



PROJEKTARBEIT

Technologiestudie über Methoden der digitalen Fertigung zum Zweck der Optimierung der Herstellungsprozesse von Fassadensystemen im Bauwesen

eingereicht von cand. ing. Adrian Schubert
geb. am 30.05.1996 in Immenstadt i. Allgäu

Betreuer/in:

- Prof. Dr.-Ing. habil. Karsten Menzel
- Suraj Sunil Kumar Shetty, M.Eng.

Dresden, den 28.01.2019

I Abstract

Die vorliegende Projektarbeit untersucht die Anwendbarkeit von digitalen Fertigungsmethoden auf das Bauwesen und zieht Vergleiche zwischen herkömmlichen Herstellungsprozessen und denen der digitalen Fertigung. Diese Arbeit soll aufzeigen, wie die digitale Fertigung effektiv eingesetzt werden kann, um von der Entwurfsphase bis zur Fertigung ein kontinuierliches Datenmodell zu erhalten. Es wird erläutert, wie dieses Modell erstellt, erweitert und alle zur Fertigung notwendigen Informationen daraus extrahiert werden können. Mithilfe dieser computergestützten Methodiken kann ein durchgängiges Datenmodell erstellt werden, um die Daten aus dem Entwurfsprozess in die Fertigung mit einzubeziehen. Diese Projektarbeit ist sowohl für Architekten und Bauingenieure, aus dem Bereich des Entwerfens und der Fassadenkonstruktion, als auch für Informatiker, die sich mit Datenmodellen beschäftigen, interessant.

II Inhaltsverzeichnis

I	Abstract	III
II	Inhaltsverzeichnis	V
III	Abbildungsverzeichnis	VII
IV	Tabellenverzeichnis	IX
V	Abkürzungsverzeichnis	XI
1	Einleitung	1
2	Fallbeispiele	3
2.1	3-D Print Canal House	3
2.2	Nematox Façade Node	6
3	Methoden der digitalen Fertigung	7
3.1	Digitale Fertigung	7
3.2	Additive Fertigung	8
3.2.1	Begriffsdefinition: Additive Fertigung	8
3.2.2	Einteilung der additiven Fertigungsverfahren	9
3.2.3	Additive Fertigungsverfahren	10
3.2.3.1	Stereolithografie	11
3.2.3.2	Laser-Sintern	12
3.2.3.3	Laser-Strahlschmelzen	13
3.2.3.4	Elektronen-Strahlschmelzen	14
3.2.3.5	Fused Layer Modelling / Manufacturing	15
3.2.3.6	Multi-Jet Modelling	17
3.2.3.7	Poly-Jet Modelling	18
3.2.3.8	3-D-Druck	19
3.2.3.9	Layer Laminated Manufacturing	20
3.2.3.10	Digital Light Processing	22
3.2.3.11	Thermotransfer-Sintern	23
3.3	CNC Fertigung	24
3.3.1	Fräsmaschine	25
3.3.2	Laserstrahlschneiden	26
3.3.2.1	Physikalische Grundlagen von Laserlicht	26

3.3.2.2	Verfahren des Laserstrahlschneidens	30
3.3.3	Autogenes Brennschneiden	32
3.3.4	Plasmaschneiden	36
3.3.5	Wasserstrahlschneiden	40
3.3.6	CNC-Steuerung	44
3.3.6.1	Praxisrelevante CNC-Programmierung	44
3.3.6.2	CNC-Programmierung nach DIN 66025	45
4	Daten der digitalen Fertigung	51
4.1	Entwurfsmodell	51
4.1.1	Parametric Design	52
4.2	Erstellung des Entwurfmodells	53
4.3	Weiterführendes Entwurfsmodell	64
4.4	Entwicklung des parametrischen Fassadenknotens	65
5	Fazit	71
5.1	Ergebnisse	71
5.2	Ausblick	72
	Literaturverzeichnis	73
	Anlagenverzeichnis	77

III Abbildungsverzeichnis

1	Konzept des 3-D Printed Canal House	3
2	Zwei aufgebaute KamerMaker	4
3	Konzept des modularen Bauens von Gebäuden	5
4	Darstellung des Nematox Façade Node	6
5	Struktur der Technologie der additiven Fertigung	10
6	Konzept der Stereolithografie	11
7	Konzept des Laser-Sinterns	12
8	Konzept des Laser-Strahlschmelzens	13
9	Konzept des Elektronen-Strahlschmelzens	15
10	Konzept des Fused Layer Modellings	16
11	Konzept des Multi-Jet Modellings	17
12	Konzept des Poly-Jet Modellings	18
13	Konzept des 3-D-Drucks	19
14	Konzept des Layer Laminated Manufacturing	20
15	Schematische Darstellung des Folienbandes in verschiedenen Bearbeitungsstadien	21
16	Konzept des Digital Light Processings	22
17	Konzept des Thermotransfer-Sinterns	23
18	Schematischer Vergleich zwischen drei- und vierachsigen Fräsmaschinen	25
19	Konzept des Laserstrahlschmelzens	26
20	Schematische Darstellung von natürlichem Licht (links) und Laserstrahlung (rechts)	27
21	Das Bohr'sche Atommodell	27
22	Vergleich des thermodynamischen Gleichgewichts mit der Besetzungsinversion	29
23	Schematische Darstellung eines Resonators	29
24	Einteilung der Lasertypen	30
25	Struktur des Laserstrahlschneidens	31
26	Metallschmelze beim Brennschneiden	33
27	Lochstechen beim Autogenbrennschneiden (hier: handgeführtes Gerät)	35
28	Marktanalyse am Deutschen Schneidkongress 2016 - Verteilung der Schneidprozesse in %	36
29	Struktur des Plasmaschneidens	36
30	Konzept des Plasmafugens	38

31	Konzept des Plasmaschneidens mit Wasserinjektion	38
32	Konzept des Wasserstrahlschneidens	41
33	Der abzufahrende gotische Bogen	47
34	Grafische Darstellung des G-Code Beispiels	49
35	Parametrische Fassade der Firma Schüco International KG	53
36	Darstellung der Grundrisskurve (Grundriss)	54
37	Eingabeparameter in Grasshopper	54
38	Verschiebung der Kurve mithilfe des "Move"-Elements	55
39	Skalierung und Zerteilung der Kurven	56
40	Variantenbildung der Gebäudeform mithilfe der Parameter (Perspektive) . .	57
41	Zerteilung der Kurven in einzelne Punkte (Perspektive)	58
42	Das Schema der Benennung der Punkte eines Feldes	58
43	Ausgabe des Clusters "Curve to 3D Form" als Baum	59
44	Zuordnung der Eckpunkte zu den Fassadenfeldern	59
45	Rasterteilung der Kurven (rechts oben: Perspektive, rechts unten: Grundriss)	60
46	Ermittlung des vorläufigen Punktes E*	61
47	Ermittlung des endgültigen Punktes E	61
48	Bake-Schleife	62
49	Variantenbildung der Fassade mithilfe der Parameter (Perspektive)	63
50	Darstellung der unterschiedlichen Fassadengeometrien	64
51	Layer-Import mithilfe von Grasshopper	65
52	Verarbeitung der Geometrieinformationen aus dem Layer	66
53	Speicherschema der Vektoren	66
54	Generierung der Knotenprofile	67
55	Lösungsansatz zum Verschneiden der Knotenprofile	68
56	Vektoren zur Definition der Schnittebenen	68
57	Definition weiterer Schnittebenen	69
58	Darstellung des geschnittenen Fassadenknotens	69
59	Rendering des parametrischen Fassadenknotens	70

IV Tabellenverzeichnis

1	Kommerziell etablierte additive Fertigungsverfahren	11
2	Überblick über die Verfahren des Laserstrahlschneidens	31
3	Einfluss der Legierungselemente auf das Verhalten der Stähle beim Brennschneiden (nach Rellensmann)	34
4	Gaskombinationen beim Plasmaschneiden (nach Simler)	40
5	Vergleich von thermischen Trennverfahren und dem Wasserstrahlschneiden	43

V Abkürzungsverzeichnis

3-D	dreidimensional
3DP	3-D-Druck
AM	additive Fertigung (eng. Additive Manufacturing)
BJ	Binder Jetting
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Drawing
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DLP	Digital Light Processing
EBM	Elektronen-Strahlschmelzen (engl.: Electron Beam Melting)
FDM	Fused Deposition Modelling
FLM	Fused Layer Modelling bzw. Fused Layer Manufacturing
LBM	Laser-Strahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting)
LLM	Layer Laminated Manufacturing
LOM	Laminated Object Manufacturing
LS	Laser-Sintern
MJ	Material Jetting
MJM	Multi-Jet Modelling
NC	Numerical Control
PJM	Poly-Jet Modelling
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tooling
SL	Stereolithografie
SLM	Selective Laser Melting
SLS	selektives Laser-Sintern
TTS	Thermotransfer-Sintern

WOP werkstatorientierte Programmierung

1 Einleitung

Spätestens seit diesem Jahrzehnt stellt Building Information Modeling (BIM) ein zentrales Thema für die Digitalisierung des Bauwesens dar. In in der deutschen Politik und Wirtschaft wird in dieser Technologie die Hoffnung gesehen, Bauprojekte effizienter und vor allem innerhalb des gegebenen Zeit- und Kostenrahmens zu realisieren. Daher fordert die Politik die schrittweise Einführung, wie sie im Stufenplan des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) vorgesehen ist.

Mit BIM soll ein ganzheitlicher Arbeitsablauf entstehen, der den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes berücksichtigt. Die erschaffenen Daten sollen nicht nur für den Neubau genutzt werden, sondern auch bspw. für Umbauten. So entstehen mehrere Modelle desselben Bauwerkes. Diese beschreiben das Gebäude in den verschiedenen Phasen von Planung bis Rückbau. Ohne die Nutzung von BIM gehen viele Daten verloren, da jedes Gewerk mit einem eigenen Modell arbeitet, die nach Erstellung der Planunterlagen nicht mehr benötigt werden. Da in BIM alle Gewerke an einem Modell arbeiten, wird die Speicherung und spätere Nutzung dieses Modells deutlich vereinfacht.

BIM ist aber nur ein Teilbereich von vielen, der die digitale Fertigung innerhalb des Bauwesens ermöglicht. So stellt auch die 3-D-Druck-Technologie großes Potenzial für die Bauindustrie dar. Damit wäre eine Umstrukturierung der Massenproduktion auch für das Bauwesen denkbar. Architektonische Konzepte, die derzeit wirtschaftlich nicht umsetzbar sind, da diese viele verschiedene Bauteile aufweisen, anstatt das gleiche Teil repetitiv zu verwenden, wären somit realisierbar. Architekten hätten somit deutlich mehr Freiheiten in ihren Entwürfen.

Diese Arbeit soll einen Überblick über die Methoden der digitalen Fertigung verschaffen. Im Anschluss wird dann ein Workflow gezeigt, der bei der Generierung eines digitalen Gebäude-modells startet und bei der Ausarbeitung eines Fertigungsmodells eines Fassadenknotens endet.

2 Fallbeispiele

2.1 3-D Print Canal House



Abb. 1: Konzept des 3-D Printed Canal House

Quelle: [online] <https://www.facebook.com/3DPRINTCANALHOUSE/photos/a.624923230914137/624923257580801/?type=3&theater> (2013) [Zugriff am 19.01.2019]

Das 3-D Print Canal House ist ein Projekt des Architekturbüros DUS aus Amsterdam. Es handelt sich um ein Design-and-Build-Projekt, das die Zielstellung hat, ein lebensgroßes Kanalhaus in Amsterdam zu errichten. Dabei soll auch der Frage nach neuen, globalen Wohnungslösungen nachgegangen werden und die Markttauglichkeit von 3-D-Druck im Bauwesen erforscht werden. Das während des Projekts zu fertigende Kanalhaus soll 700 m² umfassen und Werkstattbereiche, XL-3-D-Druckeinrichtungen, ein Café und einen Ausstellungsbereich beinhalten. In Abb. 1 ist ein Konzeptbild des Bauwerkes dargestellt. Das Projekt startete im Jahr 2013 und sollte 2018 abgeschlossen werden, wobei der Projektstatus nach Angaben der Homepage des DUS Architekturbüros immer noch offen ist (Stand: 15.01.2019). (DUS Architekten o. D.)

Die Errichtung des Gebäudes findet mithilfe des sogenannten "KamerMaker" statt. Dieser, in Abb. 2 dargestellte, KamerMaker ist ein großer 3-D-Drucker, der auf dem Verfahren des FLM (vgl. Kapitel 3.2.3.5) basiert. Nach Angaben des DUS Architekturbüros sollen Bauteile mit einer Höhe von bis zu 5 m realisiert werden können. Wie auch in Abb. 3 dargestellt, sollen mithilfe des KamerMaker in der Zukunft komplette Räume gedruckt werden, die dann zu einem Gebäude zusammengesetzt werden können. Die Vision hinter diesem Projekt ist



Abb. 2: Zwei aufgebaute KamerMaker

Quelle: [online] <https://3dprintcanalhouse.com/xl-3d-printer> (2014) [Zugriff am 19.01.2019]

die Möglichkeit eines modularen Häuserbaus, der innerhalb weniger Tage abgeschlossen werden kann. (DUS Architekten o. D., Haute Innovationen 2015)

Das Projekt legt einige Vorteile der 3-D-Druck-Technologie dar. So tritt während der Fertigung kein Materialverlust auf, da die Bauteile nicht wie herkömmlich mithilfe subtraktiver Verfahren erzeugt werden. Dadurch kann die Kosteneffizienz gesteigert werden und zusätzlich wird die Umwelt geschont. Zudem werden im 3-D-Drucker unterschiedlichste Teile hergestellt, sodass eine hohe Anpassbarkeit an die Bedürfnisse des Bauherrn erzielt wird. Aber auch einige Problemfelder konnten durch das Projekt identifiziert werden. So benötigt der Bau eines 3 m hohen Bauteils derzeit eine gesamte Woche. Diese Zeit muss deutlich reduziert werden. Die Erfinder haben dabei die Vision, solch ein Bauteil innerhalb von circa 2 Stunden zu fertigen. Auch die verwendbaren Materialien stellen noch eine Herausforderung dar, um eine nachhaltige, bautechnisch umsetzbare Lösung zu bieten. Im Falle des Kanalhauses wird dabei auf Kunststoffe gesetzt. (Haute Innovationen 2015)

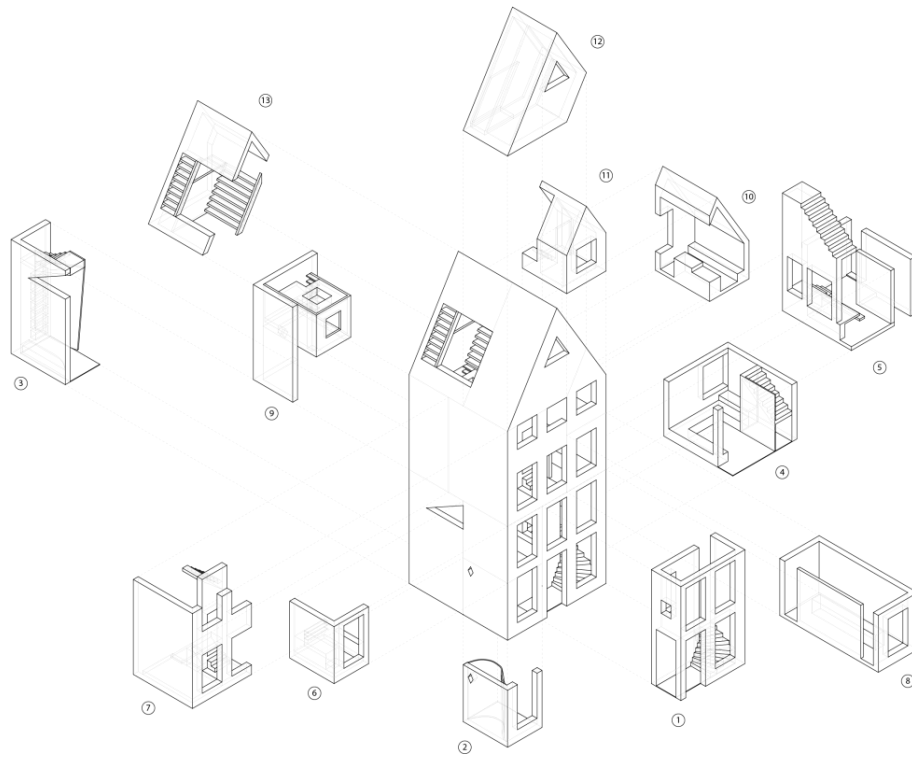


Abb. 3: Konzept des modularen Bauens von Gebäuden

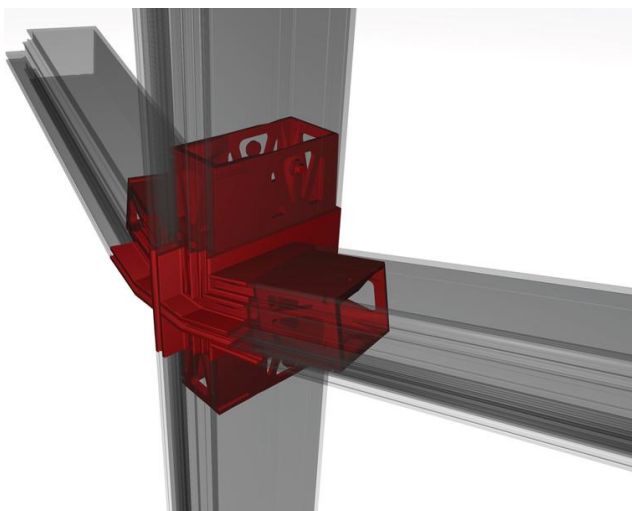
Quelle: [online] <https://www.facebook.com/3DPRINTCANALHOUSE/photos/a.624923230914137/624923257580801/?type=3&theater> (2013) [Zugriff am 19.01.2019]

2.2 Nematox Façade Node

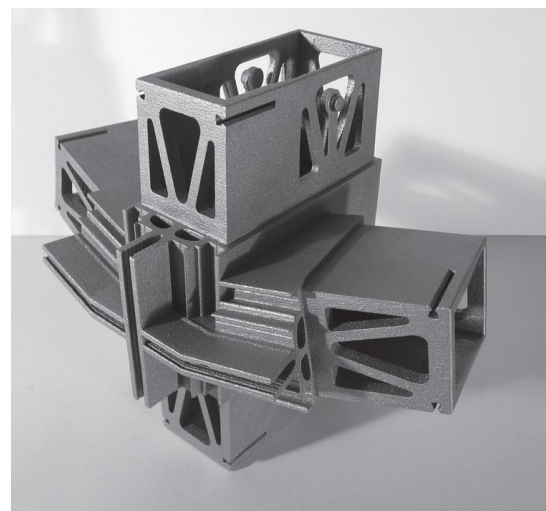
Der Nematox Façade Node ist ein hochgradig anpassbarer Fassadenknoten für Pfosten-Riegel-Fassaden. Wie in Abb. 4 zu sehen, können die einzelnen Pfosten und Riegel in bestimmten Winkeln zueinander montiert werden. Durch diese Winkel entstehen nicht nur plane Oberflächen, sondern dreidimensionale Fassaden, die beliebig geformt sein können.

Die Ausbildung von nicht-rechtwinkligen Fassadenanschlüssen stellt in der Praxis immer ein Problem dar, da hierfür Schnitte durch Freiformwinkel geführt werden müssen. Da diese nur sehr ungenau ausgeführt werden können, ergeben sich daraus Leckagen in der Fassade. Dieses Problem wird baustellenseitig durch die Verwendung von nassem Silikon gelöst. In den meisten Fällen ist solch eine Lösung jedoch unzureichend. (Strauß 2013)

Daher wurde zwischen 2008 und 2010 der Nematox Façade Node entwickelt. Das Produktdesign erfolgt rein digital. Die benötigten Winkel können mithilfe von Parametern in eine Software eingegeben werden, sodass diese automatisch das Knotenmodell auf diese Angaben anpasst (vgl. Kapitel 4.1.1). Da aufgrund von Weiterentwicklungen in der Direct Metal Fabrication (vgl. Kapitel 3.2.3.3) die Produktionszeiten reduziert und die Bauteilqualität verbessert werden konnten und zeitgleich die Preise für additive Fertigungssysteme und deren Materialien gesunken sind, wurde die Fertigung der Knoten mittels additiver Fertigung (vgl. Kapitel 3.2) realisiert. (Strauß 2013, Strauß et al. 2015)



(a)



(b)

Abb. 4: Darstellung des Nematox Façade Node
Quelle: Strauß et al. (2015)

3 Methoden der digitalen Fertigung

3.1 Digitale Fertigung

Die digitale Fertigung beschreibt die Verwendung von digitalen Technologien und Methoden zur Herstellung von realen Produkten. Der Hauptfokus, um die traditionelle Produktion zu optimieren, liegt dabei nicht in den einzelnen Technologien und Methoden, sondern vielmehr in der Zusammenarbeit der verschiedenen Systeme. Diese kooperative Arbeitsweise, zur Herstellung von Produkten, wird durch die Informations- und Kommunikationssysteme des 21. Jahrhunderts gestützt. Diese Systeme ermöglichen einen systemübergreifenden Austausch und die Speicherung von Informationen. Durch eine Integration aller Arbeitsplätze kann ein ganzheitlicher Produktionsansatz erreicht werden, sodass alle Informationen zur Produktion an fast jedem Ort mittels einer sicheren Kommunikation zur Verfügung stehen. (Westkämper et al. 2013)

Um die digitale Fertigung umzusetzen, wird sowohl ein digitales Produktmodell als auch ein digitales Modell der fertigen Fabrik benötigt. So liegen einerseits alle relevanten Informationen zum zu fertigenden Produkt vor, als auch alle Informationen über die ausführbaren Methoden innerhalb der Fabrik. Produktdesigner haben die Möglichkeit an ihren Arbeitsplätzen mithilfe von Engineering-Umgebungen, wie etwa CAD- oder FEM-Systemen, die Produktmodelle zu erstellen, zu berechnen und zu optimieren. Die aus den Produktmodellen entstehenden Prozesse können anschließend in Workflows und digitale, administrative Managementsysteme eingebunden werden. Die Prozessinformationen werden dabei um betriebswirtschaftliche und logistische Funktionen zur Auftragsabwicklung erweitert. Die Fertigung der realen Produkte wird mit computergestützten Systemen und mechatronischen Elementen (Sensoren und Aktoren) ausgeführt. Dabei sind die ausführenden Systeme über maschineninterne IT-Systeme miteinander vernetzt, sodass diese miteinander kommunizieren können. Die digitale Produktion umfasst, sämtliche technischen, organisatorischen und administrativen Prozesse eines Unternehmens zur Herstellung von Produkten. (Westkämper et al. 2013)

Zur Produktion der realen Teile eignen sich im Rahmen der digitalen Fertigung vor allem die Methoden der additiven Fertigung (vgl. Kapitel 3.2) und der CNC-Fertigung (vgl. Kapitel 3.3). In dieser Arbeit sollen daher zunächst die Fertigungsverfahren erläutert werden. Im Anschluss wird dann ein Workflow gezeigt, der bei der Generierung eines digitalen Gebäudemodells (vgl. Kapitel 4.2) startet und bei der Ausarbeitung eines parametrischen

Fassadenknotens, unter Verwendung von digitalen Fertigungsmethoden (vgl. Kapitel 4.4), endet.

3.2 Additive Fertigung

Der Begriff des 3-D-Druckes hat in den letzten Jahren unter anderem in den Medien großes Aufsehen erregt. Bei den meisten Menschen weckt der Gedanke, dass durch die additive Fertigung (eng. Additive Manufacturing) (AM) eine heimische Produktion von beliebigen Bauteilen ermöglicht wird, große Begeisterung. Im Zusammenhang mit der AM wird daher häufig von einer vierten industriellen Revolution und der Dezentralisierung der Produktion gesprochen. Durch diese Aufmerksamkeit bedingt, konnte die Technik der AM weiterentwickelt werden, sodass Fertigungsmaschinen zunehmend kostengünstiger und somit interessanter wurden. In den letzten Jahren werden Eigenbaulösungen, wie beispielsweise das Open Hardware Projekt RepRap, immer beliebter und ermöglichen letztendlich den Einzug der AM in Privathaushalte. Aber nicht nur für den Heimanwender, sondern auch politisch und wirtschaftlich gesehen besteht großes Interesse an der Technologie, vor allem da das Potenzial gesehen wird, dass es durch die AM zur Umkehrung des Outsourcings kommen kann. Daraus resultieren Förderungen für Projekte und Forschung, die sich mit der AM auseinandersetzen. (Gartner 2011)

Auch in der Industrie ist die Technologie der additiven Fertigung spätestens seit dem letzten Jahrzehnt angekommen. Das Beispiel BMW verdeutlicht das große Interesse seitens der Industrie an der AM. Der bayrische Automobilhersteller produziert im Jahr 2018 voraussichtlich über 200.000 AM-Bauteile – ein Wachstum von 42 % (Stand: 19. November 2018). Mittlerweile konnte so das millionste additiv gefertigte Bauteil in der Serienproduktion montiert werden. Hierbei handelte es sich um eine Fensterführungsschiene, deren Entwicklung in fünf Tagen abgeschlossen war (Zieler 2018). Zudem wurde für 2019 ein Campus für AM in Oberschleißheim in Bayern angekündigt. Hierfür tätigt die BMW Group eine Investition in Höhe von 10 Millionen Euro. So sollen alle Kompetenzen aus diesem Bereich vereint und neue Technologien erprobt werden, um die AM in die Serienfertigung und die dezentrale Produktion zu integrieren (Krämer 2018).

3.2.1 Begriffsdefinition: Additive Fertigung

AM bezeichnet „[die] direkte Herstellung von Bauteilen aus elektronischen Daten ohne formgebende Werkzeuge“ (Schmid 2015). Wie in der DIN 8580 definiert, sind additive Verfahren sogenannte Urformverfahren. Dies beschreibt das „Fertigen eines festen Körpers

aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhaltes“ (DIN 8580:2003-09 2003). Dadurch grenzt sich die additive Fertigung deutlich von konventionellen Verfahren, wie der subtraktiven Fertigung ab, die eine Formgebung durch Materialabtrag, zum Beispiel durch Bohren oder Fräsen, erzielt. Auch unterscheiden sich die Methoden der AM von formativen Herstellungsprozessen, bei denen das Rohmaterial, beispielsweise durch Biegen oder Tiefziehen, in Form gebracht wird. Vielmehr kommt es, bis zum Erreichen der gewünschten Bauteilform, durch einen meist schichtweisen Materialauftrag zu einer stetigen Mehrung von Material. (Strauß et al. 2015)

Weitere häufig verwendete Bezeichnungen für AM sind generative Verfahren, Freeform Fabrication, eManufacturing, Additive Manufacturing, Direct Digital Manufacturing und 3-D-Druck. Es ist zu beachten, dass Letzterer in den Medien häufig für additive Fertigung steht. Vielmehr ist 3-D-Druck jedoch nur ein einziges von vielen Verfahren. Im Folgenden wird daher dieser Begriff ausschließlich für diese Verfahren und nicht allgemein für den Begriff der additiven Fertigung verwendet. (Schmid 2015)

3.2.2 Einteilung der additiven Fertigungsverfahren

Bei der additiven Fertigung werden zum einen beim Rapid Prototyping (RP) 3-D-Modelle genutzt, um physische Objekte herzustellen. Bei diesen Objekten handelt es sich um Modelle und Prototypen, die keinen realen Anwendungsfall besitzen, da sich ihre Eigenschaften von den gewünschten Produkteigenschaften unterscheiden können. Diese Prototypen werden hauptsächlich aus zwei Gründen gefertigt. Ersterer ist zur 3-D-Visualisierung, also eine rein optische Repräsentation. Ein solches Modell wird als Konzeptmodell, Solid Image, Mock-Up oder Rapid Mock-Up bezeichnet. Das dazugehörige Verfahren nennt sich entsprechend Solid Imaging oder Concept Modeling. Andererseits können die Modelle einzelne, ausgewählte Produkteigenschaften aufweisen, um diese auf ihre Funktionalität zu überprüfen. Es handelt sich also um einen Funktionsprototyp, der beim Functional Prototyping angefertigt wurde. (Gebhardt 2017)

Obwohl, wie oben angedeutet, die AM erst in den letzten Jahren die Aufmerksamkeit der Medien auf sich gezogen hat, findet RP bereits seit den 1980er Jahren Anwendung. Trotz der Vielzahl verwendbarer Materialien waren vorerst nur Anwendungen ohne große Bauteilgrößen, wie zum Beispiel medizinische Implantate, Schmuck oder Modelle, realisierbar, da vor allem die Größe der Baukammer für Limitierungen sorgte. Jedoch fanden genau bei diesen Anwendungen in den darauffolgenden zwei Jahrzehnten Weiterentwicklungen statt, sodass aus dem RP das Rapid Tooling (RT) und das Rapid Manufacturing (RM) entstehen konnte, wie auch in Abb. 5 dargestellt. (Strauß et al. 2015)

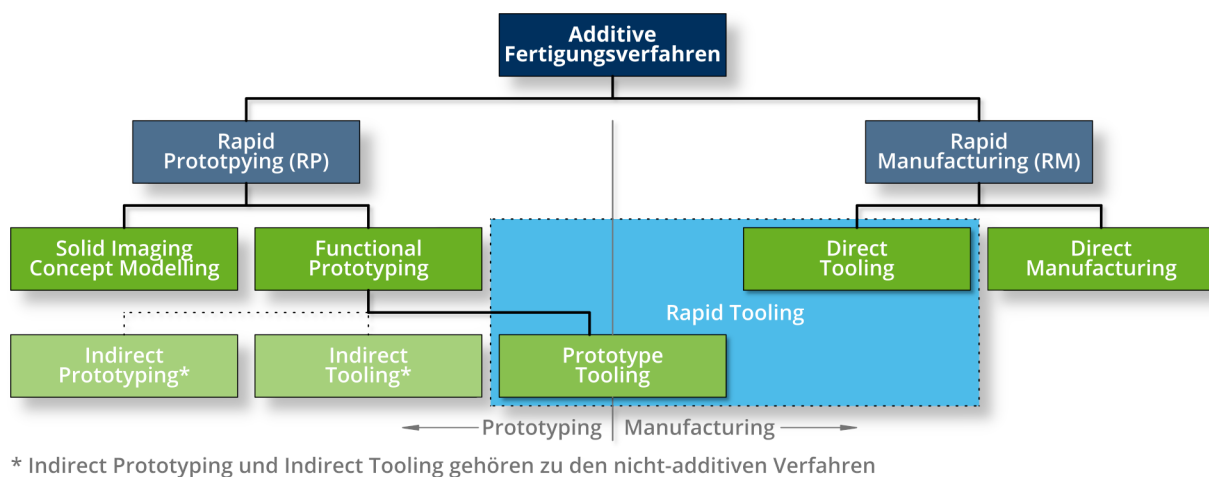


Abb. 5: Struktur der Technologie der additiven Fertigung
Quelle: In Anlehnung an Gebhardt (2017)

Im Gegensatz zu den beim RP gebauten Prototypen werden beim RM Bauteile gefertigt, die die gewünschten Endeigenschaften aufweisen. Hierbei wird weiter unterschieden in Direct Manufacturing und Direct Tooling. Direct Manufacturing beschreibt die direkte additive Fertigung von Endprodukten. Da Direct Manufacturing auf dem Verfahren des RP basiert, liegt beiden dieselbe Technologie zugrunde, sodass bis heute für beide Verfahren die gleichen Maschinen verwendet werden. Der Unterschied liegt jedoch im Erreichen der Endprodukteigenschaften. Beim Direct Tooling werden direkt einsatzfähige Werkzeuge oder Werkzeugeinsätze gefertigt. Dieses Verfahren ist vom sogenannten Prototype Tooling abzugrenzen, da die dabei gefertigten Produkte als Modelle oder Prototypen dienen. Somit ist Prototype Tooling eigentlich eine Unterkategorie des Functional Prototyping, nimmt jedoch eine Position zwischen der Prototyp- und der Produktfertigung ein. Der Begriff Rapid Tooling fasst Direct Tooling und Prototype Tooling zusammen. (Gebhardt 2017)

Des Weiteren werden auch nicht-additive Verfahren in diesen Zusammenhang gebracht. Indirect Prototyping und Indirect Tooling beschreiben Fertigungen, bei denen additiv gefertigte Modelle als Vorlage genutzt und abgeformt werden, sodass die Endprodukte selbst nicht additiv gefertigt sind. In der Praxis wird jedoch meist der Begriff Rapid Tooling auch für die nicht-additiven Verfahren gewählt. (Gebhardt 2017)

3.2.3 Additive Fertigungsverfahren

Im Folgenden sollen einige auf dem Markt frei verfügbaren Fertigungsverfahren genauer erläutert werden. Bei allen Verfahren ist zu beachten, dass die maximale mögliche Bauteilgröße ca. 20 % kleiner als die vom Hersteller angegebene Baukammergröße ist. (VDI 3405:2014-12 2014)

Zunächst ist jedoch in Tab. 1 dargestellt, welche Materialien mit den jeweiligen Methoden verarbeitet werden können.

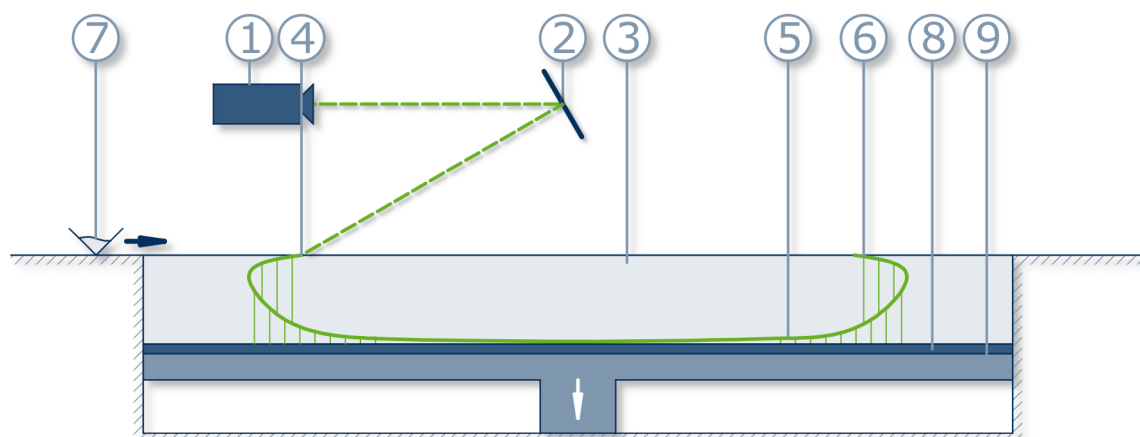
Tab. 1: Kommerziell etablierte additive Fertigungsverfahren

Material	Verfahren	Stereolithografie	Laser-Sintern	Laser-Strahlschmelzen	Elektronen-Strahlschmelzen	Fused Layer Modelling	Multi-Jet Modelling	Poly-Jet Modelling	3-D-Drucken	Layer Laminated Modelling	Digital Light Processing	Thermotransfer-Sintern
Papier										X		
Kunststoff		X	X			X	X	X	X	X	X	X
Formsand			X						X			
Metall			X	X	X				X	X	X	
Keramik		X	X						X	X	X	

Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

3.2.3.1 Stereolithografie

Stereolithografie (SL) basiert auf der Erhärtung von UV-aktivierbaren Kunstharzen unter UV-Strahlung. Wie in Abb. 6 zu sehen, erzeugt ein Laser (1) einen UV-Strahl, der mithilfe eines X-Y-Scanners (2) auf das Polymerbad (3) gelenkt wird. An der Kontaktstelle entsteht aufgrund von einer chemischen Reaktion (Polymerisation) eine Verfestigungszone (4). Mithilfe des



- | | | |
|-----------------|-----------------------|-------------------------------|
| 1 – Laser | 4 – Verfestigungszone | 7 – Beschichter |
| 2 – X-Y-Scanner | 5 – Bauteil | 8 – Bauplatte |
| 3 – Polymerbad | 6 – Stützkonstruktion | 9 – Bauplattform mit Hubtisch |

Abb. 6: Konzept der Stereolithografie

Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

X-Y-Scanners fährt der Strahl die Kontur der jeweiligen Schnittebene, auf Grundlage der Schnittdaten, ab, sodass eine Schicht des Bauteils (5) entsteht. Gegebenenfalls werden hierbei auch Stützkonstruktionen (6) erstellt, die nach Fertigstellung entfernt werden. Sobald eine Schicht abgeschlossen ist, fährt die Bauplatte (8) mithilfe der Bauplattform mit Hubtisch (9) um die Schichtdicke herunter. Der Beschichter (7) verteilt anschließend neues Material im Polymerbad, sodass die Materialoberfläche des Polymerbades wieder auf Ausgangshöhe ist. Fortfolgend kann die nächste Schnittebene bearbeitet werden. Das Verfahren wird wiederholt, bis die Bauteilgeometrie hergestellt wurde. Im Anschluss an den Druckvorgang folgt die Entnahme des Bauteils aus dem Polymerbad, eine Reinigung sowie das Nachvernetzen bzw. -erhärten im UV-Ofen. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.2.3.2 Laser-Sintern

Beim Laser-Sintern (LS), auch bekannt als selektives Laser-Sintern (SLS), werden im Gegensatz zur SL die Teilchen physikalisch durch thermische Einwirkung miteinander verbunden.

Abb. 7 zeigt, wie der Laserstrahl aus dem CO₂-Laser (1) mithilfe des X-Y-Scanners (2) auf das pulverförmige Material im Pulvervorratsbehälter (3) gelenkt wird. Als Material werden teilchenverstärkte Polymere, Polymermischungen, Metalllegierungen oder Keramiken mit Füllstoffen oder Bindern verwendet. Am Kontaktpunkt des Lasers mit der Oberfläche der Pulverpartikel werden diese, ohne ein vollständiges Schmelzen zu verursachen, gesintert. Durch einen Wärmeaustausch mit umgebendem Material kühlt die Kontaktstelle aus, sodass eine lokale Verfestigungszone (4) und so ein Stück des Bauteils (5) entsteht. Nachdem die

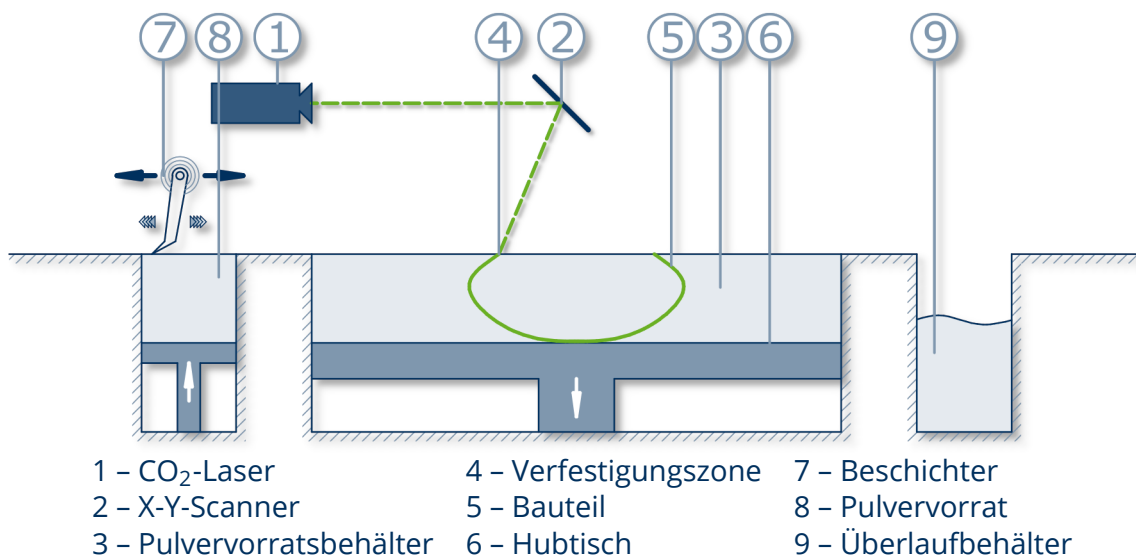


Abb. 7: Konzept des Laser-Sinterns

Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014), Trumpf (2017)

Schicht so vollständig ausgebildet wurde, fährt der Hubtisch (6) um eine Schichtdicke herunter und der Beschichter (7) kann neues Material aus einem Pulvervorrat (8) auf der Bauplatte verteilen. Überschüssiges Material wird hierbei in einen Überlaufbehälter (9) geschoben, sodass kein Material verloren geht. Anschließend kann die nächste Schicht hergestellt werden. Als Stützkonstruktion dient das nicht thermisch gebundene Material im Pulvervorratsbehälter. (VDI 3405:2014-12 2014) (Menezes 2016)

Im Anschluss an den Druckvorgang kann das Bauteil vom umgebenden, losen Material mithilfe von Druckluft entfernt werden. Des Weiteren kann die Bauteiloberfläche durch Gleitschleifen, Strahlen und Lackieren weiter verbessert werden. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.2.3.3 Laser-Strahlschmelzen

Das Laser-Strahlschmelzen (engl. Laser Beam Melting) (LBM), auch bekannt als Laser Forming, Selective Laser Melting (SLM), LaserCUSING oder Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ist eng mit dem LS verwandt. Jedoch eignet sich LBM nur für pulverförmige Metalle oder, wie meist verwendet, für Metalllegierungen. Im Gegensatz zum LS wird das Material beim LBM lokal, vollständig aufgeschmolzen (VDI 3405:2014-12 2014). Im Vergleich zum LS können höhere Druckgeschwindigkeiten erreicht werden. Jedoch ist damit der Energieverbrauch höher und der Wirkungsgrad erreicht in der Regel nur 10 bis 20 %. Während des Druckvorgangs sollte aus Sicherheitsgründen Inertgas verwendet werden. Die dadurch entstehenden Metallteile weisen im Vergleich zu mittels LS hergestellten Bauteilen einen homogenen Aufbau und eine höhere Dichte auf. (Loughborough University AMRG 2018)

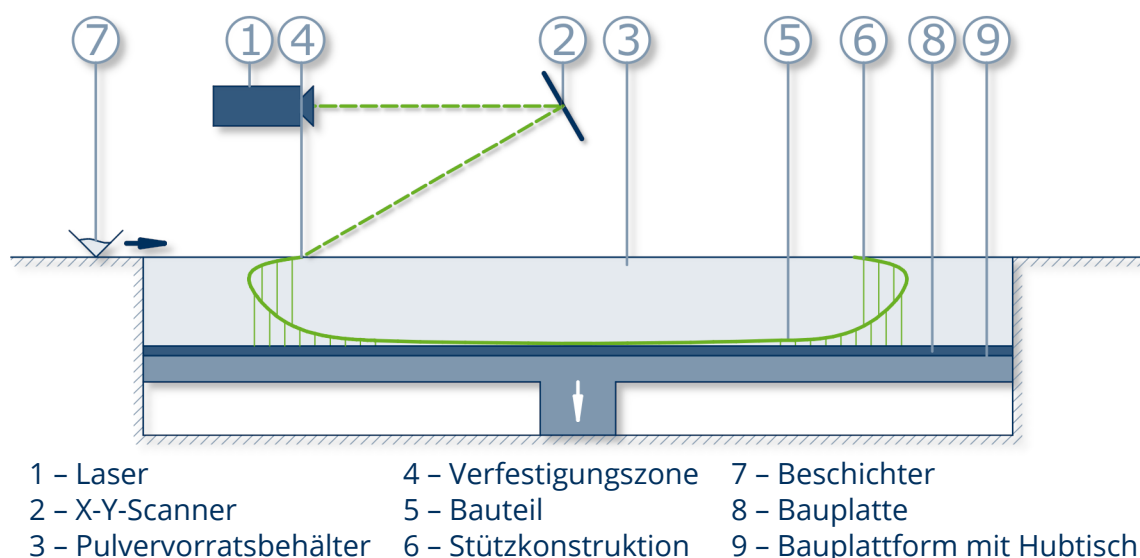


Abb. 8: Konzept des Laser-Strahlschmelzens
Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

Abb. 8 verdeutlicht, dass der Laser (1) einen Laserstrahl erzeugt, der mithilfe eines X-Y-Scanners (2) auf die pulverförmige Metalllegierung (3) geleitet wird. An der Kontaktstelle entsteht aufgrund der thermischen Einwirkung durch den Laserstrahl ein lokales, vollständiges Aufschmelzen des Materials. Nach dem Erstarren des Materials verfestigt sich dieses physikalisch, sodass eine lokale Verfestigungszone (4), die ein Bestandteil des Bauteils (5) wird, entsteht. Stützkonstruktionen (6), die später nicht zum fertigen Bauteil gehören, werden auch auf diese Weise hergestellt. Sobald eine Schicht komplett angefertigt wurde, fährt die Bauplatte (8) auf der Bauplattform mit Hubtisch (9) herunter und der Beschichter (7) kann anschließend neues Material im Arbeitsbereich verteilen. Sobald der Herstellprozess der Bauteilgeometrie beendet ist, müssen die Stützkonstruktionen abgetrennt werden. Abschließend kann die Bauteiloberfläche durch Folgetechnologien, wie Mikrostrahlen, Laserstrahlabtragen oder Laserstrahlumschmelzen, verbessert werden. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.2.3.4 Elektronen-Strahlschmelzen

Das Elektronen-Strahlschmelzen (engl.: Electron Beam Melting) (EBM) ist ebenfalls ein eng verwandter Prozess von LS und somit auch vom LBM. Ähnlich wie beim LBM eignet sich EBM ausschließlich für pulverförmige Metalle. Meist werden bei diesem Verfahren Metalllegierungen verwendet. Zudem kommt es auch beim EBM zu einem vollständigen, lokalen Aufschmelzen des Materials und das Bauteil entsteht nach dem Erstarren dieses Materials. Die Abgrenzung zum LBM ist die Art und Weise, wie die Energie in das Material eingetragen wird. Beim LBM geschieht dies über die Erwärmung durch einen Laserstrahl. Beim EBM hingegen wird die Energie durch die Bewegungsenergie der Elektronen innerhalb des Elektronenstrahls in das Material eingetragen. (VDI 3405:2014-12 2014)

Das EBM zeichnet sich durch seine sehr guten Festigkeitseigenschaften aus. Diese Eigenschaft begründet sich in der gleichmäßigen Temperaturverteilung während des Druckvorgangs. Aufgrund der hohen Qualität und der verfügbaren Nachbehandlungsmöglichkeiten eignet sich EBM für die Anwendungen mit gehobenen Anforderungen, wie beispielsweise im Flugzeugbau oder in der Medizin. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Methoden werden beim EBM keine Spiegel oder Linsen benötigt, um den Elektronenstrahl zu steuern. Vielmehr werden hierfür elektromagnetische Felder, die in der Fokussierspule und der Ablenkspule erzeugt werden, genutzt. Weiterhin wird für die Aufrechterhaltung des Elektronenstrahls ein Vakuum benötigt, sodass die Baukammer vollständig luftdicht auszubilden ist. (Loughborough University AMRG 2018)

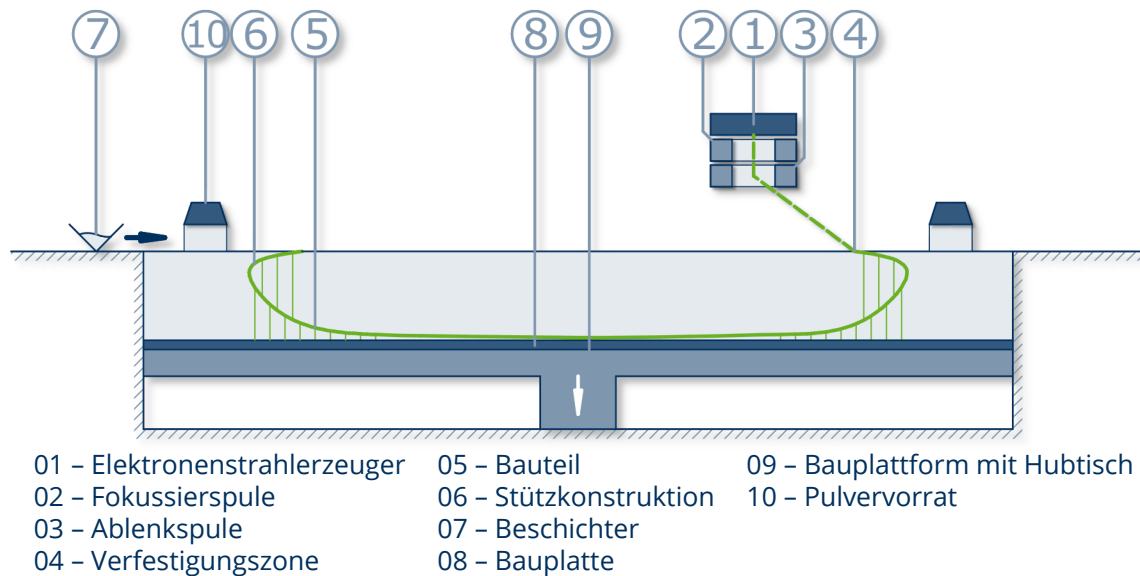


Abb. 9: Konzept des Elektronen-Strahlschmelzens

Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

Auch ist die große Eindringtiefe des Strahls in das Material zu beachten, sodass hohe Scangeschwindigkeiten ermöglicht werden. (Menezes 2016)

Wie in Abb. 9 verdeutlicht, werden Elektronen im Elektronenstrahlerzeuger (1) emittiert und beschleunigt. Mithilfe der Fokussierspule (2) werden die beschleunigten Elektronen zu einem Elektronenstrahl gebündelt und mithilfe der Ablenkspule (3) auf die Oberfläche des Materials geleitet. Aufgrund der Bewegungsenergie der Elektronen kommt es an der Kontaktstelle zum vollständigen, lokalen Aufschmelzen. Anschließend erstarrt das Material, sodass eine Verfestigungszone (4) entsteht. Diese Verfestigungszone ist Bestandteil des Bauteils (5) oder einer zur Fertigung benötigten Stützkonstruktion (6). Sobald eine Schicht vollständig hergestellt wurde, fahren die Bauplatte (8) und die Bauplattform mit Hubtisch (9) um eine Schichtdicke herunter und der Beschichter (7) kann neues pulverförmiges Material aus den Pulvervorratsbehältern (10) verteilen. Anschließend folgt die Fertigung der nächsten Schicht. (VDI 3405:2014-12 2014)

Nach Fertigstellung der Bauteilgeometrie kann das Produkt von überschüssigem Pulvermaterial gereinigt werden und ggf. können notwendige CNC-Arbeiten ausgeführt werden (Loughborough University AMRG 2018). Weiterhin kann die Bauteiloberfläche durch Folgetechnologien verbessert werden. Nennenswert sind hierbei das Mikrostrahlen, Laserstrahl-abtragen und das Laserstrahlumschmelzen. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.2.3.5 Fused Layer Modelling / Manufacturing

Das Fused Layer Modelling bzw. Fused Layer Manufacturing (FLM) ist auch unter den Bezeichnungen Fused Deposition Modelling (FDM) und Strangablegeverfahren bekannt. Bei diesem

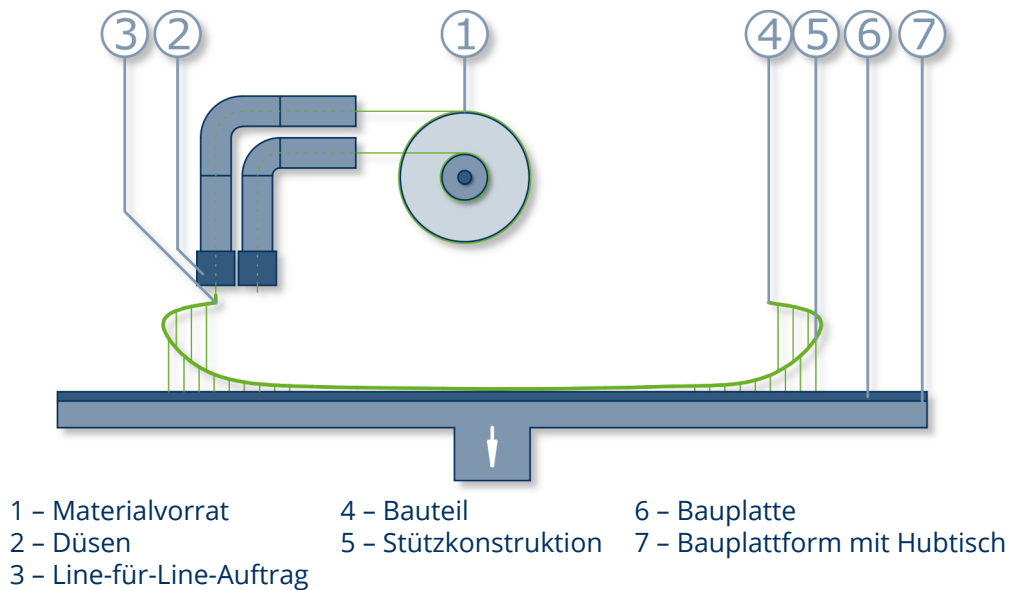


Abb. 10: Konzept des Fused Layer Modellings

Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

Verfahren wird thermoplastisches Material erhitzt, an der entsprechenden Position abgelegt und verfestigt sich unmittelbar danach. (VDI 3405:2014-12 2014)

FLM ist das am häufigsten gewählte Verfahren für 3-D-Drucker in privaten Haushalten oder im hobbymäßigen Gebrauch. Die erreichbare Endqualität der Produkte ist abhängig von einer Vielzahl von Einflussfaktoren. Wenn diese jedoch kontrollierbar sind, eröffnen sich dem FLM ein sehr großes Potenzial und eine gute Wirtschaftlichkeit. Eine große Herausforderung, um akzeptable Ergebnisse zu erzielen, ist hierbei, dass beim Druckprozess das Material auf einem konstanten Druck und auf konstanter Geschwindigkeit gehalten werden muss. Die großen Vorteile des Verfahrens sind die Verwendung von leicht zugänglichem ABS-Kunststoff, die guten strukturellen Eigenschaften der Modelle, die vergleichbar mit den geforderten Eigenschaften der Endprodukte sind, und die gute Wirtschaftlichkeit bei geringen Volumina, die die des Spritzgießens übertreffen kann. Jedoch ist die Genauigkeit und Geschwindigkeit beim FLM gering im Vergleich mit anderen AM-Verfahren. (Loughborough University AMRG 2018)

Abb. 10 verdeutlicht, wie das strang- oder filamentförmige Material im Materialvorrat (1) (hier strangförmig) gelagert wird. Der Materialvorrat kann bis zu zwei unterschiedliche Polymere aufbewahren, sodass eines für das Bauteil (4) und das andere für Stützkonstruktionen (5) verwendet werden kann. Durch Wärmeleitung im Druckkopf oder in den beheizten Düsen (2) wird das Baumaterial erweicht oder aufgeschmolzen. Der Druckkopf legt dann in einem Line-für-Line-Auftrag (3) das entsprechende Polymer in der notwendigen Position ab. Durch den physikalischen Bindungsmechanismus nach Abkühlen des extrudierten Materials wird dieses zum Bestandteil des Bauteils oder der Stützkonstruktion. Sobald eine

gesamte Schicht hergestellt wurde, kann diese ggf. nachgefräst werden. Anschließend fährt die Bauplatte (6) mit der Bauplattform mit Hubtisch (7) um eine Schichtdicke herunter, um die nachfolgende Schicht herzustellen. (VDI 3405:2014-12 2014)

Nach Fertigstellung der Bauteilgeometrie muss die Stützkonstruktion vom Bauteil entfernt werden. Dies geschieht mechanisch oder mittels Laugen, falls zwei unterschiedliche Materialien eingesetzt wurden. Abschließend muss das Bauteil gereinigt und beschichtet werden. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.2.3.6 Multi-Jet Modelling

Beim Multi-Jet Modelling (MJM) werden Wachse, also niedrigviskose Polymere von beheizten Düsen aufgeschmolzen und in Position gebracht. Durch das Abkühlen des Materials nach der Positionierung erhärtet dieses und verbindet sich physikalisch mit der darunterliegenden Schicht. (VDI 3405:2014-12 2014)

Die Abb. 11 stellt dar, wie die Materialzufuhr (1) das Material aus dem vorgewärmten Vorratsbehälter zum beheizten Druckkopf (2) leitet. Aufgrund der Wärmeleitung innerhalb des Druckkopfes erwärmt und schmilzt das Ausgangsmaterial und kann anschließend an der gewünschten Position durch eine Düse vom Druckkopf ausgeschieden werden. Das Material wird so in einem Line-für-Line-Auftrag (3) dem Bauteil (4) oder der Stützkonstruktion (5) hinzugefügt. Unmittelbar nach der Positionierung des Materials verfestigt sich dieses mit der darunter liegenden Schicht. Sobald eine Schicht fertiggestellt wurde, fährt die Bauplattform

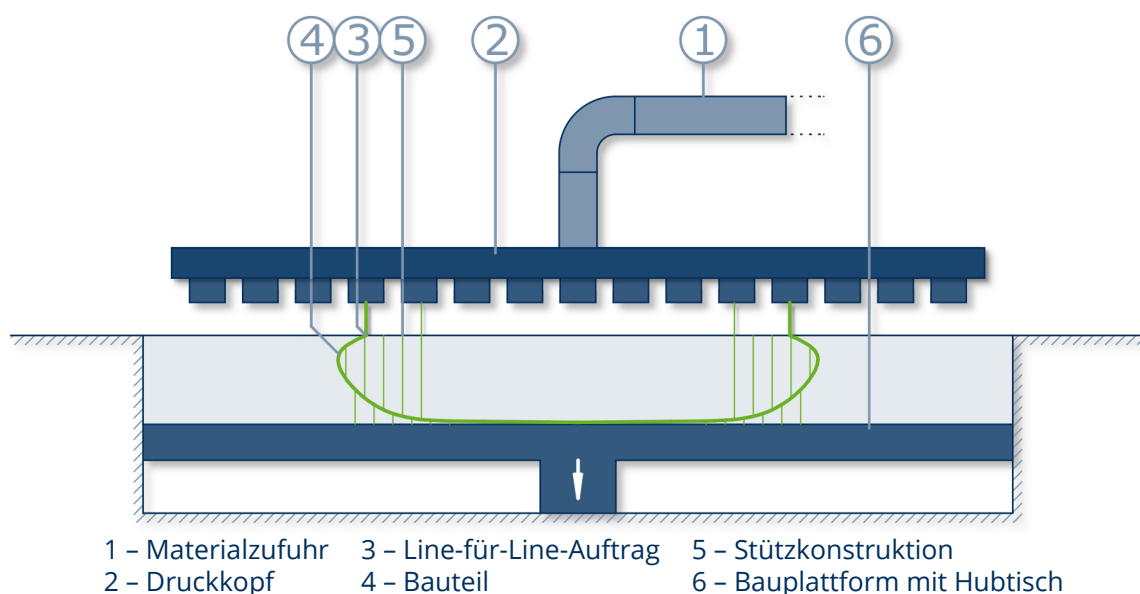


Abb. 11: Konzept des Multi-Jet Modellings
Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

mit Hubtisch (6) um eine Schichtdicke herunter und die nächste Schicht kann hergestellt werden. (VDI 3405:2014-12 2014)

Im Anschluss an die Herstellung der Bauteilgeometrie müssen die Stützkonstruktionen mechanisch vom Bauteil getrennt werden. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.2.3.7 Poly-Jet Modelling

Das Poly-Jet Modelling (PJM) ist eng mit dem MJM verwandt. Die VDI 3405:2014-12 (2014) unterscheidet beide Verfahren. In einiger Literatur wird keine Unterscheidung vorgenommen und die Methoden werden unter dem Überbegriff Material Jetting (MJ) zusammengefasst. Das dort beschriebene MJ ähnelt mehr dem im folgenden beschriebenen PJM als dem zuvor erläuterten MJM (Gibson et al. 2014, Fritz 2018, threedom.de 2018).

Wie auch in Abb. 12 zu sehen, sind zwei UV-Strahler (2) mit dem Druckkopf (1) verbunden. Da aus dem Druckkopf PJM flüssiges bis pastöses Fotopolymer-Flüssigharz zum Einsatz extrahiert wird, ist der chemische Bindungsmechanismus die UV-Vernetzung im Ausgangsmaterial, die durch die UV-Strahler ausgelöst wird. Somit befindet sich die Verfestigungszone (3) immer unterhalb dieser. Das verfestigte Material wird dann je nach Materialmischung zu einem Bestandteil des Bauteils (4) oder der Stützkonstruktion (5). Sobald eine Schicht vollständig hergestellt wurde, fährt die Bauplatte (6) auf der Bauplattform mit Hubtisch (7) um eine Schichtdicke herunter. Folgend werden die nächsten Schichten hergestellt. (VDI 3405:2014-12 2014)

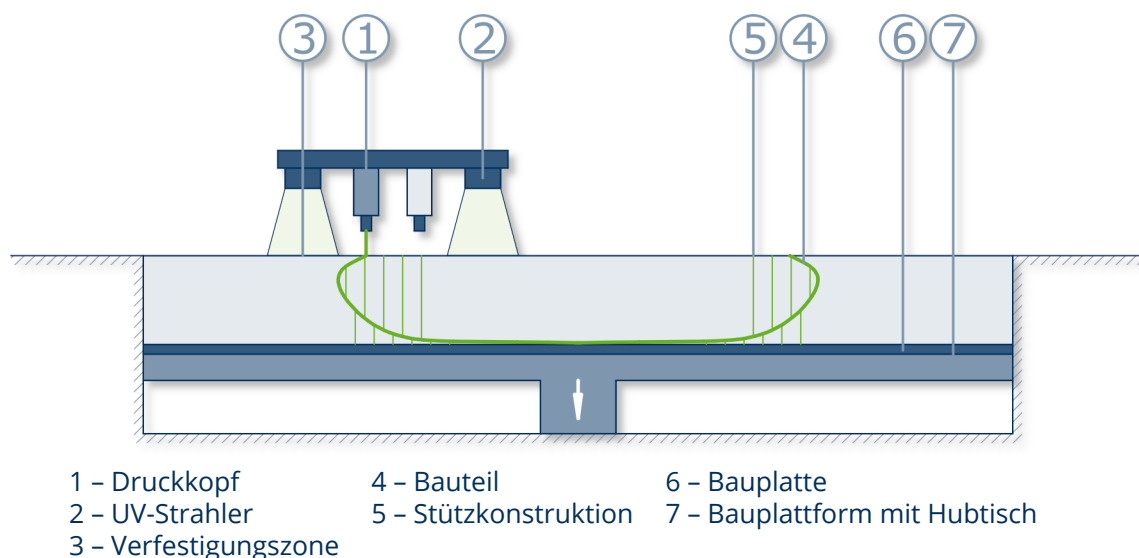


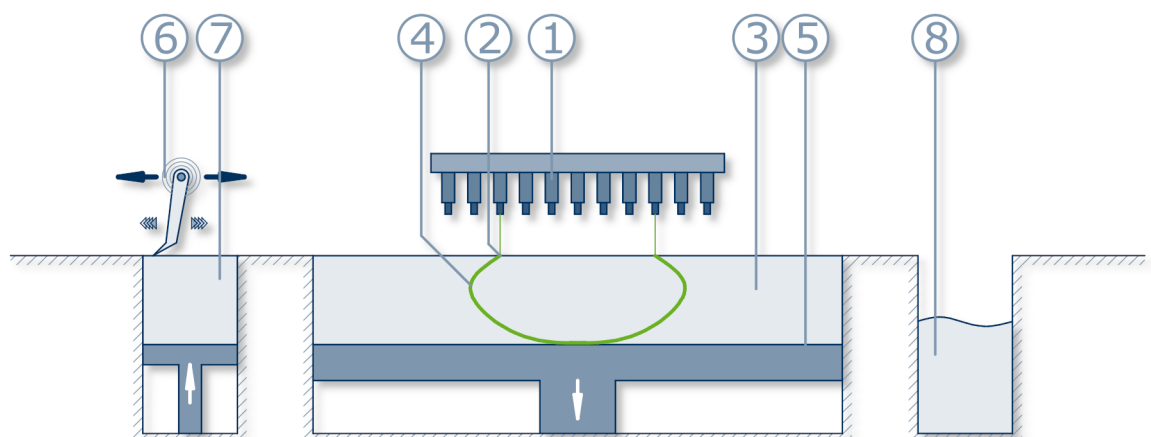
Abb. 12: Konzept des Poly-Jet Modellings
Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

Im Anschluss an die Herstellung der Bauteilgeometrie können die Stützkonstruktionen mithilfe eines Wasserstrahls entfernt werden. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.2.3.8 3-D-Druck

Wie bereits erwähnt ist der 3-D-Druck (3DP) ein Verfahren von vielen. Auch die Bezeichnung Binder Jetting (BJ) ist hierfür geläufig. Bei diesem Verfahren wird pulverförmiges Material mithilfe eines Bindemittels gebunden. Durch einen gezielten Bindemittelauftrag können so beliebige Bauteilgeometrien hergestellt werden. Als Ausgangsmaterial eignen sich Polymerpulver, Stärkepulver, Pulver auf Gipsbasis und Metallpulver. (Gibson et al. 2014)

Wie in Abb. 13 dargestellt, wird durch den Druckkopf (1) Bindemittel erhitzt und ausgeschieden. Hierfür stehen mehrere Düsen zur Verfügung, sodass an mehreren Positionen gleichzeitig gearbeitet werden kann. Das Bindemittel trifft in einem Punkt-für-Punkt-Binderauftrag (2) auf den Pulvervorrat (3). Das Pulver wird durch das Bindemittel zu einem kugelförmigen Agglomerat aus Pulverkörnern und Bindemittelflüssigkeit. Zudem verbindet sich durch das Bindemittel dieses Agglomerat mit den zuvor gedruckten Schichten und wird zum Bestandteil des Bauteils (4). Als Stützkonstruktion ist das Pulverbett ausreichend, sodass diese nicht extra gedruckt werden muss. Sobald eine Schicht vollständig hergestellt ist, fährt die Bauplattform mit Hubtisch (5) um eine Schichtdicke herunter und der Beschichter (6) verteilt neues Material aus dem Pulvervorratsbehälter (7) im Arbeitsraum. Überschüssiges Material wird hierbei in einem Überlaufbehälter (8) aufgefangen. (VDI 3405:2014-12 2014,



- | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1 – Druckkopf | 4 – Bauteil | 7 – Pulvervorratsbehälter |
| 2 – Punkt-für-Punkt-Binderauftrag | 5 – Bauplattform mit Hubtisch | 8 – Überlaufbehälter |
| 3 – Pulvervorrat | 6 – Beschichter | |

Abb. 13: Konzept des 3-D-Drucks

Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

Gibson et al. 2014)

Anders als bei den bisher vorgestellten Verfahren, wird das Bauteil nicht sofort nach Fertigstellung des Druckvorgangs aus der Baukammer entnommen. Das Bindemittel soll zunächst vollständig abbinden, sodass das Bauteil an Festigkeit gewinnt. Anschließend kann das gedruckte Teil aus dem Pulverbett entnommen werden und loses Pulvermaterial mittels Druckluft entfernt werden. Anschließend wird das Bauteil infiltriert, um die mechanischen Eigenschaften weiter zu verbessern. Vor allem bei Verwendung von elastomeren Infiltraten kann das gedruckte Teil für funktionelle Zwecke genutzt werden. Aber auch als Formteile für den Feinguss können 3-D-gedruckte Bauteile verwendet werden. Hierbei ist vor allem die Kombination aus Polymerpulver und Infiltraten auf Wachsbasis zu nennen, da diese sich später sehr gut von den gegossenen Teilen lösen. (Gibson et al. 2014)

3.2.3.9 Layer Laminated Manufacturing

Das Layer Laminated Manufacturing (LLM), auch bekannt als Laminated Object Manufacturing (LOM) oder Sheet Lamination (Gibson et al. 2014), ist ein AM-Verfahren, bei dem die Schnittkonturen mithilfe von Laser, Messer oder Wasserstrahl aus vorgefertigten Folien aus Papier, Kunststoff, Metallen oder Keramik herausgeschnitten werden. Anschließend werden diese miteinander verklebt oder mittels Ultraschall zusammengefügt, sodass ein 3-D-Körper entsteht. (VDI 3405:2014-12 2014) Bei diesem Verfahren sind zwei generelle Abläufe denkbar. Je nach Ablauf unterscheidet man hierbei in Bond-Then-Form oder Form-Then-Bond Prozesse. Abb. 14 stellt dar, wie bei Ersterem zunächst das Folienband (1) von der Rohmaterialrolle (2) durch die Laminierwalze (3) geleitet wird. Diese beheizte Walze erwärmt den auf dem Folienband rückseitig angebrachten Kleber, sodass sich dieser mit der

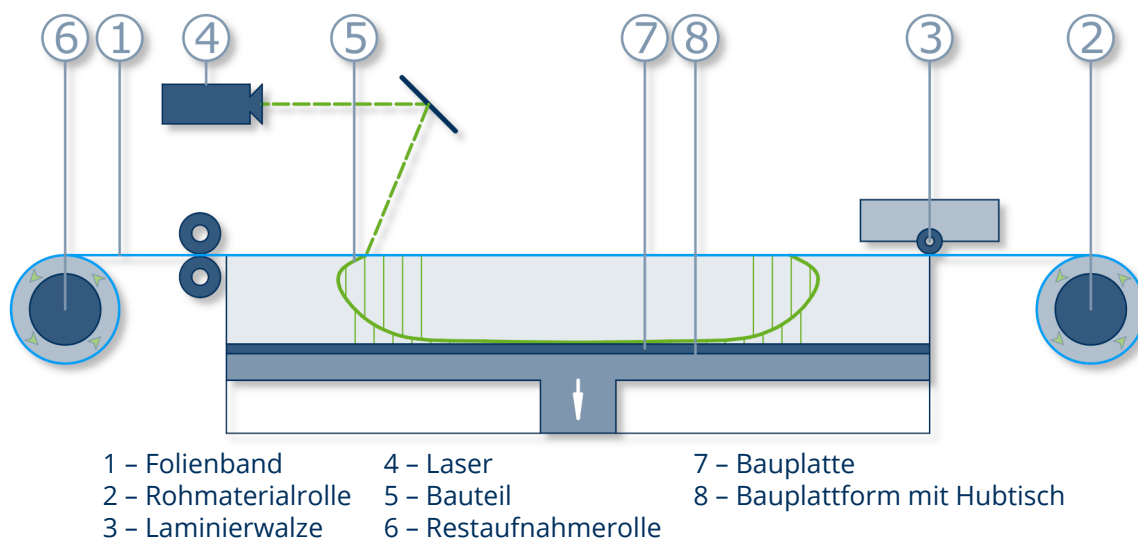


Abb. 14: Konzept des Layer Laminated Manufacturings
Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

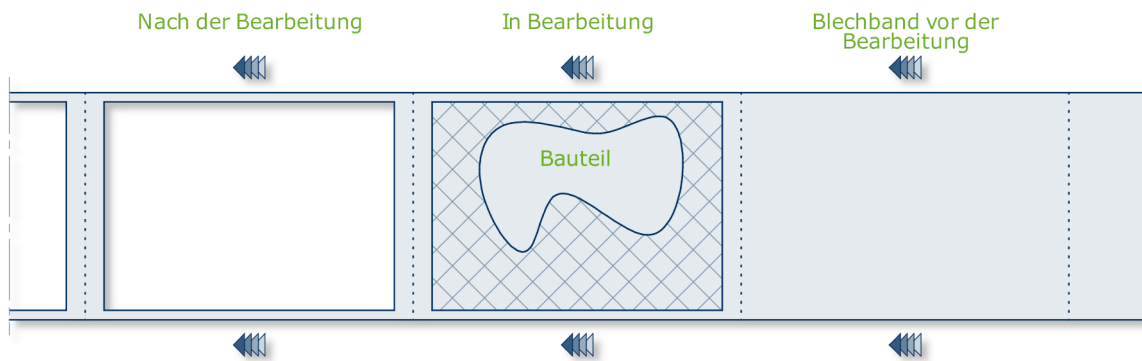


Abb. 15: Schematische Darstellung des Folienbandes in verschiedenen Bearbeitungsstadien
Quelle: Eigene Darstellung

nächsten Schicht verbinden kann. Das Folienband wird über der vorherigen Schicht platziert und verbindet sich mit dieser. Sobald das Material in Position ist, kann beispielsweise der Laser (4) damit beginnen die Kontur des Bauteils (5) auszuschneiden. Nicht benötigtes Material wird hierbei in ein Rastermuster zerschnitten, sodass Materialwürfel entstehen. Zur Verdeutlichung dieses Vorgangs ist eine schematische Darstellung des Folienbandes in verschiedenen Bearbeitungsstadien in Abb. 15 gegeben. Sobald die Schicht geschnitten wurde, kann die Restaufnahmerolle (6) das überschüssige Folienband aufnehmen. Die Bauplatte (7) auf der Bauplattform mit Hubtisch (8) fährt um eine Schichtdicke herunter und die nächste Schicht kann hergestellt werden. (Gibson et al. 2014, VDI 3405:2014-12 2014)

Im Anschluss kann der Teileblock entfernt werden. Die kreuzschraffierten Stücke können mit typischen Holzschnittwerkzeugen von dem zu fertigenden Bauteil gelöst werden. Bei Kälte kann dieser Vorgang sehr schwer sein, sodass der Teileblock optional in einem Ofen vorgeheizt werden kann. (Gibson et al. 2014)

Das alternative Form-Then-Bond-Verfahren sieht vor, dass zunächst die Konturen einer Schnittebene geschnitten werden und diese Kontur anschließend über den vorher hergestellten Schnittebenen platziert wird, um dort mit dem Bauteil verbunden zu werden. Vor allem für metallische und keramische Materialien ist dieses Verfahren beliebt. Vorteilhaft gegenüber dem Bond-Then-Form-Prozess ist, dass keine Gefahr besteht in vorherige Schichten zu schneiden und somit die Laserleistung bzw. der Messerdruck nicht ganz so relevant sind. Zudem können durch das Form-Then-Bond-Verfahren Hohlräume innerhalb des Bauteils realisiert werden, da beim Bond-Then-Form das überschüssige Material nicht aus diesen entfernt werden kann. Allerdings findet das Form-Then-Bond-Verfahren nur in der Forschung Anwendung, da einige technische Schwierigkeiten dabei auftreten. So müssen auch Stützkonstruktionen ausgeschnitten werden, da diese Funktion nicht mehr von überschüssigem Material übernommen werden kann. Auch werden Systeme zum

Ausrichten der Schichten über den vorherigen und ein flexibler Materialträger, der das Material unabhängig von der ausgeschnittenen Kontur präzise positionieren kann, benötigt. (Gibson et al. 2014)

3.2.3.10 Digital Light Processing

Das Digital Light Processing (DLP) ist eng mit der SL verwandt. Auch beim DLP werden flüssige bis pastöse UV-aktivierbare Kunstharze verwendet, um mittels UV-Strahlung zu erhärten. Im Unterschied zum SL wird bei diesem Verfahren jedoch kein Laser verwendet, sondern eine UV-Lampe. (VDI 3405:2014-12 2014)

In Abb. 16 ist das Verfahren schematisch dargestellt. Die Lichtstrahlen der UV-Lampe (1) werden mittels Umlenkspiegel (2) durch eine Glasscheibe (3) hindurch auf eine mit Fotopolymer gefüllte Wanne (4) gelenkt, sodass an der Unterseite der Wanne ein Brennpunkt (5) entsteht. In diesem Brennpunkt kommt es beim UV-aktivierbaren Kunstharz zu einer chemischen Vernetzung, sodass dieses erhärtet und zum Bestandteil des zu generierenden Bauteils (6) oder zu Stützkonstruktionen (7) wird. Im Gegensatz zu allen anderen hier vorgestellten AM-Verfahren befindet sich die Bauplatte (8) auf der Bauplattform mit Hubtisch (9) oberhalb des zu fertigenden Objekts. Dadurch hängt das Bauteil unterseitig an der Bauplatte. Sobald eine Schicht fertiggestellt wurde, fährt die Bauplattform mit Hubtisch die Bauplatte um eine Schichtdicke nach oben und die nächste Schicht kann unter der vorherigen gefertigt werden. (VDI 3405:2014-12 2014, Reddy 2016)

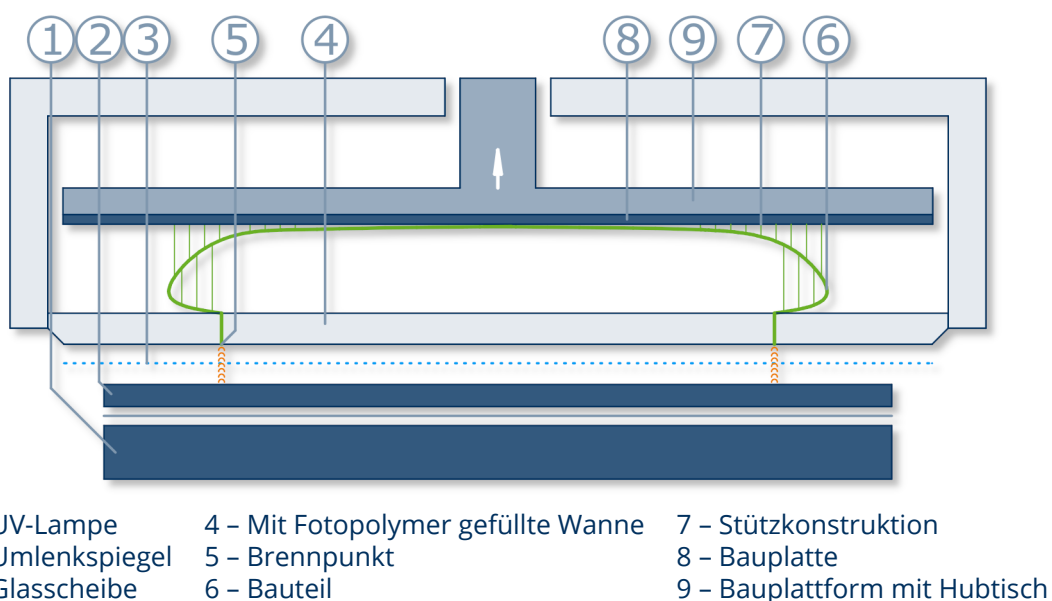


Abb. 16: Konzept des Digital Light Processings
Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

In der Nachbehandlung müssen die Stützkonstruktionen entfernt werden. Das Bauteil kann außerdem geschliffen werden, um die Oberfläche zu verbessern. Zudem härtet das UV-aktivierbare Kunstharz nach Fertigstellung weiter aus. Optional kann das Bauteil grundiert und lackiert bzw. beschichtet werden. (Reddy 2016)

Gegenüber der SL werden Bauteile beim DLP schneller produziert, da der Brennpunkt der Lichtquelle über die gesamte Arbeitsfläche verteilt sein kann, und somit eine größere Fläche auf einmal verfestigt wird. Zudem benötigt das DLP eine kleinere Menge an UV-aktivierbarem Kunststoff, sodass die Abfälle und auch die Verfahrenskosten geringer sind. Dennoch ist die Genauigkeit des DLP-Verfahrens mit der der SL vergleichbar. (Reddy 2016)

3.2.3.11 Thermotransfer-Sintern

Nach Fritz (2018) ist das Thermotransfer-Sintern (TTS) ein eng verwandter Prozess mit dem LS. Die beiden Verfahren unterscheiden sich jedoch bei der Art des Energieeintrags. So verwendet TTS keinen Laser, sondern einen beheizten Druckkopf, der mittels Druckes und Wärme die notwendige Energie bereitstellt. Auch betont Fritz (2018), dass TTS derzeit nicht auf dem Markt erhältlich ist.

Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abb. 17 dargestellt. Der beheizte Druckkopf (1) kann sich in der X-Y-Ebene frei bewegen. Mithilfe von Wärme und Druck wird das Material im Pulverbett (2) an der Kontaktstelle mit dem Druckkopf gesintert. So entsteht eine lokale Verfestigungszone (3), die zum Bestandteil des Bauteils (4) wird. Die Aufgabe der

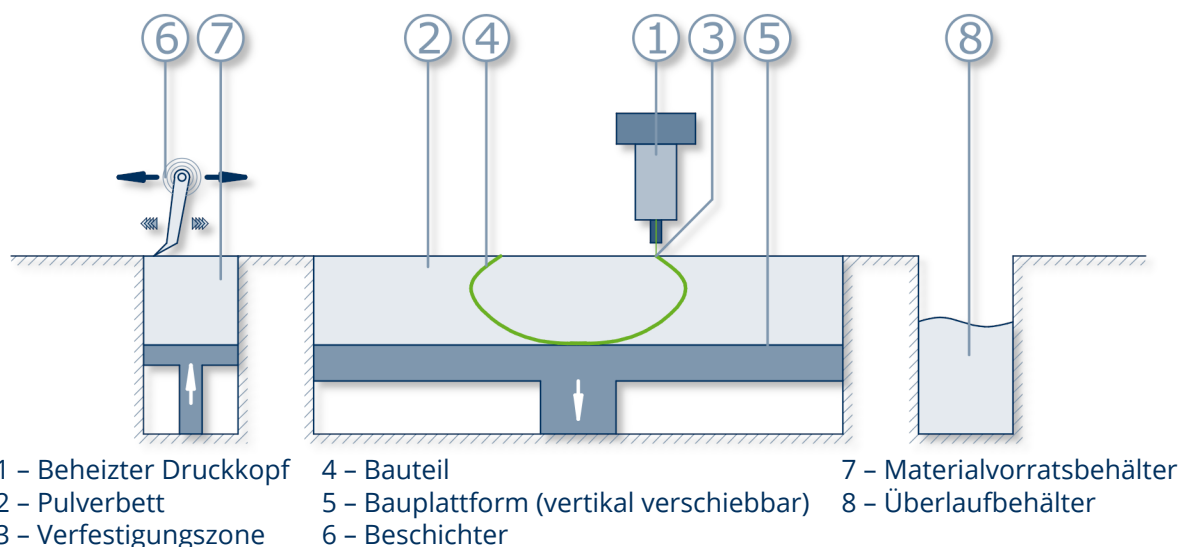


Abb. 17: Konzept des Thermotransfer-Sinterns
 Quelle: In Anlehnung an VDI 3405:2014-12 (2014)

Stützkonstruktion wird beim TTS vom Pulver übernommen, sodass diese nicht extra hergestellt werden muss. Sobald eine Schicht fertiggestellt wurde, fährt die Bauplattform (5) um eine Schichtdicke herunter. Anschließend verteilt der Beschichter (6) neues Pulvermaterial aus dem Materialvorratsbehälter (7) im Pulverbett. Überschüssiges Material wird hierbei in einem Überlaufbehälter (8) aufgefangen. (VDI 3405:2014-12 2014)

3.3 CNC Fertigung

Nicht nur die Verfahren der AM stellen ein großes Potenzial für die digitale Fertigung dar. Auch sind konventionelle Verfahren im Sinne einer subtraktiven Fertigung dafür geeignet, sollten sie über eine CNC-Steuerung verfügen. Im Gegensatz zur AM entstehen Bauteile bei der subtraktiven Fertigung nicht über das wiederholende Hinzufügen von Material. Vielmehr wird von einem Materialblock solange Material entfernt bis daraus das zu fertigende Bauteil entstanden ist. Daher wird ein Materialblock mit mindestens den gleichen Dimensionen, wie die des zu fertigenden Produktes, benötigt (Gibson et al. 2014).

Der Begriff Computerized Numerical Control (CNC) beschreibt hingegen einen computergestützten Fertigungsablauf. Hierbei übernimmt der Computer die numerische Steuerung und Regelung der Maschinen, sodass jeder Arbeitsschritt als Zahlenwert repräsentiert wird. Diese Technologie ermöglicht eine nahezu unbegrenzte Anzahl an Steuerungsschritten, ohne dass manuell in den Fertigungsablauf eingegriffen werden muss. Die Fertigung erfolgt mit einer hohen Präzision bei konstanter Fertigungsqualität. Zudem können die Programmabläufe gespeichert und schnell ausgetauscht werden, sodass die Stillstandszeiten der Maschinen deutlich reduziert werden. Mithilfe moderner Computertechnologie verarbeitet die CNC-Einheit zusätzliche Parameter, um beispielsweise unterschiedliche Fräsdurchmesser und Werkzeuglängen zu kompensieren. Dies ist der Hauptunterschied zwischen CNC- und den früheren Numerical Control (NC)-Maschinen. Zusätzlich werden bei der CNC-Technologie neben den Steuerungs- und Regelaufgaben Verwaltungs- und Anzeigefunktionen übernommen. (Kief et al. 2017)

Der für diese Arbeit jedoch wichtigste von Kief et al. (2017) und Grotz (2017) angesprochene Aspekt, ist die Verwendung von Maßangaben aus den Werkstückzeichnungen. Dadurch ist ein automatisierter Workflow vom 3-D-Modell bis hin zur Fertigung realisierbar. Die Möglichkeiten der Umsetzung werden ab Kapitel 4 genauer betrachtet.

In den folgenden Kapiteln sollen verschiedene Verfahren der CNC-Fertigung vorgestellt und erläutert werden.

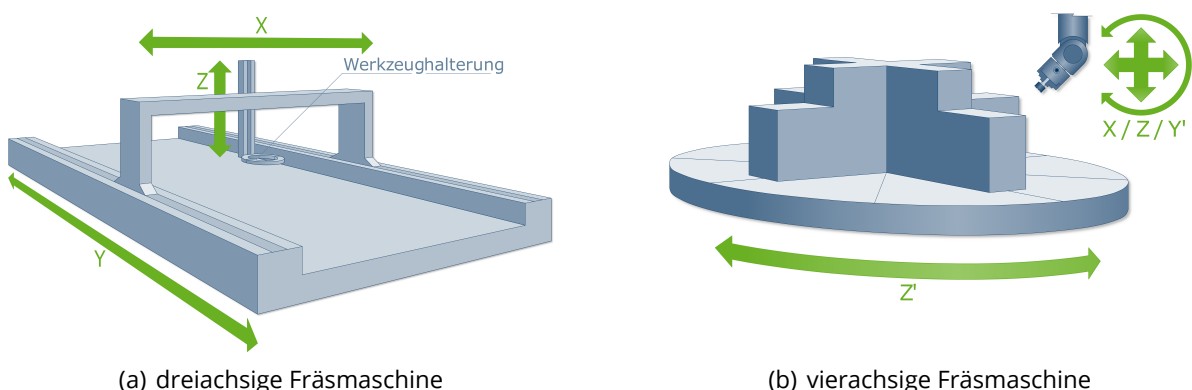
3.3.1 Fräsmaschine

Das erste hier vorgestellte Verfahren ist das Fräsen. Beim Fräsen handelt es sich um einen nicht-abrasiven¹ Fertigungsprozess, sodass die Abmessung und der Winkel des Schnittes definiert werden können. Somit ist die Fertigung unter Verwendung des Fräsverfahrens reproduzierbar. (Rattat 2017)

Bei einer Fräsmaschine handelt es sich um ein Rotationswerkzeug, das eine oder mehrere Schneiden führt. Während der Bearbeitung wird das zu fertigende Objekt auf dem Maschinentisch befestigt. Das Werkzeug ist beweglich, sodass dieses Material vom Werkstück entfernt werden kann. Einfache Fräsmaschinen sind hierbei auf die X-, Y- und Z-Achse begrenzt und ermöglichen daher nicht so viel Flexibilität, da nur senkrecht zur Arbeitsebene Material abgetragen werden kann. In Abb. 18 (a) ist eine dreiachsige Fräsmaschine dargestellt. Zur Herstellung von komplexeren Formen sind auf dem Markt Systeme mit bis zu 15 unabhängigen Achsen. Bereits bei einer Erweiterung von drei auf vier Achsen werden die Bearbeitungsmöglichkeiten stark erhöht. Dies wird in Abb. 18 (b) verdeutlicht. Bei diesem System kann sich der Maschinentisch, auf dem das Bauteil befestigt wird, drehen, sodass die Fräse das Bauteil von allen Seiten unter allen Winkeln bearbeiten kann. (Rattat 2017)

Nach Rattat (2017) liegt die Bearbeitungstoleranz für CNC-Fräsen im Bereich von $\pm 0,01$ mm. Alle Materialien, die beim Schneiden Späne erzeugen, sind für das Verfahren geeignet. Folgend sind einige verwendbare Materialien aufgelistet:

Faserplatten, Multiplexplatten, Brettschichtholz, Massivholz, Polywood², Acryl, Plexiglas, PVC,



(a) dreiachsige Fräsmaschine
 (b) vierachsige Fräsmaschine
 Abb. 18: Schematischer Vergleich zwischen drei- und vierachsigen Fräsmaschinen
 Quelle: Eigene Darstellung

¹abrasiv - "von reibender, schleifender Wirkung und dadurch glättend, reinigend oder abnutzend" oder "durch Reiben, Schleifen bewirkt" (Duden 2018)

²Polywood - ein auf Kunststoff-basiertes Holzimitat (Mair 2017)

Styrodur, Glas, Carbonfaserplatten, Glasfaserplatten, Aramidfaserplatten, Kupferplatten, Dibond, Aluminium, Messing (Rattat 2017)

3.3.2 Laserstrahlschneiden

Im Gegensatz zum bereits vorgestellten Fräsen handelt es sich beim Laserstrahlschneiden um ein thermisches Trennverfahren. Wie in Abb. 19 zu sehen, wird beim Schneiden durch den Energieeintrag des Laserstrahls das Material lokal aufgeschmolzen. Die Schmelze wird während des Schneidvorgangs kontinuierlich aus der Schnittfuge geblasen, sodass es zur Trennung des Materials kommt. Die Funktionsweise des Verfahrens wird später genauer erläutert. Aufgrund des thermischen Energieeintrags handelt es sich beim Laserstrahlschneiden um ein kraftfreies Bearbeitungsverfahren, da keine Druckkraft auf das zuschneidende Material ausgeübt werden muss. (Kaast 2017)

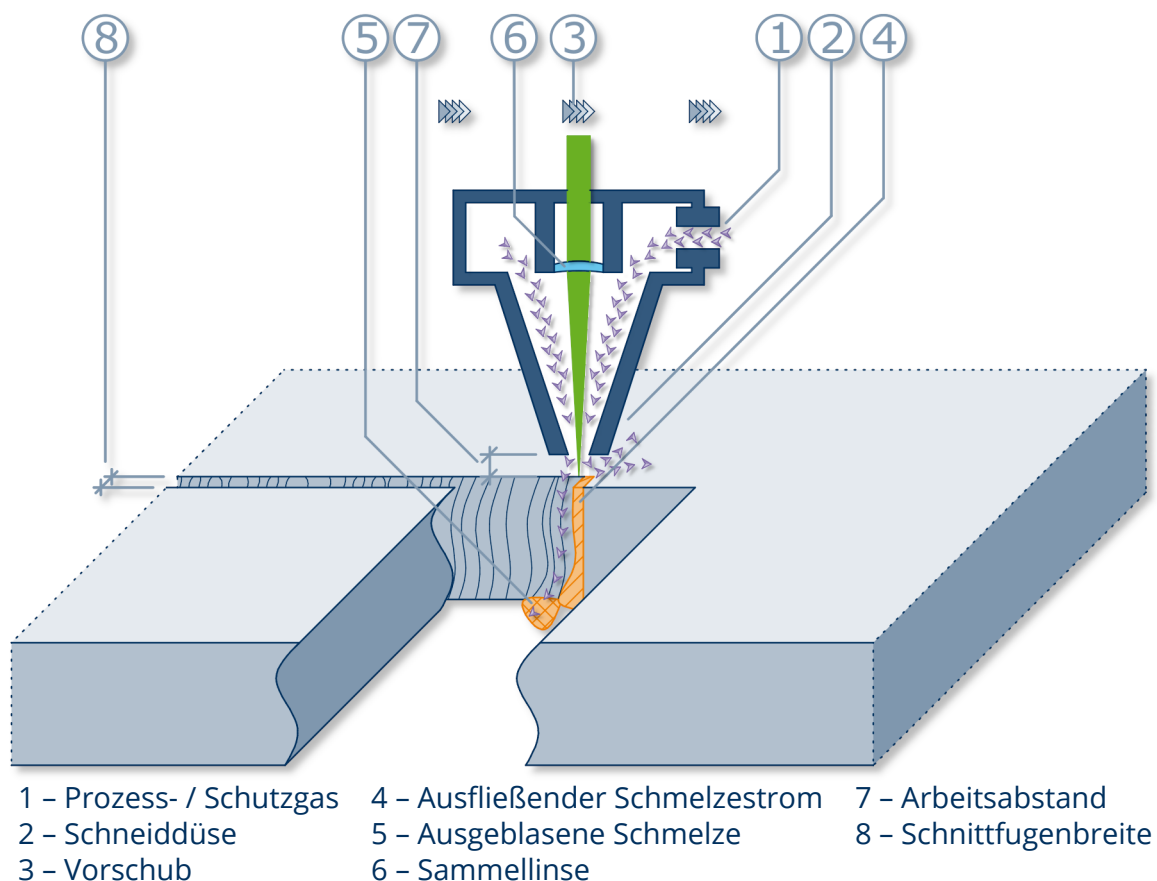


Abb. 19: Konzept des Laserstrahlschneidens

Quelle: In Anlehnung an Kaast (2017)

3.3.2.1 Physikalische Grundlagen von Laserlicht

Laserlicht unterscheidet sich stark von dem Licht einer natürlichen Lichtquelle, wie beispielsweise eine Glühbirne. Wie in Abb. 20 links dargestellt, besteht natürliches Licht immer aus verschiedenen langen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen. Die Erzeugung der Wellen

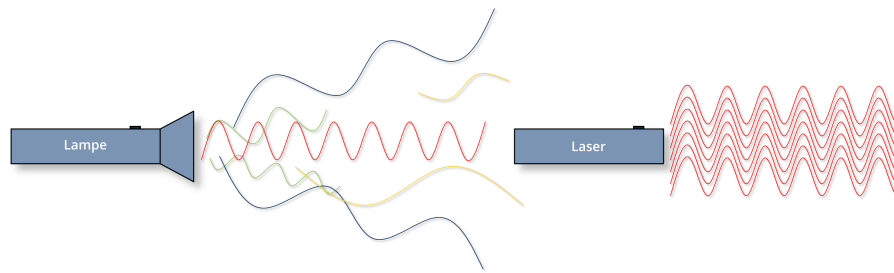


Abb. 20: Schematische Darstellung von natürlichem Licht (links) und Laserstrahlung (rechts)
Quelle: In Anlehnung an Hoffmann (2010)

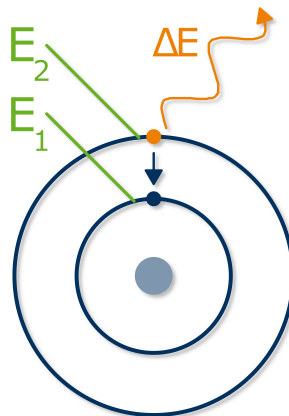


Abb. 21: Das Bohr'sche Atommodell
Quelle: In Anlehnung an Hoffmann (2010)

erfolgt dabei vollkommen unkontrollierbar. Die in Abb. 20 rechts dargestellte Laserstrahlung hingegen weist eine Monochromasie³, eine räumliche und zeitliche Kohärenz⁴, eine hohe Fokussierbarkeit und eine kurze Impulsdauer auf. (Hoffmann 2010)

Das Wort Laser leitet sich von dem englischen Ausdruck "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" ab. Diese Strahlenemission wird dabei über die Anregung eines laseraktiven Materials erzielt, sodass dessen Elektronen von einem hohen Energieniveau in ein niedrigeres übergehen und dabei ein Photon abgeben. In Abb. 21 ist dieses Prinzip am Bohr'schem Atommodell verdeutlicht. Es ist dargestellt, wie ein Photon mit der Energie von

$$\Delta E = h * \nu = h * \frac{c}{\lambda} \quad (3.1)$$

ν – Frequenz

λ – Wellenlänge

h – Plancksches Wirkungsquantum ($6,6256 * 10^{-34} \text{ Js}$)

³Monochromasie - beschreibt, dass nur eine Wellenlänge im Licht enthalten ist (SIGRIST-PHOTOMETER AG o. D.)

⁴räumlich und zeitliche Kohärenz - beschreibt das monochrome Wellen (zeitliche Kohärenz) die räumlich parallel gerichtet (räumliche Kohärenz) sind (Salzmann 2013)

ausgestrahlt wird, wenn ein Elektron vom angeregten Zustand E_2 in den Grundzustand E_1 abfällt. Die hierbei freigesetzte Energie

$$\Delta E = E_2 - E_1 \quad (3.2)$$

$E_1 = \text{Energie des Elektrons im Grundzustand}$

$E_2 = \text{Energie des Elektrons im angeregten Zustand}$

entspricht der Energie des Photons, sodass gilt:

$$h * \nu = E_2 - E_1 \quad (3.3)$$

Um ein Elektron in den angeregten Zustand zu versetzen, wird ein Photon mit der Energie des Zustandsüberganges ΔE benötigt. Die Energie kann dann vom Elektron absorbiert werden. (Hoffmann 2010)

Die Energieabgabe kann über zwei Möglichkeiten erfolgen. Die Erste ist die sogenannte spontane Emission. Hierbei wird ohne einen äußeren Verursacher das Photon ausgestrahlt. Für ein Laserlicht ist diese Art der Energieabgabe allerdings nicht geeignet, da die hierbei freigesetzte Strahlung nicht in der Ausbreitungsrichtung und der Polarisation⁵ übereinstimmt und zudem keine Phasenkorrelation vorliegt. Die zweite Möglichkeit ist die stimulierte Emission. Das Photon wird dabei durch Anregung ausgestrahlt. Zur Anregung wird ein Photon mit der Energie ΔE benötigt. Der Vorteil hierbei ist, dass Ausbreitungsrichtung, Polarisation und Phase des emittierten Photons mit denen des anregenden übereinstimmen. Dadurch verstärken sich die beiden Strahlungen, sodass es zu einer Lichtverstärkung kommt und Laserlicht entsteht. (Hoffmann 2010)

Um eine stimulierte Emission kontrolliert auszuführen, müssen mehr Ionen im angeregten Zustand als im Grundzustand vorliegen. Ist dies der Fall so spricht man von einer Besetzungsinversion. Allerdings befinden sich in der Regel die meisten Ionen aufgrund des thermodynamischen Gleichgewichtes im Grundzustand. Dieser Zustand ist in Abb. 22 links dargestellt. (Hoffmann 2010)

Um die in Abb. 22 rechts dargestellte Besetzungsinversion zu erreichen, muss das obere Laserniveau stärker besetzt werden. Die geschieht über die Zufuhr von Energie, dem sogenannten "Pumpen". Der Energieeintrag erfolgt über Lichteinstrahlung (sogenanntes optisches Pumpen), Wärme, Teilchenzusammenstöße, chemische Reaktionen oder elektrische Prozesse. (Hoffmann 2010, Joachim Herz Stiftung o. D.) Durch spontan emittierte

⁵Polarisation - beschreibt die Schwingung aller Lichtwellen innerhalb einer Ebene (LPS-Lasersysteme 2018)

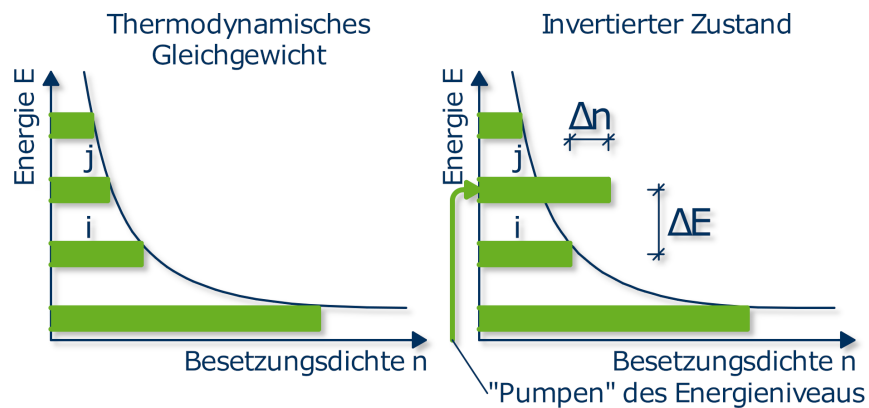
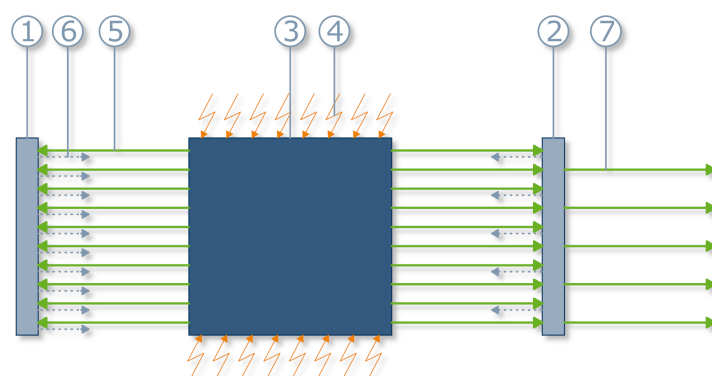


Abb. 22: Vergleich des thermodynamischen Gleichgewichts mit der Besetzungsinversion
Quelle: In Anlehnung an Hoffmann (2010)

Photonen können weitere Photonen mit dem gleichen Energiegehalt und der gleichen Bewegungsrichtung durch stimulierte Emission freigesetzt werden. Da sich diese Photonen, bedingt durch die spontane Emission, zunächst in eine beliebige Richtung bewegen und die Anzahl der Photonen anfangs sehr gering ist, wird ein Resonator benötigt. Wie in Abb. 23 abgebildet, besteht hierfür die einfachste Konstruktion aus einem totalreflektierenden und einem teildurchlässigen Spiegel. Innerhalb dieses Resonators kann das Licht zirkulieren. Das laseraktive Material wird im Resonator positioniert und dort durch eine Energiequelle, hier als optische Pumpe ausgebildet, angeregt. Die freigesetzten Photonen werden wiederholt durch das laseraktive Material geleitet, bis ein intensiver, gerichteter Laserstrahl entsteht. Durch den teildurchlässigen Spiegel kann ein Teil des Strahls den Resonator verlassen, sodass ein gerichteter Laserstrahl mit gleicher Wellenlänge entsteht. Der Reflexionsgrad des teildurchlässigen Spiegels beträgt je nach Laserart 50 - 99 %. Die reflektierte Strahlung wird zur weiteren Verstärkung genutzt. (Kief et al. 2017, Hügel & Graf 2009, Joachim Herz Stiftung o. D.)



- | | | |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 – Totalreflektierender Spiegel | 4 – Anregungsenergie | 7 – Gerichteter Laserstrahl |
| 2 – Teildurchlässiger Spiegel | 5 – Ungerichtete Strahlung | |
| 3 – Laseraktives Material | 6 – Reflektierte Strahlung | |

Abb. 23: Schematische Darstellung eines Resonators
Quelle: In Anlehnung an Hoffmann (2010)

3.3.2.2 Verfahren des Laserstrahlschneidens

Im Allgemeinen unterscheidet man Laser nach dem Aggregatzustand des laseraktiven Mediums. Abb. 24 verdeutlicht die Aufteilung nach Hoffmann (2010). Hierbei ist anzumerken, dass es sich auf der Anwendungsebene (grün) nur um eine kleine Auswahl handelt. Für die Materialbearbeitung sind dabei vor allem die Nd:YAG-Laser, als Festkörperlaser, und die CO₂-Laser, als Gaslaser, relevant (Kief et al. 2017).

Der größte Vorteil des Laserstrahlschneidens ist der konzentrierte Energieeintrag durch den Laser. Durch den geringen Fokussdurchmesser können schmale Schnittfugen und somit sehr präzise Schnitte realisiert werden. Aufgrund des effizienten Wärmeeintrags wird das umgebende Material nur minimal erwärmt und auch hohe Vorschubgeschwindigkeiten können dadurch angewendet werden. Zudem kommt es bei den meisten Materialien nicht zu einer Gratbildung, sodass eine Nachbearbeitung der Werkstücke entfällt. Auch wirtschaftlich gesehen ist das Laserstrahlschneiden sehr attraktiv, da es bereits bei geringen Losgrößen wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Letztendlich stellt auch die kontaktfreie Bearbeitung der Werkstücke einen Vorteil dar, da somit das Werkzeug kaum Verschleiß aufweist. (Kaast 2017, Trumpf 2018)

Im Sinne der DIN 2310-6:2003-06 (2003) ist das Laserstrahlschneiden dem thermischen Abtragen durch Strahl (Licht-, Laser-, Elektronen-, Ionenstrahl) zugeordnet. Ferner werden die drei Unterkategorien Laserschmelz-, -brenn- und -sublimierschneiden unterschieden. Diese Struktur ist auch in Abb. 25 schematisch dargestellt. Eine knappe Übersicht der Verfahren ist in Tab. 2 dargestellt. Die dort vorgestellten Materialien stellen die heutige Standardanwendung der Verfahren da.

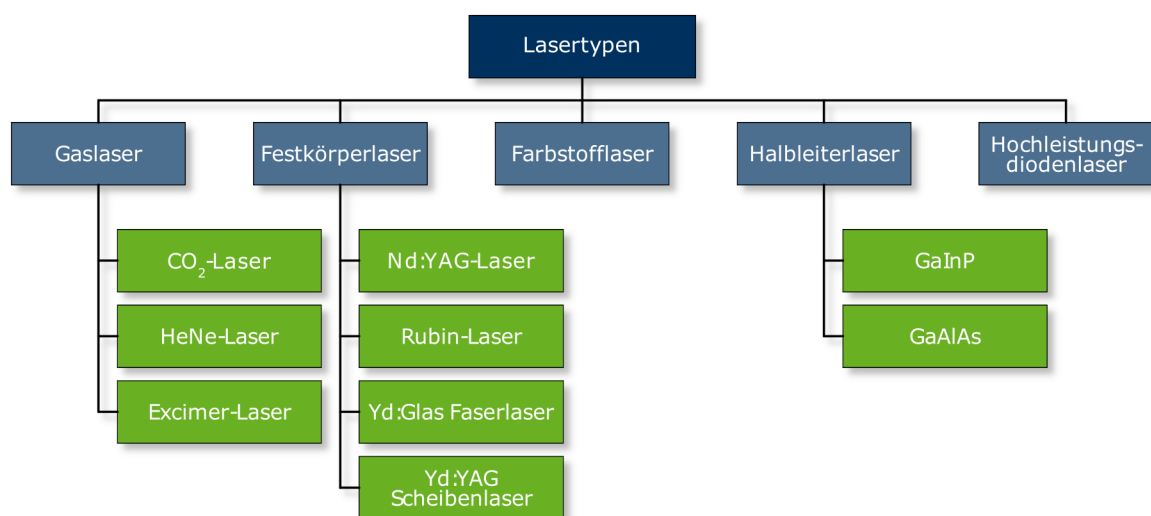


Abb. 24: Einteilung der Lasertypen
Quelle: In Anlehnung an Hoffmann (2010)

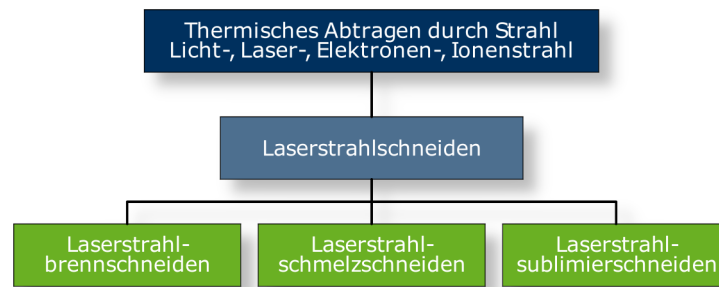


Abb. 25: Struktur des Laserstrahlschneidens
Quelle: In Anlehnung an DIN 2310-6:2003-06 (2003)

Beim Laserschmelzschnneiden wird das Material mit dem Laser aufgeschmolzen und die Schmelze mit Inertgas aus der Fuge abgetragen. Als Inertgas ist dabei zum Beispiel Stickstoff oder Argon verwendbar. Dieses verhindert ein Entzünden des Materials. Damit ist der Energieverbrauch höher als beim Laserbrennschnneiden. Da dieses Verfahren hauptsächlich für höher legierten Stahl und Aluminium zum Einsatz kommt, verhindert das Gas außerdem die Oxidation des Metalls entlang der Schnittkante. Nachteilig ist die bei dicken Blechen und beim Einstechen reduzierte Geschwindigkeit. Einige Laserschmelzschnneider umgehen dies teils durch den Einsatz von Schneidgas während des Einstechvorgangs. (Kaast 2017, Trumpf 2018)

Im Gegensatz zum Laserschmelzschnneiden wird beim Laserbrennschnneiden nicht Inertgas, sondern Schneidgas (Sauerstoff) verwendet. Niedrig legierter Stahl, wie beispielsweise Baustahl, versorgt dadurch beim Erreichen der Zündtemperatur aufgrund einer exothermen Reaktion den Schneidvorgang mit zusätzlicher Energie. Die hierbei freigesetzte Energie kann bis zum Fünffachen der durch den Laser eingebrachten Energie betragen. Zu beiden Verfahren ist zu sagen, dass CO₂-Laser sich besser für das Schneiden von dicken Materialien eignen. (Kaast 2017, Trumpf 2018)

Beim Lasersublimierschnneiden wird das Material nicht durch Gas aus der Fuge ausgeblasen.

Tab. 2: Überblick über die Verfahren des Laserstrahlschneidens

Verfahren	Technologie	Materialien	Materialstärke
Laserschmelzschnneiden	CO ₂ -Laser Festkörperlaser	hoch legierter Stahl und Aluminium	<15 mm
Laserbrennschnneiden	CO ₂ -Laser Festkörperlaser	niedrig legierter Stahl	auch >30 mm
Lasersublimierschnneiden	CO ₂ -Laser Festkörperlaser	Metalle, Keramiken, Diamant Keramiken, Kunststoffe	<1 mm (werk- stoffabhängig)

Quelle: Eigene Darstellung (kaast2017, trumpf2018)

Stattdessen bringt der Laser so viel Energie in den Werkstoff, dass dieser aufgeschmolzen wird und teilweise sublimiert, also vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht. Durch die einhergehende Volumenausdehnung des Gases übt dieses Druck auf die Schmelze aus, sodass diese entgegen der Strahleinfallsrichtung aus der Fuge verdrängt wird. Aufgrund der benötigten Energie für die Sublimation wird eine erhöhte Leistungsdichte bei verringerter Vorschubgeschwindigkeit benötigt. Die Schnitttiefe beträgt nur einige 10 μm im Singlepass-Verfahren. Daher werden Schnitte meist in mehreren Durchläufen, Multipass-Verfahren, durchgeführt. Jedoch sind die Schnittkanten im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren von höherer Qualität. Aufgrund der geringen Schnitttiefe wird dieses Verfahren kaum für die Blechbearbeitung angewendet. Vielmehr fallen diesem Verfahren Aufgaben mit sehr feinen Strukturen zu. So beispielsweise auch das Schneiden von Stents⁶ in der Medizintechnik. Beim Lasersublimierschneiden werden meist Materialien, die bei geringer Energie verdampfen, wie Kunststofffolien und Textilien, und nicht schmelzende Werkstoffe, wie Holz, Pappe und Schaumstoff, verwendet. Im Falle des Stents wird dieser aus Edelstahl oder Nickel-Titan-Legierungen gefertigt. Die Geometrie wird aus einem Rohr (1 bis 5 mm Rohrdurchmesser; 50 bis 600 μm Wandstärke) geschnitten. Die bei der Fertigung erzeugten Schnitte sind schmaler als 20 μm und können mit mehreren mm/s geschnitten werden. (Kaast 2017, Trumpf 2018, Schwab 2017, Weber & Castrucci 2008)

3.3.3 Autogenes Brennschneiden

Autogenes Brennschneiden ist im Sinne der DIN 2310-6:2003-06 (2003) ein thermischer Schneidprozess, bei dem der Schnitt mithilfe einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme und Schneidsauerstoff ausgeführt wird. Das Werkstück wird lokal auf die Zündtemperatur erwärmt. Anschließend wird das Ventil für den Schneidsauerstoffstrahl geöffnet, sodass das Material gezielt verbrennt und aufgrund der stattfindenden Oxidationsreaktion weitere Energie für den Brennvorgang bereitstellt. Diese Wärmeenergie ermöglicht nicht nur örtliche Verflüssigungen, sondern auch die Aufrechterhaltung des Verbrennungsprozesses. Wie in Abb. 26 zu sehen, entsteht dünnflüssiges Oxid, das mit dem Schneidsauerstoffstrahl aus der Schnittfuge ausgetrieben wird oder sich in einer dünnen Schicht auf der Schnittkante ablagert. Der Großteil des Materials ist jedoch verbrannt. (DIN 2310-6:2003-06 2003, Fahrenwaldt & Schuler 2009)

Um autogenes Brennschneiden ausführen zu können, sind an das zu schneidende Material (meist Metalle) einige Anforderungen zu stellen. Die Entzündungstemperatur des Werkstoffs muss unterhalb seines Schmelzpunktes liegen. Ab dieser Entzündungstemperatur muss bei ausreichend Sauerstoff eine Oxidation stattfinden können. Zudem ist es vorteilhaft,

⁶Stent - "ein medizinisches Implantat zum Offenhalten von Gefäßen oder Hohlorganen." (Wikipedia 2018)

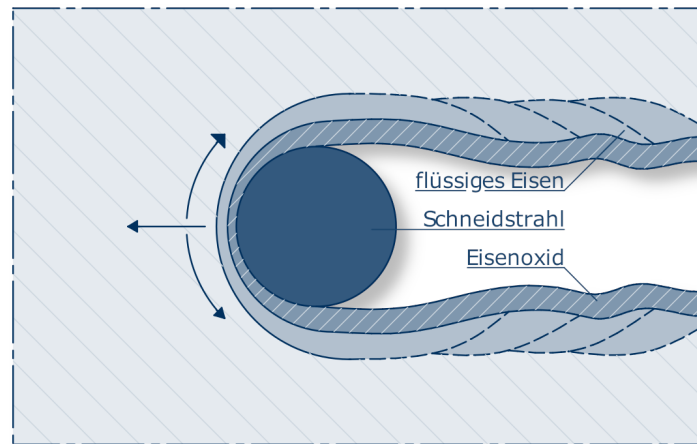


Abb. 26: Metallschmelze beim Brennschneiden
 Quelle: In Anlehnung an Fahrenwaldt & Schuler (2009)

wenn das Metall eine möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist, sodass die thermische Belastung im Werkstück möglichst lokal gehalten werden kann. Die Schmelztemperatur des sich bildenden Metalloxids darf nicht oberhalb des Schmelzpunktes des Werkstoffs liegen. Aber auch an den Schneidsauerstoff ist die Bedingung der besonderen Reinheit gebunden. Der O_2 -Gehalt muss über 99,5 % liegen, um einen Flammenabriss zu vermeiden. Sollte das Material nur bedingt schneidbar sein, so kann auch das Metall-Pulver-Brennschneiden verwendet werden. Dieses wird in dieser Arbeit nicht erläutert, es wird aber auf die Erläuterung des Prozesses in der DIN 2310-6:2003-06 (2003) hingewiesen. (Fahrenwaldt & Schuler 2009, Linde AG 2017)

Die Eignung eines Werkstoffes für dieses Verfahren wird auch als Schweißbarkeit bezeichnet. Sie ist hauptsächlich vom Kohlenstoffgehalt (folgend C-Gehalt) abhängig. Da sich mit höherem C-Gehalt auch die Entzündungstemperatur erhöht, ist ab einem C-Gehalt von rund 1,6 bis 1,8 %-C die Bedingung, dass diese Temperatur unterhalb des Schmelzpunktes liegt, nicht mehr erfüllt. Den Idealfall stellen hingegen reines Eisen und niedriglegierte Stähle dar. Der optimale C-Gehalt liegt im Bereich 0,1 - 0,3 %-C. Ab 0,3 %-C ist aufgrund der erhöhten Rissbildungsgefahr das Vorwärmen (bis ca. 450 °C) bzw. das Nachglühen (bis ca. 150 °C) des Werkstoffes notwendig. Aber nicht nur der Kohlenstoff beeinflusst die Schweißbarkeit, sondern auch weitere Legierungselemente. Über die Berechnung des Kohlenstoffäquivalenten kann die Eignung des Materials jedoch weiterhin abgeschätzt werden (Hoffmann 2019). Beispielhaft ist für diese Berechnung an dieser Stelle die vom International Institute of Welding (I.I.W.) empfohlene Formel für Stahl mit mehr als 1,8 %-C gegeben (Knauf Interfer SE 2018):

$$CEV(\%) = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \quad (3.4)$$

Tab. 3: Einfluss der Legierungselemente auf das Verhalten der Stähle beim Brennschneiden (nach Rellensmann)

Legierungselement		Obere Grenze des Anteils [%]	Brennschneidgeeignet
Kohlenstoff	C	0,25	ohne Vorwärmung
		1,6	mit Vorwärmung
Silizium	Si	2,5	bei max. 0,2 %-C
Mangan	Mn	13,0	und 1,3 %-C
		1,3	bei reinen Manganstählen
Chrom	Cr	1,5	ohne Nickel-Gehalte
Wolfram	W	10,0	bei max. 0,5 %-Cr, 0,2 %-Ni und 0,8 %-C
Nickel	Ni	7,0	
		35,0	wenn < 0,3 %-C
Molybdän	Mo	0,8	
Kupfer	Cu	0,7	

Quelle: Fahrenwaldt & Schuler (2009)

Die meisten Legierungselemente haben einen negativen Einfluss auf die Schweißbarkeit. So haben nach Fahrenwaldt & Schuler (2009) Chrom, Nickel und Molybdän einen negativen Effekt, wohingegen sich Mangan positiv auswirkt. Ein Überblick über den Einfluss von Legierungselementen ist in Tab. 3 dargestellt. Die beim autogenen Brennschneiden verwendeten Gase sind zum einen für das Schneidgas Sauerstoff mit > 99,5 %-O₂ und zum anderen für das Brenngas Acetylen, Propan, Erdgas oder Wasserstoff. Das Auswahlkriterium für das Brenngas ist die Flammleistung. Der Heizwert eines Gases spielt eine untergeordnete Rolle, da nicht der Wärmeinhalt des Gases, sondern der Wärmeübergang auf das Werkstück maßgebend ist. Allein unter diesem Gesichtspunkt ist Acetylen zu wählen, da somit die Aufheizzeit des Werkstoffes halbiert, wenn nicht sogar gedrittelt, werden kann. Jedoch ist der Acetylenarbeitsdruck (i. d. R. um die 0,5 bar) vergleichsweise gering, sodass bei Verwendung von anderen Gasen der Aspekt der geringen Aufheizgeschwindigkeit durch höhere Drücke größtenteils kompensiert werden kann. Zum Vergleich, der Schneidsauerstoffgasdruck beträgt i. d. R. um die 3 bis 3,5 bar. Nachteilig an der Verwendung von Acetylen sind vor allem die hohen Kosten und die geringere Arbeitssicherheit, da Acetylen sehr reaktionsfreudig ist. (Fahrenwaldt & Schuler 2009, Hoffmann 2019)

Im Gegensatz zu den anderen in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren stellt die Automatisierung des autogenen Brennschneidens einige Herausforderungen dar, sodass die Anwesenheit von Bedienpersonal notwendig ist. Diese Problematik soll am Beispiel des Locheinstechens verdeutlicht werden, was in Abb. 27 verdeutlicht ist. Nach dem Vorwärmen

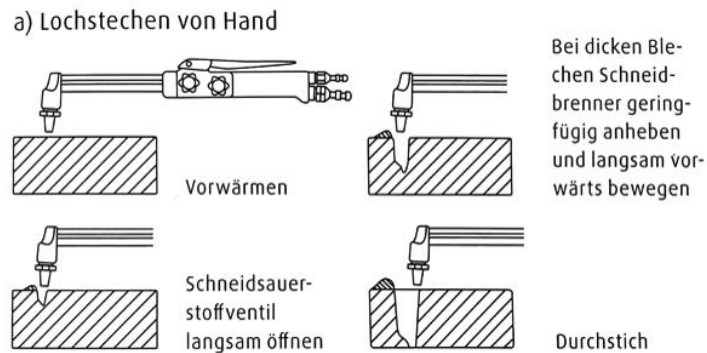


Abb. 27: Lochstechen beim Autogenbrennschneiden (hier: handgeführtes Gerät)
 Quelle: [online] <https://www.schweisshelden.de/fachwissen/schneiden-trennen/brennschneiden>
 [Zugriff am 20.01.2019]

des Werkstoffes auf die Zündtemperatur wird der Schneidsauerstoffstrahl geöffnet, sodass die Verbrennung schlagartig beginnt. Während des Lochstechvorgangs spritzt Schlacke aus dem Loch. Diese landet am Lochrand und erhärtet dort wieder, sodass sich dort eine Materialanhäufung bildet. Je nach Werkstückdicke ist die Menge nicht gerade unerheblich, sodass der Haufen ein Hindernis beim weiteren Konturschneiden darstellt. Dies kann beim Überfahren zu einem Flammenabriss führen und somit den Schneidprozess gänzlich unterbrechen. Somit muss der Maschinenbediener während des Lochstechvorgangs die Schlacke manuell mit einem Schaber entfernen. Auch der Abstand der Düse zur Werkstückoberkante und die Geschwindigkeit des Schneidvorgangs werden vom Bediener überwacht und angepasst. Die Problematik ist so schwerwiegend, dass sich Hersteller mit alternativen Locheinstechverfahren wie dem Brennbohren nach DIN 2310-6:2003-06 (2003) oder einem deutlich langsameren mechanischen Vorbohren aushelfen und dabei weitere Probleme wie etwa zusätzliches Umladen von Material oder Blockaden der Schneidanlagen aufgrund von Bohrvorgängen in Kauf nehmen. (Hoffmann 2019)

Weitere Probleme zeigen sich in der richtigen Wahl der Prozessparameter. So sind die thermische Materialausdehnung, optimale Teilabstände auf dem Blech (v. a. bei dicken Blechen), Ein- und Ausstech-Strategien, korrekt prognostizierte Schlackehaufen, Schneidgeschwindigkeit und Brennerabstand (nur mit teuren Messsystemen erfassbar) zu berücksichtigen. Da beim autogenen Brennschneiden die thermische Belastung größer ausfällt als bei den anderen vorgestellten Trennverfahren und oft sehr dicke (300 - 1.500 mm) mit einwandfreier Schnittqualität und -oberflächengüte bei geringem thermischen Verzug und geringer Materialaufhärtung unter Beachtung der Maßhaltigkeit der zu fertigenden Werkstücke gefordert werden, wird sehr viel Expertenwissen für die Parameterwahl benötigt (Hoffmann 2019). Dieses, so Hoffmann (2019), könne nicht über normale Rechenprogramme implementiert werden, sondern erfordere die Verwendung einer künstlichen

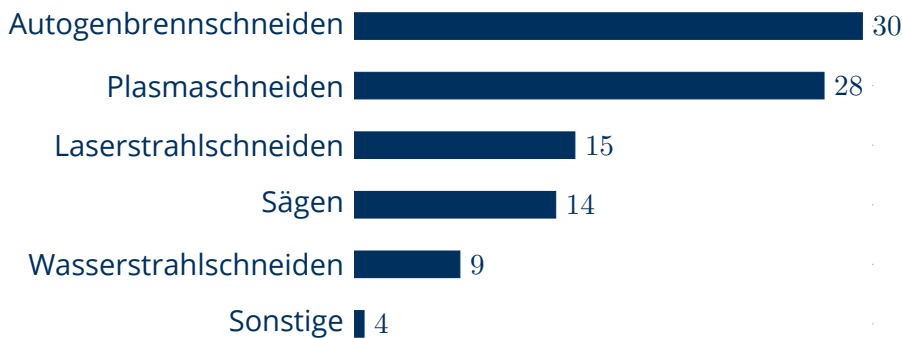


Abb. 28: Marktanalyse am Deutschen Schneidkongress 2016 - Verteilung der Schneidprozesse in %

Quelle: Hoffmann (2019)

Intelligenz.

Es ist jedoch anzumerken, dass das autogene Brennschneiden seine Daseinsberechtigung hat. Das Verfahren ist vor allem in Deutschland sehr beliebt, sodass 2015 in Deutschland europaweit die meisten Autogenbrennschneidanlagen hergestellt wurden. Dies begründet sich vor allem darin, dass bei dicken Werkstücken (ab 40 / 80 mm) das Verfahren gut einsetzbar ist und ab 250 mm zurzeit auf dem Markt alternativlos etabliert ist (Hoffmann 2019). Nach einer Marktanalyse auf dem deutschen Schneidkongress 2016, dargestellt in Abb. 28 zeigt sich, dass das autogene Brennschneiden mit rund 30 % Marktanteil sogar der Spitzenreiter ist. Auf Platz zwei folgt mit 28 % Marktanteil das Plasmaschneiden, das im nächsten Kapitel behandelt wird.

3.3.4 Plasmaschneiden

Auch das Plasmaschneiden gehört im Sinne der DIN 2310-6:2003-06 (2003) zu den thermischen Schneidprozessen, ist jedoch genauer dem thermischen Abtragen durch elektrische

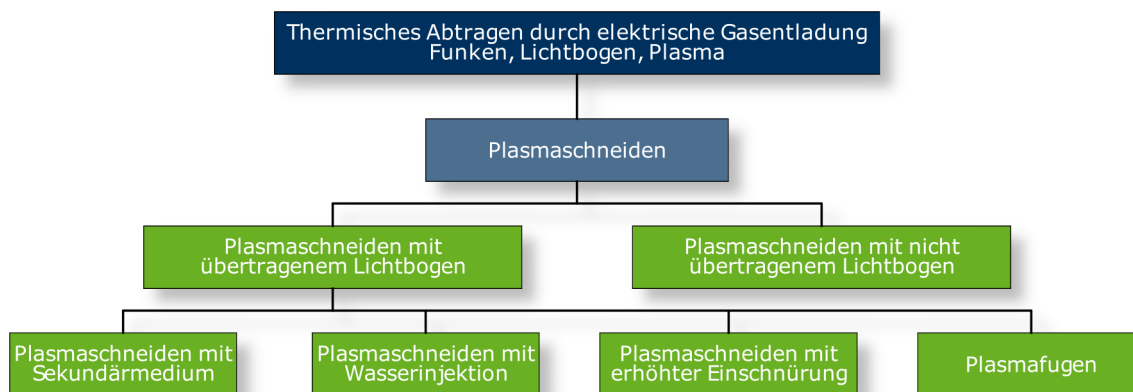


Abb. 29: Struktur des Plasmaschneidens

Quelle: In Anlehnung an DIN 2310-6:2003-06 (2003)

Gasentladung (Funken, Lichtbogen, Plasma) zugeordnet. Die gesamte Struktur des Plasmaschneidens ist in Abb. 29 dargestellt. Die Ausbildung der Schnittfuge wird mithilfe eines Lichtbogens (auch Plasmastrahl genannt) ausgeführt. Dieser wird mit einer Düse eingeschnürt, um die zum Schneiden erforderliche Leistungsdichte zu erzielen. Zwischen einer Elektrode (Kathode) und dem Werkstück bzw. der Düse kann der Lichtbogen brennen. Brennt er zwischen Elektrode und Werkstück spricht man von einem übertragenden Bogen, andernfalls vom nicht übertragenden Bogen. Als Schneidgase kommen bei diesem Verfahren entweder Inert- oder Prozessgase zum Einsatz. (DIN 2310-6:2003-06 2003, Fahrenwaldt & Schuler 2009)

Plasma ist der vierte Aggregatzustand der Materie, in diesem Fall das Schneidgas, annehmen kann. Es setzt sich aus Elektronen, Ionen, Molekülen und Atomen zusammen, die sich aufgrund von hoher Temperatur in sehr starker und ungeordneter Bewegung befinden. Aus dem gleichen Grund werden die Moleküle teilweise dissoziiert und die Atome teilweise ionisiert und nehmen somit ein Teil der Wärmeenergie auf. Das Schneidgas erreicht einen elektrisch leitfähigen Zustand, was auch als Plasmazustand bezeichnet wird. Sobald diese Teilchen auf die kühlere Werkstoffoberfläche gelangen, setzen sie sich, unter Abgabe der zuvor gespeicherten Energie, wieder zusammen. Die freigesetzte Energie wird dabei an das Werkstück abgegeben. Durch diese hohe Energieaufnahme schmilzt der Werkstoff und verdampft teilweise. Aufgrund der hohen kinetischen Energie innerhalb des Plasmabogens wird das Material aus der entstehenden Schnittfuge ausgetrieben. (Fahrenwaldt & Schuler 2009, DIN 2310-6:2003-06 2003)

Beim Plasmaschneiden unterscheidet man weitere Unterverfahren. Zum einen gibt es das Plasmaschneiden mit nicht übertragenem Lichtbogen. Der Strom fließt hierbei zwischen der Elektrode als Kathode und einer Anode am Düsenkopf. Mit dem Schneidgas wird der Plasmabogen aus der Düse herausgedrückt, sodass dieser auf das Werkstück wirken kann. Dieses Verfahren wird vor allem bei nicht leitenden Metallen verwendet, da ansonsten die Plasmaschneidverfahren mit übertragenem Lichtbogen Anwendung finden. Hierzu zählen mehrere Verfahren. Das Plasmaschneiden mit Sekundärmedium, das Plasmaschneiden mit Wasserinjektion, das Plasmaschneiden mit erhöhter Einschnürung und das Plasmafugen. Bei Letzterem wird wie in Abb. 30 dargestellt, mit einem schräg gestellten Plasmastrahl die Oberfläche eines Werkstückes abgetragen. Der Winkel zwischen Werkstück und Plasmastrahl beträgt dabei zwischen 30 und 40 °. (DIN 2310-6:2003-06 2003)

Die anderen drei Schneidverfahren unterscheiden sich vom Plasmafugen, da diese das Werkstück durchdringen und eine Schnittfuge ausbilden. Alle drei Prozesse unterscheiden sich lediglich in der Art und Weise, wie der Plasmastrahl weiter eingeschnürt wird. Beim

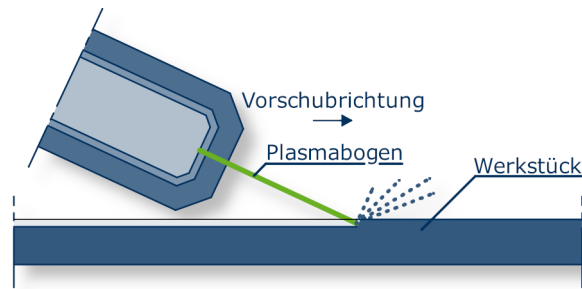


Abb. 30: Konzept des Plasmafugens
Quelle: In Anlehnung an DIN 2310-6:2003-06 (2003)

Plasmaschneiden mit Sekundärmedium wird in der Düse ein Sekundärmedium (auch als Wirbelgas bezeichnet) eingeblasen, das als Gasmantel den Plasmalichtbogen umströmt, diesen einschnürt und eine eigene, definierte Atmosphäre für den Plasmastrahl erzeugt. Beim Plasmaschneiden mit Wasserinjektion, das in Abb. 31 dargestellt ist, übernimmt Wasser die Aufgabe der Einschnürung. Dies hat den Vorteil, dass das Düsensystem und das Schneidteil durch das Wasser gekühlt werden. Spezielle Düsen übernehmen das Einschnüren beim Plasmaschneiden mit erhöhter Einschnürung. (DIN 2310-6:2003-06 2003)

Das Einschnüren des Plasmastrahls ist von essenzieller Bedeutung, da mit zunehmender Einschnürung die Leistungsdichte, und somit auch die Temperatur, zunimmt. Die Folge sind verbesserte Schnittqualität und erhöhte Schneidleistung. Fahrenwaldt & Schuler (2009) beschreibt das Feinstrahl-Plasmaschneiden, das aufgrund einer extremen Einschnürung des Plasmastrahls eine bis zu dreifache Leistungsdichte (bis zu 9.300 A/cm^2) erzielen kann. Somit wird das schlackenfreie Schneiden von un- und niedriglegierten Stählen ermöglicht. Die Schnitte sind dabei von sehr guter Qualität und können mit hoher Schneidgeschwindigkeit ausgeführt werden. Jedoch verringert sich auch die schneidbare Materialdicke auf 10 mm für Stahlbleche und auf 8 mm für Aluminium.

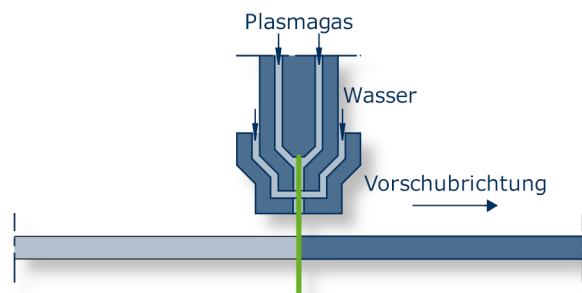


Abb. 31: Konzept des Plasmaschneidens mit Wasserinjektion
Quelle: In Anlehnung an DIN 2310-6:2003-06 (2003)

Das Plasmaschneiden wurde hauptsächlich für die Metalle entwickelt, die sich nur schlecht für das autogene Brennschneiden eignen. So eignet sich das Plasmaschneiden sehr gut für metallische Werkstoffe, wie etwa Aluminium, Kupfer und deren Legierungen, hochlegierte Stähle oder auch Hartmetall. Die maximal schneidbaren Werkstückdicken liegen bei rund 180 mm. Es ist zu beachten, dass die Schnittfugen breiter als beim autogenen Brennschneiden oder dem Laserstrahlschneiden ausfallen. Zudem fallen die Schnittkanten nicht parallel, sondern eher V-förmig aus. Der Winkel zur Vertikalen beträgt hierbei rund 2° . (Fahrenwaldt & Schuler 2009)

Das Plasmaschneiden stellt das einzige thermische Trennverfahren dar, um hochlegierte Stähle und Aluminium auch im mittleren bis größeren Dickenbereich gut zu schneiden. Auch für das Schneiden von dünnen Blechen aus Baustahl ist es hervorragend geeignet. Feste Baustähle können hierbei mit geringer Wärmebeeinflussung geschnitten werden. Zudem kann beim Plasmaschneiden eine höhere Schneidgeschwindigkeit als beim autogenen Brennschneiden verwendet werden. Auch die Schnittflächen benötigen nach dem Schneidvorgang keine weitere Nachbehandlung. (Fahrenwaldt & Schuler 2009)

Bei den verwendeten Schneidgasen erfolgt eine Unterscheidung in Inert- und Prozessgas. Unter Verwendung von inerten Gasen kann keine Oxidation des Werkstoffes stattfinden, sodass der Prozess rein physikalisch stattfindet, da das Material aufgeschmolzen und ausgetrieben wird. Hierfür kommen Argon, Wasserstoff, Stickstoff und deren Gemische zum Einsatz. Werden Gase verwendet, die die Oxidation des Werkstoffes zulassen, wie etwa reiner Sauerstoff oder ölfreie, trockene Druckluft, kann ein Teil des Materials in der Schnittfuge verbrennen. Somit findet der Prozess zusätzlich chemisch statt. Durch die Oxidation des Werkstoffes wird in einer exothermen Reaktion weitere Energie freigesetzt, die den Schneidprozess unterstützt. So wird zum einen die Schneidleistung erhöht, aber auch die bei Neigung zur Bartbildung wird bei einigen Stählen reduziert. Da das Verfahren jedoch spezielle Elektroden, beispielsweise aus Zirkonium oder Hafnium benötigt, ist der Schneidstrom auf 360 A reduziert. Letztere Variante wird als Plasmaschneiden mit "partieller Oxidation" bezeichnet. Die endgültige Wahl des Schneidgases hängt vom zu schneidenden Material ab. Für jedes einzelne Gas werden eigene Verschleißteile in den Brenner eingesetzt um eine entsprechende Schnittqualität, eine hohe Schnittleistung und eine lange Lebensdauer der Verschleißteile zu garantieren. Da die Auswahl und Kombination des richtigen Schneidgases relativ umfangreich ist, ist in Tab. 4 eine Übersicht nach Simler gegeben. (Fahrenwaldt & Schuler 2009, DIN 2310-6:2003-06 2003)

Plasmaschneiden hat jedoch einige negative Umweltauswirkungen. Es ist mit relativ hohen Lärmemissionen zu rechnen. Zudem erzeugt der Prozess Schadstoffemissionen in Form von

Tab. 4: Gaskombinationen beim Plasmaschneiden (nach Simler)

Werkstoff	Plasmagas	Wirbelgas	Bemerkung
Baustahl	Luft	Luft	Aufnitrierung der Schnittflächen möglich
	Sauerstoff	Luft oder Sauerstoff	Keine Aufnitrierung der Schnittflächen, weniger Bartanhang als bei Luft, Bartanhang leicht entfernbar
	Sauerstoff	Sauerstoff oder Sauerstoff/ Stickstoff	Laserähnliche Qualität im Dünnblechbereich
Hochlegierter Stahl	Luft	Luft	Rauhe und oxidierte Schnittflächen, wenig Bartanhang
	Argon/ Wasserstoff	Stickstoff	Glatte und blanke Schnittflächen, Bartanhang bei kleineren Materialdicken
	Argon/ Wasserstoff/ Stickstoff	Stickstoff	Glatte und blanke Schnittflächen, durch Stickstoff weniger oder kein Bartanhang
	Stickstoff	Stickstoff/ Wasserstoff	Für den Dünnblechbereich ohne Bart, metallisch blank
Aluminium	Luft	Luft	Rauhe Schnittflächen
	Argon/ Wasserstoff	Luft oder Stickstoff	Glattere Schnittflächen als bei Luft, nahezu senkrechte Schnittflächen
	Luft	Stickstoff/ Wasserstoff	Senkrechte Schnittflächen im dünneren Blechbereich

Quelle: Fahrenwaldt & Schuler (2009)

Rauch und Stäuben und setzt eine intensive UV-Strahlung frei. Aus diesen Gründen werden nasse Plasmaschneidverfahren bevorzugt. Dies bedeutet, dass Wasser zum Umweltschutz eingesetzt wird. In der Praxis wird das als Plasmaschneiden mit Wassermantel oder als Plasmaschneiden im Wassertisch umgesetzt. So werden sowohl die verwendeten Inert- und Prozessgase als auch entstehende Gase im Wasser gelöst. Ausgetriebenes Material kann sich kugelförmig am Beckenboden sammeln. Die Umwelt kann so erfolgreich vor der hohen Lärm- und UV-Immission geschützt werden. Nebenbei haben nasse Verfahren zwei weitere Vorteile. Zum einen wird das zu bearbeitende Werkstück effektiv gekühlt, sodass thermischer Verzug minimiert wird. Andererseits kann vor allem bei reaktionsfreudigen Cr-Ni-Stählen die Oxidationsreaktion unterbunden werden. Der große Nachteil hierbei ist der dabei anfallende Schlamm, der als Sondermüll behandelt und entsorgt werden muss. (Fahrenwaldt & Schuler 2009, DIN 2310-6:2003-06 2003)

3.3.5 Wasserstrahlschneiden

Beim Wasserstrahlschneiden wird ein dünner Wasserstrahl mit einem Druck von 100 - 400 MPa erzeugt. Hierbei wird das Wasser auf die dreifache Schallgeschwindigkeit (ca. 1.000 m/s) beschleunigt und aus einer Saphir-, Rubin- oder Diamantdüse gepresst. Weiche

Materialien, wie Gummi, Leder, Holzpapier, können mit reinem Wasser geschnitten werden. Durch Erosion trägt das Wasser das Material aus der Schnittfuge ab. Bei harten Materialien, wie Metalle und Metalllegierungen, wie rostfreier Stahl oder Titan, muss das Wasser mit einem feinkörnigen Abriebmittel versetzt werden. Dieses Betriebsmittel verstärkt die Erosionswirkung auf ein Hundertfaches. Da das Wasser kaum eine Schneidwirkung aufweist, dient es nur als Trägermaterial. Wie in Abb. 32 dargestellt, wird das Wasser über eine Dosierkammer mit Abriebmaterial versetzt. Die Partikel werden durch das Wasser beschleunigt, sodass ein kombinierter Strahl aus Wasser und Abrieb die Düse verlässt. Dieser Strahl ist in der Lage Materialien bis zur Härte von Keramiken (Al_2O_3) zu schneiden, sodass die meisten technologisch relevanten Materialien verwendbar sind. (Ferenc 2007)

Somit stellt das Wasserstrahlschneiden eine alternative Methode zu den thermischen Trennverfahren dar. Die Bearbeitung erfolgt wie bei den thermischen Verfahren vorwiegend zweidimensional. In einigen Punkten ist das Wasserstrahlschneiden sogar überlegen. Es können alle metallischen und nichtmetallischen Materialien bis zu einer gewissen Härte verarbeitet werden. Das Werkstück wird nicht erhitzt, sodass brennbare und spröde Materialien, wie Glas, Keramik und sogar Sprengstoff, geschnitten werden können. Zudem erhält das Bauteil dadurch keinerlei Eigenspannungen und Verformungen nach dem Schneiden. Das Wasserstrahlschneiden ist umweltverträglich, da im Gegensatz zu den thermischen Verfahren keinerlei toxische Gase oder Stäube entstehen. (Ferenc 2007)

Nachteilig ist die geringere Effizienz beim Schneiden von Nichtmetallen als bei thermischen Verfahren. Auch stellt das Sauber-, Weichhalten und die Entsorgung des Schneidwassers

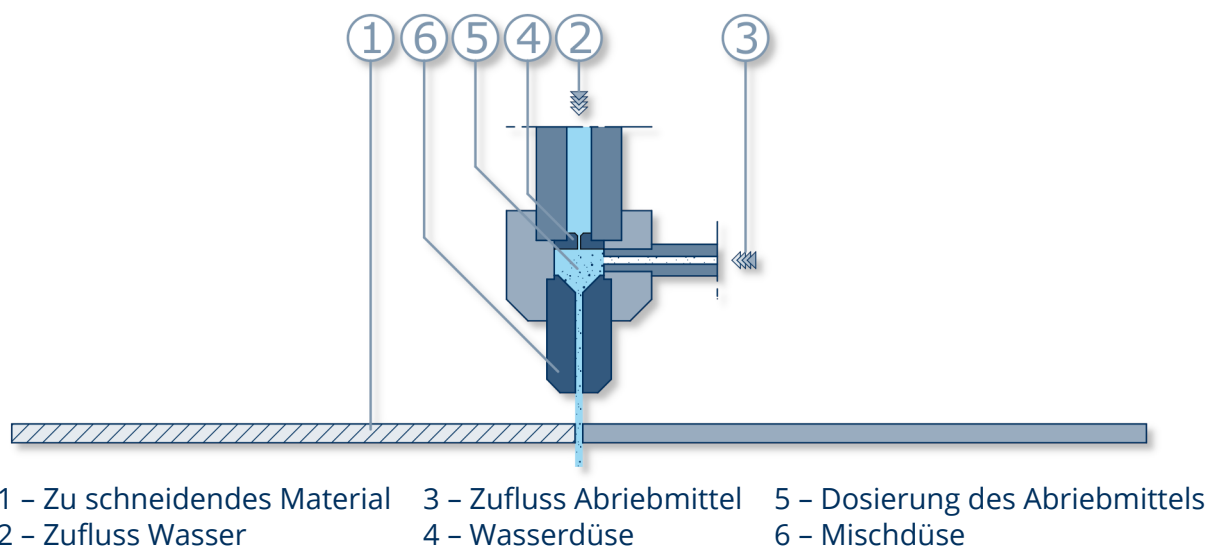


Abb. 32: Konzept des Wasserstrahlschneidens
Quelle: In Anlehnung an Ferenc (2007)

eine gewisse Herausforderung dar. Das mit Abriebmittel und Partikeln des geschnittenen Materials versetzte Schneidwasser ist jedoch nicht umweltschädlich. Ein weiterer wichtiger Negativpunkt beim Wasserstrahlschneiden ist die hohe Lärmemission. (Ferenc 2007)

Zum Ende dieses Kapitels wird in Tab. 5 ein Überblick über die Vor- und Nachteile der thermischen Trennverfahren und des Wasserstrahlschneidens gegeben.

Tab. 5: Vergleich von thermischen Trennverfahren und dem Wasserstrahlschneiden

Charakteristik	Autogenbrennschneiden	Plasmaschneiden	Laserschneiden	Wasserstrahlschneiden
Material	nur niedrig und unlegiert	alle Metalle und selten Nichtmetalle	Alle Metalle und Nichtmetalle außer spröde oder brennbar	Alle Metalle und Nichtmetalle außer wenn diese zu hart
Dicke	3 - 2.000 mm	<(50 - 100 mm) ^a	<(20 - 30 mm) ^a	<250 mm ^a
Schnittbreite	2 - 6 mm ^b	3 - 8 mm ^b	>2 mm ^b	0.4 - 3 mm ^b
Möglichkeiten der Lochausbildung	als Hilfsfunktion, schlechte Lochqualität	als Hilfsfunktion, schlechte Lochqualität	als Hilfsfunktion	als Hilfsfunktion, gute Lochqualität, $\varnothing_{\min} = 1,5 \text{ mm}$
Oberflächenglätte	gering	gering	sehr hoch	hoch
Oxidation der Schnittkanten	hoch, in Praxis nicht relevant	tritt bei Verwendung von Luft und Sauerstoff auf	nur bei Verwendung von Sauerstoff	nicht vorhanden
Verformung	am höchsten	geringer als Autogenbrennen	sehr gering, vernachlässigbar	nicht vorhanden
thermisch-belasteter Bereich	am größten	geringer als Autogenbrennen	sehr gering, vernachlässigbar	nicht vorhanden
Restspannung	hoch	gering	vernachlässigbar klein	nicht vorhanden
Schnittgeschwindigkeit	gering bei dünnen, hoch bei dicken Material	hoch bei dünnen, geringer bei dicken Materialien	sehr hoch bei dünnen, geringer bei dicken Materialien	hoch bei weichen und dünnen Materialien (langsamer als Laser)
Investitionskosten	sehr gering	gering	sehr hoch	hoch
Betriebskosten	gering (v. a. bei dicken Material)	geringer als Autogenbrennen, bei vergleichbaren Dicken	gering bei dünnem Material, erhebliche Steigerung mit der Dicke	höher als Laser bei vergleichbaren Dicken
Kosten der Betriebsmittel	hoch mit Acetylen, gering mit Propan	gering mit Luft, hoch mit Argon	hoch (besonders mit Argon), geringer mit Sauer- und Stickstoff	hoch, hauptsächlich für Abriebmittel und Düsen
Wartungskosten	gering	gering	hoch	hoch
Einfluss auf die Umwelt	minimal, fordert generelle Belüftung	ggf. toxische Verbindungen (Nitride, Oxidstaub)	minimal, fordert generelle Belüftung	nicht vorhanden
Lärmemission	gering, keine Vorsorgemaßnahmen	hoch, daher Unterserschneiden	praktisch vernachlässigbar	hoch, daher Unterserschneiden

^a abhängig von Material und Schneidleistung^b abhängig von Materialdicke

Quelle: Ferenc (2007)

3.3.6 CNC-Steuerung

Im folgenden Kapitel soll die Steuerung von CNC-Maschinen genauer erläutert werden.

3.3.6.1 Praxisrelevante CNC-Programmierung

Die Umsetzung in der Praxis findet entweder im Büro oder innerhalb der Werkstatt statt. In beiden Fällen unterstützen unterschiedlichste Programmier-Hilfsmittel beim Erzeugen der Fertigungsanweisungen. Somit erfolgt die Programmierung auf einer benutzerfreundlichen Umgebung, beispielsweise in CAD/CAM-Systemen, werkstatorientierte Programmierung (WOP) oder Teach-In-Funktionen. (Kief et al. 2017)

WOP bezeichnet eine grafisch animierte und somit leicht verständliche Programmierumgebung, sodass die Generierung des Programmcodes halb automatisiert erzeugt wird. Dies reduziert die Komplexität des Programmierens enorm. Kenntnisse in der eigentlichen Programmiersprache, wie sie in Kapitel 3.3.6.2 vorgestellt wird, sind daher nicht notwendig. (Kief et al. 2017)

Beim Teach-In / Playback-Verfahren werden vom Maschinenbediener zunächst sämtliche Positionen des zu fertigenden Werkstückes manuell angefahren. Es können entweder nur gewählte Einzelpunkte abgespeichert werden, sodass die Maschine zwischen diesen Positionen selbstständig einen Pfad wählt, oder der gesamte vom Bediener eingegebene Bewegungsablauf kann aufgezeichnet werden. (Kief et al. 2017)

CAD/CAM-Systeme kommen vor allem für sehr komplexe dreidimensionale Fertigungsaufgaben zum Einsatz. Computer Aided Drawing (CAD) beschreibt das computergestützte Zeichnen bzw. Entwerfen (Computer Aided Design). Bei Computer Aided Manufacturing (CAM)-Systemen hingegen werden aus den geometrischen Eingabedaten des CAD Programms die Fertigteilgeometrie, sowie sämtliche Schnittpunkte, Übergänge, Aufmaße, Fasen und Rundungen generiert. Sobald diese generiert wurden, kann von CAM-Systemen der Bearbeitungsablauf erstellt werden. Dieser beinhaltet z. B. die Schnittaufteilung, Werkzeugauswahl, Vorschubgeschwindigkeiten und Korrekturaufrufe. (Kief et al. 2017)

Bei allen computergestützten Programmiersystemen wird nicht die Werkzeugbewegung, sondern vielmehr die Geometrie des Werkstückes programmiert. Die Bewegungsabläufe werden dann aus diesen Informationen impliziert (Kief et al. 2017). Folgend wird die praxisnahe Betrachtung zugunsten der zugrunde liegenden Methodiken in den Hintergrund gestellt.

3.3.6.2 CNC-Programmierung nach DIN 66025

Um den für CNC-Maschinen genutzten Aufbau von Steuerprogrammen zu vereinheitlichen, ist dieser in der DIN 66025-1:1983-01 (1983) geregelt. International ist diese DIN als ISO 6983-1:2009 umgesetzt. Der Code, der in dieser DIN beschrieben wird, wird auch häufig als NC-Code (Kief et al. 2017), G-Code oder DIN/ISO-Programmierung (Saenger 2015) bezeichnet.

Wie in der DIN 66025-1:1983-01 (1983) beschrieben, besteht ein NC-Code grundsätzlich aus dem Programmstart, einer Folge von Sätzen und einem Programmende. Der Programmstart wird über das Zeichen "Programmstart" ("%") definiert. Sämtliche Zeichen vor diesem Zeichen werden nicht mit kompiliert und somit nicht ausgeführt. Direkt nach dem Zeichen "Programmstart" kann der Name des Programms definiert werden. Dieser kann aus einer beliebigen Zeichenkette bestehen und wird bei einigen CNC-Maschinen beim Ausführen des Programms auf einem Display angezeigt. Nach dem Titel kann optional eine Anmerkung geschrieben werden. Diese ist zwischen das Zeichen "Anmerkungsbeginn" "(" und dem Zeichen "Anmerkungsende" ")" zu schreiben. Anschließend kann mit dem ersten Satz begonnen werden. Dieser Programmstart ist im Folgenden dargestellt:

Quelltext 1: Programmstart

```
1  % Schneidprogramm A (Programmname: "Schneidprogramm A")
2  ... (Ab hier kann der erste Satz definiert werden)
```

Im zweiten Teil, den Sätzen, können die Programmanweisungen definiert werden. Je Programmanweisung ist ein Satz notwendig. Ein Satz wiederum besteht aus mehreren Wörtern und dem Zeichen "Satzende" ("LF"/"NL"). Die Reihenfolge der Wörter innerhalb eines Satzes ist wie folgt vorgeschrieben:

- a **N-Wort** - Wort für Satznummer
- b **G-Wort** - Wort für Wegbedingung
- c **X-, Y-, Z-, U-, V-, W-, P-, Q-, R-, A-, B-, C-Wort** - Wörter für Koordinaten
- d **I-, J-, K-Wort** - Wörter für Interpolationsparameter bzw. Parameter für Gewindesteigung
 - Diese Wörter beziehen sich auf eine Gruppe von Wörtern. Das I-, J-, K-Wort wird dann direkt hinter der betreffenden Gruppe geschrieben.
- e **F-, E-Wort** - Wort für Vorschub

- Diese Wörter können sich auf genau eine Koordinate beziehen. Das I-, J-, K-Wort wird dann direkt hinter der betreffenden Koordinate geschrieben.
- Diese Wörter können sich auf eine Gruppe von Koordinaten beziehen. Das I-, J-, K-Wort wird dann direkt hinter die letzte betreffende Koordinate geschrieben.

f **S-Wort** - Wort für Spindeldrehzahl

g **T-, D-Wort** - Wort für

- Werkzeug inkl. Korrektur (T-Wort)
- Werkzeug (T-Wort) und Korrektur (D-Wort)

h **M-Wort** - Wort für Zusatzfunktionen

Die Sätze eines NC-Codes können in Absätze unterteilt werden und somit Teilprogramme bilden. Es ist jedoch zu beachten, dass jeder Absatz mit einem Hauptsatz beginnen muss. Dieser wird anstelle des N-Worts mit dem Zeichen "Hauptsatz" (":") eingeleitet. Hauptsätze und ggf. die folgenden Sätze dienen dazu alle Wörter aufzurufen, um den Arbeitsablauf des beginnenden Programmabschnittes starten zu können.

Der Wortaufbau ist nach DIN 66025-1:1983-01 (1983) der Adressbuchstabe gefolgt von einer Zeichenfolge. Die Zeichenfolge kann mit Vorzeichen versehen sein, falls die CNC-Maschine negative Zahlenbereiche zulässt. Einige Wörter benötigen die Zeichenfolge als Parameter. Wie etwa der Befehl "X1030". Dieser drückt eine X-Koordinate mit einem Abstand von 1030,00 mm in positiver X-Richtung vom Ursprung aus. Andere Wörter, wie etwa das Wort für Wegbedingung, können auch zweistellige Schlüsselzahlen interpretieren und so vordefinierte Funktionen aufrufen. Beispielhaft sind die Befehle "G70" und "G71". Diese stellen die CNC-Maschinen in das metrische System (Grundeinheit mm) (G71) oder in das angloamerikanische System (Grundeinheit inch) (G70) um. Die Verwendung vom angloamerikanischen System wird nur nach Vereinbarung verwendet, ansonsten das metrische. Rotatorische Maße werden generell in Grad betrachtet.

Um die Funktionsweise des NC-Codes besser zu verstehen, ist folgend ein Beispielcode dargestellt. In diesem Codebeispiel wird der in Abb. 33 dargestellte gotische Bogen mit der CNC-Maschine abgefahren. Im Anschluss werden die einzelnen Befehle noch weiter erläutert.

Quelltext 2: NC-Programmierbeispiel: Gotischer Bogen

```
1  %Programm Gotischer Bogen
2  :010 G71 F50 G00 X0 Y0 Z0
```

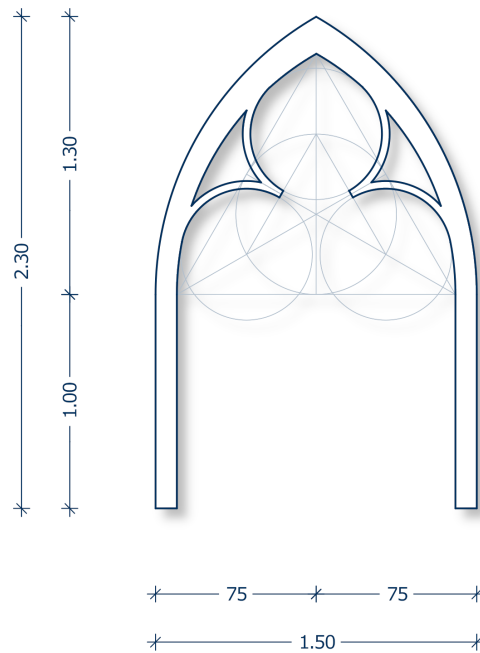


Abb. 33: Der abzufahrende gotische Bogen
Quelle: Eigene Darstellung

```

3  N020 G01 Z-50 (X0 Y0 bleiben bestehen)
4  N030 G01 Y1000
5  N030 G02 X750 Y2300 I1500 J0
6  N040 G02 X1500 Y1000 I-750 J-1300
7  N045 G91
8  N050 G01 Y-1000
9  N060 G01 X-100
10 N070 G01 Y1000
11 N080 G03 X-23.43 Y245.86 I-1300 J0
12 N090 G03 X-455.13 Y207.93 I-301.57 J-58.04
13 N100 G01 X-17.89 Y30.99
14 N110 G03 X-307.11 I-153.55 J 265.96
15 N120 G01 X-17.89 Y-30.99
16 N130 G03 X-455.13 Y-207.93 I-153.55 J-265.96
17 N140 G03 X-23.43 Y-245.68 I1276.57 J-245.68
18 N150 G90
19 N160 G01 X100.0 Y0.0
20 N170 G01 X0.0 Y0.0
21 N180 G01 Z0.0
22 N190 G00 X167.83 Y1414.44
23 N200 G01 Z-50

```

```
24 N210 G91
25 N220 G02 X325 Y109.31 I257.17 J-226.8
26 N230 G02 X-67.83 Y336.12 I257.17 J226.8
27 N240 G03 X-257.17 Y-445.43 I975 J-859.87
28 N250 G90
29 N260 Z0
30 N270 G00 X1332.17 Y1414.44
31 N280 Z-50
32 N290 G91
33 N300 G03 X-325 Y109.31 I-257.17 J-226.8
34 N310 G03 X67.83 Y336.12 I-257.17 J226.8
35 N320 G02 X257.17 Y-445.43 I-975 J-859.87
36 N330 G90
37 N340 G01 Z0.0
38 N350 G00 X0.0 Y0.0 Z0.0
39 %Ende Programm Gotischer Bogen
```

Zur besseren Verständlichkeit des G-Codes ist in Abb. 34 der Ablauf des Programms grafisch dargestellt. Zusätzlich werden dort alle benötigten Maßangaben für die Schritte 1 bis 9 gegeben. Der Hauptsatz :010 in Zeile 2 definiert in dem Befehl G71 das metrische Maßsystem, setzt die Vorschubgeschwindigkeit mit dem Befehl F50 auf 31,5 (vgl. DIN 66025-1:1983-01 (1983) Anhang A) und bewegt mit dem Befehl G00 X0 Y0 Z0 den Werkzeugkopf zum Nullpunkt. G00 steht dabei für eine Eilbewegung, also die schnellstmögliche, von der Maschine ausführbare Bewegung. Der Satz N020 senkt den Werkzeugkopf um 50 mm, sodass beispielsweise eine Fräse in das Material eintaucht. G01 drückt lineare Bewegungen zwischen dem aktuellen und einem neuen Koordinatenpunkt mit der Vorschubgeschwindigkeit aus. In Zeile 4 wird mit dem Befehl G01 Y1000 ein 1 m langer Schnitt entlang der Y-Achse geschnitten. Es ist zu beachten, dass derzeit in einem globalen Koordinatensystem gearbeitet wird und die aktuelle Maschinenkopfposition (0 | 1000 | -50) ist. Ein erneuter Aufruf des Befehls G01 Y1000 würde daher keine Bewegung hervorrufen, da dieser Zustand bereits erfüllt ist. Dabei fällt auf, dass der Befehl Z-50 nicht erneut aufgerufen werden muss, sondern solange gültig ist, bis die Z-Koordinate aktiv verändert wird. In Satz N030 wird durch den Befehl G02 X750 Y2300 I1500 J0 der Punkt (750 | 2300 | -50) über einen Kreisbogen mit dem Mittelpunkt (1500 | 1000 | -50) im Uhrzeigersinn befahren. Der Mittelpunkt errechnet sich einfach aus der Addition der Startkoordinate (0 | 1000 | -50) und den lokalen Angaben des Mittelpunktes aus den Wörtern I und J (1500 | 0 | 0). N040 entspricht N030 mit geänderter Zielkoordinate (1500 | 1000 | -50) und geänderter Kreismittelpunkt (0 | 1000 | -50). Dabei ist die lokale

Koordinate ausgehend von der letzten erreichten Koordinate.

Wie auch die Kreismittelpunkte können auch die Zielkoordinaten mittels inkrementaler Maßangaben angesteuert werden. Um von den bisherigen absoluten Maßangaben in die inkrementalen umzuschalten, wird in Zeile 7 der Befehl G91 aufgerufen (zum Zurückschalten ist der Befehl G90 implementiert). N050 erreicht somit durch den Befehl G01 Y-1000, ausgehend vom letzten Standpunkt des Maschinenkopfes (1500|1000|-50), die Koordinate (1500|0|-50). Der in Zeile 11 aufgerufene Befehl G03 bewirkt das gleiche wie G02, nur dass die Rotationsrichtung des Kreisbogens gegen den Uhrzeigersinn ist. Die Zeilen 21 bis 23 verdeutlichen, wie der Befehl für Eilbewegungen G00 nur dann verwendet werden sollte, wenn das Werkzeug nicht in der Werkstückebene ist. Auch das Ein- und AUSTAUCHEN sollte mit den G01 Befehlen ausgeführt werden.

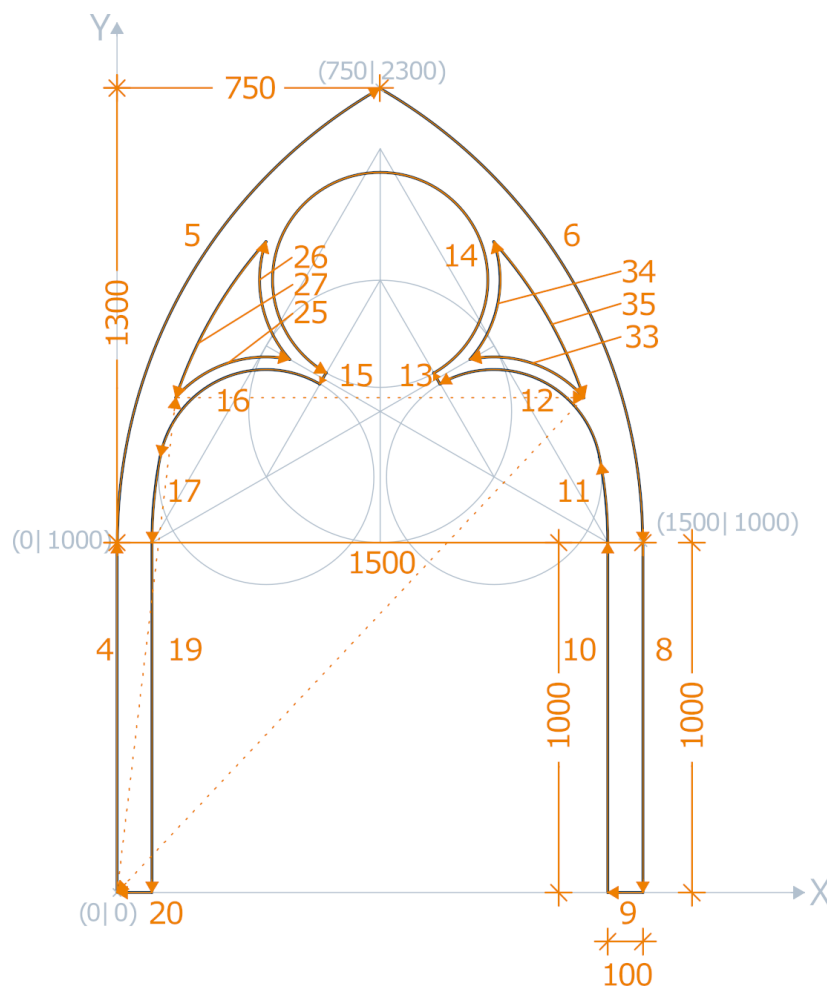


Abb. 34: Grafische Darstellung des G-Code Beispiels
Quelle: Eigene Darstellung

4 Daten der digitalen Fertigung

Im folgenden Kapitel soll auf den Datenfluss, der für die digitale Fertigung notwendig ist, eingegangen werden. Dabei wird mit der computergestützten Generierung von Gebäudeformen begonnen. Anschließend erfolgt eine weitere Detaillierung der Fassade. Abschließend sollen die Daten aus diesem Modell genutzt werden, um die darin enthaltenen Informationen zur Fertigung zu nutzen.

4.1 Entwurfsmodell

Entwurfsmodelle finden zu Beginn von Entwurfsprozessen Anwendung. Bei diesen Modellen kann der Entwerfende seinen spontanen, kreativen Impulsen freien Lauf lassen und diese konkretisieren. Somit repräsentieren diese Modelle die Ideen des Entwerfenden im dreidimensionalen Raum. Dabei zeichnen sich Entwurfsmodelle besonders durch ihre Unvollständigkeit und durch ihre eigene Veränderbarkeit aus. (Liptau 2018, Kunz o. D.)

Der Schwerpunkt dieser Arbeit soll bei der Erstellung des Entwurfsmodells nicht auf dem Entwurf liegen. Vielmehr wird der Schwerpunkt auf die Methodiken zur Erstellung eines durchgängigen Datenmodells gesetzt. Für den Entwurf wurde der Ansatz des Parametric Designs gewählt. So können organische Gebäudeformen erschaffen werden. Aufgrund der daraus resultierenden, komplexen und vielfältigen Geometrie der Bauelemente, ist die Errichtung solcher Entwürfe mit konventionellen Verfahren sehr aufwendig und kostenintensiv. Mithilfe der digitalen Fertigung wird die Fertigung von unterschiedlichsten Einzelstücken zu vergleichbaren Bedingungen, wie die der Massenproduktion eines einzigen Bauteils, ermöglicht.

Zur Erstellung des Entwurfsmodells wurde die Software Rhinoceros 6 von Robert McNeel & Associates verwendet. Dabei handelt es sich um eine kommerzielle 3-D-Computergrafik- und CAD-Anwendungssoftware. Zusätzlich wurde die Erweiterung Grasshopper verwendet, die von David Rutten bei Robert McNeel & Associates entwickelt wurde. Diese Erweiterung wurde dabei hauptsächlich für das Parametric Design des Entwurfsmodells verwendet. Aber auch eine Ausarbeitung eines parametrischen Fassadenknotens erfolgte mit Grasshopper.

4.1.1 Parametric Design

Parametric Design ist ein Architekturkonzept, das auf Regeln, Einschränkungen, Features und Assoziationen zwischen Parametern und Objekten innerhalb eines Modells basiert. Diese Regeln und Einschränkungen werden meist durch mathematische Formeln beschrieben, sodass die Datenwerte und Ergebnisse die Eigenschaften eines Modells beeinflussen. So wird eine einfache Anpassung des Modells auf Grundlage einer Änderung der Eingabeparameter gewährleistet. Parametric Design hat zudem den Vorteil, dass nach einer Änderung nicht das komplette Modell überarbeitet werden muss. (Aksamija et al. 2011)

Ein großer Vorteil des Parametric Designs ist die Verarbeitbarkeit durch einen Computer. So können die Eingabeparameter nicht nur nach ästhetischen und gestalterischen Gründen gewählt, sondern auch mit einer bestimmten Bedeutung verknüpft werden. Beispielsweise beschreibt Aksamija et al. (2011) die parametrische Gestaltung von Verschattungselementen unter Berücksichtigung der Sonneneinstrahlung. Durch die Optimierung der Verschattung kann der Gesamtenergiebedarf eines Gebäudes reduziert werden. Dabei hat die Sonneneinstrahlung im Winterfall den gewünschten Effekt, dass das Gebäude mit Wärmeenergie versorgt wird und somit weniger geheizt werden muss. Unter diesem Gesichtspunkt wäre die Wahl von wenigen Verschattungselementen sinnvoll. Andererseits erhitzt die Sonne aber auch im Sommerfall das Gebäude. Dies kann zur Folge haben, dass sich das Gebäude so stark erwärmt, dass kein behagliches Raumklima erreicht werden kann. Um das Gebäude weiterhin nutzen zu können, ist dann die Verwendung einer Klimaanlage notwendig. Die Nutzung einer Klimaanlage zieht jedoch wiederum einen erhöhten Energieverbrauch in den Sommermonaten mit sich. Mithilfe des Parametric Designs und einer Analysesoftware ist die Optimierung der Verschattungselemente möglich, um einen möglichst geringen Energieverbrauch zu erzielen.

Stauch (2016) beschreibt hingegen die Verwendung von Parametric Design zur automatisierten Generierung von Bogenbrücken aus Beton. Als Eingabeparameter verwendet er den Geländeschnitt, den die Brücke überspannen soll. Sein Algorithmus analysiert diese Topologie und gibt eine Brücke zurück, deren Stützkonstruktion an das Gelände angepasst ist. Dabei ist beispielsweise die Anzahl der Bögen variabel. Je nach Statik der Brücke werden dann mehr oder weniger Bögen gewählt. Diese beiden Anwendungsfälle stellen sehr gute Beispiele dar, wie Parametric Design genutzt werden kann, um Bauwerke hinsichtlich ihrer strukturellen oder energetischen Eigenschaften zu optimieren. Somit kann Parametric Design als Unterstützung zur Errichtung nachhaltiger Gebäude genutzt werden.

4.2 Erstellung des Entwurfmodells

Bei der Erstellung dieser Arbeit wird nicht weiter auf die in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Optimierungsprozesse eingegangen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass mithilfe einer entsprechenden Software solch ein Optimierungsprozess integrierbar wäre. Solch eine Implementierung wird in der Arbeit von Aksamija et al. (2011) ausführlich beschrieben. Daher wird der Fokus dieser Arbeit auf die Methoden zur Erstellung eines parametrischen Modells gesetzt und auf die Fragestellung, wie Daten aus diesem Modell weiter genutzt werden können. Das Modell soll dabei beispielhaft an einem parametrischen Fassadensystem der Firma Schüco International KG angelehnt sein, wie es in Abb. 35 dargestellt ist.

Zunächst muss die grundlegende Gebäudeform festgelegt werden. In dieser Arbeit wurde der Ansatz verfolgt, eine Kurve zu verwenden, die den äußeren Grundriss des Bauwerks repräsentiert. Diese Kurve ist von Hand gezeichnet und könnte auf einem vorher definierten Grundriss basieren, der anhand des Bebauungsplanes festgelegt wurde. In Abb. 36 ist diese Grundrisskurve dargestellt. Eine Parametrisierung dieser Kurve wäre denkbar. So könnten beispielhaft grobe Abmessungen, wie Länge und Breite des Bauwerks, die zu bebauende Fläche, die anhand der Vorgaben des Bebauungsplanes gewählt werden könnte, und einige weitere Parameter zur weiteren Formgebung der Kurve gewählt werden. Diese weiteren Parameter könnten durch einen Zufallsgenerator erzeugt werden, sodass alle Bauwerke eine grundlegend andere Form aufweisen.

Folgend soll diese Kurve repetitiv für jedes Stockwerk erneut verwendet werden. Die Geschossanzahl wird wie in Abb. 37 dargestellt, über den Parameter "Amount of Levels" definiert. Der Abstand zwischen den Kurven entspricht der späteren Geschosshöhe bzw.



Abb. 35: Parametrische Fassade der Firma Schüco International KG
Quelle: Schüco [online] https://www.schueco.com/web2/parametric_de [Zugriff am 21.01.2019]

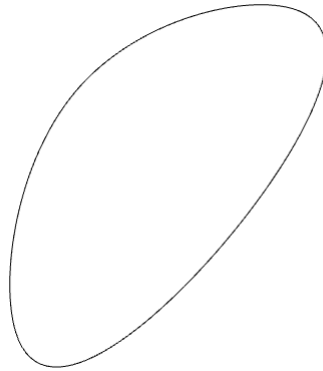


Abb. 36: Darstellung der Grundrisskurve (Grundriss)
Quelle: Screenshot aus Rhinoceros 6

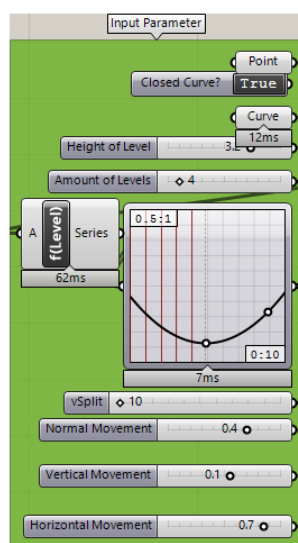


Abb. 37: Eingabeparameter in Grasshopper
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

dem Abstand zwischen den Riegeln einer Pfosten-Riegel-Fassade. Wie auch in Abb. 37 dargestellt, wird die Geschosshöhe über alle Stockwerke hinweg konstant gesetzt. Hierfür ist der Parameter "Height of Level" verantwortlich. Alternativ könnte die Höhe für jedes Stockwerk unterschiedlich sein. Um dies zu realisieren, können entweder entsprechende Parameter händisch gewählt werden, oder durch eine mathematische Formel, beispielsweise in Abhängigkeit ihrer Geschosnummer, berechnet werden. Um diese Möglichkeiten der mathematischen Berechnungen innerhalb des Parametric Designs zu veranschaulichen, sollen die Größen der Kurven für jedes Stockwerk variieren. Hierfür wurde der in Abb. 37 dargestellte Graph Editor von Grasshopper genutzt.

In Abb. 38 ist dargestellt, wie mithilfe des "Move"-Elements die Kurve repetitiv verschoben wird. Die eingehende "Geometry" ist die Grundrisskurve. Der Eingang "Motion" ist für die

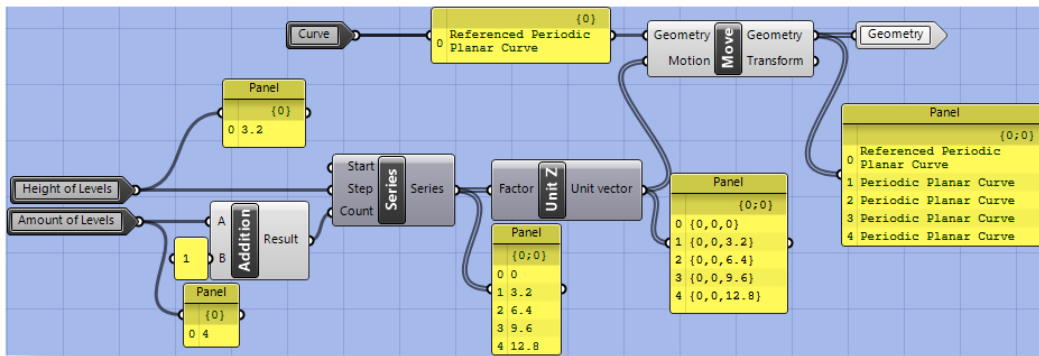


Abb. 38: Verschiebung der Kurve mithilfe des "Move"-Elements
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

vielfache Verschiebung der Kurve zuständig. Ihm werden mehrere Z-Vektoren ("Unit Z") übergeben. Für jeden Vektor wird eine Geschosskurve erzeugt, die um den jeweiligen Vektor verschoben ist. Mithilfe des "Series"-Elements wird eine Zahlenfolge erstellt, die als Grundlage für die Z-Vektoren dient. Dabei ist der Abstand der Zahlenfolge gleich der Geschosshöhe. Daher wird der Parameter "Height of Levels" als "Step" in der "Series"-Komponente verwendet. Die Länge der Zahlenfolge wird durch "Count" ausgedrückt. Hierfür wird "Amount of Levels" genutzt. Da jedes Geschoss durch eine untere und eine obere Kurve ausgedrückt wird, muss "Amount of Levels" um 1 erhöht werden. In Abb. 40 ist dargestellt, wie mithilfe dieser Parameter die Gebäudeform auf einfachem und schnellem Wege anpassbar ist, um verschiedenste Gebäude zu erhalten. Das im dritten Fall verwendete "Rev"-Element zwischen Graph Editor und Panel¹, sorgt für eine Umkehrung der Reihenfolge, in denen die Skalierungsfaktoren angewendet werden. So wird das Gebäude auf den Kopf gestellt. Es ist zu beachten, dass das unterste dargestellte Modell für weitere Betrachtungen verwendet wird.

In Grasshopper wird diese Skalierung mit dem "Scale NU"-Element umgesetzt. NU steht dabei für "non-uniform" und beschreibt eine ungleichmäßige Skalierung über die einzelnen Achsen hinweg. So wird verhindert, dass die Geschosshöhe verändert wird. In Abb. 39 ist zu sehen, wie der Faktor "Scale" an das Element als "Scale X" und "Scale Y" übergeben wird. Dieser Faktor wird aus dem in Abb. 37 dargestellten Graph Editor ausgelesen. Da dieser Faktor sowohl die X- als auch die Y-Skalierung steuert, bleibt die Form der Grundrisskurve erhalten. Diese Faktoren können auch getrennt über zwei verschiedene Graph Editoren gesteuert werden, dann wird die Grundrisskurve verzerrt. Der Input "Plane" ist für den Ursprung der Skalierung zuständig. Hierfür wird in der Gruppe "Origin Scale" eine Ebene mit entsprechendem Mittelpunkt angelegt.

¹Das Panel dient in Grasshopper zur Ausgabe von Datenwerten.

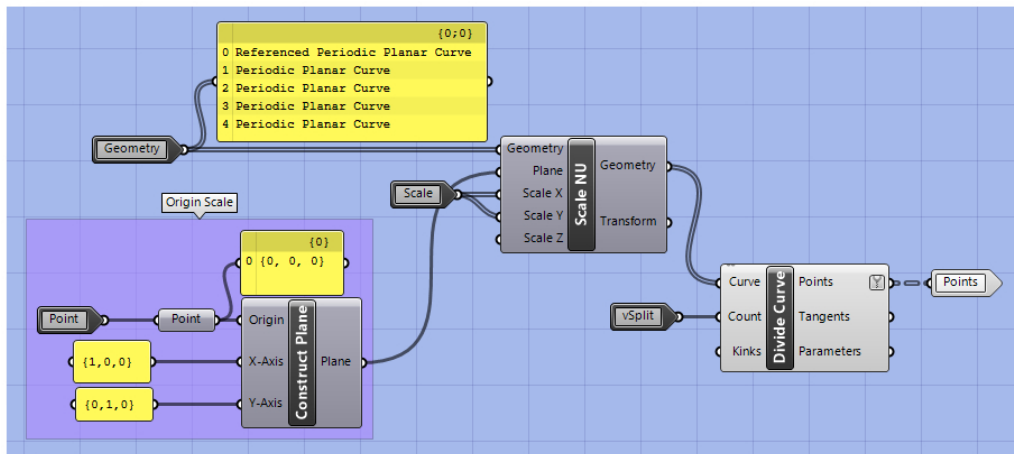


Abb. 39: Skalierung und Zerteilung der Kurven
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

Im nächsten Schritt, dargestellt in Abb. 41, werden die eben erstellten Kurven genutzt, um die Eckpunkte für die Fassadenkonstruktion zu definieren. Dazu werden die Kurven auf Grundlage ihrer Länge in Teilkurven zerteilt. Die Anzahl der Divisionen bestimmt letztendlich sowohl die Form des Gebäudes als auch die Breite der einzelnen Fassadenelemente. Über den Parameter "vSplit" lässt sich diese Division einstellen. Dieser Parameter kann auch in Abb. 37 gesehen werden.

Wie in Abb. 39 dargestellt, wird die Zerteilung der Kurve mit dem "Divide Curve"-Element umgesetzt. Dieses teilt die Kurven, die im Eingang "Curve" übergeben werden, in gleich lange Teilkurven auf und gibt deren Endpunkte in der Ausgabe "Points" aus. Hierfür wird der Parameter "Count" an das Element übergeben. Um diesen einfach zu steuern, wird ihm der Parameter "vSplit" zugeordnet.

Folgend müssen die einzelnen Punkte den Fassadenfeldern nach dem in Abb. 42 gegebenen Schema zugeordnet werden. Dazu wurde der in Abb. 44 gegebene Algorithmus verwendet. Die grün dargestellte Gruppe "Input Parameter" ist bereits aus Abb. 37 und das Cluster² "Curve to 3D Form" aus den Abb. 38 und 39 bekannt. Hierbei ist zu beachten, dass das Cluster "Curve to 3D Form" die Punkte in Form eines Baumes ausgibt. In Abb. 43 ist die Ausgabe des Clusters über das Panel dargestellt. Es ist zu erkennen, wie die zehn Punkte einer Kurve in je einer Liste enthalten sind. Diese Liste ist wiederum jeweils einem Zweig A zugeordnet, sodass die Zweige die einzelnen Geschosse darstellen.

Für den Punkt A gilt, dass alle Punkte, außer der obersten Reihe, der Punkt A sein kann. Da das oberste Geschoss im letzten Zweig des Baumes gespeichert ist, kann mithilfe der "Split Tree" Komponente (in Abb. 44 als "A" bezeichnet) die oberste Punktereihe

²Ein Cluster fasst mehrere Grasshopper-Elemente zusammen und bildet so eine Komponente.

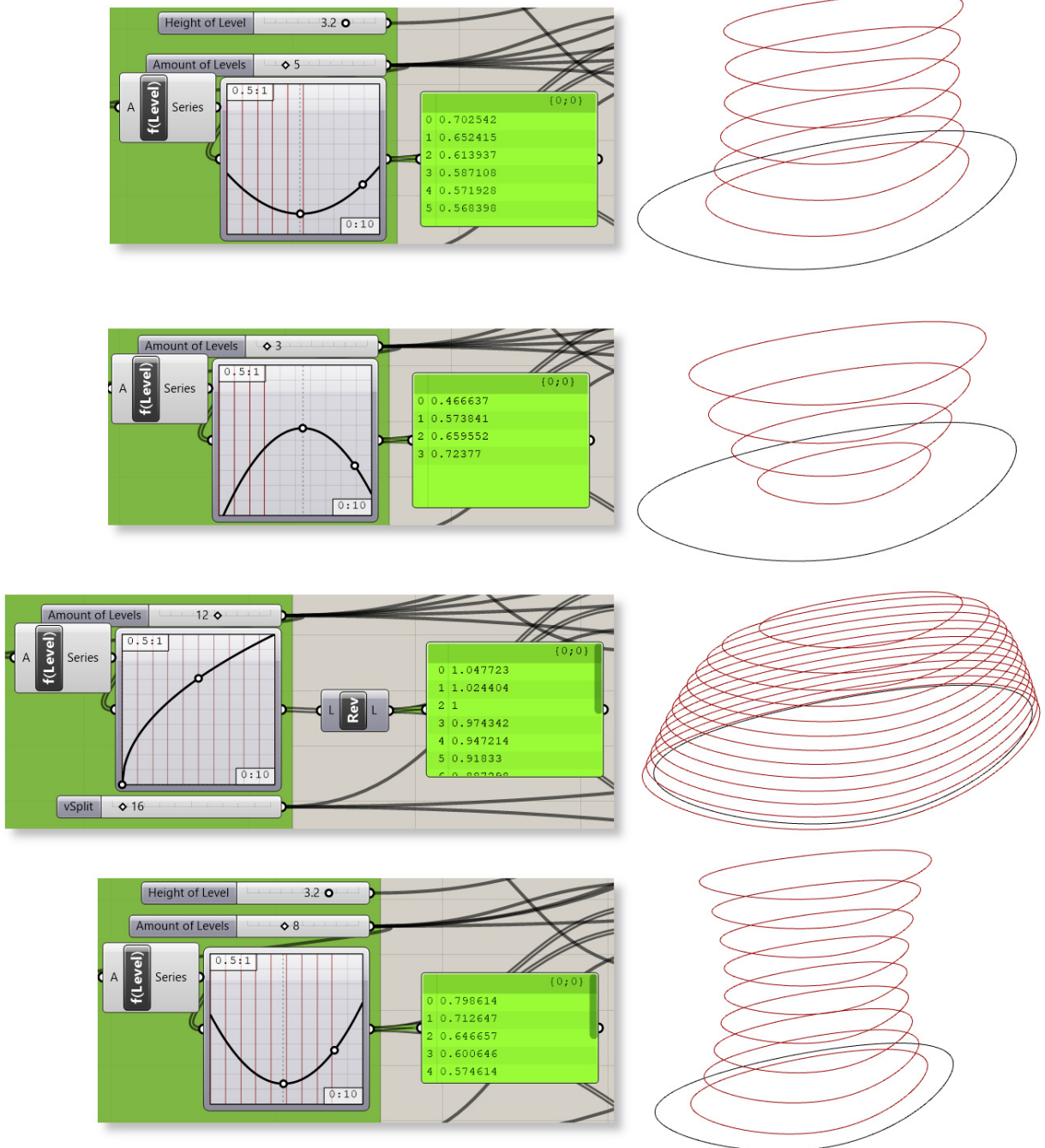


Abb. 40: Variantenbildung der Gebäudeform mithilfe der Parameter (Perspektive)
 Quelle: Screenshots aus Grasshopper (links) und Rhinoceros 6 (rechts)

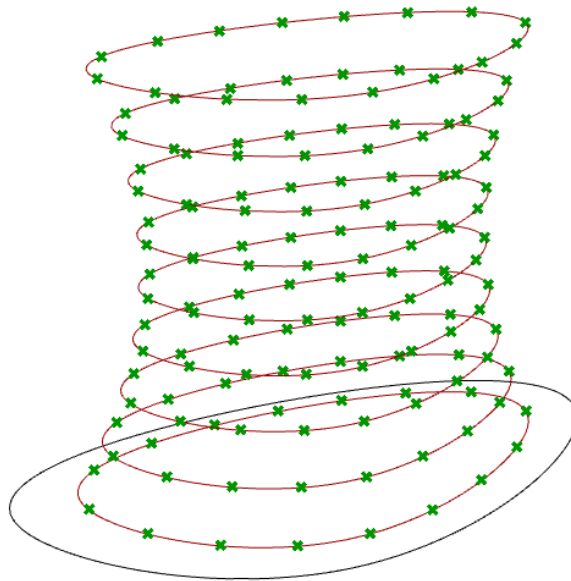


Abb. 41: Zerteilung der Kurven in einzelne Punkte (Perspektive)
Quelle: Screenshots aus Rhinoceros 6

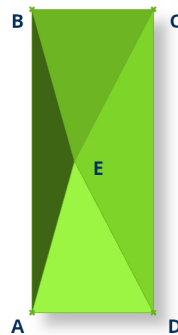


Abb. 42: Das Schema der Benennung der Punkte eines Feldes
Quelle: Eigene Darstellung

aus der Punktmenge gefiltert werden. So wird die Menge der Punkte A ausgegeben. Die Filtermaske (Eingang "A") wird durch ein kleines Python-Script erzeugt. Dieses formatiert die Geschosszahl in folgender Eingabemaske: "{l}". So ist die Eingabemaske bei einer Geschosszahl von vier: {4}. Für den Punkt D ergibt sich, dass dieser der Nachfolger von A ist. So kann die "Shift List"-Komponente auf die Menge der Punkte A angewendet werden. Dadurch wird jedes Element i zum Element $i+1$, also zum Nachfolger. Für den Punkt B gilt, dass jeder Punkt, außer die der untersten Reihe, den Punkt B repräsentieren kann. Die unterste Reihe ist im Zweig 0 gespeichert, sodass dieses durch ein "Split Tree"-Element gefiltert werden kann. Anschließend müssen alle Zweige A des Baumes in A-1 umbenannt werden. Hierfür wurde die "Path Mapper"-Komponente verwendet. Für den Punkt C ergibt sich, dass dieser wiederum der Nachfolger von B ist. Das Element "Calculate E" berechnet die Position des Punktes E. Dieses Cluster wird zu einem späteren Zeitpunkt dieses Kapitels betrachtet.

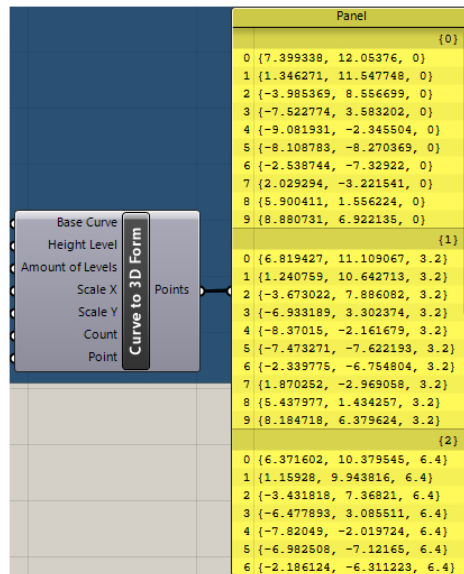


Abb. 43: Ausgabe des Clusters "Curve to 3D Form" als Baum
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

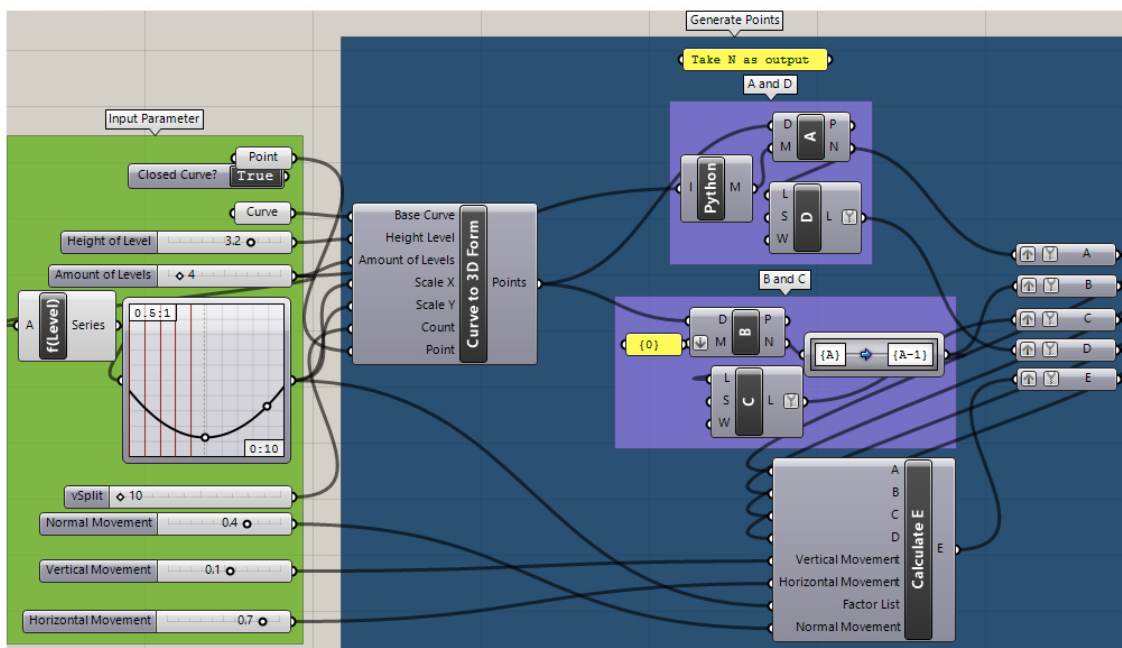


Abb. 44: Zuordnung der Eckpunkte zu den Fassadenfeldern
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

Durch diese Vorgehensweise ergeben sich etwa gleich breite Fassadenelemente. Das in Abb. 45 dargestellte Beispiel verdeutlicht, wie mithilfe des "Dispatch"-Elements unterschiedlich große Fassadenelemente entstehen können. Dazu wird zunächst die Kurve mit einer erhöhten Divisionszahl geteilt. Die entstehenden Punkte (rot und grün) ergeben ein Raster. Mithilfe des Dispatch Patterns, bestehend aus einer einfachen Abfolge von booleschen Werten, wird die Punktmenge aussortiert, sodass nur die Eckpunkte der Fassade (grün)

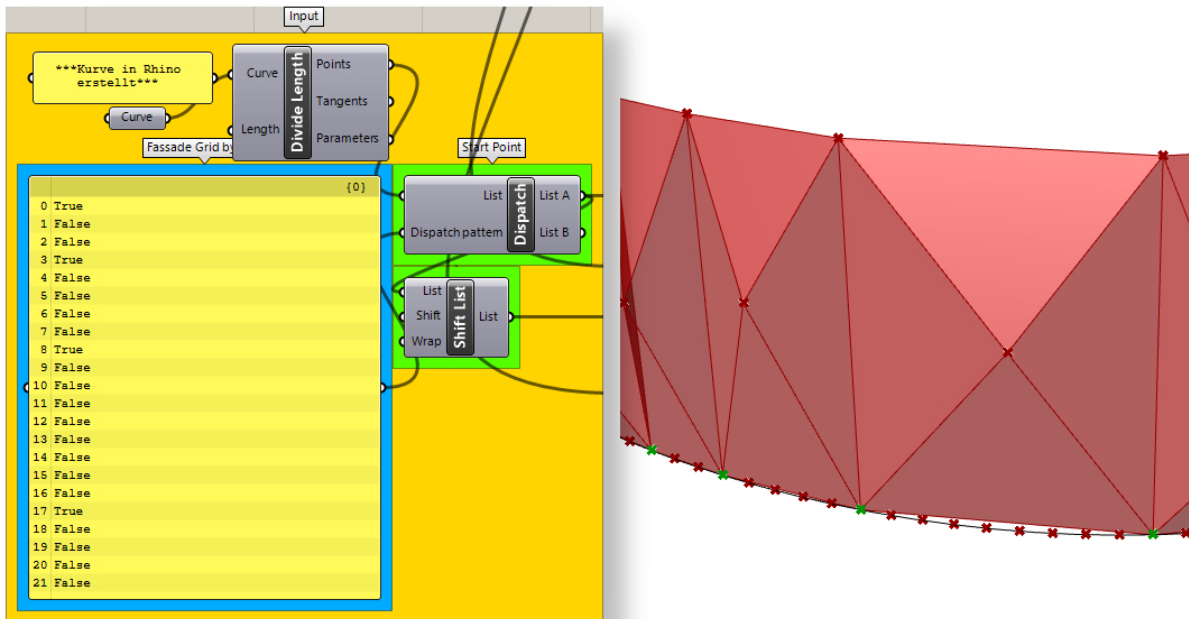


Abb. 45: Rasterteilung der Kurven (rechts oben: Perspektive, rechts unten: Grundriss)
Quelle: Screenshots aus Grasshopper (links) und Rhinoceros 6 (rechts)

erhalten bleiben. Die roten Punkte werden nicht weiter genutzt. Dieses Beispiel ist in den digitalen Anlagen als "Schubert06.gh" beigelegt.

Da nun die äußere Form der einzelnen Fassadenelemente definiert wurde, kann damit begonnen werden die innere Form der Fassadenelemente zu definieren. Zunächst wird mit einem einzelnen Punkt in der Mitte des Fassadenelementes begonnen. Dieser kann sich auf drei Achsen im Raum bewegen. Wie in Abb. 37 dargestellt, kann diese Bewegung über die Parameter "Vertical Movement", "Horizontal Movement" und "Normal Movement" durch den Nutzer vorgenommen werden. Zusätzlich wurde die Verschiebung der Punkte nicht über das globale Koordinatensystem gelöst. Denn dieser Ansatz hat zur Folge, dass eine rechts-links Bewegung an der Vorderseite des Modells gleichzeitig eine vor-zurück Bewegung an den Seiten des Modells hervorruft. Daher werden die Vektoren zwischen benachbarten Punkten genutzt, um sowohl eine horizontale als auch eine vertikale Bewegung zu realisieren. Gleichzeitig können beide Vektoren genutzt werden, um den Normalvektor zu bilden.

Zunächst wird, wie in Abb. 46 dargestellt, der Mittelpunkt E^* der Felder berechnet. Hierfür werden die vier Ortsvektoren der Punkte A, B, C und D addiert und durch vier geteilt (Anmerkung des Autors: die vier ist in den Eigenschaften des Division-Elementes gespeichert). In Abb. 47 ist das Cluster zur Bestimmung des endgültigen Punktes E dargestellt. Um das endgültige E zu erhalten, wird der Punkt E^* entlang der vorher erwähnten Vektoren

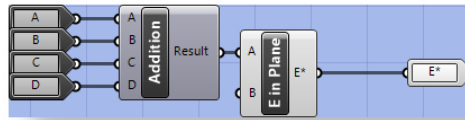


Abb. 46: Ermittlung des vorläufigen Punktes E*
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

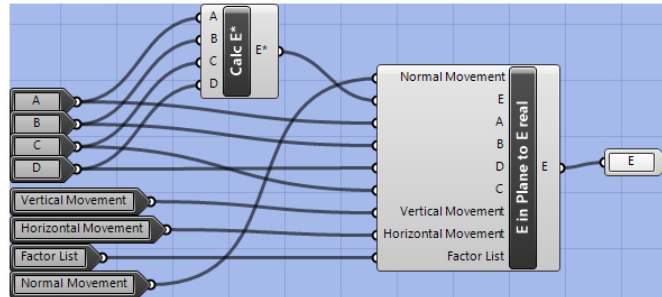


Abb. 47: Ermittlung des endgültigen Punktes E
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

verschoben. In horizontaler Richtung wird dieser Vektor über die Mittelung der Vektoren von Punkt A nach D und Punkt B nach C berechnet. In vertikaler Richtung erfolgt selbiges für die Vektoren A-B und D-C. Der Vektor in Normalen-Richtung wird über die Mittelung der beiden Kreuzprodukte $A-B \times A-D$ und $C-D \times C-B$ ermittelt. Für dieses Modell wurde zusätzlich die Bedingung aufgestellt, dass der Punkt nicht außerhalb des, durch die vier Eckpunkte definierten, Feldes liegen darf. Um dies zu erfüllen, dürfen die Verschiebungsvektoren in vertikaler und horizontaler Richtung nur mit Werten aus der Menge $[-0,5;0,5]$ multipliziert werden. Um eine Eingabe des Nutzers von $[-1;1]$ zu erhalten, werden die Eingabewerte halbiert. Anschließend können die fünf Punkte mit Kanten verbunden werden oder es können Dreiecke zwischen den Punkten definiert werden. Diese Dreiecke sollen im realen Modell entweder als Metallelemente, oder jeweils als Glasscheibe ausgeführt werden. In letzterem Fall repräsentieren die Kanten dann ein Profil innerhalb der Fassade. An den Punkten A, B, C, D, und E ergeben sich Fassadenknoten. Diese Fassadenknoten werden in Kapitel 4.4 genauer betrachtet.

Folgend kann die gesamte Hüllfläche des Gebäudes über die in Abb. 37 dargestellten Parameter bearbeitet werden. Abb. 49 verdeutlicht die Auswirkung der Parameter auf die Fassadenelemente.

Eine letzte Herausforderung beim Entwurfsmodell stellt der Bake-Vorgang der Fassadenelemente dar. Bei diesem Vorgang werden die prozeduralen Geometrien aus Grasshopper in Rhinoceros 6 übertragen und gespeichert. Um die Daten besser verwalten zu können, ist es sinnvoll die Layerstruktur von Rhinoceros 6 zu nutzen. So kann jedes Element auf

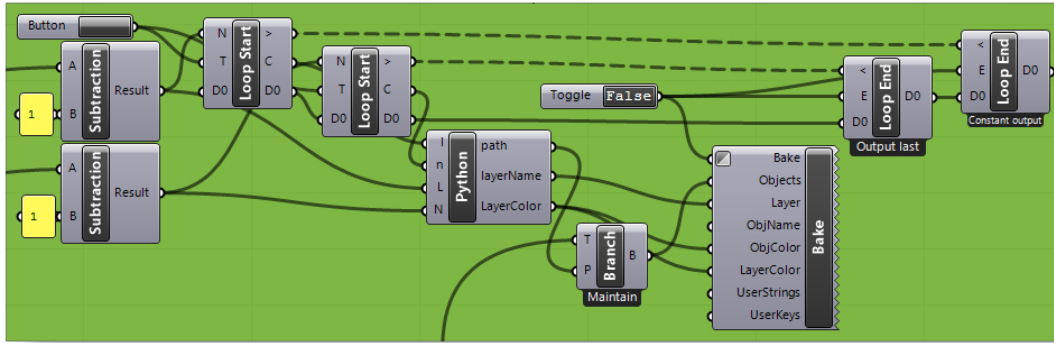


Abb. 48: Bake-Schleife
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

einem separaten Layer gespeichert werden. Dies ermöglicht einen schnellen und einfachen Zugriff auf die Daten eines beliebigen Fassadenelementes. Da die internen Bake-Werkzeuge sehr rudimentär sind, wurden zusätzlich die Plug-ins "Anemone", für einfache Zählschleifen, und "LunchBox", für umfangreiche Bake-Funktionen, verwendet. So konnte die in Abb. 48 dargestellte Bake-Schleife implementiert werden. Die Schleife geht alle Fassadenelemente durch und baket dieses. Die Anzahl der Stockwerke und die Anzahl der Elemente je Stockwerk kommen in die beiden "Subtraction"-Elemente hinein. Die zu bakende Geometrie wird der "Tree"-Komponente übergeben. Zusätzlich zu den beiden Plug-ins wurde ein Python-Script geschrieben, das automatisiert die Benennung der einzelnen Layer und gebakten Objekte übernimmt. Das Script fügt außerdem den Layer je nach Geschoss eine eigene Farbe hinzu, sodass diese in der Rhinoceros 6 Layerstruktur besser erkenntlich sind.

Das in diesem Kapitel erläuterte Entwurfsmodell ist in den digitalen Anlagen unter den Dateien "Schubert01.3dm" und "Schubert02.gh" beigelegt. Zusätzlich ist in den Dateien "Schubert05.3dm" bzw. "Schubert05.stl" das fertige Geometrie-Entwurfsmodell beigelegt.

Für die weitere Entwicklung des Modells soll dieser Ansatz für diese Arbeit genügen. Im folgenden Kapitel sollen zunächst weiterführende Ansätze, zur Weiterentwicklung des Entwurfsmodells, gezeigt werden. D

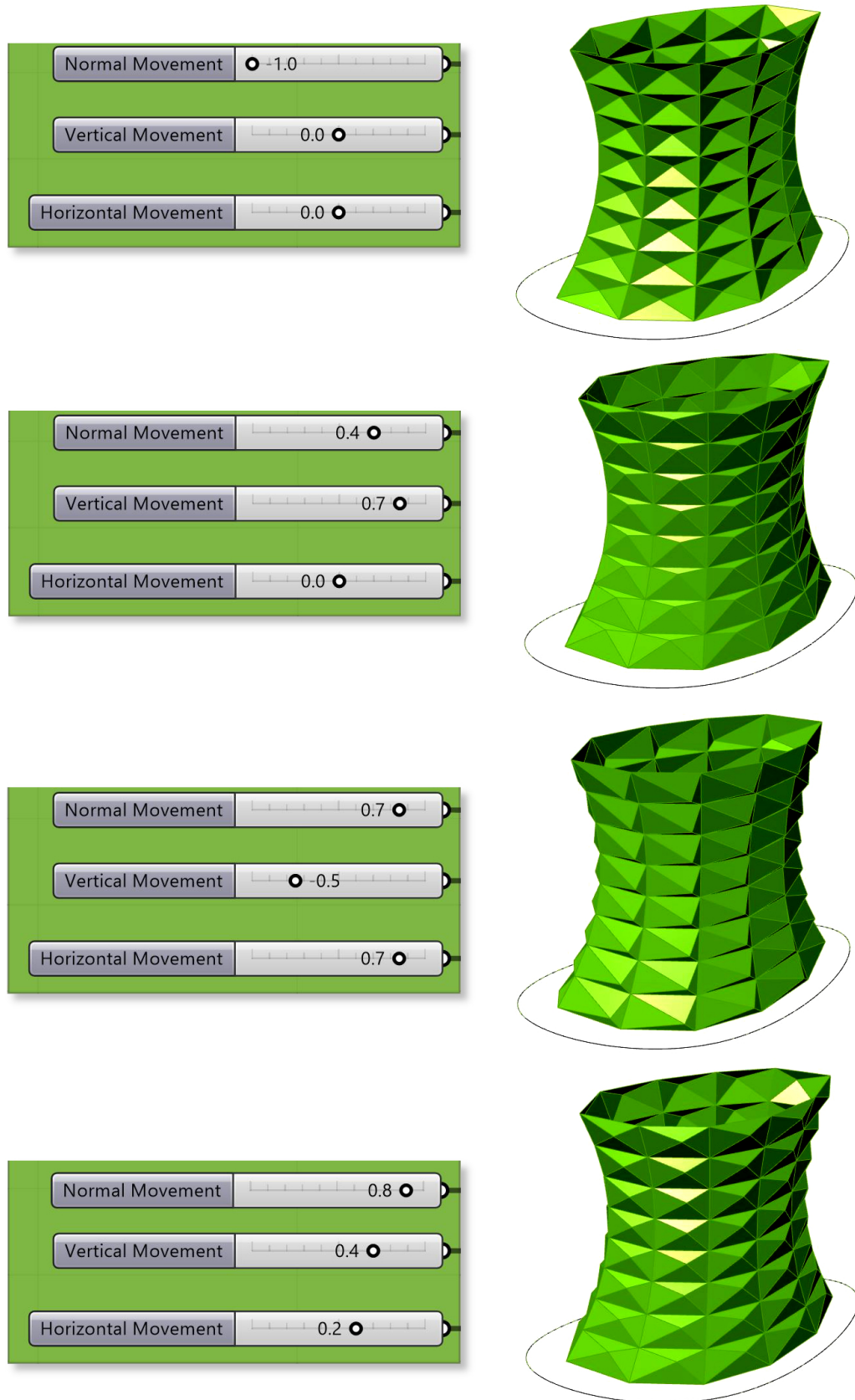


Abb. 49: Variantenbildung der Fassade mithilfe der Parameter (Perspektive)
 Quelle: Screenshots aus Grasshopper (links) und Rhinoceros 6 (rechts)

4.3 Weiterführendes Entwurfsmodell

Dieses Kapitel soll die Gedankengänge aus dem Kapitel 4.2 weitergeführt werden. Es soll aufgezeigt werden, wie die bestehende Grundstruktur erweitert werden kann, um komplexere Fassadengeometrien über einfache Werteingaben ausdrücken zu können.

Abb. 50 verdeutlicht, die Vielfalt der Fassadengeometrien, die mithilfe des Parametric Designs umsetzbar sind. Das linke Fassadenelement ist bereits aus dem Kapitel 4.2 bekannt. Die Mitte der Fassadenelemente wurde bisher nur als einzelner Punkt betrachtet. Jedoch sollen auch komplexere Geometrien realisierbar sein.

Das mittlere Element weist eine Linie als Mitte auf. Zur vollständigen Steuerung der Geometrie wird ein weiterer Parameter als im linken Fall benötigt. Dieser Parameter ist für die Breite der Linie zuständig, bzw. für den Abstand der Punkte, die diese Linie bilden. Ansonsten verhält sich die Linie ähnlich wie der Punkt. Weiterhin kann sie in drei Richtungen verschoben werden. Es ist darauf zu achten, dass die Linie parallel zu den Randkanten ausgerichtet ist. Dies liegt darin begründet, dass neben den dreieckigen Flächen viereckige entstehen. Im Gegensatz zu Vierecken haben Dreiecke die Eigenschaft, dass immer alle drei Ecken innerhalb einer Ebene liegen. Da dies für ein Viereck nicht gilt, wird bei der Rotation der Linie eine Fläche entstehen, deren Eckpunkte nicht innerhalb einer Ebene liegen. Die Folge ist, dass eine Knickkante entsteht. Somit muss ein zusätzliches Profil eingefügt werden, um das Viereck in zwei Dreiecke zu unterteilen.

Als letzter Fall wurde im Rahmen dieser Projektarbeit ein Dreieck als Mitte betrachtet. Das Dreieck besteht immer aus mindestens einer zu den Randkanten parallelen Seite. Dies liegt, wie beim mittleren Element, in der Ebenheit der Flächen begründet. Diese Linie darf fast genauso wie die Linie als Mitte verändert werden. Das bedeutet, das mittlere Dreieck darf vertikal, horizontal und in Normalen-Richtung verschoben werden. Um die Geometrie der Mitte eindeutig definieren zu können, wird neben dem Breitenparameter

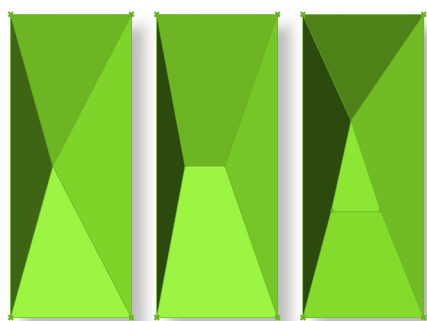


Abb. 50: Darstellung der unterschiedlichen Fassadengeometrien
Quelle: Screenshot aus Rhinoceros 6

noch ein Höhenparameter benötigt. So ist der Abstand des dritten Punktes des Dreiecks bestimmbar. Die exakte Position dieses Punktes wird anhand der weiteren Parameter bestimmt.

Eine Erläuterung des Grasshopper-Algorithmus wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen. Es sei jedoch auf die in den digitalen Anlagen beigefügte Datei "DATEINAME.gh" verwiesen. In dieser Datei wurde die Formbildung der Fassadenelemente prototypisch umgesetzt.

4.4 Entwicklung des parametrischen Fassadenknotens

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie die Daten des Entwurfsmodells genutzt werden können, um einen parametrischen Fassadenknoten zu entwickeln. Um den Fassadenknoten herzustellen, sollen Profile in einem entsprechenden Winkel geschnitten und anschließend zu einem Knoten zusammen gesetzt werden. Mithilfe eines 3-D-Lasercutters können die Profile präzise geschnitten werden. Die Profile sollen so gefertigt sein, dass sich die Fassadenprofile für die einzelnen Felder in diese hineinstecken und verschrauben lassen.

Die Grundlage hierfür ist das in Kapitel 4.2 erstellte Modell. Dieses wurde mithilfe des vorgestellten Bake-Algorithmus in Rhinoceros 6 übertragen. Folgend werden diese Layer in einer neuen Grasshopper-Datei eingelesen. Um das Einlesen der Layer zu umgehen, könnte alternativ auch die vorherige Grasshopper-Datei erweitert werden.

Mithilfe des bereits verwendeten Plug-ins "LunchBox" wird, wie in Abb. 51 verdeutlicht, ein Layer aus der geöffneten Rhinoceros 6 Datei geladen. Über Slider kann das jeweils benötigte Fassadenfeld angesteuert und so in Grasshopper importiert werden. Um die Vektoren zwischen den Punkten zu erhalten, wurden die Kanten als Linien gebaket. Nach

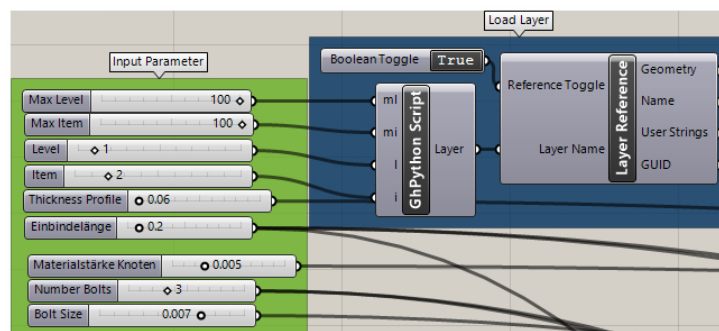


Abb. 51: Layer-Import mithilfe von Grasshopper
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

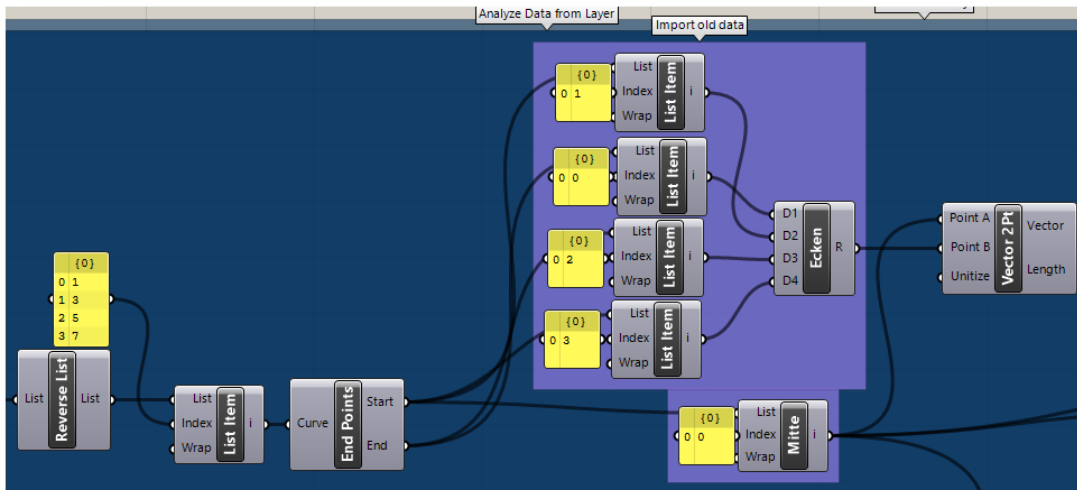


Abb. 52: Verarbeitung der Geometrieinformationen aus dem Layer
 Quelle: Screenshot aus Grasshopper

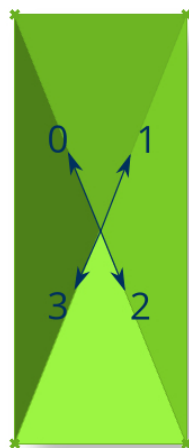


Abb. 53: Speicherschema der Vektoren
 Quelle: Screenshot aus Grasshopper

dem Import, kann so der Start- und Endpunkt der Linien genutzt werden, um die Vektoren zu berechnen. In diesem Beispiel soll nur der mittlere Fassadenknoten erzeugt werden. Um alle hierfür relevanten Linien auszusortieren, wird die "List Sort"-Komponente auf die Liste mit allen Linien angewendet. Dieser Vorgang ist in Abb. 52 dargestellt. Dadurch können alle äußeren Kanten entfernt werden und die inneren, in dem in Abb. 53 dargestellten Schema, gespeichert werden. Des Weiteren ist in Abb. 52 die Bildung der Vektoren dargestellt.

Zunächst wurden die Profile erzeugt. Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde ein einfacher Kreisquerschnitt angenommen. In der Realität sind die Profilquerschnitte deutlich komplexer, verändern aber nicht maßgebend die Vorgänge beim Erzeugen eines parametrischen Fassadenknotens. Wie in Abb. 54 dargestellt, wird der Kreisquerschnitt mithilfe des

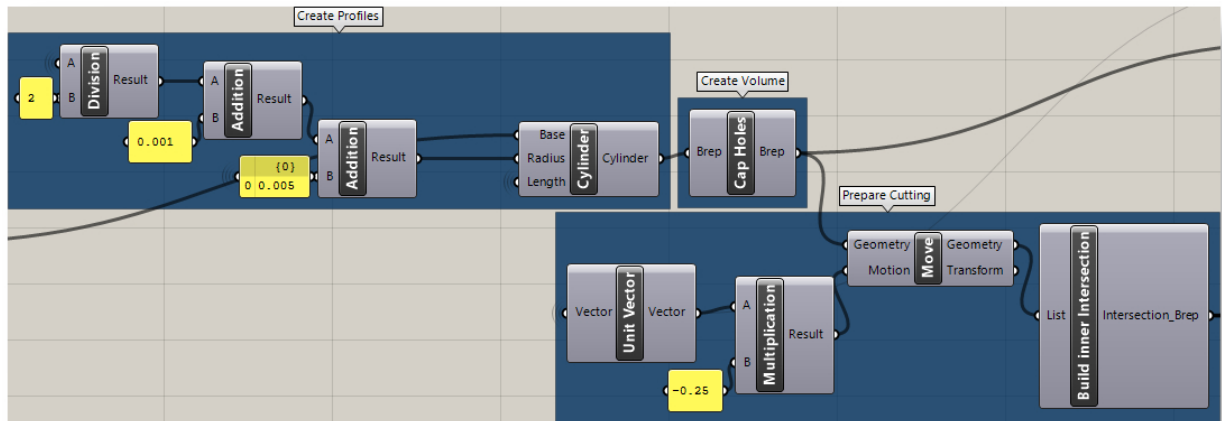


Abb. 54: Generierung der Knotenprofile
Quelle: Screenshot aus Grasshopper

"Cylinder"-Elementes in Grasshopper erzeugt. Dieses benötigt, vergleichbar mit dem "Scale"-Element, eine Eingabeebene. Als Ursprung dieser Ebene wird der Punkt E gewählt. Die Ebene wird weiter durch die Normalen-Richtung ausgedrückt. Diese wird durch die einzelnen Vektoren definiert. Der Radius wird in diesem Fall durch einen in Abb. 51 dargestellten Slider geregelt. Dabei ist zu beachten, dass dieser den Durchmesser der Fassadenprofile angibt. Da die Profile letztendlich in den Fassadenknoten gesteckt werden sollen, benötigt das Profil des Fassadenknotens einen erhöhten Durchmesser. Der Innenradius des Knotens ergibt sich aus dem Radius des Profils zuzüglich 1 mm Fuge. Der Außenradius ist der Innenradius zuzüglich der Materialstärke des Knotens. Die Materialstärke und Länge der Knotenprofile kann über einen Slider angepasst werden. Es ist denkbar, dass diese Parameter zukünftig auf Grundlage von statischen Betrachtungen, in Abhängigkeit der eingehenden Profilstärken oder -längen, vorgenommen wird.

Desweiteren ist in Abb. 54 dargestellt, wie die Stirnseiten der erzeugten Zylinder mit dem Tool "Cap Holes" geschlossen werden. Dadurch entstehen geschlossene Volumenkörper, die mit der "Solid Difference"-Komponente besser verschnitten werden können, als offene Körper. Da derzeit alle Profile ihren Ursprung im Punkt E besitzen und alle Profile voneinander weg zeigen, allerdings dabei nicht innerhalb einer Ebene liegen, entsteht zwischen den Profilen, wie in Abb. 55 a) dargestellt, ein Hohlraum der geschlossen werden muss, um einen sauberen Verschnitt zu erzielen. Daher ist es wichtig, dass alle Profile mit der "Move"-Komponente nach hinten verschoben werden, sodass sich die Volumenkörper vollständig durchstoßen. Mithilfe des "Solid Intersection"-Elements kann die Schnittmenge aller vier Zylinder vorgenommen werden. Dies wird im Cluster "Build inner Intersection" vorgenommen. Dadurch entsteht der in Abb. 55 b) dargestellte Volumenkörper. Dieser ergänzt, wie in Abb. 55 c) zu sehen, die Profile perfekt, sodass der Knoten durch das

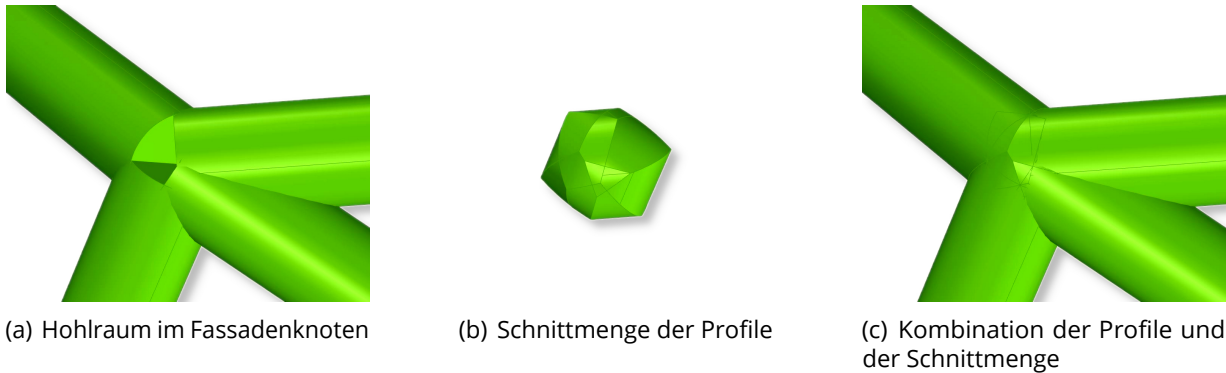


Abb. 55: Lösungsansatz zum Verschneiden der Knotenprofile
Quelle: Screenshot aus Rhinoceros 6



Abb. 56: Vektoren zur Definition der Schnittebenen
Quelle: Eigene Darstellung

Schneiden der vier Profile herstellbar ist.

Nachdem der Volumenkörper des Fassadenknotens erstellt wurde, muss der Knoten in die vier Profile zerschnitten werden. Dieser Vorgang stellt eine sehr große Herausforderung dar. Zunächst wurde die Schnittmenge mit jedem einzelnen Profil mittels "Solid Union" verschmolzen. Wie in Abb. 56 wurde die Winkelhalbierende zwischen allen Vektoren und das Kreuzprodukt aus den jeweils dazugehörigen Vektoren gebildet. Mithilfe der beiden Vektoren lassen sich die jeweiligen Schnittebenen bilden. Anschließend können die Schnittebenen genutzt werden um die Volumenkörper der vier Profile zu zerschneiden. Dazu wurde ein Python-Script benutzt, das von Arie-Willem de Jongh geschrieben wurde. Dieses Script ermöglicht die Zerteilung eines Breps anhand einer Ebene. Dieser Vorgang ist zwar in Grasshopper möglich, jedoch nicht auf solch einfache Art, wie mit dem Script.

Wie in Abb. 57 dargestellt, können sich die so getrennten Profile in der Mitte teilweise überlappen. Um dies zu verhindern können die Schnittebenen der beiden anliegenden Profile genutzt werden. Jedes der Profile wird mit zwei Ebenen geschnitten. Mithilfe der beiden Schnittgeraden dieser insgesamt vier Ebenen kann eine weitere Schnittebene

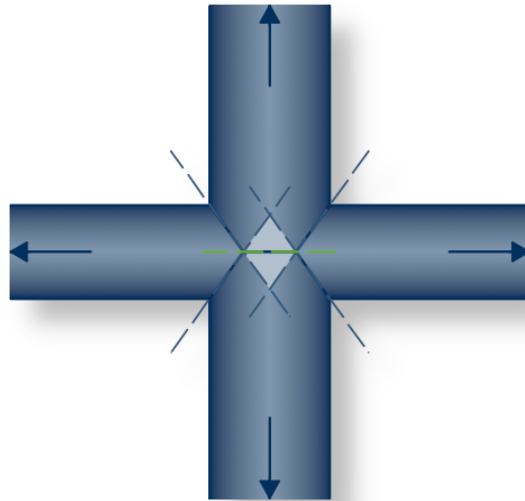


Abb. 57: Definition weiterer Schnittebenen
Quelle: Eigene Darstellung

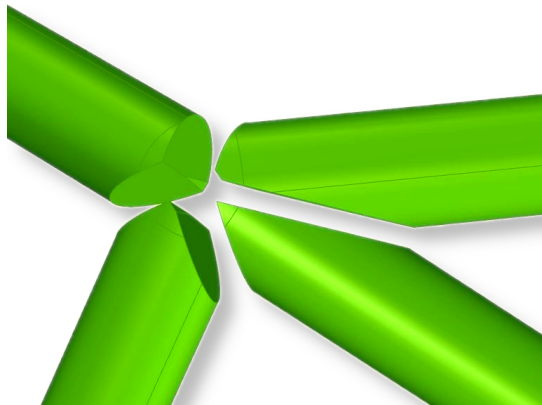


Abb. 58: Darstellung des geschnittenen Fassadenknotens
Quelle: Eigene Darstellung

aufgespannt werden. Mit dieser Ebene sind die Profile weiter zu zerschneiden, um so einen sauberen Schnitt zu erhalten. Damit ergibt sich, dass jedes Profil mit je zwei bis drei Schnitten an den Knoten angepasst werden muss. In Abb. 58 sind die zerteilten Profile dargestellt.

Zuletzt wurden Zylinder zum Ausschneiden von späteren Bolzenlöchern hinzugefügt und von dem Volumenkörper abgezogen. Die Anzahl der Bolzen und die Größe der Löcher ist dabei über einen Slider steuerbar. Hier erfolgte der letzte Verschneidvorgang nicht ganz sauber, sodass einige der Zylinder nicht richtig entfernt werden. Daher wurde der Volumenkörper noch in Rhinoceros 6 von überflüssiger Geometrie bereinigt und eine Materialdicke vergeben.

Dabei zeigte sich, dass das Geometriemodell des parametrischen Fassadenknotens nicht in einem vollständigen Grasshopper-Workflow generiert werden konnte, dennoch können

Mithilfe der erstellten Daten alle notwendigen Informationen für die Fertigung generiert werden. Mithilfe der mathematischen Beschreibungen der Schnittebenen können die bei der Herstellung auszuführenden Schnitte eindeutig beschrieben werden.

So entsteht der in Abb. 59 dargestellte parametrische Fassadenknoten. Er basiert auf den Daten aus dem Entwurfsmodell und ist auf einfache Art und Weise weiter anpassbar. Die Grasshopper-Datei, in der der parametrische Fassadenknoten erstellt wurde, sowie das Geometriemodell des fertigen Fassadenknotens liegen in den digitalen Anlagen als "Schubert03.gh" (Grasshopper-Datei), sowie "Schubert04.3dm" bzw. "Schubert04.stl" (Geometriemodell) bei.



Abb. 59: Rendering des parametrischen Fassadenknotens
Quelle: Eigene Darstellung

5 Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, einen Überblick über die Methoden der digitalen Fertigung zu geben und ein parametrisches Modell zu entwickeln, um notwendige Daten, zur Erstellung eines parametrischen Fassadenknotens, daraus zu extrahieren und zu managen.

5.1 Ergebnisse

Zu diesem Zweck wurden in dieser Arbeit sowohl die additiven Fertigungsverfahren, im Sinne der VDI 3405:2014-12 (2014), als auch weitere CNC-Fertigungsverfahren erläutert und diskutiert. Des Weiteren wurde ein Workflow entwickelt, der die wesentlichen Schritte von der Generierung eines digitalen Gebäudemodells bis zur Ausarbeitung eines parametrischen Fassadenknotens, unter Verwendung der Informationen des digitalen Gebäudemodells, umfasst. Dabei wurde mit der Erstellung eines parametrischen Entwurfsmodells begonnen. Dies resultierte in einem fertigen Entwurfsmodell, das genutzt werden konnte um die darin enthaltenen Informationen zu extrahieren und weiter zu verarbeiten. Die Weiterverarbeitung der Daten ermöglichte die Erstellung eines parametrischen Fassadenknotens, der sich automatisiert an die Bedingungen des Knotens anpasst. Des Weiteren sind die Eigenschaften des Fassadenknotens, wie beispielsweise Einbindelänge und Materialstärke, vom Nutzer anpassbar.

Dabei zeigte sich, dass das digitale Geometriemodell des parametrischen Fassadenknotens nicht in einem vollständigen Grasshopper-Workflow generiert werden konnte. Jedoch konnten mithilfe der erstellten Daten alle notwendigen Informationen für die Fertigung generiert werden, da die mathematischen Beschreibungen der Schnittebenen die auszuführenden Schnitte eindeutig beschreiben. Das Geometriemodell wurde, nach der Generierung der Geometrie innerhalb Grasshoppers, händisch in Rhinoceros 6 von überflüssiger Geometrie bereinigt und um die Materialdicke erweitert.

Dabei konnte gezeigt werden, dass eine durchgängige Datennutzung von Entwurf bis Fertigung mit den Methoden der digitalen Fertigung realisierbar ist.

5.2 Ausblick

Wenn die Probleme beim Verschneiden der Geometrie behoben werden können, steht einer vollständigen Umsetzung eines digitalen Fassadenknotens innerhalb Grasshoppers nichts mehr im Wege. So können die Knoten vollständig automatisiert generiert und die Schnittinformationen des gesamten Gebäudes ermittelt werden. Die hat den Vorteil, dass dann nicht mehr jeder Knoten einzeln betrachtet und erstellt werden muss.

Ein weiterer wichtiger Schritt wäre die Implementierung von realen Fassadenprofilen. Dadurch können Fassadenknoten für reale Anwendungsfälle generiert werden. Daraufhin müssten weitere Untersuchungen hinsichtlich der Fertigung, der strukturellen Eigenschaften und der Wasserdichtigkeit der Knoten vorgenommen werden.

Auch das aufgezeigte Entwurfsmodell kann weiter entwickelt werden, sodass mehr Freiheiten im Entwurfsprozess integriert werden. Die Ansätze dafür, wie etwa eine vollständige Parametrisierung der Grundrisskurve in Abhängigkeit der bebaubaren Fläche, wurden bereits in Kapitel 4.2 angesprochen. Diese Ansätze können noch ausgearbeitet und in das Entwurfsmodell umgesetzt werden.

Zudem sind Lösungsansätze für die Implementierung des erstellten Gebäudemodells und des digitalen Fassadenknotens in ein BIM-Projekt zu finden. So können die Vorteile der entwerferischen Freiheiten von Grasshopper und Rhinoceros 6 mit den Vorteilen eines strukturierten Gebäudemodells kombiniert werden.

Literaturverzeichnis

- Aksamija, A., Guttman, M., Rangarajan, H. P. & Meador, T. (2011), 'Parametric control of bim elements for sustainable design in revit - linking design and analytical software applications through customization', *in: Perkins+Will Research Journal Vol. 03.01* p. 31 bis 45.
- DIN 2310-6:2003-06 (2003), *Thermisches Schneiden - Teil 6: Einteilung, Prozesse.*
- DIN 66025-1:1983-01 (1983), *Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen - Allgemeines.*
- DIN 8580:2003-09 (2003), *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einleitung.*
- Duden (2018), [online] <https://www.duden.de/> [Zugriff am 15.12.2018].
- DUS Architekten (o. D.), '3D Print Canal House', [online] <http://houseofdus.com/#project-3d-print-canal-house> [Zugriff am 19.01.2019].
- Fahrenwaldt, H. & Schuler, V. (2009), *Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*, Vieweg+Teubner Verlag.
- Ferenc, K. (2007), 'Cutting with water jet', *in: Welding International*, 21:10 pp. 730 bis 735, DOI: 10.1080/09507110701668747.
- Fritz, A. H. (2018), 'Fertigungstechnik'.
- Gartner, J. (2011), 'Teil 1: Entwicklung und Geschichte der 3D-Drucktechnologie', [online] <https://3druck.com/grundkurs-3d-drucker/teil-1-entwicklung-und-geschichte-der-3d-drucktechnologie-342079/> [Zugriff am 27.01.2019].
- Gebhardt, A. (2017), *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG.
- Gibson, I., Rosen, D. & Stucker, B. (2014), *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, SpringerLink : Bücher, Springer New York.
- Grotz, M. (2017), *CNC-Technik in der Aus- und Fortbildung*, number ISBN 978-3-8085-1916-5, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG.

- Haute Innovationen (2015), '3D-Druck für den Häuserbau', [online] <http://www.haute-innovation.com/de/magazin/innovative-fertigung/gedruckte-architektur-kamer-maker-win-sun.html> [Zugriff am 19.01.2019].
- Hoffmann, D.-P. J. (2010), 'Laser in der industriellen Fertigung', [online] https://www.igp.fraunhofer.de/content/dam/agp/de/documents/Lehre/Skripte/AFV/Laser-Fertigungstechnik-2010_Teil_I_tcm101-168833.pdf [Zugriff am 22.12.2018].
- Hoffmann, G. (2019), 'Schneidwissen - Autogenschneiden', [online] <https://www.schneidforum.de/schneidwissen/autogenschneiden.html> [Zugriff am 04.01.2019].
- Hügel, H. & Graf, T. (2009), *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren*, Vieweg Studium, Vieweg + Teubner.
- Joachim Herz Stiftung (o. D.), 'Laser', [online] <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/laser> [Zugriff am 19.01.2019].
- Kaast (2017), 'kaast.de', [online] https://www.kaast.de/_technologie/ [Zugriff am 18.12.2018].
- Kief, H. B., Roschiwal, H. A. & Schwarz, K. (2017), *CNC-Handbuch : CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis*, Hanser, München :.
- Knauf Interfer SE (2018), 'Ermittlung des Kohlenstoffäquivalents (CEV)', [online] <https://www.knauf-interfer.de/service/online-tools/cev-rechner/> [Zugriff am 04.01.2019].
- Krämer, A. (2018), 'Die Zukunft ist der 3D-Druck: BMW eröffnet 2019 einen Campus für additive Fertigung in Bayern', [online] <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/bmw-campus-fuer-additive-fertigung-27387473/> [Zugriff am 27.01.2019].
- Kunz, M. (o. D.), 'Die erschließung der modellsammlung frei otto', [online] https://edoc.hu-berlin.de/bitstream/handle/18452/19218/18_kunz.pdf?sequence=1 [Zugriff am 19.01.2019].
- Linde AG (2017), 'Autogentechnik Expertenwissen', [online] <https://www.gasandmore.de/de/schweissen/autogentechnik/autogentechnik-expertenwissen> [Zugriff am 04.01.2019].
- Liptau, R. (2018), *Architekturen bilden: Das Modell in Entwurfsprozessen der Nachkriegsmoderne*, transcript Verlag.
- Loughborough University AMRG (2018), 'About Additive Manufacturing', [online] <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/> [Zugriff am 27.01.2019].
- LPS-Lasersysteme (2018), 'Polarisation', [online] https://www.lps-laser.de/lexikon/polarisation_56.htm [Zugriff am 22.12.2018].

- Mair, I. (2017), 'Polywood - das etwas andere (kunst)holz', [online] <https://www.garten-und-freizeit.de/magazin/polywood> [Zugriff am 18.12.2018].
- Menezes, D. L. (2016), Potential of Additive Manufacturing for Point Fixed Glazing Systems, mathesis, Hochschule Ostwestfalen Lippe University of Applied Sciences.
- Rattat, C. (2017), *CNC milling for makers: basics - techniques - applications*, english edition edn, Rocky Nook.
- Reddy, P. (2016), 'Digital Light Processing (DLP)', [online] <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-technology-overview/> [Zugriff am 13.12.2018].
- Saenger, A. (2015), 'Cnc programmierung mit g-code', [online] <https://www.precifast.de/cnc-programmierung-mit-g-code/> [Zugriff am 19.01.2019].
- Salzmann, W. (2013), 'Kohärenz', [online] <https://physik.wissenstexte.de/kohaerenz.htm> [Zugriff am 22.12.2018].
- Schmid, D. M. (2015), *Additive Fertigung mit selektivem Lasersintern (SLS): Prozess- und Werkstoffüberblick*, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schwab, S. (2017), 'Laserschneiden - Maßgeschneiderte Prozesse für Stent & Co', [online] <https://medizin-und-technik.industrie.de/technik/fertigung/massgeschneiderte-prozesse-fuer-stent-co/> [Zugriff am 19.12.2018].
- SIGRIST-PHOTOMETER AG (o. D.), [online] <https://www.photometer.com/de/GlossaryEntry/Monochromasie/> [Zugriff am 22.12.2018].
- Stauch, F. (2016), Untersuchung der parametrischen modellierung von bogenbrücken aus beton mit dynamo und revit, candthesis, Technische Universität München.
- Strauß, H. (2013), *AM Envelope - The potential of Additive Manufacturing for façade construction*, TU Delft, 2013.
- Strauß, H., AG, E. P. P. & Knaack, U. (2015), 'Additive Manufacturing for Future Facades: The potential of 3D printed parts for the building envelope', *Journal of Facade Design and Engineering* 3 (2015) pp. 225 -- 235.
- threedom.de (2018), 'Material Jetting - (Polyjet / Multijet Modeling)', [online] <https://threedom.de/material-jetting> [Zugriff am 10.12.2018].
- Trumpf (2017), 'Unternehmensprofil 2017 / 18 - vor der zeit'.
- Trumpf (2018), 'Laserschneiden und Laserbohren', [online] https://www.trumpf.com/de_DE/anwendungen/laserschneiden/ [Zugriff am 19.12.2018].

VDI 3405:2014-12 (2014), *Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen*.

Weber, Dr. med. M. & Castrucci, Dr. med. M. (2008), [online] https://www.kardiologie-muenster.de/de/fuer_patienten/ballonkatheter_stent [Zugriff am 24.01.2019].

Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C., Lentjes, J., Spath, D., Constantinescu, C. & Lentjes, J. (2013), *Digitale Produktion*, Springer-Verlag.

Wikipedia (2018), 'Stent', [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Stent> [Zugriff am 19.12.2018].

Zieler, J. (2018), '10 Jahre additive Fertigung bei BMW: BMW Group fertigt über eine Million Fahrzeugkomponenten mit dem 3D-Drucker', [online] <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/bmw-zehn-millionen-teile-aus-3d-drucker-27456633/> [Zugriff am 27.01.2019].

Anlagenverzeichnis

- 1 Digitaler Bericht der Projektarbeit - Schubert00Bericht.pdf (digital auf der CD enthalten)
- 2 Rhinoceros 6-Datei der Grundrisskurve - Schubert01.3dm (digital auf der CD enthalten)
- 3 Grasshopper-Datei des Entwurfsmodells - Schubert02.gh (digital auf der CD enthalten)
- 4 Grasshopper-Datei der parametrischen Fassadenknotens - Schubert03.gh (digital auf der CD enthalten)
- 5 Digitales Geometriemodell des parametrischen Fassadenknotens - Schubert04.3dm und Schubert04.stl (digital auf der CD enthalten)
- 6 Digitales Geometriemodell des Entwurfes - Schubert05.3dm und Schubert05.stl (digital auf der CD enthalten)
- 7 Grasshopper-Datei der ungleich geteilten Fassade - Schubert06.gh (digital auf der CD enthalten)