



Forschungsbereich
Maschinenbau**I**nformatik
und **V**irtuelle
Produktentwicklung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard

Implementierung eines Piezosensorsystems in den 3D- Drucker der Pilotfabrik Industrie 4.0

Diplomarbeit

Sebastian Kausel, Bsc

Matrikel.-Nr.: 01226354

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
1 Einleitung.....	4
1.1 Problemstellung.....	4
1.2 Zielsetzung.....	5
1.3 Vorgehensweise.....	5
2 Einführung in die additive Fertigung.....	6
2.1 Grundlagen.....	6
2.2 Fused Filament Fabrication (FFF).....	6
3 Grundlagen des 3D-Druckers der Pilotfabrik Industrie 4.0.....	8
3.1 Einleitung.....	8
3.2 Mechanik.....	9
3.2.1 Rahmenteile.....	9
3.2.2 Extruderplattform und dessen Linearführungen.....	9
3.2.3 Extruder.....	11
3.2.4 Druckbett und dessen Linearführungen.....	12
3.3 Elektronik.....	13
3.3.1 Steuerplatine.....	13
3.3.2 Raspberry Pi.....	15
3.3.3 Schrittmotoren.....	15
3.3.4 Sensoren für die Schrittmotoren.....	16
3.3.5 Sonstige Komponenten.....	16
3.4 Homing.....	17
4 Übersicht gängiger Sensoren in FFF-3D-Druckern.....	19
4.1 Einleitung.....	19
4.2 Kommunikation von Endstops mit der Steuerplatine.....	19
4.3 Unterscheidung Endstop und Z-Probe.....	20
4.4 Mikroschalter.....	20
4.4.1 Mechanische Mikroschalter ohne PCB.....	20
4.4.2 Mechanische Mikroschalter mit PCB.....	21
4.5 Optische Sensoren.....	21
4.6 Magnetische Sensoren.....	21
4.7 Photoelektrische Sensoren.....	22
4.8 Dehnungsmessstreifen.....	22

4.9 Kapazitive Sensoren.....	23
4.10 Induktive Sensoren.....	23
4.10.1 Schaltabstände S_n , S_r , S_u und S_a	24
4.11 Piezoelektrische Wandler	25
4.12 Übersicht der Sensortypen als Z-Probe	26
5 Anwendung von Induktions- und Piezosensoren im 3D-Drucker V2.....	28
5.1 Grundanforderungen	28
5.2 Induktionssensor	29
5.2.1 Mechanisch.....	29
5.2.2 Elektronisch	30
5.3 Piezosensor.....	31
5.3.1 Mechanisch.....	31
5.3.2 Variante A	31
5.3.3 Variante B	33
5.3.4 Elektronisch	36
6 Ermittlung der Messgeschwindigkeit.....	39
6.1 Einleitung	39
6.2 Messverfahren.....	39
6.2.1 Grundlagen	39
6.2.2 Auflösung.....	39
6.2.3 Firmwareeinstellungen	40
6.2.4 Rahmenbedingungen der Messung	41
6.2.5 Definition der Genauigkeitsbegriffe	42
6.2.6 Verteilungsfunktion der Messdaten	44
6.2.7 Definition der statistischen Berechnungen	44
6.3 Messergebnisse zur Geschwindigkeitsermittlung	45
6.3.1 Induktionssensor.....	45
6.3.2 Piezosensor Variante A	47
6.3.3 Piezosensor Variante B	48
6.3.4 Gegenüberstellung der Sensoren.....	49
7 Messergebnisse zur Präzision	52
7.1 Robustheit des Systems.....	52
7.2 Messungen bei Umgebungstemperatur.....	54
7.3 Messungen bei Betriebstemperatur	56
7.3.1 Temperaturexpansion bei Aufheizung des Systems.....	56
7.3.2 Messergebnisse.....	57
8 Praktische Validierung der Messergebnisse durch Testdrucke	60
8.1 Benchmarks zur Druckqualität.....	60

8.2 Testdrucke 1&2 ohne automatische Bettnivellierung	61
8.3 Testdrucke 3&4 mit automatischer Bettnivellierung	63
9 Diskussion der gemessenen und getesteten Ergebnisse der Sensoren	65
9.1 Erfüllung der Grundanforderungen - Induktionssensor	65
9.2 Erfüllung der Grundanforderungen - Piezosensor.....	65
9.3 Vergleich der Sensorsysteme.....	66
10 Konklusion	68
11 Tabellenverzeichnis	70
12 Abbildungsverzeichnis	71
13 Literaturverzeichnis.....	73

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

„Fused Filament Fabrication“ (FFF)-3D-Drucker müssen sich mit ihrer innovativen Fertigungsstrategie im kompetitiven Umfeld der Werkzeugmaschinen etablieren. Damit dies gelingt, werden hohe Präzision und Reproduzierbarkeit von Erzeugnissen verlangt. Diese Eigenschaften sowie qualitativ hochwertige Ergebnisse basieren bei der FFF-Technologie zu großen Teilen auf der ersten aufgetragenen Schicht, da alle weiteren Schichten auf dieser aufbauen. Bei einer typischen Schichtdicke von 0,2 mm haben wenige Hundertstelmmillimeter Unterschied in der Düsenhöhe, also der Distanz der Düsen Spitze zum Druckbett, bereits sichtbaren Einfluss auf die Adhäsion der ersten Schicht und damit auf die Qualität des gesamten Drucks. Im 3D-Drucker der Pilotfabrik Industrie 4.0 hängt die Qualität der ersten Schicht, abgesehen von der Mechanik, von dem verbauten Induktionssensor und der damit durchgeführten manuellen Kalibrierung ab.

Eine optimale Adhäsion der ersten gedruckten Schicht wird durch die genaue Einstellung der Düsenhöhe erreicht. Abweichungen von etwa 15 % führen dabei bereits zu sichtbaren Fehlern. Ist die Düsenhöhe zu gering, also das Druckbett zu nah an der Düsen Spitze ist die Ablösung des Erzeugnisses nach Druckende deutlich erschwert und eine Beschädigung der Druckoberfläche ist möglich. Ist die Düsenhöhe zu groß, verschmelzen die einzelnen gezogenen Stränge der ersten Schicht nicht homogen und es kann zu einer Ablösung des gesamten Erzeugnisses während des laufenden Drucks kommen.

Um eine konstante Düsenhöhe über das gesamte Druckbett zu garantieren, wird bei den meisten 3D-Druckern eine Form von automatischer Bettnivellierung (Automatic Bed Leveling) eingesetzt. Hierbei wird mit dem Induktionssensor die Topologie des Druckbettes ermittelt, um Unebenheiten und Neigungen zu erkennen. Diese Fehler in der Parallelität des Druckbettes zur Extruderplattformebene sollen durch entsprechende Ausgleichsbewegungen während des Druckvorganges kompensiert werden.

Die Verwendung eines Induktionssensors ermöglicht die automatische Bettnivellierung zwar, führt jedoch auch zu einigen Problemen:

- Das Druckbett muss aus Metall sein, damit der Sensor dieses detektieren kann.
- Die absolute Düsenhöhe muss manuell kalibriert werden. Das ist zeitaufwändig, relativ häufig nach zu justieren und erfordert Erfahrung des Bedieners.
- Der Sensor ist mit einem x- und y-Offset zur Düse auf der Extruderplattform montiert. Dies verhindert die Ausmessung der gesamten Druckoberfläche, da der Induktionssensor mechanisch bedingt nicht an alle Positionen des Druckbettes für eine Messung gebracht werden kann.
- Die automatische Bettnivellierung erzeugt im aktuellen System nur unzureichende Qualitätsverbesserungen.

1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit liegt in der Implementierung eines Piezosensorsystems für die z-Achse und damit die Ersetzung des aktuell verbauten Induktionssensors. Es soll ein System entwickelt werden, das vollständig kompatibel mit dem 3D-Drucker Version 2 (V2) der Pilotfabrik Industrie 4.0 ist. Dabei sollen die aktuellen Problemstellungen des Induktionssensors verbessert, oder gar beseitigt werden.

Daraus ergeben sich die folgenden Ziele für das zu entwickelnde Piezosensorsystem:

- Kompatibilität zu Druckbetten jeglichen Materials
- Vermeidung eines x- und y-Offsets zur Düse
- Höhere Messpräzision bei Umgebungs- und Betriebstemperatur
- Konsistente Einstellbarkeit der korrekten Düsenhöhe
- Beibehaltung der Bedienbarkeit des aktuellen Systems
- Kompatibilität mit der aktuell verwendeten Mechanik, Elektronik und Software

1.3 Vorgehensweise

Das entwickelte System baut auf der Pionierarbeit der Firma „Precision Piezo“ auf. Diese Firma entwickelt das bisher einzige kommerziell erhältliche System zur Implementierung von Piezosensoren in FFF-3D-Druckern. Ihre Innovation beruht auf der Verwendung von Piezoringen, die die Eliminierung der x- und y-Offsets zur Düse möglich machen. Gemeinsam mit einer Meschaltung erfolgt die Kompatibilität zu den meisten Steuerplatinen von herkömmlichen 3D-Druckern. Außerdem bieten sie Open Source Files eines Gehäuses an, das mittels 3D-Druck hergestellt werden kann, in denen der Piezoring verbaut wird.

Die Vorgehensweise dieser Arbeit beruht auf den folgenden vier Schritten:

1) Das Piezosensorsystem soll mitsamt einer iterierten Version des zur Verfügung gestellten Gehäuses in den aktuellen 3D-Drucker implementiert werden, um die grundsätzliche Funktionalität und Kompatibilität zu überprüfen.

2) Anschließend soll ein eigenes Gehäuse entwickelt werden, um die Bedienbarkeit und die Genauigkeit des Systems zu optimieren.

3) Die Genauigkeiten des Induktionssensors, sowie des Piezosensors mit beiden Gehäusevarianten werden quantitativ untersucht. Für die Messung wird zuerst eine praktikable Messgeschwindigkeit ermittelt und mit dieser anschließend Genauigkeitsmessungen durchgeführt. Diese Genauigkeitsmessungen werden an fünf Positionen des Druckbettes, einmal bei Umgebungstemperatur und einmal bei Betriebstemperatur durchgeführt.

4) Zuletzt werden die Sensortechnologien auch qualitativ verglichen. Hierbei sollen Druckqualität, Montage, Handhabung, Preis und Verfügbarkeit betrachtet werden.

2 Einführung in die additive Fertigung

2.1 Grundlagen

„Die Additive Fertigung (AF) bzw. das Additive Manufacturing (AM), das heißt die schichtweise Erzeugung dreidimensionaler Objekte, wird bereits seit den 1970er Jahren erfolgreich neben den traditionellen Fertigungsverfahren eingesetzt. Mit Auftauchen des Begriffs 3D-Druck ab circa 2012 und dem damit verbundenen medialen Interesse, entstand ein nie da gewesener Hype um die Additive Fertigung [1].“

Dieser Hype, sowie eine stetig wachsende und sehr aktive Hobbyszene führten zu einer starken Segmentierung der verwendeten Technologien und einer Vielzahl von verschiedenen Designphilosophien bei der Entwicklung von 3D-Druckern, sowie die Etablierung einer Unmenge von verschiedenen Begrifflichkeiten für dieselben Bauteile oder Technologien. In Anlehnung an [2] werden die Begriffe „3D-Drucken“ und „Additive Manufacturing“ für die technische Erzeugung von dreidimensionalen Objekten auf der Basis von Schichten verwendet.

Der 3D-Drucker der Pilotfabrik Industrie 4.0 findet sich im Bereich der Desktop Printer wieder. Diese werden vorzugsweise im professionellen oder semi-professionellen Bereich eingesetzt und sind an der untersten Preisgrenze angesiedelte Fertigungsmaschinen. Diese Drucker sind nach einer kurzen Schulung mit ausreichend hoher Genauigkeit bedienbar. Die Produktivität steht bei dieser Druckerart im Hintergrund. Typischerweise finden sich in dieser Kategorie 3D-Drucker die nach dem FFF-Verfahren, Stereolithographie- oder Lastersinterverfahren Bauteile generieren können. Der 3D-Drucker der Pilotfabrik arbeitet mit dem FFF-Verfahren [2].

2.2 Fused Filament Fabrication (FFF)

Die schichtweise Aufbringung von extrudierten Kunststoffen hat, wie die meisten Begriffe im 3D-Druckbereich, einige Bezeichnungen. Die häufigsten sind dabei „Fused Filament Fabrication“, „Fused Deposition Modeling“ und „Fused Layer Modeling“. Im Moment sind alle drei Begrifflichkeiten ähnlich weit verbreitet. In dieser Arbeit wird in der weiteren Folge, aufgrund von Vorgängerarbeiten zu dem 3D-Drucker der Pilotfabrik, „Fused Filament Fabrication“ (FFF) verwendet.

Bei diesem Prozess wird vorgefertigtes, thermoplastisches Material in geheizten Extrudern aufgeschmolzen und als Strang aufgetragen. Aus technischer Sicht stellt Fused Filament Fabrication einen Extrusionsprozess dar. FFF-Maschinen existieren in verschiedensten Ausführungen, jedoch ziehen sich einige Grundlagen durch alle Systeme. Die FFF-3D-Drucker bestehen aus einem Extruder oder Erhitzer und einem (beheizbaren) Druckbett. Das Baumaterial, ein vorgefertigter, dünner Kunststoffdraht (Filament) wird dem Extruder kontinuierlich zugeführt, mit einer elektrischen Beheizung aufgeschmolzen und durch eine Düse extrudiert, die den Durchmesser des aufgetragenen Materials bestimmt [2]. Abbildung 1 zeigt das grundsätzliche Schema eines typischen FFF-3D-Druckers, wobei die Bewegungsachsen des Extruders und des Druckbetts in anderen Ausführungen auch vertauscht sein können.

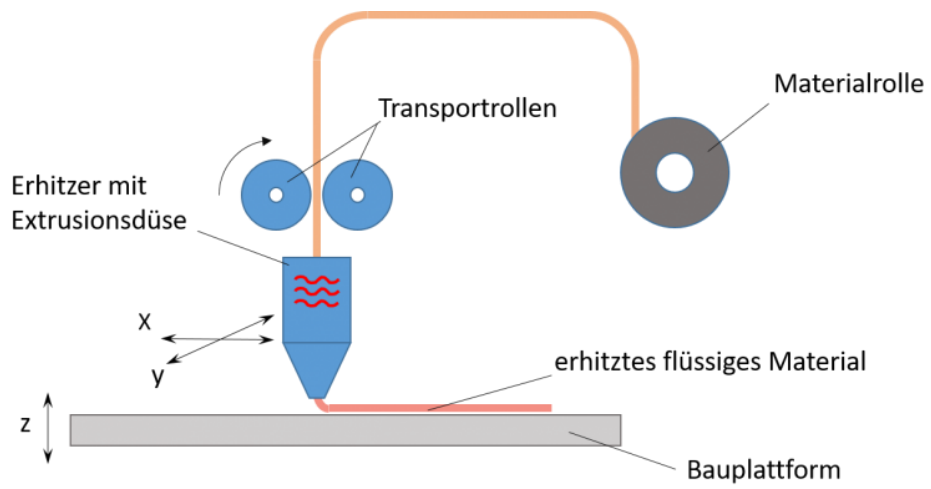


Abbildung 1: Schema der "Fused Filament Fabrication" [3]

3 Grundlagen des 3D-Druckers der Pilotfabrik Industrie 4.0

3.1 Einleitung

Diese Arbeit basiert auf dem 3D-Drucker Version 2 (V2) der Pilotfabrik Industrie 4.0 der TU Wien. Damit die Pilotfabrik 4.0 ein Produkt besitzt, das beispielhaft produziert werden kann, wurde im Jahre 2015 unter der Leitung von Herrn. Prof. Gerhard im Forschungsbereich Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung der Auftrag zur Dimensionierung, Konstruktion und Bau eines 3D-Druckers mit der „Fused Filament Fabrication“-Technologie in Auftrag gegeben [4]. Über die Jahre wurden verschiedene Versionsstufen durchlaufen. Zum aktuellen Zeitpunkt ist Version 3 dieses Druckers fertig entwickelt und gebaut, jedoch für Testzwecke noch nicht verfügbar. Aufgrund dessen wird die Implementierung des Piezosensors an dem 3D-Drucker V2 durchgeführt, dessen Aufbau ohne Riemen und Verkabelung in Abbildung 2 zu sehen ist. Das verfügbare Bauvolumen beträgt in x-, y- und z-Richtung 185x168x235 mm.

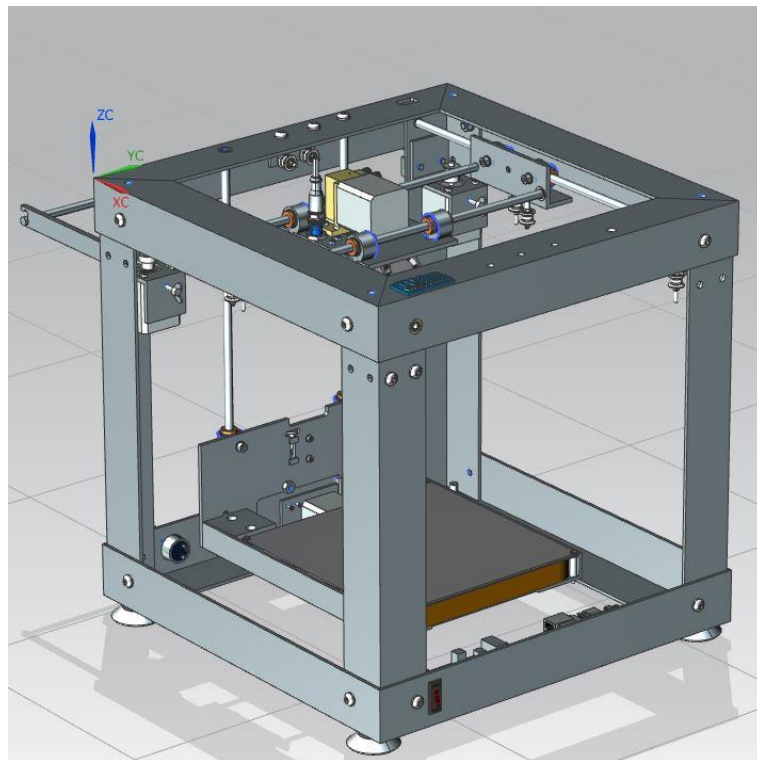


Abbildung 2: 3D-Drucker V2 der Pilotfabrik Industrie 4.0

Die Anpassung des entwickelten Sensorsystems an Version 3 beschränkt sich jedoch auf eine geringe konstruktive Änderung der mechanischen Sensoraufnahme und die Belegung eines anderen Anschlusses auf der neu entwickelten Steuerplatine.

In den folgenden Kapiteln sollen die Grundlagen des 3D-Druckers V2 erläutert werden. Die mechanischen Baugruppen werden benannt und erklärt, um die typischen Begrifflichkeiten des

3D-Drucks vorzustellen. Die elektronischen Komponenten geben Aufschluss über die Ansteuerung der Motoren und der Aufnahme von Sensorsignalen. Das Ziel ist ein Grundverständnis über die Funktionsweise dieses Druckers und die Grundlagen der additiven Fertigung zu vermitteln. Folglich werden die Zusammenhänge verständlich, weshalb im aktuellen Drucker ein Induktionssensor zum Einsatz kommt und wieso es sinnvoll sein kann, diesen durch einen Piezosensor zu ersetzen. Dabei beschränken sich die Erkenntnisse nicht allein auf diesen spezifischen 3D-Drucker, sondern kann auf andere Modelle mit ähnlicher Bauweise übertragen werden.

3.2 Mechanik

3.2.1 Rahmenteile

Der Druckerrahmen bildet das Grundgerüst des Druckers. Der Rahmen ist aus verschraubten Aluminium-L-Profilen aufgebaut, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. An diesen Profilen werden alle weiteren Bauteile befestigt. Nachdem es ein kartesischer 3D-Drucker ist, bilden die Aluminiumprofile einen Quader indem sich die restlichen Komponenten befinden. Die Hauptaufgabe des Rahmens ist es, neben Schnittstelle für andere Bauteile, die Stabilität während des Druckens zu gewährleisten. Rasche Beschleunigungen, Bremsvorgänge und Richtungswechsel erzeugen Vibrationen, die vom Rahmen aufgenommen werden und bestmöglich gedämpft werden sollen, da sich Vibrationen negativ auf die Druckqualität auswirken.

3.2.2 Extruderplattform und dessen Linearführungen

In Abbildung 2 und Abbildung 3 sind die definierten Richtungen der Koordinatenachsen des 3D-Druckers zu sehen. Der Koordinatenursprung liegt zwar in derselben Ecke, jedoch nicht exakt dort, wo das Koordinatensystem abgebildet ist.

Die Bewegung in x-y-Richtung wird von der Extruderplattform vollzogen. Diese Plattform bietet den physischen Platz und die Befestigungsmöglichkeiten für den Extruder, die Sensorik für die z-Achse, sowie die Führung der y-Achse. Auf der Extruderplattform befinden sich vier Linear-Kugellager (1), durch die zwei parallel angeordnete Stahlachsen (2) führen, um die Bewegung in y-Richtung zu ermöglichen. Diese Stahlachsen sind wiederum in zwei Aluminium-L-Profilen (3) gelagert, mit Hilfe dessen die Bewegung in x-Richtung vollzogen wird. Auf den Profilen sind jeweils zwei weitere Führungen (4) montiert, durch die zwei parallel angeordnete Stahlachsen (5) der x-Achse führen. Diese sind direkt im Druckerrahmen gelagert. Abbildung 3 zeigt diese Bauteile, zur Veranschaulichungs zwecken sind die Rahmenteile transparent dargestellt.

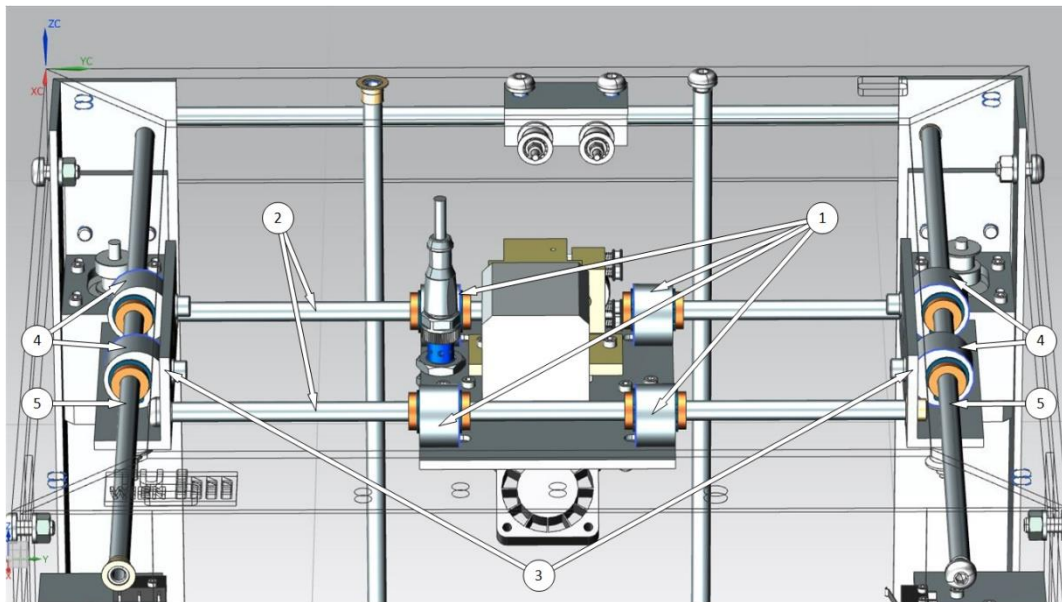


Abbildung 3: Extruderplattform mit Stahlachsen und Führungen

Die Bewegung der Extruderplattform mitsamt dessen zwei Stahlachsen wird durch zwei NEMA 17 Schrittmotoren ermöglicht. Diese sind im Druckerrahmen montiert und machen mit Hilfe von einem Riementrieb, die sogenannte Core-XY-Bewegung möglich. Diese Bewegungsstrategie wurde von MIT Media Labs entwickelt und macht es möglich beide Schrittmotoren im Rahmen zu fixieren, anstatt einen Motor für die zweite Achsbewegung auf dem bewegten System zu montieren, womit die bewegten Massen und damit die Trägheit des Systems erhöht wären.

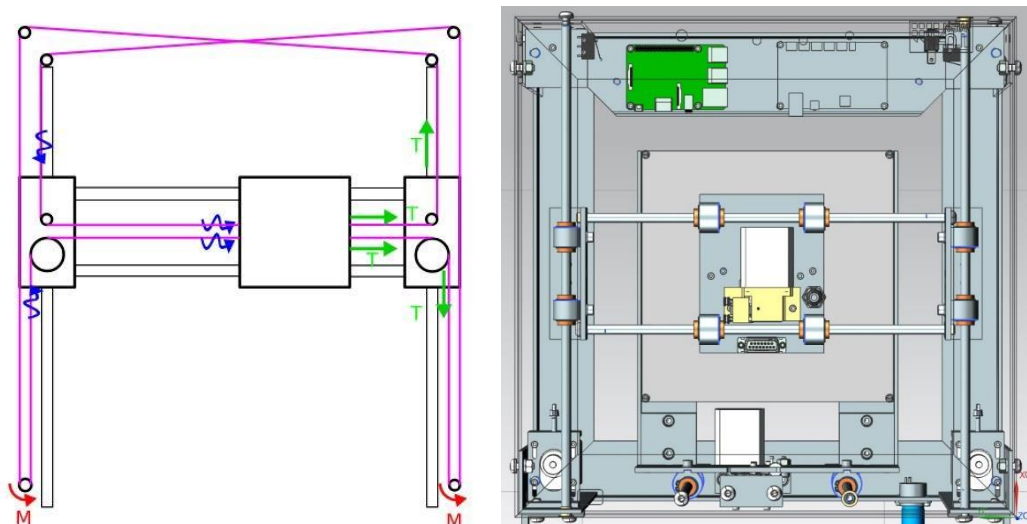


Abbildung 4: Funktionsweise der CoreXY-Bewegung [5] und der 3D-Drucker V2

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, drehen sich durch die gewählte Riemenführung beide Motoren gemeinsam, um eine lineare Bewegung der Extruderplattform zu erzeugen, während diagonale Bewegungen durch einen einzigen Motor vollzogen werden [5]. Die Riementriebe sind im CAD-Modell des 3-Druckers nicht implementiert, jedoch verlaufen die Riemen identisch zu der

schematischen Abbildung auf der linken Seite. Die Fixierung der Riemenenden erfolgen auf der Unterseite der Extruderplattform. Die Spannung kann durch die veränderliche Position der zwei Schrittmotoren mittels Flügelmuttern adjustiert werden.

3.2.3 Extruder

Den Bauteilen der gesamten Extrusionsmechanik werden im Allgemeinen sehr unterschiedliche Namen gegeben und Abgrenzungen werden oftmals nicht einheitlich gesetzt. Aufgrund dessen werde ich mich an die Unterteilungen von [6] halten, da in dieser Diplomarbeit derselbe 3D-Drucker beschrieben wird.

Der Extruder beschreibt die Baugruppe auf der Extruderplattform, die für die Extrusion des Filaments verantwortlich ist und wird in die zwei Untergruppen Cold End und Hot End geteilt. Das Filament wird durch den Rahmen geführt und gelangt in das Cold End. Dort wird es zwischen einem Vorschubrad mit Rändelung, das auf der Welle eines Schrittmotors sitzt, und einem Kugellager geführt. Durch einen Druckfedermechanismus wird sichergestellt, dass das Filament festgeklemmt wird und durch die Bewegung des Schrittmotors vorangetrieben wird, anstatt durchzurutschen.

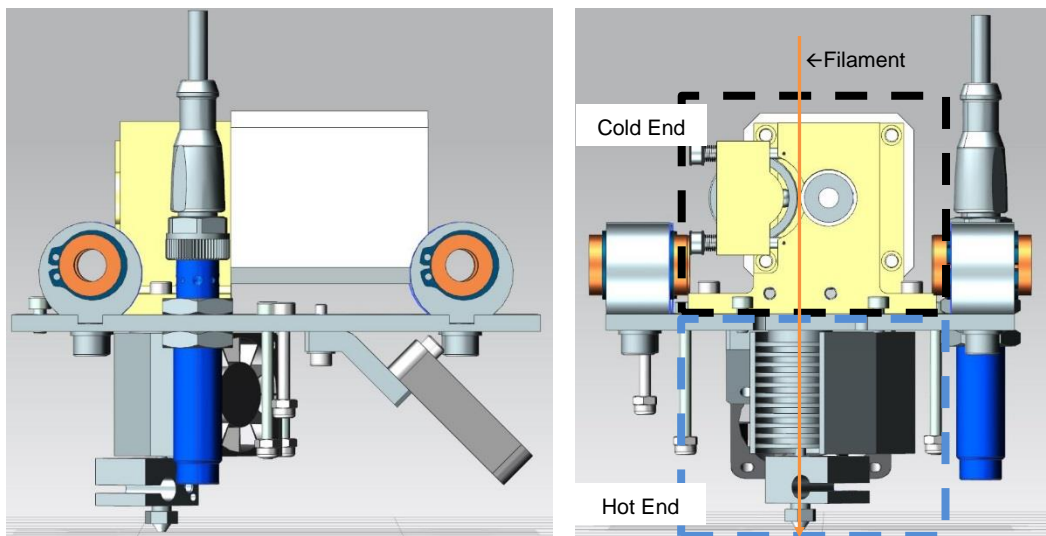


Abbildung 5: Extruder mitsamt Extruderplattform. Ansicht von links und von hinten.

Das vorgeschobene Filament bewegt sich durch das Cold End und gelangt in das Hot End. Wie der Name schon andeutet ist das Hot End im Gegensatz zum Cold End heiß. Das Filament läuft zuerst durch ein mit Kühlrippen und Lüfter bestücktes Zuführrohr, um eine Wärmeableitung in das Cold End zu vermeiden und gelangt anschließend in einen Aluminiumblock. Der Aluminiumblock ist mit einer Heizpatrone bestückt (nicht dargestellt), womit die materialabhängige Drucktemperatur erzeugt wird, um das Filament zu verflüssigen. Danach wird der flüssige Kunststoff durch eine Düse gepresst und auf der Druckoberfläche aufgebracht. Um eine konstante Temperaturregelung zu gewährleisten ist im Aluminiumblock ein NTC-Thermistor (nicht dargestellt) integriert [6].

3.2.4 Druckbett und dessen Linearführungen

Das Druckbett mitsamt seiner Baugruppen läuft auf der z-Achse des Druckers. Es wird zu Beginn eines Drucks mit einem Abstand, der der gewünschten Schichtdicke entspricht, unter die Düse bewegt und verfährt während des Druckvorganges für jede neue Schicht um diesen Abstand weiter nach unten. An den Rahmenteilen des Druckbettes sind vier Führungen mit Linearkugellagern (1) angebracht durch die wiederum zwei Stahlachsen (2) führen. Diese sind im Druckerrahmen gelagert. Die gesamte Baugruppe wird ebenfalls mit einem NEMA 17 Schrittmotor und einem Riementrieb auf und ab bewegt, wobei ein Flaschenzugsystem zur Reduzierung des Drehmoments zum Einsatz kommt. Die Übersetzung ins Langsame beträgt hierbei $i=3$. Es ist ebenfalls eine Mechanik zur Riemenspannung verbaut.

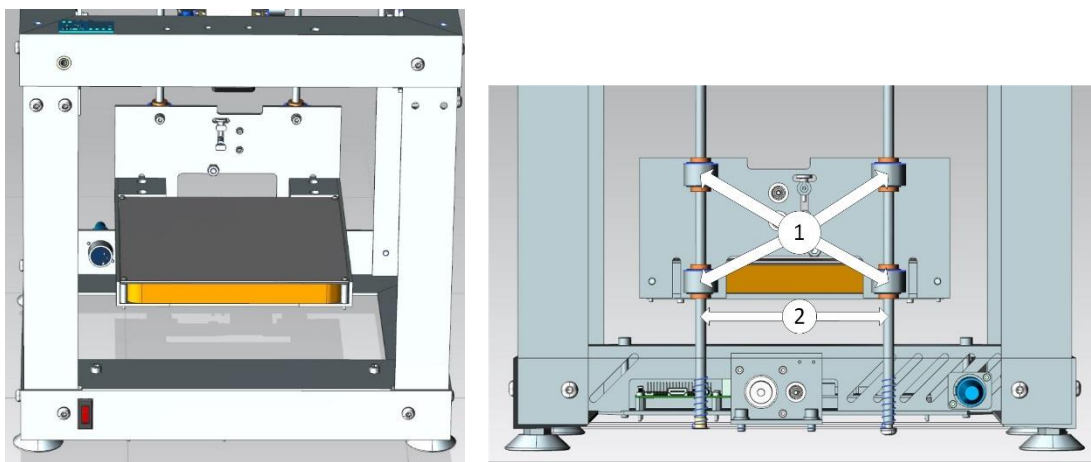


Abbildung 6: Druckbett des 3D-Druckers von vorne-links und hinten.

Das Druckbett hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität des Drucks, weil auf dessen Druckoberfläche die erste Schicht aufgetragen wird, auf der alle anderen Schichten aufbauen. Die erste Schicht entscheidet oftmals, ob ein Druck erfolgreich fertiggestellt wird, oder fehlschlägt. Dabei sind folgende Eigenschaften des Druckbettes mitentscheidend:

1) Die Adhäsion des Kunststoffes auf der Druckoberfläche muss ausreichend sein. Dafür wird einerseits eine spezielle Folie mit rauer Oberfläche verwendet, andererseits wird das Druckbett über den gesamten Druckvorgang beheizt. Diese Beheizung wird mit einem speziellem Printed Circuit Board (PCB) erzielt. Über die Bestromung dieses PCB wird die gewünschte Temperatur eingestellt, wobei wie bei dem Extruder ein NTC-Thermistor verbaut ist, um die Temperaturregelung zu gewährleisten. Zwischen der Folie als Druckoberfläche und dem PCB ist eine Aluminiumplatte montiert. Diese Platte wird oftmals auch als Einheit mit einem integrierten PCB verkauft und erzeugt die gewünschte Form, Ebenheit und Steifigkeit des Druckbettes. Weiters ist sie für die Sensorik des Extruders notwendig, da der verbaute Induktionssensor nur Metallobjekte detektieren kann. Diese Baugruppe bestehend aus PCB, Aluminiumplatte und spezieller Folie als Druckoberfläche ist mit vier Schrauben an der Druckbettaufnahme befestigt, wodurch die Neigung eingestellt werden kann.

2) Die zweite wichtige Eigenschaft ist die Parallelität des Druckbettes zu der aufgespannten Bewegungsebene der Extruderplattform. Zu Beginn eines Drucks wird das Druckbett einige

zehntel Millimeter unter die Düse positioniert, üblicherweise 0,2 mm und die Extruderplattform fährt die gewünschte Kontur des zu druckenden Teils in der x-y-Achse ab während das flüssige Filament auf die Druckoberfläche aufgetragen wird, welches sich dann rasch verfestigt. Hauptentscheidend für eine erfolgreiche erste Schicht ist hierbei, dass der Abstand des Druckbettes zur Düse (Düsenhöhe) konsistent beibehalten wird. Das erfordert eine genaue Führung der Extruderplattform und ein Druckbett, das parallel zur sich bewegenden Extruderplattform liegt, um Veränderungen der Düsenhöhe je nach aktueller x-y-Position zu vermeiden. Die Neigung des Druckbettes muss mit Hilfe der vier Schrauben also genau eingestellt werden.

3) Die Neigung des Druckbettes richtig einzustellen ist jedoch meistens nicht ausreichend. Die eigentliche Ebenheit des Druckbettes ist genauso, wenn nicht sogar wichtiger für die Qualität des 3D-Drucks. Die verwendete Aluminiumplatte muss über die gesamte Oberfläche eben sein, denn bereits Abweichungen im Bereich von wenigen zehntel Millimetern verringern die Qualität sichtbar. Oftmals lässt sich im Preissegment von Desktop 3D-Druckern so eine Maßgenauigkeit kaum realisieren, weshalb der aktuelle Trend zur automatischen Druckbettnivellierung geht, womit solche Fertigungsfehler ausgeglichen werden können.

3.3 Elektronik

Damit der 3D-Drucker drucken kann, benötigt es einige elektronische Bauteile, die im Folgenden beschrieben werden sollen. Ein Grundverständnis des Systems ist essenziell, um die Schnittstellen zu verstehen und die Rahmenbedingungen dieser Arbeit bei der Implementation eines Piezosensorsystems definieren zu können.

3.3.1 Steuerplatine

Die gesamte Steuerung des Druckers erfolgt über ein Mainboard (Steuerplatine), wie bei jedem anderen kommerziell verfügbaren 3D-Drucker auch. Im 3D-Drucker V2 der Pilotfabrik wird dafür noch ein Minitronics V1.1 verwendet. In Version 3 wird dieser durch eine eigens entwickelte Platine ersetzt. Die Grundfunktionen, Schnittstellen und Kompatibilitäten bleiben jedoch sehr ähnlich, weil beide Steuerplatinen mit derselben Repetier-Firmware-Version bespielt sind. Es kommt Repetier-Firmware Version 1.0.3 zum Einsatz.

Die Steuerplatine ist die Schlüsselstelle für die Aussendung und Aufnahme von elektronischen Signalen. Wie diese Signale verarbeitet werden, wird durch den Programmcode der individuell konfigurierbaren Repetier-Firmware bestimmt. Die Verwendung dieser Firmware erleichtert dabei die Inbetriebnahme des Druckers immens. Sie beinhaltet bereits die Programmlogik, Funktionen, Kommunikation der Motoren, Verarbeitung des G-codes, etc. Sie übernimmt also das Zusammenspiel aller Komponenten des 3D-Druckers und die Konfiguration der Firmware beschränkt sich damit auf die Setzung von verschiedenen 3D-Druckerspezifischen Parametern, wie Bauraum, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Messpunkten, Pinbelegung der Steuerplatine etc. Die tatsächliche Programmierung von Bewegungslogiken und das Zusammenspiel von Motoren und Sensoren ist bereits implementiert. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, ist das Anschließen der elektronischen Bauelemente Plug&Play, vor allem weil der Minitronics V1.1 von Repetier-Firmware nativ unterstützt wird. Die Bewegung der Extruderplattform, des

Druckbetts und des Extruders wird über vier Schrittmotoren erzeugt, die direkt an die Steuerplatine angeschlossen sind. Diese sendet alle benötigten elektronischen Signale zur exakten Bewegung der Schrittmotoren aus.

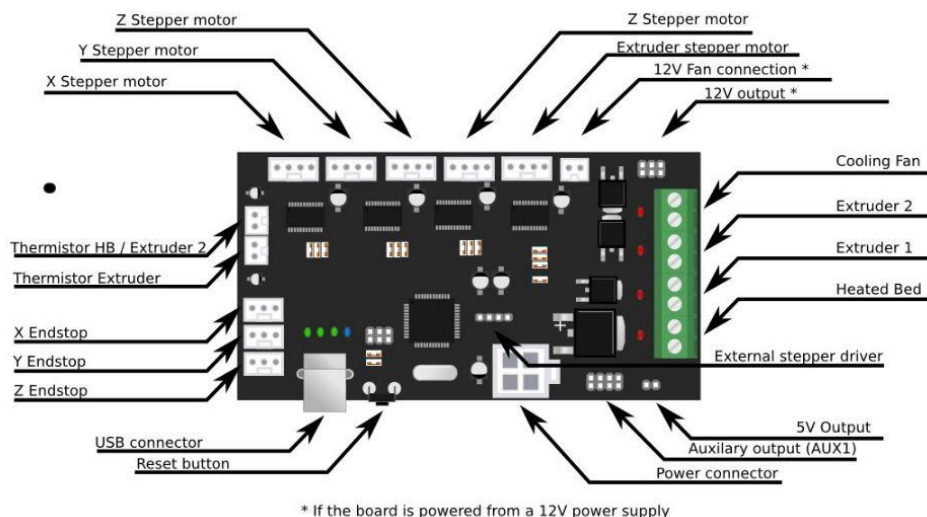


Abbildung 7: Anschlussmöglichkeiten eines Minitronics V1.1

Zur Temperaturerzeugung und -regelung sind die Heizpatrone und das Druckbett, sowie deren Thermistoren ebenfalls mit der Steuerplatine verbunden. Weiters sind zwei Mikroschalter, sowie der Induktionssensor, als Sensoren für je eine Achse angeschlossen. Der Induktionssensor wird dabei über den 12V Output versorgt und gibt sein Sensorsignal über den Signalpin des z-Endstopanschlusses an die Steuerplatine weiter. Abbildung 8 visualisiert wie die Anschlüsse des Minitronics V1.1 für den 3D-Drucker V2 verwendet werden.

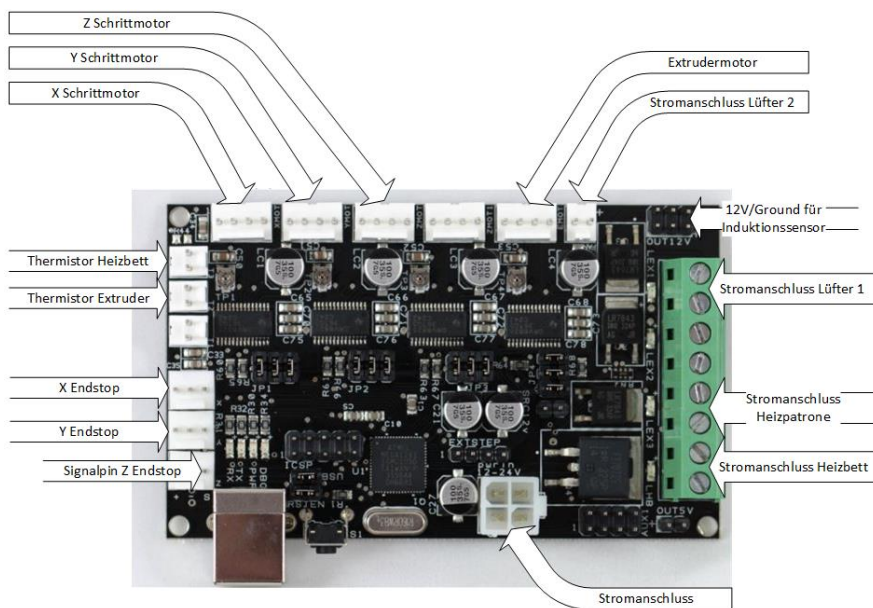


Abbildung 8: Verwendete Anschlüsse des Minitronics V1.1

3.3.2 Raspberry Pi

Damit Bauteile gedruckt werden können, müssen sie über spezielle Software in G-code konvertiert werden. Dieser G-code wird anschließend zeilenweise an die Steuerplatine weitergegeben, die die eingelesenen Befehle in die entsprechenden elektronischen Signale für die Schrittmotoren, Heizelemente und Sensoren umwandelt. Im 3D-Drucker V2 der Pilotfabrik wird ein Raspberry Pi 3 verwendet, um diese Befehle an die Steuerplatine weiterzugeben. Die zweite Aufgabe des Raspberry Pi ist die Schnittstelle der Benutzer mit dem 3D-Drucker zur Verfügung zu stellen. Mit Hilfe der Software „Repetier-Server“ ist es möglich innerhalb desselben WLAN-Netzwerks über den Raspberry Pi und eine Weboberfläche, siehe Abbildung 9, den Endnutzer mit dem Drucker interagieren zu lassen.

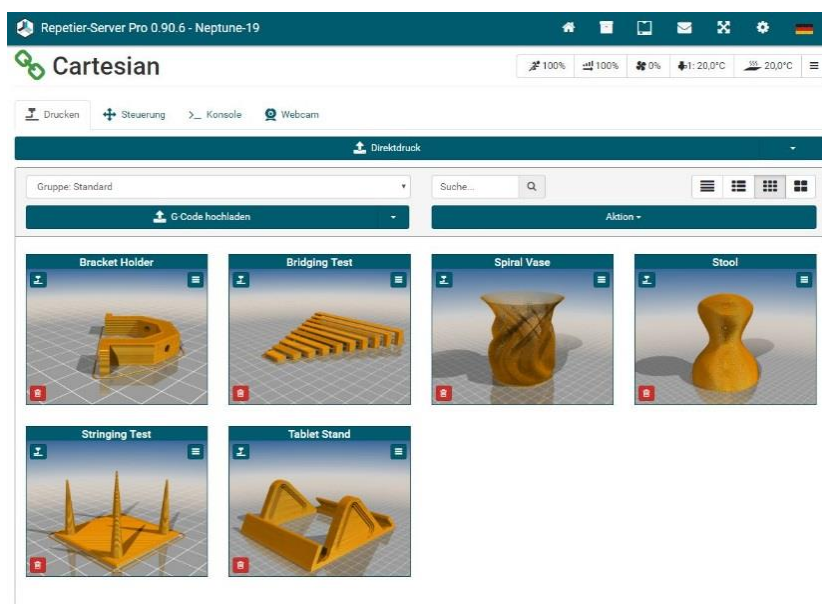


Abbildung 9: Weboberfläche von Repetier-Server

Ein normaler Druckprozess folgt dem folgenden Workflow:

Das gewünschte Bauteil wird mittels CAD-Software konstruiert und im STL-Format exportiert. Durch spezielle „Slicersoftware“ wird das Bauteil in die einzelnen Schichten geschnitten (gesliced) und die entsprechenden Befehle als G-code ausgegeben. Dieser G-code kann über WLAN mit der Weboberfläche des Repetier-Servers auf den Raspberry Pi hochgeladen werden. Durch den Start des Drucks wird der G-code nun zeilenweise von dem Raspberry Pi an die Steuerplatine weitergegeben und die gesamte Drucklogik wird bis zum Ende des Drucks abgearbeitet, während der Nutzer sich mit seinem Endgerät entfernen kann. Lediglich der Raspberry Pi muss die gesamte Zeit hochgefahren und mit dem 3D-Drucker verbunden bleiben.

3.3.3 Schrittmotoren

Die verbauten Schrittmotoren zur Erzeugung der Bewegung der Extruderplattform, sowie des Vorschubs des Filaments verfahren mit 1,8° pro Schritt. Dies bedeutet, dass 200 Schritte pro Umdrehung gebraucht werden und keine stufenlose Positionierung möglich ist. Es werden

diskrete Rotationen von $1,8^\circ$ mit jedem Schritt erzeugt. Die Genauigkeit kann jedoch durch sogenannte Mikroschritte (Microstepping) erhöht werden. Damit können die einzelnen Schritte des Schrittmotors weiter geteilt werden. Die Steuerplatine des 3D-Drucker V2 unterstützt eine maximale Teilung in 32 Mikroschritte, womit für eine Umdrehung 6400 Schritte, anstelle von 200 benötigt werden. Dadurch kann die Präzision erhöht werden und der Lauf der Motoren gestaltet sich ruhiger, womit die Vibrationen verringert werden. Die Schrittmotoren der x- und y-Achse, sowie der Extruder werden mit 16 Mikroschritten bewegt, während der Schrittmotor der z-Achse mit 32 Mikroschritten verfährt. Schrittmotoren werden bei 3D-Druckern aufgrund ihrer einfachen Ansteuerung und des geringen Preises bei hoher Genauigkeit verwendet. Zu beachten ist jedoch, dass Schrittmotoren über keinerlei Feedback verfügen. Somit muss bei jedem Neustart des Druckers oder manueller Bewegung der Extruderplattform bzw. des Druckbetts die Nullpunkte der drei Achsen neu gesetzt werden müssen. Die Nullpunkte des Koordinatensystems werden dabei durch das sogenannte „Homing“ eingestellt und ab dann „zählen“ die Schrittmotoren bzw. die Steuerplatine die verfahrenen Schritte mit, wodurch die x-, y-Position der Extruderplattform und die z-Position des Druckbetts bekannt sind. Diese Art der Positionierung ist zwar sehr einfach, verhindert jedoch auch eine aktive Regelung der Bewegungen. Weiters führt der „Verlust“ von ganz wenigen Schritten zu fehlerhaften Positionierungen und damit zu fehlgeschlagenen Drucken. Die Positionierung der Extruderplattform und Bettes ist lediglich durch die mitgezählten Schritte der einzelnen Motoren in beide Rotationsrichtungen bekannt. Diese werden auch mitgezählt, wenn sich ein Motor, z.B. aufgrund von fehlendem Drehmoment trotz Drehbefehl nicht dreht. Sobald Schritte verloren wurden, besteht eine Differenz der Ist- zur Soll-Position und es kommt zu fehlerhaften Positionierungen oder gar Kollisionen. Das System muss neu „gehomed“ werden, damit die Soll-Position wieder mit der Ist-Position übereinstimmt.

3.3.4 Sensoren für die Schrittmotoren

Jede Achse verfügt über einen eigenen Sensor, womit der zugehörige Nullpunkt der Koordinatenrichtung, mithilfe des Homings, gesetzt werden kann. Diese Sensoren werden bei 3D-Druckern Endstops genannt. Für die x-y-Achsen sind hierfür Mikroschalter verbaut und für die z-Achse kommt ein Induktionssensor zum Einsatz. Der Sensor der z-Achse hat im Laufe der 3D-Druckerentwicklung eine weitere Aufgabe bekommen. Um Unebenheiten oder fehlende Parallelität des Druckbettes auszugleichen, kann dessen Topologie gemessen werden und mit Hilfe dieser Daten eine automatische Druckbettnivellierung ausgeführt werden. Diese Ausmessung erfolgt bei modernen Druckern über den Sensor der z-Achse.

3.3.5 Sonstige Komponenten

Die Heizpatrone und das PCB des Druckbettes erzeugen die gewünschten Temperaturen für den Druck. Bei der Verwendung von PLA als Filamentmaterial werden Temperaturen von 190°C - 215°C für die Heizpatrone angestrebt. Um eine gute Adhäsion des Filaments auf dem Druckbett zu gewährleisten wird dieses auf 50°C - 70°C erhitzt. Die optimalen Temperaturen hängen von dem verwendeten Material ab.

Die Regelung der Temperatur erfolgt über softwarebasierte PID-Regler der Repetier-Firmware, die die benötigten Temperaturinformationen über die verbauten Thermistoren erhalten.

Weiters sind noch zwei Lüfter im System verbaut und an der Steuerplatine angeschlossen. Der Bauteillüfter soll das flüssige, extrudierte Filament so schnell wie möglich kühlen und eine rasche Verfestigung erzeugen. Der Hotendlüfter hängt an den Kühlrippen des Hot Ends, um die Wärmeausbreitung in das Cold End zu verhindern. Das Filament soll sich lediglich im beheizten Aluminiumblock verflüssigen, jedoch oberhalb festbleiben. Dies hat den Grund, dass der Extruder einen genauen Vorschub erzeugen muss, um die richtige Menge Filament, abhängig von der verfahrenen Geschwindigkeit vorzuschieben. Eine korrekte Extrusion erfordert festes Filament im Cold End, bereits das Überschreiten der Glasktemperaturen des verwendeten Kunststoffes können zu Ungenauigkeiten und damit zu einer Qualitätsminderung führen.

3.4 Homing

Das Verfahren zur Bestimmung der Nullpunkte des Koordinatensystems und damit die Positionsbestimmung der Schrittmotoren des 3D-Druckers hat eine besondere Signifikanz für den Druck, weshalb der Homingbegriff kurz beschrieben werden soll. Es existiert im Moment kein etablierter deutscher Begriff für diese Verfahrenslogik, weshalb weiterhin Homing und der eingedeutschte Begriff gehomed verwendet wird.

Wenn der 3D-Drucker gestartet wird, verfügt dieser über keinerlei Positionsinformationen der Extruderplattform, sowie des Druckbetts. Damit Kollisionen verhindert werden, muss der Drucker gehomed werden, bevor ein Druck gestartet werden kann. Diese Bewegungslogik lässt sich in der Firmware konfigurieren und erfolgt beim 3D-Drucker V2 folgendermaßen:

- 1) Das Heizbett verfährt 5 mm nach unten, um eine Kollision der Druckoberfläche mit der Düse zu vermeiden.
- 2) Der Extruderschlitten verfährt in x-Richtung bis der Mikroschalter durch das Aluminiumprofil, siehe Abbildung 10 rechts, betätigt wird.
- 3) Der Extruderschlitten setzt 2 mm in x-Richtung zurück und fährt mit 1/5 der Geschwindigkeit erneut gegen den Mikroschalter, um die Genauigkeit der Betätigung und dadurch der Positionsbestimmung zu erhöhen.
- 4) Wiederholung der vorherigen zwei Schritte für die y-Richtung, links in Abbildung 10 zu sehen.

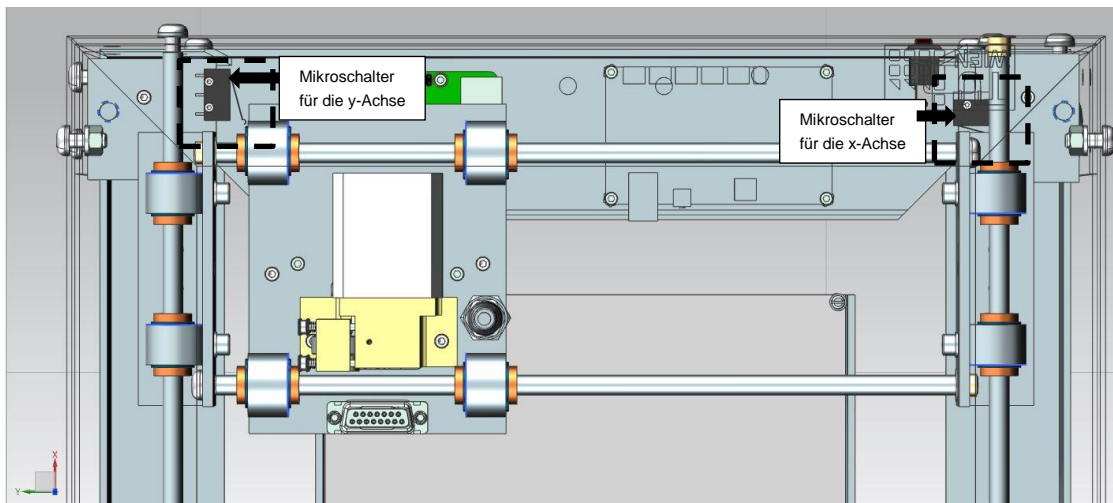


Abbildung 10: Betätigung der Mikroschalter in x- und y-Richtung (von rechts nach links)

- 5) Der Induktionssensor mitsamt der Extruderplattform wird über die Mitte des Bettes gebracht.
- 6) Anschließend fährt das Druckbett nach oben bis der Induktionssensor ausgelöst wird.
- 7) Das Druckbett setzt 1 mm zurück und fährt mit 1/3 der Geschwindigkeit nach oben, bis der Induktionssensor auslöst. Damit kann im ersten Schritt das Druckbett rasch nach oben gefahren und im zweiten Schritt mit langsamer Geschwindigkeit genau gemessen werden.
- 8) Die Extruderplattform wird an die in Abbildung 10 obere, linke Ecke mit den Koordinaten X185, Y168, Z0 verfahren.

Die genaue Funktionsweise und Implementierung des Induktionssensors wird in den Kapiteln 4.10 und 5.2 erklärt, es sei hier jedoch bereits erwähnt, dass die Detektierung des Druckbettes berührungslos erfolgt. Die Distanz zwischen dem sogenannten Schaltabstand und der Düsen spitze muss durch einen manuell gesetzten Offset in der Firmware ausgeglichen werden, damit die Koordinate Z0 auch einer exakten Berührung des Druckbettes mit der Düsen spitze entspricht.

4 Übersicht gängiger Sensoren in FFF-3D-Druckern

4.1 Einleitung

Die Szene rund um kommerzielle Desktop-FFF-3D-Drucker ist sehr stark von der RepRap-Szene geprägt worden, dessen Motivation darin besteht 3D-Druck für jeden zugänglich zu machen. Das originale RepRap-Team hatte es sich zur Aufgabe gemacht billige, sich selbst replizierende 3D-Drucker zu entwickeln und die Entwicklung unter der „open source license“ zu führen [7]. Dies hat zu einer großen Anhängerschaft geführt und folglich sind eine Vielzahl von Maschinen mit unterschiedlichsten Designphilosophien entstanden. Sowohl in diesem Hobbybereich als auch in professionelleren Desktop-3D-Druckern.

Der 3D-Drucker der Pilotfabrik befindet sich in einem Preis-, und Marktsegment mit vergleichbaren Materialkosten und Designentscheidungen wie typische Drucker aus der RepRap-Szene bzw. im unterem Preissegment von professionellen Desktop-3D-Druckern. Die Grenze ist fließend. Daraus ergeben sich folgende Entscheidungskriterien bei der Wahl der Sensorik. Typischerweise stellen Kosten, Einfachheit, Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Kompatibilität mit etablierten Systemen die Hauptfaktoren dar. Vor allem die Kosten spielen in diesem Segment eine große Rolle.

Wie in Kapitel 3.3.4 bereits erwähnt, werden bei kartesischen 3D-Druckern Sensoren, die zur Setzung der Nullpunkte des Koordinatensystems verwendet werden, als Endstops bezeichnet. Wobei sich der Begriff Z-Probe für den Sensor der z-Achse immer mehr durchsetzt. Der Grund dafür wird in Kapitel 4.3 erläutert.

4.2 Kommunikation von Endstops mit der Steuerplatine

Trotz der Nutzung einer Vielzahl verschiedener Steuerplatinen in verschiedenen 3D-Druckern hat sich ein gewisser Standard bei den Anschlüssen und dessen verwendeten Spannungen durchgesetzt, nicht zuletzt dadurch, dass viele Steuerplatinen auf Arduinos basieren. Die elektronischen Signale der Endstops werden dadurch bei den meisten Steuerplatinen ähnlich verarbeitet. Im Normalfall besitzen die Steuerplatinen drei Anschlüsse für Endstops, für jede Achse einen, siehe Abbildung 8. Diese Anschlüsse bestehen aus drei Pins. VCC, Ground und Signal. Über VCC liegen je nach Board 3,3V oder 5V Spannung an. Im Falle des Minitronics sind es 5 Volt. Ground ist die Erdung. Die Endstops laufen also mit einer Spannung von 5V und geben bei Sensoraktivierung ein Signal an den Signalpin des Endstopanschlusses ab. Dadurch wird der Status am Signalpin als „High“ durch die Steuerplatine und der Endstop als aktiviert erkannt. Je nach Firmwareeinstellung ist es auch möglich den Signalpin unbelegt zu lassen und bei Aktivierung des Sensors lediglich einen Schaltkreis über Ground zu schließen, wie es beim 3D-Drucker der Pilotfabrik für die x- und y-Achse mittels Mikroschaltern der Fall ist. Die Logik der Steuerplatine erfolgt dabei binär, es wird nur unterschieden ob ein Sensor aktiviert ist oder nicht, je nachdem ob das Signal am Signalpin bzw. über Ground „High“ oder „Low“ ist.

4.3 Unterscheidung Endstop und Z-Probe

Während bei den ersten 3D-Druckern die Sensoren für alle drei Achsen als Endstops bezeichnet wurden, hat sich über die letzten Jahre der Begriff Z-Probe für den Sensor der z-Achse durchgesetzt. Anfangs wurden die Sensoren einzig und allein für die Nullpunktsetzung des Koordinatensystems genutzt. Meist waren der Einfachheit halber drei Mikroschalter verbaut. Mittlerweile wird der Sensor der Z-Achse jedoch für weitere Funktionen genutzt, womit sich in diesem Bereich verschiedenste Sensorarten etabliert haben. In der Folge werden die Sensoren für die x- und y-Achse als Endstops und der Sensor für die z-Achse als Z-Probe bezeichnet.

Z-Probes werden in FFF-3D-Druckern dazu genutzt, die Distanz der Düse zum Druckbett zu messen. Diese Messung wird anschließend dazu verwendet, um die Topologie des Druckbettes zu bestimmen und die Kalibrierung der Distanz von Düse zu Druckbett (Düsenhöhe) zu assistieren. In modernen Druckern werden Z-Probes auch zur Assistenz der semi- oder vollautomatischen Druckbettnivellierung verwendet. Verschiedene Sensoren als Z-Probes haben sich aufgrund unterschiedlicher Kosten, Einfachheit, Handhabung, Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und Kompatibilität durchgesetzt und die wichtigsten sollen im Folgenden vorgestellt werden [8].

4.4 Mikroschalter

4.4.1 Mechanische Mikroschalter ohne PCB

Mechanische Mikroschalter sind die einfachste Sensorform in 3D-Druckern. Ein Mikroschalter ist ein elektrischer Schalter, dessen Kontakte im geöffneten Zustand weniger als 3mm Abstand voneinander haben [9].



Abbildung 11: Mechanischer Mikroschalter ohne PCB [10].

Sie sind mit dem Endstopanschluss der Steuerplatine verbunden, womit an ihnen 5 Volt anliegen, sobald durch Betätigung des Schalters der Stromkreis geschlossen wird. Die Steuerplatine erkennt dies und der Sensor wird als aktiviert wahrgenommen. Mikroschalter haben sich bei sehr vielen Druckern als Endstop der x- und y-Achse durchgesetzt, da sie sehr billig und einfach handzuhaben sind. Ihre Defektraten sind niedrig und die Genauigkeit ist für die x- und y-Achse ausreichend hoch. Im 3D-Drucker der Pilotfabrik sind für diese Achsen ebenfalls Mikroschalter verbaut. In einfachen 3D-Druckern werden Mikroschalter auch für die z-Achse verwendet, damit ist jedoch nur eine manuelle Kalibrierung des Druckbettes möglich und die mechanische Positionierung des Schalters für die z-Achse ist oftmals nicht einfach zu lösen.

4.4.2 Mechanische Mikroschalter mit PCB

Mechanische Mikroschalter mit PCB werden wie einfache Mikroschalter mechanisch betätigt. Der einzige Unterschied ist, dass diese Schalter direkt auf einer kleinen Schaltung befestigt sind, dessen Aufgabe es ist, den Stromkreis nicht über Ground zu schließen, sondern bei Betätigung ein Signal über ein drittes Kabel direkt an den Signalpin der Steuerplatine zu senden. Diese Schalter werden ebenfalls hauptsächlich für die x- und y-Achse und in manchen Fällen auch für die z-Achse verwendet.



Abbildung 12: Mechanischer Mikroschalter mit PCB [11].

4.5 Optische Sensoren

Optische Sensoren werden heutzutage kaum noch verwendet, waren in den ersten RepRap-Druckern jedoch öfter verbaut. Diese Sensoren messen das Lichtlevel und reagieren auf rasche Änderungen [12].

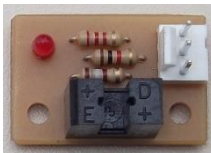


Abbildung 13: Optischer Sensor [12]

4.6 Magnetische Sensoren

Magnetische Sensoren als Endstops machen sich den Halleffekt zu Nutze. Diese Sensoren messen die Intensität des umgebenden Magnetfeldes. Wird die Extruderplattform nah genug an den Sensor gebracht, steigt die ausgehende Spannung über eine gewisse Referenzspannung, wodurch die Steuerplatine den Sensor als aktiviert erkennt. Magnetische Sensoren sind aufgrund des Hall-Effektes temperaturabhängig und somit nur für die x- und y-Achse sinnvoll verwendbar, jedoch nicht für eine konsistente Detektierung des beheizten Druckbettes [12], [13].



Abbildung 14: Magnetischer Sensor

4.7 Photoelektrische Sensoren

Photoelektrische Sensoren senden einen Lichtstrahl aus, meist Infrarot und messen über den Empfang des reflektierten Lichtstrahls die Distanz zum Zielobjekt. Es existieren dabei verschiedene Arten, wie der Lichtstrahl reflektiert und aufgenommen wird. In 3D-Druckern kommen meist Reflexionssensoren zum Einsatz. Hier wird der emittierte Lichtstrahl direkt vom Zielobjekt reflektiert und vom Sensor wieder aufgenommen [14].



Abbildung 15: Reflexionssensor [14]

Dabei sind die verbauten Sensoren auf eine hohe Präzision und Wiederholgenauigkeit optimiert. Sie haben eine hohe Beliebtheit erlangt, da sie unabhängig von den meisten Druckbettoberflächen arbeiten können und relativ klein sind. Ihre Genauigkeit hängt jedoch vom Reflexionsverhalten der Druckoberfläche ab und ist empfindlich auf Lichtänderungen in der Umgebung.

4.8 Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen zur Kraftmessung sind im Maschinenbau ein etablierter Sensortyp und haben ihren Weg auch in die Welt der 3D-Drucker gefunden. Bei diesen Sensoren kommt es durch Druckbelastung zu einer Widerstandsänderung. Diese Widerstandsänderung kann mittels Brückenschaltung ausgewertet werden und damit ein Signal an die Steuerplatine ausgeben. In der Praxis wird diese Sensorart als Z-Probe in sogenannten Delta-3D-Druckern verwendet. Es werden drei Dehnungsmessstreifen in das Druckbett integriert, die auslösen, wenn mit der Düse das Druckbett berührt wird. Somit ist diese Sensorart nicht berührungslos. Mit dieser Art des Z-Probing wird kein Platz in der Extruderplattform benötigt, weshalb sie bei Deltas an Beliebtheit gewonnen haben. Diese profitieren von einer sehr kleinen und leichten Extruderplattform, um hohe Druckgeschwindigkeiten und -beschleunigungen zu erreichen. Einschränkungen dieses Systems sind jedoch, dass aktuelle kommerzielle Produkte keinen Temperatenausgleich besitzen, wodurch sie nur bei Druckern ohne beheiztes Druckbett verwendbar sind. Außerdem können ausgehärtete Filamentreste an der Düsenspitze oder auf dem Druckbett die Ergebnisse negativ beeinflussen [15], [16].

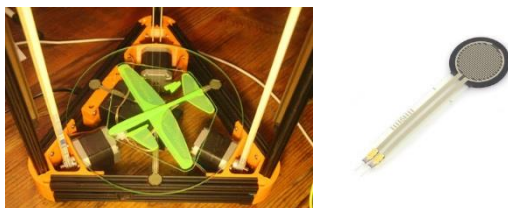


Abbildung 16: Dehnungsmessstreifen im Druckbett [16], [17]

4.9 Kapazitive Sensoren

Kapazitive Sensoren wurden in 3D-Druckern häufig als Z-Probes verwendet und sind die klassischen Gegenspieler zu Induktionssensoren. Sie liefern eine berührungslose Möglichkeit zur Distanzmessung. Es wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Kapazität C eines Kondensators nur eine Funktion seiner geometrischen Abmessungen, Fläche A , Abstand l und der Dielektrizitätskonstanten ϵ ist [15]. Sobald ein anderes Material als Luft in das erzeugte elektrische Feld des Sensors eindringt, wird die Dielektrizitätskonstante verändert und je nach Material ändert sich die Kapazität. Die Kapazitätsveränderung wird gemessen und kann bei Überschreiten eines Referenzwertes zur Aussendung eines Signals verwendet werden. Dieser Referenzwert wird dabei in einer Art und Weise definiert, sodass dieser überschritten wird, sobald das Druckbett entsprechend nah an den auf der Extruderplattform montierten Sensor gefahren wird. Die Vorteile einer hohen Genauigkeit, sowie der berührungslosen Detektierung teilt sich dieser Sensor mit dem induktiven Sensor, ist von diesem jedoch weitgehend verdrängt worden. Ein entscheidender Nachteil, der vor allem im 3D-Druck zu tragen kommt, ist die Tatsache, dass kapazitive Sensoren sowohl von der Luftfeuchtigkeit als auch von der Umgebungstemperatur beeinflusst werden. Dadurch sinkt die Präzision und Wiederholgenauigkeit zu stark für eine effektive Verwendung als Z-Probe.



Abbildung 17: Kapazitiver Sensor [18].

4.10 Induktive Sensoren

Im 3D-Drucker V2 der Pilotfabrik ist wie in vielen anderen Druckern aus diesem Preissegment ein induktiver Sensor als Z-Probe verbaut. Deswegen soll die Funktionsart dieses Sensors etwas genauer beschrieben. Für die tatsächliche mechanische, sowie elektronische Implementierung in den Drucker wird auf Kapitel 5.2 verwiesen.

Induktive Sensoren beruhen auf dem folgenden physikalischen Prinzip. Die Induktivität L einer Spulenanordnung ist lediglich eine Funktion geometrischer Größen, der Windungszahl N und der Permeabilität μ des von den Feldlinien durchsetzten Mediums. Die geometrischen Größen können z.B. die Länge l der magnetischen Feldlinien und des Querschnitts A , der von den Feldlinien durchsetzt wird, sein.

$$L = f(N, \mu, A, l)$$

Die Induktivität der Spule kann nach der folgenden Beziehung berechnet werden:

$$L = \frac{N^2 * \mu * A}{l}$$

$$\mu = \mu_r * \mu_0$$

Dabei ist μ_0 die absolute Permeabilität, eine Naturkonstante und μ_r die relative Permeabilitätszahl, welche materialabhängig ist [15].

Die Spule in einem Schwingkreis erzeugt ein hochfrequentes Magnetfeld. Nähert sich diesem Magnetfeld ein Objekt aus Metall, wird durch die elektromagnetische Induktion im Objekt ein Wirbelstrom erzeugt. Je näher es dem Sensor kommt, desto größer ist der Wirbelstrom, wodurch die Last am Schwingkreis steigt. Wird die Last am Schwingkreis groß genug, bricht die Schwingung teilweise oder vollständig ein. Nachdem der Sensor die Amplitude permanent misst, erkennt er diese Änderung im Schwingungsstatus und gibt ein Detektionssignal aus [14]. Mit Hilfe dieses Detektionssignals wird der Sensor durch die Steuerplatine als ausgelöst erkannt. Der Abstand zwischen Druckbett und Induktionssensor, bei dem dieses Detektionssignal ausgegeben wird, nennt sich Schaltabstand.



Abbildung 18: Induktiver Sensor [19].

4.10.1 Schaltabstände S_n , S_r , S_u und S_a

Die Begrifflichkeit Schaltabstand wird durch die internationale Norm EN 60947-5-2 folgendermaßen definiert: Schaltabstand ist der Abstand, bei dem sich eine auf die aktive Fläche des Näherungsschalters zubewegende Normmessplatte einen Signalwechsel bewirkt. In der Praxis existieren vier verschiedene Schaltabstände [20].

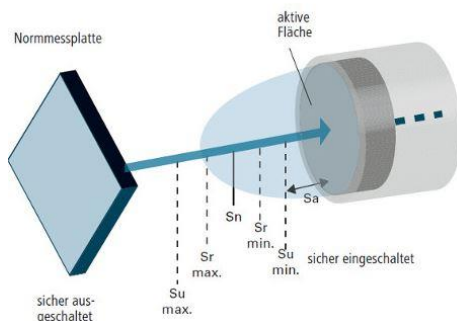


Abbildung 19: Schaltabstände bei induktiven Sensoren [21].

S_n - Nennschaltabstand: Dieser Schaltabstand wird in den meisten Datenblättern für den Sensor angegeben, berücksichtigt jedoch keine Fertigungstoleranzen, Temperatur- oder sonstige äußere Einflüsse [21].

Sr – Realschaltabstand: Die eben genannte Norm bezieht sich auf den realen Schaltabstand. Bei diesem Abstand werden Faktoren wie Temperaturen, Spannung, Objektgröße und -material in einem Prüfprozess vorgeschrieben und er muss innerhalb von 90 bis 110 % des Nennabstands auslösen [21]:

$$S_n * 0,9 \leq S_r \leq S_n * 1,1$$

Su – Nutzschartabstand: Der Nutzschartabstand berücksichtigt den gesamten zulässigen und im Datenblatt angegebenen Arbeitsbereich des Sensors. Dabei muss der Sensor jedoch unter jeglichen Temperatur- und Spannungsschwankungen und weiteren äußeren Einflüssen immer zwischen 90 % und 110 % des *Realschaltabstands* liegen [21]:

$$S_n * 0,81 \leq S_u \leq S_n * 1,21$$

Sa – Arbeitsschartabstand oder gesicherter Schaltabstand: Der gesicherte Schaltabstand ist der Abstand, bei dem der Sensor unter allen im Datenblatt angegebenen Toleranzen und Bereichen immer schaltet. Er liegt im Bereich von 0 % bis 81 % des *Nennschartabstands*. Nur innerhalb dieser Distanz zwischen Sensoroberfläche und Messobjekt schaltet der Sensor unter allen Umständen und Fehlertoleranzen [20], [21].

$$S_a < S_n * 0,81$$

Weiters ist bei all diesen Schaltabständen ein materialabhängiger Korrekturfaktor zu berücksichtigen, wie in Abbildung 20 zu sehen ist.

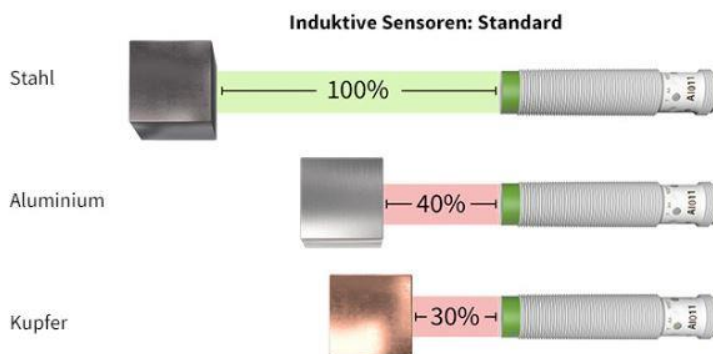


Abbildung 20: Materialabhängiger Korrekturfaktor [21].

4.11 Piezoelektrische Wandler

Das Wirkprinzip von piezoelektrischen Wandlern soll ebenfalls genauer beschrieben werden. Für die tatsächliche mechanische, sowie elektronische Implementierung in den 3D-Drucker wird auf Kapitel 5.3 verwiesen.

Piezokristalle lassen sich als Sensoren zur Kraftmessung verwenden. Bei dem sogenannten direkten piezoelektrischen Effekt wirkt eine mechanische Last (Kraft, mechanischer Druck oder Verschiebung) auf den piezoelektrischen Wandler. Dabei kommt es zu einer Ladungsverschiebung innerhalb des Materials, die über eine Spannungs- bzw. Ladungsänderung gemessen werden kann [15].

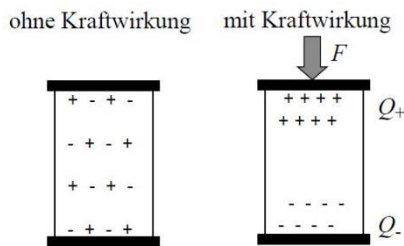


Abbildung 21: Direkter piezoelektrischer Effekt [15].

Diese Sensoren bestehen aus Einkristallen, wie SiO_2 Quarz, ferroelektrischen Materialien wie Barium-Titanat (BaTiO_3) und Blei-Zink-Titanat (PZT) oder Polymeren wie Polyvinylidenflourid (PVDF) [22].

Die Ladungsverschiebung wird durch die Verschiebeflussdichte D gekennzeichnet, die sich über die folgende Gleichung mit der Ladung Q und der Fläche A ergibt:

$$D = \frac{Q}{A}$$

Q wird dabei über diese Gleichung bestimmt:

$$Q = k_p * F$$

k_p bezeichnet die piezoelektrische Konstante, auch Piezomodul genannt. Dieser Modul ist abhängig vom verwendeten Material des piezoelektrischen Wandlers. Ladungen sind allerdings nicht direkt messbar, weswegen Spannungsverstärker mit hochohmigem Eingang zum Einsatz kommen, auch Ladungsverstärker genannt. Damit werden die Ladungen über eine Kapazität in eine proportionale Spannung U_q übergeführt:

$$Q = C * U_q \rightarrow U_q = \frac{Q}{C} = \frac{k_p * F}{C}$$

Hierbei ist zu beachten, dass als Kapazität C alle Kapazitätsanteile in der Messschaltung mit dem Piezosensor einzubeziehen sind. Das heißt die Kapazität C_0 des Piezokristalls, die Kapazität C_L der Zuleitung und die Eingangskapazität C_e des verwendeten Verstärkers zur Signalgewinnung. Es ergibt sich die folgende Formel [15]:

$$U_q = \frac{Q}{C_{ges}} = \frac{k_p * F}{C_0 + C_L + C_e}$$

Die theoretischen Grundlagen zeigen, dass ein herkömmlicher Piezosensor mit zwei Anschlüssen für die Eingangsspannung und Erdung nicht direkt an die Steuerplatine eines 3D-Druckers angeschlossen werden kann. Es braucht eine dazwischen geschlossene Messschaltung, die ein entsprechendes Signal an die Steuerplatine aussendet, sobald der Piezosensor auslöst.

4.12 Übersicht der Sensortypen als Z-Probe

Nachdem sich diese Arbeit mit der Implementierung eines Piezosensors als Z-Probe beschäftigt, soll im Folgenden ein kurzer qualitativer Vergleich der verschiedenen Sensortechnologien, die in der Praxis als Z-Probe verwendet werden, dargestellt werden.

Sensortyp	Größe	Druckbett- oberfläche	Temperatur- abhängigkeit	Präzision	Preis	Automatische Bettnivellierung
Endschalter	Klein	Jede	Nein	Hoch	Sehr niedrig	Nein
Photoelektronisch	Klein	Jede	Nein	Mittel	Niedrig	Mittel
Dehnungsmessstreifen im Druckbett	Klein	Jede	Ja	Mittel	Hoch	Ja
Kapazitiv	Groß	Jede	Ja	Niedrig	Niedrig	Schlecht
Induktiv	Groß	Nur leitende	Indirekt ja*	Hoch	Niedrig	Gut
Piezosensor im Hot End	Mittel	Jede	Indirekt nein**	Sehr hoch	Mittel	Sehr gut

Tabella 1: Qualitativer Überblick verschiedener Z-Probes [23]

* Während industrielle Induktivsensoren nicht direkt temperaturabhängig sind, ändert sich der Schaltabstand durch die Wärmeausdehnung.

** Piezosensoren sind grundsätzlich temperaturabhängig, jedoch bei der Integration ins Hot End meist gut genug isoliert, sodass die Messung des beheizten Systems unbeeinflusst bleibt.

5 Anwendung von Induktions- und Piezosensoren im 3D-Drucker V2

5.1 Grundanforderungen

Die Verwendung von Sensoren als Z-Probes haben die Qualität von einfachen 3D-Druckern merklich verbessern können. Um die Qualitätsverbesserungen durch genaueres Homing und präzisere Messungen zur Ermöglichung von automatischer Druckbettnivellierung umzusetzen, müssen die Sensoren gewisse Anforderungen erfüllen und haben in typischen 3D-Druckern drei Hauptaufgaben.

- **Setzung des Nullpunktes der z-Achse des Koordinatensystems:** Die Grundaufgabe als Endstop besitzen Z-Probes weiterhin. Während des Homingprozesses wird das Druckbett in Richtung der Extruderplattform verfahren, bis die Z-Probe auslöst und der Nullpunkt der z-Achse gesetzt werden kann. Dabei sind Präzision und eine hohe Wiederholgenauigkeit der Auslösung entscheidend für die Qualität.
- **Erzeugung der korrekten Düsenhöhe:** In Kombination mit der Setzung des Nullpunktes der z-Achse wird die richtige Düsenhöhe für den Druck eingestellt. Nur wenn der Nullpunkt exakt an der Düsen spitze liegt, kann die korrekte Düsenhöhe erzielt werden. Die meisten Sensorarten arbeiten berührungslos und lösen nicht so aus, dass der Nullpunkt an der Düsen spitze liegt.



Abbildung 22: Benötigter Offset (Z-Probe Height) zur Korrektur der Nullpunktsetzung [24]

Folglich muss, wie in Abbildung 22 ersichtlich, ein Offset in der Firmware gesetzt werden, um den Koordinatenursprung an die richtige Stelle zu verschieben. Dieser Offset ist nicht immer konsistent, nicht eindeutig bekannt und muss mittels manueller Kalibrierung gefunden werden. Die Praxis hat gezeigt, dass die reale Düsenhöhe H_r sich in einem Bereich von 75%-125 % der Nenndüsenhöhe H_N befinden muss, um sichtbare Defekte zu vermeiden:

$$0,75 * H_N \leq H_r \leq 1,25 * H_N$$

- **Präzise Ausmessung mit hoher Wiederholgenauigkeit des Druckbetts:** Mit den meisten Steuerplatinen bzw. deren aufgespielter Firmware ist es mittlerweile möglich Neigungen und Unebenheiten des Druckbettes mittels automatischer Druckbettnivellierung auszugleichen.

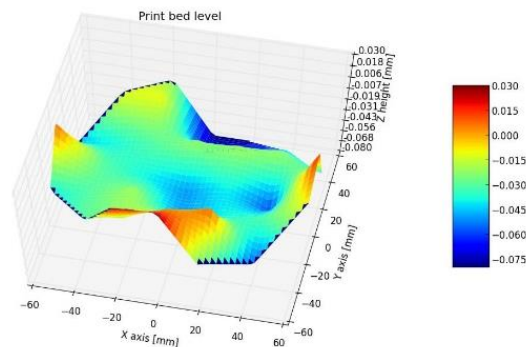


Abbildung 23: Ausgemessene Topologie eines Druckbetts [25]

Um diesen Ausgleich zu erzielen, müssen diese Neigungen und Unebenheiten des Bettes bekannt sein. Dementsprechend gibt es Messroutinen, die vor dem Druck durchgeführt werden können, um die Topologie des Druckbettes auszumessen. Dabei wird an verschiedenen Punkten des Druckbettes die Distanz zur Düse gemessen und zwischen den Distanzen interpoliert, wie in Abbildung 23 zu sehen ist.

Mit dieser Messroutine lassen sich also Neigungen und in gewisser Weise auch Unebenheiten des Druckbettes erfassen und eine Transformationsmatrix gebildet werden, damit diese Fehler während des Druckes durch Gegenbewegungen des Druckbetts ausgeglichen werden können. Entscheidend für die Effektivität dieses Ausgleiches ist hierbei die Präzision der verwendeten Z-Probe bei der Ausmessung des Druckbettes.

5.2 Induktionssensor

Im 3D-Drucker der Pilotfabrik ist ein Induktionssensor in der elektronischen PNP-Ausführung mit einem „normally open“-Schalter der Firma „autosen“ verbaut. Es handelt sich um einen Sensor mit M12 Außengewinde und einem Schaltabstand von 8 mm [26].

5.2.1 Mechanisch

Induktionssensoren sind als Standardkomponenten kaufbar und mechanisch einfach in den 3D-Drucker zu implementieren, wie in Abbildung 24 zu sehen ist. Der Sensor verfügt über ein Außengewinde, womit er in die Extruderplattform geschraubt wird und höhenverstellbar ist. Mit zwei Muttern wird seine Position fixiert. Zu beachten ist hierbei, dass der Sensor einerseits oberhalb der Düse sitzt, um eine Kollision mit dem Druckbett zu vermeiden und andererseits nicht zu hoch befestigt wird, damit das Druckbett detektiert wird, bevor die Düse das Druckbett berührt. Außerdem ist zu beachten, dass der Induktionssensor einen x- und y-Offset zur Düse besitzt, der einmalig in der Firmware eingestellt werden muss, damit während den Messungen der Induktionssensor an die Stelle der Düse gebracht wird. Im Falle des 3D-Druckers V2 entspricht dieser Offset den folgenden Maßen, relativ zur Düsenspitze im gewählten Koordinatensystem:

$$x = 9\text{mm}$$

$$y = -43\text{mm}$$

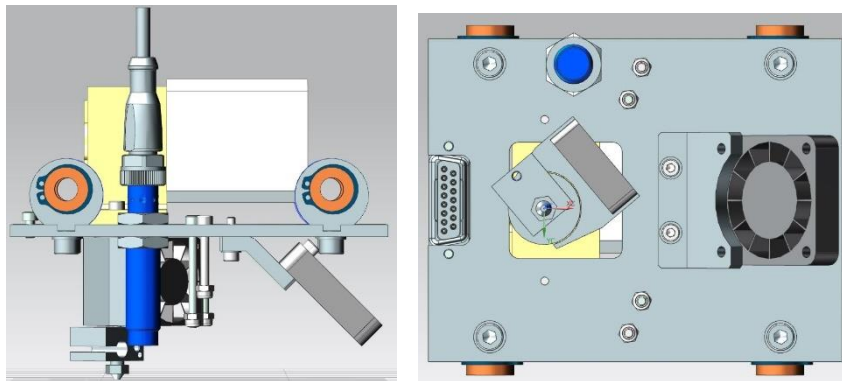


Abbildung 24: Induktionssensor auf der Extruderplattform – von der Seite und von Unten.

Dieser Offset führt zu einem entscheidenden Nachteil dieser Sensortechnologie, der sich vor allem auf die automatische Druckbettnivellierung auswirkt. Um die Topologie des Druckbettes sinnvoll erfassen zu können, muss dieses an möglichst vielen Punkten vermessen werden. Für jede Messung wird dabei die Extruderplattform in x- und y-Achse bewegt, um den Sensor an die entsprechende Messposition zu bringen. Mechanisch bedingt, ist dies jedoch nicht überall möglich, wie in Abbildung 25 zu sehen ist. Nahe dem Ursprung des Systems macht sich der Offset aufgrund der Position relativ zur Düse kaum negativ bemerkbar. Am Ende der y-Achse bleibt jedoch ein großer Teil des Druckbettes für den Induktionssensor unerreichbar. Wodurch wichtige Messpunkte nicht erfasst werden können und die Ausmessung unvollständig bleibt.

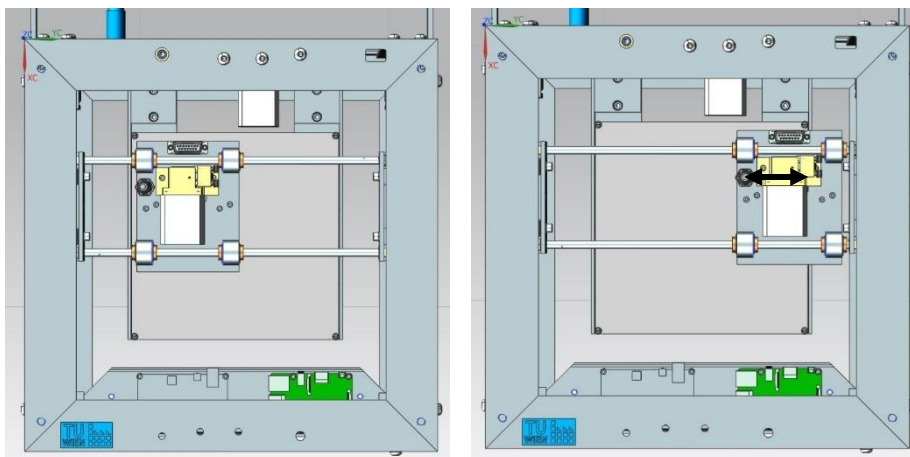


Abbildung 25: Druckbettmessung nahe dem Ursprung (links) und am Ende der y-Achse (rechts)

5.2.2 Elektronisch

Die meisten Induktionssensoren für den 3D-Druck werden mit 12V betrieben, um eine zuverlässige Detektion zu erreichen. Diese Spannung wird von vielen Steuerplatinen auf dem Anschluss für Endstops nicht unterstützt, da hier maximal 5V Spannung angelegt sind. Aus diesem Grund wird der Induktionssensor aus dem 12V Output der Minitronics-Steuerplatine gespeist, wo er auch an Ground anliegt. Mit einem einfachen Spannungsteiler wird die Ausgangsspannung der Signalleitung des Sensors, die der Eingangsspannung entspricht auf 5 Volt reduziert und an den Signalpin für die z-Achse angeschlossen. Die Verkabelung, sowie die

entsprechenden Firmwareeinstellungen gestalten sich recht einfach, lediglich für die Zwischenschaltung des Spannungsteilers ist etwas Erfahrung im Bereich der Elektronik nötig.

5.3 Piezosensor

Das implementierte Piezosensorsystem besteht aus drei Teilen:

- Piezoscheibe des Typs „7BB-20-6LO“ von Murata mit einem selbst gebohrten Loch in der Mitte [27].



Abbildung 26: Piezoscheibe mit gebohrtem Loch [28]

- Die Messschaltung zur Umwandlung der erzeugten Ladung des Piezorings „Piezo 20 PCB v1.2“ von Precision Piezo [29].
- Ein Gehäuse für den Piezoring. In dieser Arbeit werden dabei zwei verschiedene Varianten getestet. **Variante A** ist ein iteriertes Design des von Precision Piezo zur Verfügung gestellten Gehäuses [30] und **Variante B** ist eine selbst erstellte Neuentwicklung. Beide Gehäuse sind bis auf Schrauben und Muttern mittels FFF-3D-Druckes hergestellt.

5.3.1 Mechanisch

Die mechanische Implementierung eines Piezosensors als Z-Probe in den 3D-Drucker der Pilotfabrik erfolgt mit zwei wichtigen Rahmenbedingungen. Einerseits muss eine mechanische Schnittstelle konstruiert werden, um das System mit dem Cold End des Druckers kompatibel zu machen und andererseits muss ein Gehäuse für den Piezoring konstruiert werden, dass eine ausreichend hohe Genauigkeit ermöglicht, um alle nötigen Voraussetzungen für die Nutzung als Z-Probe zu garantieren.

5.3.2 Variante A

Variante A basiert, wie bereits erwähnt, auf dem Design von Precision Piezo. Das Gehäuse besteht aus drei Teilen. Der obere Teil hat dieselben Abmaße wie das verbaute Hot End, damit es auf dieselbe Art und Weise am Cold End montiert werden kann. Das Hot End, explizit das Zuführrohr inklusive Kühlrippen, wird mittels zwei Schrauben und zwei versenkten Muttern zwischen den zwei unteren Gehäuseteilen befestigt, wie in Abbildung 27 zu sehen ist.

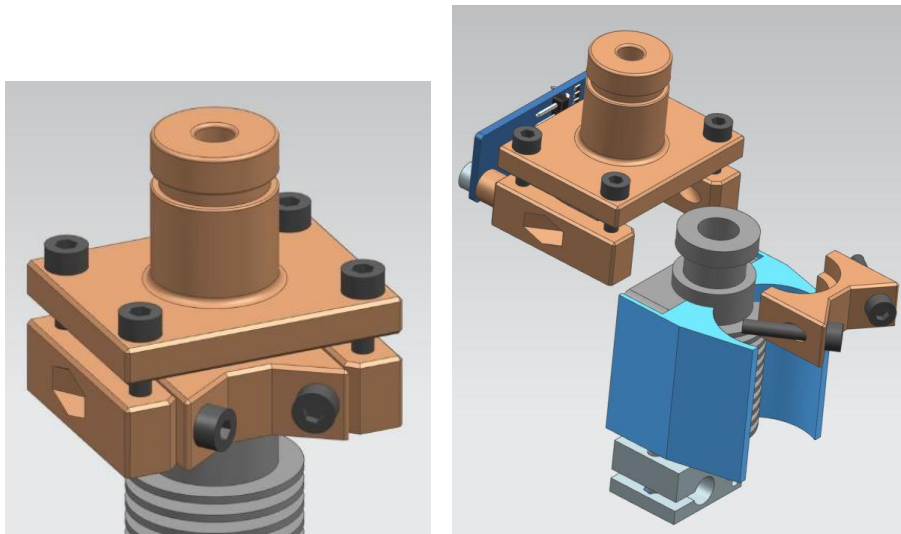


Abbildung 27: Variante A des Piezogehauses und Explosionsansicht der Hot Endbefestigung

Der Piezoring wird in die Aussparung des oberen Gehäuseteils gelegt. Mit vier Schrauben kann die benötigte Vorspannung eingestellt werden, dabei wird der untere Teil nach oben gezogen bis dieser aufgrund seiner Form den Piezoring leicht elastisch verformt. Auf der rechten Seite der Abbildung 28 ist das System bündig dargestellt. Die Sensitivität des Systems ist dabei sehr stark von der gewählten Vorspannung abhängig. In Variante A ist diese variabel einstellbar, basiert jedoch auf den vier manuell festgezogenen Schrauben. Eine gleichmäßige und korrekte Vorspannung ist somit nur nach Gefühl möglich und erfordert Erfahrung bzw. ein häufiges Ein- und Ausbauen des Systems, sowie praktische Tests um die richtige Spannung einzustellen. Anschließend wird ein PTFE-Schlauch durch die gesamte Konstruktion geschoben, damit das Filament während des Druckes gleichmäßig geführt werden kann.

Die Kraftübertragung zur Auslösung des Piezosensors läuft über Düse (1), Heizblock (2), Gewindestange (3), Zuführrohr (4) und über die untere Gehäusehälfte (5+6) an den Piezoring (7). Die entscheidenden Faktoren in der Genauigkeit des Systems liegen in der gewählten Vorspannung der Piezoscheibe, der Elastizität aller zwischengeschalteten Bauteile und die Einstellung des Potentiometers auf der Messchaltung.

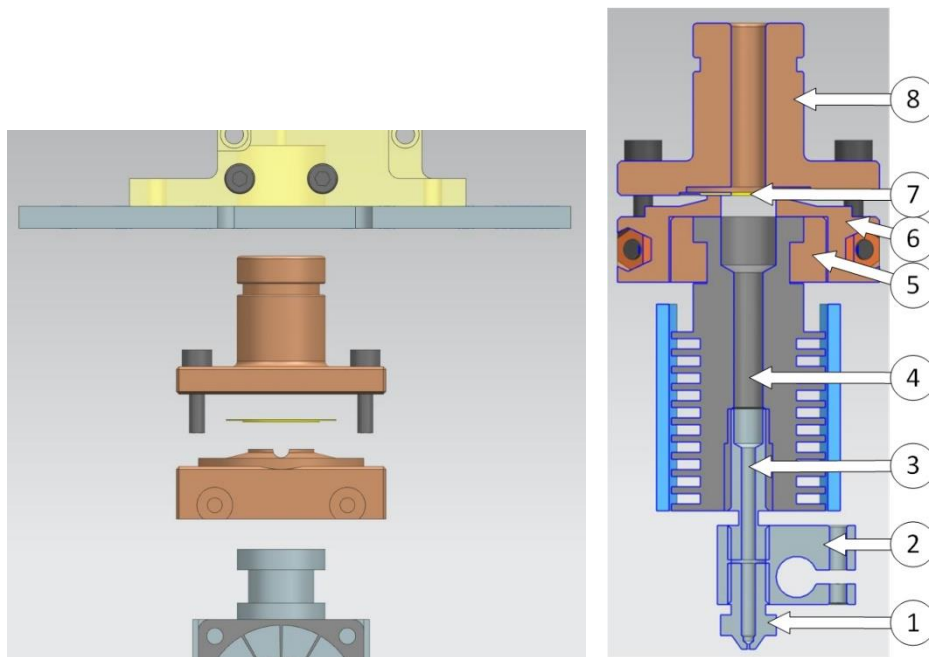


Abbildung 28: Explosions- und Schnittansicht der Variante A zwischen Cold- und Hot End

Die Montage dieses Gehäuses ist einfach und schnell. Das Hot End kann sehr fest im Piezogehäuse montiert werden und die Montage durch zwei Schrauben im Cold End funktioniert ebenfalls sehr gut. Die Steifigkeit wird durch die effektive Verlängerung des Hot Ends vermindert, bleibt jedoch ausreichend hoch. Im Vergleich zu der aktuellen Konstruktion wird das Hot End durch die Zwischenschaltung des Piezogehäuses um fast 27 mm länger, wodurch es auch zu einer Verringerung des verfügbaren Baumraumes um diese Distanz kommt. Damit sind im Gegensatz zu der Variante mit Induktionssensor statt 235 mm nur noch 218 mm in z-Richtung verfügbar.

Die Nachteile von verringerter Steifigkeit und Bauraumverkleinerung lassen sich durch die Wahl anderer Materialien für das Gehäuse des Piezorings optimieren. Im Sinne einer raschen Generierung von Prototypen wurden in dieser Arbeit jedoch ausschließlich Gehäuse aus PLA getestet, die durch einen FFF-3D-Drucker hergestellt wurden.

5.3.3 Variante B

Während Variante A das Design von „Precision Piezo“ zu großen Teilen übernimmt, stellt Variante B eine Überarbeitung in der Kraftübertragung dar. Die Schnittstelle für das Cold End, sowie die Aufnahme des Piezorings bleiben jedoch gleich.

In der Explosionsansicht der Abbildung 29 sind alle Bauteile des Piezogehäuses der Variante B zu erkennen. Im Gegensatz zu Variante A besteht es aus sechs Hauptkomponenten. Der obere Teil besitzt die Aufnahme für die Montage in das Cold End. Die Aussparung für die Piezoscheibe ist identisch zur Variante A. Es befinden sich an den vier Ecken kleine Blöcke zur Erzeugung eines gleichmäßigen Kontakts zu dem Rahmenteil. Zusätzlich sind sechs weitere Blöcke konstruiert, die in die vorgesehenen Taschen des Rahmenteils passen, um die Steifigkeit zu erhöhen. Durch den oberen Gehäuseteil und den Rahmen führen vier Schrauben, die in

jeweils zwei versenkte Muttern der zwei Halterungen führen und mit denen das Gehäuse verschraubt wird, wie in Abbildung 31 zu sehen ist. Zwischen dem oberen Gehäuseteil, dem Rahmen und den Halterungen befindet sich der zweigeteilte Kern des Gehäuses.

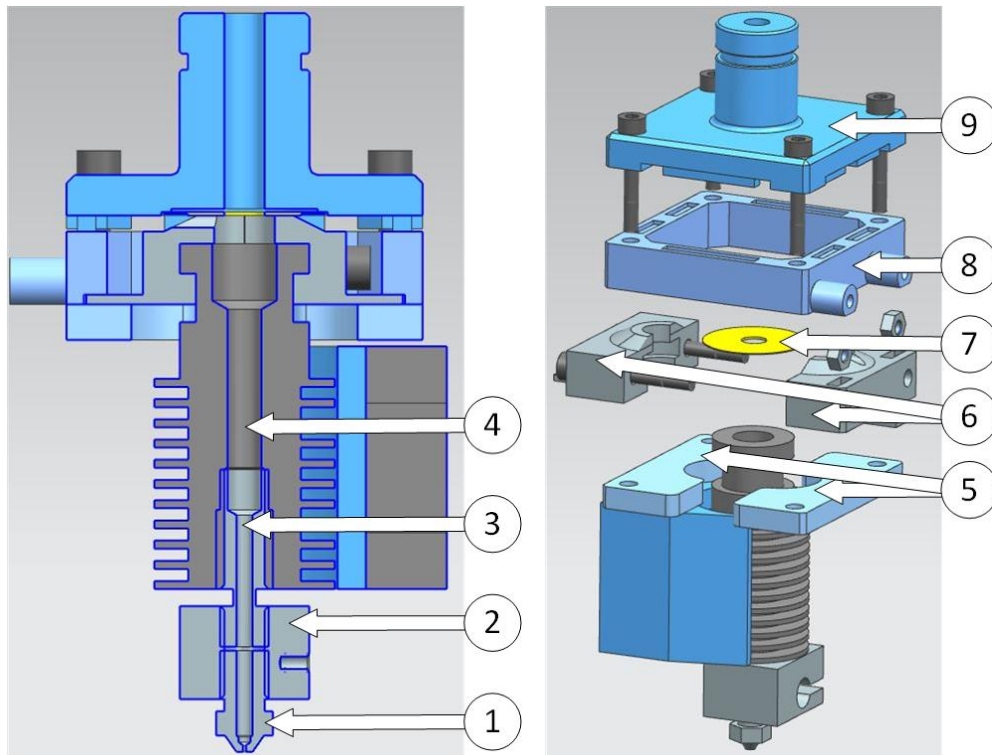


Abbildung 29: Explosions- und Schnittansicht der Variante B des Piezogehäuses. (1) Düse, (2) Heizblock, (3) Gewindestange, (4) Zuführrohr, (5) Halter, (6) Kernhälften, (7) Piezoring, (8) Rahmen, (9) oberes Gehäuseteil

Der Kern nimmt das Hot End auf eine ähnliche Art und Weise wie Variante A auf. Das Hot End wird in die Aussparung platziert und die Teile des Kerns miteinander verschraubt. Die zwei Schrauben führen durch Durchgangsbohrungen und werden mit zwei versenkten Muttern fest verschraubt, um ein steifes System zu bilden. Die Verjüngung auf der oberen Seite des Kerns leitet die Kraft an den Piezoring weiter. Der Kern macht sich dabei die Eigenschaften des 3D-Drucks und die geometrische Auslegung des Systems zur Erzielung der Vorspannung des Piezorings und der Kraftübertragung zu Nutze, wie anhand Abbildung 30 erläutert werden soll.

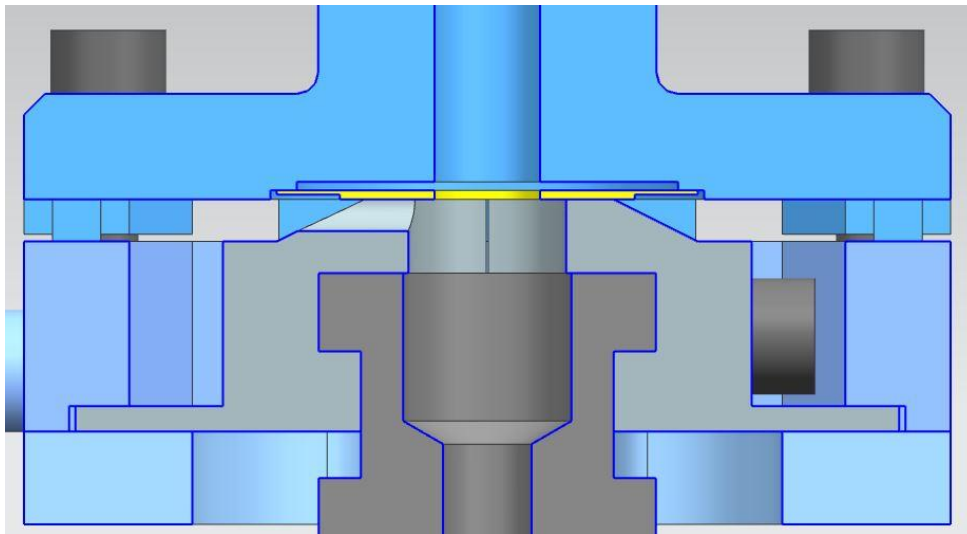


Abbildung 30: Vergrößerte Schnittansicht zur Veranschaulichung der Vorspannungserzielung

An beiden Kernhälften sind zwei 1,2 mm dicke rechteckige Flansche zu sehen. Der ganze Kernteil wird aus PLA mit einer Schichtdicke von 0,2 mm gedruckt. Daraus folgt, dass die Flansche aus nur sechs Schichten Material bestehen und somit relativ elastisch bleiben. Diese Eigenschaft wird zur Ausnutzung der Flansche als Blattfedern genutzt. In Abbildung 30 ist ebenfalls ein Spalt zwischen dem oberen Gehäuseteil und dem Rahmen zu sehen, während alle anderen Teile bündig anliegen. Dieser Spalt von 0,35 mm besteht konsistent über die gesamte Fläche des oberen Gehäuseteils und den Rahmen. Abbildung 30 zeigt also das zusammengebaute System, jedoch ohne angezogene Schrauben. Der Abstand zwischen den Bauteilen wird erst durch das Anziehen dieser vier Schrauben an den Ecken des Systems eliminiert. Dadurch wird eine fixe, durch die Geometrie bestimmte Vorspannung am Piezoring erzeugt und die Elastizität der Bauteile verringert. Dadurch entfällt, im Gegensatz zu Variante A die manuelle Kalibrierung bei der Montage und die Genauigkeit durch eine effizientere Kraftübertragung erhöht werden kann.

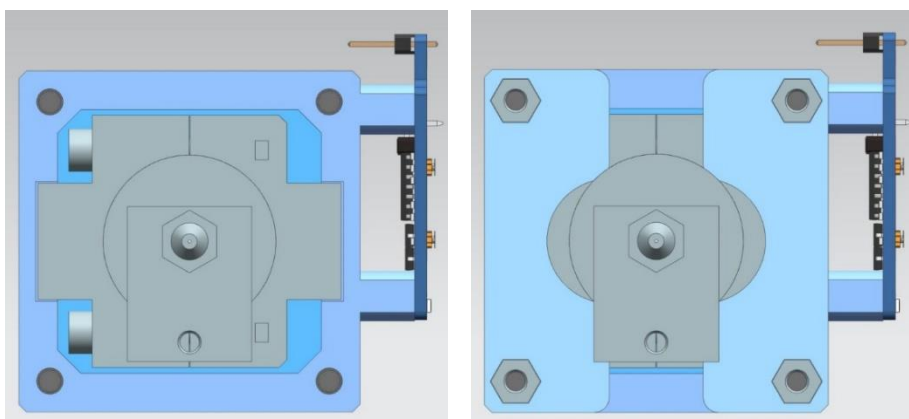


Abbildung 31: Darstellung der Blattfedern (links) und der Halterungen (rechts)

In Abbildung 31 ist das System einmal ohne und einmal mit Halterungen abgebildet. Diese Halterungen dienen für die Aufnahme der Muttern zur Verschraubung des Systems, sowie der

Befestigung der Kernhälften in den Aussparungen des Rahmens. Ihre Form führt außerdem zu einer erhöhten Steifigkeit des Systems und reduziert somit Vibrationen während des Druckvorganges.

Die Vor- und Nachteile von Variante B im Gegensatz zu Variante A sollen kurz erläutert, sowie eine kleine Anmerkung zur Konstruktion gemacht werden:

Vorteile:

- Der größte Vorteil liegt in der automatischen Einstellung der Vorspannung. Sobald die Vorspannung in Variante A perfekt eingestellt ist, folgt eine ähnliche Genauigkeit wie bei Variante B, wie in den folgenden Kapiteln belegt wird. Die Einstellung dieser Vorspannung beansprucht bei Variante A jedoch sehr viel Zeit und ein häufiges Ein- und Ausbauen des Systems.
- Ein weiterer Vorteil liegt in der Steifigkeit, die nicht gemessen wurde, jedoch haptisch spürbar ist und sich in der Druckqualität vor allem bei häufigen Richtungswechseln bemerkbar machen kann. Die maximale Druckgeschwindigkeit bei gleichbleibender Qualität wird somit effektiv verringert.

Nachteile:

- In der aktuellen Form ist die Montage etwas schwieriger gestaltet als bei Variante A.
- Die äußeren Abmaße sind größer, als jene von Variante A. Die Länge ist jedoch bis auf wenige Zehntelmillimeter gleich, wodurch es zu keiner weiteren Bauraumverkleinerung kommt.

Anmerkungen:

Das System stellt in seiner aktuellen Form einen funktionalen Prototyp dar, welcher zweckmäßige Ergebnisse für den 3D-Druck liefert. Während die gewünschten Genauigkeitsergebnisse erreicht werden, wie in den folgenden Kapiteln belegt wird, machen Folgearbeiten auf dieser Arbeit Sinn, da einige Optimierungen auf der Hand liegen.

- Die Verwendung von steiferen Materialien sollte die Genauigkeit weiter verbessern. Das aktuelle System entfernt einen Großteil der Elastizität des PLAs durch die Vorspannung, jedoch besteht das System trotzdem aus Kunststoff, was keine optimale Lösung darstellt.
- Eine Verbesserung der geometrischen Verhältnisse zur optimaleren Vorspannungserzeugung könnte durch Berechnungen erreicht werden.
- Die Montage des Gehäuses ist verbesserungswürdig.

5.3.4 Elektronisch

Piezosensoren brauchen eine Messschaltung damit die, durch eine mechanische Belastung erzeugte, Ladungsänderung in eine proportionale Spannung umgewandelt werden kann. Wie bereits erläutert, basieren die Anschlüsse für Endstops auf der Steuerplatine des 3D-Druckers nur auf der Unterscheidung „High“ und „Low“. Der Sensor wird lediglich als aktiviert oder deaktiviert erkannt. Dementsprechend muss die Ladung nicht nur in eine Spannung gewandelt,

sondern für die Steuerplatine auch entsprechend konditioniert werden. Die Messschaltung „Piezo20 PCB V1.2“ der Firma „Precision Piezo“ wurde für diese spezielle Anwendung von Piezosensoren als Z-Probe in 3D-Druckern entwickelt und wird für das implementierte System verwendet.

Auf dem Piezoring sind zwei Kabel angelötet, die mit der Messschaltung verbunden werden. Diese Messschaltung verarbeitet die Ladungsänderung und ist über drei Kabel an der entsprechenden Sensorschnittstelle der Steuerplatine angeschlossen. Die Messschaltung ist dabei für die typischen Endstoppanschlüsse ausgelegt, wird also mit 5 Volt Spannung versorgt und ist an der Erdung angeschlossen. Das Signal bei Sensorauslösung wird an den entsprechenden Signalpin weitergegeben. Die Verwendung als Z-Probe ist nach der mechanischen Montage und elektronischen Verkabelung jedoch noch nicht möglich. Es müssen einige Änderungen in der Repetier-Firmware vorgenommen werden. Alle relevanten Firmwareeinstellungen, die für die Genauigkeitsmessungen vorgenommen wurden, sowohl für Piezo- als auch Induktions-sensor, werden in Kapitel 6.2.3 aufgelistet. Nach der Bespielung der Steuerplatine mit der adaptierten Firmware funktioniert das Sensorsystem folgendermaßen:

Das Druckbett wird noch oben in Richtung der Düse bewegt, bis es zu einer Berührung der Düsenspitze mit der Druckoberfläche kommt. Die Kraft wird über Düse, Heizblock, Gewindestange und das Gehäuse auf den Piezoring übertragen und löst laut Datenblatt mit einer Belastung von ca. 5-15 Gramm, also ca. 0,05-0,15 Newton aus [31]. Diese Druckbelastung führt zu einer proportionalen Ladungsänderung, die von der Messschaltung in einem ersten Schritt in eine proportionale Spannung umwandelt wird. Dies erfolgt, wie in Abbildung 32 zu sehen, durch den Ladungsverstärker.

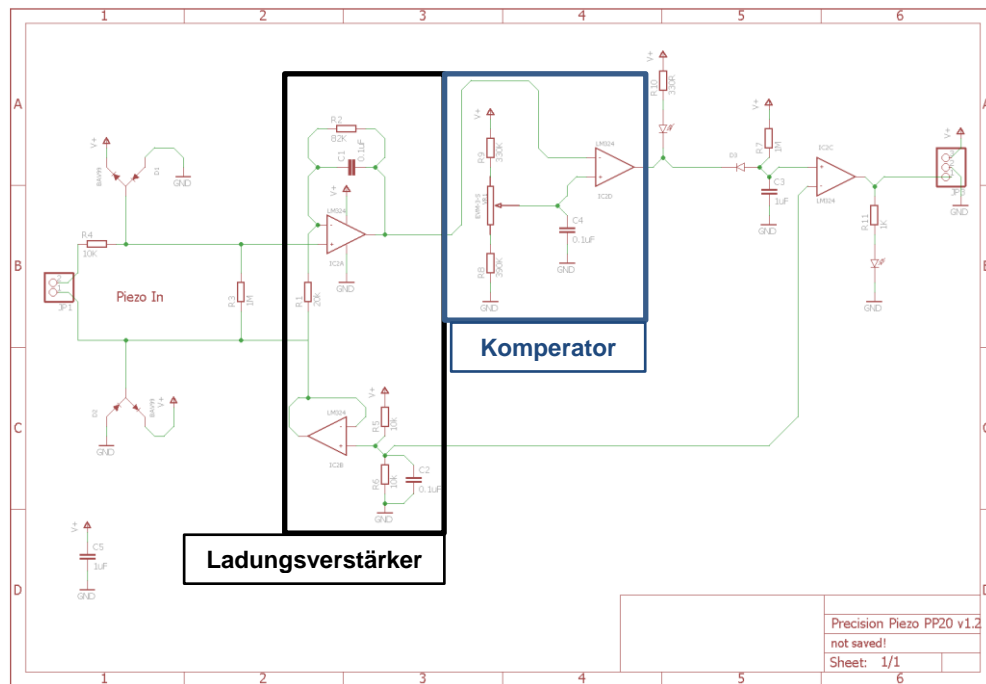


Abbildung 32: Elektronischer Schaltplan der Messschaltung [32]

In einem zweiten Schritt wird die Ausgangsspannung von einem Komparator mit einer Vergleichsspannung verglichen. Sobald die Vergleichsspannung überschritten wird, sendet die Messschaltung das aktive Signal aus und der Signalpin auf der Steuerplatine wird als „High“ erkannt. Solange die Vergleichsspannung am PCB nicht erreicht wird, liegt keine Spannung am Signalpin und dieser bleibt auf „Low“. Um die Sensitivität des Sensors einstellen zu können, ist auf der Messschaltung ein Potentiometer verbaut wodurch die Vergleichsspannung justiert werden kann. Bei der Justierung muss ein Kompromiss zwischen hoher Messgenauigkeit und der Vermeidung von Falschauslösung durch Vibrationen erreicht werden. Diese Einstellarbeit muss jedoch nur ein einziges Mal gemacht werden und gestaltet sich als intuitiver Prozess.

6 Ermittlung der Messgeschwindigkeit

6.1 Einleitung

In einem ersten Schritt sollen für den Induktions-, sowie den Piezosensor praktikable Geschwindigkeitsparameter für die Durchführung der darauffolgenden Genauigkeitsmessungen gefunden werden. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass sie keinen Benchmark für die absolute Genauigkeit der beiden Sensortechnologien darstellen sollen. Vielmehr geht es um die tatsächlich erzielbare Genauigkeit mitsamt den vorhandenen Rahmenbedingungen im Betrieb des 3D-Druckers. Dies bedingt Messungenauigkeiten durch die Druckerart, Vibrationen, Reibung der mechanischen Teile, hohe Temperaturen und die maximale Auflösung des Messsystems. All diese Messungenauigkeiten sind im Betrieb des 3D-Druckers nicht vernachlässigbar, beeinflussen das System im Betrieb und sind damit auch für die Messungen von Relevanz.

Beide Sensoren werden am selben 3D-Drucker mit identischen Verfahren und Parametern getestet. Lediglich die Firmware muss sensorspezifisch eingestellt werden.

6.2 Messverfahren

6.2.1 Grundlagen

In der Repetier-Firmware wird zwischen der Hominggeschwindigkeit und der sogenannten Probinggeschwindigkeit unterschieden. Zur Wiederholung soll der Unterschied zwischen Homing und Probing noch einmal kurz erläutert werden.

Der *Homingvorgang* muss bei jedem Neustart des Druckers durchgeführt werden. Hier wird der Koordinatenursprung des 3D-Druckers gesetzt. Um optimale Druckergebnisse zu erzielen, muss vor allem der Ursprung der z-Achse exakt gesetzt werden. Dieser muss an der Spitze der Düse liegen, um anschließend exakte Düsenhöhen einstellen zu können.

Der *Probingvorgang* wird für die Distanzmessungen des Druckbettes genutzt. Im normalen Betrieb des 3D-Druckers wird dieser Vorgang für die Ausmessung der Druckbetttopologie und damit der Bestimmung von Neigung und Ebenheit des Druckbettes verwendet. Damit eignet sich der Probingvorgang für die Bestimmung der Sensorgenauigkeit, da die gemessenen Distanzen auch ausgelesen und ausgewertet werden können.

6.2.2 Auflösung

Die Distanzmessung durch die Z-Probe während des Probingvorgangs basiert auf der Bewegung des Druckbetts durch den Schrittmotors der z-Achse. Das Druckbett, sowie die Extruderplattform wird nach dem Homingvorgang an definierte Koordinaten bewegt. Anschließend wird das Probing gestartet. Hierbei wird das Druckbett in Richtung der Düse bewegt, bis die Z-Probe auslöst. Wie bereits erwähnt, ist es durch die verwendeten Sensoren und die Steuerplatine nicht möglich direkte Distanzmessungen durchzuführen. Die Steuerplatine kann lediglich

erkennen, wann die Z-Probe aktiviert wurde. Die gemessene Distanz wird von der Firmware dementsprechend über einen indirekten Weg ermittelt. Sie ergibt sich über die verfahrenen Schritte des Motors, die Übersetzung des Flaschenzugs, sowie der verbauten Riemenscheibe. Die errechnete Distanz wird anschließend von Repetier-Server in Millimetern mit drei Nachkommastellen ausgegeben und kann für die Genauigkeitsermittlung verwendet werden.

Die maximal erreichbare mechanische Auflösung gibt an mit welcher Schrittgröße das Druckbett bei maximaler Präzision verfahren werden kann. Also um wie viele Millimeter sich das Druckbett bewegt, wenn der Schrittmotor um einen 1/32 Schritt oder 1 Mikroschritt rotiert wird. Zur Erinnerung: Der Schrittmotor benötigt 200 Schritte pro Umdrehung, welche für die z-Achse in 32 Mikroschritte geteilt werden, also 6400 Mikroschritte pro Umdrehung.

Die mechanische Auflösung des Systems kann über die folgende Formel errechnet werden:

$$\text{Auflösung [mm/step]} = \frac{p * z}{(s_u * f_m * i)}$$

- p... Zahnteilung des Riemens [mm]
- z... Zähnezahl der Riemenscheibe [-]
- s_u... Schritte pro Umdrehung [steps]
- f_m... Faktor für Mikroschritte [-]
- i... Übersetzung [-]

Für den 3D-Drucker werden GT2 Riemenscheiben mit z=20 Zähnen verwendet. Die Zahnteilung beträgt p=2mm und die Übersetzung ins Langsame durch den Flaschenzug hat den Faktor i=3. Die Schrittmotoren besitzen eine Auflösung von 1,8° pro Schritt und benötigen somit 200 Schritte pro Umdrehung. Auf der Steuerplatine ist ein Mikroschrittfaktor von 32 für die z-Achse eingestellt. Folglich ergibt sich die folgende Auflösung:

$$\text{Auflösung} = \frac{2\text{mm} * 20}{200\text{steps} * 32 * 3} = 0,002083 \frac{\text{mm}}{\text{step}} \approx 2 \frac{\mu\text{m}}{\text{step}}$$

Die maximale Auflösung des 3D-Druckers beträgt damit 2 µm in z-Richtung. Diese Auflösung erklärt die Häufung von Messdaten in 2µm-Abständen.

6.2.3 Firmwareeinstellungen

Die Steuerplatine ist, wie bereits erwähnt, mit Repetier-Firmware bespielt. Die Einstellungsmöglichkeiten dieser Firmware sind exzessiv und sollen nicht vollständig beschrieben werden. Die wichtigsten Parameter für die Messung werden jedoch aufgezählt. Um konsistente Ergebnisse zu erhalten, wurde versucht die Unterschiede zwischen den Sensorsystemen auf das Notwendigste zu reduzieren. Das System läuft mit Repetier-Firmware Version 1.0.3.

Einstellung	Induktionssensor	Piezosensor	Bemerkung
<i>z-Homing speed</i>	7,5mm/s	7,5mm/s	Geschwindigkeit des Druckbetts für das Homing.
<i>z-Travel acceleration</i>	150mm/s ²	150mm/s ²	Die Beschleunigung hat einen entscheidenden Einfluss auf Fehlauflösungen des Piezosensors und ist ein limitierender Faktor.
<i>z min</i>	Switch on GND, normally open	Electronic, normally open	Während der Induktionssensor sein Signal über Ground schickt, läuft dies beim Piezosensor über den Signalpin.
<i>Go back after first hit</i>	2mm	10mm	Beim Homingvorgang wird der Sensor zweimal ausgelöst. Beim Induktionssensor wird das Bett dazwischen 2 mm wegbewegt, beim Piezosensor 10 mm.
<i>Reduction factor 2nd test</i>	1	1	Normalerweise wird bei der zweiten Auslösung die Geschwindigkeit zur Genauigkeitserhöhung verringert. Für die Messung wird diese gleich gehalten und von Beginn die optimale Geschwindigkeit verwendet.
<i>Probing z speed</i>	7,5mm/s	7,5mm/s	Geschwindigkeit des Druckbetts für das Probing.
<i>Probing delay</i>	0ms	750ms	Diese Verzögerung wird beim Piezosensor benötigt, damit das System nach der x-y-Bewegung der Extruderplattform zur Ruhe kommen kann, bevor das Druckbett bewegt wird und es zu keiner Falschauslösung kommt.
<i>Distance to switch off z probe</i>	1mm	10mm	In der Praxis werden oft mehrere Messungen pro Messpunkt gemacht und das arithmetische Mittel gebildet. Die Mindestdistanz zwischen diesen Messungen zur Deaktivierung des Sensors ist für den Induktionssensor 1 mm. Der Piezosensor braucht hauptsächlich Zeit zur Deaktivierung, deswegen werden 10 mm eingestellt.
<i>Probing repetitions</i>	1	1	Für die Messungen wird auf diese Wiederholung verzichtet, um Rohdaten zu sammeln.
<i>X Offset</i>	9	0	Offset der Z-Probe zur Düse in x-Richtung
<i>Y Offset</i>	-43	0	Offset der Z-Probe zur Düse in y-Richtung

Tabelle 2: Teilauszug der Firmwareeinstellungen

6.2.4 Rahmenbedingungen der Messung

Vor jeder durchgeführten Messung wird der Drucker nun einmal gehomed und zwar mit derselben Geschwindigkeit mit der anschließend gemessen wird, um konsistente Ergebnisse zu erhalten. Es werden sieben verschiedene Messgeschwindigkeiten getestet, mit der jeweils 50 Distanzmessungen durchgeführt werden. Das eingestellte Homing- und Messverfahren für den Induktionssensor und den Piezosensor erfolgen sehr ähnlich, jedoch nicht identisch:

Schritt	Induktionssensor	Piezosensor
1	Homing der x-Achse, siehe Kapitel 3.4	Homing der x-Achse siehe Kapitel 3.4
2	Homing der y-Achse, siehe Kapitel 3.4	Homing der y-Achse, siehe Kapitel 3.4
3	Positionierung der Düse an die Koordinaten X92 Y84, also der Mitte des Druckbettes und Positionierung des Druckbettes auf Z10, also 10 mm unter der Düsen Spitze	Positionierung der Düse an die Koordinaten X92 Y84, also der Mitte des Druckbettes und Positionierung des Druckbettes auf Z10, also 10 mm unter der Düsen Spitze
4	Positionierung des Induktionssensors an die Koordinaten X92 Y84, also an die Stelle der Düse	Bewegungspause von 750 Millisekunden
5	Verfahren des Druckbettes in Richtung der Düse mit ausgewählter Messgeschwindigkeit bis zur Auslösung des Sensors	Verfahren des Druckbettes in Richtung der Düse mit ausgewählter Messgeschwindigkeit bis zur Auslösung des Sensors
6	Zurücksetzen des Bettes auf Z10	Zurücksetzen des Bettes auf Z10
7	Positionierung der Düse an die Koordinaten X92 und Y84	---
8	Wiederholung der Schritte 3-7 weitere 49 Mal	Wiederholung der Schritte 3-7 weitere 49 Mal

Tabelle 3: Beschreibung des Homing- und Messverfahrens

Die Unterschiede in den Verfahren ergeben sich einerseits technologie- und andererseits firmwarebedingt. Der Induktionssensor sitzt, wie bereits erwähnt, mit einem x- und y-Offset zur Düse. Damit die Messung an der richtigen Stelle vorgenommen wird, muss der Sensor um genau diesen Offset umpositioniert werden. In der Firmware wird dies im Probingvorgang automatisch berücksichtigt, da der Offset des Induktionssensors hinterlegt ist. Es wird immer zuerst die Düse an die ausgewählte Stelle gefahren und anschließend um den Offset des Sensors wegbewegt. Dies passiert in Schritt 4 für den Induktionssensor in Tabelle 3.

Der Piezosensor braucht in Schritt 4 eine Bewegungspause, da diese Sensorart sehr sensibel auf Bewegungen und Vibrationen im System ist. Wie in Tabelle 2 beschrieben ist in der Repeater-Firmware eingestellt, dass der Signalpin auf der Steuerplatine also erst 750 ms nach Erreichen des gewünschten Messpunktes freigegeben wird. Dadurch lassen sich Falschauslösungen durch Vibrationen vermeiden. Zusätzlich muss die Beschleunigung des Druckbettes beschränkt werden, damit das Anfahren bei der Messung ebenfalls keine Falschauslösungen produziert.

6.2.5 Definition der Genauigkeitsbegriffe

Um die Qualität von Messdaten durch die Verwendung von Sensoren quantitativ bewerten zu können, müssen die Präzision und die Richtigkeit der ermittelten Daten bestimmt werden. Die Begriffe Präzision, Richtigkeit, systematische Abweichung, sowie akzeptierter Bezugswert sollen nun nach [33] definiert werden:

Die Präzision ist der Grad der Übereinstimmung zwischen voneinander unabhängigen Ergebnissen, die unter vorgegebenen Bedingungen ermittelt wurden. Die Präzision hängt nur von der Verteilung der zufälligen Fehler ab. Sie bezieht sich nicht auf den wahren Wert oder den angegebenen Wert. Als Maß für die Präzision wird im Allgemeinen die Unpräzision gewählt, die berechnet wird als Standardabweichung des Ermittlungsergebnisses oder des Messergebnisses. Eine kleinere Präzision äußert sich durch eine größere Standardabweichung.

Für die Präzision bei verschiedenen Geschwindigkeiten bzw. beim Vergleich der Sensortypen wird die Größe der empirischen Standardabweichung herangezogen, die sich laut [34] folgendermaßen berechnen lässt:

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

s_x ... empirische Standardabweichung

n ... Anzahl der Messdaten

x_i ... Messdaten

\bar{x} ... Mittelwert

Die Richtigkeit ist der Grad der Übereinstimmung zwischen dem mathematischen Erwartungswert eines Ermittlungsergebnisses oder eines Messergebnisses und dem wahren Wert. Als Maß für die Richtigkeit wird im Allgemeinen die systematische Abweichung gewählt. In der Praxis wird der wahre Wert durch den akzeptierten Bezugswert ersetzt.

Der akzeptierte Bezugswert ist ein Wert, der als vereinbarter Bezugswert für einen Vergleich dient. Der anerkannte Bezugswert wird hergeleitet als

- a) theoretischer oder feststehender Wert, der auf wissenschaftlicher Grundlage beruht;
- b) festgesetzter oder anerkannter Wert, der auf der Arbeit einer nationalen oder internationalen Organisation beruht;
- c) ein Konsens oder ein anerkannter Wert, der auf gemeinsamen Untersuchungen unter Aufsicht einer wissenschaftlichen oder technischen Arbeitsgruppe beruht;
- d) Erwartungswert, also als Mittelwert einer genau angegebenen Messreihe, falls a), b) und c) nicht vorliegen.

In den durchgeführten Messungen ist der akzeptierte Bezugswert ein festgesetzter Wert, der beim Start der Messung bestimmt wird, indem das Druckbett auf eine bestimmte Höhe verfahren wird. Die ausgewählte Höhe und damit der akzeptierte Bezugswert beträgt bei allen Messungen 10 mm.

Die systematische Abweichung ist die Differenz zwischen dem Erwartungswert eines Ermittlungsergebnisses oder eines Messergebnisses und dem wahren Wert. Die systematische Abweichung eines Messinstrumentes (Richtigkeitsfehler) wird normalerweise geschätzt durch Berechnung des mittleren Anzeigefehlers aus einer hinreichenden Anzahl

von Wiederholungsmessungen. Der Anzeigefehler ist „die Anzeige eines Messinstrumentes minus dem wahren Wert der zugehörigen Eingangsgröße“. In der Praxis wird der wahre Wert durch den akzeptierten Bezugswert ersetzt.

Die Richtigkeit der Messungen wird mit der folgenden Formel ermittelt:

$$R = |\bar{x} - x_{ref}|$$

R... Richtigkeit

\bar{x} ... Mittelwert

x_{ref} ... akzeptierter Bezugswert

6.2.6 Verteilungsfunktion der Messdaten

Die Normalverteilung hat sich als die am häufigsten zutreffende Verteilung von Messreihen erwiesen [15]. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Distanzen bei der Sensortechnologien annähernd normalverteilt sind. Aufgrund der hohen Genauigkeiten der Sensoren bewegen sich die Messergebnisse jedoch sehr nah an der maximalen Auflösung des Systems, weshalb bei jeder Messreihe eine Stichprobe von $n = 50$ aufgenommen wurde, um signifikante Aussagen über die Messergebnisse machen zu können. Laut [35] gilt für den zentralen Grenzwertsatz:

Seien X_1, X_2, \dots, X_n , eine Folge von identisch verteilten Zufallsvariablen, die alle dieselbe Wahrscheinlichkeitsverteilung aufweisen und unabhängig sind. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung muss dabei nicht der Gauss'schen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion entsprechen! Angenommen werde weiters, dass sowohl Erwartungswert μ_x auch die Standardabweichung $\sigma_x > 0$ existieren und endlich sind. Dann konvergiert die Verteilung der standardisierten Zufallsvariablen mit wachsendem n punktweise gegen eine Standardnormalverteilung. In der Praxis gilt, dass der Stichprobenumfang $n \geq 30$ gewählt werden sollte, damit der zentrale Grenzwertsatz annäherungsweise gilt.

6.2.7 Definition der statistischen Berechnungen

Die folgenden Gleichungen, laut [15], mit adaptierter Nomenklatur geben Aufschluss über die folglich angegebenen Messwerte und deren statistische Betrachtung.

Arithmetischer Mittelwert \bar{x}

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Der arithmetische Mittelwert ergibt sich aus der Summe aller Messwerte x_i dividiert durch die Gesamtanzahl n . Er wird als bester Schätzwert der Messgröße aufgefasst.

Empirische Standardabweichung s

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_j - \bar{x})^2}$$

Die empirische Standardabweichung s beschreibt die mittlere quadratische Abweichung der Einzelwerte einer Messreihe von deren Mittelwert. Sie beschreibt nur eine Stichprobe der Grundgesamtheit, weswegen durch $n-1$ dividiert wird.

Intervallgrenzen und Streubreite

Die Messergebnisse werden als annähernd normalverteilt angenommen, womit die in Tabelle 4 beschriebenen Zusammenhänge gelten. Hiermit lassen sich anhand der errechneten empirischen Standardabweichung direkt Rückschlüsse auf die Qualität der Messung und eventuelle Auswirkungen auf die sichtbare Druckqualität rückschließen. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,45 % liegt eine einzelne Messung also innerhalb der Streubreite von $4 \cdot s$ und mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % liegt eine einzelne Messung innerhalb einer Streubreite von $5,16 \cdot s$.

Symmetrische Intervallgrenzen	Transformation: $t = \frac{x - \bar{x}}{s}$	Bezeichnung in der betrieblichen Messpraxis	Wahrscheinlichkeit, dass ein Messwert im Intervall liegt
$\bar{x} \pm 1 \cdot s$	1	Orientierende Messung	68,27 %
$\bar{x} \pm 1,96 \cdot s$	1,96	Betriebsmessung	95,00 %
$\bar{x} \pm 2 \cdot s$	2		95,45 %
$\bar{x} \pm 2,58 \cdot s$	2,58		99 %
$\bar{x} \pm 3 \cdot s$	3	Präzisionsmessung	99,73 %
$\bar{x} \pm 4 \cdot s$	4		99,99 %

Tabelle 4: Für die Praxis typische Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung der Messaussage [15]

6.3 Messergebnisse zur Geschwindigkeitsermittlung

6.3.1 Induktionssensor

Zur Bestimmung der Messgenauigkeit über verschiedene Messgeschwindigkeiten des Induktionssensors werden sieben Messreihen durchgeführt. Abbildung 33 veranschaulicht die Standardabweichung dieser Messreihen über die getesteten Geschwindigkeiten. Anfangs sinkt die Standardabweichung, womit die Präzision des Sensors steigt. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Präzision mit steigender Geschwindigkeit stetig abnimmt, jedoch war bei der Messreihe mit 2,5 mm/s optisch zu erkennen, dass bei dieser Geschwindigkeit kein ruhiger Lauf des Druckbettes möglich ist. Bei 7,5 mm/s erreicht die Standardabweichung ein Minimum von $4,418 \mu\text{m}$.

Anschließend kommt es infolge der steigenden Messgeschwindigkeit zu einer steigenden Standardabweichung, die ein Maximum von $7,204 \mu\text{m}$ bei einer Geschwindigkeit von 20 mm/s erreicht. Der starke Abfall bei 25 mm/s lässt sich nicht erklären und bleibt unberücksichtigt.

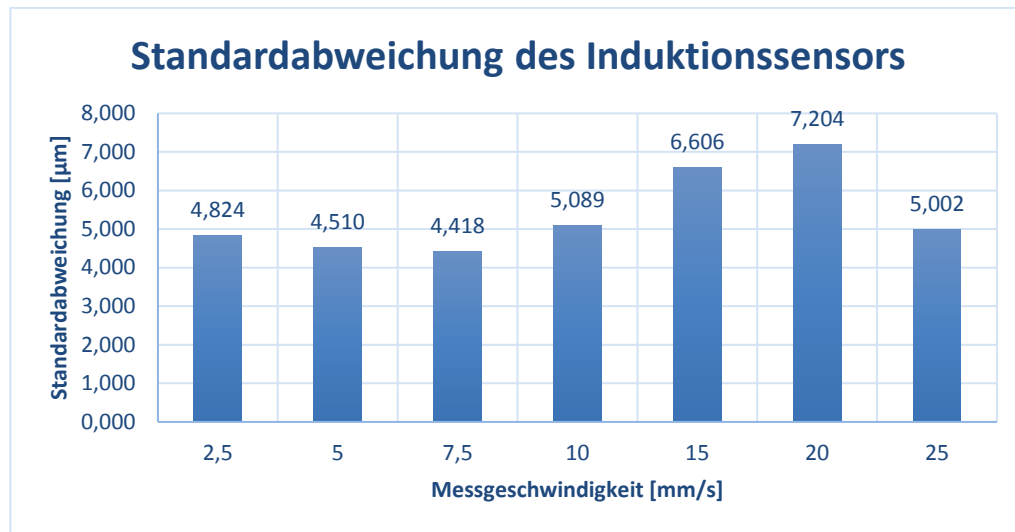


Abbildung 33: Präzision des Induktionssensors

Die Richtigkeit des Induktionssensors macht deutlich weshalb sich diese Technologie als Z-Probe in 3D-Druckern verbreitet hat, denn die Messreihen zeigen, dass sich die Richtigkeit innerhalb weniger Mikrometer bewegt. Es sei ein weiteres Mal erwähnt, dass bei diesen Ergebnissen die berührungslose Detektion des Induktionssensors berücksichtigt werden muss. Die Richtigkeit, sowie die Standardabweichung beziehen sich auf den Schaltabstand des Induktionssensor. Deshalb ist für die Einstellung der korrekten Düsenhöhe ein manuell eingestellter Offset in z-Richtung nötig. Eine hohe Präzision bedeutet allerdings, dass dieser Offset nicht allzu oft nachjustiert werden muss, da der referenzierte Schaltabstand sich bei verschiedenen Messungen kaum ändert. Wäre die Präzision nicht hoch und konsistent genug, dann müsste der manuell eingestellte Offset nach jedem Homing neu kalibriert werden, womit der Sensor als Z-Probe unbrauchbar wäre.

Für die Ausmessung der Druckbetttopologie zur Verwendung der automatischen Druckbettnivellierung ist der Offset zwischen Sensorschaltabstand und Düsenspitze, sowie die Richtigkeit des Sensors irrelevant. Für eine korrekte Ausmessung sorgt lediglich eine hohe Präzision bei der Ausmessung.

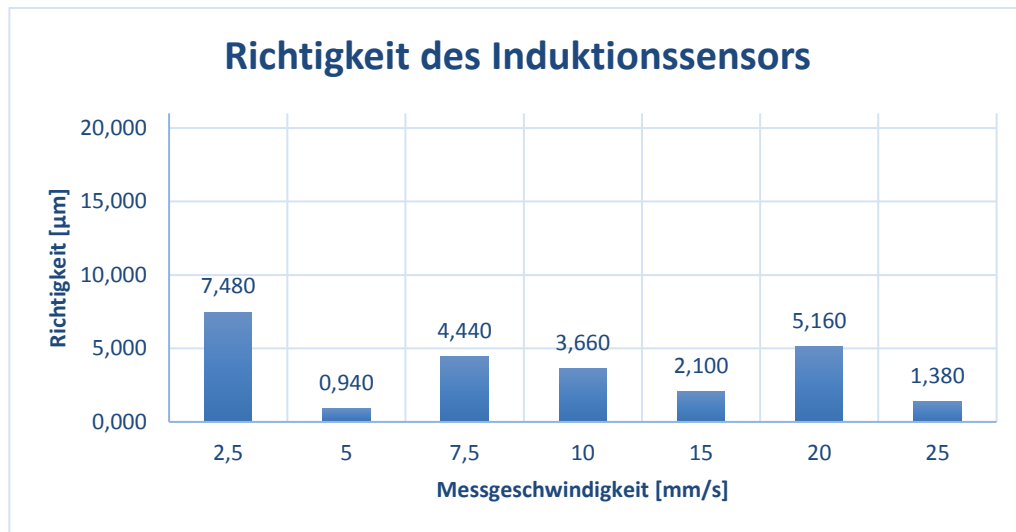


Abbildung 34: Richtigkeit des Induktionssensors

6.3.2 Piezosensor Variante A

Die Standardabweichung des Piezosensors Variante A zeigt ein ähnliches Bild, wie jene des Induktionssensors. In Abbildung 35 lässt sich erkennen, dass bei einer Geschwindigkeit von 2,5mm/s die Präzision im Vergleich zu den anderen Messreihen niedrig anfängt, ihr Maximum bei 7,5mm/s annimmt und anschließend konstant mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. Eine Verbesserung der Präzision bei 25mm/s, wie beim Induktionssensor wurde nicht gemessen.

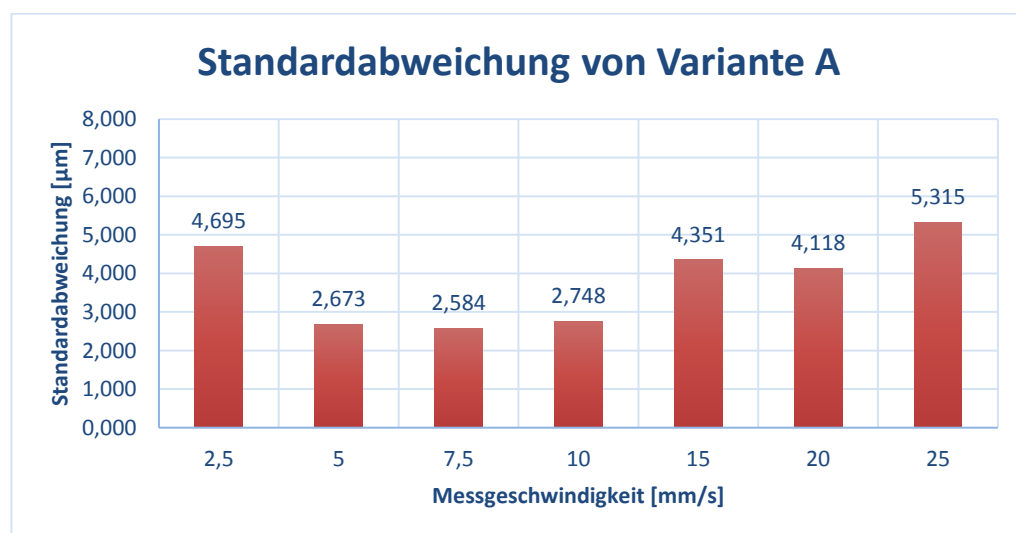


Abbildung 35: Präzision der Variante A

Die Richtigkeit des Piezosensors Variante A bewegt sich, mit einer Ausnahme in einem Bereich von wenigen Mikrometern. Das Minimum wird, so wie bei der Standardabweichung, bei 7,5 mm

erreicht. Der Ausreißer bei 2,5mm/s deutet daraufhin, dass das System bei solch einer Druckbettgeschwindigkeit deutlich schlechtere Messergebnisse erzeugt als bei allen anderen Geschwindigkeiten.

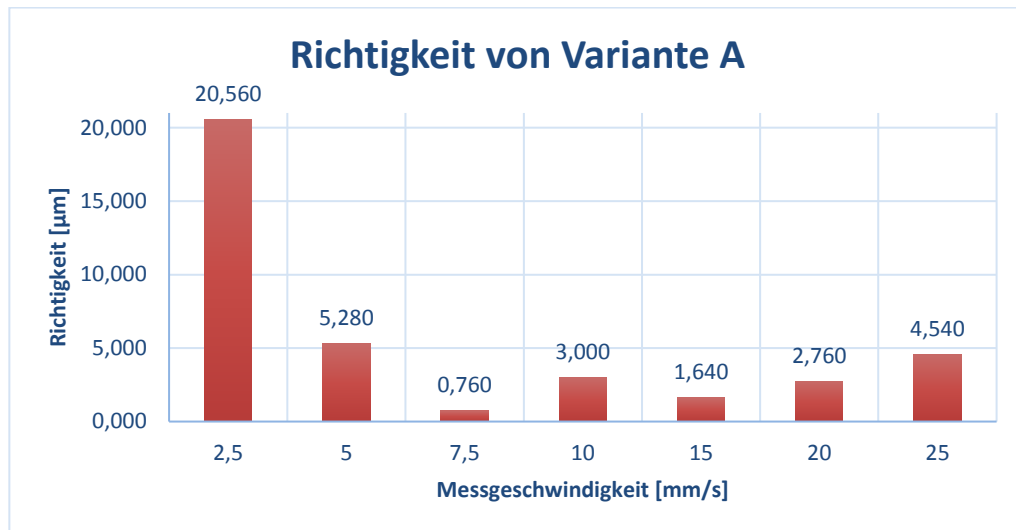


Abbildung 36: Richtigkeit der Variante A

6.3.3 Piezosensor Variante B

In Abbildung 37 ist der Verlauf der Standardabweichung von Piezosensor Variante B visualisiert. Dieses System zeigt einen ähnlichen Präzisionsverlauf über die gemessenen Geschwindigkeiten, wie Variante A. Die absoluten Werte der Standardabweichung sind ebenfalls ähnlich. Es zeigt sich, dass die verschiedenen Gehäusekonstruktionen die Präzision des Piezosensors kaum beeinflussen.

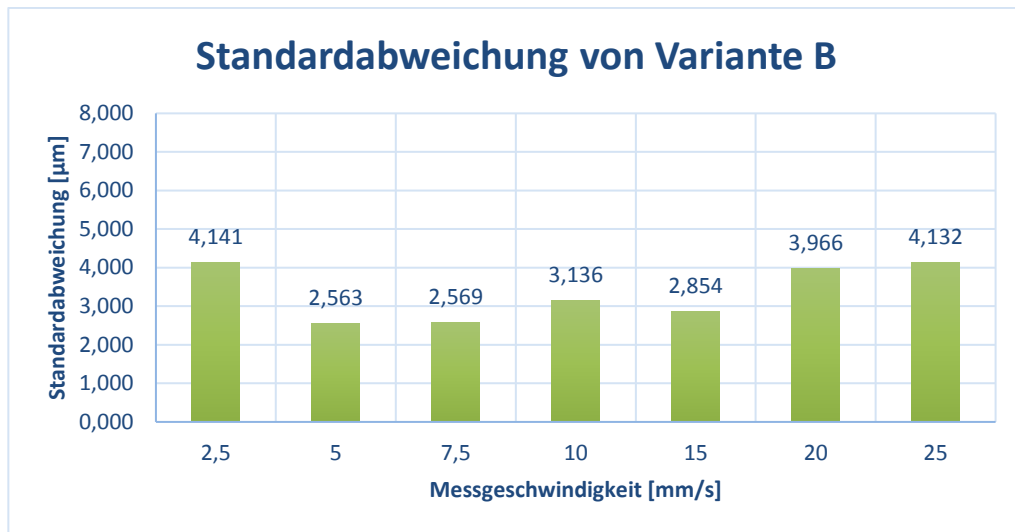


Abbildung 37: Präzision der Variante B

Die Richtigkeit bewegt sich in einem ähnlichen Spektrum wie bei den anderen Sensoren. Jedoch ist hier, wie bei Variante A, bei einer Messreihe ein sehr hoher Ausschlag gemessen worden. Dieses Mal jedoch bei 20mm/s. Diese Ausschläge lassen sich am ehesten auf Verschmutzungen an der Druckbettoberfläche oder an der Düse zurückführen. Im Gegensatz zum Induktionssensor erfolgt die Messung mittels Piezosensor nicht berührungslos, womit Verfälschungen durch Partikel möglich sind und verhindert werden müssen.

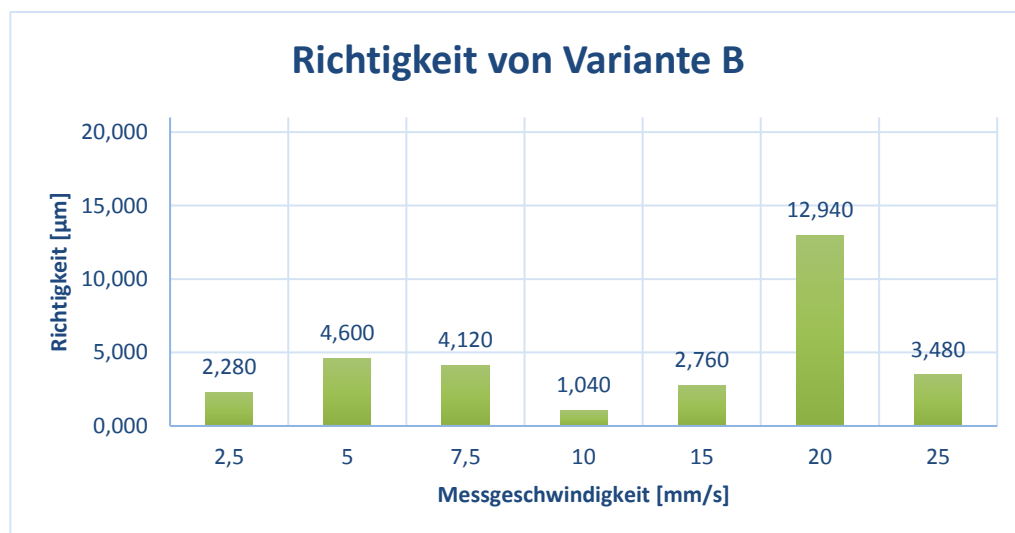


Abbildung 38: Richtigkeit der Variante B

6.3.4 Gegenüberstellung der Sensoren

Abbildung 39 und Abbildung 40 stellen die besprochenen Ergebnisse zur Veranschaulichung gegenüber. Für den Verlauf der Standardabweichungen zeigt sich für den Induktionssensor und Variante B ein Minimum bei 7,5mm/s. Bei Variante A liegt das Minimum bei 5mm/s, jedoch ist der Unterschied zu den Ergebnissen von 7,5mm/s vernachlässigbar klein. Es folgt daraus,

dass die höchste Präzision der Z-Probe bei dem 3D-Drucker V2 der Pilotfabrik bei einer Messgeschwindigkeit von 7,5mm/s erreicht wird. Die Messreihen aller Sensoren deuten darauf hin, dass langsamere Geschwindigkeit zur Präzision positiv beitragen, diese ab einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit jedoch wieder abnimmt. Wird diese Grenzgeschwindigkeit überschritten, überwiegen Reibung und Vibrationen im System, die die Vorteile der langsameren Geschwindigkeit zu Nichte machen. Es zeigt sich ebenfalls, dass die verschiedenen Sensortechnologien keine unterschiedlichen Eigenschaften bei verschiedenen Geschwindigkeiten zeigen und allein die mechanische Beschaffenheit des Druckers durch unterschiedliche Vibrationen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten die Präzision der Systeme beeinflusst.

Die Standardabweichung von Variante A und Variante B bewegt sich in relativ ähnlichen Bereichen, vor allem rund um die optimale Messgeschwindigkeit. Der Vergleich zum Induktionssensor stellt ein erstes Indiz auf die höhere Präzision der Piezosensortechnologie dar, die in den weiteren Messungen beobachtet werden soll.

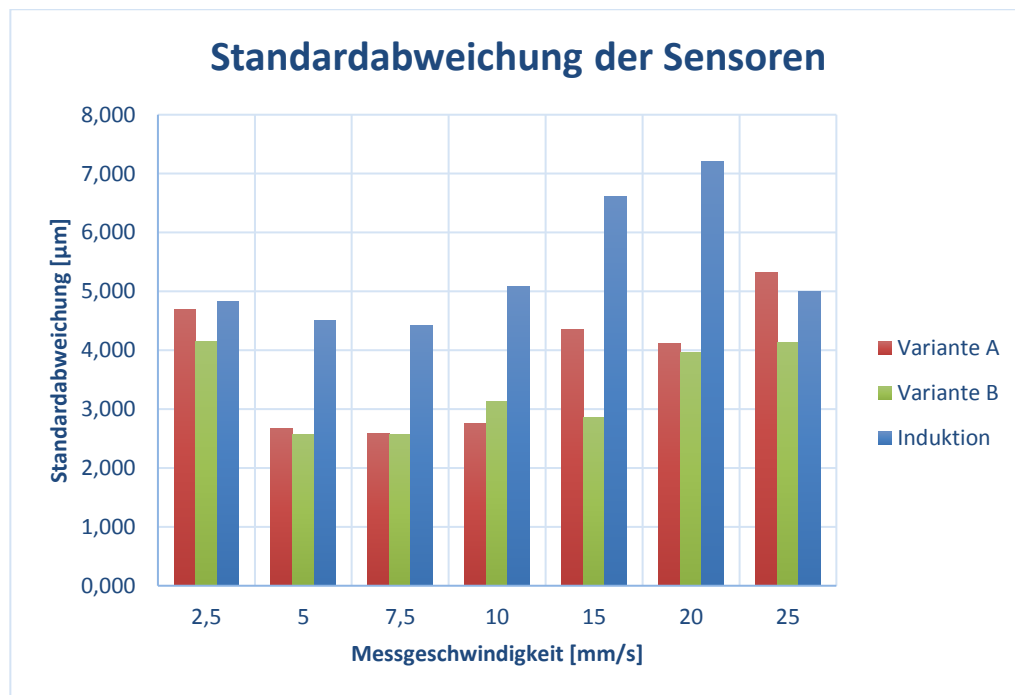


Abbildung 39: Gegenüberstellung der Präzision

Die Betrachtung der Richtigkeit liefert keine eindeutige Aussage zur Korrelation von Richtigkeit und Messgeschwindigkeit. Dies lässt sich zum Teil dadurch erklären, dass vor jeder Messung gehomed wird. Die Setzung des Nullpunktes durch das Homing wird mit dem zu testenden Sensor selbst durchgeführt, womit der absolute Nullpunkt mit der Präzision des Sensors zusammenhängt und innerhalb der Streubreite des Sensors schwankt. Im Allgemeinen und vor allem bei einer Geschwindigkeit von 7,5mm/s liegt die Abweichung der Richtigkeit für alle drei Sensoren unter 5 μm . Es ist also davon auszugehen, dass die systematische Abweichung vernachlässigbar klein ist und in weiterer Folge nicht betrachtet wird.

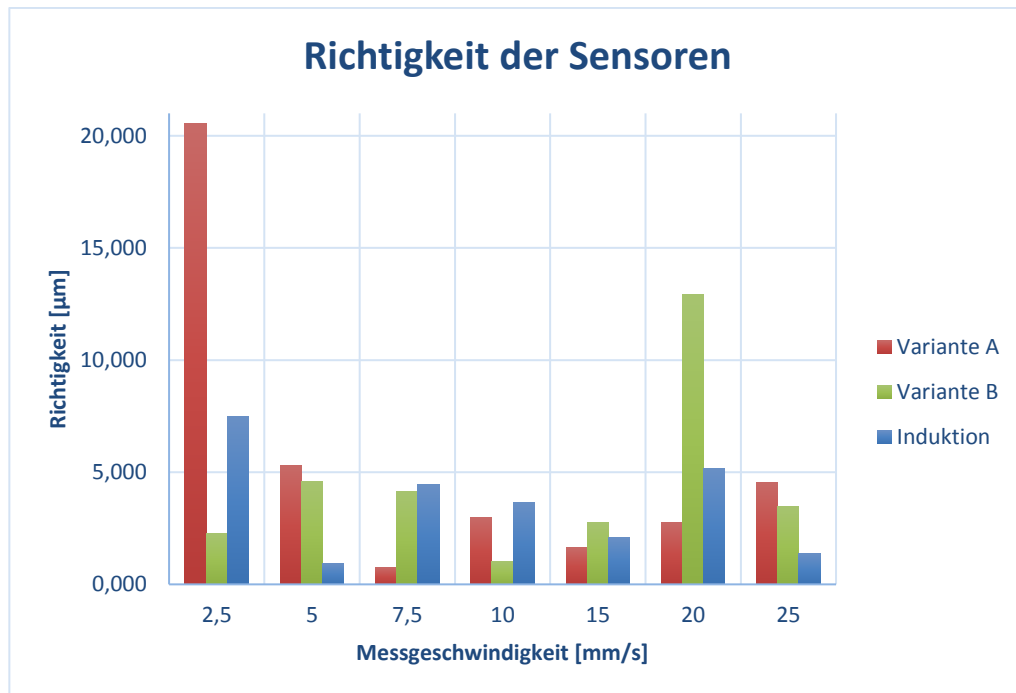


Abbildung 40: Gegenüberstellung der Richtigkeit

7 Messergebnisse zur Präzision

Alle nachfolgenden Messreihen werden mit der zuvor ermittelten optimalen Messgeschwindigkeit von 7,5mm/s durchgeführt. Mit dieser Geschwindigkeit wird vor jeder Messreihe das System gehomed und anschließend die Messungen gestartet. Es folgen die Beschreibung der Einzelergebnisse der Sensoren, ein Vergleich aller drei, sowie die Interpretation der Ergebnisse und dessen Bedeutung für die praktische Verwendung im Betrieb des 3D-Druckers. Es werden für alle drei Sensoren, die folgenden drei Messvorgänge durchgeführt:

- 1) Drei individuelle Messreihen mit jeweils 50 Stichproben an derselben Position zur Überprüfung der Robustheit des Systems zur Ermittlung von Messdaten.
- 2) Fünf individuelle Messreihen an fünf definierten Messpunkten des Druckbettes bei Umgebungstemperatur, um eine Ausmessung der Druckbetttopologie zu simulieren.
- 3) Fünf individuelle Messungen an denselben fünf definierten Messpunkten aus Punkt 2) bei Betriebstemperatur, um mögliche Präzisionsänderungen bei höheren Temperaturen aufzunehmen.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die kommenden Messungen. Die angeführten Angaben sind pro Sensor zu verstehen.

Nr.	Anzahl	Anzahl	Gesamtanzahl
Messvorgang	Messreihen	Stichproben / Messreihe	Stichproben
1)	3	50	150
2)	5	50	250
3)	5	50	250

Tabelle 5: Messvorgänge pro getesteten Sensor

7.1 Robustheit des Systems

Nachdem ein 3D-Drucker kein Präzisionsmessgerät darstellt, wird nach der Ermittlung der Messgeschwindigkeit ein kleiner Test durchgeführt, um zu überprüfen ob Genauigkeitsmessungen direkt an dem 3D-Drucker möglich und vor allem aussagekräftig sind. Dafür werden für jeden Sensor drei weitere Messungen mit jeweils 50 Stichproben durchgeführt. Vor jeder Messung wird der Drucker gehomed.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt und es lässt sich erkennen, dass die Messreihen direkt am 3D-Drucker ausreichende Aussagekraft besitzen. Die Werte bewegen sich in einem angebrachten Bereich und liefern somit über mehrere Messungen hinweg konsistente Genauigkeitsaussagen, die in derselben Form während des Druckbetriebes zu erwarten sind. Anhand der durchschnittlichen Standardabweichung der drei Systeme lässt sich ein erster Eindruck über die Präzision der Systeme gewinnen. Messung 0 stellt die aufgenommene Messreihe aus Kapitel 6.3 bei einer Messgeschwindigkeit von 7,5 mm/s dar.

Variante A und B erzielen, wie in den ersten Messreihen sehr ähnliche Ergebnisse, während die Standardabweichung des Induktionssensors um mehr als 30 % höher liegt.

Sensortyp	Messung 0	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Durchschnittl.
	Std. Abw. in μm	Std. Abw. in μm	Std. Abw. in μm	Std. Abw. in μm	Std. Abw. in μm
Induktions-sensor	4,418	4,752	3,888	3,569	4,157
Variante A	2,584	2,801	2,434	2,759	2,645
Variante B	2,569	2,546	3,642	2,748	2,876

Tabelle 6: Vergleich der Standardabweichungen

Die Präzision der Sensoren ist besonders wichtig für die korrekte Ausmessung des Druckbettes, die konsistente Nullpunktsetzung der z-Koordinatenachse und dadurch folgend der Düsenhöhe. Als Faustregel lässt sich ein Qualitätsunterschied in der ersten Schicht bei einer Abweichung der Düsenhöhe von etwa 15 % der gewünschten Schichtdicke bemerken. Im 3D-Druck hat sich ein gewisser Standard durchgesetzt, der als Benchmark verwendet werden soll.

- Filamentdurchmesser: 1,75 mm
- Düsendurchmesser: 0,4 mm
- Schichtdicke (SD) des aufgetragenen Filaments: 0,2 mm

Bei diesen Parametern berechnet sich die maximal tolerierte Düsenhöhenabweichung wie folgt:

$$\text{max. tol. Abw.} = 0,15 * SD$$

$$\text{max. tol. Abw.} = 0,15 * 0,2\text{mm} = 0,03\text{mm} = 30\mu\text{m}$$

Um eine optimale Schichtqualität zu erhalten muss die eingestellte Düsenhöhe der gewünschten Schichtdicke exakt entsprechen. Somit ergibt sich bei den gewählten Parametern eine maximal tolerierbare Abweichung von 30 μm .

In der Folge soll die Streubreite der Messergebnisse als Vergleich zur maximal tolerierbaren Abweichung herangezogen werden. Die Grundlagen zur Ermittlung der Streubreite sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Aufgrund der Wichtigkeit der Präzision der Z-Probe wird eine sehr hoch gewählte Wahrscheinlichkeit von 99 %, dass ein Messwert im angenommenen Intervall liegt definiert. Folglich ergibt sich die Streubreite anhand der Standardabweichung s . Die Streubreite ist $5,16*s$. Tabelle 7 zeigt nun, dass alle drei Sensortypen ausreichend genaue Ergebnisse liefern und die Streubreiten unterhalb der maximal tolerierbaren Abweichung bleiben. Es lässt wiederum ein Präzisionsunterschied zwischen der induktiven Sensortechnologie und der Verwendung von piezoelektrischen Wandlern messen.

Sensortyp	Messung 0	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Max. tol. Abw. in μm
	Streuung in μm (99 %)	Streuung in μm (99 %)	Streuung in μm (99 %)	Streuung in μm (99 %)	
Induktions-sensor	22,796	24,518	20,064	18,415	30
Variante A	13,332	14,451	12,560	14,239	30
Variante B	13,254	13,135	18,794	14,178	30

Tabelle 7: Vergleich der Streubreiten mit der maximal tolerierbaren Abweichung

7.2 Messungen bei Umgebungstemperatur

Nach Ermittlung der Messgeschwindigkeit und der Verifizierung des Messsystems erfolgen Messungen, die einerseits den Messvorgang zur automatischen Bettnivellierung simulieren sollen und andererseits die Veränderung der Präzision der Sensorsysteme bei Umgebungs- und Betriebstemperatur widerspiegeln.

Abbildung 41 visualisiert die fünf ausgewählten Messpunkte und in Tabelle 8 sind die passenden Koordinaten angegeben. Die Punkte liegen dabei soweit wie möglich an den Ecken des Druckbettes. Messpunkt 5 dient als Referenzwert zu den Messungen aus dem vorherigen Kapitel. Wie bereits besprochen, ergibt sich bei der Nutzung eines Induktionssensor das Problem, dass nicht alle Ecken gleich gut erreichbar sind. Während die Abmaße des druckbaren Bereichs in y-Richtung 168 mm betragen und Messpunkt 1 (MP1) bei $y=10\text{ mm}$ gesetzt ist, lässt sich auf der anderen Seite nur ein Messpunkt bei $y=125\text{ mm}$ testen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden diese Punkte für alle drei Sensorsysteme beibehalten.



Abbildung 41: Position der Messpunkte

X/Y	10mm	84mm	125mm	168mm
20mm	MP1		MP2	
92mm		MP5		
185mm	MP4		MP3	

Tabelle 8: Koordinaten der Messpunkte

Die Messreihen werden bei einer, durch die verbauten Thermistoren gemessenen Umgebungstemperatur von 23°C am Hot End und 24°C am Druckbett sequenziell durchgeführt. An jedem Messpunkt werden 50 Stichproben und somit insgesamt 250 Distanzmessungen pro Sensor durchgeführt.

Tabelle 9 zeigt die ermittelten Standardabweichungen der Sensorsysteme für jeden Messpunkt und es lassen sich drei Schlüsse aus den Daten ziehen, die anschließend mit den Ergebnissen bei Betriebstemperatur verglichen werden sollen:

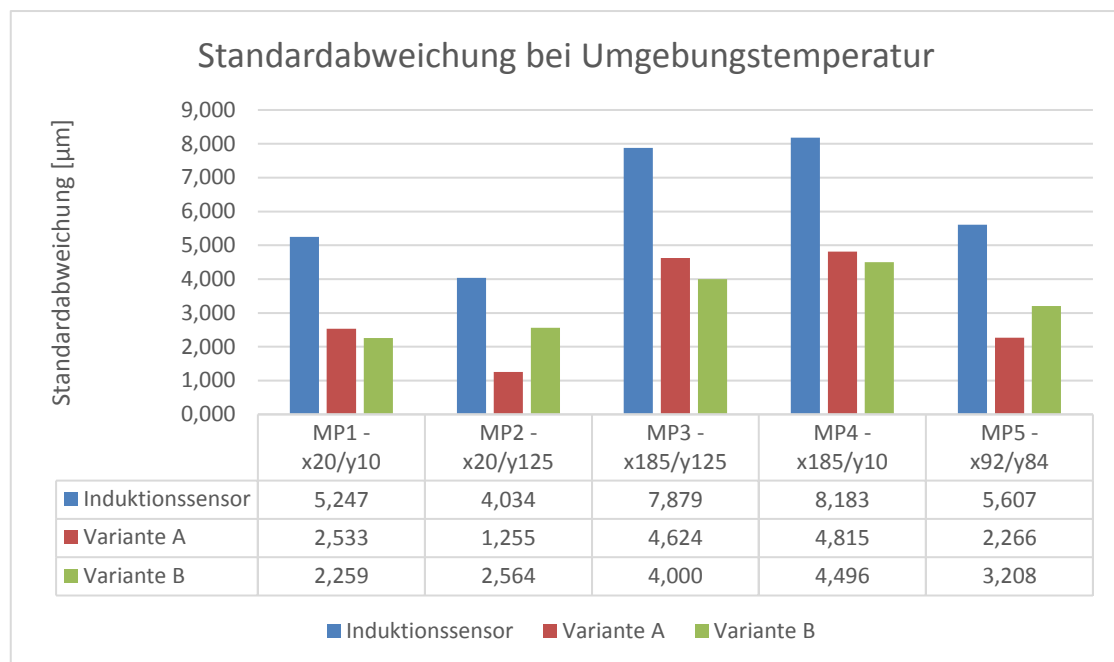


Tabelle 9: Vergleich der Standardabweichung der Systeme bei Umgebungstemperatur

1) Diese Messungen bestätigen die vorherigen Ergebnisse. Es existiert ein messbarer Präzisionsunterschied zwischen dem Induktions- und dem Piezosensor. Dieser Präzisionsunterschied ist an allen Messpunkten vorhanden und die Standardabweichung ist um 36 %-69 % höher als die der Piezosensoren. Im Durchschnitt ist die Standardabweichung des Induktionssensors um 53 % höher, als die von Variante A und 46 % höher, als die von Variante B.

2) Der Verlauf der Standardabweichungen über die fünf Messpunkte verhält sich für alle Sensorsysteme ähnlich. Dies lässt den Schluss zu, dass die Präzision der Z-Probe abhängig von der Position der Extruderplattform bei der Messung ist. Der Grund dafür kann in der Ausbreitung von Vibrationen im mechanischen System des 3D-Druckers liegen, wenn das Druckbett während der Messung nach oben bewegt wird. Das Druckbett ist freitragend aufgebaut, womit sich rasch erkennen lässt, weshalb die Messpunkte 3 und 4 schlechter abschneiden als die anderen. Es existiert nur auf einer Seite eine Aufnahme des Druckbettes, die sich an der Seite des Ursprungs der x-Achse des 3D-Druckers befindet. Die Steifigkeit der Druckbetaufnahme ist nicht ausreichend, um Vibrationen und Bewegungen gänzlich zu verhindern. Dies führt dazu, dass die Präzision am Ende des Druckbettes messbar beeinträchtigt wird.

3) Tabelle 10 gibt die Streubreite der Messergebnisse an den Messpunkten bei einer gewählten Wahrscheinlichkeit von 99 %, dass ein Messwert im angenommenen Intervall liegt, an. Die maximal tolerierte Abweichung wurde mit 30 µm definiert. Es zeigt sich deutlich, dass die Piezosensoren an allen Messpunkten akzeptable Präzision liefern. Der Induktionssensor überschreitet diesen Grenzwert an den Positionen MP3 und MP4. In der Praxis bedeutet dies, dass eine automatische Bettnivellierung beeinträchtigt wird. Die Messergebnisse am Rande des Druckbettes können während der Ausmessung der Druckbetttopologie außerhalb des tolerierten Grenzwerts liegen. Unebenheiten und Neigungen des Bettes können somit nicht zuverlässig ausgeglichen werden. Die gesammelte Erfahrung in der Druckpraxis mit dem 3D-Drucker V2 der Pilotfabrik 4.0 bestätigt dieses Verhalten. Nun lassen sich unzureichende Ergebnisse bei aktivierter Nivellierung auf die Ungenauigkeit des Induktionssensors zurückführen.

Sensortyp	MP1 Streubreite in µm (99 %)	MP 2 Streubreite in µm (99 %)	MP 3 Streubreite in µm (99 %)	MP4 Streubreite in (99 %)	MP5 Streubreite in (99 %)
Induktions- sensor	27,076	20,815	40,654	42,222	28,933
Variante A	13,069	6,473	23,861	24,845	11,691
Variante B	11,656	13,231	20,640	23,197	16,554

Tabelle 10: Streubreite der Sensoren an allen fünf Messpunkten

Für eine endgültige Aussage über die Präzision der beiden Sensortechnologien muss jedoch noch der nächste Messvorgang in Betracht gezogen werden. Um Längenausdehnungen in der Düse und dem Druckbett zu berücksichtigen sollte in der Praxis das Homing, sowie die Ausmessung des Druckbettes für die automatische Druckbettnivellierung immer erst bei einem aufgeheizten System erfolgen.

7.3 Messungen bei Betriebstemperatur

7.3.1 Temperatureausdehnung bei Aufheizung des Systems

Bevor auf die Ergebnisse der Messungen bei Betriebstemperatur eingegangen wird, soll eine kurze Berechnung zeigen, weshalb die Messungen der Sensoren bei aufgeheiztem System auszuführen sind.

Grundsätzlich ließe sich ja argumentieren, dass das Homing und die Ausmessung des Druckbettes bei Umgebungstemperatur durchführbar und somit Ungenauigkeiten bei temperaturabhängigen Sensoren vermeidbar sind. Unter diesem Gesichtspunkt wäre die temperaturabhängige Präzision von Z-Probes irrelevant. Der Temperaturunterschied von Umgebungs- zu Betriebstemperatur des Druckbettes liegt bei ca. 35 °C und beim Heizblock mit der integrierten Düse bei ca. 185 °C. Diese Temperaturunterschiede führen zu Längenänderungen in den Materialien und lassen sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$\Delta l = l_0 * \alpha * (T_1 - T_0)$$

Für die relevanten Bauteile Druckbett, Heizblock und Düse werden die verwendeten Variablen in Tabelle 11 dargestellt. Während Heizblock und Druckbett aus Aluminium bestehen, ist die Düse aus Messing. Die entsprechenden Wärmeausdehnungskoeffizienten sind ebenfalls in Tabelle 11 vermerkt.

Bauteil	l_0	α	T_1	T_0
Druckbett (Db)	3,2 mm	$23 * 10^{-6} K^{-1}$	333,15 K	297,15 K
Heizblock (Hb)	11,5 mm	$23 * 10^{-6} K^{-1}$	483,15 K	297,15 K
Düse (D)	12,5 mm	$18,4 * 10^{-6} K^{-1}$	483,15 K	296,15 K

Tabelle 11: Parameter der Wärmeausdehnung

$$\Delta l_{Db} = l_{0Db} * \alpha_{Db} * (T_{1Db} - T_{0Db}) = 3,2mm * 23 * 10^{-6} K^{-1} * (333,15K - 297,15K) = 0,003mm$$

$$\Delta l_{Hb} = l_{0Hb} * \alpha_{Hb} * (T_{1Hb} - T_{0Hb}) = 11,5mm * 23 * 10^{-6} K^{-1} * (483,15K - 297,15K) = 0,049mm$$

$$\Delta l_D = l_{0D} * \alpha_D * (T_{1D} - T_{0D}) = 12,5mm * 18,4 * 10^{-6} K^{-1} * (483,15K - 296,15K) = 0,0043mm$$

Es zeigt sich, dass das Druckbett einen vernachlässigbaren Einfluss hat, während die Längenänderungen von Heizblock und die Düse zu berücksichtigen sind.

$$\Delta l_{ges} = \Delta l_{Db} + \Delta l_{Hb} + \Delta l_D$$

$$\Delta l_{ges} = 0,003mm + 0,049mm + 0,0043mm = 0,095mm = 95\mu m$$

In der Summe ändert sich die Länge der betrachteten Bauteile in z-Richtung um 95 μm , was fast die Hälfte einer Schichtdicke entspricht. Daraus ergibt sich, dass das Homing und die Ausmessung des Druckbettes zumindest bei aufgeheiztem Extruder vorgenommen werden muss, da sich ansonsten deutliche Qualitätsunterschiede beim Druck bemerkbar machen. Die Düsenhöhe wäre um fast 50 % falsch eingestellt. Daraus ergibt sich, dass die folgende Messung die höchste Priorität in der Genauigkeitsbetrachtung der Sensoren darstellt. Sie stellt eine gute Näherung der Präzision der Sensoren im praktischen Betrieb des 3D-Druckers dar und es lässt sich folglich von den gemessenen Werten auf die Auswirkungen in der Praxis schließen.

7.3.2 Messergebnisse

Es werden dieselben Messreihen, wie in Kapitel 0 durchgeführt. Für alle drei Systeme werden an fünf Messpunkten jeweils 50 Stichproben durchgeführt und somit insgesamt 250 Messungen pro Sensor vollzogen. Der Unterschied liegt nun in der Temperatur der Bauteile. Um realistische Bedingungen zu schaffen wird der Heizblock und damit auch die Düse auf 210 °C erhitzt, eine typische Drucktemperatur von PLA. Das Druckbett wird auf 60 °C erwärmt. Diese Temperaturen werden gehalten und alle Messreihen damit vollzogen. Vor jeder Messung wird das System ebenfalls bei dieser Temperatur gehomed. Tabelle 12 visualisiert die ermittelte Standardabweichung anhand der Messdaten für alle drei Sensorsysteme, wobei sich im Vergleich zu Tabelle

9: Vergleich der Standardabweichung der Systeme bei Umgebungstemperatur folgende Schlüsse ziehen lassen:

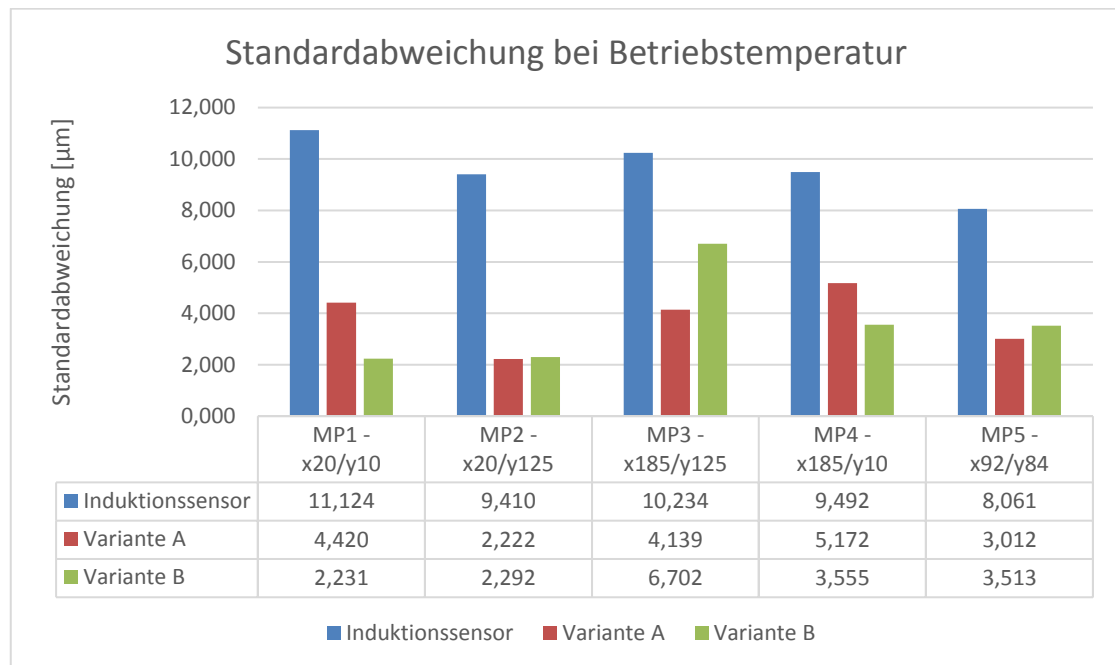


Tabelle 12: Vergleich der Standardabweichung der Systeme bei Betriebstemperatur

1) Diese Messungen bei Betriebstemperatur decken sich mit allen anderen bereits erhobenen Daten zur Genauigkeit. Es existiert ein messbarer Präzisionsunterschied zwischen dem Induktions- und dem Piezosensor, auch bei Betriebstemperatur. Dieser Präzisionsunterschied ist an allen Messpunkten vorhanden und die Standardabweichung ist um 35 %-80 % höher als die der Piezosensoren. Im Durchschnitt ist die Standardabweichung um 61 % höher, als die von Variante A und um 62 % höher, als die von Variante B. Die Ergebnisse von Variante A und B bewegen sich wiederum in einem sehr ähnlichem Präzisionsbereich.

2) Ein interessantes Ergebnis liefert der Verlauf der Standardabweichungen über die Messpunkte. Während die Präzision an den Messpunkten 3 und 4 für die Piezosensoren sich aufgrund von Vibrationen im Druckbett wieder verschlechtert, ist für den Induktionssensor kein Unterschied messbar. Der Grund dafür hat sich innerhalb dieser Arbeit nicht erschlossen.

3) Zur Veranschaulichung der Standardabweichungsänderungen bei Umgebungs- bzw. Betriebstemperatur sind die Ergebnisse an Messpunkt 5 herausgegriffen und in Tabelle 13 dargestellt. Die Differenzen verhalten sich an den anderen Punkten ähnlich. Es zeigt sich, dass alle drei Sensortypen eine verringerte Präzision bei Betriebstemperatur aufweisen. Jedoch ist der Unterschied zwischen Umgebungstemperatur (UT) und Betriebstemperatur (BT) beim Induktionssensor am stärksten ausgeprägt.

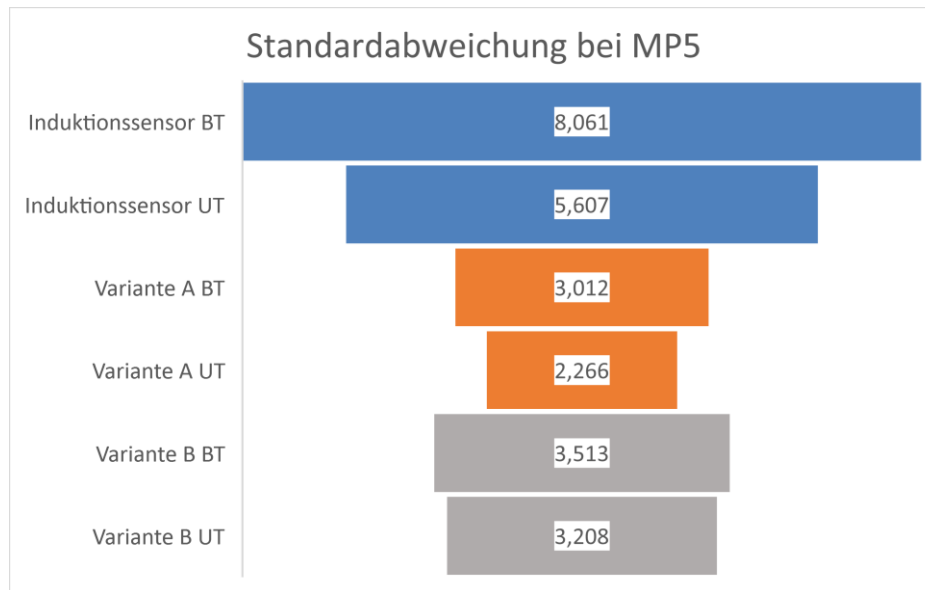


Tabelle 13: Visualisierung der Standardabweichungen bei Umgebungs- bzw. Betriebstemperatur an Messpunkt 5

4) Tabelle 14 fasst die Streubreite der Messergebnisse an allen Messpunkten bei einer gewählten Wahrscheinlichkeit von 99 %, dass ein Messwert im angenommenen Intervall liegt zusammen. Diese Messungen belegen, dass der Induktionssensor bei Betriebstemperatur, deutlich schlechter abschneidet, als die Piezosensorsysteme. Variante A überschreitet die maximal tolerierte Abweichung von 30 μm gar nicht und Variante B nur an MP3. Der Induktionssensor überschreitet diese Abweichung an allen Messpunkten relativ deutlich.

Sensortyp	MP1	MP 2	MP 3	MP4	MP5
	Streubreite in μm	Streubreite in μm	Streubreite in μm	Streubreite in	Streubreite in
	(99 %)	(99 %)	(99 %)	(99 %)	(99 %)
Induktions-sensor	57,398	48,558	52,810	48,981	41,597
Variante A	22,807	11,467	21,357	26,687	15,541
Variante B	11,513	11,826	34,581	18,344	18,130

Tabelle 14: Streubreite der Sensoren an allen fünf Messpunkten

8 Praktische Validierung der Messergebnisse durch Testdrucke

Die Ergebnisse aus den Kapiteln 6.3 und 7 zeigen, dass beide implementierten Piezosensorvarianten als Z-Probes eine höhere Präzision und geringe Temperaturabhängigkeit aufweisen, als der aktuell verbaute Induktionssensor. Die genaue Interpretation der Ergebnisse soll im folgenden Kapitel beleuchtet werden. Um die theoretischen Ergebnisse mit praktischen Versuchen zu validieren, werden vier Testdrucke vollzogen. Es werden zwei mit eingebauten Induktionssensor und zwei mit eingebauten Piezosensor Variante B durchgeführt. Auf Variante A wird in weiterer Folge verzichtet, da die Ergebnisse der Präzision für beide Piezovariante kaum Unterschiede zeigen. Die Einstellung der Vorspannung ist jedoch bei Variante B deutlich einfacher gelöst und wird somit als Piezosensorsystem präferiert.

8.1 Benchmarks zur Druckqualität

Bevor auf die Testdrucke und dessen Ergebnisse eingegangen wird, sollen einige Beispiele präsentiert werden, die deutlich machen, wie sich die Düsenhöhe auf die optisch ersichtliche Druckqualität, vor allem der ersten Schicht, auswirken. In Abbildung 42 ist schematisch dargestellt, wie sich die Düsenhöhe auf die Aufbringung des Kunststoffes auf das Druckbett auswirkt. Die Düsenhöhe sollte dabei der eingestellten Schichtdicke exakt entsprechen. Ist die Düsenhöhe zu niedrig ergeben sich Ergebnisse, wie auf der linken Seite zu sehen. Ist die Düsenhöhe zu hoch ergeben sich Ergebnisse, wie auf der rechten Seite zu sehen.

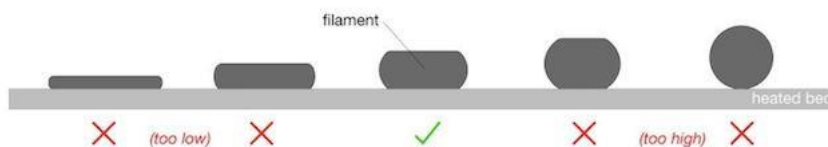


Abbildung 42: Auswirkung der Düsenhöhe auf die Aufbringung der Schicht [36].

Abbildung 43 und Abbildung 44 veranschaulichen die praktischen Ergebnisse bei einer falsch eingestellten Düsenhöhe. Zur Klarstellung sei hier erwähnt, dass eine falsche Düsenhöhe immer auf die gewünschte Schichtdicke bezogen wird. Qualitätsunterschiede ergeben sich aus einer Abweichung der realen Düsenhöhe bezogen auf die gewünschte Schichtdicke. Auf den Abbildungen lässt sich erkennen, dass bei einer richtigen Kalibrierung die einzelnen, gezogenen Stränge, die nebeneinander aufgetragen werden zu einer relativ homogenen Fläche verschmelzen. Ist die Düsenhöhe zu hoch und damit die Düsen spitze zu weit von der Druckoberfläche positioniert, ist der Querschnitt in x,-y-Richtung der aufgetragenen Linien, siehe Abbildung 42 rechts, zu klein und die einzelnen nebeneinander liegenden Stränge können nicht miteinander verschmelzen. Sie bleiben getrennt und es kommt nicht zu der gewünschten homogenen Fläche. Ist hingegen die Düsenhöhe zu niedrig, also die Düsen spitze zu nah am Bett, dann kommt es zu einer sehr rauen Oberfläche des gedruckten Teils bis hin zu einer Blockierung der Düse und/oder einer Beschädigung der Druckoberfläche. Die dargestellten Beispiele stellen Extrembeispiele dar, bei denen es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem

fehlgeschlagenen Druck kommt. Jedoch machen sich bereits deutlich kleinere Düsenhöhenabweichung in der Qualität optisch bemerkbar.

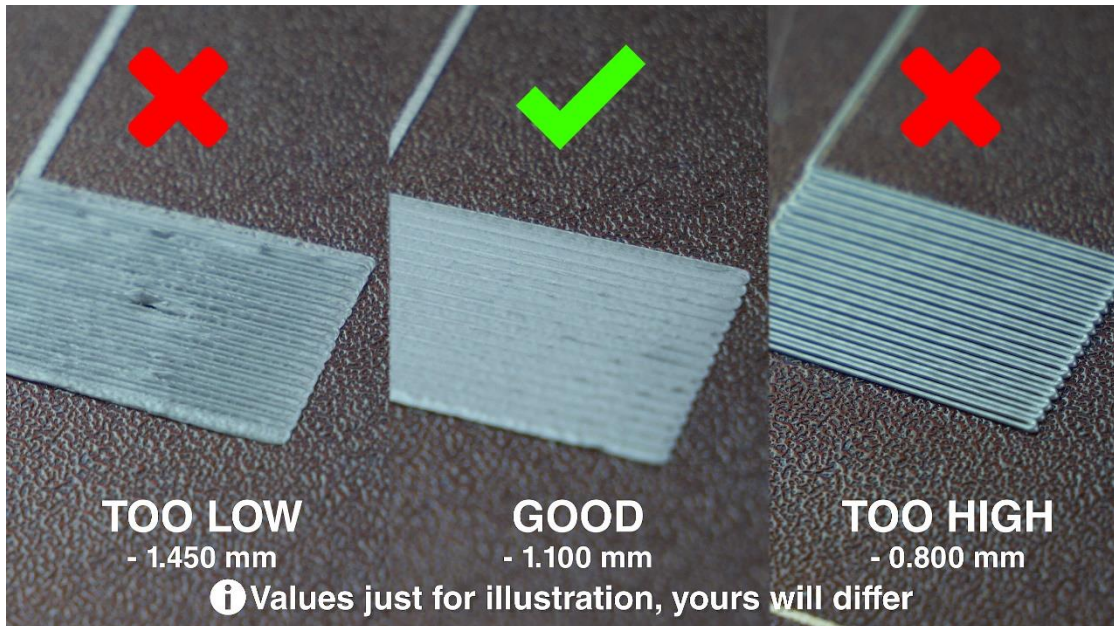


Abbildung 43: Praktische Unterschiede bei unterschiedlicher Düsenhöhe [36].



Abbildung 44: Weiteres Praxisbeispiel bei unterschiedlicher Düsenhöhe [37].

8.2 Testdrucke 1&2 ohne automatische Bettnivellierung

Grundsätzlich gilt es die Qualität der ersten Schicht zu überprüfen, da sich Abweichungen in der Düsenhöhe am deutlichsten zeigen. Dafür wird 85 % der Druckoberfläche mit einer Schicht PLA bedruckt, wodurch sich die Qualität optisch und haptisch überprüfen lässt. Die

Druckparameter werden für beide Systeme identisch gewählt und die automatische Druckbett-nivellierung wird anfangs deaktiviert. Die einzigen Unterschiede in der Druckqualität erfolgen in diesen Tests also in der Präzision während des Homings und der dadurch eingestellten Düsenhöhe:

- Die Düsenhöhe für den Induktionssensor muss zusätzlich zum Homing manuell über die Einstellung eines Offsets in der Firmware kalibriert werden. Diese Kalibrierung wird bestmöglich vorgenommen, um optimale Druckergebnisse zu erzielen.
- Für den Piezosensor wurde anfänglich vermutet, dass ein negativer Offset nötig sei, da Erfahrungsberichte diesbezüglich bekannt waren. Die Düsenhöhe könnte ohne Offset zu klein sein, da die Auslösung des Sensors erst nach Stauchung der Druckoberfläche oder kleiner Verbiegung des Druckbettes passiert. Nachdem die Messergebnisse eine sehr hohe Präzision des Piezosensorsystems belegen und die Auslösung bei minimaler Berührung von staten geht, wird für die ersten Tests auf eine manuelle Verschiebung des Nullpunktes verzichtet. Folglich ergibt sich die Düsenhöhe rein über das Homing und den dadurch gesetzten Nullpunkt der z-Achse.
- Filamentmaterial: PLA
- Filamentquerschnitt: 1,75 mm
- Schichtdicke: 0,2 mm
- Druckgeschwindigkeit: 35 mm/s
- Hot End-Temperatur: 210 °C
- Druckbetttemperatur 60 °C

Abbildung 45 zeigt den Vergleich der Testdrucke. Die rein optische Betrachtung über Fotos übermittelt das Ergebnis nicht ausreichend gut, es ist jedoch zu sehen, dass die Oberfläche relativ unregelmäßig ist. Dies resultiert daraus, dass die Düsenhöhe über die Druckoberfläche nicht konstant bleibt, ausgehend aus Unebenheiten im Druckbett bzw. Neigungen im Vergleich zur Extruderplattformebene. Es zeigt sich für den Testdruck mittels Induktionssensor in der unteren rechten Ecke ein ähnliches Bild, wie auf der rechten Seite von Abbildung 44. An dieser Stelle ist die Düse bereits zu weit von der Druckoberfläche entfernt. Um diese Unregelmäßigkeiten in der Düsenhöhe auszugleichen, erfolgen die nächsten Testdrucke nach Ausmessung des Druckbetttopologie und der mit diesen Daten aktivierten automatischen Bett-nivellierung.

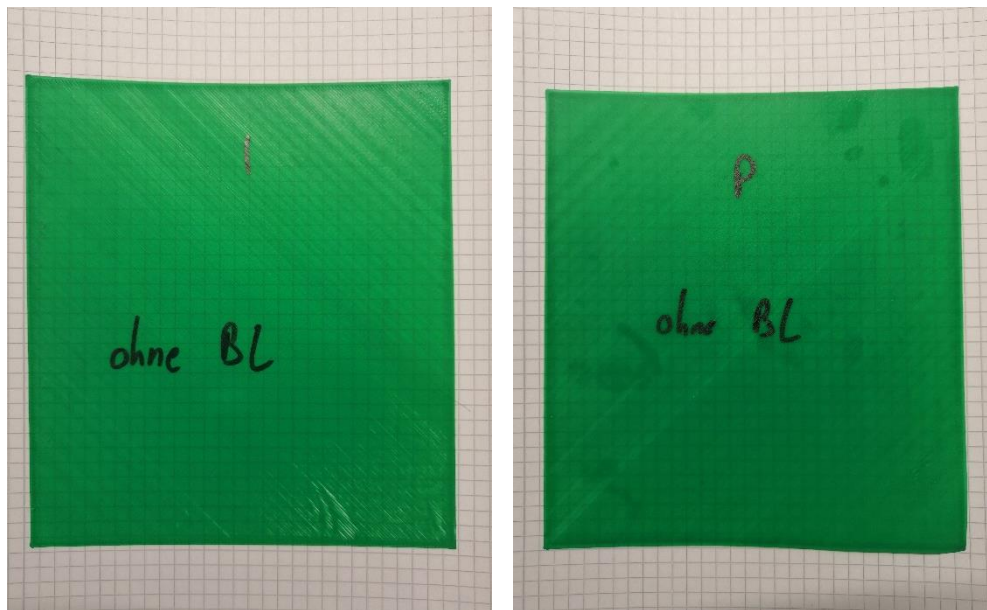


Abbildung 45: Testdrucke ohne Bettnivellierung - links Induktion, rechts Piezo

8.3 Testdrucke 3&4 mit automatischer Bettnivellierung

Für die Testdrucke 3&4 wird nun die automatische Bettnivellierung aktiviert. Es werden 25 Messpunkte bei Betriebstemperatur abgefahren und mit den Sensoren die Distanz der Düsen- spitze zur Druckoberfläche gemessen. An jedem Messpunkt erfolgen drei Messungen, woraus ein Mittelwert für die Distanz ermittelt wird. Dieser Messvorgang ist in die Repetier-Firmware integriert und erfolgt vollautomatisch. Lediglich die gewünschten Messpunkte werden manuell gesetzt. Grundsätzlich erfolgt diese Ausmessung für beide Sensorarten gleich, jedoch sind die Messpunkte nicht identisch gewählt, um die Praxis zu simulieren. Während der Induktionssensor, durch den x-y-Offset zur Düse nicht die Gesamtheit des Druckbettes vermessen kann, existiert so eine Einschränkung für den Piezosensor nicht.

In Abbildung 46 sind die Ergebnisse der Testdrucke 3&4 mit aktivierter automatischer Bettnivellierung zu sehen, die Qualitätsunterschiede ergeben sich nun aus der eingestellten Düsen- höhe und der Effektivität der Druckbettnivellierung.

Die Haptik unterscheidet sich für beide Sensorarten kaum zu den ersten Testdrucken und ist sehr zufriedenstellend. Für den Induktionssensor hat sich ein interessantes Ergebnis ergeben. Während die obere rechte Ecke, bis ca. zur Hälfte des Druckes signifikant bessere Oberflächenqualität zeigt, verschlechtert sich das Ergebnis danach deutlich. Auf dem Bild nur zu erah- nen, verschmelzen einige Nachbarstränge nicht miteinander und es entsteht keine homogene Fläche, es bleiben kleine Spalte ohne Material zurück. Dieses Ergebnis lässt sich auf die feh- lende Präzision des Induktionssensor zurückführen. Durch unpräzise Messungen während der Ausmessung des Druckbettes bei Betriebstemperatur kann der Ausgleich nicht exakt genau durchgeführt werden.

Auf der rechten Seite ist der Testdruck für den Piezosensor zu sehen. Die Druckqualität ist über die gesamte Fläche annähernd gleichbleibend, was für eine sehr präzise Ausmessung der Druckbetttopologie spricht. In Anbetracht der Ergebnisse aus Abbildung 45 war ein sichtbarer Bedarf zur Bettnivellierung da, und durch Ausmessung mit Hilfe des Piezosensors konnten die dafür nötigen Daten entsprechend präzise aufgenommen werden. Vielversprechend ist auch die Haptik des Testdruckes. Im Gegensatz zum Induktionssensor, ist für den Piezosensor kein manueller Offset für den Nullpunkt der z-Achse erfolgt. Der Nullpunkt wird einzig und allein durch das Homing gesetzt und die praktischen Tests beweisen, dass dadurch die Düsenhöhe präzise genug gesetzt werden kann ohne weitere Justierungen vernehmen zu müssen. Dies bedeutet, dass der für den Induktionssensor nötige Kalibrierungsschritt komplett entfällt. Diese Eigenschaft des Piezosensors führt damit zu deutlich konsistenteren Druckergebnissen und macht es vor allem unerfahrenen Nutzern deutlich einfacher gute Ergebnisse zu erzielen.

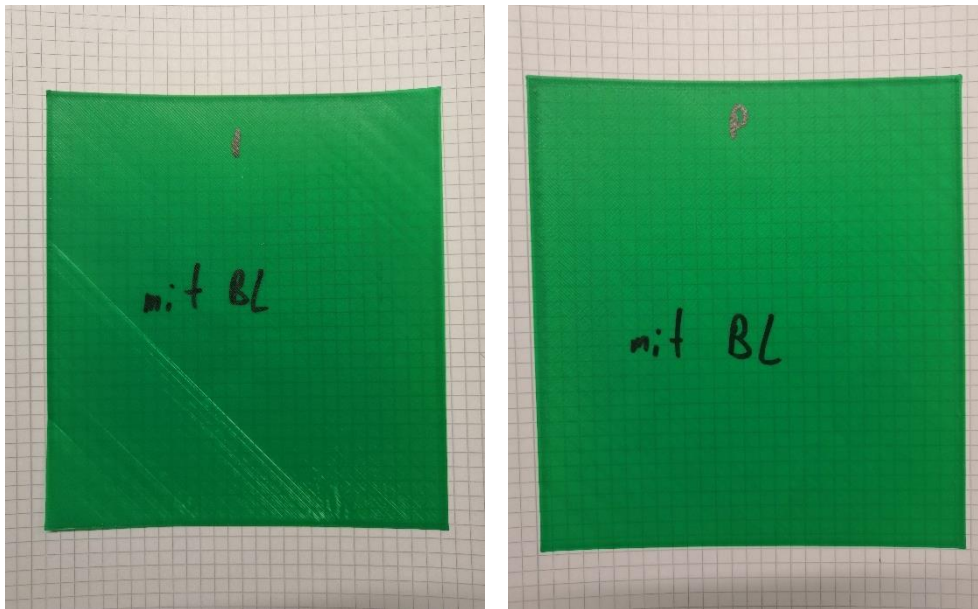


Abbildung 46: Testdrucke mit Bettnivellierung - links Induktion, rechts Piezo

9 Diskussion der gemessenen und getesteten Ergebnisse der Sensoren

In Anlehnung an Kapitel 5.1 „Grundanforderungen“ sollen die Ergebnisse der Messungen und praktischen Experimente in Anbetracht der Anforderungen an Z-Probes erläutert werden.

9.1 Erfüllung der Grundanforderungen - Induktionssensor

- **Setzung des Nullpunktes der z-Achse des Koordinatensystems:** Induktionssensoren als Z-Probes erfüllen, in der buchstäblichen Definition, die Anforderung der Nullpunktsetzung nicht. Die eigentliche Nullpunktsetzung erfolgt erst durch die manuelle Kalibrierung des Offsets zwischen Schaltabstand und Düsen Spitze.
- **Erzeugung der korrekten Düsenhöhe:** Die korrekte Düsenhöhe erfolgt durch die korrekte Nullpunktsetzung der z-Achse. Diese Einstellung erfolgt bei Verwendung eines Induktionssensors manuell. Prinzipiell ist die Präzision dieses Sensors ausreichend, um ein konstantes Messergebnis zu erhalten und damit ein häufiges Nachjustierung des Offsets nicht nötig. Die manuelle Kalibrierung kostet dennoch sehr viel Zeit und erfordert einiges an Erfahrung, um eine korrekte Düsenhöhe zu erreichen.
- **Genau und wiederholbare Messung des Druckbetts an verschiedenen Positionen:** Induktionssensoren besitzen eine hohe Präzision, womit eine gute Ausmessung des Druckbettes möglich ist. Jedoch ergibt sich durch ihren x- und y-Offset eine Einschränkung. Es ist mechanisch nicht möglich mit dem Induktionssensor das gesamte Druckbett auszumessen. Zusätzlich haben die Messungen ergeben, dass die Präzision zwar hoch ist, jedoch die maximal tolerierte Abweichung oftmals überschritten wird. Diese Überschreitung macht Drucke ohne Probleme prinzipiell möglich, es zeigen sich jedoch bereits optisch sichtbare Fehler in der Oberfläche und aufgrund der messbaren Standardabweichung bei der Ausmessung des Druckbettes ist die automatische Bettnivellierung nur mittelmäßig effektiv. Dies zeigt sich vor allem dann, wenn die Erzeugnisse eine große Fläche des Druckbettes einnehmen.

9.2 Erfüllung der Grundanforderungen - Piezosensor

- **Setzung des Nullpunktes der z-Achse Koordinatensystems:** Die Messungen und vor allem die praktischen Experimente zeigen, dass bei Verwendung von Piezosensoren als Z-Probes die Setzung des Nullpunktes ohne manuelle Kalibrierung richtig gesetzt wird.
- **Erzeugung der korrekten Düsenhöhe:** Aufgrund der automatischen und korrekten Nullpunktsetzung wird die Düsenhöhe ausreichend genau gesetzt und im Gegensatz zum Induktionssensor bedarf es ebenfalls keiner manuellen Anpassung.
- **Genau und wiederholbare Messung des Druckbetts an verschiedenen Positionen:** Die Ausmessung des Druckbettes ist über die gesamte Fläche möglich und die Messergebnisse zeigen, dass die maximal tolerierbare Abweichung nur in seltenen Fällen überschritten wird. In Kombination bedeutet dies, dass die Ausmessung des Druckbettes präzise verläuft und damit eine effektive Druckbettnivellierung möglich ist.

9.3 Vergleich der Sensorsysteme

Die Sensorsysteme sollen im Folgenden in ihrer Gesamtheit anhand der gemachten Erfahrungen, Messungen und praktischen Untersuchungen verglichen werden. Eine Zusammenfassung dessen stellt Tabelle 15 dar.

Präzision: Die Messergebnisse der Präzision haben konsistente Ergebnisse geliefert und zeigen, dass Piezosensoren eine deutlich niedrigere Standardabweichung besitzen, als Induktionssensoren.

Streubreite: Die Streubreite bei gewählter Wahrscheinlichkeit von 99 % liegt bei Verwendung des Induktionssensors und Betriebstemperatur nicht innerhalb der maximalen tolerierten Abweichung und macht keine exakte Bettnivellierung möglich. Die Streubreite des Piezosensors liegt hingegen bei den meisten Messungen unterhalb der 30 μm -Grenze.

x-y-Offset: Der Induktionssensor besitzt einen x-y-Offset zur Düse, der Piezosensor nicht.

Bauraum: Der Induktionssensor benötigt Platz auf der Extruderplattform, verringert die verfügbare Bauhöhe jedoch nicht. Im Gegensatz dazu wird der Piezosensor direkt in das Hot End integriert und benötigt keinen zusätzlichen Platz auf der Extruderplattform. Jedoch wird die maximale Bauhöhe um ca. 27 mm reduziert.

Temperaturabhängigkeit: Die Sensorsysteme zeigen beide eine Abhängigkeit der Präzision von der Temperatur. Die Steigerung der Standardabweichung und damit die Verringerung der Präzision ist beim Induktionssensor jedoch höher.

Montage: Für die Montage des Induktionssensors muss ein Spannungsteiler eingelötet werden, der Sensor direkt in die Extruderplattform geschraubt und mit zwei Muttern fixiert werden. Für den Piezosensor sind mehr Schritte notwendig. Zuerst muss ein Loch in die Piezoscheibe gebohrt und anschließend das Gehäuse zusammengebaut werden. Bei der aktuellen Version bedarf dies etwa 20 Minuten. Der Piezoring und die Messschaltung müssen verkabelt werden. Anschließend wird die gesamte Konstruktion mit zwei Schrauben in das Cold End geschraubt.

Handhabung: Die Verwendung des Induktionssensors als Z-Probe ist relativ einfach und es gibt mittlerweile sehr viel Dokumentation, um alle nötigen Einstellungen vorzunehmen. Aufgrund der Neuartigkeit des Piezosensors als Z-Probe ist die Dokumentation nicht so ausführlich und es bedarf mehr Zeit, um alle Einstellungen richtig zu treffen. Dieser Prozess ist deutlich langwieriger im Gegensatz zum Induktionssensor erfolgt jedoch nur einmalig bei Integration in den 3D-Drucker.

Preis: Der Preis des verbauten Induktionssensor inklusive aller benötigten Kabel beläuft sich auf ca. 15€, während der Preis des Piezosensors bei ca. 20 € liegt.

Verfügbarkeit: Die Verfügbarkeit des Induktionssensors ist aufgrund seiner Verbreitung sehr hoch. Die verwendeten Piezoscheiben sind ebenfalls sehr einfach zu bekommen, jedoch ist die passende Messschaltung für 3D-Drucker im Moment nur von einem Hersteller erhältlich.

Merkmal	Induktionssensor	Piezosensor
Präzision	Die Standardabweichung liegt bei Betriebstemperatur bei ca. 9 μm	Die Standardabweichung liegt bei Betriebstemperatur bei ca. 3,5 μm
Streubreite	Die Streubreite liegt bei Betriebstemperatur bei ca. 50 μm	Die Streubreite liegt bei Betriebstemperatur bei ca. 20 μm
x-y-Offset	Vorhanden	Nicht vorhanden
Bauraum	Benötigt Platz auf der Extruderplattform, verringert jedoch nicht die verfügbare Bauhöhe	Wird direkt in das Hot End integriert, verringert die verfügbare Bauhöhe jedoch um ca. 27 mm
Temperaturabhängigkeit	Ja, Steigerung der Std. Abw. um 35 %	Ja, Steigerung der Std. Abw. um 5 %
Montage	Einfach	Mittel
Handhabung	Einfach	Mittel bis Schwer
Preis	~ 15 €	~20 €
Verfügbarkeit	Sehr hoch	Piezoscheibe sehr hoch, Messschaltung sehr niedrig

Tabelle 15: Vergleich der Sensorsysteme

10 Konklusion

Die Zielsetzungen aus Kapitel 1.2 wurden zu großen Teilen erfüllt und sind in Tabelle 16 zusammengefasst:

Nr.	Ziel	Erfüllt?	Bemerkungen
1	Kompatibilität zu Druckbetten jeglichen Materials	Ja	
2	Vermeidung eines x- und y-Offsets zur Düse	Ja	
3	Höhere Messpräzision bei Umgebungs- und Betriebstemperatur	Ja	
4	Konsistente Einstellbarkeit der korrekten Düsenhöhe	Ja	
5	Beibehaltung der Bedienbarkeit des aktuellen Systems	Jein	Die einmalige Implementation und optimale Einstellungen zu finden, bedarf einiges an Zeit. Die größte Herausforderung im laufenden Betrieb ist zu garantieren, dass sich keine größeren Partikel auf der Düse und/oder dem Druckbett befinden, die die Messung verfälschen.
6	Kompatibilität mit der aktuell verwendeten Mechanik, Elektronik und Software	Ja	

Tabelle 16: Erfüllung der Zielsetzungen

Die Implementierung eines Piezosensorsystems in den 3D-Drucker Version 2 des Pilotfabrik Industrie 4.0 bringt nennenswerte Vorteile in der Druckqualität bei wenigen Nachteilen. Obwohl der aktuelle verbaute Induktionssensor große Beliebtheit aufgrund seiner Einfachheit und Genauigkeit in der 3D-Druck-Szene erfährt, kann ein Umstieg auf die Piezosensortechnologie sinnvoll sein.

Während Induktionssensoren wiederkehrende Kalibrierungsschritte durch erfahrene Benutzer für die Sicherstellung zufriedenstellender Druckqualität benötigen, entfällt dieser Vorgang bei der Nutzung von Piezosensoren vollständig. Nach einmaligem Einbau und Einstellung der Sensitivität dieses Systems sind die Ergebnisse konsistent zufriedenstellend und erfordern keine manuelle Nachjustierung. Eine präzisere Ausmessung der Druckbetttopologie ermöglicht eine effektivere Druckbettnivellierung. Die Düsenhöhe wird durch den Piezosensor automatisch korrekt eingestellt. Die Hauptursache, vor allem für unerfahrene Nutzer, für qualitativ unzureichende oder gar fehlgeschlagene 3D-Drucke liegt in vielen Fällen in der Einstellung dieser Düsenhöhe. Mit dem implementierten Piezosensorsystem entfällt die manuelle Kalibrierung damit vollständig.

Der Entfall wiederkehrender Kalibrierungsschritte kann jedoch nur erreicht werden, wenn die Implementierung erfolgreich erzielt wird. Hierfür sind noch einige Punkte zu beachten, die wiederum Erfahrung benötigen. Jedoch ist davon auszugehen, dass diese Erfahrung bei den verantwortlichen Personen der Implementierung eher zu finden, als die Erfahrung einer erfolgreichen Kalibrierung bei den Nutzern des Druckers ist. Explizit ist zu erwähnen, dass die folgenden Grundeigenschaften des 3D-Druckers richtig abgestimmt werden müssen, um konsistent präzise Ergebnisse ohne Fehlauflösungen des Piezosensors als Z-Probe zu erzielen:

- Einstellung eines Delays der Extruderplattform vor Messungen in der Firmware
- Beschränkung der Beschleunigung der z-Achse in der Firmware, um bei Beginn der Messung Fehlauflösungen zu vermeiden
- Einstellung der maximalen Bauhöhe, da diese durch die Implementierung des Sensors reduziert wird
- Kalibrierung der Vergleichsspannung an der Messschaltung mittels Potentiometers, um die höchstmögliche Sensitivität ohne Fehlauflösungen zu erreichen
- Einstellung der korrekten Start G-codes in der verwendeten Slicersoftware

Diese Punkte müssen einmalig für den verwendeten 3D-Drucker eingestellt werden und gelten fortan für alle weiteren Drucker desselben Modells. Grundsätzlich treffen einige oder ähnliche Punkte bei der Verwendung von Induktionssensoren ebenfalls zu und gehören zu den Aufgaben bei der Produktentwicklung eines 3D-Druckers hinzu.

Aus dieser Arbeit lässt sich schlussfolgern, dass bereits das verbaute Piezosensorsystem in dessen Prototypenphase in fast vielen Belangen dem Induktionssensor überlegen ist und stellt somit ein sehr hohes Potential für Weiterentwicklungen dar, um die Präzision weiter zu erhöhen bzw. den großen Nachteil der Bauhöhenverkleinerung zu minimieren.

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Qualitativer Überblick verschiedener Z-Probes [23].....	27
Tabelle 2: Teilauszug der Firmwareeinstellungen	41
Tabelle 3: Beschreibung des Homing- und Messverfahrens	42
Tabelle 4: Für die Praxis typische Wahrscheinlichkeit für die Einhaltung der Messaussage [15]	45
Tabelle 5: Messvorgänge pro getesteten Sensor	52
Tabelle 6: Vergleich der Standardabweichungen	53
Tabelle 7: Vergleich der Streubreiten mit der maximal tolerierbaren Abweichung	54
Tabelle 8: Koordinaten der Messpunkte	54
Tabelle 9: Vergleich der Standardabweichung der Systeme bei Umgebungstemperatur	55
Tabelle 10: Streubreite der Sensoren an allen fünf Messpunkten	56
Tabelle 11: Parameter der Wärmeausdehnung	57
Tabelle 12: Vergleich der Standardabweichung der Systeme bei Betriebstemperatur	58
Tabelle 13: Visualisierung der Standardabweichungen bei Umgebungs- bzw. Betriebstemperatur an Messpunkt 5	59
Tabelle 14: Streubreite der Sensoren an allen fünf Messpunkten	59
Tabelle 15: Vergleich der Sensorsysteme	67
Tabelle 16: Erfüllung der Zielsetzungen.....	68

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der "Fused Filament Fabrication" [3]	7
Abbildung 2: 3D-Drucker V2 der Pilotfabrik Industrie 4.0	8
Abbildung 3: Extruderplattform mit Stahlachsen und Führungen	10
Abbildung 4: Funktionsweise der CoreXY-Bewegung [5] und der 3D-Drucker V2	10
Abbildung 5: Extruder mitsamt Extruderplattform. Ansicht von links und von hinten.	11
Abbildung 6: Druckbett des 3D-Druckers von vorne-links und hinten.	12
Abbildung 7: Anschlussmöglichkeiten eines Minitronics V1.1	14
Abbildung 8: Verwendete Anschlüsse des Minitronics V1.1	14
Abbildung 9: Weboberfläche von Repetier-Server	15
Abbildung 10: Betätigung der Mikroschalter in x- und y-Richtung (von rechts nach links)	18
Abbildung 11: Mechanischer Mikroschalter ohne PCB [10]	20
Abbildung 12: Mechanischer Mikroschalter mit PCB [11]	21
Abbildung 13: Optischer Sensor [12]	21
Abbildung 14: Magnetischer Sensor	21
Abbildung 15: Reflexionssensor [14]	22
Abbildung 16: Dehnungsmesstreifen im Druckbett [16], [17]	22
Abbildung 17: Kapazitiver Sensor [18]	23
Abbildung 18: Induktiver Sensor [19]	24
Abbildung 19: Schaltabstände bei induktiven Sensoren [21]	24
Abbildung 20: Materialabhängiger Korrekturfaktor [21]	25
Abbildung 21: Direkter piezoelektrischer Effekt [15]	26
Abbildung 22: Benötigter Offset (Z-Probe Height) zur Korrektur der Nullpunktsetzung [24]	28
Abbildung 23: Ausgemessene Topologie eines Druckbetts [25]	29
Abbildung 24: Induktionssensor auf der Extruderplattform – von der Seite und von Unten.	30
Abbildung 25: Druckbettmessung nahe dem Ursprung (links) und am Ende der y-Achse (rechts)	30
Abbildung 26: Piezoscheibe mit gebohrtem Loch [28]	31
Abbildung 27: Variante A des Piezogehäuses und Explosionsansicht der Hot Endbefestigung	32
Abbildung 28: Explosions- und Schnittansicht der Variante A zwischen Cold- und Hot End	33
Abbildung 29: Explosions- und Schnittansicht der Variante B des Piezogehäuses. (1) Düse, (2) Heizblock, (3) Gewindestange, (4) Zuführrohr, (5) Halter, (6) Kernhälften, (7) Piezoring, (8) Rahmen, (9) oberes Gehäuseteil	34
Abbildung 30: Vergrößerte Schnittansicht zur Veranschaulichung der Vorspannungserzielung	35

Abbildung 31: Darstellung der Blattfedern (links) und der Halterungen (rechts)	35
Abbildung 32: Elektronischer Schaltplan der Messschaltung [32]	38
Abbildung 33: Präzision des Induktionssensors	46
Abbildung 34: Richtigkeit des Induktionssensors.....	47
Abbildung 35: Präzision der Variante A	47
Abbildung 36: Richtigkeit der Variante A.....	48
Abbildung 37: Präzision der Variante B	49
Abbildung 38: Richtigkeit der Variante B.....	49
Abbildung 39: Gegenüberstellung der Präzision.....	50
Abbildung 40: Gegenüberstellung der Richtigkeit.....	51
Abbildung 41: Position der Messpunkte	54
Abbildung 42: Auswirkung der Düsenhöhe auf die Aufbringung der Schicht [36].	60
Abbildung 43: Praktische Unterschiede bei unterschiedlicher Düsenhöhe [36].	61
Abbildung 44: Weiteres Praxisbeispiel bei unterschiedlicher Düsenhöhe [37].	61
Abbildung 45: Testdrucke ohne Bettnivellierung - links Induktion, rechts Piezo	63
Abbildung 46: Testdrucke mit Bettnivellierung - links Induktion, rechts Piezo.....	64

13 Literaturverzeichnis

- [1] A. Fischer, S. Gebauer, und E. Khavkin, *3D-Drucker im Unternehmen - Entscheidungsmodelle, Best Practices und Anwendungsbeispiele am Beispiel Fused Layer Modeling*. München: Carl Hanser Verlag München, 2018.
- [2] A. Gebhardt, J. Kessler, und L. Thurn, *3D-Drucken - Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)*, 2. Aufl. Aachen: Carl Hanser Verlag München, 2016.
- [3] „FDM Verfahren (Fused Deposition Modeling)“, *3D Druckcenter*. [Online]. Verfügbar unter: <http://3d-druckcenter.at/fdm/>. [Zugegriffen: 29-Jan-2019].
- [4] M. Brumnik, *3D Scanning - Virtuelle Produktentwicklung eines 3D Scanners für die TU Wien Pilotfabrik Industrie 4.0*. Unpubliziertes Dokument: Technische Universität Wien, o.J.
- [5] „Double Jump Electric“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.doublejumpelectric.com/projects/core_xy/2014-07-15-core_xy/. [Zugegriffen: 08-Jan-2019].
- [6] S. Wiedemann, *Entwicklung der Steuerelektronik für den 3D-Drucker der Pilotfabrik Industrie 4.0 in Wien*. Unpubliziertes Dokument: Te, o.J.
- [7] „About - RepRap“. [Online]. Verfügbar unter: <https://reprap.org/wiki/About>. [Zugegriffen: 09-Jan-2019].
- [8] „Z probe - RepRap“. [Online]. Verfügbar unter: https://reprap.org/wiki/Z_probe. [Zugegriffen: 09-Jan-2019].
- [9] „Mikroschalter“, *Wikipedia*. 17-Aug-2017.
- [10] „Endstop Micro Switch For RepRap Mendel 3D Printer - Endstop - Electronics“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reprap.me/endstop-micro-switch.html>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [11] „Mechanical Endstop - Ramps 1.4 RepRap 3D Printer“, *Semaf Electronics*. [Online]. Verfügbar unter: <https://electronics.semaf.at/Mechanical-Endstop-Ramps-14-RepRap-3D-Printer>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [12] „Endstop“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reprap.me/electronics/endstop>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [13] „Hall-Sensor“, *Wikipedia*. 24-Sep-2018.
- [14] KEYENCE, „Was ist ein Sensor? Sensor Basics“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.keyence.de/ss/products/sensor/sensorbasics/index.jsp>. [Zugegriffen: 09-Jan-2019].
- [15] R. Parthier, *Messtechnik: Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*, 4., verb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2008.
- [16] „FSR - RepRap“. [Online]. Verfügbar unter: <https://reprap.org/wiki/FSR>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [17] „Force Sensitive Resistor 0.5" - SEN-09375 - SparkFun Electronics“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sparkfun.com/products/9375>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [18] „Kapazitive Sensoren - autosen.com“. [Online]. Verfügbar unter: <https://autosen.com/de/Positionssensoren/Kapazitive-Sensoren>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [19] „Induktive Sensoren für industrielle Anwendungen - autosen.com“. [Online]. Verfügbar unter: <https://autosen.com/de/Positionssensoren/Induktive-Sensoren>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].

- [20] „Funktionsweise von induktiven Sensoren“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.baumer.com/de/de/a/know-how_function_inductive-sensors. [Zugegriffen: 21-Jan-2019].
- [21] „Schaltabstand“. [Online]. Verfügbar unter: <https://autosen.com/de/fachwissen-schaltabstand>. [Zugegriffen: 21-Jan-2019].
- [22] M. Kaltenbacher und H. Ecker, *Mess- und Schwingungstechnik*. .
- [23] „Choosing a Z probe“, *Duet3D*. [Online]. Verfügbar unter: https://duet3d.dozuki.com/Wiki/Choosing_a_Z_probe. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [24] „Z-Probing with Repetier-Firmware“, *Repetier Software*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.repetier.com/documentation/repetier-firmware/z-probing/>. [Zugegriffen: 11-Jan-2019].
- [25] „G30 A command?“, 29-Jan-2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://reprap.org/forum/read.php?1,491789,495464>. [Zugegriffen: 29-Jan-2019].
- [26] autosen, „Induktiver Sensor Standard Class IP67.pdf“. [Online]. Verfügbar unter: <https://autosen.com/de/Positionssensoren/Induktive-Sensoren/Induktiver-Sensor-Standard-Class-IP67-AI011>. [Zugegriffen: 11-Jan-2019].
- [27] Murata, „7BB-20-6L0.pdf“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.murata.com/en-global/products/sound/diaphragm/7bbww>. [Zugegriffen: 11-Jan-2019].
- [28] „Drilled 20mm Murata7BB Piezo Disc“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.precisionpiezo.co.uk/product-page/drilled-20mm-murata7bb-piezo-disc>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [29] „Piezo20 PCB v1.2 (For the Piezo20 Module/1 piezo)“, *precision-piezo*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.precisionpiezo.co.uk/product-page/copy-of-piezo20-pcb-for-the-piezo20-module-1-piezo>. [Zugegriffen: 11-Jan-2019].
- [30] Thingiverse.com, „Precision Piezo - Piezo20 Hotend Z Probe by DjDemonD“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thingiverse.com/thing:2319993>. [Zugegriffen: 10-Jan-2019].
- [31] „precision-piezo | Hotend Piezo Sensors“, *precision-piezo*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.precisionpiezo.co.uk/hotend-piezo-sensors>. [Zugegriffen: 22-Jan-2019].
- [32] „Piezo-electric sensors - RepRap“. [Online]. Verfügbar unter: https://reprap.org/wiki/Piezo-electric_sensors. [Zugegriffen: 22-Jan-2019].
- [33] *DIN ISO 3534-2.PDF*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [34] A. Rooch, *Statistik für Ingenieure: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Datenauswertung endlich verständlich*. Berlin: Springer Spektrum, 2014.
- [35] M. Kozek und M. Jakubek, *Stochastik*. Wien: Technische Universität Wien, 2017.
- [36] „First layer calibration and Live adjust Z“, 29-Nov-2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://help.prusa3d.com/article/ZhBlGFD9Ah-live-adjust-z>. [Zugegriffen: 25-Jan-2019].
- [37] T. Chvalina, „How to fix the most common 3D printing errors“, *Prusa Printers*, 27-Apr-2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.prusaprinters.org/how-to-fix-the-most-common-3d-printing-errors/>. [Zugegriffen: 25-Jan-2019].