

Praxisprojekt

Half-Edge Mesh für Unity3D

Erstellt von:

Yannick Dittmar

Studiengang: Allgemeine Informatik

Matrikelnummer: 11117676

Datum der Abgabe: 17.05.2023

Abnahme: Prof. Dr. Christian Kohls

Technische Hochschule Köln

Fakultät für Informatik und Ingenieurwissenschaften

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	2
2	Grundlagen	3
2.1	Unity3D	3
2.2	Triangular Meshes	3
2.3	Triangular Meshes in Unity	4
2.4	Datenstrukturen für Meshes	5
2.4.1	Triangle-Neighbor Structure	6
2.4.2	Winged-Edge Mesh	6
3	Half-Edge Mesh	8
3.1	Vergleich der Datenstrukturen	8
3.2	Implementierung der Komponenten	9
3.2.1	Klassenstruktur	9
3.2.2	Die Vertex, HalfEdge und Face Klassen	10
3.2.3	Listenklassen	10
3.3	Erstellen eines Half-Edge-Meshes	11
3.3.1	GenerateUnityMesh	11
3.3.2	GenerateHalfEdgeMesh	12
4	Operationen	15
4.1	Split Half-Edge	15
4.2	Edge Collapse	18
4.3	Subdivision	20
4.4	2D-Zerstörungssimulation	22
5	Vergleich zwischen Half-Edge Mesh und UnityMesh	26
6	Ausblick	28
7	Rechnungen	29
7.1	Indexed Mesh	29
7.2	Triangle-Neighbor Structure	29
7.3	Winged-Edge Mesh	29
7.4	Half-Edge Mesh	29

1 Abstract

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Performance von Unity-Meshs mit der eines Half-Edge Mesh zu vergleichen. In dieser Arbeit wird versucht die folgende Forschungsfrage zu beantworten: Wie unterscheidet sich die Laufzeit von Unity-Meshs und Half-Edge Meshs bei der Ausführung von Standardmethoden für dynamische Anwendungen und was bedeutet dies für ihre Anwendungsbereiche?

Um diese Frage zu beantworten wird ein Prototyp entwickelt und das Half-Edge Mesh theoretisch betrachtet, sodass Aussagen über das durchschnittliche Laufzeitverhalten getroffen werden können. Die folgenden Analysen zeigen, dass sich Half-Edge Meshs durch ihre deutlich bessere Laufzeit für dynamische Meshs besser eignen, dafür jedoch einen höheren Speicherbedarf aufweisen. Deshalb sollte bei größeren Meshs abgewogen werden, ob der Anwendungsfall ein Half-Edge Mesh benötigt oder ob die native Unity-Lösung ausreichend ist.

2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen skizziert. Es umfasst sowohl die Entwicklungsumgebung Unity3D, als auch das Konzept der Triangular Meshes, die essenziell in der 3D-Computergrafik sind.

2.1 Unity3D

Unity3D ist eine plattformübergreifende Spiele-Engine mit eingebauter Entwicklungsumgebung für zwei- und dreidimensionale sowie Augmented- und Virtual-Reality Spiele und Simulationen. Die Engine besitzt einen eigenen Editor, in dem diverse Szenarien erstellt und bearbeitet werden können. Um diese Szenarien zum Leben zu erwecken, unterstützt Unity selbst programmierte Scripte auf der Grundlage von C#. Insgesamt laufen auf über drei Milliarden Geräten Programme, die mit Unity erstellt wurden, auf über 25 verschiedenen Plattformen, wie Windows oder Linux und den gängigen Spielekonsolen wie die PlayStation 4, XBox One und der Nintendo Switch. Zudem sind 50% aller mobilen Spiele und 60% aller VR/AR Anwendungen mithilfe von Unity entstanden [4]. Spiele wie „Pokémon Go“, „Superhot“ und das Simulationsspiel „Universe Sandbox“ sind drei Beispiele für Spiele, die in Unity erstellt wurden.

2.2 Triangular Meshes

Um auf einem Computer eine dreidimensionale Szene, zum Beispiel mit der Hilfe von Unity darzustellen, müssen alle dargestellten Modelle angenähert werden. In der Regel werden dafür Dreiecksnetze (Triangular Mesh) verwendet, die die Oberfläche eines Objekts mithilfe von Dreiecken annähert, wie Abbildung 1 anhand eines Delfins gezeigt. Informationen, die für ein solches Dreiecksnetz garantiert benötigt werden, sind eine Reihe von Eckpunkten, den Vertices, welche immer in Dreiermengen auftreten und deren Position im dreidimensionalen Raum [3, S.262]. Zwei Vertices werden durch Kanten (Edges) verbunden und drei Kanten bilden damit Dreiecksflächen, auch Faces genannt.

Die einfachste Implementierung eines solchen Meshes sieht vor, zu jedem Dreieck die drei Eckpunkte mit jeweils einer X-, Y- und Z-Koordinate zu speichern. Wichtig ist, dass die Orientierung der Dreiecke immer gleich bleibt, sodass im gesamte Netz die Punkte aller Dreiecke im oder gegen den Uhrzeigersinn angegeben sind. Eine konsequente Behandlung der Orientierung der Dreiecke ist für jede Art von Mesh wichtig. Ein Nachteil von dieser Art ein Mesh zu speichern ist, dass Punkte die häufig im Netz vorkommen mehrfach gespeichert werden.

Aus diesem Grund kann eine abgewandelte Version dieser Darstellungsform verwendet werden, ein Indexed Mesh. Ein solches Mesh trennt die Vertices von der Verwendung im Mesh. Dafür werden zwei Listen benötigt, eine mit den Punkten und eine Liste mit den Indices, wie die Dreiecke zu konstruieren sind. Ein Index zeigt auf eine Position in der Vertex-Liste und drei Indices formen jeweils eine Face [3, S.265].

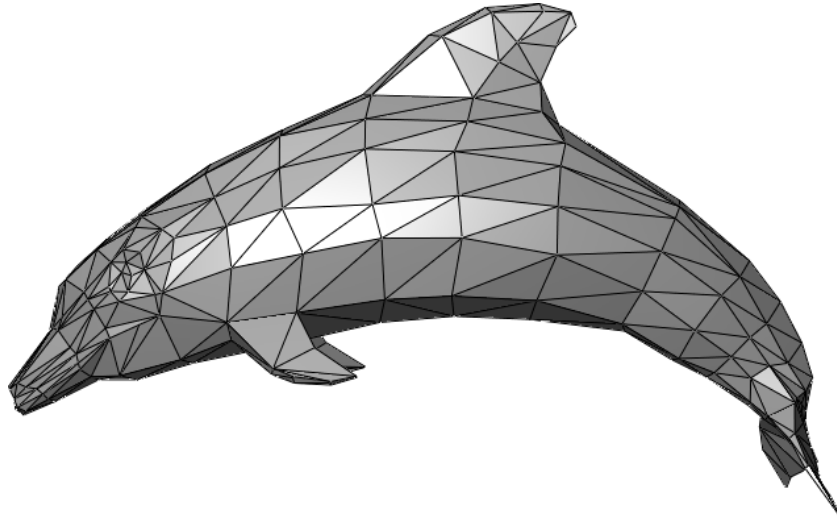


Abbildung 1: Beispiel eines Dreiecks-Polygonen-Netz, von [5]

2.3 Triangular Meshes in Unity

Unity bietet die Möglichkeit, mit Hilfe von selbstgeschriebenen Scripten eigene Indexed Meshes zu erstellen. Dafür stellt Unity ein eigenes Mesh-System zur Verfügung, die *UnityEngine.Mesh*-Klasse. Damit diese ein Mesh rendern kann, erwartet das Mesh zum einen ein *UnityEngine.Vector3*-Array für die Vertices, wobei ein *Vector3* ein Punkt im dreidimensionalen Raum darstellt. Zum anderen erwartet es ein *int*-Array, welches die Reihenfolge der Eckpunkte festlegt, indem die Indizes der zu verwendenden Vertices angegeben werden. Zu beachten ist, dass die Vertices eines Unity-Meshs immer im Uhrzeigersinn orientiert sind, im Gegensatz zu Anwendungen wie Blender, die gegen den Uhrzeigersinn arbeiten.

Der folgende Code zeigt beispielhaft, wie ein Unity-Mesh erzeugt werden kann:

```

1 public void CreateMesh()
2 {
3     //— Der Vollständigkeit halber vorhanden
4     meshFilter = gameObject.GetComponent<MeshFilter>();
5     if (meshFilter == null)
6         meshFilter = gameObject.AddComponent<MeshFilter>();
7
8     //— vom MeshFilter zum Mesh
9     mesh = meshFilter.sharedMesh;
10    if (mesh == null)
11        mesh = new Mesh { name = "Quad" };
12
13    //— MeshRenderer holen
14    meshRenderer = this.gameObject.GetComponent<MeshRenderer>();
15    if (meshRenderer == null)
16        meshRenderer = gameObject.AddComponent<MeshRenderer>();

```

```

17
18 //— Mesh zusammenstellen
19 //— Vertices/Points
20 Vector3 P0 = new Vector3(0, 0, 0);
21 Vector3 P1 = new Vector3(0, 1, 0);
22 Vector3 P2 = new Vector3(1, 0, 0);
23 Vector3 P3 = new Vector3(1, 1, 0);
24
25 List<Vector3> verticies = new List<Vector3> { P0, P1, P2, P3 };
26
27 //— Triangles
28 List<int> triangles = new List<int>
29     {0, 1, 2, // — Dreieck 1
30     2, 1, 3}; // — Dreieck 2
31
32 //— Mesh bef"ullen
33 mesh.Clear();
34 //— Vertices zuweisen
35 mesh.vertices = verticies.ToArray();
36 //— Triangles zuweisen
37 mesh.triangles = triangles.ToArray();
38 //— Mesh dem MeshFilter zuweisen
39 meshFilter.sharedMesh = mesh;
40 }

```

Und liefert das folgende Ergebnis:

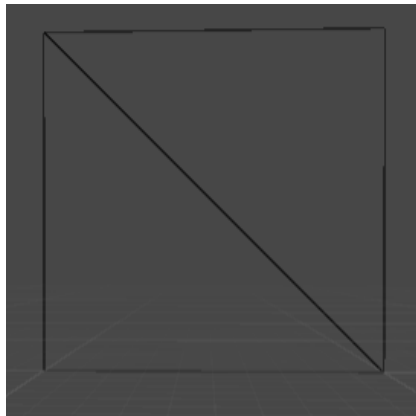


Abbildung 2: Die Wireframeansicht des erstellten Meshes im Unity Editor

2.4 Datenstrukturen für Meshes

Wird zur Laufzeit eine Nachbarschaftsbeziehung abgefragt, zum Beispiel welche Faces oder Kanten an einem Punkt anliegen oder welche Endpunkte eine Edge hat, stößt ein

Indexed Mesh schnell an seine Grenzen. Diese Informationen lassen sich für ein solches Mesh über eine erschöpfende Suche ermitteln, dessen Laufzeit von der Größe des Meshes abhängig ist. Um diese Probleme zu lösen gibt es unterschiedliche Datenstrukturen, die einzelne Komponenten eines Meshes direkt in eine Beziehung zueinander setzen.

2.4.1 Triangle-Neighbor Structure

Ein solcher Ansatz ist die Triangle-Neighbor Structure (Dreiecks-Nachbar Struktur). Dabei erhält jedes Dreieck eine Referenz auf jeden seiner Nachbarn und jeder Vertex speichert zusätzlich noch einen Pointer auf ein benachbartes Dreieck. Eine beispielhafte Implementierung sieht wie folgt aus [3, S.269]:

```

1  class Triangle
2  {
3      Triangle[3] Neighbours;
4      Vertex[3] Vertices;
5  }
6
7  class Vertex
8  {
9      // — Vertex specific data
10     Vector3 Point;
11     Triangle Triangle;
12 }
```

Der Vorteil gegenüber einem Indexed Mesh ist, dass nun nicht mehr jeder Punkt betrachtet werden muss, sondern mithilfe der Faces Aussagen über das Mesh getroffen werden können. Ein Problem, welches beim traversieren des Meshes auftritt, ist, dass nach jedem Schritt geprüft werden muss, ob die nächste Face nicht gleichzeitig auch die letzte Face war. Damit dieses Problem nicht auftritt, kann von einem facebasierten Ansatz auf einen Edgebasierten umgestellt werden.

2.4.2 Winged-Edge Mesh

Eine edgebasierte Datenstruktur ist das Winged-Edge Mesh. Diese Datenstruktur besteht aus Edges, Faces und Vertices. Jede Face und jeder Vertex verweist auf eine anliegende Kante. Zudem besitzt jede Kante eine Referenz auf ihren Start- und Endpunkt (Head und Tail), die beiden anliegenden Faces sowie die beiden vorherigen und nachfolgenden Edges. Aus dieser Beschreibung ergibt sich eine solche Implementierung [3, S.273]:

```

1  class Edge
2  {
3      Edge LeftPrevious, RightPrevious, LeftNext, RightNext;
4      Vertex Head, Tail;
5      Face Left, Right;
6  }
```

```
7
8 class Face
9 {
10     // — Face specific data
11     Edge Edge;
12 }
13
14 class Vertex
15 {
16     // — Vertex specific data
17     Vector3 Point;
18     Edge Edge;
19 }
```

Die Vorteile gegenüber der Triangle-Neighbor Structure sind, dass nicht nur Zugriffe zwischen Faces und Vertices konstant sind, sondern auch Abrufe von Kanten auf Dreiecke und Punkte vice versa in konstanter Zeit möglich sind. Die Herausforderung beim Arbeiten mit einem Winged-Edge Mesh ist, dass immer drauf geachtet werden muss, aus welcher Richtung die aktuelle Edge kommt, um in der richtigen Richtung weiterzuarbeiten. Diese Unannehmlichkeit wird im Half-Edge Mesh gelöst.

3 Half-Edge Mesh

Nachdem im vorherigen Kapitel die Grundlage unterschiedlicher Datenstrukturen beschrieben wurden, wird im folgenden Kapitel die eine weitere Datenstruktur beschrieben. Um ein Traversieren eines Meshes, Abfragen der Nachbarschaftsbeziehungen der einzelnen Meshkomponenten und Operationen wie „Subdivisionen“ von Faces (Unterteilung der Faces in kleinere Dreiecke) so einfach wie möglich zu machen, gibt es neben den oben genannten Ansätzen noch den Ansatz der Half-Edge Meshes. Ein solches Mesh besteht aus folgenden Komponenten:

- Eine Liste von Vertices,
- Eine Liste von Half-Edges,
- Eine Liste von Faces.

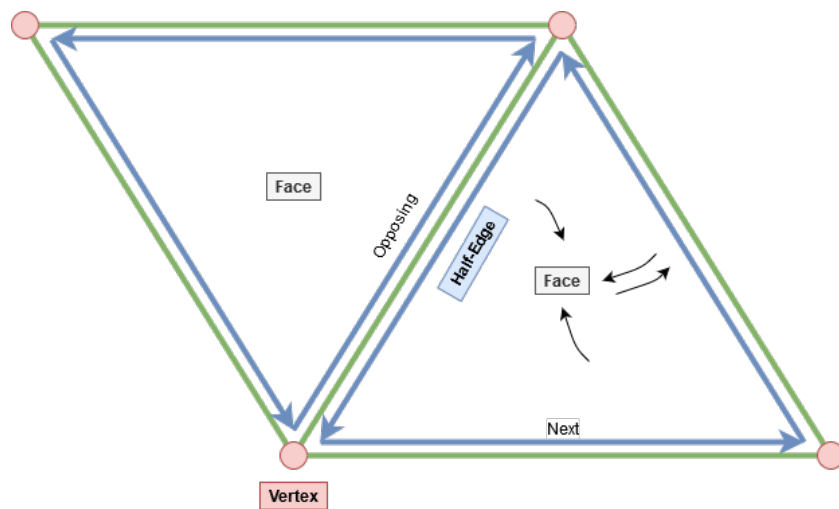


Abbildung 3: Die Elemente eines Half-Edge-Mesh.

Im Gegensatz zu den Winged-Edge Meshes modellieren die Half-Edge Meshes eine Kante nicht explizit, sondern als Kombination aus zwei Half-Edges, die in jeweils entgegengesetzte Richtungen auf einen der Endpunkte der Kante zeigen, wobei die Half-Edges gegen den Uhrzeigersinn orientiert sind. Durch die Aufteilung der Kanten kann jede Half-Edge genau einer Face zugeordnet werden und besitzt somit nicht mehr eine Referenz auf den linken und rechten Nachfolger, sondern einen nur noch einen Pointer auf die nächste Half-Edge der Face, wie in Abbildung 3 gezeigt. Zudem besitzt jede Half-Edge einen Verweis auf die zugehörige Face sowie auf die Gegenüberliegende Half-Edge. Ein Verweis auf die Vorherige ist nicht nötig, da diese die übernächste Kante ist.

3.1 Vergleich der Datenstrukturen

Mit den vorgestellten Datenstrukturen kommen Vor- und Nachteilen einher. Die Entscheidung, welche von diesen verwendet wird, ist vom Use Case der Anwendung abhängig.

3 Half-Edge Mesh

Verglichen werden können die Datenstrukturen in Sachen Speichernutzung und der Laufzeit von Nachbarschaftsabfragen. Bei der Speichernutzung wird ein allgemeines Mesh mit n_v Vertices betrachtet, bei der Laufzeitanalyse wird zusätzlich mit n_t die Anzahl der Dreiecke und mit m_{ev} die Anzahl der Kanten pro Vertex dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Datenstrukturen

	Indexed Mesh	TNS	WEM	HEM
Relativer Speicherbedarf	$36 \times n_v \text{ Byte}$	$116 \times n_v \text{ Byte}$	$228 \times n_v \text{ Byte}$	$228 \times n_v \text{ Byte}$
Laufzeitanalyse der möglichen Abfragen:				
Edge \rightarrow Vertices	N/A	N/A	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
Edge \rightarrow Faces	N/A	N/A	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
Edge \rightarrow angrenzende Edges	N/A	N/A	$\mathcal{O}(n_{ev})$	$\mathcal{O}(n_{ev})$
Vertex \rightarrow Edges	$\mathcal{O}(n_t)$	$\mathcal{O}(n_{ev})$	$\mathcal{O}(n_{ev})$	$\mathcal{O}(n_{ev})$
Vertex \rightarrow Faces	$\mathcal{O}(n_t)$	$\mathcal{O}(n_{ev})$	$\mathcal{O}(n_{ev})$	$\mathcal{O}(n_{ev})$
Face \rightarrow Edges	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
Face \rightarrow Vertices	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$
Face \rightarrow angrenzende Faces	$\mathcal{O}(n_t)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$	$\mathcal{O}(1)$

Tabelle 2: Vergleich der Laufzeit und des Speicherbedarfs von Indexed Mesh, Triangle-Neighbor Structure (TNS), Winged-Edge Mesh (WEM) und Half-Edge Mesh (HEM)

Auffällig ist, dass der Speicherbedarf mit der Komplexität des Netzes wächst, wodurch einzelne Abfragen beschleunigt oder ermöglicht werden können. Zusätzlich fällt auf, dass das Winged-Edge Mesh gleich wie das Half-Edge Mesh abschneidet, allerdings bietet das Half-Edge Mesh in der Handhabung, durch eine eindeutige Zuordnung von Half-Edge zu Face, große Erleichterungen.

3.2 Implementierung der Komponenten

Die oben beschriebenen Komponenten sind im Folgenden in C# implementiert [2], um das Half-Edge Mesh in Unity3D verwenden zu können.

3.2.1 Klassenstruktur

Aus den beschriebenen Elementen einer Half-Edge-Netzstruktur ergibt sich das in Abbildung 4 gezeigte Klassendiagramm. Der grundlegende Aufbau der einzelnen Klassen basiert dabei auf dem Plankton-Mesh [6]. Jede Komponente besitzt eine eigene Listenklasse. Allerdings verfügt eine einzelnen Komponenten im Plankton-Mesh keine direkte Referenz auf die benachbarten Komponenten, sondern einen Verweis auf den Index der Elemente in der jeweiligen Liste. So hat beispielsweise eine Half-Edge keine weitere Half-Edge als „Next“-Element, sondern den jeweiligen Index der nächsten Kante.

3.2.2 Die Vertex, HalfEdge und Face Klassen

Die Klassen *Vertex*, *HalfEdge* und *Face* sind die Datenmodelle der oben beschriebenen Komponenten. Die Vertex-Klasse besitzt einen *Vector3* Point, der die Position im Raum darstellt, eine *HalfEdge*, die von diesem Punkt aus geht (Im Gegensatz zu [6] wird hier eine Referenz gespeichert.) und der Index des Punktes, um die Arbeit mit dem Unity-Mesh zu erleichtern. Zudem kann ein *PositionChangedEvent* abonniert werden, um Positionsänderungen im Unity-Mesh direkt zu zeigen.

Eine Half-Edge besitzt die oben erwähnten Eigenschaften: Den Punkt von dem sie ausgeht, die anliegende Face, die gegenüberliegende und nächste Half-Edge sowie den Index der Half-Edge. Wie auch der Index der Vertices ist dieser Index für das Unity-Mesh wichtig.

Die Face-Klasse besitzt eine Referenz auf eine anliegende Half-Edge und den Index der Face, um die Arbeit mit dem Unity-Mesh zu erleichtern.

3.2.3 Listenklassen

Objekte der Klassen *Vertex*, *HalfEdge*, *Face* werden jeweils in einer Listenklasse gespeichert. Die Klassen *VertexList*, *HalfEdgeList*, *FaceList* implementieren das *IEnumerable*-Interface, um die Iteration über die Elemente zu vereinfachen. Zudem beinhalten diese Klassen die Kernlogiken für die Komponenten. *VertexList* bietet die Möglichkeit, einen neuen Vertex hinzuzufügen oder einen zu entfernen, die *HalfEdgeList* verfügt über eine *CreateHalfEdge*-Methode, die wie folgt eine Half-Edge anlegt:

```

1
2 public HalfEdge CreateHalfEdge(Vertex vertex , Face face ,
3     HalfEdge next)
4 {
5     HalfEdge halfEdge = new HalfEdge(vertex , face , next , Count);
6     vertex.HalfEdge = halfEdge;
7     // — _halfEdges ist die zugrunde liegende Liste
8     _halfEdges.Add(halfEdge);
9     return halfEdge;
10 }
```

Auch die *FaceList* besitzt eine *Create*-Methode, um eine Fläche korrekt anlegen zu können. Dabei wird die Referenz der Face auf die Half-Edge gesetzt und umgekehrt. Eine weitere wichtige Methode ist die *GetFaceCirculator*-Methode, die eine Liste aller Half-Edges, die an einer gegebenen Face anliegen, zurück gibt:

```

1 public List<HalfEdge> GetFaceCirculator(Face f)
2 {
3     List<HalfEdge> result = new List<HalfEdge>();
4     result.Add(f.HalfEdge);
5     result.Add(f.HalfEdge.Previous);
6     result.Add(f.HalfEdge.Previous.Previous);
7     return result;
```

8 }

3.3 Erstellen eines Half-Edge-Meshes

Die oben genannten Listenklassen werden von der *HalfEdgeMesh*-Klasse verwendet, um aus der beschriebenen Half-Edge-Datenstruktur ein von Unity renderbares Mesh zu erstellen.

Um ein Dreieck, die einfachste mögliche Netzstruktur zu erzeugen, kann die Methode *CreateMesh* verwendet werden. Diese erstellt die drei Eckpunkte des Dreiecks, verbindet zwei mit einer neuen Half-Edge und erzeugt damit ein Face. Die Fläche wird dann verwendet um die fehlenden Kanten mit Referenzen zu erzeugen und anschließend wird die Referenz der ersten Half-Edge auf die zweite gesetzt. Zum Schluss wird *GenerateUnityMesh* aufgerufen um mit den angelegten Daten das UnityMesh zu generieren.

```

1
2 public void CreateMesh(Vector3 va, Vector3 vb, Vector3 vc)
3 {
4     Vertex a = Vertices.CreateVertex(va);
5     Vertex b = Vertices.CreateVertex(vb);
6     Vertex c = Vertices.CreateVertex(vc);
7
8     HalfEdge heA = HalfEdges.CreateHalfEdge(a, null, null);
9     Face face = Faces.CreateFace(heA);
10    HalfEdge heB = HalfEdges.CreateHalfEdge(b, face, heA);
11    HalfEdge heC = HalfEdges.CreateHalfEdge(c, face, heB);
12    heA.Next = heC;
13
14    GenerateUnityMesh();
15 }
```

Sollen beim Erstellen des Netzes weitere Flächen hinzugefügt werden, ist es möglich diese Methode zu erweitern oder weitere Faces mit *AddFace* hinzuzufügen.

3.3.1 GenerateUnityMesh

Um aus den Daten des Half-Edge-Mesh ein für Unity brauchbares Mesh zu generieren, müssen folgende Daten aus dem Half-Edge-Mesh entnommen werden: Die Position jedes Punktes als Liste und ein Array mit der Reihenfolge, wie diese Punkte zu verbinden sind. Die Zusammenstellung dieser Daten passiert mit Hilfe von Linq. Im Folgenden wird der wichtigste Teil der *GenerateUnityMesh*-Methode skizziert:

```

1 ClearMesh();
2 // — Add vertices
3 List<Vertex> vertices = Vertices.Select(p => p.Point).ToList();
4
5 // — Add triangles
```

```

6   foreach (Face face in Faces)
7   {
8       HalfEdge adjacentHalfEdges = Faces.GetFaceCirculator(face)
9           .ToList();
10      SetMeshTriangles(face.Index, adjacentHalfEdges
11          .Select(p => p.OutgoingPoint.Index).ToList(), true);
12  }
13
14  AddMeshVertices(vertices);
15  CommitMeshTriangles();

```

Da das Netz eines komplexen Modells sehr groß werden kann, ist es für die Laufzeit von Vorteil, wenn bei lokalen Änderungen nicht das gesamte Netz neu generiert werden muss, da jedes Mal über alle Punkte, Kanten und Flächen iteriert werden müsste. Stattdessen werden alle Punkte zusätzlich in einer Liste gespeichert, die während des Bearbeitens des Netzes das UnityMesh aktualisiert. Werden dem Half-Edge-Mesh neue Punkte hinzugefügt, können diese mit den Methoden *AddMeshVertex* und *AddMeshVertices* ergänzt werden. Am Ende der Methode wird die aktualisierte Liste dem UnityMesh übergeben.

Auch die Triangles des UnityMeshes werden gecached. Da Manipulationen des Meshes in der Regel bedeuten, dass sich die Triangles relativ zu den drei Punkte einer Face verändern, werden diese in dreier Tuplen in ein Dictionary geschrieben. Der Schlüssel ist dabei der Index der Face. Die Indexliste lässt sich mit *SetMeshTriangles* bearbeiten. Dabei wird ein Eintrag an der Stelle des Faceindex hinzugefügt, sofern er nicht vorhanden ist oder verändert, falls ein Eintrag existiert. Wichtig ist dies zum Beispiel, wenn eine Face geteilt wird und ein Dreieckseintrag mit zwei von drei Punkten übernommen wird. Als weiterer Parameter kann angegeben werden, ob eine Veränderung Teil einer größeren Transaktion war, um zu vermeiden, dass bei umfangreicheren Operationen, wie der Subdivision aller Faces, für jeden Methodenaufwurf das Dictionary in eine Liste umzuwandeln und das Mesh erneut rendern zu müssen. Wird diese Option verwendet, muss nach Abschluss der Transaktion *CommitMeshTriangles* ausgeführt werden, um die Änderungen ins Mesh zu übernehmen.

3.3.2 GenerateHalfEdgeMesh

Andersherum kann es genauso sinnvoll sein, ein bestehendes UnityMesh in ein Half-Edge Mesh umzuwandeln, um die Vorteile dieser nutzen zu können. Implementiert ist dies in der *HalfEdgeMeshBuilder*-Klasse. Der Builder kann dem HalfEdgeMesh hinzugefügt werden und besitzt eine Referenz auf das HalfEdgeMesh, um dieses bearbeiten zu können. Um ein UnityMesh in ein HalfEdgeMesh zu überführen, kann die *BuildHalfEdgeMeshFromUnityMesh* verwendet werden. Diese Methode füllt die drei Komponentenlisten anhand der Daten aus dem UnityMesh. Zum Erreichen gelten drei Grundsätze:

1. Für jeden Punkte gibt es einen Vertex
2. Es gibt, ausgehend von einem Punkt eines Index, eine Half-Edge

3. Jeweils drei Indices bilden eine Face.

```

1 public void BuildHalfEdgeFromUnityMesh(Mesh mesh)
2 {
3     List<Vector3> vertices = mesh.vertices;
4     List<int> triangles = mesh.triangles;
5
6     // — Add vertices to HalfEdgeMesh
7     int[] indexChanges = new int[vertices.Length];
8     for (int i = 0; i < vertices.Length; i++)
9     {
10         Vector3 point = vertices[i];
11         // — CreateVertex checks if position is already saved
12         // — and returns the first matching Vertex
13         Vertex vertex = _mesh.Vertices.CreateVertex(point);
14
15         // — Saving the index change
16         indexChanges[i] = vertex.Index;
17     }
18
19     // — Change Vertex Index to first occurrence
20     if (indexChanges.Any())
21     {
22         for (int i = 0; i < triangles.Length; i++)
23         {
24             // — change here!
25             triangles[i] = indexChanges[triangles[i]];
26         }
27     }
28
29     // — For every three indices in triangles (= a face) add a face
30     // — and three halfEdges
31     for (int i = 0; i < triangles.Length - 3; i += 3)
32     {
33         Vertex point1 = _mesh.Vertices[triangles[i]];
34         Vertex point2 = _mesh.Vertices[triangles[i + 1]];
35         Vertex point3 = _mesh.Vertices[triangles[i + 2]];
36         int[] indices = new[] {
37             point1.Index,
38             point2.Index,
39             point3.Index
40         };
41         List<HalfEdges> pairs = _mesh.HalfEdges
42             .Where(p => indices.Contains(p.OutgoingPoint.Index)
43                 && indices.Contains(p.EndPoint.Index));
44
45         HalfEdge halfEdge1 = _mesh.HalfEdges

```

```

46         .CreateHalfEdge(point1, null, null);
47
48     Face face = _mesh.Faces.CreateFace(halfEdge1);
49
50     HalfEdge halfEdge2 = _mesh.HalfEdges
51         .CreateHalfEdge(point2, face, halfEdge1);
52     HalfEdge halfEdge3 = _mesh.HalfEdges
53         .CreateHalfEdge(point3, face, halfEdge2);
54     halfEdge1.Next = halfEdge3;
55
56     foreach (HalfEdge pair in pairs)
57     {
58         if (pair.OutgoingPoint.Index == halfEdge1.EndPoint.Index
59             && pair.EndPoint.Index == halfEdge1.OutgoingPoint.Index)
60             _mesh.HalfEdges.CreatePair(pair, halfEdge1);
61         else if (pair.OutgoingPoint.Index == halfEdge2.EndPoint.Index
62             && pair.EndPoint.Index == halfEdge2.OutgoingPoint.Index)
63             _mesh.HalfEdges.CreatePair(pair, halfEdge2);
64         else if (pair.OutgoingPoint.Index == halfEdge3.EndPoint.Index
65             && pair.EndPoint.Index == halfEdge3.OutgoingPoint.Index)
66             _mesh.HalfEdges.CreatePair(pair, halfEdge3);
67     }
68 }
69 }

```

Beim Erstellen des HalfEdgeMeshes muss beachtet werden, dass beim Erzeugen eines Vertex mit *_mesh.Vertices.CreateVertex(point)* geprüft wird, ob dieser Punkt bereits vorhanden ist, um redundante Daten zu vermeiden und ein zusammenhängendes Netz zu garantieren. Wenn in einem UnityMesh allerdings ein Punkt im *vertices*-Array mehrfach vorkommt, verschieben sich nach dieser Stelle alle weiteren Indices. Somit muss zu Beginn das UnityMesh „bereinigt“ werden. Beim Erstellen der Vertices werden etwaige Indexänderungen gespeichert und für alle Indices geprüft. Anschließend werden, wie beim Erstellen des UnityMeshes auch, jeweils drei Indices gleichzeitig betrachtet.

Zu den Punkten hinter den Indices wird je eine Half-Edge erstellt und zu jeder Triplette wird eine Face erstellt, mit Referenz auf eine der Half-Edges. Zudem müssen alle Half-Edges, die ein Paar mit einer aktuell betrachteten Half-Edge bilden, ermittelt werden. Dafür werden alle Half-Edges gesucht, dessen eingehender und ausgehender Punkt in der Liste der aktuell betrachteten Punkte liegt:

```

1 List<HalfEdge> pairs = _mesh.HalfEdges
2     .Where(p => indices.Contains(p.OutgoingPoint.Index)
3     && indices.Contains(p.EndPoint.Index));

```

4 Operationen

In diesem Kapitel werden die Standardoperationen eines Half-Edge Mesh näher erläutert. Nachdem ein Half-Edge Mesh prozedural erstellt wurde oder ein Unity Mesh umgewandelt wurde, können auf ein Half-Edge Mesh einige Standardoperationen angewendet werden. Folgende Operationen werden im folgenden Kapitel erklärt und die Implementierung beschrieben:

- das Teilen einer Half-Edge (Split Half-Edge),
- das Kollabieren einer Kante (Edge Collapse),
- das Aufteilen einer Face (Subdivision) und
- eine einfache 2D-Zerstörungssimulation (Simulate Breaking).

4.1 Split Half-Edge

Ziel der *SplitHalfEdge*-Methode ist es, eine Half-Edge so zu teilen, dass das Ergebnis der Operation ein konformes Half-Edge Mesh ist, also dass jede Face immer noch aus drei Half-Edges besteht und dass jede Half-Edge maximal einen Partner besitzt. Um das Teilen durchzuführen, müssen folgende Schritte durchgeführt werden, die in der Abbildung 5 schematisch dargestellt sind:

1. Bestimme die zu splittende Half-Edge.
2. Erzeuge einen neuen Punkt, dort wo sich die Half-Edge aufteilt.
3. Erzeuge drei neue Half-Edges und eine neue Face:
 - Eine Half-Edge zum neuen Punkt, vom Ursprung der gesplitteten Half-Edge.
 - Eine Half-Edge als Nachfolger der ersten Half-Edge, mit dem neuen Punkt als Ursprung.
 - Eine Half-Edge als Vorgänger der gesplitteten Half-Edge.
4. Setze die Referenzen der Half-Edges neu.
5. Führe Schritte 1-4 für die der gesplitteten Half-Edge gegenüberliegende Half-Edge ebenfalls aus.
6. Setze die Paare neu.

4 Operationen

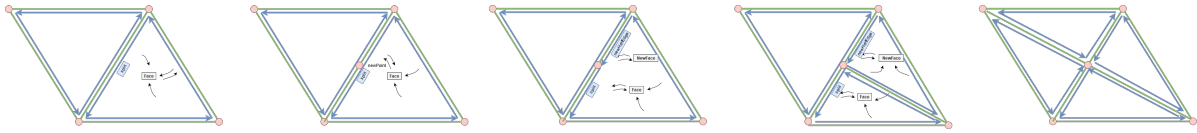


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Edgesplits. In Bild 1 ist die Ausgangssituation dargestellt, Bild 2 zeigt Schritt 2, die Bilder 3 und 4 zeigen die Schritte 3 und 4 und Bild 5 zeigt das Ergebnis, nach den Schritten 5 und 6.

Der beschriebene Algorithmus ist im Folgenden implementiert:

```

1 private bool _lock = false;
2 private HalfEdge _newHalfEdge, _split;
3
4 public void SplitHalfEdge(HalfEdge split, Vector3 splitPoint)
5 {
6     // — Schritt 1:
7     split.Face.HalfEdge = split; // — Set Reference of
8     // — Face to split to know where the new face goes
9     _split = split;
10
11     // — Schritt 2:
12     Vertex newPoint = _mesh.Vertices.CreateVertex(splitPoint);
13
14     // — Schritt 3:
15     HalfEdge newHalfEdge = _mesh.HalfEdges
16         .CreateHalfEdge(split.OutgoingPoint, null, split);
17     _newHalfEdge = newHalfEdge;
18     Face newFace = _mesh.Faces.CreateFace(newHalfEdge);
19     split.OutgoingPoint = newPoint;
20
21     HalfEdge newHalfEdgeToSplit = _mesh.HalfEdges
22         .CreateHalfEdge(split.Next.EndPoint, split.Face, split);
23     HalfEdge newHalfEdgeFromNewHalfEdge = _mesh.HalfEdges
24         .CreateHalfEdge(newPoint, newFace, split.Next.Next);
25     _mesh.HalfEdges
26         .CreatePair(newHalfEdgeToSplit, newHalfEdgeFromNewHalfEdge);
27
28     // — Schritt 4:
29     newHalfEdge.Next = newHalfEdgeFromNewHalfEdge;
30     newHalfEdgeFromNewHalfEdge.Next.Next = newHalfEdge;
31     split.Next.Next = newHalfEdgeToSplit;
32
33     // — Aktualisiere das Unity Mesh
34     _mesh.AddMeshVertex(newPoint.Point);
35
36     _mesh.SetMeshTriangles(split.Face.Index,

```

```

37  _mesh.Faces.GetFaceCirculator(split.Face)
38      .Select(p => p.OutgoingPoint.Index)
39      .ToList(), true);
40
41  _mesh.SetMeshTriangles(newFace.Index,
42  _mesh.Faces.GetFaceCirculator(newFace)
43      .Select(p => p.OutgoingPoint.Index)
44      .ToList(), true);
45
46  if (!_lock) // — Blockiere nach dem ersten Aufruf,
47              // — um eine Endlosschleife zu vermeiden
48  {
49      // — Schritt 5:
50      if (split.Opposing != null)
51      {
52          _lock = true;
53          SplitHalfEdge(split.Opposing, splitPoint);
54          // — Schritt 6:
55          _mesh.HalfEdges.CreatePair(_split, newHalfEdge);
56          _mesh.HalfEdges.CreatePair(split, _newHalfEdge);
57          _lock = false;
58      }
59      _mesh.CommitMeshTriangles();
60  }
61 }

```

Wird die *SplitHalfEdge*-Methode auf das erste Mesh in Abbildung 6 angewendet, so ist das Mesh im zweite Bild das Ergebnis, wenn die Diagonale gesplittet wird. Wird stattdessen die linke Kante unterhalb der Mitte geteilt, entsteht das Mesh im dritten Bild. Das letzte Bild zeigt, dass der Teilungspunkt nicht zwingend auf der Kante liegen muss, da sich die Kanten entsprechend anpassen.

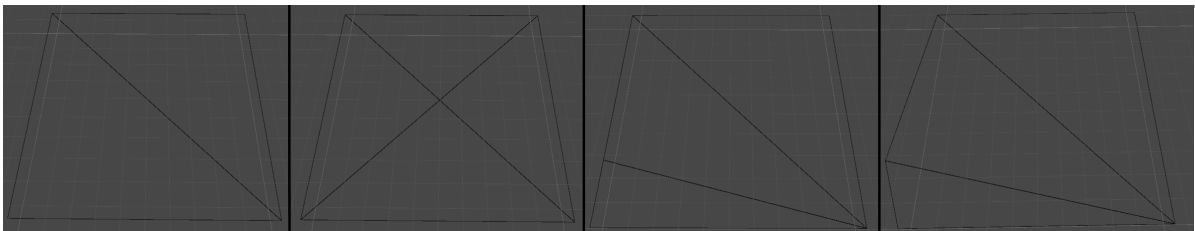


Abbildung 6: Bild 1 ist das Ausgangsmesh, welches in Bild 2 in der Mitte der Diagonale gesplittet wurde, in Bild 3 ein Viertel auf dem Weg nach oben, auf der linken Seite und im 4. Bild eine Einheit links von der Kante

Der beschriebene Algorithmus besitzt eine konstante Laufzeit, da alle Änderungen lokal an den betroffenen Half-Edges vorgenommen werden können und die einzigen „komplexen“ Operationen auf der *GetFaceCirculator*-Methode basieren, die immer die drei

anliegenden Half-Edges einer Face zurückgibt. Wird im Gegensatz dazu die selbe Operation nur mithilfe vom UnityMesh versucht, so muss mittels Brute-Force zuerst jeder Index der Eckpunkte der gesuchten Kante ermittelt werden, da diese nicht explizit dargestellt wird, um anschließend in den Indices die Dreiecke zu finden, die diese Eckpunkte verwenden, damit diese durch die neu bestimmten Dreiecke ersetzt werden können. Daraus resultiert eine Laufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Vertices im Netz, wodurch es zu Performanceproblemen bei großen Netzen kommen kann.

4.2 Edge Collapse

Der Edge-Collapse ist eine Operation, die dazu dient, die Komplexität eines Models zu reduzieren. Dazu werden zwei Punkte zusammengeführt, indem eine Kante zusammenfällt, wodurch bei einer Operation zwei Dreiecksflächen entfernt werden, ohne die gesamte Struktur zu verändern [1]. In diesem Ansatz kann bestimmt werden, zu welchem Punkt die Kante zusammenfällt, je nachdem, welche der beiden Half-Edges als Ursprung gewählt wird, da dafür der Endpunkt der Half-Edge verwendet wird. Um einen Edge-Collapse durchzuführen, müssen die Schritte aus Abbildung 7 befolgt werden:

1. Bestimme die an der Half-Edge anliegenden Vertices, Half-Edges und Faces.
2. Setze die Referenzen der Nachbarschaftsbeziehung neu, die Nachbarn der Half-Edges die an derselben Half-Edge liegen und nicht teil der kollabierenden Kante sind, werden Nachbarn.
3. Entferne die betroffene Faces und Half-Edges.
4. Setze alle Referenzen von einem Vertex auf den andern, entferne den Unbenutzten.

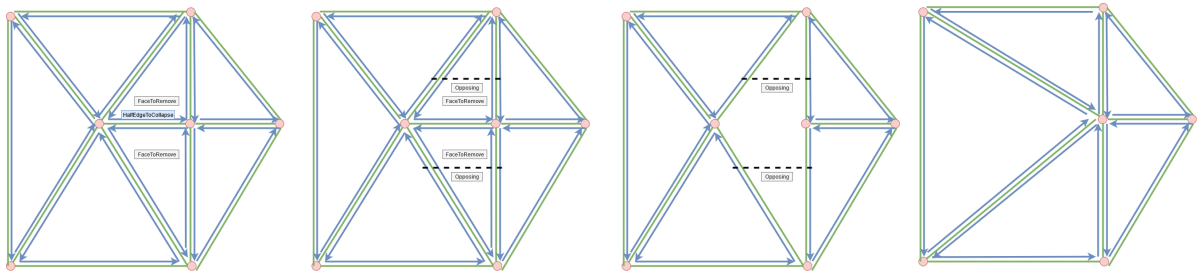


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Edge-Collapses. Bild 1 zeigt die Ausgangssituation, Bild 2 stellt die neuen Nachbarschaftsreferenzen dar, in Bild 3 wurden die Faces entfernt und in Bild 4 ist das Ergebnis zu sehen.

Die Implementierung des beschriebenen Algorithmus sieht folgendermaßen aus:

```

1 public void EdgeCollapse(HalfEdge halfEdge)
2 {
3     // — the point the halfEdge is collapsing to
4     Vertex collapsingPoint = halfEdge.EndPoint;
```

```

5  Vertex pointToRemove = halfEdge.OutgoingPoint;
6
7  // — determine the halfEdges to remove
8  // — those are the HalfEdges around the halfEdge Face
9  // — and it's pairs face
10 HalfEdge pair = halfEdge.Opposing;
11
12 List<HalfEdge> halfEdgesToRemove =
13 _mesh.Faces.GetFaceCirculator(halfEdge.Face);
14 halfEdgesToRemove
15 .AddRange(_mesh.Faces.GetFaceCirculator(pair.Face));
16
17 // — set the neighbours right
18 foreach (HalfEdge he in halfEdgesToRemove)
19 {
20     if (he.Index == halfEdge.Index
21         || he.Index == pair.Index
22         || he.Next.Index == halfEdge.Index
23         || he.Next.Index == pair.Index
24         || he.Opposing == null
25         || he.Next.Opposing == null)
26         continue;
27
28     _mesh.HalfEdges.CreatePair(he.Opposing, he.Next.Opposing);
29 }
30
31 _mesh.Faces.RemoveFace(halfEdge.Face);
32 _mesh.Faces.RemoveFace(pair.Face);
33
34 foreach (HalfEdge he
35 in _mesh.Vertices.GetVertexCirculator(pointToRemove))
36 {
37     if (he.OutgoingPoint.Index == pointToRemove.Index)
38     {
39         he.OutgoingPoint = collapsingPoint;
40     }
41 }
42
43 _mesh.Vertices.RemoveVertex(pointToRemove);
44 _mesh.GenerateUnityMesh();
45 }

```

Die Methode *RemoveFace* ist eine Methode aus der *FaceList* und regelt auch das Löschen von allen weiteren Referenzen:

```

1  public void RemoveFace(Face f)
2  {

```

```

3  List<HalfEdge> halfEdges = GetFaceCirculator(f);
4  foreach (var halfEdge in halfEdges)
5  {
6      if (halfEdge.Opposing != null)
7          halfEdge.Opposing.Opposing = null;
8
9      if (_mesh.Vertices.GetVertexCirculator(halfEdge.OutgoingPoint)
10         .Count <= 0)
11      {
12          _mesh.Vertices.RemoveVertex(halfEdge.OutgoingPoint);
13      }
14  }
15  _mesh.HalfEdges.RemoveAll(p => halfEdges.Contains(p));
16
17  _faces.Remove(f);
18  }

```

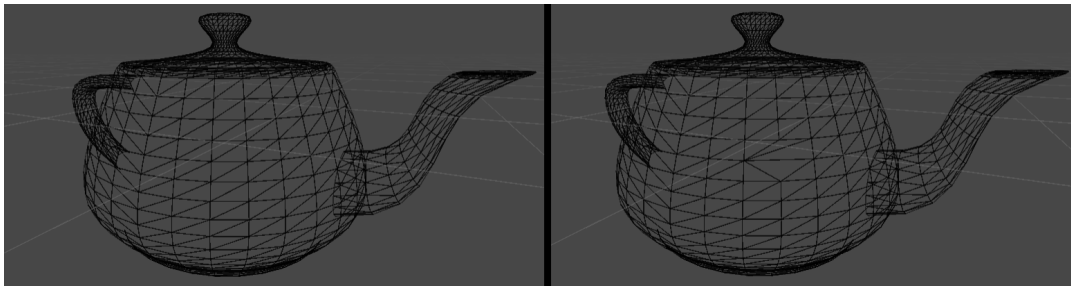


Abbildung 8: Edge-Collapse am Beispiel des Utah-Teapot

4.3 Subdivision

Im Gegensatz zum Edge-Collapse kann es beim Arbeiten mit 3D-Modellen auch nötig sein, eine Face in mehrere kleinere Faces zu unterteilen, um den Detailgrad des Modells zu erhöhen oder Zerstörung realistischer zu modellieren. Um dies zu erreichen, bietet die *FaceSplittingBehaviour*-Klasse die *SplitFace*-Methode, die eine gegebene Face an einem gegebenen Punkt in drei kleinere Faces aufteilt. Um dies zu erreichen muss:

1. Der neue Punkt auf der Face erzeugt werden.
2. Für jede Half-Edge der Face:
 - Eine Half-Edge vom Endpunkt der Half-Edge zum neuen Punkt erzeugt werden.
 - Eine Half-Edge vom neuen Punkt zum Startpunkt der Half-Edge erzeugt werden.
 - Eine Face (wenn nötig) erzeugt werden.

4 Operationen

- Die „Next“-Referenz der Half-Edge auf die Half-Edge zum neuen Punkt gesetzt werden.

3. Für jede neue Half-Edge der Partner gesetzt werden.

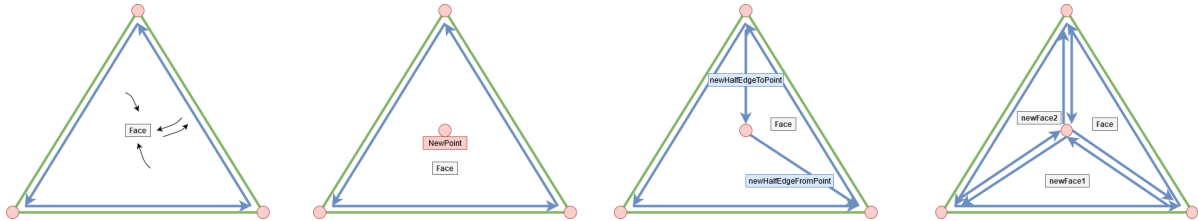


Abbildung 9: Schematische Darstellung des SplitFace Algorithmus. Bild 1 zeigt die Ausgangsposition, Bild 2 zeigt Schritt 2, Bild drei einen Teilschritt von Schritt 3 und Bild 4 zeigt das Ergebnis

In C# ergibt sich daraus der folgende Quellcode, welcher durch den Übergabeparameter *isTransaction* für den Gebrauch im gesamten Mesh optimiert ist.

```

1 public void SplitFace(Face face, Vector3 pointToSplit,
2     bool isTransaction = false)
3 {
4     // — Schritt 1:
5     Vertex center = _mesh.Vertices.CreateVertex(pointToSplit);
6     _mesh.AddMeshVertex(center.Point);
7
8     // — Schritt 2:
9     List<HalfEdge> halfEdges = _mesh.Faces.GetFaceCirculator(face);
10    List<HalfEdge> newHalfEdges = new List<HalfEdge>();
11    // — Keeping a reference to all new HalfEdges to pair them later
12
13    // — Schritt 3:
14    for (int i = 0; i < halfEdges.Count; i++)
15    {
16        HalfEdge halfEdge = halfEdges[i];
17        Face newFace = face;
18        // — reuse old face
19        if (i == 0)
20        {
21            newFace.HalfEdge = halfEdge;
22        }
23        else
24        {
25            newFace = _mesh.Faces.CreateFace(halfEdge);
26        }
27    }

```

```

28     HalfEdge newHalfEdgeFromCenter =
29         _mesh.HalfEdges.CreateHalfEdge(center, newFace, halfEdge);
30     HalfEdge newHalfEdgeToCenter =
31         _mesh.HalfEdges.CreateHalfEdge(halfEdge.EndPoint,
32             newFace, newHalfEdgeFromCenter);
33     halfEdge.Next = newHalfEdgeToCenter;
34
35     _mesh.SetMeshTriangles(newFace.Index,
36         _mesh.Faces.GetFaceCirculator(newFace)
37             .Select(p => p.OutgoingPoint.Index)
38             .ToList(), true);
39     newHalfEdges.AddRange(new List<HalfEdge>{
40         newHalfEdgeFromCenter,
41         newHalfEdgeToCenter,
42         halfEdge
43     });
44 }
45
46 // — Schritt 4:
47 _mesh.HalfEdges.CreatePair(newHalfEdges[0], newHalfEdges[4]);
48 _mesh.HalfEdges.CreatePair(newHalfEdges[3], newHalfEdges[7]);
49 _mesh.HalfEdges.CreatePair(newHalfEdges[6], newHalfEdges[1]);
50
51 // — Optimisation for SplitAllFaces
52 if(isTransaction)
53     _mesh.CommitMeshTriangles();
54 }

```

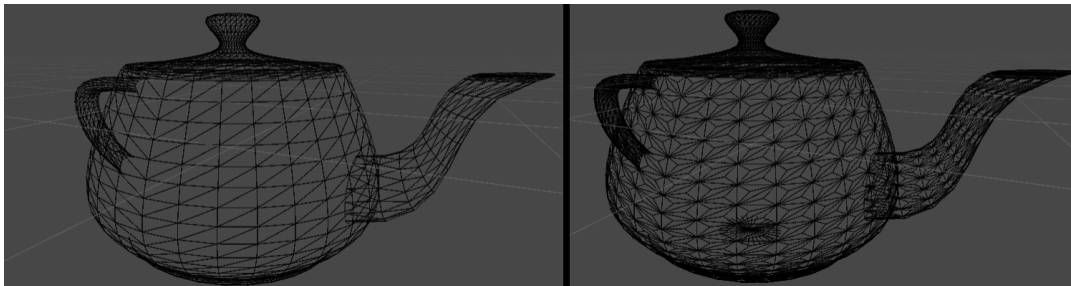


Abbildung 10: Subdivision aller Faces am Beispiel des Utah-Teapot

4.4 2D-Zerstörungssimulation

Mit Hilfe der Subdivision und dem Edgesplit kann eine einfache, dynamische Zerstörungssimulation für zweidimensionale Oberflächen erstellt werden, welche zum Beispiel im Kontext eines Videospiels eine interaktive Welt bietet.

Die Simulation basiert auf einem Punkt des Meshs, der das Zentrum der Zerstörung darstellt, vergleichbar mit dem Aufschlagpunkt eines Hammers. Um diesen Punkt herum

werden zufällig weitere Punkte platziert, je nach Material der getroffenen Face unterschiedlich viele - in größer werden Abständen. Von der direkt getroffenen Face wird jede Half-Edge gesplittet, um so große Splitter, die sich durch das Material ziehen zu simulieren, da auch die gegenüberliegenden Half-Edges geteilt werden. Die verteilten Punkte werden anschließend als neuer Punkt für die Subdivision verwendet, um so den Bruch konzentrisch vom Epizentrum ausgehen zu lassen. Schließlich werden die neuen Faces aus dem Mesh ausgetrennt und in ein eigenes Mesh umgewandelt, die einzelnen Bruchstücke bewegen zu können.

In Unity ist es wie folgt programmiert:

```

1 public void SimulateBreaking(Vector3 impactPoint)
2 {
3
4     if (Faces.TryGetFaceContainingPoint(impactPoint,
5     out Face impactedFace))
6     {
7         var bbd = new BreakingBehaviourDeterminer();
8
9         List<Vector3> breakpoints = bbd.GetBreakingPoints(impactedFace,
10         impactPoint);
11
12         List<HalfEdge> halfEdges =
13             Faces.GetFaceCirculator(impactedFace).ToList();
14         _faceSplittingBehaviour.SplitFace(impactedFace, impactPoint);
15
16         // — Aufteilen der Urspruenglichen HalfEdges
17         foreach (HalfEdge oldHe in halfEdges)
18         {
19             _edgeSplittingBehaviour.SplitHalfEdge(oldHe,
20             VectorMath.GetIntermediateVector(
21             oldHe.OutgoingPoint.Point, oldHe.EndPoint.Point));
22         }
23
24         // — Platzieren der neuen Punkte, splitten der Faces
25         foreach (Vector3 point in breakpoints)
26         {
27             if (Faces.TryGetFaceContainingPoint(point, out Face face))
28             {
29                 List<HalfEdge> oldHalfEdgesOfFace =
30                     Faces.GetFaceCirculator(face).Select(p => p.Next);
31                 _faceSplittingBehaviour.SplitFace(face, point);
32             }
33         }
34
35         // — Liste aller erzeugten Faces
36         List<Face> faces = _edgeSplittingBehaviour.GetCreatedFaces();

```



```

37     faces.AddRange(_faceSplittingBehaviour.GetCreatedFaces());
38
39     // — Herausloesen der Faces
40     foreach (Face face in faces)
41     {
42         // — Unity GameObject
43         GameObject go = new GameObject("Shard");
44
45         HalfEdgeMesh mesh = go.AddComponent<HalfEdgeMesh>();
46         go.AddComponent<Rigidbody>().useGravity = true;
47
48
49         List<HalfEdge> createdHalfEdges =
50             Faces.GetFaceCirculator(face).ToList();
51         List<Vertex> vertices = createdHalfEdges
52             .Select(p => p.OutgoingPoint).ToList();
53
54         mesh.CreateMesh(vertices[0].Point,
55             vertices[1].Point, vertices[2].Point);
56         Faces.RemoveFace(face);
57     }
58
59     // — entfernen der Erzeugten Faces
60     _edgeSplittingBehaviour.ClearCreatedFaces();
61     _faceSplittingBehaviour.ClearCreatedFaces();
62 }
63 }

```

Bei der Bestimmung der Bruchpunkte wird der *BreakingBehaviourDeterminer* verwendet, welcher zufällige Punkte in größer werdenden Kreisen platziert, relativ zu dem gewählten Punkt. Die Methode *GetMaterialBreakingBehaviour* gibt eine Liste mit Integern zurück, die die Anzahl an Punkten in jedem Kreis für ein Material vordefiniert.

Der Code der *GetBreakingPoints*-Methode sieht wie folgt aus:

```

1  public List<Vector3> GetBreakingPoints(Face face,
2      Vector3 impactPoint)
3  {
4      var result = new List<Vector3>();
5
6      Vertex v1 = face.HalfEdge.OutgoingPoint.Point;
7      Vertex v2 = face.HalfEdge.Next.OutgoingPoint.Point;
8      Vertex v3 = face.HalfEdge.Next.Next.OutgoingPoint.Point;
9
10     List<int> materialBehaviour =
11         GetMaterialBreakingBehaviour(face.materialType);
12
13     for (int i = 0; i < materialBehaviour.Count; i++)

```

```
14 {  
15   for (int j = 0; j < materialBehaviour[i]; j++)  
16   {  
17     Vector3 newPoint = UnityEngine.Random.insideUnitCircle *  
18       (i + .5f) + new Vector2(impactPoint.x, impactPoint.z);  
19     Vector3 addPoint = new Vector3(newPoint.x,  
20       impactPoint.y, newPoint.y);  
21     result.Add(addPoint);  
22   }  
23 }  
24 return result;  
25 }
```

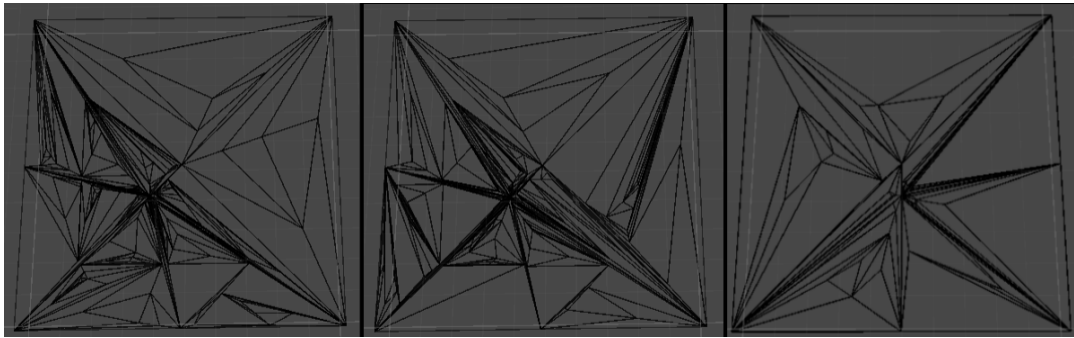


Abbildung 11: Die Ergebnisse von der Zerstörungssimulation mit unterschiedlichen Startpunkten

5 Vergleich zwischen Half-Edge Mesh und UnityMesh

Nachdem die Funktionsweise der wichtigsten Operationen für ein Half-Edge Mesh im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, werden diese im Folgenden mit vergleichbaren Operationen eines UnityMeshs verglichen.

Bei den Methoden *SplitHalfEdge*, *EdgeCollapse* und *SplitFace* handelt es sich um Operationen auf dem Mesh, die lokale Änderungen verursachen. Da es einen direkten Zugriff auf die betroffenen Stellen gibt, muss nicht das gesamte Mesh nach den betroffenen Positionen abgesucht werden, stattdessen kann die Stelle direkt über der Face- und Half-Edge-Listen erreicht werden. Zudem kann mittels der *GetFaceCirculator*-Methode auf alle betroffenen Half-Edges in konstanter Zeit zugegriffen werden, da diese Methode immer die drei Half-Edges über die Referenz der Face bestimmen kann. Insgesamt haben die *SplitHalfEdge*- und *SplitFace*-Methode also eine konstante Zeitkomplexität, unabhängig von der Größe des Meshs. Um allerdings das gleiche Resultat mit einem UnityMesh zu erhalten, muss zuerst mittels Brute-Force jeder Index der Eckpunkte der gesuchten Kante oder Face ermittelt werden, da diese nicht explizit dargestellt werden. Diese Suche nach allen Kanten mit denselben Eckpunkten könnte wie folgt aussehen:

```

1 List<int> findEdges(int a, int b)
2 {
3     // — All triangle indices
4     int[] tris = _mesh.triangles;
5
6     // — The result contains every starting index
7     // — of a matching triangle
8     List<int> result = new List<int>();
9
10    // — for each pair of three
11    for(int i = 0; i < tris.Length; i+=3)
12    {
13        int matches = 0; // — count the matching indices
14        if(tris[i] == a || tris[i] == b)
15            matches++;
16        if(tris[i+1] == a || tris[i+1] == b)
17            matches++;
18        if(tris[i+2] == a || tris[i+2] == b)
19            matches++;
20
21        // — if there are two, consider this triangle index
22        if(matches == 2)
23            result.Add(i);
24    }
25    return result;
26 }

```

Dieser beispielhafte Implementierungsvorschlag kann benutzt werden, um die betroffe-

nen Faces für einen EdgeSplit zu finden. Um die entsprechende Stelle für eine Subdivision zu finden, muss der dritte betroffene Punkt mitgegeben werden. Auffällig bei dieser Implementierung ist, dass es, im Gegensatz zum Half-Edge-Mesh abhängig von der Größe des Meshs ist, wodurch es bei dieser Implementierung mit großen Netzen zu Laufzeitproblemen kommen kann.

Auch die *EdgeCollapse*-Methode verwendet die *GetFaceCirculator*-Methode mit konstanter Laufzeit. Zusätzlich wird die *GetVertexCirculator*-Methode verwendet, um die Half-Edges an den betroffenen Vertices zu finden. Theoretisch besitzt diese Methode eine konstante Laufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Half-Edges, die den gefragten Vertex verwenden. Im Plankton-Mesh [6] wird folgende Implementierung verwendet:

```

1 public IEnumerable<int> GetVertexCirculator(int halfedgeIndex)
2 {
3     if (halfedgeIndex < 0 || halfedgeIndex > this.Count) {
4         yield break;
5     }
6
7     int h = halfedgeIndex;
8     int count = 0;
9     do
10    {
11        yield return h;
12        h = this[this.GetPairHalfedge(h)].NextHalfedge;
13        if (h < 0) {
14            throw new InvalidOperationException
15                ("Unset index, cannot continue.");
16        }
17        if (count++ > 999) {
18            throw new InvalidOperationException
19                ("Runaway vertex circulator");
20        }
21    }
22    while (h != halfedgeIndex);
23 }
```

Allerdings funktioniert dieser Ansatz nur auf der zugrunde liegenden Annahme, dass das abgebildete Mesh vollständig ist, es also keine Half-Edge gibt, die keinen Nachbarn hat. Aus diesem Grund wird eine andere Implementierung verwendet, da diese Eigenschaft für ein solches Netz nicht gegeben sein muss. Diese sieht wie folgt aus:

```

1 public List<HalfEdge> GetVertexCirculator(Vertex v)
2 {
3     return _mesh.HalfEdges
4         .Where(p => p.OutgoingPoint.Index == v.Index).ToList();
5 }
```

Durch diese Generalisierung wird jedoch die konstante Laufzeit durch eine Lineare ersetzt, wodurch die Laufzeiten des Half-Edge-Meshs und des UnityMeshs jeweils in lineare

Abhängigkeit von der Größe des Netzes stehen. Allerdings kann, wie das Plankton-Mesh zeigt, die *GetVertexCirculator*-Methode noch weiter optimiert werden.

Alles in allem kann gesagt werden, dass ein Half-Edge-Mesh mit konstanten Laufzeiten für die wichtigsten Operationen besser geeignet ist für Echtzeitsimulationen mit dynamischen Meshs, die sich zur Laufzeit verändern. Auch eignet sich ein Half-Edge-Mesh zur Bearbeitung eines Meshs, um den Detailgrad mithilfe der Subdivision zu erhöhen oder durch EdgeCollapse zu reduzieren. Diese Möglichkeiten mit dem Nachteil einher, dass die Grundstruktur des Half-Edge-Mesh allein mehr als sechsmal so groß ist, wie ein Indexed Mesh derselben Anzahl an Vertices. Für statische Meshs eignet sich daher eher das UnityMesh und allgemein muss auf den einzelnen Anwendungsfall geachtet werden, um zu entscheiden, ob ein Half-Edge-Mesh oder ein Indexed Mesh verwendet werden soll.

6 Ausblick

Im Anschluss an die Erkenntnisse dieser Arbeit gibt es noch einige Features, um die diese Implementierung eines Half-Edge-Mesh erweitert werden kann. Zum einen muss die *GetVertexCirculator*-Methode optimiert werden, um eine konstante Zeitkomplexität bei allen Grundoperationen zu erhalten, damit es in Echtzeitanwendungen verwendet werden kann.

Des Weiteren ist ein Ziel die 2D-Zerstörungssimulation zu erweitern, um diese in dreidimensionalen Simulationen verwenden zu können. Dies kann geschehen, indem die Bruchpunkte nicht nur, wie bei der 2D-Simulation, auf der Oberfläche, sondern auch innerhalb des Modells verteilt werden. Die erzeugten „Scherben“ werden um einen vierten Punkt erweitert, wodurch diese ein Tetraeder bilden und zu einem dreidimensionalen Splitter werden.

In diesem Zuge sollte die Simulation auch die Kraft (force), die auf das Modell wirkt, betrachtet werden, um in unterschiedlichen Situationen realistischere Resultate zu erzielen.

Sollte der gewählte Ansatz nicht die gewünschten Effekte erzielen, kann eine andere Methode verwendet werden, um die Brucheffekte zu berechnen, zum Beispiel mithilfe von Voronoi-Diagrammen.

Abschließend sollte alles in einer Simulation zusammengefügt werden, die als Demo dient, in der die Effekte gezeigt werden, um sie anschließend in Anwendungen, wie zum Beispiel Computerspielen verwenden zu können.

7 Rechnungen

Um die Werte aus Tabelle 2 zu erhalten, müssen folgende Annahmen getroffen werden: Bei der Speichernutzung wird ein allgemeines Mesh mit n_v Vertices und n_t Triangles betrachtet. Allgemein kann angenommen werden, dass ein Mesh ungefähr doppelt so viele Eckpunkte wie Dreiecke hat, woraus sich $n_t \approx 2 * n_v$ ergibt. Zudem kann die Annahme getätigt werden, dass in C# ein *Vector3*, der aus drei *floats* besteht eine Größe von $3 * 32\text{Bit} = 12\text{Byte}$ hat, ein *int* 4Byte groß ist und eine Referenz auf ein Objekt bei einer 64 Bit-Architektur 8Byte benötigt.

7.1 Indexed Mesh

$$\begin{aligned} & n_v \times 12\text{Byte} [\text{Vector3}] + 3 \times n_t \times 4\text{Byte} [\text{Pro Dreieck existieren 3 int Indices}] \\ & \approx n_v \times 12\text{Byte} + 6n_v \times 4\text{Byte} \\ & \approx \underline{36 \times n_v\text{Byte}} \end{aligned}$$

7.2 Triangle-Neighbor Structure

$$\begin{aligned} & n_t \times (3 \times 8\text{Byte} [3 \text{ ref. auf Nachbardreiecke}] + 3 \times 8\text{Byte} [3 \text{ ref. auf Eckpunkte}]) + \\ & n_v \times (8\text{Byte} [\text{ref. auf ein anliegendes Dreieck}] + 12\text{Byte} [\text{Vector3}]) \\ & \approx 2 \times n_v \times (24\text{Byte} + 24\text{Byte}) + n_v \times 20\text{Byte} \\ & \approx 96 \times n_v\text{Byte} + 20 \times n_v\text{Byte} \\ & \approx \underline{116 \times n_v\text{Byte}} \end{aligned}$$

7.3 Winged-Edge Mesh

$$\begin{aligned} & n_v \times (8\text{Byte} [\text{ref. von Vertex auf Edge}] + 12\text{Byte} [\text{Vector3}]) + \\ & n_t \times 8\text{Byte} [\text{Referenz von Face auf Edge}] + \\ & 1.5 \times n_t [\text{Jede Edge wird von zwei Faces verwendet}] \times \\ & (4 \times 8\text{Byte} [\text{ref. der Kante auf andere Kanten}] + \\ & 2 \times 8\text{Byte} [\text{ref. auf anliegende Faces}] + 2 \times 8\text{Byte} [\text{ref. auf Eckpunkte}]) \\ & \approx 20 \times n_v\text{Byte} + 2 \times n_v \times 8\text{Byte} + 3 \times n_v \times 64\text{Byte} \\ & \approx 20 \times n_v\text{Byte} + 16 \times n_v\text{Byte} + 192n_v\text{Byte} \\ & \approx \underline{228 \times n_v\text{Byte}} \end{aligned}$$

7.4 Half-Edge Mesh

$$\begin{aligned} & n_v \times (8\text{Byte} [\text{ref. von Vertex auf Edge}] + 12\text{Byte} [\text{Vector3}]) + \\ & n_t \times 8\text{Byte} [\text{ref. von Face auf Edge}] + \\ & 3 \times n_t (4 \times 8\text{Byte} [\text{ref. der HalfEdge auf den ausgehenden Punkt, die nächste} \\ & \text{und gegenüberliegende HalfEdge und die Face}]) \\ & \approx 20 \times n_v\text{Byte} + 2 \times n_v \times 8\text{Byte} + 6 \times n_v \times 32\text{Byte} \\ & \approx \underline{228 \times n_v\text{Byte}} \end{aligned}$$

Literatur

- [1] P. Castello u. a. „Viewpoint entropy-driven simplification“. In: *WSCG '2007: Full Papers Proceedings*. Jan. 2007, S. 249–256.
- [2] Yannick Dittmar. *HalfEdgedMesh*. [Online; zuletzt besucht am 16.05.2023]. 2023. URL: <https://github.com/Thot38/HalfEdgedMesh>.
- [3] Peter Shirley und Steve Marschner. *Fundamentals of Computer Graphics*. Third Edition. CRC Press, 2010. Kap. 12 Data Structures for Graphics.
- [4] *Unity. Public Relations*. [Zuletzt besucht: 15.01.2020]. URL: <https://web.archive.org/web/20200114191426/https://unity3d.com/public-relations>.
- [5] the free encyclopedia Wikipedia. *Polygon mesh*. [Online; zuletzt besucht am 04.12.2019]. 2007. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dolphin_triangle_mesh.png/media/File:Dolphin_triangle_mesh.png.
- [6] David Stasiuk Will Pearson Daniel Piker. *Plankton*. [Online; zuletzt besucht am 13.12.2019]. 2017. URL: <https://github.com/meshmash/Plankton>.

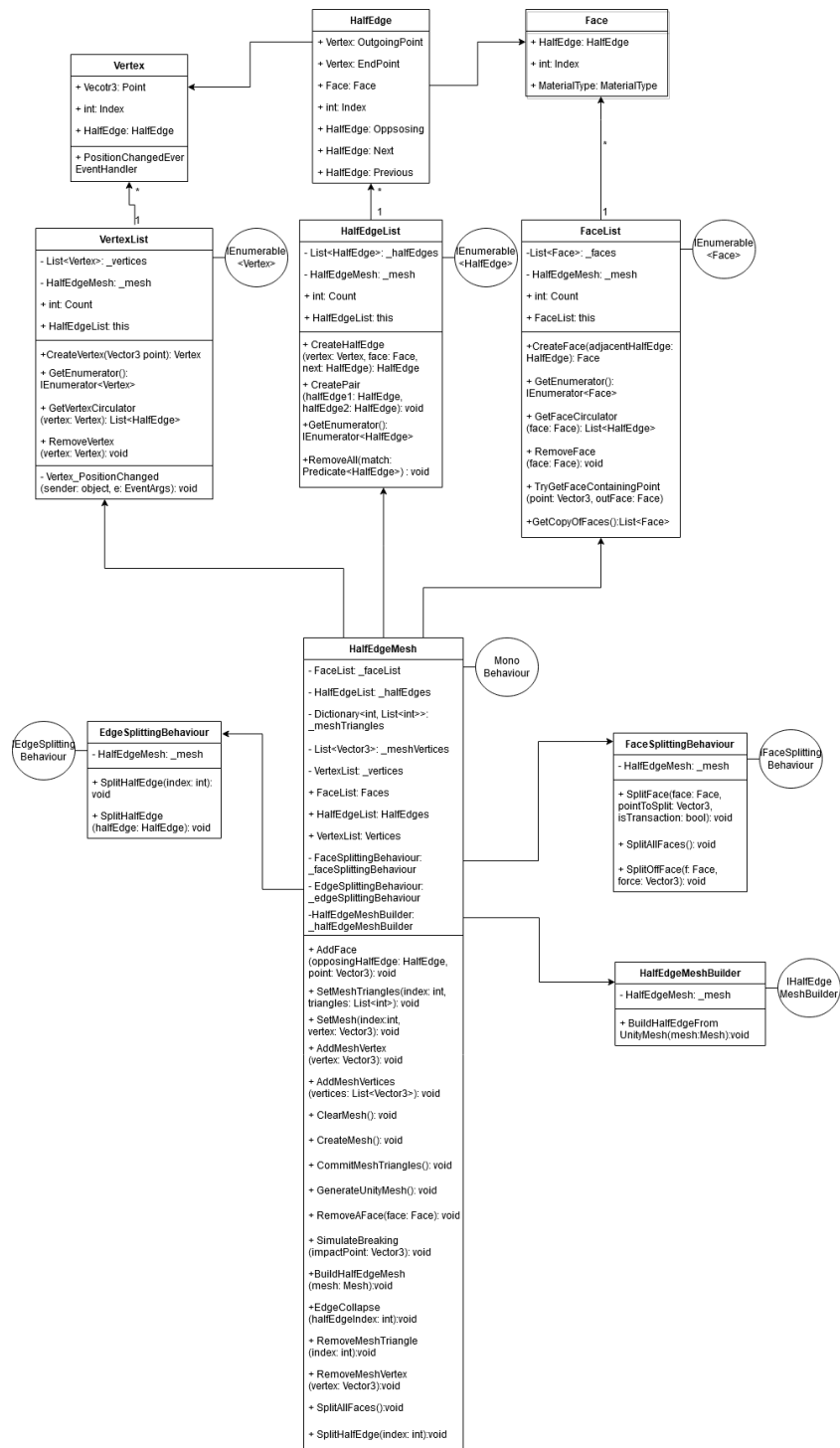


Abbildung 4: UML-Klassendiagramm des Half-Edge-Mesh Projekts