

Non-Standard Formen in der Architektur

Albert Wiltsche

TU Graz, Institut für Architektur und Medien
email: wiltsche@tugraz.at

Im Rahmen des FWF-Forschungsprojektes „Non-Standard Architektur mit Ornamenten und planaren Elementen“ (L695) wurde am Institut für Architektur und Medien an der TU Graz versucht, neue Maßstäbe hinsichtlich der Realisierbarkeit von Freiformflächen zu setzen. Im Rahmen des Projektes wurde ein geometrischer Algorithmus entwickelt, der es erlaubt, doppelt gekrümmte Freiformflächen in ebene Teile zu zerlegen, die einem ornamentalen Muster folgen. Die ebenen polygonalen Teile (Paneele) können mit konventionellen CNC Maschinen kostengünstig gefertigt werden. Für die Realisierung wurde das Material Holz gewählt und für die Verbindungstechnik eine neuartige Klebe-Technik verwendet, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Holzbau und Holztechnik und der holz.bau.forschungs.gmbh an der TU Graz unter der Leitung von Thomas Bogensperger entwickelt wurde. Viele Details und Fotos sind unter <http://iam2.tugraz.at/fwf/freeform> zu finden.

Einleitung

Dem kreativen Einsatz neuer digitaler Planungswerkzeuge verdanken wir so Aufsehen erregende Bauwerke wie das Kunsthaus in Graz (Abbildung 1) oder die Hungerburgbahn in Innsbruck, deren Gebäudehüllen aus doppelt gekrümmten, frei geformten Flächen bestehen. Solche Elemente sind mit Lineal und Zirkel nicht mehr zu konstruieren, doch mit den heutigen CAD-Programmen können auch die komplexesten virtuellen Formen modelliert werden. Die Umsetzung dieser Modelle in gebaute Realität ist jedoch eine ganz andere Frage. Noch immer wird nach geeigneten Methoden gesucht, um die neue Formensprache mit vertret-



Abbildung 1: Kunsthaus Graz (Foto: Tono Gfrerrer)

barem Aufwand zu materialisieren.

Es versteht sich von selbst, dass so aufwändige Verfahren enorme Kosten verursachen können. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren verschiedene Strategien erforscht, die eine effizientere Produktion von Freiformbauten erlauben, in dem etwa die Gebäudehüllen so angepasst werden, dass Formteile mehrmals verwendet werden können, oder in dem die Flächen sogar so vereinfacht werden, dass die Herstellung mit seriell ge-

fertigten Bauelementen möglich wird. In diesem Zusammenhang hat auch die Geometrie in der Architektur wieder an Bedeutung gewonnen, da sie die nötige Unterstützung zur Bearbeitung der neuen Fragestellungen anbieten kann (Pottmann et al. 2007a).

Unumgänglich bei der Herstellung eines doppelt gekrümmten Bauwerkes im Realmaßstab ist die Zerlegung in eine abzählbare Menge von Einzelteilen, die hier mit Diskretisierung bezeichnet und nun näher erklärt wird.

Diskretisierung in gekrümmte Teile

Gebäudehüllen wie jene des Grazer Kunsthauses oder der Innsbrucker Hungerburgbahn folgen in ihrer Realisierung mehr oder weniger ihrer im CAD-Programm entwickelten Form. Da die Gesamtfläche zu groß ist, muss die Form in kleinere produzierbare Teile zerlegt werden. Dies kann zum Beispiel entlang einer Schar von Parameterlinien erfolgen. Benachbarte u- und v-Parameterlinien erzeugen so doppelt „gekrümmte Vierecke“,



Abbildung 2: Diskretisierung (Zerlegung) einer doppelt gekrümmten Fläche in „gekrümmte Vierecke“ am Beispiel des Grazer Kunsthauses

die sich im Allgemeinen alle voneinander unterscheiden und individuell erzeugt werden müssen (Abbildung 2).

Dies ist sehr aufwendig und kostenintensiv und auch immer eine potentielle Fehlerquelle bei der Herstellung und Montage der Einzelteile. Einfach gekrümmte Formen lassen sich viel leichter erzeugen und können deswegen auch leichter realisiert werden. Glas ist hierzu als Material sehr flexibel und auch dementsprechend einsetzbar (Weber 2009). In Abbildung 3 ist ein schiefer Kreiskegel zu sehen, der aus einfach gekrümmten Glaspaneelen erzeugt wurde, die der Kegelform folgen. Die einzelnen Glasflächen sind von Erzeugenden und Schichtenkreisen begrenzt und dort miteinander verbunden.



Abbildung 3: Joanneum Graz, Eingangsbereich

Der berühmte Architekt Frank O. Gehry äußerte sich einmal zu den Kosten von komplexen Geometrien auf folgende Weise: „Flat pieces cost one dollar, single curvature pieces cost two dollars; double curvature pieces cost ten dollars“.

Diskretisierung in ebene Teile

Eine besonders effektive Diskretisierungsstrategie ist die planare Diskretisierung. Dabei wird eine kontinuierlich gekrümmte Fläche durch eine Geometrie angenähert, die aus vielen einzelnen ebenen (planaren) Elementen besteht. Die exakte Geometrie der Fläche wird hierbei approximiert. Die ebenen Teile können aus industriell Massen produzierten Standardbaumaterialien gefertigt werden und sind üblicherweise sehr leicht mit Hilfe von CNC Maschinen herzustellen. Die Fertigung einer solchen diskreten Geometrie ist damit natürlich sehr viel günstiger, als die Produktion einer kontinuierlich gekrümmten Fläche.

Dreiecke

Die einfachste geometrische Möglichkeit, eine Freiformfläche in planare Elemente umzuwandeln, ist die Triangulierung. Dabei wird eine Reihe von Punkten auf der kontinuierlichen Fläche berechnet, aus denen dann ein Dreiecksnetz gebildet wird.

Diese Methode ist unter anderem an der Murinsel in Graz zu sehen (Abbildung 4). Weitere berühmte Beispiele sind die Hofüberdachung des British Museum in London von Norman Foster und die neue Messe in Mailand von Massimiliano Fuksas.



Abbildung 4: Dreiecksdiskretisierung am Beispiel der Murinsel in Graz

Die Dreiecksgeometrie bedingt jedoch, dass bei einer regelmäßigen Triangulierung an den Eckpunkten der einzelnen Flächen im Durchschnitt sechs Paneele aneinander stoßen, was zu komplexen und wiederum kostspieligen Konstruktionsdetails führt, insbesondere dann, wenn entlang der Flächenkanten eine tragende Unterkonstruktion geführt wird. Eine noch komplexere Variante ist in Abbildung 5 zu sehen. Die windschiefen Vierecke, die aus der Überdeckung der Fläche mit den u- und v-Parameterlinien stammen, wurden hierbei in Dreiecke zerlegt. Es treffen sich hier in jedem Kreuzungspunkt der Parameterlinien alternierend vier bzw. acht Dreiecke.



Abbildung 5: Freiformfläche aus Dreiecken

Vierecke

Will man eine Zerlegung einer gekrümmten Fläche in viereckige Teile erreichen, kann man dazu z.B. Kegel-, Zylinder-, Dreh- oder Schiefblächen (Glymph 2002) nehmen. Ein diskretes Parameterliniennetz, das der natürlichen Erzeugungsweise der Flächen folgt, ergibt eine Aufteilung in ebene Vierecke.

Drehflächen zum Beispiel können sehr leicht durch gleichseitige Trapeze approximiert werden. Abbildung 6 zeigt als Beispiele einen Drehkegel und eine Halbkugel.



Abbildung 6: Diskretisierte Drehflächen am Beispiel eines Drehkegels (links, Foto: Lukas Pointner) und einer Halbkugel (rechts, Synagoge in Graz)

Abbildung 7 links zeigt einen parabolischen Zylinder, dessen Diskretisierung aus ebenen Rechtecken besteht. Die Aufteilung erfolgt der geometrischen Erzeugungsweise entlang der Erzeugenden und Schichtenparabeln.

Auch die Standard-Parametrisierung einer allgemeinen Schiebfläche liefert eine Zerlegung in ebene Vierecke (Abbildung 7 rechts).



Abbildung 7: Diskretisierter parabolischer Zylinder (Botanischer Garten in Graz) und diskretisierte Schiebfläche (Chicago University Library, Foto: Bernhard Ortel)

Auch mit starker österreichischer Beteiligung wird an der Geometriediskretisierung geforscht (Liu et al. 2006, Pottmann et al. 2007b, Pottmann et al. 2008, Zadavec et al. 2010). Eine Wiener Forschergruppe um Helmut Pottmann entwickelte eine Methode, bei der eine Freiformfläche durch ein Netz, das meist aus viereckigen Polygonen besteht, angenähert wird. Die Polygone sind dabei anfangs nicht planar, können dann aber mithilfe eines iterativen Verfahrens dahingehend optimiert werden, dass eine ebene diskrete Geometrie entsteht. Diese Methode wurde zum Beispiel bei der Außenhaut des Yas Marina Hotels in Abu Dhabi von Asymptote Architecture verwendet.

Fünf- und mehrseitige Polygone

Will man eine allgemeine doppelt gekrümmte Fläche in Polygone zerlegen, die aus vier oder mehr Seiten besteht, muss man sich eine spezielle Vorgehensweise überlegen. In (Wang et al. 2008) wird zum Beispiel eine Zerlegung in Sechsecke vorgestellt, die durch einen Optimierungsalgorithmus erhalten wird.

Tangentialebenenmethode

Am Institut für Architektur und Medien der TU Graz wird momentan an einem weiteren Ansatz gearbeitet. Die hier erforschte Methode basiert auf

Verschneidungen von Tangentialebenen der originalen kontinuierlich gekrümmten Fläche (Troche 2008). Dabei wird eine Anzahl von Punkten im $[u, v]$ -Parameterraum der originalen Fläche verteilt. Das ebene Voronoi-Diagramm dieser Punkte ergibt eine erste sehr gute Näherung der zu diskretisierenden Fläche (Abbildung 8 Mitte). Zu diesen Parameterpunkten werden dann die zugehörigen Flächenpunkte bestimmt.

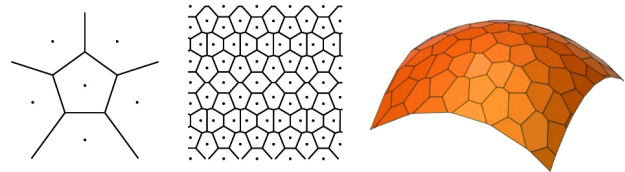


Abbildung 8: Voronoi-Zelle (links), Parameterwerte mit Voronoi-Diagramm (Mitte) und das Ergebnis der Tangentialebenenverschneidung

Anschließend werden die Tangentialebenen der Flächenpunkte bestimmt und miteinander geschnitten. Die Schnittlinien der Tangentialebenen bilden dabei die Seiten der ebenen Paneele der diskreten Geometrie (Abbildung 8 rechts). Um die richtigen Tangentialebenen für die Schnitte zu bestimmen, wird in jedem der beteiligten Punkte P eine orthogonale perspektive Affinität in Richtung einer der Hauptkrümmungsrichtungen ausgeführt. Die Affinität wird so gewählt, dass dem Betrage nach gleich große Hauptkrümmungen entstehen. Bei positiv gekrümmten Flächenteilen erhält man einen Nabelpunkt und einen Kreis als Dupinsche Indikatrix (Abbildung 9).

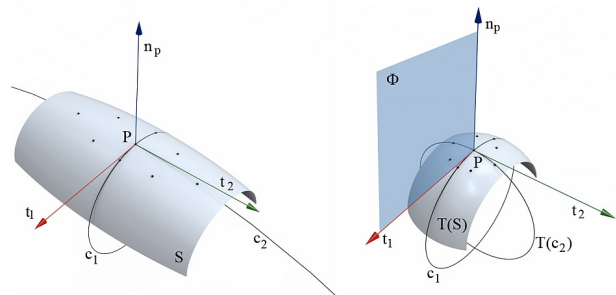


Abbildung 9: Für die richtige Tangentialebenenverschneidung wird in jedem der zugehörigen Flächenpunkte eine perspektive orthogonale Affinität ausgeführt, um eine Gleichverteilung der Punkte zu erhalten.

Bei negativ gekrümmten Flächenteilen entstehen gleichseitige Hyperbeln als Indikatrix. Die Dupinschen Indikatrizen können weiters dazu benützt werden, um die Schnittlinien zwischen benachbarten Tangentialebenen abzuschätzen (Wang et al. 2008, Stavric et al. 2011).

Bei der vorgestellten Tangentialebenenmethode gibt es zwei sehr wichtige Fragen zu lösen:

1. Wie verteilt man die Punkte im Parameterbereich, sodass sich brauchbare Lösungen ergeben?
2. Ist der Algorithmus schnell genug, dass man damit interaktiv in Echtzeit arbeiten kann?

Die Antwort auf die Frage 1 wurde dahingehend gelöst, dass ein ebenes Muster als Anfangsform gewählt werden kann und auf eine Fläche übertragen wird. Dabei kommt es natürlich bei der Übertragung auf die Fläche zu Veränderungen der ornamentalen Form, was mit den unterschiedlichen Flächenkrümmungen zu tun hat. Der Designer hat damit aber ein Werkzeug zur Verfügung, womit er seine Form sehr gut abschätzen kann.

Als Antwort zu Frage 2 dient folgendes Beispiel: Für eine Fläche, die aus 1000 ebenen Teilen besteht, dauert die Berechnung auf einem 3.4 Ghz PC mit i-7 quadcore Prozessor 70 Millisekunden. Diese Geschwindigkeit ermöglicht somit dem Designer eine interaktive Benützung der Software in Echtzeit und liefert unmittelbar ein direktes Feedback (Manahl et al. 2012).

Abbildung 10 zeigt als weiteres Beispiel die Dachfläche des Hippo-Hauses im Berliner Zoo mit einer ornamentalen Überdachung aus Fünf-, Sechs- und Achtecken.

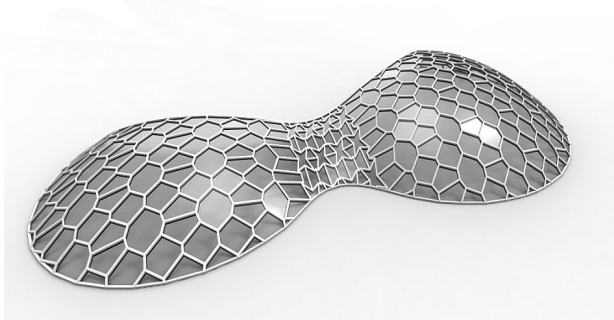


Abbildung 10: Hippo-Haus in Berlin in ornamentaler Ausführung

Bemerkungen

1. Als großer Vorteil erweist sich die Tatsache, dass bei der gezeigten Vorgehensweise die entstehenden Muster automatisch zu einer Konfiguration tendieren, bei der immer nur drei Paneele an den Eckpunkten der Flächen zusammenstoßen. Dadurch treffen sich auch immer alle Symmetrieebenen aller beteiligten angrenzenden Schnittflächen, was bei Verwendung des Materials Holz eine sehr entscheidende Frage ist. Will man nämlich vier Platten-Paneele mit gleicher Materialstärke in einen Punkt zusammenführen, muss darauf geachtet werden, dass die beteiligten Platten eine gemeinsame Kugel berühren (Wiltsche et al. 2008). Die zu Grunde liegenden Diskretisierungsnetze werden auch konische Netze genannt (Liu et al. 2006).

2. Ein weiterer Vorteil ist die lokale Kontrolle. Die programmierte Software erlaubt es dem Benutzer, jederzeit die Lage einzelner Punkte zu verändern,

indem er sie auf der Fläche verzieht. Die dazugehörige Tangentialebene und ihre Schnitte mit den Nachbarflächen werden automatisch mit generiert.

3. Lineare Transformationen führen ebene Polygone wieder in ebene Polygone über. Das heißt, dass Streckungen, Scherungen, Affinitäten und Kollineationen eine in ebene Polygone diskretisierte Fläche wieder in eine solche überführt. Das ergibt einen weiteren Spielraum bei der Gestaltung von Formen.

4. Positiv gekrümmte Flächen (positive Gaußsche Krümmung) liefern als Ergebnis der Diskretisierung immer konvexe Polygone (Abbildung 8 rechts). Bei der Verwendung von Flächen mit hyperbolischen Flächenpunkten (negative Gaußsche Krümmung) können Polygone mit einspringenden Ecken entstehen, die auch oft als Butterfly-Polygone bezeichnet werden (Abbildung 11).

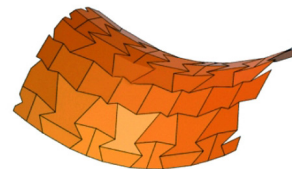


Abbildung 11: Eine negativ gekrümmte Flächen kann durch Butterfly-Polygonen diskretisiert werden.

Material und Verbindungstechnik

Neben der geometrischen Herausforderung, einen Diskretisierungs-Algorithmus zu finden, war die Frage des Materials und dessen Verbindungstechnik das zweite Hauptthema des Forschungsprojektes. Auf dieses breite Thema kann hier aber nur sehr kurz eingegangen werden.

Es sollte ein Verfahren entwickelt werden, die diskretisierten Freiformflächen mit Hilfe von Brettsperrholzplatten (BSP) in baubare Architektur umzusetzen. Holz hat sich idealerweise als natürlicher Rohstoff angeboten. Österreich ist reich an Holz. Holz ist umweltverträglich und wächst auch wieder nach. Das Institut für Holzbau und Holztechnologie an der TU Graz gilt international als Wiege des verwendeten Brettsperrholzes. Das legte auch die Verwendung dieses Materials nahe.

Für die Verbindung wurde eine neuartige Technik verwendet, bei der nur Holz und ein Klebemittel aber keine Metallteile zum Einsatz kamen. In monatelangen Versuchen am Institut für Holzbau und Holztechnologie wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die BSP-Platten mit Hilfe von Kertoplaten miteinander verklebt werden (Pfaller 2012). Die Kertos werden dabei in konische Schlitze eingeleimt, die zuvor in der CNC-Fertigung gefräst werden (Abbildung 12 und 13). Diese Methode ermög-

licht eine biegesteife Kantenverbindung, welche flexibel für verschiedene Winkel ist.



Abbildung 12: Konische Schlitz-Geometrie in den BSP-Platten (links) und die ein zu leimenden Kerto-Platten



Abbildung 13: Die eingeleimten Kerto-Platten

Prototyp

Zur Demonstration der wissenschaftlichen Untersuchungen und Ergebnisse wurde in den letzten Monaten des Projektes ein Prototyp im Maßstab 1:1 erstellt. Ziel war es, eine komplexe Form zu kreieren, an der der geometrische Ornamentierungsalgorithmus sowie die Verbindungstechnik ideal erprobt werden konnten. Das Design folgt keiner speziellen praktischen Anwendung, sondern sollte vielmehr die Vielseitigkeit der neu entwickelten Ergebnisse und des Baustoffes Holz demonstrieren. Desweiteren sollte das gebaute Design freitragend sein und durch keine Hilfsmittel gestützt werden.

Form

Nach längeren Design-Studien wurde jene Nurbs-Form ausgewählt, die in Abbildung 14 links zu sehen ist. Als ornamentale Diskretisierung wurde die Form in Abbildung 14 rechts gewählt. Die Form besteht aus Fünf-, Sechs- und Siebenecken und ist symmetrisch bezüglich ihrer Längsrichtung. Die Abmessungen betragen ca. 10 x 4 x 4 m.

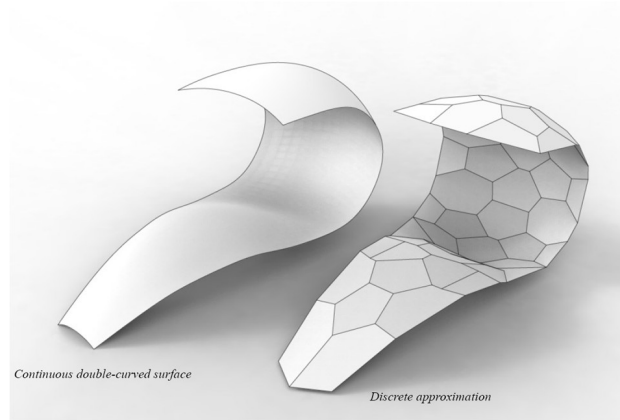


Abbildung 14: Die Prototyp-Nurbs-Form und ihre Diskretisierung

Material und CNC-Fertigung

Der Prototyp selbst wurde aus 51 Brettsperholzplatten (Plattendicke 95mm) gefertigt. Deren Seitenlängen lagen zwischen 1.0 und 2.5 Metern. Die Schnitt-Formen wurden von der Projekt-Software vorbereitet und an die CNC-Bearbeitung weitergegeben (Abbildung 15).



Abbildung 15: CNC-gefertigte polygonale BSP-Paneele

Zusammenbau

In der Versuchshalle der HTBLVA Graz Ortwein wurde der Prototyp in drei Teilen vorgefertigt.

Bauhandwerker (Zimmerer) und Schüler der Fachrichtung Bautechnik konnten ihre Kenntnisse bei diesem ungewöhnlichen Objekt idealerweise erweitern und in die Tat umsetzen (Abbildung 16). Vor allem die praktische Erfahrung und der Enthusiasmus der beteiligten Lehrpersonen trugen sehr zum Erfolg dieses Projektes bei.



Abbildung 16: Schüler der HTBLVA Graz Ortweinschule beim Zusammenbau des Prototyps

Nach der Fertigung wurden die Teile mit einem Schwertransporter an die TU Graz geliefert und dort endgültig zusammengeklebt (Abbildung 17).



Abbildung 17: Abtransport der Teile vor der HTBLV Graz Ortwein

Abbildung 18 zeigt das Endergebnis dieser zweieinhalbjährigen Projektarbeit.



Abbildung 18: Der Prototyp am Campus der TU Graz in der Infeldgasse. Die Fläche ist auf einem Eisenträger mit 6 Lagerpunkten und einer zentralen Platte gelagert.

Danksagung

Dieses Projekt wurde vom Österreichischen Förderungsfond FWF unter der Nummer L695 gefördert. An dieser Stelle möchte sich der Autor recht herzlich bei allen Projektmitarbeitern bedanken, die auch einen Teil der Abbildungen in diesem Artikel erzeugt haben: Milena Stavric, Markus Manahl, Heimo Schimek, Emmanuel Calderon, Urs Hirschberg, Christoph Pfaller und Thomas Bogensperger.

Literatur

- [1] Glymph J., Shelden D., Ceccato C., Mussel J. and Schober H. (2002): *A parametric strategy for freeform glass structures using quadrilateral planar facets*. In: *Proc. Acadia 2002*, pp. 303 - 321.
- [2] Liu Y., Pottmann H., Wallner J., Yang Y.-L. and Wang W. (2006): *Geometric modeling with conical meshes and developable surfaces*. *ACM Trans. Graphics* 25, 3, pp. 681 - 689.
- [3] Pfaller C. (2012): *Experimentelle und theoretische Betrachtungen verklebter Holz-Holz-Verbindungen am Beispiel von Freiformflächen in Brettsperrholz*. Masterarbeit, TU Graz.
- [4] Manahl M., Schimek H., Calderon E. and Wiltsche A. (2012): *Ornamental Discretisation of Free-Form Surfaces*. In: *Beyond Codes and Pixels, Proc. CAADRIA 2012*, pp. 347 - 356.
- [5] Pottmann H., Asperl A., Hofer M. and Kilian A. (2007a): *Architectural Geometry*, Bentley Institute Press.
- [6] Pottmann H., Liu Y., Wallner J., Bobenko A. and Wang W. (2007b): *Geometry of multi-layer freeform structures for architecture*, *ACM Trans. Graphics* 26, #65, 1-11.
- [7] Pottmann H., Schiffner A. and Wallner J. (2008): *Geometry of architectural freeform structures*. *Int. Math. Nachr.* 209, 15-28.
- [8] Stavric M., Wiltsche A. and Freissling C. (2011): *Discretization of free-form surfaces by plane elements derived from tangent planes*, *Glass Performance Days 2011, Tampere*.
- [9] Troche C. (2008): *Planar Hexagonal Meshes by Tangent Plane Intersection*. *Advances in Architectural Geometry, Vienna*, 57 - 60.
- [10] Wang W., Liu Y., Yan D., Chan B., Ling R. and Sun F. (2008): *Hexagonal meshes with planar faces*, *Technical Report, TR-2008-13, Department of Computer Science, The University of Hong Kong*.
- [11] Weber F. (2009): *Curved glass structures*, *Glass Performance Day 2009*.
- [12] Wiltsche A., Schimek H. and Stavric M. (2008): *Geometric aspects in Producing Non-Standard Architecture with Standard Tools*. *Journal for Geometry and Graphics* 12 (2008) 2, pp 205 - 214.
- [13] Zadavec M., Schiffner A. and Wallner J. (2010): *Designing Quad-dominant Meshes with Planar Faces*. In: *Computer Graphics Forum 29/5 (2010)*, 1671-1679, *Proc. Symp. Geometry Processing*.