

# Diplomarbeit

Nr. MB/02/2024

## Konzeption und Entwurf eines Multimaterial-3D-Druckkopfes

eingereicht bei der Fakultät Automobil- und Maschinenbau  
der Westsächsischen Hochschule Zwickau  
am 06.01.2025

zur Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: **cand. ing. P o h l m a n n , M a r c**

geb. am: 05.06.1998

Studiengang Maschinenbau  
Schwerpunkt Maschinenkonstruktion

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Carsten Keller  
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Daniel John  
Auftraggeber: Westsächsische Hochschule Zwickau

# **Autorenreferat**

Die vorliegende Diplomarbeit untersucht im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Möglichkeit der Integration eines Multimaterialdruckkopfes in den 3D-Drucker Modix Big Meter oder alternativ in eine Roboterzelle. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung und Bewertung konzeptioneller Ausführungsvarianten, um eine optimale Lösung für die Integration zu identifizieren und einen ersten konstruktiven Entwurf abzuleiten.

Zu Beginn werden die technischen Grundlagen des Modix Big Meters, der Roboterzelle sowie des Multimaterialdruckkopfes dargestellt, um die Rahmenbedingungen und Anforderungen klar zu definieren. Anschließend erfolgt eine umfassende Machbarkeitsanalyse, in der technische Kompatibilitäten, mögliche Herausforderungen und Integrationsoptionen untersucht werden.

Die entwickelten Varianten werden anhand definierter Kriterien wie technische Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Flexibilität bewertet. Die bevorzugte Lösung wird detailliert ausgearbeitet und durch technische Zeichnungen und Simulationen validiert. Eine abschließende Bewertung der Lösung zeigt deren Potenzial für den praktischen Einsatz auf.

Die Ergebnisse der Arbeit liefern eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Weiterentwicklung und Integration von Multimaterialdruckköpfen in industrielle Anwendungen und eröffnen neue Perspektiven für additive Fertigungsverfahren.

# **Erklärung zur selbstständigen Anfertigung der Arbeit**

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig angefertigt habe.

Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u. a. sind unter Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit oder eine ähnliche Arbeit mit in Teilen wesentlicher Inhaltsübereinstimmung noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Zwickau, am 06.01.2025

.....

Marc Pohlmann

# **Vorwort**

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen meines Studiums des Maschinenbaus an der Westsächsischen Hochschule Zwickau mit der Vertiefungsrichtung Konstruktion. Ziel der Arbeit war es, die Machbarkeit der Integration eines Multimaterialdruckkopfes in den 3D-Drucker Modix Big Meter oder alternativ in eine Roboterzelle zu untersuchen und eine optimale technische Lösung zu entwickeln.

Das Thema dieser Arbeit vereint meine persönliche Begeisterung für innovative Fertigungstechnologien und die Herausforderungen des konstruktiven Maschinenbaus. Insbesondere die Vielseitigkeit und die wachsende Bedeutung der additiven Fertigung haben mein Interesse an diesem Thema geweckt und motiviert, praxisnahe Lösungsansätze zu entwickeln.

Ich hoffe, dass die Ergebnisse dieser Arbeit einen praktischen Beitrag zur Weiterentwicklung der additiven Fertigung leisten und als Grundlage für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte dienen können.

Zwickau, den 06.01.2025

Marc Pohlmann

**Inhaltsverzeichnis****Verzeichnis der Abbildungen .....IV****Verzeichnis der Tabellen .....VI****Abkürzungen und Formelzeichen.....VII**

|          |                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung.....</b>                                        | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Theoretische Grundlagen .....</b>                          | <b>2</b>  |
| 2.1      | Additive Fertigung .....                                      | 2         |
| 2.2      | Fused Filament Fabrication.....                               | 2         |
| 2.3      | Multi-Material-3D-Druck .....                                 | 4         |
| 2.3.1    | Funktionsweise und Grundprinzipien .....                      | 4         |
| 2.3.2    | Anwendungsgebiete und Vorteile.....                           | 5         |
| 2.3.3    | Herausforderungen und Einschränkungen.....                    | 7         |
| 2.4      | „Big Meter“ und Roboterzelle .....                            | 8         |
| 2.4.1    | Beschreibung der vorhandenen Systeme .....                    | 8         |
| 2.4.2    | Einsatzbereiche und bisherige Funktionen .....                | 9         |
| 2.4.3    | Potenzial für eine Aufrüstung mit Multimaterialdruckkopf..... | 13        |
| <b>3</b> | <b>Konzeptentwicklung .....</b>                               | <b>14</b> |
| 3.1      | Funktionsanalyse .....                                        | 14        |
| 3.1.1    | Gesamtfunktion .....                                          | 14        |
| 3.1.2    | Allgemeine Funktionsstruktur .....                            | 15        |
| 3.1.3    | Bekannte Multimaterial-Systeme.....                           | 17        |
| 3.1.4    | Lösungsfindung „Filamentwechsel“ .....                        | 25        |
| 3.2      | Teillösungen.....                                             | 26        |
| 3.2.1    | Energieumwandlung .....                                       | 26        |
| 3.2.2    | Regelung der Raumtemperatur.....                              | 26        |
| 3.2.3    | Maschinensteuerung.....                                       | 28        |

|          |                                                 |           |
|----------|-------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.4    | Speicherung des Filaments.....                  | 30        |
| 3.2.5    | Filamentzuführung .....                         | 33        |
| 3.2.6    | Filamentschmelzung .....                        | 36        |
| 3.2.7    | Kabelführung.....                               | 37        |
| 3.2.8    | Werkzeugbewegung .....                          | 37        |
| 3.2.9    | Parken des Werkzeuges .....                     | 44        |
| 3.2.10   | Positionierung des Werkzeuges.....              | 45        |
| 3.2.11   | Fixierung des Werkzeugs.....                    | 49        |
| 3.2.12   | Einstellung des Druckbettes.....                | 51        |
| 3.2.13   | Beheizen des Druckbettes .....                  | 53        |
| 3.2.14   | Bewegung des Druckbettes .....                  | 53        |
| 3.3      | Morphologischer Kasten .....                    | 55        |
| 3.4      | Bewertung .....                                 | 57        |
| 3.4.1    | Bewertungskriterien .....                       | 57        |
| 3.4.2    | Gewichtung der Kriterien.....                   | 58        |
| 3.4.3    | Bewertung .....                                 | 58        |
| <b>4</b> | <b>Entwurf.....</b>                             | <b>60</b> |
| 4.1      | Maschinensteuerung.....                         | 60        |
| 4.1.1    | Hardware .....                                  | 60        |
| 4.1.2    | Software .....                                  | 63        |
| 4.2      | Parken des Werkzeugs .....                      | 65        |
| 4.3      | Positionieren und Fixieren des Werkzeuges ..... | 66        |
| <b>5</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>        | <b>69</b> |
| 5.1      | Zusammenfassung.....                            | 69        |
| 5.2      | Ausblick.....                                   | 70        |
|          | <b>Quellenverzeichnis.....</b>                  | <b>71</b> |

## Verzeichnis der Abbildungen

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: FFF-Druckverfahren /2/ .....                                                       | 3  |
| Abbildung 2: Gesamtfunktion.....                                                                | 15 |
| Abbildung 3: Funktionsstruktur .....                                                            | 16 |
| Abbildung 5: Y-Gabelung /19/.....                                                               | 18 |
| Abbildung 4: Multi-Material-Upgrade 3 von Prusa /18/ .....                                      | 18 |
| Abbildung 6: Diamond Nozzle /20/ .....                                                          | 19 |
| Abbildung 7: Palette von Mosaic /21/ .....                                                      | 20 |
| Abbildung 8: E3D Kraken /22/ .....                                                              | 21 |
| Abbildung 9: Prinzipielle Funktionsweise der Switching Multi Nozzle /23/.....                   | 22 |
| Abbildung 10: IDEX-Upgrade des Big Meter .....                                                  | 23 |
| Abbildung 11: Werkzeugwechsler im Prusa XL /24/ .....                                           | 24 |
| Abbildung 12: Funktionsstruktur "Filamentwechsel" .....                                         | 25 |
| Abbildung 13: Duex5-Erweiterungsboard /26/ .....                                                | 29 |
| Abbildung 14: SUNLU FilaDryer S4 /27/.....                                                      | 31 |
| Abbildung 15: KIT RepBox v2.5 von repkord /28/.....                                             | 31 |
| Abbildung 16: Vakuumierset für die Filamentlagerung /29/ .....                                  | 32 |
| Abbildung 17: Schematische Darstellung des Direct-Drive-Extruders /30/ .....                    | 34 |
| Abbildung 18: Schematische Darstellung des Bowden-Extruders /30/ .....                          | 34 |
| Abbildung 19: Konzeptdarstellung des Biegewellen-Extruders Flex3Drive von<br>Mutkey3D /31/..... | 36 |
| Abbildung 20: Kabelführung des Big Meter .....                                                  | 37 |
| Abbildung 21: Kartesisches System /34/ .....                                                    | 39 |
| Abbildung 22: CoreXY-System /34/ .....                                                          | 40 |
| Abbildung 23: Delta-System /34/ .....                                                           | 41 |
| Abbildung 24: 3D-Drucker von Polar3D mit polaren Bewegungssystem /34/ .....                     | 42 |
| Abbildung 25: HIWIN-Profilschienenführung .....                                                 | 43 |
| Abbildung 26: Kelvin-Kinematiksystem /35/.....                                                  | 46 |
| Abbildung 27: Maxwell-Kinematiksystem /35/.....                                                 | 47 |
| Abbildung 28: Quasikinematische Verbindung und Kontaktwinkel /36/ .....                         | 48 |
| Abbildung 29: Hohlschaftkegel (Fügepostion und Spannpostion) /37/ .....                         | 49 |
| Abbildung 30: Duet 2 Wifi Board /42/.....                                                       | 61 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 31: Erweiterungsboard DueX 5 /26/ .....                            | 62 |
| Abbildung 32: Extruder des Big Meter .....                                   | 65 |
| Abbildung 33: Theoretische Halterung des Werkzeugwechslers /43/ .....        | 66 |
| Abbildung 34: schematische Darstellung der kinematischen Kopplung /17/ ..... | 67 |
| Abbildung 35: Zeichnung des Permanentelektromagneten /44/ .....              | 68 |

## Verzeichnis der Tabellen

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Morphologischer Kasten .....            | 55 |
| Tabelle 2: Paarweise Vergleich der Kriterien ..... | 58 |
| Tabelle 3: gesamte Konzeptbewertung .....          | 59 |

## Abkürzungen und Formelzeichen

| Abkürzung | Erläuterung                    |
|-----------|--------------------------------|
| FFF       | Fused Filament Fabrication     |
| FDM       | Fused Deposition Modeling      |
| FLM       | Fused Layer Modeling           |
| PLA       | Poly lactide                   |
| PVA       | Polyvinylalkohol               |
| ABS       | Acrylnitril-Butadien-Styrol    |
| PEEK      | Polyetheretherketon            |
| PEKK      | Polyetherketonketon            |
| PETg      | Polyethylenterephthalat-Glykol |
| ASA       | Acrylnitril-Styrol-Acrylat     |
| PC        | Polycarbonat                   |

# 1 Einleitung

In den zurückliegenden Jahren durchlief die additive Fertigung eine beispiellose Entwicklung, die gegenwärtig eine Vielzahl an Möglichkeiten bietet, um komplexe und individuell angepasste Bauteile zu produzieren. Insbesondere der Multi-Material-3D-Druck, bei dem verschiedene Materialien in einem einzigen Druckprozess kombiniert werden, eröffnet neue Perspektiven für industrielle Anwendungen. Die Kombination unterschiedlicher Materialeigenschaften, wie beispielsweise Flexibilität, Härte oder chemische Beständigkeit, ermöglicht die Herstellung von Bauteilen, die präzise auf die Anforderungen ihrer jeweiligen Einsatzbereiche abgestimmt sind. Dies führt nicht nur zur Entwicklung multifunktionaler Objekte, sondern auch zur Reduktion von Fertigungsschritten und Nachbearbeitungsaufwand.

Gegenstand der vorliegenden Diplomarbeit ist die Untersuchung der Möglichkeit der Aufrüstung eines bestehenden FDM-3D-Drucksystems oder alternativ einer Roboterzelle mit einem Multimaterialdruckkopf. Ziel ist die Erstellung einer Machbarkeitsstudie, in der verschiedene technische Konzepte entwickelt, analysiert und bewertet werden. Basierend auf einer umfassenden Bewertung der Konzepte wird eine bevorzugte Lösung abgeleitet und ein erster konstruktiver Entwurf erstellt.

Ein besonderes Augenmerk gilt dabei der Untersuchung der mit der Integration eines Multimaterialdruckkopfs verbundenen technischen Herausforderungen und Einschränkungen. Aspekte wie Materialkompatibilität, Steuerungstechnik und Automatisierungsgrad spielen dabei eine zentrale Rolle. Parallel dazu werden die Potenziale des Multi-Material-Drucks für verschiedene Anwendungsgebiete betrachtet, um die wirtschaftliche und technische Relevanz des Projekts zu verdeutlichen.

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, eine fundierte Grundlage für die Weiterentwicklung des bestehenden Drucksystems zu schaffen und gleichzeitig einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Multi-Material-3D-Drucks und seiner industriellen Anwendungen zu leisten.

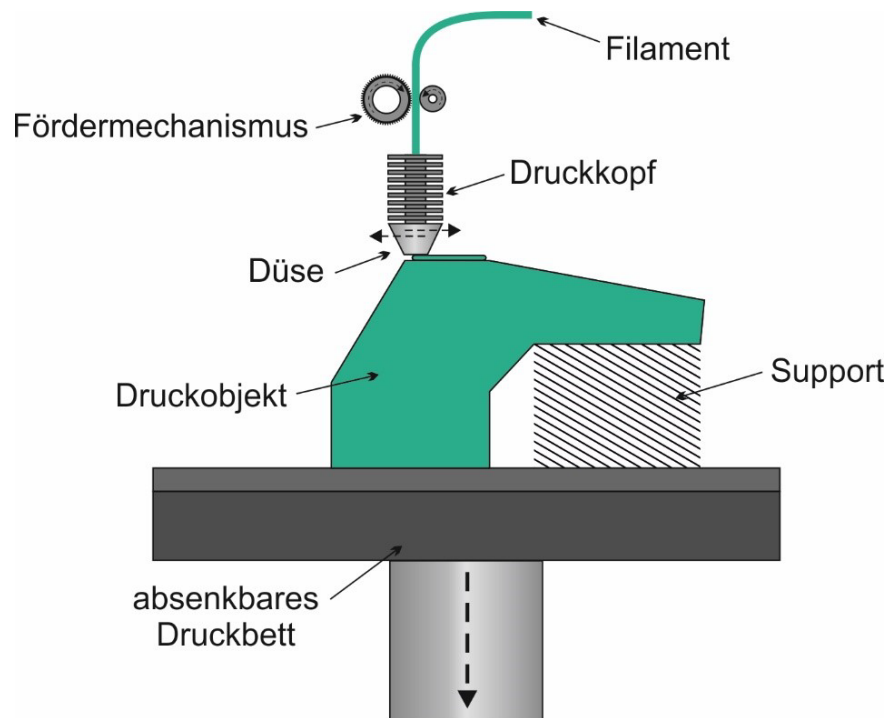
## **2 Theoretische Grundlagen**

### **2.1 Additive Fertigung**

Gemäß DIN 8580 wird in der Fertigungstechnik eine Unterscheidung in sechs Untergruppen vorgenommen: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaften ändern. Die erste Untergruppe, das sogenannte "Urformen", umfasst gemäß DIN 8580 alle Fertigungsverfahren, bei denen aus einem formlosen Stoff ein fester Körper mit geometrisch definierter Form hergestellt wird. In diese Gruppe fällt seit 2020 auch die additive Fertigung. Die additive Fertigung umfasst demnach alle Fertigungsverfahren, bei denen Material Schicht für Schicht aufgetragen wird. Der schichtweise Aufbau erfolgt computergesteuert nach vorgegebenen Maßen und Formen. Der Einsatz sowohl flüssiger als auch fester Werkstoffe ist möglich, wobei die stattfindenden Prozesse neben den physikalischen auch chemische Härtungs- und Schmelzprozesse umfassen. Typische Materialien, die in diesem Kontext zum Einsatz kommen, sind Kunststoffe, Kunstharze, Keramiken, Beton im Bauwesen und Biomaterialien in der Medizintechnik. /1/

### **2.2 Fused Filament Fabrication**

In wissenschaftlichen Foren und im Internet findet eine Vielzahl von Bezeichnungen für das gleiche Fertigungsverfahren Verwendung, darunter Fused Filament Fabrication (FFF), Fused Deposition Modeling (FDM) und Fused Layer Modeling (FLM). Im Jahr 2009 lief das Patent für die FDM-Technologie aus, jedoch blieb der Name Fused Deposition Modeling weiterhin geschützt. In der Folge mussten sich andere Namen für das Verfahren finden und etablieren. Der Verlust des Patents hat eine rasche Diffusion der Technologie begünstigt, sowohl in der Industrie als auch in den Bereichen des semiprofessionellen und des Hobbybereichs. Als Hauptgründe hierfür sind insbesondere die vergleichsweise geringen Kosten, die einfache Handhabung und die leichte Bedienbarkeit zu nennen.



**Abbildung 1: FFF-Druckverfahren /2/**

Im Rahmen des Fertigungsverfahrens Fused Filament Fabrication wird das als thermoplastischer Kunststoff klassifizierte Filament über einen spezifischen Fördermechanismus in den Druckkopf transferiert. Im Druckkopf befindet sich ein Heizelement, welches den Filament-Strang schmilzt und in die Düse leitet. Die Düse, auch als "Nozzle" bezeichnet wird, fährt einen vorprogrammierten Weg ab und trägt den Strang auf dem Druckbett auf. Die zugrundeliegende Funktionsweise wird in Abbildung 1 veranschaulicht. Der Fördermechanismus besteht aus Schrittmotoren, auch Extrudermotoren genannt, und bestimmt die Menge des extrudierten Materials. In Kombination mit dem Düsendurchmesser und der Geschwindigkeit der Druckbewegung ergibt sich ein definierter Materialfluss. Nun trifft der Filament-Strang auf das beheizte Druckbett, welches jedoch kühler als das Material ist, wodurch es zu einer raschen Abkühlung des Filaments und dessen Verfestigung auf dem Druckbett kommt. Der Prozess wird nun um eine Schichtdicke erhöht, wenn der Programmpfad beendet ist und die Schicht, auch als Layer bezeichnet, auf dem Druckbett aufgetragen wurde.

/3/

## **2.3 Multi-Material-3D-Druck**

### **2.3.1 Funktionsweise und Grundprinzipien**

Der Multi-Material-3D-Druck beschreibt ein Verfahren, bei dem mittels eines 3D-Druckverfahrens die Fertigung von Objekten erfolgt, welche die Verwendung mehrerer Materialien in einem einzigen Druckvorgang ermöglicht. Im Gegensatz zum Mehrfarbendruck, bei dem ein Material in verschiedenen Farben verwendet wird, zielt der Multi-Material-3D-Druck darauf ab, die jeweiligen Eigenschaften der Materialien zu kombinieren. Die Auswahl der Materialien wird dabei so getroffen, dass sich unterschiedliche Eigenschaften wie Leitfähigkeit, Härte, Flexibilität, Transparenz und chemische Beständigkeit ableiten lassen, die für spezifische Anwendungen vorteilhaft sind. In vielen Fällen ist es erforderlich, diese Eigenschaften in einem einzigen Objekt zu vereinen, um dessen Funktionalität optimal zu gestalten.

Für einen effizienten Druckprozess ist die Wahl der Technologie und Hardware von entscheidender Bedeutung. Neben der Wahl eines geeigneten Druckers, wie dem Fused Deposition Modeling (FDM)-Drucker von Modix, ist auch die Software zur Vorbereitung der Druckdateien von großer Bedeutung. Hierbei findet spezielle "Slicing-Software" Anwendung, wie etwa Cura oder Simplify3D, um die verschiedenen Materialien präzise auf das Objekt zuzuweisen und den Druckvorgang zu steuern. Darüber hinaus ist die adäquate Konfiguration des Druckers von entscheidender Relevanz, um eine optimale Druckqualität und Materialhaftung zu gewährleisten.

Die schichtweise Fertigung des Objekts ist dabei ein wesentlicher Aspekt. Dabei werden die verschiedenen Materialien in aufeinanderfolgenden Schichten aufgetragen, wobei jede Schicht die gewünschten Eigenschaften des Objekts beeinflusst. Eine präzise Kontrolle des Druckvorgangs ist erforderlich, um die korrekte Verbindung der Materialien und die Übereinstimmung der Eigenschaften des Endprodukts mit den Vorgaben sicherzustellen.

Neben der Vorbereitung des Druckers, der Software und dem eigentlichen Druckvorgang ist die Nachbereitung des Druckobjekts ein weiterer wichtiger Bestandteil des Multi-Material-3D-Drucks. Nach Abschluss des Druckvorgangs können unterstützende Strukturen entfernt werden und das Objekt kann je nach Bedarf weiterbearbeitet werden, um die Oberflächenqualität zu verbessern oder zusätzliche Eigenschaften hinzuzufügen. /4/

### 2.3.2 Anwendungsgebiete und Vorteile

Der Multi-Material-3D-Druck eröffnet vielfältige Anwendungsgebiete und bietet zahlreiche Vorteile, die herkömmliche Fertigungsmethoden ergänzen oder sogar ersetzen können.

#### Anwendungsgebiete:

- **Medizinische Geräte und Prothetik:** Durch die Kombination verschiedener Materialien können patientenspezifische Prothesen und medizinische Geräte hergestellt werden, die sowohl flexible als auch feste Komponenten enthalten. Dies erhöht den Tragekomfort und die Funktionalität. /5/ /6/ /7/
- **Luft- und Raumfahrt:** Die Möglichkeit, Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften in einem Bauteil zu vereinen, ermöglicht die Herstellung leichter und dennoch robuster Komponenten, die den hohen Anforderungen der Branche gerecht werden. /5/ /6/ /7/
- **Automobilindustrie:** Komplexe Bauteile mit integrierten Funktionen, wie z. B. flexible Dichtungen kombiniert mit starren Gehäusen, können in einem einzigen Druckvorgang gefertigt werden, was die Produktionszeit verkürzt, und die Montage vereinfacht. /5/ /6/ /7/
- **Elektronik:** Die Integration von leitfähigen und isolierenden Materialien ermöglicht die Herstellung von funktionalen elektronischen Bauteilen, einschließlich Sensoren und Leiterplatten, direkt aus dem Drucker. /5/ /7/
- **Konsumgüter:** Produkte wie maßgeschneiderte Schuhe oder Sportausrüstungen können durch die Kombination von harten und weichen Materialien in einem Druckvorgang individuell angepasst werden. /5/ /7/

### Vorteile:

- **Erhöhte Designfreiheit:** Der Multi-Material-3D-Druck ermöglicht die Realisierung komplexer Geometrien und die Integration verschiedener Materialeigenschaften in einem einzigen Bauteil, was mit traditionellen Fertigungsmethoden schwer umsetzbar ist. /5/ /6/ /7/ /8/ /12/
- **Reduzierte Montagezeiten:** Da mehrere Materialien in einem Druckvorgang verarbeitet werden können, entfällt die Notwendigkeit, separate Teile zusammenzufügen, was die Produktionszeit und potenzielle Fehlerquellen reduziert. /5/ /6/ /7/ /8/
- **Kosteneffizienz:** Durch die additive Fertigung werden Materialabfälle minimiert, und die Möglichkeit, Prototypen und Kleinserien ohne teure Werkzeuge herzustellen, senkt die Produktionskosten. /5/ /6/ /7/ /8/
- **Funktionale Integration:** Die Kombination von Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften ermöglicht die Herstellung multifunktionaler Bauteile, die beispielsweise sowohl strukturelle als auch elektrische Funktionen erfüllen können. /5/ /6/ /7/ /8/ /12/
- **Schnellere Markteinführung:** Die Fähigkeit, Prototypen und Endprodukte schneller zu produzieren, verkürzt die Entwicklungszyklen und ermöglicht eine raschere Reaktion auf Marktanforderungen. /5/ /6/ /7/ /8/

### 2.3.3 Herausforderungen und Einschränkungen

Der Multi-Material-3D-Druck bietet zahlreiche Vorteile, bringt jedoch auch spezifische Herausforderungen und Einschränkungen mit sich, die bei der Anwendung berücksichtigt werden müssen.

#### Herausforderungen:

- **Unterschiedliche Materialeigenschaften:** Verschiedene Materialien erfordern spezifische Druckeinstellungen hinsichtlich Düsentemperatur, Druckbetttemperatur und Druckgeschwindigkeit. Die Kombination dieser Materialien in einem Druckvorgang kann komplex sein und erfordert präzise Abstimmung, um optimale Ergebnisse zu erzielen. /4/
- **Komplexität der Druckprozesse:** Die Integration mehrerer Materialien in einem einzigen Druck erhöht die Komplexität des Druckprozesses. Dies kann zu höheren Fehlerquoten führen und erfordert sorgfältige Planung und Überwachung. /4/
- **Materialkompatibilität:** Nicht alle Materialien sind miteinander kompatibel. Unterschiedliche thermische und mechanische Eigenschaften können zu Haftungsproblemen oder inneren Spannungen im gedruckten Objekt führen. /4/
- **Anpassung der Werkstoffe:** Viele der aktuell verwendeten Materialien wurden ursprünglich nicht für additive Fertigungsverfahren entwickelt. Dies kann zu Einschränkungen in der Qualität der gedruckten Objekte führen und erfordert eine Anpassung der Werkstoffe an die spezifischen Anforderungen des 3D-Drucks. /4/

**Einschränkungen:**

- **Kostenfaktor:** Die Anschaffung und der Betrieb von Multi-Material-3D-Druckern können kostspielig sein, insbesondere wenn spezielle Materialien oder komplexe Druckköpfe erforderlich sind. /9/
- **Nachbearbeitung:** Gedruckte Objekte mit mehreren Materialien können eine aufwändige Nachbearbeitung erfordern, um die gewünschten Oberflächeneigenschaften zu erzielen oder Stützstrukturen zu entfernen. /9/
- **Technologische Grenzen:** Obwohl der Multi-Material-3D-Druck fortschrittlich ist, gibt es technologische Grenzen hinsichtlich der Anzahl der kombinierbaren Materialien und der erreichbaren Präzision. /9/
- **Designbeschränkungen:** Trotz erhöhter Designfreiheit gibt es weiterhin Beschränkungen hinsichtlich der Geometrie und Struktur von Objekten, die mit Multi-Material-3D-Druck realisiert werden können. /9/

## **2.4 „Big Meter“ und Roboterzelle**

### **2.4.1 Beschreibung der vorhandenen Systeme**

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die bestehenden Systeme gegeben, die als Basis für die vorliegende Diplomarbeit dienen. Hierzu zählen sowohl der Fused Deposition Modeling (FDM)-Drucker "Big Meter" von Modix als auch die vorhandene Roboterzelle. Die detaillierte Beschreibung dieser Systeme ist wesentlich für das Verständnis der geplanten Machbarkeitsstudie.

Der Modix-Drucker zeichnet sich durch sein großes Druckvolumen und seine Anpassungsfähigkeit aus. Das Druckvolumen beträgt 1010 x 1010 x 1010 mm, was ausreichend Platz für große und komplexe Objekte bietet. Zudem kommt ein Hochleistungsextruder zum Einsatz, der sowohl thermoplastische Kunststoffe als auch Verbundwerkstoffe verarbeiten kann. Die Bewegungsmechanik basiert auf einem Riemenantriebssystem, welches eine

genaue Positionierung des Druckkopfs in X-, Y- und Z-Richtung ermöglicht. Die Steuerung erfolgt über eine mikrocontrollerbasierte Einheit mit einer Open-Source-Firmware von RepRap. Die daraus resultierende, als flexibel zu bezeichnende Steuerung bietet dem Nutzer zahlreiche Anpassungsmöglichkeiten und unterstützt gängige Kommunikationsschnittstellen wie USB und Wi-Fi.

Die Roboterzelle ist eine autonome Arbeitsstation, welche einen Industrieroboterarm enthält. Der Roboterarm ist mit sechs Achsen ausgestattet, was eine hohe Flexibilität und Beweglichkeit ermöglicht und somit ideal für präzise Aufgaben wie das Materialhandling oder die Montage ist. Die Roboterzelle ist mit einer robusten Steuerung ausgestattet, die eine sichere Arbeitsumgebung gewährleistet. Sie umfasst Sicherheitsvorkehrungen wie einen Not-Aus-Schalter, Lichtschranken und weitere Schutzvorrichtungen. Die Roboterzelle kann mit verschiedenen Endeffektoren ausgestattet werden, darunter Greifer und Montagemodule, wodurch eine breite Palette von Anwendungen ermöglicht wird. Die Roboterzelle ist mit verschiedenen Schnittstellen ausgestattet, die eine Kommunikation und Koordination mit anderen Teilen der Produktionslinie ermöglichen. Die Roboterzelle ist folglich ein vielseitiger Bestandteil der Fertigung.

### 2.4.2 Einsatzbereiche und bisherige Funktionen

Großformatige 3D-Drucker, wie zum Beispiel der „Big Meter“, sind in den letzten Jahren in verschiedenen Industrien und Fachbereichen wichtiger geworden und haben an Bedeutung gewonnen. Dies haben sie primär der Fähigkeit zu verdanken, großvolumige Objekte und Strukturen herzustellen. Diese Anwendungsmöglichkeiten bieten sowohl wirtschaftliche als auch ökologische Vorteile. Im Folgenden werden die wichtigsten Einsatzbereiche der großräumigen 3D-Drucksysteme dargestellt.

- **Bauwesen und Architektur:** Die additive Fertigung ermöglicht die Herstellung von großen Bauteilen und ganzen Gebäudekomponenten in einem Fertigungsschritt, was sowohl die Konstruktions- als auch die Bauprozesse erheblich beschleunigt. Im Zusammenhang mit dem 3D-Druck werden primär die Materialien Beton und faserverstärkte Kunststoffe genutzt, da diese sich für stabile und langlebige Konstruktionen

eigenen. In der Architektur sind vor allem die Reproduzierbarkeit und die Skalierbarkeit der Modelle die größten Vorteile des 3D-Drucks. /12/

- **Luft- und Raumfahrt:** Für die Luft- und Raumfahrt ist der Leichtbau ein sehr wichtiger Faktor, indem der 3D-Druck den herkömmlichen Werkstoffen und Herstellungstechniken überlegen ist. Durch die Reduktion des Materialeinsatzes und den schnellen und unkomplizierten Druck im Vergleich zu konventionellen Verfahren, kann das Gewicht der Bauteile reduziert werden, wodurch der Flugzeugbetreiber Treibstoff einsparen kann und die Zuladung steigern. Eine etwas andere Nutzung des 3D-Drucks, insbesondere der Nutzung des „Big Meter“, stellt die Nutzung im Projekt „EDEN ISS“ dar. Hierbei wurde ein 3D-Drucker gesucht der Funktionsteile und Prototypen, in Originalmaßstab, für das „Bioregenerative Lebenserhaltungssysteme“ herzustellen vermag. Die Wahl auf den „Big Meter“ von Modix, da dieser durch seinen Bauraum auszeichnete. /10/
- **Automobilindustrie:** In der Automobilindustrie stellen insbesondere die Herstellung von Prototypen und die Fertigung von Funktionsbauteilen durch additive Fertigungsverfahren einen bedeutenden Vorteil dar. Auch spielt die Personalisierung des Fahrzeugs in Bezug auf Kundenwünsche eine wachsende Rolle, so hat der britische Automobilhersteller „MINI“ für seine Kunden eine Reihe an Individualisierungsmöglichkeiten angeboten, zum Beispiel Dekorleisten für die Beifahrerseite im Innenraum, LED-Türprojektoren oder LED-Einstiegsleisten. /11/
- **Maschinenbau und Fertigung:** Im Vergleich zu konventionellen Verfahren ist der 3D-Druck günstiger, technisch weniger anspruchsvoll und schneller, wodurch Produkte und Kleinserien effizienter produziert werden können. Des Weiteren können Werkzeuge Eigenschaften aufweisen, die nur durch den 3D-Druck möglich sind, Ersatzteile schnell und ohne großen Aufwand gefertigt werden und Sonderanfertigungen umgesetzt werden können, für die es mittlerweile keine Ersatzteile mehr gibt, wie zum Beispiel bei Oldtimern. /12/

- **Medizin und orthopädische Anwendungen:** Die zentrale Herausforderung der Medizin, in Bezug auf den 3D-Druck, ist die Herstellung von individuellen und personalisierten Produkten und Hilfsmittel. Hier bietet der 3D-Druck eine hohe Design-Freiheit, wodurch prothetische Produkte, wie zum Beispiel künstliche Kniegelenke, orthopädische Schienen oder auch perspektivisch die Herstellung von Organen und Organteile ein Anwendungsbereich des 3D-Drucks ist und werden kann. /12/
- **Rüstungsindustrie:** Die Rüstungsindustrie, gehört zu den innovativsten Branchen und fördert die Weiterentwicklung des 3D-Drucks maßgeblich. Mit dem 3D-Druck können benötigte Ersatzteile und Ausrüstung vor Ort produziert werden, wodurch die Abhängigkeit auf externen Nachschub entfällt. Des Weiteren können Sonderanfertigungen und Optimierungen durch die additive Fertigung realisiert werden, wie zum Beispiel das Unternehmen toolcraft AG den Hersteller Rheinmetall bei einer Verbesserung des Schützenpanzers „Puma“ unterstützt. /13/

Roboterzellen haben sich in den verschiedensten Industriezweigen etabliert und bieten durch die Automatisierung von Arbeitsprozessen signifikante Vorteile in den Bereichen der Effizienz, der Präzision und der Arbeitssicherheit. Nachfolgend werden einige der wichtigsten Einsatzgebiete und die Funktion der Roboterzelle erläutert. /14/

- **Montage und Fertigung:**

Die Montage von Bauteilen in der Automobil- und Elektronikindustrie werden heutzutage primär von Roboterzellen übernommen, da es sich hierbei um präzise und wiederholbare Prozesse handelt und dies prädestiniert für Roboterzellen ist. Im Genaueren umfasst die Montage Aufgaben wie Schrauben, Schweißen oder auch Verkleben und die Zelle erreicht hohe Qualitätsstandards bei einer kurzen Taktzeit. /15/

- **Bearbeitung und Materialverarbeitung:**

Hauptakteure unter diesem Gesichtspunkt sind die Metall- und Kunststoffindustrie, da diese die Roboterzelle für Schneid-, Fräs-, Schleif- und Polierarbeiten einsetzen. Ähnlich wie bei der Montage und Fertigung, wird die Fähigkeit der präzisen Arbeit der Roboterzelle genutzt, um konstant gute Oberflächenqualitäten zu ermöglichen. /15/

- **Palettieren und Verpacken:**

In Distributionszentren und Warenlagern sind Roboterzellen mittlerweile unverzichtbar, da sie den Versand und Logistik optimieren, indem sie die Produkte schnell und präzise auf der Palette anordnen, wo herkömmliche Verfahren nicht annähernd so effizient sind. Außerdem sind die Roboter an Verpackungsmaschinen angeschlossen und optimieren den Ablauf der Logistikkette. Diese Verpackungsmaschinen sind unter anderem auch Roboterzellen, die die einzelnen Produkte effizient verpackt und auch auf verschiedene Verpackungsarten und -größen schnell reagieren können. Im Falle der Verpackungsroboter in der Konsumgüterindustrie erfüllen sie außerdem erhöhte Hygieneanforderungen. /15/

- **Qualitätskontrolle und Inspektion:**

Neben den produktionstechnischen Merkmalen werden Roboterzellen auch für Qualitätskontrolle genutzt. Hierbei werden Kameras, Lasersensoren und Messtechnik verwendet um Bauteile auf Fehler, Maße und die Oberflächenqualität zu überprüfen. Diese Kontrolle nutzt, wie die anderen Bereiche auch, die hohe Präzision und die Flexibilität. Schlussfolgernd erhöht sich dadurch die Sicherheit während des Prozesses und die Ausschussquote kann reduziert werden. /15/

### **2.4.3 Potenzial für eine Aufrüstung mit Multimaterialdruckkopf**

Die Möglichkeiten einer derartigen Aufrüstung sind im Vergleich zur aktuellen Situation als bemerkenswert zu erachten. Einerseits ist die Produktion komplexer Teile vereinfacht, da separate Komponenten und komplexe Montageprozesse entfallen. Weiterhin wird die Montagezeit drastisch verkürzt, da bisher komplexe Teile aus mehreren Einzelteilen gedruckt werden mussten und dies mit einem Multi-Material-3D-Druckkopf in einem Druckvorgang geschieht. Neben den effizienztechnischen Aspekten eröffnet sich durch den 3D-Druck auch eine neue Designfreiheit. Exemplarisch sei die Luft- und Raumfahrt genannt, in der spezialisierte Komponenten additiv gefertigt werden können. Ein weiteres Beispiel ist die Herstellung personalisierter Implantate und Prothesen in der Medizin, bei der eine weichere und flexiblere Materialschiicht direkt in eine härtere, stützende Struktur integriert werden kann. In der Automatisierungstechnik und der Produktion können durch die Integration von Stützelementen aus löslichem Material aufwändigere Geometrien effizienter und mit deutlich geringerem Nachbereitungsaufwand gefertigt werden. Dies ist insbesondere bei der Produktion von Prototypen und komplexen Bauteilen vorteilhaft, da die Anforderungen effizienter und einfacher erfüllt werden können. /16/

### **3 Konzeptentwicklung**

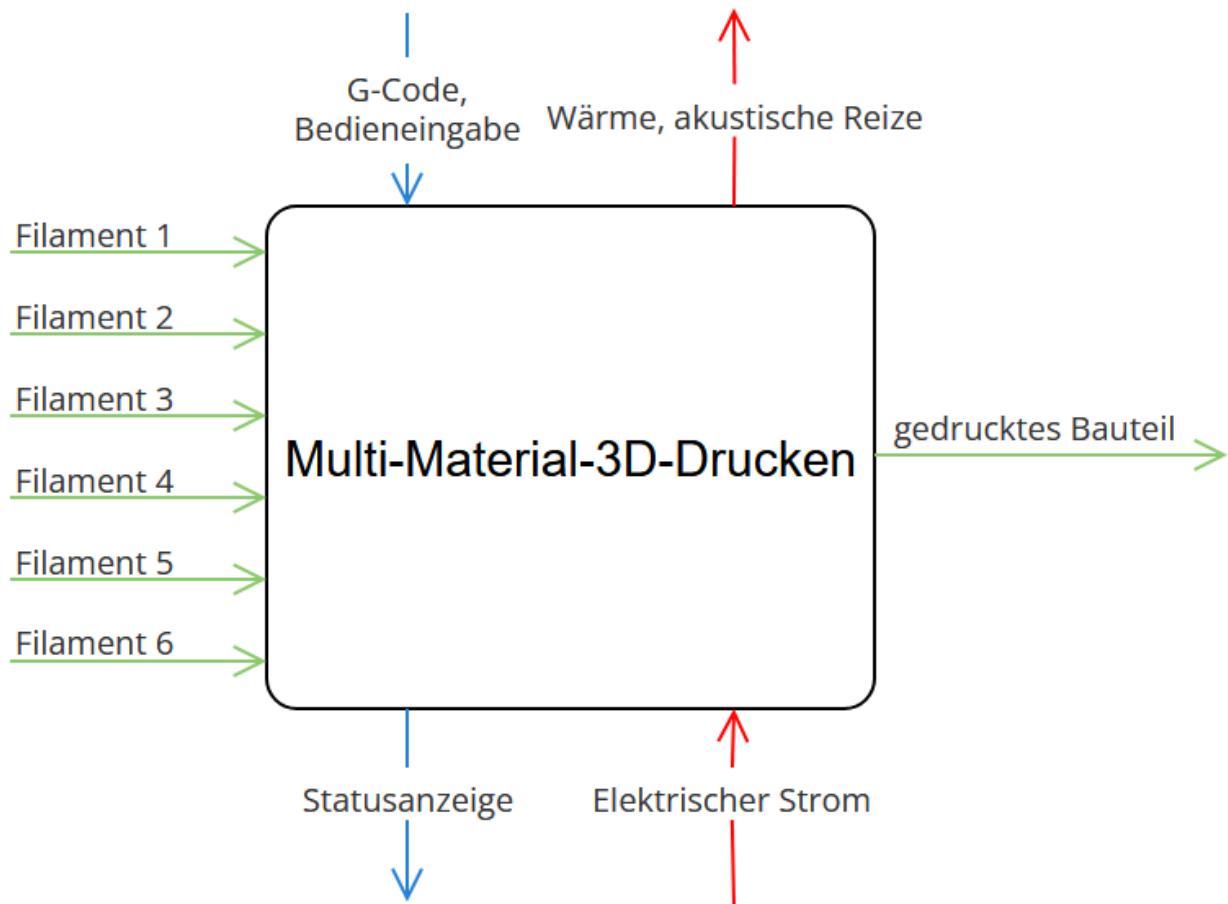
In der Konzeptphase wird zunächst eine Funktionsanalyse durchgeführt, deren Ziel darin besteht, die identifizierten Teilfunktionen in eine übergeordnete Funktionsstruktur zu integrieren. Im Anschluss werden für die Teilfunktionen Lösungen erarbeitet und in einen Morphologischen Kasten integriert. Darauf aufbauend wird ein Entwurf erstellt, der jedoch einer Bewertung unterzogen werden muss, bevor die Umsetzung erfolgt. In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf den 3D-Drucker "Big Meter" von Modix gelegt, da dieser bereits über bestehende Strukturen verfügt, wie beispielsweise ein beheizbares Druckbett, eine erweiterbare Steuerung, eine Extruderanordnung und einen abgeschlossenen Druckraum, der erweiterbar ist.

#### **3.1 Funktionsanalyse**

Die Funktionsstruktur ist das Bindeglied zwischen der Aufgabenklärung und der Lösungssuche und weiterhin werden die gefundenen Funktionen und deren Bezüge zueinander dargestellt. Bei diesem Schritt sind die Funktionen allgemein gehalten, um einen gewissen Entscheidungsspielraum bei der Lösungsfindung sicher zu stellen.

##### **3.1.1 Gesamtfunktion**

Die Gesamtfunktion beschreibt in einer gewollten Einfachheit die Funktion des Produktes. Auch werden stoffliche (grün), energetische (rot) und signaltragende (blau) Flüsse dargestellt und benannt, folgend in Abbildung 2.

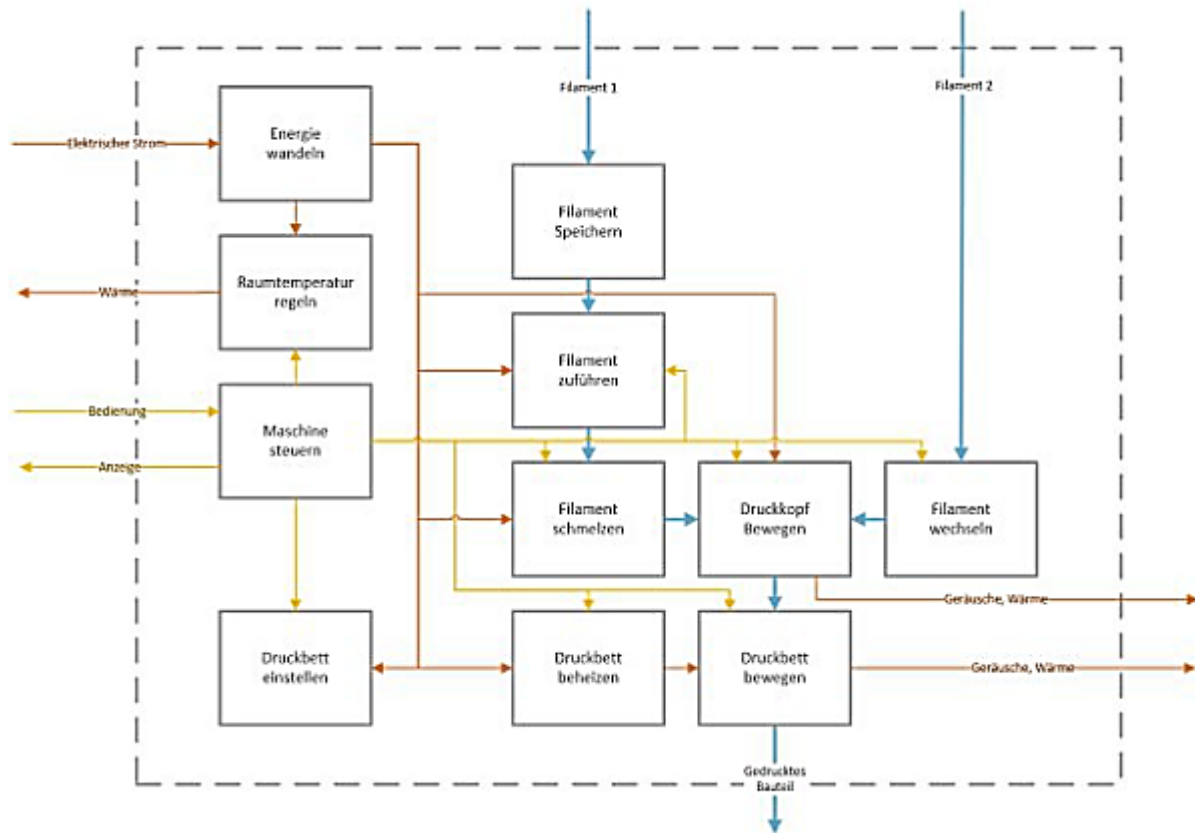


**Abbildung 2: Gesamtfunktion**

Das Ziel ist ein gedrucktes Bauteil mit Hilfe der Verwendung des Produktes, somit ist der stoffliche Fluss der relevanteste. Filament 1 bis 6 stellen die gewünschten Ausgänge dar, wobei es durchaus möglich ist, weitere hinzuzufügen oder vereinzelte Ausgänge zu ignorieren. Der signalgebende Signalfluss ist zum einen bedeutsam für die Bedienung des Druckers, zum anderen muss darüber die steuerungstechnische Thematik gelöst werden. Die energetischen Flüsse sind wichtig, aber in dieser Arbeit von geringerer Relevanz.

### 3.1.2 Allgemeine Funktionsstruktur

Die Funktionsstruktur wird als zielorientiertes Modell dargestellt, folgend in Abbildung 3. Die hierbei gefundenen Funktionen beschreiben das Endprodukt, jedoch werden nicht alle Teilprobleme auch mit Lösungen ausgestattet.



**Abbildung 3: Funktionsstruktur**

Die bis auf Weiteres gezogene Systemgrenze wird schwarz gestrichelt dargestellt. Die erarbeitete Funktionsstruktur beschreibt bisher einen allgemeinen Fused Filament Fabrication-Prozess mit Multiextrusion. Eine weitere Funktionsebene ist notwendig, um relevante Funktionen zu präzisieren. Genauer geht es um die Funktion "Filament wechseln", da es sich hierbei um den Prozess der Eingliederung eines weiteren Filaments handelt. Diese Teilfunktion hat großen Einfluss auf die Konzeptionierung des Gesamtproduktes und somit auch auf die Auswahl der Vorzugsvariante im weiteren Prozess. Die Präzisierung der oben genannten Teilfunktion kann nur realisiert werden, wenn ein Lösungskonzept ausgewählt wird und daran die Basis konstruiert werden kann.

### **3.1.3 Bekannte Multimaterial-Systeme**

Die Eignung verschiedener Lösungsansätze hängt sehr von den gewünschten Zielen ab, beispielsweise ist für den Fertigung mit dem Augenmerk auf Mehrfarbigkeit eine andere Lösung geeigneter als für die Kombination verschiedener Materialien. Dementsprechend ist es von hoher Wichtigkeit die eigenen Anforderungen an den 3D- Drucker zu erkennen. Im Grunde kann man jedoch zwei verschiedene Gruppen unterteilen. Zum einen die Systeme, welche mit einer Düse arbeiten, auch Single-Nozzle-System genannt, und somit den Werkstoff im Druckprozess wechseln und zum anderen die Multi-Nozzle-Systeme, die im Prozess das gesamte Hot-End wechseln. Da der "Big Meter" von Modix bereits über 2 Extruder, das heißt auch 2 Hot-Ends, verfügt, kommen die Single-Nozzle-Systeme mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zum Einsatz. Da aber auch der Blick auf die Roboterzelle geworfen wird, könnte dort eine Lösungsvariante mit einer Düse sein.

#### **3.1.3.1 Single-Nozzle-Systeme**

Die Kalibrierung einer einzigen Druckdüse zum Druckbett ist ein wesentlicher Vorteil der Single-Nozzle-Systeme im Vergleich mit Multi-Nozzle-Systemen, da in diesem System nur eine Druckdüse an das Druckbett ausgerichtet werden muss. Daher werden diese Einzelsysteme primär als Erweiterung beziehungsweise als Upgrade für bereits bestehende Single-Material-Drucker verwendet und sind zudem auch platzsparender. Nachteilig ist bei Einzel-Druck-Systemen das Verbleiben von Materialrückständen bei jedem Filamentwechsel. Dementsprechend ist entweder ein Opferturm (engl. Purge-Tower) oder eine andere Purging-Lösung notwendig, um die vermischten Materialien vom eigentlichen Bauteil fernzuhalten. Des Weiteren ist es wichtig eine Übergangszeit einzuplanen, wenn Druckmaterialien mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften verwendet werden, da das Heizelement die Düse auf die notwendige Temperatur anpassen muss.

### 3.1.3.1.1 Switching Filament

Inzwischen haben sich Multi-Extrusions-Upgrades für verschiedene 3D-Drucker auf dem Markt durchgesetzt. Da die meisten handelsüblichen Drucker nur eine einzelne Düse besitzen, wird versucht, diese Düse abwechselnd mit verschiedenen Filamenten zu versorgen. Zuerst wird der Druck mit Filament A gestartet, wenn der Layer abgeschlossen ist und auf Filament B gewechselt werden soll, wird das erste Filament bis zu einer Y-Gabelung in der Filamentzufuhr aus dem Hot-End zurückgeführt und nun wird das neue Filament B eingeführt. Bevor der Druck fortgesetzt werden kann, muss die Düse noch einen „Purge-Vorgang“ vollziehen und dann erst kann das neue Filament genutzt werden und der Druck fortfahren. Eine praktische Umsetzung dieses Systems ist dem Unternehmen Prusa gelungen. Diese haben einen Filament-Revolver für ihr Multi-Material-Upgrade realisiert. Somit ist es möglich bis zu 5 verschiedene Filamente in einem Druck zu verwenden, folgend in Abbildung 3 zu sehen.



Abbildung 5: Multi-Material-Upgrade 3 von Prusa /18/



Abbildung 4: Y-Gabelung /19/

Jedoch hat dieses System auch seine Nachteile: Ein Opferturm (Purge-Tower) ist unbedingt notwendig. Die Flexibilität bei der Materialauswahl ist ein weiterer Nachteil. In der Theorie ist die Temperaturanpassung des Heizelements möglich, jedoch erhöht sich damit gleichermaßen die notwendige Zeit für den Druckvorgang. Durch das Zurückziehen des Filaments in die Zufuhr kann es zu Verstopfungen in dieser kommen, da das Material viskos ist. /17/

### 3.1.3.1.2 Mixing Nozzle

Bei der „Mixing Nozzle“ handelt es sich um eine einzige Düse, in der mehrere Filament-Stränge zusammengeführt werden. Dementsprechend befinden sich jeder Strang im beheizten Areal und ist dementsprechend dauerhaft im flüssigen Zustand. Diese Bedingungen schränken die Nutzung verschiedener Materialien bedeutend ein, da ungefähr gleiche thermische Eigenschaften zwischen den verschiedenen Filamenten herrschen müssen. Knapp über der Düsenspitze befindet sich der Raum, in dem alle Filamente zusammenkommen und je nachdem, welcher Strang gedruckt werden soll, verdrängt dieser die anderen aus der Kammer.

Bei einem Druck mit einer Mixing Nozzle kommt es zur Vermischung der verwendeten Filamente, insbesondere beim Übergang von zwei Filamenten ist mit einem Farbübergang oder einer Vermischung zwei Materialien zu rechnen. Eine weitere Problematik ist die kleine Mischkammer und der daraus resultierende schlechte durchmischte Extrusionsstrang, Grund dafür ist der zu geringe Platz für eine gleichzeitige Extrusion zweier Filamente. Weiterhin müssen alle Zugänge zum Hot-End entweder mit einem Filament gefüllt sein oder mit einem Stöpsel versiegelt sein, da es sonst zu einem unkontrollierten Fluss durch diese Zugänge kommt.

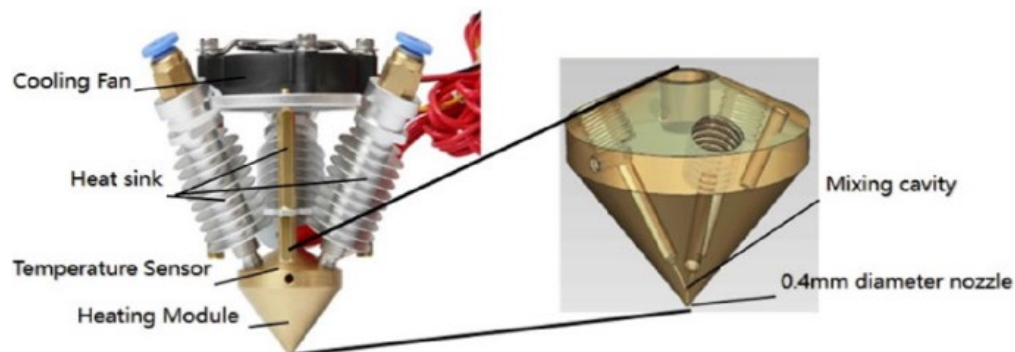
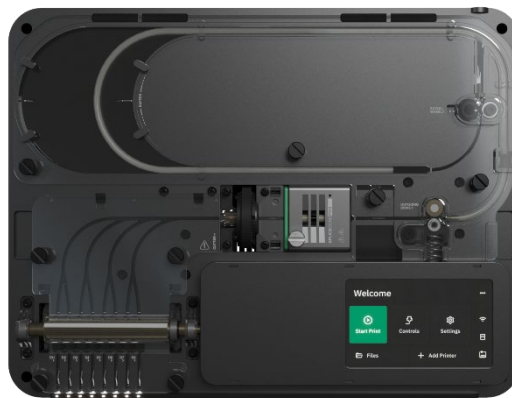


Abbildung 6: Diamond Nozzle /20/

Vorteilhaft für dieses System ist zum einen die geringe Massenzunahme im Vergleich zum einem Single-Extrusion-System. Zum anderen sind die niedrigen Kosten, der einfache mechanische Aufbau und der niedrige Kalibrierungsaufwand ein positiver Aspekt dieses Systems, da nur eine einzelne Düse genutzt wird. /17/

### 3.1.3.1.3 Filament Splicing

Die Grundidee des „Splicing“ ist, zwei verschiedenfarbige Filamente oder zwei Filamente mit unterschiedlichen Materialien zu zerschneiden und darauffolgend wieder zusammen zu führen zu einem Filament-Strang. Neben den mechanischen Anforderungen von zerschneiden und wieder zusammenfügen, benötigt es noch eine Software für diesen Vorgang, um das richtige Filament im richtigen Moment zu extrudieren. Das Unternehmen „Mosaic“ bietet hierfür eine Erweiterung für bestehende Systeme an, namens „Palette“. In der folgenden Abbildung 7 ist dieses Extra-System dargestellt, mit 8 Anschlüssen für bis zu acht verschiedenen Farben oder acht verschiedenen Materialien.



**Abbildung 7: Palette von Mosaic /21/**

Der große Nachteil bei diesem System ist das nicht Vorhandensein von günstigen Standardteilen und dem zusätzlichen Aufwand auf der Softwareseite, da der Splicing-Prozess in die herkömmlichen Slicer-Programme integriert werden muss. /17/

### 3.1.3.2 Multi-Nozzle-Systeme

Der wesentliche Vorteil eines Multi-Nozzle-Systems im Vergleich mit einem Single-Nozzle-System ist die Nutzung mehrerer Düsen, wodurch Filamente mit verschiedener Betriebstemperatur genutzt werden und der eigentlich entstehende Opferturm minimiert oder im besten Fall nicht benötigt wird. Dies führt zu einer Verringerung der Materialverschwendung und der Druckzeiten. Außerdem ist es möglich Düsen mit unterschiedlichen Durchmessern

zu verwenden und somit die grobe Struktur eines Bauteils mit einer größeren Düse zu drucken und die feinere Oberfläche mit einer kleineren Düse zu finalisieren.

Nachteilig in diesen Systemen ist der erhöhte Kalibrierungsaufwand, da mehrere Düsen zum Druckbett kalibriert werden müssen und durch die Nutzung mehrerer Düsen wird es unvermeidlich zu einem Oozing-Problem kommen. Beim Oozing-Problem handelt es sich um unkontrolliertes Austreten des Filamentes bei einem Filamentwechsel oder beim Wechsel des Extruders. Dieses Filament besteht dann am gedruckten Bauteil und sieht aus wie „Haare“. Diese Problematik ist unbedingt zu vermeiden, da sie die Qualität des Druckteils erheblich mindert.

#### 3.1.3.2.1 Fixed Multi Nozzle

Die simpelste Lösung eines Systems mit mehreren Düsen ist die Fixed Multi Nozzle. Hierbei befinden sich mehrere Hot-Ends an einer Führung. Das zusätzliche Gewicht der Extra-Düsen spielt dabei eine untergeordnete Rolle, jedoch führt diese Anordnung zu einer Reihe anderer Nachteile. Wie bereits beschrieben ist die Kalibrierung der Düsen von enormer Wichtigkeit, denn es müssen sich alle auf der gleichen Höhe befinden, da es sonst zu einer Kollision mit dem Bauteil kommen kann. Auch ist das Oozing-Problem bei dieser Möglichkeit nicht zu verhindern. In der folgenden Abbildung 8 ist ein solche Nozzle dargestellt, mit 4 Düsen an einem Hot-End angeordnet. /17/



Abbildung 8: E3D Kraken /22/

### 3.1.3.2.2 Switching Multi Nozzle

Die Switching Multi Nozzle kann man die Weiterentwicklung der Fixed Multi Nozzle nennen. Hierbei sind die einzelnen Hot-Ends nicht starr in ihrer Position an der Führung angebracht, sondern sind schwenkbar installiert, wodurch sie bei Nicht-Nutzung entweder weggeschwenkt oder angehoben werden können. Diese Umsetzung löst die Problematik der Kollisionsgefahr mit dem Bauteil. Ähnliche Systeme gehen noch einen Schritt weiter und schwenken die inaktive Düse in eine Position, in der der Düsenausgang geschlossen wird und damit einhergehend dem Oozing-Problem entgegengewirkt wird. /23/

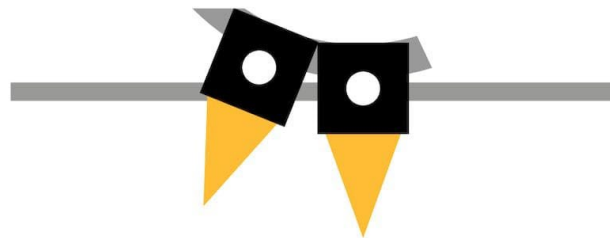
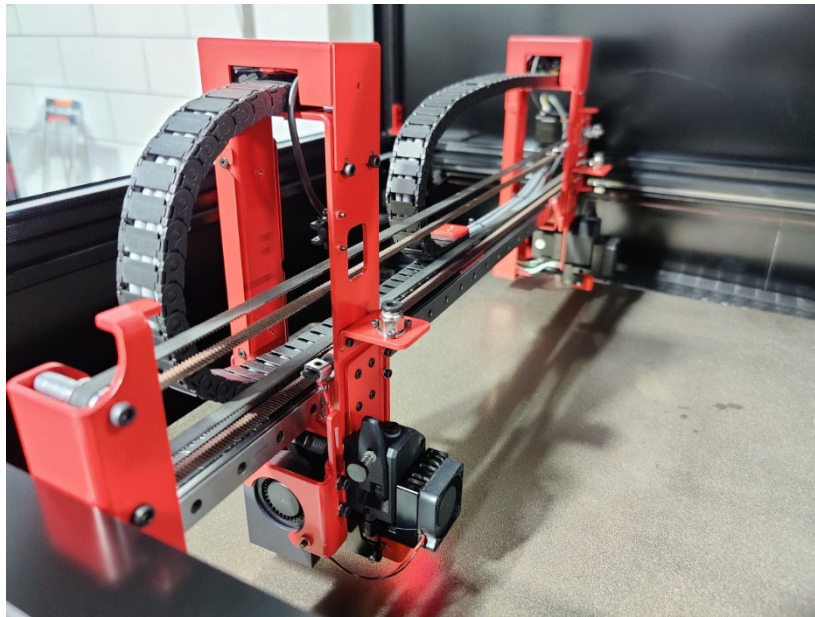


Abbildung 9: Prinzipielle Funktionsweise der Switching Multi Nozzle /23/

### 3.1.3.2.3 Independent Dual Extruder (IDEX)

Dieses System ist dem Fixed-Multi-Nozzle-System sehr ähnlich, jedoch sind die Hot-Ends nicht mehr auf einem Extruder, sondern befinden sich nun auf zwei voneinander unabhängig agierenden Extrudern. Diese „Unabhängigkeit“ bezieht sich jedoch nur auf eine Achse, beispielsweise die x-Achse. Das heißt die Bewegungen auf der X-Achse können unterschiedlich sein, die Bewegungen auf der Y-Achse werden von beiden Extrudern gleich ausgeführt. Dieser Aufbau birgt Vorteile im Vergleich zu den bisher erläuterten Möglichkeiten. Der größte Vorteil ist das Parken des inaktiven Extruders in der Parkposition, das heißt sowohl die Gefahr einer Kollision mit dem entstehenden Bauteil wird signifikant vermindert und die Oozing-Problematik wird umgangen, da austretendes Material auf das Druckbett tropfen kann und danach einfach entfernt werden kann. Ein Vorteil, welcher bisher noch gar nicht

realisierbar war, ist die Steigerung der Produktivität. Es ist möglich beide Extruder parallel zueinander arbeiten zu lassen und somit in einem Druckvorgang das gleiche Bauteil zweimal drucken zu lassen. Das IDEX-System ist theoretisch bereits vorhanden im „Big Meter“ von Modix, wodurch es in die weitere Entscheidungsfindung für das zu wählende System integriert werden kann. In der Praxis müsste diese Erweiterung beim Hersteller dazu gekauft werden, um sie auch vollumfänglich nutzen zu können.



**Abbildung 10: IDEX-Upgrade des Big Meter**

#### 3.1.3.2.4 Werkzeugwechsler

Diese Technik, die bereits aus anderen Werkzeugmaschinen bekannt ist, wurde auch auf den 3D-Drucker übertragen. Das zugrundeliegende Konzept ist als simpel zu bezeichnen: Die Realisierung mehrerer Hot-Ends in einem Magazin sowie die Möglichkeit der Kopplung oder des Austausches der Druckkopf-Führung mit den jeweils passenden Extrudern je nach Bedarf. Das Oozing-Problem, das beim IDEX-System noch zu beobachten war, wird durch diese Technologie ebenfalls adressiert. Im Gegensatz zum IDEX-System ist die Anzahl der umsetzbaren Hot-Ends signifikant erhöht, da inaktive Hot-Ends im Magazin geparkt werden und nur die aktiven Düsen relevant für die bewegten Massen sind.

Großer Nachteil ist der Kalibrierungsaufwand für die verschiedenen Werkzeuge. Weiterhin muss die Kopplung zwischen Werkzeug und Führung eine hohe Wiederholbarkeit aufweisen und sich dabei relativ schnell öffnen und schließen können.

Ein Gesichtspunkt, der eine Sonderstellung für dieses System hat, ist die Möglichkeit des Einsatzes von Nicht-FFF-Werkzeugen. /17/



Abbildung 11: Werkzeugwechsler im Prusa XL /24/

### 3.1.4 Lösungsfindung „Filamentwechsel“

Im vorherigen Kapitel 3.1.3 wurden mögliche Einzelsysteme und Mehrfachsysteme vorgestellt und erläutert. Nun muss ein passendes Konzept für den Filamentwechsel ausgewählt werden, wodurch die Funktionsstruktur weiter detailliert werden kann.

Die Single-Nozzle-Systeme sind für den bereits vorhandenen 3D-Drucker mit optionalen IDEX nicht von Relevanz, weshalb diese nicht weiter berücksichtigt werden. Bei den Multi-Nozzle-Systemen hat die Fixed Multi Nozzle das signifikante Probleme des Oozing, wodurch es aus der weiteren Auswahl herausfällt. Bei einem Neubau eines 3D-Druckers kann die Technologie der Switching Nozzle durchaus Verwendung finden, jedoch ist bei einem bereits bestehenden System der Aufwand diese Technologie zu integrieren zu hoch, wodurch sie ebenfalls aus der Auswahl entfällt. Da das IDEX-System bereits vorhanden ist, kann man es auch in der weiteren Konzept- und Entwurfsphase integrieren. Der Werkzeugwechsler, welcher nun noch übrigbleibt, bietet die größten Möglichkeiten der Integrierung, der Weiterentwicklung und der Sicherheit gegen Oozing, weshalb es endgültig als bevorzugte Variante ausgewählt wurde, und in der weiteren Konzept- und Entwurfsphase bearbeitet wird. Im nachfolgenden Bild 12 ist die Funktionsstruktur der Teilfunktion „Filamentwechsel“ für einen weiteren Extruder dargestellt.

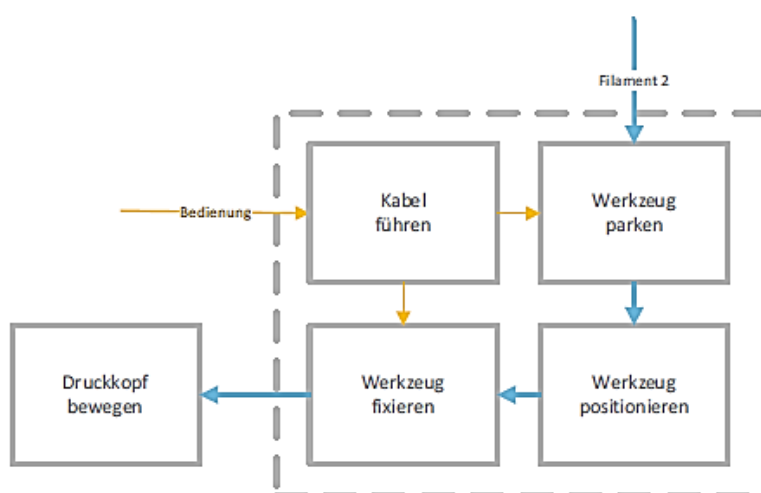


Abbildung 12: Funktionsstruktur "Filamentwechsel"

Diese Struktur kann in die Gesamtfunktionsstruktur beliebig oft wiederholt werden, abhängig davon, um wie viele Extruder das bestehende System erweitert wird. Der Extruder, welcher im Wechsler verharret, hat bereits das nächste Filament geladen und verweilt in dieser Parkposition, bis die Maschinensteuerung den Extruder wechselt. Bei diesem Wechsel ist es zunächst wichtig, dass der Extruder mit einer wiederholbaren Genauigkeit an der Führung positioniert wird. Daraufhin wird es an der Führung fixiert und während des Druckprozesses bewegt. Die Kabelführung in der Funktionsstruktur ist essenziell für das Hot-End, da dieses Energie benötigt, um das Filament auf die notwendige Temperatur zu erhitzen und somit drucken zu können.

## **3.2 Teillösungen**

### **3.2.1 Energieumwandlung**

Sowohl der 3D-Drucker als auch die Roboterzelle nutzen elektrische Energie, um das Bauteil zu beheizen. Dies ist notwendig, da die verwendeten Materialien eine bestimmte Umgebungstemperatur benötigen, um gefertigt zu werden. Die Beheizung im eigentlichen Hot-End ist dafür zuständig, die verschiedenen Filamente auf Betriebstemperatur zu bringen und damit die additive Fertigung zu initialisieren. Neben diesen Hauptaugenmerk-Aspekten sind auch die Elektromotoren für die Bewegung sowie die Lüftung für den Bauraum als energieintensive Elemente zu berücksichtigen. Die Steuerung dieser unterschiedlichen Strom- und Spannungsversorgungen erfolgt über das Mainboard.

Da bereits der Big Meter vorhanden ist, wird dessen Stromversorgung genutzt und ein ähnlicher Aufbau für die Roboterzelle angedacht.

### **3.2.2 Regelung der Raumtemperatur**

Alle druckbaren Kunststoffe, welche in der additiven Fertigung genutzt werden, unterliegen einer gewissen Schrumpfung beim Abkühlen. Diese liegt beispielsweise bei Polylactiden (PLA) bei 0,3% bis 0,5%. Im Gegensatz dazu liegt die Schrumpfung bei Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) zwischen 0,7% und 1,6%. Ein letztes Beispiel ist das Polyvinylidenfluorid (PVDF), hier kann die Schrumpfung zwischen 2,0% und 4,0% betragen. Diese teilweise

sehr großen Unterschiede zeigen, dass ein beheizter Druckraum nicht unbedingt notwendig ist für jedes Druckmaterial, jedoch ist bei der hier gestellten Anforderung von sechs unterschiedlichen Filamenten damit zu rechnen, dass auch Kunststoffe wie ABS oder sogar PVDF zum Einsatz kommen. /25/

Der bereits vorhandene „Big Meter“ besitzt über eine geschlossene Druckkammer ohne aktive Heizkammer, daher wird diese Variante weiterverfolgt, jedoch ist es durchaus denkbar die Roboterzelle mit einer geschlossenen Druckkammer und aktiver Heizkammer auszustatten, falls die Notwendigkeit besteht, komplexere Filamente zu nutzen, welche eine gesteuerte Raumtemperatur benötigen.

### **3.2.2.1 Offene Druckkammer**

Diese Bauweise hat kein Gehäuse um den Bauraum herum, wodurch hauptsächlich Kunststoffe verwendet werden können, welche eine geringe Schrumpfung vorweisen. Die meistgenutzten Materialien bei offenen Druckern sind PLA und die meisten Polyethylenterephthalat, modifiziert mit Glykol. Bei diesen Kunststoffen ist die Schrumpfung praktisch zu vernachlässigen, wodurch sie in offenen Druckern genutzt werden können, unabhängig von der Bauteilgröße. Auch können andere Kunststoffe genutzt werden, welche eine größere Schrumpfung haben, jedoch ist dann die Bauteilgröße sehr stark beschränkt, da nur bei kleinen Bauteilen die Schrumpfung wieder vernachlässigt werden kann. /25/

### **3.2.2.2 Geschlossene Druckkammer / passive Heizkammer**

Bei dieser Bauweise wird der Druckraum vollständig umschlossen, verschiedene Hersteller nennen dies auch passive Heizkammer, da die erzeugte Wärme der Druckplattform indirekt den Druckraum erwärmt. Die erreichten Temperaturen in dieser Bauweise reichen aus, um verschiedenste Materialien nutzen zu können und auch größere Bauteile zu drucken als im Vergleich zu den offenen Druckern. Bei großen Bauteilen kann es jedoch durchaus passieren, dass die erzeugte Wärme im Druckraum nicht ausreichend ist und somit die Schrumpfung das Bauteil verformt und somit sich das Bauteil verziehen kann, die einzelnen Schichten sich voneinander lösen oder auch die gewünschten Maße des Bauteils nicht mehr mit den praktischen Maßen übereinstimmen. /25/

### **3.2.2.3 Geschlossene Druckkammer mit aktiver Heizkammer**

Diese Bauweise ermöglicht es, die Temperatur der Druckkammer zu steuern. Neben dieser Steuerung besitzen sie meist auch über Hochtemperatur-Hot-Ends und über Flüssigkeitskühlsysteme. Nun wird in 2 verschiedene Arten unterteilt, die Hochtemperatur-Wärmekammer und die Niedertemperatur-Wärmekammer.

#### **3.2.2.3.1 Niedertemperatur-Wärmekammer**

Hier können Höchsttemperaturen von 80°C bis 120°C ermöglicht werden. Diese Bauweise ist somit für die Herstellung von qualitativ hochwertigen Teilen aus Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA), ABS, Nylon oder auch Polycarbonat (PC) prädestiniert. Teilweise ist auch die Nutzung von Polyetheretherketon (PEEK) möglich, jedoch nur Niedertemperatur-PEEK und diese nur auf kleine Bauteile. /25/

Insgesamt ist zu sagen, dass diese Bauweise hervorragend für Bauteile ist, welche stabil sein müssen und eine geringe Verformbarkeit nachweisen. Daraus schließend ist dies die beste Variante für die Herstellung von Funktionsbauteilen oder technischer Teile.

#### **3.2.2.3.2 Hochtemperatur-Wärmekammer**

Bei dieser Bauweise werden Temperaturen von 160°C bis 180°C angesteuert und ist somit speziell für die Nutzung von PEEK, Polyetherketonketon (PEKK) und Polyetherimide (PEI) ausgelegt. Bei der Nutzung dieser Materialien ist ein gewisses Fachwissen und eine Extra-Schulung für die Nutzung dieser Drucker notwendig. /25/

### **3.2.3 Maschinensteuerung**

Die Maschinensteuerung realisiert die präzise Koordination verschiedenster Mechanismen, um das Modell Schicht für Schicht aus einem oder mehreren Materialien zu fertigen. Die Firmware übernimmt die Steuerung der Hardwarekomponenten und diese Firmware wird über den „G-Code“, der vom Slicer-Programm erstellt wird, gesteuert. Im Wesentlichen beinhaltet dieser G-Code Informationen über die Bewegung der Achsen, über das Extrudieren des Filaments, Temperatur und Druckbettheizung.

### 3.2.3.1 Firmware

Hierbei handelt es sich um eine Software, welche auf dem Mikrocontroller des 3D-Druckers agiert, und die Hardware steuert. Die Firmware empfängt den G-Code, interpretiert diesen und setzt dementsprechend die Befehle in Bewegungen und Aktionen um.

Bekannte Firmware-Optionen sind „Marlin“, „Smoothieware“, „Klipper“ und „RepRapFirmware“, welche auch im „Big Meter“ verwendet wird.

### 3.2.3.2 Mikrocontroller

Der Mikrocontroller ist das „Gehirn“ eines jeden 3D-Druckers, denn hier wird die Firmware ausgeführt.

Oft verwendete Mikrocontroller-Plattformen sind Arduino-basierte Boards, wie zum Beispiel RAMPS 1.4, oder leistungsfähigere Boards wie das Smoothieboard oder der Duet-Controller, welcher im „Big Meter“ verwendet wird.

Im Falle dieser Arbeit ist es notwendig den bereits vorhandenen Mikrocontroller zu erweitern, da es nicht genügend Anschlüsse für die weiteren Extruder mit deren Lüftern gibt und somit eine Erweiterungsplatine benötigt wird. Dafür hat der Hersteller der Duet2 Wifi-Mikrocontroller ein passendes Erweiterungsboard im Angebot, und zwar die DueX5.

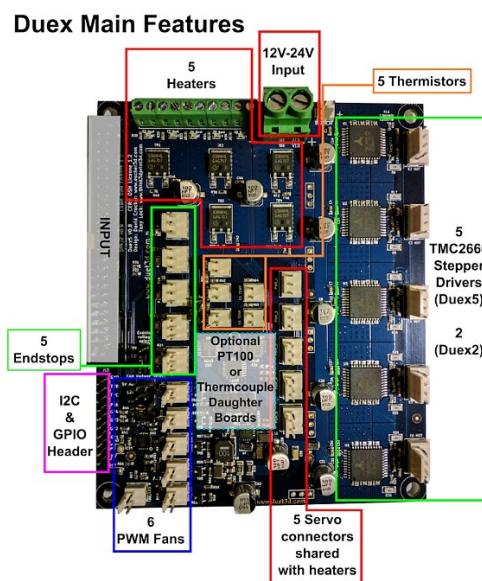


Abbildung 13: DueX5-Erweiterungsboard /26/

### **3.2.3.3 G-Code**

Dieses Standardtextformat enthält Befehle, die dem Drucker mitteilen, wohin er sich bewegen soll, wie schnell er sich bewegen soll, welches Material zu extrudieren ist und noch weitere Vorgänge. Diese Befehle werden durch den Slicer, wie zum Beispiel Cura oder PrusaSlicer, aus dem 3D-Modell generiert und dann an den Drucker übermittelt.

### **3.2.4 Speicherung des Filaments**

Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, UV-Strahlung und Staub sind Faktoren, welche die Qualität des Filaments beeinflussen können. Beispielsweise kann das Material spröde werden, durch die unerwünschte UV-Strahlung, es kann zu einem Stau in der Düse kommen, durch Staub als Verunreinigung, oder es wird eine höhere Temperatur für die Extrusion benötigt. Dies sind einige Probleme, die auftreten können, wenn das Filament nicht richtig gelagert wird.

Im Falle des „Big Meter“, welcher in einer Fertigungshalle steht, sind Probleme hinsichtlich der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit oder auch der UV-Strahlung zu vernachlässigen. Staub und andere Verunreinigungen in der Luft können jedoch ein Problem darstellen, weshalb es wichtig ist, dass das Filament bei Nicht-Nutzung wieder in einen Schrank zu räumen ist.

Falls der Einsatzort später mal ein anderer sein sollte, beispielsweise mit einer höheren Luftfeuchtigkeit oder einer stärkeren UV-Strahlenbelastung, dann gibt es verschiedene Lösungen für die verschiedensten Anforderungen.

#### **3.2.4.1 Filamenttrockner**

Filamenttrockner sind speziell dafür konzipiert, niedrige Luftfeuchtigkeitswerte aufrechtzuerhalten und Filamente vor Feuchtigkeitsaufnahme zu schützen. Des Weiteren ist ein integrierter Entwässerer vorhanden, welcher dazu imstande ist, die Feuchtigkeit in den Filamenten zu reduzieren, sofern diese zuvor der Atmosphäre ausgesetzt waren. Ein Filamenttrockner kann eine sinnvolle Investition darstellen, insbesondere für Nutzer, die häufig mit feuchtigkeitsempfindlichen Filamenten arbeiten oder in einer Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit leben. Der Trockner schafft für den Anwender eine ideale Umgebung zur Lagerung der Filamente. Als Beispiel für einen Filamenttrockner, der über die Fähigkeit zur gleichzeitigen

Trocknung und Lagerung von bis zu vier Spulen verfügt, kann der SUNLU FilaDryer S4 angeführt werden.



Abbildung 14: SUNLU FilaDryer S4 /27/

### 3.2.4.2 Filament-Aufbewahrungsbox

Die RepBox stellt eine professionelle Filamentaufbewahrungsmöglichkeit dar, welche bis zu sechs 1-kg-Spulen in einem versiegelten Acrylgehäuse aufnehmen kann. Jede Spule ist mit einer eigenen Öffnung versehen, sodass ein unmittelbarer Anschluss an den Drucker gewährleistet ist. Des Weiteren ist die RepBox mit einem Hygrometer und einem Thermometer ausgestattet, sodass die Luftfeuchtigkeit und Temperatur innerhalb der Box kontrolliert werden kann.



Abbildung 15: KIT RepBox v2.5 von repkord /28/

### 3.2.4.3 Vakuumversiegelte Beutel

Vakuumversiegelte Beutel bieten einen umfassenden Schutz für Filament, indem sie sämtliche Arten von Feuchtigkeit, Gerüchen, Insekten und Schimmel fernhalten. Durch das Versiegeln der Beutel mit einem Vakuumierer kann die Luft aus dem Beutel entfernt werden, wodurch eine dichte Versiegelung entsteht. Diese verhindert, dass Feuchtigkeit und Verunreinigungen das Filament beeinträchtigen. Es besteht die Möglichkeit, mehrere Spulen mit Filament in einen Vakuumbbeutel zu verpacken und die Luft mit einem Vakuumventil zu entfernen. Um das Filament zu verwenden, ist es erforderlich, es aus dem Beutel zu entnehmen und diesen anschließend wieder zu verschließen.

Es sei darauf hingewiesen, dass eine Sicherung des scharfen Endes des Filaments vorteilhaft ist, da es andernfalls zu einem Loch im Vakuumbbeutel kommen kann, durch welches das Filament der feuchten Luft ausgesetzt wird, welche durch den Vakuumbbeutel geschützt werden soll.



**Abbildung 16: Vakuumierset für die Filamentlagerung /29/**

### 3.2.5 Filamentzuführung

Bei dieser Teillösung haben sich im Laufe der Zeit 3 Konzepte für 3D-Drucker etabliert. Zum einen der Direct-Drive-Extruder, der Bowden-Extruder und die Biegewelle, welche den Direct Drive und den Bowden-Extruder miteinander kombiniert. Die Gemeinsamkeit aller Varianten ist die Nutzung eines Zahnrades und eines Gegenrades, um den Filamentstrang zwischen beiden Rädern zu klemmen und diesen somit in Richtung des Hot-Ends zu führen, um den Schmelzvorgang zu initiieren.

#### 3.2.5.1 Direct-Drive-Extruder

Bei dieser Extruder-Variante ist der Extruder-Körper (A) direkt mit dem Hot-End (C) verbaut und dadurch kann das Filament (B) durch die Düse (D) gedruckt werden. Weiterhin kann das Filament schnell eingezogen werden, durch die Nähe von Extruder und Hot-End. Ein weiterer Vorteil ist die Wahl eines schwächeren Motors, da weniger Drehmoment vom Motor benötigt wird, um den Filamentstrang durch den Aufbau zu bewegen. Gesondertes Interesse liegt im breiteren Spektrum für kompatible Filamente, da abrasive und flexible Materialien mit hoher Zuverlässigkeit gedruckt werden können. /30/

Nachteilig bei diesem Extruder-Aufbau ist zu nennen, dass eine höhere Last am Druckkopf vorliegt und damit einhergehend Nachteile entstehen: Zum einen ein höherer Stromverbrauch im Vergleich zum Bowden-Extruder, der Verschleiß der Zahnriemen und der Gleitlager und die geringere Druckgeschwindigkeit durch die "hohe" zu bewegende Masse im Druckprozess. Als letzteren Nachteil für den Direct-Drive-Extruder ist die komplexere Wartung zu nennen, da der kompaktere Aufbau beispielsweise die Reinigung der Düse erschwert. /30/

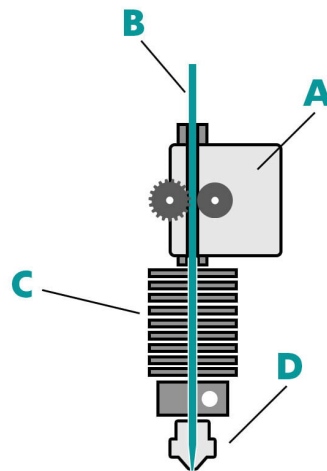


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Direct-Drive-Extruders /30/

Im Big Meter ist ein solches Direct-Drive-Extruder-System verbaut, wodurch es automatisch als Lösung für die Filamentführung gewählt ist, da eine Umrüstung auf Bowden oder Biege-  
welle einen erheblichen Mehraufwand darstellt. Auch ist zu erkennen, dass die eben ge-  
nannten Vor- und Nachteile auf den Big Meter zutreffen.

### 3.2.5.2 Bowden-Extruder

Der Bowden-Extruder nutzt im Gegensatz zum Direct-Drive-Extruder eine weniger kom-  
pakte Bauweise. Hier befindet sich der Extruder (A) am Rahmen des 3D-Druckers und das  
Filament (B) wird über PTFE-Schlauch zum Hot-End (C) geführt.

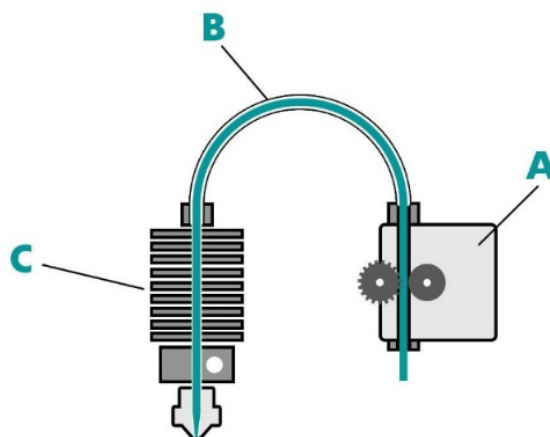


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Bowden-Extruders /30/

Der signifikanteste Vorteil dieses Systems ist die geringere Masse am Druckkopf und die daraus resultierende geringere bewegte Masse und Trägheit während des Druckprozesses. Daraus ergibt sich eine höhere Druckgeschwindigkeit und tendenziell bessere Druckergebnisse, da es weniger Vibrationen am Bauteil gibt. /30/

Nachteilig ist zu nennen, dass ein stärkerer Motor notwendig ist, da der Filamentstrang nicht direkt in das Hot-End und die Düse gelangt, sondern erst durch den Schlauch bewegt werden muss. Des Weiteren ist bei einem Filamentwechsel ein höherer Zeitaufwand notwendig, da durch die entstehende Reibung im Schlauch das System mehr Zeit benötigt, um den Strang vollständig zu entfernen oder zum Hot-End zu führen. Auch ist die Wahl der Filamente beschränkter im Vergleich mit dem Direct-Drive-System, da abrasive und flexible Materialien mehr Abnutzung im PTFE-Schlauch erfahren und durch den längeren Weg eine schlechtere Qualität für das Endprodukt darstellen können. /30/

### **3.2.5.3 Biegewellen-Extruder**

Das dritte und letzte Konzept für die Filamentzuführung kombiniert sowohl den Direct-Drive-Extruder als auch den Bowden-Extruder. Wie auch bei dem Bowden-Extruder befindet sich der Schrittmotor außerhalb des Druckraumes. Im Gegensatz zum Bowden-System überträgt der Schrittmotor das Antriebsmoment jedoch nicht direkt auf das Filament, sondern über eine torsionssteife Welle an das Getriebe, welches am Hot-End befestigt ist. Durch eine Untersetzung wird erreicht, dass die Verdrehung im Antriebsstrang verhältnismäßig gering ist. Hierfür ist es notwendig, dass der Motor deutlich schneller drehen muss. Masstechnisch wird auf den Extruder nur die Masse des Getriebes addiert, bleibt jedoch ähnlich niedrig wie bei dem Bowden-System. Weiterhin muss das Filament nicht durch einen Schlauch geführt werden und dementsprechend ist eine größere Auswahl von Filamenten möglich. Insgesamt verbindet dieses System die jeweiligen Vorteile der zuvor genannten Systeme. Ein bedeutender Nachteil dieses Systems ist der höhere Kostenpunkt, da es wenige Hersteller dafür gibt und die entstehenden Kräfte, welche sich auf die Kopplung auswirken, sind nicht zu vernachlässigen. /17/ /31/



Abbildung 19: Konzeptdarstellung des Biegewellen-Extruders Flex3Drive von Mutkey3D /31/

### 3.2.6 Filamentschmelzung

In der additiven Fertigung hat sich im Laufe der Zeit ein spezieller Aufbau der Düse entwickelt, wobei nur die Düse die gewünschte beziehungsweise die benötigte Zieltemperatur erreicht. Die restlichen Komponenten sind thermisch gesehen isoliert von der Düse. Deswegen besteht das Hot-End auch aus einem „heißen“ Teil, dem Hot-End, und einem „kalten Teil“, dem Cold-End. Die Kombination beider wird wiederum Hot-End genannt, da der thermisch beanspruchte Teil charakteristischer ist als der thermisch weniger beanspruchte Teil. /32/

Mittlerweile gibt es einige Hersteller für Hot-Ends, jedoch besitzt der Big Meter V3 den Titan Aero Hot-End und Extruder. Dieser Druckkopf besteht zum einen aus dem Extruder „Titan“ und dem Hot-End V6, beide entwickelt von dem Unternehmen E3D. Die Kombination aus Extruder und Hot-End besteht vollständig aus Metall, wodurch Filamente genutzt werden können, welche auf bis zu 300°C erhitzt werden müssen. Dieses Titan Aero Kit ist im aktuellen Big Meter, welcher als Grundlage dient, verbaut, jedoch gibt es mittlerweile neuere und verbesserte Versionen des Druckers, indem neuere und effizientere Technik verbaut ist. /33/

### 3.2.7 Kabelführung

Grundsätzlich müssen die Arbeitsgeräte jede Stelle im 1010x1010mm umfassenden Drucker erreichen können. Dies muss die Kabelführung ermöglichen, ohne dabei die Fertigung zu stören. In Abbildung 20 ist die aktuelle Kabelführung des „Big Meter“ dargestellt.

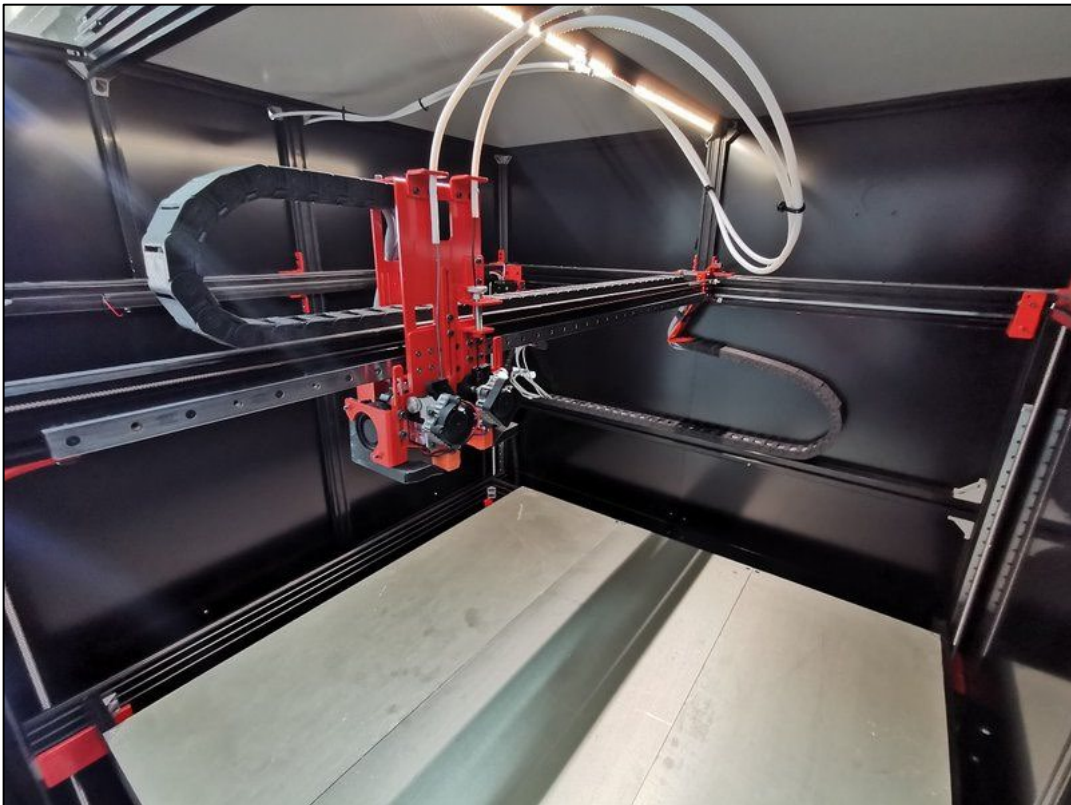


Abbildung 20: Kabelführung des Big Meter

Für die Erweiterung des 3D-Druckers mit weiteren Extrudern für verschiedenste Materialien sollte diese Methode weiterhin funktionieren, da lediglich weitere Kabel von außen in den Druckraum geführt werden und sich zu jedem Zeitpunkt und an jeder Stelle über dem Druckbett befinden und somit den eigentlichen Druck nicht behindern können.

### 3.2.8 Werkzeugbewegung

Die Bewegung der Werkzeuge zu ihrem gewünschten Ziel, um dort die jeweilige Funktion auszuführen ist ein essenzieller Bestandteil. Der Bewegungsmechanismus im vorhandenen „Big Meter“ ist das CoreXY-System, welches mit Linearschienen komplementiert wird. Für

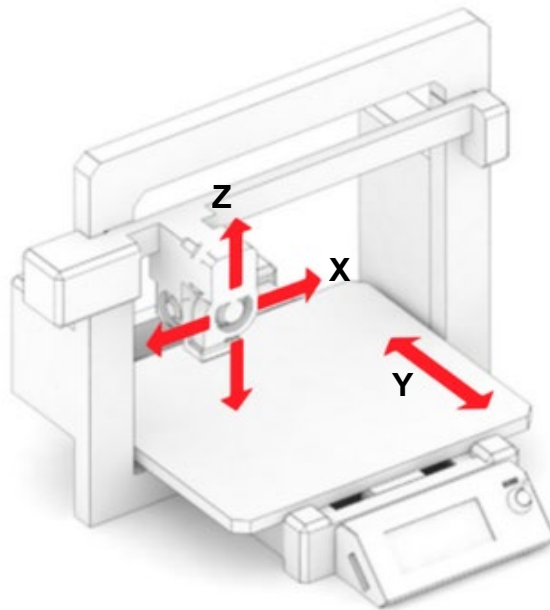
eine eventuelle Umsetzung des Multi-Material-Druckkopfes in der Roboterzelle wird noch auf weitere Umsetzungsmöglichkeiten eingegangen.

### **3.2.8.1 Kartesisches System**

Kartesische Drucker sind durch mindestens drei Motoren gekennzeichnet, welche die einzelnen Komponenten des Druckers entlang der Achsen des kartesischen Koordinatensystems bewegen. Die drei Achsen sind Y (längs), X (quer) sowie Z (hoch). Desktop-Drucker für den persönlichen Gebrauch sind in der Regel kartesische Drucker, da sie eine hohe Verbreitung aufweisen und zu einem geringen Preis erhältlich sind. Vor dem Druck muss das zu druckende Modell in Schichten zerlegt werden. Die Y- und X-Achse definieren die Koordinaten, die in einer Schicht gedruckt werden sollen. Sobald die Schicht fertiggestellt ist, wird die Düse durch die Z-Achse eine Schicht nach oben bewegt. Dies kann durch eine Bewegung des Druckbetts oder des Extruders erfolgen. Sofern Überhänge vorhanden sind, besteht die Möglichkeit, darunter Stützen hinzuzufügen.

Der signifikante Vorteil kartesischer Drucker liegt in ihrer breiten Akzeptanz und Verwendung. Eine Vielzahl an Tipps, Tricks und Problemlösungsstrategien sind online verfügbar. Des Weiteren ist die Beschaffung der erforderlichen Bauteile für den Drucker unproblematisch. /34/

Bei einer Verwendung der kartesischen Drucker für schnellere Drucke ist jedoch zu berücksichtigen, dass aufgrund des Gewichts der Achsen eine geringere Druckqualität resultiert. Außerdem ist in der Regel das Druckervolumen aufgrund der Bewegung aller Achsen deutlich größer als das Bauvolumen.



**Abbildung 21: Kartesisches System /34/**

### **3.2.8.2 CoreXY-System**

Analog zu den kartesischen Druckern werden beim CoreXY-Design die Breiten- und Längskoordinaten durch zwei Motoren und Zahnriemen auf der Y- und X-Achse bestimmt, während die Druckhöhe durch die Z-Achse definiert wird. Der wesentliche Unterschied des Core XY besteht darin, dass die X- und die Y-Bewegung voneinander abhängig sind. Dies wird durch eine spezifische Konstruktion der verwendeten Riemen erreicht. In diesem Fall erfolgt eine Anhebung der Druckfläche, sodass ein Aufprall auf den Extruder erfolgt. Es sei darauf hingewiesen, dass nicht allein die bewegliche Druckoberfläche ein charakteristisches Merkmal eines CoreXY-Druckers darstellt. Das entscheidende Charakteristikum des Druckertyps ist die Konstruktion der XY-Riemen sowie deren Bewegung. /34/

Aufgrund der geringeren Masse der X- und Y-Achsen treten bei schnellen Druckaufträgen auf diesem Druckertyp keine Artefakte auf, wie sie bei schnellen Druckaufträgen auf kartesischen Druckern beobachtet werden können. Das Design erlaubt zudem die Nutzung eines deutlich größeren Volumens als Bauvolumen, da sich die Druckoberfläche nicht seitlich bewegen muss.

Im Vergleich zu kartesischen Druckern weisen CoreXY-Drucker eine wesentlich längere Riemenlänge auf, wodurch sich die potenziellen Probleme mit den Riemen deutlich erhöhen. Die Komplexität des Aufbaus führt zudem zu einer erschwerten Behebung etwaiger Defekte. Es ist von essenzieller Bedeutung, dass der Rahmen eine hohe Stabilität und exakte Rechtwinkligkeit aufweist, da dies maßgeblich die Maßgenauigkeit beeinflusst. /34/

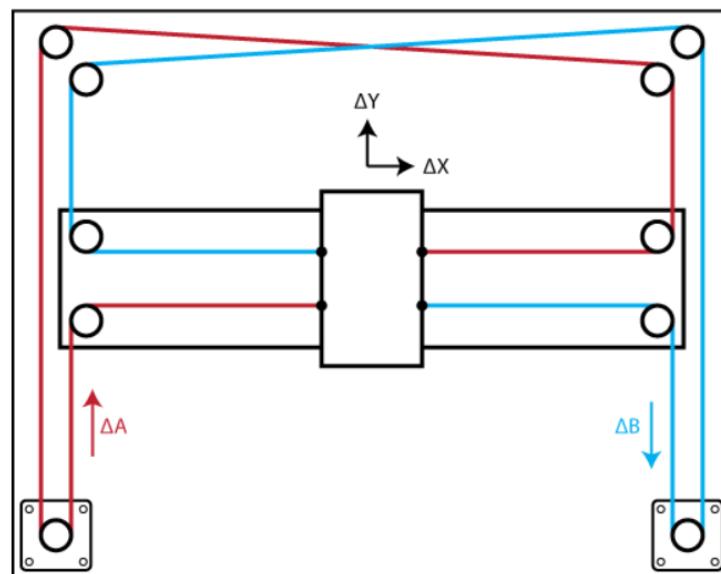


Abbildung 22: CoreXY-System /34/

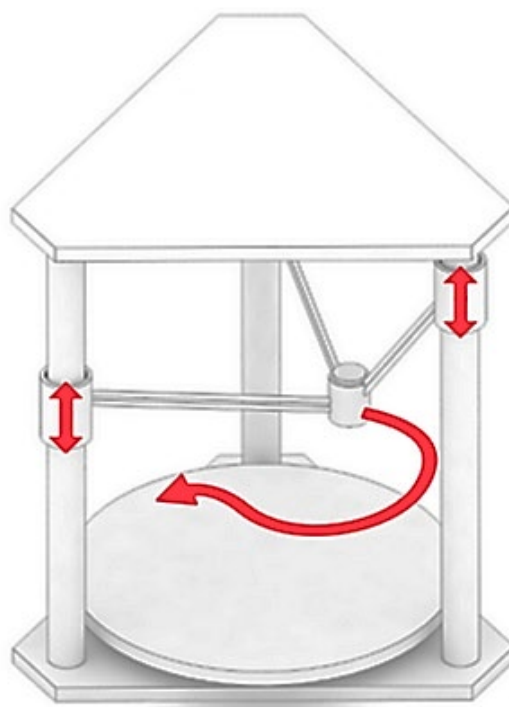
### 3.2.8.3 Delta-System

Bei Delta-Druckern befindet sich die Druckfläche in einer statischen Position, während drei Motoren in Interaktion treten, um sich im Hot-End zu treffen und den Druckkopf mit den Breiten-, Längen- und Höhenkoordinaten zu bewegen. Die Steuerung der drei Pfosten erfolgt durch die zuvor erwähnten Motoren, welche wiederum mit dem Extruder durch die erwähnten Arme verbunden sind, welche die Bewegung des Hot-Ends bewirken. Die Bezeichnung des Druckerstils (Delta =  $\Delta$ ) leitet sich von der dreieckigen Form der das Hot-End haltenden Arme ab. Die Entwicklung dieses Druckertyps zielte auf eine Steigerung der Druckgeschwindigkeit ab. /34/

Der Extruder des Delta-Druckers zeichnet sich durch ein geringes Gewicht aus. In Kombination mit den drei Motoren, welche die Steuerung übernehmen, eignet sich dieser Drucker

in besonderem Maße für schnelle Drucke. Aufgrund der komplexen Berechnungen, die für die Ausführung der Bewegungen erforderlich sind, zählte dieser Drucker zu den ersten Geräten, die mit einem 32-Bit-System ausgestattet wurden. Ein weiterer Aspekt, der für den Reiz des Druckers spricht, ist dessen ästhetischer Wert. /34/

Die Druckfläche der Delta-Drucker ist klein und rund. Dies führt zu einer signifikanten Einschränkung des verfügbaren Bauraums. Die hohe Geschwindigkeit des Druckers führt zu einer Verringerung der Druckpräzision. Des Weiteren ist eine Verwendung als Desktop-Drucker nicht üblich, da die Behebung und Lösung sämtlicher Probleme des Druckers mit großen Schwierigkeiten verbunden sind. Dies ist zum einen auf die komplexe Funktionsweise und den Mangel an Informationen, zum anderen auf den allgemeinen Mangel an Teilen und die hohen Kosten zurückzuführen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass der Drucker mit einem Bowdenextruder ausgestattet sein muss, um den Extruder zu vereinfachen und die Anzahl der zu verwendende Filamente zu begrenzen. /34/



**Abbildung 23: Delta-System /34/**

#### 3.2.8.4 Polares System

Bei diesen Druckern findet das Polarkoordinatensystem Anwendung, bei dem die Punkte auf einem kreisförmigen Gitter statt auf dem Quadrat als kartesisches System angeordnet sind. Des Weiteren erfolgt eine Bewegung der Druckplattform nicht nur in seitlicher Richtung, sondern ebenfalls in Rotation. Infolgedessen ist lediglich eine Auf- und Abwärtsbewegung des Extruders möglich, auch bei einem umfangreichen Baubereich. Der Rahmen des Druckers ist von bemerkenswerter Leichtigkeit. /34/

Diese Technologie befindet sich noch in der Entwicklungsphase. Dies resultiert in einem hohen Anschaffungspreis sowie Schwierigkeiten bei der Beschaffung von Ersatzteilen und technischem Support im Falle von Problemen.



Abbildung 24: 3D-Drucker von Polar3D mit polaren Bewegungssystem /34/

### 3.2.8.5 Linearführungen

#### 3.2.8.5.1 Linearachse

Die Linearführung stellt eine gängige Methode dar, die sich durch ihre Wirtschaftlichkeit auszeichnet und basiert auf der Kombination aus gehärteten Stahlwellen und Linearlagern. Linearlager sind sowohl als Linearkugellager als auch als selbstschmierende Polymerlager verfügbar. Die Polymerlager sind im Betrieb geräuschärmer, jedoch erfordert ihre Installation eine präzise Passung der Bohrung, durch die sie komprimiert werden und schließlich spielfrei auf der Welle aufliegen. Beide Ausführungen sind durch eine hohe Lebensdauer sowie eine geringe Wartungsintensität gekennzeichnet.

#### 3.2.8.5.2 Linearschiene

Die kostenintensivere und präzisere Variante stellt eine auf Schienen laufende Linearführung dar. Diese sind in einer Vielzahl von unterschiedlichen Ausführungen und mit diversen Anforderungen hinsichtlich der Wartung verfügbar. Die Befestigung der Schienen auf steifen Rahmenteilen ermöglicht eine deutlich geringere Biegungsabsenkung bei höheren Kräften im Vergleich zu gehärteten Rundstählen ähnlicher Masse. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass durch die Schienenführung lediglich ein Freiheitsgrad offenbleibt.

Diese Variante ist bereits im „Big Meter“ verbaut, deswegen wird es im Falle des 3D-Druckers verwendet.



Abbildung 25: HIWIN-Profilschienenführung

### **3.2.9 Parken des Werkzeuges**

Im Rahmen des Druckvorgangs ist eine Sicherung der inaktiven Werkzeuge in einer fixen Position erforderlich, wobei deren Entnahme gleichzeitig simpel zu bewerkstelligen sein muss. Der Prozess ist so zu konzipieren, dass er für hohe Wiederholungen ausgelegt ist und die Wahrscheinlichkeit einer Fehlfunktion geringgehalten wird. Die Bewegung der Werkzeuge zum Parken oder vom Parken weg ist nur in X- und Y-Richtung vorgesehen, nicht in Z-Richtung.

#### **3.2.9.1 Magnete**

Prinzipiell reicht ein Dauermagnet am Rahmen aus, um den jeweiligen Extruder, welcher an der Rückseite aus magnetisierbarem Material besteht, am vorgesehenen Parkplatz zu sichern. Vorteilhaft an dieser Umsetzung sind die geringen Kosten und die einfache Erzeugung der notwendigen Kraft.

Bei der Nutzung von Magneten müssen am Werkzeug kaum Veränderungen vorgenommen werden, da die Rückseite der Extruder bereits aus magnetisierbarem Material besteht und somit nur die Werkzeughalterung mit einem Permanentmagneten versehen werden muss.

#### **3.2.9.2 Schnappmechanismus**

Bei dieser Umsetzung ist ein Kugelschreiber und dessen Druckknopf das Grundprinzip. Hierfür sind zum einen Federmechanismus, welcher die hohen Wiederholungszahlen sicher schafft, und mehrere bewegliche Teile notwendig.

#### **3.2.9.3 Reibung**

Hier wird das Werkzeug auf den Rahmen „gesteckt“, wobei die notwendige Kraft zum „Aufstecken und zum „Abziehen“ relativ konstant sein muss. Eine Option ist eine Bohrung an der Rückseite des Werkzeuges, damit es auf einen Stift aufgeschoben werden kann. Als Sicherung dient eine Feder in der Bohrung, welche eine konstante Kraft aufbringt, sowohl für das Abziehen als auch das Aufschieben des Werkzeuges.

Diese Umsetzung ist in der Theorie am einfachsten, jedoch benötigt es die Bearbeitung der bereits vorhandenen Werkzeuge des Big Meter, wodurch es für die Variante im 3D-Drucker einen höheren Arbeitsaufwand bedeutet.

### **3.2.10 Positionierung des Werkzeuges**

Bei der Verbindung des Werkzeugs mit der Führung muss die Abweichung der Positionierung und Orientierung des Werkzeugs zur Führung gegenüber dem letzten Werkzeugwechsel so gering wie möglich gehalten werden. Ausgehend von einer Positionsabweichung von 50 Mikrometern muss die Summe der Biegeabweichungen des Rahmens und der Positionsabweichungen der Verbindung zwischen Werkzeug und Führung diese Forderung erfüllen. Dabei muss die Verbindung zusätzlich eine einfache und schnelle Lösung ermöglichen, um den Werkzeugwechsel so einfach wie möglich zu gestalten.

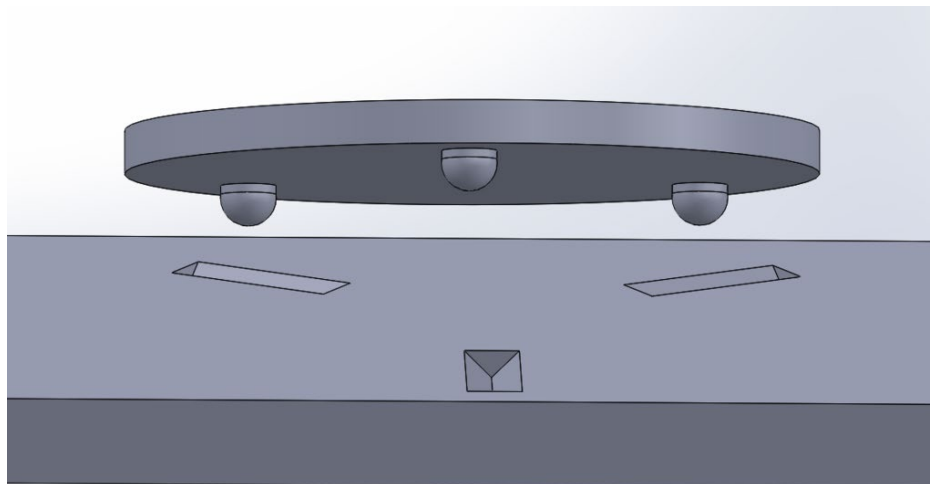
#### **3.2.10.1 Kinematische Kopplung**

In der Wissenschaft besteht Konsens darüber, dass zwei grundlegende Methoden zur Kopplung zweier Strukturelemente einer Werkzeugmaschine zu unterscheiden sind. Die erste Methode ist das sogenannte "Kinematic Design". Es beschreibt eine statisch bestimmte Verbindung, bei der die Einflüsse der Fertigung der Komponenten geringer sind. Zudem sind die Kraftflüsse eindeutig und Positionen sowie Orientierungen sehr genau bestimmbar. Allerdings sind die Steifigkeiten und Tragfähigkeiten der Verbindung unter anderem durch die zulässige Hertzsche Pressung beschränkt. Das "Elastic Averaged Design" hingegen geht von einer statisch überbestimmten Verbindung aus, bei der Spannungen durch elastische Verformungen erzeugt werden. Diese können zu unerwünschten Biegungen führen und lassen sich analytisch nicht eindeutig zuordnen. Dafür können jedoch sehr hohe Tragfähigkeiten und Steifigkeiten erzielt werden, wie das Beispiel des Zusammensteckens zweier Legosteine zeigt.

Eine Form des "Kinematic Design" ist die Kinematische Kopplung, deren Grundidee darin besteht, genau sechs Freiheitsgrade zu sperren, die jeder Körper im dreidimensionalen Raum hat. Demnach ist die Schaffung von exakt sechs Kontaktpunkten zwischen den zwei zu verbindenden Elementen in richtiger Anordnung erforderlich. Die Anordnung der

Kontaktpunkte ist so zu gestalten, dass bei Weglassung einer Kontaktfläche die freierwerdende Richtung möglichst normal auf die weggelassene Kontaktfläche steht. Es existieren zahlreiche Anordnungen, die dieses Kriterium erfüllen, wobei die zwei bekanntesten die Kelvin- und die Maxwell-Clamp sind.

Die Kelvin-Kopplung ist nach William Thompson (Lord Kelvin) benannt, der das Design in den Jahren 1868–1871 publizierte. Die Konstruktion besteht aus drei kugelförmigen Oberflächen, die jeweils auf einem konkaven Tetraeder, einer V-Nut, die zum Tetraeder zeigt, und einer flachen Platte ruhen. Das Tetraeder-Modell bietet drei Kontaktpunkte, während die V-Nut zwei und die flache Platte einen Kontaktpunkt aufweist. Diese Anordnung ergibt insgesamt sechs Kontaktpunkte, die für die Funktionsweise des Systems erforderlich sind. Ein signifikanter Vorteil dieses Designs ist, dass sich der Rotationsmittelpunkt am Tetraeder befindet. Allerdings treten bei Anwendungen mit hoher Belastung Probleme durch Kontaktspannungen auf. /35/



**Abbildung 26: Kelvin-Kinematiksystem /35/**

Die Prinzipien des Maxwell-Kinematiksystems wurden erstmals 1871 von James Clerk Maxwell publiziert. Dieses besteht aus drei V-förmigen Nuten, die zum Zentrum des Bauteils ausgerichtet sind, während das Gegenstück drei gekrümmte Oberflächen aufweist, die in die drei Nuten passen. Jede der drei V-Nuten bietet zwei Kontaktpunkte, was eine Gesamtzahl von sechs ergibt. Das vorliegende Design zeichnet sich durch eine ausgeprägte

Symmetrie aus, was den Fertigungsprozess maßgeblich erleichtert. Darüber hinaus begünstigt die Symmetrie eine thermische Stabilität der Maxwell-Kopplung, da eine einheitliche Ausdehnung oder Zusammenziehung der gekrümmten Oberflächen in den V-Nuten möglich ist. /35/

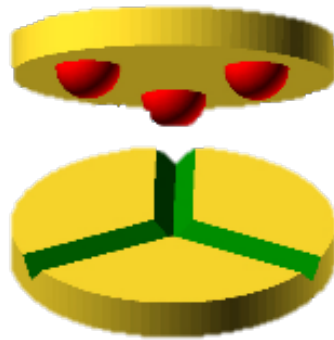


Abbildung 27: Maxwell-Kinematiksystem /35/

### 3.2.10.2 Quasikinematische Kopplung

Die Quasikinematische Kopplung ähnelt der kinematischen Kopplung in ihrem Aufbau. Im Unterschied zur kinematischen Kopplung werden dabei jedoch keine Punktkontakte angestrebt, sondern Kontaktlinien, wie in der Abbildung 28 dargestellt. Dies resultiert in einem statisch überbestimmten System. Die negativen Auswirkungen der statischen Überbestimmtheit werden durch kurze Linienkontakte reduziert, während gleichzeitig die Steifigkeit und Tragfähigkeit des Systems erhöht werden sollen. Bei derartigen Verbindungen können bei größeren Kräften gegenüber der kinematischen Kopplung erhebliche Kostenersparnisse erzielt werden, während gleichzeitig eine hohe Präzision gewährleistet wird. /36/

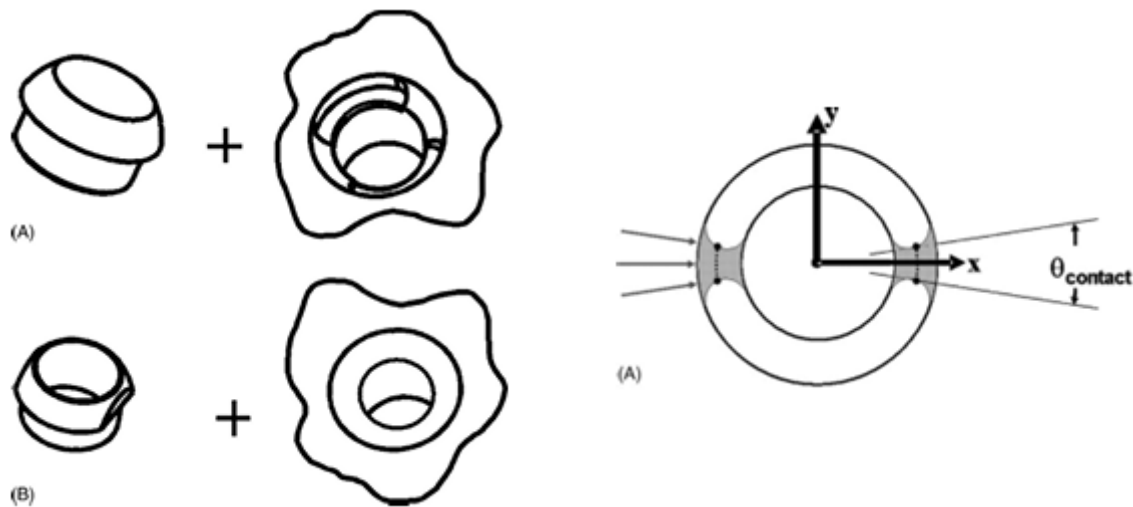


Abbildung 28: Quasikinematische Verbindung und Kontaktwinkel /36/

Die Herstellung der Nuten für die Kopplung benötigt die Verwendung einer CNC-Fräse.

### 3.2.10.3 Hohlschaftkegel

Der Hohlschaftkegel stellt eine Weiterentwicklung des Steilkegelsystems dar und hat diesen in vielen industriellen Bereichen bereits ersetzt. Zu den Vorteilen des Systems zählen hohe Steifigkeit, hohe Einwechselgenauigkeit und kurze Wechselzeiten. Beim Schließen der Verbindung wird die Zugstange zurückgezogen und dadurch die Klemmhebel verspreizt, was das Gegenstück in der konischen Form fixiert. Die dargestellte Abbildung 29 veranschaulicht die unterschiedlichen Zustände der Verbindung, wobei der linke Zustand den geöffneten und der rechte den geschlossenen Zustand darstellt. Die Verbindung wird gegen Verdrehen gesichert, indem zusätzliche Passstifte oder ähnliche Verdrehsicherungen verwendet werden. Diese Variante zeichnet sich durch eine hohe axiale Verbindungsgenauigkeit aus und macht die Teillösung "Werkzeug fixieren" obsolet. Allerdings sprechen die Kosten und die Masse tendenziell gegen diesen Lösungsansatz. /37/

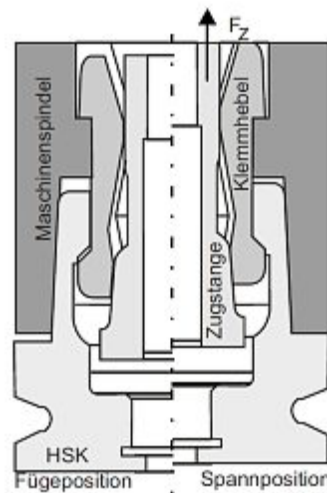


Abbildung 29: Hohlenschaftkegel (Fügeposition und Spannposition) /37/

#### 3.2.10.4 Kegelstifte

Ein weiterer Schritt weg vom "Kinematic Design" wird durch Kegelstifte markiert, die je Stift einen Kontaktkreis mit der Verbindung bilden. Aufgrund ihrer Einfachheit stellen Kegelstifte die denkbar einfachste Lösung des Problems dar. Allerdings sind Kegelstifte mit hoher Passpräzision aufgrund minimaler Toleranzen sehr teuer zu fertigen und bieten dennoch eine geringere Genauigkeit. Darüber hinaus wäre es erforderlich, die geforderten hohen Werkzeug-Wechselzahlen zu testen, da davon auszugehen ist, dass diese einen negativen Einfluss auf die Positionierung haben.

#### 3.2.11 Fixierung des Werkzeugs

Die nachfolgenden Lösungen vervollständigen in Kombination mit der Lösung für "Positionieren des Werkzeuges" die präzise lösbare Verbindung zwischen Werkzeug und Führung. Die folgenden Lösungsansätze zielen darauf ab, eine exakte Positionierung und Orientierung auch unter dynamischen Kräfteeinwirkungen zu gewährleisten. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass die Fixierung keine negativen Auswirkungen auf die Positionierung oder Orientierung des Werkzeuges hat und zusätzlich möglichst schnell lösbar bzw. schließbar ist. Da der Schließmechanismus mindestens teilweise auf der bewegten Führung

befestigt ist, sollten niedrige Massen angestrebt werden. Schließlich sollte der Mechanismus möglichst einfach gestaltet werden.

#### **3.2.11.1 Hubmagnet**

Der Hubmagnet zeichnet sich durch einen Tauchkern aus, welcher durch ein elektrisch erzeugtes Magnetfeld linear in eine Richtung bewegt wird. Es existieren unterschiedliche Varianten, wie beispielsweise mono- und bistabile Konstruktionen. Bei Nicht-Bestromung des Tauchkerns ziehen diese entweder eine Feder zurück oder verbleiben im gestreckten Zustand. Im Vergleich zu anderen magnetischen Lösungsansätzen fallen die Kosten und das Gewicht des Hubmagneten etwas höher aus. /38/

Eine Möglichkeit, die sich durch den Einsatz von Hubmagneten bietet, sind Hohlschaftkegel oder Konstruktionen nach ähnlichem Prinzip, die ausreichend große Zugkräfte zwischen Werkzeug und Führung erzeugen.

#### **3.2.11.2 Elektromagnet**

Die Erzeugung eines Magnetfeldes unter Strom ermöglicht die Generierung der erforderlichen Zugkraft zwischen Werkzeug und Führung. Elektromagneten zeichnen sich zudem durch ihre leichte Bauweise und kompakte Größe aus und ermöglichen ein elektronisches Öffnen und Schließen der Verbindung. Ein signifikanter Nachteil besteht jedoch in der kontinuierlichen Notwendigkeit einer Stromversorgung, die zu einer Wärmeentwicklung, einem hohen Stromverbrauch und potenziellen Schäden bei einem Stromausfall führen kann. /39/

#### **3.2.11.3 Permanentelektromagnet**

Permanentelektromagneten und Elektromagnete weisen eine gegenläufige Funktionsweise auf. Bei Bestromung induzieren Permanentelektromagneten ein Magnetfeld, welches das bereits bestehende Permanentmagnetfeld neutralisiert. Somit wird die Magnetkraft bei Stromfluss abgeschaltet. Da die Neutralisierung der Kraft ausschließlich während des Wechselstroms erfolgen soll, ist eine kurze Dauer des Stromflusses zu erwarten. Infolgedessen ist keine schädliche Wärmeentwicklung zu erwarten. Ähnlich den Elektromagneten weisen Permanentelektromagnete ein geringes Gewicht und eine kleine Baugröße auf, die Kosten pro Krafteinheit fallen allerdings in etwa doppelt so hoch aus. /40/

#### **3.2.11.4 Permanentmagnet**

Permanentmagnete zeichnen sich durch eine hohe Kraftentfaltung bei geringen Kosten und einem geringen Platzbedarf aus. Allerdings besteht bei großen Magnetfeldern die Möglichkeit einer negativen Interaktion mit anderen elektrischen Komponenten, wie beispielsweise Lüfter oder Sensoren, was zu einer Störung der Funktion führen kann. Das Schließen und Lösen der Verbindung zwischen Werkzeug und Führung kann nicht elektronisch gesteuert werden, sondern muss durch mechanische Bewegung und Kräfte erfolgen. Um die Trennung der Verbindung zu ermöglichen, ist die Entwicklung eines Krafttrenners erforderlich, dessen Funktion darin besteht, die Kräfte zu minimieren, die für die Trennung der verbundenen Magnete erforderlich sind. Die Trennung erfolgt durch den Krafttrenner, indem er die verbundenen Magnete mit einer Distanz von wenigen Millimetern voneinander trennt. Dies ist dadurch bedingt, dass die Magnetkraft mit zunehmender Entfernung exponentiell abnimmt, sodass die Trennung ohne großen Kraftaufwand erfolgt. /17/

Ein möglicher Ansatz zur Trennung ist die Verwendung einer Trennrampe am Werkzeugparkplatz, die zwischen die beiden Magnete getrieben wird und so deren Haltekraft reduziert, um das Werkzeug von der Führung zu trennen. Dies hat jedoch eine Vergrößerung des notwendigen Platzes pro Werkzeug im Magazin zur Folge.

#### **3.2.12 Einstellung des Druckbettes**

Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die Nivellierung nicht mit der Nivellierung des Druckerbettes mit dem Boden gleichzusetzen ist. Der Begriff "Druckbett-Nivellierung" bezeichnet demgemäß die Kalibrierung der Parallelität und der Höhe zwischen der Druckdüse bzw. den Druckdüsen (beispielsweise bei IDEX-Druckern wie dem „Big Meter“) und der gesamten Druckfläche. Im Rahmen der Nivellierung ist es erforderlich, dass die Höhe exakt gleich ist, unabhängig davon, auf welcher Achse sich die Düse befindet.

##### **3.2.12.1 Manuelle Nivellierung**

Um die zugrundeliegenden Mechanismen zu erfassen, ist es zunächst erforderlich, die Funktionsweise der manuellen Nivellierung des Druckbetts zu verstehen. Im Rahmen der manuellen Druckbett-Nivellierung erfolgt eine manuelle Einstellung der Höhe des

Druckbetts durch den Benutzer. Dies erfolgt durch eine manuelle Justierung der Befestigungsknöpfe oder -schrauben, welche die Bauplatte mit dem Drucker verbinden. Der Benutzer hat somit die Möglichkeit, das Druckbett nach oben oder unten zu bewegen und gleichzeitig zu überprüfen, ob alle Ecken waagerecht sind.

In Bezug auf den Prozess selbst besteht unter Experten keine Einigkeit darüber, ob der Drucker vorgeheizt werden sollte oder nicht. Einige Experten sind der Meinung, dass eine Erwärmung des Druckbetts unerlässlich sei, da sich dieses bei der Erwärmung ausdehnt und eine wirklich ebene Oberfläche nur gewährleistet werden kann, wenn der Drucker eingeschaltet ist. Andere Experten sind der Meinung, dass die Ausdehnung vernachlässigbar ist und Sicherheitsprobleme wie Verbrennungen vermieden werden können, wenn der Drucker ausgeschaltet bleibt. Es kann als gesichert gelten, dass der erste Schritt in einer Reinigung sowohl der Düse als auch der Bauplatte selbst besteht. Dies gewährleistet präzisere Resultate.

### **3.2.12.2      Automatische Nivellierung / „Auto-Leveling“**

Ein zunehmend zu beobachtender Trend bei 3D-Druckern ist die Integration des sogenannten "Auto-Leveling". Wie der Name impliziert, ist ein 3D-Drucker in der Lage, sich mit minimalinvasiven Eingriffen des Benutzers selbst zu nivellieren.

Die automatische Nivellierung des Druckbetts erfolgt entweder mittels Sensoren oder einer Sonde. Diese sind in der Regel am Druckkopf angebracht und dienen der Messung des Abstands zum Druckbett. Die Erstellung einer Netzkarte, welche die Werte und ihre jeweiligen Koordinaten beinhaltet, ermöglicht dem Drucker die Bestimmung der Höhe des Druckbetts sowie den darauffolgenden Ausgleich. In der Praxis erfolgt die Justierung des Druckbetts durch das Nivelliersystem nur in Ausnahmefällen. Vielmehr ist der Druckkopf dazu imstande, eine etwaige Nivellierungsabweichung des Druckbetts auszugleichen. Die automatische Nivellierung des Druckbetts erfreut sich großer Beliebtheit, da sie für den Benutzer einfacher zu handhaben ist. Ein weiterer Vorteil ist die höhere Präzision der Sensoren im Vergleich zur menschlichen Hand, wodurch eine höhere Konsistenz gewährleistet wird.

### **3.2.13 Beheizen des Druckbettes**

Beheizte Druckbetten sind eine hochentwickelte Komponente zur Verbesserung der Druckqualität. Die Wärme wird durch elektrischen Widerstand erzeugt und gleichmäßig über die Oberfläche des Druckmaterials verteilt.

Während der 3D-Drucker das geschmolzene Filament extrudiert, hält das Heizbett die Temperatur konstant. Die Wärmezufuhr verhindert, dass die ersten Schichten zu schnell abkühlen, so dass sie gut an der Oberfläche haften. Auf diese Weise wird eine günstige Umgebung für die Druckbasis geschaffen.

Heizbetten eignen sich hervorragend zur Vermeidung von Verformungen, insbesondere bei Materialien, die beim Abkühlen schrumpfen. Da die Temperatur konstant gehalten wird, bleibt der Druck flach und gleichmäßig.

Die Vielseitigkeit von Heizbetten zeigt sich bei der Verarbeitung einer Vielzahl von Filamenten. Von zähem ABS bis zu flexiblem Thermoplastischen Polyurethan (TPU) - ein Heizbett erweitert die Materialoptionen erheblich. Der „Big Meter“ besitzt bereits ein beheiztes Druckbett, weshalb dieses auch in der weiteren Gestaltung genutzt wird. Im Falle der Roboterzelle ist ein beheiztes Druckbett von großer Relevanz, da beheizte Druckbetten insgesamt besser sind als unbeheizte Druckbetten.

### **3.2.14 Bewegung des Druckbettes**

Die Bewegung des Druckbettes in einem 3D-Drucker stellt einen zentralen Bestandteil des Druckprozesses dar, da das Druckbett in der Regel eine der wichtigsten Achsen für den Druckvorgang bildet. In den meisten 3D-Druckern ist das Druckbett entweder auf der Z-Achse (vertikal) oder, in einigen Fällen, auf der Y-Achse (horizontal) positioniert und bewegt sich, um das Modell Schicht für Schicht zu drucken. Im Folgenden wird die Funktionsweise der Bewegung des Druckbettes detailliert erläutert.

#### **3.2.14.1 Bewegung auf der Z-Achse (Vertikalbewegung)**

Bei vielen 3D-Druckern, insbesondere bei FDM-Druckern (Fused Deposition Modeling), bewegt sich das Druckbett in der Regel in vertikaler Richtung (Z-Achse), um die verschiedenen

Schichten des gedruckten Objekts zu erstellen. Im Anschluss an den Druck jeder einzelnen Schicht wird das Druckbett um eine definierte Höhe, der sogenannten Schichtdicke, nach unten verschoben, um den benötigten Platz für die nächste Schicht zu schaffen.

Im Falle des „Big Meters“ wird eine Vertikalbewegung des Druckbettes genutzt, wodurch es in der weiteren Umsetzung auch weiterhin genutzt wird.

#### **3.2.14.2 Bewegung auf der X- und Y-Achse (Horizontalbewegung)**

Die Bewegung des Druckbetts kann zudem in horizontaler Richtung erfolgen, wobei sich das Druckbett in vielen Druckern auf den Achsen X und Y bewegt. Diese Bewegung ist weniger häufig als die vertikale Z-Bewegung, jedoch nutzen einige 3D-Drucker (insbesondere größere oder spezialisierte Modelle) auch diese Achsen, um den Druckbereich effizient zu nutzen. Die Bewegung in diesen Achsen ermöglicht es dem Drucker, Objekte auf dem Bett in verschiedenen Positionen zu drucken.

### 3.3 Morphologischer Kasten

Im folgenden Morphologischen Kasten sind sowohl die einzelnen Teilfunktionen aufgelistet und die dazugehörigen Teillösungen. Die gewählte Variante ist mit grün markiert, leicht orange eingefärbte Teillösungen sind Varianten, welche im aktuellen Fall nicht zwingend notwendig sind, jedoch einbezogen werden können.

| Teilfunktion                | Teillösungen                                                                                           |                                                 |                                   |                                 |             |                |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------|----------------|
| Energieumwandlung           | 24 V                                                                                                   | 12V                                             |                                   |                                 |             |                |
| Regelung der Raumtemperatur | Offene Druckkammer                                                                                     | Geschlossene Druckkammer/<br>passive Heizkammer | Niedertemperatur-Wärme-<br>kammer | Hochtemperatur-Wärme-<br>kammer |             |                |
| Maschinensteuerung          | Verwendung der vorhandenen Steuerung des „Big Meter“ mit Erweiterungsplatine Duex5-Erweiterungsplatine |                                                 |                                   |                                 |             |                |
| Speicherung des Filaments   | Filamenttrockner                                                                                       | Filament-Aufbewahrungsbox                       | Vakuumversiegelte Beutel          |                                 |             |                |
| Filamentzuführung           | Direct-Drive-Extruder                                                                                  | Bowden-Extruder                                 | Biegewellen-Extruder              |                                 |             |                |
| Filamentschmelzung          | Verwendung der aktuellen Hot-Ends im „Big Meter“ mit Möglichkeit der Aufrüstung falls notwendig        |                                                 |                                   |                                 |             |                |
| Kabelführung                | Verwendung der aktuellen Kabelführung des „Big Meter“                                                  |                                                 |                                   |                                 |             |                |
| Werkzeuggestaltung          | Kartesisches System                                                                                    | CoreXY-System                                   | Delta-System                      | Polares System                  | Linearachse | Linear-schiene |
| Parken des Werkzeugs        | Magnete                                                                                                | Schnappmechanismus                              | Reibung                           |                                 |             |                |
| Positionieren des Werkzeugs | Kinematische Kopplung                                                                                  | Quasikinematische Kopplung                      | Hohlschaftkegel                   | Kegelstifte                     |             |                |
| Fixieren des Werkzeugs      | Hubmagnet                                                                                              | Elektromagnet                                   | Permanentelektromagnet            | Permanentmagnet                 |             |                |
| Einstellung des Druckbettes | Manuelle Nivellierung                                                                                  | Automatische Nivellierung/„Auto-Leveling“       |                                   |                                 |             |                |
| Beheizen des Druckbettes    | Verwendung des vorhandenen Heizbettes im „Big Meter“                                                   |                                                 |                                   |                                 |             |                |
| Bewegung des Druckbettes    | Bewegung Richtung Z-Achse                                                                              | Bewegung Richtung X- und Y-Achse                |                                   |                                 |             |                |

**Tabelle 1: Morphologischer Kasten**

Da der „Big Meter“ bereits betriebsbereit ist und dieser über ein 24V Netzteil verfügt, werden alle weiteren Komponenten, welche zusätzlich benötigt werden für die Aufrüstung, auch auf 24V abgestimmt. Dies betrifft im genaueren die Permanentelektromagneten, welche für die Fixierung des Werkzeugs notwendig sind. Die Teilfunktionen Energieumwandlung, Regelung der Raumtemperatur, Filamentzuführung, Kabelführung, Werkzeugbewegung, Einstellung des Druckbettes, Beheizen und Bewegung des Druckbettes und die dazugehörigen Teillösungen sind vorgegeben, da diese durch den „Big Meter“ bereits gegeben sind. Bei der Maschinensteuerung muss eine Erweiterungsplatine integriert werden, um die weiteren Materialien in die Software übertragen zu können und der Drucker somit erkennen kann, welche Materialien aktuell nutzbar sind und an welcher Stelle sich diese befinden. Falls der Drucker oder die Roboterzelle in einer Umgebung arbeiten müsste, in der es Probleme hinsichtlich der Luftfeuchtigkeit, der UV-Strahlung oder eine verstärkte Entwicklung von Verunreinigungen in der Luft geben sollte, sind die Varianten der Filamentspeicherung in Betracht zu ziehen. Die Nutzung des aktuellen Hot-Ends des „Big Meter“ ist für erste Nutzungsversuche durchaus ausreichend, der Nachfolger im neuen „Big Meter“ kann in den aktuellen 3D-Drucker nachgerüstet werden. Bei der Kabelführung muss darauf geachtet werden, ob die Öffnung auf der Oberseite des Druckers groß genug ist für die weiteren Filamentstränge, welche durch die Erweiterung dazukommen. Um die einzelnen Werkzeuge in ihrer inaktiven Position zu parken, ist ein einfacher Magnet die simpelste Lösung und Bedarf weniger Änderung an den bereits vorhandenen Bauteilen. Die kinematische Kopplung für die Positionierung des Werkzeuges ist im Vergleich zu den aufgeführten Varianten die einfachste Umsetzung, gepaart mit einer hohen Genauigkeit. Dazu einen Permanentelektromagneten, welcher in der Anschaffung kostspieliger ist als beispielsweise die Fertigung einer Rotationskopplung, jedoch weist er eine kleine Baugröße auf und ein geringes Gewicht und eine einfache Montage im vorhandenen System.

### **3.4 Bewertung**

Es empfiehlt sich, die weitere Ausreifung der ausgewählten Variante auf Basis der zugrunde liegenden Anforderungen zu evaluieren. Nach Selektion und anschließender Gewichtung der Kriterien ist eine Bewertung der Lösungskombination vorzunehmen.

#### **3.4.1 Bewertungskriterien**

Im Rahmen der Analyse der Anforderungen wurden adäquate Kriterien zur Bewertung abgeleitet. Zum Zeitpunkt der Bewertung sind bereits einige Komponenten vorhanden, sodass die Kostenschätzung bedeutend geringer als ein Neubau des Systems ist.

##### **1. Komplexität**

Es stellt sich die Frage, ob die Erfüllung der Gesamtfunktion auf dem einfachsten Weg gelungen ist.

##### **2. Erweiterbarkeit**

Es stellt sich die Frage, ob eine Weiterentwicklung des Druckers als sinnvoll und realisierbar erachtet werden kann.

##### **3. Sicherheit gegen Oozing**

Es stellt sich die Frage, inwiefern das Oozing-Problem minimiert werden konnte.

##### **4. Effizienz**

Es stellt sich die Frage, ob die Druckteile in angemessener Zeit gedruckt werden und ob die Werkzeugwechsel in kurzer Zeit ablaufen.

##### **5. Wirtschaftlichkeit**

Es stellt sich die Frage, ob die geschätzten Kosten pro Funktion geringgehalten wurden.

##### **6. Qualität der Druckteile**

Es stellt sich die Frage, ob die Druckteile eine zufriedenstellende Qualität erreicht haben.

### 3.4.2 Gewichtung der Kriterien

In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Kriterien paarweise miteinander verglichen und dann gewichtet.

| Paarweiser Vergleich der Kriterien zur Konzeptbewertung | Komplexität | Erweiterbarkeit | Sicherheit gegen Oozing | Effizienz | Wirtschaftlichkeit | Qualität der Druckteile | Summe | Gewichtung |
|---------------------------------------------------------|-------------|-----------------|-------------------------|-----------|--------------------|-------------------------|-------|------------|
| 1. Komplexität                                          |             | 2               | 0                       | 1         | 1                  | 1                       | 5     | 0,5        |
| 2. Erweiterbarkeit                                      | 0           |                 | 0                       | 2         | 1                  | 0                       | 3     | 0,3        |
| 3. Sicherheit gegen Oozing                              | 2           | 2               |                         | 2         | 2                  | 2                       | 10    | 1          |
| 4. Effizienz                                            | 1           | 0               | 0                       |           | 0                  | 0                       | 1     | 0,1        |
| 5. Wirtschaftlichkeit                                   | 1           | 1               | 0                       | 2         |                    | 1                       | 5     | 0,5        |
| 6. Qualität der Druckteile                              | 1           | 2               | 0                       | 2         | 1                  |                         | 6     | 0,6        |

Tabelle 2: Paarweise Vergleich der Kriterien

### 3.4.3 Bewertung

Zur Bewertung der gewählten Lösungskombination wird die technische Wertigkeit herangezogen. Diese errechnet sich nach VDI 2225 aus dem Verhältnis der Summe der Punkte der Lösung zur Anzahl der Bewertungskriterien multipliziert mit der maximalen Punktzahl, also der Ideallösung. /41/

$$W = \frac{\text{Summe der Punkte der Lösungen}}{\text{Anzahl der Bewertungskriterien} * \text{maximale Punktzahl}}$$

Die VDI 2225 schreibt für die Einschätzung technischer Wertigkeiten folgende Werte vor.

$$W > 0,8 \rightarrow \text{Sehr gute Lösung}$$

$$W \sim 0,7 \rightarrow \text{Gute Lösung}$$

$$W < 0,6 \rightarrow \text{Unbefriedigende Lösung}$$

Nun folgt die Tabelle für die Bewertung der gefundenen Lösung mit Wichtung im Vergleich zur Ideallösung.

| Konzeptbewertung | Kriterium  | 1   | 2   | 3  | 4   | 5   | 6   | Summe | Technische Wertigkeit |
|------------------|------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-------|-----------------------|
|                  | Gewichtung | 0,5 | 0,3 | 1  | 0,1 | 0,5 | 0,6 |       |                       |
| Gefundene Lösung | Bewertung  | 4   | 3   | 4  | 2   | 2   | 2   | 17    | 0,71                  |
|                  | Gewichtet  | 16  | 9   | 16 | 4   | 9   | 6   | 60    | 0,83                  |
| Ideallösung      | Bewertung  | 4   | 4   | 4  | 4   | 4   | 4   | 24    | 1                     |
|                  | Gewichtet  | 16  | 12  | 16 | 8   | 12  | 12  | 76    |                       |

**Tabelle 3: gesamte Konzeptbewertung**

Diese Bewertung zeigt auf, dass die gewählte Variante gemäß der Richtlinie VDI 2225 als gut zu erachten ist und unter Berücksichtigung der Gewichtung als sehr gut einzustufen sein kann. Infolgedessen kann die weitere Entwicklung des Entwurfs und die Ausarbeitung des Konzepts mit dieser Variante erfolgen.

## **4 Entwurf**

In der nachfolgenden Abhandlung wird das gewählte Konzept einer weiteren Präzisierung unterzogen. Ein erster Entwurf in rudimentärer Form fungiert als Fundament für die Entwicklung der einzelnen Teillösungen. Da bereits einige der Teillösungen vorliegen, fokussiert sich dieses Kapitel auf die Erweiterung des 3D-Druckers um einen Werkzeugwechsler sowie dessen softwaretechnische Implementierung.

### **4.1 Maschinensteuerung**

Die Maschinensteuerung setzt sich zum einen aus der Hardware zusammen, die korrekt angeschlossen werden muss, und zum anderen aus der Software, die aus G-Code besteht und korrekt programmiert werden muss. Nur so kann eine einwandfreie Funktion der bereits bestehenden Extruder und der zusätzlichen Extruder gewährleistet werden.

#### **4.1.1 Hardware**

Die Erweiterungsplatine Duex5 kann direkt an das vorhandene Board, das Duet 2 Wifi, angeschlossen werden. Die Position, an der das Erweiterungsboard mit dem Board verbunden werden muss, ist in Bild 30 mit einem roten Pfeil gekennzeichnet.

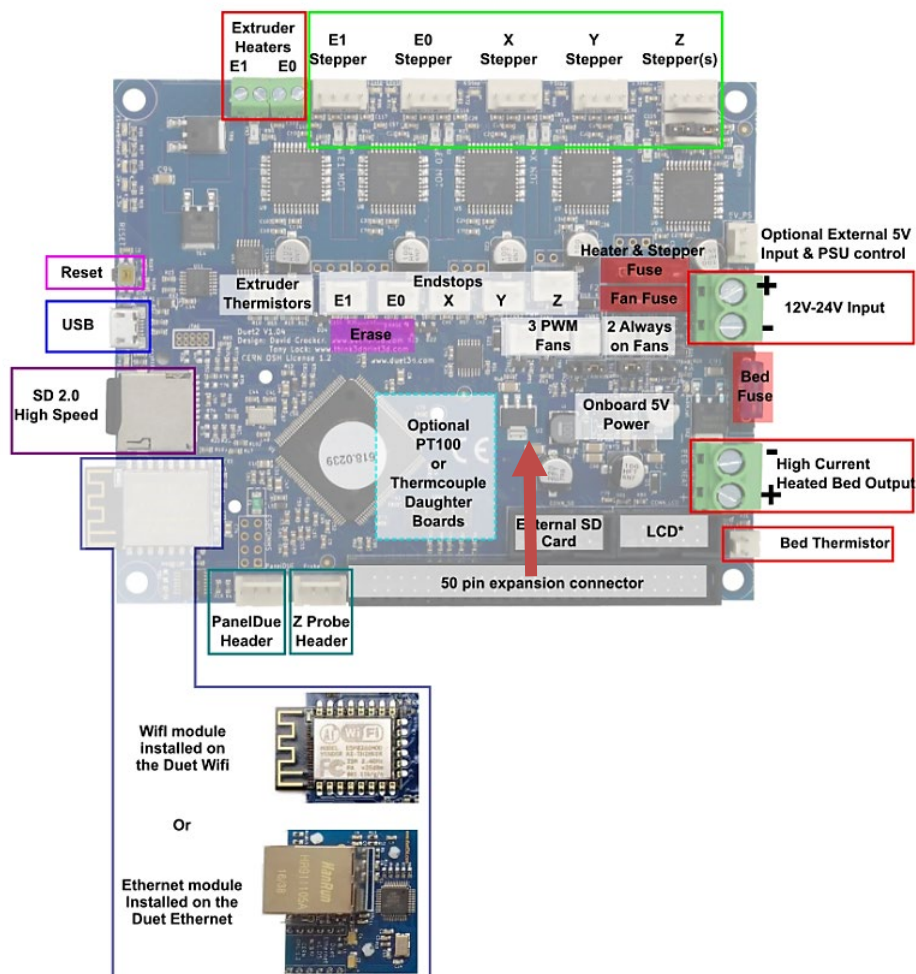


Abbildung 30: Duet 2 Wifi Board /42/

Im folgenden Bild 31 ist das Erweiterungsboard Duex 5 dargestellt. Auch in diesem Bild zeigt der rote Pfeil an die Anschlussstelle des Erweiterungsboards, welche an das Main-board angeschlossen werden muss.

## Duex Main Features

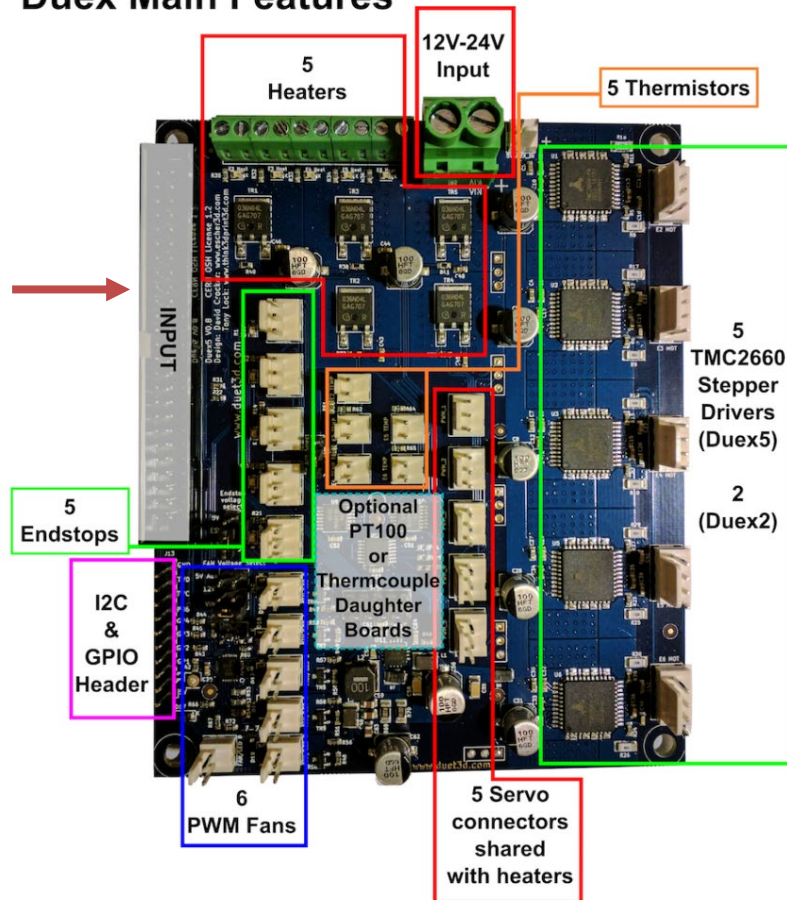


Abbildung 31: Erweiterungsboard DueX 5 /26/

Anhand der verschiedenen Markierungen, die der Hersteller bereits vorgenommen hat, lässt sich erkennen, an welchen Stellen die zusätzlichen Extruder angeschlossen werden müssen. Dies ist anhand der roten Umrandung mit der Beschriftung "5 Heaters" erkennbar. Die weiteren Markierungen und Umrandungen sind für den vorliegenden Entwurf von untergeordneter Relevanz, können jedoch in einer späteren Umsetzung an Signifikanz gewinnen, beispielsweise im Falle des Bedarfs weiterer Lüfter, der Integration von LEDs im Druckraum oder der Verwendung zusätzlicher Schrittmotortreiber auf der Erweiterungsplatine für den Betrieb mehrerer Extruder in paralleler Konfiguration. Der Hersteller der Platinen, Duet3D, bietet auf seiner Website sehr ausführliche Dokumentationen für die Hauptplatine und die Erweiterungsplatine an, die eine signifikante Erleichterung bei der Installation der verschiedenen Bauteile bewirken.

### 4.1.2 Software

Aus softwaretechnischer Perspektive sind einige Aspekte zu berücksichtigen, um die Erweiterung des "Big Meter" mit mehreren Extrudern zu ermöglichen. Zunächst ist es essenziell, dass der Slicer die exakte Anzahl an Extrudern konfiguriert. Im vorliegenden Fall können bis zu 8 Extruder konfiguriert werden, sodass in diesem Fall der Slicer Cura ausreichend ist. Darüber hinaus ist eine Anpassung der Firmware des 3D-Druckers erforderlich, um die Kommunikation über G-Code zu ermöglichen. Im vorliegenden Fall basiert die Firmware des "Big Meter" auf der Duet ReRap Firmware, welche flexibel an die Hardware-Konfigurationen angepasst werden kann. Die Definition der weiteren Drucker erfolgt anhand des folgenden Code-Ausschnitts:

```
; Extruder 3  
  
M563 P2 D2 H2 F2 ; Werkzeug 2, verwendet Extruder-Treiber 2, Heizgerät  
2, Lüfter 2  
  
G10 P2 X0 Y0 Z0 ; Werkzeug 2 Offset  
  
M92 E420 ; Schritte pro mm für Extruder 3
```

Abgesehen von der Konfiguration des Extruders sind auch die Heizelemente, das heißt der Temperatursensor, das Heizgerät oder die Kühlung, die Regelung des Proportional-Integral-Differential-Reglers sowie die Maximaltemperatur konfigurierbar. Die Befehle für diese Konfiguration sind im folgenden Code-Ausschnitt dargestellt, wobei die Werte nicht real sind.

```
; Heizgerät für Extruder 3  
M308 S2 P"e2_temp" Y"thermistor" T100000 B4725 ; Temperatursensor für  
Extruder 3  
M950 H2 C"e2_heat" T2 ; Heizgerät für Extruder 3  
M307 H2 B0 S1.00 ; PID-Regelung für Heizge-  
rät 2  
M143 H2 S280 ; Maximaltemperatur für  
Extruder 3
```

Für den Werkzeugwechsel werden Makros benötigt, um eine Unterscheidung der einzelnen Extruder zu ermöglichen und die jeweils korrekten Makros zuzuordnen. Die Makros könnten in der Form von tpre2.g und tpost2.g geschrieben werden. Die Präfixe "pre" und "post" bezeichnen dabei den Zustand vor und nach dem Wechsel zu Werkzeug 2, wobei die Zahl 2 als Suffix dient.

## 4.2 Parken des Werkzeugs

Die Realisierung des Parkens der inaktiven Extruder erfolgt mittels Magneten, die am Rahmen der Halterung des Extruders und am Rahmen des Werkzeugwechslers angebracht sind. Das nachfolgende Bild 32 zeigt den primären Extruder an dessen Halterung. Die Anbringung der Magnete ist an der blauen Markierung vorgesehen. Vor dem Einpressen der Neodym-Magnete, welche temperaturbeständig sind, müssen die Schrauben entfernt werden. Aufgrund der hohen Temperaturen ist es nicht möglich, die Magnete einzukleben, da der Kleber sich auflösen könnte.

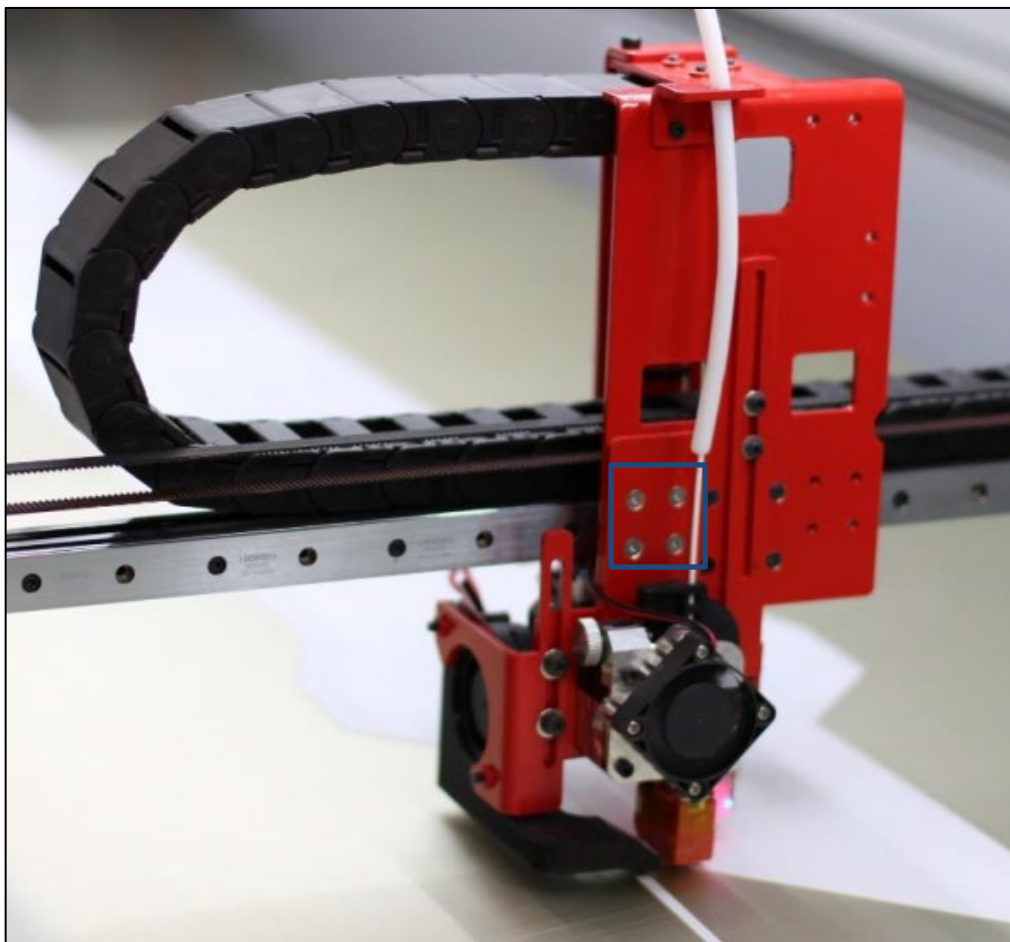


Abbildung 32: Extruder des Big Meter

Das darauffolgende Bild 33 veranschaulicht eine theoretische Realisierung der Halterung im Werkzeugwechsler. Anstelle der Befestigungshilfe, die in der Abbildung rot markiert ist, werden dort die Neodym-Magnete eingepresst. Dies resultiert in einer einfachen, effizienten und langlebigen Lösung für das Parken von inaktiven Extrudern während des Druckvorgangs.

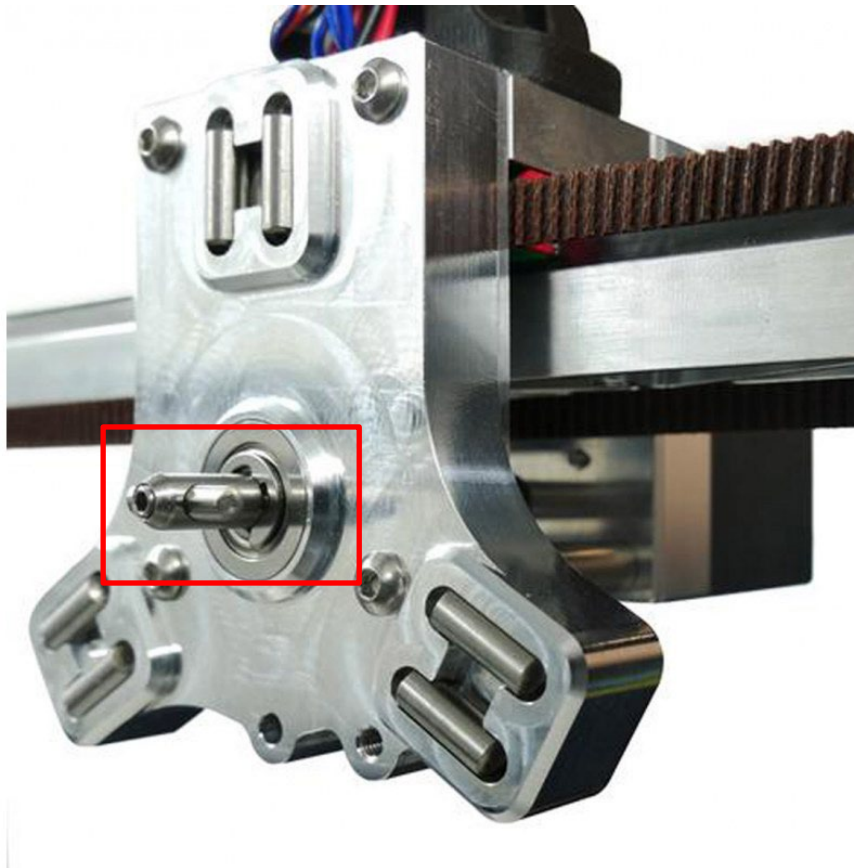


Abbildung 33: Theoretische Halterung des Werkzeugwechslers /43/

### 4.3 Positionieren und Fixieren des Werkzeuges

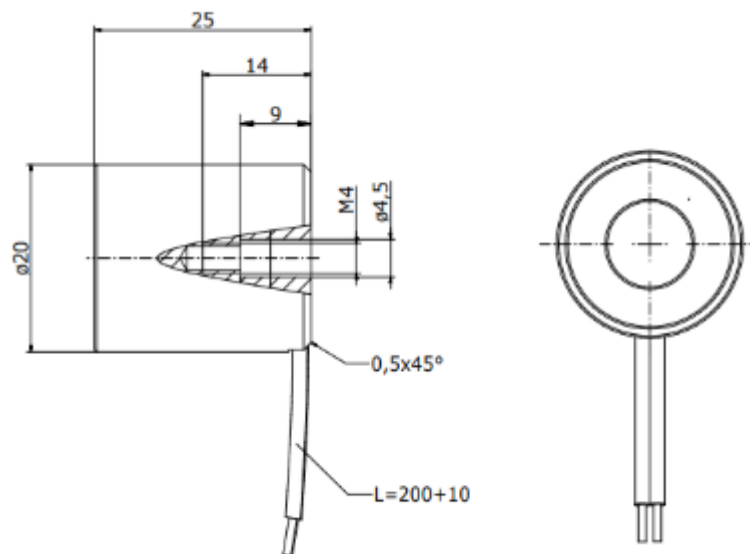
Die kinematische Kopplung in Kombination mit Permanentelektromagneten bilden die Werkzeugkopplung, welche dafür verantwortlich ist, dass das Werkzeug beliebig oft gewechselt werden kann und im Endeffekt wieder an der gleichen Position der vorherigen Ent- beziehungsweise Aufnahme positioniert werden kann. Hierbei ist das Bezugssystem nicht das übergeordnete Koordinatensystem, sondern die Position der vorherigen Aufnahme. Die

notwendige Kraft, um das Werkzeug in der Halterung zu fixieren, wird über den Permanentelektromagneten hergestellt. Im folgenden Bild 34 ist diese kinematische Kopplung schematisch dargestellt.



**Abbildung 34: schematische Darstellung der kinematischen Kopplung /17/**

Das folgende Bild 35 stellt die Abmessungen des Permanentelektromagneten dar, welcher in die kinematische Kopplung integriert, wird für die notwendige Anpresskraft.



**Abbildung 35: Zeichnung des Permanentelektromagneten /44/**

Diese Kombination aus kinematischer Kopplung, Permanentelektromagneten, der bereits vorhandenen Kabelführung des „Big Meter“ und der Verwendung der Neodym-Magneten für das Parken des Werkzeugs stellt sicher, dass die Teilfunktion des „Filamentwechsel“ beliebig oft durchgeführt werden kann und die Genauigkeit während des Prozesses nicht abnimmt.

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

### **5.1 Zusammenfassung**

Die Erweiterung eines 3D-Druckers durch die Integration eines Multi-Extrusions-Druckkopfes eröffnet vielversprechende Perspektiven für die Weiterentwicklung der additiven Fertigung. Die Technologie gestattet den simultanen Druck mit mehreren Materialien und eröffnet neue Möglichkeiten hinsichtlich der Flexibilität und Funktionalität der gedruckten Objekte. Zudem ist eine Steigerung der Vielfalt der verarbeitbaren Materialien zu erwarten, was zu einer signifikanten Erweiterung des Einsatzbereichs dieser Technologie führen dürfte. Die Verwendung neuartiger Verbundwerkstoffe und speziell entwickelter Polymere könnte die Erfüllung spezifischer Anforderungen in Bereichen wie der Medizin oder der Luft- und Raumfahrt ermöglichen. Die Integration fortschrittlicher Sensoren und KI-gesteuerter Steuerungen könnte zu einer signifikanten Verbesserung der Präzision und Reproduzierbarkeit der Druckprozesse führen, was insbesondere vorteilhaft für Anwendungen wäre, die hohe Genauigkeit und Detailtreue erfordern.

Darüber hinaus könnten zukünftige Druckköpfe mit intelligenten Funktionen ausgestattet werden, die eine automatische Erkennung der Materialeigenschaften ermöglichen und die Druckparameter in Echtzeit anpassen. Diese Entwicklung würde zu einer signifikanten Steigerung der Benutzerfreundlichkeit und zu einer gleichzeitigen Minimierung der Fehlerquote führen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Nachhaltigkeit. Die Verwendung recycelter Materialien und biologisch abbaubarer Polymere könnte dazu beitragen, die Umweltbelastung durch die additiven Fertigungsverfahren zu reduzieren und eine umweltfreundlichere Produktion zu fördern. Schließlich könnte die Skalierbarkeit von Multi-Extrusions-Druckern deren Einsatz in der industriellen Massenproduktion erleichtern. Die Herstellung komplexer, multifunktionaler Bauteile in großen Mengen sowie die Erschließung neuer Innovationsmöglichkeiten in diversen Industriezweigen wären folglich realisierbar.

Die Entwicklung und Fertigung des Druckers wurden maßgeblich durch die Unterstützung der mittlerweile großen und aktiven 3D-Maker-Community erleichtert. Im Verlauf des

Entwicklungsprozesses konnten eine Vielzahl an Herausforderungen durch den Einsatz und die Veröffentlichung von Erfahrungen anderer Akteure adressiert, gelöst oder weiterentwickelt werden. Die Open-Source-Mentalität, die in diesem Kontext eine bedeutende Rolle spielt, ermöglichte eine fokussierte Entwicklung der Werkzeugwechselmechanik. Für den konventionellen FFF-3D-Druck stehen bereits erprobte, flexibel einsetzbare und kosteneffiziente Teillösungen zur Verfügung, die als Grundlage für die Entwicklung des Werkzeugwechslers dienten.

## **5.2 Ausblick**

Sowohl die Erweiterbarkeit als auch die Flexibilität wurde in der Konzeptphase und dem Entwurf mit einer hohen Priorität angegeben. Weiterhin ist die Nutzung der Firmware ReppRap ein weiterer Punkt, welche diese Kriterien unterstützt, da die Firmware sehr gut dokumentiert ist und auch aktiv vom Entwickler unterstützt und weiterentwickelt wird. Anhand dieser Gesichtspunkte ist ein Blick in die Zukunft der Multi-Extrusion in der additiven Fertigung durchaus positiv zu bewerten. Werkzeugwechsler werden bereits in vielen Bereichen der Industrie genutzt und haben dort vielseitige Einsatzbereiche und -möglichkeiten. Dadurch ist es möglich auch Werkzeuge zu nutzen, die nicht nur in der additiven Fertigung verwendet. Es ist denkbar, dass der 3D-Drucker in Zukunft ähnliche Möglichkeiten haben kann, wie beispielsweise die Roboterzelle, mit dem besseren finanziellen Aspekt. Mögliche Folgeprojekte oder Forschungsfragen und -aufgaben könnten sein:

- Einsatz von metallischen Materialien
- Nutzung von weiteren Werkzeugen zur Verbesserung der Oberflächenqualität
- Kombination des IDEX-Systems mit dem Werkzeugwechsler
- Nutzung von Werkzeugen zum Drehen, Fräsen, Bohren, Schleifen oder Schneiden
- Nutzung von Werkzeugen für die Überwachung der Druckqualität während des Druckprozesses
- Nutzung von Werkzeugen zum Einsetzen von Gewinden, elektrischen Schaltkreisen

## Quellenverzeichnis

1. Hochwarth, Dominik. Was ist additive Fertigung? Definition, Anwendung, Potenzial. *Ingenieur*. [Online] [Zitat vom: 25.11.2024.] <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/3d-druck/was-ist-additive-fertigung-definition-anwendung-potenzial/>.
2. Fused Filament Fabrication Prozesskette. *leistungszentrum-smart-production-materials*. [Online] [Zitat vom: 25.11.2024] <https://www.leistungszentrum-smart-production-materials.de/verfahrensdetails/fused-filament-fabrication-fff.html/>.
3. Gebhart, Andreas. Generative Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping - Rapid Tooling – Rapid Manufacturing. München: Hanser, 2007.
4. Multi-Material 3D-Druck, was ist das und was müssen Sie darüber wissen? *3dnatives*. [Online] [Zitat vom: 25.11.2024] <https://www.3dnatives.com/de/multi-material-druck-leitfaden-100120241/>.
5. Neue Produkte mit Multi-Material-3D-Druck. *Fraunhofer*. [Online] [Zitat vom: 26.11.2024] [https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2023\\_9\\_12\\_p\\_neue\\_produkte\\_mit\\_multi-material-3D-druck.html/](https://www.ikts.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2023_9_12_p_neue_produkte_mit_multi-material-3D-druck.html/).
6. Industrielle Anwendungen von Kunststoff 3D-Druck. *3faktor*. [Online] [Zitat vom: 26.11.2024] <https://3faktor.com/industrielle-anwendungen-von-kunststoff-3d-druck/>.
7. Multi-Material 3D-Druck Anwendungen. *Truer*. [Online] [Zitat vom: 26.11.2024] <https://am-printing.com/de/multi-material-3d-printing-202408091/>.
8. McGarry, Shannon. The Benefits of Multi-Material 3D Printing. [Online] [Zitat vom: 26.11.2024] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/the-benefits-of-multi-material-3d-printing/>.
9. Joram. Additive Fertigung im Fokus: Chancen, Herausforderungen und Zukunftsaussichten. *3druck*. [Online] [Zitat vom: 27.11.2024] <https://3druck.com/industrie/additive-fertigung-im-fokus-chancen-herausforderungen-und-zukunftsaussichten-16140528/>.

10. Der Modix Big Meter 3D-Drucker als Lösung für das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt.eV. (Projekt EDEN ISS). *BFI 3D*. [Online] [Zitat vom: 27.11.2024] <https://shop.bfi-it.de/der-modix-big-meter-3d-drucker-als-loesung-fuer-das-deutsche-zentrum-fuer-luft-und-raumfahrt-ev-projekt-eden-iss/>.
11. Isabell I. Die Rolle der additiven Fertigung in der Automobilindustrie. *3dnatives*. [Online] [Zitat vom: 27.11.2024] <https://www.3dnatives.com/de/rolle-der-additiven-fertigung-in-automobilindustrie/>.
12. Einsatzbereiche von 3D-Druck. *bitkom*. [Online] [Zitat vom: 27.11.2024] <https://www.bitkom.org/Themen/Technologien-Software/3D-Druck/Einsatzbereiche.html/>.
13. 3D-Druck in der Rüstungsindustrie. *3druck*. [Online] [Zitat vom: 27.11.2024] <https://3druck.com/anwendungen/3d-druck-ruestungsindustrie/>.
14. Schwalm, Samuel. Die Roboterzelle – Unverzichtbares Multitool für die Fertigung. *STiMA*. [Online] [Zitat vom: 27.11.2024] <https://www.stima-m.de/roboterzelle-multitool-fertigung/>.
15. Roboterzellen. *Robofunktion Systems*. [Online] [Zitat vom: 27.11.2024] <https://robofunktion-systems.com/news-trends/roboterzellen/>.
16. Madison, James. Multimaterial-3D-Druck: Enthüllung der Technologie. *sunlu*. [Online] [Zitat vom: 28.11.2024] <https://www.sunlu.com/de-de/blogs/3d-printing-guide/multi-material-3d-printing-unveiling-the-technology/>.
17. Samhaber, Maximilian Peter. Entwicklung eines Multi-Extrusion-Kopfes für einen FFF 3D-Drucker. [Online] [Zitat vom: 28.11.2024] <https://repositum.tu-wien.at/handle/20.500.12708/17035/>.

18. Průša, Josef. Original Prusa MMU3 now shipping: multi-material printing with improvements all around, plus a new FW for MMU2S! *prusa*. [Online] [Zitat vom 28.11.2024] [https://blog.prusa3d.com/original-prusa-mmu3-is-here-multi-material-printing-with-improvements-all-around-now-shipping\\_80485/](https://blog.prusa3d.com/original-prusa-mmu3-is-here-multi-material-printing-with-improvements-all-around-now-shipping_80485/).
19. Bambu Lab Filament Y Splitter mit Halterung. *Cults3d*. [Online] [Zitat vom: 28.11.2024] <https://cults3d.com/de/modell-3d/werkzeuge/bambu-lab-filament-y-splitter/>.
20. Guan Yupeng, Shen Bingxia, Zhang Yu, Fu Zi'ang. Design of Color Mixing 3D Printing System Based on LabVIEW. [Online] [Zitat vom: 28.11.2024] [http://www.csroc.org.tw/journal/JOC28\\_6/1991-1599-28.6-25.pdf/](http://www.csroc.org.tw/journal/JOC28_6/1991-1599-28.6-25.pdf/).
21. Palette 3. *Mosaic*. [Online] [Zitat vom: 28.11.2024] <https://www.mosaicmfg.com/products/palette-3/>.
22. Printing the unprintable using breakaway support on the Kraken. [Online] [Zitat vom: 28.11.2024] <https://e3d-online.com/blogs/news/printing-the-unprintable-using-breakaway-support-on-the-kraken/>.
23. Stevenson, Kerry. The Several Methods of Dual Extrusion. [Online] [Zitat vom: 28.11.2024] <https://www.fabbaloo.com/2018/03/the-several-methods-of-dual-extrusion/>.
24. Průša, Josef. Original Prusa XL Dev Diary #1 and FAQ. *prusa*. [Online] [Zitat vom: 29.11.2024] [https://blog.prusa3d.com/original-prusa-xl-dev-diary-1-faq\\_65575/](https://blog.prusa3d.com/original-prusa-xl-dev-diary-1-faq_65575/).
25. 3D-Drucker mit offener und geschlossener passiver/aktiver Kammer. *Filament2print*. [Online] [Zitat vom: 29.11.2024] <https://filament2print.com/de/blog/imprimantes-ouvertes-camera-active-passive?slug=imprimantes-ouvertes-camera-active-passive&module=smartblog/>.
26. DueX2 and DueX5. *Duet3d Documentation*. [Online] [Zitat vom: 30.11.2024] [https://docs.duet3d.com/Duet3D\\_hardware/Duet\\_2\\_family/DueX2\\_and\\_DueX5/](https://docs.duet3d.com/Duet3D_hardware/Duet_2_family/DueX2_and_DueX5/).
27. S4 FilaDryer, Platz für vier Spulen gleichzeitig. *sunlu*. [Online] [Zitat vom: 30.11.2024] <https://www.sunlu.com/de-de/products/sunlu-filadryer-s4/>.

28. KIT RepBox v2.5+ Build Your Own: "THE" 3D Printing Filament Management Solution. *repkord*. [Online] [Zitat vom: 30.11.2024] <https://www.repkord.com/products/repbox-2-the-3d-printing-spool-management-solution/>.
29. Vakuumierset für die Filamentlagerung. *filamentworld*. [Online] [Zitat vom: 01.12.2024] <https://filamentworld.de/shop/zubehoer/leerrollen-filament-aufbewahrung/vakuumier-set-filamentlagerung/>.
30. Direct-Extruder vs. Bowden-Extruder. *3djake*. [Online] [Zitat vom: 01.12.2024] <https://www.3djake.de/info/ratgeber/direct-extruder-vs-bowden-extruder#:~:text=Den%20gr%C3%B6%C3%9Ften%20Unterschied%20findet%20man,Direct%2DExtruder%20definitiv%20zu%20empfehlen/>.
31. Dominik. Flex3Drive: Extruder mit flexibler Antriebswelle. *3druck*. [Online] [Zitat vom 02.12.2024] <https://3druck.com/drucker-und-produkte/open-source-eigenbau/flex3drive-extruder-mit-flexibler-antriebswelle-2142982/>.
32. E3D Titan Aero Original Extruder. *filament2print*. [Online] [Zitat vom: 03.12.2024] <https://filament2print.com/de/extruder/803-extruder-e3d-titan-aero.html/>.
33. Modix präsentiert neuen 3D-Druckkopf und Firmware. *3druck*. [Online] [Zitat vom: 03.12.2024] <https://3druck.com/industrie/modix-3d-druckkopf-35106546/>.
34. Druckertypen und ihre Unterschiede. *prusa*. [Online] [Zitat vom: 03.12.2024] [https://help.prusa3d.com/de/article/druckertypen-und-ihre-unterschiede\\_112464/](https://help.prusa3d.com/de/article/druckertypen-und-ihre-unterschiede_112464/).
35. Kinematic coupling. *Wikipedia*. [Online] [Zitat vom: 04.12.2024] [https://en.wikipedia.org/wiki/Kinematic\\_coupling/](https://en.wikipedia.org/wiki/Kinematic_coupling/).
36. Culpepper, Martin L. Design and Application of Compliant Quasi-Kinematic Couplings. 2000.
37. Ralf Förster, Anna Förster. Einführung in die Fertigungstechnik. s.l.: Springer Verlag, 2018. 978-3-662-54701-4.

38. Hubmagnete. *red-magnetics*. [Online] [Zitat vom: 04.12.2024] <https://www.red-magnetics.com/de/produktgruppen/weitere/hubmagnete/>.
39. Elektromagnete. *red-magnetics*. [Online] [Zitat vom: 04.12.2024] <https://www.red-magnetics.com/de/produktgruppen/haftmagnete/elektromagnete/>.
40. Permanentelektromagnete. *red-magnetics*. [Online] [Zitat vom: 04.12.2024] <https://www.red-magnetics.com/de/produktgruppen/haftmagnete/permanentelektromagnete/>.
41. Technisch-wirtschaftliche Bewertung. *VDI Zentrum Ressourceneffizienz*. [Online] [Zitat vom: 05.12.2024] <https://www.ressource-deutschland.de/leitfaden-re/methoden/technisch-wirtschaftliche-bewertung/>.
42. Duet 2 WiFi and Ethernet Hardware Overview. *Duet3D Documentation*. [Online] [Zitat vom: 07.12.2024] [https://docs.duet3d.com/Duet3D\\_hardware/Duet\\_2\\_family/Duet\\_2\\_WiFi\\_Ethernet\\_Hardware\\_Overview/](https://docs.duet3d.com/Duet3D_hardware/Duet_2_family/Duet_2_WiFi_Ethernet_Hardware_Overview/).
43. ToolChanger 3D drucker ToolChanger Werkzeug kopf motor kit 1,75mm. *Aliexpress*. [Online] [Zitat vom: 08.12.2024] <https://de.aliexpress.com/item/1005004552480981.html/>.
44. ITS-PE-2529. *red-magnetics*. [Online] [Zitat vom: 10.12.2024] <https://www.red-magnetics.com/en/product-groups/electromagnets/permanent-electromagnets/its-pe-2529/>.