

Todo list

Johann wollte DCEL noch mal überarbeiten	4
Überdenken, ob Code hier wirklich notwendig	11
Details über die Länge der Pins hinzufügen!	23
Abstand zwischen Flächen; Vergrößerung von an das äußere Gebiet angrenzende Fläche	24
Veraltet; Überarbeiten!	34

Wilhelm-Ostwald-Schule, Gymnasium der Stadt Leipzig

Dokumentation zur Besonderen Lernleistung

Im Fachbereich

Informatik

Thema

Erzeugung eines 3D-Modells eines Gebäudes
anhand des Grundrisses

Vorgelegt von

Johann Bartel und Peter Oehme

Schuljahr

2017/2018

Externe Betreuer

Herr Prof. Dr. Gerik Scheuermann, Herr Tom Liebmann
Universität Leipzig Fakultät für Mathematik und Informatik

Interner Betreuer

Herr Rai-Ming Knospe

Leipzig, den 22.12.2017

Bibliographische Beschreibung

Bartel, Johann und Oehme, Peter

„Erzeugung eines 3D-Modells eines Gebäudes anhand des Grundrisses“

35 Seiten, Y Anlagen, 16 Abbildungen

Erzeugung eines druckbaren 3D-Modells eines Gebäudes anhand des Grundrisses

Die Zielstellung dieser BeLL ist es, den Grundriss eines Hauses, der aus einem Konstruktionsprogramm entnommen wurde, in eine druckbare 3D-Datei zu konvertieren. Diese Umwandlung wird mithilfe eines Programmes mit eingebetteten selbst entworfenen mathematischen Operationen realisiert.

Aus dem Grundriss, welcher eine 2D-Datenmenge darstellt, werden die digitalen Anweisungen für die 3D-Strukturen Wände, Grundflächen und Eckpfeiler berechnet. Diese Anweisungen lassen sich nach der Umwandlung in einem Modellierungsprogramm für den Druckvorgang umwandeln. Die Berechnungen der Umwandlung laufen so ab, dass an allen Elementen des finalen Modells komplementäre Stecker angebracht werden, die zusammen als ein Stecksystem fungieren. Eckpfeiler dienen hierbei als Verbindungsstücke zwischen den Wänden und Bodenplatten, welche somit für die Stabilität des Objektes sorgen. Das Stecksystem ermöglicht ein Zusammensetzen aller Bauteile zu einem stabilen Modell. Dadurch entsteht ein Modell, welches aufgrund der genannten Modifikationen transportabel und geeignet für Präsentationen ist.

Immobilienkäufer und -verkäufer können die 3D-Darstellung der Immobilie nutzen, um mehr Eindruck über das Objekt zu erlangen und eine mögliche Inneneinrichtung zu planen.

Johann Bartel und Peter Oehme

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Wissenschaftliche Grundlagen	3
2.1	Planare Graphen	3
2.2	Doubly connected edge list	3
2.3	Convex Hull	4
2.4	Oriented Minimum Bounding Box	5
2.5	AutoCAD	6
2.6	OpenSCAD	7
2.7	3D-Drucker MakerBot Replicator™ 2	9
3	Vorgehen zur Problemlösung	11
3.1	Einlesen des Grundrisses	11
3.1.1	Funktionsweise der Bibliothek <i>kabeja</i>	11
3.1.2	Funktionsweise der GUI	12
3.2	Erstellen der Doubly-connected Edge List	15
3.2.1	Graph Klasse	15
3.2.2	Verarbeitung der Linien	15
3.2.3	Vector-to-Node Konvertierung	15
3.2.4	Line-to-Edge Konvertierung	16
3.2.5	Zwillingskantengenerierung	16
3.2.6	Nachfolger- und Vorgängerermittlung	16
3.2.7	Flächenerstellung	18
3.2.8	Vervollständigung der Knoten	19
3.3	Aufbau der Einzelbauteile	20
3.3.1	Eckpfeiler	20
3.3.2	Wandstücke	22
3.3.3	Grundplatten	23

3.3.4	Zuweisen von Berechnungskonstanten	24
3.4	Druckvorgang	28
3.4.1	Minimierung der Druckvorgänge	28
3.4.2	Ermittlung der Größen	28
3.5	Ausgabe der Resultate	31
3.5.1	Erstellung des Ausgabeordners	31
3.5.2	OpenSCAD Java Interface	31
3.5.3	STL Konvertierung	32
4	Ausblick	34
	Internetquellenverzeichnis	35

1. Einleitung

In den letzten Jahren gewannen 3D-Drucker immer mehr Bedeutung, sowohl für wissenschaftliche als auch für wirtschaftliche Zwecke. Sie werden genutzt, um verschiedene Gegenstände oder Bauteile des Eigenbedarfs selbst herzustellen oder nach Belieben anzupassen. Entsprechend naheliegend war es, dass schnell die ersten Modelle nachgebildet wurden, oder man sich an beliebten Steckbausteinsystemen wie LEGO orientierte, um sich eigene Sets zu drucken.

Diese Eignung für den Modellentwurf und Modellbau erweckte auch die Idee, ein Modell eines Hauses zu drucken, welches in sich aus strukturierten Bauteilen zusammengesetzt ist und somit auch das Entfernen einzelner dieser Bauteile erlaubt, um einen einfacheren Einblick in das Modell zu erhalten. Kombiniert mit dem Interesse an der Architektur entstand die Überlegung, ob es möglich wäre, anhand eines Grundrisses, welchen man aus einem Konstruktionsprogramm wie beispielsweise AutoCAD in Form einer .dxf-Datei erhalten kann, ein 3D-Modell des Hauses zu erzeugen, welches mithilfe eines Programmes automatisch in die vorgesehenen Bauteile zerlegt wurde, das im Anschluss von einem 3D-Drucker gedruckt werden kann. Dem Nutzer wird demnach nur zuteil, den Grundriss einzuspeisen und die ausgegebenen Bauteile korrekt auszudrucken, was ihm einen aufwendigen Modellierungs- und Zerlegungsprozess erspart.

Ein solches Modell soll dann Architekten als Möglichkeit vorliegen, um ihren Kunden vor dem Kauf eines Hauses näheren Einblick in die Immobilie zu gewähren und mit ebenfalls 3D-gedruckten Möbeln bereits im Voraus erste Einrichtungsideen zu überprüfen. Diese Methode würde auf ein ausgeprägtes dreidimensionales Vorstellungsvermögen des Kunden verzichten und als Ergänzung zum vorgelegten Grundriss funktionieren.

Die Umsetzung des Programms erfolgt in der Programmiersprache Java. Um die Problemstellung zu bewältigen, musste zunächst eine systematisch

einzuhaltende Zerteilung des Modells festgelegt werden.

2. Wissenschaftliche Grundlagen

2.1 Planare Graphen

Zur einfacheren Handhabung des Grundrisses wird dieser in einen planaren Graphen umgewandelt. Ein planarer, auch plättbarer Graph ist ein Graph der in einer Ebene mithilfe von Punkten bzw. Knoten und Kanten dargestellt werden kann, ohne dass sich zwei oder mehr Kanten schneiden (vgl. Quelle [11]). Jede Fläche des Graphen wird dabei durch mindestens drei verschiedene Kanten beschrieben, die den Rand dieser Fläche darstellen. Die Fläche um den Graphen herum, welche scheinbar unbegrenzt groß ist, wird äußeres Gebiet genannt.

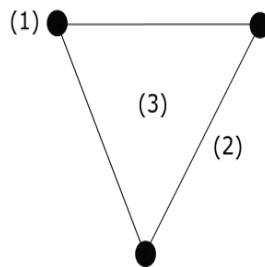


Abbildung 1: Schema eines planaren Graphen (Abbildung der Verfasser)

In Abbildung 1 wird ein solcher planarer Graph dargestellt. Der linke obere Knoten ist hier mit (1) bezeichnet, die rechte Kante mit (2) und die innere Fläche mit (3).

2.2 Doubly connected edge list

Um planare Graphen ohne Informationsverlust zu speichern werden in der Informatik Referenzen zwischen den einzelnen Bestandteilen des Graphen eingesetzt.

In der sogenannten „Doubly connected edge list“ (DCEL) erhält eine Kante, die aus einem Anfangsknoten und Endknoten besteht, jeweils eine

Vorgänger-, eine Nachfolger- und eine Zwillingskante. Die jeweiligen Zwillingskanten beschreiben hierbei die invertierten Varianten der betrachteten Kanten. Jedem Knoten wird außerdem eine ausgehende Kante und allen Flächen eine anliegende Kante zugewiesen (vgl. Quelle [2] und [3]).

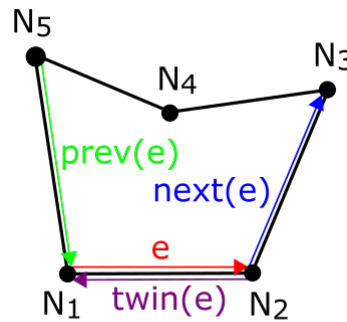


Abbildung 2: Schema einer DCEL (Abbildung der Verfasser)

In Abbildung 2 wird die Kante „e“ durch den Anfangsknoten „N₁“ und den Endknoten „N₂“ gebildet. Die Zwillingskante wird mit „twin(e)“ bezeichnet, die Nachfolgerkante mit „next(e)“ und die Vorgängerkante mit „prev(e)“.

Diese Referenzierungen ermöglichen es, ausgehend von einem Element, ohne umfangreiche Berechnungen, auf alle anderen Objekte zu schließen, indem bei der Betrachtung von Knoten und Flächen die zugehörigen Kanten, beziehungsweise bei der Betrachtung von einzelnen Kanten deren Vorgänger und Nachfolger betrachtet werden.

Johann wollte DCEL noch mal überarbeiten

2.3 Convex Hull

Die konvexe Hülle einer Punktmenge ist die kleinste konvexe Menge, in der die Punktmenge enthalten ist. Bezogen auf ein Polygon ist die konvexe Hülle folglich ein neues Polygon, welches so wenig wie möglich Punkte beinhaltet, damit alle Elemente des Ursprungspolygons innerhalb des Neuen liegen.

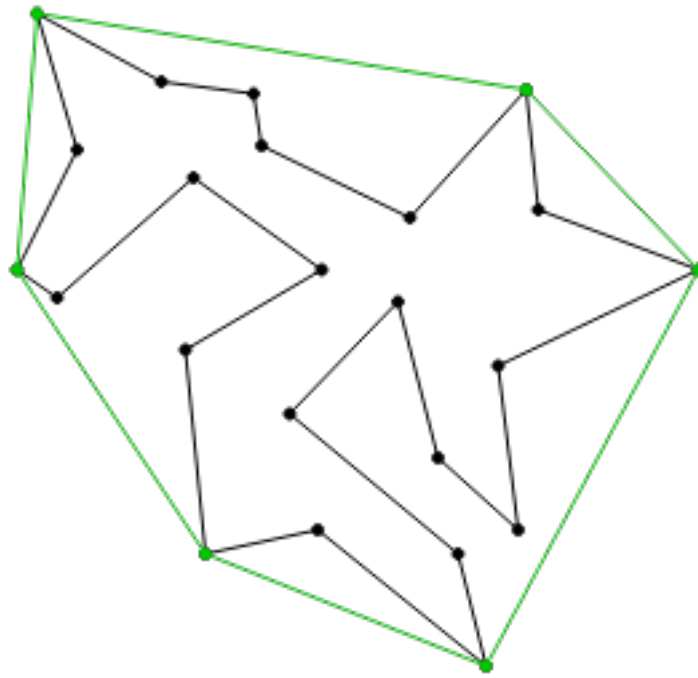


Abbildung 3: Beispiel einer konvexen Hülle

2.4 Oriented Minimum Bounding Box

Die Oriented Minimum Bounding(OMBB) Box beziehungsweise das orientierte minimale Begrenzungsrechteck eines Polygons ist das Rechteck, welches das komplette Polygon umschließt und dabei den kleinstmöglichen Flächeninhalt besitzt.

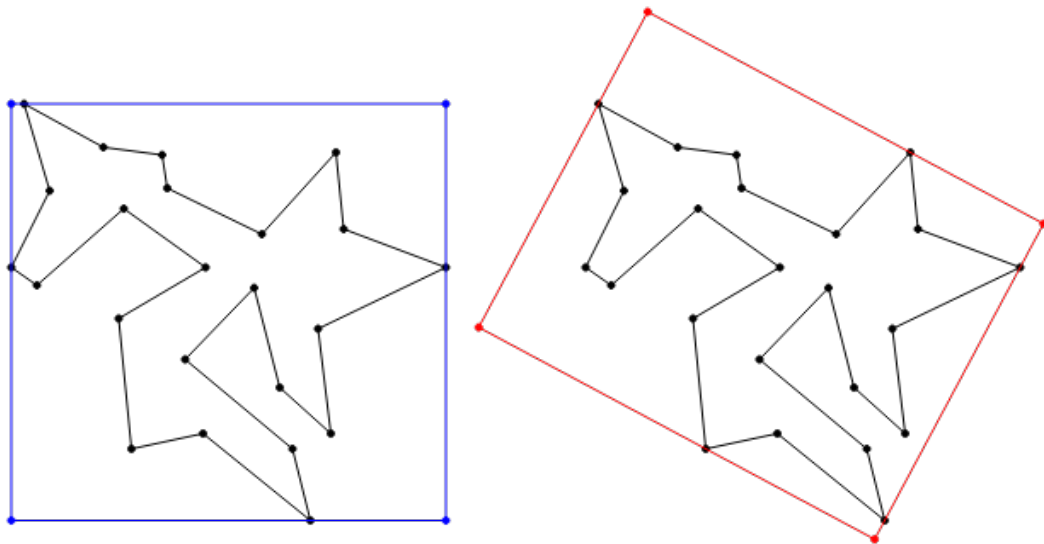


Abbildung 4: Eine mögliche Bounding Box(l.) im Vergleich zur OMBB(r.)

2.5 AutoCAD

AutoCAD ist ein grafischer Zeichnungseditor, welcher zum Erstellen von technischen Zeichnungen und dem Modellieren von Objekten verwendet wird (siehe Quelle [8]). AutoCAD verwendet dabei einfache Objekte wie Linien, Kreise und Bögen, um auf deren Grundlage kompliziertere Objekte zu erschaffen. Zu AutoCAD gehörig wurde das Dateiformat „.dxf“ entwickelt, welches als Industriestandard zum Austausch von CAD-Dateien dient.

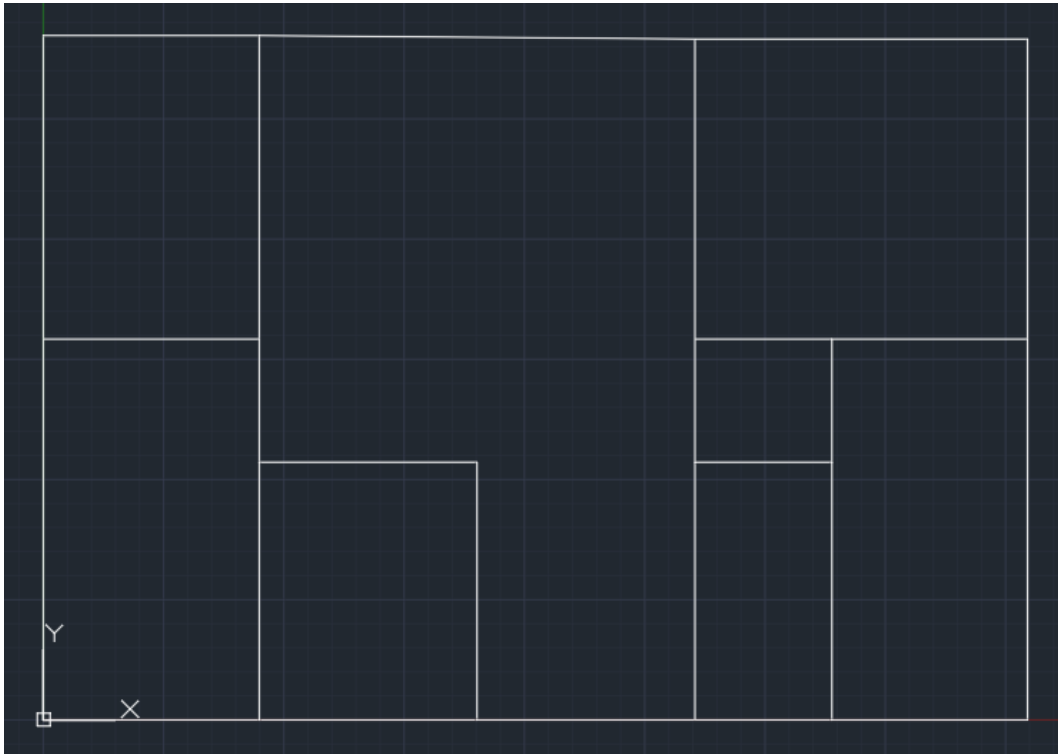


Abbildung 5: Grundriss aus AutoCAD (Screenshot der Verfasser)

Der Grundriss, welcher als Ausgangspunkt dieser Arbeit fungiert, wird in AutoCAD erstellt und dem zu erstellenden Programm in Form einer .dxf-Datei bereitgestellt. Diese Dateien dienen auch dem fertiggestellten Programm als Ausgangspunkt. Ein Beispiel für einen solchen Grundriss ist in Abbildung 5 zu sehen.

2.6 OpenSCAD

OpenSCAD ist eine kostenlos verfügbare CAD-Modellierungssoftware, welche aus einer textbasierten Beschreibungssprache 3D-Modelle erzeugt (siehe Quelle [4]). OpenSCAD bietet dabei verschiedene Vorteile während des Modellierungsvorganges. Hierzu gehören beispielsweise das farbige Hervorheben oder die Modularisierung zusammenhängender Objekte.

Die Modellierung von einfachen Basisobjekten in OpenSCAD erfolgt

durch das Verwenden von Schlüsselwörtern wie `cube()`, `sphere()` oder `cylinder()` und Parametern in Klammern. Diese Basisobjekte können anschließend durch Mengenoperationen wie Vereinigungen (`union()`), Differenzen (`difference()`) oder Überschneidungen (`intersection()`) und Transformationen wie Skalierungen (`scale()`), Rotationen (`rotate()`) oder Translationen (`translate()`) miteinander verknüpft und kombiniert werden, um neue Objekte nach eigenen Ansprüchen zu bilden.

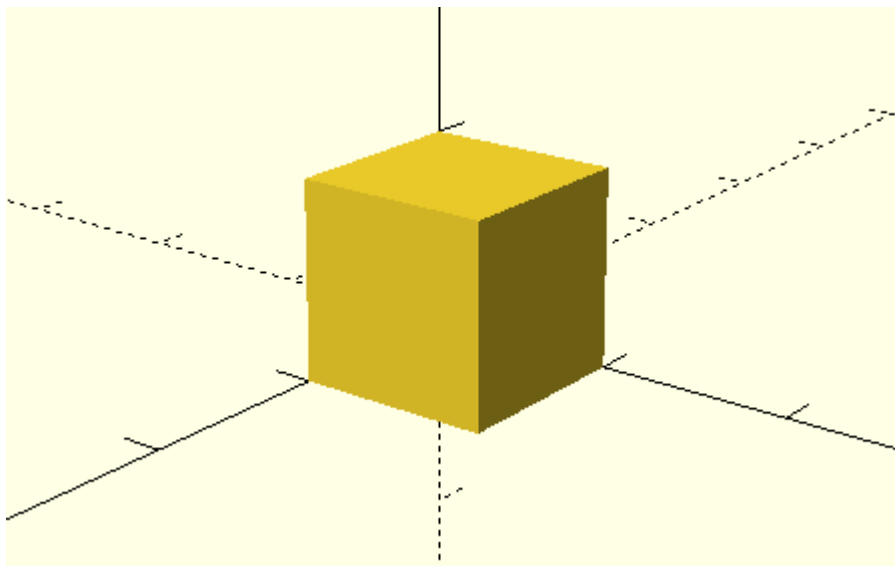


Abbildung 6: Eine Vereinigung zweier Würfel in OpenSCAD (Screenshot der Verfasser)

Neben solchen einfachen Objekten wird außerdem die Möglichkeit geboten, komplexere Objekte wie Polygone (`polygon()`) zu erstellen. Diese können dann ausgehend von einem zweidimensionalen Polygon in dreidimensionale Polygone umgewandelt werden (`linear_extrude()`), welche vor allem das Umwandeln von komplexen Formen in Objekte erleichtert.

Die Anweisungen, welche OpenSCAD zum Modellieren verwendet, werden in einfachen Textdateien im „scad“-Format gespeichert. Die Simplizität dieser Textdateien erlaubt es, die aus dem zu entwickelnden Programm

erhaltenen Anweisungen in .scad-Dateien zu speichern, welche von OpenSCAD eingelesen, eingesehen und bearbeitet werden können.

Die Modelle, die so mit OpenSCAD erstellt wurden, können anschließend mit dem 3D-Drucker ausgedruckt werden. Dazu werden die Modelle in Dateien des „.stl“-Formats konvertiert. Dies geschieht entweder über die Oberfläche von OpenSCAD oder mittels einer Kommandozeilenanweisung.

2.7 3D-Drucker MakerBot Replicator™ 2

Der vorliegende 3D-Drucker ist das Modell Replicator™ 2 der Firma MakerBot. Dieser Drucker verfügt über eine höhenverstellbare Grundplatte, auf der das Filament¹ aufgetragen und das finale Objekt gedruckt wird und einen sogenannten „Extruder“, welcher die Funktion übernimmt, das zu druckende Filament zu erhitzen und mit einer konstanten Filamentbreite auf die Grundplatte bzw. das gedruckte Objekt aufzutragen. Mithilfe dieser zwei Hauptbestandteile wird schichtweise Filament aufgetragen, welches aushärtet und so nach und nach das Objekt bildet.

Die Höhe der Grundplatte wird während des Druckvorganges automatisch vom Drucker variiert und nach Abschluss des Druckens wieder auf den Ausgangszustand zurückgesetzt. Um die Beweglichkeit des Extruders zu garantieren, ist dieser auf drei Achsen befestigt, sodass drei Motoren ihn auf diesen Achsen verschieben können.

Abhängig vom Filament bzw. der Temperatur, bei der dieses aufgetragen wird, der Bewegungsgeschwindigkeit des Extruders und der Filamentstärke, die der Extruder aufträgt, lässt sich die gewünschte Druckqualität anpassen. Eine niedrige Qualität ist dabei in den meisten Fällen mit einer erheblich kürzeren Druckzeit verbunden.

Die Druckzeit wird außerdem von der eingestellten Ausfüllung von ge-

¹Filament bezeichnet das Material, welches der 3D-Drucker zum Drucken verwendet.

schlossenen Objekten und dem Hinzufügen von Druckhilfen beeinflusst. So kann man Quader zum Beispiel nicht komplett mit Filament füllen lassen, sondern mit einem Bienenwabenmuster durchsetzen, sodass nur ein geringer Teil des Objektes ausgefüllt wird. Zusätzlich zu dem eigentlichen Druckergebnis wird unter jedes gedruckte Element ein dünner Untergrund gedruckt, welcher leicht von der Grundplatte und vom gedruckten Modell zu trennen ist und so eine Beschädigung beim Entfernen des Objekts vom Drucker verhindert. Außerdem werden bei Überhängen zusätzliche Stützen angebracht, um ein Absacken des noch nicht fest gewordenen Filaments zu verhindern. Indem so also ein stark verringerter Betrag an Filament aufgetragen werden muss, wird auch die Druckzeit drastisch reduziert.

Beim Drucken von Objekten ist neben Anpassungen zur Kontrolle der Druckqualität und Druckzeit außerdem zu beachten, dass die Grundplatte nur auf einer begrenzten Fläche bedruckbar ist. Entsprechend dieser möglichen Maße sollten also alle Objekte in ihrer Größe angepasst werden.

3. Vorgehen zur Problemlösung

3.1 Einlesen des Grundrisses

3.1.1 Funktionsweise der Bibliothek *kabeja*

Den Beginn der Verarbeitung markiert hierbei die Grundrissdatei, in welcher sämtliche Werte, welche im weiteren Verlauf des Programmes relevant werden, enthalten sind. Das Einlesen der Daten eines Grundrisses, wie in Abb. 5, erfolgt mit der Java-Bibliothek „kabeja“. Diese ermöglicht es, aus .dxf-Dateien alle DXF-Objekte eines bestimmten Typs zu erhalten und deren Werte in einer Liste zu speichern und später zu verarbeiten [6].

```
1 public static ArrayList<Line> getAutocadFile(String filePath)
    throws ParseException {
2     ArrayList<Line> vcs = new ArrayList<>();
3     Parser parser = ParserBuilder.createDefaultParser();
4     parser.parse(filePath, DXFParser.DEFAULT_ENCODING);
5     DXFDocument doc = parser.getDocument();
6     List lst = doc.getDXFLayer("0").getDXFEntities(
        DXFConstants.ENTITY_TYPE_LINE);
7     for (int index = 0; index < lst.size(); index++) {
8         DXFLine dxfline = (DXFLine) lst.get(index);
9         Line v = new Line(
10            new Vector(round2(dxfline.getStartPoint().getX()),
                round2(dxfline.getStartPoint().getY())),
11            new Vector(round2(dxfline.getEndPoint().getX()),
                round2(dxfline.getEndPoint().getY())));
12         vcs.add(v);
13     }
14
15     return vcs;
16 }
```

Codeauschnitt 1: DXF File Parser

Überdenken, ob Code hier wirklich notwendig

In dieser Anwendung wird eine Funktion der Klasse „DXFReader“ verwendet, welche den Pfad zur .dxf-Datei als Parameter übergeben bekommt. Aus dieser Datei werden alle DXF-Objekte, die mit dem Typen `DXFLine` übereinstimmen, in einer Liste zurückgegeben. Die Koordinaten der Start- und Endpunkte der DXFLines in dieser Liste werden anschließend in eine Liste von Linien übertragen, welche im weiteren Programmablauf unter anderem bei der Umwandlung des Graphen in die DCEL Verwendung findet.

3.1.2 Funktionsweise der GUI

Die GUI setzt sich zusammen aus einem `JFrame`, in dem zwei `JTextField`, ein `FileChooserButton`, ein `StartButton` und ein `ShowResultButton` platziert sind.

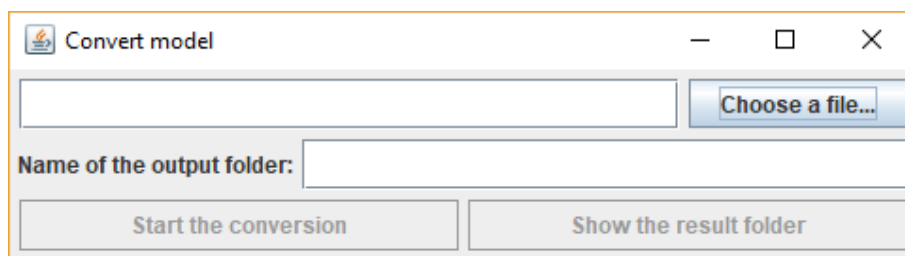


Abbildung 7: Ausgangszustand der GUI (Screenshot der Verfasser)

Der Nutzer kann im Ausgangszustand über den `FileChooserButton` einen `JFileChooser`-Dialog öffnen, mit dem er die Datei, die er umwandeln möchte, auswählen kann. Sobald er dann eine Datei ausgewählt hat, wird der Dateipfad zu dieser Datei zusätzlich im `JTextField` angezeigt. In diesem `JFileChooser` ist außerdem ein `FileFilter` implementiert, der dem Nutzer lediglich .dxf-Dateien anzeigt. Alternativ zum `JFileChooser`-Dialog kann der Nutzer auch direkt in das links positionierte `JTextField` den Dateipfad eingeben. Im `JTextField` unterhalb gibt der Nutzer dann den Ordernamen ein, in dem die umgewandelten Dateien ausgegeben werden.

Nachdem der Nutzer eine Datei ausgewählt und einen Namen für den Ergebnisordner hat, wird nun der `StartButton` aktiviert und er kann den Konvertierungsprozess starten.

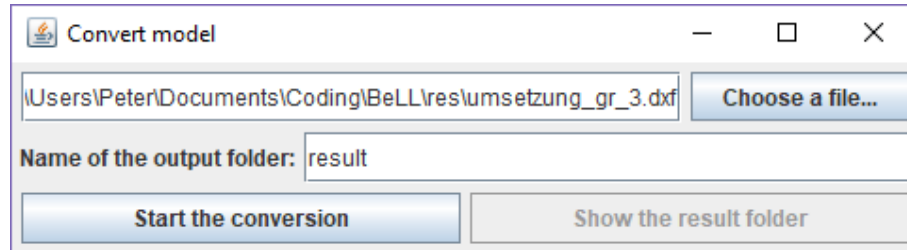


Abbildung 8: GUI mit aktiviertem `StartButton` (Screenshot der Verfasser)

Beim Klicken des `StartButton` wird überprüft, ob das Programm die ausführbare Datei von OpenSCAD unter `C:\\Program Files\\OpenSCAD\\` finden kann. Diese Datei wird benötigt, um die Umwandlung der `.scad`-Dateien in `.stl`-Dateien zu ermöglichen. Sollte diese dort nicht gefunden werden, wird der Nutzer mit einem Dialog darauf hingewiesen.

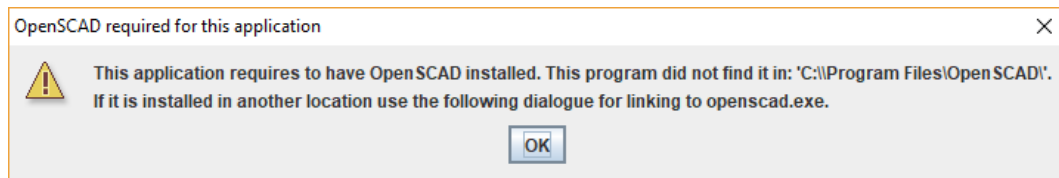


Abbildung 9: Dialog zur Warnung des Nutzers (Screenshot der Verfasser)

Anschließend hat der Nutzer die Möglichkeit, den Pfad zur ausführbaren Datei mit einem weiteren `JFileChooser`-Dialog anzugeben.

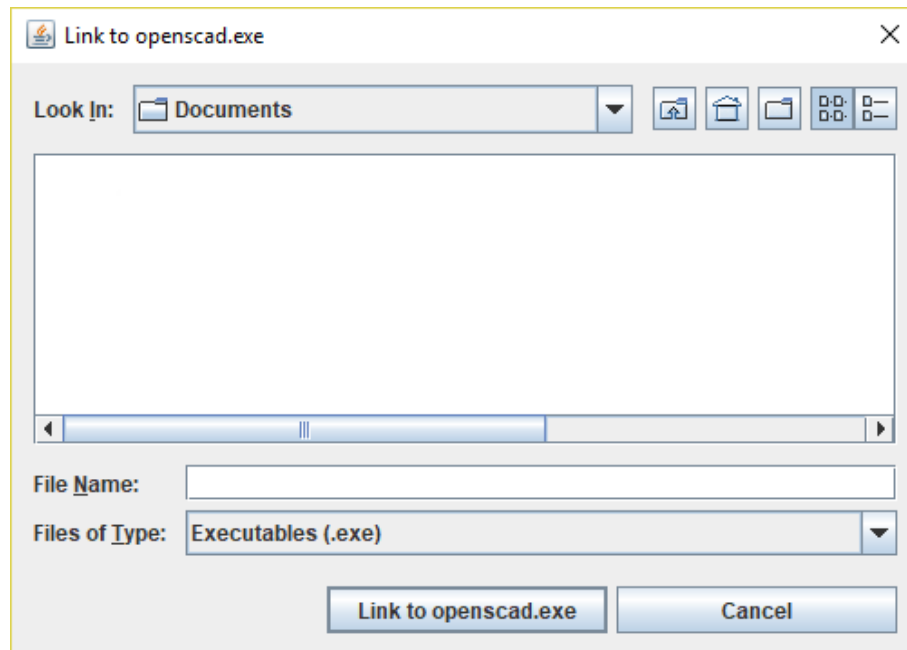


Abbildung 10: Dialog zum Verlinken der openscad.exe (Screenshot der Verfasser)

Sobald dieser Vorgang beendet ist, bleiben dem Nutzer nun die Möglichkeiten, den Ordner mit den Ausgabedateien anzuzeigen oder einen anderen Grundriss umzuwandeln.

3.2 Erstellen der Doubly-connected Edge List

3.2.1 Graph Klasse

Die zweidimensionalen Operationen der Anwendung werden von der `Graph`-Klasse durchgeführt. Übergibt man dieser eine Liste aus Linien, welche jeweils aus einem Start- und Endortsvektor bestehen, wird auf diesen basierend eine DCEL berechnet. Dafür werden die drei graphischen Elemente der Typen `Edge`(Kante), `Node`(Knoten) und `Face`(Fläche) gespeichert.

3.2.2 Verarbeitung der Linien

Beginnend werden gleichzeitig die Knoten und Kanten der zu generierenden DCEL erstellt.

3.2.3 Vector-to-Node Konvertierung

Aus einem Ortsvektor kann die Funktion `createNode()` einen kongruenten Knoten mit gleichen Ursprungskoordinaten, aber ohne Referenz auf eine anliegende Kante, erstellen. Desweiteren wird, falls ein Knoten zu einem abgefragten Punkt schon generiert wurde, dieser zurückgeben.

```
1      private Node createNode(Vector p) {
2          for (Node n : nodes) {
3              if (n.getOrigin().equals(p)) {
4                  return n;
5              }
6          }
7          nodes.add(new Node(p));
8          return (nodes.get(nodes.size() - 1));
9      }
```

Codeauschnitt 2: `createNode()` Funktion

3.2.4 Line-to-Edge Konvertierung

Die `processData` Funktion greift auf `createNode()` zu und erstellt die Liste aus Kanten mit den jeweiligen Start- und Endknoten. Auch hier gibt es noch keine abgespeicherten Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kanten.

```
1 private void processData(ArrayList<Line> ls) {  
2     for (Line l : ls) {  
3         edges.add(new Edge(createNode(l.getP1()),  
                             createNode(l.getP2())));  
4     }  
5 }
```

Codeauschnitt 3: Line-to-Edge Konvertierung

Basierend auf dieser Grundlage müssen alle folgenden Kalkulationen der `Graph`-Klasse durchgeführt werden.

3.2.5 Zwillingskantengenerierung

Durch Vertauschen der Start- und Endknoten wird nun für jede existente Kante eine entgegengesetzt-laufende komplementäre „Zwillingskante“ gebildet. In der Anwendung wird so die Liste der Kanten um ihre Größe erweitert. Direkt nach dem Hinzufügen der Zwillingskante wird jeweils eine Referenz erstellt, welche beide Zwillinge miteinander verknüpft. Durch die Zwillingskanten werden folgende Operationen in der DCEL vereinfacht, da jede Fläche nun von einer eindeutigen Menge an Kanten begrenzt ist und ein Umlaufsinn dieser festgestellt werden kann.

3.2.6 Nachfolger- und Vorgängerermittlung

Für die Erstellung der Nachfolger- und Vorgängerreferenzen zwischen den Kanten, werden alle ausgehenden Kanten E eines Knotens N_i betrachtet. Anschließend sortiert die Anwendung diese mittels der `angle()`-Methode

anhand des Winkels. Dabei wird die jeweilige Kante E_i in einen Vektor, welcher zwischen die beiden Kantenknoten gespannt werden kann, konvertiert, damit die `angle()`-Funktion aufrufbar ist. Diese gibt den Winkel des Vektors zur x-Achse im Intervall $(-\pi, \pi]$ aus. Aus den angeordneten Kanten E lassen sich unter Beachtung des mathematisch positivem Umlaufsinnnes der Kanten an den Flächen nun folgende Beziehungen ableiten.

1. Die Zwillingskante von E_{i+1} ist der Vorgänger von E_i
2. E_{i-1} ist der Nachfolger der Zwillingskante von E_i

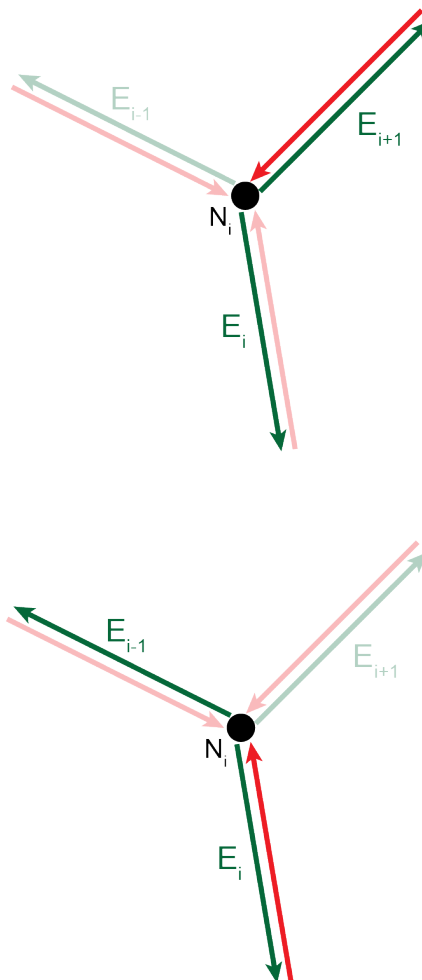


Abbildung 11: Veranschaulichung 1. und 2.

Falls $i-1$ bzw. $i+1$ die Indices der Menge E mit n Elementen überschreiten, wird anstattdessen E_n bzw. E_0 gewählt.

Der aufgeführte Algorithmus wird für alle Knoten N der DCEL fortgeführt, sodass alle Referenzen zwischen den Kanten fertiggestellt werden. r jeden Knoten eine sortierte ArrayList aus Kanten enthält,

```
1      for (ArrayList<Edge> e : nodeEdges) {
2          for (int i = 0; i < e.size(); i++) {
3              e.get(i).setPrev(e.get((i + 1) \% e.size()).
4                  getTwin());
5              e.get(i).getTwin().setNext(e.get(Math.
6                  floorMod((i - 1), e.size())));
7          }
8      }
```

Codeauschnitt 4: Zuweisung der Beziehungen im Programm; `nodeEdges` ist eine zweidimensionale ArrayList

3.2.7 Flächenerstellung

Durch das Vorliegen der DCEL Kanten können alle Flächen des Graphen erschlossen werden. Dabei wird bei dem Element E_0 der Kantenliste begonnen und solange der Nachfolger über die Verknüpfung ermittelt, bis die Ursprungskante wieder erreicht wurde. Die ermittelte Fläche F_0 besitzt als anliegende Kante so die Kante E_0 . Alle in der Fläche enthaltenen Kanten werden bei der fortlaufenden Rechnung ignoriert, sodass die alle anderen Flächen F analog errechnet werden können. Das äußere Gebiet des planaren Graphen, also in der DCEL der Umriss, kann durch den Drehsinn der Kanten dieser Fläche festgestellt werden, denn dieser ist als einziger mathematisch negativ. In der Anwendung wird dafür die Gaußsche Trapezformel verwendet, welche bei einem umgekehrten Drehsinn einen negativen Flächeninhalt ausgibt.

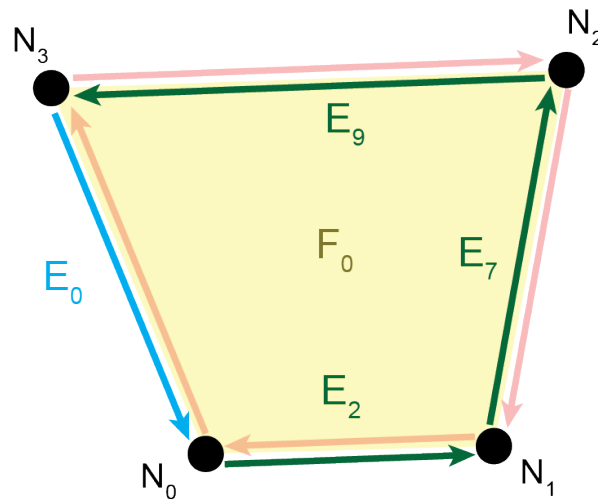


Abbildung 12: Flächenberechnung. Dargestellt: Anliegende Kante(Cyan), Kanten(grün) und Fläche(gelb)

3.2.8 Vervollständigung der Knoten

Die letzte nötige Referenz ist die einer anliegenden Kante eines Knotens. Dafür wird für die Knoten N eine Kante ermittelt, die ihren Ursprung in dem jeweiligen Knoten hat. Die DCEL ist mit diesem Schritt fertiggestellt und bildet die Grundlage für alle folgenden dreidimensionalen Berechnungen.

3.3 Aufbau der Einzelbauteile

Die drei Kriterien, die die Unterteilung des Modells einhalten soll, sind wie folgt festgelegt:

- Die Einzelteile sollen möglichst simpel gestaltet sein, um unnötig komplizierten Konflikten vorzubeugen.
- Die Untereinheiten sollen durch so geringe Modifikation wie möglich einen guten seitlichen Einblick in das Modell gewähren.
- Die Untereinheiten sollen auch nach dem Entfernen einzelner Bauteile eine möglichst stabile Einheit bilden.

Diese Kriterien lassen sich mit herausnehmbaren Wandstücken realisieren, welche im restlichen Modell verankert sind, so dass sie herausgenommen und auch wieder eingesetzt werden können. Um diese Wände auch weiterhin im Modell fixieren zu können, werden Eckpfeiler verwendet, in welche die Wandstücke, eingesetzt werden. Da die Einheit aus Eckpfeilern und leicht entfernbar Wandstücken nicht sehr stabil ist, werden nun am unteren Teil der Eckpfeiler noch Stecker hinzugefügt, um eine Grundplatte zu fixieren und so eine stabile Einheit zu erhalten. Zur Realisierung des Stecksystems müssen anschließend für beide Verankerungsmechanismen geeignete Designs ausgearbeitet werden.

3.3.1 Eckpfeiler

Die Eckpfeiler des Modells symbolisieren die Schnittpunkte der Wände des Grundrisses. Sie dienen dem Befestigen der Grundplatten und Wandstücke. Um das Stecksystem zu realisieren, verfügen die Eckpfeiler über die meisten Verbindungen zu den anderen Objekten. Um diese Verbindungen jedoch problemlos herstellen zu können, ist ein komplexes Modell vonnöten.

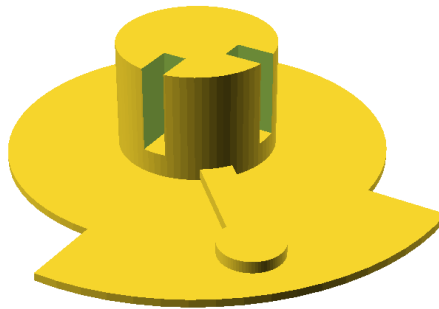


Abbildung 13: Ein Eckpfeiler (Screenshot der Verfasser)

CornerCylinder

Der „CornerCylinder“ stellt den oberen Teil eines Eckpfeilers dar. Dieser besteht aus einem zylindrischen Grundbauteil mit Vertiefungen, in denen die Wände befestigt werden. Dieser ist auf der Oberseite des Eckpfeilers in Abbildung 13 zu sehen.

In dessen Berechnung werden alle an dem Knoten anliegenden Kanten betrachtet und eine Schnittmenge zwischen einem Grundzylinder und in die Richtung der Kanten gedrehten Quadern gebildet.

CornerPin

Der „CornerPin“ ist der untere Abschnitt des Eckpfeilers, welcher der Verbindung des Eckpfeilers mit den Grundplatten dient. Hierfür verfügt er über positive Steckmechanismen, die auf der Unterseite des Eckpfeilers in Abbildung 13 zu sehen ist.

Für jede anliegende Fläche wird dabei ein neues Objekt berechnet. Es ist dabei zu unterscheiden, ob die Fläche das äußere Gebiet oder einen Teil des inneren Gebietes darstellt. Auf der Innenseite des Grundrisses sollten Steckmechanismen angebracht werden, um die Verankerung der Grundplatten zu gewähren, was außen nicht notwendig ist, da dort keine

reale Fläche angelegt wird.

Wenn an einen Knoten das äußere Gebiet angrenzt, wird der entsprechende Eckpfeiler dessen nicht mit einem Pin, sondern nur mit einer Umrandung versehen. Diese entsteht durch eine Differenzmenge zwischen einem Basiszylinder, der den kompletten Eckpfeiler umschließt und der äußeren Fläche. Gewährleistet wird das durch die Verarbeitung von Polygonen mit OpenSCAD. Obwohl die unendliche Fläche in der Differenz mit einbezogen ist, repräsentiert diese immer auch den kompletten inneren Raum des Grundrisses, so dass eine Differenz möglich ist.

Bei einem Knoten, der nicht an das äußere Gebiet angrenzt, wird ein positiver Steckmechanismus errechnet. Er setzt sich zusammen aus einer Basis, einem Quader und einem Zylinder. Die Länge des Pins kann dabei variieren. Sie ist so definiert, dass zum Rand der Fläche immer ein gewisser Abstand vorherrscht. Dies vermeidet Komplikationen nach und während des Druckens, wo sonst Hohlräume überlappen könnten. Die Basis entsteht durch eine Schnittmenge der betrachteten Fläche mit dem Basiszylinders des Pins.

3.3.2 Wandstücke

Die Wände des Modells stellen die Wände des Grundrisses dar. Eine Wand setzt sich aus jeweils drei Quadern zusammen.

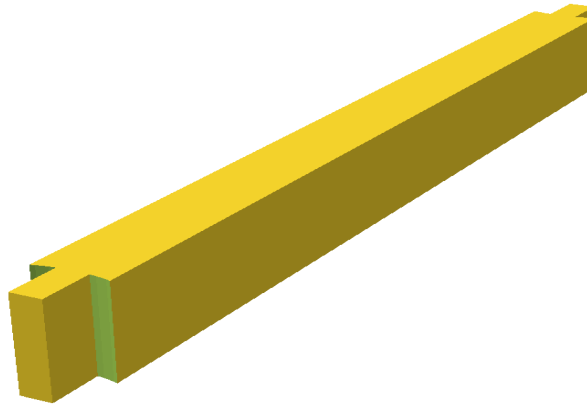


Abbildung 14: Ein Wandteil (Screenshot der Verfasser)

Der größte dieser Quader stellt, wie in Abbildung 14 zu sehen, den mittleren Hauptteil dar. Dieser Teil verfügt über die tatsächliche Länge der Wand, welche im Grundriss angegeben ist. Die Höhe und Breite der Wand werden jedoch mit konstanten Parametern zu Beginn des Programmes festgelegt. Die zwei kleineren Quader dienen dem Befestigen der Wand am Eckpfeiler. Dafür wurden die beiden Quader mittig an die beiden schmalen Seiten des Mittelteils gesetzt. Die Verbindungsstücke verfügen dabei über die gleiche Höhe wie die eigentliche Wand, ihre Breite beträgt aber nur ein Drittel der Wandbreite.

Details über die Länge der Pins hinzufügen!

3.3.3 Grundplatten

Grundplatten repräsentieren die Flächen des Grundrisses. Sie sind aufgebaut aus einem extrudierten Polygon, welches inverse Steckmechanismen am Boden aufweist.

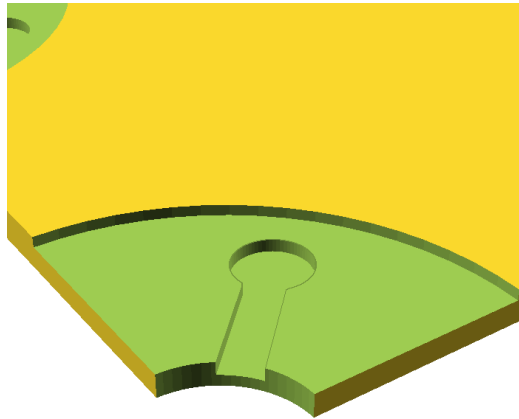


Abbildung 15: Eine Grundplatte (Screenshot der Verfasser)

Ein Ausschnitt einer solchen Grundplatte ist in Abbildung 15 zu sehen. Die inversen Steckmechanismen dienen dem Anbringen der Grundplatte an die Eckpfeiler. Für jeden Knoten, der an der Fläche anliegt wird hierbei je eine Einkerbung vorgenommen, die auf das Stecksystem des zu dem Knoten zugehörigen Eckpfeiler passt.

Abstand zwischen Flächen; Vergrößerung von an das äußere Gebiet angrenzende Fläche

3.3.4 Zuweisen von Berechnungskonstanten

Funktion der `Params`-Klasse

Die `Params`-Klasse wird als statische Zugriffsmöglichkeit auf bestimmte Konstanten des Programms verwendet, welche bei der Berechnung der Bauteile vonnöten sind. Diese Klasse verfügt hierbei über öffentliche statische Funktionen, mit der aus allen anderen Klassen ohne eine Instanziierung der `Params`-Klasse deren Parameter gesetzt oder auf bereits vorhandene Parameter zugegriffen werden kann. Die Statik der Variablen und Funktionen verhindert hierbei, dass während des Programmablaufes verschiedene Berechnungskomponenten unterschiedliche Konstanten zur

Verfügung gestellt bekommen.

Das Setzen der Parameter findet zu Beginn des Programmes in der `Main`-Klasse statt. Hierbei wird die Funktion `setParams()` aufgerufen. Dieser Funktion werden sämtliche Werte als Parameter des Datentyps `double` übergeben. In der `Params`-Klasse werden dann innerhalb der Funktion allen privaten Variablen ihre Werte entsprechend der Parameter zugewiesen und abrufbar gemacht.

```
1      public static void setParams(double E, ...) {  
2          e = E;  
3          // ...  
4      }
```

Codeauschnitt 5: Die `setParams()`-Funktion zum Setzen der Parameter

Das Abrufen der Parameter erfolgt dann mittels der entsprechenden `get()`-Funktionen der `Params`-Klasse, welche für alle Parameter vorhanden sind. Ein Überschreiben einzelner Parameter wird an dieser Stelle verhindert, da für die privaten Variablen keine `set()`-Funktionen vorliegen. Der Aufbau der `get()`-Funktionen folgt dem generellen Aufbau des nachfolgenden Codebeispiels, jedoch werden die Parameterbezeichnungen jeweils entsprechend ersetzt:

```
1  public static double getE() {  
2      return e;  
3  }
```

Codeauschnitt 6: Die `get()`-Funktion für den Parameter `e`

Diese Funktionen werden dann aus den Programmteilen, in denen sie für Berechnungen benötigt werden, statisch mittels des Aufrufs der `Params`-Klasse aufgerufen.

Die Bedeutung der einzelnen Parameter erklärt sich wie folgt:

E (ϵ /Epsilon)

Der Parameter „E“ entspricht der Konstante ϵ (Epsilon), welcher aus Gründen der vorteilhaften Kürze der Parameternamen hier verwendet wurde. Somit muss nicht jedes mal `Epsilon` ausgeschrieben werden, es wird auf `E` reduziert. ϵ bezeichnet den Abstand, welcher zwischen zwei Bauteilen mit einberechnet werden muss, um ein einfaches Zusammenstecken zu gewährleisten.

CornerRadius

Der Parameter „CornerRadius“ entspricht der Konstante, welche den Radius des Grundzylinders der Eckstücken angibt.

PinMinLength

Der Parameter „PinMinLength“ entspricht der Konstante, welche die minimale Länge des Quaders des positiven Eckstücks angibt, welcher zwischen dem Eckzylinder und dem Pinzylinder platziert wird.

PinPWidth

Der Parameter „PinPWidth“ entspricht der Konstante, welche die Weite für den Quader des positiven Eckstücks angibt, welcher zwischen dem Eckzylinder und dem Pinzylinder platziert wird.

PinPRadius

Der Parameter „PinPRadius“ entspricht der Konstante, welche den Radius des Pinzylinders des positiven Eckstücks angibt.

PinDistance

Der Parameter „PinDistance“ entspricht der Konstante, welche die Distanz zwischen dem positiven Pin und den anliegenden Wandstücken angibt, welche für jeden Pin eingehalten werden muss.

Height

Der Parameter „Height“ entspricht der Konstante, welche die Höhe der Wandteile und der Eckzylinder angibt.

PinHeight

Der Parameter „PinHeight“ entspricht der Konstante, welche die Höhe des positiven Pinzylinders angibt.

BasePlateHeight

Der Parameter „BasePlateHeight“ entspricht der Konstante, welche die Höhe der Grundplatte angibt.

BasePlatePinCircleHeight

Der Parameter „BasePlateCircleHeight“ entspricht der Konstante, welche die Höhe der Kreisflächen angibt, die unter den positiven Eckstücken angebracht werden und der Stabilisierung und Verankerung von Grundplatter und Eckstück dienen.

3.4 Druckvorgang

Nachdem die einzelnen Bestandteile des Modells berechnet wurden, können diese gedruckt werden. Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass alle einzelnen Bauteile nicht in einem Druckvorgang gedruckt werden können, da die Grundplatte des 3D-Druckers zu klein ist.

In unserem Fall wies diese eine Länge von 28,5 cm und eine Breite von 15,2 cm auf (siehe Quelle [10]).

3.4.1 Minimierung der Druckvorgänge

Um die Dimensionen der Grundplatte effektiv auszunutzen, werden einzelne Elemente des Modells nach der Größe sortiert und dann solange nebeneinander angeordnet, bis die Breite der Druckfläche mit dem nächsten Element überschritten würde. Anschließend wird eine neue Reihe eröffnet, in der nun neue Elemente platziert werden. Dieser Prozess wird solange fortgeführt, bis die Länge der Druckfläche überschritten werden würde.

Dann wird eine neue Gruppierung von Objekten bzw. `Union` erstellt, in welcher der Algorithmus weiterläuft. Das Resultat zeigt eine Liste von Objekten, die eine platzeffiziente Anordnung dieser repräsentiert. Jedes einzelne Element in der Liste kann mit einem Durchgang gedruckt werden.

3.4.2 Ermittlung der Größen

Das Einzige, was die Strukturen Wand- und Eckteil, sowie Grundplatte in diesem Algorithmus voneinander unterscheidet, ist die Größe, welche unterschiedlich bestimmt wird. Da die Anordnung ein zweidimensionales Problem ist, wird die Höhe der Objekte nicht berücksichtigt.

Wände

Die Wandelemente werden durch eine Kante dargestellt und so modifiziert, dass sie in die Eckpfeiler gesteckt werden kann. Die Wände sind durch den notwendigen Abstand zwischen den Objekten immer kürzer als die zugehörige Kante. Die Breite ermittelt sich durch die definierte `wallWidth` der übergebenen `Params`-Klasse.

Eckpfeiler

Für die Größenberechnung der Eckpfeiler wird der längste Pin, welcher an dem jeweiligen Objekt anliegt, festgestellt. Die Länge dieses Pins stellt dann die Seitenlänge eines Quadrats dar, welche die Ausmaße des Eckpfeilers angibt.

Grundplatten

Um die optimale Größe der Grundplatten zu berechnen, muss die OMBB der Grundplatte berechnet werden. Dafür wird die OMBB der Grundfläche ermittelt und anschließend vergrößert, damit Modifikationen, die an der dieser durchgeführt wird, berücksichtigt werden.

Bestimmung der Konvexen Hülle Die Berechnung der OMBB wird über diesen Zwischenschritt realisiert, da nach dem von Freeman und Shapira bewiesenen Satz, eine Seite des minimalen Begrenzungsrechtecks kollinear mit einer der konvexen Hülle sein muss.

Für die Ermittlung wird der „Gift Wrapping Algorithm“ herangezogen. Bei diesem Algorithmus wird zuerst der Punkt mit der kleinsten Ordinate als Startpunkt P_0 festgelegt. Gibt es mehrere dieser Punkte, wird der Punkt mit der kleinsten Abszisse gewählt. Von P_0 ausgehend wird eine Gerade durch einen beliebigen Punkt P des Polygons gelegt und anschließend überprüft, ob es einen Punkt S gibt, der links der Geraden liegt. Im Programm geschieht das durch die Berechnung des Winkels zwischen den Vektoren $\overrightarrow{P_0P}$

und $\overrightarrow{P_0S}$ mithilfe der `Vector.angleTo(Vector v)` Methode. Ist dieser Winkel kleiner als 180° , liegt S links von der Gerade durch P_0 und P . S wird folglich als neuer Punkt P gesetzt und die Berechnung fortgesetzt. Der Vorgang wird solange durchgeführt bis alle Punkte überprüft wurden und ein nächster Punkt P_1 der konvexen Hülle feststeht. Der Algorithmus wird nun fortgeführt mit P_1 als Ausgangspunkt, solange bis der Anfangspunkt P_0 wieder erreicht wurde, so dass die konvexe Hülle „geschlossen“ ist.

Bestimmung der OMBB Nun wird die konvexe Hülle fortlaufend rotiert, so dass eine Seite parallel zur x-Achse ist. Dadurch kann man leicht das Begrenzungsrechteck durch Feststellen der Extremwerte des rotierten Polygons ermitteln. Der Flächeninhalt des Rechtecks aus den Punkten $A(x_{min}, y_{min})B(x_{min}, y_{max})C(y_{max}, x_{max})D(x_{max}, y_{min})$ wird gespeichert. Der Algorithmus wiederholt diese Abfolge für jede Gerade, bis alle Seiten der konvexen Hülle behandelt wurden. Als Ergebnis erhält das Programm die Breite, Höhe und den nötigen Winkel der OMBB. Diese Werte werden dann in der Platzierung genutzt.

3.5 Ausgabe der Resultate

3.5.1 Erstellung des Ausgabeordners

Alle ausgegebenen Dateien des Programms werden in einem Ordner zusammengefasst. Dieser Ordner wird im gleichen Verzeichnis erstellt, in dem auch das Programm ausgeführt wird. Als Name des Verzeichnisses wird der Name genutzt, den der Nutzer in der GUI eingegeben hat.

```
1      private static void createDirs(String folderName) {
2          try {
3              Files.createDirectories(Paths.get("./" +
4                  folderName + "/scad"));
5              Files.createDirectories(Paths.get("./" +
6                  folderName + "/stl"));
7          } catch (IOException e) {
8              e.printStackTrace();
9          }
10     }
```

Codeauschnitt 7: Erstellung der Unterordner

Im Unterordner „scad“ dieses Ordners finden sich dann sämtliche .scad-Dateien, im Unterordner „stl“ alle .stl-Dateien.

3.5.2 OpenSCAD Java Interface

Für die erleichterte Erstellung von OpenScad Objekten wurde ein Java Interface `ScadObject` erstellt, welches alle für das Projekt wichtigen Befehle enthält. Die Methode `toString()` stellt in den Klassen des Interfaces die Übergabe des OpenSCAD Befehlsstrings dar. So kann man z.B. mit der Klasse `Cube` einen Quader mit gegebener Länge, Höhe und Breite erstellen, der dann wie folgt mit `Cube.toString()` in einen String konvertiert wird: `cube([Länge, Breite, Höhe]);`

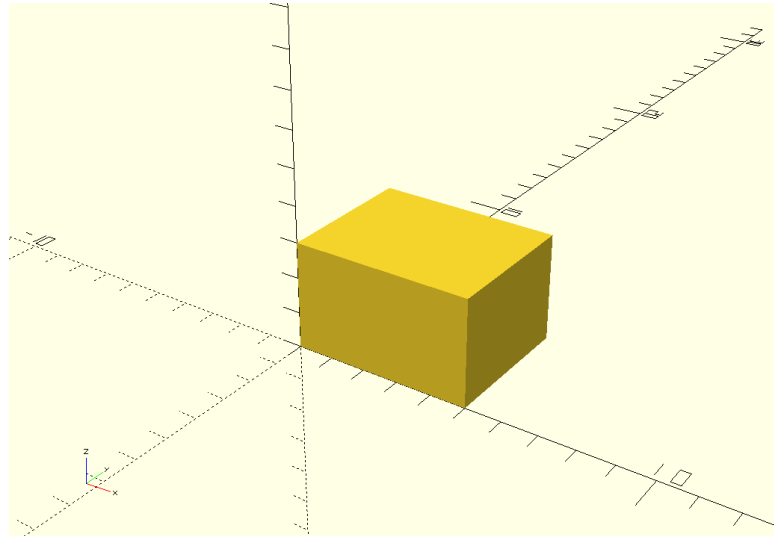


Abbildung 16: Resultat der Eingabe: `new Cube(3, 4, 5).toString()`
(Screenshot der Verfasser)

3.5.3 STL Konvertierung

Um die ermittelten .scad-Dateien im .stl-Format auszugeben, wird die Kommandozeilenfunktionalität von OpenSCAD verwendet. Die verwendete Anweisung setzt sich hierbei aus dem Pfad zur `openscad.exe`, dem Parameter `-o` und zwei weiteren Parametern zusammen. Die beiden weiteren Parameter stehen zum einen für den Namen der Ausgabedatei und zum anderen für den Namen der Eingabedatei. Eine vollständige Anweisung könnte wie folgt aussehen: `C:\Program Files\OpenSCAD\openscad.exe -o \stl\walls1.stl \scad\walls1.scad`

Hierzu werden zunächst alle Dateien im „scad“-Unterordner mit der Endung .scad durch die Klasse `SCADFinder` ermittelt und in einem Feld ausgegeben.

```
1      public static File[] findFiles(String folderName){
2          File dir = new File(".\\" + folderName + "\\scad\\")
3              );
4          return dir.listFiles(new FilenameFilter() {
5              public boolean accept(File dir, String
```

```
        filename)
6          { return filename.endsWith(".scad"); }
7      });
8  }
```

Codeauschnitt 8: Ausgabe aller .scad-Dateien aus einem Ordner

Diese Dateinamen verwendet dann die Klasse `STLConverter` um mittels eines `ProcessBuilder` die Kommandozeilenanweisungen auszuführen und die .stl-Dateien im „stl“-Unterordner zu erstellen.

```
1      public static void convert (String fileName, String
        folderName) throws InterruptedException {
2          Process p;
3          ProcessBuilder b;
4          try {
5              b = new ProcessBuilder(/*Anweisung*/);
6              p = b.start();
7
8              p.waitFor();
9          } catch (IOException e) {
10             e.printStackTrace();
11         }
12     }
```

Codeauschnitt 9: Ausführung der Kommandozeilenanweisungen

4. Ausblick

Im aktuellen Entwicklungsstand ist es nur möglich, alle Bauteile einzeln auszudrucken. Dies erhöht jedoch den Filamentverbrauch des 3D-Druckers um ein Vielfaches, weshalb eine Kombination mehrerer Bauteile für einen Druckvorgang zwecks der Reduktion des verwendeten Filaments für den Druck unterstützende Elemente als sinnvoll anzusehen ist. Dafür bietet sich beispielsweise ein gemeinsamer Druck von Wandteilen oder Eckpfeilern an, da diese Objekte weitestgehend ähnliche Ausmaße besitzen und somit eine recht effektive Kombination möglich ist. Außerdem liegen momentan lediglich Bauteile vor, welche nur auf einer Druckplatte fester Größe gedruckt werden können. Sollte das zu druckende Objekt größer als die Druckplatte sein, muss es zum Drucken skaliert werden, was jedoch unbedingt vermieden werden soll, da dadurch die Verhältnisse der Stecker zueinander verändert werden und so ein sachgemäßer Aufbau verhindert wird. Um diesen Umstand zu verhindern, soll es in der weiteren Entwicklung möglich sein, überdimensionierte Bauteile weiter in kleinere Untereinheiten zu teilen und so eine Wahrung des Maßstabs zu garantieren. Hierfür muss jedoch ein weiteres Stecksystem, sowie weitere Logik zur Umsetzung und Umwandlung der alten Bauteile konzipiert und implementiert werden. Als ferne Zukunftskonzeption, die an den Rahmen der Besonderen Lernleistung anschließt, lässt sich die Umsetzung von 3D-Modellen festmachen. Hierzu zählen kompliziertere Wände mit Schrägen, Fenstern oder Verstreben und Dachgestelle, welche als Abschluss auf dem Modell angebracht werden können. Die Komplexität der Aufgabenstellung wird dadurch aber um ein Vielfaches gesteigert, weshalb diese Problematik kein Bestandteil der Besonderen Lernleistung sein wird.

Veraltet; Überarbeiten!

Internetquellenverzeichnis

[1] de.wikipedia.org/wiki/Gau%C3%9Fsche_Trapezformel
(Stand: 21.03.2017, 12:00 Uhr)

[2] cs.sfu.ca/~binay/813.2011/DCEL.pdf
(Stand: 25.04.2017, 12:00 Uhr)

[3] en.wikipedia.org/wiki/Doubly_connected_edge_list
(Stand: 25.04.2017, 12:00 Uhr)

[4] en.wikibooks.org/wiki/OpenSCAD_User_Manual
(Stand: 25.04.2017, 12:00 Uhr)

[5] docs.oracle.com/javase/8/docs/api/index.html
(Stand: 25.04.2017, 12:00 Uhr)

[6] kabeja.sourceforge.net/
(Stand: 12.10.2017, 10:00 Uhr)

[7] <http://www.journaldev.com/864/java-open-file>
(Stand: 28.05.2017, 17:15)

[8] <https://en.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>
(Stand: 05.06.2016, 18:00)

[9] <https://en.wikipedia.org/wiki/OpenSCAD>
(Stand: 05.06.2017, 18:00)

[10] [https://eu.makerbot.com/fileadmin/Inhalte/Support/
Manuals/German_UserManual_V.4_Replicator2.pdf](https://eu.makerbot.com/fileadmin/Inhalte/Support/Manuals/German_UserManual_V.4_Replicator2.pdf)
(Stand: 06.06.2017, 09:00)

[11] https://de.wikipedia.org/wiki/Planarer_Graph
(Stand: 07.11.2017, 16:00 Uhr)

Abbildungsverzeichnis

1	Schema eines planaren Graphen (Abbildung der Verfasser) .	3
2	Schema einer DCEL (Abbildung der Verfasser)	4
3	Beispiel einer konvexen Hülle	5
4	Eine mögliche Bounding Box(l.) im Vergleich zur OMBB(r.) . .	6
5	Grundriss aus AutoCAD (Screenshot der Verfasser)	7
6	Eine Vereinigung zweier Würfel in OpenSCAD (Screenshot der Verfasser)	8
7	Ausgangszustand der GUI (Screenshot der Verfasser)	12
8	GUI mit aktiviertem <code>startButton</code> (Screenshot der Verfasser)	13
9	Dialog zur Warnung des Nutzers (Screenshot der Verfasser)	13
10	Dialog zum Verlinken der <code>openscad.exe</code> (Screenshot der Ver- fasser)	14
11	Veranschaulichung 1. und 2.	17
12	Flächenberechnung. Dargestellt: Anliegende Kante(Cyan), Kanten(grün) und Fläche(gelb)	19
13	Ein Eckpfeiler (Screenshot der Verfasser)	21
14	Ein Wandteil (Screenshot der Verfasser)	23
15	Eine Grundplatte (Screenshot der Verfasser)	24
16	Resultat der Eingabe: <code>new Cube(3, 4, 5).toString()</code> (Screenshot der Verfasser)	32

Dank an die Betreuer

Wir möchten hiermit sowohl unserem internen Betreuer, als auch den externen Betreuern der Fakultät für Mathematik und Informatik der Universität Leipzig danken.

Herrn Rai-Ming Knospe als unseren internen Betreuer des Wilhelm-Ostwald-Gymnasiums verdanken wir die Beratung bezüglich Inhalt und Ausarbeitung dieser Besonderen Lernleistung. Außerdem fungierte er als zentraler schulinterner Ansprechpartner und lieferte uns Hinweise beim Überarbeiten der Besonderen Lernleistung.

Die Idee für das Thema lieferte uns Herr Prof. Dr. Geric Scheuermann der Fakultät für Mathematik und Informatik der Universität Leipzig. Er ermöglichte uns ebenso das Arbeiten mit dem 3D-Drucker und stellte uns die notwendigen Materialien bereit. Weiterhin möchten wir einen besonderen Dank an Herrn Tom Liebmann richten, der uns während unserer Arbeitszeit an der Universität Leipzig betreute und mit umfangreichen Rat sowie Ideen zur Problemlösung zur Seite stand. Er unterstützte uns dabei maßgeblich in unserer Arbeits- und Herangehensweise zur Umsetzung des Problems und gab uns Hinweise zur Lösung mathematischer Operationen.

Selbstständigkeitserklärung

Johann Bartel

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle Stellen, die dem Wortlaut und dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Mit der schulinternen Verwendung der Arbeit bin ich einverstanden.

Leipzig, den 22.12.2017

Johann Bartel

Peter Oehme

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt, nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle Stellen, die dem Wortlaut und dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Mit der schulinternen Verwendung der Arbeit bin ich einverstanden.

Leipzig, den 22.12.2017

Peter Oehme

Arbeitsteilung

Wir versichern hiermit, dass die Besondere Lernleistung von uns zu gleichen Teilen erarbeitet wurde. Die Aufteilung erfolgte so, dass Johann Bartel die „“, die „“, ... und die „“ übernahm. Peter Oehme fertigte die „“, die „“, ... und die „“ an. Hierbei wurde darauf abgezielt, dass jeder von uns etwa die Hälfte der Arbeit erarbeitet hat.

Leipzig, den 22.12.2017

Johann Bartel

Peter Oehme
