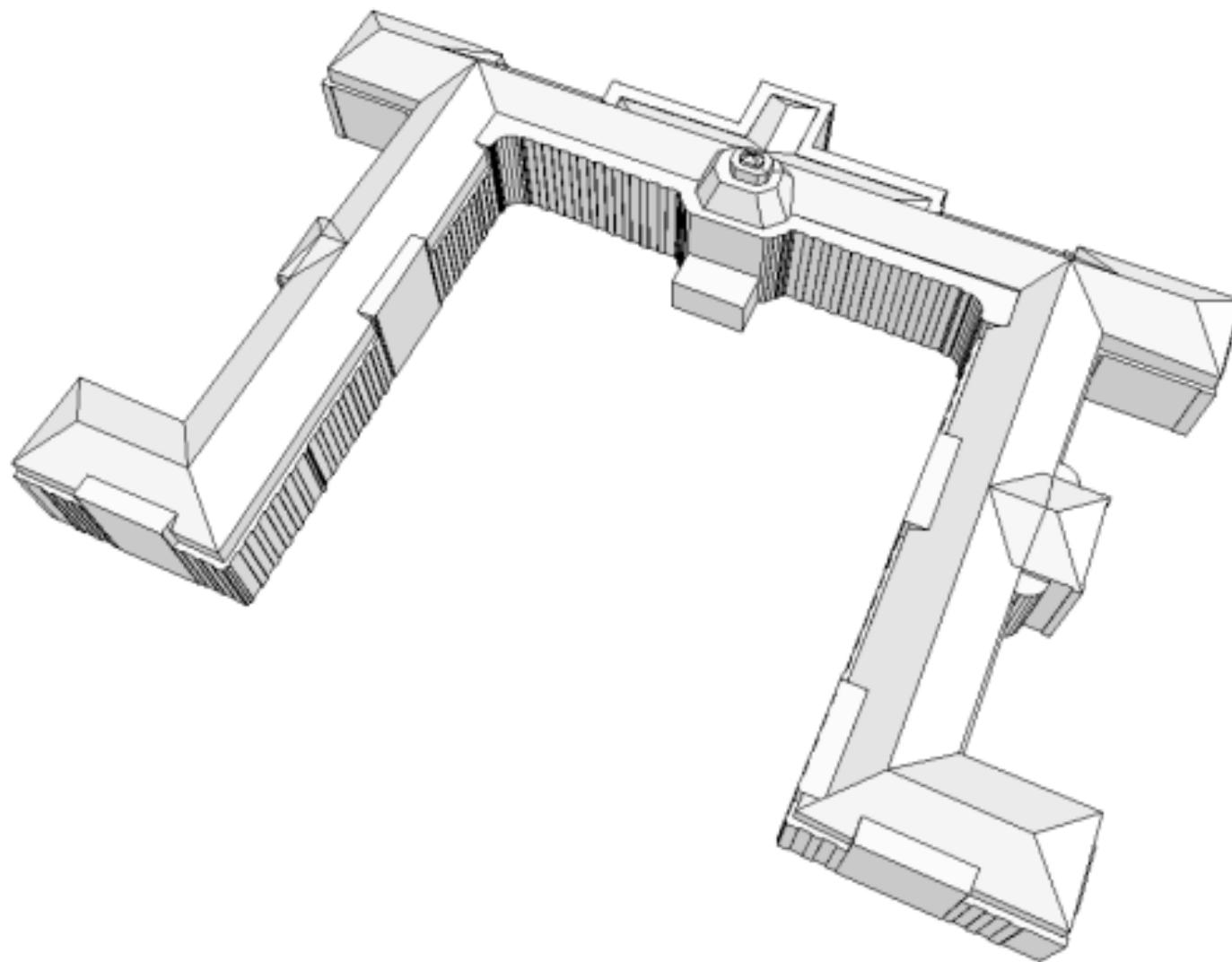
- Unwichtige Details eliminieren
  - ◆ Vorsprünge, Einbuchtungen, Dachaufbauten etc.

- Typische geometrische Relationen bewahren
  - ◆ Koplanare, parallele und rechtwinklige Flächen
  - ◆ Symmetrische Dachneigungen



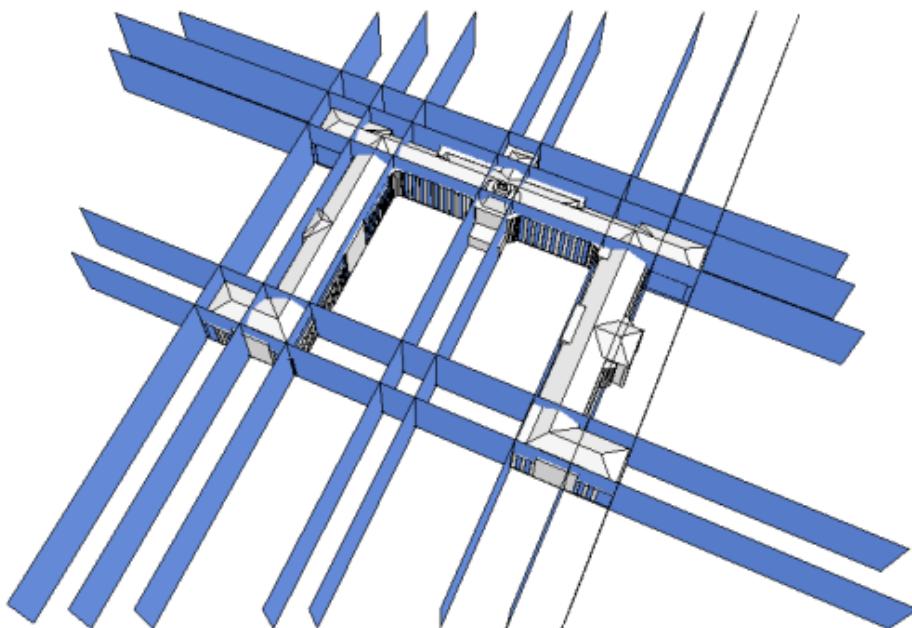
- Objektspezifisches Erscheinungsbild erhalten
  - ◆ Globale Form
  - ◆ wesentliche Gebäudeelemente

# Direkte Formvereinfachung

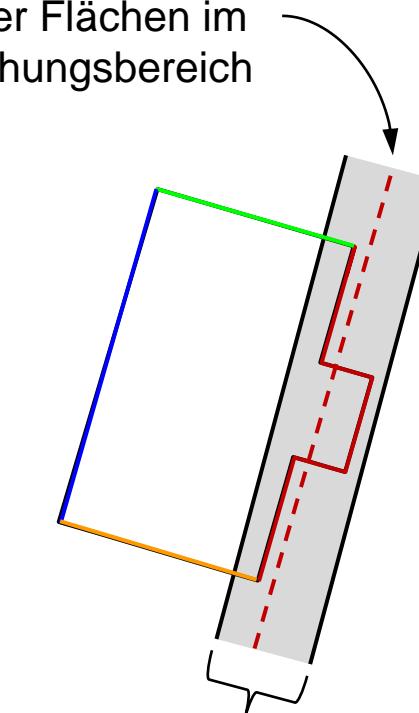


# Direkte Formvereinfachung

- **Schritt 1:** Finde für die **Fassadenflächen** des Gebäudemodells eine möglichst kleine Menge an **approximierenden Ebenen**, welche die (2D-)Form des Gebäudes *hinreichend gut* annähern

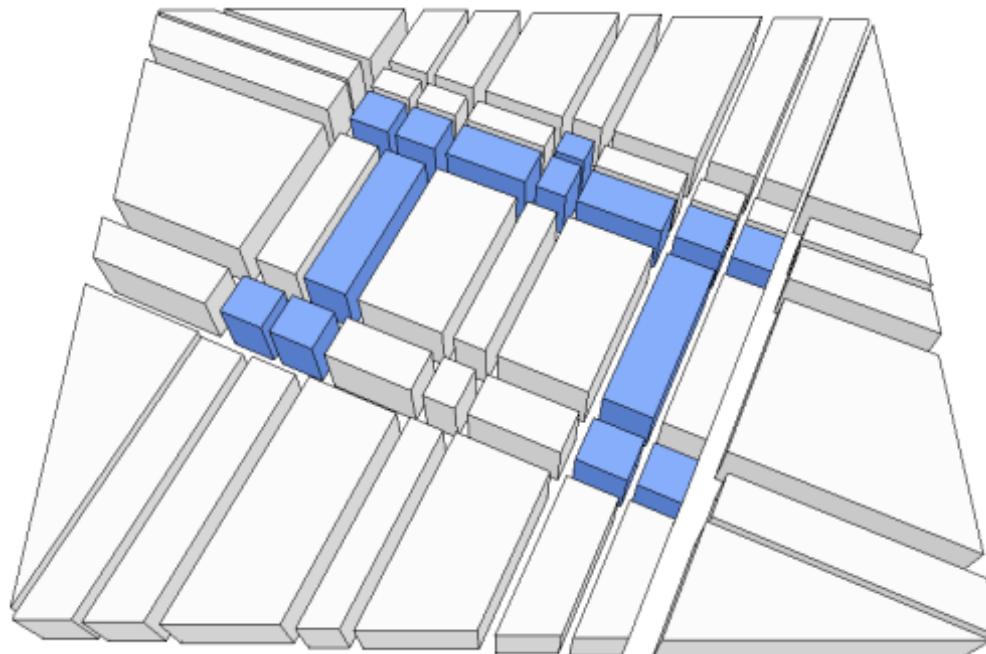


Ebene als gewichtetes  
Mittel aller Flächen im  
Untersuchungsbereich



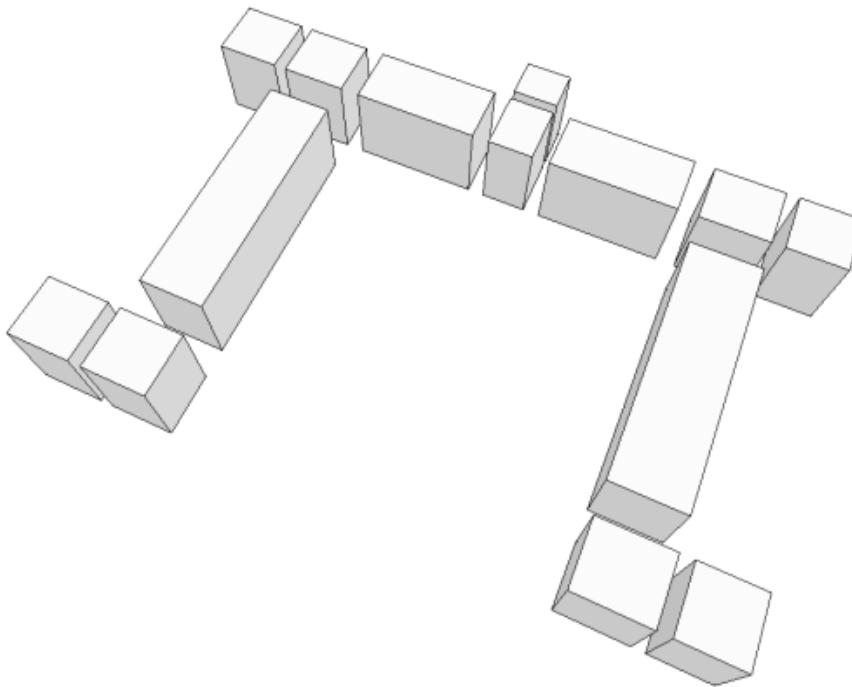
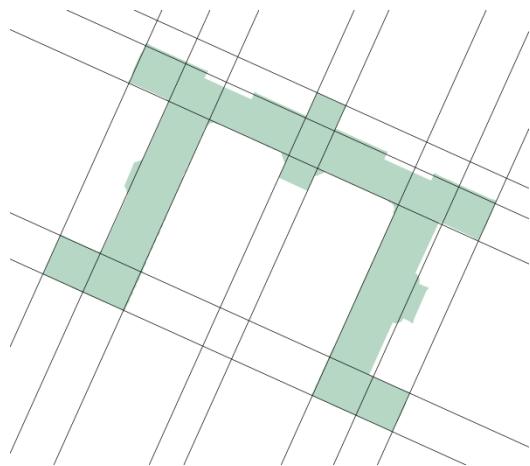
Generalisierungs-  
schwellwert

- Schritt 2: Erzeuge eine **2D-Zellenzerlegung** durch Teilung des *unendlichen* Raums entlang der approximierenden Ebenen



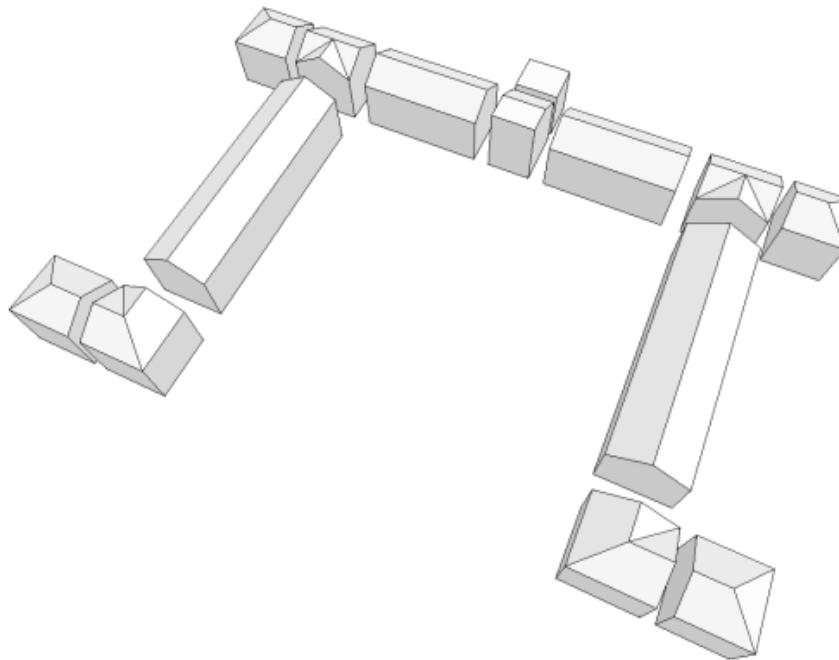
## ■ Schritt 3: Identifiziere und entferne Nichtgebäudezellen

- ◆ Gebäudezellen → hohe relative Überdeckung mit Grundriss
- ◆ Nichtgebäudezelle → geringe relative Überdeckung mit Grundriss

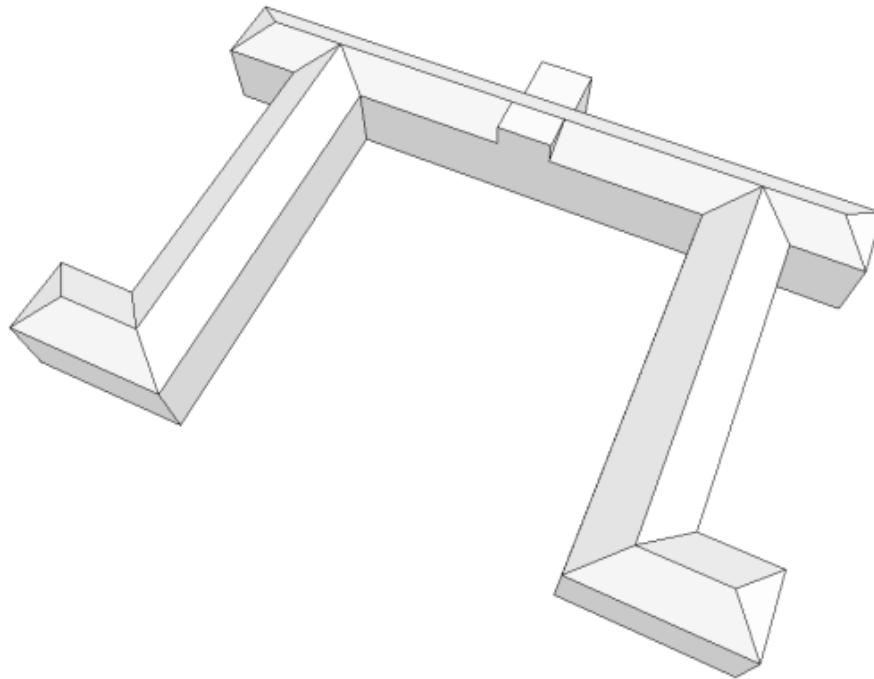
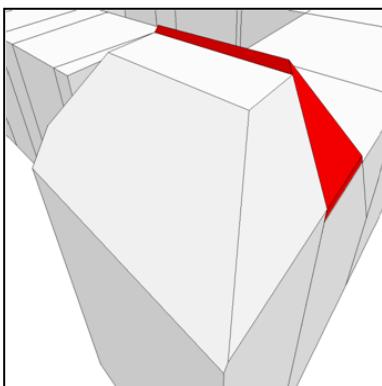
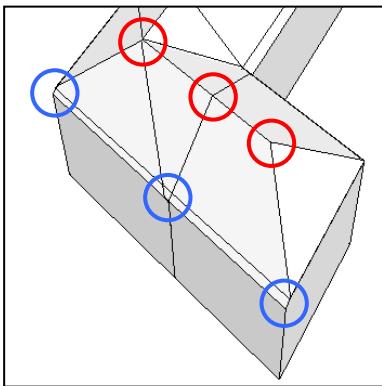


## ■ Schritt 4: Erzeuge für jede Gebäudezelle eine 3D-Zellenzerlegung

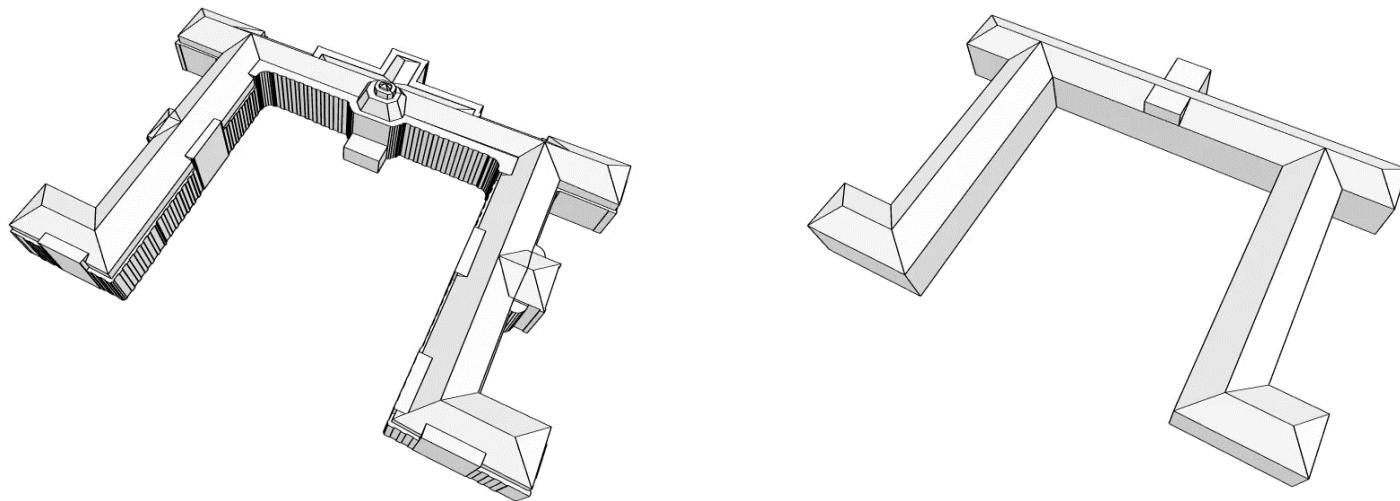
- ◆ Analoge Vorgehensweise wie 2D-Zellenzerlegung:
  1. Finde *global* approximierende Ebenen für die **Dachflächen**
  2. Zerlege jede Gebäudezellen *lokal* entlang der Ebenen, die aus Flächen entstanden sind, welche in der Gebäudezelle vorkommen
  3. Identifiziere und entferne Nichtgebäudezellen



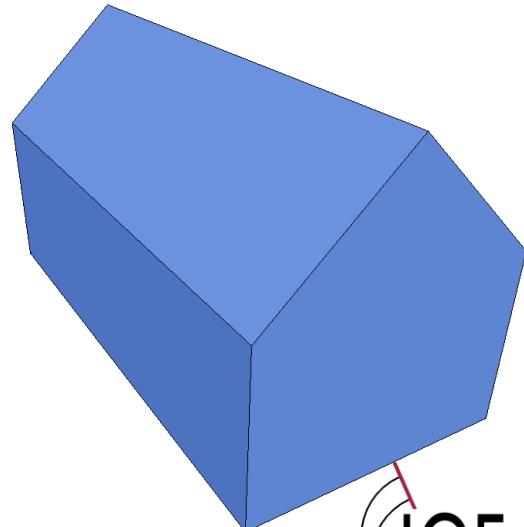
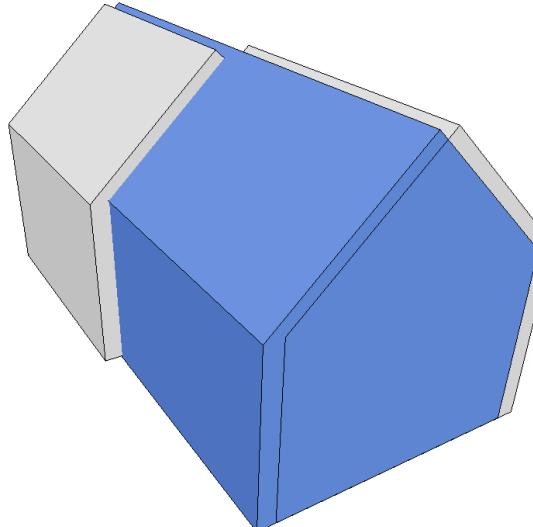
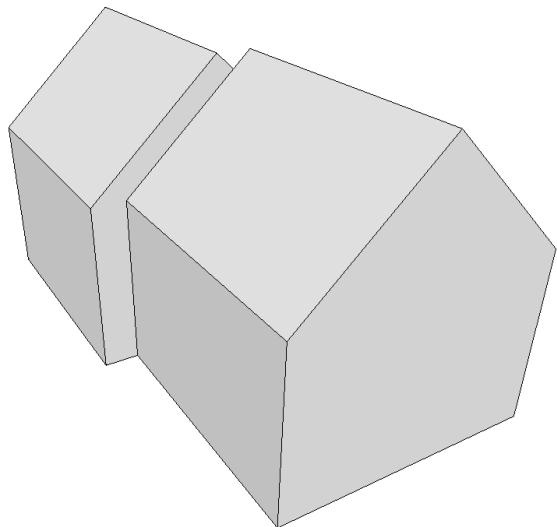
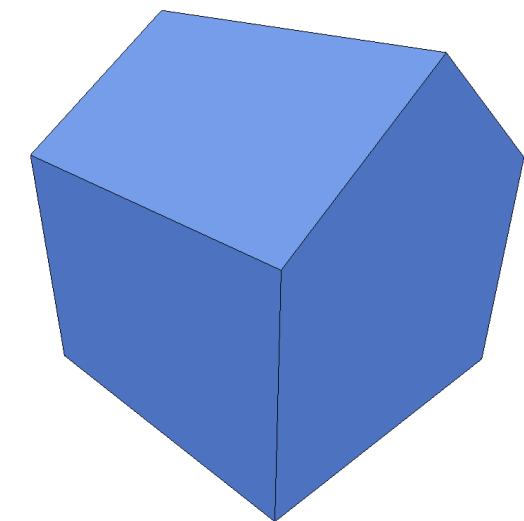
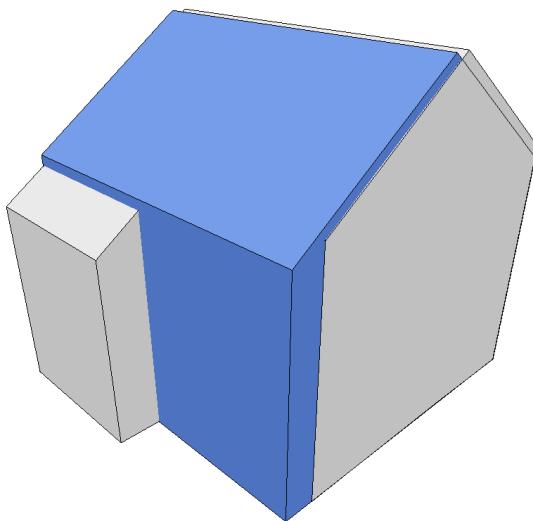
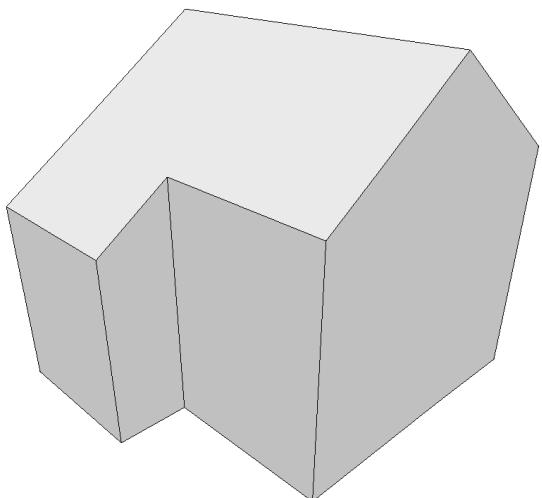
- **Schritt 5:** Bereinige Ungenauigkeiten durch Zusammenziehen von Knoten und klebe die Gebäudezellen zusammen



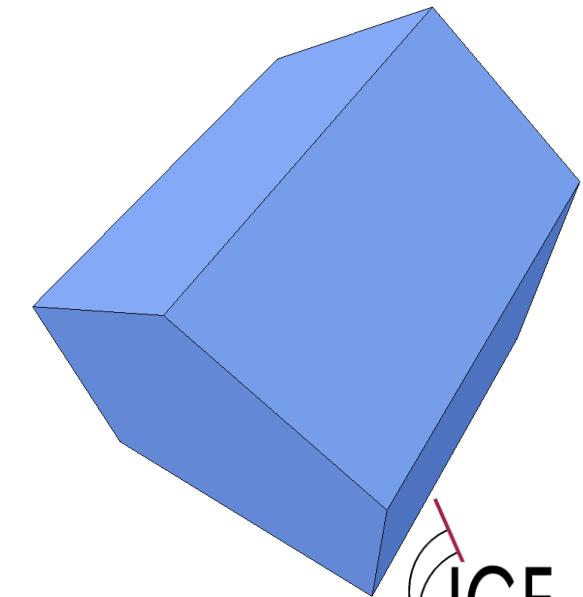
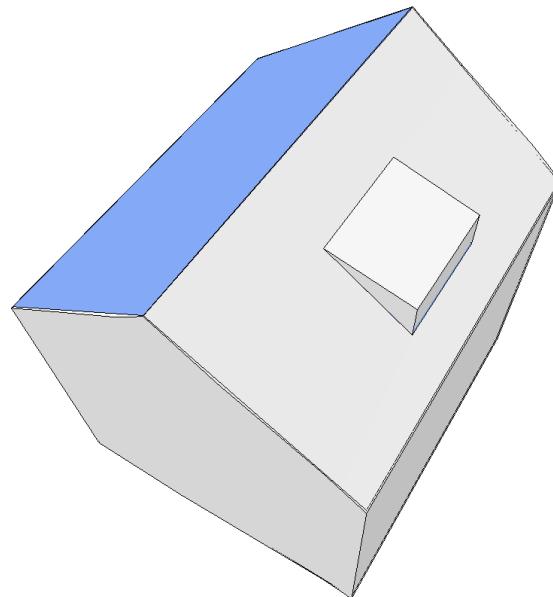
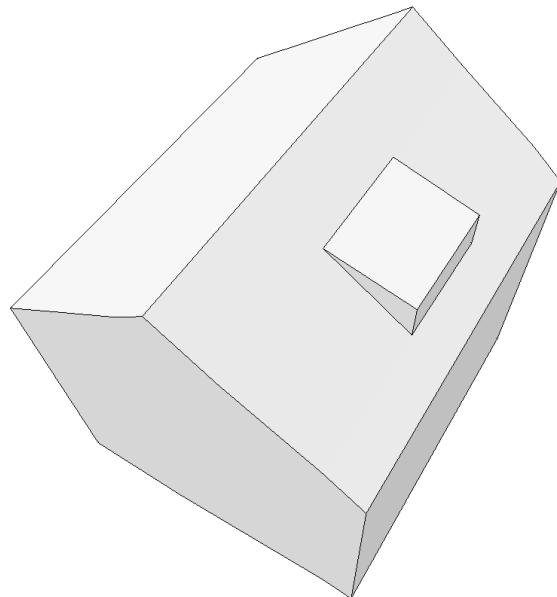
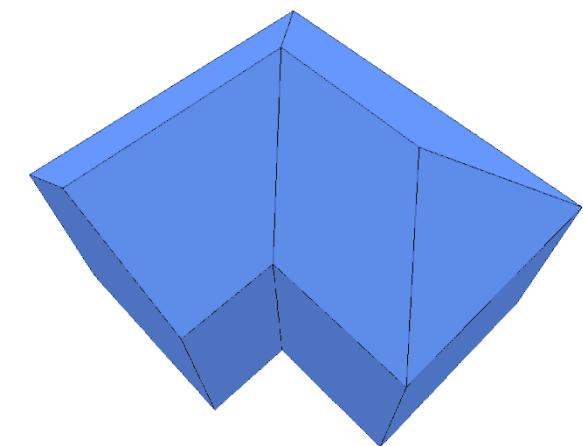
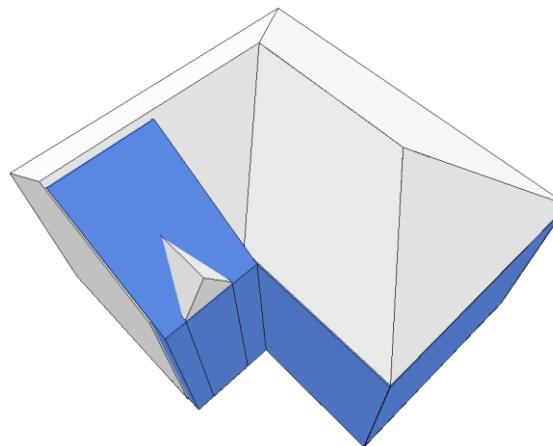
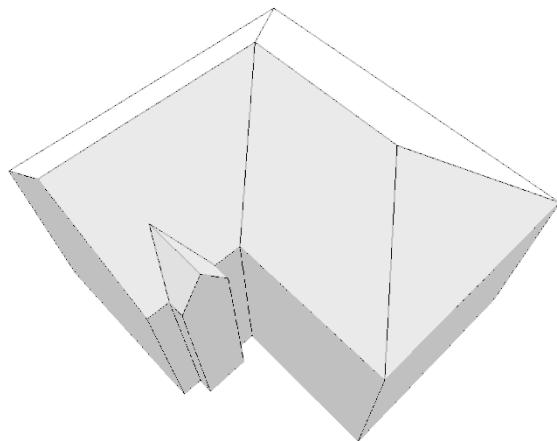
# Direkte Formvereinfachung



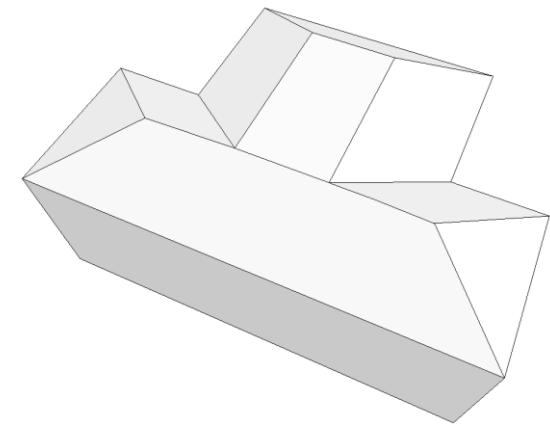
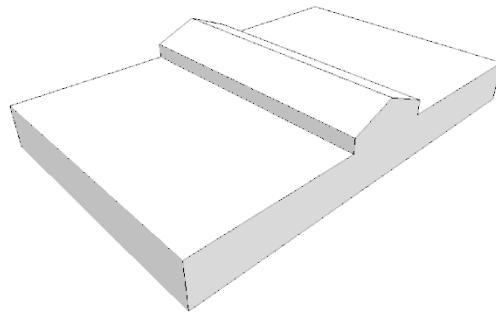
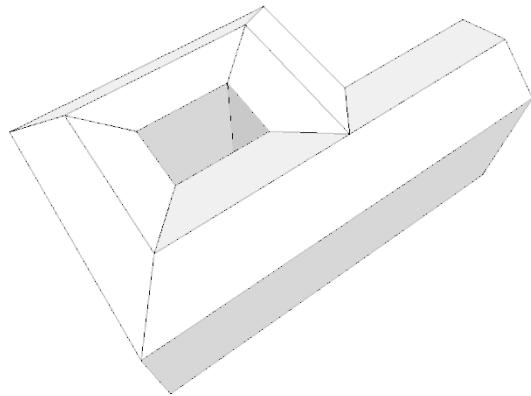
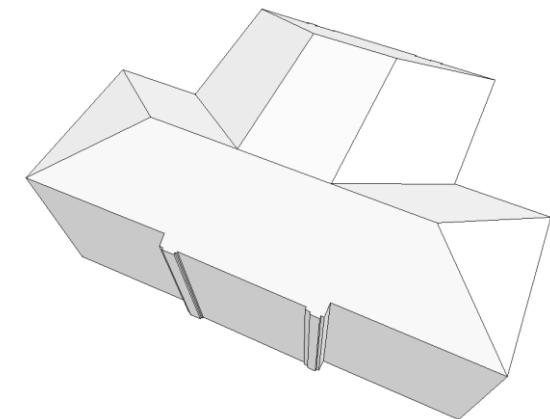
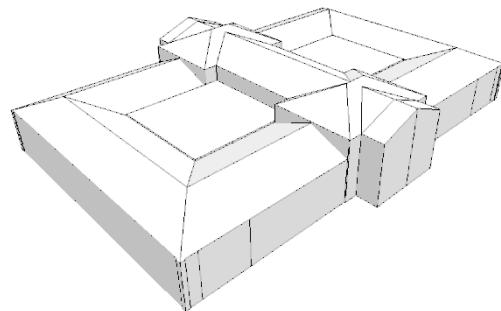
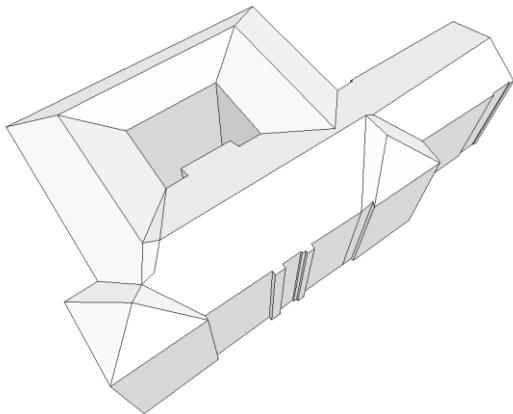
# Direkte Formvereinfachung



# Direkte Formvereinfachung

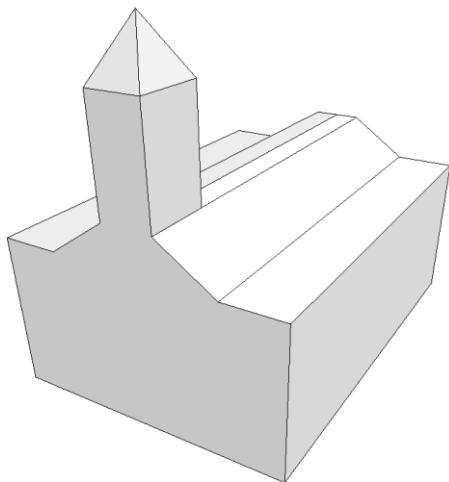
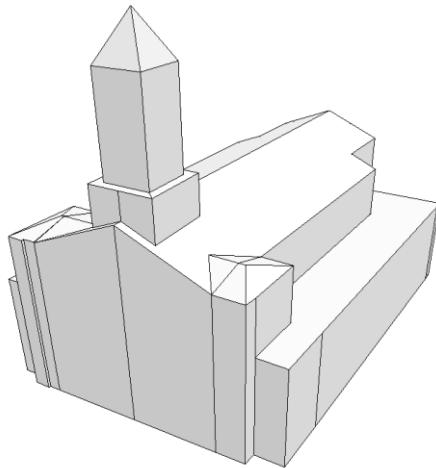


# Direkte Formvereinfachung

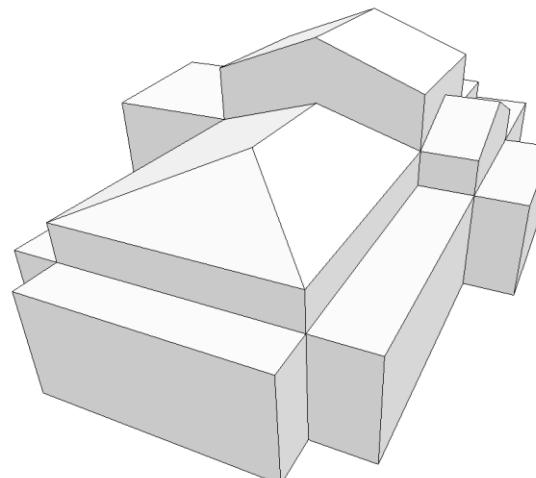
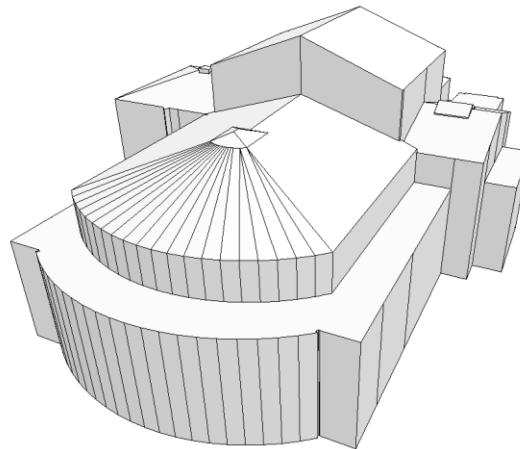


# Direkte Formvereinfachung

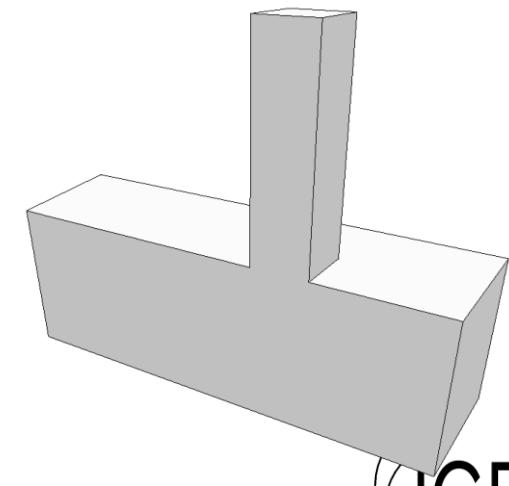
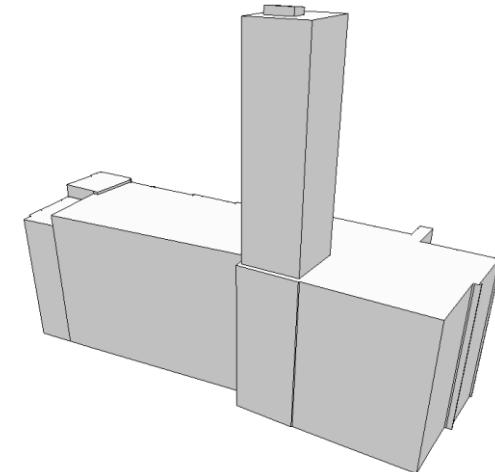
St. Eberhardskirche



Opernhaus



Rathaus



- Boykov, Y., Kolmogorov, V. (2011): Basic Graph Cut Algorithms. In: (Blake, A., Kohli, P., Rother, C., Eds.) *Markov Random Fields for Vision and Image Processing*, MIT Press, pp 31-50.
- Boykov, Y., Veksler, O., Zabih, R. (2011): Optimizing Multilabel MRFs using Move-Making Algorithms, In: (Blake, A., Kohli, P., Rother, C., Eds.) *Markov Random Fields for Vision and Image Processing*, MIT Press, pp 51-64.
- Brenner, C. (2000): Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 530, München 2000. 124p.
- Kada, M. (2007): Scale-Dependent Simplification of 3D Building Models Based on Cell Decomposition and Primitive Instancing. In: Proceedings of the International Conference on Spatial Information Theory: COSIT '07, Melbourne, Australia.
- Kada, M., McKinley, L. (2009): 3D Building Reconstruction from LIDAR Based on a Cell Decomposition Approach. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 3/W4, pp. 47-52.
- Niemeyer, J., Rottensteiner, F., Soergel, U. (2014): Contextual classification of lidar data and building object detection in urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 87, January 2014, pp 152-165.