



Azra GRADINČIĆ, B.Sc.

# Struktur- und Tragwerksmodelle

Die Entwicklung des Rapid Modelling

## **MASTERARBEIT**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Architektur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn.

Andreas TRUMMER

Institut für Tragwerksentwurf

Graz, Juli 2020



# Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebene Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum/Date

---

Unterschrift/Signature



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die diese Arbeit möglich gemacht haben. Bei meinem Betreuer Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Andreas Trummer bedanke ich mich für die kritischen und hilfreichen Anregungen während des gesamten Betreuungszeitraums. Ass.Prof. Mag.rer.nat. Dr.techn. Albert Wiltsche danke ich für die Unterstützung bei der Algorithmusentwicklung.

Weiters möchte ich Maria Verdnik für das Korrekturlesen der Arbeit danken.

Ein besonderer Dank gilt meinen lieben Eltern und Großeltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht haben, mir während meines gesamten Studiums eine Stütze waren und immer an mich geglaubt haben.

Meinem Manuel danke ich für die vielen Stunden, in denen er mir tatkräftig zur Seite gestanden ist - bei der Optimierung und den Reparaturen des 3-D-Druckers, beim Zuschneiden der Rohre zu später Stunde, für die vielen Diskussionen über verschiedenste Themen der Masterarbeit, die mich immer einen Schritt weiter gebracht haben und letztendlich für das ausführliche Korrekturlesen der geschriebenen Arbeit. Danke für die Motivation und den Rückhalt den du mir tagtäglich gibst.

Graz, 26.07.2020

Azra Gradinčić



# Kurzfassung

## Stichwörter

Modelle

Rapid Modelling

3-D-Druck

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Verwendung eines Fused-Deposition-Modelling-Druckers zur Unterstützung beim Struktur- und Tragwerksmodellbau untersucht. Durch die Möglichkeit, Veränderungen am Modell vorzunehmen und dadurch Material und Zeit beim Modellbauprozess zu sparen, soll auf diese Weise die Begleitung des Entwurfsprozesses durch ein Modell vereinfacht werden. Hierfür wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt.

Der erste Ansatz verfolgte verschiedene Ideen zur Entwicklung eines Tragwerksmodellbaukastens mit dem Ziel, einen 3-D-druckbaren Universalknoten zu erstellen, der mithilfe eines FDM-Druckers erstellt werden kann. Die Ideen wurden auf Bedienbarkeit, Herstellbarkeit und auf die Erfüllung gesetzter Anforderungen getestet und die Erkenntnisse werden in 3 Systemen zusammengefasst. Dabei zeigte sich, dass ein universeller Knoten, der alle gesetzten Anforderungen erfüllt, mit der gewählten Fertigungstechnologie nicht im gewünschten Maßstab realisiert werden kann.

Als zweiter Ansatz wurde die Idee eines digitalen Modellbaukastens verfolgt und ein Grasshopper-Algorithmus erstellt, der den Knotenerstellungsprozess automatisiert. Die Knoten entstehen aus den Stabverlängerungen und der einzige benötigte Input ist ein Stabachsenmodell. Form und Größe der Knoten werden durch 5 Parameter bestimmt. Die Platzierung der Knoten wird für den Druckprozess optimiert, indem die Knoten bei Möglichkeit orientiert auf das Druckbett gelegt werden. Bei Stäben, die zu kurz ausfallen würden oder für Knoten, die sich berühren würden, werden Sonderelemente erstellt. Alle für den weiteren Modellbauprozess benötigten Daten werden im Algorithmus automatisch generiert.

Bei der Entwicklung der Stäbe wurde der Fokus auf die stufenlose Längeneinstellung gelegt. Die

Stäbe werden aus komplementären Rohren hergestellt und die Fixierung der Stablängen wird durch 3-D-druckbare Klemmen oder durch die Verformung der Rohrgeometrie bewerkstelligt.

Der Rapid Modelling Algorithmus wurde zur Erstellung von Modellen einer Lamellenkuppel, einer Translationsschale und mehrerer Raumfachwerke eingesetzt, um die praktische Anwendung im Modellbauprozess zu demonstrieren.



# Abstract

## Keywords

Models

Rapid Modelling

3D printing

In the course of this work, the use of fused deposition modeling (FDM) printers for creating structural models was investigated. The possibility of making changes to the model and in this way saving material and time during the modeling process should simplify the creation of structural models with the aim of supporting the design process. Two different approaches were pursued for this purpose.

The first approach dealt with the development of a structural model kit with the focus on creating a universal node that could be 3-D printed using an FDM printer. The ideas were tested for usability, producibility, and the fulfillment of set requirements and the findings are summarised in 3 systems. It was found that a universal node that fulfills all set requirements cannot be realized in the desired scale with the chosen printing technology.

As a second approach, the idea of a digital modeling kit was pursued and a Grasshopper algorithm was created to automate the node creation process. The nodes are created from the beam extensions and the only required input is a beam axis model. The shape and size of the nodes are determined through 5 parameters. If possible, the placement of the nodes on the printing bed is optimized. For the case that two nodes would collide or if they were too close to each other, special elements are created. All data that is required for the construction process is provided through the algorithm.

During the development of the beams, the focus was placed on the length adjustment. The beams are manufactured from complementary tubes and the fixing of the lengths is achieved through 3-D printable clamps or the deformation of the tube geometry. Models of a lamellar dome, a grid shell, and several space frames were created in order to demonstrate the practical application of the Rapid Modeling algorithm in a modelling process.



# Inhaltsverzeichnis

	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>3</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>5</b>
	<b>Kurzfassung</b>	<b>7</b>
	<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>I</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
	1.1. Die Aufgabenstellung	14
<b>II</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>15</b>
	2.1. Struktur- und Tragwerksmodelle	16
	2.2. Additive Fertigung	19
	2.2.1. 3-D-Druckverfahren	22
	2.2.2. Materialextrusion, Fused Deposition Modelling - MEX/FDM	23
	2.2.3. Vom digitalen Modell zum Druck	25
	2.2.4. Fertigungsbedingte Anforderungen	27
	2.3. Baukastensysteme	28
	2.3.1. Tragwerksmodellbaukasten Mola	28
	2.3.2. Spielzeugbaukästen	29
	2.3.3. Bausysteme	31

<b>III Rapid Modelling</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Voraussetzungen und Anforderungen</b>	<b>35</b>
<b>3.2. Ansatz 1: Das Baukastensystem</b>	<b>37</b>
3.2.1. Knoten	37
3.2.1.1. Bajonettknoten	39
3.2.1.2. Klemmschalen	42
3.2.1.3. Scharnierknoten	48
3.2.2. Stäbe	53
3.2.3. Fazit Modellbaukasten	58
<b>3.3. Ansatz 2: Digitaler Modellbaukasten</b>	<b>60</b>
3.3.1. Der Rapid Modelling Algorithmus	67
3.3.1.1. Erstellung des Linienmodells und Einstellung der Parameter	68
3.3.1.2. Erstellung der Knoten	69
3.3.1.3. Orientierung der Knoten	84
3.3.1.4. Erstellung von Sonderelementen	96
3.3.1.5. Outputs	99
3.3.2. Modellbau	102
3.3.3. Fazit Rapid Modelling	110
<b>VI Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>111</b>
<b>Literaturnachweis</b>	<b>113</b>
<b>Bildverzeichnis</b>	<b>115</b>
<b>Anhang</b>	<b>117</b>
A1 - Rapid Modelling Algorithmus digital	
A2 - Rapid Modelling Algorithmus gedruckt	
A3 - Flow Chart - Erstellung der Knoten	
A4 - Flow Chart - Orientierung der Knoten	
A5 - Flow Chart - Erstellung von Sonderknoten und Outputs	

# I Einleitung

Der architektonische Entwurf ist ein komplexer Prozess, in welchem der Architekt unter Berücksichtigung vieler Anforderungen das Ziel verfolgt, Räume für bestimmte Nutzungen zu schaffen. Viele Faktoren, wie etwa Standort, Umgebung oder Materialverfügbarkeit beeinflussen den Entwurf. Um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen, erstellt der Architekt zahlreiche Unterlagen und verwendet Hilfsmittel, die ihn dabei unterstützen, seine Ideen möglichst gut zu kommunizieren. Um mithilfe von Plänen und Zeichnungen einen Entwurf zu verstehen, bedarf es an fachspezifischen Voraussetzungen sowie eines guten räumlichen Vorstellungsvermögens. Das Architekturmodell ist die erste räumlich physische Darstellung des Entwurfs. Wie ein Modell hergestellt wird, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab: Art des Modells, Entwurfsphase, Zielgruppe, die verfügbare Infrastruktur und die Qualifikation der ModellbauerIn. Die Herstellung von Struktur- und Tragwerksmodellen ist besonders komplex, da die Modelle aus sehr vielen und oft filigranen Elementen bestehen.

Struktur- und Tragwerksmodelle stellen eine Kategorie von Architekturmodellen dar, die aus vielen ähnlichen oder gleichen Elementen die Gesamtstruktur ergeben. Gestaltungselemente werden nicht dargestellt und der Fokus liegt auf der präzisen Wiedergabe des Tragwerks. Obwohl diese Kategorie der Modelle sehr gut für den systematischen Modellbau geeignet ist, gibt es fast keine Systeme, die einen schnellen Modellbau ermöglichen. Stattdessen werden die Modelle in Handarbeit oder mithilfe von CNC-Maschinen wie Lasercuttern oder 3-D-Druckern individuell hergestellt. Dies setzt voraus, dass der Zugang zu diesen Geräten gewährleistet ist und die Daten richtig vorbereitet werden, da eine nachträgliche Veränderung meist unmöglich ist. Es bedeutet auch, dass jede Optimierung des Entwurfs ein neues Modell fordert. Aus zeitlichen Gründen werden deswegen manche Modelle nicht gebaut, obwohl sie einen Mehrwert für den Entwurfsprozess bringen würden.

Die additive Fertigung hat in den letzten Jahren sehr an Bedeutung gewonnen. Dies betrifft nicht nur die industrielle Anwendung, sondern vor allem wegen der Erschwinglichkeit der Geräte und der einfachen Bedienung auch den Hobby-Bereich. Aus diesem Grund ist der Zugang zu einem 3-D-Drucker viel einfacher geworden. Es gibt die Möglichkeit, ein Gerät zu erwerben oder eine freie Werkstatt, ein sogenanntes fabLab (engl. fabrication laboratory, de: Fabrikationslabor) zu nutzen.

Jedoch hat diese Technologie auch Limitierungen, sodass nicht jede Geometrie direkt gedruckt werden kann. Im Zuge dieser Arbeit sollen die Vorzüge eines systematischen Ansatzes mit den Vorteilen des 3-D-Druckes optimal genutzt werden.

## **1.1. Die Aufgabenstellung**

Diese Arbeit beschäftigt sich damit, einen Baukasten zu entwickeln, mit dem der Struktur- und Tragwerksmodellbauprozess vereinfacht und beschleunigt werden kann. Die Herstellung der Elemente soll, soweit es sinnvoll ist, mit einem FDM-Drucker (Fused Deposition Modelling) erfolgen und möglichst viele Elemente des Baukastens sollen wiederverwertbar sein. Auf diese Weise werden Arbeiten am Modell und nachträgliche Veränderungen der Tragstruktur ermöglicht. Hierbei kann es sich um einen haptischen Baukasten, aber auch um einen optimierten Prozess für den Modellbau handeln. Die Ziele sind, die Modellbauzeit zu verkürzen, Material einzusparen und eine hohe Genauigkeit des Modells zu ermöglichen. Somit soll das haptische Tragwerksmodell als Entwurfsmedium verbessert werden und den Entwurfsprozess besser und auch länger begleiten.

In Kapitel II werden für diese Arbeit relevante Begriffsbestimmungen, Grundlagen und der Stand der Technik festgelegt. Hier werden bestehende (Modell-) Bausysteme recherchiert und dienen als Grundlage für die Entwicklung eines neuen 3-D-druckbaren Systems. Anschließend werden alle relevanten Punkte der additiven Fertigung mit Fokus auf die Fused-Deposition-Modelling-Technologie bearbeitet. Dies schließt fertigungsbedingte Anforderungen an die Konstruktion ein, die für den Entwicklungsprozess von großer Bedeutung sind.

Der Entwurfsprozess wird in Kapitel III näher beschrieben. Einleitend werden Voraussetzungen und Anforderungen an die Konstruktion und an den zu entwickelnden Baukasten gesetzt. Hier wird eine genaue Abgrenzung der Tragwerkselemente, die mit dem neuen System nachgebildet werden sollen, festgehalten. Fortlaufend werden zwei Lösungsansätze erläutert, die während der Arbeit verfolgt wurden. Der erste Ansatz war, einen 3-D-druckbaren Baukasten zu entwickeln, der von jedem Benutzer vor der Herstellung so individualisierbar ist, dass er den persönlichen Anforderungen entspricht. Hierbei wird die Entwicklung der Knoten und Stäbe getrennt betrachtet. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird beschrieben, wie mithilfe von Rhino und Grasshopper ein Algorithmus entstanden ist, der den Tragwerksmodellbau vereinfacht und beschleunigt. Die Funktionsweise des Algorithmus und der Modellbauprozess werden anhand ausgewählter Modelle beschrieben.

Abschließend werden in Kapitel IV die Erkenntnisse festgehalten und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen der Systeme gegeben.

## II Grundlagen und Stand der Technik

Der Begriff 'Modello' (Lat. Modulus - Maß, Maßstab), als Begriff für ein proportional verkleinertes Modell eines Bauwerks, scheint erstmals in den Mailänder Dombauakten kurz vor 1400 auf<sup>1</sup>. Gebäudenachbildungen konnten zwar bereits in der Antike gefunden werden, wie das Terrakotta Hausmodell aus dem Heraion von Argos aus dem ersten Viertel des 7. Jahrhunderts vor Christus (Abb. 2.1.), allerdings kann nicht nachgewiesen werden, dass dieses Modell auch eine tatsächliche Nachbildung eines bestehenden Bauwerks darstellt oder welchem Zweck es gedient hat<sup>2</sup>. Trotzdem können dank solcher Modelle einige, für die Architekturgeschichte wichtige Daten gesammelt werden, wie beispielsweise die Formensprache der damaligen Zeit. Auch andere Gegenstände können solche architekturgeschichtlichen Funktionen übernehmen, wie Reliquiare, die der Aufbewahrung von Reliquien dienten und Kirchen oder Kapellen nachempfunden waren (Abb. 2.2.). Architekturmodelle, die als unterstützende Medien des Entwurfsprozesses dienten, sind in etwa in der Renaissance entstanden. Zu dieser Zeit kam es zu einem Aufschwung in der Architektur und viele neue Bauten, die damals errichtet wurden, dienten unter anderem der Zurschaustellung des Wohlstandes. Damit auch tatsächlich die besten und innovativsten Entwürfe ausgesucht werden konnten, kamen wettbewerbsähnliche Verfahren zum Einsatz, an denen nicht nur Baumeister, sondern auch Wissenschaftler, Goldschmiede und Bildhauer teilnahmen. In diesem Zuge entstanden auch die ersten Architekturmodelle, die der Veranschaulichung des Entwurfs dienten. Ein sehr berühmtes Beispiel dieser Zeit ist das um 1420 entstandene Modell der Kuppel für den Florentiner Dom, von Filippo Brunelleschi und Lorenzo Ghiberti<sup>3</sup> (Abb. 2.3.).

Es wurde bereits angedeutet, dass Architekturmodelle nicht nur vor der Errichtung eines Gebäudes erstellt wurden, um den Planungsprozess zu unterstützen. In der Vergangenheit haben sie ganz unterschiedlichen Zwecken gedient, etwa um die Planung der Stadtverteidigung zu erleichtern, um Gebäude, die vor dem Abriss standen vor Vergessenheit zu bewahren, um Betriebe und deren Abläufe zu optimieren oder für Lehrzwecke, um nur einige Beispiele zu nennen. So können Architekturmodelle unter der Berücksichtigung verschiedener Kriterien wie Motiv (Gebäude-,

---

II-1 Vgl. Lepik 2011  
II-2 Vgl. Stark 2018  
II-3 Vgl. Lepik 2011



Abb. 2.1.  
Hausmodell von Argos,  
700/676 v. Chr., Terrakotta



Abb. 2.2.  
Anastasisreliquiar,  
Antiochien, Byzanz, 969-970



Abb. 2.3.  
Dom von Florenz von Filippo  
Brunelleschi und Lorenzo Ghiberti,  
dreiteiliges Holzmodell, entstanden  
um 1420

Stadtmodell), Verwendungszweck (Erinnerungsmodell, Arbeitsmodell) oder Entwurfsphase (Entwurfs-, Präsentationsmodell) auf unterschiedliche Weisen kategorisiert werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Struktur- und Tragwerksmodellen, weshalb diese im nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben werden.

## 2.1. Struktur- und Tragwerksmodelle

Ein Tragwerksmodell stellt nur das Tragwerk eines Gebäudes dar. Elemente, die keine tragende Funktion übernehmen, werden dabei außer Acht gelassen. Modelle, bei denen nur die Achsen der linearen Elemente übernommen werden, ohne die tatsächlichen Dimensionen und Querschnitte dieser Elemente zu berücksichtigen, werden im Rahmen dieser Arbeit als Strukturmodelle bezeichnet. Strukturmodelle müssen daher nicht zwingend die tatsächliche Form des Tragwerks wiedergeben, es kann sich auch um eine strukturelle Nachbildung handeln. In den meisten Fällen betrifft dies Systeme, die aus linearen Elementen wie Stützen, Seilen oder Trägern zu komplexeren Systemen wie Fachwerken, Netzkuppeln oder Gitterschalen zusammengesetzt sind.

Ein prominentes Beispiel eines Strukturmodells ist das Ende des 19., Anfang des 20. Jahrhunderts entstandene Hängemodell für die Sagrada Familia von Antoni Gaudi (Abb. 2.4. und Abb. 2.5.). Hängemodelle sind an Ketten oder Schnüren aufgehängte Tragwerksmodelle, die am Prinzip der Umkehrung der Kettenlinie beruhen. Die Kettenlinie (Katenoide) nimmt eine stabile Form an, wenn nur Zugkräfte auf sie wirken. Da die Ketten nicht biegesteif sind, können auch keine Biegemomente entstehen. Durch die Umkehrung solcher Modelle entstehen Strukturen, die ausschließlich aus druckbeanspruchten Stützlinsen bestehen. In diesem Fall diente das Strukturmodell nicht nur als unterstützendes Entwurfsmedium, es war das Entwurfsmedium. Ein weiterer Architekt, der sich mit dem Thema der Tragwerksoptimierung intensiv beschäftigt hat, ist Frei Otto (Abb. 2.6.). In seinem





Abb. 2.4.  
Original-Hängemodell der Sagrada Familia von  
Antoni Gaudi



Abb. 2.5.  
Rekonstruktion des Modells der Sagrada Familia



Abb. 2.6.  
Hängemodell der Multihalle in Mannheim von Otto Frei, M 1:98,5, 1973

Buch 'Denken in Modellen' wurden seine Modelle auf über 400 Seiten fotografisch festgehalten<sup>4</sup>.

Der Modellbauprozess für ein Struktur- oder Tragwerksmodell wird von einigen Faktoren beeinflusst, wobei die Komplexität des Tragwerks im Vordergrund steht. So kann eine Stockwerksrahmenkonstruktion eines kleinen Bürogebäudes im Gegensatz zu einer Gitterschale, die über ein Fußballstadion gespannt ist, vergleichsweise schnell gebaut werden. Die verwendeten Werkstoffe legen über deren Festigkeit und Verarbeitbarkeit die möglichen Werkzeuge fest, die wiederum die erzielbare Genauigkeit und somit den erreichbaren Maßstab bestimmen. Somit kann der Maßstab ausschlaggebend sein, ob ein Modell überhaupt von Hand hergestellt werden kann. Die verwendeten Werkstoffe und Werkzeuge stellen jedoch auch Anforderungen an das Wissen und die notwendige Infrastruktur der ModellbauerInnen. So können beispielsweise Holzprofile leicht zugeschnitten und verklebt werden, der Zuschnitt von Metallprofilen kann jedoch präziser erfolgen und eine Schweißverbindung kann größere Belastungen aufnehmen.

<sup>4</sup>II-4 Frei u.a. 2016

Wie bereits erwähnt, nimmt man beim manuellen Modellbau immer eine Ungenauigkeit in Kauf. Um diese Ungenauigkeit und im gleichen Zug auch den Arbeitsaufwand zu senken, kommen CNC-Maschinen wie Lasercutter oder 3-D-Drucker zum Einsatz. Lasercutter ermöglichen präzise Plattenzuschnitte, die nachträglich zu einer Gesamtkonstruktion verbunden werden. Flächige Tragwerke lassen sich so rasch bauen, bei gekrümmten Tragwerken ist dieser Prozess komplexer. Es gibt mehrere Herangehensweisen, wie Konstruktionen für die Herstellung mit dem Lasercutter optimiert werden können, jedoch steigt der Arbeitsaufwand erheblich. 3-D-Drucker hingegen können beliebige Formen drucken. Aus diesem Grund bietet sich der 3-D-Druck für die Herstellung von Tragwerksmodellen an. Es wurde beobachtet, dass 3-D-gedruckte Architekturmodelle fast ausschließlich als Präsentationsmodelle erstellt werden. Geht man einen Schritt zurück in Richtung Arbeitsmodell, das man anschließend noch verändern kann, eröffnen sich Optionen, um den Modellbauprozess mithilfe von 3-D-Druckern zu beschleunigen und zu vereinfachen. In Kapitel 2.2.1. wird auf die verschiedenen 3-D-Drucktechnologien genauer eingegangen.

Strukturmodelle haben die Eigenschaft, dass sie aus vielen gleichen oder ähnlichen Elementen zusammengesetzt sind, weswegen sich die Option eines Baukastensystems gut für diese Art der Modelle anbietet. Tragwerksmodellbaukästen wurden bereits als didaktische Hilfsmittel für den Lehrbetrieb entwickelt. Im Laufe der Architekturausbildung sind in den Lehrunterlagen immer wieder Bildstrecken von Modellen gesichtet worden, die mithilfe federförmiger Stäbe und kugel- oder würfelförmiger Knoten zusammengebaut waren. Wer sie entwickelt hat und welche Möglichkeiten sie genau bieten, konnte bis auf einen neuen Modellbaukasten, der im Anschluss näher beschrieben wird, nicht in Erfahrung gebracht werden. Die Hauptaufgabe dieser Modellbaukästen war jedoch klar aus den Bildern zu erkennen - sie sollen die Verformung des Tragwerks unter Belastung sichtbar machen, weswegen die Form der verschiedenen Elemente auch dementsprechend konstruiert wurde. Ein Baukasten, der das Tragwerk zumindest ansatzweise formgetreu darstellt, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden. Dennoch kann das Prinzip des Modellbaukastens als realisierbare und entwicklungsfähige Idee übernommen werden. Um einen Baukasten entwickeln zu können, werden in Abschnitt 2.3. bestehende (Modell-)Bausysteme genauer betrachtet und deren Einschränkungen und Möglichkeiten analysiert.

## 2.2. Additive Fertigung

„Additive Fertigung ist der Allgemeinbegriff für jene Technologien, mit denen, basierend auf einer geometrischen Darstellung, Gegenstände durch die sukzessive Zugabe von Werkstoffen erzeugt werden.“<sup>5</sup>

Begriffe, die bei additiven Fertigungstechnologien verwendet werden, sind durch die ÖNORM 52900 definiert. In dieser Norm wird der Begriff '3-D-Druck' als Synonym für additive Fertigung festgelegt, jedoch mit folgender Anmerkung: „Häufig in nichttechnischem Kontext verwendeter Begriff [...] insbesondere mit Maschinen in Verbindung gebracht, die niedrige Preise und/oder Leistungsfähigkeit bieten“<sup>6</sup>.

Die in additiven Fertigungsverfahren (engl.: additive manufacturing; kurz: AM) entstehenden Werkstücke werden durch schichtweises Auftragen des Rohmaterials und anschließendes Verkleben, Verschweißen, Verschmelzen oder gezieltes Aushärten aufgebaut. Es entsteht sehr wenig bis gar kein unbrauchbares Restmaterial, da das Baumaterial nur gezielt aufgetragen oder gebunden wird. Bleibt Pulver- oder Flüssigwerkstoff übrig, kann dieser im nächsten Prozess wiederverwendet werden. Es werden keine Negativformen benötigt, was den Herstellungsprozess zusätzlich beschleunigt.

Im Gegensatz zu additiven Fertigungsverfahren stehen subtraktive Fertigungsverfahren (Fräsen, Drehen, Schleifen, Erodieren), bei welchen das Werkstück durch Abtragen des Materials geformt wird. Hier entsteht vergleichsweise viel Restmaterial, welches ohne zusätzliche Verarbeitung (z.B. Einschmelzen) nicht wiederverwendbar ist.

Additive Fertigung ermöglicht die Herstellung von Objekten, die in anderen Verfahren gar nicht oder nur in Kombination verschiedener Prozesse und in mehreren Prozessstufen möglich sind. Ein solches Beispiel ist die Herstellung von Hohlkörpern (siehe Abb. 2.7.), womit große Gewichts- und Materialeinsparungen möglich sind. Auch Formen, die früher nicht herstellbar waren, sind durch additive Fertigung möglich (Abb. 2.8.). Dank dieser Eigenschaften können herzustellende Konstruktionen optimiert werden um Material und Gewicht einzusparen.

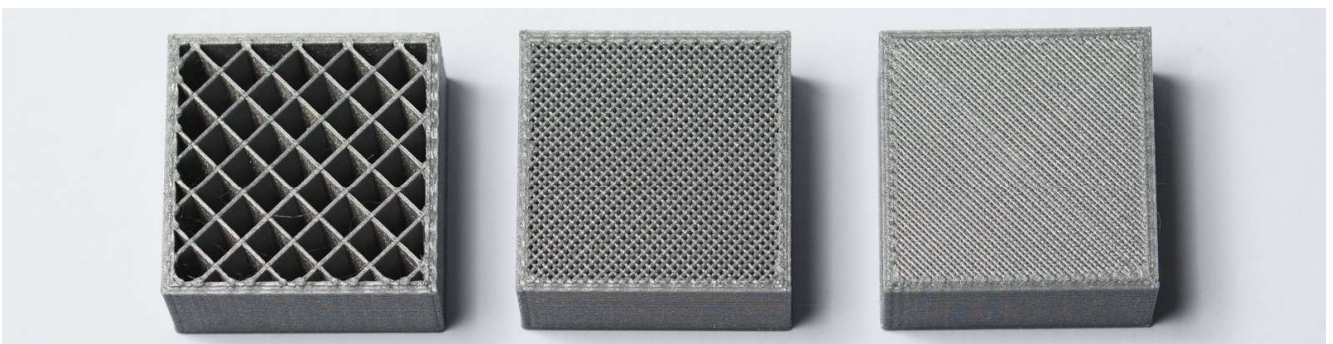


Abb. 2.7.

Verschiedene Füllgrade 3-D-gedruckter Werkstücke. Links - 20%, mitte - 50%, rechts - 75%

II-5 ÖNORM 52900: 2017  
II-6 Ebda.



Abb. 2.8.  
Lampenschirm im SLS- Verfahren hergestellt

Mittlerweile gibt es viele verschiedene 3-D-Drucktechnologien, die unterschiedliche Möglichkeiten bieten, mit denen unterschiedliche Materialien verarbeitet werden und die bestimmte Vor- und Nachteile mit sich bringen. So ist es möglich, nahezu alle Materialien zu verarbeiten, wie z.B. Metalle, Kunststoffe, Keramik, Holz, Karbon oder Sand. Die Ausgangsform des Materials ist je nach Verfahren flüssig, pulverförmig oder fest. Die Fügeprinzipien unterteilen sich in:

- Verkleben
- Verschweißen
- Verschmelzen
- Aushärten

Die Anwendungsgebiete der additiven Fertigung sind breit gefächert. In Abb. 2.9. werden sie nach der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften in vier Kategorien unterteilt.



Abb. 2.9.  
Begriffsgebäude der additiven Fertigung

## Exkurs: Additive Fertigung in der Luftfahrt

Durch die Gewichtseinsparung können in der Luftfahrt Kraftstoffverbrauch und Betriebskosten gesenkt werden\*. Boeing hat mit dem Programm zur Entwicklung des 702SP Satelliten die Nutzung additiver Fertigungstechnologien in der Luftfahrttechnik erstmals getestet und erste Anwendungsmöglichkeiten und Vorteile erkannt. Heutzutage wird additive Fertigung als etabliertes Herstellungsverfahren in der Luftfahrttechnik eingesetzt. Auf diese Weise werden bereits über 1000 Teile für verschiedene Flugprogramme hergestellt.\*\*

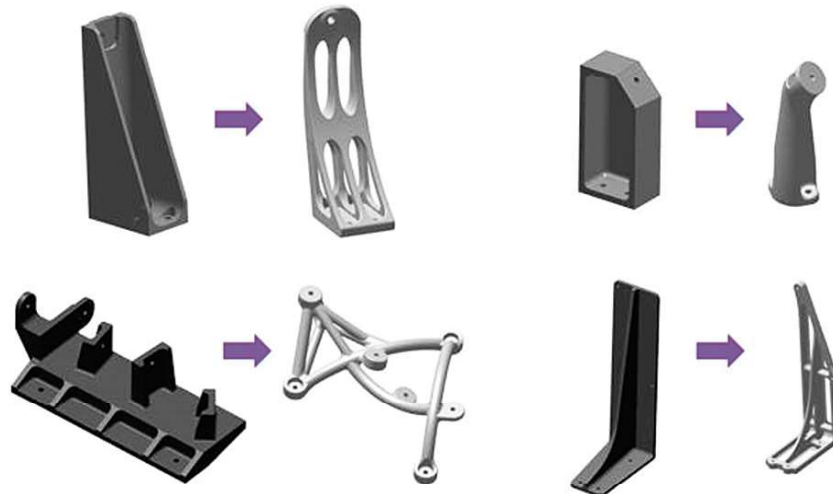


Abb. 2.10..  
Additive Fertigung bei Boeing

\* David: Erstflug. Boeing 777X mit 3D-gedruckten Teilen. in: <https://3druck.com/case-studies/erstflug-boeing-777x-mit-3d-gedruckten-teilen-4187786/>, 02.07.2020

\*\* Aston, Richard: 3D Printing done right, in: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/nov2017/feature-thought-leadership-3d-printing.page>, 14.01.2019

## 2.2.1. 3-D-Druckverfahren

Die Entwicklung des 3-D-Drucks begann bereits in den 1980ern. Den Durchbruch schaffte Charles Hull mit seinem Patent für die Stereolithografie, welches 1984 angemeldet wurde<sup>7</sup>. Die Bewilligung dieses Patents bildete die Grundlage zur Gründung der Firma 3D Systems im Jahr 1986, welche die erste 3-D-Druck Firma der Welt<sup>8</sup> war und bis heute eine führende Rolle in der additiven Fertigung inne hat. Bereits 1986 wurde die nächste Technologie zum Patent angemeldet<sup>9</sup> – Carl R. Deckard meldet eine Methode und ein Gerät zur Herstellung von Objekten mithilfe von Lasersintern an, 1989 meldet S. Scott Crump eine Methode zur Herstellung dreidimensionaler Objekte im Fused-Deposition-Modelling-Verfahren<sup>10</sup>.

Diese und weitere 3-D-Technologien sind über 30 Jahre alt, gewannen aber erst vor ca. 10 Jahren an Bedeutung, als 2009<sup>11</sup> Scott Crumps Patentschutz ablief. Dies rückte die additive Fertigung in ein neues Licht. Die mediale Bekanntheit stieg rasch, Forschung wird an technischen Universitäten, in der Medizin sowie in der Automobilindustrie betrieben. Durch die immer größere Anzahl an Unternehmen, die in der 3-D-Druckbranche tätig wurden, stieg die Konkurrenz und die Anschaffungskosten sanken. Bald wurde der 3-D-Drucker auch für Hobbywerkstätten erschwinglich und die Popularität dieser Verfahren stieg weiterhin an. Diesen Erfolg haben auch Open-Source-Plattformen wie RepRap<sup>12</sup> oder Thingiverse<sup>13</sup> maßgeblich beeinflusst, da Informationen, Bauanleitungen und sogar fertig konstruierte Objekte als druckbare Dateien kostenfrei zur Verfügung gestellt wurden.

Die Grundlagen und die Terminologie additiver Fertigungsverfahren werden in der ÖNORM 52900<sup>14</sup> festgelegt. Laut dieser Norm werden die verschiedenen Fertigungsverfahren in folgende Kategorien eingeteilt (Skizzen dazu in Abb. 2.11.):

- Binder Jetting (BJT) – Freistrah-Bindemittelauftrag
- Directed Energy Deposition (DED) – Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung
- Material Extrusion (MEX) – Materialextrusion (auch Fused Deposition Modelling / FDM)
- Material Jetting (MJT) – Freistrah-Bindemittelauftrag
- Powder Bed Fusion (PBF) – Pulverbettbasiertes Schmelzen
- Sheet Lamination (SHL) – Schichtlaminierung
- Vat Photopolymerisation (VPP) – Badbasierte Photopolymerisation

Vergleicht man die verschiedenen Verfahren in Bezug auf Verfügbarkeit, Anschaffungskosten, laufende Kosten und Bedienfreundlichkeit, sticht ein Verfahren besonders heraus - Materialextrusion, auch bekannt als Fused Deposition Modelling (FDM). Aus diesen Gründen wurde entschieden, das neue Modellbausystem für den FDM-Prozess zu optimieren. Hierfür wurde das Herstellungsverfahren, die einzelnen Schritte von der Modellierung bis zum Druck und die fertigungsbedingten Anforderungen nochmals genauer analysiert und auf den folgenden Seiten festgehalten.

II-7 Patent: Charles W. Hull 1984

II-8 3D Systems: o.A.: About, online unter: <https://www.3dsystems.com/our-story>, 11.11.2018

II-9 Patent: Carl R. Deckard 1986

II-10 Patent: S. Scott Crump 1989

II-11 Ebda.

II-12 [www.reprap.org](http://www.reprap.org), 30.06.2020

II-13 [thingiverse.com](http://thingiverse.com)

II-14 ÖNORM 52900

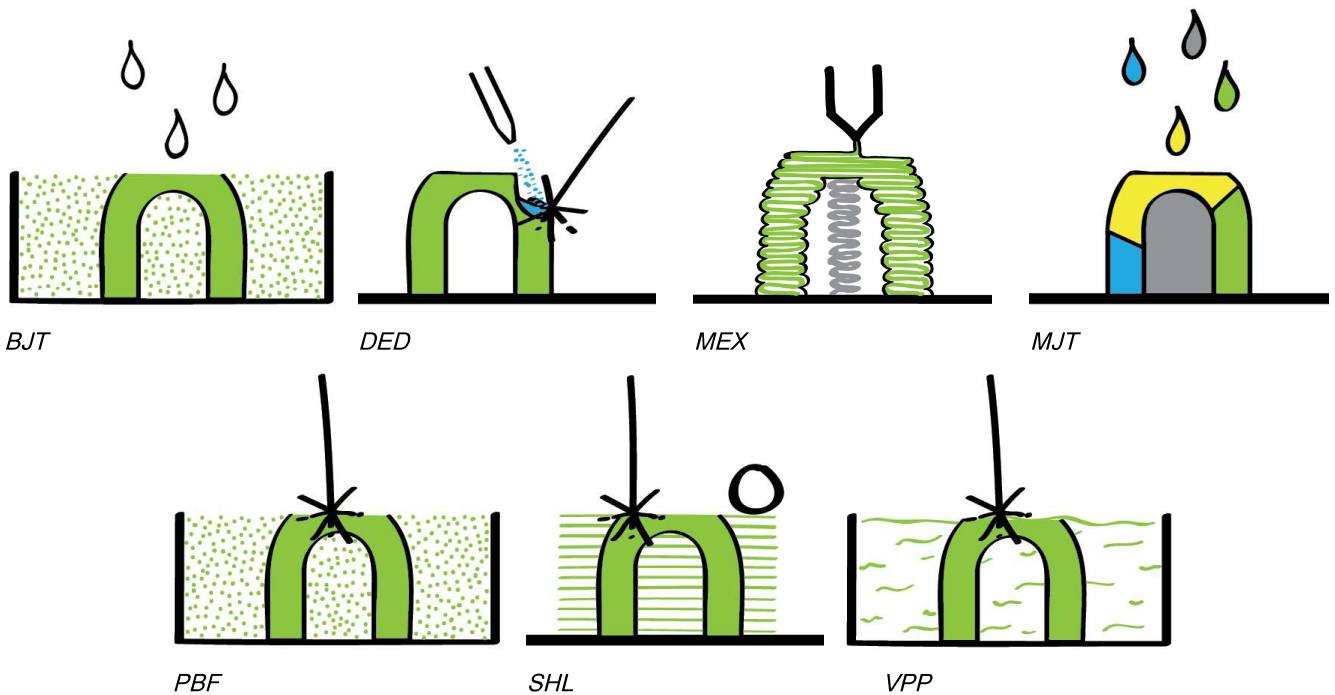


Abb 2.11.  
Skizzen der Fertigungsprinzipien additiver Fertigungstechnologien

## 2.2.2. Materialextrusion, Fused Deposition Modelling - MEX/FDM

**Werkstoffe:** filamentförmig: Kunststoffe (z.B. PLA, ABS, PETG, Nylon, TPE, PC), Verbundwerkstoffe mit Karbon, Metall, Holz, Nylon, Lehm, Keramik, Beton<sup>15</sup>

**Fügeprinzip:** Schmelzkleben<sup>16</sup>

„Additiver Fertigungs-Prozess, in dem Werkstoffe gezielt mit einer Düse oder Öffnung dosiert werden“<sup>17</sup>

Beim Schmelzkleben wird der Werkstoff geschmolzen und mithilfe einer Düse gezielt auf das Werkstück aufgetragen. Die Bandbreite der Materialien, die so verarbeitet werden können, wird immer größer; die einzige Anforderung liegt darin, dass das Material während des Auftrags durch die Düse extrudiert werden kann und sich im Anschluss möglichst schnell verfestigt. Auf diese Weise können nicht nur verschiedene Kunststoffe und Verbundstoffe gedruckt werden, sondern auch außergewöhnliche Materialien, wie Beton oder Schokolade. 3-D-Drucker, die auf Basis dieser Technologie arbeiten, sind in Hobby-Werkstätten und Makerspaces besonders verbreitet, da die Maschinen sowie die Materialien kostengünstig und die Handhabung und Instandhaltung relativ einfach sind.

Die Nachteile des FDM-Verfahrens liegen einerseits in der Druckauflösung und andererseits in der Anisotropie der Festigkeit des gedruckten Werkstückes. Das zu druckende Material beeinflusst den minimalen Düsendurchmesser und somit auch die Druckauflösung, prinzipiell sind aber für gängige

II-15 [www.filamentworld.de](http://www.filamentworld.de), 30.06.2020

II-16 Vgl. acatech, 2016

II-17 ÖNORM 52900

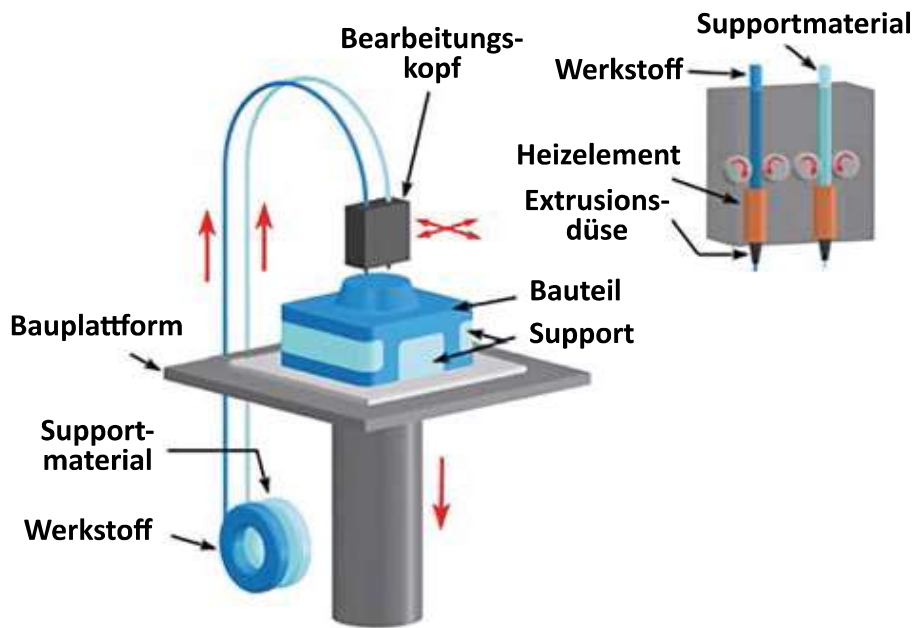


Abb. 2.12.  
Fused Deposition Modelling [CustomPartNet]

Materialien, wie PLA oder ABS Düsendurchmesser ab 0,1 mm erhältlich. Mit einer solchen Düse ist es möglich, eine XY-Auflösung (horizontal) von 0,2 mm und eine Z-Auflösung (vertikal) von ca. 0,05 mm problemlos zu erreichen. Diese Auflösung reicht im Normalfall aus. Die Auflösung kann allerdings noch deutlich höher sein, so kann man mit dem Form 2 SLA-Drucker der Firma Formlabs<sup>18</sup> Werkstücke mit einer Auflösung von 25 Mikron herstellen. Die Oberflächen können jedoch auf verschiedene Arten bearbeitet werden, so können sie durch Sandstrahlen, Polieren oder thermische Behandlung geglättet werden. Auf diese Weise ist man in der Lage, eine glattere Oberfläche des Werkstücks zu erreichen.

Ein weiterer Nachteil FDM-gedruckter Werkstücke ist deren Festigkeit in Z-Richtung. Je nach Material und Drucktemperatur schwankt diese im Vergleich zur Festigkeit in XY-Richtung erheblich. Aber auch hier gibt es Fortschritte, so erstellt der Metal X Drucker der Firma Markforged<sup>19</sup> in Kombination mit einer Waschstation und einem Sinterofen Werkstücke aus Metall, die in alle Druckrichtungen hochbelastbar sind.

FDM-basierte Verfahren haben in verschiedenen Bereichen ihre Anwendung gefunden. Beim Contour Crafting<sup>20</sup> wird ein ganzes Gebäude aus flüssigem Beton hergestellt. BeeHex<sup>21</sup>, ein Startup aus Silicon Valley hat einen Roboter entwickelt, der innerhalb von 6 Minuten eine Pizza '3-D-Drucken' und backen kann. Das Marijn Roovers Food Design Studio hat bei der Forschung über 3-D-Druck in Michelin Restaurants mitgewirkt und die berühmte Schoko-Weltkugel<sup>22</sup> designt und produziert.

Druckverfahren, die auf der FDM-Technologie basieren, werden immer vielfältiger und die Auswahl an Werkstoffen, die damit verarbeitet werden können, steigt auch stetig.

II-18 <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>, 26.07.2020

II-19 [www.mark3d.com/de/metalx/](http://www.mark3d.com/de/metalx/), 30.06.2020

II-20 Vgl. Untersweg, Thomas: Contour Crafting - Häuser aus dem Drucker, Lehrveranstaltung Digitale Fabrikation, TU Graz, [https://iam.tugraz.at/dfab/w10/blog/wp-content/uploads/2010/11/contour-crafting\\_untersweg.pdf](https://iam.tugraz.at/dfab/w10/blog/wp-content/uploads/2010/11/contour-crafting_untersweg.pdf), 30.06.2020

II-21 [www.beehex.com](http://www.beehex.com), 30.06.2020

II-22 [www.mrfd.nl/en/nxt-iv/](http://www.mrfd.nl/en/nxt-iv/), 30.06.2020



### 2.2.3. Vom digitalen Modell zum Druck

3-D-Druck ist ein digitales Fertigungsverfahren, bei welchem ein digitales 3-D-Modell als Grundlage zur Steuerung von CNC-Maschinen dient. Wie dieser Prozess genau abläuft, wird im Anschluss beschrieben. Als Grundlage für die anschließende Beschreibung wurde ein Prusa i3 Drucker mit einem Extruder und die Software Repetier-Host unter Verwendung der Slicer-Software 'Slic3r' verwendet. Grundsätzlich unterscheidet sich der Prozess nicht maßgeblich bei der Verwendung anderer Drucker oder Softwares.

Die Geometrie des zu druckenden Objektes wird mittels CAD erzeugt oder von einem 3-D-Scanner eingelesen und nachbearbeitet. Das Modell muss 'wasserdicht' sein - dies bedeutet, dass sich keine Öffnungen am Modell befinden, in die man 'Wasser eingießen' könnte. (Abb. 2.13.)

Die fertige Geometrie wird in ein druckbares Format umgewandelt, beispielsweise \*.STL (standard triangle language) oder \*.OBJ (Object). Wie man bereits aus dem Namen schließen kann, werden bei \*.STL Dateien die Oberflächen des Modells in Dreiecke konvertiert. Durch das Speichern des Objektes in ein .STL Format entsteht somit eine Abweichung vom Originalmodell. Der Grad der Abweichung kann jedoch so gering eingestellt werden, dass er für den Druck mit einem FDM-Drucker irrelevant wird. Je kleiner die Dreiecke sind, desto größer wird auch die Datei. Informationen über Material, Farbe, Krümmungsgrade oder andere Attribute werden nicht dargestellt. Die Präzision neuer 3-D-Drucker ist bereits im Mikrometerbereich angekommen, was zur Folge hat, dass andere Dateiformate .STL-Dateien ablösen. Eines davon ist das .OBJ-Format, bei dem NURBS (non-uniform rational B-splines) zur Darstellung der Geometrien zur Verwendung kommen. Dies ermöglicht eine exakte Abbildung des Modells bei gleichbleibender Dateigröße. Zusätzlich werden in diesem Format auch Informationen über Farbe oder Struktur gespeichert, wodurch mehrfarbige Drucke oder Drucke aus verschiedenen Materialien ermöglicht werden. (Abb. 2.14.)

Die Geometrie wird nun in eine Slicer-Software (engl: to slice - schneiden) importiert, mithilfe welcher die Geometrie

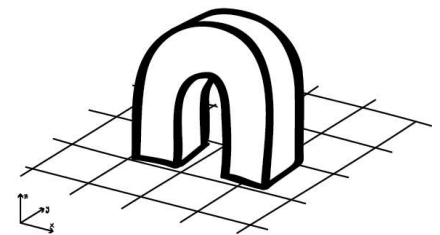


Abb. 2.13.  
Erstellung der Geometrie in einem CAD Programm

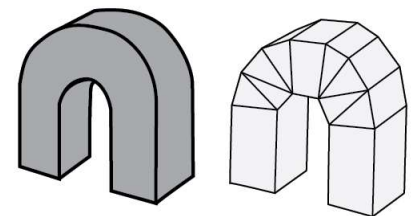


Abb. 2.14.  
Exportieren in \*.STL, \*.OBJ oder ein anderes Format

in konkrete Maschinenbefehle umgewandelt wird. Sie 'schneidet' das Modell in horizontale Schichten (Layer) und erstellt Pfade (Paths) zur Steuerung des Druckkopfs. Bevor jedoch die Geometrie konvertiert werden kann, gibt es einige Punkte, die beachtet werden müssen. An erster Stelle steht die Orientierung des Modells auf dem Druckbett, bzw. im Druckraum. Insbesondere bei anisotropen Drucktechnologien, wie FDM es ist, beeinflusst die Druckorientierung die Festigkeit des Werkstücks. Bei einfachen Geometrien ist dies kein Problem, bei komplexen Geometrien muss man oft einen Kompromiss eingehen, da es manchmal unmöglich ist, die ideale Orientierung zu finden. Druckzeit und der Bedarf an Stützstrukturen können durch gute Orientierung reduziert werden. (Abb. 2.15.)

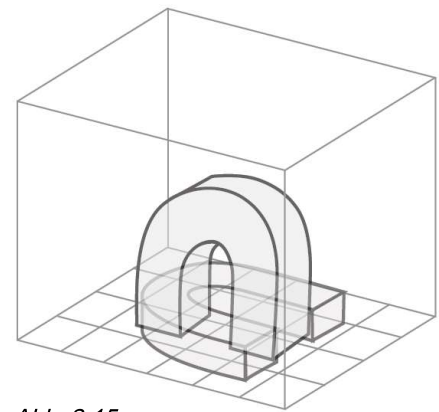


Abb. 2.15.  
Orientierung im Druckraum anpassen

Anschließend werden bei Bedarf Stützstrukturen generiert. Je nach Software können diese automatisch generiert werden oder manuell im digitalen Bauraum platziert werden. Wie bereits erwähnt, kann die Orientierung des Werkstücks im Bauraum großen Einfluss auf diesen Schritt haben. (Abb. 2.16.)

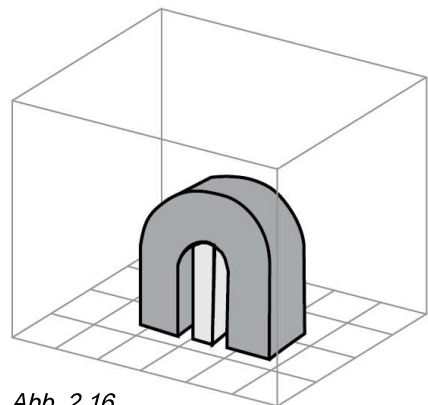


Abb. 2.16.  
Stützstrukturen generieren

Im selben Schritt werden Einstellungen über Schichtdicken, Pfadbreiten, Druckgeschwindigkeit, Drucktemperatur, den Füllgrad und alle weiteren relevanten Einstellungen getätigt. Einstellungen bezüglich Schichtdicken und Pfadbreiten beeinflussen die Auflösung und somit die Oberflächenbeschaffenheit des Drucks. Die Optimierung dieses Prozesses erfolgt immer unter Rücksichtnahme der Materialeigenschaften und der verwendeten Düse (Nozzle). Der Füllgrad hat vor allem Auswirkungen auf die Druckzeit, aber auch auf die Festigkeit und die benötigte Materialmenge. (Abb. 2.17.)

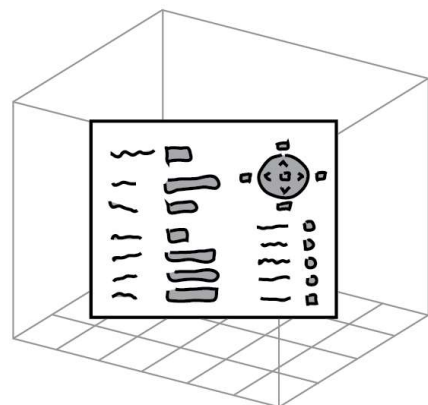


Abb. 2.17.  
Einstellungen konfigurieren

Sind alle relevanten Einstellungen getroffen, kann das Modell 'gesliced' werden. Eine zusätzliche Kontrolle der fertigen Datei ist immer ratsam, um möglichen Problemen beim Druck vorzubeugen. Dabei kann es sich um folgende Probleme handeln: zu viele kurze Pfade, Hohlräume in den Wänden des Modells durch zu schmale Pfade, entkoppelte Teile des Modells durch zu breite Pfade oder Stützmaterial an den falschen Stellen, um die häufigsten Fehler zu nennen. Das Ergebnis davon kann ein unsauberes, brüchiges, fehlerhaftes Modell sein, es kann zum Filamentstau oder zum

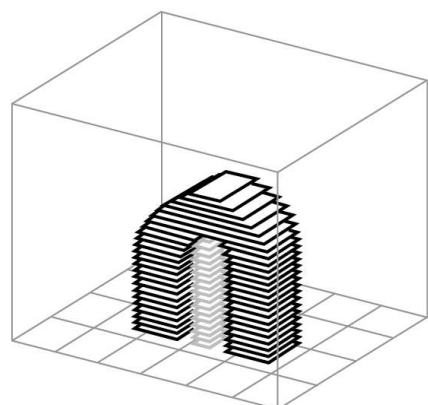


Abb. 2.18.  
Slicen

unerwünschten Filamentaustritt kommen, sodass der Druck abgebrochen werden muss. Kann dies nicht beeinflusst werden, können Drucktemperatur und Druckgeschwindigkeit geändert werden, um bessere Ergebnisse zu erzielen (Abb. 2.18.).

Die Datei ist nun bereit und kann gedruckt werden. Anschließend werden vorhandene Stützstrukturen entfernt und die Oberfläche bei Bedarf nachbearbeitet.

## **2.2.4. Fertigungsbedingte Anforderungen**

Jede 3-D-Drucktechnologie hat ihre eigenen Voraussetzungen für einen erfolgreichen Druck. Manche dieser Voraussetzungen können technologieübergreifend festgehalten werden, manche Einstellungen müssen individuell an das Modell angepasst werden und können nicht als allgemeine Voraussetzung eingestuft werden. Um die nachfolgenden Anforderungen nicht auf den spezifischen Anwendungszweck von Strukturmodellen zu beschränken, wird der Fokus auf alle technologiebedingten Anforderungen gelegt. Zwei Punkte wurden bereits in den vorangegangenen Unterkapiteln beschrieben, wie die Anisotropie der Festigkeit und die Druckauflösung.

Eine Eigenschaft darf jedoch bei FDM-Drucken nicht außer Acht gelassen werden. Überhänge und der Bedarf an Stützstrukturen müssen während der Entwicklungsphase gut durchdacht werden. Obwohl es viele Drucker gibt, die die Möglichkeit haben, lösliches oder leicht trennbares Stützmaterial zu verarbeiten, ist immer noch ein großer Teil der Drucker nur in der Lage, ein Material zu drucken. Schräge Flächen mit einer Neigung von 40° oder mehr benötigen im Regelfall keine Stützstrukturen. Bei sogenannten 'Brücken' kann eine Spannweite von ca. 8 mm überbrückt werden, bei nur minimalem Durchhängen des Filaments. Eine Wanddicke von mindestens 1 mm und 3 Pfaden bietet bei nicht zu hohen Belastungen in XY-Richtung eine akzeptable Steifigkeit. Eine Drucktoleranz von ca. 0,1-0,5 mm muss bereits während der Konstruktionsphase berücksichtigt werden (die Drucke werden um diesen Wert größer).

Bei Modellen, die nicht ohne Stützstrukturen auskommen, ist es ratsam, die Stützstrukturen möglichst auf solche zu minimieren, die einen direkten Kontakt mit dem Druckbett haben und nicht ihre untere Kontaktfläche auf dem Modell haben. In diesem Fall kann es auch vorteilhaft sein, einen Raft (eine Art Plattform) von ca. 1 mm zu erstellen. Auf diese Weise kann die gesamte Stützstruktur als eine Einheit entfernt werden.

Bei allen beschriebenen Voraussetzungen handelt es sich um Richtwerte, die aus der bisherigen Erfahrung beim Drucken mit einem Geeetech Prusa i3 und Nozzles mit 0,2 mm, 0,3 mm und 0,4 mm Durchmesser gesammelt wurden. Als Material wurde fast ausschließlich PLA mit einer Drucktemperatur von 205-210° C verwendet. Je nach Druckerhardware, -software und verwendetem Material können diese Richtwerte abweichen.

## 2.3. Baukastensysteme

Der Begriff Baukastensystem wird unter anderem in der Wirtschaftslehre, im Change Management, in der Automobilindustrie aber auch in der Spielzeugbranche verwendet. Es handelt sich dabei immer um einen Satz von standardisierten Elementen oder Elementgruppen, die unter vorgegebenen Bedingungen miteinander kombiniert ein Endprodukt ergeben.

### 2.3.1. Tragwerksmodellbaukasten Mola

Im Architekturmodellbau kommen fast ausschließlich didaktische Bausätze im Bereich des Tragwerksentwurfs zum Einsatz. Der Tragwerksmodellbaukasten Mola ist ein aktuelles Beispiel eines solchen Baukastens und wurde 2007-2008 von dem brasilianischen Architekten Marcio Sequiera im Rahmen einer Master- und Doktorarbeit an der Federal University of Ouro Preto, Minas Gerais, Brasilien entwickelt<sup>23</sup> (Abb.2.19.).



Abb. 2.19.  
Brückenmodell

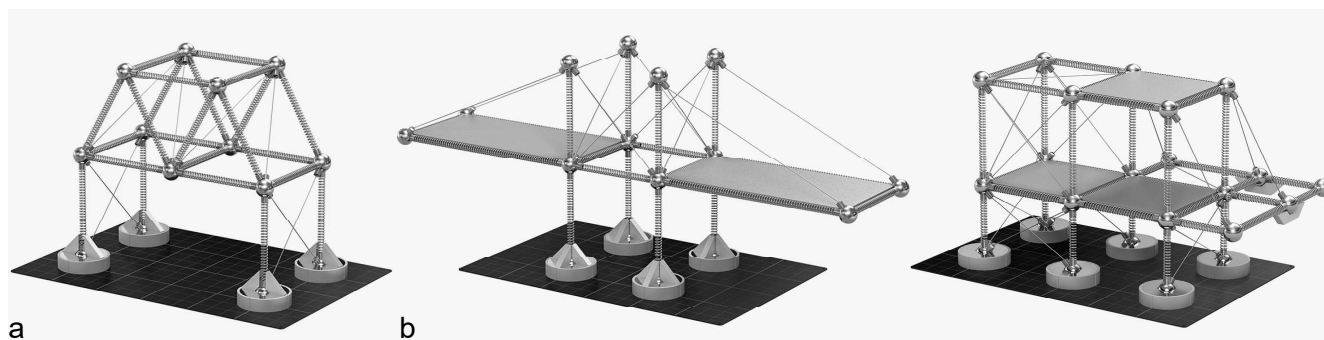


Abb. 2.20.  
Mola-Modelle, a, b - Structural Kit 1, c - Structural Kit 2

II-23 Vgl. Sequiera 2008

Mola veranschaulicht die Verformung von Tragwerken unter Belastung. Der Baukasten besteht aus magnetischen Kugeln als Knotenelemente, federähnlichen Stäben, Seilen, Platten, Auflagern und Eckaussteifungen für den Rahmenbau. Die Stäbe können in der Länge stufenlos verlängert werden, aber die Platten und die Seile weisen fixe Größen auf, weswegen Konstruktionen, die vom Grundraster abweichen, nur bedingt möglich sind. Durch die Wahl einer magnetischen Kugel als Knotenelement können die Winkel, unter denen die Stäbe zueinander stehen, flexibel gewählt werden, wobei die Auflagefläche der Stäbe auf der Kugel die begrenzende Größe ist. Die genaue Einstellung der Anschlusswinkel ist nur über die Längen Anpassung der Stäbe und Seile möglich (Abb.2.20.).

Dieser Modellbaukasten bietet große Flexibilität im Tragwerksmodellbau, da nahezu alle Arten von Tragwerken nachgebildet werden können. Da jedoch die Knoten nicht biegesteif ausgeführt sind und nur die Stäbe in der Länge eingestellt werden können, gibt es Einschränkungen, welche Formen diese Konstruktionen einnehmen können. Auch die Optik und das Material können in diesem System nicht beeinflusst werden.

### 2.3.2. Spielzeugbaukästen

Eine Kategorie, die im Modellbau nicht außer Acht gelassen werden darf, sind Spielzeugbaukästen. In den letzten 100 Jahren spielen Konstruktionsspielzeuge eine große Rolle in der Lernumgebung von Kindern<sup>24</sup>. Verschiedenste Arten von Bausätzen ermöglichten es, der Phantasie freien Lauf und eine eigene Welt am Teppich des Kinderzimmers entstehen zu lassen. Mithilfe von Bausteinen, Stäben, Knoten, Platten und Seilen können unterschiedliche Bauwerke nachgebaut und entworfen werden. Eine große Datenbank der Architekturspielzeugbaukästen findet man unter [architoy.net](http://architoy.net)<sup>25</sup>. Von den untersuchten Spielzeugsystemen wurden die nachstehenden ausgesucht, um Anforderungen an einen Tragwerksmodellbaukasten zu erarbeiten.

#### K'Nex

Zu den Grundelementen von K'Nex<sup>26</sup> gehören Stäbe und flächige Verbindungselemente (Abb. 2.21.). Die Stäbe sind im Querschnitt kreuzförmig und besitzen Anschlussnoppen an beiden Enden. Die Längen der einzelnen Stäbe stehen im Verhältnis  $1:\sqrt{2}$  zueinander, was die Herstellung ausgesteifter Rechtecke ermöglicht. Die Verbindungselemente ermöglichen die Verbindung der Stäbe in einer Ebene unter Winkeln, die das Mehrfache von  $45^\circ$  ergeben. Hiermit ist es möglich, Strukturmodelle zu bauen, aber mit großen Einschränkungen in Bezug auf Anschlusswinkel und Stablängen.



Abb. 2.21.  
K'Nex

II-24 Einer der Vorreiter der Spielzeugbaukästen ist der Modello-Baukasten, der 1919 auf den Markt kam

II-25 [www.architoy.net](http://www.architoy.net), 30.06.2020

II-26 <https://www.basicfun.com/knex/>, 22.07.2020

## Matador

Matador<sup>27</sup> ist ein Holzbaukasten, der Stäbe als Verbindungselemente und Bauelemente mit regelmäßigen Bohrungen verwendet. Die Bauelemente besitzen verschiedenen Formen wie Platten, Zylinder oder Würfel und werden durch Steckverbindungen miteinander verbunden (siehe Abb. 2.22.). Die Auswahl der Elemente ist bei diesem Baukasten deutlich höher als bei K'NEX. Die einzelnen Elemente, abhängig von der Form, können hier nur parallel oder im rechten Winkel zueinander in dem vorgegebenen Raster verbunden werden.



Abb. 2.22.  
Matador

## Meccano

Bei Meccano<sup>28</sup> (Abb. 2.23.) handelt es sich um ein technisches Spielzeug, das die Arbeiten von Norman Foster<sup>29</sup> geprägt haben soll. Das Set besteht aus perforierten Blechplatten und -streifen, die durch Schraubverbindungen zusammengefügt werden. Dieser Baukasten ermöglicht die belastbarsten Verbindungen aller hier genannten Spielzeugbaukästen, ist aber durch die Form der Bauelemente und die parallelen Verbindungen nicht für Strukturmodelle geeignet.

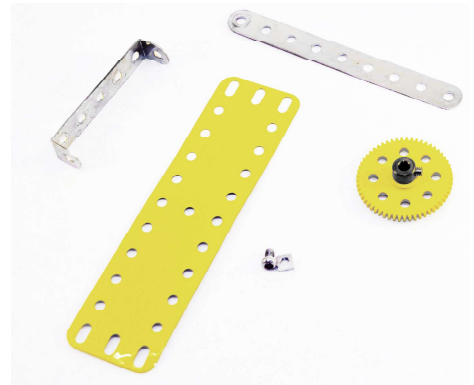


Abb. 2.23.  
Meccano

## Fischertechnik

Das System Fischertechnik<sup>30</sup> (Abb. 2.24.) baut auf einem „Grundbaustein“ auf, der über ein Nut- und Federsystem an allen sechs Seiten ausgebaut werden kann. Die Nut verläuft über die vier Längsseiten des Grundbausteins, an den Stirnseiten befindet sich die Feder. Dadurch können die einzelnen Bausteine im rechten Winkel verbunden werden, jedoch ohne Einschränkung in Bezug auf die Positionierung in der Nut, da es sich um eine gleitende Verbindung handelt. Wird eine fixe Verbindung benötigt, kommen Elemente mit regelmäßigen Bohrungen zum Einsatz. Durch



Abb. 2.24.  
Fischertechnik

II-27 [www.matador.at/](http://www.matador.at/) 22.07.2020

II-28 [www.meccano.com/](http://www.meccano.com/) 22.07.2020

II-29 Vale/Vale 2013

II-30 [www.fischertechnik.de](http://www.fischertechnik.de) 22.07.2020

Spezialelemente sind Verbindungen unter anderen Winkeln möglich. In Bezug auf Flexibilität im Spielzeugbau bietet dieser Baukasten die bisher besten Möglichkeiten. Für einen Tragwerksmodellbaukasten ist dies jedoch immer noch zu wenig.

## Free Universal Construction Kit

Ein interessantes open source Projekt hat sich mit der Interoperabilität der verschiedenen Bausätze auseinandergesetzt. Das Free Universal Construction Kit<sup>31</sup> ist ein Satz von ca. 80 Teilen, der es ermöglicht, zehn verschiedene Bausätze miteinander zu kombinieren (Abb. 2.25.). Alle Elemente können kostenfrei als .STL Dateien heruntergeladen und mithilfe eines 3-D-Druckers gedruckt werden.

Spielzeugbaukästen sind keine Alternative für den Architekturmodellbau, da sie immer ein Raster aufweisen, in dem die Strukturen gebaut werden können. Somit hat man eine begrenzte Auswahl an Stablängen und die Knoten ermöglichen die Verbindung der Stäbe nur unter bestimmten Winkeln, womit auch die Anzahl der Verbindungen pro Knoten fixiert wird. Es können zwar keine Eigenschaften aus diesen Systemen übernommen werden, allerdings können die drei beschriebenen Punkte als Anforderungen für einen Tragwerksmodellbaukasten übernommen werden.



Abb. 2.25.  
Free Universal Construction Kit

### 2.3.3. Bausysteme

Da es keine klare Definition von Bausystemen gibt, wird anhand von drei Beispielen die im Rahmen dieser Arbeit definierte Bedeutung erklärt.

Fachwerkhäuser (Abb. 2.26.) sind bekannte Anwendungsbeispiele von Holzfachwerken im Hochbau. Repetitive Strukturen der Konstruktion sind gut sichtbar, dennoch handelt es sich nicht um ein Bausystem. Bei den meisten Fachwerkhäusern handelt es sich um Gebäude, die

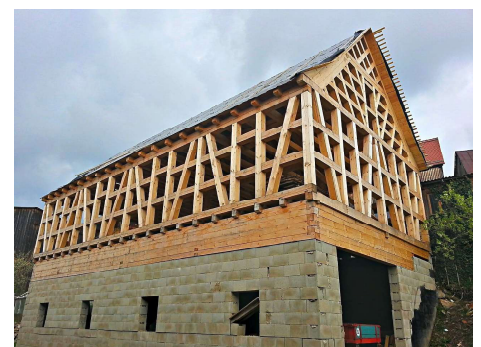


Abb. 2.26.  
Fachwerkhaus

II-31 Free Art and Technology [F.A.T.] Lab and Sy-Lab. "The Free Universal Construction Kit." Ffff.at (20 March 2012), in: <http://ffff.at/free-universal-construction-kit>, 27.09.2019

vor einigen Jahrzehnten oder Jahrhunderten erbaut worden sind. Die Elemente wurden vor Ort passend zugeschnitten und verbaut. Versucht man die Konstruktion auseinanderzubauen, um sie dann wieder zusammenzubauen, wird offensichtlich, dass die Elemente nicht beliebig austauschbar sind. Nicht jeder Eckpfosten kann in jeder Ecke montiert werden, auch wenn die Anschlüsse theoretisch dieselben sind. Der Grund hierfür ist einfach. Mit den zum Errichtungszeitpunkt zur Verfügung stehenden Werkzeugen konnten die einzelnen Elemente und deren Anschlüsse nicht einheitlich hergestellt werden.

Die Gitterschale der Bibliothek der Singapore University of Technology and Design (Abb. 2.27.) wurde als Teil eines Projektes des dortigen Forschungslabors gebaut. Die Hauptkonstruktion besteht aus geknickten Dreiecken. Alle Elemente wurden mit einer CNC Maschine zugeschnitten und dann zu Dreiecken montiert. Hier handelt es sich zwar um präzise vorgefertigte Elemente, aber immer noch nicht um ein Bausystem, denn auch hier kann jedes Element nur an seinem bestimmten Ort verbaut werden.

Die von Fritz Haller geplante Fabrikhalle der Firma USM in Münsingen, Schweiz wurde mit dem USM-Stahlbausystem Maxi errichtet<sup>32</sup>, wie in Abb. 2.28. abgebildet. Alle Elemente einer Kategorie sind beliebig untereinander austauschbar und können jede Funktion im Gesamtsystem übernehmen. Eine Stütze kann z.B. als Eck-, Wand- oder freistehende Stütze montiert werden. Dies bedeutet auch, dass die Halle an ihrem jetzigen Standort abgebaut und an einem anderen Standort neu aufgebaut werden könnte. Zusätzlich wäre es sogar möglich, im Rahmen der Systemmöglichkeiten den Grundriss zu verändern, um neuen Anforderungen zu entsprechen. Aufgrund dieser Eigenschaften handelt es sich hier um ein Bausystem.

Ein Bausystem besteht aus verschiedenen in Serienproduktion hergestellten Elementen und Elementgruppen, innerhalb welcher die Einzelteile bedingt untereinander austauschbar sind. Die Elemente werden unter Verwendung präziser CNC-Maschinen hergestellt, womit die Vorfertigung eine Grundvoraussetzung für Bausysteme darstellt. Bausysteme werden oft mit Einschränkungen

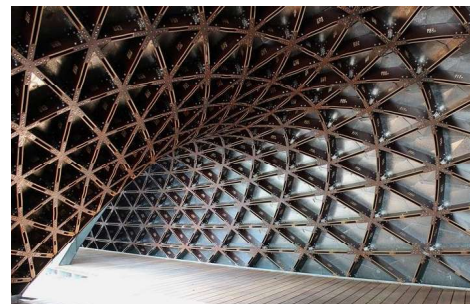


Abb. 2.27.  
Singapore University of Technology  
and Design Library Pavilion



Abb. 2.28  
USM Stahlbausystem Maxi

---

II-32 Frisch 2006



im Entwurf assoziiert. Dank der technologischen Entwicklung der letzten Jahre ist es möglich, relativ schnell und unkompliziert Sonderelemente zu entwerfen und diese auch schnell herzustellen, was individualisierte Lösungen innerhalb eines Bausystems ermöglicht.

Die meisten Bausysteme wurden im Leichtbau entwickelt, obwohl es auch im Massivbau Unternehmen gibt, die ihre Produkte als Bausysteme entwickelt haben. Hier muss jedoch vermerkt werden, dass das System vorrangig beim Neubau von Vorteil ist. Da beim Massivbau raumabschließende Elemente durchaus eine wichtige Rolle spielen, entstehen beim Errichten solcher Bauten Verbindungen zwischen den einzelnen Elementen, die den Rück- oder Umbau mehr oder weniger erschweren. Dabei kann es sich um eine Putzschicht oder um gegossene Betonelemente handeln.

Der Leichtbau ist für systematisches Bauen gut geeignet, da es viele Elemente gibt, die in einem Tragwerkssystem öfter in gleicher oder ähnlicher Ausführung vorkommen. Die Errichtungszeit verkürzt sich durch ausgeklügelte Knoten und Verbindungstechniken und die Vorteile der Vorfertigung werden genutzt: weniger Werkzeug muss zur Baustelle transportiert werden, weniger Lärmbelästigung für Anrainer, witterungsunabhängiges Arbeitsumfeld, gleichzeitiges Arbeiten verschiedener Fachkräfte und höhere Qualität durch präziseres Arbeiten in kontrolliertem Umfeld. Der Grad an Vorfertigung wird mit Rücksicht auf Transport, Logistik und Montage an das Projekt angepasst.



Abb. 2.29.  
USM Stahlbausystem MAXI



Abb. 2.30.  
USM Stahlbausystem MIDI



Abb. 2.31.  
USM Stahlbausystem MINI



Abb. 2.32.  
USM Haller Möbelbausystem, a - Sideboard, b - Garderobe

Die verschiedenen USM-Haller Systeme werden von Fritz Haller selbst wie folgt beschrieben:

„Das Stahlbausystem MAXI wird verwendet zum Bau von eingeschossigen Hallen mit großen Spannweiten (Abb. 2.29.). Es besteht aus den Elementgruppen Tragwerk, Dachhaut, Außenwand und Innenwand. Fundamente, Bodenkonstruktion und haustechnische Anlagen werden objektspezifisch erstellt. Das Tragwerk aus Stützen und Fachwerkträgern kann horizontal in alle Richtungen erweitert werden. Die Elemente der Außen- und Innenwände sind demontierbar und im Rahmen der Modulordnung austauschbar. Das Stahlbausystem MAXI ist geeignet zum Bau von Produktionsanlagen, bei denen die Möglichkeit zum einfachen Um- und Anbau gegeben sein soll.

Das Stahlbausystem MIDI ist ein Baukastensystem zum Bau mehrgeschossiger, hochinstallierter Gebäude (Abb. 2.30.). Alle Bauteile werden in ihren Wechselbeziehungen zu einem modularen Gesamtsystem geordnet. So ist es möglich, auch objektspezifische oder vom Baumarkt angebotene Bauteile in den Gesamtbaukasten zu integrieren. Auch die geometrischen Ordnungen der Leitungssysteme für haustechnische Anlagen sind Teil der Gesamtordnung. Sie werden im Rahmen des Installationsmodells «Armillar» koordiniert.

Das Stahlbausystem MINI wird verwendet zum Bau von ein- bis zweigeschossigen Gebäuden mit Spannweiten bis 8.40 Meter (Abb.2.31.). Es besteht aus den Elementgruppen Tragwerk, Boden, Dachhaut und Außenwand. Fundamente, Untergeschoss und Innenausbauteile werden objektspezifisch erstellt. Das Tragwerk aus Stützen und Trägern aus kaltverformten Blechprofilen kann horizontal in alle Richtungen erweitert werden. Die Elemente der Außenhaut sind demontierbar und im Rahmen der Modulordnung austauschbar. Mit dem Stahlbausystem MINI werden Bauten für unterschiedliche Nutzungen erstellt, Ateliers, Büro-, Schul-, Verkaufsbauten, Ausstellungspavillons, Wartehallen und Wohnhäuser. Kurze Bauzeiten und rasche und einfache Um- und Anbaumöglichkeiten sind Vorteile dieses Bausystems.

Das USM Haller Möbelbausystem ist ein Baukastensystem mit den Baugruppen Traggerüste, Verkleidungen, Einbauten und Zubehör sowie den Baugruppen Tische und Displaywände (Abb. 2.32.). Das Möbelbausystem ist ein kompletter Baukasten oder ein geschlossenes System. Es umfasst alle notwendigen Elemente zum Bau der unterschiedlichsten Objekte, wie offene oder geschlossene Akten- und Geräteschränke, Korpusse, Rollboys, Empfangstheken und Pflanzenkübel. Diese Objekte lassen sich zerlegen und erneut zu anderen Objekten zusammenbauen.“<sup>33</sup>

## **III Rapid Modelling**

Die in den letzten Jahrzehnten immer weiter fortschreitende Digitalisierung hatte großen Einfluß auf verschiedene Bereiche, so auch auf die Architektur. Mittlerweile gibt es Softwarelösungen für fast jeden Bereich des architektonischen Entwurfs. Der Modellbau wurde auch dadurch beeinflusst, dass die Erstellung von Dateien, die für die Steuerung von CNC-Maschinen grundlegend ist, erleichtert wurde. Schichtmodelle können mithilfe von Lasercuttern, Massenmodelle mit Fräsen und Tragwerksmodelle mit 3-D-Druckern hergestellt werden. Die 3-D-Drucktechnologie hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt, sodass diese Geräte in Relation zu anderen CNC-Maschinen sehr günstig geworden sind. Aus diesem Grund wurde der Zugang zu 3-D-Druckern viel einfacher. Wie bereits in Abschnitt 2.2. beschrieben, ist vor allem im Low-End Bereich die Fused-Deposition-Modelling-Technologie weit verbreitet. Für die Herstellung komplexer Tragwerksmodelle in einem Stück reichen Low-End Geräte meistens nicht aus. Wird jedoch die Konstruktion der Modelle so geändert, dass das Modell in einzelne Elemente geteilt wird, können auch Low-End Geräte verwendet werden.

In den Abschnitten 3.2. und 3.3. werden zwei Ansätze beschrieben, um den Struktur- und Tragwerksmodellbauprozess mittels 3-D-Drucken zu vereinfachen und somit zu beschleunigen.

### **3.1. Voraussetzungen und Anforderungen**

Um die Möglichkeiten und Einschränkungen eines Tragwerksmodellbaukastens zu beschreiben, wurden die Tragwerkselemente, die damit nachgebildet werden sollen, klar definiert und die Recherche bestehender Systeme ausgewertet. Daraus können die Voraussetzungen, die das nachzubildende Tragwerk erfüllen muss und die Anforderungen an das neue Modellbausystem abgeleitet werden.

Für dieses Modellbausystem stehen Tragwerke im Fokus, die aus linearen, geraden, biegesteifen Elementen bestehen, die in der Regel auf Zug und Druck belastet werden und miteinander biegesteif verbunden sind. Hierbei kann es sich um lineare, kombiniert-lineare oder flächige Tragwerkselemente

handeln, sofern sie in einzelne gerade Elemente aufgelöst werden können. Tragwerke, die überwiegend auf Biegung beansprucht werden, wie Trägerroste oder Tragwerkselemente, die auf Zug belastet werden, wie Seiltragwerke und Membranen zählen nicht dazu. Anhand der Kategorisierung der Tragwerkselemente nach Block, et al.<sup>1</sup> wird die Abgrenzung der Tragwerkssysteme in Abb. 3.1. festgehalten.

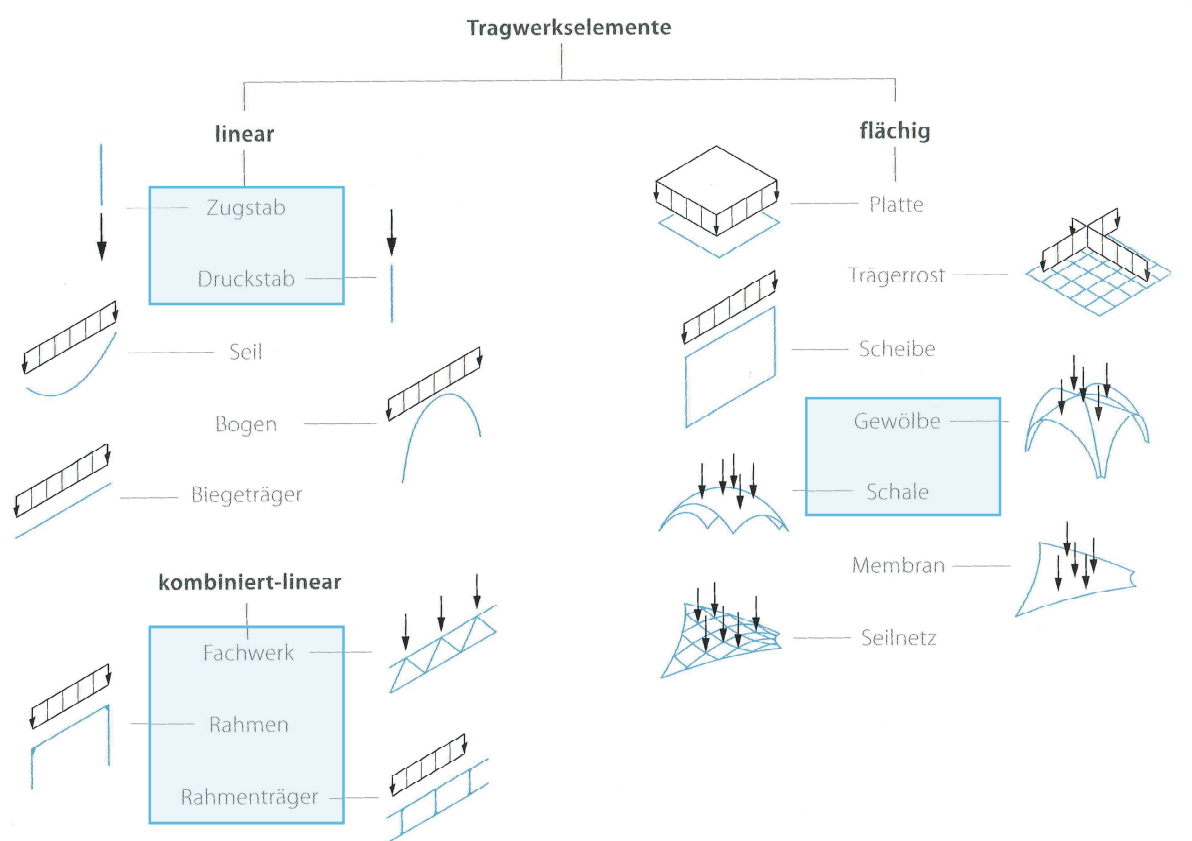


Abb. 3.1. Abgrenzung der Tragwerkselemente, die mit dem Modellbaukasten nachgebildet werden sollen

Die Anforderungen, die das System erfüllen soll, sind:

- Eine möglichst hohe Anzahl der Anschlussmöglichkeiten pro Knoten
- Keine Einschränkungen in der Wahl der Anschlusswinkel der Stäbe mit den Knoten
- Keine Einschränkungen der Stablängen
- Freie Skalierbarkeit in den gewünschten Maßstab
- Ausreichende Belastbarkeit der Verbindungen auf Zug und Druck
- Wiederverwendbarkeit von Elementen
- Nachträgliche Veränderbarkeit des Modells

Die ersten drei Anforderungen waren bei allen recherchierten Systemen ausschlaggebend dafür, dass mit ihnen keine oder nur wenige Tragwerksmodelle nachgebildet werden konnten. Die Anzahl der Anschlussmöglichkeiten pro Knoten, die möglichen Anschlusswinkel der einzelnen Stäbe und die möglichen Stablängen des Systems bestimmen maßgeblich die Arten von Konstruktionen, die mit diesem System erstellt werden können. Um beispielsweise ein räumliches Fachwerk nachzubilden

zu können, müssen sich 8 Stäbe in einem Knotenpunkt treffen. Es gilt, diese Einschränkungen weitestgehend zu minimieren.

Weiters wurde beobachtet, dass man sich bei der Wahl eines Modellbausystems immer auf einen vom System bestimmten Maßstab einschränkt. Dies ist für ein Tragwerksmodellbausystem unpraktikabel, da der Maßstab frei wählbar sein muss. Die Belastbarkeit der Knoten auf Zug und Druck muss ausreichend gegeben sein. Das heißt, dass die Verbindungen stabil genug sein müssen, um kleinen Lasten standzuhalten, nicht jedoch, dass es sich um feste Verbindungen handeln muss. Um die Modellbauzeit zu verkürzen und den Materialaufwand zu verkleinern, soll das System oder zumindest einige Teile davon, wiederverwendbar und die nachträgliche Veränderung des Modells möglich sein. Abschließend müssen die fertigungsbedingten Anforderungen erfüllt werden.

Alle bisher genannten Anforderungen und Voraussetzungen dienen als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Tragwerkmodellbausystems, das die Komplexität des Modellbauprozesses reduziert, die Bauzeit verkürzt und den Materialaufwand minimiert. Das verwendete Material und der Maßstab des Modells werden, abhängig von den Herstellungsmöglichkeiten, der ModellbauerIn überlassen. Je nach Ausführung soll es möglich sein, Arbeits- oder Präsentationsmodelle herzustellen.

## **3.2. Ansatz 1: Das Baukastensystem**

Der erste Ansatz war es, einen Modellbaukasten in Anlehnung an die recherchierten Systeme aus Abschnitt 2.3. zu entwerfen. Ein Baukasten ist vor allem für die Herstellung von Arbeitsmodellen vorteilhaft, weil er es ermöglicht, sofort mit dem Modellbau zu beginnen, ohne vorab die Materialien besorgen zu müssen oder diese zu bearbeiten (z.B. zuschneiden). Auch der Werkzeugbedarf minimiert sich. Auf diese Weise ist es rasch möglich, Ideen am Modell zu testen, oder sogar das Modell als Entwurfswerkzeug zu verwenden. Während des Entwicklungsprozesses standen zwei Elementkategorien im Vordergrund - die Knoten mit der passenden Anschlussart und die Stäbe mit Fokus auf die stufenlose Längen Anpassung. Diese zwei Kategorien werden im Anschluss getrennt voneinander beschrieben.

### **3.2.1. Knoten**

Als Ausgangsform für den Knoten wurde die Kugelform gewählt. Die ersten zwei Herausforderungen waren, unterschiedliche Anschlusswinkel zu ermöglichen und die Anzahl der Anschlüsse pro Knoten zu vergrößern. Die Lösung dieser Aufgaben hängt damit zusammen, wie die Verbindung des Stabs mit dem Knoten erfolgen soll und auf welche Art der Anschlusswinkel angepasst werden soll.

Die Verbindung des Stabs mit dem Knoten kann auf mehrere Arten ausgeführt werden. Beispielsweise werden bei Mola die Stäbe nur durch das Auflegen des Stabs auf die Kugeloberfläche verbunden. Dies ist nur dann möglich, wenn magnetische Elemente verwendet werden. Nachdem es derzeit nicht möglich

ist, magnetische Materialien mit FDM-Druckern zu verarbeiten, wurde diese Option ausgeschlossen. Eine weitere Option ist, die Verbindung durch den Einsatz von Konsolen durchzuführen. Hierbei handelt es sich um Steck-, Schraub- oder Bajonettverbindungen. Eine Steckverbindung ist einfach zu bedienen und benötigt im Regelfall kein Werkzeug. Bajonett- oder Schraubverbindungen sind im Gegensatz dazu belastbarer, setzen jedoch voraus, dass der Anschluss immer in die richtige Position gebracht werden kann. Diese drei Verbindungsgarten wurden auf ihre Herstellbarkeit mit einem FDM Drucker und deren Bedienbarkeit untersucht und werden in den Kap. 3.2.1.1 bis 3.2.1.3 genauer beschrieben.

Um das gewünschte Maß an Flexibilität der Anschlusswinkel zu erreichen, müssen die einzelnen Anschlüsse so ausgeführt werden, dass sie diese Flexibilität ermöglichen. Das bedeutet, dass ein Anschlusspunkt einen bestimmten Winkelbereich abdecken muss. In Abb. 3.2. wird anhand eines Knotens mit 6 Anschlusspunkten grafisch dargestellt, wie dieser Anschlussbereich definiert und berechnet wird.

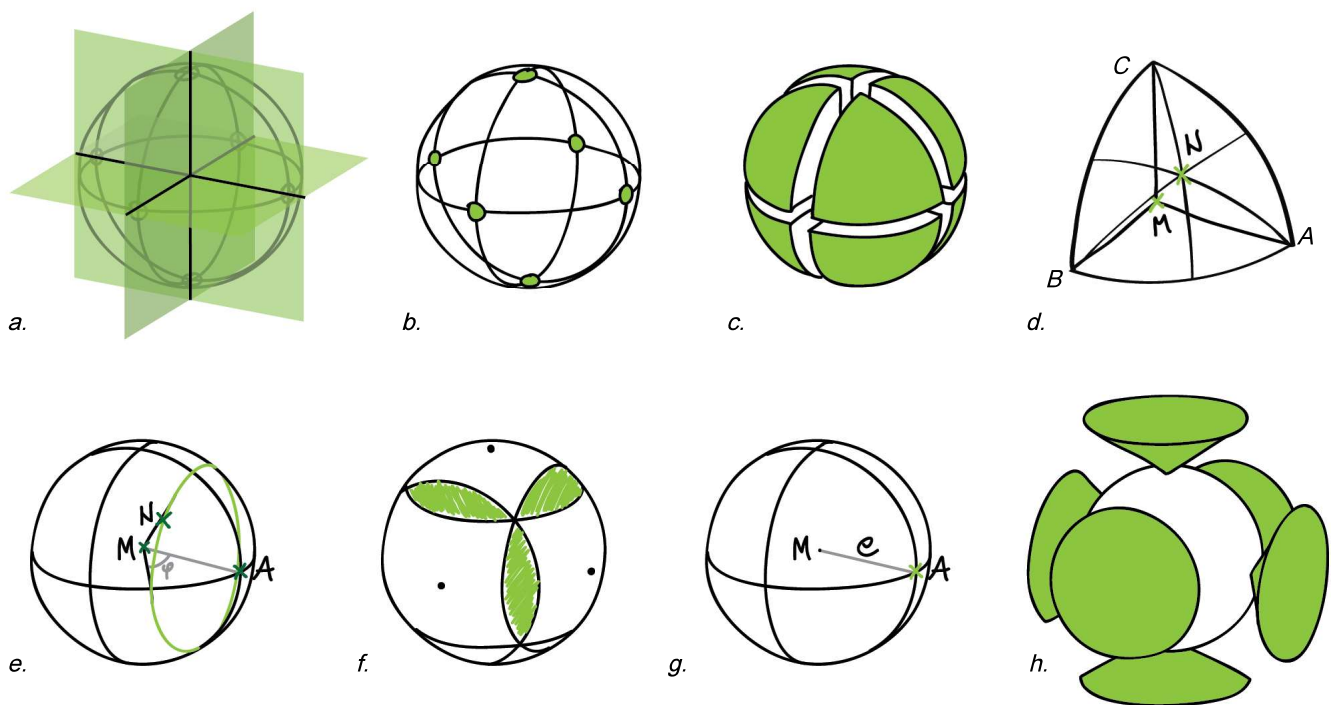


Abb. 3.2.  
Skizze zur Ermittlung der Anschlusswinkelbereiche

Dieses Modell geht davon aus, dass der Rotationsmittelpunkt eines Anschlusspunkts im Knotenmittelpunkt liegt. Es gibt 3 Anschlussebenen, in denen jeweils 4 Anschlusspunkte liegen (a., b.), wobei jeder Punkt in zwei Ebenen vorkommt. Durch diese Ebenen wird die Kugel in insgesamt 8 gleich große tetraederförmige Teile geteilt (c.). Der Mittelpunkt N der gekrümmten Fläche eines Tetraeders ist der Punkt, der am weitesten von den angrenzenden drei Anschlusspunkten A, B und C entfernt liegt (d.). Die Distanz zwischen Punkt N und einem Anschlusspunkt, der auf der gleichen Fläche liegt (Punkte A,B oder C), bildet den Radius eines Kegels, mit dem Ursprung im Knotenmittelpunkt M (e.). Dieser Kegel legt den Winkelbereich fest, unter dem die Stäbe angeschlossen werden können. Somit kann ein Stab unter jedem Winkel mit dem Knoten verbunden werden. Auf diese Weise entstehen

Bereiche, in denen sich die Anschlusswinkelbereiche überlappen (f.). Ist ein Anschluss bereits besetzt, entfällt dieser Anschlusswinkelbereich für weitere Anschlüsse. Ausgehend davon, entstehen sechs Kegel mit Öffnungswinkeln von  $109,48^\circ$ . Sind mehr als sechs gleichmäßig verteilte Anschlusspunkte am Knoten vorhanden, verkleinert sich der Öffnungswinkel der Kegel.

Liegen die Rotationsmittelpunkte der Anschlüsse nicht im Knotenmittelpunkt, entsteht eine Exzentrizität  $e$  (g., h.). Je größer der Abstand des Knotenmittelpunkts vom Rotationsmittelpunkt ist, desto mehr wird das Modell verfälscht. Es gilt also, die Exzentrizität im finalen Entwurf zu vermeiden, jedoch wird sie während des Entwurfsprozesses akzeptiert.

### 3.2.1.1. Bajonettknoten

Die erste Verbindungsart, die untersucht wurde, ist die Bajonettverbindung. Hierfür wurde ein Knoten mit 6 Anschlüssen, in Anlehnung an Abb. 3.2. hergestellt. Um den benötigten Winkelbereich zu ermöglichen, wurden die Anschlusspunkte als Kugelgelenke ausgeführt. Der Knoten besteht somit aus dem Knotenkörper und den einzelnen Anschlusskugeln mit Bajonettbuchse.

Die Prototypen wurden aus verschiedenen vorgefertigten Elementen hergestellt. Als Knotenkörper kamen Holzkugeln und -würfel zum Einsatz, die an sechs Seiten angebohrt, die Kugelschalen für die Anschlüsselemente bildeten. Diese entstanden auch aus Holzkugeln, in die vorgefertigte Bajonettbuchsen versenkt wurden. Eine Unterlegscheibe hält die Anschlusskugel in der Schale, ermöglicht aber weiterhin die Rotation in der Kugelschale. Die Größe der Öffnung der Unterlegscheibe bestimmt den Winkel des Kegels, in dem sich der Stab bewegen kann. (Abb. 3.3. und 3.4.)



Abb. 3.3.  
Bajonettknoten Elemente



Abb. 3.4.  
Bajonettknoten Modell

In Abb. 3.5. sind alle Elemente des Systems schematisch in einer Zeichnung dargestellt. Mit einer kleinen Anzahl an Elementen wurden einfache geometrische Formen nachgebildet, um das System zu beurteilen (Abb. 3.6.).

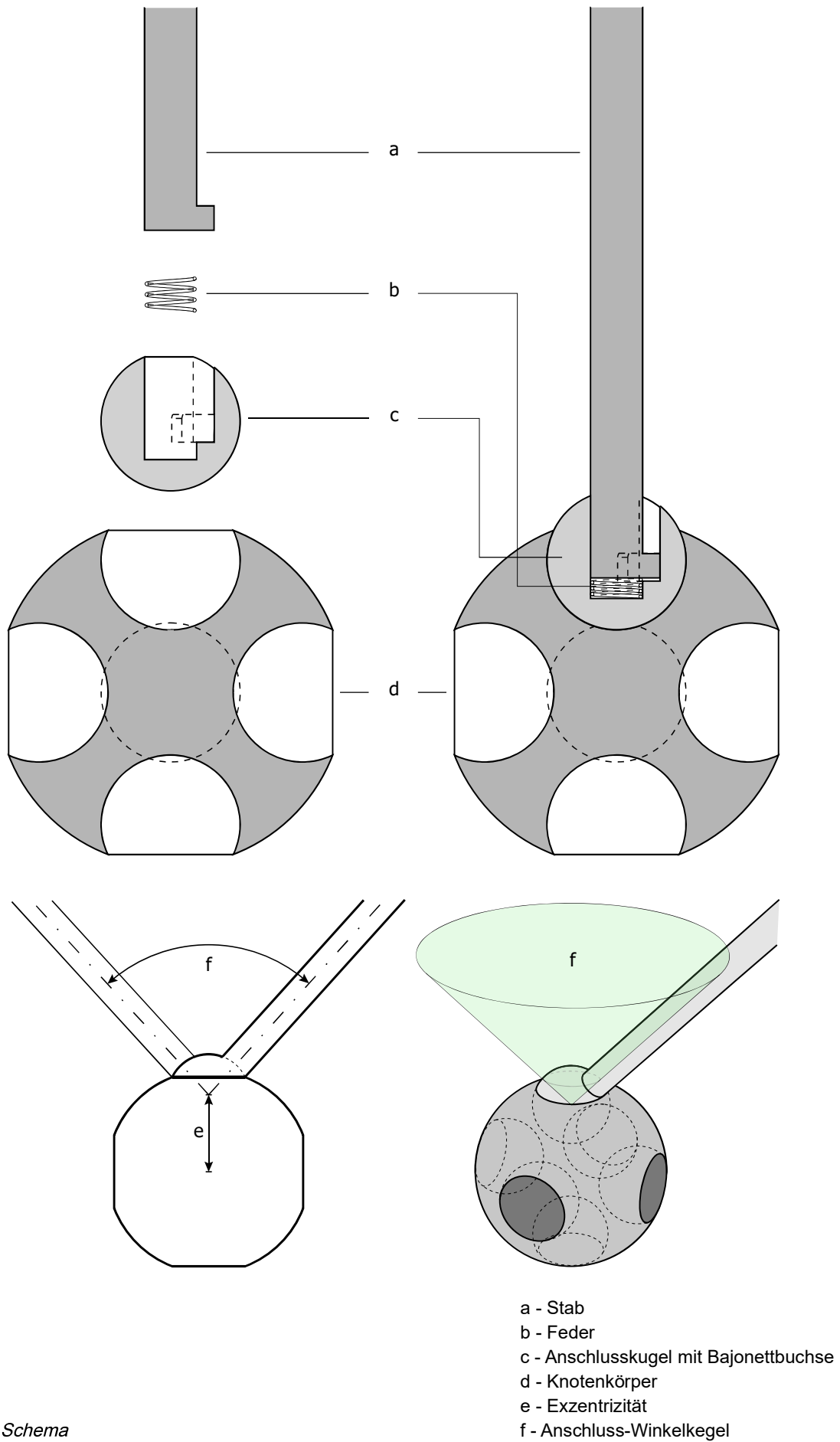


Abb. 3.5.  
 Bajonettknoten Schema



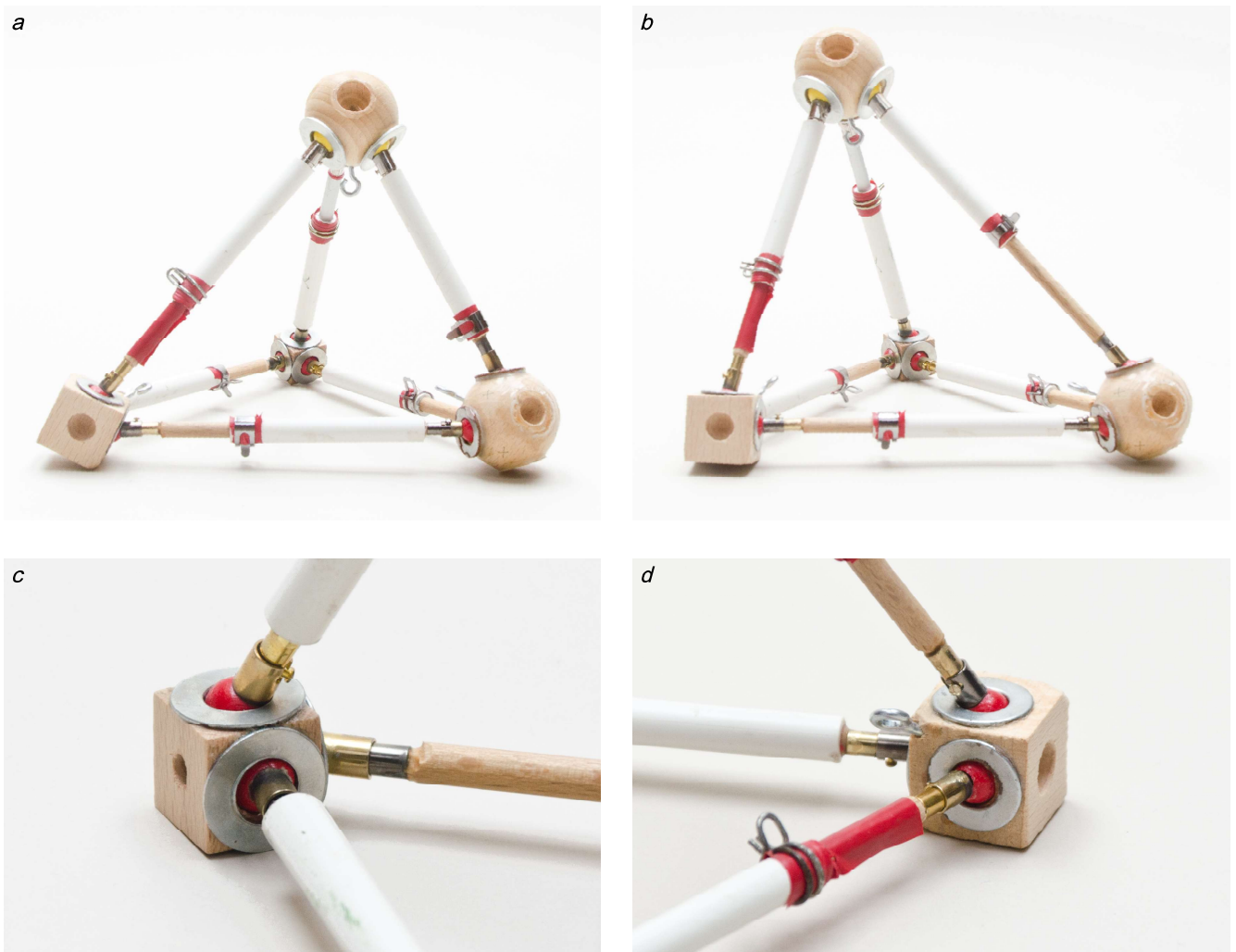


Abb. 3.6.  
Bajonettknoten Modelle

In weiterer Folge wurde die Druckbarkeit der einzelnen Elemente untersucht, indem Bajonettbuchse, Bajonettstecker und der Kugelkörper in verschiedenen Größen und Druckausrichtungen hergestellt wurden (Abb. 3.7.).

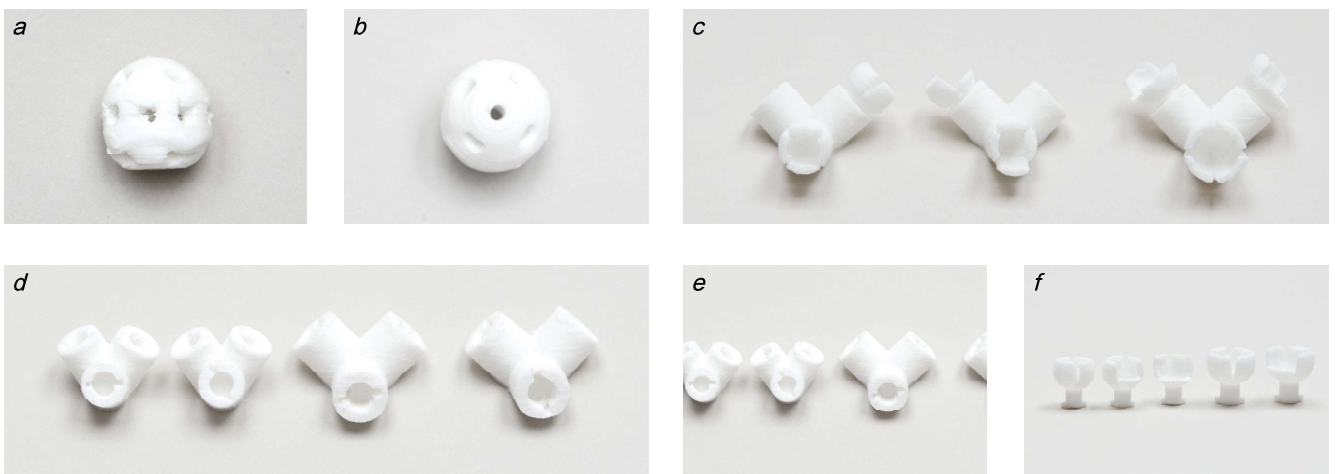


Abb. 3.7.  
Bajonettknoten gedruckte Elemente: a,b - Knotenkörper; c,d - Bajonettbuchsen in unterschiedlichen Größen und Ausrichtungen, e - Anschlusskugel, f - Bajonettstecker mit Kugelschale

Bereits nach wenigen einfachen Modellen und Druckversuchen konnte festgestellt werden, dass dieses System nicht für die Herstellung mit einem FDM-Drucker geeignet ist. Einerseits liegt das an der Oberflächenbeschaffenheit der gedruckten Elemente und andererseits an der Abweichung in Folge der unterschiedlichen Ausrichtung der Buchsen zum Druckbett, wobei unterschiedlich große Buchsen entstehen. Bei einer Vergrößerung der Knoten auf 40mm Durchmesser konnte diese Diskrepanz minimiert werden, dennoch konnten die Knoten sowie die Anschlusskugeln ohne Verwendung von Stützmaterial nicht zufriedenstellend hergestellt werden. Es sind nicht nur fertigungsrelevante Probleme, die eine Reevaluierung des Systems zur Folge hatten. Der Knoten ermöglichte zwar die Verbindung der Stäbe unter beliebigen Winkeln, trotzdem aber noch mit Einschränkungen. Einerseits kann pro Winkelbereich nur ein Stab angeschlossen werden, andererseits konnten die Winkel nicht fixiert werden, weswegen nur dreieckförmige Konstruktionen nachgebildet werden konnten. Zudem verfälschte die Exzentrizität die Modelle maßgebend. Positiv war, dass wegen der möglichen Rotation der Anschlusskugel die Verbindung des Stabs mit dem Knoten immer erfolgen konnte (die Noppen des Bajonettsteckers konnten immer in die richtige Position gedreht werden), allerdings mussten hierfür der Stab und die Anschlusskugel festgehalten werden, um das gegenseitige Verdrehen zu ermöglichen, was sich wegen der geringen Größe der Elemente als unpraktikabel erwies.

Zusammenfassend wurden für die weitere Entwicklung folgende Änderungen vorgenommen:

- Die Bajonettverbindung wurde gegen eine Steckverbindung ausgetauscht
- Der Knotenkörper wurde in einzelne Elemente aufgelöst, um die Druckausrichtung besser kontrollieren zu können
- Die Anschlusskugeln wurden nicht 3-D-gedruckt, um die Reibung zu minimieren
- Die Fixierung der Anschlusswinkel wird ermöglicht

### **3.2.1.2. Klemmschalen**

In dieser Entwicklungsstufe wurde der Fokus auf die Aufspaltung der Knoten in einzelne Elemente und deren Verbindung gelegt. Dies brachte nicht nur Vorteile in Bezug auf die Herstellung der Elemente, sondern ermöglicht auch die Herstellung von Knoten, die nur aus den benötigten Anschlüssen bestehen, wie beispielsweise Eckknoten. Das spart Material und Zeit. Der Ansatz, ein Kugelgelenk als Anschluss zu verwenden wurde beibehalten, aber die Ausführung wurde geändert und die Bajonettverbindung wurde von einer Steckverbindung abgelöst. Zusammengefasst besteht ein Anschlusselement aus:

- Anschlusskugel
- Verbindungszyylinder
- Kugelschale

Um die Fixierung des Anschlusswinkels zu ermöglichen wurde die Kugelschale zweigeteilt. Wird die Bewegung der zwei Schalen zueinander ermöglicht, kann die Anschlusskugel, die sich zwischen den zwei Schalen befindet, geklemmt werden. So ist es möglich, mit dem gleichen Anschluss eine gelenkige und eine steife Verbindung herzustellen.

Um einen praktikablen Konstruktionsansatz für die Schalen zu finden, wurden verschiedene Modelle

gedruckt. Die Ziele dabei waren einerseits, so wenig Material wie möglich zu verwenden um die Druckzeit zu reduzieren und andererseits, die Klemmung der Anschlusskugel möglichst einfach auszuführen.

Zwei Schalen, die ineinander geschraubt werden (Abb. 3.8.), können wegen der Oberflächenbeschaffenheit nicht in ausreichender Qualität in kleinem Maßstab ausgeführt werden, weswegen diese Idee verworfen wurde.

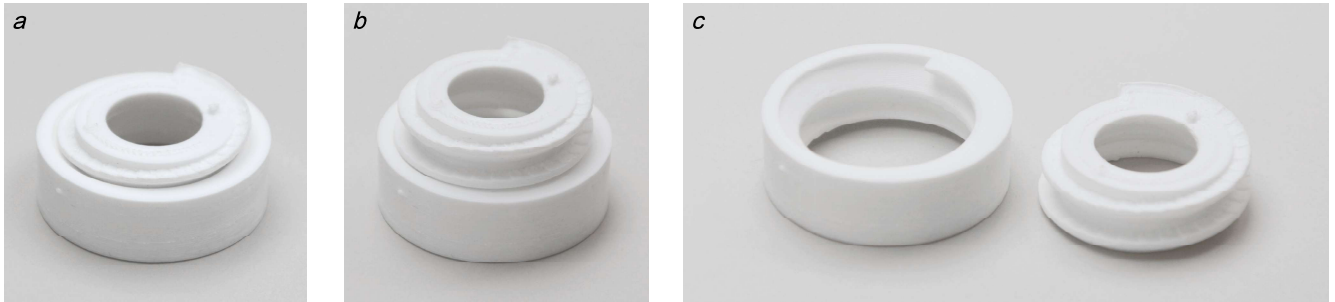


Abb. 3.8.  
Schalen mit Gewinde

Als nächste Variante wurden die zwei Schalen mit einem Scharnier miteinander verbunden und auf der Gegenseite mit einer Schraube geklemmt (Abb. 3.9.).

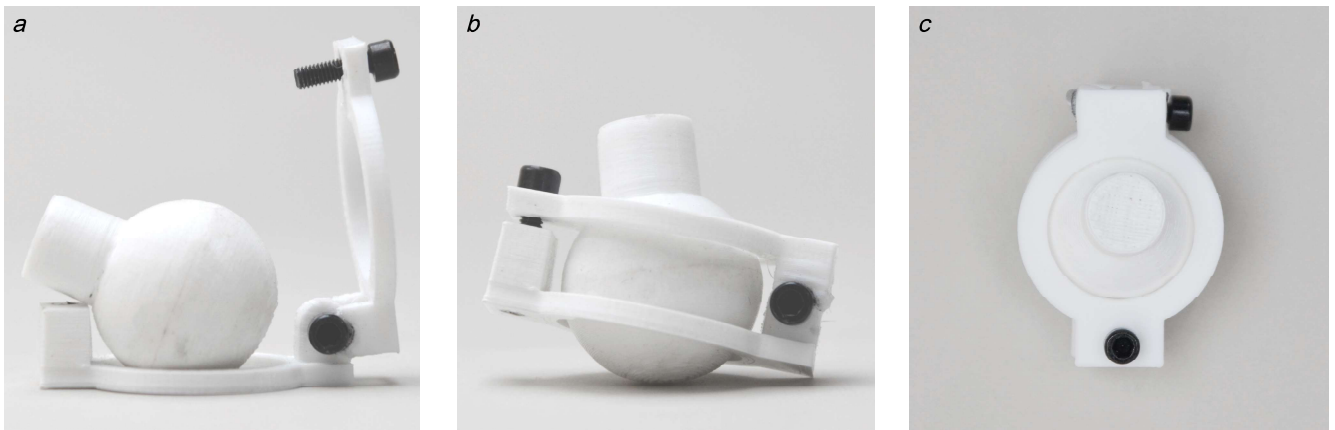


Abb. 3.9.  
3-D-gedruckte Scharnierschalen

In diesem Fall war das Scharnier problematisch. Die Belastung des Scharniers erfolgte normal zur Druckebene und wegen der Anisotropie der Bauteile brach das Scharnier entlang einer Druckschicht. Durch die Vergrößerung des Scharniers könnte man hier entgegenwirken, jedoch ist das für kleine Knotenelemente nicht möglich, da die Vergrößerung des Scharniers die Größe der Knotenelemente erheblich beeinflussen würde. Die Schraubverbindung, die auf der gegenüberliegenden Seite des Scharniers die Klemmung ermöglicht, funktionierte einwandfrei, weswegen das Scharnier gegen eine Schraubverbindung ausgetauscht wurde. Diese Art der Schalen bietet auch die bisher kleinste Lösung an. Die endgültige Form der Schalen konnte erst entschieden werden, nachdem die Verbindung der einzelnen Anschlüsselemente entworfen wurde. Eine Auswahl der gedruckten Schalen ist in Abb. 3.10. dargestellt.

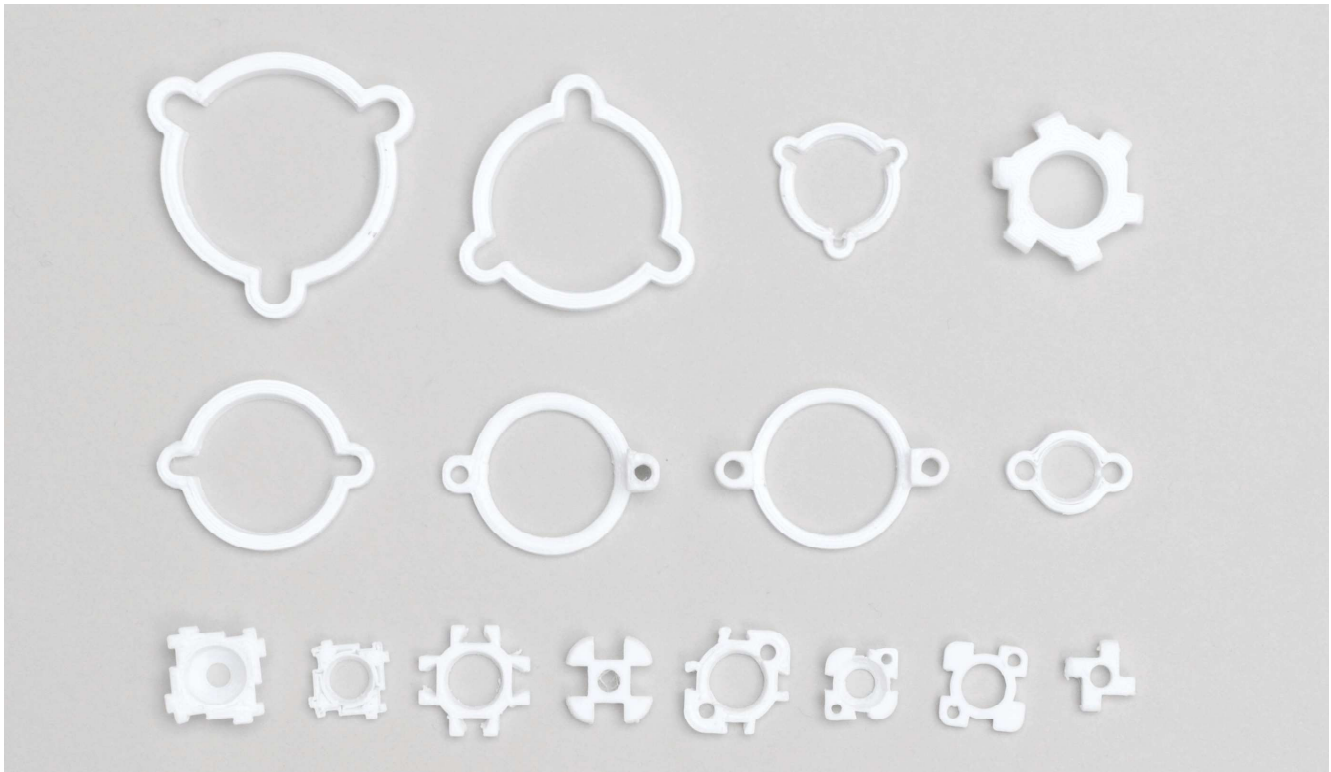


Abb. 3.10.  
3-D-gedruckte Schalen



Abb. 3.11.  
Klemmkreuze

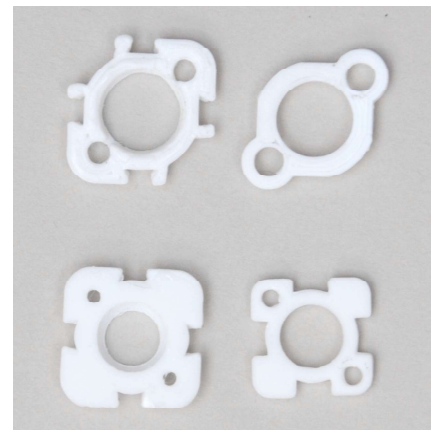


Abb. 3.12.  
Endgültige Form der Klemmschalen  
(links Unter-, rechts Oberschale)

Um eine platzsparende und belastbare Verbindung der Elemente zu ermöglichen, muss die Belastung, die dabei entsteht, vertikal (Druckrichtung XY) auf die Schalen einwirken. Hierfür wurden sogenannte Klemmkreuze verwendet. Dabei handelt es sich um Elemente, die im Grundriss kreuzförmig und in der Vertikale verjüngt extrudiert sind (Abb. 3.11.). Die Verjüngung ist notwendig, um die Drucktoleranz auszugleichen und die Klemmung zu ermöglichen. An vier Seiten der Unterschale wurden Nuten vorgesehen. Das Kreuz greift zur Hälfte in ein Element und zur Hälfte in das andere. Nach mehreren Optimierungsschleifen ist ein Knotenelement entstanden, das im Grundriss eine abgerundete rechteckige Form aufweist. (Abb. 3.12.)

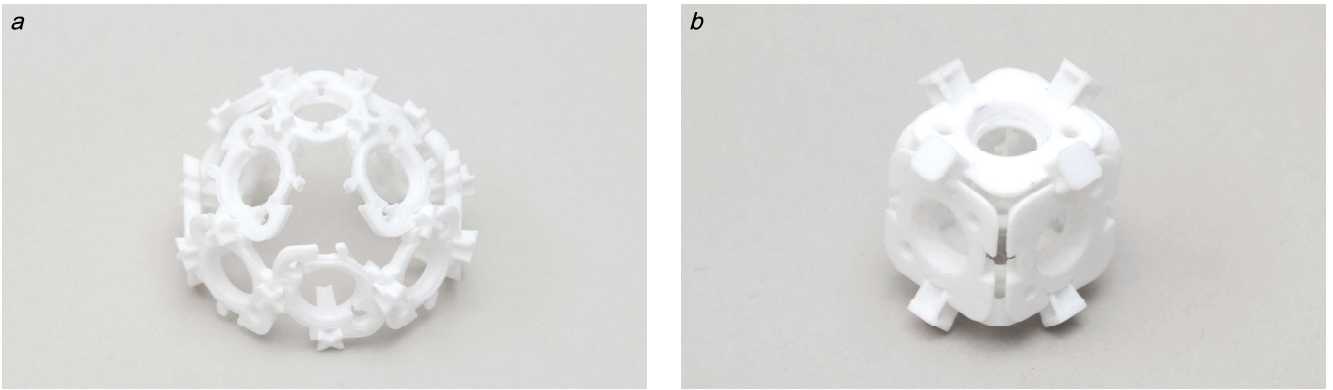


Abb. 3.13.

*a - Teilknoten mit 13 Anschlüssen, b - Ganzer Knoten mit sechs Anschlüssen*

Die Verbindung der einzelnen Elemente erfolgt nur über die Unterschale, damit die Oberschale bewegt werden kann und die Klemmung der Anschlusskugel nicht behindert wird. Um die Verbindung der einzelnen Elemente zu einem kugelförmigen Knoten zu ermöglichen, ist die Unterschale nach unten verjüngt. Der Winkel, unter dem die Schale verjüngt wird, bestimmt, wie viele Elemente in einer Anschlussebene (Siehe Abb 3.2.a.) verbunden werden können. Bei einem Winkel von  $22,5^\circ$  können acht Elemente in einer Ebene verbunden werden, bei  $30^\circ$  sechs Elemente und bei  $45^\circ$  vier (Abb. 3.13.). Damit im gleichen System nicht verschiedene Unterschalen eingesetzt werden müssen, können auch die Winkel der Klemmkreuze angepasst werden (Abb. 3.14.).

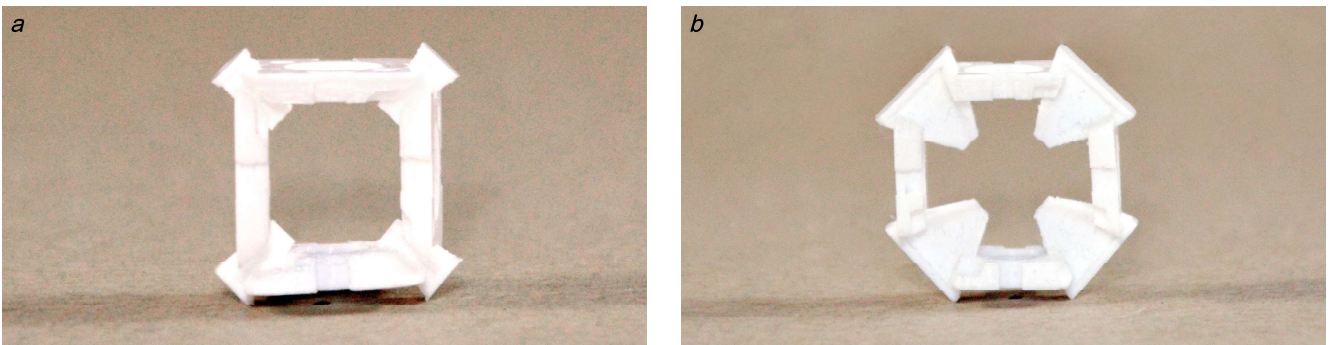
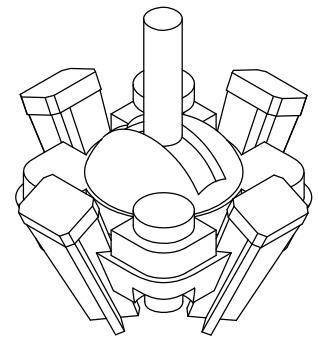
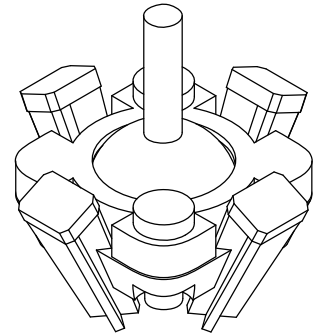
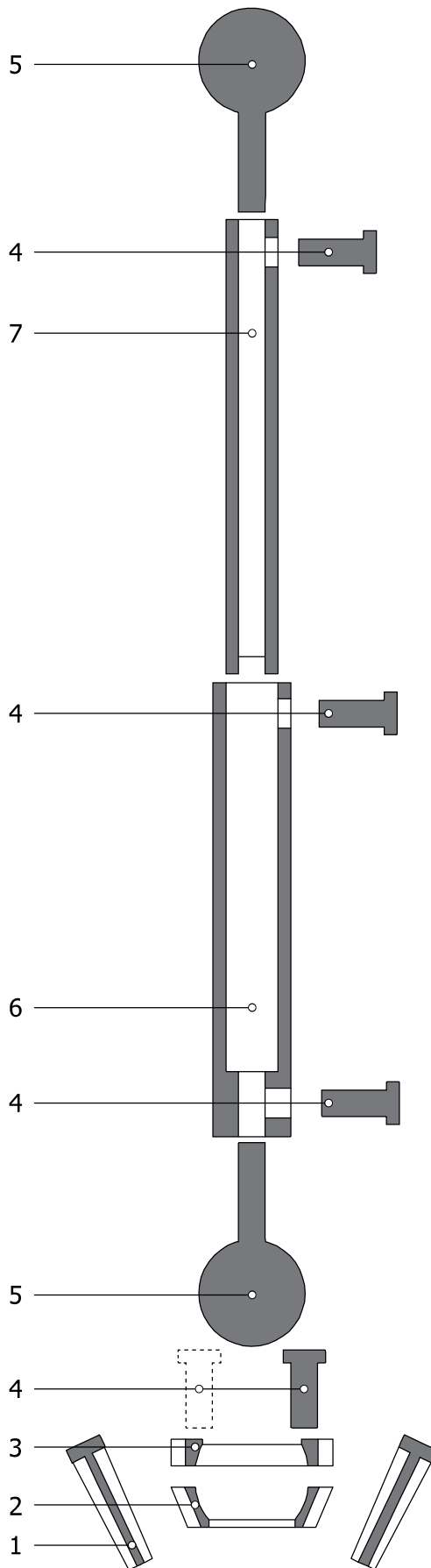
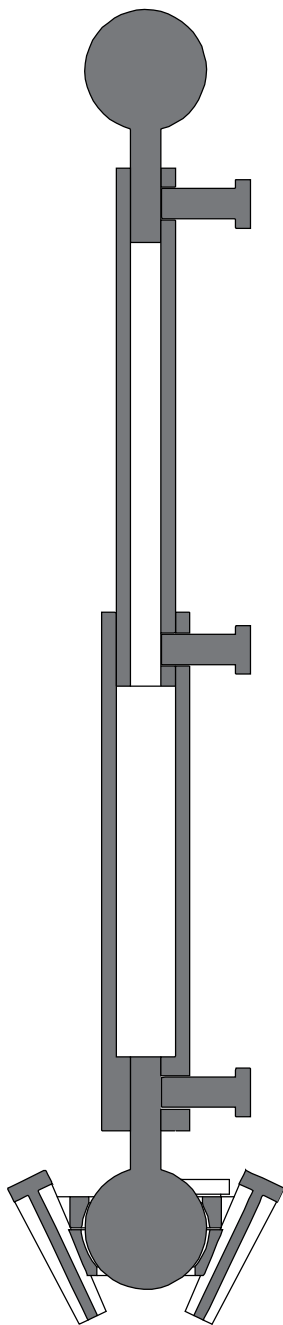


Abb. 3.14.

*Unterschiedliche Verjüngungswinkel der Unterschale - a; und der Klemmkreuze - b*

Dass die Kugelschale zweigeteilt wurde, hat auch den Vorteil, dass verschiedene Oberschalen eingesetzt werden können, und so die Art der Verbindung beeinflusst werden kann. Beispielsweise bietet ein Schlitz in der Oberschale die Möglichkeit, ein Halbgelenk nachzubilden. Die Verbindung des Stabs mit dem Knoten erfolgt hier mit einer Steck-Klemmverbindung. Die Anschlusskugel verfügt hierfür über einen dünnen Rundstab. Auf diesen Anschlussstab wird ein passendes Rundrohr gesteckt und mit einer Schraube festgeklemmt. Ein schematischer Überblick über die Teile dieses Systems ist in Abb. 3.15. dargestellt.

In der vorangegangenen Entwicklungsstufe wurde bereits festgehalten, dass die Anschlusskugeln nicht mit ausreichender Oberflächenqualität druckbar sind. Deswegen wurde in dieser Stufe versucht, 3-D-gedruckte und vorgefertigte Elemente zu kombinieren. Der Anschluss wurde aus einem Messingstab gefertigt, der in die Anschlusskugel aus Holz gesteckt wurde. Durch die Verwendung eines



- 1 - Klemmkreuz
- 2 - Unterschale
- 3 - Oberschale
- 4 - Schraube
- 5 - Kugel mit Anschluss
- 6 - Ausenstab
- 7 - Innenstab

Abb. 3.15.  
Klemmschalen Schema

Messingstäbe konnte der Durchmesser sehr klein gehalten werden, was zur Folge hatte, dass auch die Stäbe sehr dünn gehalten werden konnten (Abschnitt 3.2.2.). Die Schalen und die Klemmkreuze wurden 3-D-gedruckt.

Um die Funktionalität und Handhabung des Systems zu beurteilen, wurden auch mit diesem System einfache Modelle gebaut (Abb. 3.16 bis 3.20.).

Nach dem Modellbau konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es gibt eine deutliche Verbesserung der Festigkeit und Präzision der Einzelemente, weil die Druckausrichtung optimiert werden konnte. Lediglich bei den Klemmkreuzen gab es anfangs Druckprobleme, aber auch diese konnten gelöst werden, indem eine Düse mit kleinerem Durchmesser eingesetzt wurde.
- Die verwendete Steck-Klemm-Verbindung ist zeitaufwendiger als die Bajonettverbindung. Dies konnte aber vereinfacht werden, indem Flügelschrauben mit einer größeren Gewindesteigung eingesetzt wurden
- Die Klemmung der Knotenelemente mit den Klemmkreuzen bietet stabile Verbindungen, die es ermöglichen, Teilknoten zu erstellen. Die Handhabung der Klemmkreuze ist jedoch problematisch, da sie relativ schwer einzufügen und zu entfernen sind. Die Klemmkreuze haben in den gebauten Modellen eine Breite von ca. 3-4 mm. Obwohl die Drucktoleranz relativ klein gehalten werden konnte, wiesen die gedruckten Knoten trotzdem unterschiedliche Größen auf. Eine nachträgliche Änderung der Knotenelemente ist zwar möglich, aber nicht leichtgängig.
- Die Anzahl der Elemente ist viel zu groß, weswegen der Modellbau mit diesem System keine Zeitersparnis erzielen würde.
- Die Verkleinerung der Knoten konnte nicht erzielt werden.

Fazit ist, dass dieser Ansatz zu komplex ist und in weiterer Folge versucht wird, die Anzahl der Elemente, die für die Herstellung eines einzelnen Knotenelements benötigt wird, zu reduzieren. Schraubverbindungen bieten zwar stabile Verbindungen, sie zu montieren ist aber zeitaufwendig, weswegen in weiterer Folge auf sie verzichtet wird. Nachdem in beiden bisherigen Varianten die Knoten zu groß waren, vor allem im Vergleich zu den Stäben, wird untersucht, welche Funktionen des Knotens die Stäbe übernehmen können.



Abb. 3.16.  
Teile des Knotenelements

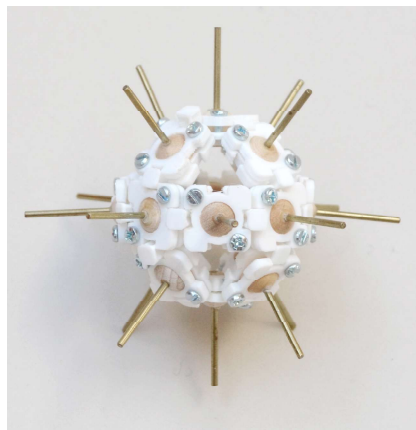


Abb. 3.17.  
Knoten mit 18 Anschlüssen



Abb. 3.18.  
Teilknoten mit 3 Anschlüssen



Abb. 3.19.  
Modell Tetraeder mit einem flexiblen Stab hängend



Abb. 3.20.  
Modell Tetraeder mit einem flexiblen Stab

### 3.2.1.3. Scharnierknoten

Um die Komplexität des Knotens zu reduzieren, wurden mehrere Änderungen durchgeführt. Als Erstes wurde die Verbindungsart zu einer Steckverbindung geändert. Diese bringt den Vorteil, dass die Drehung des Stabs um seine Längsachse irrelevant bleibt, aber keine zusätzliche Klemmung benötigt wird, wie es bei der Steck-Klemmverbindung der Fall war. Die Vorteile der Aufteilung des Knotens in einzelne Knotenelemente werden weiterhin genutzt, aber die weitere Unterteilung (Schalen, Schrauben) wurde verworfen. Das Knotenelement soll nur mehr aus einem Stück bestehen, weswegen die zwei Schalen zu einer Einheit zusammengefügt wurden. Das Anschlusselement wird zu einem Teil des Stabs und ist nicht mehr ein Teil des Knotens. Grundsätzlich ist es eine Verlängerung des Stabs mit vertikalem Schlitz, der das Einfügen des Stabs in das Knotenelement ermöglicht (Abb. 3.24.). Abhängig davon, ob eine steife oder gelenkige Verbindung gewünscht ist, sehen die Anschlusselemente dementsprechend anders aus, beispielsweise ist für gelenkige Verbindungen der untere Teil des Anschlusselements kugelförmig ausgeführt. Auf der oberen Seite befindet sich eine Konsole, über die der Stab mit dem Anschlusselement verbunden wird. Zur Dimensionierung des Schlitzes und zur Formfindung des Anschlusselements wurden mehrere Modelle gedruckt (Abb. 3.21.). Die linken sechs sind Anschlusselemente für fixe Verbindungen und die rechten zwei für gelenkige Verbindungen.

Es wurde festgestellt, dass die notwendige Größe und Form des Schlitzes stark von der Druckauflösung und dem verwendeten Material abhängt.

Die Knotenelemente weisen immer noch eine quadratische Form auf, die nun auf vier Seiten mit einem Stift miteinander verbunden werden. Mit dieser Lösung kann die gleiche Form verwendet





Abb. 3.21.  
Anschlusselemente Steckverbinding

werden, um unterschiedlich viele Elemente in einer Ebene miteinander zu verbinden. Im Vergleich zum vorangegangenen System können Teilknoten nicht so einfach erstellt werden, denn es werden Sonderelemente benötigt (Abb. 3.22.. 3.23.). Abb. 3.24. stellt ein Schema des Systems dar.



Abb. 3.22.  
Sonderelemente Scharnierknoten

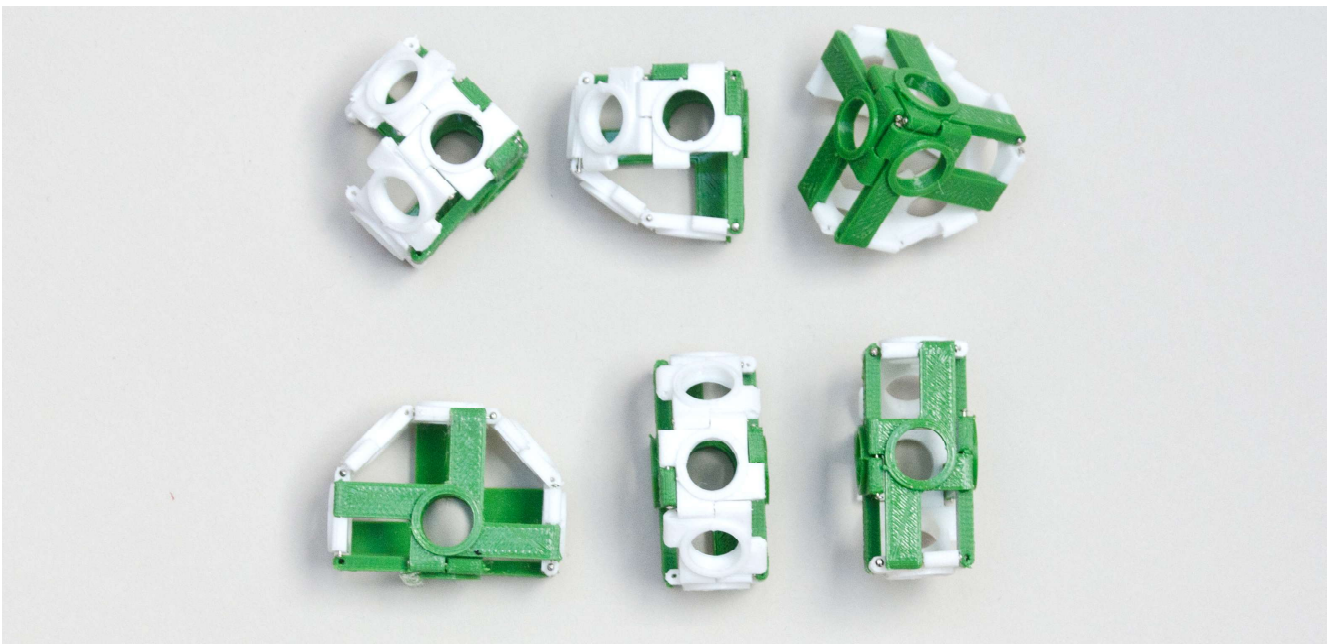
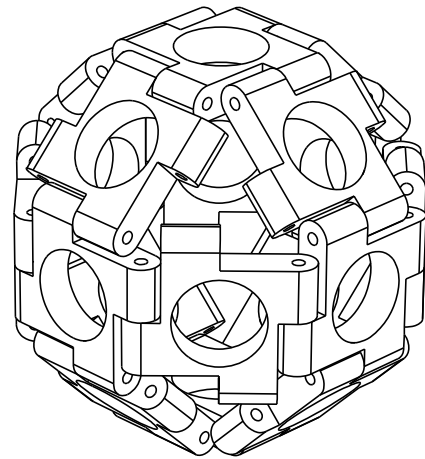
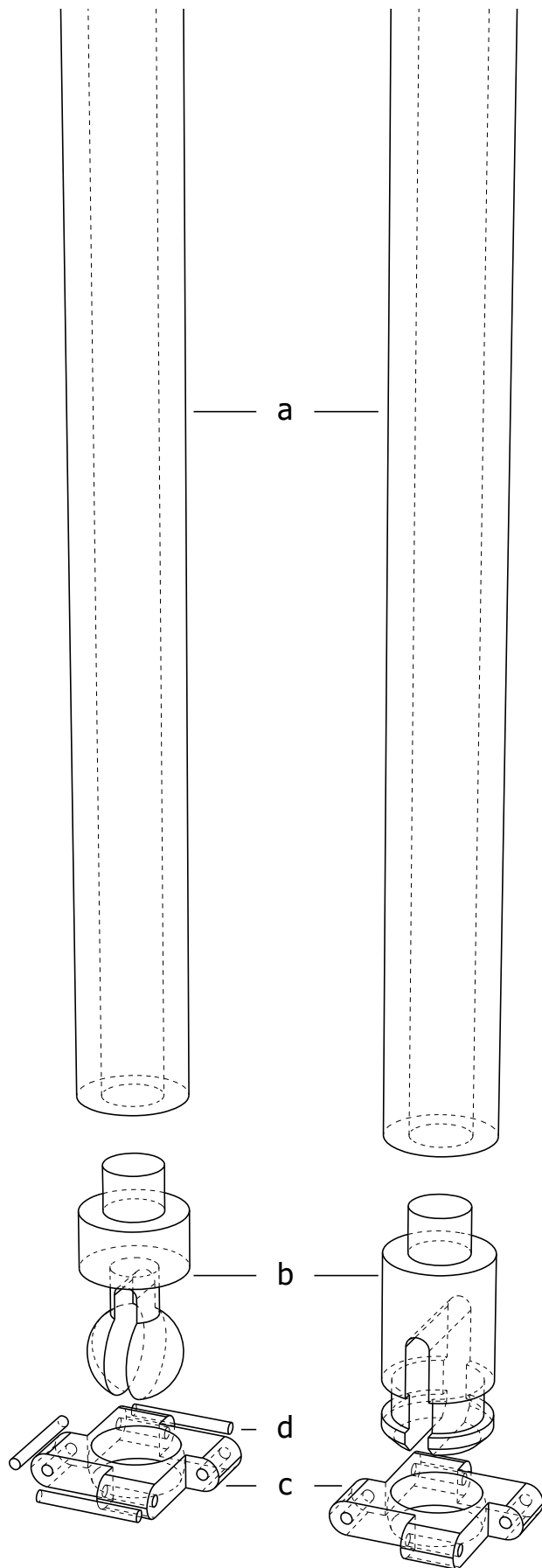
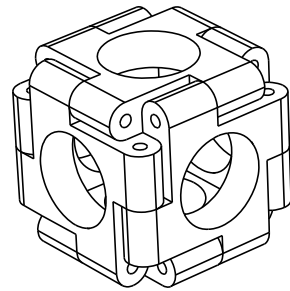


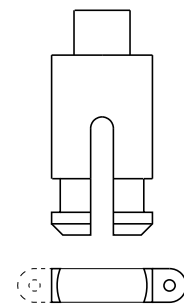
Abb. 3.23.  
Teilknoten Scharnierknoten



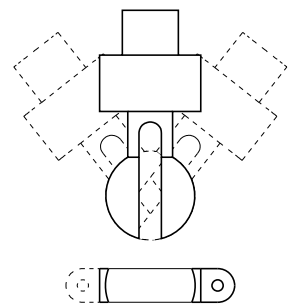
Knoten mit 18 Anschlüssen



Knoten mit 6 Anschlüssen



Orthogonales  
Anschlusselement



Gelenkiges  
Anschlusselement

- a - Stab
- b - Anschlusselement
- c - Knotenelement
- d - Verbindungsstift

Abb. 3.24.  
Scharnierknoten Schema

Die Knotenelemente dieses Systems haben die bisher einfachste Form, dementsprechend waren sie auch am einfachsten zu drucken. Auch die Anchlusselemente konnten erfolgreich gedruckt werden (Abb. 3.25.), lediglich die Verjüngung, die sich über der Kugel beim Element für gelenkige Verbindungen befindet, stellt eine Schwachstelle dar.



Abb. 3.25.  
Anchlusselemente Steckverbindung orthogonal  
3-D-gedruckt



Abb. 3.26.  
Scharnierknoten mit orthogonalen (a) und gelenkigen (b)  
Anchlusselementen

Beim Modellbau zeigte sich, dass die Scharnierknoten eine geringere Belastbarkeit als die Klemmschalen aufweisen. Die scharnierähnliche Verbindung der Knotenelemente ist verglichen mit den Klemmkreuzen wesentlich lockerer, jedoch wäre sie innerhalb der Toleranzgrenzen des Systems. Die Verbindung des Stabs mit dem Knoten konnte allerdings nicht fest genug ausgeführt werden. Dieses Problem tritt bei relativ kleinen Knoten auf - eine Vergrößerung des Maßstabs könnte dieses Problem vermutlich lösen, allerdings wurde das nicht untersucht, weil es für die Entwicklung eines Modellbaukastens nicht zielführend ist. Eine weitere Art der Verbindung des Stabs wurde deswegen getestet. Die Steckverbindung wurde zusätzlich mit einer Federverriegelung ausgestattet (Abb 3.27. - 3.31.). Leider konnte keine Verbesserung festgestellt werden.



Abb. 3.27.  
Anchlusselement mit Federverriegelung

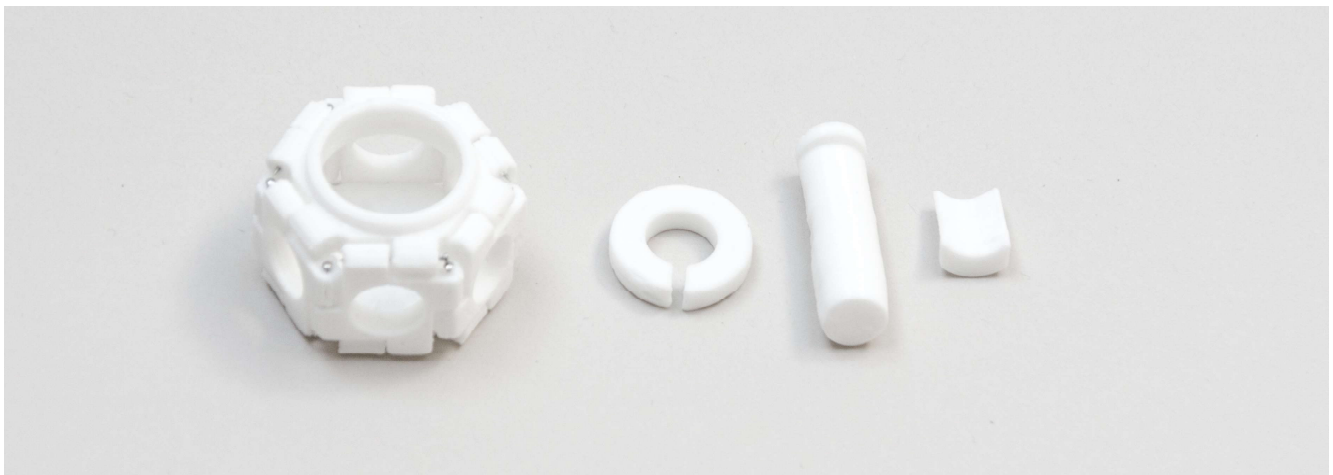


Abb. 3.28.  
Scharnierknoten sonderform mit einem Modell des Anschlusses mit Federverriegelung; gelenkige Ausführung



Abb. 3.29.  
Scharnierknoten, Anschlusselement mit Federverriegelung, gelenkig



Abb. 3.30.  
Scharnierknoten, Anschlusselement mit Federverriegelung, gelenkig

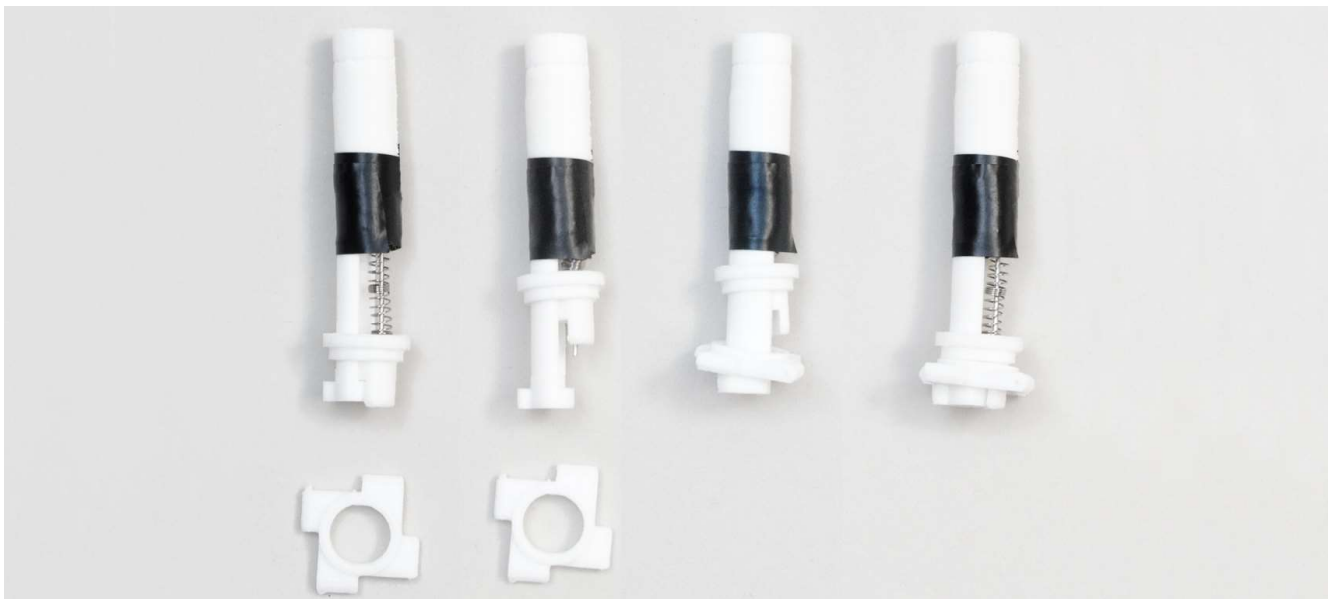


Abb. 3.31.  
Anschlusselemente Federverriegelung

### 3.2.2. Stäbe

Während der Entwicklung der verschiedenen Bausätze spielte die Entwicklung der Stäbe eine zweitrangige Rolle, trotzdem wurden sie immer mitbearbeitet. Das Ziel der Entwicklung ist es, die stufenlose Längenverstellung der Stäbe zu ermöglichen.

Die Form der Stabenden wird durch die gewählte Verbindungsart mit dem Knoten vorgegeben. Der Stab an sich kann theoretisch jede Form aufweisen, jedoch wurde ein runder Querschnitt als Ausgangsform gewählt. Die runde Form setzt keine bestimmte Orientierung der Stäbe zum Knoten voraus und ist somit rotationsunabhängig. Zusätzlich bestehen die Stäbe aus mindestens zwei Teilen, da sie längenverstellbar sein sollen, was auch für den runden Querschnitt spricht. Da die Verwendung eines 3-D-Druckers eine wesentliche Randbedingung bei der Entwicklung des Modellbausatzes darstellt, war zunächst die Druckbarkeit der Stäbe eine zentrale Frage. Nachdem die Herstellung von Rohren mit kleinem Durchmesser problematisch ist, wurden zunächst einige Stäbe gedruckt, um die Belastbarkeit gedruckter Stäbe im Vergleich zu anders hergestellten Stäben zu untersuchen. Um die Festigkeit zu maximieren wurden sie liegend auf dem Bett gedruckt und nachdem der Druck runder Rohre nicht erfolgreich war, wurden rechteckförmige Stäbe gedruckt (Abb. 3.32.). Der 3-D-Druck von Stäben hätte zwar den Vorteil, dass die Verbindungselemente an den Enden, bzw. die Teile, die für die Längeneinstellung benötigt werden, im gleichen Arbeitsschritt hergestellt werden können, die Festigkeit der gedruckten Elemente war jedoch bedeutend geringer im Vergleich zu Halbzeugen, die aus Kunststoff, Metall oder Holz vorgefertigt wurden. Aus diesem Grund wurde entschieden, die Stäbe nicht 3-D zu drucken.

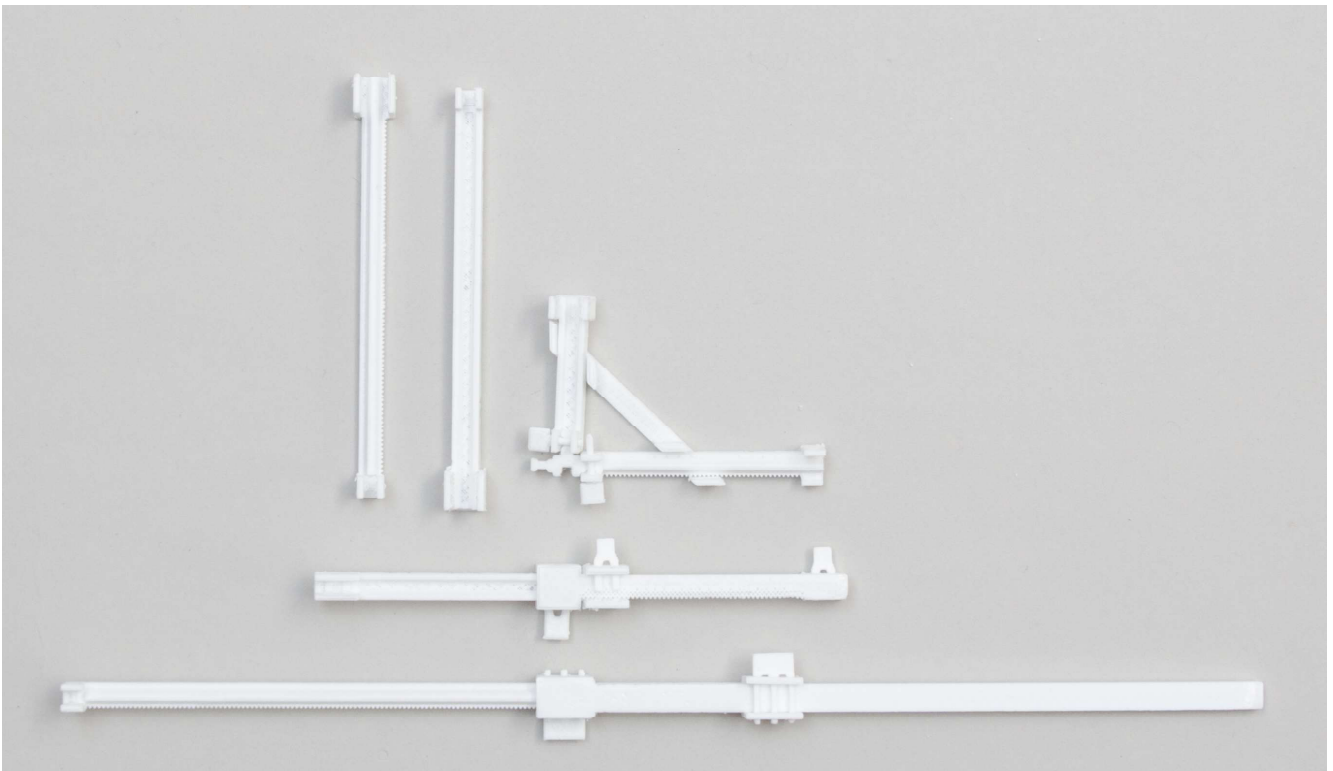


Abb. 3.32.  
3-D-gedruckte längenverstellbare Stäbe; Modell zur Ermittlung der Vor- und Nachteile gedruckter Stäbe

Prinzipiell kann gesagt werden, dass bei der Entwicklung der Stäbe der gleiche Ansatz, jedoch in unterschiedlichen Ausführungen, verfolgt wurde. Zwei komplementäre Rohre, oder ein Rohr und ein Stab, der in das Rohr passt, bilden die Basis des Stabs. Die Verbindung der zwei Teile und damit auch die Längeneinstellung werden mithilfe eines Klemmadapters durchgeführt. Hierfür wurden verschiedene Klemmadapter getestet.

Die ersten Modelle entstanden mit Schlauchschellen (Abb. 3.33.). Die Schelle befindet sich über dem Außenrohr in das beidseitig ein Schlitz eingeschnitten ist. So wird das äußere Rohr auf das innere gedrückt und die Teile werden dadurch verbunden. Diese Schellen haben den Vorteil, dass keine zusätzlichen Elemente, wie beispielsweise Schrauben, bedient werden müssen. Sie haben jedoch den Nachteil, dass die Klemmkraft gering ist und Metallrohre oder generell Rohre mit sehr glatten Oberflächen nicht ausreichend geklemmt werden können.



Abb. 3.33.  
Längenverstellbare Stäbe, Bajonettanschluss, Schlauchschelle als Klemmelement, Außenrohr Kunststoff

Weiters kamen 3-D-gedruckte Klemmadapter zum Einsatz, die mithilfe einer Schraube geklemmt werden. In der ersten Variante wurde ein Adapter gedruckt, mit dem die Schraube die zwei Teile klemmt, indem sie orthogonal auf den Stab geschraubt wird. Bei Kunststoffrohren drückte die Schraube



Abb. 3.34.  
Längenverstellbare Stäbe, Klemmelement mit orthogonal auf den Stab ausgerichteter Schraube;  
a - Steck-Klemm-Verbindung, Messingrohre; b - Steckverbindung, Kunststoffrohre

gegen das Außenrohr, bei Metallstäben wurde das Außenrohr angebohrt, da es keine Verformung zulässt und die Schraube drückte auf das Innenrohr (Abb. 3.34.). Bei dieser Variante, egal ob mit Mutter oder ohne, wurde beobachtet, dass der Adapter bereits nach wenigen Klemmungen im Bereich der Schraube brach, sogar bei einer Wandstärke von 2 mm und einer M3 Schraube. Der Grund ist auch hier die Anisotropie des Herstellungsverfahrens, weil die Klemmkraft der Schraube normal zur Druckebene wirkt.

Nachdem der Adapter wegen seiner Form nicht anders auf dem Bett ausgerichtet werden kann, ohne dabei weitere Einbußen in Kauf zu nehmen, wurde der Klemmadapter so abgeändert, dass die Schraube nicht mehr auf den Stab wirkt, sondern zwei Laschen des Adapters zusammengezogen und die zwei Stäbe geklemmt werden (Abb. 3.35. - 3.36.). Hiermit entsteht auch eine deutlich stärkere Klemmung der Stäbe, ohne Materialversagen des 3-D-gedruckten Adapters. Diese Art der Klemme hat auf der Innenseite zwei verschiedene Durchmesser, mit denen jeweils das Innen- bzw. Außenrohr geklemmt werden. Auf diese Weise ist keine zusätzliche Bearbeitung der Stäbe (Bohren) notwendig. Die Form dieser Klemme ist einfach mit einem FDM-Drucker herstellbar. Welche Form und Größe der Schrauben und Muttern verwendet werden, bleibt dem Benutzer überlassen, die kleinste Form kann mit einer Viereckmutter und einer Zylinderkopfschraube erreicht werden.

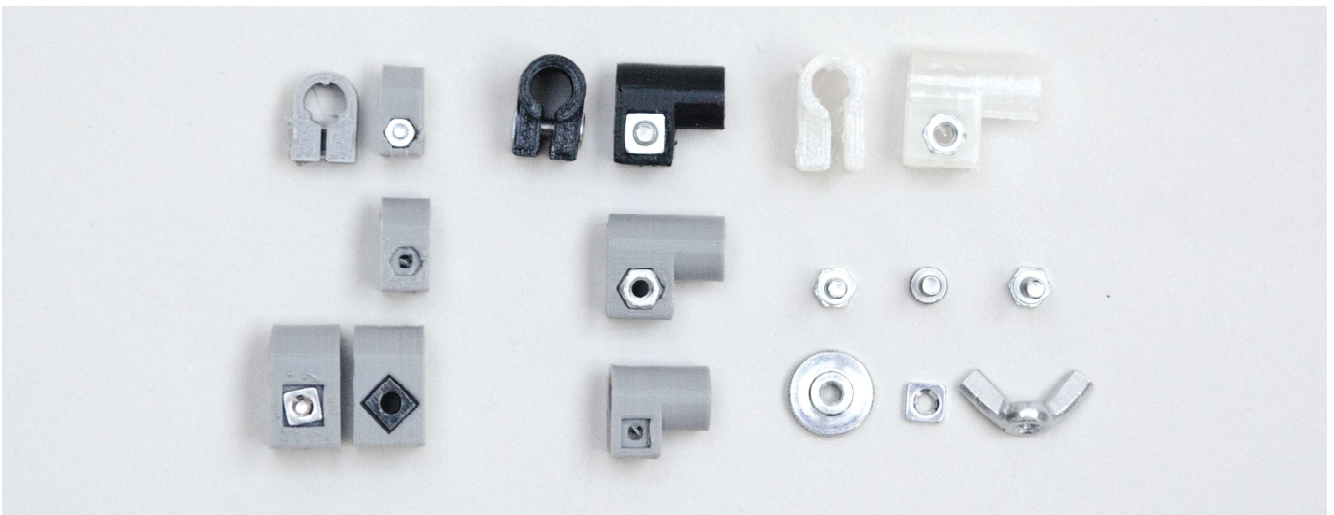


Abb. 3.35.  
3-D-gedruckte Stabklemmen in verschiedenen Größen und Formen, verschiedene Schrauben und Muttern,

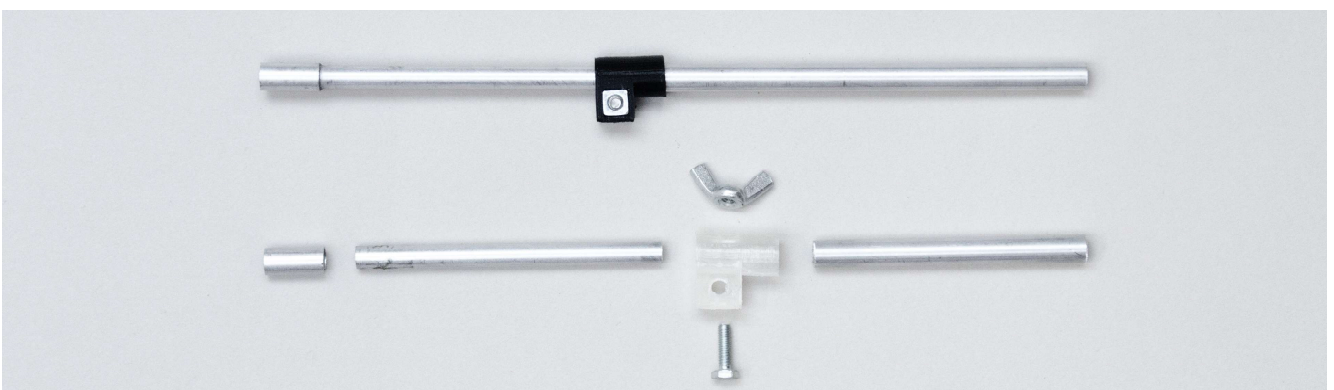


Abb. 3.36.  
Längenverstellbarer Stab, Klemmelement mit Laschen

Für den Fall, dass man zur Gänze auf Adapter verzichten möchte, trotzdem aber die Flexibilität der Längen Anpassung behalten möchte, kann das überlappende Ende des inneren Rohres so verformt werden, dass es gegen die Innenwand des Außenrohres drückt (Abb. 3.37.). Dadurch entsteht Reibung, die es ermöglicht ohne weitere Elemente die Länge des Stabs anzupassen. Diese Verbindung ist nicht besonders belastbar und die Klemmwirkung lässt mit der Zeit nach, kann aber jederzeit durch eine weitere Verformung des Innenrohres wiederhergestellt werden. Handelt es sich um ein reines Präsentationsmodell, bei dem keine weiteren Veränderungen benötigt werden, gibt es die Möglichkeit, die Stäbe aus vorgefertigten Rohren passend zuzuschneiden.

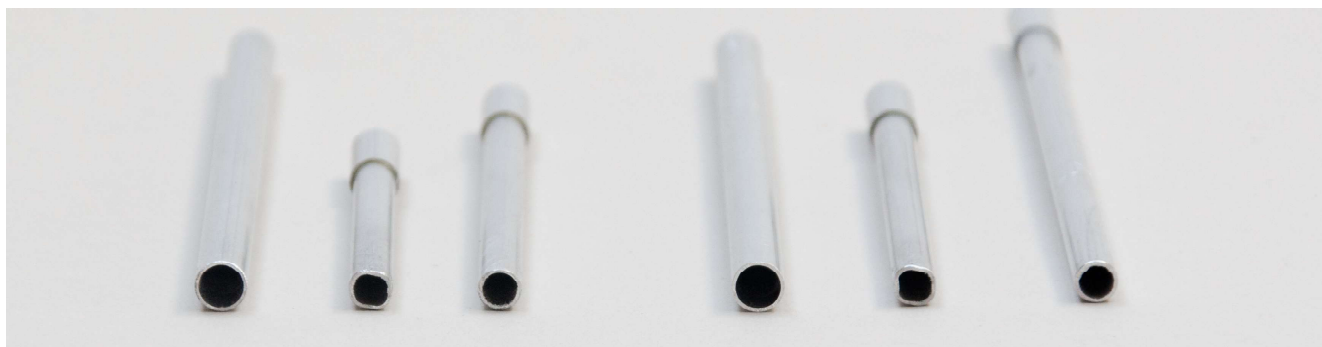


Abb. 3.37.

Längenverstellbarer Stab ohne Klemme, mit verformtem Innenrohrende; von links nach rechts jeweils - Außenrohr, Innenrohr verformt, Innenrohr nicht verformt

Durch die Längenverstellung der Stäbe ist es möglich, mit nur 4 verschiedenen Stäben Stablängen in einem Bereich zwischen ungefähr 6 cm und 35 cm abzudecken (Abb. 3.38). Die genauen Maße der Stäbe sind abhängig von den genauen Maßen der Klammern und der Art der Verbindung zwischen Knoten und Stab und deren Größe. Um die Längeneinstellung der Stäbe zu erleichtern, kann das Innenrohr über eine Längenskala, wie in Abb. 3.39. dargestellt, verfügen.

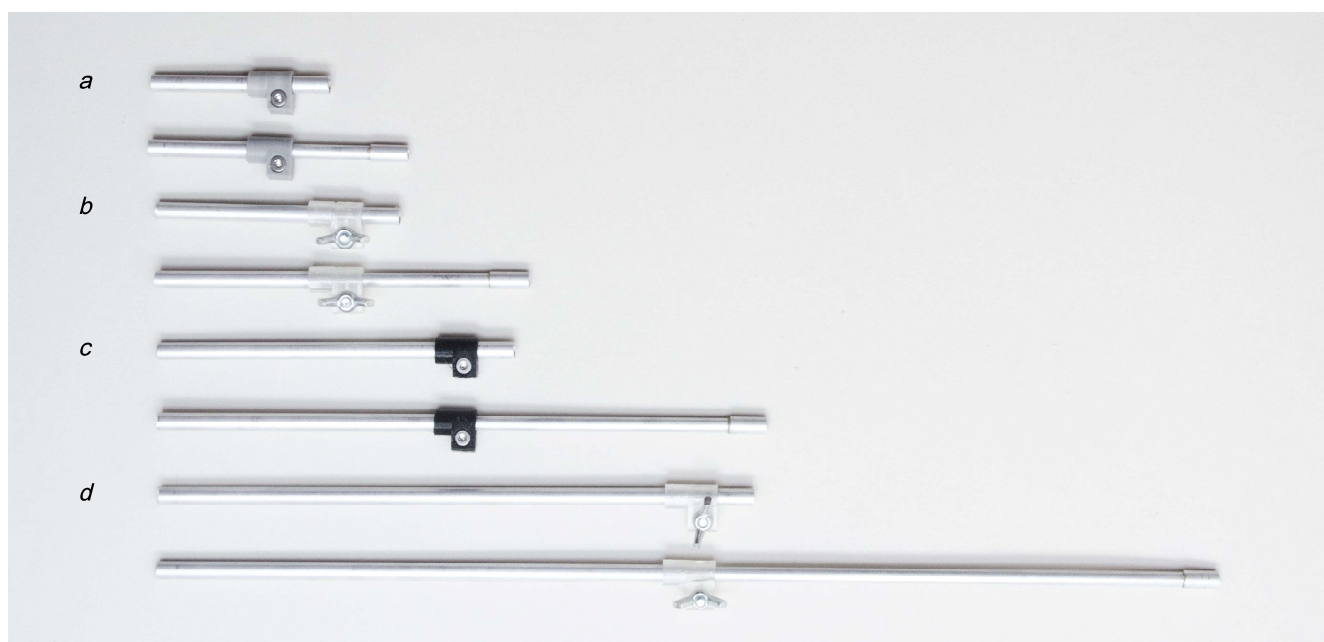


Abb. 3.38.

Vier verschiedene Stablängen: a - 60-85 mm, b - 80-125 mm, c - 120-205 mm, d - 200-355 mm



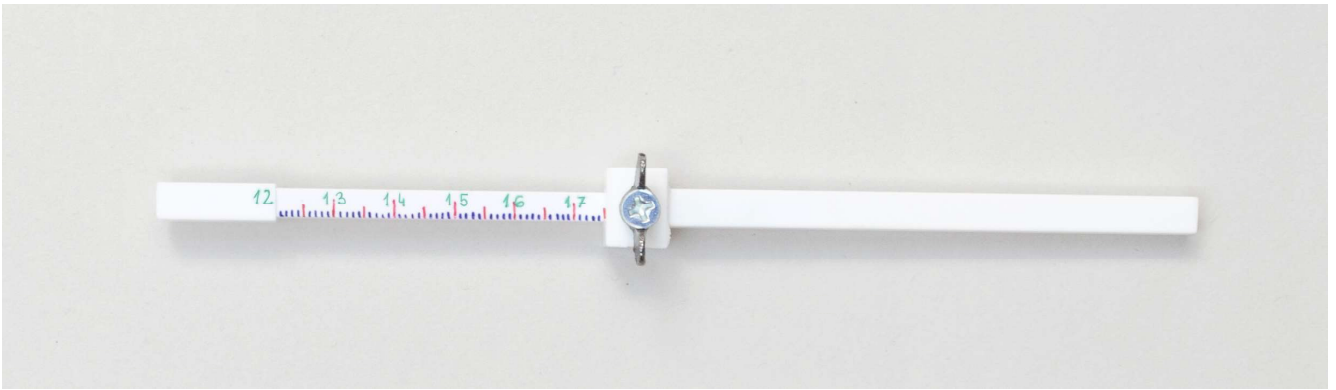


Abb. 3.39.  
Längenskala am Innenrohr

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die Stäbe aus verschiedenen Materialien hergestellt werden können und die Längeneinstellung der Stäbe mit einem 3-D-druckbaren Adapter leicht umzusetzen ist. Für die Herstellung von Präsentationsmodellen können die längenverstellbaren Stäbe durch passend zugeschnittene Rohre ausgetauscht werden, nachdem die Entwurfsphase abgeschlossen ist. Prinzipiell können in diesem Fall auch andere Rohrquerschnitte verwendet werden, sofern sie mit der Art der Verbindung mit dem Knoten kompatibel sind. In Abb. 3.40. ist ein Überblick ausgewählter Stabmodelle, die erfolgreich erstellt wurden, ersichtlich.

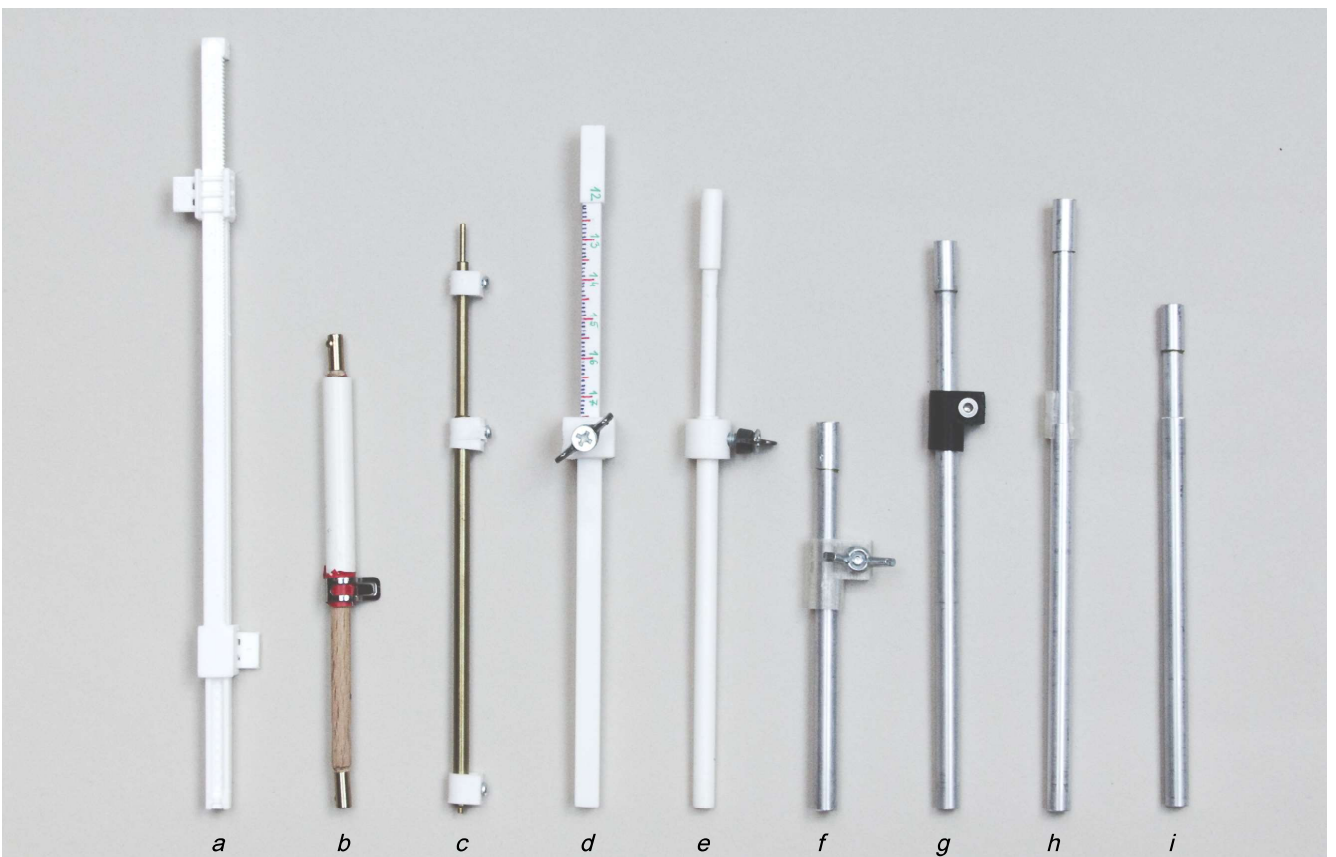


Abb. 3.40.  
Längenverstellbare Stäbe: a - 3-D-gedruckt rechteckig, b - Kunststoff und Holz mit Schlauchschelle, c - Messingrohre mit Schraubklemmen, d - Kunststoffrohre mit Schraubklemme rechteckig, e - Kunststoffrohre mit Schraubklemme rund, f - Alurohre mit Laschenklemme und Flügelmutter, g - Alurohre mit Laschenklemme und versenkter Schraube, h - Alurohre mit Sicherungsring, i - Alurohre mit verformten Innenrohr

### 3.2.3. Fazit Modellbaukasten

Die Entwicklung eines konventionellen Tragwerksmodellbaukastens und deren Herstellung im FDM-Verfahren erwies sich als komplizierter als anfangs angenommen. Eine große Rolle spielten hierbei die Systemeinschränkungen der Fused-Deposition-Modelling-Technologie. Diese wurden aufgrund fehlender Erfahrung anfangs falsch eingeschätzt, somit resultierten die verfolgten Ansätze immer in zu großen Elementen. Die Aufteilung der Knoten in einzelne Elemente war zwar vorteilhaft für die Qualität der hergestellten Elemente und ermöglichte das Anpassen der Anzahl der Elemente pro Knoten, jedoch in einem vorgegebenen Raster. Daraus resultiert, dass die Anschlüsse nicht dort positioniert werden können, wo sie tatsächlich gebraucht werden. Zudem entsteht eine Exzentrizität, die eine Verfälschung des Modells zur Folge hat, die so nicht akzeptiert werden kann. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Knoten zu viele Aufgaben auf einmal übernehmen mussten und das ist in der Form eines Universalbaukastens nicht möglich. Eine Übersicht der Entwicklungsstufen und deren Vor- und Nachteile ist in Abb. 3.41. zusammengefasst dargestellt. Die Aufgabenstellung wurde unter Einbeziehung der gewonnenen Erkenntnisse neu evaluiert. Zur Wiederholung, die Hauptziele dieser Arbeit sind:

- Den Modellbauprozess zu beschleunigen
- Die Vorteile der Herstellung mit einem 3-D-Drucker zu nutzen, mit Fokus auf die FDM-Technologie
- Material und Zeit während dem Entwurfsprozess einzusparen, indem Veränderungen am Modell durchgeführt oder Teile des Modells wiederverwertet werden können

Der Hauptvorteil des 3-D-Druckens ist die Möglichkeit, sehr rasch Werkstücke zu drucken, ohne vorab Negativformen herzustellen. Möchte man Knoten drucken, die möglichst klein sind, dürfen sie keine kleinen Strukturen aufweisen, wie es beispielsweise beim Bajonettknoten der Fall war, da die kleinsten Teile eines gedruckten Werkstückes den Maßstab festlegen. Weiters kann der Knoten verkleinert werden, indem er nur die Anschlüsse bietet, die tatsächlich benötigt werden. Durch die Herstellung des Knotens im Ganzen fallen zusätzlich alle Verbindungsstellen weg, was wiederum den Knoten noch weiter verkleinert. Das alles würde jedoch bedeuten, dass jeder Knoten individualisiert werden muss, damit er auch tatsächlich so klein wie möglich gehalten wird. Die Aufgabe würde in diesem Fall bedeuten, den Prozess der Individualisierung zu vereinfachen. Auf diese Weise entsteht also eine Art 'digitaler Modellbaukasten'. Dieser Ansatz und die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden in Abschnitt 3.3. beschrieben.

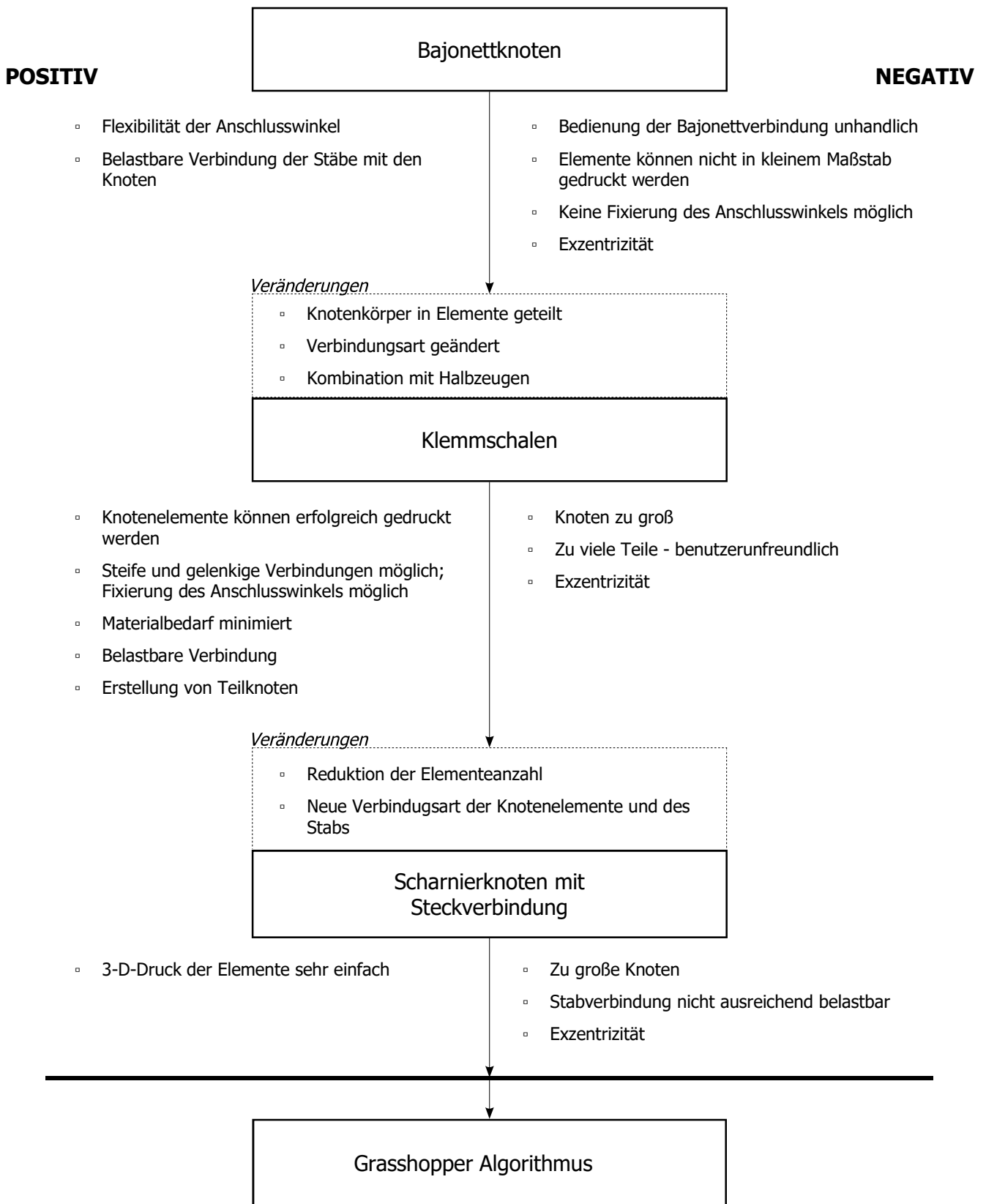


Abb.3.41.  
Schematischer Überblick der Entwicklungsstufen

### 3.3. Ansatz 2: Digitaler Modellbaukasten

Der bisher verfolgte Ansatz konnte die gesetzten Anforderungen nicht erfüllen, was dazu führte, das Konzept des Modellbaukastens zu überdenken und neu zu interpretieren. Die Probleme, die während der Entwicklung entstanden, sind darauf zurückzuführen, dass der Knoten zu viele Funktionen erfüllen musste, weshalb die Multifunktionalität des Knotens auf die Funktionen, die tatsächlich benötigt werden, reduziert wurde. Dadurch entsteht jedoch ein individualisierter Knoten, der nicht beliebig verändert werden kann. Eine der Hauptanforderungen ist, dass am Modell Veränderungen vorgenommen werden können. Dies bezieht sich jedoch nicht direkt auf die Veränderbarkeit der Knoten, sondern auf das System. Wenn also die Knoten austauschbar sind, kann diese Anforderung erfüllt werden. Zudem bedeutet es, dass Teile des Modells wiederverwertbar sind und somit Material und Zeit beim Modellbauprozess gespart werden können.

Nachdem die Knoten für jedes Modell gedruckt werden, können sie auch besser an das Modell angepasst werden. Material und Farbe können vor dem Druck gewählt werden, aber auch die Form des Knotens soll möglichst unauffällig sein. Die Steckverbindung ist hierfür eine gute Lösung, da sie nach dem Verbinden zur Gänze verschwindet. Nach mehreren Entwurfsiterationen entstand ein Modellbausystem mit folgenden Merkmalen:

- Der Knoten entsteht aus der Verlängerung der Stäbe.
- Zylinderförmige Anschlussstifte ermöglichen den Stabanschluss.
- Die Stäbe werden aus runden Rohren hergestellt.
- Um die Knoten nach dem Druck richtig zuzuordnen, müssen sie markiert werden. Hierfür wird ein Zahlenmarker an einem Ende des Anschlussstiftes konstruiert, der nach der Montage nicht sichtbar ist.
- Die Längen der Knotenschenkel werden anhand der Winkel, unter denen die Stabachsen zueinander stehen, berechnet.

Zwar bietet der 3-D-Druck individualisierter Knoten eine Vielzahl an Vorteilen, ob es den Modellbauprozess an sich beschleunigt, hängt davon ab, wie die Individualisierung vorgenommen wird. Schafft man es, den Prozess der Knotenherstellung zu automatisieren, kann eine Beschleunigung des Modellbauprozesses erzielt werden.

Dies wurde durch einen Algorithmus gelöst, der ausgehend von einem Linienmodell des Tragwerks, unter Vorgabe anpassbarer Parameter, vollautomatisch 3-D-druckbare digitale Modelle der Knoten erzeugt. Die Elemente des neuen Knotens sowie die Parameter, die bei der Verwendung des Algorithmus konfiguriert werden können, sind in Abb. 3.42. grafisch festgehalten. Folgende Parameter können angepasst werden:

- a - Durchmesser des Stabs, des Knotenschenkels und der Abschlusskugel
- b - Durchmesser des Anschlussstifts
- c - Länge des Anschlussstifts
- d - Schriftgröße des Knotenmarkers
- e - Mindestabstand zwischen den Knoten

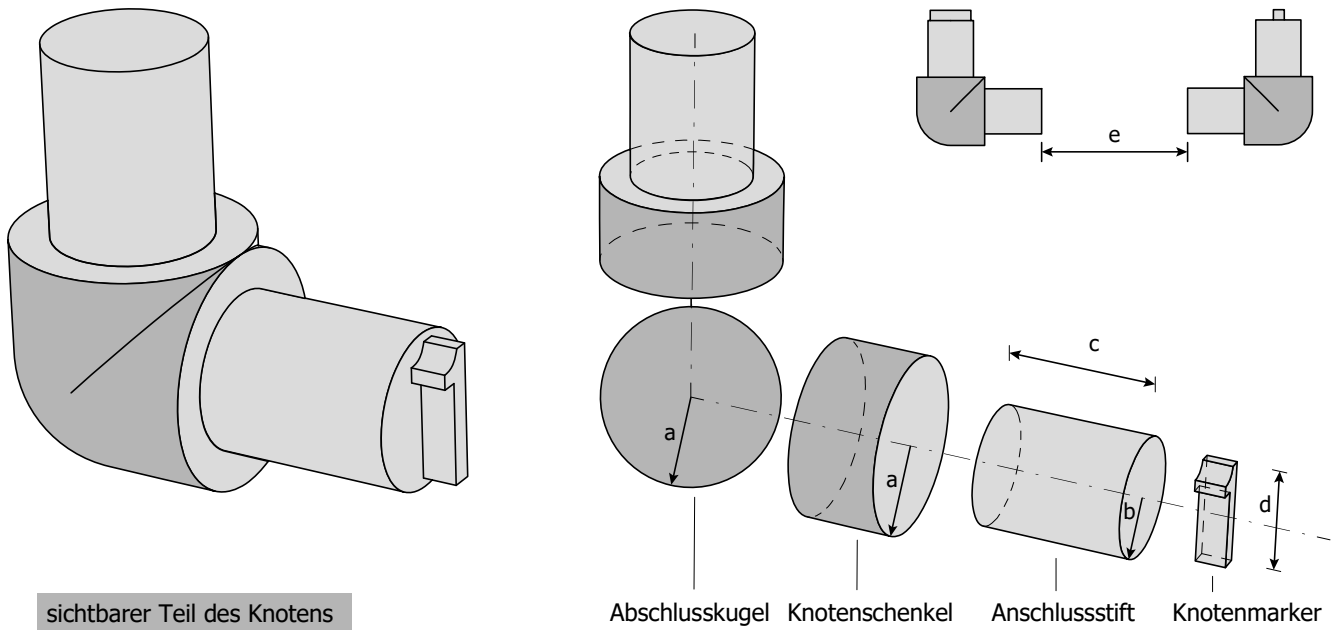


Abb. 3.42.  
Elemente und Parameter eines Knotens

Einen Prozess zu automatisieren bedeutet, eine standardisierte Abfolge von Schritten zu definieren, die zum gewünschten Ergebnis führen, also einen Algorithmus zu erstellen. Rhino<sup>2</sup> und Grasshopper<sup>3</sup> bieten eine Umgebung und Programmiersprache, um einen CAD-Algorithmus zu erstellen. Rhino ist eine CAD-Software zur Erstellung digitaler 3-D-Objekte. Die Objekte werden in Rhino direkt modelliert. Grasshopper hingegen ist eine grafische Programmiersprache, die es ermöglicht, innerhalb der Rhino-Umgebung über Algorithmen 3-D-Objekte zu generieren und diese über Parameter zu manipulieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe 'direktes Modellieren' und 'algorithmisches Modellieren' folgendermaßen unterschieden:

- Direktes Modellieren - ein Modell entsteht durch direkte Manipulation der Punkte, Linien und Flächen und kann auch nur so geändert werden.
- Algorithmisches Modellieren - der Konstruktionsalgorithmus entsteht unabhängig vom Input und kann auf verschiedene Inputs angewendet werden. Die Manipulation des Modells durch Parameter kann im Algorithmus vorgesehen werden.



Abb. 3.43.  
Modell eines Tetraeders mit 3-D-gedruckten Knoten

III - 2    www.rhino3d.com, 20.07.2020  
III - 3    www.grasshopper3d.com, 20.07.2020

Um den Unterschied zwischen direktem und algorithmischem Modellieren besser zu verstehen und zu erklären, wie ein Konstruktionsprozess aus Rhino in Grasshopper umgewandelt werden kann, werden die zwei Prozesse anhand eines Beispiels erklärt. Die Anforderungen an das Modellbausystem werden in diesem Beispiel vernachlässigt und einfache Knoten für einen Tetraeder erstellt. Das fertige Modell ist in Abb. 3.43. abgebildet.

In Abb. 3.44. wird der Ablauf in Rhino festgehalten:

- a Die Stabachsen werden gezeichnet.
- b In den Endpunkten der Stäbe werden Kreise normal zur Stabachse konstruiert.
- c Die Kreise werden entlang der Stabachse extrudiert.
- d, e Die planaren Öffnungen an den Enden werden geschlossen.
- f, g An allen Knotenpunkten werden Kugeln mit dem Durchmesser des Stabs konstruiert, um einen verrundeten Abschluss des Knotens zu erzielen.
- h Kugeln, die die Länge der Knotenschenkel bestimmen, werden konstruiert.
- i Die Schnittmenge dieser Kugeln und der Stäbe wird ermittelt.
- j - l Die Schritte b-i werden für dünnere Stäbe wiederholt - diese bilden die Anschlussstifte.
- m Die Stablängen werden ermittelt.

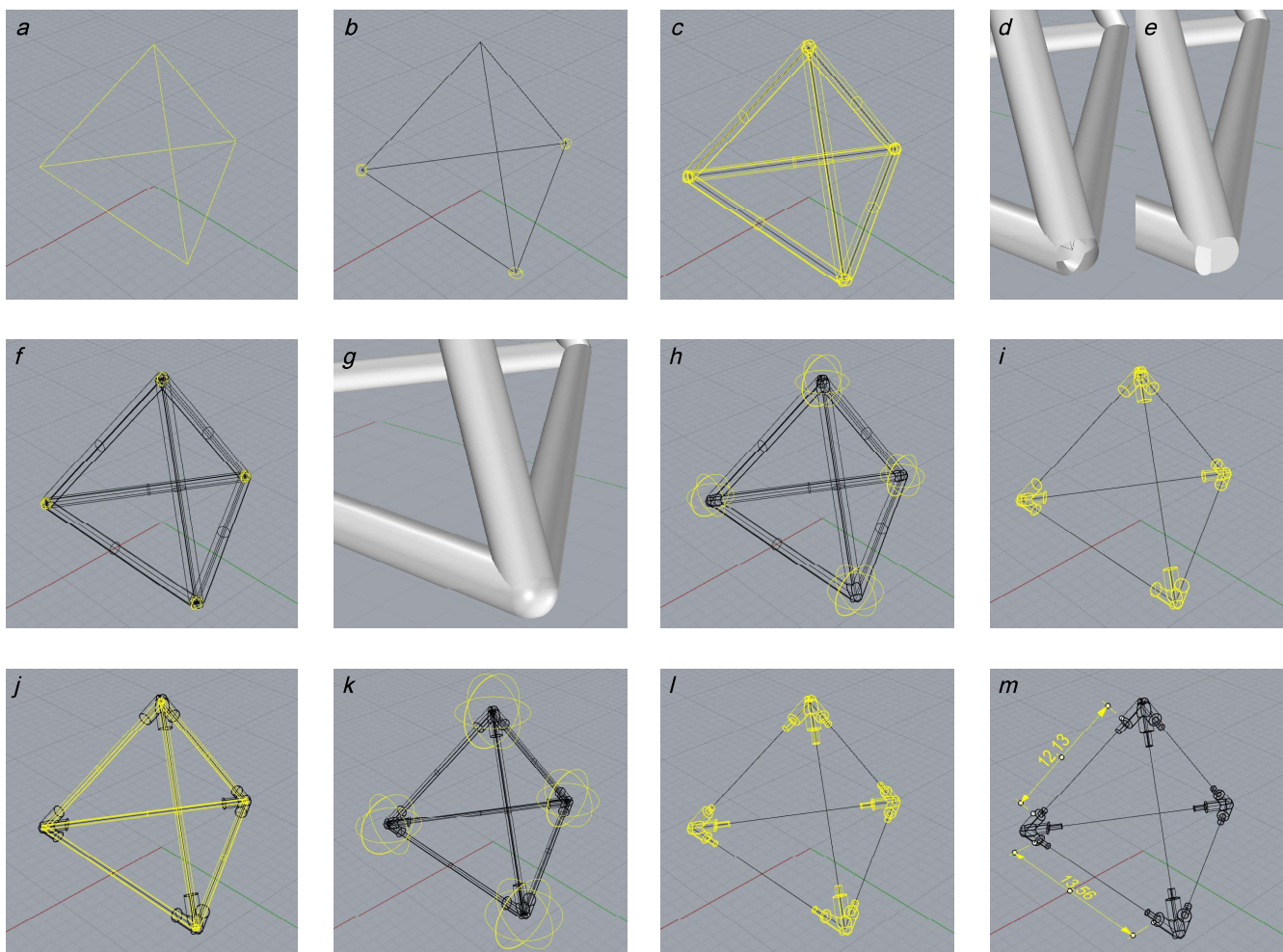


Abb. 3.44.  
Ablauf des direkten Modellierens in Rhino am Beispiel des Tetraeders aus Abb. 3.43.

In Grasshopper sind für dieselbe Konstruktion folgende Schritte notwendig (Abb.3.45.):

- a Die Stabachsen werden in Rhino gezeichnet.
- b Die Achsen werden in Grasshopper verlinkt.
- c Die Linien werden in einzelne Segmente aufgespalten um sicherzugehen, dass keine Polylinien verlinkt wurden. Doppelte Punkte werden gelöscht.
- d Rohre mit Schenkeldurchmesser werden aufgezogen; die Enden werden dabei abgerundet.
- e Kugeln zur Ermittlung der Schenkellängen werden konstruiert.
- f Rohre mit Anschlussstiftdurchmesser werden extrudiert; die Enden werden dabei abgerundet.
- g Kugeln zur Ermittlung der Anschlussstiftlänge werden konstruiert.
- h Die erste Schnittmenge wird ermittelt (Knotenschenkel).
- i Die zweite Schnittmenge wird ermittelt (Anschlussstifte).
- j Die zwei Schnittmengen werden zusammengefügt.
- k Die Stablängen werden automatisch berechnet.

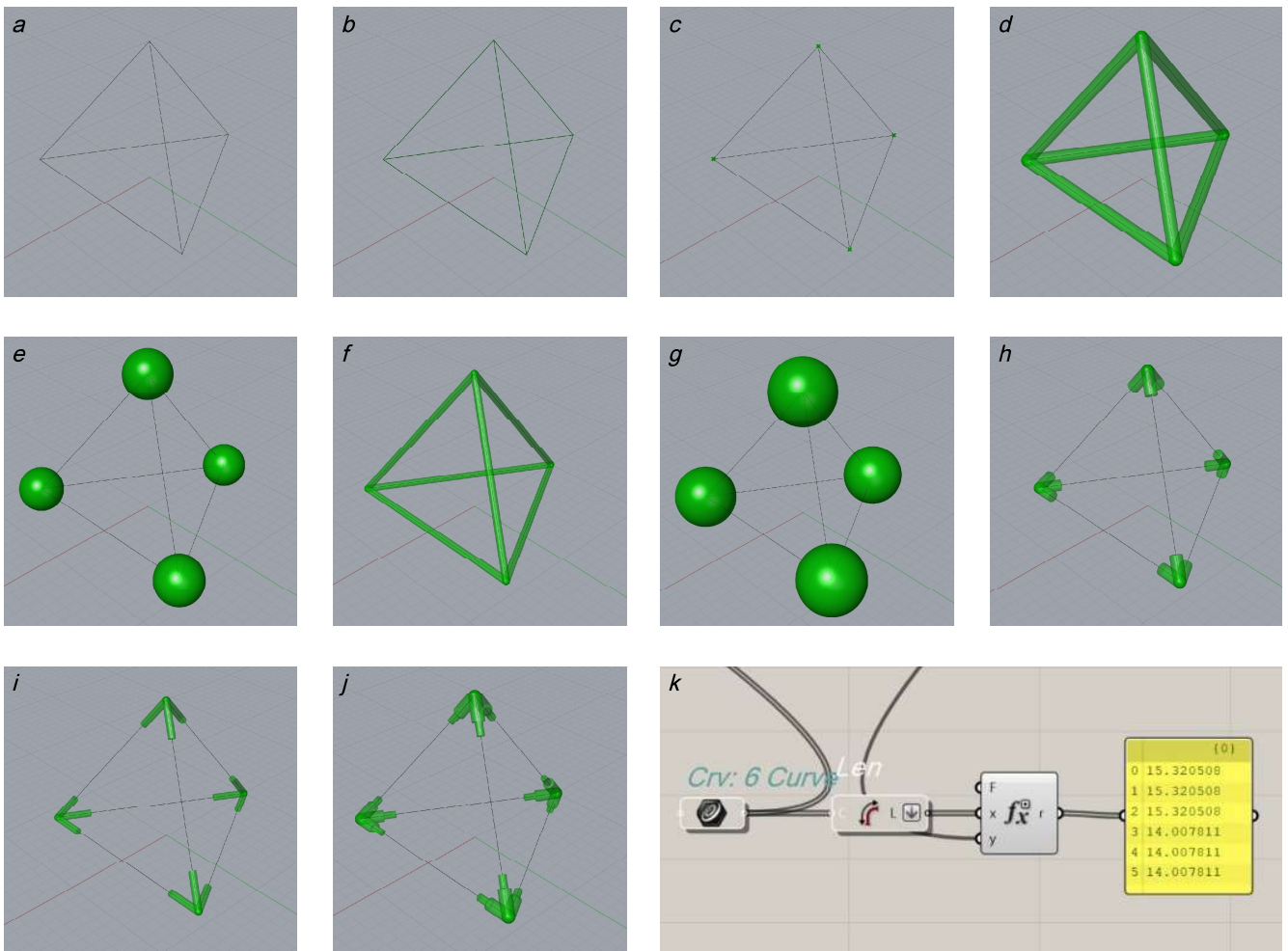


Abb. 3.45.

Ablauf des algorithmischen Modellierens mit Grasshopper am Beispiel des Tetraeders aus Abb. 3.43.

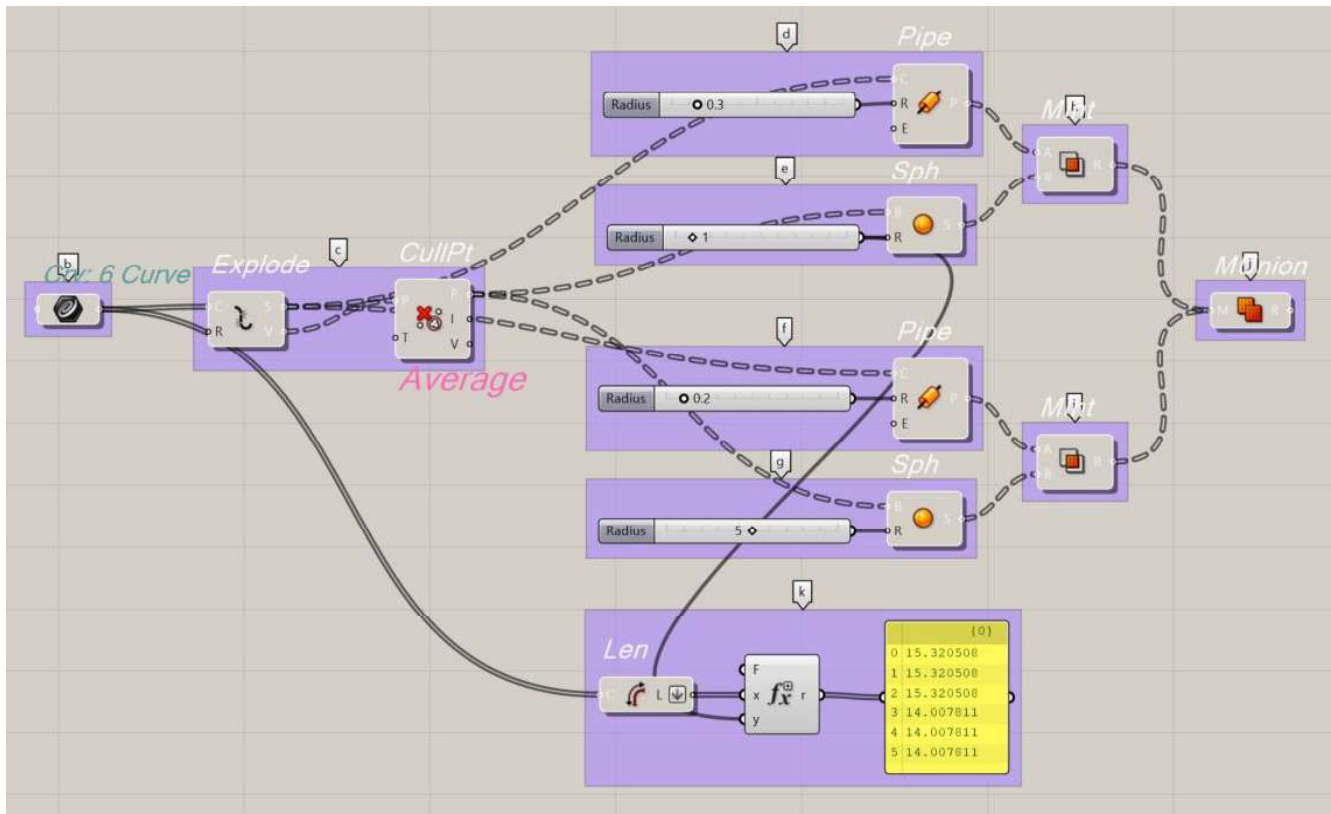


Abb. 3.46.  
Grasshopper Algorithmus des Beispiels 'Tetraeder'

In Abb. 3.46. ist der zuvor beschriebene einfache Algorithmus abgebildet. Die Inputs in diesem Beispiel sind nur die Stabachsen des Tetraeders, die mit der Komponente 'Curve' verlinkt sind. Die Parameter, die manipuliert werden können, sind:

- Stabdurchmesser
- Anschlussdurchmesser
- Größe des Knotens (kleinere Kugel)
- Länge des Anschlusses (Differenz zwischen den zwei Kugeln)

Diese Werte sind im Algorithmus durch den Zahlenschieber leicht erkennbar. Wird die Komponente 'Curve' mit einem anderen Linienmodell verlinkt, entstehen neue Knoten, wie in Abb. 3.47. ersichtlich ist.

Bei der Entwicklung eines Algorithmus in Grasshopper ist es jedoch notwendig, die Art der Datenverarbeitung zu kennen. Jede Komponente in Grasshopper braucht die richtige Art von Input um zu funktionieren, wie beispielsweise Integer, Farbe, geschlossene Fläche, Kurve, und andere<sup>4</sup>. Wie ein Algorithmus letztendlich aufgebaut sein muss, hängt maßgebend davon ab, welche Funktionen er erfüllen soll und welche Daten während der Algorithmusausführung verfügbar sein müssen. Bei einfachen Algorithmen spielen diese Eigenheiten keine große Rolle, da die verwendeten Komponenten keinen besonderen Datenaufbereitungsaufwand voraussetzen. In Abb. 3.45. wurden die Kugeln immer in allen Knotenpunkten erstellt und die Rohre auf allen Linien extrudieren. Wenn jedoch eine bestimmte Kugel einen anderen Durchmesser aufweisen soll, werden die Eigenheiten von Grasshopper wichtig,

III - 4 <https://developer.rhino3d.com/guides/grasshopper/grasshopper-data-types/>, 15.07.2019



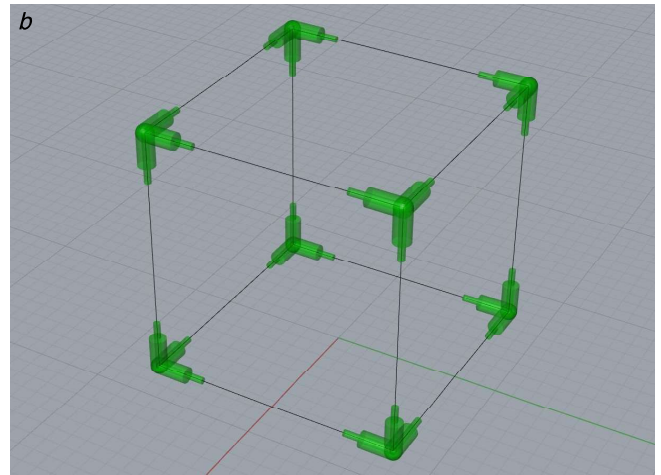
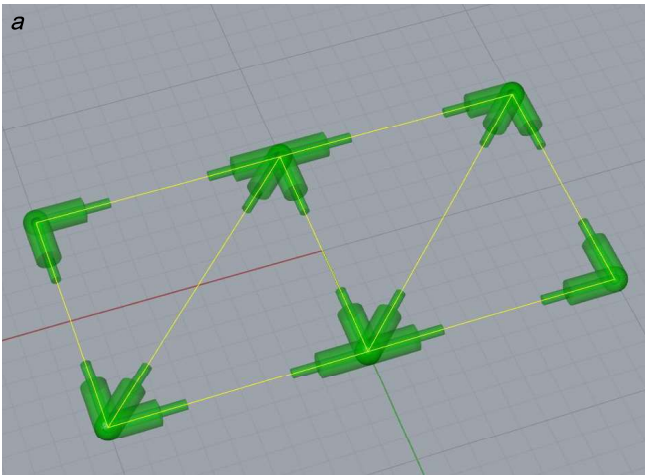


Abb. 3.47.  
 Weitere mit dem einfachen Grasshopper-Algorithmus erstellte Modelle

um die richtige Ausführung des Algorithmus zu erzielen. Je komplexer ein Algorithmus wird, desto wichtiger ist der richtige Umgang mit den Daten von Beginn an.

In Grasshopper werden die Daten in Data Trees strukturiert, weswegen einige Begriffe kurz beschrieben werden, um das Verständnis des Algorithmus zu steigern. Alle Begriffe in Grasshopper sind englisch und um Missverständnissen vorzubeugen, werden die Begriffe nicht übersetzt. Ein **Data Tree** (engl. für Datenbaum) besteht aus **Branches** (engl. Äste) und **Items** (engl. Einträge, Einheiten, Posten). Die Einträge in einem Branch bilden eine **List** (engl. Liste), die eine Länge **N** aufweist. Branches und Items werden startend mit 0 fortlaufend nummeriert. Die Nummerierung der Branches wird in einem **Path** (engl. Pfad) festgehalten, die Verzweigung der Branches wird durch einen Strichpunkt (;) markiert und der Path steht in geschweiften Klammern. Die Nummerierung der Items sind die Indizes (Einzahl: **Index**) und werden in runden Klammern geschrieben. Beim Verzweigen eines Data Trees werden die Items zu Branches, dementsprechend werden die Indizes zum Teil des Pfads und die neuen Daten bekommen neue Indizes.

**{0; 0} (0) -> {0; 0; 0} (0)**

Anhand von Beispiel 3.48. wird die Entstehung eines Data Trees erklärt. Im ersten Schritt (a) entstehen zwei Würfel, diese befinden sich auf dem ersten Branch {0}, sind Items in der Liste und besitzen die Indizes (0) und (1). Im nächsten Schritt (b) werden die Würfel in die einzelnen Flächen aufgespalten. Die Indizes aus dem vorigen Schritt werden zum Teil des Pfads (Path), dementsprechend ist der Pfad des ersten Würfels jetzt {0;0} und der des zweiten {0; 1}. Die Seiten bekommen bei beiden Würfeln nun die Indizes (0) bis (5). Im dritten Schritt (c) werden die Kanten der Würfelseiten abgefragt. Wiederum werden die Indizes zum Pfad hinzugefügt und die Kanten werden mit (0) bis (3) durchnummeriert. Diese Art der Strukturierung der Daten bietet viele Möglichkeiten, diese Daten gezielt zu bearbeiten. Möchte man beispielsweise die erste Kante jeder Fläche abrufen, werden alle Items mit Index 0 abgefragt (Abb. 3.49.a.). Wenn die Kanten der rechten Seiten des rechten Würfels bearbeitet werden sollen, dann muss in diesem Fall der Branch mit dem Pfad {0;0;2} abgefragt werden (Abb. 3.49.b.).

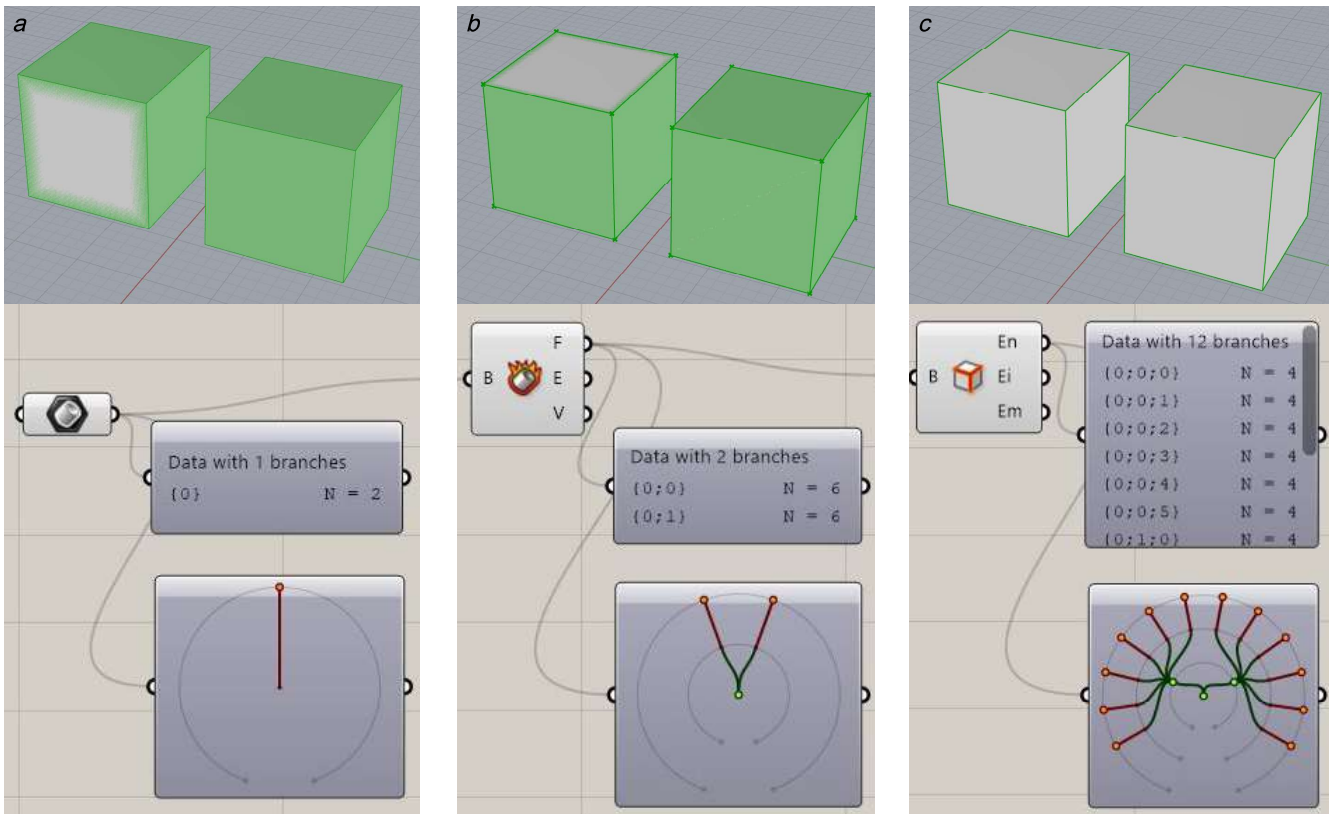


Abb. 3.48.  
Beispiel - Die Entstehung eines Data Trees

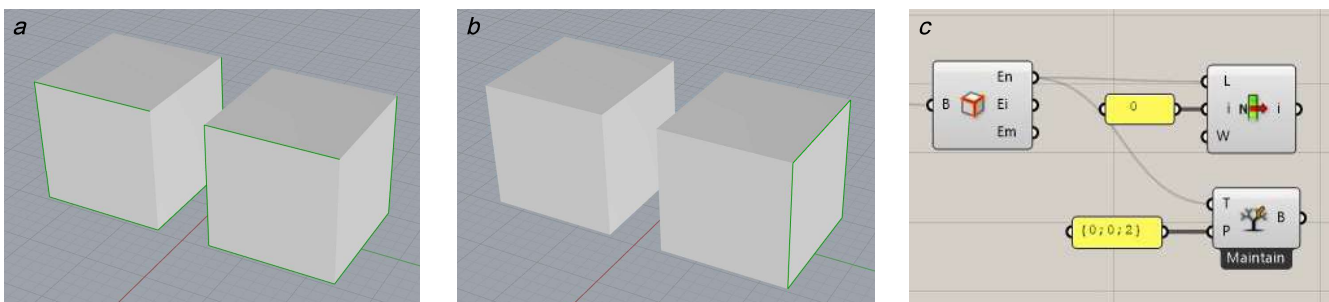


Abb. 3.49.  
Beispiele verschiedener Arten der Datenabfrage, a - List Item, b - Tree Branch, c - Grasshopper Screenshot

Prinzipiell ist ein Data Tree eine strukturierte Sammlung an Listen, die in einer tabellenähnlichen Struktur aufgebaut ist, wobei die Branches die Spalten und die Indizes die Zeilen bilden. Anschließend werden noch einige Komponenten und deren Funktionen beschrieben, weil sie im Algorithmus öfters angewendet wurden:

- Flip Matrix Die Matrix des Data Trees flippen, indem Zeilen und Spalten getauscht werden
- Clean Tree Entfernen aller ungültigen und 'Null'-Items aus einem Data Tree
- Sort List Sortieren einer Liste numerischer Werte aufsteigend
- Trim Tree Die Komplexität des Data Trees reduzieren, indem die äußersten Branches zusammengefügt werden
- List Item Einen bestimmten Item einer Liste auflisten
- Graft Tree Jeder Item wird zu einem Branch
- Tree Branch Einen bestimmten Branch eines Data Trees abrufen

### 3.3.1. Der Rapid Modelling Algorithmus

Die Anforderungen an die Knoten und somit auch an den Algorithmus sind wesentlich komplexer als in dem zur Einführung dienenden Beispielen des Tetraeders. Wegen der Komplexität des Algorithmus, wird er für die Beschreibung in 5 Einheiten aufgeteilt:

- Erstellung des Linienmodells und Einstellung der Parameter
- Erstellung der Knoten
  - Aufbereitung der Daten
  - Berechnung der Knotenschenkellängen
  - Konstruktion der Knotenschenkel und Anschlussstifte
  - Konstruktion der Knotenmarker
  - Zusammenfügen der Einzelteile
- Orientierung und Positionierung der Knoten in eine Ebene in folgender Reihenfolge
  - Knoten mit 2 Anschlüssen
  - Knoten mit 3 Anschlüssen
  - Knoten mit 4 Anschlüssen nicht rotierbar
  - Knoten mit 4 Anschlüssen rotierbar
  - Anordnen der Knoten in einem Raster
- Erstellung von Sonderknoten bei zu kurzen Stäben
- Erstellung von Outputs, die den Modellbauprozess unterstützen sollen

Weil die Funktionen und Outputs der Grasshopper-Komponenten auf Screenshots gar nicht oder nicht ausreichend klar ersichtlich sind, wird der Algorithmus mithilfe eines Flow-Charts erklärt, dabei wird die in Abb. 3.50. dargestellte Legende verwendet. Zur besseren Verständlichkeit wurde ein einfaches repräsentatives Modell erstellt, dass die Funktionen des Algorithmus und die Auswirkungen auf das Modell sichtbar macht.

Der Grasshopper Algorithmus ist in Anhang 1 in digitaler Form verfügbar und ist in Anhang 2 abgebildet.

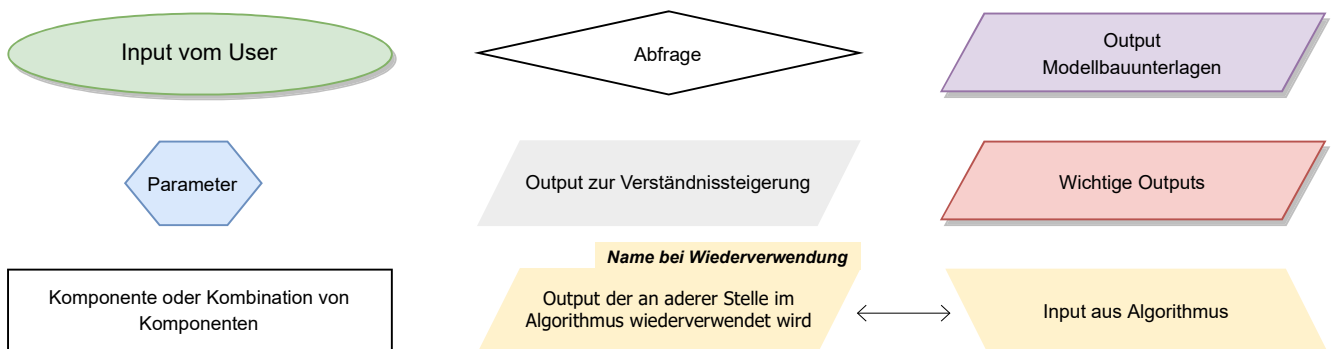


Abb. 3.50.  
Im Flow Chart verwendete Legende

### 3.3.1.1. Erstellung des Linienmodells und Einstellung der Parameter

Um den Algorithmus zu starten, wird nur ein Input benötigt - ein Linienmodell der Stabachsen. Bei der Erstellung dieses Linienmodells müssen folgende Anforderungen beachtet werden:

- Es müssen gerade Linien verwendet werden
- Es sollen keine Polylinien verwendet werden
- Die Linien müssen sich in den Knotenpunkten treffen
- Der Algorithmus ist auf Knoten mit maximal 12 Achsen ausgelegt

Anschließend werden die Parameter a bis e eingestellt (Siehe Abb. 3.42.). Die Parameter a und b werden vom Außen- bzw. Innendurchmesser des Rohres, das zur Herstellung der Stäbe verwendet wird, beeinflusst. Die Länge des Anschlusszylinders kann frei gewählt werden, sollte aber so eingestellt werden, dass eine ausreichende Verbindung zwischen Knoten und Stab entsteht. Aus Erfahrung beträgt dieser Wert ungefähr das Eineinhalbfache des Durchmessers des Anschlussstifts. Bei der Wahl der Schriftgröße der Anschlussmarker muss berücksichtigt werden, wie viele Knoten es im Modell geben wird und ob es sich nur um zwei- oder doch eventuell um dreistellige Zahlen handelt. Parameter e bestimmt den Mindestabstand zwischen zwei Knoten. Wird dieser unterschritten, werden die Knoten automatisch miteinander verbunden und es entsteht ein Doppelknoten. Diese Option ist beispielsweise bei Translationsflächen, bei denen am Rand enge Maschen entstehen, von Vorteil. Wird dieser Parameter auf 0 gesetzt, werden nur die Knoten miteinander verbunden, die sich berühren.

Nachdem das Stabachsenmodell im gewünschten Maßstab erstellt wurde und die Parameter eingestellt wurden, wird es mit der Komponente 'Curve' verlinkt (Abb. 3.54.). In den Abb. 3.51.-3.53. ist das Linienmodell, das zur Erklärung des Algorithmus verwendet wird, dargestellt. Die Form des Modells wurde gewählt, um alle Funktionen des Algorithmus darzustellen.

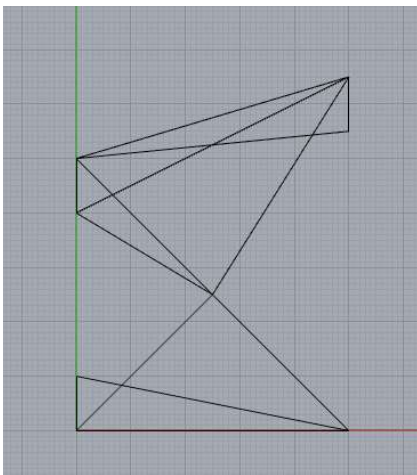


Abb. 3.51.  
Aufriß

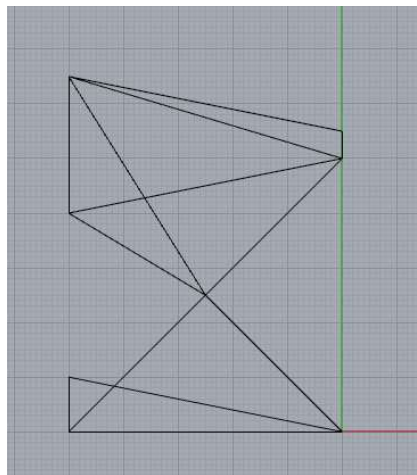


Abb. 3.52.  
Aufriß von links

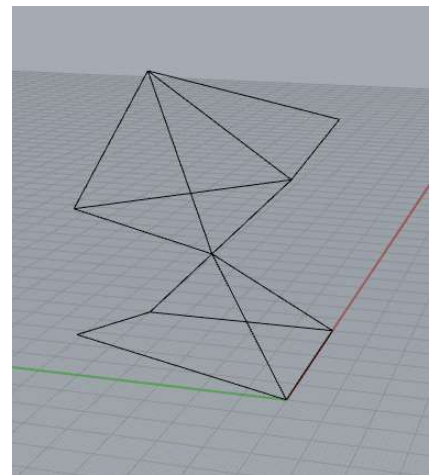


Abb. 3.53.  
Perspektive

### 3.3.1.2. Erstellung der Knoten

#### Datenaufbereitung

Die Daten in Grasshopper werden in Data Trees strukturiert und die Reihenfolge, in der sie in die Struktur aufgenommen werden, kann vorab nicht beeinflusst werden. Aus diesem Grund müssen die Daten aufbereitet werden, um anschließend richtig weiterverarbeitet werden zu können. In diesem Schritt werden ausgehend vom verlinkten Linienmodell in Abb. 3.54. folgende Punkte bearbeitet:

- Falls noch Polylinien vorhanden sind, werden sie in einzelne Segmente aufgespalten (Abb. 3.55.)
- Doppelte Linien und Punkte werden entfernt (Abb. 3.56. - 3.57.)
- Die Richtungen der Vektoren der Stabachsen werden abgefragt und bei Bedarf umgekehrt (*alle Linien in Grasshopper haben einen Start- und Endpunkt und somit auch eine Richtung*), sodass die Vektoren den Startpunkt immer im Knotenpunkt haben

Der betreffende Teil des Algorithmus ist in den Teilen 1 und 2 des Flow Charts (Abb. 3.59.-3.60.) dargestellt.

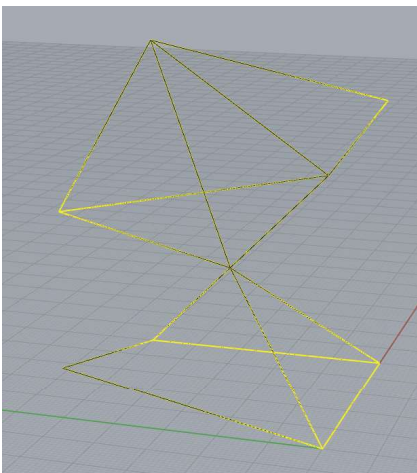


Abb. 3.54.  
Linienmodell mit 'Curve' verlinkt

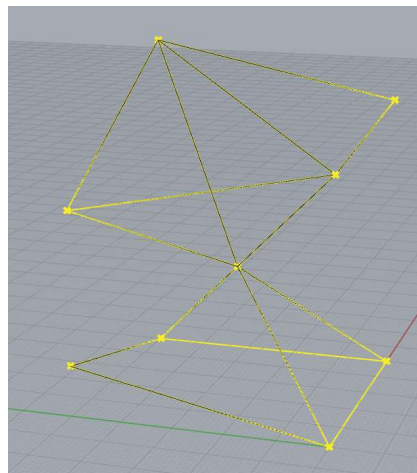


Abb. 3.55.  
Explode

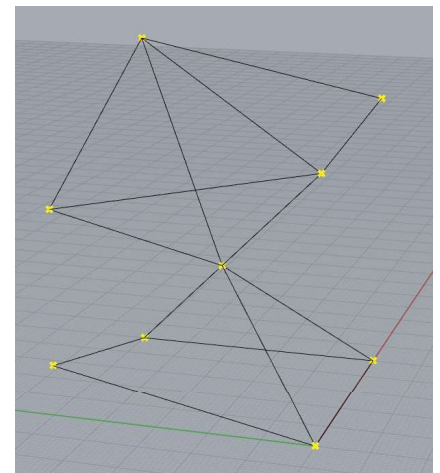


Abb. 3.56.  
Knotenpunkte

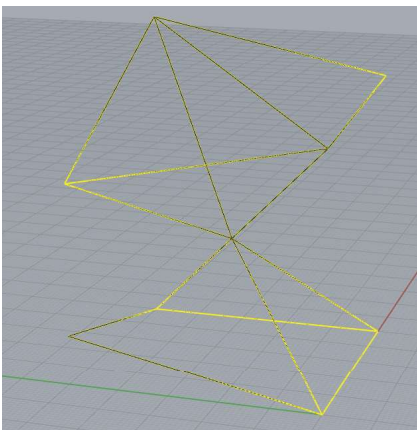


Abb. 3.57.  
Stabachsen

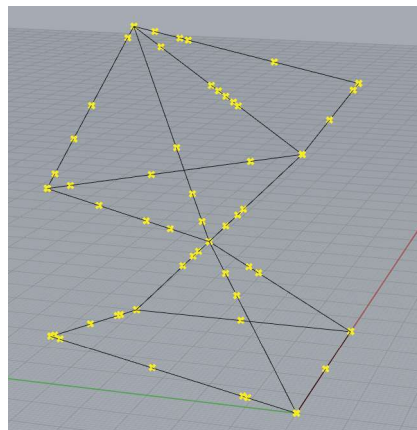
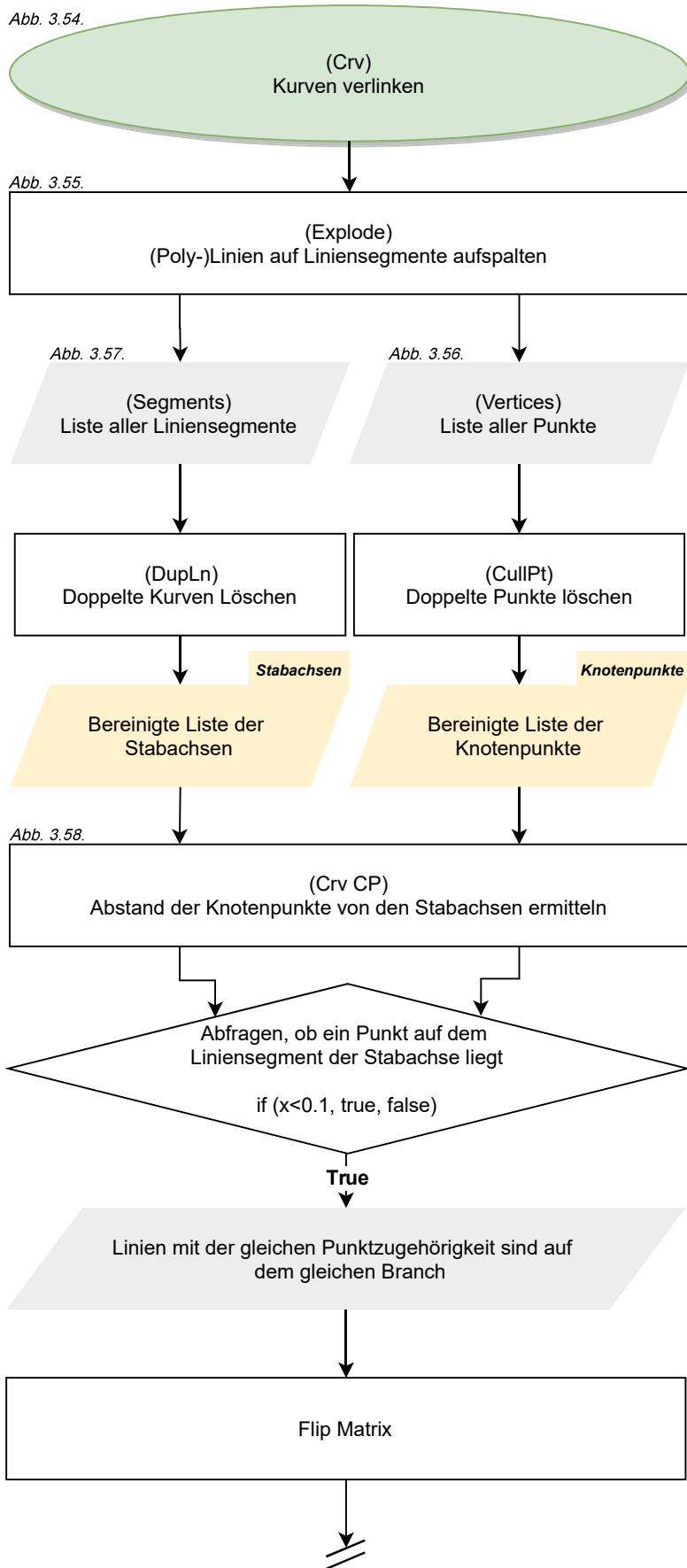
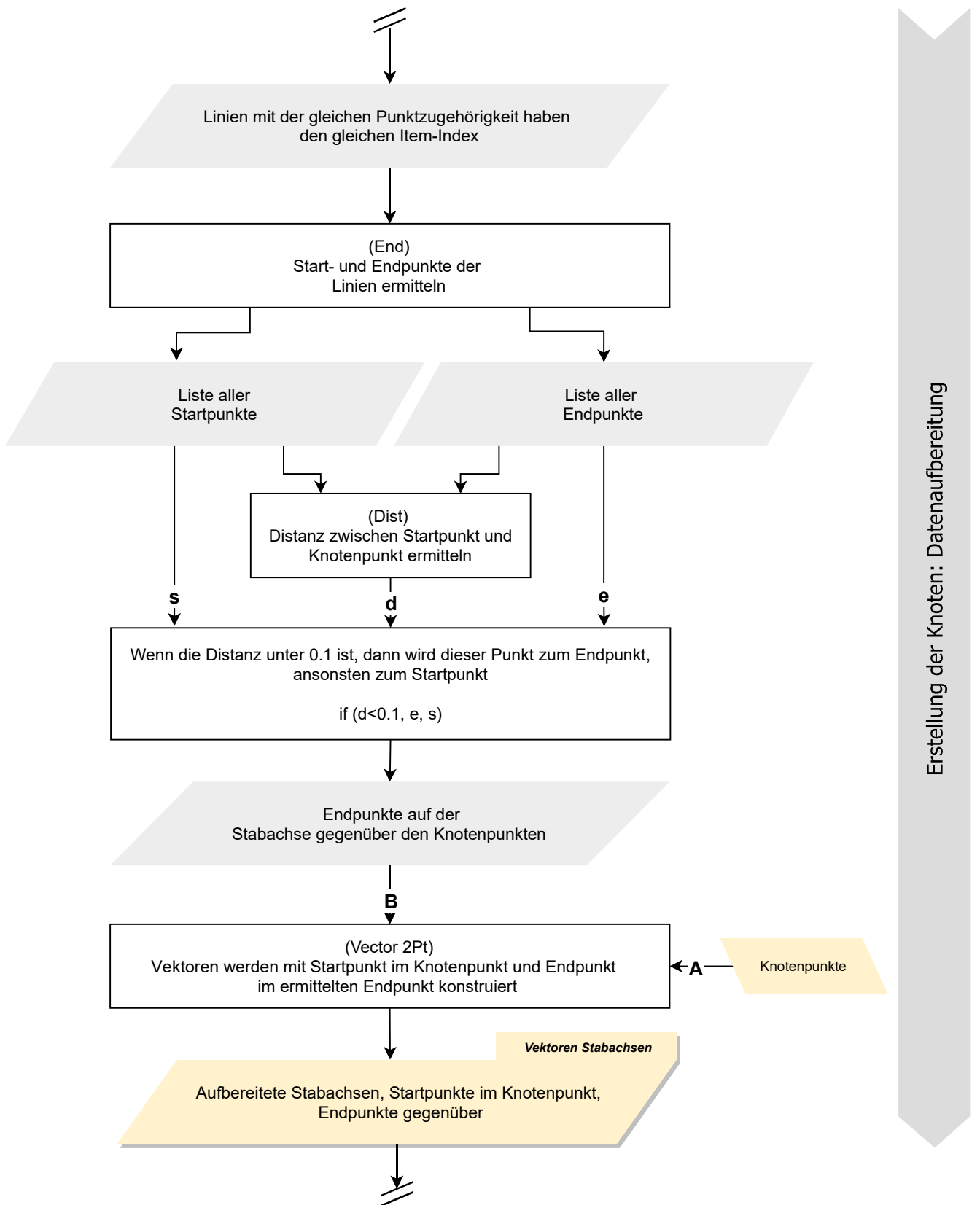


Abb. 3.58.  
Curve Closest Point



Erstellung der Knoten: Datenaufbereitung

Abb. 3.59.  
Flow Chart Teil 1 - Erstellung der Knoten: Datenaufbereitung Teil 1



Erstellung der Knoten: Datenaufbereitung

Abb. 3.60.  
Flow Chart Teil 2 - Erstellung der Knoten: Datenaufbereitung Teil 2

## Berechnung der Längen der Knotenschenkel und Konstruktion der Knotenschenkel

Nachdem die Daten aufbereitet wurden, werden die Längen der Knotenschenkel berechnet. Der Grund dafür, dass die Knotenschenkel nicht durch einen Parameter bestimmt werden, wie es in dem Beispiel des Tetraeders der Fall war, ist, dass es so zu unnötig großen Knoten kommen würde. Um sicherzustellen, dass alle Stäbe richtig angeschlossen werden können, müsste die Schenkellänge durch den kleinsten Winkel zwischen zwei Stabachsen bestimmt werden (Abb. 3.61.b.). Bei Knoten, deren Stäbe unter größeren Winkeln zueinander stehen, resultiert das in unnötig langen Knotenschenkeln, was die Druckzeit verlängert (Abb. 3.61.a.). Sollte man aus irgendeinem Grund den kleinsten Winkel nicht richtig erkennen und die Schenkellänge verkürzen (Abb. 3.61.c.), wird es zu Problemen beim Anschluss der Stäbe mit dem Knoten kommen (Abb. 3.61.d.).

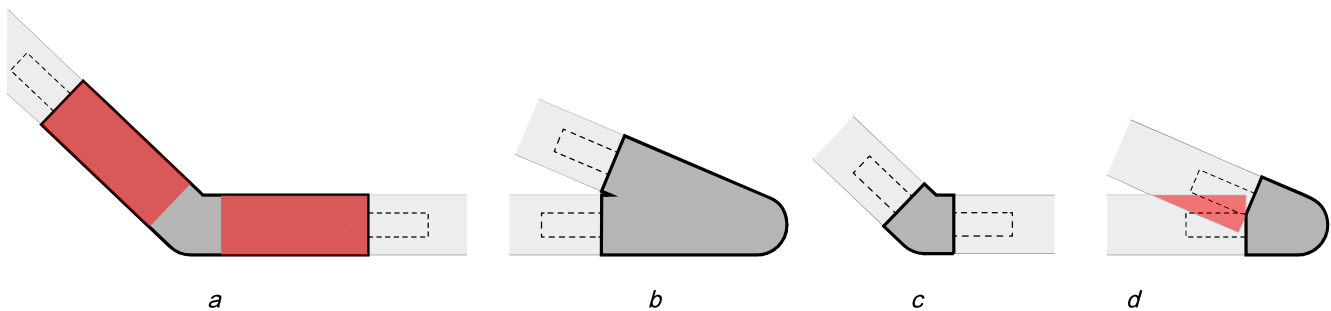


Abb. 3.61.

Auswirkungen der Einstellung der Längen der Knotenschenkel durch einen Parameter, der auf alle Knoten gleichermaßen angewendet wird. a - unnötig lange Schenkel, b - berechnete Schenkellänge für spitze Winkel, c - kurze Knotenschenkel, d - Probleme beim Stabanschluss bei zu kurzen Knotenschenkeln

Die vorgehensweise wird anhand des in Abb. 3.62. markierten Knotens und dessen in Abb. 3.63. markierten Schenkels erklärt. Um die Längen der Knotenschenkel zu optimieren, werden die Winkel zwischen einer Stabachse (Abb. 3.63.) und allen anderen Stabachsen (Abb. 3.64.) eines Knotens gemessen. Der kleinste Winkel  $w$  (3.65. - 3.66.) ist für den weiteren Prozess ausschlaggebend. Diese Abfrage wird bei jeder Achse getrennt durchgeführt und die Längen der Knotenschenkel werden mithilfe folgender Formel berechnet.

$$a \cdot (1/\sin(w) + 1/\tan(w))$$

Entlang der entstandenen Vektoren (Abb. 3.67.) werden Pipes (engl. Rohre) mit dem Durchmesser  $a$  und flachen Enden konstruiert (Abb. 3.68. - 3.69.).

Der Algorithmus ist für maximal 12 Stabachsen pro Knoten ausgelegt, eine Erweiterung des Algorithmus ist jedoch einfach durchzuführen.



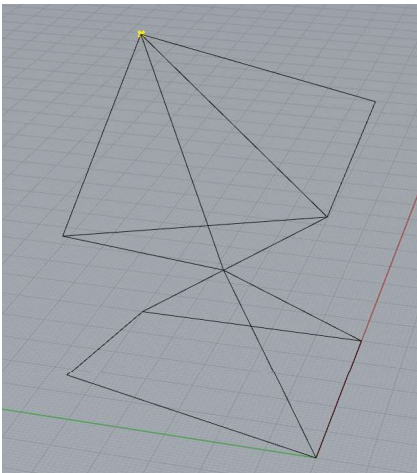


Abb. 3.62.  
Knotenpunkt des Knotenschenkels,  
dessen Länge bestimmt werden soll

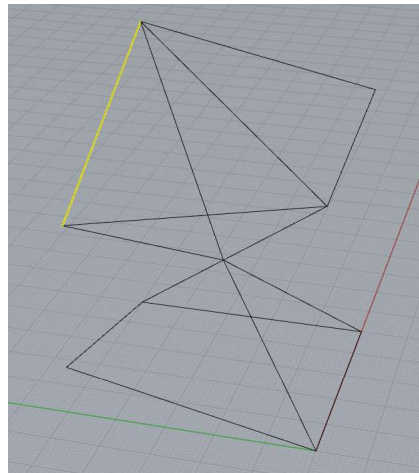


Abb. 3.63.  
Die Stabachse, dessen  
Knotenschenkellänge bestimmt  
werden soll

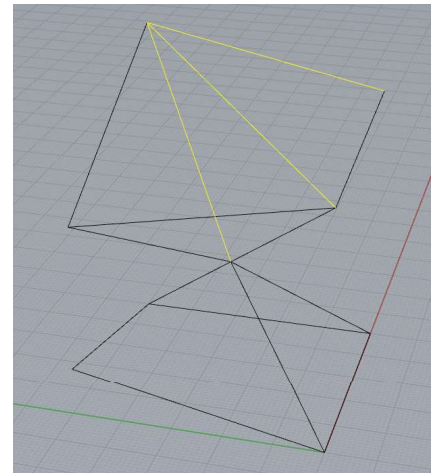


Abb. 3.64.  
Die angrenzenden Stabachsen

	{7}
0	1.482978
1	0.716762
2	0.779178
3	<null>
4	<null>
5	<null>
6	<null>
7	<null>

Abb. 3.65.  
Die Liste der berechneten Winkel

	{7}
0	0.716762
1	0.779178
2	1.482978

Abb. 3.66.  
Sortierte Liste der Winkel in  
aufsteigender Folge

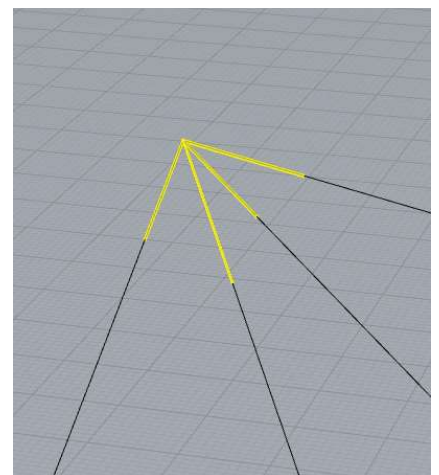


Abb. 3.67.  
Die Vektoren der Knotenschenkel

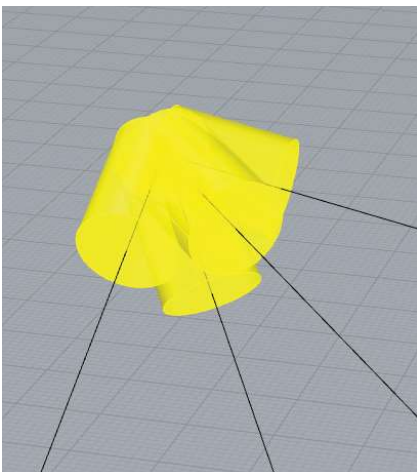


Abb. 3.68.  
Knotenschenkel eines Knotens

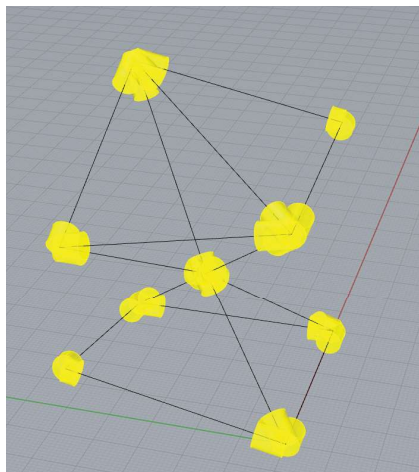
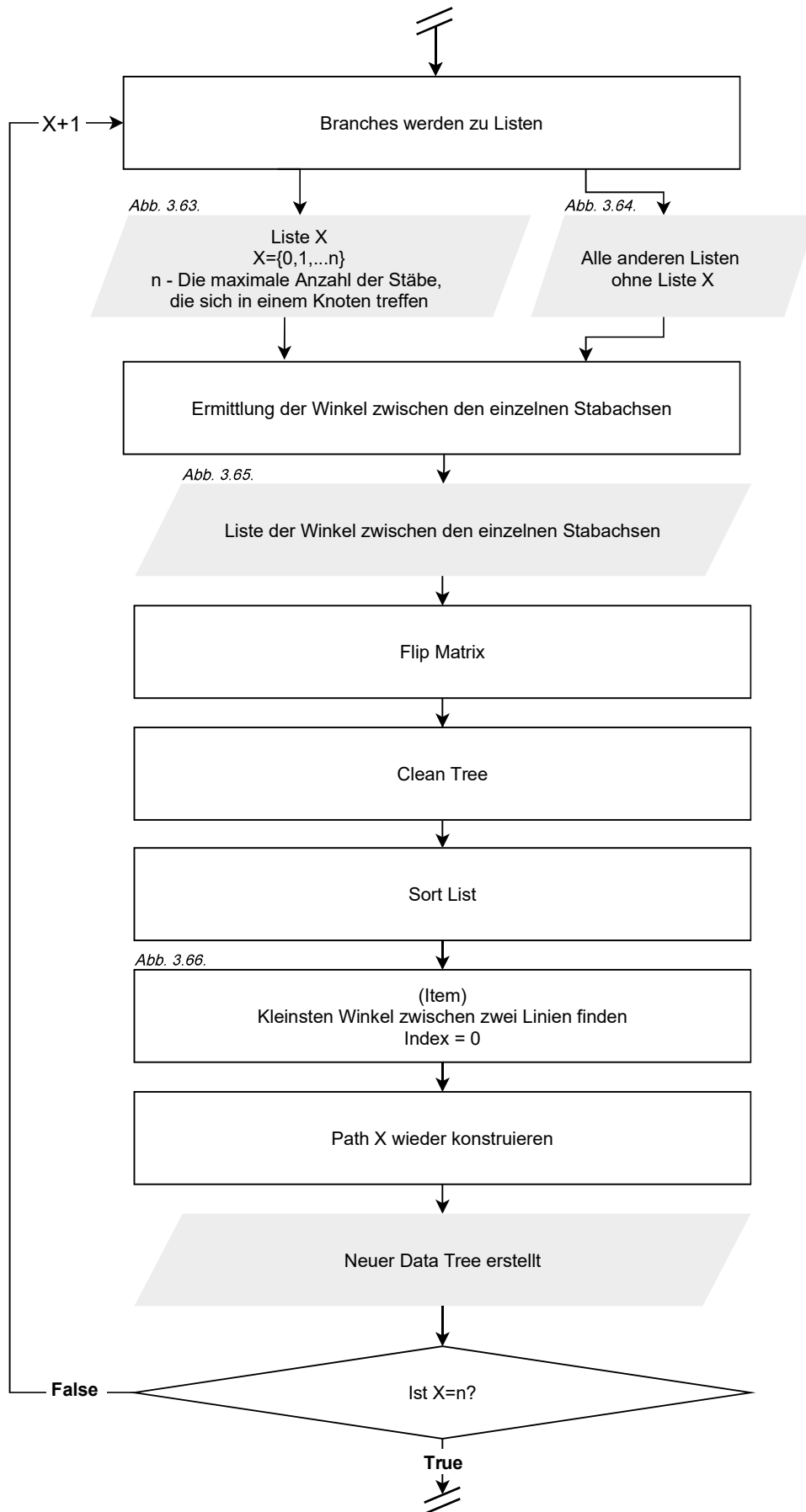


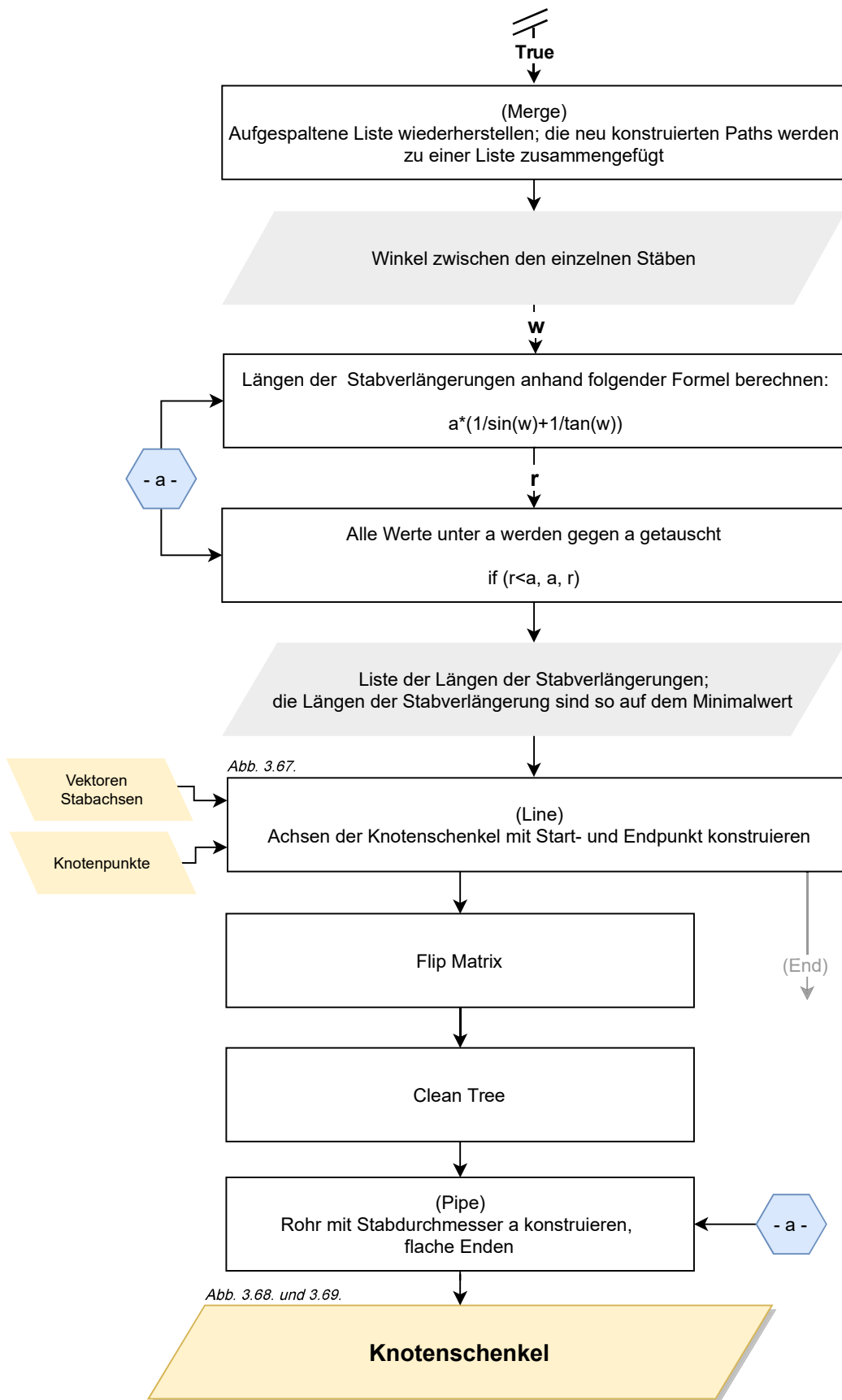
Abb. 3.69.  
Knotenschenkel

Die beschriebenen Teile des Algorithmus sind in den Teilen 3 und 4 des Flow Charts in Abb. 3.70. und 3.71. dargestellt.



Erstellung der Knoten: Berechnung der Längen der Knotenschenkel

Abb. 3.70.  
Flow Chart Teil 3 - Erstellung der Knoten: Berechnung der Längen der Knotenschenkel Teil 1



Erstellung der Knoten: Berechnung der Längen der Knotenschenkel

Erstellung der Knoten: Konstruktion der Knotenschenkel

Abb. 3.71. Flow Chart Teil 4 - Erstellung der Knoten: Berechnung der Längen der Knotenschenkel Teil 2 und Erstellung der Knotenschenkel

## Konstruktion der Anschlussstifte

Die Anschlussstifte für den in Abb. 3.72. hervorgehobenen Knoten werden konstruiert, indem Vektoren aus den Endpunkten (Abb. 3.73.) der Vektoren der Knotenschenkel mit der gleichen Richtung konstruiert werden (Abb. 3.74.). Die Länge dieser Vektoren wird durch den Parameter  $c$  bestimmt. Entlang dieser Vektoren werden wiederum Pipes mit dem Durchmesser  $b$  und flachen Enden konstruiert (Abb. 3.75. und 3.76.).

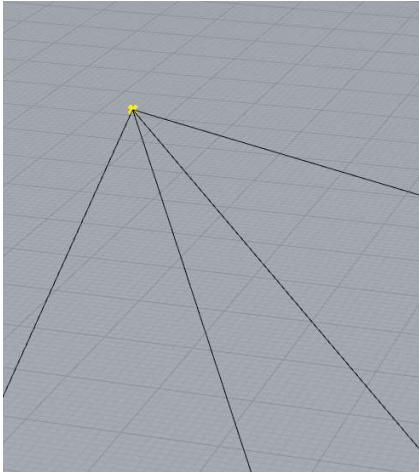


Abb. 3.72.  
Startpunkt der Knotenschenkel-  
Vektoren

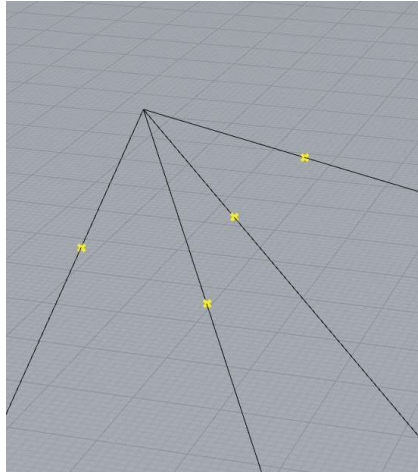


Abb. 3.73.  
Endpunkte der Knotenschenkel-  
Vektoren

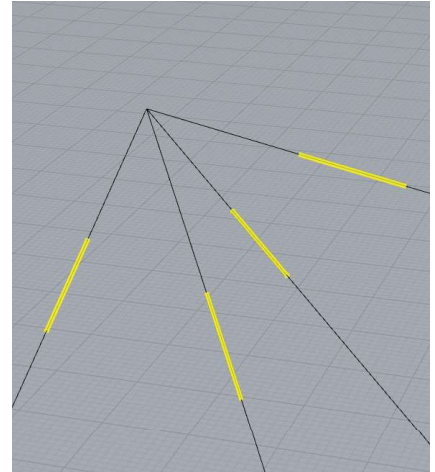


Abb. 3.74.  
Vektoren der Anschlussstifte

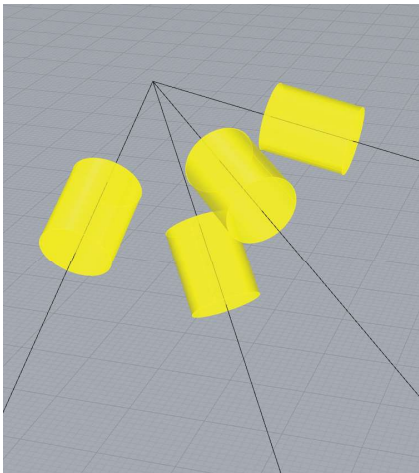


Abb. 3.75.  
Anschlussstifte eines Knotens

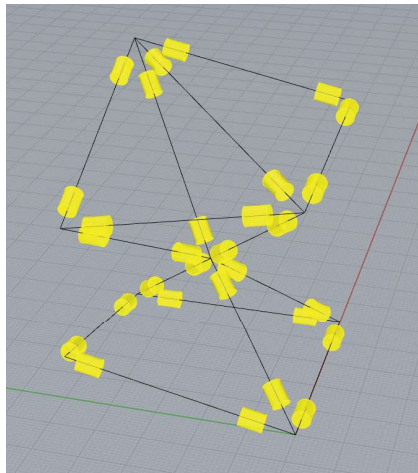
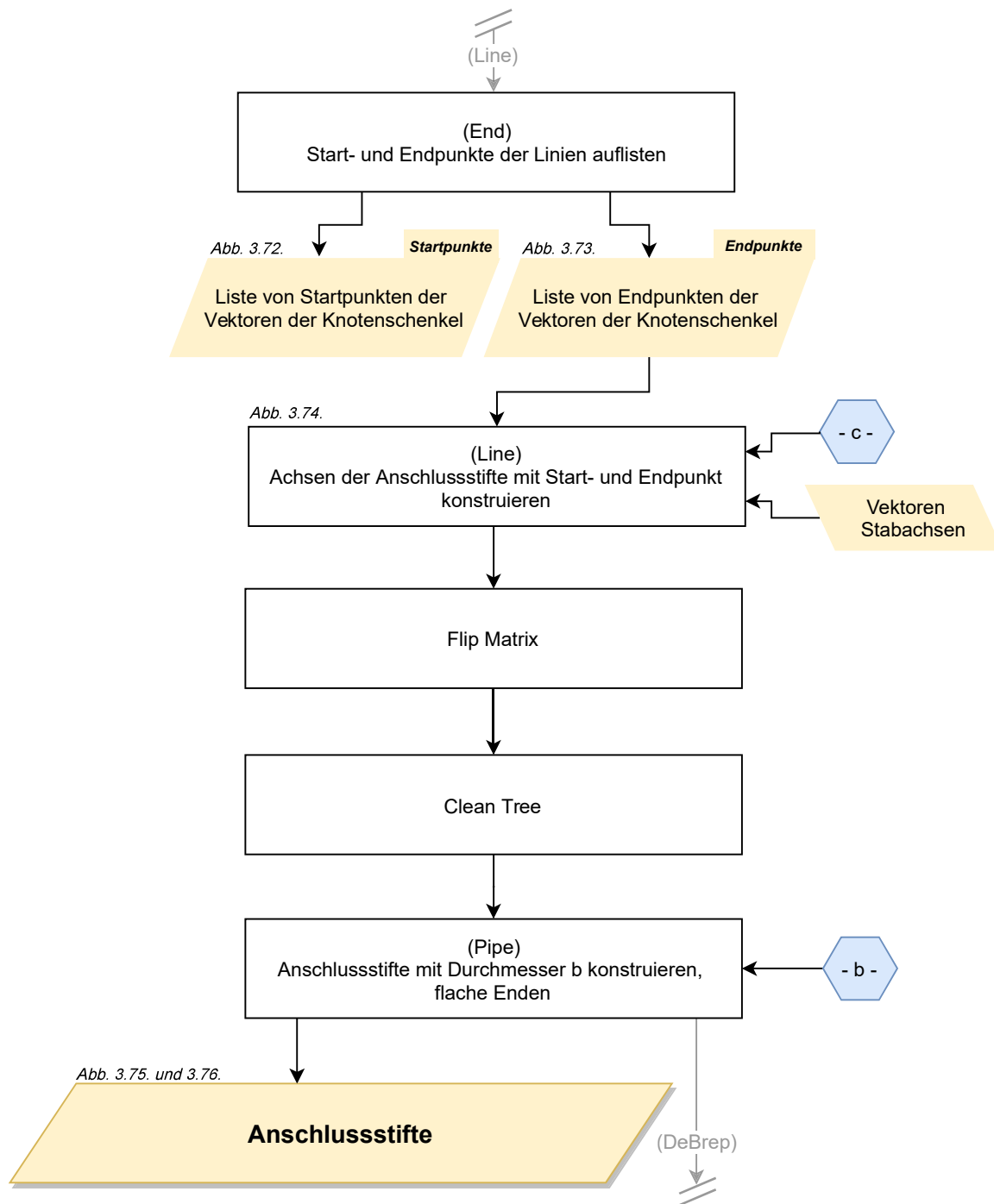


Abb. 3.76.  
Anschlussstifte

Diese Schritte des Algorithmus sind in Teil 5 des Flow Charts in Abb. 3.77. dargestellt.



Erstellung der Knoten: Konstruktion der Anschlussstifte

Abb. 3.77.  
Flow Chart Teil 5 - Erstellung der Knoten: Konstruktion der Anschlussstifte

## Konstruktion der Knotenmarker

Um die individualisierten Knoten beim Modellbau richtig zuzuordnen, müssen sie markiert werden. Hierfür entstehen am Ende eines Anschlussstiftes 3-dimensionale Zahlen, die mitgedruckt werden. Hierfür werden die Anchlusselemente in einzelne Flächen aufgespalten (Abb. 3.78) und die äußere runde Fläche eines Anschlussstiftes gewählt (Abb. 3.79.). Die Paths der Knoten (Abb. 3.82.) werden in Integer umgewandelt (Abb. 3.83.) und in der Ebene der runden Fläche (3.80.) werden Konturen dieser Zahlen erstellt (Abb. 3.84.). Aus den Konturen entstehen Flächen (Abb. 3.85.), die anschließend extrudiert den Knotenmarker ergeben (Abb. 3.86.). Dies geschieht wie in Abb. 3.87. - 3.89. dargestellt bei allen Knoten des Modells.

Die Positionierung des Knotens im Modell ist jedoch nicht die einzige Funktion dieses Markers. Er ermöglicht auch die richtige Orientierung des Knotens, wenn sich die Winkel unter denen die Knotenschenkel stehen nur geringfügig unterscheiden. Der Knotenmarker befindet sich nur an einem Anschlussstift, dementsprechend kann der Knoten so gedreht werden, dass der Marker in die richtige Richtung gedreht wird. Die Orientierung der Zahl am Anschlussstift gibt zusätzliche Auskunft darüber, ob der Knoten richtig Ausgerichtet ist oder um 180° gedreht werden muss. Bei großen Modellen, bei denen viele Knoten nur minimale Unterschiede aufweisen, ist diese Funktion essenziell, um das Modell zusammenbauen zu können.

Die Konstruktion der Knotenmarker ist in den Teilen 6-7 des Flow Charts (Abb. 3.90. - 3.91.) ersichtlich.

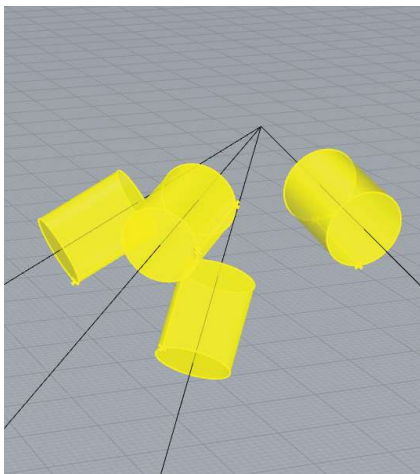


Abb. 3.78.  
Anschlusszylinder in einzelne Flächen aufspalten

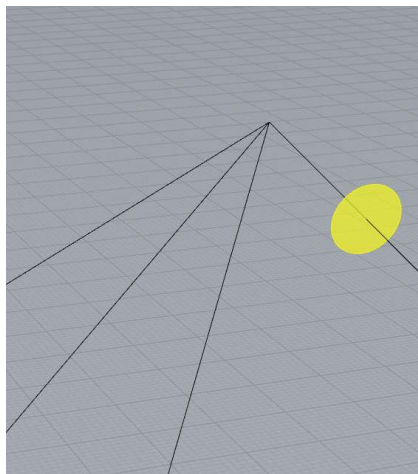


Abb. 3.79.  
Eine Fläche des Anschlusszylinders wählen

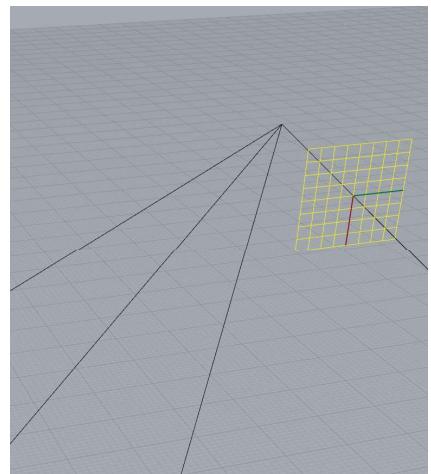


Abb. 3.80.  
Die Ebene dieser Fläche eruiern

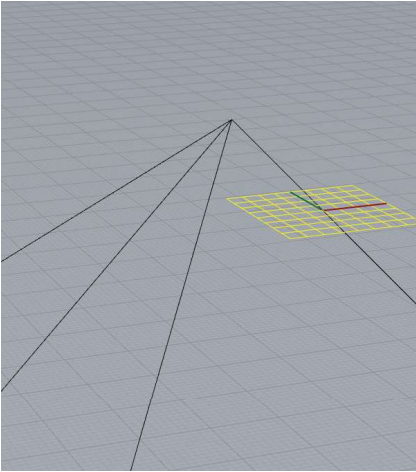


Abb. 3.81.  
Eine XY-Ebene mit gleichem Ursprung  
wie Knotenmarker-Ebene erstellen

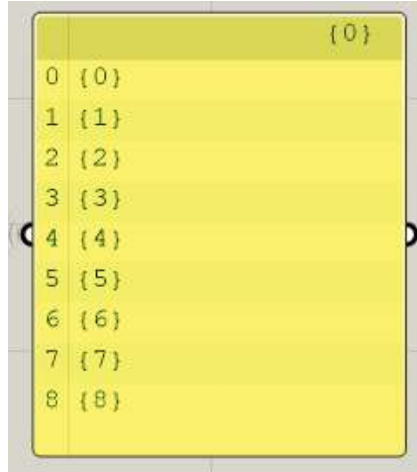


Abb. 3.82.  
Paths abfragen

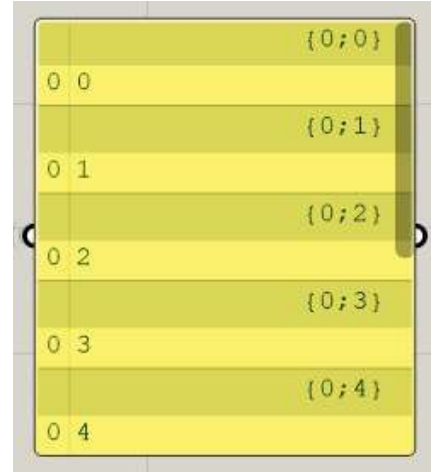


Abb. 3.83.  
Paths in Integer umwandeln

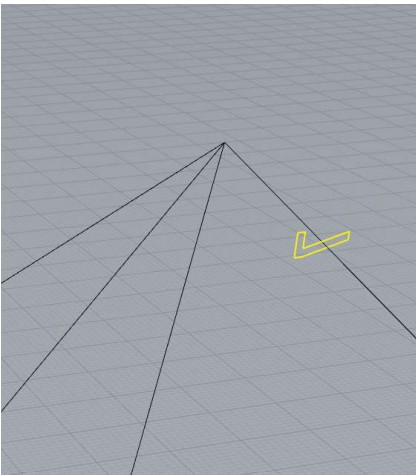


Abb. 3.84.  
Outlines aus Integern generiert

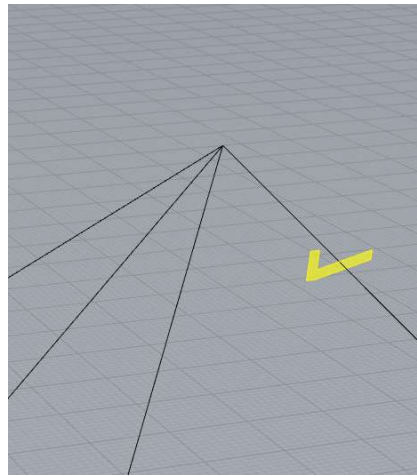


Abb. 3.85.  
Fläche mit Outlines generiert

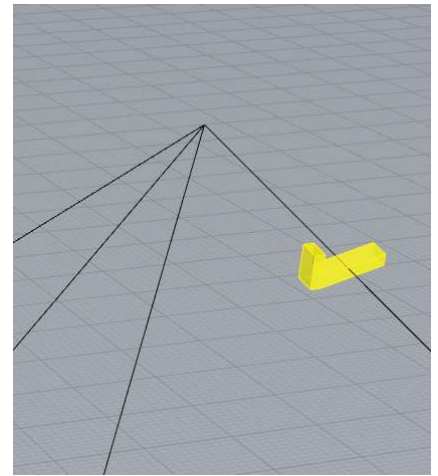


Abb. 3.86.  
Fläche extrudiert

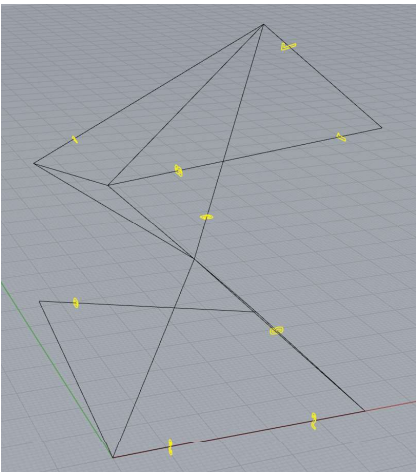


Abb. 3.87.  
Outlines aus Integern generiert

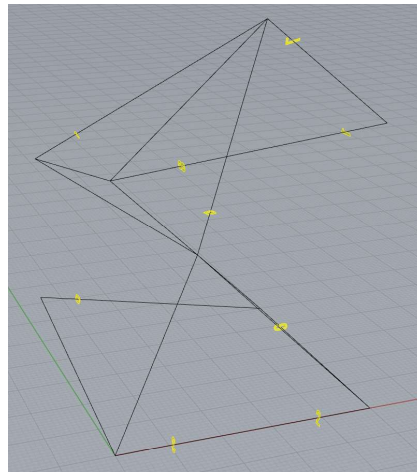


Abb. 3.88.  
Fläche mit Outlines generiert

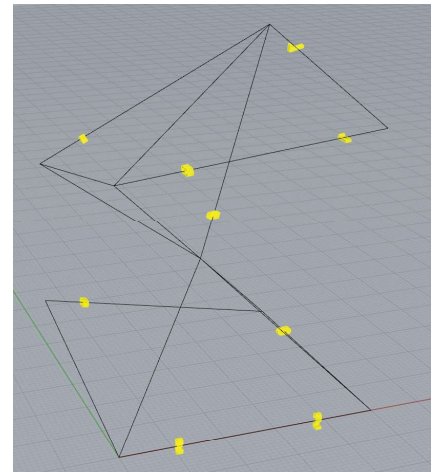


Abb. 3.89.  
Fläche extrudiert

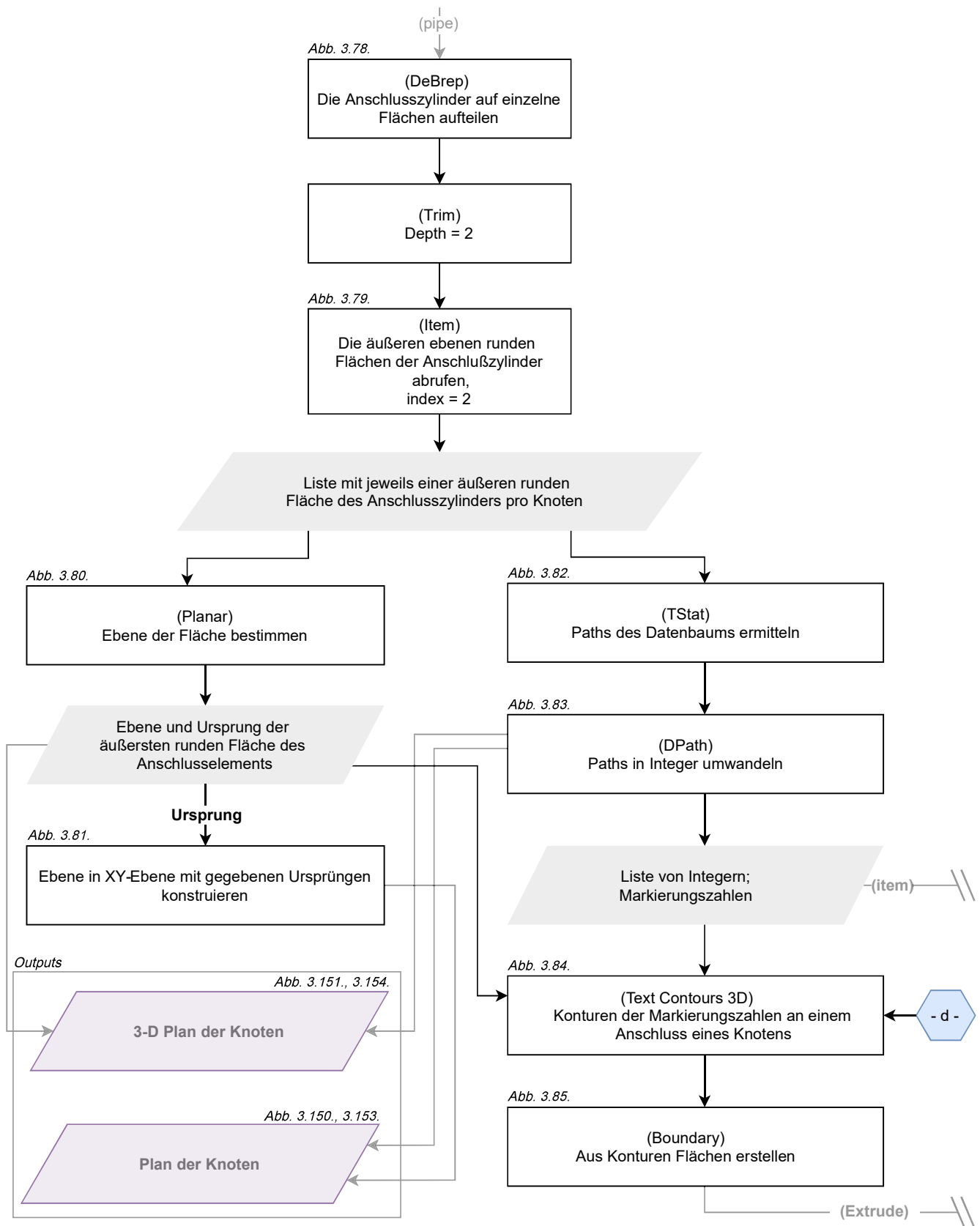


Abb. 3.90.  
Flow Chart Teil 6 - Erstellung der Knoten: Konstruktion der Knotenmarker, Teil 1



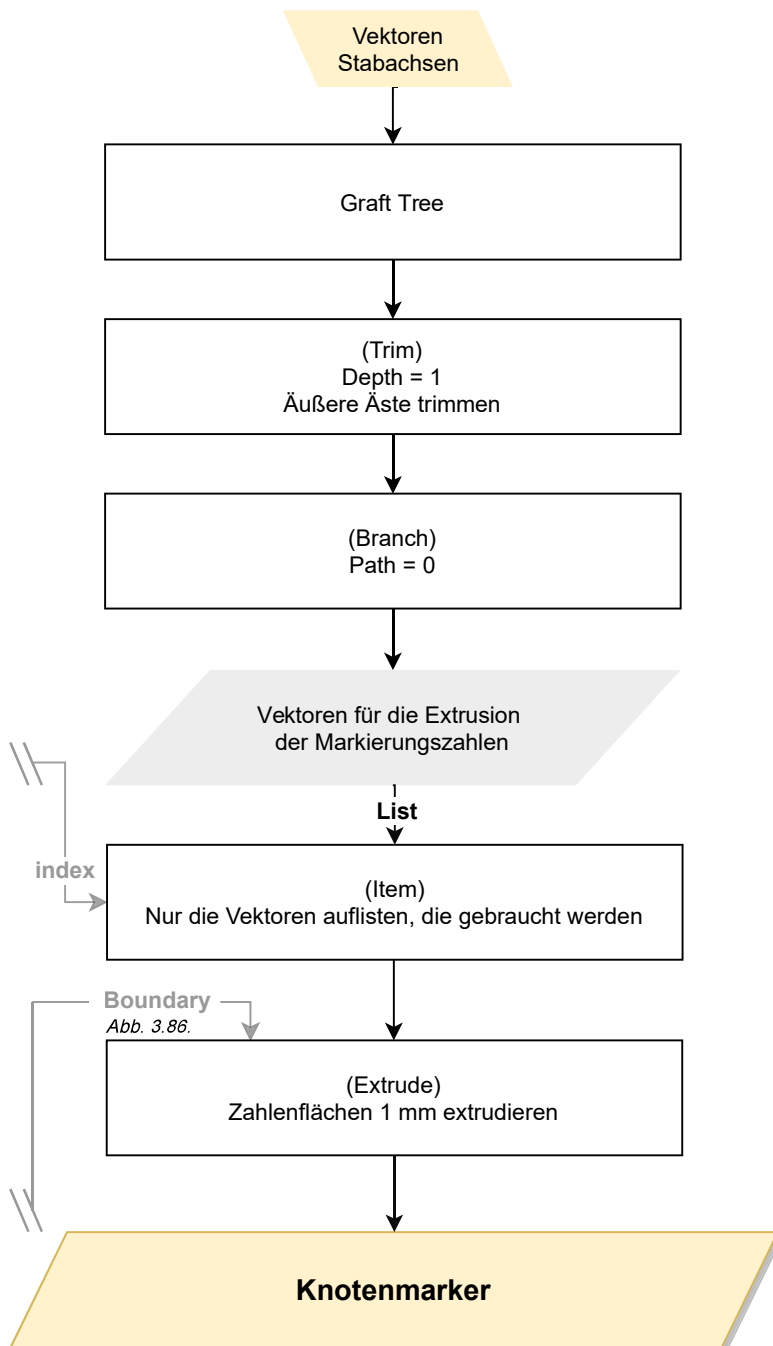


Abb. 3.91.

Flow Chart Teil 7 - Erstellung der Knoten: Konstruktion der Knotenmarker, Teil 2

## Knotenelemente zusammenfügen

Alle Knotenelemente wurden nun erfolgreich generiert (Abb. 3.93. - 3.95.) und werden in diesem Schritt zusammengefügt (Abb. 3.97., 3.98.). Aus optischen Gründen werden zusätzliche Kugeln mit dem Durchmesser  $a$  (Abb. 3.96, 3.99.) in allen Knotenpunkten generiert, um abgerundete Enden der Knoten zu erhalten (Abb. 3.100.). Dies ist in Teil 8 des Flow Charts in Abb. 3.92. ersichtlich.

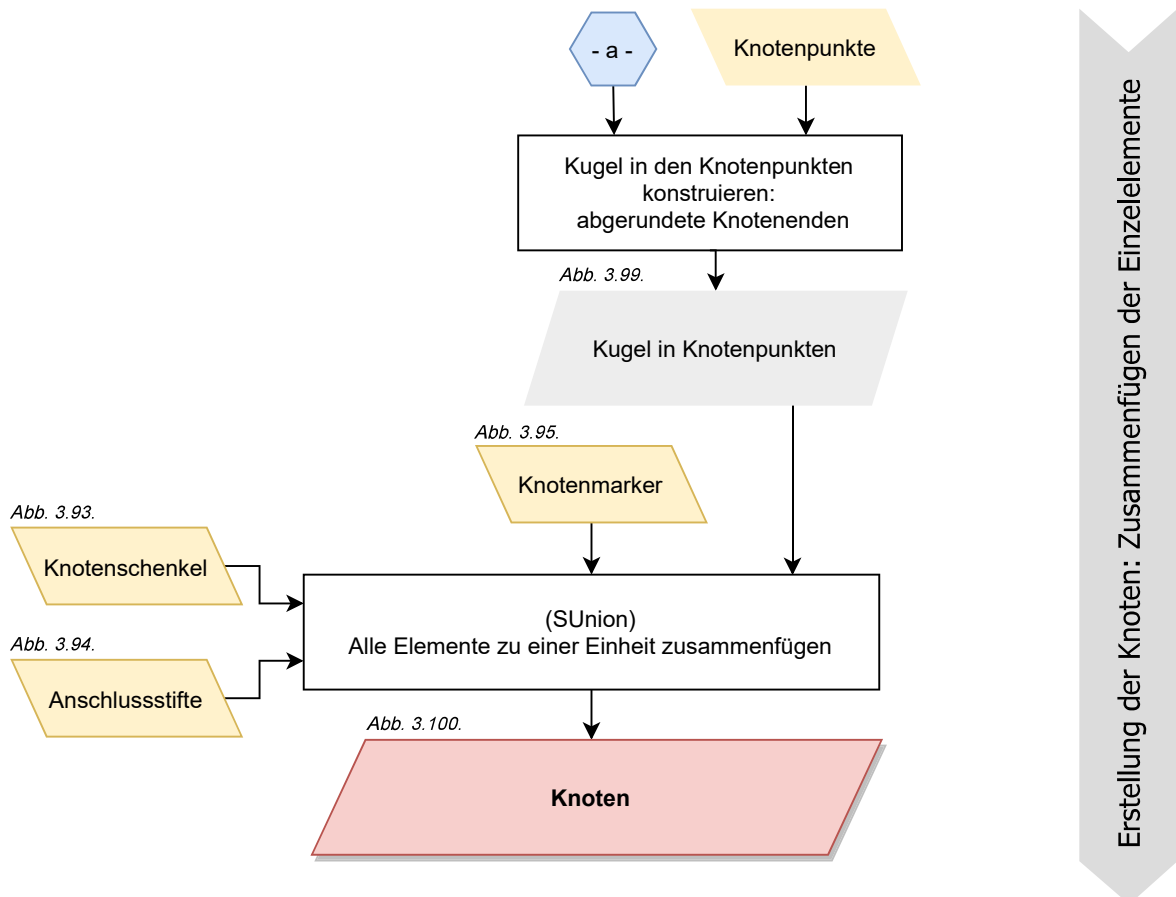


Abb. 3.92.

Flow Chart Teil 8 - Erstellung der Knoten: Zusammenfügen der Einzelemente

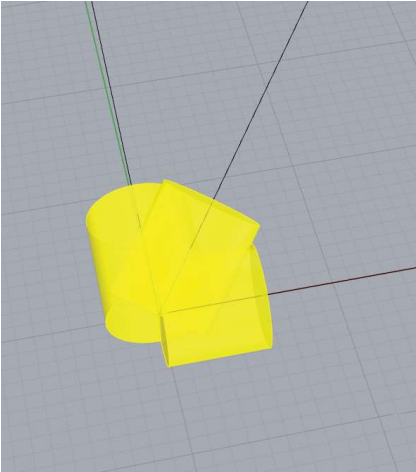


Abb. 3.93.  
Knotenschenkel

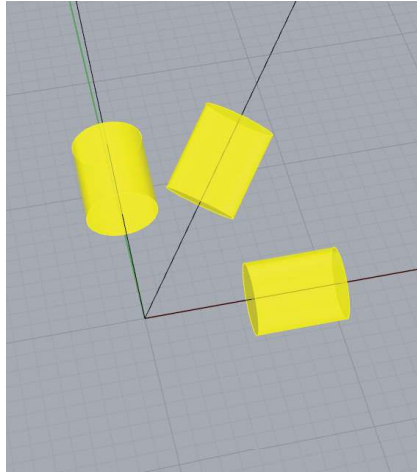


Abb. 3.94.  
Anschlussstifte

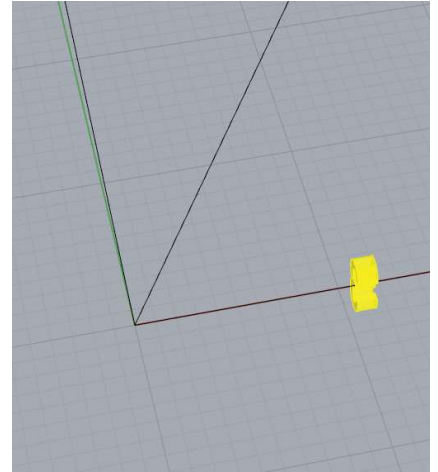


Abb. 3.95.  
Knotenmarker

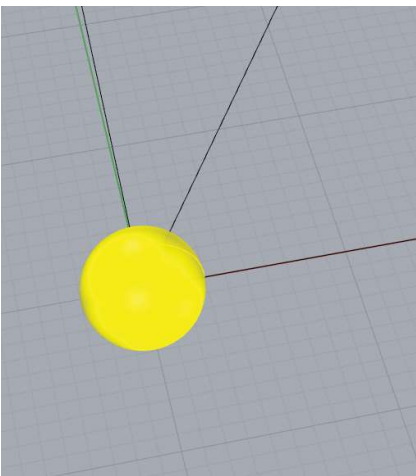


Abb.3.96.  
Abschlusskugel

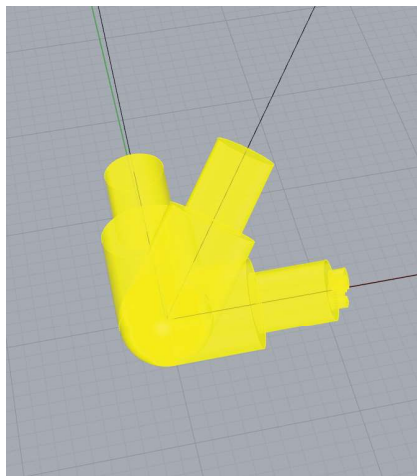


Abb. 3.97.  
Alle Elemente eines Knotens

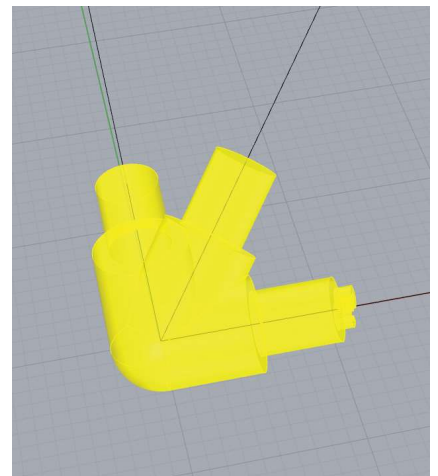


Abb. 3.98.  
Knoten mit Solid Union verbunden

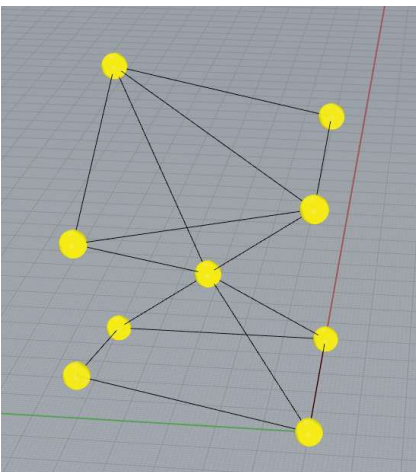


Abb. 3.99.  
Abschlusskugeln

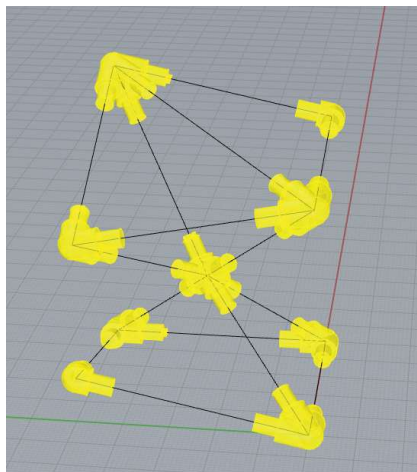


Abb. 3.100.  
Fertige Knoten

### 3.3.1.3. Orientierung der Knoten

Wegen der Anisotropie des FDM-Drucks ist die Orientierung der Knoten am Druckbett ausschlaggebend für die Druckqualität und bestimmt auch dadurch wie belastbar die gedruckten Knoten sein werden. Die optimale Orientierung des Knotens am Druckbett kann nicht in allen Fällen durch einen Algorithmus erzielt werden und erfolgt bestmöglich basierend auf abfragbaren Kriterien. Bei komplexen Knoten wird eine Kontrolle und gegebenenfalls eine manuelle Umorientierung empfohlen

Für die Orientierung der Knoten in diesem Algorithmus werden sie in vier Kategorien unterteilt:

- Knoten mit 2 Achsen
- Knoten mit 3 Achsen
- Knoten mit 4 oder mehr Achsen, dessen Stabachsen auf einer Seite einer Ebene durch den Knotenpunkt liegen, dadurch 'rotierbar'
- Knoten mit 4 oder mehr Achsen, dessen Stabachsen auf beiden Seiten einer Ebene durch den Knotenpunkt liegen

Diese vier Kategorien werden getrennt voneinander bearbeitet und anschließend in einem ebenen Raster mit fortlaufender Nummerierung strukturiert verteilt.

#### Orientierung von Knoten mit 2 Achsen

Diese Knoten (Abb. 3.101.) werden so auf das Druckbett gelegt, dass die zwei Vektoren der Stabanschlüsse in der gleichen Ebene wie das Druckbett liegen. Hierfür wird die Ausgangsebene (Abb. 3.102.), in der sich die zwei Vektoren befinden, eruiert, aus der die Knoten anschließend in die XY-Ebene gebracht werden (Abb. 3.103.). Auf diese Weise kann die höchste Festigkeit der gedruckten Elemente erreicht werden.

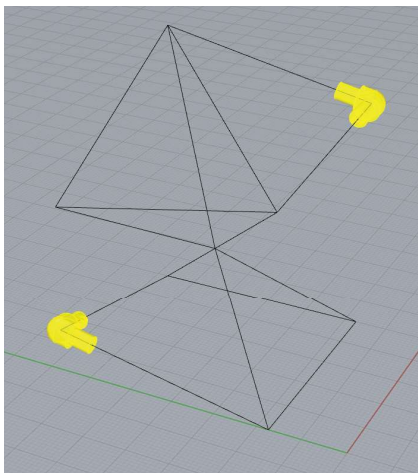


Abb. 3.101.  
Ermittlung der Knoten mit 2 Achsen

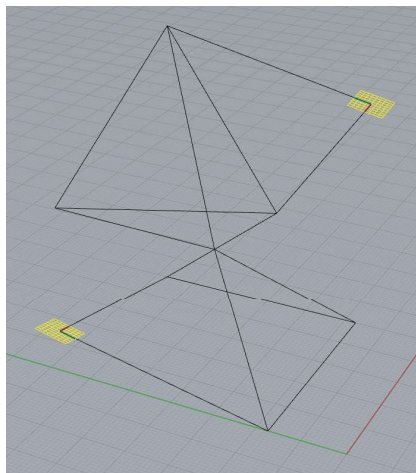


Abb. 3.102.  
Ermittlung der Ebenen in denen die Stabachsen liegen

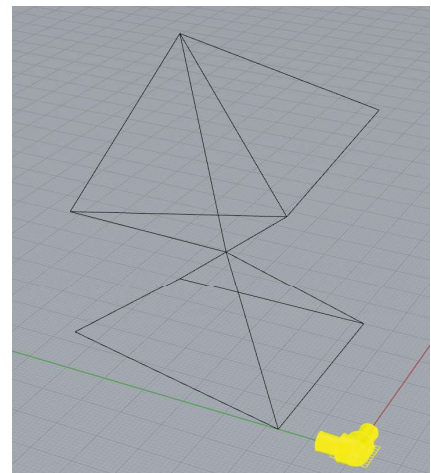


Abb. 3.103.  
Neuorientierung in XY-Ebene

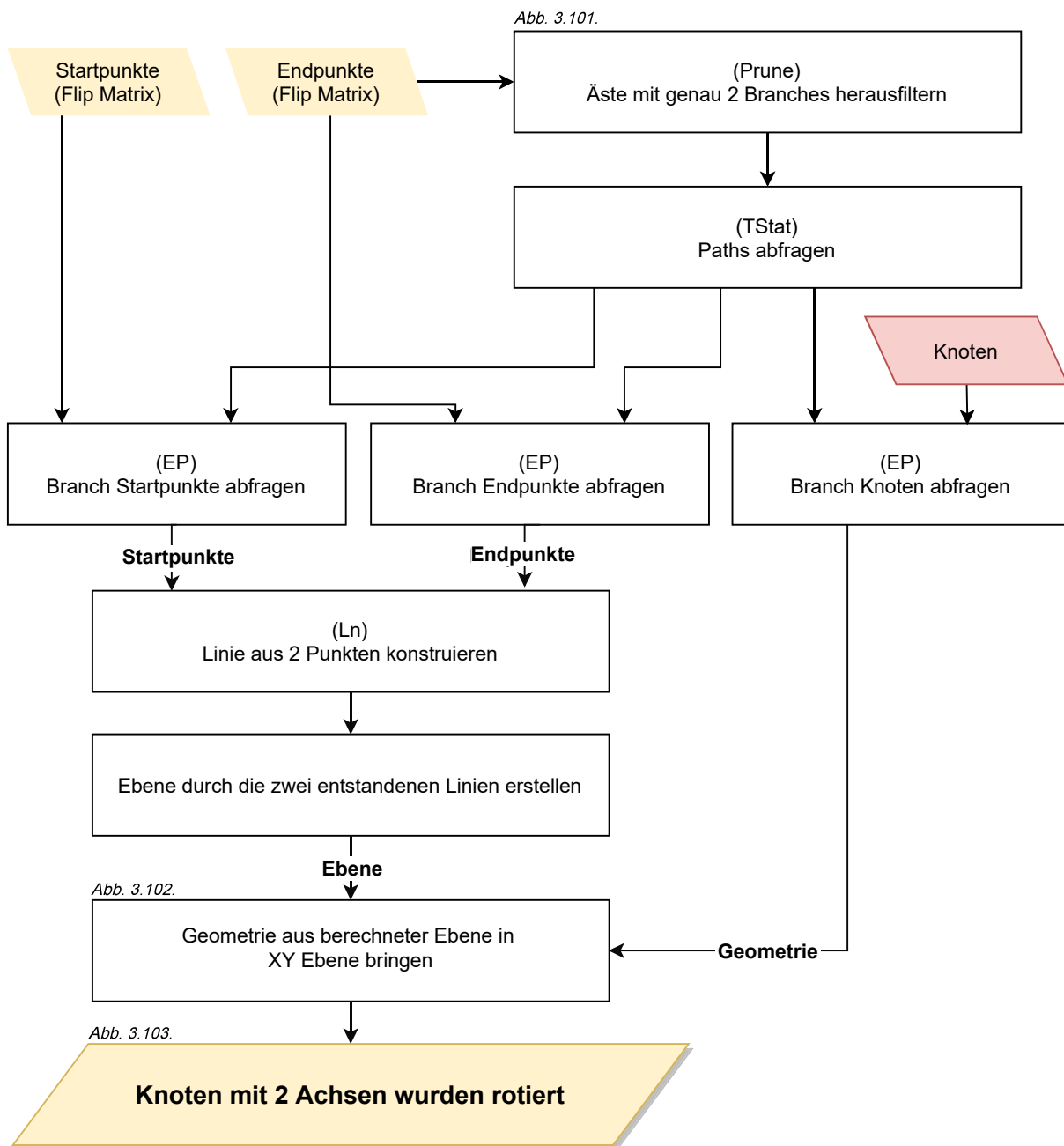


Abb. 3.104.  
Flow Chart Teil 9 - Orientierung: Stäbe mit 2 Achsen

## Orientierung von Knoten mit 3 Achsen

Bei dreiachsigen Knoten (Abb. 3.105.) wird, ähnlich wie bei den Knoten mit 2 Achsen, eine Ebene durch zwei Knotenschenkelvektoren gelegt (Abb. 3.106.) und der Knoten wird aus dieser Ebene in Ebene XY gedreht (Abb. 3.107.). Um sicherzugehen, dass der dritte Knotenschenkel immer über der XY-Ebene liegt, wird zuerst das Kreuzprodukt zweier Knotenschenkelvektoren berechnet. Danach wird das Punktprodukt des resultierenden Vektors und des dritten Knotenschenkelvektors berechnet. Ist dieses Ergebnis positiv, liegt der dritte Knotenschenkel über der konstruierten Ebene. Ist das Ergebnis negativ, dann muss die konstruierte Ebene durch Umkehrung des Normalvektors gespiegelt werden (Abb. 3.108.).

Diese Schritte sind in Teil 10 des Flow Charts in Abb. 3.109. dargestellt.

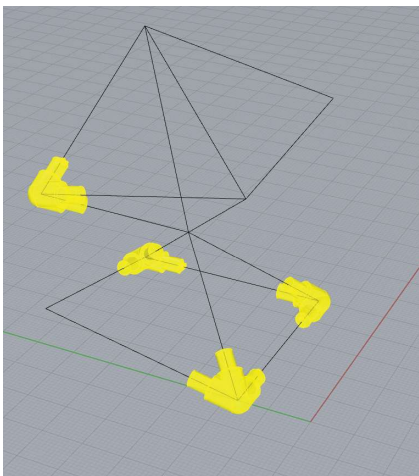


Abb. 3.105.  
Ermittlung der Knoten mit 3 Achsen

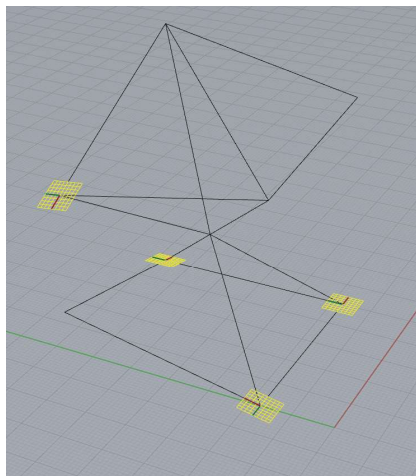


Abb. 3.106.  
Ebenen der Knoten bestimmen

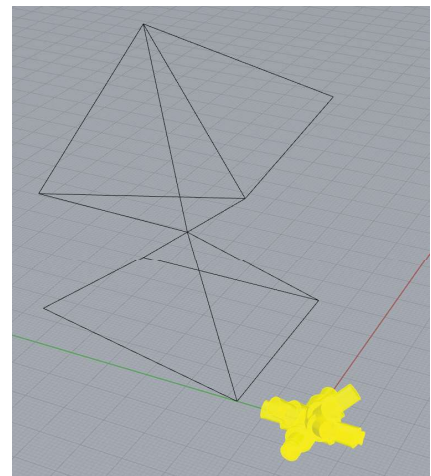


Abb. 3.107.  
Neuorientierung in XY-Ebene

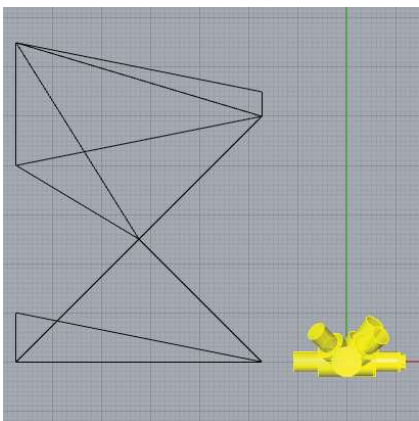
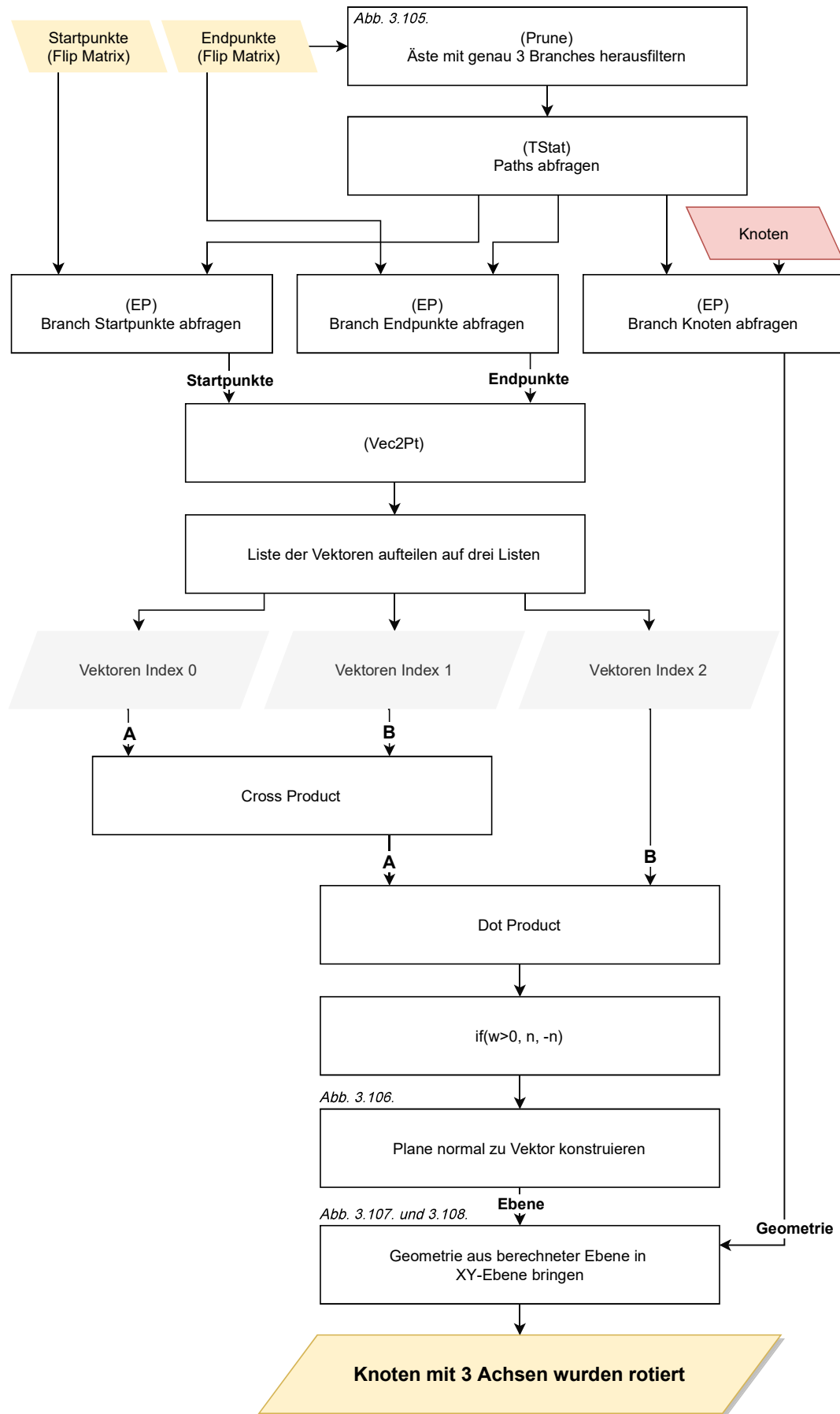


Abb. 3.108.  
Neuorientierung in XY-Ebene



Orientierung: Knoten mit 3 Achsen

Abb.3.109.  
Flow Chart Teil 10 - Orientierung: Stäbe mit 3 Achsen

## Orientierung von Knoten mit 4 Achsen, nicht rotierbar

Ab 4 Stabachsen pro Knoten wird abgefragt, ob die Vektoren der Knotenschenkel auf einer Seite einer Ebene, die durch den Knotenpunkt gelegt wird, liegen. Knoten, auf die das zutrifft, können für den 3-D-Druck auf zwei äußere Knotenschenkel gelegt werden. Trifft es nicht zu, bedeutet es, dass mindestens ein Knotenschenkel unter der XY-Ebene liegt und der Knoten 'stehend' gedruckt werden muss (Abb. 3.110.).

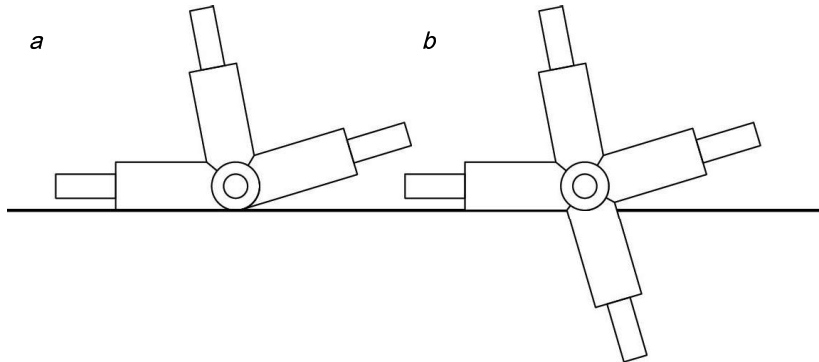


Abb. 3.110.

*Knoten mit 4 oder mehr Achsen, die auf das Druckbett gelegt werden können (a) und Knoten, die stehend auf dem Druckbett gedruckt werden müssen (b)*

Um zu bestimmen, um welche Art Knoten es sich handelt, wird ein Mesh aus den Endpunkten der Knotenschenkelvektoren erstellt (Abb. 3.112.-3.114.) und abgefragt, ob der dazugehörige Knotenpunkt innerhalb (Abb. 3.115.-3.117.) oder außerhalb des Meshs (Abb. 3.119.) liegt. Wenn der Knotenpunkt innerhalb des Meshs liegt (entspricht Fall b in Abb. 3.110.), wird dieser Knoten nicht weiter gedreht und nur auf die XY-Ebene gezogen (Abb. 3.117.-3.118.).

Die Abfrage der Knoten mit 4 Anschlüssen sowie die Verschiebung in die Druckebene erfolgt in Teil 11 des Flow Charts (Abb.3.132.).



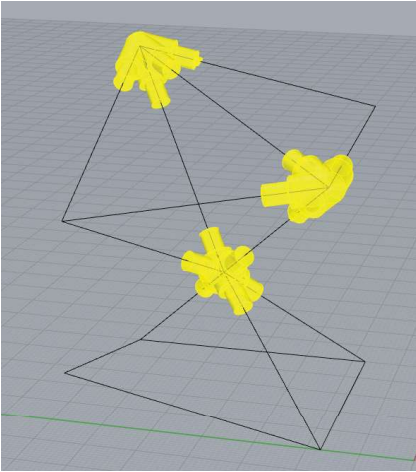


Abb. 3.111.  
Ermittlung der Knoten mit 4 oder mehr Achsen

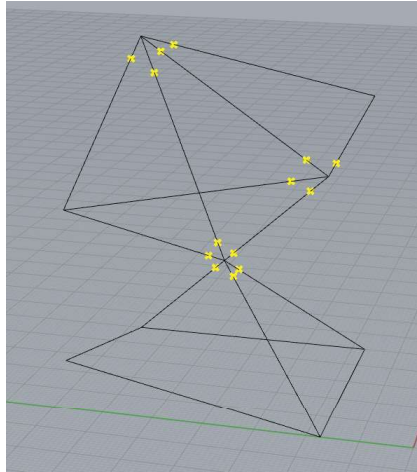


Abb. 3.112.  
Endpunkte der Knotenschenkelvektoren

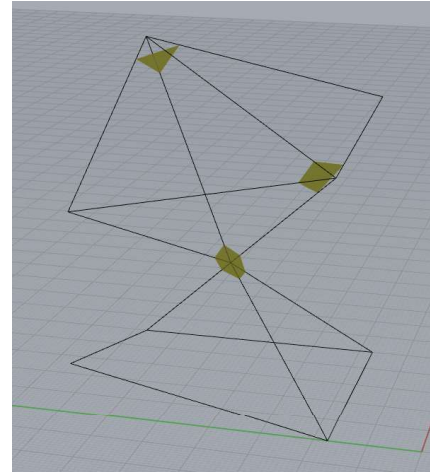


Abb. 3.113.  
Mesh aus den Endpunkten

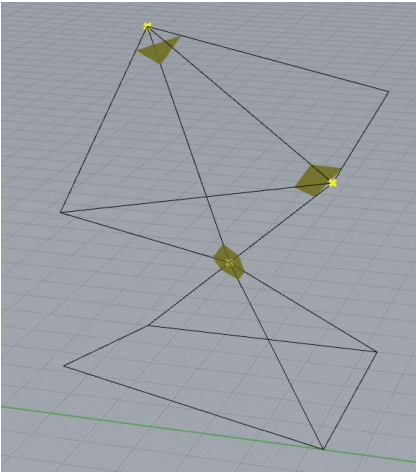


Abb. 3.114.  
Mesh Inclusion Abfrage

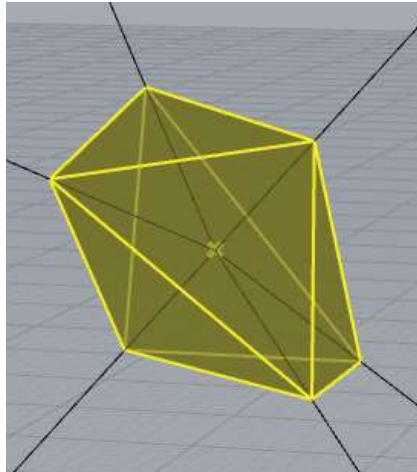


Abb. 3.115.  
Punkt im Mesh - Perspektive 1

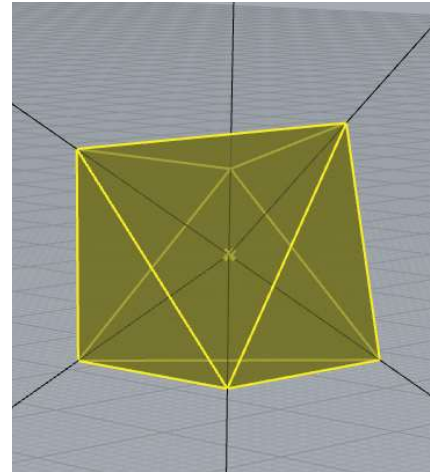


Abb. 3.116.  
Punkt im Mesh - Perspektive 2

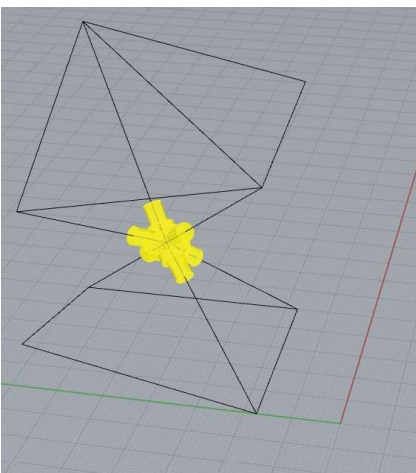


Abb. 3.117.  
Knoten, die nicht weiter gedreht werden, sind ermittelt

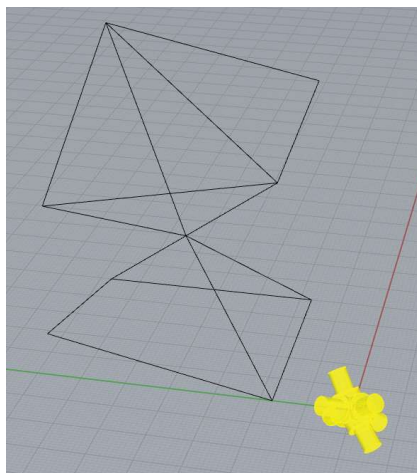


Abb. 3.118.  
Knoten wird in XY-Ebene gezogen

## Orientierung von Knoten mit 4 Achsen, rotierbar

Bei Knoten, deren Knotenpunkt außerhalb des Mesh liegt (Abb. 3.119.), werden zuerst die äußeren Stäbe ermittelt. Hierfür wird eine Ebene durch die Endpunkte (Abb. 3.121.) der Knotenschenkelvektoren berechnet (Plane Fit) (Abb. 3.122.). Hierbei handelt es sich um eine Ebene, die den Mittelwert aus den eingegebenen Punkten ergibt, da die Punkte selten tatsächlich auf einer Ebene liegen. Aus den Schnittpunkten (Abb. 3.123.) der berechneten Ebene und der Stabachsen wird eine Convex Hull erstellt (Abb. 3.124.). Die Umrandung der Convex Hull wird in einzelne Linien aufgespalten (Abb. 3.125.). Durch den Knotenpunkt (Abb. 3.119.) und die Endpunkte (Abb. 3.127.) einer dieser Linien (Abb. 3.126.) wird eine Ebene konstruiert (Abb. 3.128.), aus der wiederum der Knoten in die XY-Ebene gedreht wird (Abb. 3.129. - 3.131.). Welche Linie der Convex-Hull-Umrandung dabei gewählt wird, ist nicht relevant, weshalb die Auswahl zufällig erfolgt. Die Schritte für die rotierbaren Knoten erfolgen in Teil 12 des Flow Charts, ersichtlich in Abb. 3.133.

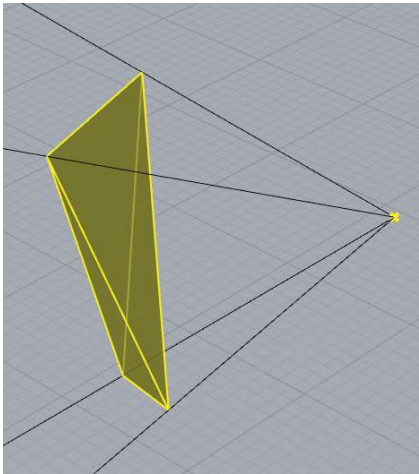


Abb. 3.119.  
Knotenpunkt liegt außerhalb des Mesh

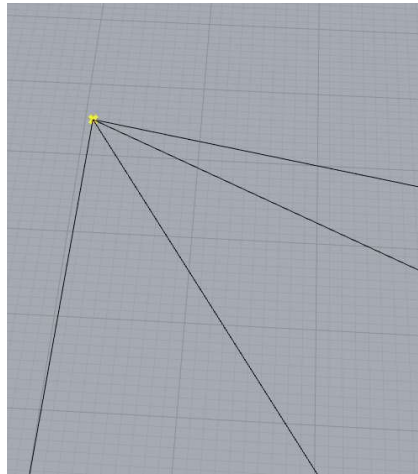


Abb. 3.120.  
Knotenpunkt ermitteln

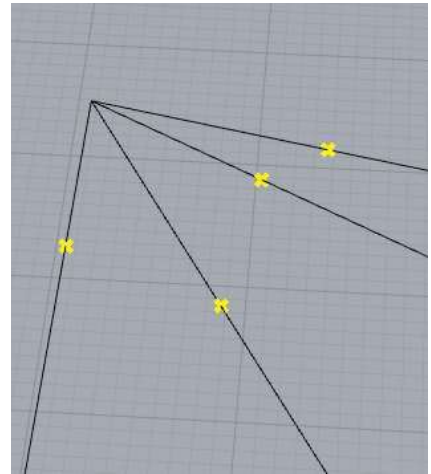


Abb. 3.121.  
Endpunkte der  
Knotenschenkelvektoren ermitteln

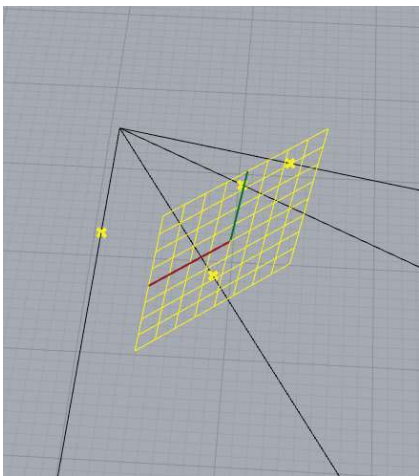


Abb. 3.122.  
Ebene durch Endpunkte der  
Knotenschenkelvektoren berechnen

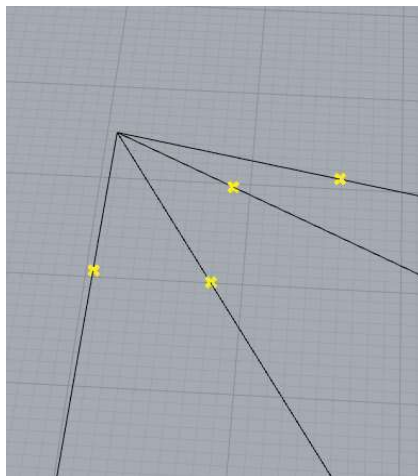


Abb. 3.123.  
Schnittpunkte der konstruierten Ebene  
und der Stabachsen

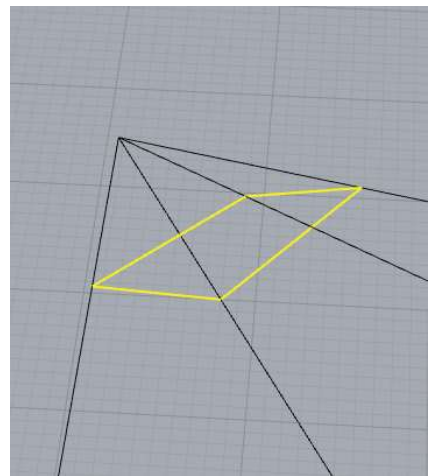


Abb. 3.124.  
Convex Hull aus den Schnittpunkten

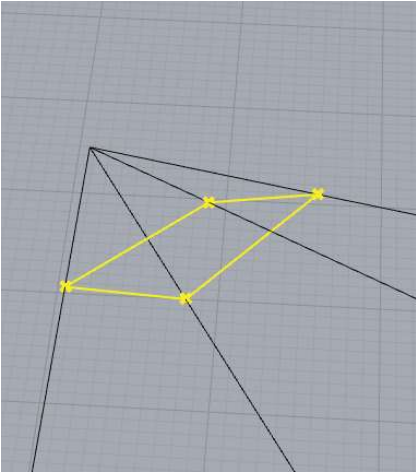


Abb. 3.125.  
Aufgespaltene Convex Hull

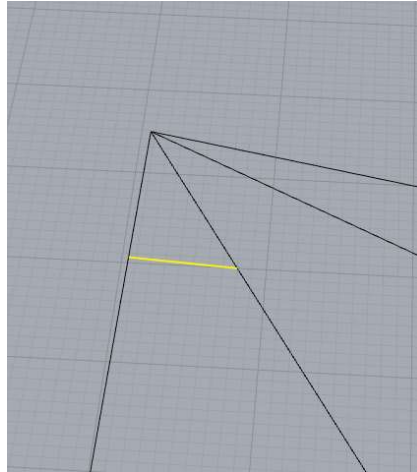


Abb. 3.126.  
Eine Kante gewählt

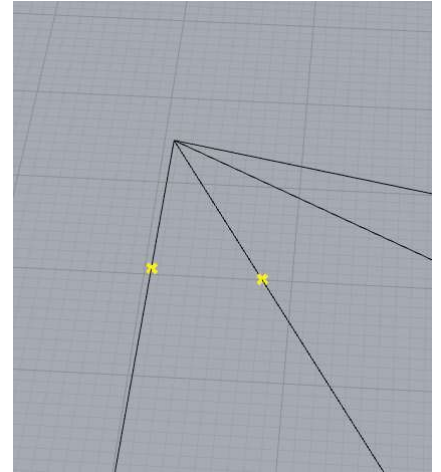


Abb. 3.127.  
Endpunkte der Convex Hull Kante

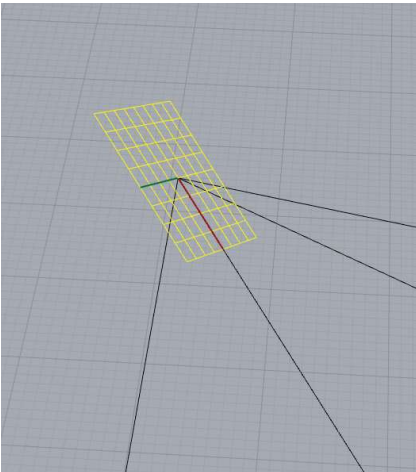


Abb. 3.128.  
Ebene durch Endpunkte und  
Knotenpunkt gelegt

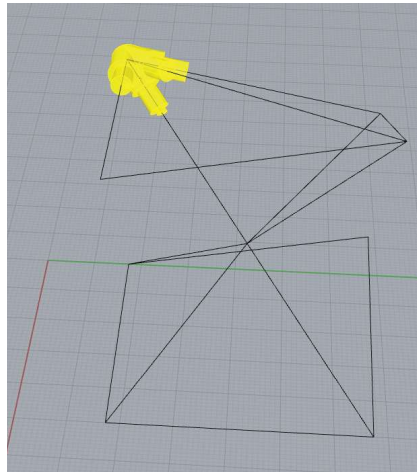


Abb. 3.129.  
Knoten in Ausgangsposition

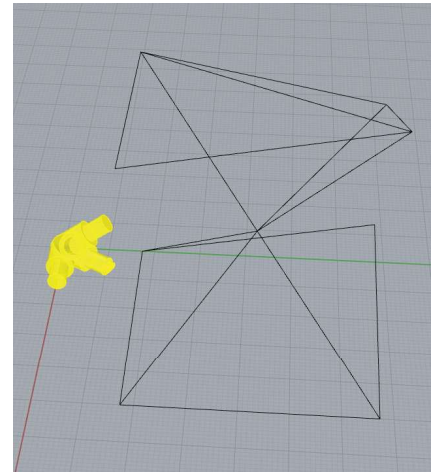


Abb. 3.130.  
Knoten in XY-Ebene gebracht

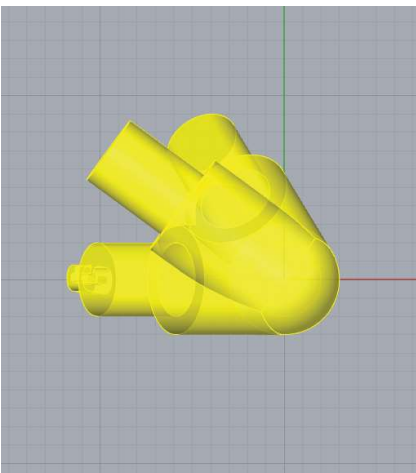


Abb. 3.131.  
Knotenschenkel liegen über der XY-  
Ebene

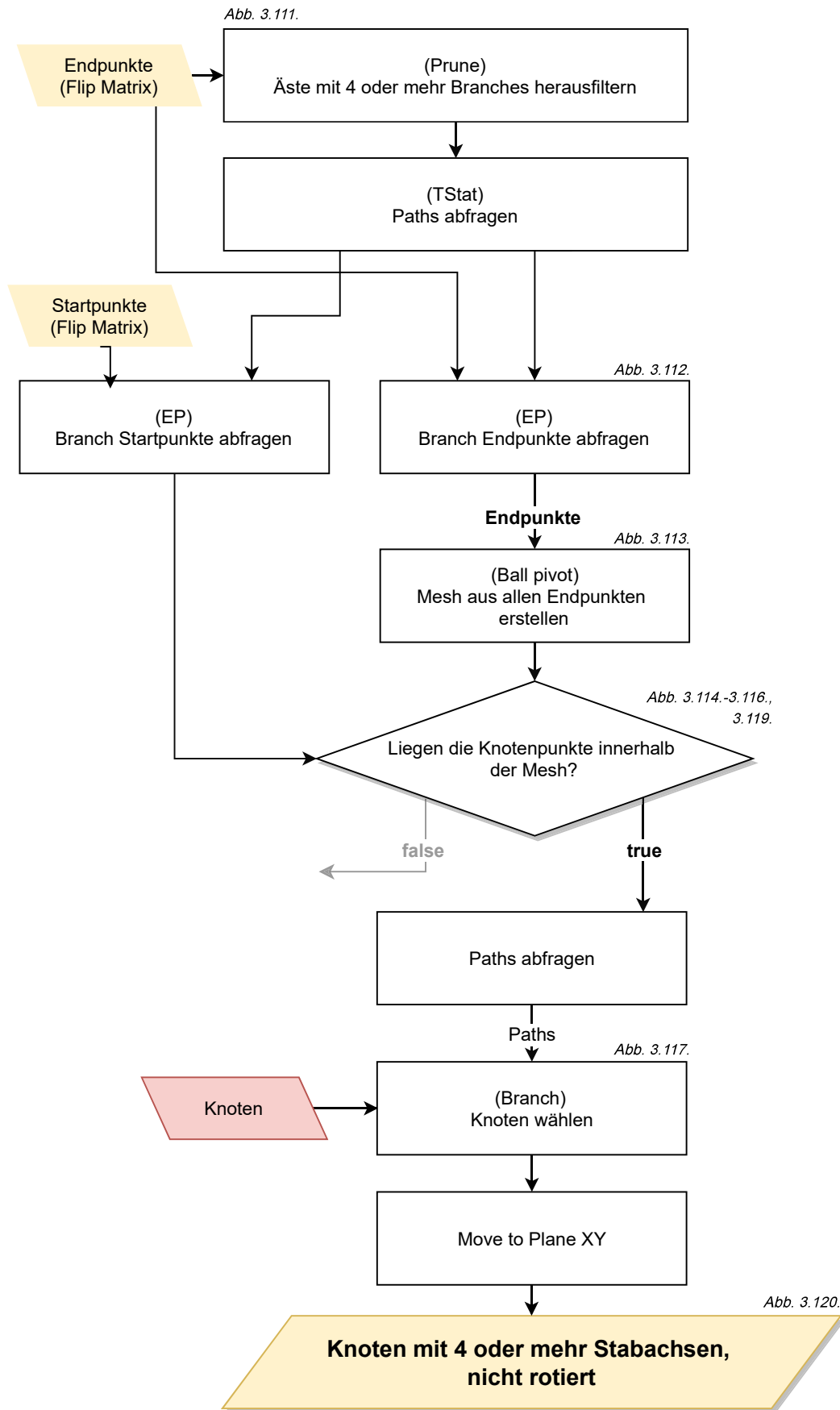


Abb. 3.132.  
Flow Chart Teil 11 - Orientierung: Stäbe mit 4 Achsen, Teil 1

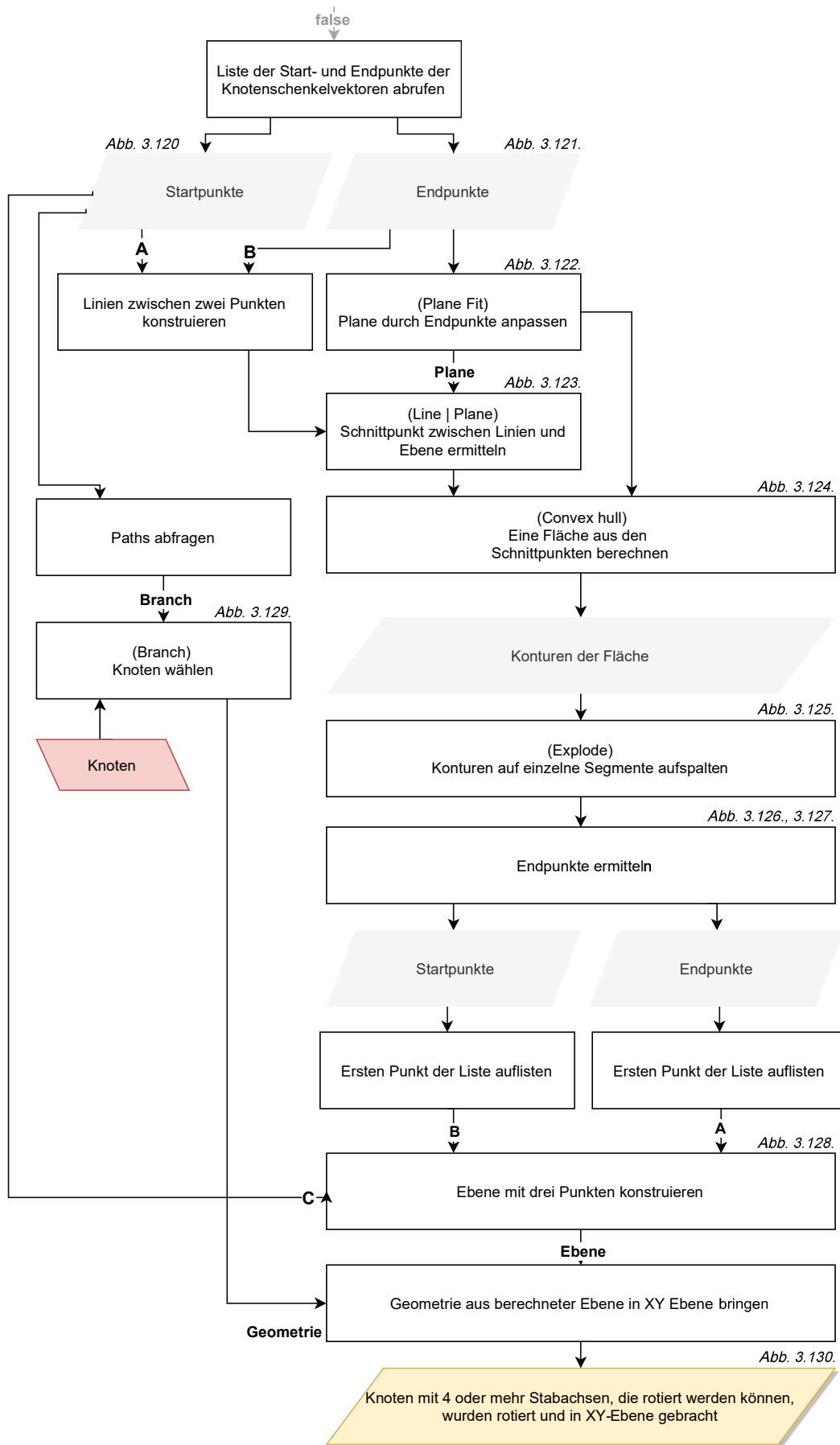


Abb. 3.133.  
Flow Chart Teil 12 - Orientierung: Stäbe mit 4 Achsen, Teil 2

## Anordnen der Knoten im Raster

Nachdem die Orientierung aller Knoten abgeschlossen wurde, befinden sie sich alle im Ursprung der XY-Ebene (Abb. 3.134.). Von hier werden sie in einem ebenen Raster verteilt (Abb. 3.135. - 3.138.). Die Größe und Anzahl der Rasterzellen können vom Benutzer eingestellt werden (Parameter x und y), wobei die tatsächliche Anzahl der benötigten Zellen von der Anzahl der Knoten abhängt und vom Algorithmus auf diese Menge reduziert wird (Abb. 3.137.). Die Knoten werden in aufsteigender Reihenfolge im Raster verteilt (Abb. 3.138.) und anschließend auf die XY-Ebene gezogen (Abb. 3.139.). Die Knoten sind nun fertig und können für den Druck exportiert werden.

Diese Schritte sind in Teil 13 des Flow Charts in Abb. 3.140. ersichtlich.

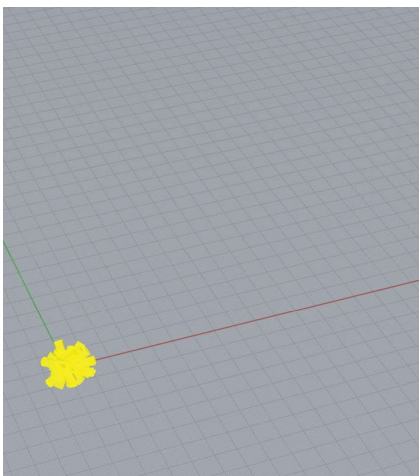


Abb. 3.134.  
Gedrehte Knoten liegen im gleichen Punkt

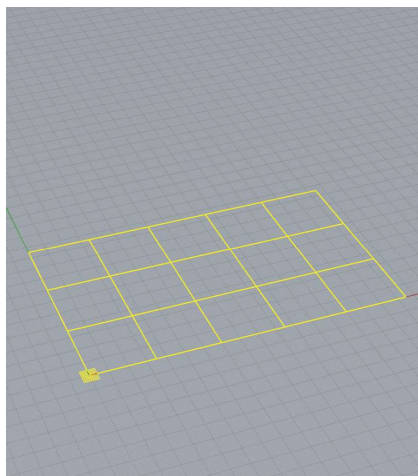


Abb. 3.135.  
Raster

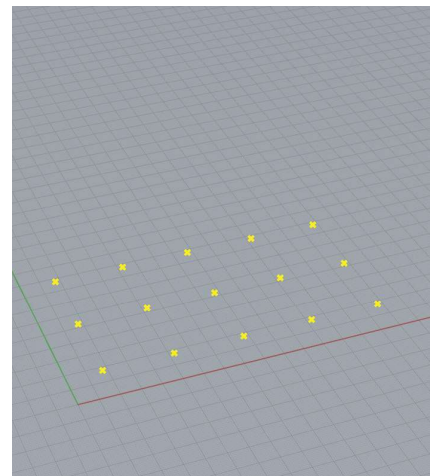


Abb. 3.136.  
Mittelpunkte der Rasterzellen

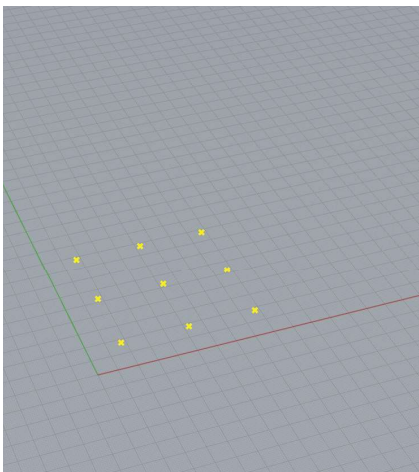


Abb. 3.137.  
Reduktion der Anzahl an Punkten auf die Anzahl der Knoten

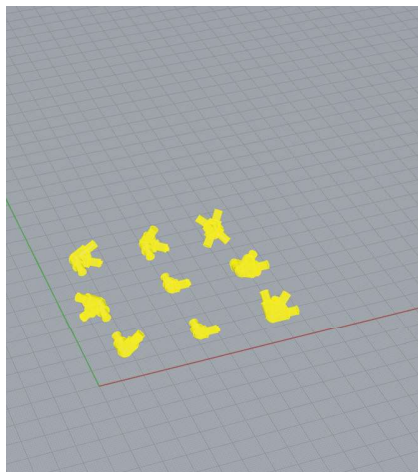


Abb. 3.138.  
Knoten sind im Raster verteilt

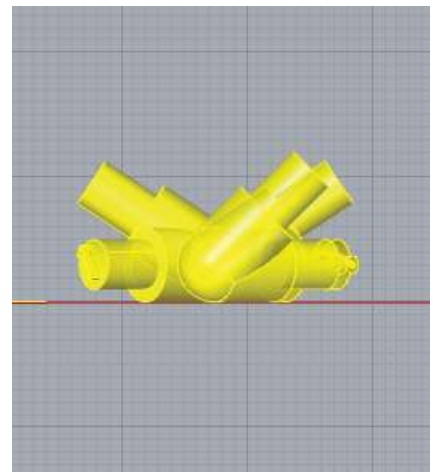
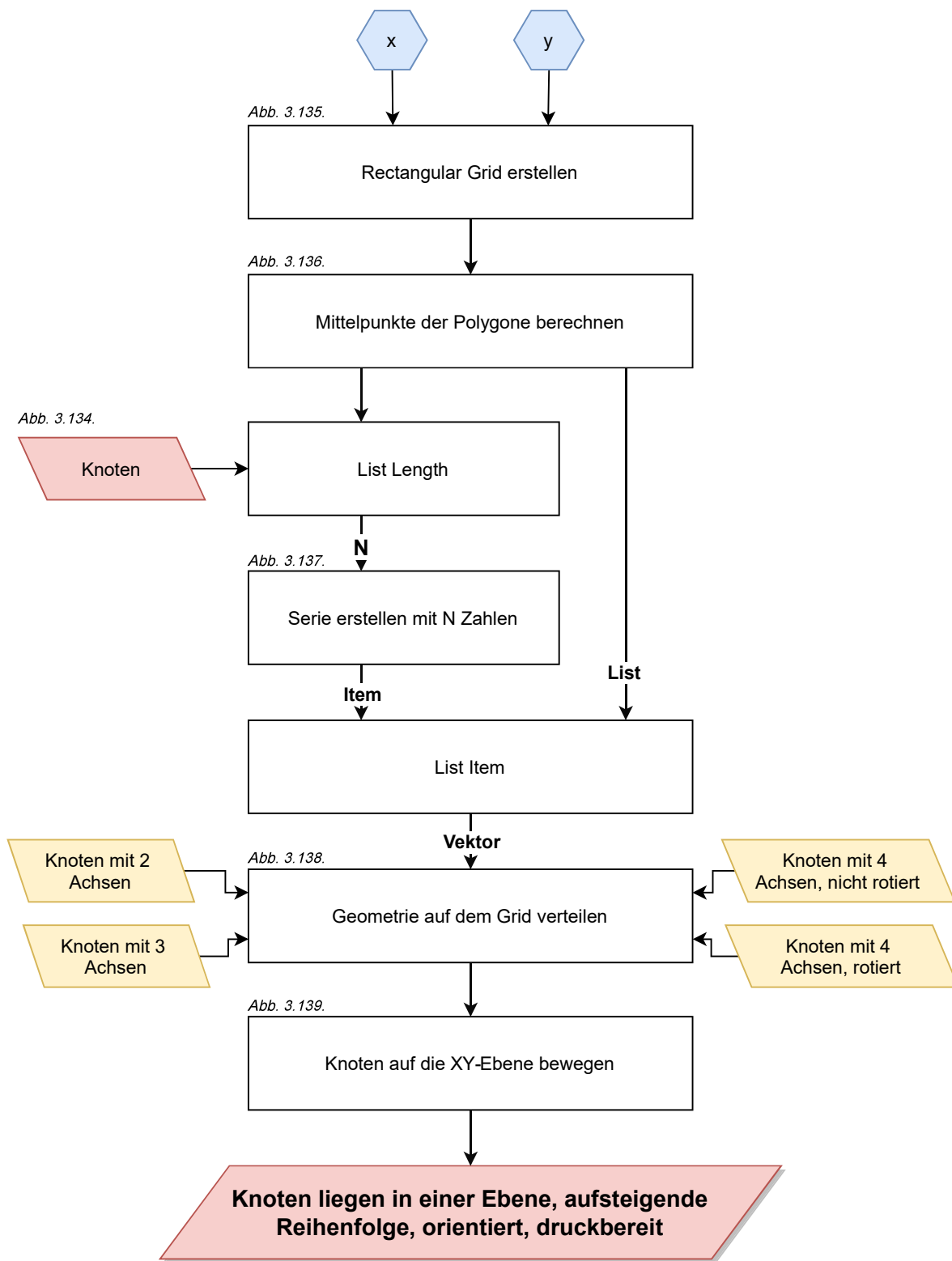


Abb. 3.139.  
Knoten liegen alle auf derselben Ebene



Prozess Orientierung: Knoten mit 4 und mehr Achsen

Abb. 3.140. Flow Chart Teil 13 - Orientierung: Anordnung der Knoten auf dem Druckbett

### 3.3.1.4. Erstellung von Sonderelementen

Bei Konstruktionen, deren Knotenpunkte zu nahe aneinanderliegen, kann es dazu kommen, dass die Stäbe zwischen den Knoten zu kurz ausfallen, oder dass die Knoten sich berühren. Für solche Fälle gibt es die Option, diese Stäbe mit den dazugehörigen Knoten mitzudrücken. Parameter  $e$  bestimmt den Mindestabstand zwischen zwei Knoten, gemessen von den Enden der Anschlussstifte. Wird dieser Wert unterschritten, werden die Knoten und Stäbe zusammengefügt.

Zuerst werden die Längen der Stäbe ermittelt (Abb. 3.141.) und entlang der zu kurzen Stäbe wird ein Zylinder mit Durchmesser  $a$  extrudiert (Abb. 3.142.). Anhand der Endpunkte der Stabachse (Abb. 3.143.) werden die dazugehörigen Knoten ermittelt (Abb. 3.144.) und der Stab und die Knoten werden zusammengefügt (Abb. 3.145.). Elemente, die auf diese Weise entstehen, werden bei der Orientierung der Knoten nicht berücksichtigt. Die Erstellung von Sonderelementen ist in Teil 14 und 15 des Flow Charts in Abb. 3.146. und 3.147. dargestellt.

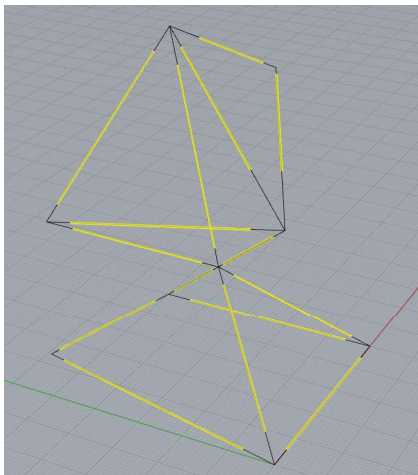


Abb. 3.141.  
Stablängen ermittelt

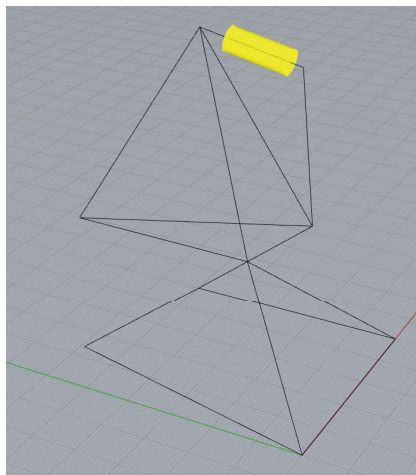


Abb. 3.142.  
Zu kurze Stäbe aussortiert

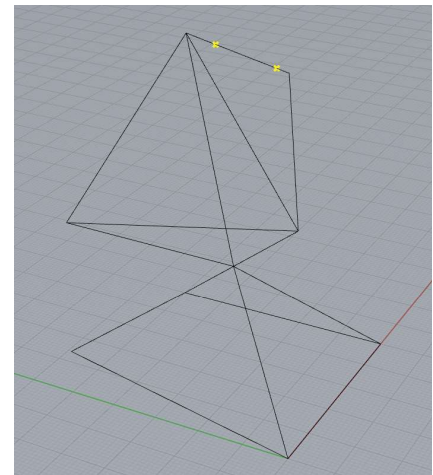


Abb. 3.143.  
Endpunkte der Stabachse

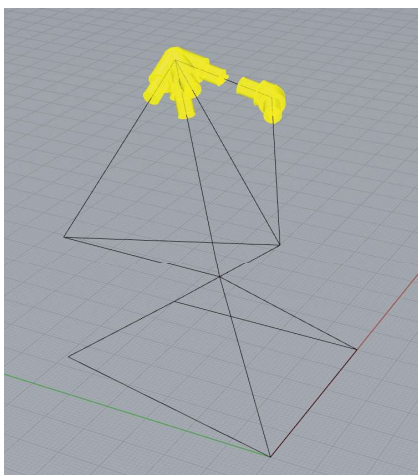


Abb. 3.144.  
Die dazugehörigen Knoten ermittelt

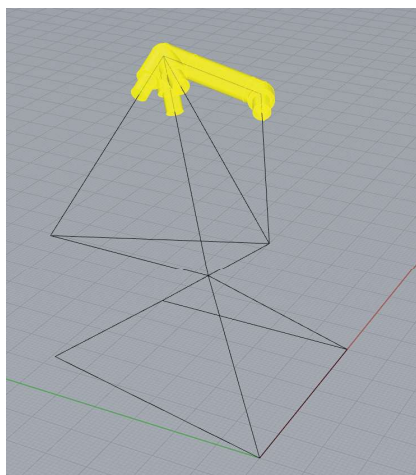


Abb. 3.145.  
Knoten und Stab miteinander verbunden



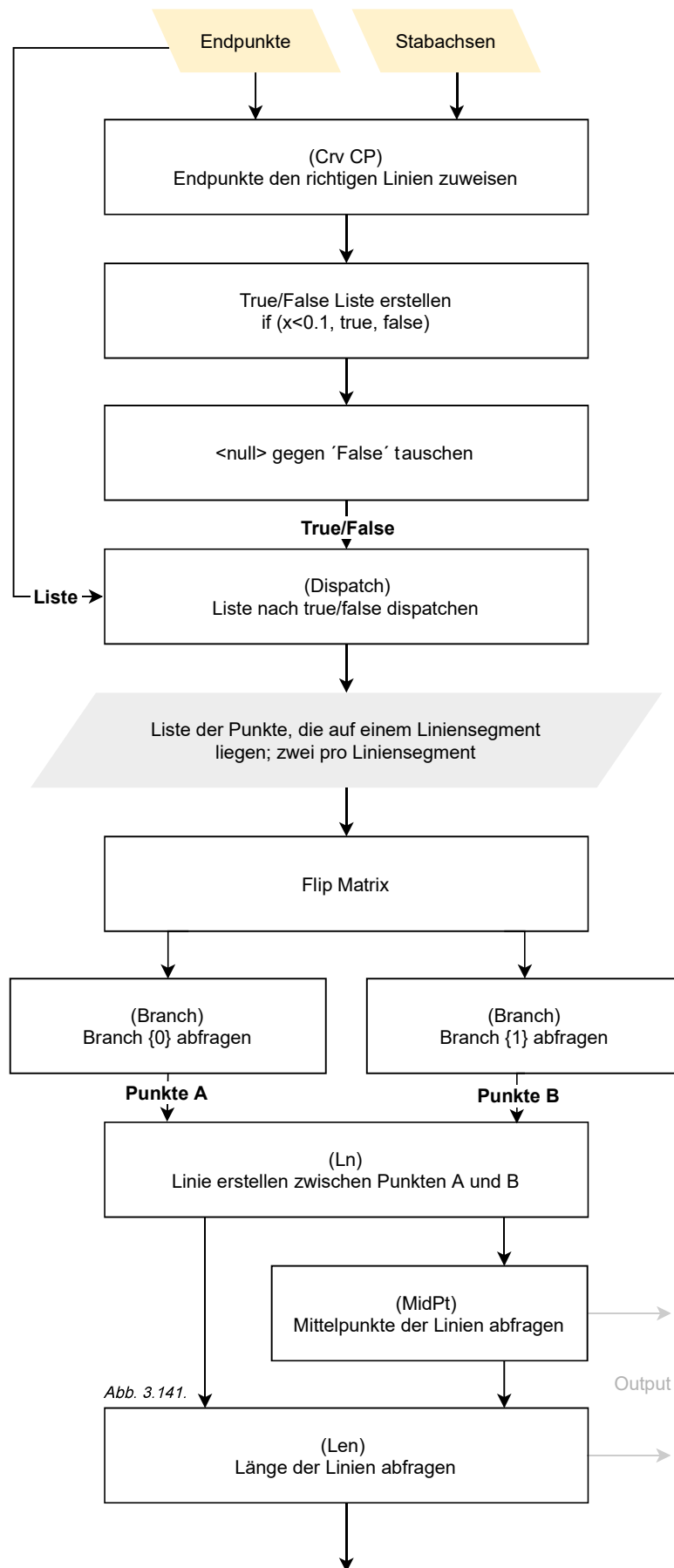
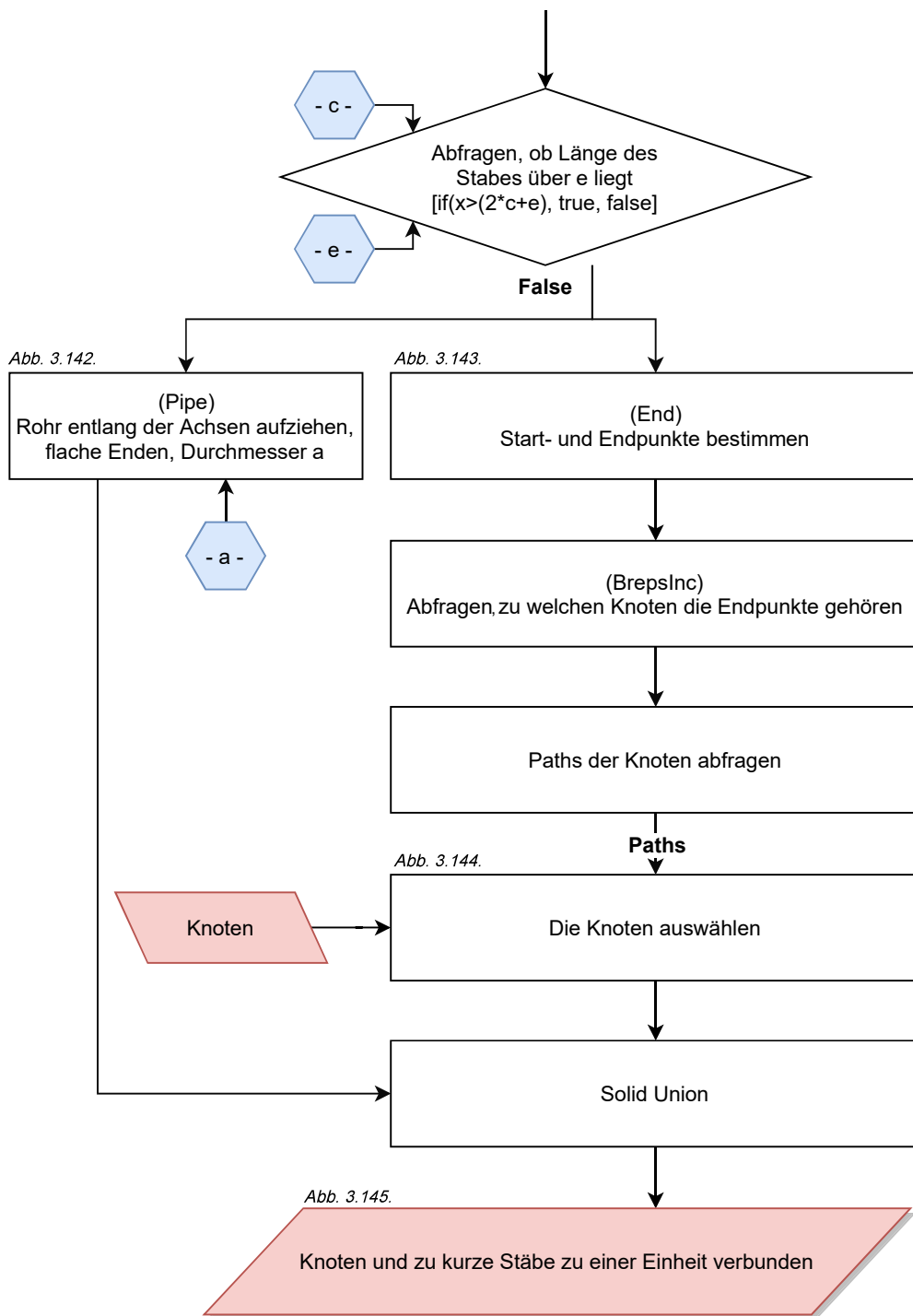


Abb. 3.146.  
Flow Chart Teil 14 - Erstellung von Sonderelementen bei zu kurzen Stäben Teil 1



Erstellung von Sonderknoten bei zu kurzen Stäben

Abb. 3.147.  
Flow Chart Teil 15 - Erstellung von Sonderelementen bei zu kurzen Stäben Teil 2

### 3.3.1.5. Outputs

Um nach dem 3-D-Druck das Modell bauen zu können, werden bestimmte Unterlagen benötigt. Folgende Daten werden vom Algorithmus ausgegeben:

- Eine Liste mit allen Stablängen (Abb. 3.148.)
- Die Anzahl der Stäbe (Abb. 3.148.)
- Die Gesamtlänge aller Stäbe - Dieser Wert wird benötigt, wenn die Stäbe passend zugeschnitten werden, um die Gesamtlänge der Halbzeuge zu ermitteln (Abb. 3. 148.)
- Die Nummer der Knoten, die Teil eines Sonderelements sind - Bei der Erstellung der Sonderelemente kann es passieren, dass die Knotenmarker bei der Verbindung des Stabes mit den Knoten verschwinden. (Abb. 3. 148.)
- Eine Übersicht der Knotenmarker in einer Ebene (‘zweidimensionale Markierung’) - Hierfür werden die einzelnen Markierungen in der Position, in der sie sich befinden in die horizontale Ebene gekippt (Abb. 3.150. und 3.153.)
- Die dreidimensionale Anordnung der Knotenmarkierungen (‘dreidimensionale Markierung’) - Diese befinden sich an den gleichen Stellen und sind auch gleichermaßen ausgerichtet, wie die Knotenmarker an den Anschlussstiften (Abb. 3.151 und 3.154.)
- Die Markierungen der Stäbe im Mittelpunkt der Stabachsen. Der Text ist horizontal ausgerichtet (Abb. 3.152. und 3.155.)

Die Erstellung dieser Outputs ist in Teil 16 des Flow Charts in Abb. 3.156. dargestellt.

Alle Stablängen	
	{ 1 }
0	16.4
1	31.6
2	32.2
3	33.3
4	38.4
5	38.4
6	40.5
7	41
8	41
9	41.8
10	42.3
11	47.7
12	49.9
13	56.9
14	58.1

Anzahl der Stäbe	
	{ 1 }
0	15

Summe aller Stablängen	
	{ 1 }
0	609.5

Knoten in Sonderelementen	
	{ 4 }
0	{ 4 }
1	{ 7 }

Abb. 3.148.

Outputs des Algorithmus: Stablängen, Anzahl der Stäbe, Summe der Stablängen, Knoten in Sonderelementen

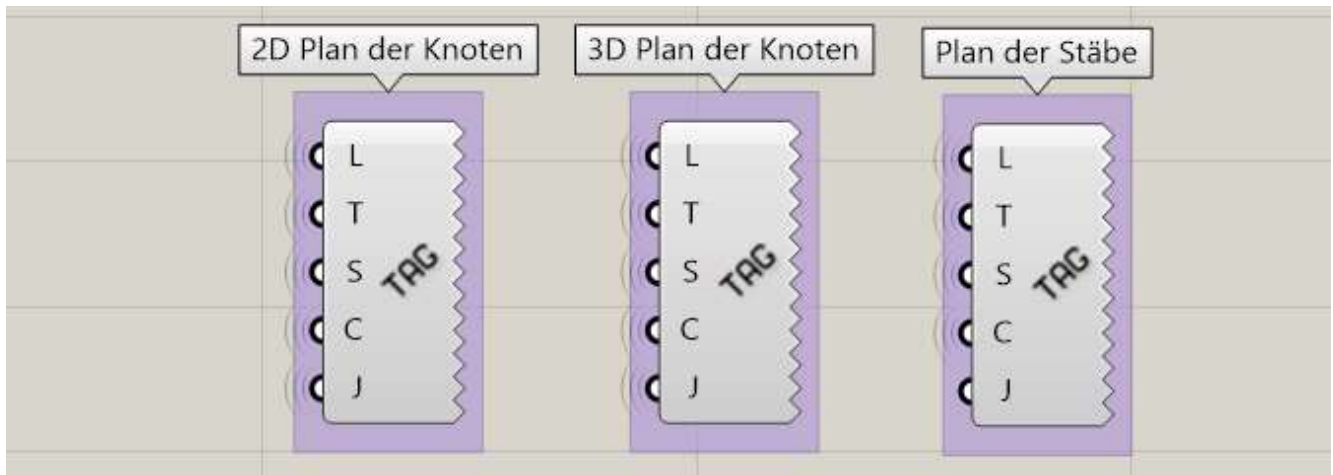


Abb. 3.149.  
Tags zur Markierung der Knoten und Stäbe

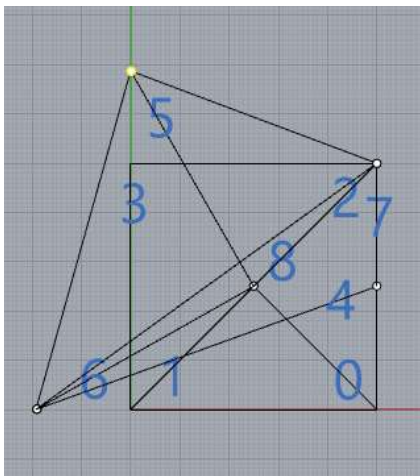


Abb. 3.150.  
Draufsicht 'zweidimensionale Markierung' der Knoten

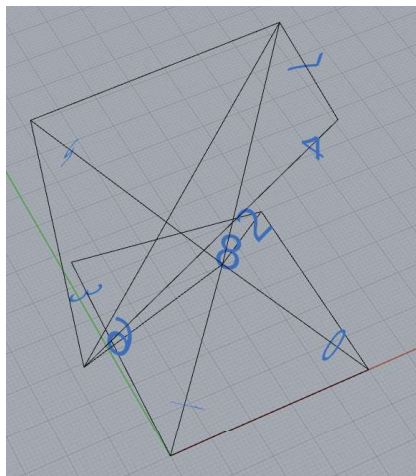


Abb. 3.151.  
Draufsicht 'dreidimensionale Markierung' der Knoten

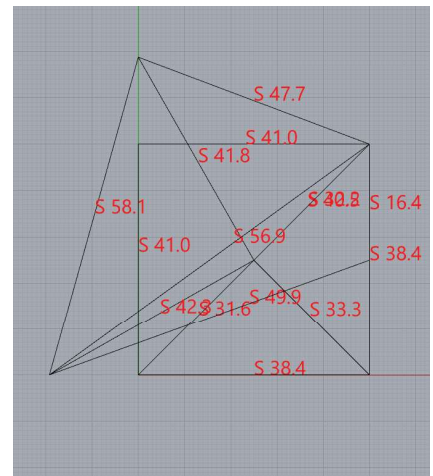


Abb. 3.152.  
Draufsicht der Markierung der Knoten

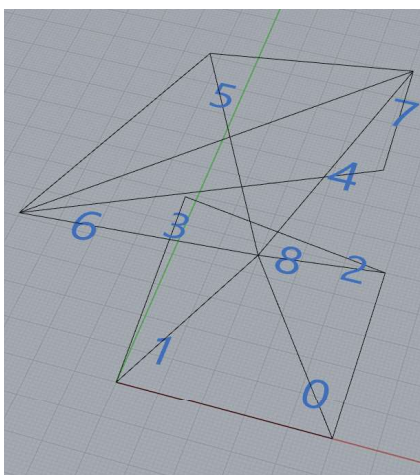


Abb. 3.153.  
Perspektivenansicht zweidimensionale Markierung' der Knoten

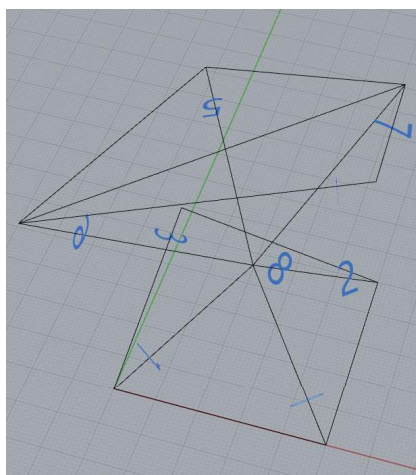


Abb. 3.154.  
Perspektivenansicht dreidimensionale Markierung' der Knoten

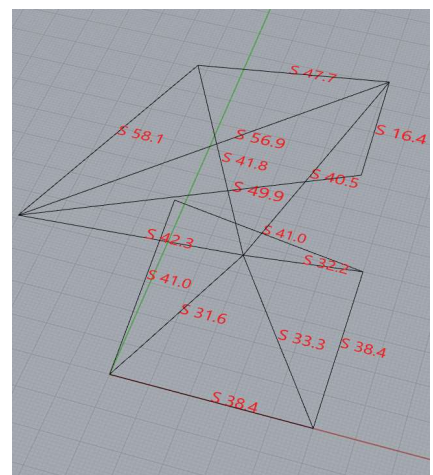


Abb. 3.155.  
Perspektivenansicht der Markierung der Knoten

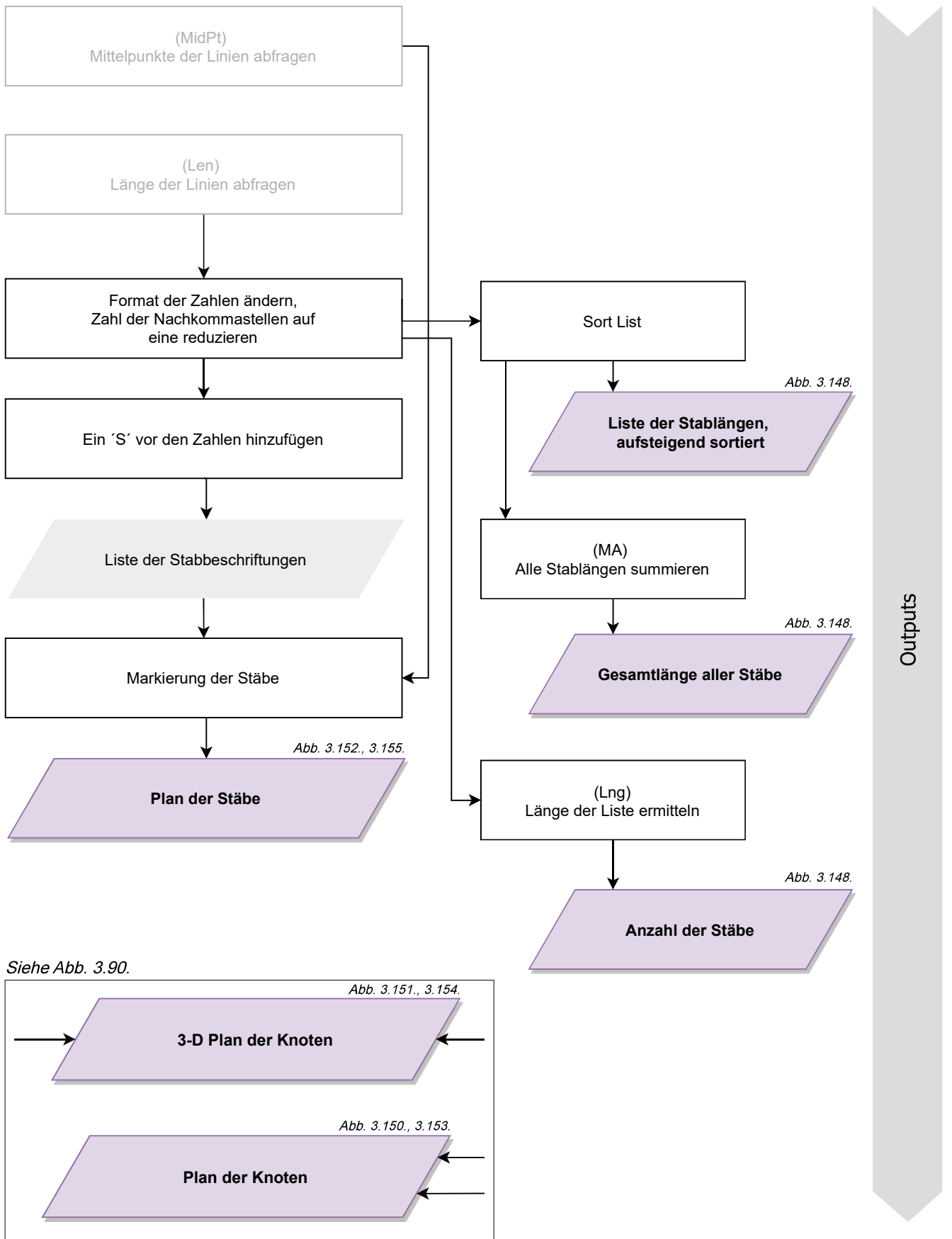


Abb. 3.156.

Flow Chart Teil 16 - Outputs: Unterlagen und Daten zur Unterstützung des Modellbauprozesses

### 3.3.2. Modellbau

Nachdem die Erstellung der Knoten in Grasshopper abgeschlossen wurde, kann die Geometrie exportiert und für den 3-D-Druck vorbereitet werden (Siehe Abschnitt 2.3.3.). Zusätzlich zu den Einstellungen, die bereits in Abschnitt 2.3.3. beschrieben wurden, sind folgende zwei Einstellungen empfehlenswert (bei einer Druckschichtdicke von 0,1 mm und Linienbreite von 0,3 mm):

- Bei einer Knotenmarkergröße unter 4 mm, ist es ratsam, die Werkstücke auf einem durchgehenden **Brim** (engl. Rand)\* zu platzieren, weil die gedruckten Knotenmarker schwer erkennbar sind. Da die Knoten in aufsteigender Reihenfolge in der horizontalen Ebene sortiert sind, kann eine zusätzliche manuelle Markierung der Knoten die Zuordnung erleichtern (Abb. 3.157.).  
*\*ein Brim vergrößert die Grundfläche des gedruckten Objekts und ist in der Regel eine Schichthöhe hoch. Ein Durchgehendes Brim entsteht, indem die Größen der einzelnen Brims soweit vergrößert werden, dass sie sich mit den angrenzenden Brims verbinden*
- Ein **Raft\*\*** (engl. Floß) von mindestens 5 Layern erleichtert das Entfernen der Stützstruktur (Abb. 3.157.)

*\*\*ein Raft kann als Fundament des Objekts beschrieben werden und befindet sich, im Gegensatz zum Brim, nur unter dem gedruckten Objekt und ist in der Regel mehrere Schichten hoch.)*



Abb. 3.157.

3-D-gedruckte Knoten mit Rafts (obere Reihe) und Brims (untere Reihe)



Abb. 3.158.

Vorbereitete Stäbe für die Lamellenkuppel aus Abb. 3.167.

Während die Knoten gedruckt werden, können die Stäbe anhand der Stablängen-Liste vorbereitet werden. Ob längenverstellbare oder passend zugeschnittene Stäbe verwendet werden, bleibt dem Benutzer überlassen. Die eingestellten Stäbe für die Lamellenkuppel (Abb. 3.167.) sind in Abb. 3.158. dargestellt.

Anhand der Pläne, die in Abschnitt 3.3.1.5 vorgestellt wurden, kann der Modellbauprozess durchgeführt werden. Je nach Komplexität und Größe des Modells, ist es vorteilhaft, die Stäbe und Knoten vorab in kleineren Baugruppen zusammenzufügen (Abb. 3.159.-160..) und dann Schritt für Schritt zum Gesamtmodell zu verbinden (Abb. 3.162. - 3.166.).

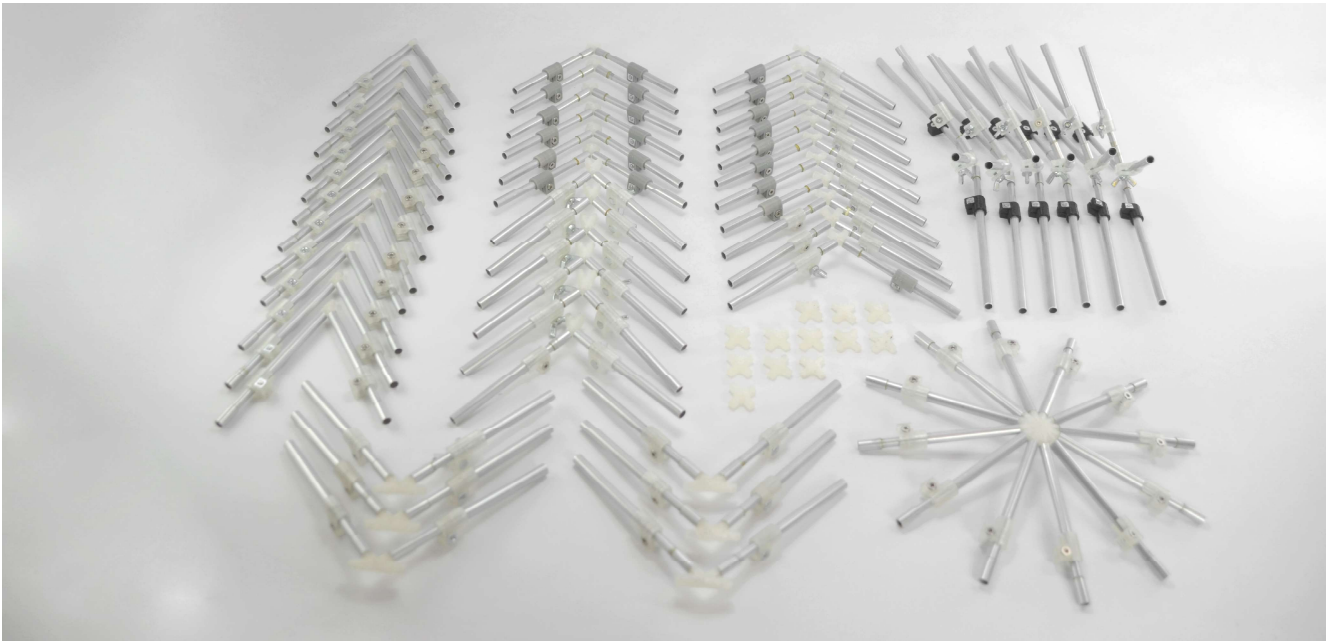


Abb. 3.159.  
Stäbe in zweier Gruppen mit den Knoten vorab zusammengefügt, Modell Lamellenkuppel

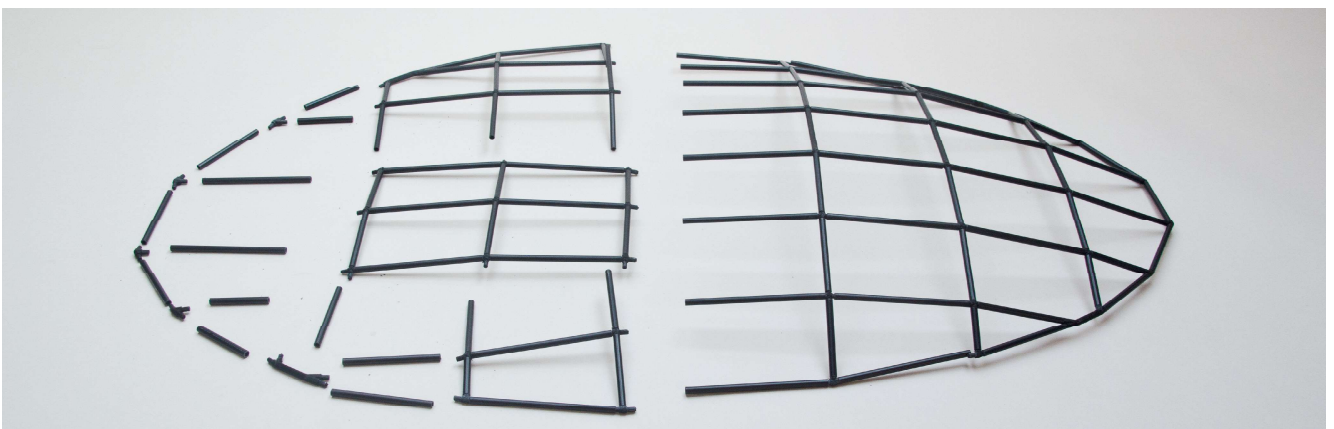


Abb. 3.160.  
Stäbe und Knoten werden in Abschnitten zusammengefügt, Modell Translationsschale

Zur Optimierung des Algorithmus und der Stäbe wurden während dem Entwicklungsprozess mehrere Modelle erstellt. Anschließend werden drei Modelle und die daraus gewonnenen Erkenntnisse vorgestellt.

## Lamellenkuppel

Die hier dargestellte Lamellenkuppel besteht aus 12 gleichen Segmenten, dementsprechend gibt es auch von jedem Element 12 Stück (eine Übersicht der unterschiedlichen Elemente ist in Abb. 3.161. dargestellt). Auf diese Weise konnte getestet werden, wie groß die Abweichung bei der Herstellung der Anschlussstifte tatsächlich ist. Alle gleichen Knoten wurden immer im selben Druckvorgang erstellt. Der Innendurchmesser der verwendeten Stäbe ist 2,5 mm und die Anschlussstifte wurden mit einem Durchmesser von 2,48 mm gedruckt. Ein minimaler Unterschied zwischen den einzelnen Anschlussstiftdurchmessern konnte festgestellt werden, dennoch konnte das Modell gut montiert werden. In sehr wenigen Fällen war es notwendig, die Knoten zusätzlich mit Klebstoff zu fixieren. Wie groß diese Abweichung ist, hängt vom verwendeten Drucker und dessen Einstellung ab.

Für dieses Modell wurden längenverstellbare Stäbe aus Aluminiumrohren erstellt. Das Außenrohr hatte die Maße 6x0,5 mm und das innere 5x0,5 mm. Die Rohre werden in der Mitte mit einer Laschenklemme fixiert, wodurch die Stäbe in Längsrichtung sehr belastbar sind. Wegen der dünnen Wände der Aluminiumrohre war es möglich, die Stäbe auch auf Knoten zu stecken, dessen Anschlussstifte dicker ausgefallen sind, weil die Rohre eine leichte Verformung zuließen. Die Einstellung der Stablängen kann durch eine Vorrichtung mit Anschlägen an beiden Enden erleichtert werden, vor allem wenn mehrere Stäbe mit der gleichen Länge benötigt werden. Der Modellbauprozess und das Modell werden in den Abb. 3.162.-3.172. dargestellt.



Abb.3.161.  
Elemente der Lamellenkuppel



Abb.3.162.  
Lamellenkuppel Aufbau Schritt 1



Abb. 3.163.  
Lamellenkuppel Aufbau Schritt 2



Abb. 3.164.  
Lamellenkuppel Aufbau Schritt 3



Abb. 3.165.  
Lamellenkuppel Aufbau Schritt 4



Abb. 3.166.  
Lamellenkuppel Aufbau Schritt 5



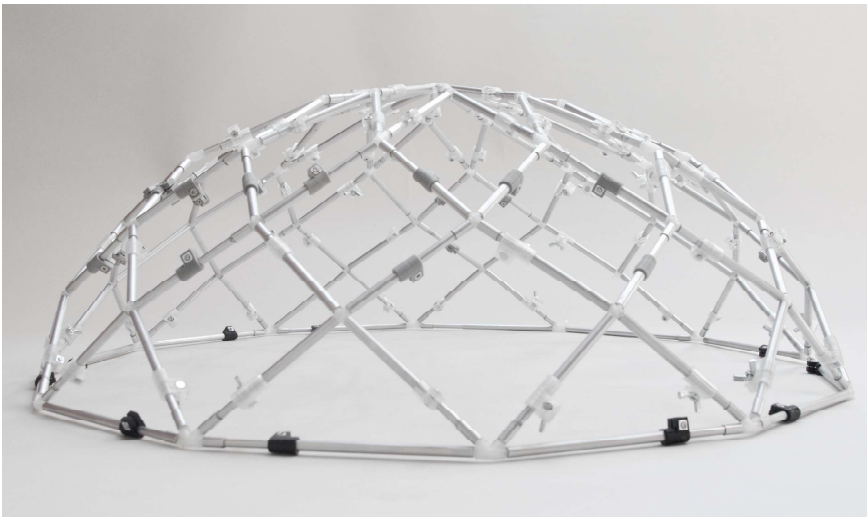


Abb. 3.167.  
Modell Lamellenkuppel 1

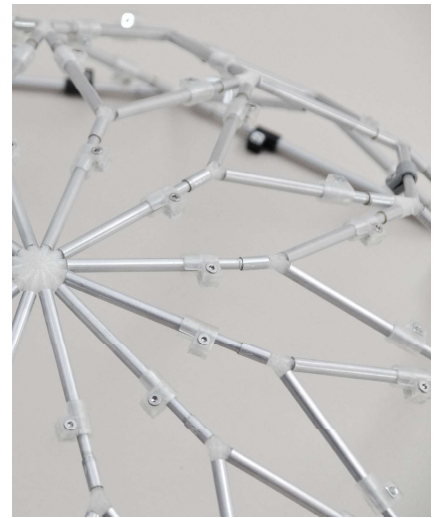


Abb. 3.168.  
Detail 1 Lamellenkuppel

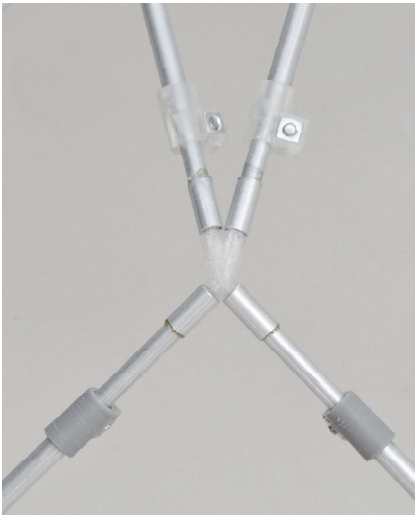


Abb. 3.169.  
Detail 2 Lamellenkuppel



Abb. 3.170.  
Modell Lamellenkuppel 2



Abb. 3.171.  
Detail 3 Lamellenkuppel



Abb. 3.172.  
Detail 4 Lamellenkuppel

## Fachwerkmodelle

Längenverstellbare Stäbe haben den Vorteil, dass sie wiederverwendet werden können. Dadurch ist es möglich, ohne zusätzlichen Materialaufwand für die Herstellung der Stäbe, Veränderungen am Modell durchzuführen. In den Abb. 3.174.-3.188. werden vier Abwandlungen eines Raumfachwerks dargestellt, bei deren Erstellung die gleichen Stäbe verwendet wurden.

Die verwendeten Stäbe wurden aus Aluminiumrohren mit Durchmessern 6x0,5 mm und 5x0,5 mm hergestellt, jedoch ohne Klemmen. Die Enden des Innenrohres sind so verformt, dass ausreichend Reibung entsteht, um die Stablängen zu fixieren. Diese Stäbe sind im Vergleich zu den Stäben, die für die Lamellenkuppel verwendet wurden, weniger belastbar. Außerdem waren manche Anschlussstifte zu dünn, weswegen die Verbindung zwischen Stab und Knoten nicht belastbar war. Dieses Problem wurde gelöst, indem das Rohr an diesem Ende mit einer Zange verformt wurde, um es an die Anschlussstifte anzupassen.



Abb. 3.173.  
3-D-gedruckter Knotensatz eines Raumfachwerks

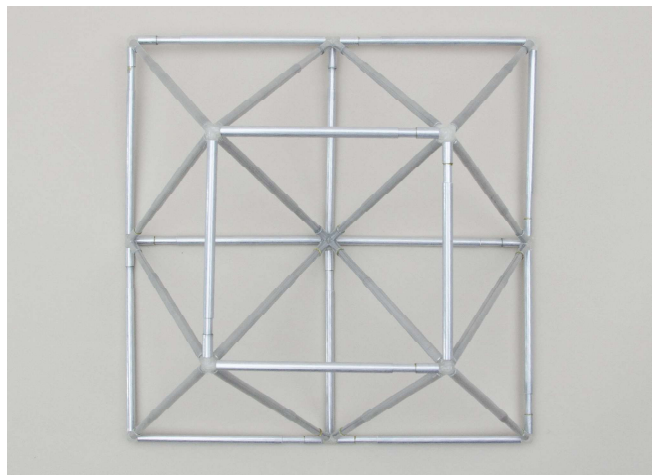


Abb. 3.174.  
Fachwerk Variante 1, Draufsicht

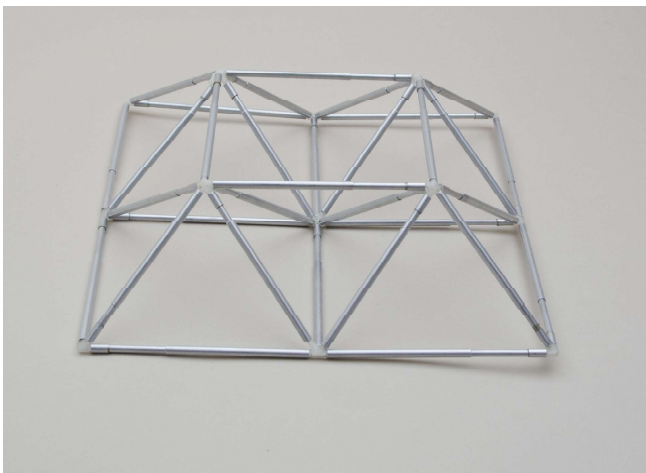


Abb. 3.175.  
Fachwerk Variante 1, Perspektive vorne

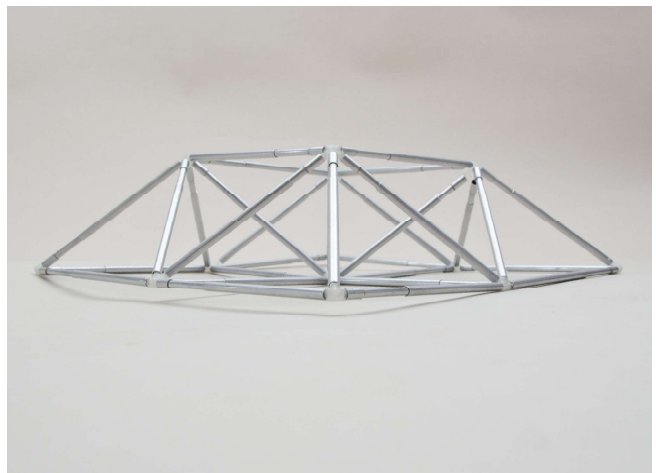


Abb. 3.176.  
Fachwerk Variante 1, Ansicht diagonal

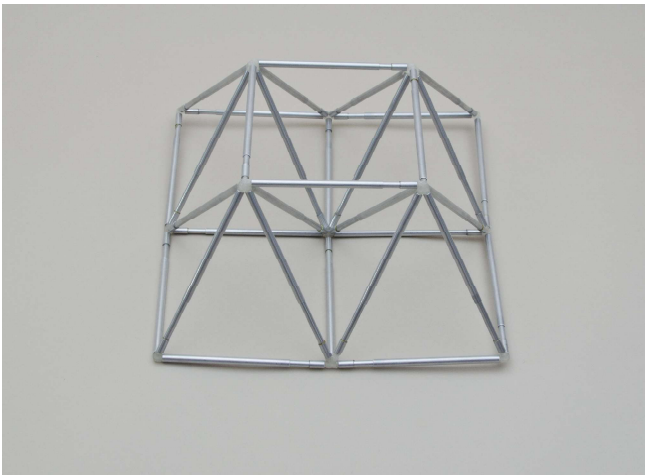


Abb. 3.177.  
Fachwerk Variante 2, Perspektive vorne

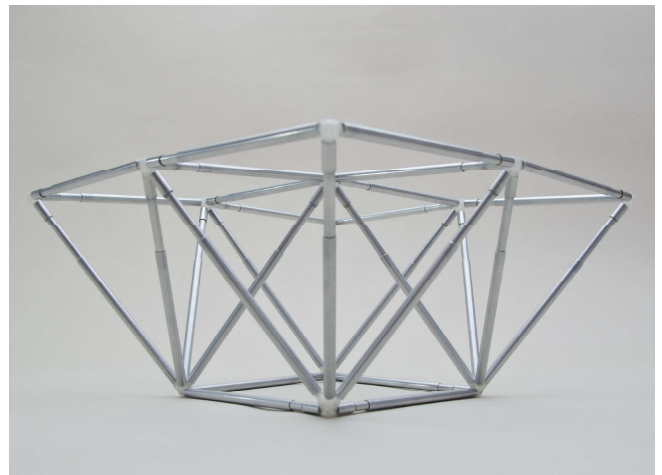


Abb. 3.178.  
Fachwerk Variante 2, Ansicht diagonal

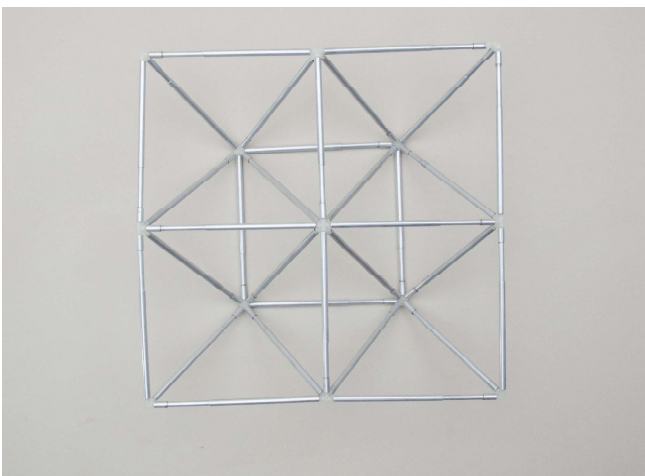


Abb. 3.179.  
Fachwerk Variante 2, Draufsicht

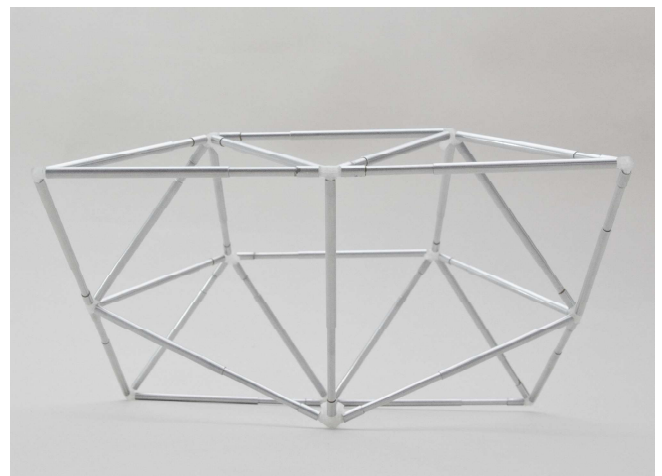


Abb. 3.180.  
Fachwerk Variante 3, Ansicht von vorne

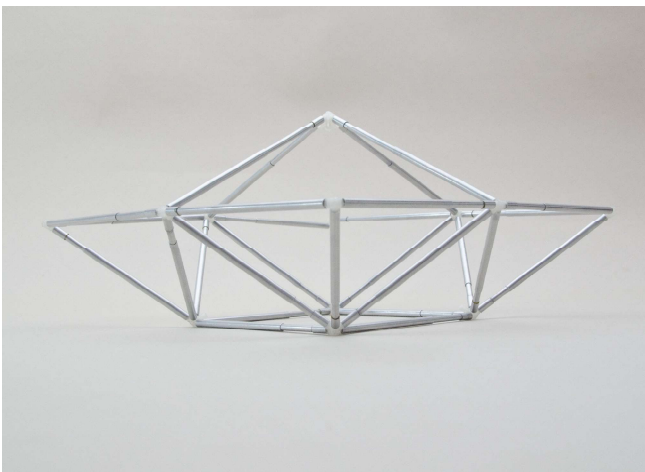


Abb. 3.181.  
Fachwerk Variante 3, Ansicht diagonal

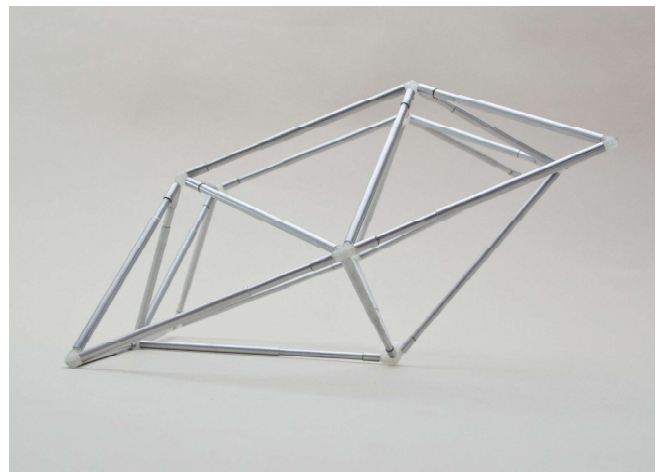


Abb. 3.182.  
Fachwerk Variante 3, Ansicht von links

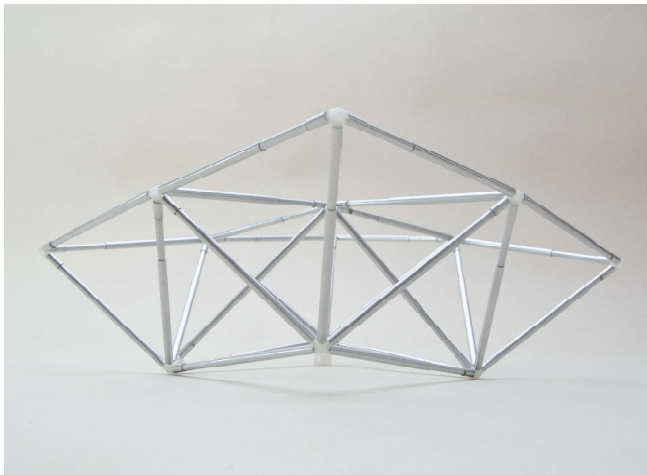


Abb. 3.183.  
 Fachwerk Variante 4, Ansicht von vorne

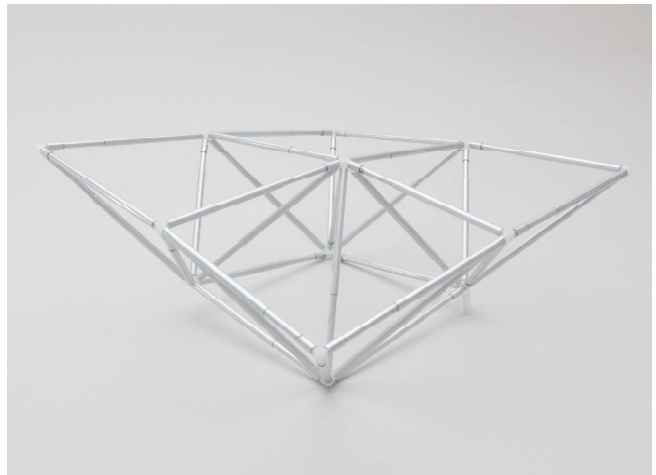


Abb. 3.184.  
 Fachwerk Variante 4, Perspektive diagonal

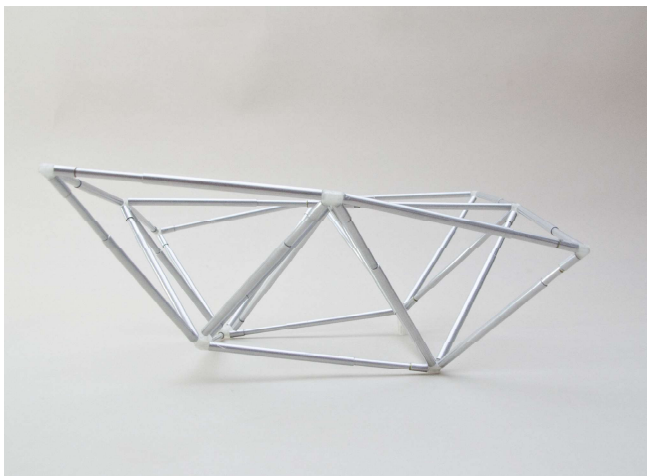


Abb. 3.185.  
 Fachwerk Variante 4, Ansicht von links

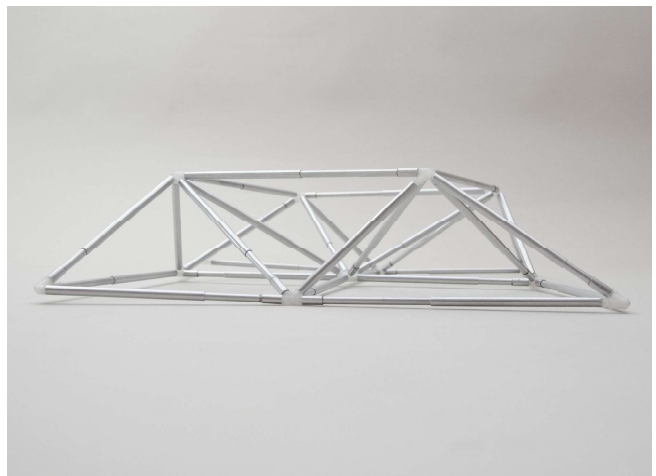


Abb. 3.186.  
 Fachwerk Variante 5, Ansicht von links

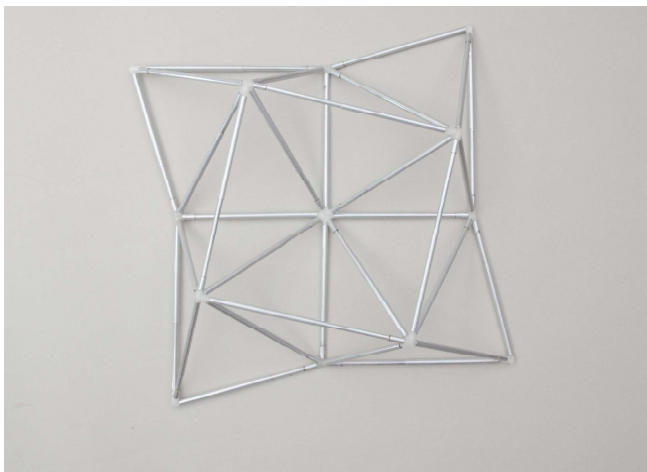


Abb. 3.187.  
 Fachwerk Variante 5, Draufsicht

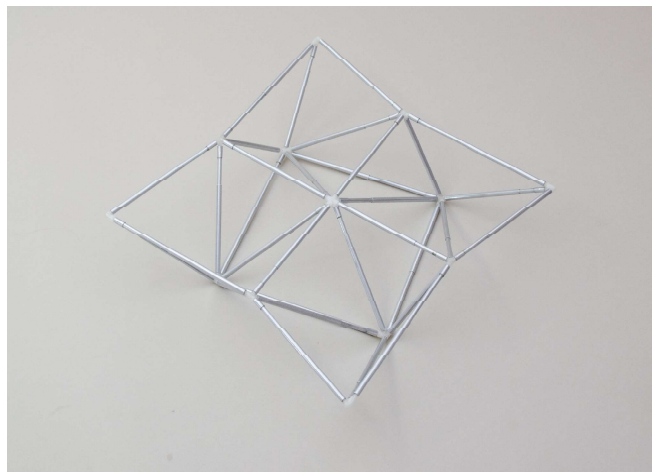


Abb. 3.188.  
 Fachwerk Variante 5, Perspektive diagonal

## Translationsschale

Die Knoten einer Translationsschale sind sehr ähnlich und es ist sehr wichtig diese im Modell richtig zuzuordnen. Für die Herstellung wurde in diesem Fall schwarzes Filament verwendet und die Schriftgröße der Knotenmarker wurde auf 3 mm eingestellt. Dies resultierte in sehr schwer oder gar nicht lesbaren Knotenmarkern. Die Knoten wurden während dem Druckprozess nicht miteinander verbunden, weswegen es nachträglich nicht möglich war sie manuell zu markieren, wodurch sich der tatsächliche Modellbauprozess erheblich verlängerte. Auch in diesem Fall war es vorteilhaft, die Elemente in Gruppen zusammenzubauen und diese anschließend zum Gesamtmodell zusammenzufügen.

Die Stäbe für die Translationsschale wurden aus schwarzen PE-Rohren passend zugeschnitten und es wurden Rohre mit den Durchmessern 7x1 mm verwendet. Hierbei wurde bemerkt, dass diese Rohre weniger nachgeben als die Aluminiumrohre. Der Grund dafür ist die dickere Wandstärke der Rohre. Die zugeschnittenen Stäbe haben den Vorteil, dass sie aus einem Stück bestehen und somit ohne Klemme auskommen und die Stablänge sich unter Belastung nicht verändern kann.

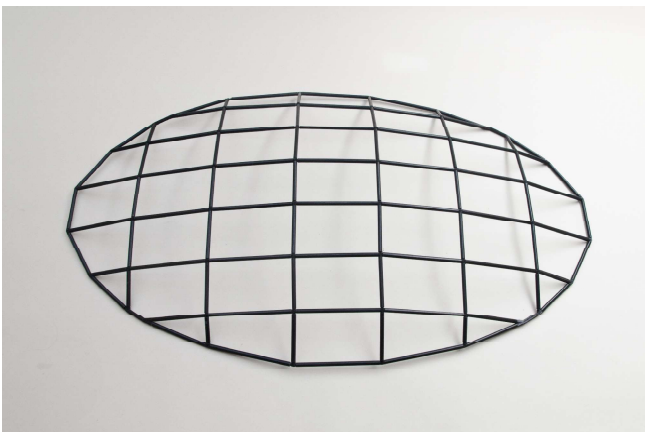


Abb. 3.189.  
Translationsschale Modell 1

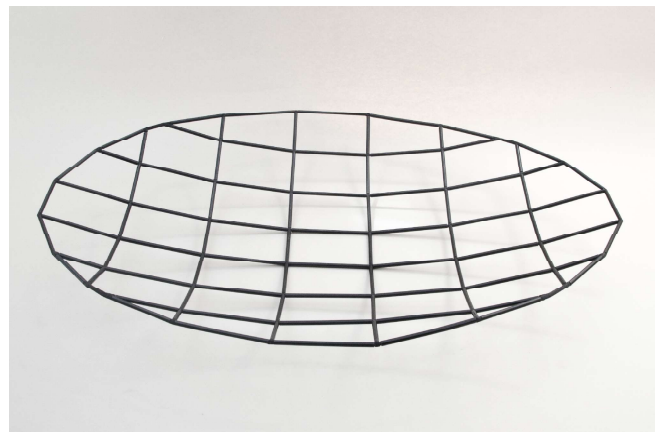


Abb. 3.190.  
Translationsschale Modell 2



Abb. 3.191.  
Translationsschale Aufbauprozess

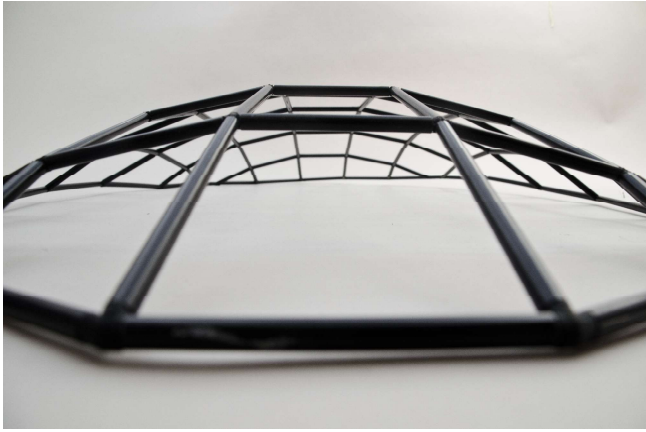


Abb. 3.192.  
Translationsschale Modell 3



Abb. 3.193.  
Translationsschale Modell 4



Abb. 3.194.  
Translationsschale Knoten 1



Abb. 3.195.  
Translationsschale Knoten 2



Abb. 3.196.  
Translationsschale Sonderknoten

### 3.3.3. Fazit Rapid Modelling

Der Rapid Modelling Algorithmus in Kombination mit längenverstellbaren Stäben reduziert den Zeit- und Materialaufwand, der benötigt wird, um ein Tragwerksmodell zu erstellen, erheblich. Für die Erstellung der Knoten ist lediglich die Konstruktion eines Linienmodells und die Einstellung von 5 Parametern notwendig. Die benötigten Modellbauunterlagen, wie Pläne der Knotenpositionen und Liste der Stablängen werden vom Algorithmus automatisch erstellt. Die Stablängen können vorab oder während dem Modellbau nach Bedarf eingestellt werden. Die nachträgliche Veränderung des Modells kann durch den Austausch betreffender Knoten und die Anpassung der Stablängen mit minimalem Materialaufwand durchgeführt werden, ohne die Genauigkeit oder die Optik des Modells zu beeinträchtigen. Somit erfüllt der Algorithmus alle in Abschnitt 3.1. gesetzten Anforderungen.

## VI Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Struktur- und Tragwerksmodellbauprozess durch die Verwendung eines 3-D-Druckers zu beschleunigen. Zudem soll es möglich sein, Veränderungen am Modell vorzunehmen, um Material und Zeit beim Modellbauprozess zu sparen und auf diese Weise die Begleitung des Entwurfsprozesses durch ein Modell zu vereinfachen. Hierfür wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt.

Im ersten Teil der Arbeit wurden mehrere Ideen verfolgt, einen Tragwerksmodellbaukasten zu entwickeln. In Anlehnung an die Recherche bestehender Modellbau- und Bausysteme wurden die Lösungsansätze in 3 Systemen zusammengefasst. Während der Entwicklung dieser Systeme standen die Knoten und die Art der Verbindung der Knoten mit den Stäben im Vordergrund, wobei die Grenzen der FDM-Technologie berücksichtigt werden mussten. Diese 3-D-Drucktechnologie wurde vor allem wegen ihrer Verfügbarkeit gewählt. Mehrere Ideen, die auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Entwicklungsschritte aufbauten, wurden auf Druckbarkeit, Bedienbarkeit und die Erfüllung gesetzter Anforderungen getestet. Eine Übersicht über die Entwicklungsstufen und deren Bewertung wird in Abb. 3.41. gegeben. Die Multifunktionalität, die ein Modellbauknoten voraussetzt um Tragwerksmodelle wahrheitsgetreu darstellen zu können, war der Grund dafür, dass viele Anforderungen nicht im gewünschten Ausmaß erfüllt werden konnten. Nach mehreren erkenntnisreichen Entwicklungszyklen die jedoch nicht alle an den Bausatz gestellten Anforderungen erfüllten, wurde die Aufgabe neu evaluiert und beschlossen, anstelle von universellen Knoten aus vorgefertigten Bausteinen individualisierte, von einem Algorithmus erstellte 3-D-gedruckte Knoten zu verwenden.

Die Idee dieses digitalen Modellbaukastens wurde in Rhino und Grasshopper umgesetzt, indem der sogenannte 'Rapid Modelling' Algorithmus entwickelt wurde, der die Erstellung von 3-D-druckbaren Knoten für den Struktur- und Tragwerksmodellbau automatisiert. Durch die Eingabe des Stabachsenmodells und die Einstellung von fünf Parametern, wie beispielsweise dem Stabdurchmesser, werden Knoten erstellt, die aus der Verlängerungen der Stäbe entstehen. Die Form und Größe der Knoten werden auf das Minimum reduziert, womit einerseits unauffällige Knoten entstehen und die Druckzeit verringert wird.

Durch passende Filamentwahl können die Knoten farblich auf die Stäbe abgestimmt werden, was die Erstellung optisch ansprechender Modelle ermöglicht. Die Knoten und Stäbe werden über einfache Steckverbindungen miteinander verbunden, wodurch es möglich ist, einzelne Knoten auszutauschen und so Veränderungen am Modell durchzuführen. Da die Knoten direkt aus digitalen Modellen erstellt werden, können die benötigten Geometrien präzise gefertigt werden. Im Vergleich zum manuellen Modellbau sind somit komplexere Modelle mit höherer Genauigkeit herstellbar.

Die Stäbe wurden während der Entwicklung des Modellbaukastens mitentwickelt, jedoch können sie losgelöst betrachtet werden, weil sich die Entwicklung darauf fokussierte, die stufenlose Verlängerung der Stäbe zu ermöglichen. Da die Herstellung der Elemente mit einem 3-D-Drucker ein wesentlicher Aspekt der Aufgabenstellung war, wurde diese Option auch für die Herstellung der Stäbe untersucht, Aufgrund fertigungstechnischer Aspekte des gewählten 3-D-Druckverfahrens wurden schließlich Halbzeuge für die Stäbe verwendet und der 3-D-Druck für die Klemmen, die die komplementären Rohre in der gewünschten Länge fixieren, eingesetzt. Bei der Verwendung von Metallrohren zur Herstellung der Stäbe war es sogar möglich, die Längeneinstellung ohne die Verwendung von Klemmen durch Verformung des Innenrohres zu erreichen, auch wenn diese Verbindung nicht sehr belastbar ist. Ob die Stäbe passend zugeschnitten werden, oder längenverstellbare und somit wiederverwendbare Stäbe gewählt werden, bleibt der ModellbauerIn überlassen.

Der gesamte Entwicklungsprozess wurde durch etliche Modelle begleitet, die die Grenzen und Möglichkeiten der verschiedenen Systeme aufzeigten und in den relevanten Abschnitten dokumentiert wurden. Derzeit erstellt der Algorithmus Knoten für runde Stäbe, jedoch wäre es denkbar, diesen Algorithmus auf verschiedene Arten zu erweitern. So würden unterschiedliche Stabquerschnitte, sowie die Kombination verschiedener Stabdurchmesser im gleichen Modell durchaus einen Mehrwert bringen.

Der Rapid Modelling Algorithmus stellt ein Werkzeug dar, das durch Eingabe weniger Daten die Herstellung präziser und optisch ansprechender Tragwerksmodelle unter Verwendung von FDM-Druckern in kurzer Zeit ermöglicht und den Zeit- und Materialaufwand auf ein Minimum reduziert.



## Literaturnachweis

Block, Philippe/Gengnagel, Christoph/Peters, Stefan: Faustformel Tragwerksentwurf, München 2013

Crump, S. S. (1989). U.S. Patent No. 5,121,329. Apparatus and method for creating three-dimensional objects

Deckard, C.R. (1986). U.S. Patent No. 4,863,538. Method and apparatus for producing parts by selective sintering.

Frisch, Evelyne: Industriebau aus dem Baukasten, in: Steeldoc 04/06, Stahlbau Zentrum Schweiz, 2006, 4

Frei, Otto/Vrachliotis, Georg/Kleinmanns, Joachim, u.a.: Denken in Modellen, Leipzig 2015

Haller, Fritz: Bauen mit System, in: Steeldoc 04/06, Stahlbau Zentrum Schweiz, 2006, 5

Hull, C. W. (1984). U.S. Patent No. 4,575,330. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography

Lepik, Andres: Erfindung eines Mediums, in: Zuschnitt 44, Dezember 2011, 10-13

ÖNORM EN ISO/ASTM 52900: 2017 06 01 - Additive Fertigung - Grundlagen - Terminologie (ISO/ASTM 52900:2015)

Sequeira De Oliveira, Marcio: Modelo estrutural qualitativo para pré-avaliacao do comportamento de estruturas metalicas, Masterarbeit, Ouro Preto, August 2008

Stark, Barbara: Die Heraia von Argos und Samos. Eine Strukturanalyse im soziopolitischen Kontext der geometrischen und archaischen Zeit, Diplomarbeit, Universität Wien, 2008

Vale, Brenda/Vale, Robert: Architecture on the carpet. The curious Tale of Construction Toys and the Genesis of Modern Buildings, London 2013

o.A.: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.):  
Stellungnahme. Additive Fertigung. München 2016, 10

o.A./USM: Chronologie der Firma USM U. Schärer Söhne AG, Pressemappe, 2013

## Bildverzeichnis

- Abb. 2.1. - Hausmodell von Argos  
Bildarchiv Foto Marburg, Foto: Helbig, Konrad; Aufn.-Datum: 1960/1980,  
in: <https://www.bildindex.de/document/obj20322899?medium=gr00065d03>, 22.07.2020
- Abb 2.2. - Anastasiusreliquiar  
Aachener Domschatzkammer,  
in: <https://www.aachener-domschatz.de/highlights/anastasiusreliquiar/>, 22.07.2020
- Abb 2.3. - Dom von Florenz von Filippo Brunelleschi und Lorenzo Ghiberti  
Archivio R.C.S. Libri e Grandi Opere – Ufficio Fotografico/Piero Baguzzi,  
in: <http://www.proholz.at/zuschnitt/44/erfindung-eines-mediums/>, 22.07.2020
- Abb. 2.4. - Original-Hängemodell der Sagrada Familia von Antoni Gaudi  
Graefe, Rainer: Zum Entwerfen mithilfe von Hängemodellen,  
in: Werk, Bauen + Wohnen, Heft 11, Band 70 (1983), S. 26
- Abb. 2.5. - Rekonstruktion des Modells der Sagrada Familia,  
Graefe, Rainer: Zum Entwerfen mithilfe von Hängemodellen,  
in: Werk, Bauen + Wohnen, Heft 11, Band 70 (1983), S. 28
- Abb. 2.6. - Hängemodell der Multihalle in Mannheim von Otto Frei, M 1:98,5, 1973  
Frei, Otto/Deutsches Architekturmuseum, Foto: Uwe Dettmar,  
in: <http://archiv.dam-online.de/handle/11153/187-011-001>, 22.07.2020
- Abb. 2.7. - Verschiedene Füllgrade 3-D-Gedruckter Werkstücke.  
Chain, Perry: Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D Printing 3dhubs,  
in: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing>, 22.07.2020
- Abb. 2.8. - Lampenschirm im SLS-Verfahren hergestellt.  
Rapidsol,  
in: <https://www.rapidsol.org/sls.aspx>, 22.07.2020
- Abb. 2.9. - Begriffsgebäude der Additiven Fertigung  
o.A.: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der  
Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.):  
Stellungnahme. Additive Fertigung. München 2016, 10

- Abb. 2.10. - Additive Fertigung bei Boeing  
 Aston, Richard: 3D printing done right. Applying additive manufacturing in integrated mechanical designs,  
 Online unter: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/nov2017/feature-thought-leadership-3d-printing.page>, 22.07.2020
- Abb. 2.12. Fused Deposition Modelling  
 o.A.: Fused Deposition Modelling (FDM),  
 CustomPartNet, 2008  
 Online unter: <https://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>, 22.07.2020
- Abb. 2.19. Brückenmodell  
 Stouhi, Dima: A Chance to Win Exclusive Mola Structural Kits with their Accessories, ArchDaily  
 online unter: <https://www.archdaily.com/916028/a-chance-to-win-exclusive-mola-structural-kits-with-their-accessories>, 25.07.2020
- Abb. 2.20. Mola-Modelle, a, b - Structural Kit 1, c - Structural Kit 2  
 Sequiera De Oliveira, Marcio,  
 Online unter: <https://molamodel.com/>, 22.07.2020
- Abb. 2.25. Free Universal Construction Kit  
 Free Art and Technology [F.A.T.] Lab and Sy-Lab: The Free Universal Construction Kit  
 Online unter: <http://fffff.at/free-universal-construction-kit/>, 22.07.2020
- Abb. 2.26. Fachwerkhaus  
 Huber, Richard,  
 Online unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Fachwerkhaus#/media/File:Fachwerkhaus\\_Rohbau.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Fachwerkhaus#/media/File:Fachwerkhaus_Rohbau.jpg),  
 22.07.2020
- Abb. 2.27. Singapore University of Technology and Design Library Pavilion,  
 o.A.: Arup  
 Online unter: <https://www.arup.com/projects/singapore-university-of-technology-and-design-library-pavilion>, 22.07.2020
- Abb. 2.28. USM Bausystem Maxi  
 o.A.: Stahlbausystem MAXI. in: Archplus 103, Architektur ohne Architekten, (1990), 94
- Abb. 2.29. USM Stahlbausystem MAXI  
 Frisch, Evelyne: Industriebau aus dem Baukasten, in: Steeldoc 04/06, Stahlbau Zentrum Schweiz, (2006), 4
- Abb. 2.30. USM Stahlbausystem MIDI  
 Frisch, Evelyne: Industriebau aus dem Baukasten, in: Steeldoc 04/06, Stahlbau Zentrum Schweiz, (2006), 4
- Abb. 2.31. USM Stahlbausystem MINI  
 Frisch, Evelyne: Industriebau aus dem Baukasten, in: Steeldoc 04/06, Stahlbau Zentrum Schweiz, (2006), 4
- Abb. 2.32. USM Haller Möbelbausystem  
<https://www.usm.com/de-de/home/galerie/?tags=5291>, 25.07.2020
- Abb. 3.1. Abgrenzung der Tragwerkselemente, die mit dem Modellbaukasten nachgebildet werden sollen  
 Quelle: Block, Philippe/Gengnagel, Christoph/Peters, Stefan: Faustformel Tragwerksentwurf, München 2013, 90

# **Anhang**

**A1 - Rapid Modelling Algorithmus digital**

**A2 - Rapid Modelling Algorithmus gedruckt**

**A3 - Flow Chart - Erstellung der Knoten**

**A4 - Flow Chart - Orientierung der Knoten**

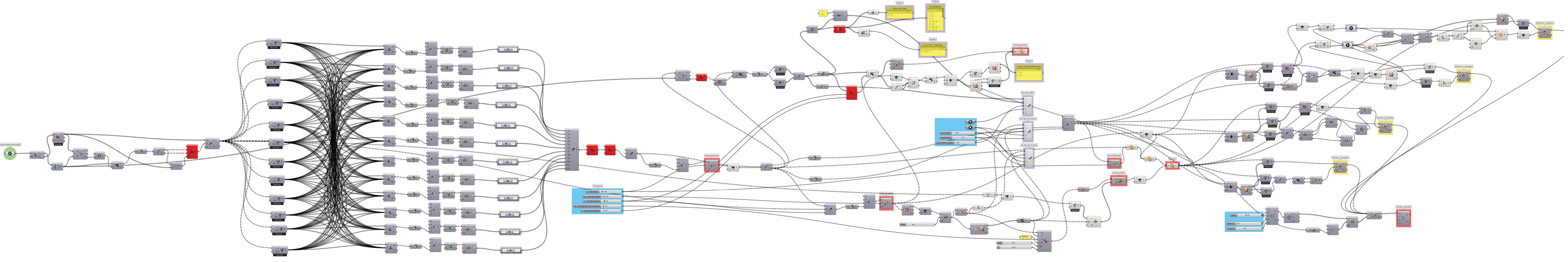
**A5 - Flow Chart - Erstellung von Sonderknoten und Outputs**

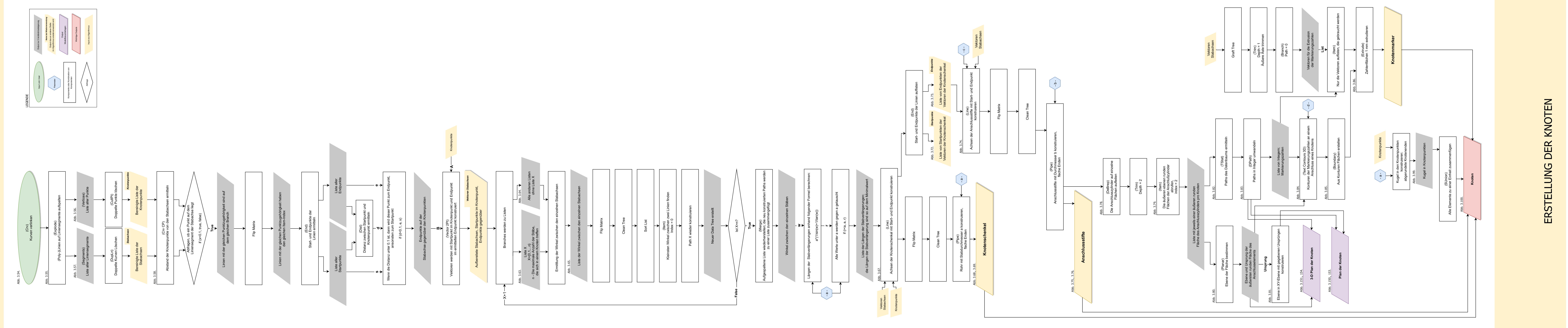


## **Algorithmus digital**







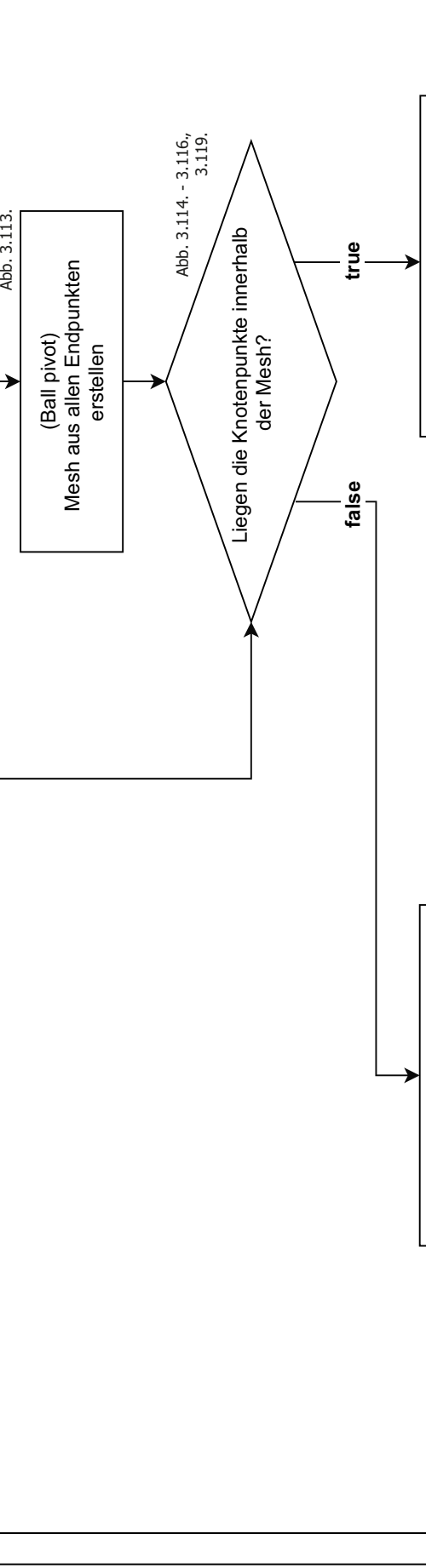
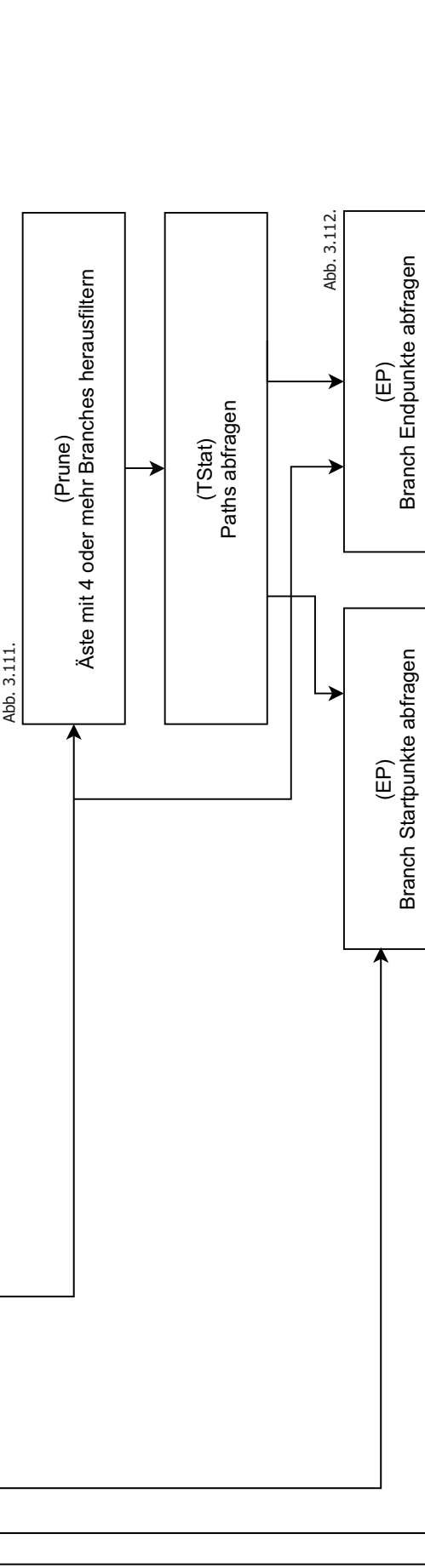
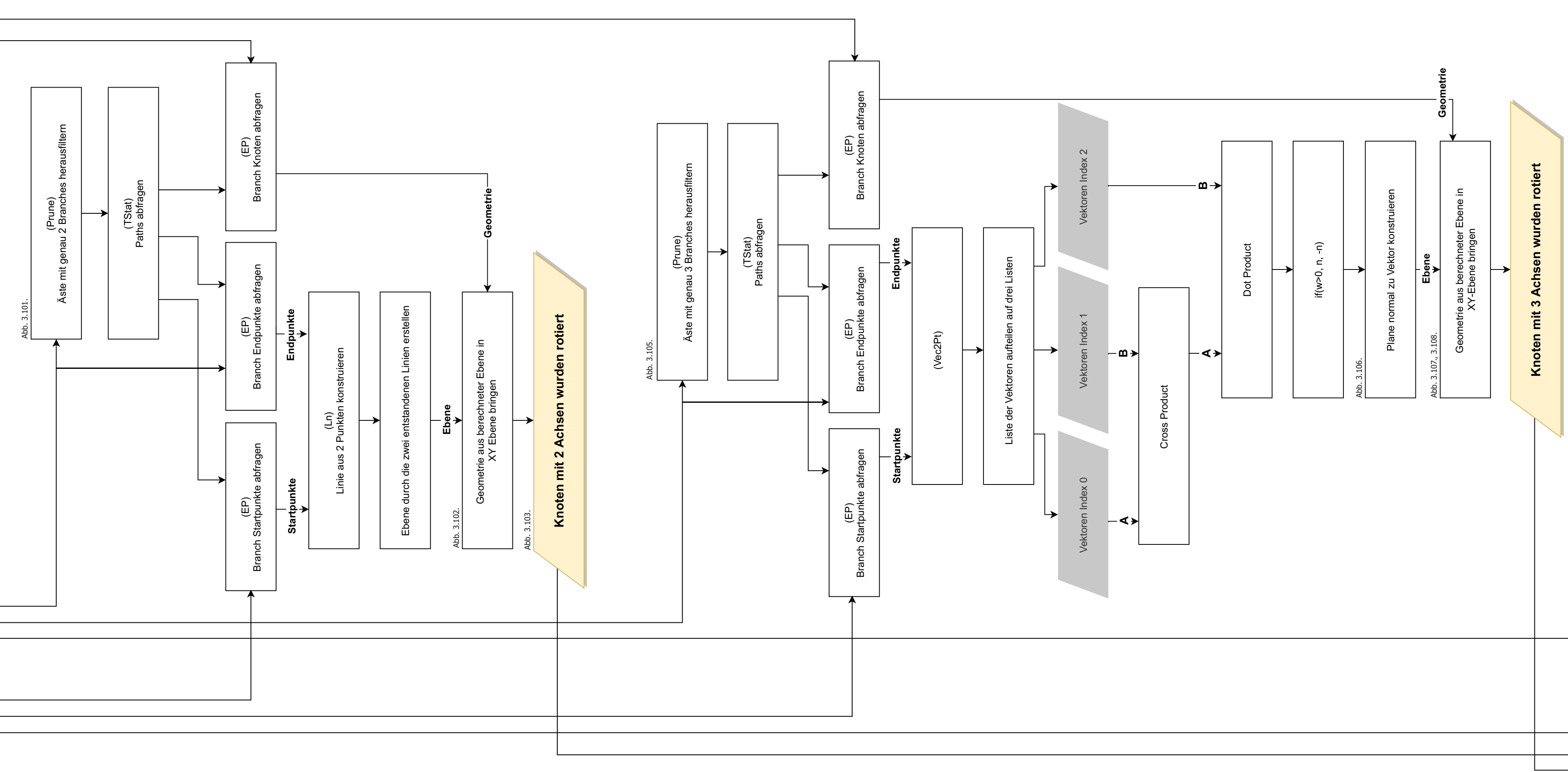


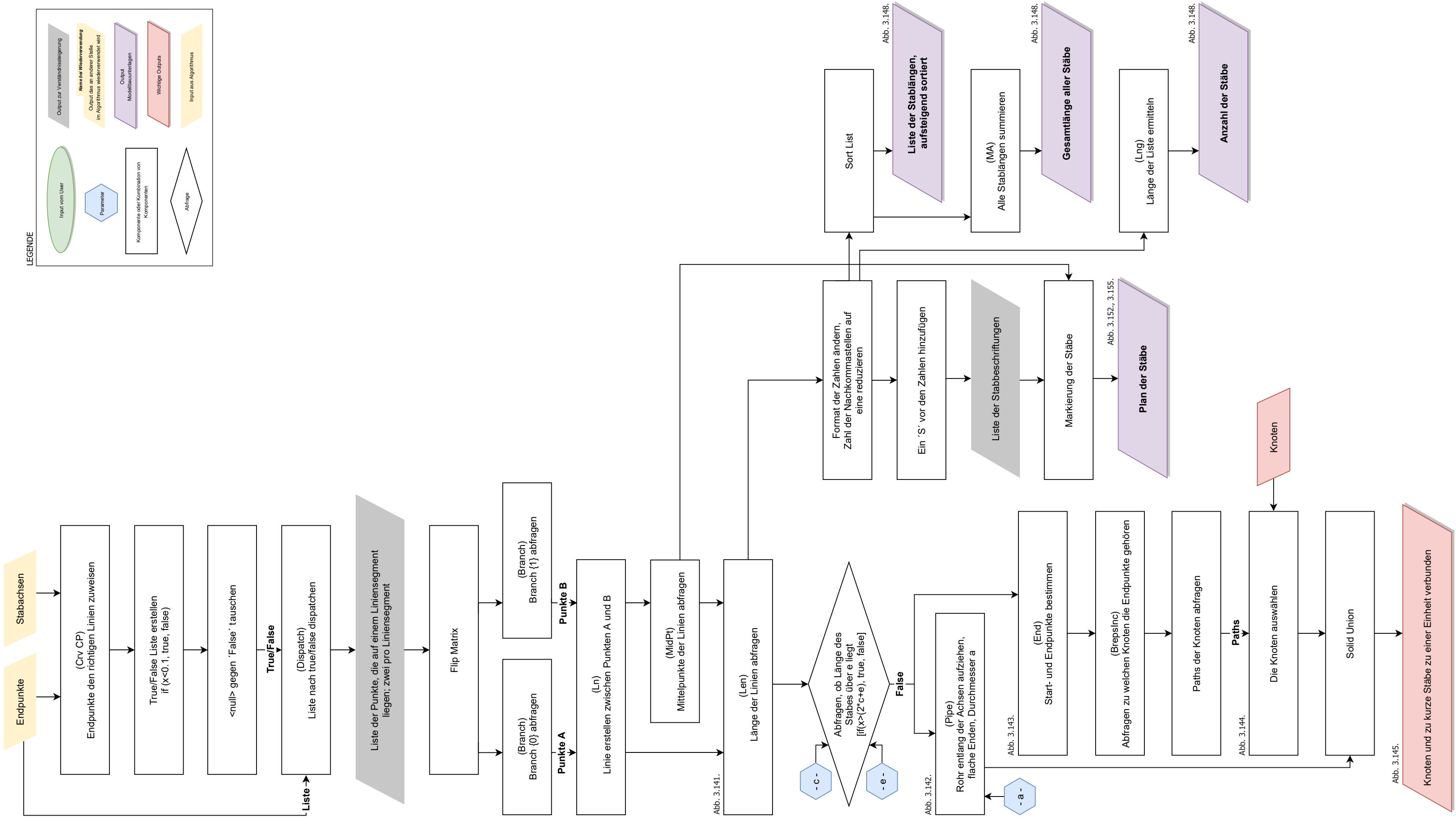
# ERSTELLUNG DER KNOTEN

Startpunkte  
(Flip Matrix)

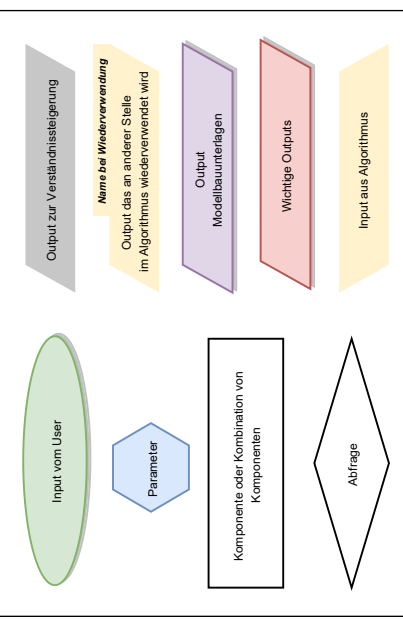
Endpunkte  
(Flip Matrix)

Knoten





LEGENDE



ERSTELLUNG VON SONDERKNOTEN UND OUTPUTS