

Jan Köhler (B.Eng. M.Sc.)

3D Printing Embedded HF-Filters, Metamaterials and Filament Composites using FDM

DOCTORAL THESIS

to achieve the university degree of
Doctor in Technical Sciences

Supervisor

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. MBA Wolfgang Bösch
Institute of Microwave and Photonic Engineering

Co-Supervisor

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Erich Leitgeb
Institute of Microwave and Photonic Engineering

Graz, May 2021

AFFIDAVIT

Hiermit versichere ich an Eides statt und durch meine Unterschrift, dass die Arbeit mit dem Titel

“FDM-Druckverfahren zur Einprägung von HF-Filtern, Metamaterialien and Filamentkompositen”

von mir selbstständig, ohne fremde Hilfe angefertigt worden ist. Inhalte und Passagen, die aus fremden Quellen stammen und direkt oder indirekt übernommen worden sind, wurden als solche kenntlich gemacht. Ferner versichere ich, dass ich keine andere, außer der im Literaturverzeichnis angegebenen, Literatur verwendet habe. Diese Versicherung bezieht sich sowohl auf Textinhalte, sowie alle enthaltenen Abbildungen, Skizzen und Tabellen. Die Arbeit wurde des Weiteren bisher keiner Prüfungsbehörde vorgelegt oder veröffentlicht. Diese vorliegende Dissertation ist identisch mit der von TUGRAZonline.

DEPONENT

I hereby affirm by oath and by my signature that the here presented work with the title

“3D Printing Embedded HF-Filters, Metamaterials and Filament Composites using FDM”

was made by me independently, without outside help. Contents and passages that originate from external sources and have been taken over directly or indirectly have been marked as such. Furthermore, I assure you that I have not used any other literature than that specified in the bibliography. This insurance applies to the text content as well as to all figures, sketches and tables contained. Furthermore, the work has not yet been submitted or published to any examining authority. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral thesis.

Graz, im Mai 2021

Jan Köhler

KURZFASSUNG

Diese vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Fertigung von innovativen passiven Hochfrequenzstrukturen. Hierfür wurde ein neuartiges *Metamaterial* entworfen und unterschiedliche Methoden für das 3D-Druckverfahren *Fused Deposition Modeling* (FDM) entwickelt, um individualisierte Verbundstoffe (*Komposite*) zu erstellen.

Die Fertigungstechnologie des 3D-Drucks ermöglicht es beliebige Gegenstände zu erzeugen, was es dadurch auch für die Elektrotechnik und Nachrichtentechnik besonders interessant macht. Es wird hierbei schichtweise ein Material über eine Fläche aufgetragen, wobei der verwendete Rohstoff variiert wird. In dieser Arbeit wird erstmals eine Methode vorgestellt, die die Zusammensetzung des verwendeten Rohstoffes beliebig manipuliert. Somit wird es ermöglicht völlig neuartige passive Komponente zu fertigen, die in die bestehenden elektronischen Systeme integriert werden können, um so beispielsweise gezielt Interferenzen zu reduzieren oder auch Strahlungselemente zu unterstützen.

Zu Beginn dieser Arbeit wird eine innovative passive Linsenstruktur auf Basis von *Metamaterial* entwickelt, welches das induzierte elektromagnetische Feld so transformiert, dass eine Fokussierung stattfindet. Dadurch wird erstmals gezeigt, wie ein solches Bauelement zur Unterstützung der Feldübertragung genutzt werden kann.

In weiterführenden Versuchen sollte dieses Merkmal mithilfe von FDM repliziert werden, wobei mit Eisen versetzter Rohstoff (Filament) verwendet wurde. Hierbei wurde erstmals festgestellt, dass in den Fertigungsprozess einbezogene unterschiedlich kombinierte Magnetfelder in 3D-gedruckte Objekte permanent eingeprägt werden können. Damit ist es erstmals möglich den permeablen Anteil zu steuern, sowie den Grad der elektromagnetischen Transmission oder Dämpfung aktiv zu verändern.

Um den permittiven Anteil ebenfalls verändern zu können, wurde aufbauend auf der vorherigen Betrachtung diese Idee weitergeführt und eine Methode zur Herstellung von Verbundstoffen entwickelt. Hierbei werden beliebige Filamente anhand des FDM-Schichtungsverfahrens miteinander kombiniert. Mithilfe des in dieser Arbeit entwickelten Mischverfahrens, können diese Bestandteile miteinander kombiniert werden, um so als weiterverwendbares *Komposit* zu Erstellung von HF-Komponenten genutzt zu werden.

Für alle Entwicklungen wurden unterschiedliche theoretische Vorbetrachtungen, Weiterentwicklungen, Methoden, Simulationen und Messreihen vorgenommen, um die Qualität der vorgestellten Komponenten zu bestimmen.

Die Messergebnisse dieser Untersuchungen zeigten, dass die vorgestellten Konzepte definitiv von großem Vorteil für die Hochfrequenztechnik sind. Somit wird es beispielsweise möglich 3D-Drucke zu erstellen, die neuartige *Metamaterialien* sind und die gleichzeitig nicht nur auf eine äußere Metallisierung beschränkt sind, wie es aus der aktuellen Literatur bekannt ist.

ABSTRACT

The following dissertation deals with the development of innovative passive high-frequency structures. For this, a novel *Metamaterial* was designed and manufactured. Using the 3D-printing, new methods were created to enable the user to make individualized composites using Fused Deposition Modeling (FDM).

The manufacturing technology of 3D printing makes it possible to create any object, which makes it particularly interesting for electrical engineering and telecommunication technology. Thermoplastic material (Filament) is being heated and deposited on a surface layer by layer. In this work, a method is presented that manipulates the composition of the raw material used at will. This makes it possible to manufacture completely new passive components that can be integrated into the existing electronic systems in order to specifically reduce interference or support radiation elements.

At the beginning of this work, an innovative passive lens structure based on *Metamaterial* is developed, which transforms the induced electromagnetic field in such a way that a focusing takes place. This is the first time that such a device can be used to support field transmission.

In further experiments this feature was to be replicated using FDM, using iron filament. For the first time, it was found that differently combined magnetic fields included in the manufacturing process can be permanently imprinted in 3D-printed objects. Thus, it is possible to control the permeable portion in an easy manner, as well as to actively change the degree of electromagnetic transmission or attenuation.

In order to be able to change the permittivity as well, this idea was continued and a method to produce composite materials was developed. By using the FDM layering technique filaments are being combined with each other. By using the developed mixing process of this work, the usable composite is being made to create the new RF components.

For all developments, different theoretical preliminary considerations, further developments, methods, simulations and series of measurements were carried out in order to determine the quality of the presented components.

The measurement results of these investigations showed that the concepts presented are of great advantage for future radio communication. Thus, it is possible, for example, to create 3D prints that are novel *Metamaterials* and which at the same time are not limited to external metallization, as it is known from the current literature.

WISDOM Research Project

This work is part of the project WISDOM. It was funded by the *Austrian Science Fund* (FWF).

The international consortium consisting of members of the Graz University of Technology in Austria (TUG), University of Kent in the UK, University of Warwick in the UK, and KU Leuven in Belgium, with expertise in the areas of integrated circuit and antenna design as well as enhanced 3D printing techniques. In the framework of this project, the emphasis at our institute was on the investigation of planar lenses, either implemented as *Antenna-in-Package* (AiP) or located right above the *Antenna-on-Chip* (AoC), to establish an optimum transition between a miniaturised antenna located at the integrated circuit to a corresponding high gain antenna. By this approach, the effectiveness of the transmission and the capability to focus the radiated beam is significantly enhanced.

The author of this work is thanking the following members for their contributions, their scientific input and wish them well.

Sanz-Izquierdo Benito, Wolfgang Bösch,

Chao Gu, Michael Ernst Gadringer, Steven Gao,

Greg Gibbons, Patrick Reynart, Rui Xu und Alexander Standaert



Für Kalina,

*meine Partnerin
und eine ganz besondere Frau.*

*Danke, dass Du mir durch diese Zeit
geholfen, mich begleitet und getragen hast.*

*Du bist meine Domestique,
die mich zum Rouleur werden ließ.*

Ein **dickes Dankschön** geht natürlich besonders an die vielen Mitarbeiter, die mir bei der Fertigstellung dieser Arbeit geholfen haben. Ihr seid alle super!

Vielen Dank an die Leitung, Prof. Wolfgang Bösch, Prof. Erich Leitgeb, Prof. David Pommerenke.

Vielen Dank an Dr. Dr. Ivan Ndip für die Zweitprüfung und meine tolle Ausbildung.

Ganz liebese Danke and die folgenden Leute. Jeder von Euch hat mir bei den Korrekturen der Arbeit, den notwendigen Geräten, der Administration, Zuarbeit und moralischer Unterstützung sehr geholfen.

Dominik Amschl, Eduard Dorner, Daniel Eisenkölbl, Andreas Gruber,
Michael Gadringer, Lukas Johann Görtschacher, Marting Hinteregger, Daniel Kraus,
Manuel Kubicka, Andreas Johann Hörmer, Andreas Merdonig, Gabriele Mörth,
Marika Scheer, Reinhard Lilek, Luke Robins, Jose Romero Lopera, Kai Parthy,
Helmut Paulitsch, Carola Pauser, Pirmin Pezzei, Franz Teschl, Thomas Plank,
Hossein Sarbandifarahani, Helmut Schreiber, Peter Schrotter, Lucas Speckbacher,
David Veit, Michael Vorderderfler, Manuela Wenger.

We are not the avatars we create.
We are not the pictures on a film stock.
We are the light, that shines through.

Jim Carrey; speech at *Maharishi University of Management* (MUM) Graduation 2014 (18:57 Min.)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung, Überblick und Neuheiten	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Struktur dieser Arbeit	3
1.3	Überblick der Neuheiten	3
1.4	Introduction, Overview and Novelties	5
1.4.1	Introduction	5
1.4.2	Structure	7
1.4.3	Novel features	7
2	Stand der Wissenschaft und Technik	9
3	Weiterentwicklungen und Beitrag dieser Dissertation	12
4	Metamaterial	14
4.1	Modellbildung und 3D-Simulation von Metamaterialien	14
4.1.1	Omega als Metamaterial	14
4.1.2	Omega-Metamaterial als Array	18
4.1.3	Omega-Metamaterial als Block	22
4.2	Vermessung von Metamaterial	25
4.2.1	Herstellung	25
4.2.2	Ermittlung der Fertigungstoleranzen	26
4.2.3	Vermessung vom Metamaterial mit Wellenleitern	30
4.2.4	Messung von Metamaterial mit Patchantennen	32
4.3	Metamaterial: Zusammenfassung	35
4.4	FDM-Druck von Metamaterial	38
4.4.1	FDM-Druck auf Druckbett mit Permanentmagneten	38
4.4.2	Druck von Metamaterial mit Eisenfilament und Magneten	42
4.4.3	Vermessung von FDM-gedrucktem Omega-Metamaterial	44
5	Eisenfilament	46
5.1	FDM-Druck von Eisenfilament mit Magneten	46
5.2	Messaufbau	51
5.3	Eisenfilament: Proben zur Vermessung	52
5.4	Eisenfilament: Zusammenfassung	61
6	Filamentkomposite	64
6.1	FDM-Druck von Filamentkomposit	64
6.2	Proben zur Vermessung	76
6.3	Filamentkomposite: Proben zur Vermessung	78
6.3.1	PLA+Eisen	79
6.3.2	Graphit+Eisen	85
6.3.3	Kupfer+Eisen	91
6.3.4	CaCO ₃ +Eisen	98
6.4	Filamentkomposit: Zusammenfassung	104
7	Magnetschlitten	107

8	Ausblick	111
9	Zusammenfassung	117
9.1	Final Conclusion	119
10	Liste der Veröffentlichungen dieser Arbeit	121
	Literatur	122
A	Anhang	131
B	Werkzeuge der Feldberechnung	132
B.1	Berechnungsansätze	132
B.2	Finite-Elemente-Methode (FEM)	133
B.3	Full-Wave-Simulator HFSS	134
C	Werkzeuge des 3D-Drucks	136
C.1	Erstellung von 3D-Modellen	136
C.2	Übersetzung vom 3D-Modell in 3D-Druckersprache	138
C.2.1	DIN/ISO-Programmierung (GCode)	140
C.2.2	Programmiersoftware (Slicer)	140
C.3	Kommunikation und Überwachung	142
C.3.1	Marlin	142
C.3.2	Octoprint	142
D	Physik von Metamaterial	144
E	Funktionsweise von 3D-Druckern	148
E.1	Aufbau und Prinzip	150
E.2	Heizelement	151
E.3	Extruder	153
F	Modifikationen für FDM	154
F.1	Rohmaterial Filament	154
F.2	Trocknung von Filamenten	157
F.3	Modifiziertes Cold-Pull-Verfahren	160
F.4	Elektrische Hardware	162
F.5	Doppelte Z-Achse	167
F.6	Design des Extruders	172
F.7	Thermische Isolation vom Heizelement	176
F.8	Heat Creep und dessen Vermeidung	179
F.9	Filamentkühlung	182
F.10	Abtaster der Druckoberfläche	185
F.11	X-/Y-Kalibrierung mit Horizontal Size Compensation	189
F.12	Gehäuse	192
F.13	Filamentkalibrierung	195
F.14	Düsenreinigung	199
F.15	Konfigurationen	204
F.16	Quellcode Marlin	208

Abkürzungen

Abbr. Abbreviation (deut.: Abkürzung)

Abk. Abkürzung

bzw. beziehungsweise

Chpt. Chapter (deut.: Kapitel)

deut. im Deutschen

e.g. Deutsch: beispielhaft; Englisch: That is

eng. im Englischen

FDM Schmelzschichtverfahren (engl.: Fused Deposition Modeling)

Gl. Gleichung

IC Integrierter Schaltkreis (engl.: integrated circuit)

I/O Eingang/Ausgang (engl.: input/output)

i.e. Deutsch: bedeutend; Latein: id est; Englisch: That is

Kpt. Kapitel

MOSFET Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor

PCB Printed Circuit Board (deut.: Leiterplattentechnologie)

PLA Polylactide (Kunststoff für 3D-Druck)

PWM Pulsweitenmodulation

vgl. vergleiche ebenfalls mit

VNA Netzwerkanalysator (engl.: Network Analyzer)

s.a. siehe auch

s.g. so genannt

Tab. Tabelle

Nomenklatur

ABS Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer

EMV Elektromagnetische Interferenz (engl.: EMI)

EMW Elektromagnetische Welle

Extruder Einspeisungsmotor, um das Filament in das Heizelement einzuführen.

FDM Fused Deposition Modeling (deut.: Schmelzschichtungsverfahren)

FFF Fused Filament Fabrication

Filament Thermoplastischer Kunststoff, der in Drahtform auf Rollen vertrieben wird als Rohstoff im FDM/FFF-Verfahren zum Einsatz kommt. Die verwendeten Akronyme ABS, PTEG, PLA, TPU stehen hierbei für die Art des Rohstoffes.

Frequenzen Maß wie oft ein periodischer Vorgang pro Zeiteinheit wiederholt wird.

Heat Creep Verstopfung des Heizelements durch mangelnde thermische Entropie

HFSS High Frequency Electromagnetic Simulation Software

Hotend Heizelement zur Schmelzung des Filaments

IC Integrated Chip

Infill Ausfüllende Bestandteil von 3D-Drucken, der anhand der definierten Geometrien (i.e. Kreuzmuster, Wabenmuster) und Dichte die Stärke eines Bauteils determiniert.

Moden Schwingungsmoden oder Eigenschwingungsmoden, ist die stationäre Eigenschaft stehender Wellen hinsichtlich der Energieverteilung in verschiedenen Richtungen

PLA Polymilchsäure

PTEG Polyethylenterephthalat mit Glycol

SLA Stereolithography Apparatus

SLS Selective Laser Sintering

TPU Thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis

1 Einleitung, Überblick und Neuheiten

1.1 Einleitung

Die Zukunft gehört den Kompositen.

Als Kompositwerkstoffe (kurz *Komposite*) werden Verbundstoffe bezeichnet, deren Zusammensetzung aus mehreren Werkstoffen besteht und dadurch in ihrer Summe verbesserte Merkmale aufweisen. Die Erstellung von Kompositen war in der Vergangenheit oftmals schwierig, da diese Spezialanfertigungen besondere Industrieprozesse benötigten, welches in den meisten Fällen unrentabel ist. Mithilfe des 3D-Drucks ist es möglich, solche Anfertigungen in kürzer Zeit und günstiger zu erzielen.

Die Fertigungstechnologie des 3D-Drucks wurde erstmals 1970 von DAVID EDWARD HUGH JONES vorgestellt [1], 1988 von S. SCOTT CRUMP hergestellt und revolutioniert seitdem die technische Welt. Durch den Verfall des Patents von *Fused Deposition Modeling* (FDM) in 2009 und einer gezielten Vermarktung im Verbrauchersegment, etablierte sich ein regelrechter Hype sowohl im Bereich der Privatanwender als auch Industrie für dieses Thema. Als Ergebnis dessen wurden bis 2019 insgesamt 95 302 Patente und 43 718 Patentfamilien mit 3D-Druckbezug generiert [2]. Dazu zählen auch s.g. *Desktop Printer*, die es jedem Anwender ermöglichen diese Technologie zu nutzen. Laut RIC FULOP (CEO *Desktop Metal*) sollte dies den Beginn der vierten Industriellen Revolution darstellen [3, 5:10 Min.].

Nachdem die prognostizierte Revolution schlussendlich ausblieb, wonach jeder Haushalt über einen 3D-Drucker verfügen sollte, hat 3D-Druck stattdessen nahezu in jedem Produktentwicklungsschritt Verwendung gefunden. Grund hierfür war die Eliminierung von zusätzlichen Produktionsstätten, den damit verbundenen Transportwegen und der dadurch reduzierten Gesamtkosten.

Nicht nur der geringe Stückpreis der hergestellten Komponenten machte hierbei den 3D-Druck attraktiv, sondern auch die Möglichkeit noch komplexere Teile zu fertigen.

Komplexe Teile in geringen Stückzahlen bedeutet oftmals hohe Produktionskosten, die nicht tragbar sind. Aber speziell in Forschungsbereichen wie Medizin, sind die Budgets oftmals sehr beschränkt, sodass solche Spezialanfertigungen nicht umsetzbar sind. Ein Beispiel hierfür wurde unter der Leitung von Dr. ANTHONY ATALA vom *Wake Forest Institute for Regenerative Medicine* (WFIRM) vorgestellt, wobei mithilfe von FDM menschliches Zellmaterial hergestellt wird [4]. Wie in Abb. 1.1 (A) gezeigt, können Grundgerüste von maßgeschneiderten Körperteilen generiert werden, die gleichzeitig erschwinglich sind.

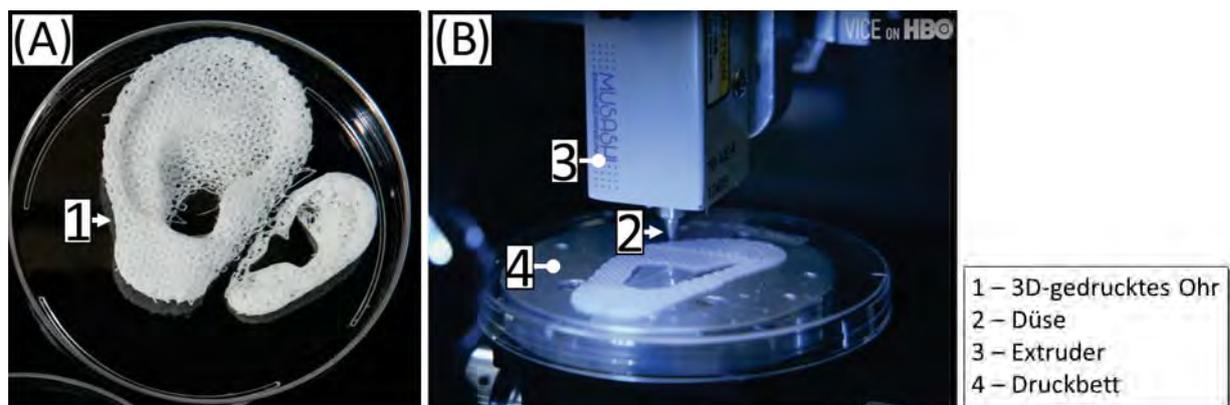


Abbildung 1.1: 3D-gedrucktes menschliches Ohr. (A) Draufsicht von gefertigten Grundgerüsten mit verschiedenen Größen [4], (B) Fertigungsverfahren von 3D-gedruckten Ohren [3, 0:45 Min.].

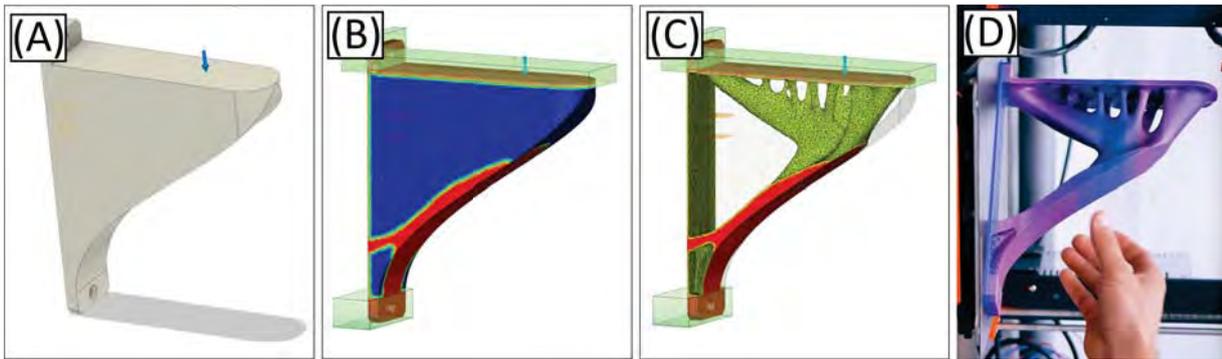


Abbildung 1.2: Weiterentwicklung von Regalhalter mithilfe von FEM und FDM. (A) Ausgangsmodell, (B) ermittelte Belastungszonen anhand von Spannungsanalyse, (C) extrahiertes Strukturmodell, (D) gefertigter Regalhalter durch FDM [5].

Hierfür wird das für FDM typische Schichtungsverfahren genutzt (Abb.: 1.1 (B)), um Lagen an Körperhaut zu generieren. Brandopfern kann so bei der Reaktivierung ihrer Haut mit körpereigenen Gewebeproben geholfen werden. Auch innere Organe, wie Arterien, können nachgebildet werden. Hierbei wird extrudierter Rohstoff schichtweise und stufenweise über eine Fläche aufgetragen, bis ein Objekt abgebildet wurde. Dies ist ein Beispiel für die Vielseitigkeit des Verfahrens, wie Rohstoffe entlang eines Rasters platziert werden können. Auch diese Arbeit schließt sich dem an, in dem das Konzept abermals erweitert wird, um erstmals Verbundstoffe für die Elektrotechnik zu generieren.

Da es deutlich einfacher und schneller ist mit dieser Methode Prototypen und Spezialanfertigungen selbst zu erzeugen, findet 3D-Druck umfangreich Anwendung in einer Vielzahl von Unternehmen. Die Entwicklung von leistungsfähigeren Computern brachte die Möglichkeit numerische Simulationen von komplexen Systemen mithilfe von Differentialgleichungen zu lösen (s.a. *Finite Elemente Methode*, Abk.: FEM) und durch Computergrafiken darzustellen (Abb.: 1.2 (B), (C)). Anhand dessen wird für das Bauteil die benötigte physikalische Materialverteilung ermittelt, wodurch organisch anmutende Strukturen generiert werden, die gleichzeitig widerstandsfähiger und leichter sind. Die Herstellung dieser Komponenten gestaltete sich in der Vergangenheit jedoch als schwierig, da die verfügbaren Werkzeuge stark limitierend und oftmals Fachkenntnisse des Anwenders bzw. Unternehmens benötigt waren. Wie in Abb. 1.2 (D) gezeigt wird, wird diese Methode hauptsächlich für mechanische Anwendungen eingesetzt, um effizientere Strukturen in die physische Welt zu übertragen. Ziel dieser Arbeit ist es weitere Anwendungsmöglichkeiten zu identifizieren, speziell im Bereich der Hochfrequenztechnik. Hier stellt sich die wissenschaftliche Frage, ob es möglich ist elektromagnetische Feldverteilungen anhand von 3D gedruckten Strukturen zu beeinflussen oder gar beliebig zu schaffen.

Der gemeinsame Nenner all dieser Beispiele ist das Herstellungsverfahren, wobei der verwendete Rohstoff variiert wird. An diesem Sachverhalt greift diese vorliegende Arbeit an und stellt ein FDM-Fertigungsverfahren für Verbundstoffe vor. Diese s.g. *Komposite* nutzen den Vorteil, dass mit FDM ein sehr viel größeres Spektrum an unterschiedlichen thermoplastischen Polymeren verarbeitet werden können, wie *Polymilchsäure* (PLA) [6], *Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer* (ABS) [7, S. 416], *Polyethylenterephthalat mit Glycol* (PETG) [8], sowie *Thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis* (TPU) [9, S. 55]. Zusätzlich können diese Polymere auch noch mit weiteren Stoffen vermischt werden, wie Kupfer, Graphit, Eisen, Stahl oder Holz.

Dieses Konzept ist besonders für die Elektrotechnik und Nachrichtentechnik von großem Interesse, da beispielsweise *Metamaterialien* von diesem sehr dynamischen Herstellungsverfahren profitieren. Somit wird es möglich passive Komponenten zu fertigen, die das elektromagnetische Feld formen oder eine Rich-

tungsänderung geben. Somit könnten Leitungen reflektionsarmer isoliert, Antennen beim Signalempfang unterstützt oder frequenzspezifische Kopplungen reduziert werden. Ein qualitativ ähnliches Verfahren ist für die *Stereolithografie* (SLA) oder *Selective Laser Sintering* (SLS) nicht bekannt [10, 11].

Da diese Thematik sehr umfangreich und fachübergreifend ist, erhält der Leser einen schrittweisen Überblick und Erklärung aller getätigten Entwicklungen. Hierbei wird auf die Prozesse, Werkzeuge und Konstruktionen eingegangen, sowie die möglichen Einschränkungen. Ziel dessen ist es, das Experiment selbst nachbauen und die Ergebnisse weiterverwenden zu können.

1.2 Struktur dieser Arbeit

Die Struktur dieser Arbeit teilt sich in vier Abschnitte auf.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird die Thematik vorgestellt, wobei die Grundlage geschaffen werden soll, anhand der Beweggründe für diese Arbeit.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird auf die Entwicklung in der Hochfrequenztechnik eingegangen. Hierbei wird im ersten Teilabschnitt das entwickelte *Metamaterial* vorgestellt, wobei die Theorie, Simulation, Herstellung, Herstellungstoleranzen und Messung erklärt werden. Anschließend beginnt der Teilbereich des 3D-Drucks, wobei das vorher gefertigte *Metamaterial* mittels Eisenfilament nachgebaut wird. Hierbei wird die Fertigung erklärt, sowie die Manipulation mit Hilfe von statischen Magnetfeldern. Der Einfluss der Felder wird anhand von zusätzlichen Proben in einer Messreihe untersucht. Im dritten Abschnitt wird auf die Erstellung der Komposite eingegangen, wobei die entwickelte Methode vorgestellt wird, sowie die Abstufung der Bestandteile für bestimmte Filamentkombinationen. Die Auswirkungen dessen wird auch hier anhand von mehreren Messreihen untersucht.

Im dritten Teil dieser Arbeit wird eine Zusammenfassung der Arbeit gegeben, Verbesserungsvorschläge, sowie einen Ausblick für weitere Forschungen.

Eine Vielzahl an Weiterentwicklungen wurden für diese Arbeit getätigt. Um den Lesefluss nicht zu unterbrechen, werden auf die notwendigen Entwicklungen im Anhang dieser Arbeit verwiesen. Hierbei wird die Notwendigkeit der Veränderung detailliert erläutert, die Physik näher erläutert, verwendete Programme beschrieben, sowie ein Bauplan zum replizieren gegeben. Von diesen Modifikationen profitiert ebenfalls das allgemeine FDM-Fertigungsverfahren.

1.3 Überblick der Neuheiten

Folgende Neuheiten wurden im Rahmen dieser Arbeit generiert.

Für die Hochfrequenztechnik:

- Hochfrequenzlinse anhand von transformierten Omega-Metamaterial als Array (Kpt.: 4.1)
- Qualitative Vergleichsmethode von Simulationsmodellen und gefertigten Bauteilen (Kpt.: 4.2.2)
- Einbettungsverfahren von 3D-Drucken in photopolymerem Harz (Kpt.: 4.4.1)
- Methode zur Einprägung von passiven Geometrien in 3D-Druck anhand von Eisenfilament und Permanentmagneten (Kpt.: 5.1)
- Fertigungsprozess von Verbundstoffen (*Kompositen*) für variable Dämpfung mittels Gemischen mit PLA, Graphit, Eisen, Kupfer, CaCO_3 (Kpt.: 6)
- Semi-Mischverfahren von Verbundstoffen (*Kompositen*) für FDM (Kpt.: 6.1)

Neuentwicklungen und Weiterentwicklung für das FDM-Druckverfahren:

- Modifiziertes Cold-Pull-Verfahren zur inneren Reinigung der Düse (Kpt.: F.3)
- Antrieb für doppelte Z-Achse für schwere Extruder, durch Verwendung eines einzelnen Schrittmotors, mit integrierter Magnetdämpfern (Kpt.: F.5)
- Verbessertes Konzept zur Filamentkühlung für thermisch leitende Filamente, welche in geschlossenem Gehäuse angewandt werden kann (Kpt.: F.9)
- Thermische Isolation vom Heizelement (*Hotend*), mittels maßgeschneiderten Isolationssocken aus thermischresistentem Silikonkautschuk für E3D-Hotends (Kpt.: F.7)
- Verbessertes Kalibrierungsverfahren zur Justierung der X-/Y-Kalibrierung am karthesischen 3D-Drucker mit einer Genauigkeit von $10\ \mu m$ (Kpt.: F.11)
- Verhinderung von Verstopfung der Düse (*Heat Creep*), durch Installation eines Kühlrippenlüftungskanals, um thermisch leitende Filamente (Eisen- und Kupferfilament) in geschlossenem Raum verarbeiten zu können (Kpt.: F.8)
- Neuentwicklung eines kompakten Direct-Drive-Extruders, mit sehr kurzer Wegstrecke zur Filamenteführung, integrierter Filamentfüllstandsensoren und integriertem Kugelgelenk für das Hotend, für sowohl $1,75\ mm$ - und $2,85\ mm$ -Filamente (Kpt.: F.6)
- Automatisierte Reinigungsbürste, um die Düse während des Druckvorgangs von Verschmutzungen zu befreien und ohne Verlust den 3D-Druck fortzusetzen (Kpt.: F.14)
- Ein thermisch abgeschlossenes Gehäuse für FDM-Drucker (Kpt.: F.12)

1.4 Introduction, Overview and Novelties

1.4.1 Introduction

The future belongs to composites.

A composite is a combination of two or more materials, which merges the beneficial properties of each together. Creating a custom composite material can be difficult and costly, requiring specific tools and processes, which are not always widely available. With the help of 3D printing it is now possible to create them quickly, cheaply and even at home.

The manufacturing technology of 3D printing was first introduced in 1970 by DAVID EDWARD HUGH JONES [1], implemented in 1988 by S. SCOTT CRUMP and since then has revolutionized the technical world. The patent for *Fused Deposition Modeling* (FDM) expired in 2009, which along with targeting the consumer market, created a large amount of hype surrounding the technology. As a result by 2019 a total of 95 302 3D printing patents have been filed, with 43 718 additional related patents [2]. The so-called *Desktop Printer* technology enabled more universal access which according to RIC FULOP (CEO *Desktop Metal*) would spark the beginning of the fourth industrial revolution with a 3D printer in every household. [3, 5:10 Min.].

After the surrounding hype subsided and predicted revolution yet to come, this technology can now be found being used in industry at almost every product development step. Leveraging 3D printing enable several production steps to be combined, reducing the number of required facilities and related transportation, which reduces overall costs.

But the impact of 3D printing does not only come down to pricing, but also the possibility of manufacturing even more complex components. Producing complex components in small batches is synonymous with high production costs. This is especially important for the medical sector, where limited budgets often make it impossible to produce required custom made components.

Dr. ANTHONY ATALA from *Wake Forest Institute for Regenerative Medicine* presented a method to 3D print human tissue [4]. As shown in Fig. 1.3 (A) it is now possible to generate a framework using FDM, with its associated layering technique (Fig.: 1.3 (B)), for affordable customized body parts. The printed parts are then used as a support for the recultivation of skin to help burn victims for example, regrow damaged organs with their own cells. Extensions of this procedure are also used to produce internal organs, such as arteries. Applications like these highlight that 3D printing is not limited to cost saving, but also allows the possibility of manufacturing previously impossible complex components.

New methods for simulations and more powerful computer hardware opened the possibility to solve

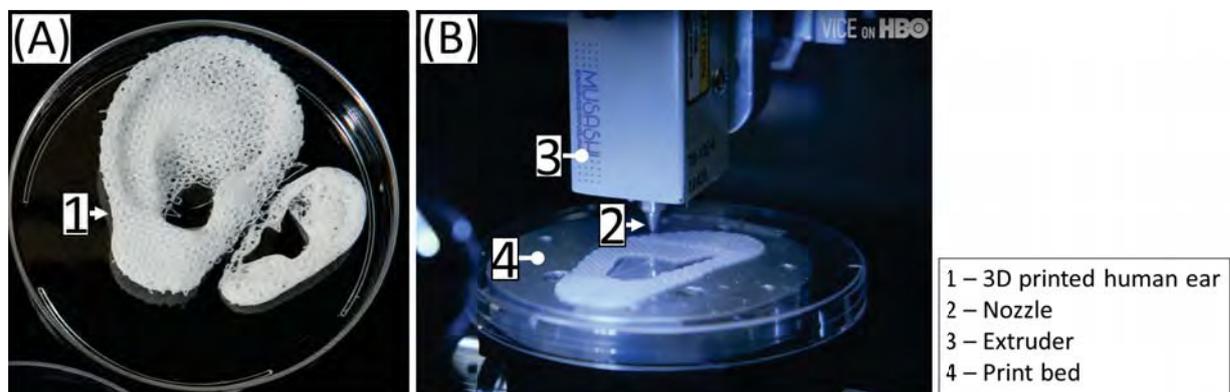


Abbildung 1.3: 3D printed human ear. (A) Manufactured framework with different sizes [4], (B) Manufacturing process of 3D printed human ears [3, 0:45 Min.].

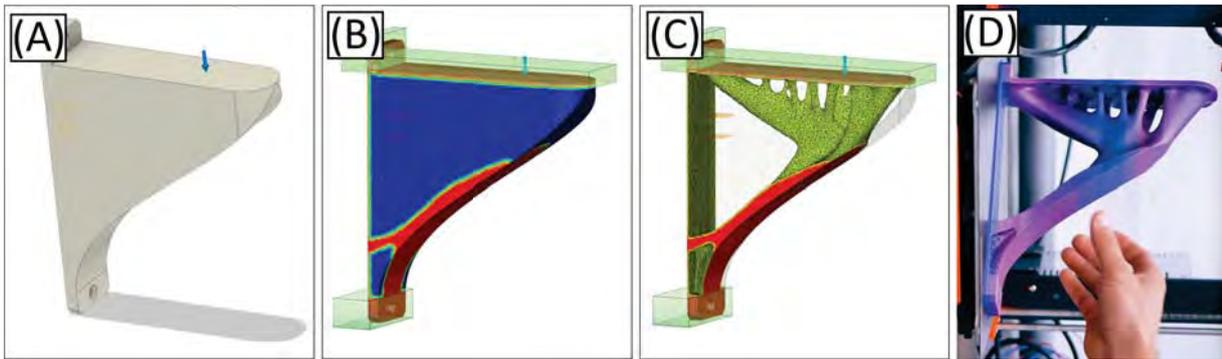


Abbildung 1.4: Development of shelf holder through *Topology Optimization*, FEM and FDM. (A) Starting modell, (B) mechanical stress analysis, (C) extracted structure model, (D) manufactured shelf holder with FDM [5].

complex numerical problems (i.e. *Finite Elemente Methode*, FEM) and visualize it with the help of computer graphics (Fig.: 1.4 (B), (C)) which can be implemented using 3D printing. Shown is an example of *Topology Optimization*, which makes use of FEM to determine the required position and the thickness of material to carry a specific load during the design. This optimized structure ends up looking organic and carries the required load while being lighter and stronger than more traditional designs. In the past manufacturing those components would have been impossible, due to computation complexity, manufacturability and the experience of its user. These techniques are widely used in the design of mechanical parts, such as the example in Fig. 1.4 (D), however have limited use in electromagnetic applications. The use in electromagnetic field distributions has the potential to enable novel designs and effects.

The discussed examples of FDM applications use an identical manufacturing process, but vary material parameters for a wide range of results. FDM has a variety of usable thermoplastic polymers, for example, *polylactide* (PLA) [6], *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS) [7, S. 416], *polyethylene terephthalate with glycol* (PETG) [8] and *thermoplastic elastomer with urethane* (TPU) [9, S. 55]. These polymers can also be combined with other particles like copper, graphite, iron, steel or wood, creating unique characteristics. Other common 3D printing methods such as *Stereolithography* (SLA) or *Selective Laser Sintering* (SLS) do not provide this ease of material combination [10, 11], making FDM the choice for the development of composite filaments or materials.

An interesting application area leveraging FDM and material composites within wireless communication, is the concept of *Metamaterials*. By controlling the permeability and permittivity, *Metamaterials* allow the creation of novel passive components with specific electromagnetic field bending or focusing properties. These materials can then be integrated in systems to achieve the dampening of radiated power of cables, improve the transmission of antennas or filter unwanted frequency dependent coupling, for example.

The work presented in this thesis aims to push the boundaries of 3D printing by introducing novel filament composites and the manufacturing process thereof for wireless communications/metamaterials.

The topics covered are very extensive and interdisciplinary, which is why the reader will be guided consecutively through all development steps. All processes, tools and fabricated parts are explained, with limitations thereof highlighted. Subsequently, the reader should be able to reproduce the results and use them for further experiments.

1.4.2 Structure

The structure of this work divided into four parts.

Part one provides an introduction for the reader, giving a broad overview of all topics, the motivation, the used tools and the basic theory.

Part two is dedicated to all high frequency developments and consists of Three segments. The first segment details the development of a novel PCB based *metamaterial*. Theory, simulations, manufacturing technique, determined manufacturing tolerances are provided and compared to measurements made. In second segment the manufacturing approach for the *Metamaterials* was shifted to 3D printing. The manufacturing process is explained and along with the process of manipulating metal particles with static magnetic fields. The influence thereof on electromagnetic waves is shown through the completed measurement series. The third segment explains the manufacturing process, method and mixing procedure for developed composites. Measurements of the electromagnetic characteristics of the combinations is provided and discussed.

Part three is used as a summary of this work, providing suggested improvements and an outlook for further research.

Part four consists of an appendix detailing the many additional improvements which were developed for this work. For improved readability, references to the necessary sub-chapters are in the appendix of this work. The needed changes are described in detail, with an manual to replicate them, with the modifications also being useful for standard FDM 3D printing.

1.4.3 Novel features

The following novelties were developed in this work.

For high frequency technology:

- A high frequency lens based on transformed Omega-*Metamaterial* array (Chpt.: 4.1)
- A comparison method of results of simulation model with manufacturing (Chpt.: 4.2.2)
- Embedding 3D printed structure into photopolymer resin (Chpt.: 4.4.1)
- Embedding passive geometries into 3D prints by using permanent magnets and iron filament (Chpt.: 5.1)
- A manufacturing process of composites, by mixing PLA, Graphite, Iron, Copper, CaCO_3 for versatile attenuation of electromagnetic waves (Chpt.: 6)
- A semi-mixing procedure of composites for FDM (Chpt.: 6.1).

Novelties and advancements for FDM printing:

- A modified cold-pull procedure to clean nozzle (Chpt.: F.3)
- A double Z-axis drive for heavy extruders, by using a single stepper motor, with integrated magnetic dampeners (Chpt.: F.5)
- An improved concept of filament cooling for highly thermal conductive filaments and usage inside of an enclosure (Chpt.: F.9)
- Thermal isolation of *hotend*, with customized isolation sock out of thermal resistant silicone rubber for E3D hotends (Chpt.: F.7)

- A modified calibration method to adjust the X-/Y-axis of a cartesian 3D printer with an accuracy of $10\ \mu m$ (Chpt.: F.11)
- Countermeasures of nozzle blockage by *Heat Creep* with installing additional channeled cooling fins, to print highly thermal conductive filaments inside of an enclosure (Chpt.: F.8)
- A novel direct drive extruder with very short filament insert, integrated filament runout sensor, integrated ball joint for interchangeable hotend for both $1,75\ mm$ - and $2,85\ mm$ filaments (Chpt.: F.6)
- A nozzle cleaning system for FDM 3D printing nozzle (Chpt.: F.14)
- A thermally isolated enclosure for FDM 3D printing (Chpt.: F.12).

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In dem folgenden Abschnitt sollen die Beweggründe für diese Arbeit verdeutlicht werden. Diese Ausführungen wurden in [12] veröffentlicht.

Um die nächste Generation der mobilen Kommunikation zu ermöglichen, bedarf es eines neuen Ansatzes des Hardware-Designs. Diese neuen Geräte sollen sich durch eine große Leistungsfähigkeit auszeichnen, die für mehrere Anwendungen geeignet sind, in großer Stückzahl produziert werden können und gleichzeitig kompakt sind. Dies steht jedoch im Widerspruch zu den Möglichkeiten. Die Kombination mehrerer elektrischer Komponenten führt zu meist zu elektromagnetischen Interferenzen (EMV), bedingt durch Induktionen, Kopplungen oder Weiterleitungen. Als Ergebnis dessen wird die Gesamtleistung des Systems reduziert, durch Daten- und Energieverluste, sowie Fehlinterpretationen von logischen Zuständen. Hierbei sei auch zu berücksichtigen, dass Interferenzen auch von einzelnen Komponenten ausgehen können, wie digitalem Rauschen oder Kopplungen durch Antennen. Dieser Effekt wird illustriert in Abb. 2.1 (A), wenn Energieversorgung, Logik (engl.: *integrated chip*, Abk.: IC) und Strahlungselement nahe beieinander liegen. Eine Verbesserung dessen wäre möglich, wenn anwendungsspezifische Gehäuse für jedes einzelne der Bauelemente installiert werden könnten. Der IC erhält hierfür ein Gehäuse, welches passiv bestimmte Frequenzen der EMV isolieren könnten (Abb.: 2.1 (B, 7)), durch eine Kombination von unterschiedlichen Materialien und Geometrien (i.e. Gitternetze, Gradienten, Einprägungen). Als Weiterentwicklung dessen könnte ein weiteres Gehäuse für die Antenne (Abb.: 2.1 (3)) entwickelt werden, welches unterstützend die Abstrahlung passiv fokussieren oder dirigieren würde (Abb.: 2.1 (B, 6)).

Der Bedarf hierfür wird verdeutlicht anhand der technischen Vorgaben von IEC 62132-10 in [13], als Darstellung der Methoden zur Charakterisierung von ICs. So wird verdeutlicht, dass es in der Praxis Limitierungen gäbe die interne und externe Strahlungen voneinander zu isolieren. So werden hierfür Metallkäfige verwendet, wie schirmende Gehäuse oder Koaxialkabel. Ein weiterer neuerer Lösungsansatz hierfür wäre es, eine zusätzliche *Stripline* auf dem IC zu installieren, um somit eine Immunität gegenüber EMV zu generieren. Dieses Konzept schließt somit jedoch zukünftige Weiterentwicklung von der Anwendung aus, wie *Antenna in Chip* (AIC) oder *Antenna in Package* (AIP). Des Weiteren müssen Energiequellen in

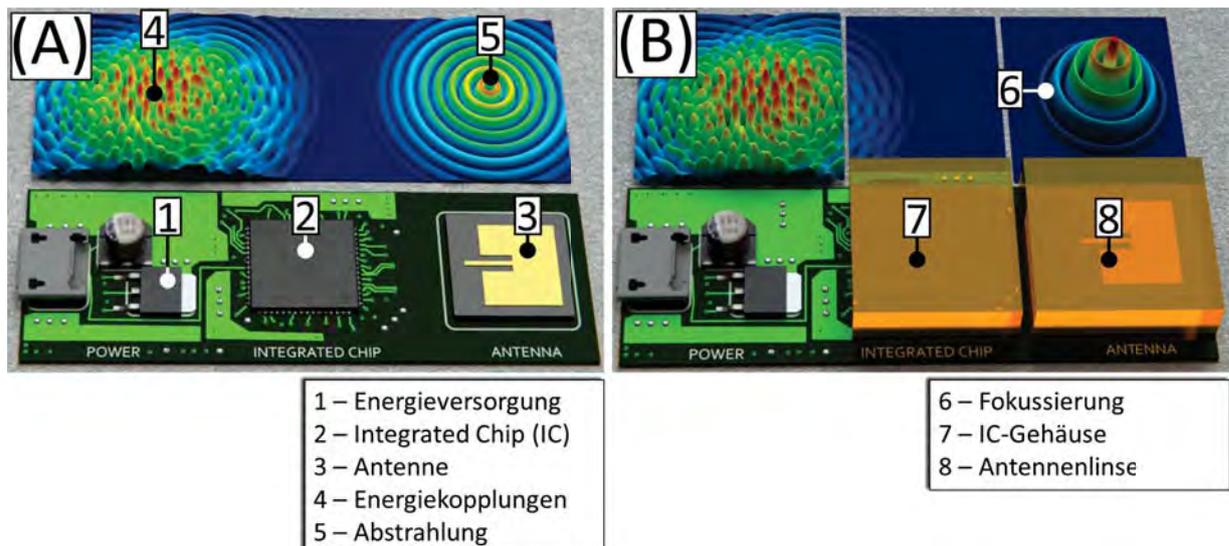


Abbildung 2.1: Theoretische Strahlungscharakteristik anhand einer möglichen Schaltung. (A) Theoretische elektromagnetische Strahlung als Rauschen und schmalbandige Antennenstrahlung, (B) theoretischer Lösungsansatz zur Reduzierung Handhabung vom Rauschen und Antennenstrahlung mithilfe von passiven Filtern

unmittelbarer Nähe zum IC berücksichtigt werden, wie in [14] untersucht worden ist, welche ein beträchtliches Ausmaß an Rauschen generieren durch *Direct Power Injection* (DIP).

Metamaterial

Ein möglicher Lösungsansatz wären Metamaterialien. Diese unkonventionellen Strukturen kennzeichnen sich durch feldformende Eigenschaften aus, wobei in einem spezifischen Verhältnis die relative Permittivität ϵ_r und Permeabilität μ_r kombiniert werden. Auf Grund dieser besonderen Eigenschaften haben Metamaterialien eine große Zahl an Anwendungen, wie bei Antennen, Sensoren oder Absorbern [15].

Durch die Installation von zwei unterschiedlichen umhüllenden Metamaterialien, könnten bestimmte Frequenzbereiche passiv beim IC isoliert und zu einer Antenne dirigiert werden. Dies würde eine Alternative zu bekannten verwendeten Bauteilen sein, wie es in [16, 17, 18] dokumentiert ist.

Besondere Aufmerksamkeit haben hierbei die s.g. *Artificial Magnetic Metamaterials* [19], die zur Feldbeugung des magnetischen Anteils verwendet werden. Hierbei wird berücksichtigt, dass das Magnetfeld weniger Interferenzen unterliegt, da das Substrat sich durch eine höhere Permittivität ϵ_r kennzeichnet. Ein Metamaterial mit diesen Kennzeichen wurde in [20] vorgestellt, wobei zwei Omega-Metamaterialien kombiniert wurden. Dieses *bi-omega*-Bauteil wurde in [21] auf das Zusammenspiel der Komponenten analysiert (Abb.: 2.2 (A)), sowie in Simulationen [22] und Messungen [23]. Die Weiterentwicklungen und Experimente beschränkten sich hierbei lediglich auf das Replizieren mit nur geringen Änderungen [24, 25]. Wie in Abb. 2.2 (B) zu sehen ist, wurden nur zwei Elemente verwendet, um anhand derer das Verhalten zu untersuchen. Wenige Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Kombination mehrerer Elemente, die zu meist nicht über die Analyse hinausgehen [26]. So wurde in Abb. 2.2 (C) eine duale Patchantenne mit diesem Metamaterial kombiniert, jedoch wurde hierbei die falsche Polarisierung des Metamaterials gewählt und es ist nicht eindeutig, wie die Elemente miteinander kombiniert wurden. Die Auswirkung des Arrays gilt es somit näher zu untersuchen.

3D-Druck für HF und Metamaterial

3D-Druck revolutioniert die technische Welt. Dieses Fertigungsverfahren nutzt das schichtweise Verschmelzen von drahtförmigem Rohmaterial (Filament), welches extrudiert und entlang einer Rasterform aufge-

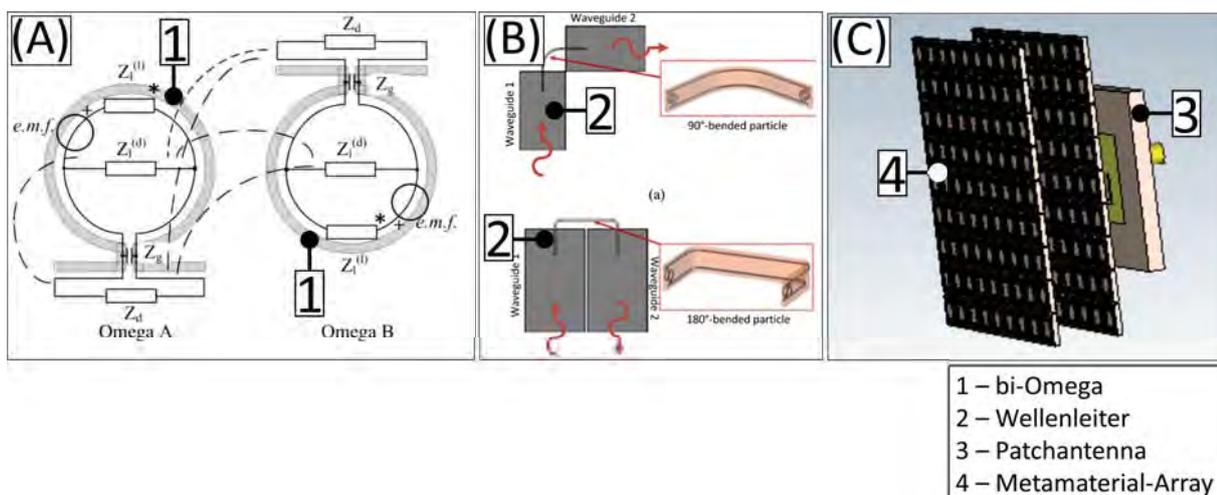


Abbildung 2.2: Verwendete Illustrationen in Veröffentlichung zu bi-Omega-Metamaterialien. (A) Analyse des Metamaterials [21], (B) Verwendung von Metamaterial mit Wellenleiter [25], (C) Simulation von Metamaterial mit dualer Patchantenne in CST [26].

bracht wird. Somit können komplexe Objekt günstig und schnell hergestellt werden, ohne die Notwendigkeit von Fachpersonal oder Spezialgeräten. Dies macht es auch für die Hochfrequenz- und Elektrotechnik besonders interessant, da eine Vielzahl von Testobjekten mittels iterativen Vorgehens erstellt werden können, wobei die Bauelemente hochgradig komplexe geometrischen Strukturen abbilden.

Da bei allen 3D-Druckverfahren thermoplastische Kunststoffe verwendet werden, ist ein wiederkehrender Trend die 3D-gedruckten Bauelemente einer Oberflächenbehandlung zu unterziehen, um somit die gewünschte Metallisierung zu erhalten [27]. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 2.3 (B) dargestellt. Hierbei wurde eine 3D-gedruckter geschlitzter Wellenleiter (Abb.: 2.3 (A)) hergestellt und mittels einer leitenden Oberfläche kombiniert. Auf Grund von mehreren Möglichkeiten, wurde in [28] ein Vergleich von Vakuummetallisierung, Kupferplattierung und metallischem Bemalen aufgestellt (Abb.: 2.3 (D)). Die Ergebnisse dessen sind sehr vielversprechend und zeigten sich als echte Alternative zur käuflichen Vollmetallvariante. Dennoch ist die unvermeidbare Oberflächenrauigkeit hierbei zu beachten, wie in Abb. 2.3 (C) illustriert. Anhand der Nahaufnahme wird das verwendeten Schichtungsverfahren erneut verdeutlicht, wobei die Metallisierung oberflächlich dieses ummantelt.

Zusätzlich zur Metallisierung, werden zunehmend ebenfalls 3D-Drucktechnologie genutzt, die mehrere Materialien simultan verwenden. SLA ist hierbei anhand des mechanischen Aufbaus in der Anzahl der Variationen beschränkt, da der Wechsel nur zwei Materialien zulässt (Abb.: ?? (A)). Die Kombination der Rohstoffe wie in Abb. ?? (B) gestaltet sich zusätzlich schwierig, da die Aushärtung der Objekte mittels UV-Lichts qualitativ vom Bindemittelanteil im Harz abhängig ist [29]. Die Kombination dessen ist materialspezifisch und kann bei großer Differenz zu Spannungen im Material führen, bis hin zum Brechen des Objekts.

Jedoch wird der Bedarf solcher dualen 3D-Drucke anhand von [30] verdeutlicht, wobei mit verschiedenen Metamaterialien experimentiert wurde und eine Variation der verschiedenen Metallisierungsarten von [28] festgestellt wurde. Die betrachteten Metamaterialien wurden hierbei für eine Frequenz von $2,4\text{ GHz}$ getestet und zeigten eine Fluktuation in den Ergebnissen, welche diese ungeeignet für höhere Frequenzbereiche machen würde und somit die zukünftige Generation der Mobilkommunikation.

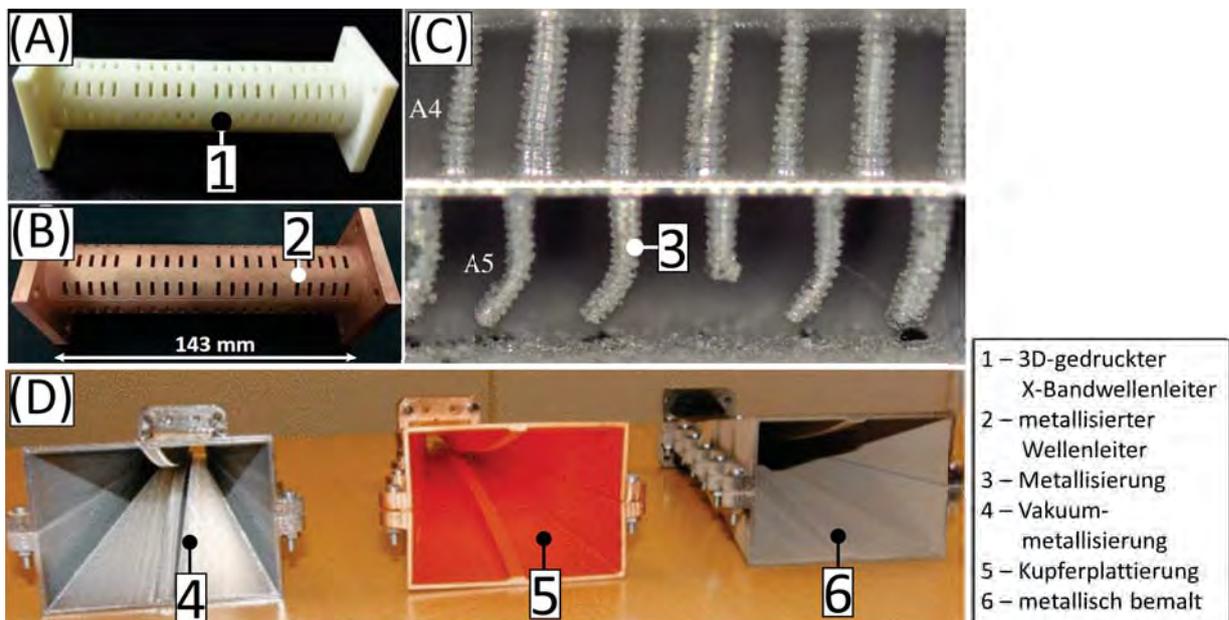


Abbildung 2.3: Metallisierungen von 3D-gedruckten Bauteilen. (A) 3D-gedruckter X-Bandwellenleiter [31], (B) metallisierter X-Bandwellenleiter [31], (C) Nahaufnahme von Metallisierung von 3D-gedruckter Probe [32], (D) Vergleich von verschiedenen Metallisierungsarten von 3D-gedruckten Hornantennen [28].

3 Weiterentwicklungen und Beitrag dieser Dissertation

Anhand der Art der Verwendung von 3D-Druck für Hochfrequenzanwendung ist zu erkennen, dass weiterhin die bekannten Strukturen aus der Theorie abgebildet werden sollen. Hierbei ist weiterhin ein Interesse für Strukturen zu erkennen, die Richtungsänderung, Bündelung oder Feldumformung der elektromagnetischen Welle erzielen sollen. Aus diesem Grund sollen in dieser Arbeit die unterschiedlichen Möglichkeiten dieser physikalischen Änderungen betrachtet werden. Das Konzept der *Metamaterialien* soll hierfür näher untersucht werden, um einen Einblick in die Einsetzbarkeit zu erhalten.

Hornantennen sind häufig eingesetzte Komponente in der Hochfrequenztechnik, um eine definierte gerichtete Feldverteilung zu erzeugen. Die Gemeinsamkeit bei den 3D-gedruckten Varianten aus Abb. 2.3 (D) ist, dass der Rohstoff die Eigenschaften eines elektrischen Leiters imitieren soll. Als Referenz dient hierfür eine metallische Hornantenne. Mithilfe der verwendeten Polymere wäre es jedoch möglich ein größeres Spektrum an unterschiedlichen Eigenschaften zu kreieren, die ebenfalls die Feldausbreitung zusätzlich beeinflussen könnten. Mithilfe der Kombination von unterschiedlichen Materialien könnte dieser Effekt gesteuert werden. Die Möglichkeit dieser Idee und die Auswirkung auf das hochfrequente Feld werden im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht.

Die Kombination von mehreren Rohstoffen würde gleichzeitig die Möglichkeit eröffnen, einen materialabhängigen Gradienten einzubinden. Hierfür könnte die Materialverteilung in einer Struktur während der Verarbeitung verändert werden, um so eine Einprägung zu ermöglichen. In dieser Arbeit wird dieser Frage nachgegangen und ein Herstellungsverfahren dafür entwickelt.

Speziell bei der Metallisierung der 3D-Drucke ist zu erkennen, dass von dem gefertigten Objekten Ergebnisse erwartet werden, wie von einer Vollmetallvariante. Dieses ist jedoch nicht möglich. Stattdessen ist der Autor dieser Arbeit davon überzeugt, dass der größte Vorteil von 3D-Drucken in FDM ist, mehrere Materialien zu verwenden. Dies ermöglicht es mit Strukturen zu experimentieren die mehrere Eigenschaften frequenzabhängig ineinander zu vereinen, da diese nun nicht mehr alleine an die geometrische Auslegung der Struktur allein gebunden sind, sowie den bekannten Randbedingungen des Nichtleiters und des Leiters. Als Beispiel sei hierfür auf die Abb. 3.1 (A) verwiesen, wo die Silhouette eines theoretischen Stehwellenverhältnisses dargestellt worden ist. Mittels des 3D-Druckverfahrens wäre es denkbar diese Geometrie dreidimensional abzubilden und auf einer Patchantenne als Messobjekt zu platzieren, um so auf das Verhalten zurückzuschließen (Abb.: 3.1 (B, 1)). Gleichzeitig würde innerhalb dieses Objektes

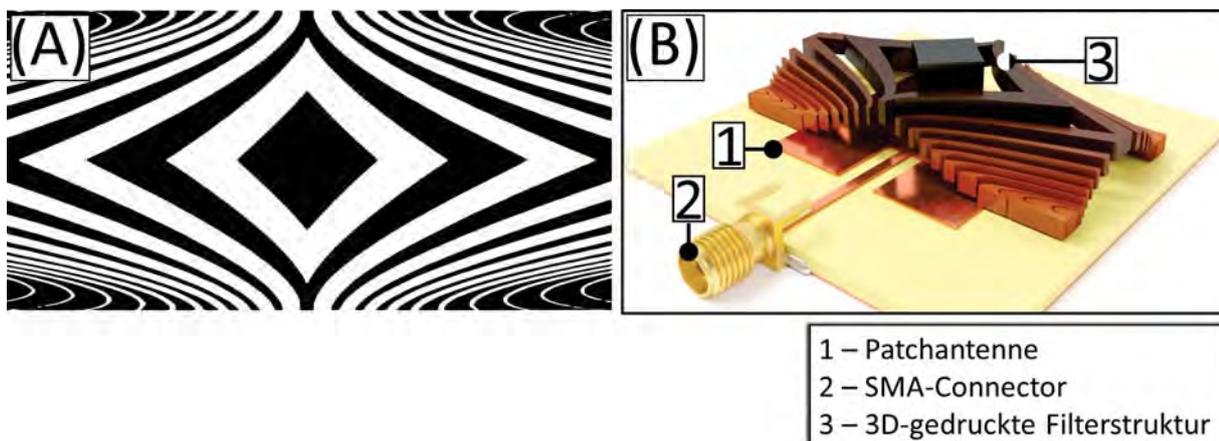


Abbildung 3.1: Theoretische Filterstruktur die mittels 3D-Druck erstellt werden könnte. (A) Stehwellenverhältnis anhand von diamantförmiger Silhouette, (B) theoretische Kombination von gedruckter Struktur von Silhouette, mit eingebautem Materialgradienten, um es mit einer Patchantenne zu verwenden.

ein Materialgradient integriert werden, der unterschiedliche Feldformungen generiert und damit charakteristische Eigenschaften eines Metamaterials aufweisen würde. Wie anhand der Vorbetrachtungen gezeigt wird, sind zum Zeitpunkt der Entwicklung dieser Arbeit solche Überlegungen noch nicht getätigt worden. Obwohl mehrere Verfahren existieren, ist der Autor dieser Arbeit überzeugt, dass FDM die größten Vorteile für die Umsetzung des Vorhabens dieser mit sich bringen wird. Attraktiv ist hierbei die einfache Verarbeitung (e.g. Erhitzen, Positionieren, Abkühlen), die eine direkte Anwendung ermöglicht, ohne es zusätzlich nachbearbeiten zu müssen (e.g. Aushärtungsvorgang bei SLA, engl.: *curing*). Außerdem ist wegen der einfachen Mechanik des FDM-Druckers möglich viele Komponenten hinzuzufügen, so wie es in dieser Arbeit vorgestellt wird.

FDM erlaubt es außerdem dem Trägermedium zusätzliche Rohstoffe hinzuzufügen, wobei der Anteil dem von SLA um ein Vielfaches übersteigen kann, da es nicht von der Notwendigkeit abhängig ist mittels UV-Licht das Objekt nach der Herstellung aushärten zu müssen [33]. Diese unterschiedlichen Rohstoffe müssen lediglich dem thermoplastischen Material beigefügt werden.

Somit wird es möglich 3D-Drucke zu erstellen die neuartige Metamaterialien sind und die gleichzeitig nicht nur auf eine äußere Metallisierung beschränkt sind, wie es aus der aktuellen Literatur bekannt ist.

Zusammengefasst sind die Hauptbeiträge dieser Arbeit dem Abschnitt 1.3 zu entnehmen. Dort werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren und notwendig gewordenen Weiterentwicklungen aufgelistet.

4 Metamaterial

4.1 Modellbildung und 3D-Simulation von Metamaterialien

Basierend auf den Betrachtungen von Kapitel 4 wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes Metamaterial entwickelt. Das Ziel war es mittels dieser Komponente das elektromagnetische Feld zu fokussieren, um so eine Antenne bei der Signalübertragung zu unterstützen. Darauf soll im Detail im folgenden Abschnitt eingegangen werden.

4.1.1 Omega als Metamaterial

Wie im Kpt. D näher erläutert wurde, wirkt beim Metamaterial die passive Komponente durch magnetische Feldentwicklung der materialbedingten Permittivität ε_r entgegen. Für diese Arbeit wurde das Interesse auf ein s.g. Omega-Metamaterial gerichtet [34, 35, 36], dessen Geometrie äquivalent dem griechischen Buchstaben ist. Zerlegt man dieses Symbol in seine Bestandteile und überträgt es auf die Grundbausteine der Feldtheorie ([37, S. 47-48]), so sind drei Komponenten vorhanden, der Ringresonator (Abb.: 4.1 (A, 16)), der Dipol (Abb.: 4.1 (A, 18)) und eine Verbindungsleitung zwischen diesen Teilen (Abb.: 4.1 (A, 17)). Dieser Zusammenschluss an Bauelementen, in seiner Gesamtheit, wird an der y-Achse gespiegelt auf der Rückseite eines Substrats (Abb.: 4.1 (B, 9, 10)). Das hochfrequente Verhalten dessen soll nun betrachtet werden. Zur Untersuchung dessen wird sich der Finite-Elemente-Methode (Abk.: FEM, Kpt.: B.2) mittels HFSS (Kpt.: B.3) bedient, wobei das Testobjekt in eine berandende *Airbox* (Abb.: 4.1 (E, 15)) eingebracht wird. Diese *Airbox* wird mit zwei Energiequellen (s.g. *Ports*, Abb.: 4.1 (E, 13, 14)) versehen, die sich auf den jeweils gegenüberliegenden Seiten befinden. Die induzierte Energie wird hierbei anhand eines vom Nutzer festgelegten Frequenzspektrums f in der Wellenlänge λ verändert, um so spezifische Eigenschaften extrahieren zu können. Um auf dieses Ergebnisse rückzuschließen, bedient man sich der Streuparameter (Abk.: *S-Parameter*), die das Kleinsignalverhalten mittels Wellengrößen angeben. Hierbei ist es wichtig, dass die Betrachtung unter Berücksichtigung des Ausschlussprinzips erfolgt und dass der Betrachtungsraum selbst nicht mit den Ergebnissen der zu beobachteten Struktur interagiert. HFSS bietet hierbei die Möglichkeit die Randbedingung spezifisch so zu definieren, dass beispielsweise eine Transmission, Reflektion oder Absorption ([37, S. 245-254]) stattfinden kann. Für die Betrachtung des Omega-Metamaterials soll die gesamte Energie transmittiert werden. Wie im Eingang dieser Betrachtungen festgestellt, bestehen die zu untersuchenden Strukturen aus denen aus der Feldtheorie bekannten Grundbausteinen. Der Ringresonator (Abb.: 4.1 (A, 16)) wird auch als Leiterschleife bezeichnet und generiert somit einen magnetischen Feldanteil [38, S.80-82], sowie Gegeninduktionen auf anliegenden Leitern. Um dieses zu vermeiden, wurde die Ober- und Unterseite der *Airbox* als Perfekt-Magnetischer-Leiter (engl.: *Perfect Magnetic Conductor*, PMC) definiert (Abb.: 4.1 (D, 12)). Basierend auf dem *poyntingsche Strahlungsvektor* \vec{S} (D.1), ist eine Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen nur dann gegeben, wenn die Feldanteile \vec{E} und \vec{H} orthogonal zueinander stehen. Folglich wurden die seitlichen Randbedingung der Airbox als Perfekt-Elektrischer-Leiter (engl.: *Perfect Electric Conductor*, PEC) gewählt (Abb.: 4.1 (C, 11)). Auf diese Weise wird gleichzeitig gewährleistet, dass die Energiequellen Port 1 und Port 2 (Abb.: 4.1 (E, 13, 14)) das elektrisch gleiche Potential φ besitzen.

Zur Verifizierung dieser angewandten Methode, wurden vergleichende FEM-Simulationen erstellt. Hierbei mehrere Vergleiche erstellt, in denen die Randbedingungen der Airbox invertiert wurde, sowie Positionsänderung des Omega-Metamaterials. Hierbei stellte das Metamaterials seine Funktion ein. Folglich wurde mit der beschriebenen weiterverfahren.

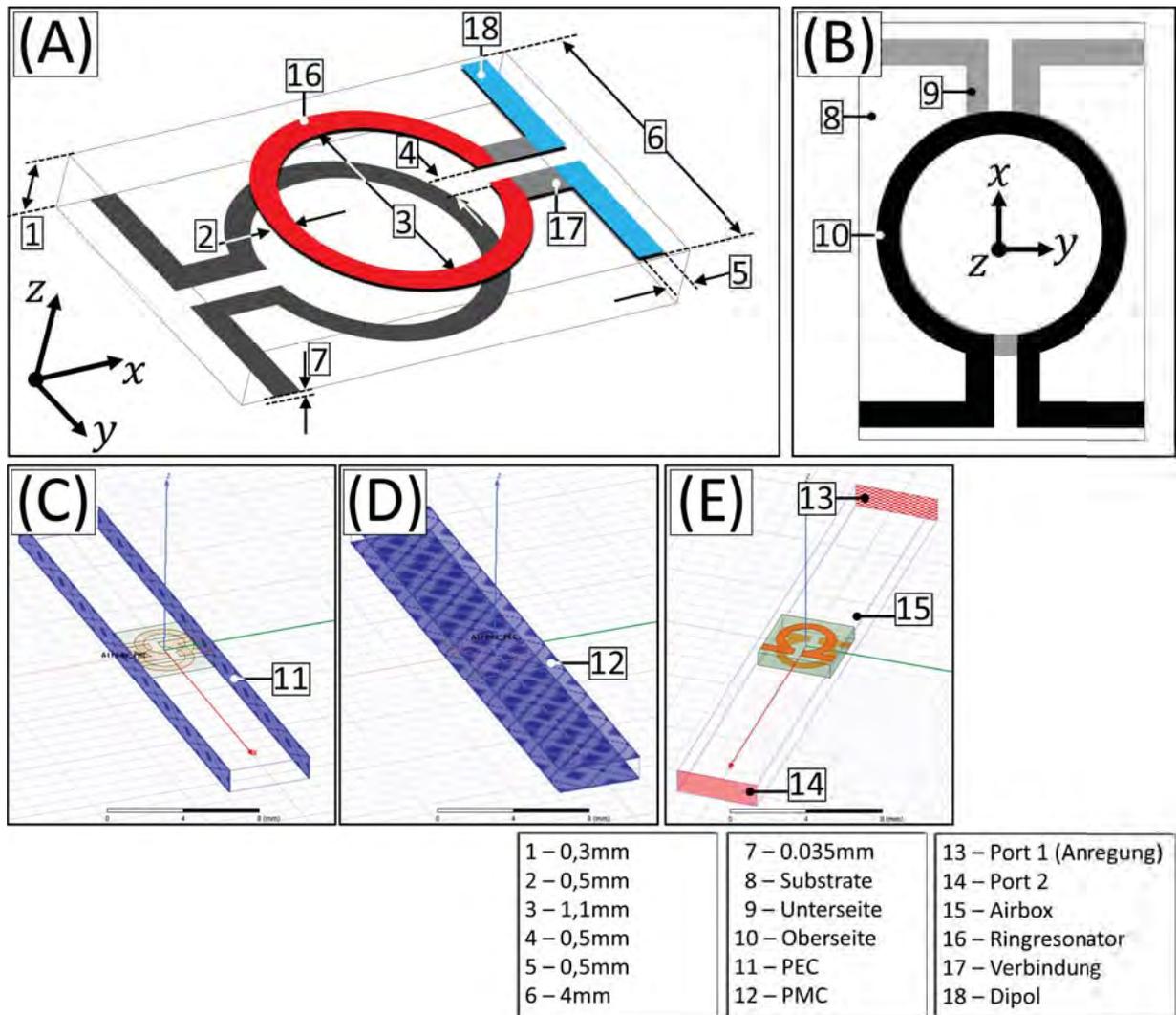


Abbildung 4.1: Zusammensetzung des Omega-Metamaterials und Simulation in HFSS. (A) Dimensionen und Bestandteile, (B) Draufsicht mit Komponenten, (C) Airbox mit PEC-Randbedingung, (D) Airbox mit PMC-Randbedingung, (E) Airbox mit Omega-Material und Portverteilung.

Tabelle 1: Gewählte Einstellungen für Simulation des Omega-Metamaterials in HFSS

Kategorie	Unterkategorie	Einstellung
Solution Type		Modal
Frequency Sweep	Type	Discrete
	Start	4 GHz
	Stop	16 GHz
Convergency	Step	250 MHz
	Frequency	13 GHz
	ΔS	0,02
	Min. Converged Passes	3

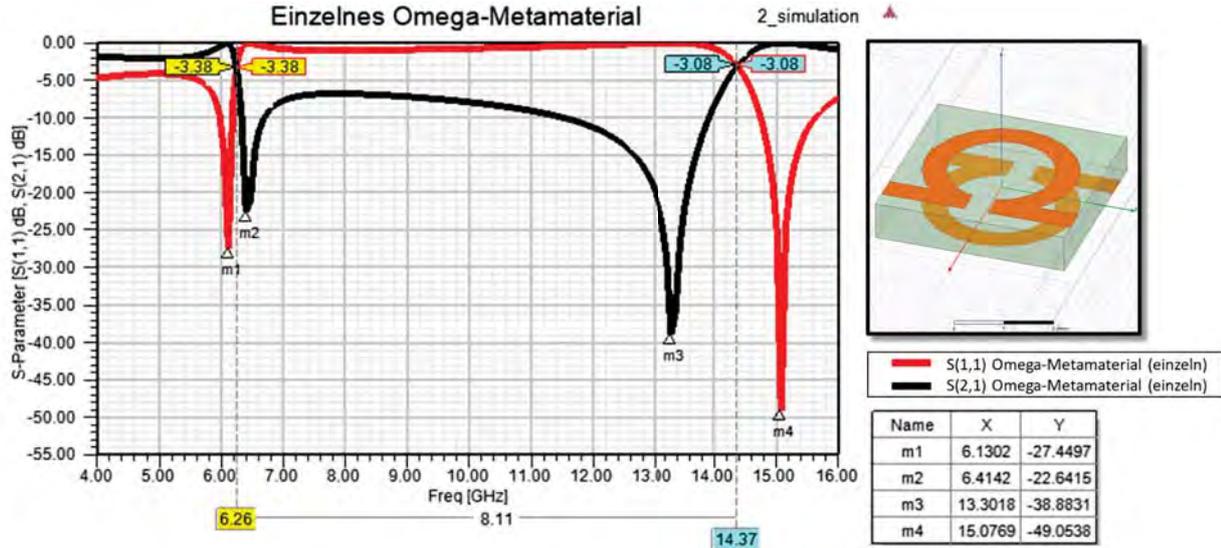


Abbildung 4.2: Simulationsergebnisse der S-Parameter $S(1,1)$ und $S(2,1)$ aus HFSS für ein einzelnes Omega-Metamaterial anhand des Simulationsaufbaus von Abb. (4.1, E) mit zugehörigen Ports.

Die verwendeten Einstellungen für diese Simulation in HFSS sind der Tab. 1 zu entnehmen. Als Simulationstyp wurde der Modus *Modal* verwendet, wobei jeder der berechneten Frequenzpunkte diskret ermittelt wurde und dadurch einen geringeren Fehlerquotienten gewährleistete. Die verwendete Konvergenzfrequenz (engl.: *Convergency Frequency*) wurde anhand der Vorberechnung des Omega-Metamaterials verwendet. Als Nutzfrequenz wurde für das Omega-Metamaterial $13,5 \text{ GHz}$ festgelegt, wobei ein Resonator mit halber Wellenlänge verwendet wird. Da zu diesem Zeitpunkt das verwendete Substrat noch nicht feststand, wurde so FR4 angenommen mit $\epsilon_r = 4$. Es wurde davon ausgegangen, dass der Strom i eine Wegstrecke von 11 mm umfassen würde. Wie in D.4 erläutert, wurde somit die resultierende Nutzfrequenz ermittelt.

$$f = \frac{\left(\frac{c}{\lambda_{eff, \epsilon_r}}\right)}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{(2.99 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) / 11 \text{ mm})}{\sqrt{4}} \approx 13,5 \text{ GHz} \quad (4.1)$$

Die Dimensionen für das Omega sind der Abb.: 4.1 (A) zu entnehmen, die empirisch ermittelt wurden. Hierfür wurde das Verhalten und die resultierende Einflüsse der einzelnen Komponente betrachtet, um zwei nahe beieinanderliegende Resonanzen zu erhalten (Abb.: 4.2). Wie der Abb. 4.2 zu entnehmen ist, erfolgt dies bei $m_1 = 6,1 \text{ GHz}$ und $m_2 = 6,4 \text{ GHz}$ ($\Delta m_{12} = 300 \text{ MHz}$), sowie bei $m_3 = 13,3 \text{ GHz}$ und $m_4 = 15 \text{ GHz}$ ($\Delta m_{34} = 1,7 \text{ GHz}$). Hierbei ist zu erkennen, dass in einem Bereich von $8,11 \text{ GHz}$ die Transmission ($S(2,1)$) um -7 bis -40 dB reduziert wird. Folglich ist davon auszugehen, dass die vorgestellte Struktur die EMW beeinflusst und deckt sich mit den Beobachtungen aus den Quellen [22, 23, 24]. Um die Art der Veränderungen zu ergründen, müssen die Feldverteilungen betrachtet werden.

Die Feldverteilung des einzelnen Omega-Materials ist der Abb. 4.3 zu entnehmen, wo als Vektorrichtung (\vec{E} , \vec{H}), prägnanten Phasenpunkten φ , sowie den Beträgen der Felder ($|\vec{E}|$, $|\vec{H}|$) angegeben sind. Die Felder werden anhand der Frequenzen $6,2 \text{ GHz}$ und $14,3 \text{ GHz}$ betrachtet, die die Schnittpunkte der Verläufe von $S(1,1)$ und $S(2,1)$ aus Abb. 4.2 sind. Wie in der Vorbetrachtung von Kpt. D dargestellt, ist das Merkmal von Metamaterial eine Phasenänderung der EMW zu bewirken. Wie in Abb. 4.3 (A) bei $6,2 \text{ GHz}$ zu erkennen, erfolgen bei $\varphi_{6,2} = 30^\circ$ und $\varphi_{6,2} = 210^\circ$ ein Phasenwechsel in y -Richtung. Bei beiden Elementen erfolgt dies an der Unterseite des Omegas, wobei sich anhand dieses Feldbilds dessen Herkunft nicht genau herleiten lässt. Weiterführend sei die magnetische Feldverteilung \vec{H} in Abb. 4.3 (B) bei $6,2 \text{ GHz}$ zu betrachten, für $\varphi_{6,2} = 30^\circ$ und $\varphi_{6,2} = 210^\circ$, wobei der Phasenwechsel deutlich wird.

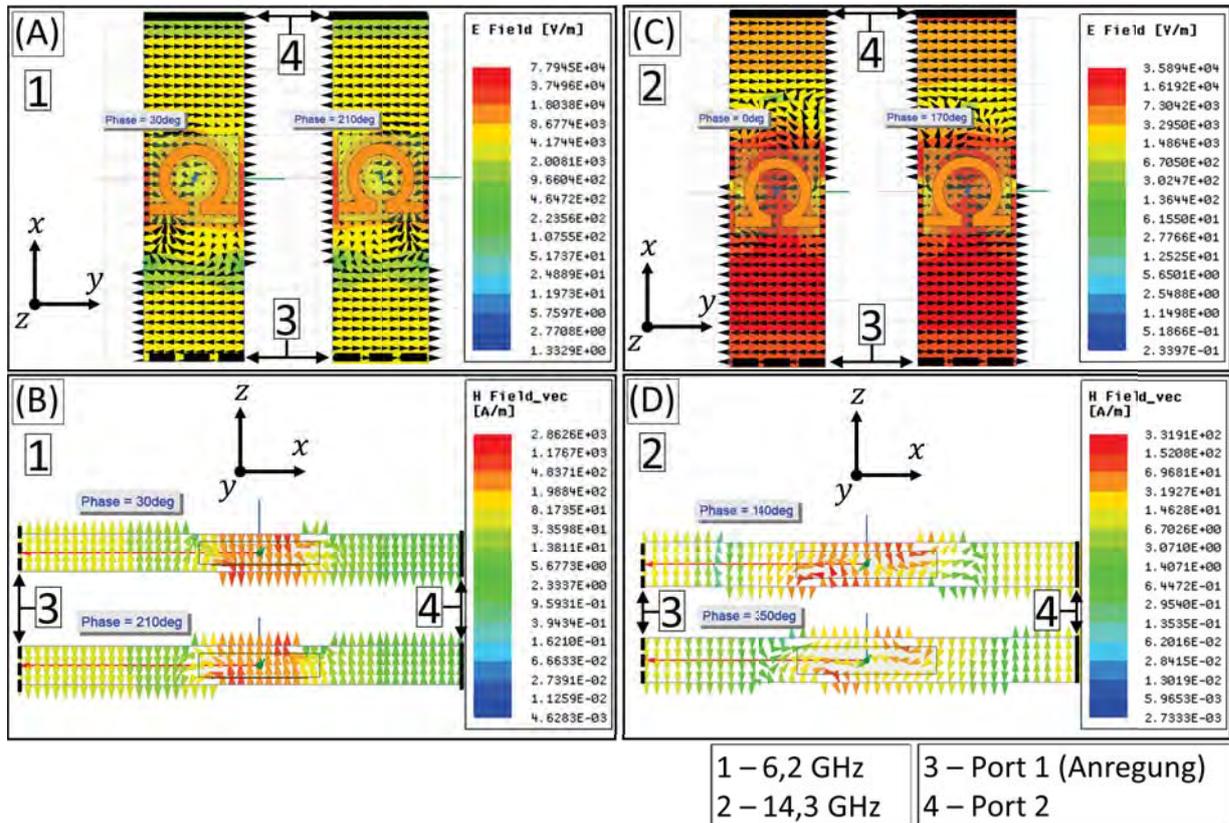


Abbildung 4.3: Felddarstellungen für Omega-Metamaterialien von Betrag, Phase und Richtung, (A) Draufsicht mit \vec{E} -Feld bei $6,2\text{ GHz}$, (B) Seitenansicht mit \vec{H} -Feld bei $6,2\text{ GHz}$, (C) Draufsicht mit \vec{E} -Feld bei $14,3\text{ GHz}$, (D) Seitenansicht mit \vec{H} -Feld bei $14,3\text{ GHz}$.

Erkennbar hierbei ist die Kopplung vom oberen Omega zum unteren Omega [38, S. 78-79]. Gleichzeitig findet dieses diagonal statt, was durch den Versatz des Dipolelements bedingt ist.

Vergleichend dazu die Betrachtung in Abb. 4.3 (C) bei $14,3\text{ GHz}$, hierbei ist die Phasenänderung $\varphi_{14,3} = 0^\circ$ und $\varphi_{14,3} = 170^\circ$ zu erkennen, wobei die Verwirbelung des elektrischen Feldes im oberen Teil des Omegas stattfindet. Verdeutlicht wird dieser Effekt anhand der magnetischen Feldverteilung \vec{H} in Abb. 4.3 (D), wobei das Maximum der Feldstärken auf der Ober- oder Unterseite der Struktur angesiedelt ist. Gleichzeitig ist eine Drehung der Phase um die y -Achse zu erkennen.

Diese Betrachtung verdeutlicht die Funktion dieses Omega-Materials. Obwohl innerhalb dieses Aufbaus es nicht gelang, wie in Kpt. D dargestellt, eine interaktionsfreie Transmission zu realisieren, so konnte mit dieser Omega-Struktur eine Änderung an der Feldverteilung bewirkt werden, die es für weitere Betrachtungen attraktiv macht. So kann davon ausgegangen werden, dass die Kopplung zwischen den beiden Elementen geometrieabhängig ist und so durch unterschiedliche Kombinationen dessen verändert wird. Mit der hier betrachteten Struktur kann eine Absorption der induzierten Energie bewirkt werden.

4.1.2 Omega-Metamaterial als Array

Basierend auf der Vorbetrachtung von Kpt. 4.1.1 soll nun das Omega-Metamaterial als Array ausgebaut werden. Hierbei sollen mehrere der Elemente miteinander kombiniert werden, um so ein neues und gewünschtes Verhalten zu bewirken. Die zwei wichtigen Teilinformationen der Vorbetrachtungen waren es, dass eine Richtungsänderung anhand des Phasenwechsels erzeugt werden kann, sowie eine Kopplung in Abhängigkeit der Auslegung der Spiegelstruktur. In diesem Abschnitt soll nun darauf eingegangen werden, wie sich das Verhalten auswirkt, würde die effektive Wellenlänge λ_{eff} in der Struktur erhalten bleiben, aber dafür die geometrische Auslegung verändert. Auf diese Weise könnten die beiden nahe beieinanderliegenden Resonanzen konserviert werden (vgl. Abb. 4.2), die Kopplungen justiert und die Abstrahlung verändert werden. Das Vorgehen hierfür wurde in Abb. 4.4 (B) visualisiert. Das Omega-Metamaterial besitzt die Bestandteile des Dipols (Abb.: 4.4 (A, 3)), des Ringresonators (Abb.: 4.4 (A, 1)) und einem verbindendem Element zwischen diesen (Abb.: 4.4 (A, 2)). Diese drei Größen wurden so verändert, dass zum einen der Umfang des Ringresonators vergrößert wurde und zum anderen parallel dazu der Dipol proportional verkleinert wurde (Abb.: 4.4 (B, 4)). Auf diese Weise werden in dieser Struktur nun die magnetischen Feldanteile bevorzugt induziert. Analog dazu wurde eine zweite Variante erstellt, mit verlängerter Dipolarmlänge und einem proportional verkleinerten Ringresonator (Abb.: 4.4 (B, 6)).

In dem daraus generierten gestapelten Aufbau (Abb.: 4.4 (C)) wurde der Teil mit dominantem Ringresonatoranteil (Abb.: 4.4 (B, 4), Abk.: $R1$) an den Rändern des Aufbaus positioniert. Der Teil mit dominantem Dipolanteil (Abb.: 4.4 (B, 6), Abk.: $R9$) wurde einzeln im Zentrum positioniert. Wie innerhalb des Aufbaus von Abb. 4.4 (C) visualisiert, wurden die Bestandteile des Omega-Resonators so transformiert, so dass die Größen der Komponenten wieder die Form des ausgeglichenen Omega-Materials annehmen (Abb.: 4.4 (B, 5), Abk.: $R5$). Die getätigten Größenveränderungen sind hierfür der Abb. 4.4 (D) zu entnehmen. Erkennbar ist hier, dass der Innendurchmesser (Abb.: 4.4 (D, 7)) von 3 mm (Reihe $R1$) auf $0,6\text{ mm}$ (Reihe $R9$) verkleinert wird. Gleichzeitig erfolgt die Vergrößerung der Armlänge des Dipols (Abb.: 4.4 (D, 10)) von $0,5\text{ mm}$ (Reihe $R1$) auf $0,7\text{ mm}$ (Reihe $R9$)¹. Zusätzlich zu diesen Hauptbestandteilen wurden ebenso die Leitungsbreite (Abb.: 4.4 (D, 8)) verändert, die schmaler für $R1$ ($0,09\text{ mm}$) und breiter für $R9$ ($0,3\text{ mm}$) gewählt wurde. Ebenso wurde der Spalt (Abb.: 4.4 (D, 9)) schmaler für $R1$ ($0,59\text{ mm}$) und breiter für $R9$ ($0,092\text{ mm}$) gewählt. Gleichzeitig wird die Verbindungslänge vergrößert von $R1$ mit $0,065\text{ mm}$, zu $R9$ mit $0,75\text{ mm}$. Diese Größenänderung folgen einem Funktionsverlauf von $f(x) = x^2$. Wie der Abb. 4.4 (C) zu entnehmen ist, erfolgt diese Transformation gespiegelt an der x -Achse.

Das vorgestellte Konzept wurde mit diesen Dimensionen mittels HFSS simuliert (Abb.: 4.5). Die Randbedingung für diese Simulation wurden von der Vorbetrachtung (Kpt.: 4.1.1) übernommen, wobei die Seitenwände als PEC definiert wurden und die Oberseiten als PMC. Aus der Draufsicht von Abb. 4.5 (A) ist zu erkennen, dass der Struktur ein zusätzlicher Versatz gegeben wurde. Der Übergang von Ringresonator zu Verbindungselement wird vom Ursprung repräsentiert, wobei dies zu einer verbesserten Kopplung führt.

Bei dem verwendeten Substrat handelt es sich um *Rogers 4030B*[39] mit einem $\epsilon_r = 3,66$, $\tan_{\Delta} = 0,0037$ und einer Stärke von $0,381\text{ mm}$. Dieses Substrat wurde gewählt, da es beim Leiterplattenhersteller *Multi-CP* verfügbar war.

¹Es handelt sich hierbei um eine Armlänge des Dipols, die die Hälfte des gesamten Dipols darstellt, ohne den Spalt (Abb.: 4.4 (D, 9)) einbezogen.

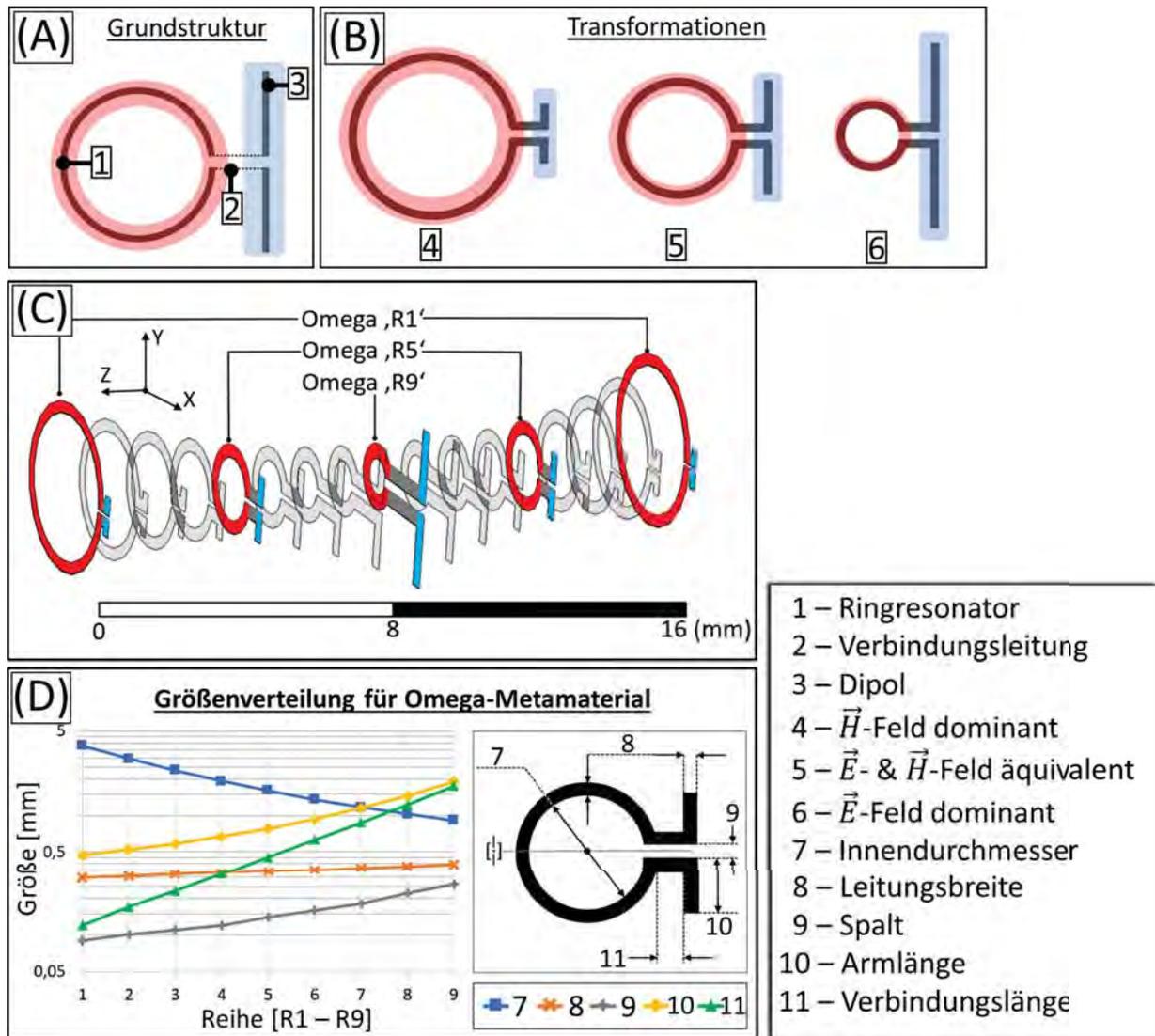


Abbildung 4.4: Variation der Struktur des Omega-Materials. (A) Zusammensetzung der Einzelbestandteile von Dipol und Ringresonator, (B) Veränderung der Dimensionen von Dipol und Ringresonator entsprechend der gewünschten Feldverteilung, (C) zusammengesetztes Array von Omega-Metamaterial, bestehend aus 19 Elementen und variierender Dimensionen, (D) Veränderungen der Dimensionen, abhängig von der Position des Omega-Metamaterials im Array.

Tabelle 2: Gewählte Einstellungen für Simulation des gestapelten Omega-Metamaterials in HFSS

Kategorie	Unterkategorie	Einstellung
Solution Type		Modal
Frequency Sweep	Type	Discrete
	Start	12 GHz
	Stop	16 GHz
	Step	50 MHz
Convergency	Frequency	12,75 GHz
	ΔS	0.015
	Min. Converged Passes	2

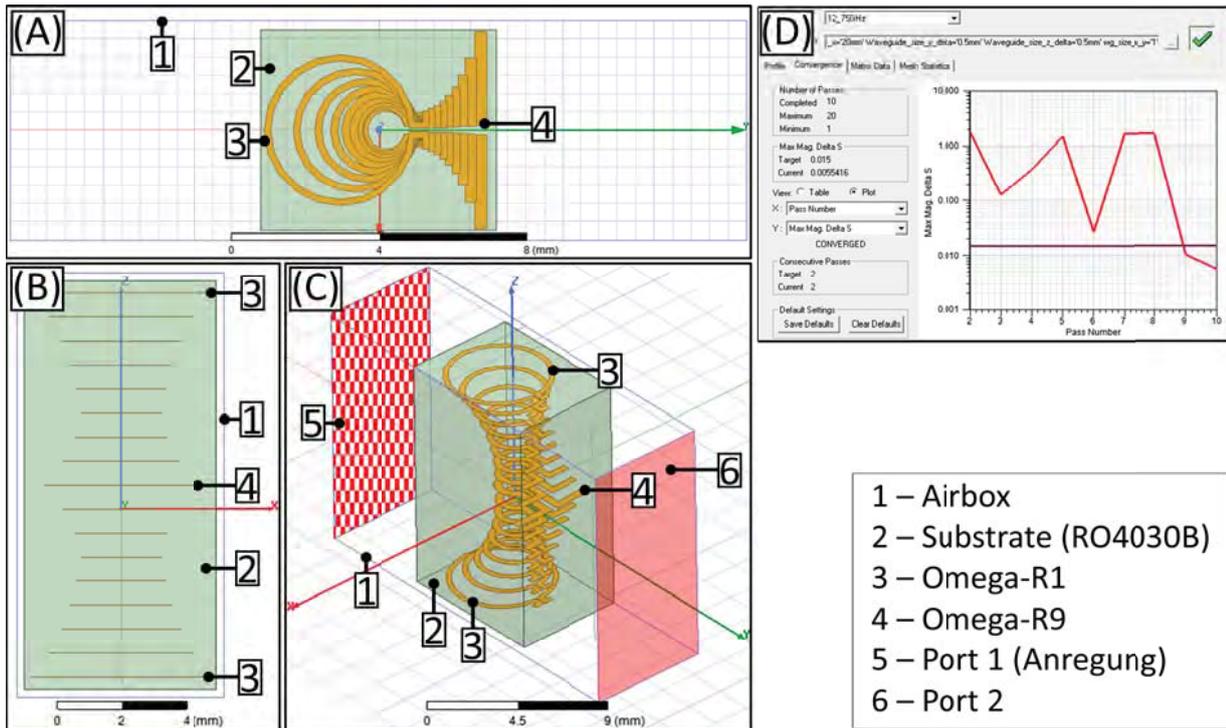


Abbildung 4.5: Omega-Metamaterial gestapelt als Simulationsaufbau in HFSS. (A) Draufsicht mit Komponenten, (B) Vorderansicht mit Komponenten, (C) Schrägansicht mit Airbox, Ports und Komponenten, (D) Konvergenzkriterium in HFSS.

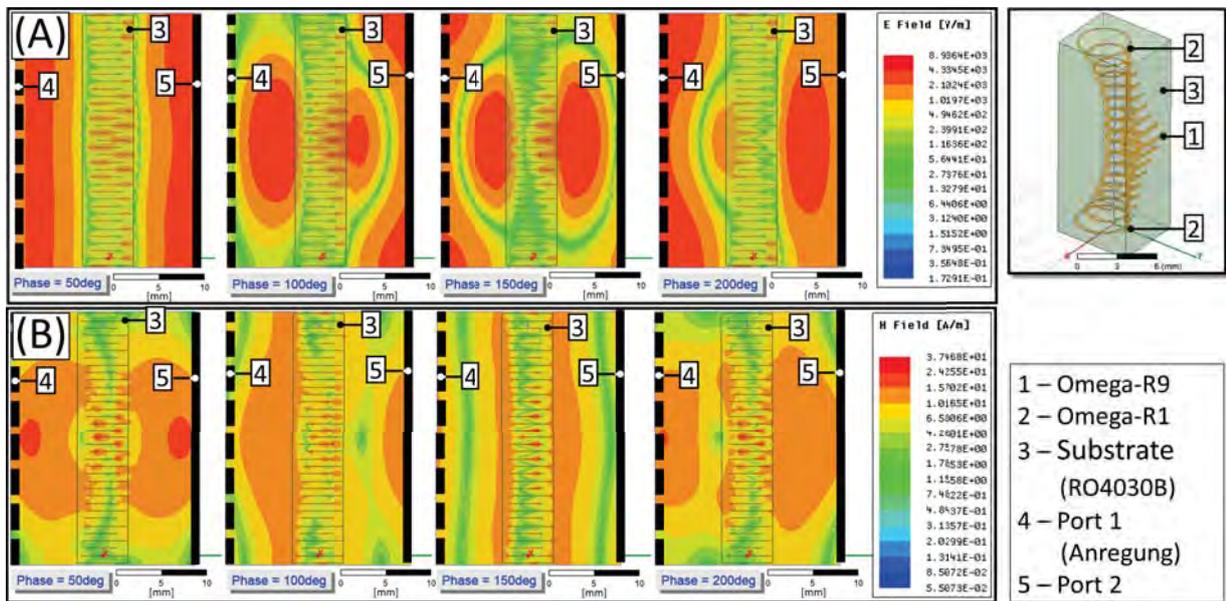


Abbildung 4.6: Seitenansicht der Feldverteilung im simulierten Omega-Metamaterial (gestapelt, transformiert) in HFSS. (A) $|\vec{E}|$ -Feld von $\varphi = 50^\circ$ bis $\varphi = 200^\circ$, (B) $|\vec{H}|$ -Feld von $\varphi = 50^\circ$ bis $\varphi = 200^\circ$.

In der Simulation wurde das Substrat als ein homogenes Objekt angenommen (Abb.: 4.5 (B), (C)). Grund hierfür war es, dass die Komplexität der Struktur die Simulationszeit signifikant verlängerte. Um dem entgegen zu wirken, wurden ebenfalls die Simulationskriterien angepasst (Tab. 2). Der Betrachtungsbereich wurde verkleinert auf 12 bis 16 GHz. Als Konvergenzfrequenz wurde 12,75 GHz gewählt, wobei mindestens zwei Berechnungen $\Delta S < 0,015$ erfüllen müssen. Wie der Abb. 4.5 (D) zu entnehmen, wurde diese Vorgaben nach zehn Iterationen erreicht.

Anhand von Abb. 4.5 werden die S-Parameter des gestapelten Omega-Metamaterials dargestellt. Vergleicht man diesen Graphen mit dem von Abb. 4.2, so ist im Graphen von Abb. 4.5 (A) nun eine ausgeprägte Resonanz bei 14,8 GHz mit -40 dB ($S_{1,1}$) zu erkennen. Ebenfalls prägnant sind die doppelt vorkommenden, nahe beieinander liegenden Resonanzen bei 13,5 GHz und 15,75 GHz, wie es ebenfalls im Graphen aus Abb. 4.2 zu erkennen war. Die Transmission $S_{2,1}$ (Abb.: 4.5 (A)) ist verlustarm von 13,32 bis 15,36 GHz mit < -1 dB. Im Detail wird in diesem Frequenzbereich 85 bis 99% der induzierten Energie transmittiert (Abb.: 4.5 (B)), trotz der eingebrachten Struktur. Eine Betrachtung der Felddbilder ist in diesem Frequenzbereich dadurch notwendig.

Die Effekte der Transmission $S_{2,1}$ wurden in der Abb. 4.6 dargestellt. Betrachtet man die elektrische Feldverteilung anhand der Abb. 4.6 (A, $\varphi = 50^\circ$), so ist die planare Welle zu Beginn zu erkennen. Bei Abb. 4.6 (A, $\varphi = 100^\circ$) ist eine Beugung dessen zu erkennen, wobei das Feld in eine Sphere transformiert. Die erzeugte Kopplung der Elemente in der Struktur bewirken die Transmission der Sphere, wobei diese auf die gegenüberliegende Seite übertragen wird (Abb.: 4.6 (A, $\varphi = 150^\circ$)). Es erfolgt eine Weitergabe des Feldes auf die rechte Seite des Omega-Materials, welche als Ergebnis eine Sphere abbildet (Abb.: 4.6 (A, $\varphi = 200^\circ$)). Analog dazu sind die Felddbilder für das magnetische Feld, mit den zugehörigen Phasenpunkten in Abb. 4.6 (B) dargestellt. Auch hier ist die sphärische Feldumformung zu erkennen, wobei die $|\vec{H}|$ -Feldstärke hierbei jedoch um eine vielfaches geringer ausgeprägt ist, als die des $|\vec{E}|$ -Feldes.

Abhängig von der Transformationsart des Omega-Metamaterials, werden andere Feldanteile angeregt (Kpt.: 4.1.1). Die äußersten Elemente (Abb.: 4.7 (A, 5)) werden vom magnetischen Feld \vec{H} angeregt, wobei ein Wirbelfeld mit bestimmter Polarität entsteht. Sollte das obere Omega-R1 (Abb.: 4.7 (A, 5)) einen Wirbelstrom gegen den Uhrzeigersinn (engl.: Counterclockwise, CCW) generieren, so entsteht am unteren Omega-R1 (Abb.: 4.7 (A, 5)) ein Wirbelstrom, der mit dem Uhrzeigersinn (engl.: Clockwise, CW) verläuft. Grund hierfür ist, dass es sich beim Ringresonator um keinen geschlossenen Kreis handelt, wodurch die maximale Stromdichte \vec{J} sich immer an der gleichen Position des Omega-Metamaterials befindet (Abb.: 4.7 (A, 3)). Der Effekt der gegensätzlichen Polarisierung wurde in Abb. 4.3 (B), (D) aufgezeigt und wird in Abb. 4.7 (B) abhängig von der Stromdichte \vec{J} im Detail betrachtet. Hierbei ist zu erkennen, dass die maximale Stromdichte i_{max} sich an den beiden Ringresonatoren an entgegengesetzten Seiten befindet, welches in einer entgegengesetzten Polarisierung der magnetischen Wirbelfelder \vec{H} resultiert. Die magnetische Flussdichte besitzt somit ein Minimum \vec{B}_{min} im Zentrum, sowie diagonal zu den beiden vorhandenen Omega-Metamaterialien. Dieser Effekt kann ebenfalls zur Kopplung genutzt werden, wodurch die Transformation vom Ringresonator (Abb.: 4.7 (A, 4)) zum Dipol (Abb.: 4.7 (A, 7)) vollzogen wird. Auf diese Weise erfolgt eine Verschiebung der Strommaxima i_{max} vom Ring zum Dipolarm. Gleichzeitig besitzen die aufeinanderfolgenden Kopplungen von den Rändern (Abb.: 4.7 (A, 5)) entgegengesetzte magnetische Polarität, die unweigerlich zu einer Abstoßung führen (vgl. Abb. 4.7 (B, 8)). So wird die induzierte Energie vom Dipolelement (Abb.: 4.7 (A, 7)) transformiert und als Poyntingvektor \vec{S} an den freien Raum als Sphäre abgegeben. Dies resultiert in der in Abb. 4.6 illustrierten Feldverteilung.

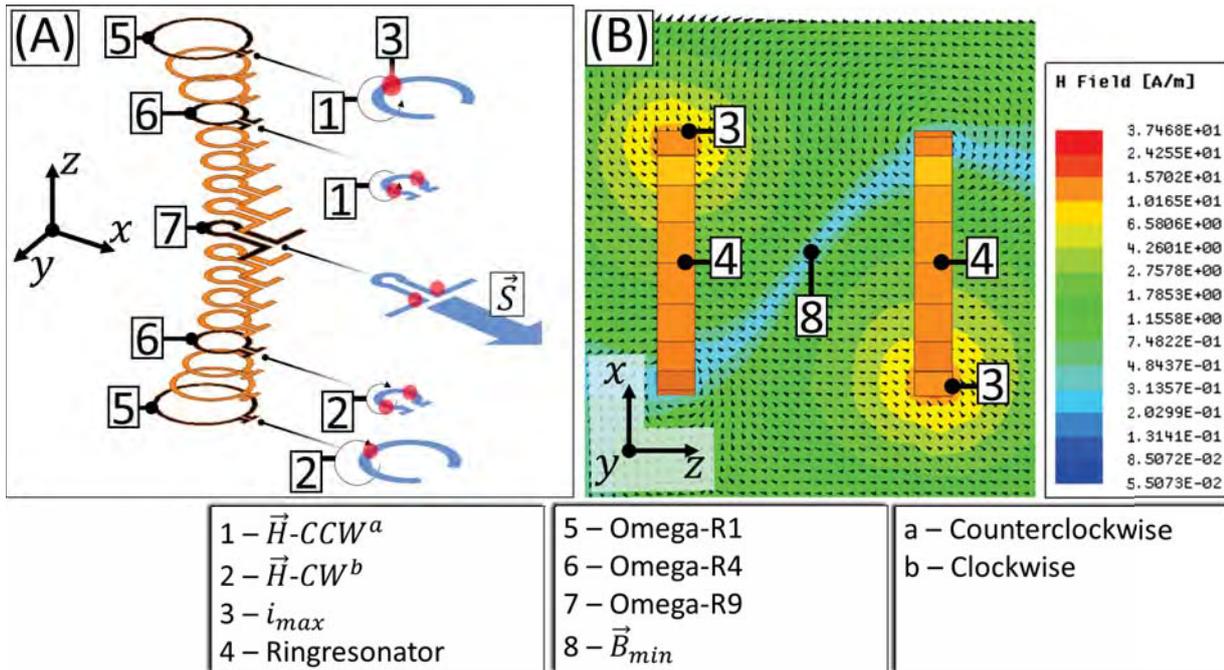


Abbildung 4.7: Elektromagnetische Interaktion und dessen resultierende Abstrahlung als Poyntingvektor \vec{S} . (A) Omega-Metamaterial und Feldanteile, (B) zwei gespiegelte Omega-Metamaterialien mit Stromdichte \vec{J} und resultierender magnetischer Feldentwicklung \vec{B} im Substrat.

4.1.3 Omega-Metamaterial als Block

In diesem Abschnitt wird die letzte Iteration vor der Herstellung und Messung aufgezeigt. Aus den Vorbetrachtung aus Kpt. 4.1.2 wurde ein Omega-Metamaterial als Block entworfen, wobei fünf der gestapelten, transformierten Omega-Metamaterialien nebeneinander positioniert wurden (Abb.: 4.8 (A)).

Auch hier wurde das vorgestellte Konzept mittels HFSS simuliert (Abb.: 4.8). Die Randbedingung für diese Simulation wurden von der Vorbetrachtung (Kpt.: 4.1.1) übernommen, wobei die Seitenwände als PEC definiert wurden und die Oberseiten als PMC. Aus der Draufsicht von Abb. 4.8 (A) zu erkennen, wurde die Airbox (Abb.: 4.8 (A, 1)) verkleinert, um die Simulationszeit zu verkürzen.

Weiterhin wurde als Substrat *Rogers 4030B*[39] verwendet, mit einem $\epsilon_r = 3.66$, $\tan\Delta = 0.0037$ und einer Stärke von 0.381 mm . Dieses Substrat wurde gewählt, da es beim Leiterplattenhersteller *Multi-CP* verfügbar war.

Auch in dieser Simulation wurde das Substrat als homogenes Objekt angenommen (Abb.: 4.8 (B), (C)). Die erweiterte Komplexität der Struktur führte zu einer verlängerten Simulationszeit. Um dem entgegen zu wirken, wurden ebenfalls die Simulationskriterien angepasst (Tab. 3). Der Betrachtungsbereich wurde verkleinert auf 11 bis 16 GHz . Als Konvergenzfrequenz wurde 13.26 GHz gewählt, wobei mindestens zwei Berechnungen $\Delta S < 0.07$ erfüllen müssen. Wie der Abb. 4.8 (D) zu entnehmen, wurde diese Vorgabe nach fünf Iterationen erreicht.

Anhand von Abb. 4.9 werden die S-Parameter des Omega-Metamaterials als Block dargestellt. Vergleicht man diesen Graphen mit dem von Abb. 4.9, so ist im Graphen von Abb. 4.9 (A) ein breitbandiges Verhalten zu erkennen, durch die unmittelbar nebeneinander positionierten Resonanzen bei 12.53 GHz mit -26 dB ($S(1, 1)$) und 13.4 GHz mit -40 dB ($S(1, 1)$). Die Transmission $S(2, 1)$ (Abb.: 4.9 (A)) ist verlustarm von 12.52 bis 14.54 GHz mit $< -2\text{ dB}$. Im Detail wird in diesem Frequenzbereich 90 bis 99% der induzierten Energie transmittiert (Abb.: 4.9 (B)), trotz der eingebrachten Struktur.

Anhand der Felddarstellung von Abb. 4.10 sollen die Veränderungen durch die Struktur zu erkennen

sein. Hierbei wird Augenmerk auf das \vec{H} -Feld genommen werden. Bei $\varphi = 140^\circ$ ist die planare Welle erkennbar, wobei ein Maximum vom Magnetfeld an Omega-R1 (Abb.: 4.10 (1)) liegt, weil die Schnittebene des Feldes in dieser Position gewählt wurde. Bei $\varphi = 190^\circ$ ist die aus Abb. 4.10 (A) bekannte Fokussierung der Energie im Zentrum ersichtlich. Bei der Phase von $\varphi = 240^\circ$ transmittiert das Feld durch die Struktur, bis bei $\varphi = 290^\circ$ ein Abklingen zu beobachten ist. Die hier dargestellten Felddarstellungen sind für das magnetische Feld \vec{H} und besitzt eine abweichende Form für das elektrische Feld \vec{E} , wodurch der Einsatz des Omega-Metamaterial Blocks nur eine bestimmte Polarisierung aufweist.

Tabelle 3: Gewählte Einstellungen für Simulation des Omega-Metamaterials als Block in HFSS

Kategorie	Unterkategorie	Einstellung
Solution Type		Modal
Frequency Sweep	Type	Discrete
	Start	11 GHz
	Stop	16 GHz
Convergency	Step	100 MHz
	Frequency	13.26 GHz
	ΔS	0.07
	Min. Converged Passes	2

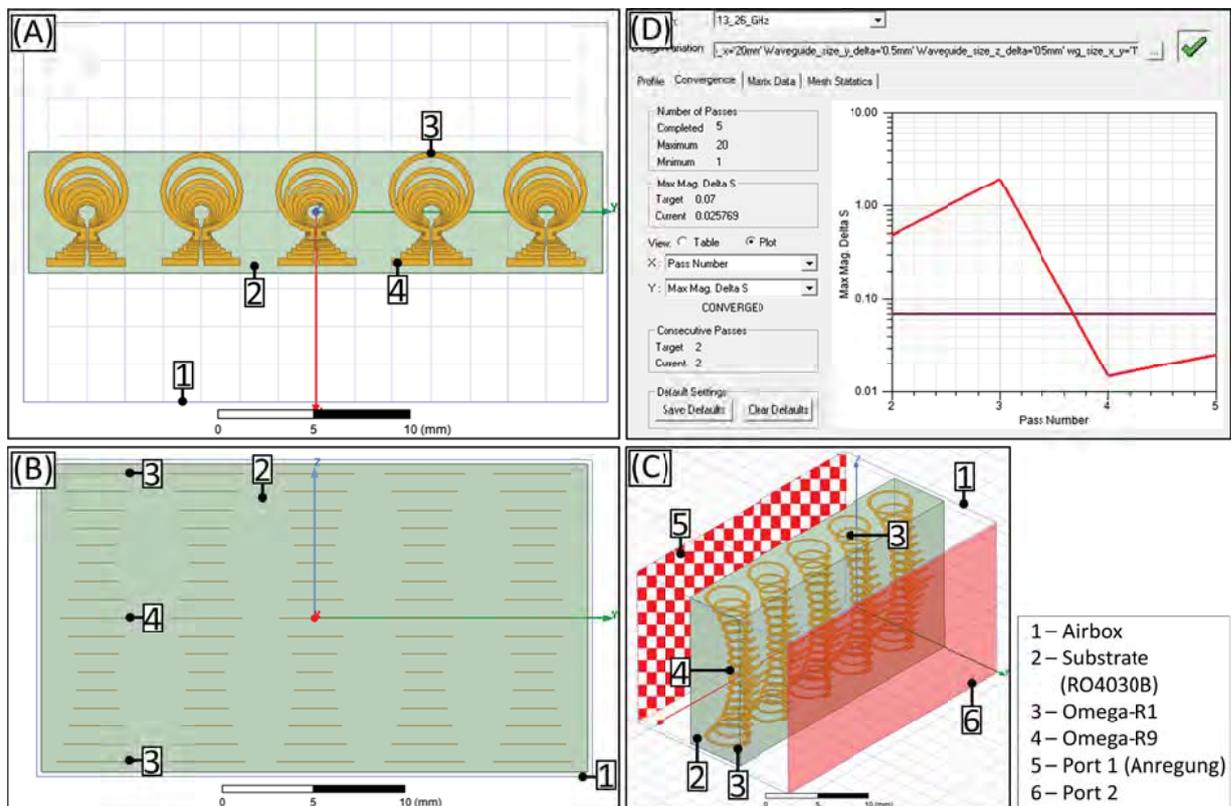


Abbildung 4.8: Omega-Metamaterial als Block als Simulationsaufbau in HFSS. (A) Draufsicht mit Komponenten, (B) Vorderansicht mit Komponenten, (C) Schrägansicht mit Airbox, planaren Ports und Komponenten, (D) Konvergenzkriterium in HFSS.

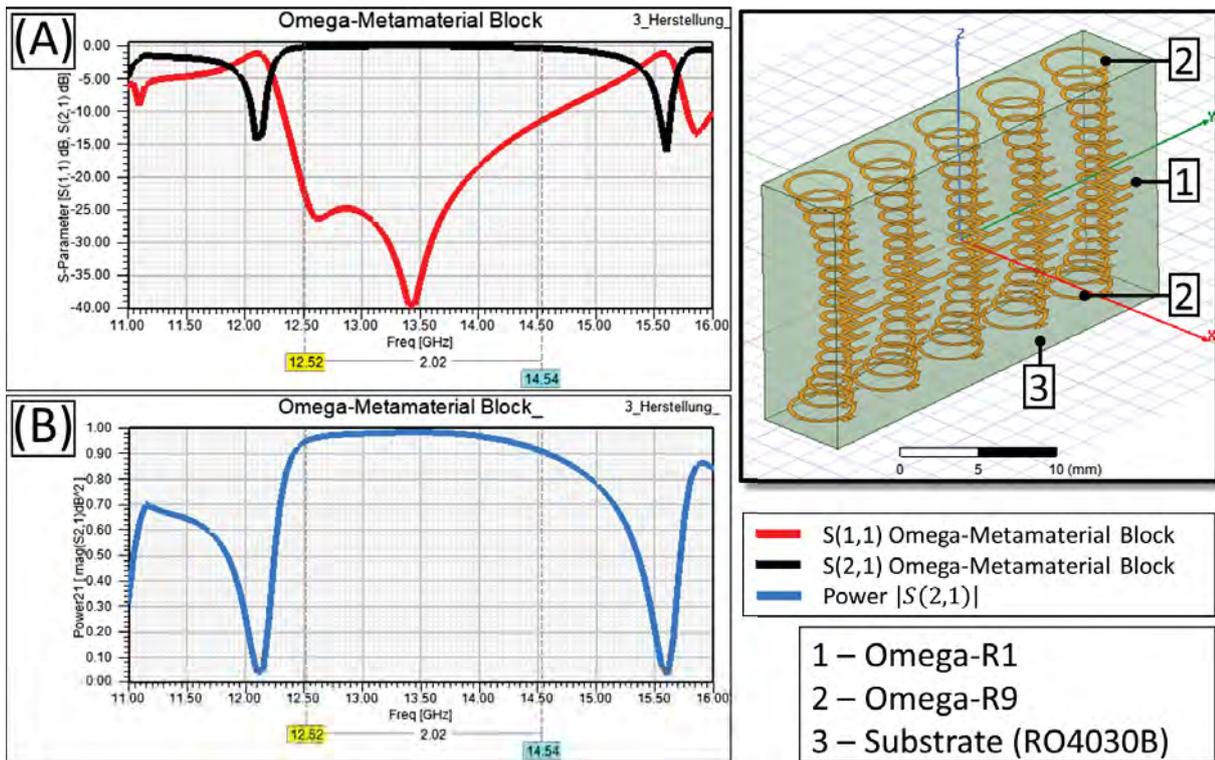


Abbildung 4.9: Omega-Metamaterial gestapelt mit transformierten Elementen als Simulationsaufbau in HFSS. (A) S-Parameter $S(1, 1)$ und $S(2, 1)$, (B) Energieübertragung $|S(2, 1)|$.

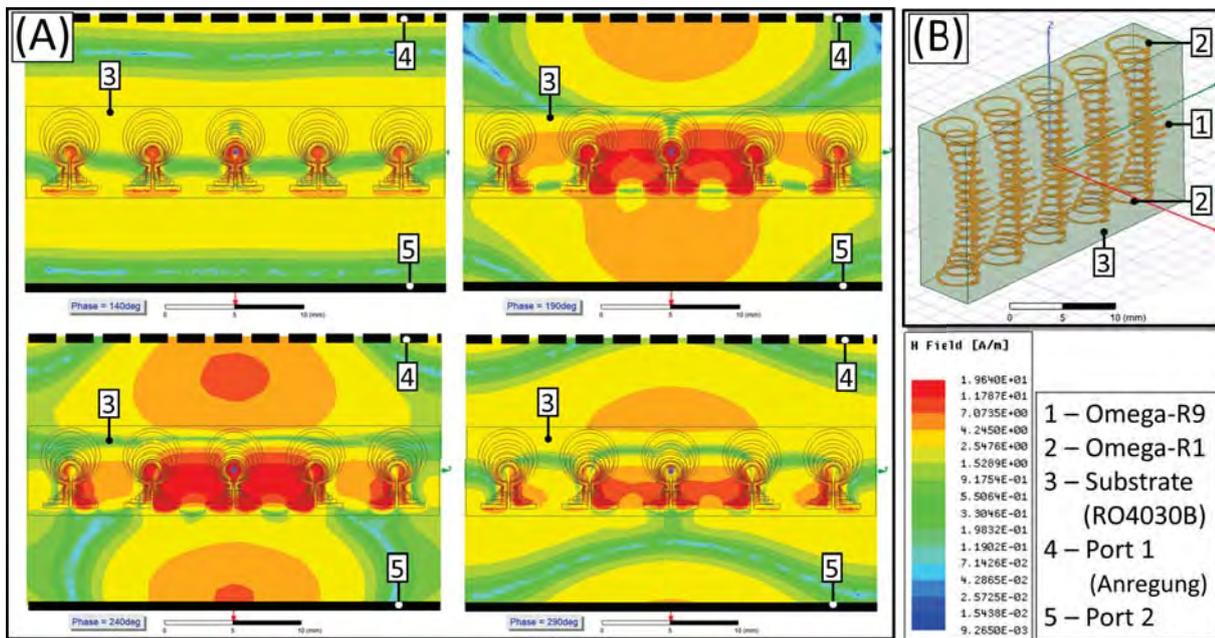


Abbildung 4.10: Draufsicht der $|\vec{H}|$ -Feldverteilung im simulierten Omega-Metamaterial Block in HFSS. (A) $|\vec{H}|$ -Feld von $\varphi = 140^\circ$, $\varphi = 190^\circ$, $\varphi = 240^\circ$, $\varphi = 290^\circ$, (B) Simulationsobjekt in HFSS.

4.2 Vermessung von Metamaterial

Das in Kpt. 4.1 entworfene Metamaterial wurde hergestellt und vermessen. Auf den Prozess und die Überlegungen wird in dem folgenden Text eingegangen.

4.2.1 Herstellung

Für die Herstellung des Prototypens wurde der Leiterplattenhersteller *Multi-CB* gewählt. Die Herstellungstoleranzen sind der Tab. 4 zu entnehmen. Das Ergebnis ist der Abb. 4.11 zu entnehmen. Die Fertigung wurde mittels Fräsen vorgenommen, wobei vom Substrate die Kupferfläche entfernt wird und die Silhouette der Leiterbahnen zurückbleibt. Für das Substrat wurde *Ro 4030B* [39] gewählt, wie bereits für die Simulationen. Die Stärke des Substrates beträgt $0,8\text{ mm}^2$.

Wie aus der Abb. 4.11 (oben) zu entnehmen, wurde die Struktur auf einzelnen Substraten gefertigt, die es erlaubten den Aufbau zu schichten. Ein Beispiel der installierten geschichteten Strukturen sind der Abb. 4.11 (unten) zu entnehmen, wobei einige verschiedene Variationen probiert worden sind (e.g. PLA-Halter, Abb.: 4.11 (4)). Dieses Fertigungsprinzip erlaubte es die Zusammensetzung der Bestandteile zu verändern, wie beispielsweise den Einfluss zu ergründen, wenn zusätzliche leere Substrate mit dem Metamaterial kombiniert werden (Abb.: 4.11 (3)).

Ein weiterer Grund keine eingebettete Struktur zu verwenden ist es, die Fertigungstoleranzen der Fräse zu ermitteln (Kpt.: 4.2.2). Eine eingebettete Struktur würde dies nicht erlauben.

Die Vorbereitung des Fertigungsauftrages wurden mittels *Eagle* und *Altium* vorgenommen.

²Die exakte Angabe vom Substrathersteller ist $0,781\text{ mm}$.

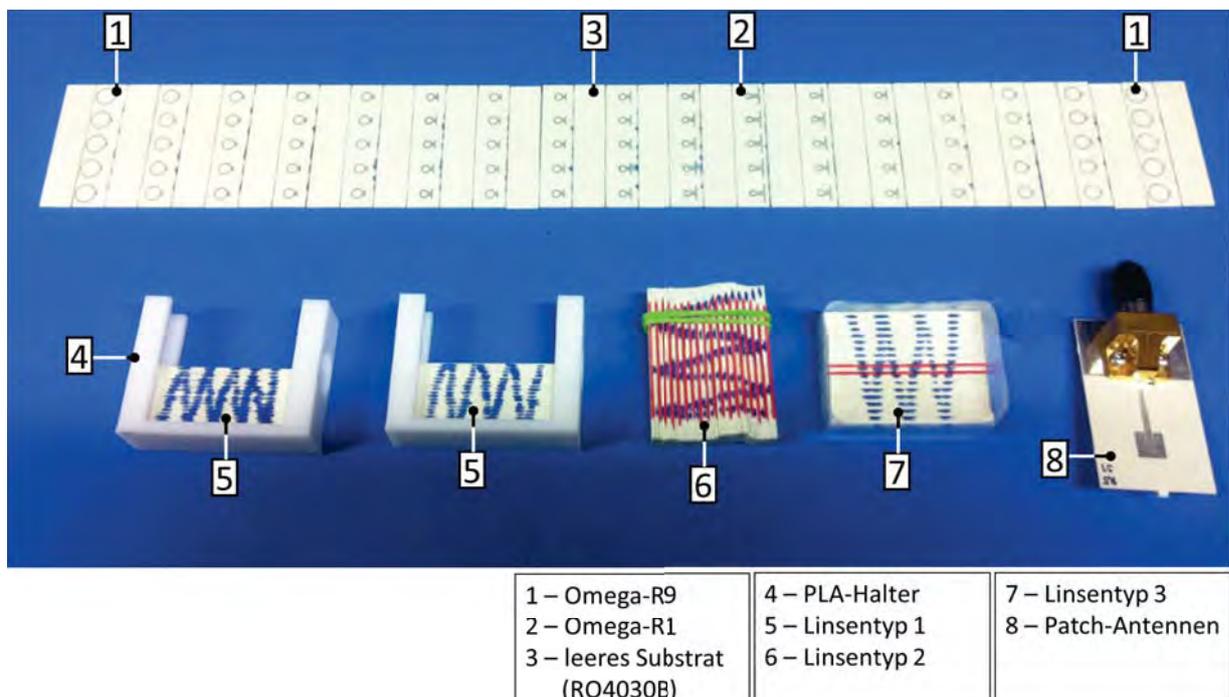


Abbildung 4.11: Gefertigter Omega-Metamaterial-Block, mit verschiedenen Linsentypen und Halterungen.

4.2.2 Ermittlung der Fertigungstoleranzen

Fertigungstoleranzen beschreiben zusammenfassend die Abweichung des hergestellten Objekts von der digitalen Blaupause. Dadurch entstehen Abweichung der Messergebnisse von den erwarteten Simulationsergebnissen. Dies ist besonders für diese Arbeit relevant, da der Hersteller mittels der angebotenen Fräse am Limit der herstellbaren Größenordnung das PCB verarbeitet hat (s.a. Tab. 4: Fertigungstoleranz $150\ \mu\text{m}$), wobei die Bestandteile des Omega-Metamaterials unterhalb dieses Grenzwertes liegen (Abb.: 4.12 (A), (B), (C)). Diese Limitierungen sind jedoch nicht alleine die maßgeblichen Faktoren, die zu einer Abweichung der Messergebnisse führen. Anhand der Nahaufnahmen in Abb. 4.12 (D), (E), (F) sind eine Auswahl von Unfeinheiten illustriert.

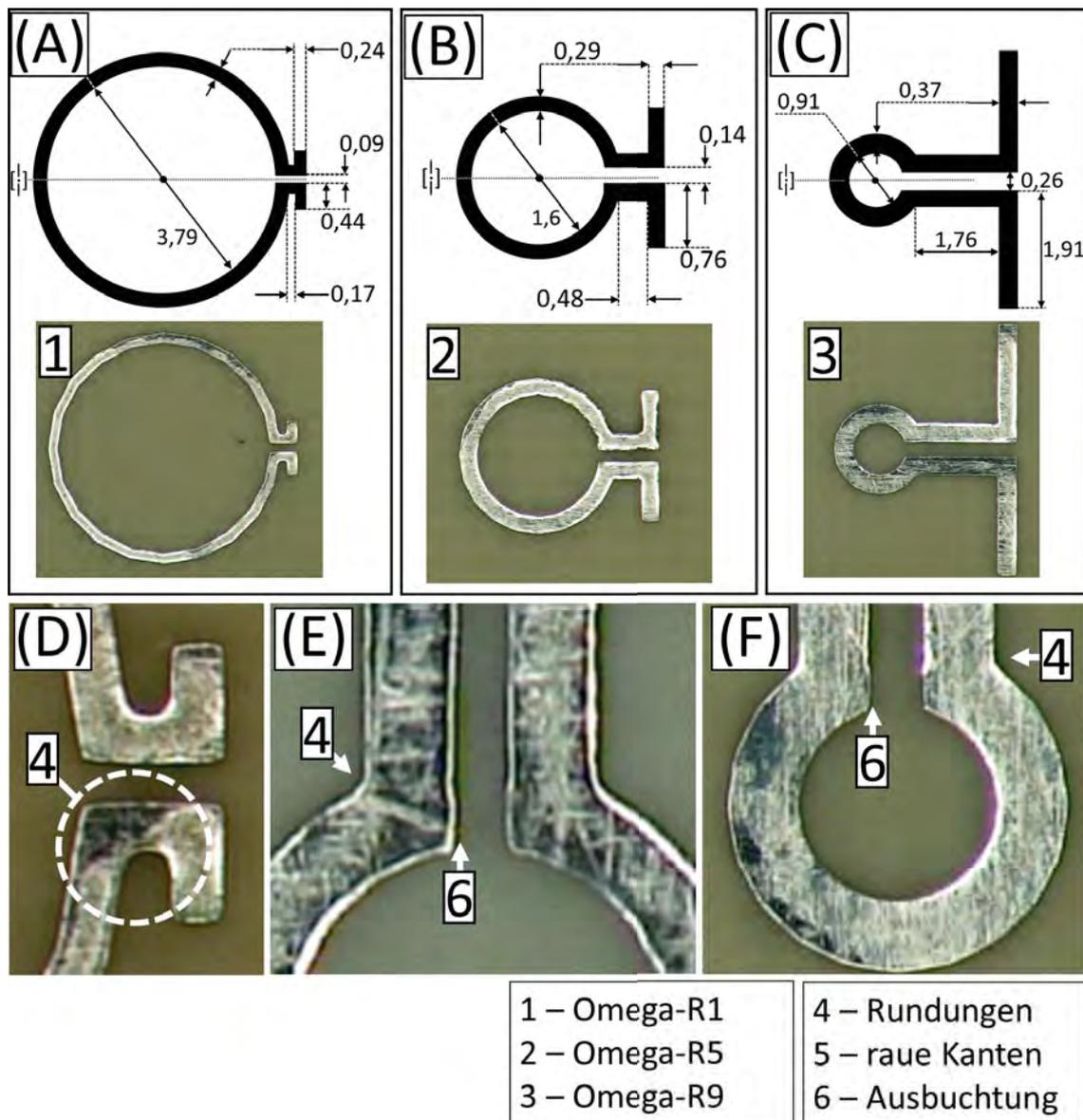


Abbildung 4.12: Gefertigtes Omega-Metamaterial mit Dimensionen, Nahaufnahmen, sowie Herstellungsfehlern. (A) Omega-R1 mit Dimension und Fertigung, (B) Omega-R5 mit Dimension und Fertigung, (C) Omega-R9 mit Dimension und Fertigung, (D) Nahaufnahme vom Dipol vom Omega-R1 mit Fertigungsungenauigkeiten, (E) Nahaufnahme vom Spalt vom Omega-R5 mit Fertigungsungenauigkeiten, (F) Nahaufnahme vom Ringresonator vom Omega-R9 mit Fertigungsungenauigkeiten.

Tabelle 4: Herstellerangaben Multi-CB-Leiterplatten vom hergestelltem Omega-Metamaterial-Block

Angabe	Wert
Material	Rogers 4350B
Materialstärke	0,8 mm
Kupferlagenhöhe	18 μm
Lagen	1
Min. Leiterbahnbreite	150 μm

Beim Fräsen des PCBs werden Drillbits verwendet, die durch Rotation die Kupferschicht vom Substrat entfernt. Folglich ist es unvermeidlich Ecken in der entsprechenden Orthogonalität zu erzeugen. Erkenntlich wird dies anhand der Abb. 4.12 (D), wobei an den Armen des Dipols Rundungen (Abb.: 4.12 (D, 4)) erzeugt wurden. Ebenso gilt dies für die Übergänge des Ringresonators (Abb.: 4.12 (E, 4)). Gleichzeitig ist die Herstellung auf einem PCB nur so exakt möglich, wie es das verwendete Gerät und das verwendete Programm erlaubt. So sind bei Abb. 4.12 (E, 6) und Abb. 4.12 (F, 6) Ausbuchtungen vorhanden, obwohl es sich hierbei um unterschiedliche Objekte handelt. Folglich ist hierbei von einem Fabrikationsfehler auszugehen.

Alle diese benannten Faktoren sind unvermeidlich, müssen aber jedoch im Designprozess berücksichtigt werden, um ein optimales Werkstück generieren zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, um diese Abweichungen zu ermitteln, um so vom gefertigten Prototypen die zu erwartenden Messergebnisse zu ermitteln.

Wie in Abb. 4.12 gezeigt ist, wurden mikroskopische Aufnahmen der hergestellten Omega-Metamaterial erstellt. Diese Aufnahmen wurden verwendet, um anhand der Silhouette erneut ein Simulationsmodell zu erstellen, welches Einblick auf die Auswirkungen der Fertigungstoleranzen gibt. In Abb. 4.13 ist das Vorgehen visualisiert worden. Bedingt durch die limitierte Brennweite des Mikroskops wurden eine Vielzahl an Bildern von den gefertigten Strukturen erstellt, die mittels Bildbearbeitungssoftware (i.e. *GIMP*) zusammengesetzt wurden (Abb.: 4.13 (A)). Basierend auf dieser Rastergrafik wurde mittels des Schwarz-Weiß-Schwellenwertes, sowie Helligkeits- und Kontrastabgleich ein Bild erstellt, das lediglich die Silhouette der Kupferelemente abbildet. Aus dieser Rastergrafik wurde eine Vektorgrafik in *Inkscape* erstellt (Abb.: 4.13 (B)) und mittels der Zusatz Erweiterung *Paths to OpenSCAD* and das Programm *OpenSCAD* übergeben³. In *OpenSCAD* erfolgte die Generierung einer STL-Modelldatei⁴ (Abb.: 4.13 (C)), welche exportiert wird, um dann in HFSS geöffnet zu werden können (Abb.: 4.13 (D)). Es sei bei diesem Verfahren zu beachten, dass die Oberflächenrauigkeit nicht berücksichtigt und für die Simulationen als homogen angenommen wurde.

Die verwendeten Simulationsparameter für dieses Modell sind der Tab. 5 zu entnehmen. Die benötigten Ressourcen für diese Simulation stiegen hierbei immens (Speicherkapazität: 75,9 GB, Simulationszeit: 90,3 h), weswegen eine Anpassung notwendig wurde.

Die Randbedingungen für diese Simulation wurden gleichbehalten (Kpt.: 4.1.1), wobei die Seitenwände als PEC und die Oberseiten als PMC definiert wurden. Aus der Draufsicht von Abb. 4.14 (A) ist eine Verschiebung der Airbox (Abb.: 4.14 (A, 1)) zu erkennen, welches modellbedingt gewählt wurde.

Um die Effekte der Messung exakt nachvollziehen zu können, wurde das Substrat *Rogers 4030B* [39] in diesem Fall als geschichteter Aufbau simuliert (Abb.: 4.14 (B, 2)).

Die Simulationskriterien wurden entsprechend angepasst (Tab.: 5). Der Betrachtungsbereich wurde ver-

³Dieser Schritt kann ebenfalls übersprungen werden, durch exportieren der Vektorgrafik als *.SVG und Importierung in *Fusion360*.

⁴Standard Triangulation Language (Abk.: STL) ist eine Modellschnittstelle, um geometrische, dreidimensionale Datenmodelle zu erstellen.

schoben von 10 bis 15 GHz, da dies mit den resultierenden Ergebnissen korrespondiert. Als Konvergenzfrequenz wurde 13,5 GHz gewählt, wobei mindestens zwei Berechnungen $\Delta S < 1,0$ erfüllen müssen. Wie der Abb. 4.14 (C) zu entnehmen, wurde diese Vorgaben nach vier Iterationen erreicht.

In Abb. 4.15 wird die Nachsimulation mit den Vorbetrachtungen aus Abb. 4.9 anhand der S-Parameter miteinander verglichen. Erkennbar ist hier eine mögliche Verschiebung der Werte von den ursprünglichen designten 13,5 GHz zu 11,0 GHz. Gleichzeitig ist eine Reduzierung der Resonanz auf -25 dB erkennbar. Die Transmission $S(2,1)$ (Abb.: 4.15 (A)) ist verlustarm von 10,0 bis 12,01 GHz mit $< -1\text{ dB}$. Im Detail wird in diesem Frequenzbereich 90 bis 99% der induzierten Energie transmittiert (Abb.: 4.15 (B)). Diese Werte sind die Vorbetrachtungen für die folgende Messung dieser Proben.

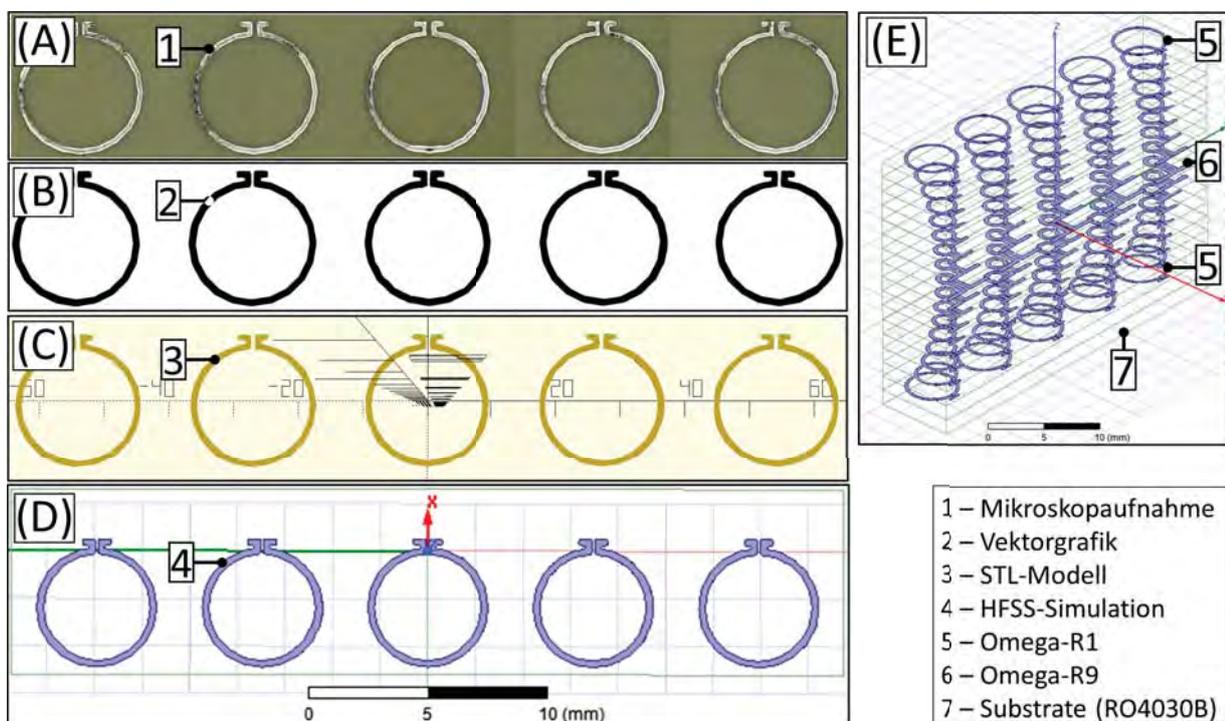


Abbildung 4.13: Generierung von Simulationsmodellen basierend auf mikroskopischen Fotografien, zur Ermittlung der Fertigungstoleranzen. (A) Zusammengesetzte Nahaufnahmen vom hergestellten Omega-R9, (B) erstellte Vektorgrafik basierend auf den Nahaufnahmen, (C) erstelltes STL-Modell in OpenSCAD, (D) importes STL-Modell in HFSS zur Simulation.

Tabelle 5: Gewählte Einstellungen für Simulation des Omega-Metamaterials als Block in HFSS

Kategorie	Unterkategorie	Einstellung
Solution Type		Modal
Frequency Sweep	Type	Discrete
	Start	10 GHz
	Stop	15 GHz
	Step	100 MHz
Convergency	Frequency	13,5 GHz
	ΔS	1.0
	Min. Converged Passes	2

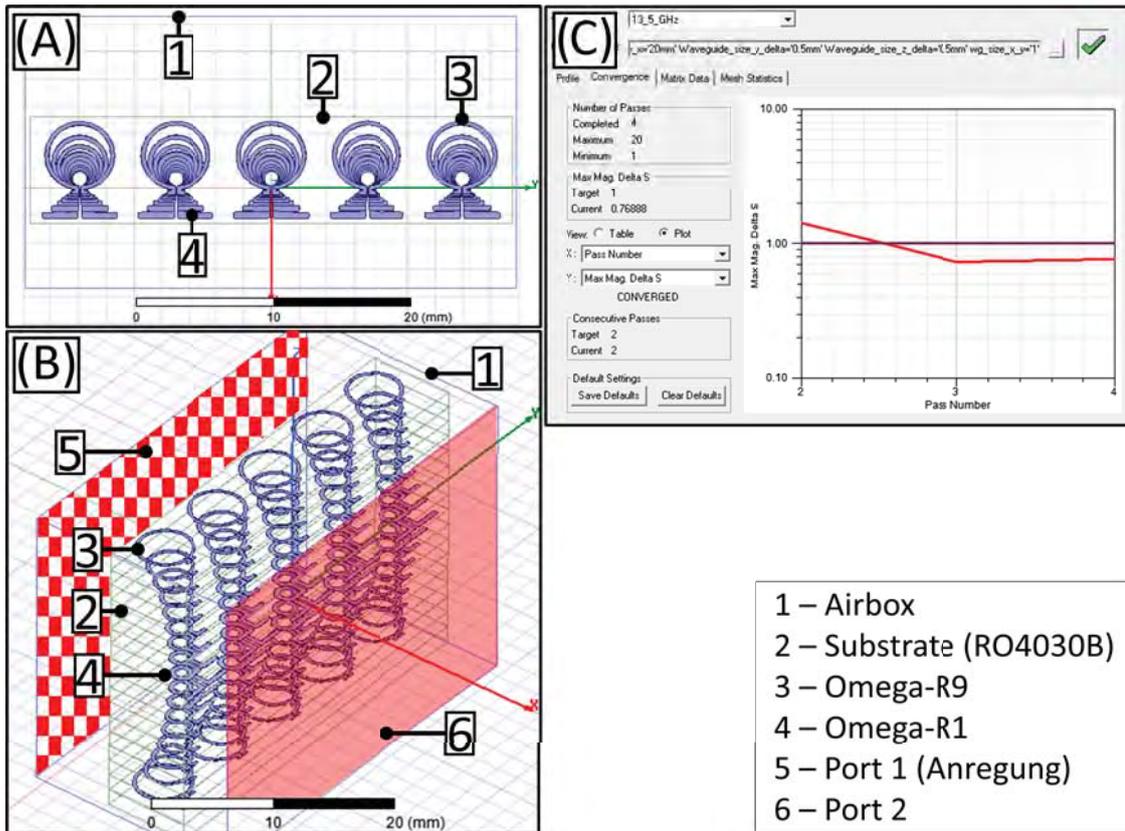


Abbildung 4.14: Nachsimulation des hergestellten Omega-Metamaterial als Block als Simulationsaufbau in HFSS. (A) Draufsicht mit Komponenten, (B) Schrägansicht mit Airbox, Ports und Komponenten, (C) Konvergenzkriterium in HFSS.

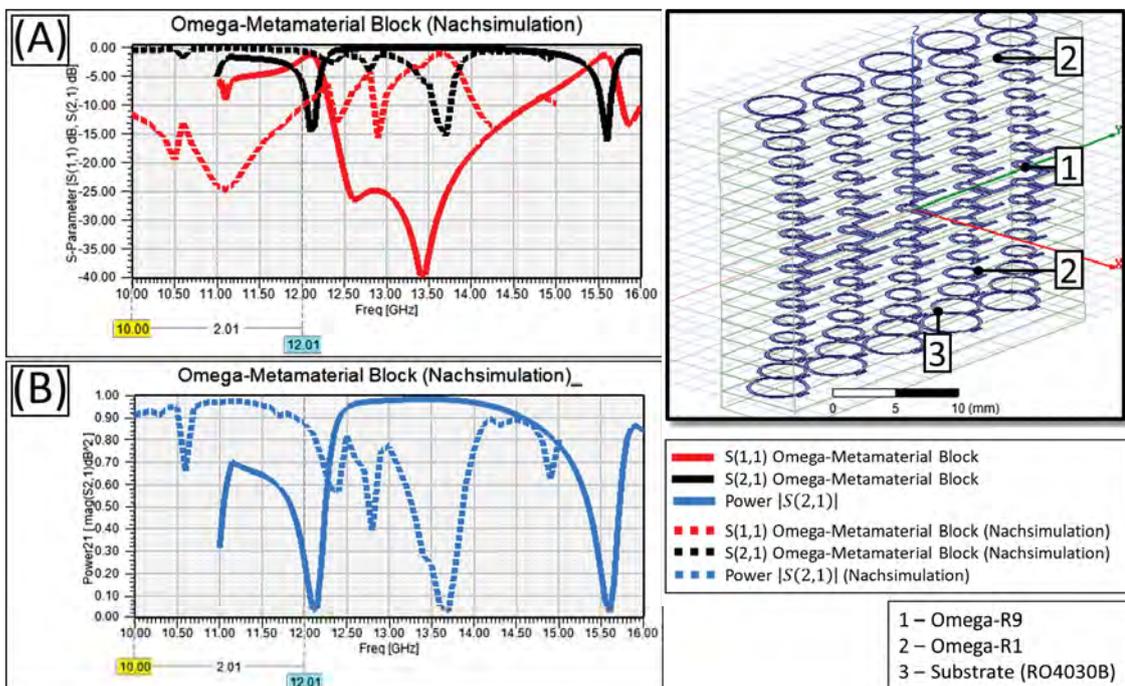


Abbildung 4.15: Nachsimulation vom Omega-Metamaterial als Block in HFSS. (A) S-Parameter $S(1,1)$ und $S(2,1)$, (B) Energieübertragung $|S(2,1)|$.

4.2.3 Vermessung vom Metamaterial mit Wellenleitern

Im folgenden Abschnitt wird das Vorgehen der Messung dargestellt.

Durch eine fehlende elektrische Verbindung, die am Metamaterial angeschlossen werden könnte, muss die Vermessung vom Metamaterial mittels eines transmittierenden elektromagnetischen Feldes erfolgen. Der zu vermessende Testkörper wird hierfür in dieses Feld eingebracht, um Rückschluss auf das Verhalten zu erlangen.

Die verwendeten Gerätschaften sind der Abb. 4.16 zu entnehmen. Grundlage ist der Netzwerkanalysator *ZVA24* von *Rohde & Schwarz* (Abb.: 4.16 (A)), um die Transmission anhand der S-Parameter zu ermitteln. Als Übertragungsinstrument wurden hierfür zwei baugleiche *WR90*-Wellenleiter⁵ mit N-Steckverbindern verwendet (Abb.: 4.16 (B)). Im Entwicklungsstadium dieser Arbeit waren dies die verfügbaren Gerätschaften, die im weiteren Verlauf geändert werden mussten. Die Zusammensetzung der Gerätschaften ist der Abb.: 4.16 (D, E) zu entnehmen. Hierbei wurden die Wellenleiter (Abb.: 4.16 (2)) miteinander verbunden, wobei die Probe innerhalb des Übergangsbereichs platziert wurde. Die Kabel wurden hierbei mittels *3,5 mm*-Steckverbinder mit dem VNA verbunden, wobei am Wellenleiterübergang ein Adapter für N-Steckverbinder verwendet werden musste. Die Kalibrierung wurde mittels des *R&S ZV-Z52* [40] (Abb.: 4.16 (C, 4)) vorgenommen, wobei die N-Steckverbinder nicht berücksichtigt werden konnten. Folglich ist bei den Messergebnissen von einem Verlust von mindestens -3 dB auszugehen. Zur Validierung der Ergebnisse wurde der Aufbau aus Abb. 4.16 (D) verwendet. Eine für diese Arbeit notwendige Kalibrierung spezifisch für den Wellenleiter war nicht verfügbar.

Für die Messung wurden die hergestellten Omega-Metamaterialien (s.a. Kpt.: 4.2.1) gestapelt, mit der entsprechenden Reihenfolge vom Simulationsmodell (Kpt.: 4.1.3). Zur Fixierung der PCBs wurden diese auf der Stirnseite mit Klebeband umwickelt und so in ihrer Position fixiert. Die entsprechende Probe ist der Abb. 4.17 (A), (B) zu entnehmen.

Mit dieser vorgestellten Messung soll überprüft werden, ob das Omega-Metamaterial genutzt werden kann, um den erzeugten Freibereich zwischen zwei Wellenleitern zu überbrücken. Dieser Aufbau ist deswegen sehr attraktiv, da das System abgeschlossen ist und wenige externe Interferenzen zulässt, die Einfluss auf die Ergebnisse nehmen könnten. Hierfür wird die Probe zentral auf dem *WR90*-Wellenleiter positioniert (Abb.: 4.17 (E)) und aus *PLA 3D*-gedruckten Haltern durch Klemmen fixiert (Abb.: 4.17 (C, 3)). Die Position wird vorab mit Hilfe eines Messschiebers⁶ (Abb.: 4.17 (B)) auf dessen Genauigkeit überprüft, bevor die Probe in der Halterung verankert wird. Anhand der Abb. 4.17 (D) illustriert, wird der zweite *WR90*-Wellenleiter auf der Probe durch Schrauben befestigt. Das gesamte Konstrukt wird mit einem Schraubstock am Tisch fixiert, um so den Bewegungsradius zu reduzieren, welches sonst die Verschraubungen lösen und Einfluss auf die Kalibrierung nehmen würde.

Die ermittelten Messergebnisse sind der Abb. 4.18 zu entnehmen. Als Proben wurde das gestapelte Omega-Metamaterial verwendet (Abb.: 4.18 (C, 3)), sowie ein geometrisch identischer Stapel aus leerem *Ro 4030B* (Abb.: 4.11 (3)). Die Ausrichtung der Probe mit dem Wellenleiter ist der Abb. 4.18 (D) zu entnehmen. Anhand von Abb. 4.18 (A) werden die S-Parameter der beiden Proben dargestellt. Erkennbar hierbei ist eine Differenz der Transmission von 3 dB bei $9,82\text{ GHz}$ und $11,97\text{ GHz}$, sowie 1 dB bei $12,92\text{ GHz}$. Vergleichend dazu werden die Messungen von Abb. 4.18 (B) mit den Ergebnissen des zweiten Messaufbaus verglichen (Abb.: 4.16 (D)), bei $9,82\text{ GHz}$ mit einer Differenz von 33% , bei $11,97\text{ GHz}$ einer Differenz von 28% und bei $12,92\text{ GHz}$ einer Differenz von 23% . Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der Nachsimulation (Abb.: 4.15), wobei eine Verschiebung durch Herstellungstoleranzen prognostiziert wurde. Basierend auf diesen Ergebnissen ist eine Fokussierung durch die Struktur möglich, im Vergleich zu kupferfreiem Substrat.

⁵Wellenleitertyp: *WR-90* (US), *WR-16* (EU)

⁶Starrett (Modell 798A-6/150) [41]; Genauigkeit $0,01\text{ mm}$

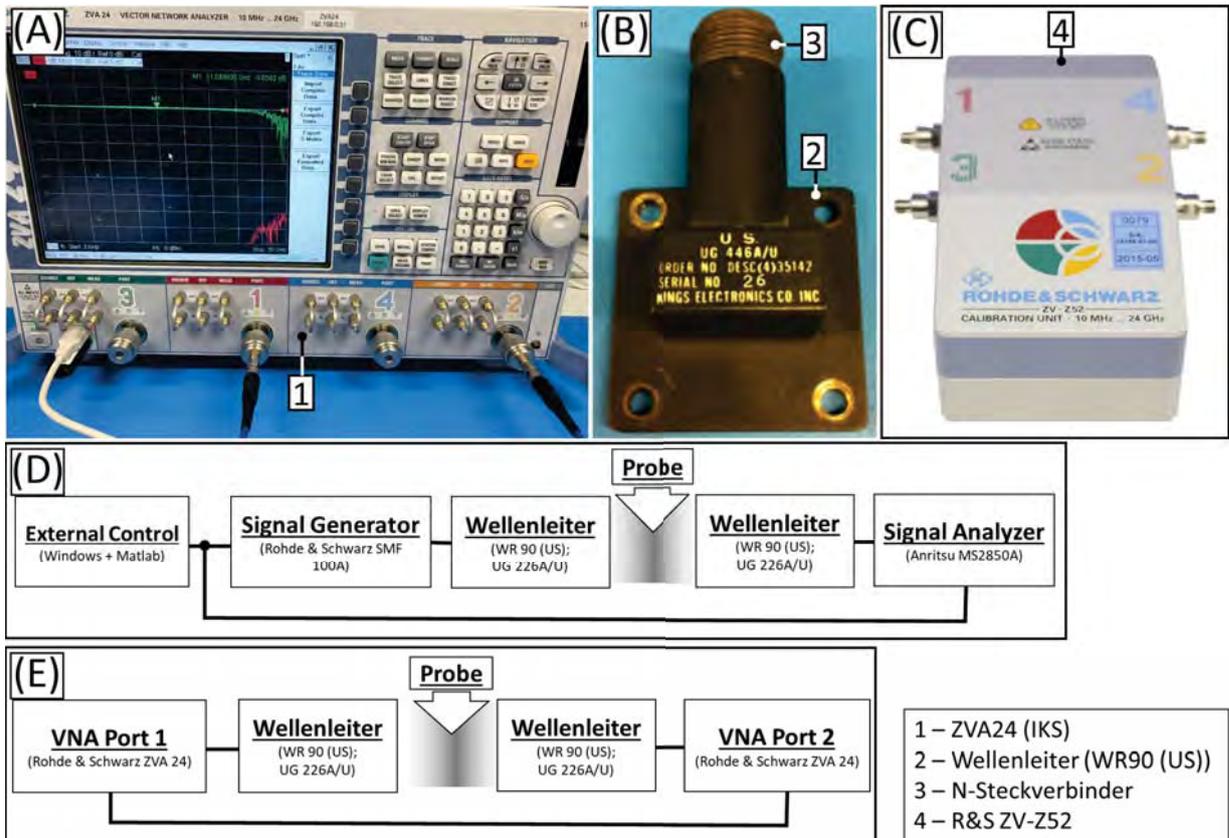


Abbildung 4.16: Verwendete Messgeräte für Metamaterialmessung. (A) Verwendeter ZVA 24 (VNA) von Rohde&Schwarz, (B) verwendeter Wellenleiter WR90 mit N-Verbinder, (C) verwendetes Kalibrierungsgerät *Rohde & Schwarz ZV-Z52*, (D) verwendeter Messaufbau mit Signal Generator, (E) verwendeter Messaufbau mit VNA.

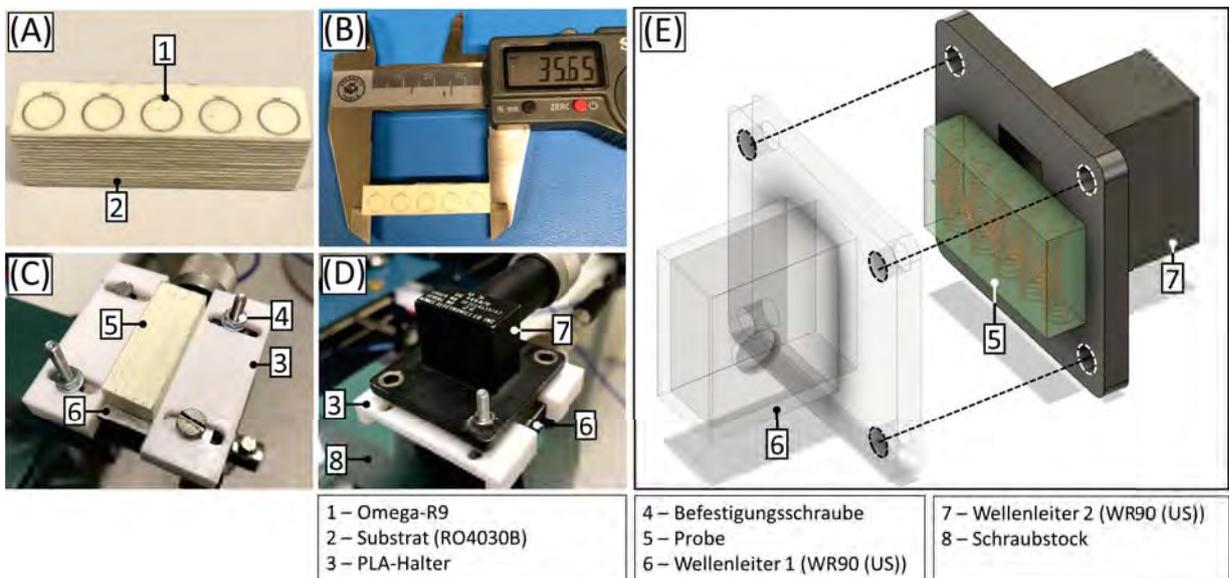


Abbildung 4.17: Zusammengesetzter Aufbau zur Ermittlung der Eigenschaften des ermittelten Omega-Metamaterials. (A) Zusammengesetzte Probe des Omega-Metamaterials, (B) geometrische Vermessung der Probe vom Omega-Metamaterial, (C) installierte Probe am Wellenleiter, mit PLA-Haltern und Verschraubung, (D) verwendeter Aufbau zur Messung des Omega-Metamaterials, (E) Illustration der Zusammensetzung der Wellenleiter mit der Probe, um eine Messung vorzunehmen.

4.2.4 Messung von Metamaterial mit Patchantennen

Als aufbauenden Schritt sollte außerdem ermittelt werden, ob das entwickelte Omega-Metamaterial ebenfalls verwendet werden könnte, um die Signalübertragung von der Patchantenne zu unterstützen. Parallel zur Fertigung des Omega-Metamaterials (Kpt.: 4.2.1), wurden Patchantennen für $11,0\text{ GHz}$ zu Testzwecken hergestellt (Abb.: 4.19 (A)). Entsprechend den Fertigungstoleranzen des Omega-Metamaterials (Kpt.: 4.2.2), obliegen den diese Patchantennen ebenfalls den Limitierung, welches der Nahaufnahme zu entnehmen ist (Abb.: 4.19 (D)). In dieser Messung soll eine Übertragungsstrecke zwischen zwei identischen Patchantennen hergestellt werden (Abb.: 4.19 (C, 1, 2)), wobei zwischen diesen Patchantennen das Omega-Metamaterial eingebracht wird (Abb.: 4.19 (C, 3)). Mit der aus PLA 3D-gedruckten Hebebühne (Abb.: 4.19 (C, 7)) ist es möglich die Abstände zwischen den drei Komponenten über Stellschrauben (Abb.: 4.19 (C, 5, 6)) zu justieren.

Vor der Messung wurde eine Simulation der Patchantenne in HFSS vorgenommen, um den erwarteten Antennengewinn zu ermitteln. Die Simulationsmodelle sind der Abb. 4.20 (B, C) zu entnehmen. Laut der Simulation (Abb.: 4.20 (C)) der hergestellten Patchantenne (Abb.: 4.19 (D)) ist ein Antennengewinn von 6 dB bei $13,3\text{ GHz}$ von der Hauptkeule zu erwarten (Abb.: 4.20 (A)).

Vergleichend dazu wurde der Simulationsaufbau mittels des Omega-Metamaterials erweitert, welches oberhalb in einem Abstand von 3 mm sich befindet (Abb.: 4.20 (B)). Laut des Graphens von Abb. 4.20 (A) ist damit eine Änderung in der Abstrahlung bewirkt worden, mit einem Antennengewinn von 9 dB .

Der eingesetzte Messaufbau ist der Abb. 4.21 (B) zu entnehmen. Hierbei wurde die Linsenhebebühne (Abb.: 4.21 (B, 9)) mittels eines Schraubstocks (Abb.: 4.21 (B, 8)) am Tisch fixiert. Um die Transmission anhand der S-Parameter für die Übertragungsstrecke zu ermitteln, wurde der *Rohde&Schwarz ZVA24* (Abb.: 4.21 (B, 7)) verwendet. Laut den Ergebnissen von Abb. 4.21 (A) ist für die Transmission $S(2,1)$ bei $10,89\text{ GHz}$ ohne Omega-Metamaterial ein Wert von $-29,44\text{ dB}$ (Abb.: 4.21 (A, 3)). Für eine Transmission $S(2,1)$ mit installiertem Omega-Metamaterial wird ein Wert von $-25,32\text{ dB}$ bei $10,94\text{ GHz}$ erreicht (Abb.: 4.21 (A, 2)). Somit besteht eine Verbesserung der Übertragungsstrecke durch einbringen des Omega-Metamaterials von 4 dB , was mit den Simulationsergebnissen des Antennengewinns der Hauptstrahlkeule (Abb.: 4.20 (A)) korrespondiert.

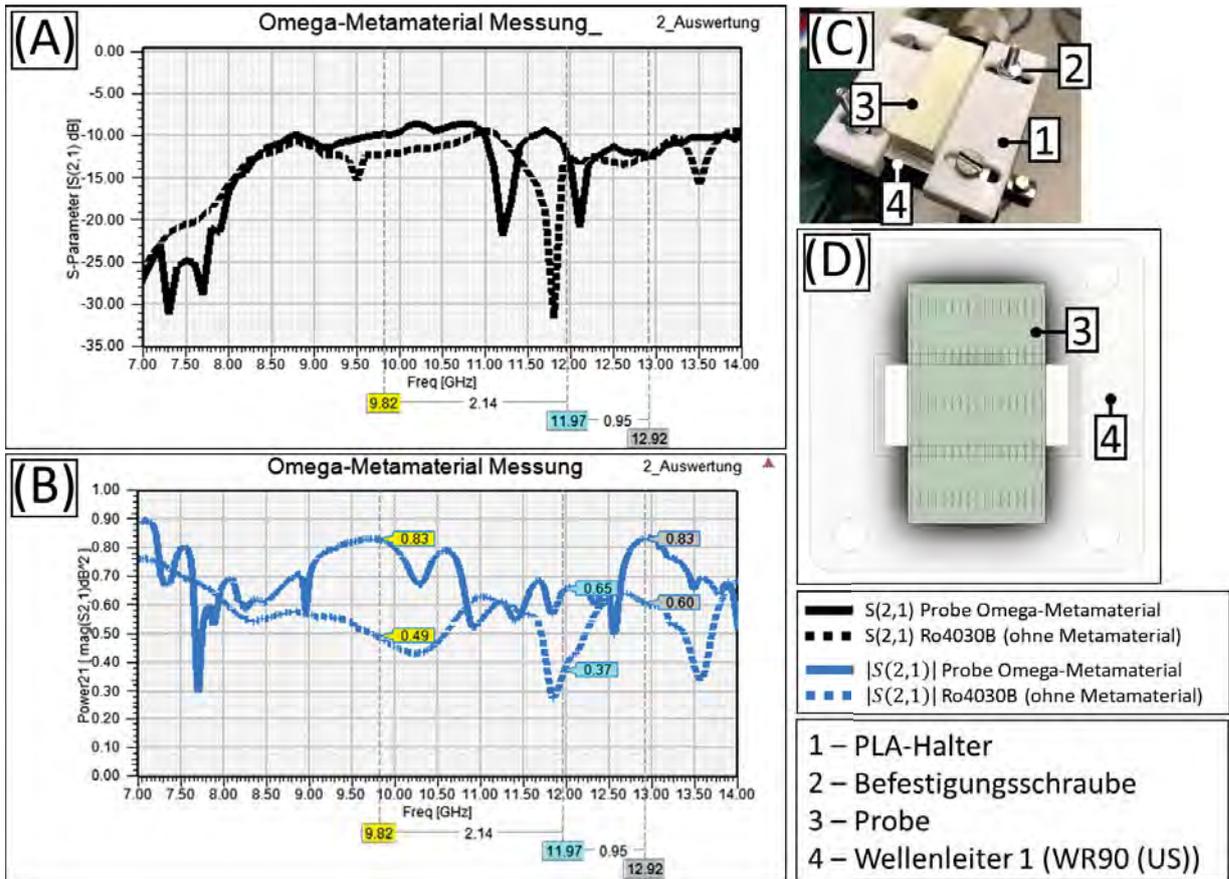


Abbildung 4.18: Messergebnisse vom entwickelten Omega-Metamaterial, im Vergleich mit kupferfreiem *Rogers 4030B*[39]. (A) S-Parameter $S(2,1)$ (Messaufbau aus Abb. 4.16 (E)), (B) Transmission $|S(2,1)|$ mit Messaufbau 2 (Messaufbau aus Abb. 4.16 (D)), (C) vermessene Struktur, (D) Ausrichtung der Probe am Wellenleiter.

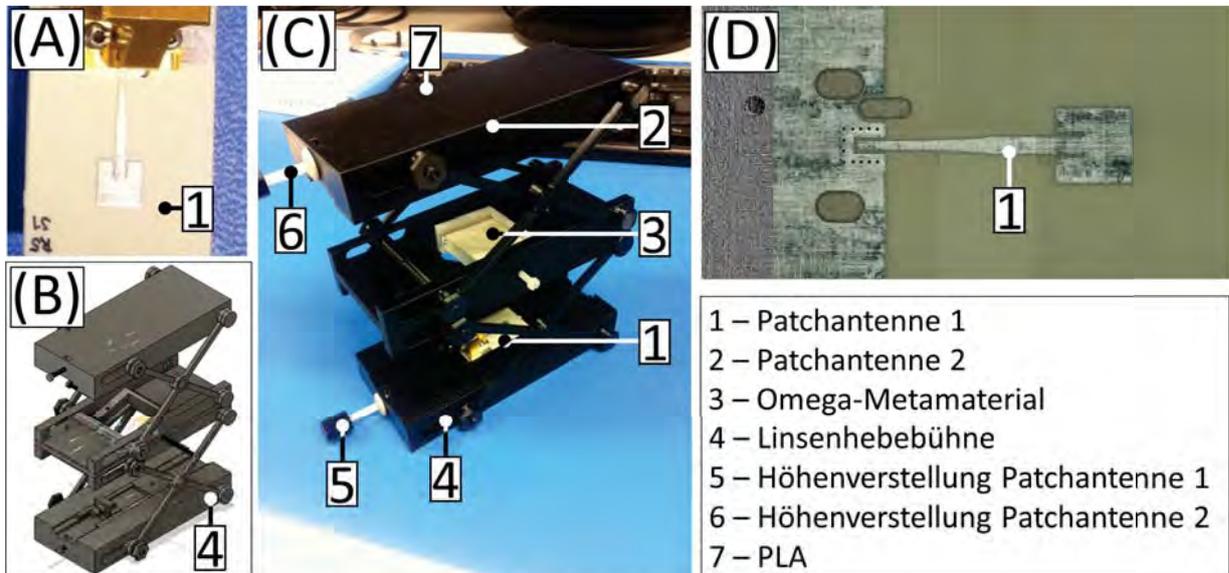


Abbildung 4.19: Verwendete Konstruktion *Linsenhebebühne*, um den Effekt des Omega-Metamaterials auf die Patchantenne zu untersuchen. (A) Verwendete Patchantenne, (B) konstruierte CAD in *Fusion360*, (C) eingesetzte Linsenhebebühne mit installierten Komponenten aus 100% PLA, (D) zusammengesetzte mikroskopische Aufnahme der hergestellten Patchantenne.

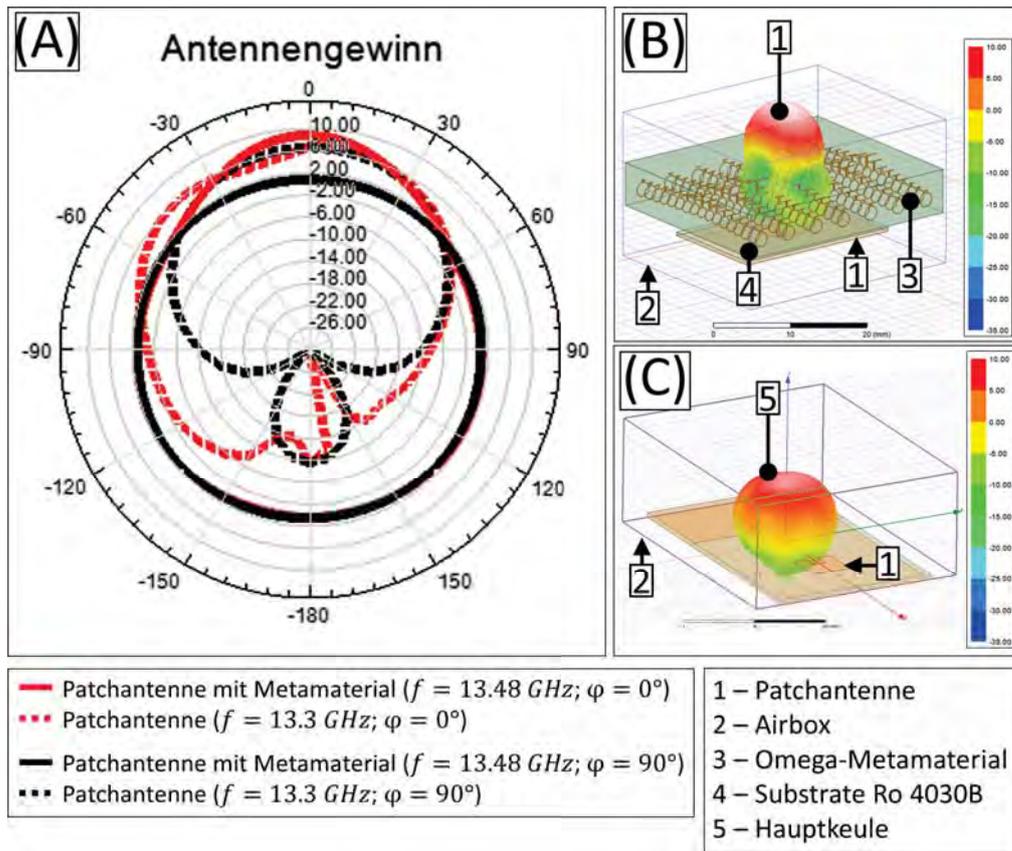


Abbildung 4.20: Simulierter Antennengewinn in HFSS für Patchantenne mit Metamaterial. (A) Gewinn-
diagramm, (B) Simulation von Antennengewinn für Patchantenne mit Omega-Metamaterial in HFSS, (C)
Simulation von Antennengewinn von Patchantenne.

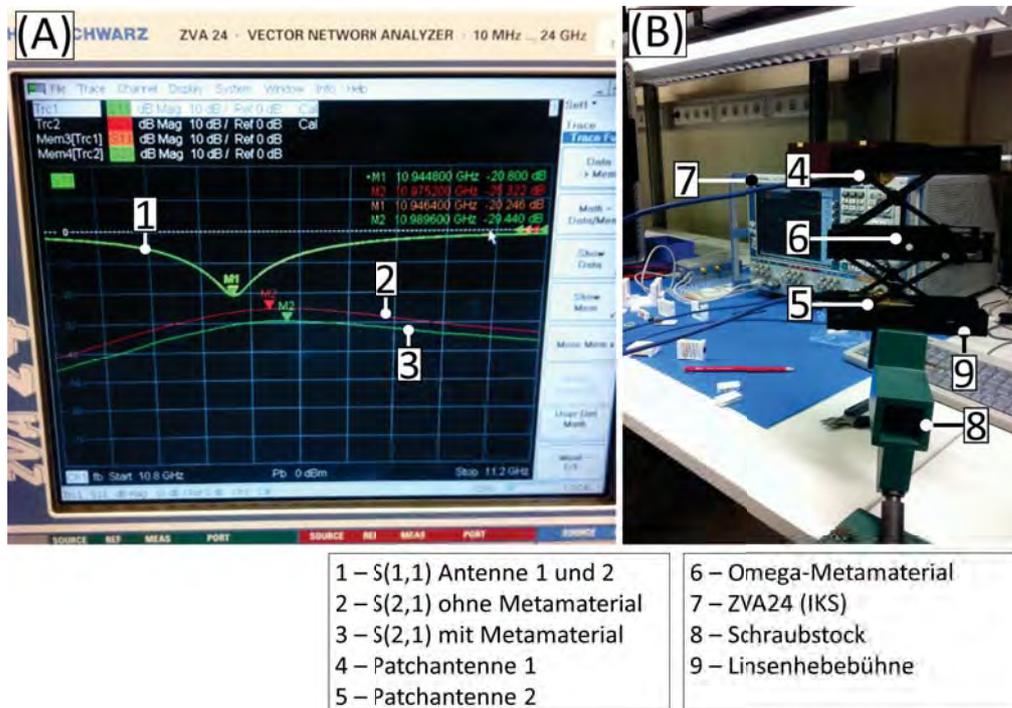


Abbildung 4.21: Messung der Übertragungstrecke zwischen zwei Patchantennen und dem eingebrachten Omega-Metamaterial. (A) Messergebnisse $S(1,1)$ und $S(2,1)$ für die Übertragungstrecke, (B) installierter
und eingesetzter Messaufbau der Linsenhebebühne (Hebebühne wurde selbstständig in CAD designt
besteht zu 100% aus PLA. Schraubverbindung sind aus PTFE).

4.3 Metamaterial: Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf das Design eines Metamaterials eingegangen, um das elektromagnetische Feld in der Transmission zu unterstützen. Die Ergebnisse dieser neuartigen Erfindung wurden [42] veröffentlicht und vorgestellt. Hiermit konnte eine neue Bauweise von Metamaterial gezeigt werden, wie mithilfe von Transformation der enthaltenen Geometrien and gezielter Anordnung der enthaltenen Bestandteile dazu genutzt werden kann, die drahtlose Übertragung zu fokussieren. Hierbei wurde gezeigt, dass die abhängig von der Veränderung und der Kombination der Bestandteile neue vorteilhafte Eigenschaften generiert werden können. Für die Hochfrequenztechnik ist diese Information wertvoll, da nun weitere Anordnung nach dem gleichen Prinzip verändert werden könnten, um so weitere Feldverändernden Eigenschaften extrahieren zu können. Anhand der Experimente konnte bereits gezeigt werden, dass in einer unterbrochenen Übertragungsstrecke zwischen zwei Wellenleitern die Bereich fortgesetzt werden kann.

Weitere erwähnungswerte Informationen zum *Metamaterial* werden in dem folgenden Abschnitt näher eräutert.

Herstellungstoleranzen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein *Metamaterial* designed (Kpt.: 4.1), hergestellt (Kpt.: 4.2.1), validiert (Kpt.: 4.2.2) und vermessen (Kpt.: 4.2.3). Zur Herstellung wurde hierfür das Fräsen verwendet. Obwohl eine verbesserte Energieübertragung mittels dieser Erfindung ermöglicht werden konnte, zeigen sich anhand der Betrachtungen ebenfalls die Einschränkungen dieser Technologie. Die hergestellten Proben besitzen eine Abweichung der gewollten Frequenzen, die auf das Herstellungsverfahren zurückzuführen sind. Damit ist davon auszugehen, dass das präsentierte *Metamaterial* nicht mittels Fräsens produziert werden kann und eine andere Herstellungstechnologie verwendet werden müsste (e.g. Lasertechnologie). Insbesondere ist dies relevant für zusätzliche Interferenzen im *Metamaterial*, die nur durch eine Feinjustierung in der Dimensionierung des Designs kompensiert werden können. Als Beispiel sei hierbei auf die Montage verwiesen. Sollten die unterschiedlichen Schichten nicht miteinander verklebt werden, so muss eine mechanische Verbindung vorgenommen werden, wie beispielsweise durch verschrauben. Hierfür kann nicht auf Objekte mit einer Leitfähigkeit κ zurückgegriffen werden, weswegen Teflonschrauben verwendet werden könnten. Um den Einfluss auf die Simulationsergebnisse zu überprüfen, erfolgte eine Testung anhand der Simulationsergebnisse mittels *HFSS* (Abb.: 4.22). Wie dem Graphen aus Abb. 4.22 zu entnehmen ist, verstimmen die eingesetzten Teflonschrauben das *Metamaterial*. Eine Feinjustierung wäre jedoch anhand der notwendigen Kriterien nicht möglich, weil die Herstellungstoleranz $< 150 \mu m$ wäre, was laut des Herstellers nicht möglich ist (Tab.: 4).

Messungen

Die Messreihen zur Ermittlung der Omega-*Metamaterial* Struktur müssten sehr viel ausführlich getätigt werden. Interessant hierbei wäre verschiedene Elemente zu entnehmen oder hinzuzufügen.

Der zum Zeitpunkt dieser Arbeit verfügbare Wellenleiter *WR90*, sollte durch einen *WR62*-Wellenleiter ersetzt werden, um das Verhalten in den höheren Frequenzbereichen ebenfalls prüfen zu können (Abb.: 4.23). Mittels diesen Wellenleiters wäre es ebenfalls möglich gewesen, auf die N-Steckverbinder (Abb.: 4.16 (3)) zu verzichten und SMA-Verbinder zu verwenden (Abb.: 4.23 (B, 3)). Entsprechend der eingesetzten Kalibrierungsgeräte, sahen die Ergebnisse vielversprechend aus (Abb.: 4.23 (C)). Aufbauend zu

diesen Betrachtungen sollten weitere Patchantennen mit dem *Metamaterial* kombiniert werden, um den Strahlungsgewinn zu beobachten. Durch die plötzlich eintretende *COVID-19*-Pandemie [43] konnte dieses im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden.

Integration

Das Herstellungsverfahren von PCBs und die Funktionsweise vom *Metamaterial* widerstreitet sich mit der Integration. Die Funktionsweise der *Metamaterialien* macht es notwendig, dass die Struktur sich stets orthogonal zu Ausbreitungsrichtung befindet. Hierbei ist es unabhängig, welche Polarisierung von dem elektromagnetischen Feld erzeugendem Bauteil ausgeht. Es ist stets notwendig das auf PCB-Basis erstellte *Metamaterial* mechanisch so zu verändern, dass die Funktionalität anhand der Ausrichtung aufrechterhalten werden kann. Somit wird es notwendig die Einzelelemente vom *Metamaterial* miteinander zu kombinieren, um beispielsweise ein Raster zu erzeugen (s.a. Abb.: D.1 (B)). Würde beispielsweise ein Steck-

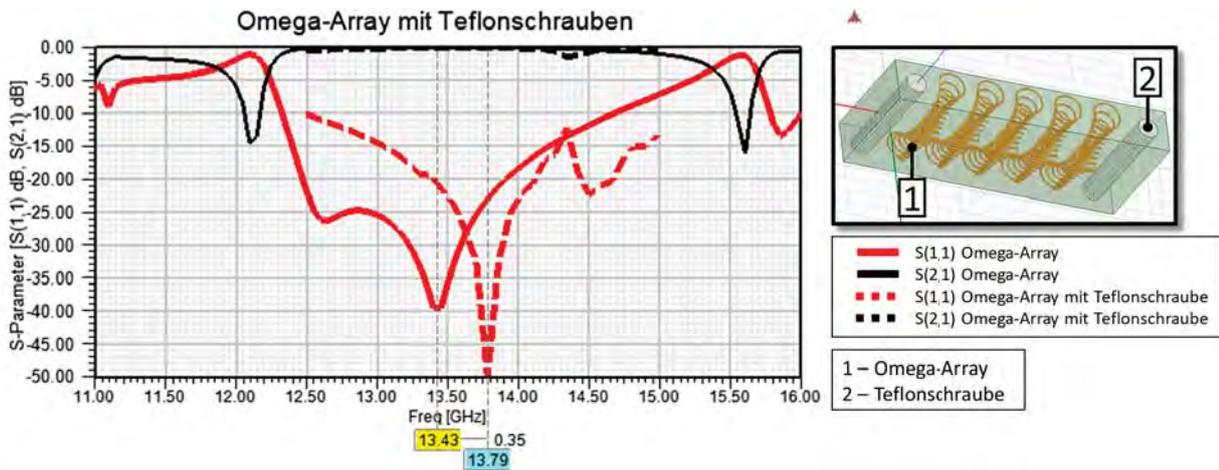
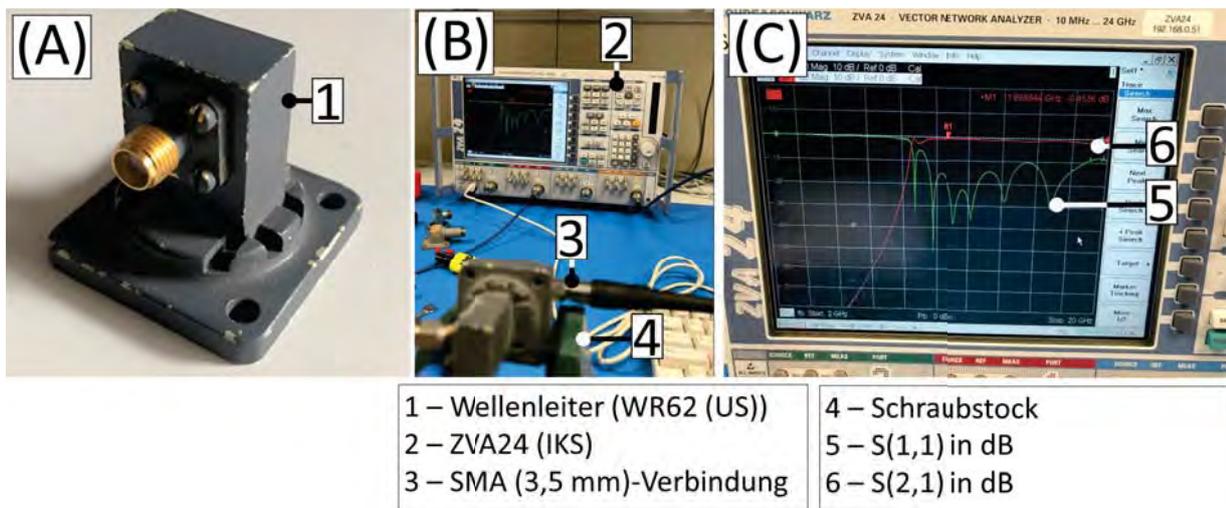


Abbildung 4.22: Vergleich der Simulationsergebnisse (HFSS) der S-Parameter $S(1,1)$ und $S(2,1)$ für ein Omega-Array mit Teflonschrauben.



- 1 – Wellenleiter (WR62 (US))
- 2 – ZVA24 (IKS)
- 3 – SMA (3,5 mm)-Verbindung
- 4 – Schraubstock
- 5 – $S(1,1)$ in dB
- 6 – $S(2,1)$ in dB

Abbildung 4.23: WR62-Wellenleiter für nähere Betrachtungen des Omega-*Metamaterials*. (A) WR62-Wellenleiter, (B) erweiterter Messaufbau, (C) kalibrierter Messaufbau mit zwei WR62-Wellenleitern und durchgeführter Messung (S-Parameter).

verfahren verwendet werden, wobei mittels gefräster Kerben die Elemente miteinander steif verbunden werden würden, so ist das *Metamaterial* in seiner Gesamtheit stets auf eine ebene Fläche eingeschränkt. Komplexere geometrische Formen werden dadurch ungemein schwieriger zu fertigen und parallel dazu fragiler gegenüber Schlagschäden, da keine homogene Struktur vorhanden ist, sondern ein Skelettbauprinzip ohne stützende Wände. Demensprechend beschränkt sich das *Metamaterial* durch seine eigene Bauweise darin selbst in ein bestehendes System integriert zu werden.

Preis

Die Herstellung des entwickelten Omega-*Metamaterials* dieser Arbeit ist sehr teuer. Der Preis einer einzelnen Probe belief sich auf ≈ 200 €, was dieses sehr unattraktiv für eine kommerzielle Verwendung macht. Es sei hierbei ebenfalls zu beachten, dass es sich hierbei um den Mindestbetrag handelt. Durch weiterführende Montage, Installation und Erweiterungen werden weitere Kosten anfallen. Dadurch würde der Preis dieses Bauteils den von SMD-Bauteilen, PCB-Fertigung und ICs um ein Vielfaches übersteigen, die zumeist $< 1\%$ dessen kosten. Ob der Stückpreis durch Massenfertigung sich stark reduzieren würde, sei zu überprüfen. Überwiegen die Vorteile des Materials z.B. die Kosten einer verbesserten Antenne oder eines verbesserten Leistungsverstärkers, muss näher untersucht werden.

Metamaterial auf PCB

Das *Metamaterial* ist nur so gut, wie die Wirtschaftlichkeit dieser Implementierung in das System.

In dieser Arbeit wurde mit einem Omega-*Metamaterial* experimentiert. Dies eröffnete die Frage, ob ein ähnliches Verhalten ebenfalls erzeugt werden könnte, durch die Kombination anderer Geometrien von *Metamaterialien* (vgl. Abb.: D.2), die in der gewünschten Feldumformung resultiert. Würde hierfür von einem beliebigem existierendem System ausgegangen werden, so wären beeinflussende Faktoren für das *Metamaterial* der Abstand der Bauteile (e.g. Antenne, PSU, IC), das gewählte Trägermaterial (e.g. *FR4*, *Rogers4030*) und die gewählten Frequenzen (e.g. schmalbandiges, breitbandiges Verhalten, Multibandverhalten, Höhe der Frequenz). Gleichzeitig sind diese ebenfalls abhängig von den Herstellungstoleranz, wie es in Kpt.: 4.2.2 untersucht wurde.

Daraus resultiert die Frage, ob die benötigten Eigenschaften erhalten bleiben können, wenn die Komplexität des Systems gesteigert wird und die Isolation der Komponenten nicht mehr möglich ist. Somit wären mehrfache Iterationen des erstellten *Metamaterials* notwendig, um eine funktionelle Kombination, mit beispielsweise einer Antenne, herzustellen. Dies würde gleichzeitig für den Entwicklungsprozess voraussetzen, dass das verwendete *Metamaterial* zu Beginn des Entwicklungszeitpunkt feststehen müsste oder mittels mehrerer Iterationen an das bestehende System angepasst wird. Folglich ist die Wirtschaftlichkeit abhängig davon, wie teuer die Herstellung auf PCB-Basis ist und welche Dynamik die Änderungen bieten. Zusätzlich sei für das entwickelte *Metamaterial* dieser Arbeit zu beachten, dass eine gesonderte Herstellung stattfinden muss, auch wenn die Schaltung ebenfalls auf einem PCB gefertigt wird. Auch eine Apparatur zur Befestigung wird benötigt.

Alle diese Teilschritte zur Implementierung machen *Metamaterialien* als PCB unattraktiv. Ein kostengünstigere Variante des *Metamaterials*, die gleichzeitig integriert sein könnte (e.g. Gehäuse) würde dies jedoch wettmachen. Diese Anforderung könnten mittels der Fertigung durch 3D-Druck umgesetzt werden.

4.4 FDM-Druck von Metamaterial

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein Metamaterial aus PCB-Basis gefertigt. In den folgenden Kapiteln wird darauf eingegangen, wie eine Fertigung von Metamaterialien mittels des FDM-3D-Druckverfahrens stattfindet. Eine Vielzahl an Modifikationen am Fertigungsprozess waren notwendig gewesen, um das Verfahren funktionsfähig werden zu lassen. Auf Grund der Ausführlichkeit, wird innerhalb des Textes auf diese Unterkapitel verwiesen, um die notwendigen näheren Details zu erläutern.

4.4.1 FDM-Druck auf Druckbett mit Permanentmagneten

Mittels des Eisenfilaments von *Protopasta* [44] (Kpt.: F.1) wird nun das entwickelte Metamaterial aus Kpt. 4.1 nachgebildet. Das Eisenfilament zeichnet sich durch eine höhere Permeabilität aus ($\mu_r = 5$ bis 8 bei 1 MHz [44, S. 1]), welches es empfänglicher macht gegenüber magnetischen Feldern. Dieses wurde für

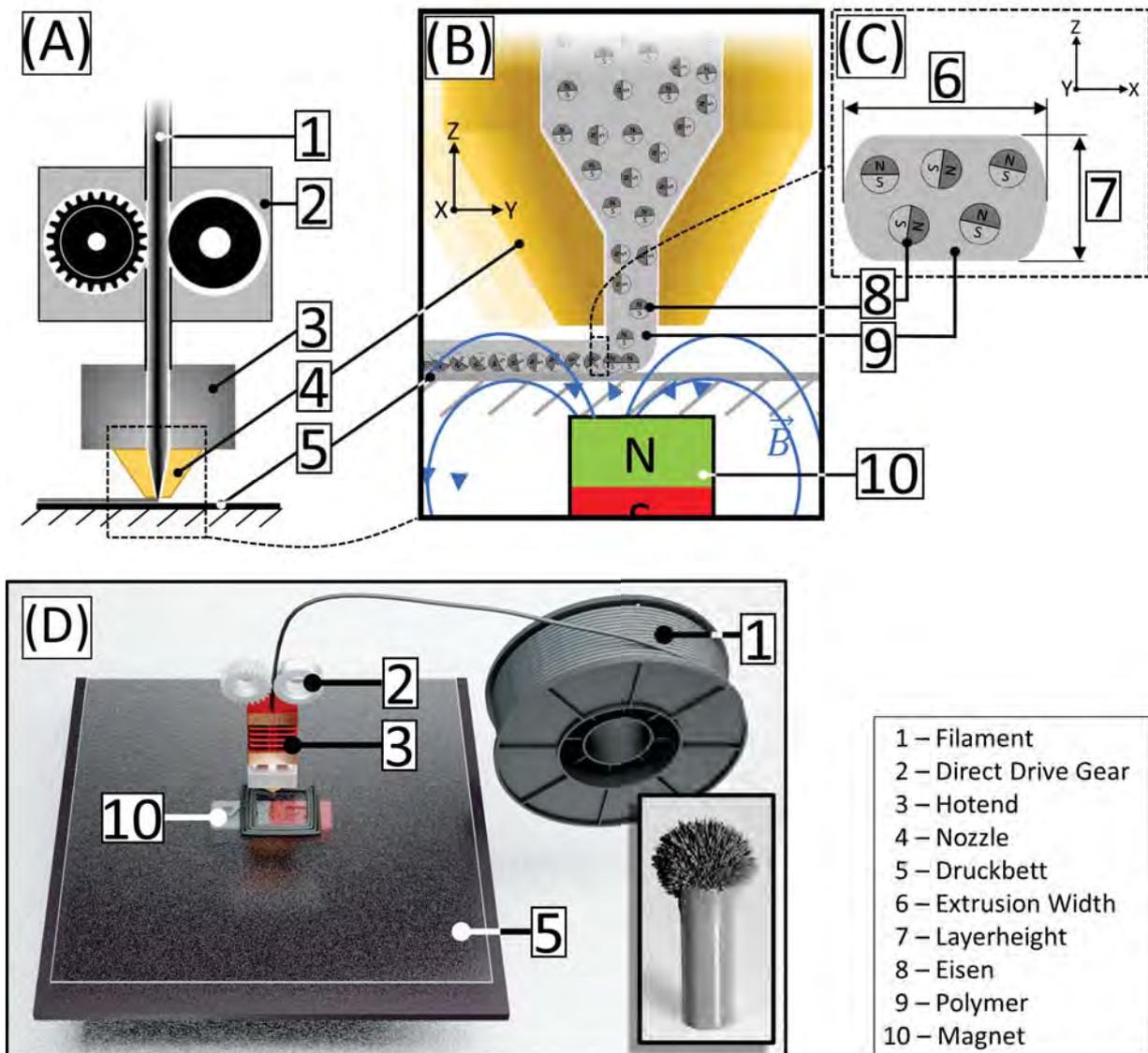


Abbildung 4.24: FDM-Druck mit Eisenfilament und Permanentmagneten. (A) Aufbau und Querschnitt vom Extruder für FDM-Druck, (B) Nahaufnahme und Querschnitt von Düse mit extrudiertem Eisenfilament, (C) Querschnitt von gedrucktem Eisenfilament, (D) Überblick des Druckvorgangs mit Eisenfilament und Permanentmagnet.

die folgende Betrachtung mitberücksichtigt.

Das Fertigungsverfahren wird in Abb. 4.24 dargestellt. Filament (Kpt.: F.1) wird mittels der integrierten Mechanik (Abb.: 4.24 (A, 2)) in das *Hotend* (Abb.: 4.24 (A, 3)) befördert, dort auf den Schmelzpunkt erhitzt und mit Hilfe einer Düse (Abb.: 4.24 (A, 4)) anhand eines Rasters auf dem s.g. Druckbett (Abb.: 4.24 (A, 5)) positioniert. Für diese Arbeit wurde ein s.g. *direkter Extruder* (Kpt.: F.6) verwendet, wobei der Abstand zwischen Düse und Motor klein gehalten wird, um mehr Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit des Druckprozess zu erhalten.

In Abb. 4.24 (B) wird die Zusammensetzung des Eisenfilaments illustriert, wobei im Polymer (Abb.: 4.24 (9)) als Trägermedium Eisenpartikel eingebracht sind (Abb.: 4.24 (8)). Jeder einzelne Eisenpartikel besitzt Eigenschaften eines Dipols und richtet sich dadurch analog zu externen Magnetfeldern aus. Dieses Verhalten entsteht auf Grund der Ausrichtung der WEISSSCHEN Bezirke [45, 46, S. 916, 925 (D)] und wurde in der Abb. 4.24 (D) anhand von Metallspänen an einem Zylinder illustriert. Während des Schmelzprozesses vom Filament im *Hotend* (Abb.: 4.24 (3)) werden die enthaltenen Eisenpartikel mechanisch beweglich, wie in Abb. 4.24 (B) dargestellt. Diese Ausrichtung wird bewusst provoziert, in dem in das Druckbett Permanentmagnete (Abb.: 4.24 (B, 10)) eingelassen sind, um auf diesen zu drucken. Unmittelbar nach dem Auskühlen des Polymers, verharren die enthaltenen Eisenpartikel in die versetzte momentane Position. Es wird dabei davon ausgegangen, dass mittels dieser Methode nicht nur die örtliche Dichte des Eisens diktiert wird. Das magnetisierte Eisen erhält eine geometrische Anordnung, die als Flocken bezeichnet werden kann [47]. Auf diese Weise wird die Silhouette des Magnetfeldes in das gedruckte Objekt eingepägt.

Hierzu bedarf es einer räumlichen Trennung der Magneten vom Rohstoff. Dieses wurde vollzogen durch eine Abgrenzung mithilfe einer Platte aus Glas, Plastik oder Glasfaser (Abb.: 4.24 (D)).

Der verwendete Aufbau ist der Abb. 4.25 zu entnehmen. Es wurde bei der Herstellung der Apparatur maßgeblich darauf geachtet, nicht magnetische Stoffe zu verwenden (e.g. Holz, Glas, Papier, PLA), um ungewollte Rückwirkungen zu vermeiden. So bildet die Grundfläche eine Spanholzplatte (Abb.: 4.25 (4)), auf welche eine mitteldichte Holzfaserplatte (Abk.: MDF, Abb.: 4.25 (3)) montiert wurde, die wiederum eine Glasplatte (Abb.: 4.25 (1)) oder weitere beliebige Träger hält. Beim MDF wurde eine Einlassung eingearbeitet, in welchem die Magnethalter (Abb.: 4.25 (2)) positioniert wurden.

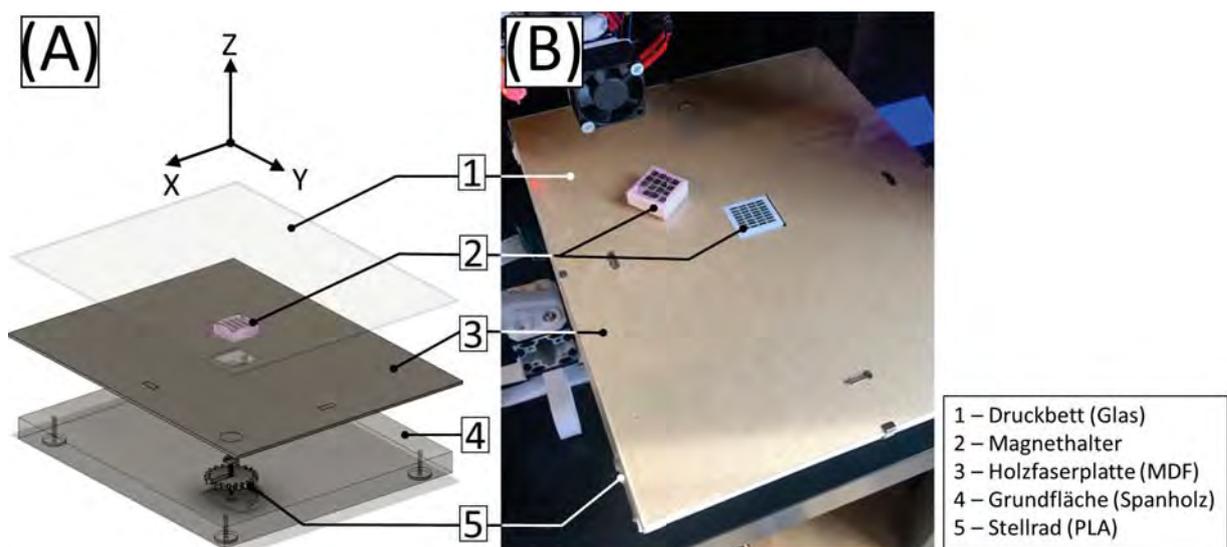


Abbildung 4.25: Erstellter Glasplattenhalter zum Druck von Metamaterialien auf Permanentmagnete. (A) Zusammensetzung der Einzelteile, (B) eingesetzter Aufbau.

Um einen bündigen Abschluss zwischen Glaspaste und Magnethalter zu gewährleisten, wurden an den Eckpunkten der Halterung vier Stellräder (Abb.: 4.25 (5)) integriert, mit welchen der vertikale Abstand justiert werden kann. Die Notwendigkeit dessen entsteht durch die Möglichkeit, verschiedene Magnethalter zu installieren.

Einer der verwendeten Magnethalter aus Abb. 4.25 (2) ist beispielhaft in Abb. 4.26 illustriert. Hier wurde eine Halterung aus PLA erstellt, die es erlaubt vier baugleiche $12 \times 12 \text{ mm}$ -Würfelmagnete [48] aus Neodym in unterschiedlichen Polarisierungen zu verankern. Die Montage ermöglicht es die unterschiedlichen Feldformungen vom Magnetfeld auf das zu druckende Eisenfilament zu übertragen. Zur Illustration der Feldformungen, wurde eine Magnetfolie verwendet (Abb.: 4.26 (C, 3)). Anhand derer und der mobilen eingefärbten Eisenspäne, ist eine Vorschau des Magnetfeldes möglich. Die illustrierte Magnetfolie zeigt das Ergebnis bei einer Kombination der vier $12 \times 12 \text{ mm}$ -Würfelmagnete in einer gleichgerichteten Polarisierung (Abb.: 4.26 (D, 4)). Erkennbar hierbei ist, dass Eisenspäne sich hauptsächlich an den Übergangsbereichen ansammeln, weil das magnetische Feld dort am stärksten ist.

In Abb. 4.27 wird beispielhaft das Ergebnis des Fertigungsprozesses dargestellt. Hierbei bietet die Grundlage der bereits in Kpt. 4.2.3, Abb. 4.16 (B, 2) verwendete *WR90*-Wellenleiter. Mit der beschriebenen Methode soll der Ausgang des Wellenleiter, mit den in Abb. 4.27 (A, 2) beschriebenen Dimensionen, abgebildet werden. Hierfür wurde ein Magnethalter gefertigt (Abb.: 4.27 (B, 3)), für acht Neodymmagnete. Verwendet wurden für die linke und rechte Seite vier $8 \times 4 \times 3 \text{ mm}$ -Quadmagnete [49], sowie für die Ober- und Unterseite vier $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}$ -Quadmagnete [50]. Gemäß der maximalen Verteilung der Eisenspäne am Übergangsbereich der Magnete (Abb.: 4.26 (C), Abb.: 4.27 (C)) und dem Ziel die Silhouette des Ausgangs vom *WR90* abzubilden, wurde der Magnethalter hierfür designt und hergestellt (Abb.: 4.26 (A), (D)). Die gleiche Polarisierung der Magnet wurde hierfür zum Zentrum ausgerichtet (Abb.: 4.26 (D, 5)). Mithilfe dieses Magnethalters im Druckbett und der beschriebenen Fertigungsmethode wurden Proben gefertigt.

Zur weiteren Visualisierung sind in Abb.: 4.26 (F), (G) zwei Proben dargestellt, wobei gefärbte Eisenspäne mit photopolymerem Harz gemischt und auf den Magnethalter aufgelegt wurden. Durch Abb. 4.27 (F) wird abermals verdeutlicht, dass die Eisenspäne sich hauptsächlich am Übergangsbereich der Pole anordnen. Wie in Abb. 4.27 (G) dargestellt ist, können abhängig von den verwendeten Magneten auch komplexe geometrische Formen so abgebildet werden, die dennoch abhängig sind von den verwendeten Magneten. Um diese Ausrichtung permanent zu erhalten, wurde das photopolymere Harz mittels UV-Lichts ausgehärtet, welches eine weitere mechanische Bewegung der Eisenspäne verhindert. Dieses Verfahren findet erneut Anwendung im Kpt. 4.4.2. Wie in Abb. 4.27 (E, 6) illustriert, wurde eine lichtdurchlässige Probe erstellt, mit der gewünschten Silhouette des *WR90*-Wellenleiters. Obwohl das gewünschte Ergebnis erzielt worden ist, sind eine Vielzahl von Unregelmäßigkeiten im Druck zu erkennen, welche mithilfe einer Vielzahl von Modifikationen im Rahmen dieser Arbeit behoben worden ist.

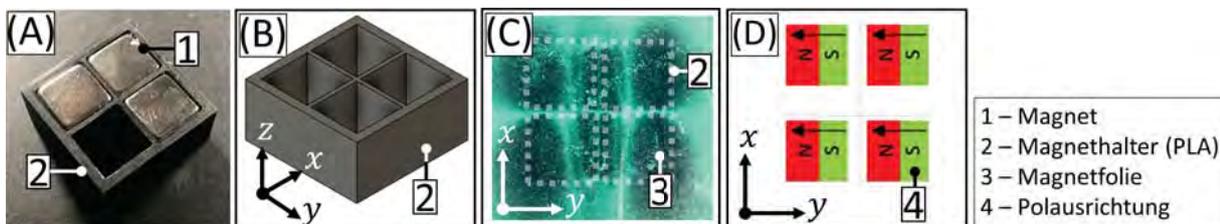


Abbildung 4.26: Magnethalter aus PLA mit integriertem Permanentmagneten. (A) Magnethalter für $12 \times 12 \text{ mm}$ -Würfelmagnet [48] N48 (Haftkraft: 6,3 KG), (B) Magnethalterdesign in *Fusion360*, (C) Magnetfeldbildung anhand von Magnetfolie mit vier $12 \times 12 \text{ mm}$ -Würfelmagnete [48], (D) Polarisierung der verwendeten vier $12 \times 12 \text{ mm}$ -Würfelmagnete [48].

So ist die lichtere Stelle im dritten Quadranten durch *Heat-Creep* (Kpt.: F.8) bedingt. Ebenfalls zu erkennen, die Ausfüllung des Objektes erfolgt mittels eines Kreuzmusters, um die Freibereiche zu füllen. Dieses sollte bis zu dem Grad überlagernd sein, dass es nicht mehr erkenntlich sein kann. Die in Abb. 4.27 (E, 6) zu sehenden Kreuzmuster sind bedingt durch eine zu kleine *Extrusion Width* und fehlerhafte Kalibrierung (Kpt.: F.13).

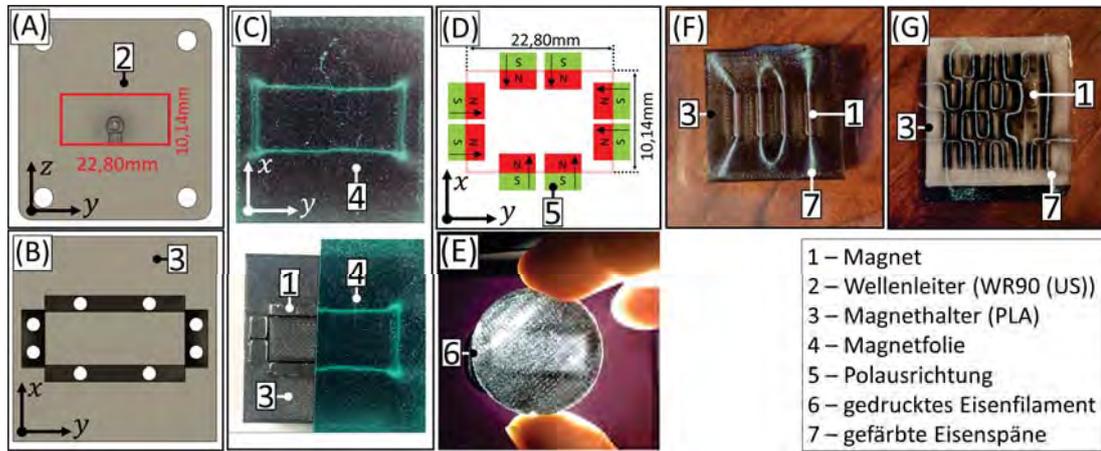


Abbildung 4.27: Abbildung der Silhouette des Ausgangs eines *WR90*-Wellenleiters. (A) Seitenansicht auf den Ausgang eines *WR90*-Wellenleiters mit Dimensionen, (B) Draufsicht auf Magnethalter zur Abbildung der Silhouette eines *WR90*-Wellenleiters, (C) Magnetfolie auf Magnethalter mit installierten Magneten, (D) Polarisierung der installierten Magnet, (E) gedruckte Probe mit Eisenfilament und Magnethalter für Silhouette von *WR90*-Wellenleiter, (F) ausgerichtete Eisenspäne auf Magnethalter und vier Magnete in ausgehärtetem photopolymerem Harz, (G) ausgerichtete Eisenspäne auf Magnethalter und 33 Magnete in ausgehärtetem photopolymerem Harz.

Tabelle 6: Einstellung für Eisenfilament[44] in *Simplify3D*, um Omega-Metamaterial zu drucken

Kategorie	Einstellungen	Wert
Extruder	Typ	Remote Extruder <i>Zesty Nimble</i>
	Nozzle Diameter	0,25 mm
	Extrusion Multiplier	1,02
	Retraction Distance	0,20 mm
	Retraction Vertical Lift	0,20 mm
	Retraction Speed	45 mm/s
Layer	Primary Layer Height	0,2 mm
	Top Solid Layers	0
	Bottom Solid Layers	0
	Outline/Perimeter Shells	1
Infill	Interior Fill Percentage	0 %
Temperature	Primary Extruder	210 °C
	Heated Bed ^a	0 °C
	Fan Speed	100 % at Layer 1
	Speeds	Default Printing Speed
Other	X/Y Axis Movement Speed	150 mm/s
	Horizontal Size Compensation ^b	0,0 mm
	Linear Advance ^c	0.0

^aBeheiztes Druckbett durch Apparatur ersetzt (vgl. Kpt.: 4.4.1)

^bs.a. Kpt.: F.11

^cs.a. Kpt.: F.15

4.4.2 Druck von Metamaterial mit Eisenfilament und Magneten

Die Erstellung des Metamaterials auf Basis von Eisenfilament teilt sich in zwei Teile auf. Im Ersten soll untersucht werden, welche messbaren hochfrequenten Ergebnisse ein mittels FDM gedrucktes Metamaterial generiert. Zum Zweiten, wie sich die Ergebnisse unter Einflussnahme von Permanentmagneten auf das Eisenfilament verändern (Kpt.: 4.4.1).

Die Druckeinstellung für das Eisenfilament und dem Druck des Omega-Metamaterials sind der Tab. 6 zu entnehmen. Hierbei wurde darauf geachtet, dass eine langsame Druckbewegung (30 mm/s) vollzogen wird, aber eine sehr schnelle Nichtdruckbewegung (150 mm/s). Grund hierfür ist quellendes Eisenfilament zu kompensieren (Abb.: 4.28 (E, 7)). Gleichzeitig wurde für diesen 3D-Druck ein kleinerer Düsendurchmesser (0,25 mm) verwendet, um den Druck der feinen Strukturen zu ermöglichen. Als Layerhöhe (engl.: *Layerheight*) wurde 0,2 mm verwendet, um einen einzelnen Strang von Filament zu drucken.

Vor jedem Druck erfolgt eine Abtastung des Druckbetts (Kpt.: F.10).

Für den 3D-Druck des Omega-Metamaterials wurden aus dem Simulationsprogramm *HFSS* die Strukturen als Modelle exportiert⁷ und in *Simplify3D* eingefügt (Abb.: 4.28 (A)). Um Einfluss darauf nehmen zu können, in welcher Reihenfolge jedes Omega-Metamaterial gedruckt wird, erfolgte die Exportierung jedes Objekts als individueller Bestandteil. Die Objekte wurden innerhalb von *Simplify3D* gruppiert, in dem der gemeinsame Koordinatenursprung der Objekte als Referenz verwendet wurde⁸ (vgl. Legende Abb.: 4.28 (C)). Auf diese Weise konnte verhindert werden, dass herausquellendes Filament nicht die bereits gedruckten Proben verunreinigen würde. Die Auswirkung dessen sind in Abb. 4.28 (E) dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass innerhalb eines geometrischen Zickzackmusters das Omega-Metamaterial gedruckt wurde, von der rechten zur linken Seite. Erkennbar ist hierbei mit vorschreitendem Druckprozess die Zunahme

⁷Exportierungsvorgang: *.STEP-File und Konvertierung als *.STL

⁸Anordnung von Objekten anhand des gemeinsamen Koordinatenursprungs in *Simplify3D*: \Simplify3D\Edit\Align Selected Model Origins\

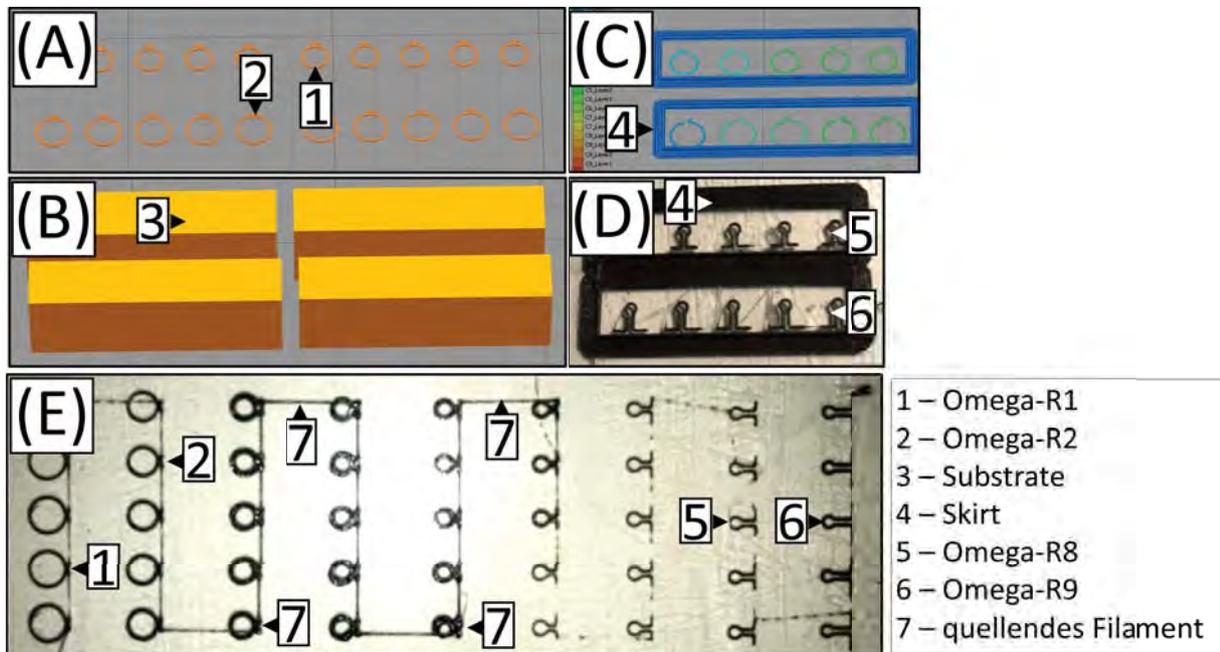


Abbildung 4.28: Druckprozess von Omega-Metamaterial. (A) Modellvorschau in *Simplify3D* vom Omega-Metamaterial, (B) Modellvorschau in *Simplify3D* vom Substrat, (C) Vorschau vom *GCode* des Drucks mit Omega-Metamaterial und Skirts, (D) gedrucktes Omega-Metamaterial (E) Auswirkung auf Druckqualität durch aus der Düse quellendes Filament.

von quellendem Filament (Abb.: 4.28 (E, 7)). Wobei die Omega-Metamaterialien R1 (Abb.: 4.28 (E, 1)) und R2 (Abb.: 4.28 (E, 2)) noch von guter Qualität gekennzeichnet sind, treten mit fortschreitendem Druckvorgang Artefakte in Erscheinung, die die Einsetzbarkeit der Metamaterialien verhindern würden. Um dem entgegen zu wirken, wurden verbesserte Kühlungsmechanismen entwickelt (Kpt.: F.9, Kpt.: F.8, Kpt.: F.7), sowie eine Düsenreinigung als Zwischenschritt (Kpt.: F.14). Zum Herstellungszeitpunkt dieser Proben war der FDM-Druckprozess noch nicht final verfeinert, so dass eine frühe Version verwendet werden musste (e.g. *Remote-Extruder*, Standardkühlung). Das Ergebnis dieser Modifikation ist der Abb. 4.28 (D) zu entnehmen.

Um die gedruckten Omega-Metamaterialien vom Druckbett entfernen zu können, wurde als Trägermedium photopolymeres Harz verwendet, welches aus dem SLA-Druckverfahren bekannt ist. Hierfür wurden die Omega-Metamaterialien im Druckvorgang mit einem Rock (engl.: *Skirt*, Abb. 4.28 (4)) versehen, wobei eine Umrandung um das Objekt erstellt wird. Als Referenz hierfür wurde das von der *HFSS*-Simulation verwendete Objekt vom Substrat verwendet und ebenfalls am gemeinsamen Koordinatenursprung orientiert (Abb.: 4.28 (B, 3)). Abhängig von der Höhe des Skirt konnte die Substrathöhe des Omega-Metamaterials gesteuert werden, welche als $0,8\text{ mm}$ gewählt wurde und identisch dem vom *Ro4030B* (Kpt.: 4.1) sein soll.

Der Herstellungsprozess wurde in Abb. 4.29 visualisiert. Hierbei wurde das als Druckbett verwendete Glas (Abb.: 4.25 (1)) vom FDM-Drucker entfernt und das gedruckte Omega-Metamaterial innerhalb des *Skirts* mit flüssigem photopolymerem Harz aufgefüllt, unter Vermeidung von Blasenbildung. Durch die Schichtung einer zweiten Glasplatte (Abb.: 4.29 (B, 2)) wird das Omega-Metamaterial mit dem flüssigem photopolymerem Harz gepresst. Eine aufgelegte UV-Lampe (Abb.: 4.29 (4)) wird zur Aushärtung des Harzes verwendet, wobei Aluminiumfolie (Abb.: 4.29 (5)) als Reflektor verwendet wird, um eine homogene Verteilung zu bewirken⁹.

Nach dem Aushärten des Harzes, wurde die Probe von den Glasscheiben, dem *Skirt*, sowie dem überschüssigem Harz befreit. Die generierten Proben von Omega-Metamaterial R1 bis R9 sind der Abb.: 4.29 (D, 6) zu entnehmen.

⁹Zur Aushärtung wurden 10 bis 20 Sekunden UV-Belichtung verwendet.

4.4.3 Vermessung von FDM-gedrucktem Omega-Metamaterial

In folgendem Abschnitt wird auf die Vermessung des 3D-gedrucktem Omega-Metamaterial eingegangen. Um vergleichbare Ergebnisse zu haben, wurde der identische Messaufbau von Kpt.: 4.2 verwendet. Zur Ermittlung der Transmission anhand der S-Parameter, ist abermals Grundlage der Netzwerkanalysator ZVA24 von Rohde & Schwarz (Abb.: 4.16 (A)). Als Übertragungsinstrument wurde hierfür die zwei baugleichen WR90-Wellenleiter¹⁰ mit N-Steckverbindern verwendet (Abb.: 4.16 (B)). Die Zusammensetzung der Gerätschaften ist der Abb. 4.16 (D, E) zu entnehmen. Hierbei wurden die Wellenleiter (Abb.: 4.16, (2)) miteinander verbunden, wobei die Probe innerhalb des Übergangsbereichs platziert wurde. Die Kabel wurden hierbei mittels 3,5 mm-Steckverbinder mit dem VNA verbunden, wobei am Wellenleiterübergang ein Adapter für N-Steckverbinder verwendet werden musste. Die Kalibrierung wurde mittels des R&S ZV-Z52 [40] (Abb.: 4.16, (C, 4)) vorgenommen, wobei die N-Steckverbinder nicht berücksichtigt werden konnten. Folglich ist bei den Messergebnissen von einem Verlust von mindestens -3 dB auszugehen. Ein zweiter Validierungsmessaufbau (Abb.: 4.16 (D)) konnte auf Grund der Verfügbarkeit nicht verwendet werden.

Auch für diese Messung wurden die gedruckten Omega-Metamaterialien (s.a. Kpt.: 4.4.2) gestapelt, mittels der entsprechenden Reihenfolge vom Simulationsmodell (Kpt.: 4.1.3). Zur Fixierung wurde die Stirnseite mittels Klebeband umwickelt und so in ihrer Position fixiert. Die entsprechende Probe ist der Abb. 4.30 (A), (B) und (C) zu entnehmen. Mit dieser Messung sollen die Ergebnisse des Omega-Metamaterials aus Ro 4030B verglichen werden (Kpt.: 4.2.3). Hierfür wird die Probe zentral auf dem WR90-Wellenleiter positioniert (Abb.: 4.30 (E)) und mit aus PLA 3D-gedruckten Haltern durch Klemmen fixiert (Abb.: 4.30 (D, 3)). Die Position dessen wird vorab mithilfe eines Messschiebers¹¹ auf dessen Genauigkeit überprüft, bevor die Probe in der Halterung verankert wird. Anhand der Abb. 4.30 (F) illustriert, wird der zweite WR90-Wellenleiter auf der Probe mit Schrauben befestigt. Das gesamte Konstrukt wird mit einem Schraubstock am Tisch fixiert (Abb.: 4.30 (8)).

¹⁰Wellenleitertyp: WR-90 (US), WR-16 (EU)

¹¹Starrett (Modell 798A-6/150) [41]; Genauigkeit 0,01 mm

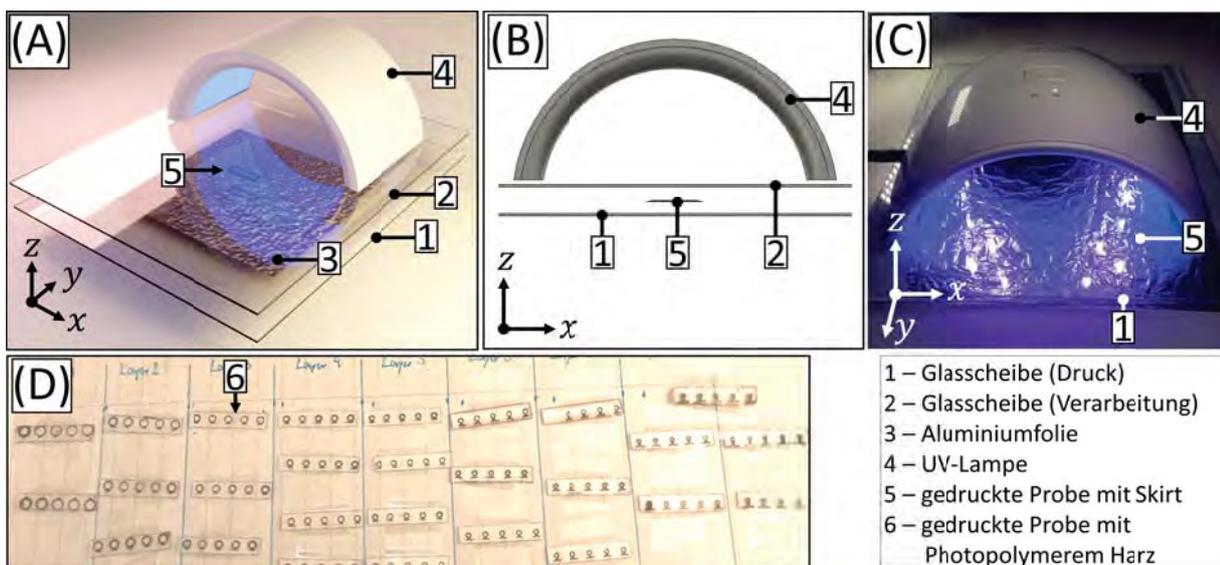


Abbildung 4.29: Fertigungsprozess und Einkapselung von gedrucktem Omega-Metamaterial mit photopolymerem Harz. (A) Zusammensetzung der verwendeten Werkzeuge, (B) Seitenansicht der verwendeten Werkzeuge, (C) Aushärtungsvorgang des Photopolymer Harzes, (D) gefertigte gedruckte Omega-Metamaterialien mit Eisenfilament eingekapselt in photopolymeren Harz.

Die ermittelten Messergebnisse sind der Abb. 4.31 zu entnehmen. Das aus Kpt. 4.2.3 bekannte Metamaterial wird hierbei mit drei Probentypen verglichen. Jede Probe verwendet photopolymerem Harz als Trägermedium. So sind in den Graphen 4.31 die Messergebnisse für eine unbedruckte Probe (Abb.: 4.30 (F, 8)), eine Probe mit gedrucktem Eisenfilament (Abb.: 4.30 (C)) und eine Probe aus Eisenfilament, die auf einem Permanentgeduckt wurde (s.a. Kpt.: 4.4.1). Alle Proben wurden gestapelt verwendet (Abb.: 4.31 (C, 3)). Die Ausrichtung der Probe mit dem Wellenleiter ist der Abb. 4.31 (C) zu entnehmen.

Anhand von Abb. 4.31 (A) wird die Transmission $S(2,1)$ aller Proben verglichen. Die Verläufe zeigen, dass das Verhalten vom ursprünglichem Omega-Metamaterial damit nicht mehr abgebildet wird. Für die mittels des FDM-Prozesses hergestellten Komponenten ist jedoch eine Differenz der Transmission von 3 dB bei $11,5\text{ GHz}$ und $12,0\text{ GHz}$ zu erkennen. Das Verhalten oberhalb von 13 GHz variiert hierbei innerhalb der Proben. Vergleichend dazu der Graph 4.31 (B) aus den vorherigen Betrachtungen, wobei es sich hierbei jedoch um einen identischen Messaufbau handelt. Bei $9,82\text{ GHz}$ ist eine geringe Differenz von 1% zu erkennen. Größere Variationen sind bei $> 11,97\text{ GHz}$ zu erkennen, mit einer Differenz von 11% . Entlang der Messung für die mittels des FDM-Verfahrens produzierten Proben ist zu erkennen, dass Unterschiede vorhanden sind. Es ist somit davon auszugehen, dass der Fertigungsprozess Einfluss auf das Verhalten hat. Dieses soll in den folgenden Kapiteln näher untersucht werden.

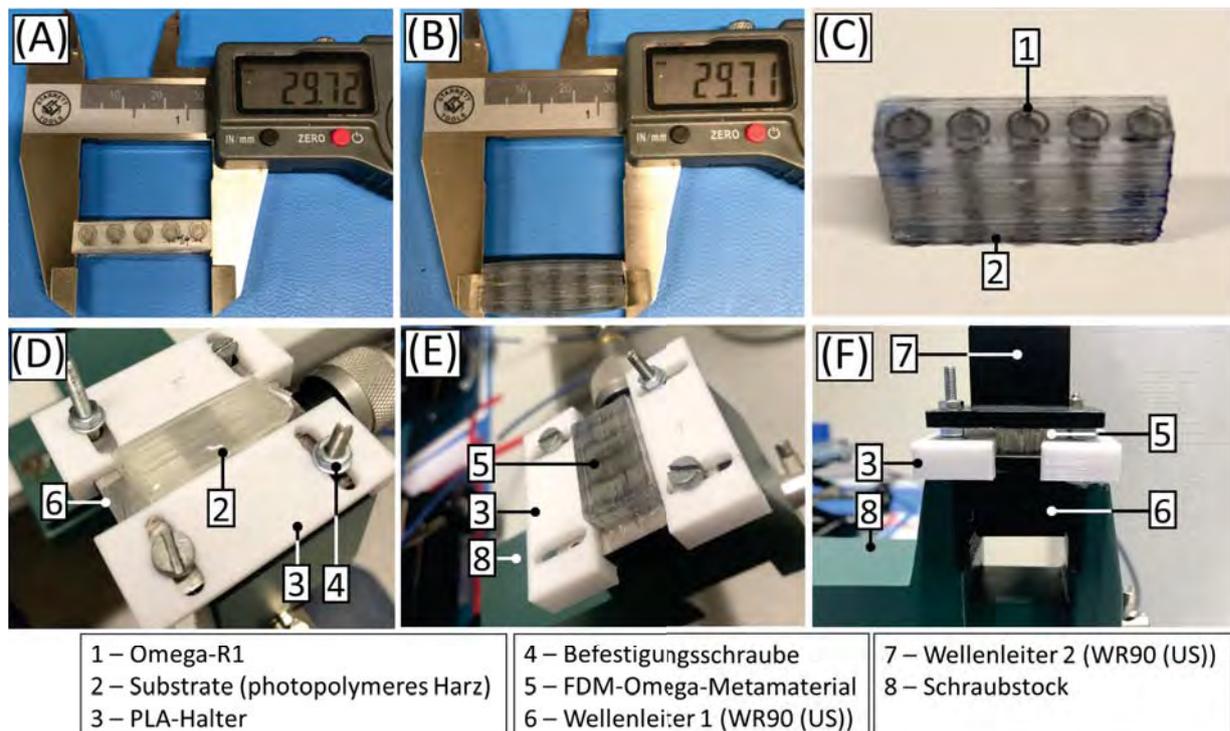


Abbildung 4.30: Aufbau zur Ermittlung der HF-Eigenschaften des 3D-gedruckten Omega-Metamaterials. (A) Draufsicht der geometrischen Vermessung der Probe vom 3D-gedrucktem Omega-Metamaterial, (B) Seitenansicht der geometrischen Vermessung der Probe vom 3D-gedrucktem Omega-Metamaterial, (C) Nahaufnahme der gestapelten Probe des 3D-gedruckten Omega-Metamaterials, eingekapselt in photopolymerem Harz, (D) installiertes unbedrucktes photopolymeres Harz am Wellenleiter mit PLA-Haltern, (E) installierte mit Eisenfilament bedruckte Probe mit photopolymerem Harz am Wellenleiter mit PLA-Haltern, (F) verwendeter Aufbau zur Messung des bedruckten Omega-Metamaterials mit zwei Wellenleitern.

5 Eisenfilament

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein Metamaterial aus PCB-Basis gefertigt und dieses mittels des FDM-3D-Druckverfahrens abgebildet. Das dafür verwendete Eisenfilament (Kpt.: F.1, [44]) zeigte anhand der HF-Messungen unterschiedliches Verhalten, sofern dieses unter Einflussnahme von Permanentmagnete gedruckt wurde (Kpt.: 4.4.1). In dem folgenden Kapitel soll dieses isoliert näher untersucht werden.

Der hier vorgestellte Fertigungsprozess und dessen Resultate wurde in [51] veröffentlicht.

5.1 FDM-Druck von Eisenfilament mit Magneten

Im Kpt. 4.4.1 wurde ein Fertigungsverfahren vorgestellt, wobei Permanentmagnete im Druckbett platziert werden, um dann mittels des statischen Magnetfeldes Geometrien in das Eisenfilament einzuprägen. Es sollen nun weitere Proben gefertigt werden, wobei der Anteil des Eisenfilaments variiert wird, sowie das verwendete statische Magnetfeld. Auf diese Weise soll Rückschluss auf die materialabhängige Veränderlichkeit des HF-Signals gezogen werden.

Für die Herstellung der Proben wurden zwei Filamente verwendet. Kern der Untersuchung ist das aus den vorherigen Betrachtungen verwendete Eisenfilament von *Protopasta* [44].

Als zweiter Rohstoff wird weißes PLA von *Janbex* [52] verwendet, da dieses aus Vorbetrachtungen eine geringe Interferenz bei Messungen aufwies. Laut [53] besitzt das PLA eine Permittivität von $\epsilon_r = 2,7$. Die verwendeten Druckeinstellungen hierfür sind der Tab. 7 zu entnehmen. Für beide Filamente wurde ein Düsendurchmesser von $0,4\text{ mm}$ verwendet, welcher häufig als Standardgröße für den FDM-Druck verwendet wird [54, S. 57] und gleichbedeutsam mit $0,48\text{ mm}$ Schichtweite (engl.: *Layerwidth*, Kpt.: F.13) ist. Alle Proben werden mit einer Layerhöhe von $0,2\text{ mm}$ erstellt, sowie der Freibereich (engl.: *Infill*) mit 95 % Material ausgefüllt. Um Verstopfungen zu vermeiden, wurde die Druckgeschwindigkeit für das Eisen

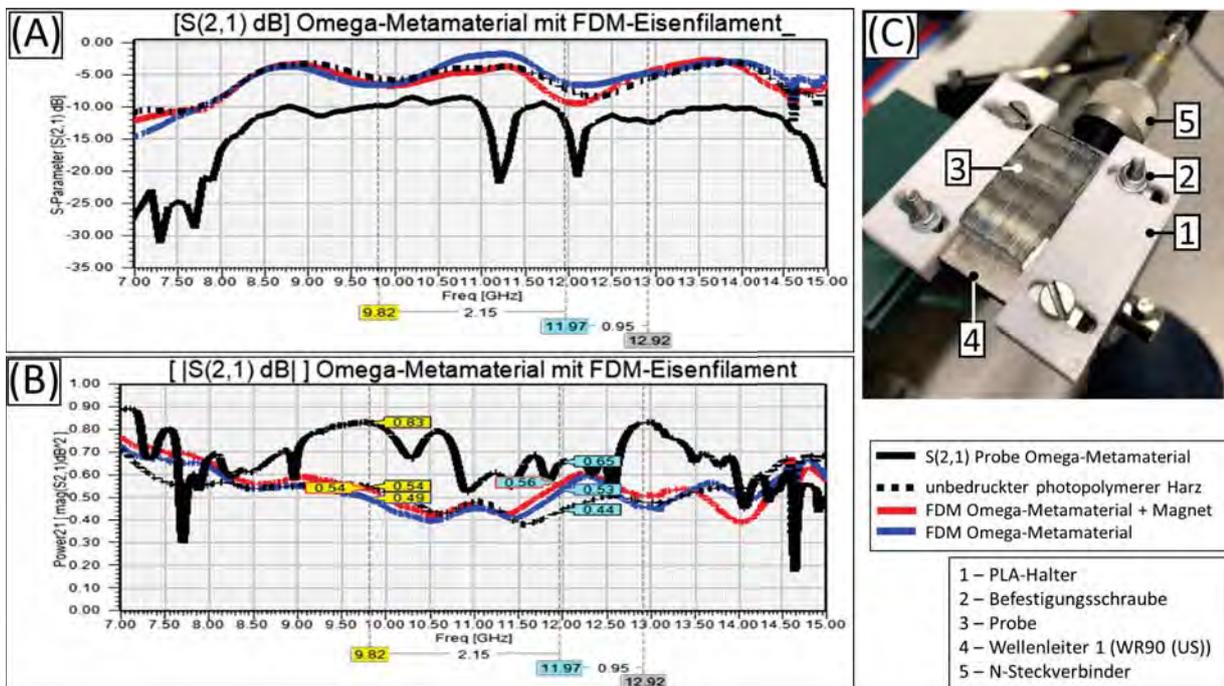


Abbildung 4.31: Messergebnisse und Vergleich vom 3D-gedrucktem Omega-Metamaterial, im Vergleich mit Omega-Metamaterial mit *Rogers 4030B*[39]. (A) S-Parameter $S(2,1)$, (B) Transmission $|S(2,1)|$, (C) vermessene Struktur mit Bestandteilen.

auf 30 mm/s reduziert, im Gegensatz zum PLA mit 60 mm/s . Um Verunreinigungen zu vermeiden, wird beim Wechsel des Filaments die in dieser Arbeit entwickelte *Cold-Pull-Methode* (Kpt.: F.3) verwendet. Vor jedem Druck erfolgt eine Abtastung des Druckbetts (Kpt.: F.10).

Zusammensetzung der Proben

Zu untersuchen sei der Einfluss auf das hochfrequente Signal, anhand der Materialeigenschaften des mit Eisenspänen versetzten Filaments. Hierfür wurden geschichtete Proben erstellt, die zu Teilen aus PLA und Eisenfilament bestehen (Abb.: 5.1). Zur Steuerung der Bestandteile wird das Schichtungsverfahren des 3D-Druckers genutzt, wobei die Anteile anhand der Layerhöhe (engl.: *Layerheight*) gesteuert werden. Laut des Herstellers besitzt das Eisenfilament eine Permeabilität von $\mu_r = 7$ bis 10 und soll in den Proben primär variiert werden. Wie in Abb. 5.1 (A) illustriert, wurde das PLA bei einer konstanten Höhe von 2 mm beibehalten, welches einer *Layerheight* von 10 entspricht (Abb.: 5.1 (A, 2)). Die Schichthöhe des Eisenfilaments wurde variiert in den Höhen $0,4\text{ mm}$ (*Layerheight*: 2), $1,0\text{ mm}$ (*Layerheight*: 5) und $2,0\text{ mm}$ (*Layerheight*: 10). Zusätzlich wurden diese Schichthöhen in drei Probeshöhen variiert, 5 mm (Abb.: 5.1 (A, 3)), 10 mm (Abb.: 5.1 (A, 4)), 15 mm (Abb.: 5.1 (A, 5)). Es sollen hierbei unterschiedliche Transmissionen beobachtet werden, wie bei verschiedenen Ausrichtungen des Eisens das planare auf die Probe auftretende Feld verändert wird. Die Wahl der Abstände fiel hierbei auf die Überlegung, die maximale Nutzfrequenz des *WR90*-Wellenleiters als Referenz zu verwenden [55, S. 1] und unterhalb von $\lambda/8$ der Nutzfrequenz des *WR90*-Wellenleiters zu bleiben. Die effektive Wellenlänge λ_{eff,ϵ_r} dessen wurden basierend auf der ermittelten Permittivität von [53] erstellt.

Tabelle 7: Druckeinstellung für Eisenfilament[44] und weißes PLA von Janbex [52] in Simplify3D

Kategorie	Einstellungen	Iron (Protopasta[44])	PLA (Janbex[52])
Extruder	Typ	Direct Drive	Direct Drive
	Nozzle Diameter	0,40 mm	0,40 mm
	Extrusion Multiplier	0,94	0,82
	Retraction Distance	0,35 mm	0,35 mm
	Retraction Vertical Lift	0,00 mm	0,00 mm
	Retraction Speed	50 mm/s	80 mm/s
Layer	Primary Layer Height	0,2 mm	0,2 mm
	Top Solid Layers	3	3
	Bottom Solid Layers	3	3
	Outline/Perimeter Shells	3	3
Infill	Interior Fill Percentage	95 %	95 %
Temperature	Primary Extruder	210 °C	210 °C
	Heated Bed ^a	0 °C	0 °C
	Fan Speed	80 % at Layer 2	80 % at Layer 2
	Default Printing Speed	30 mm/s	60 mm/s
Speeds	X/Y Axis Movement Speed	80 mm/s	80 mm/s
	Horizontal Size Compensation ^b	0,02 mm	0,02 mm
Other	Linear Advance ^c	0,08	0,08

^aBeiheiztes Druckbett durch Apparatur ersetzt (vgl. Kpt.: 4.4.1)

^bs.a. Kpt.: F.11

^cs.a. Kpt.: F.15

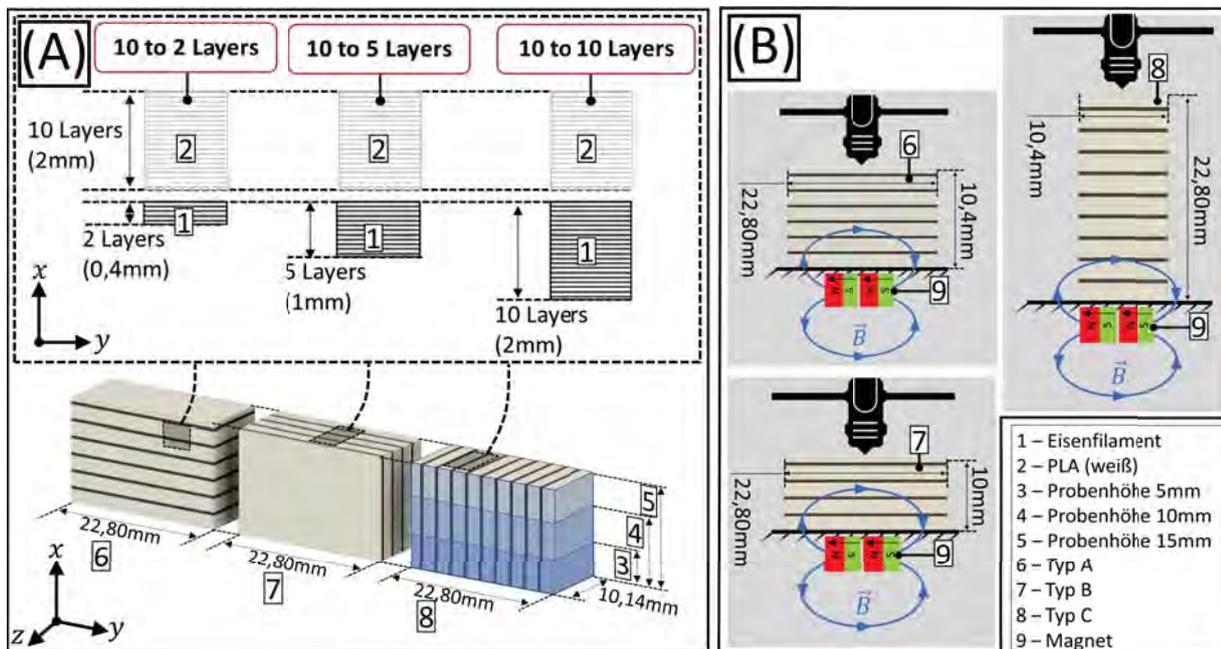


Abbildung 5.1: Zusammensetzung der erstellten Proben mittels FDM-Druckverfahren. (A) Bestandteile des Schichtenaufbaus der drei Probetypen, sowie deren unterschiedliche Schichtung, (B) Erweiterung des FDM-Druckverfahrens mittels integrierter Permanentmagneten im Druckbett

$$\lambda_{1/8} = \frac{c}{f} = \frac{2,99 \cdot 10^8 \left(\frac{m}{s}\right)}{(12,4 \text{ GHz}) \cdot 8} \approx 3,0 \text{ mm} \quad (5.1)$$

$$\lambda_{eff,\varepsilon_r} = \frac{\lambda_{1/8}}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{3,0 \text{ mm}}{\sqrt{2,75}} \approx 1,9 \text{ mm} \quad (5.2)$$

Hier wurden drei Richtungsarten der Layer erstellt, relativ zur Platzierung innerhalb des verwendeten *WR90*-Wellenleiters. Betrachtet man die Ausbreitungsrichtung der Welle im Wellenleiter, so sind die Proben wie folgt erstellt worden; Type A orthogonal (Abb.: 5.1 (A, 6), Abb.: 5.5 (6)), Type B horizontal parallel (Abb.: 5.1 (A, 7), Abb.: 5.5 (7)) und bei Type C vertikal parallel (Abb.: 5.1 (A, 8), Abb.: 5.5 (8)). Um den Einfluss des Eisens beobachten zu können, wurden für den Vergleich außerdem Proben aus reinem PLA gefertigt (Abb.: 5.2 (C)).

Erstellung der Proben

Die mittels des FDM-Drucks hergestellten Proben sind der Abb. 5.2 zu entnehmen. Um einen Filamentwechsel zu bewirken, wird in der bestimmten *Layerheight* das Kommando *M600* durchgeführt. Hierbei wird der Drucker pausiert, in dem die Düse vom 3D-Druck gehoben wird und zu einer Pauseposition fährt. Das Filament wird automatisch entladen und vom Nutzer neu beladen. Durch die zugehörige Nutzereingabe wird der 3D-Druck von der zu letzt angefahrenen Position fortgesetzt. Zum frühen Entwicklungszeitpunkt dieser Arbeit wurde hierbei der *GCode* (Kpt.: C.2.1) fehlerbehaftet verändert, da zunächst eine manuelle Änderung der Programmzeilen gewählt wurde und nicht die Funktion der Prozessunterteilung (Kpt.: C.2.2, Abb.: C.5 (D)). Zum Zeitpunkt dieses Experiments war ebenfalls auch noch nicht die Einbindung des Filamentwechsel bei spezifischen Prozessen bekannt oder die *GCode*-Vorschau von *Simplify3D*. Wie in Abb. 5.2 (D, 7) und (D, 8) zu erkennen ist, variieren einige Schichten in ihrer breiteren Verteilung des Eisenfilament in der Mitte und am Rand. Dies ist ein ungewollter Effekt, der auf die damalige Unerfahrenheit des Autors dieser Arbeit zurückzuführen war. Dies wurde im weiteren Verlauf dieser Arbeit verbessert und die Filamentwechsel in verschiedene Druckprozesse implementiert. Auf diese Weise können ebenfalls zusätzliche Befehle implementiert werden, wie Düsenreinigungen (Kpt.: F.14). Eine Vorschau dessen ist der Abb. 6.12 (B) zu entnehmen.

Herstellung der Proben mit Magnete

Zusätzliche zu den aus Abb. 5.2 erstellten Proben, wurden weitere unter Einflussnahme von statischen Magnetfeldern erstellt. Hierbei wurde das in Kpt. 4.4.1 erstellte Fertigungsverfahren verwendet, wobei aus PLA gedruckte Magnethalter im Druckbett eingelassen sind. Hierfür wurden drei verschiedene Anordnungen gewählt (Abb.: 5.3). Der erste Magnethalter (Abb.: 5.3 (A, 1)) bildet eine Halterung für 16 Stück $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^{12}$ Magnete [56] ab. Zwei Anordnungen wurden für diesen Magnethalter gewählt. Ein wechselseitiger Austausch der Magnete in horizontaler Ausrichtung, welches eine Schachbrettgeometrie (Abk.: *Checkers Magnet*) abbildet. Die zweite Ausrichtung beinhaltet diesen wechselseitigen Austausch als Ring auf der Außenseite und einen 2×2 Kern im Zentrum. Als gleichnamige Bezeichnung wurde hierfür *Ring Magnet* gewählt.

Der zweite Magnethalter wurde in Abb. 4.26 (B, 2) bereits vorgestellt, wobei vier Stück $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}$ Magnete¹³ [48], mit identischer Ausrichtung verwendet werden (Abb.: 5.3 (B)). Grund hierfür ist, um Rückschluss auf die Ergebnisse von Kpt. 4.4.3 nehmen zu können.

¹²Haftkraft 11.8 N

¹³Haftkraft 61.8 N

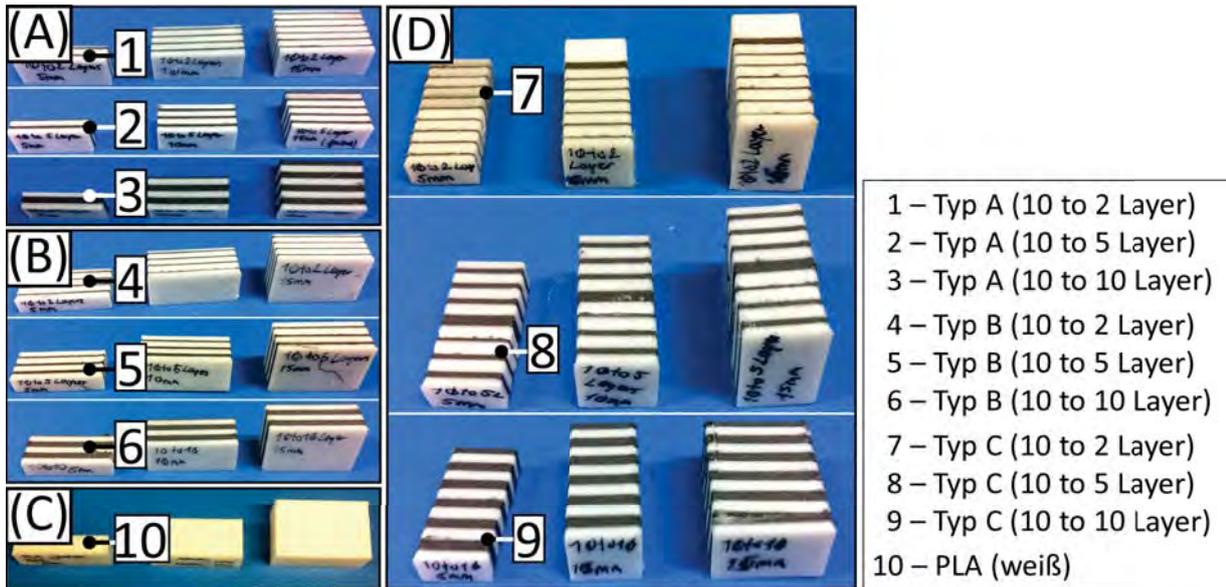


Abbildung 5.2: Erstellte Proben für Messreihe zur Ermittlung des Einfluss von Eisenfilament. (A) Proben typ A (Abb.: 5.1 (6)) mit drei Eisenfilamentschichtungen, (B) Probentyp B (Abb.: 5.1 (7)) mit drei Eisenfilamentschichtungen, (C) Proben aus PLA, (D) Probentyp C (Abb.: 5.1 (8)) mit drei Eisenfilamentschichtungen.

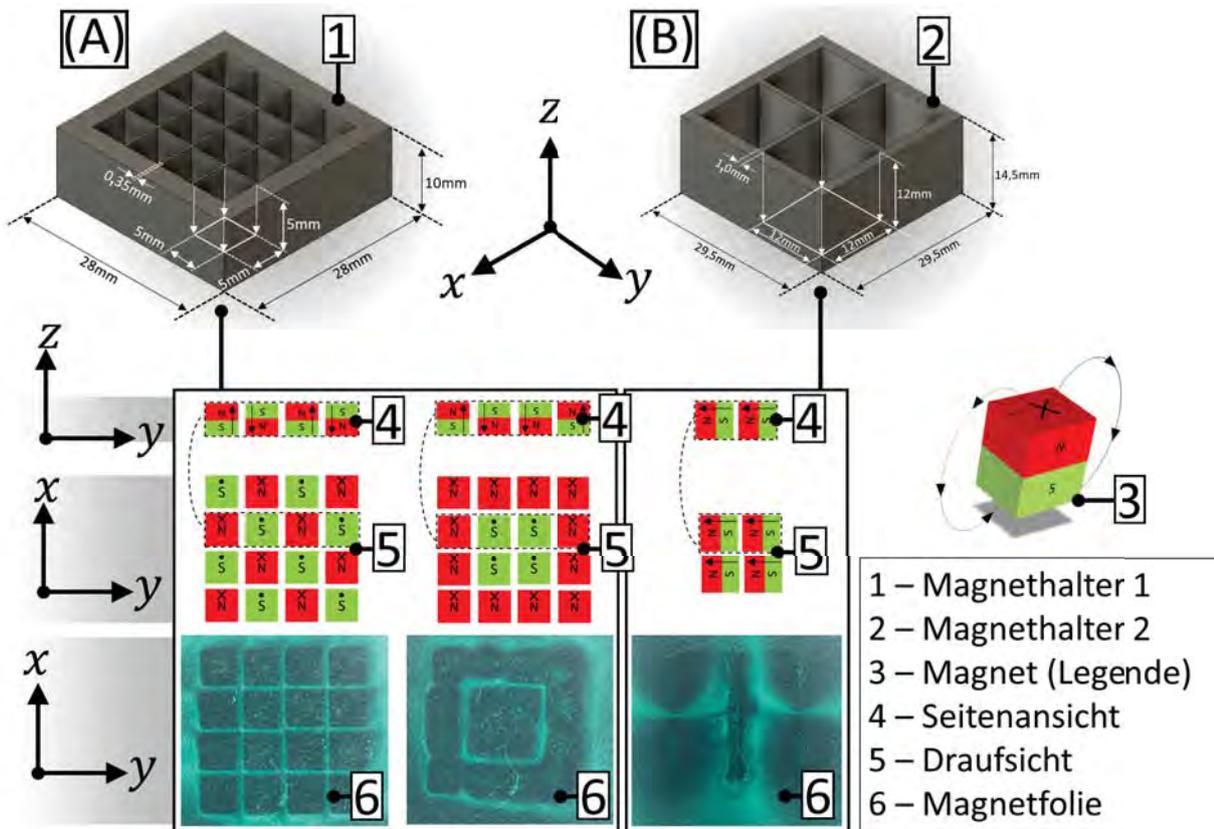


Abbildung 5.3: Im Druckbett platzierte Magnethalter zur Fertigung von Proben unter Einfluss von den statischen Magnetfeldern. (A) Magnethalter für 16 Stück $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ Magnete [56], (B) Magnethalter für 4 Stück $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}$ Magnete [48].

Wie bereits aus den Vorbetrachtungen von Kpt. 4.4.1 bekannt, wurden analog zu den erstellten Anordnungen der Magnete ebenfalls Darstellungen mit Magnetfolie hinzugefügt (Abb.: 5.3), um Einblick auf die erwartete Ausrichtung der Eisenpartikel zu erhalten. Hierbei ist zu erkennen, dass die Eisenspäne ausgeprägt in den angrenzenden Bereichen der Pole vorzufinden sind.

5.2 Messaufbau

In folgendem Abschnitt wird auf die Vermessung der 3D-gedruckten Proben eingegangen.

Um vergleichbare Ergebnisse zu haben, wurde der identische Messaufbau von Kpt.: 4.2 verwendet.

Grundlage ist abermals der Netzwerkanalysator *ZVA24* von *Rohde & Schwarz*, zur Ermittlung der Transmission anhand der S-Parameter. Als Übertragungsinstrument wurden hierfür die zwei baugleichen *WR90*-Wellenleiter¹⁴ mit N-Steckverbindern verwendet (Abb.: 5.4 (C, 6)). Die Zusammensetzung der Gerätschaften ist der Abb. 5.4 (A) zu entnehmen. Hierbei wurden die Wellenleiter (Abb.: 5.4 (A, 3), (A, 4)) miteinander verbunden, wobei die Probe im Wellenleiter platziert wurde. Durch exakte Kalibrierung (Kpt.: F.11) haben die Proben einen bündigen Abschluss im Wellenleiter. Die zentrale Position im Wellenleiter wurde mittels Messschieber geprüft, bevor dieses zusammengesetzt und verschraubt wurde.

Als Kabel wurden 3,5 mm-Steckverbinder mit dem VNA verbunden, wobei am Wellenleiterübergang ein Adapter für N-Steckverbinder verwendet werden musste (Abb.: 5.4 (C, 6)). Die Kalibrierung wurde mittels des *R&S ZV-Z52* [40] (Abb.: 4.16 (C, 4)) vorgenommen, wobei die N-Steckverbinder nicht berücksichtigt werden konnten. Folglich ist bei den Messergebnissen von einem Verlust von mindestens -3 dB auszugehen. Ein zweiter Validierungsmessaufbau (Abb.: 4.16 (D)) konnte auf Grund der Verfügbarkeit nicht verwendet werden.

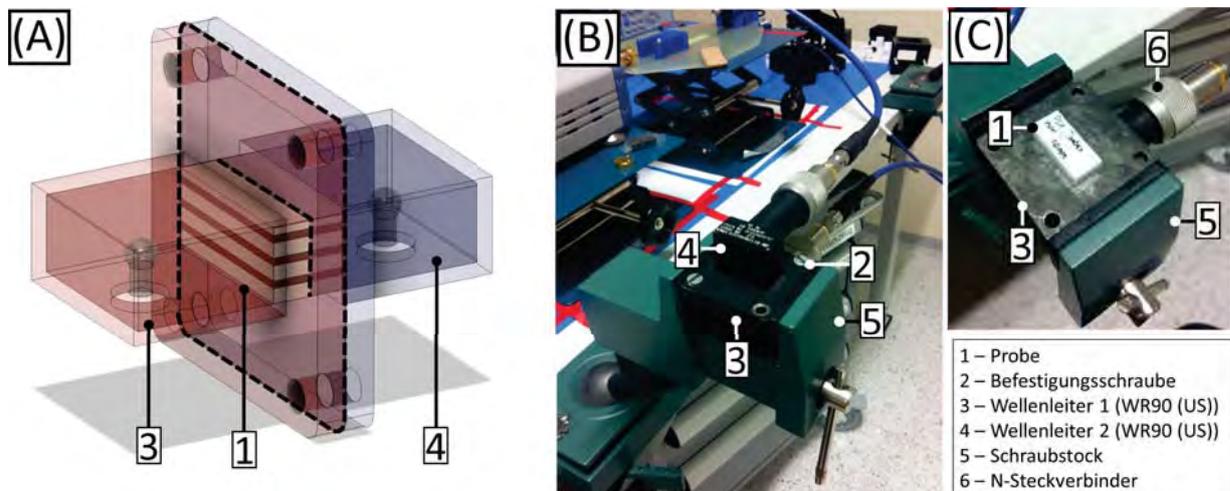


Abbildung 5.4: Zusammensetzung des Messaufbaus zur Ermittlung des Einflusses von Eisenfilament. (A) Zusammensetzung der Einzelteile, (B) Eingesetzter Messaufbau mit zwei Wellenleitern und eingesetzter Probe, (C) demontierter Messaufbau mit eingesetzter Probe im Wellenleiter.

¹⁴Wellenleitertyp: *WR-90* (US), *WR-16* (EU)

5.3 Eisenfilament: Proben zur Vermessung

Mittels der erstellten Proben aus Kpt. 5.1 sollen nun Messungen die frequenzabhängige Dämpfung der Signalübertragung zwischen den beiden Wellenleitern ermitteln. Die eingefügten Proben fungieren hierbei als Störstelle. Hierbei wird die Schichthöhe des Eisenfilaments variiert (*2 zu 10 Layer*, *5 zu 10 Layer*, *10 zu 10 Layer*) und die Schichthöhe vom PLA konstant gehalten (*10 Layer*). Beispielhaft wurden die Probenarten *10 zu 10 Layer* in Abb. 5.5 visualisiert und deren Positionierung innerhalb des WR90-Wellenleiters (Abb.: 5.5 (9)).

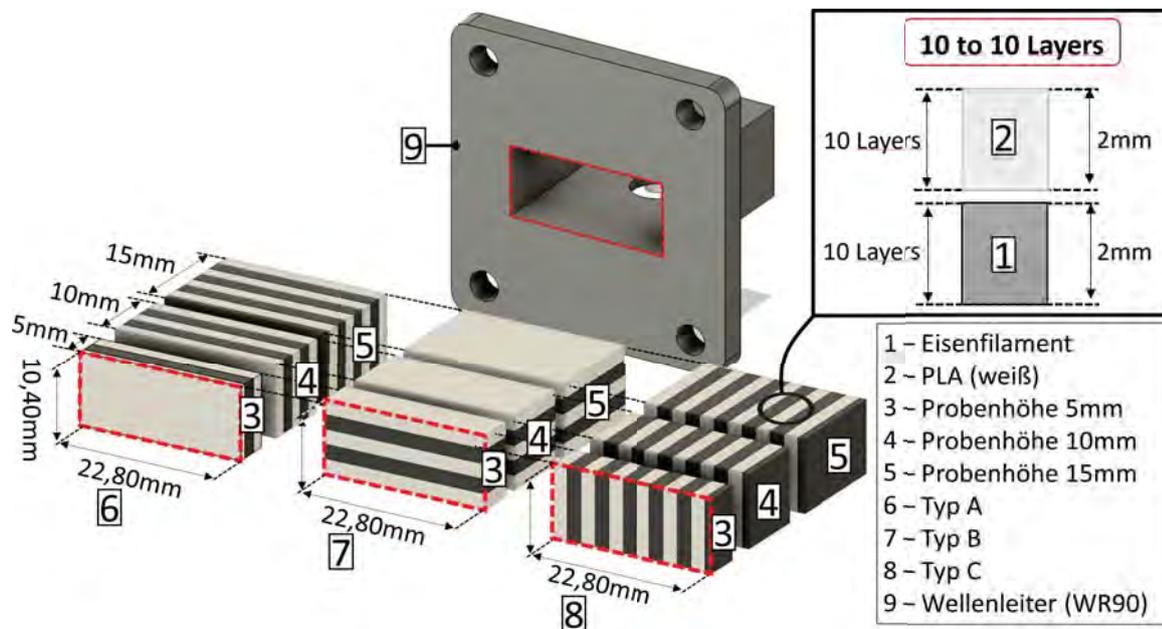


Abbildung 5.5: Ausrichtung der gedruckten Proben im platzierten WR90-Wellenleiter

Alle Messungen werden mit reinem PLA verglichen (Abb.: 5.2 (C, 10)). Bei der Vorgehensweise werden zunächst die Auswirkungen der Variation der Schichtungen des Eisens untersucht. Aufbauend werden die Probentypen *10 zu 10 Layer* mit denen der Probentypen mit Magneten untersucht, da der Eisenanteil in diesen Proben am größten ist und somit die größte Änderung zu erwarten war. In Abb. 5.1 (B) wird Einblick auf das Herstellungsverfahren mit Permanentmagneten gegeben, um so Rückschluss auf die Messergebnisse zu ziehen.

In der ersten Messreihe wurden hierfür Proben Typ A mit unterschiedlichen Schichtungsverhältnissen miteinander verglichen, *10 zu 2*, *10 zu 5* und *10 zu 10 Layer*. Verändert wurde hierbei die Höhe der Proben von *5 mm* (Abb.: 5.6), zu *10 mm* (Abb.: 5.7), zu *15 mm* (Abb.: 5.8). Die Ausrichtung der Probe mit dem statischen Magnetfeld ist der Abb. 5.1 (B, 6) zu entnehmen.

Type A: 5 mm (2, 5, 10 zu 10 Layer)

Im Graphen von Abb. 5.6 (A) ist eine geringe Dämpfung der Transmission $|S(2, 1)|$ von 90 bis 95% von 10 bis 17,5 GHz für den Probentypen A zu erkennen. Die Variation zu der reinen PLA-Variante ist hierbei wenig ausgeprägt. Dennoch auffallend bei der Probe *10 zu 2 Layer* (5 mm) ist der Frequenzpunkt 17,5 GHz mit einem Wert von 60 bis 65% ($|S(2, 1)|$). Obwohl dieser Bereich außerhalb der maximalen Nutzfrequenz des WR90-Wellenleiters [55] liegt, soll dies in die Betrachtung mitaufgenommen werden, da es argumentativ die These unterstützt, dass eine Variabilität mittels des verwendeten Herstellungsverfahrens möglich ist.

Type A: 5 mm mit Magneten

Eine vergrößerte Variabilität ist anhand des Graphen von Abb. 5.6 (B) für den Probetypen A 10 zu 10 Layer (5 mm) unter Verwendung des Einflusses von Magneten. Eine ausgeprägtere Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ von 85 bis 92% ist für die Varianten *Ring Magnet* und *Big Magnet* zu erkennen. Deutlich wird dies anhand der Frequenzpunkte 11,34 GHz, 12,55 GHz und 15,5 GHz, wobei hierbei jedoch nicht von Resonanzen ausgegangen werden kann. Die Variante *Checkers Magnet* zeigt geringe Änderungen gegenüber der magnetlosen Variante. Abermals ist bei 17,5 GHz ein sehr ausgeprägte Dämpfung der Trans-

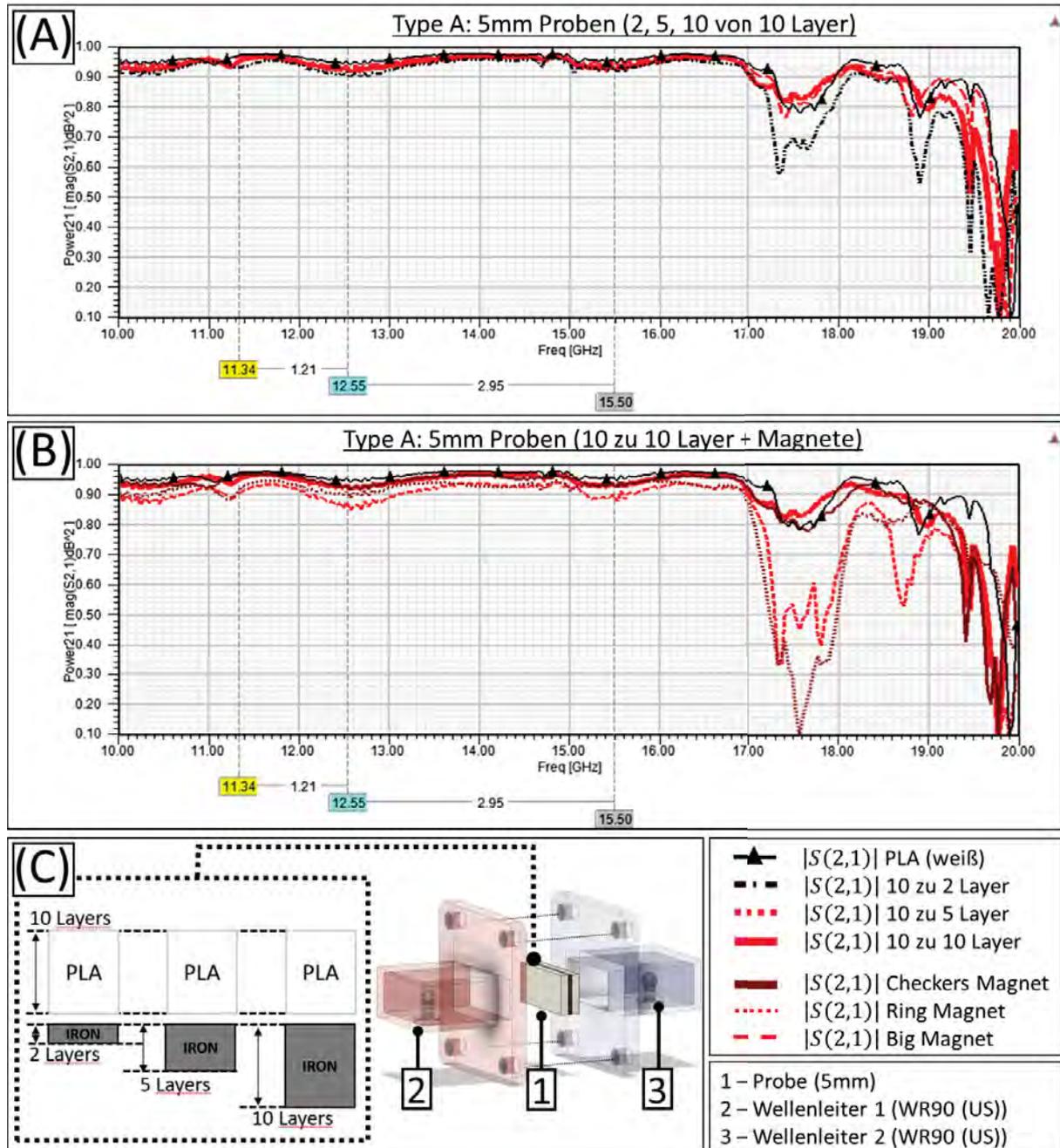


Abbildung 5.6: Messung vom Probetyp A 5 mm mit (A) verändertem Schichtungsverhältnis von Eisenfilament und PLA-Filament, (B) eingesetzten verschiedenen Magnettypen für Schichtungsverhältnis 10 zu 10-Layer, (C) Übersicht der Proben und Installation.

mission $|S(2,1)|$ zu sehen, bei *Big Magnet* mit 50% ($|S(2,1)|$) und bei *Ring Magnet* mit 20% ($|S(2,1)|$). Die Ergebnisse der Variante *10 zu 10 Layer* (10 mm) mit *Big Magnet* sind ähnlich denen der magnetlosen Variante.

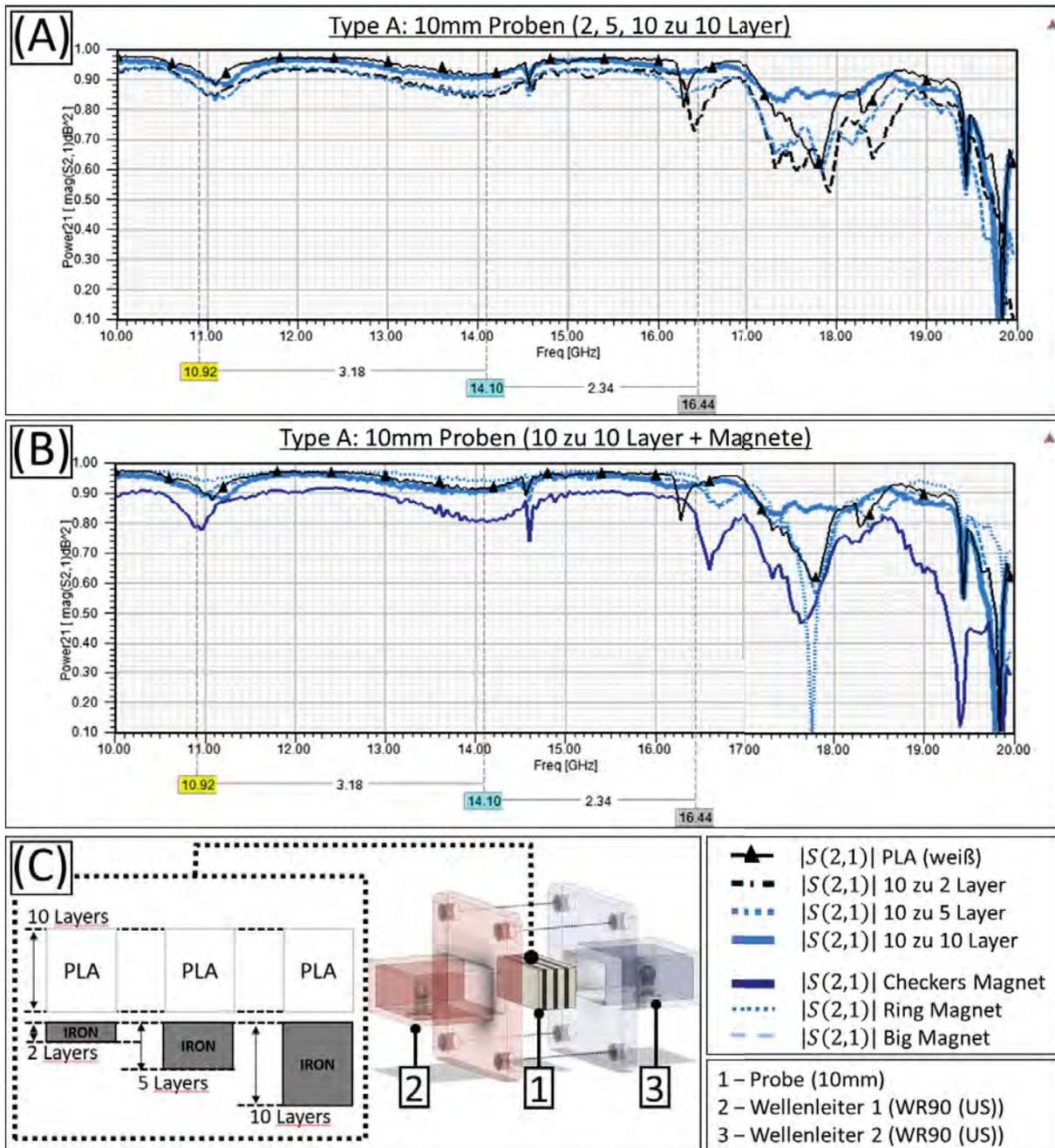


Abbildung 5.7: Messung vom Probentyp A 10 mm mit (A) verändertem Schichtungsverhältnis von Eisenfilament und PLA-Filament, (B) eingesetzten verschiedenen Magnettypen für Schichtungsverhältnis 10 zu 10-Layer, (C) Übersicht der Proben und Installation.

Type A: 10 mm (2, 5, 10 zu 10 Layer)

Es sollen nun die Ergebnisse für eine Probenhöhe von 10 mm untersucht werden. Anhand des Graphen aus Abb. 5.7 (A) ist eine stärkere Dämpfung von 10% der Transmission $|S(2,1)|$ zu erkennen, gegenüber der 5 mm-Variante. Erkennbar bei 10,92 GHz und 14,10 GHz sind 85% ($|S(2,1)|$) für die Proben 10 zu 2 Layer (10 mm) und 10 zu 5 Layer (10 mm). Dies könnte auf die größere Anzahl von Materialübergängen innerhalb der Probe zurückzuführen sein. Probe 10 zu 10 Layer (10 mm) zeigt die geringste Änderung im Vergleich zur PLA-Probe (10 mm) von 10 bis 17 GHz. Für 17,5 GHz ist zu erkennen, dass die Probe mit den meisten Materialübergängen 10 zu 2 Layer (10 mm) die größte Dämpfung von 60% ($|S(2,1)|$) erfährt.

Type A: 10 mm mit Magneten

Abermals sollen nun die Proben verglichen werden, unter Verwendung des Einflusses von Magneten (Abb.: 5.7 (B)). Die Probe 10 zu 10 Layer (10 mm) mit *Checkers Magnet* erfährt die größte Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ über den gesamten Frequenzbereich von 10 GHz bis 20 GHz. Hierbei variiert der Wert von 75% bis 90% $|S(2,1)|$ von 10 GHz bis 16,5 GHz. Ausgeprägte Frequenzpunkte sind hierbei bei 10,92 GHz, 14,10 GHz und 16,44 GHz vorhanden, bei denen nicht von Resonanzen auszugehen ist, sondern lediglich von einer Verstärkung des bereits vorhandenen Verhaltens, welches nicht Material- oder Zusammensetzungsabhängig sein kann (vgl. Probe 10 mm für PLA).

Die Probe 10 zu 10 Layer (10 mm) mit *Ring Magnet* erfährt eine Reduzierung und dadurch Verbesserung der Transmission $|S(2,1)|$ gegenüber der magnetlosen oder magnetbehafteten Variante. So ist eine geringe Verbesserung der Transmission $|S(2,1)|$ von 3% an den Frequenzpunkten 10,92 GHz, 14,10 GHz und 16,44 GHz zu erkennen. Zusätzliche ist eine ausgeprägtere Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ von 10% bei 17,8 GHz dargestellt. Als Beleg dessen müssen weitere Untersuchungen hierfür durchgeführt werden. Bei Variante 10 zu 10 Layer (10 mm) mit *Big Magnet* sind nur geringe Änderungen gegenüber der magnetlosen Variante zu entnehmen.

Type A: 15 mm (2, 5, 10 zu 10 Layer)

Es soll nun die Auswirkung auf die größte Probe mit 15 mm betrachtet werden (Abb.: 5.8 (A)). Wie den vorherigen Betrachtungen auszugehen war, erfährt die Transmission $|S(2,1)|$ bei diesen Probetypen die maximale Dämpfung, da diese Proben zahlenmäßig die größte Anzahl von Übergängen besitzt. Dies ist erkennbar am Graphen von Abb. 5.8 von 10 GHz bis 17 GHz mit einer Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ auf 92% bis 70%. Die größte Dämpfung ist bei der Probe 10 zu 10 Layer (15 mm) zu beobachten. Auffällige Frequenzpunkte hierbei sind 10,72 GHz und 14,82 GHz. Wie in den vorherigen Betrachtungen von Abb. 5.6 und Abb. 5.7 bereits erwähnt, handelt es sich bei diesen Frequenzpunkten um keine Resonanzen, sondern einen verstärkten unbekanntem Effekt in der Messung. Erkennbar wird dies anhand der Vergleichsprobe mit PLA, da diese Frequenzpunkte materialunabhängig dort ebenfalls auftreten. Dieses könnte auf ein loses Kabel zurückzuführen zu sein (s.a. Kpt.: 5.4).

Die größte Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ ist in Abb. 5.8 (A) ebenfalls bei 17,5 GHz bis 18 GHz zu beobachten, dessen Silhouette bei allen Proben vergleichbar ist. So erfährt hier die Probe mit den größten Eisenteilanteil (10 zu 10 Layer (15 mm)) die größte Dämpfung bis zu 10% ($|S(2,1)|$) und PLA die geringste. Eine Anwendbarkeit hierfür muss jedoch überprüft werden, da diese Messungen außerhalb des Anwendungsbereiches des WR90-Wellenleiters liegen.

Type A: 15 mm mit Magneten

Erneut sollen diese Ergebnisse mit denen der Proben verglichen werden, die unter Einfluss vom statischen Magnetfeld gefertigt wurden (Abb.: 5.8 (B)). Die Variante *Checkers Magnet* zeigt hierbei eine stärkere Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ im Vergleich zur magnetlosen Variante, mit 0,76% bis 0,91% von 10 GHz bis 17 GHz. Dieses Verhalten wurde ebenfalls in Abb. 5.7 (B) für die Probe *10 zu 10 Layer 10 mm (Checkers Magnet)* beobachtet. Für die Variante *Ring Magnet* ist eine Verbesserung gegenüber der magnetlosen Probe zu erkennen, mit 0,85% bis 0,92% von 10 GHz bis 16 GHz. Dieses Verhalten ist ebenfalls in Abb. 5.7 (B) für die Probe *10 zu 10 Layer 10 mm (Ring Magnet)* beobachtet worden.

Bei dieser Variante für *10 zu 10 Layer (15 mm)* mit *Big Magnet* sind nur geringe Änderungen gegenüber der magnetlosen Variante zu entnehmen.

Es wird davon ausgegangen, dass diese Proben zu lang für diesen Wellenleiter sind (vgl. 5.4). Aufbauend auf den Vorbetrachtungen, sollen nun die Konsequenzen der veränderten Ausrichtung des Eisenfilaments anhand der statischen Magnetfelder untersucht werden, mittels der Probevariante B. Die Ausrichtung der Probe mit dem statischen Magnetfeld ist der Abb. 5.1 (B, 7) zu entnehmen. Hierbei ist zu erkennen, dass die Ausrichtung des Eisens in vertikaler Richtung zur Ausbreitungsrichtung der Welle im Wellenleiter erfolgt. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob die eingepprägten Geometrien von Probe A wirklich Auswirkung auf die HF-Eigenschaft haben oder ob es sich hierbei lediglich um Artefakte handelt.

Type B: 5 mm, 10 mm, 15 mm mit Magneten

Anhand des Graphen in Abb. 5.9 (A) sind für die Probe *10 zu 10 Layer 5 mm* eine Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ im Bereich von 88% bis 95% von 10 GHz bis 17 GHz zu erkennen. Die Variation ist hierbei unabhängig vom eingesetzten Magneten sehr gering, wobei lediglich für *Checkers Magnet* eine geringfügige Verbesserung zu erkennen ist. Auch bei diesen Ergebnissen ist eine ausgeprägte Dämpfung bei 17,3 GHz von bis zu 20% ($|S(2,1)|$) vorhanden. Hierbei ist ebenfalls von einem systematischen Fehler auszugehen, jedoch kann anhand dessen erneut die Veränderung der HF-Eigenschaften der Probe mit verwendetem *Checkers Magnet* abgelesen werden.

In Abb. 5.9 (B) ist die Messung für die Probe *10 zu 10 Layer 10 mm* dargestellt. Bei dieser Probe sind mehrere Variationen der Transmission $|S(2,1)|$ zu erkennen gegenüber der magnetlosen Variante. Die Probe *10 zu 10 Layer 10 mm Checkers Magnet* variiert zwischen 92% ($|S(2,1)|$) und 95% ($|S(2,1)|$) von 10 GHz bis 17 GHz, wobei hierbei bei 11,12 GHz, 14,0 GHz und 16,5 GHz eine geringe Dämpfung vorhanden ist gegenüber der eisenlosen PLA-Variante. Die Probe *10 zu 10 Layer 10 mm Ring Magnet* zeigt ebenfalls eine geringe Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ bei 12,2 GHz mit 95% ($|S(2,1)|$). Bei der Probe *10 zu 10 Layer 10 mm Big Magnet* sind auch bei diesen Messungen die geringsten Änderungen gegenüber der magnetlosen Variante zu erkennen.

In Abb. 5.9 (C) ist die Messung für die Probe *10 zu 10 Layer 15 mm* dargestellt. Die Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ variiert von 10 GHz bis 17 GHz von 69% bis 90%. Die Probe *10 zu 10 Layer 10 mm Checkers Magnet* zeigt hierbei eine geringere Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ von 5% bei den Frequenzpunkten 10,94 GHz, 14,84 GHz und 17,5 GHz gegenüber der magnetlosen Variante. Die Proben *10 zu 10 Layer 10 mm Ring Magnet* und *Big Magnet* zeigen wenig Änderung.

Vergleicht man diesen Graphen der Messergebnisse mit denen des Probetypen A von Abb. 5.8 (B), so sind ähnliche Verläufe erkennbar. Deutlich wird dieses anhand des gemeinsamen Frequenzpunktes bei 18 GHz. Da diese Messungen unabhängig voneinander durchgeführt worden sind, könnte hierbei von einem systematischen Fehler ausgegangen werden, wie die bereits erwähnte Überdimensionierung der Probe mit 15 mm, die zu weit in den *WR90*-Wellenleiter hineinreicht.

Zuletzt sollen die Messergebnisse der Probevariante C betrachtet werden (Abb.: 5.10). Vorab soll hier-

bei Augenmerk auf den Fertigungsprozess des Probentypen gelegt werden (Abb.: 5.1 (B, 8)). Durch das Schichtungsverhältnis ist davon auszugehen, dass aufgrund der größeren Distanz und der Vielzahl von Eisenschichten die oberen Elemente kaum oder gar nicht vom Magnetfeld beeinflusst werden könnten. Diese Vermutung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht.

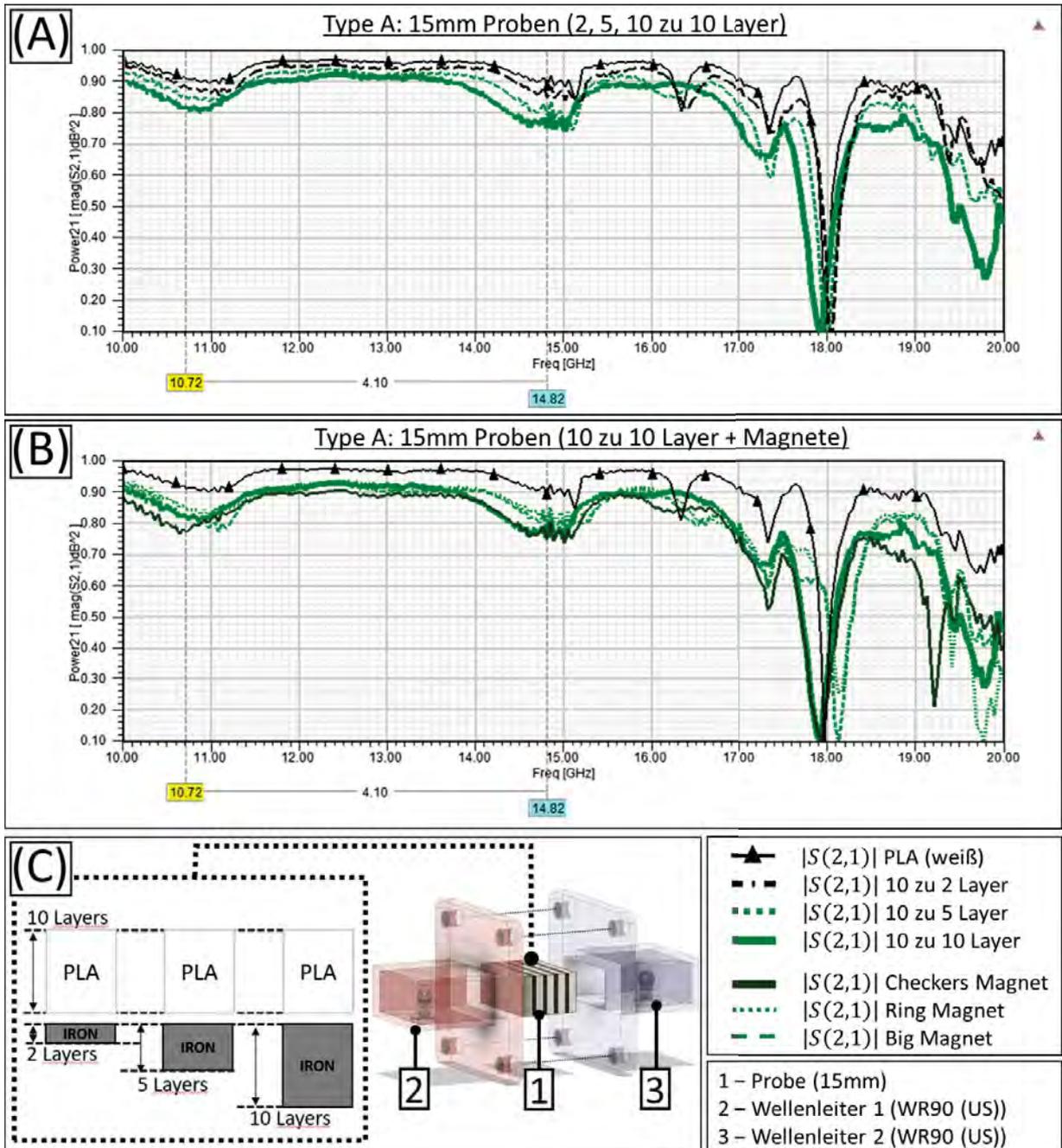


Abbildung 5.8: Messung vom Probentyp A 15 mm mit (A) verändertem Schichtungsverhältnis von Eisensfilament und PLA-Filament, (B) eingesetzten verschiedenen Magnettypen für Schichtungsverhältnis 10 zu 10-Layer, (C) Übersicht der Proben und Installation.

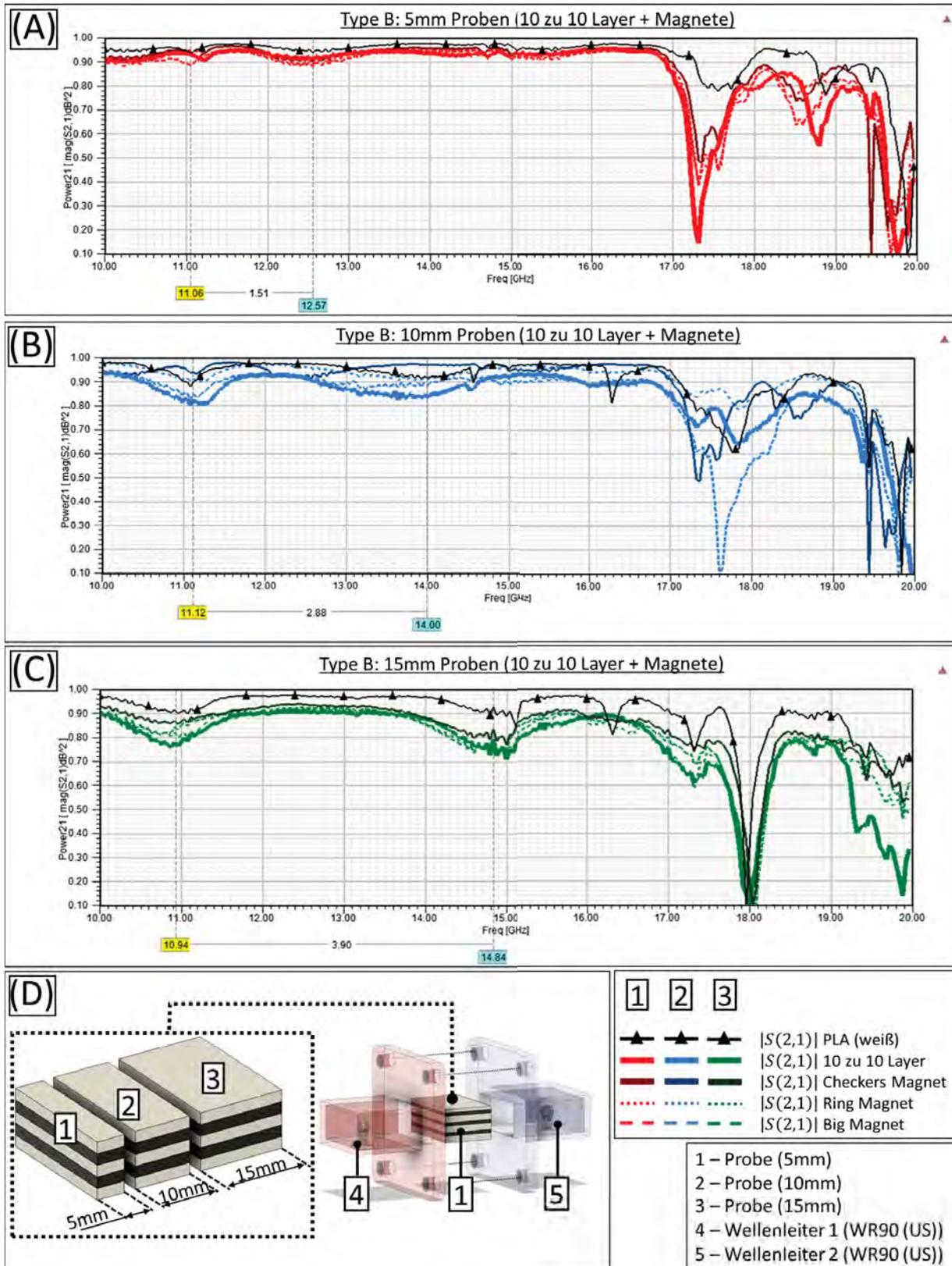


Abbildung 5.9: Messung der Auswirkung auf die Transmission $|S(2,1)|$ abhängig von verschiedenen Magnettypen beim Schichtungsverhältnis 10 zu 10-Layer bei (A) Probentyp B bei 5 mm, (B) Probentyp B bei 10 mm, (C) Probentyp B bei 15 mm, (D) Übersicht der Proben und Installation.

Type C: 5 mm, 10 mm, 15 mm mit Magneten

Anhand der Abb. 5.10 (A) ist der Probetyp C 10 zu 10 Layer 5 mm dargestellt. Erkennbar ist hierbei eine Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ von 95% bis 90% von 10 GHz bis 17 GHz, die nur geringfügig von der PLA-Variante abweicht. Besonderes Augenmerk sei hierbei für den Bereich von 17 GHz bis 19 GHz gelegt, wobei gegenüber allen anderen 5 mm-Proben der Typ C eine geringere Dämpfung von $|S(2,1)|$ erfährt.

Der Probetype C 10 zu 10 Layer 10 mm (Abb.: 5.10 (B)) zeigt einen vielseitigen Wechsel bei den Messergebnissen. Die Probe 10 zu 10 Layer 10 mm Ring Magnet erfährt die größte Dämpfung von 52% bis 90% ($|S(2,1)|$) von 10 GHz bis 17 GHz. Besondere Frequenzpunkte sind hierbei 11,04 GHz, 14,13 GHz und 16,7 GHz, wobei nicht eindeutig bestimmt werden kann, ob alle diese Punkte keine Resonanzen abbilden könnten. Eine geringe Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ wurde sowohl mit der Checkers Magnet- und Big Magnet-Variante generiert. Probe 10 zu 10 Layer 10 mm Big Magnet zeigt bei den Frequenzpunkten 11,3 GHz, 14,13 GHz und 16,5 GHz eine Verbesserung von 3% ($|S(2,1)|$). Im weiteren Vergleich zur PLA-Probe, liegt Probe 10 zu 10 Layer 10 mm Checkers Magnet unterhalb der Transmission $|S(2,1)|$, jedoch bei den Frequenzpunkten 12 GHz, 14 GHz und 16,5 GHz mit 5% ($|S(2,1)|$) über der magnetlosen Variante.

Abschließend soll die dimensional größte Variante betrachtet werden, Probetype C 10 zu 10 Layer 15 mm (Abb.: 5.10 (C)). Auch hier sind unterschiedliche Auswirkungen zu beobachten, basierend auf der Herstellung. Für die Probetypen 10 zu 10 Layer 10 mm Checkers Magnet und Ring Magnet sind nur geringfügige Änderungen gegenüber der magnetlosen Variante zu erkennen. Beim Frequenzpunkt 16,5 GHz ist lediglich eine Änderung von 10% ($|S(2,1)|$) ersichtlich. Besonders Augenmerk sei hierbei auf die Auswirkung der Probe 10 zu 10 Layer 10 mm Big Magnet gelegt, deren Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ an den Frequenzpunkten 10,88 GHz, 15,01 GHz und 16,4 GHz geringfügiger ausfällt, als bei der PLA-Variante. Dieses könnte auf die ausgeprägte Feldstärke des Magneten zurückzuführen sein.

Wie auch bei 15 mm-Probetypen B (Abb.: 5.8 (B)) und 15 mm-Probetypen C (Abb.: 5.9 (C)) sind die ähnlichen Graphenverläufe in Abb. 5.10 (C) ebenfalls auf die Möglichkeit zurückzuführen, dass die Größe der Probe problematisch sein könnte. Erneut ist hierbei die größte Dämpfung der Transmission bei 18 GHz ein mögliches Indiz hierfür.

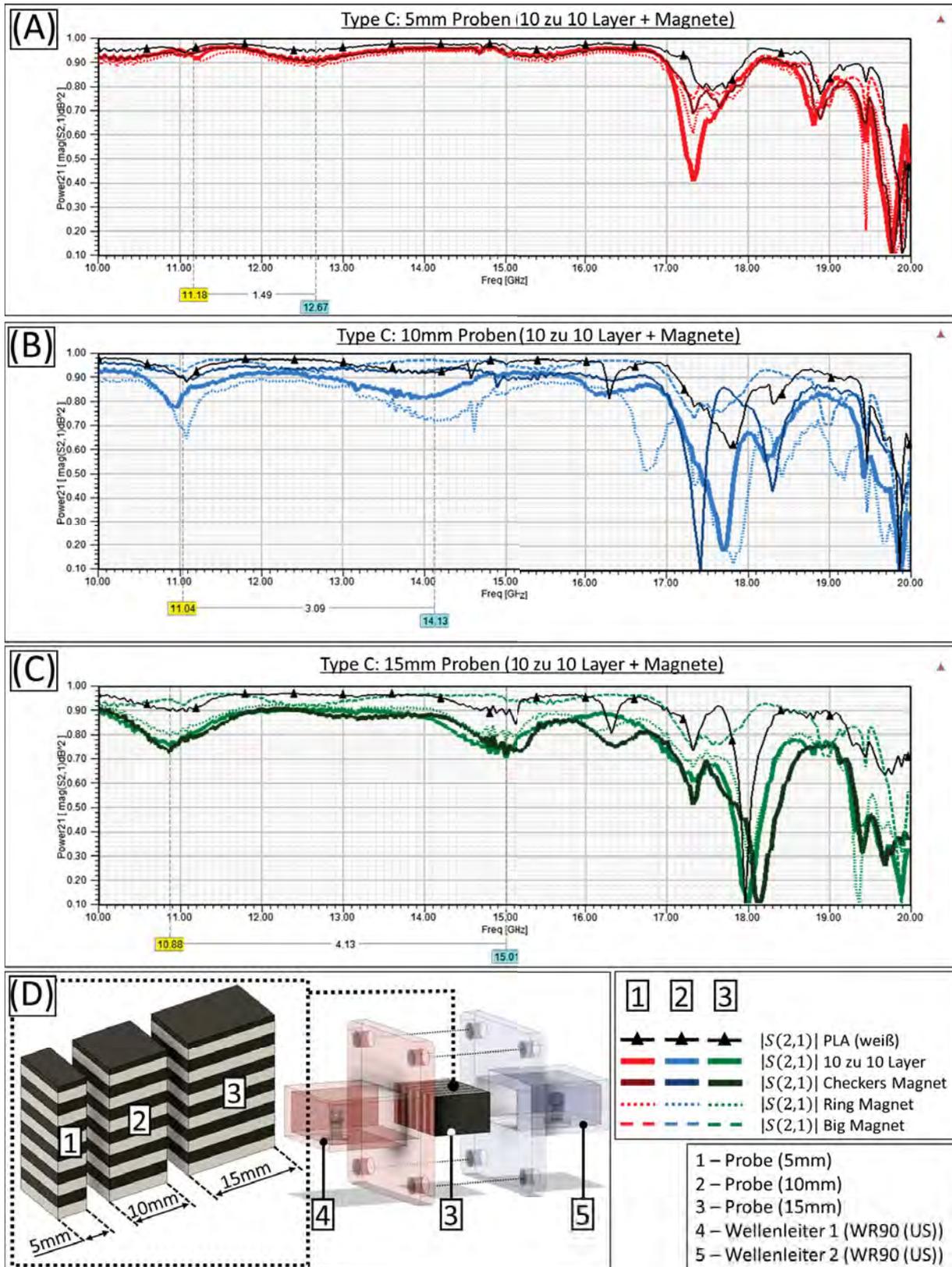


Abbildung 5.10: Messung der Auswirkung auf die Transmission $|S(2,1)|$ abhängig von verschiedenen Magnettypen beim Schichtungsverhältnis 10 zu 10-Layer bei (A) Probentyp C bei 5 mm, (B) Probentyp C bei 10 mm, (C) Probentyp C bei 15 mm, (D) Übersicht der Proben und Installation.

5.4 Eisenfilament: Zusammenfassung

Die Betrachtungen dieses Abschnitts befassen sich mit der innovativen Idee Eisenfilament für den FDM-Druck zu verwenden und während des Druckvorgangs die Ausrichtung der enthaltenen Eisenspäne durch externen Permanentmagnete zu verändern. Verschiedene Variationen von Proben wurden betrachtet, in welchen der Einfluss auf das hochfrequente Feld untersucht worden ist. Die Ergebnisse wurden in [51] veröffentlicht.

Erkennbar ist, dass die Dämpfung der Transmission $|S(2,1)|$ abhängig vom Eisenanteil ist, sowie der Anzahl der Übergänge, welches das transmittierte Feld durchwandern muss. Ein höherer Eisenanteil hierbei ist gleichbedeutend mit einer verstärkten Dämpfung. In diesem Experiment wurde das Schichtungsverfahren vom FDM-Druck verwendet, um den Anteil der Materialien zu variieren. Wobei der PLA-Anteil konstant gehalten wurde. Gleichzeitig beeinflusst die Anzahl der Übergänge von PLA zu Eisenfilament, wie stark diese Dämpfung ausgeprägt sein wird.

Die Ausprägung dieser Dämpfung kann beeinflusst werden, in dem die Platzierung des Materials mittels statischen Magnetfeld manipuliert wird. Hiermit kann eine Reduzierung oder Steigerung der Dämpfung generiert werden, abhängig von der eingepprägten Geometrie des Magnetfeldes. Hierdurch ist es möglich signifikant die Dämpfung zu steuern. Somit kann davon ausgegangen werden, dass eine Einprägung von Strukturen mittels dieses Verfahrens möglich ist, um so neuartige RF-Bauelemente zu erschaffen.

Anhand der Untersuchungen mit verschiedenen Auslegungen von Magneten ist zu erkennen, dass unterschiedliches Verhalten abhängig von der Polarisierung generiert werden kann. So konnte mittels der Variante *10 zu 10 Layer (10 mm)* mit *Ring Magnet* und mit *10 zu 10 Layer (10 mm)* mit *Checkers Magnet* unterschiedliche Ergebnisse generiert werden, obwohl die verwendeten Magnettypen identisch waren. Die verwendeten stärkeren Magnettypen für den Magnethalter aus Abb. 5.3 (B, 2) besitzen eine größere Haftkraft (ca. $61,8\text{ N}$ [48, S. 1]) für die Probe *10 zu 10 Layer (10 mm)* mit *Big Magnet*. Wie jedoch anhand der Magnetfolie in Abb. 5.3 (B, 6) zu erkennen ist, wird eine weniger ausgeprägte Geometrie durch die Eisenspäne abgebildet. Hierbei sei jedoch auch zu beachten, dass die Auslegung der Halterung für die Magneten ebenfalls Einfluss auf die Spanabbildung hat, wie z.B. die unterschiedlichen Wandstärken von $0,35\text{ mm}$ für *Checkers Magnet* und *Ring Magnet* (Abb.: 5.3 (A, 1)), sowie $1,0\text{ mm}$ für *Big Magnet* (Abb.: 5.3 (B, 2)).

Verhalten der Proben

Die Messergebnisse sind abhängig von der Ausprägung des statischen Magnetfeldes. So wird die Dichte der Eisenpartikel in Bereichen mit geringer Magnetfeldstärke reduziert, wodurch an diesen Stellen die HF-Eigenschaften von PLA angenommen wurden. Wie jedoch anhand der Abb. 5.7 (B) *10 zu 10 Layer 10 mm (Ring Magnet)* gezeigt wurde, kann dadurch das HF-Verhalten auch begünstigt werden. Für diese spezielle Anwendung sollten aufbauend mehrere Proben erstellt werden und versucht werden, dieses Ergebnis zu reproduzieren.

Die Verwertbarkeit der Messungen ist abhängig von der Dimension der verwendeten Proben. Bei der 15 mm -Variante war zu beobachten, dass die Dimension der Probe sehr weit in den Wellenleiter hineinreicht und somit möglicherweise bereits innerhalb des Nahfeldes vom Monopol interagiert. Als Konsequenz dessen wurden die aufbauenden Untersuchungen mit kleineren Proben getätigt, mit maximal 10 mm Länge.

Wie anhand der Messungen zu sehen ist, hängt die Interaktion der Probe - und infolgedessen des Eisens - vom gewählten Druckverfahren ab. Hierbei ist beim Probetypen C (Abb.: 5.10) zu sehen, dass die höheren Lagen vom statischen Magnetfeld nicht mehr durchdrungen werden. Als Konsequenz dessen sollten lichtdurchlässige Schnittbilder der Probe erstellt werden (s.a. Abb. 4.27 (E)), um so die Auswirkung eindeutig

zu machen.

Aufbauend auf diesen Betrachtungen sollte der genaue Materialwert der Proben bestimmt werden, um mittels eines nachgebautem CAD-Modells durch eine FEM-Simulation das generierte HF-Bild zu untersuchen. Auf diese Weise könnte Rückschluss auf das Verhalten gezogen werden, um anhand dessen neue RF-Komponenten zu generieren.

Verwendete Messgeräte

Anhand der Ergebnisse und der Betrachtungen wäre die Verwendung eines Wellenleiters von Vorteil gewesen, der für höhere Nutzfrequenzen konzipiert ist. Ein entsprechender *WR62*-Wellenleiter wurde hierfür erworben, kam jedoch aus zeitlichen Gründen nicht mehr zum Einsatz (vgl. Abb.: 4.23). Speziell die Betrachtung von 10 bis 20 *GHz* hätten auf diese Weise kombiniert werden können.

Zum Zeitpunkt der Messung war es ebenfalls notwendig die Messgeräte zu warten. So musste beispielsweise das Gewinde des N-Steckverbinders gereinigt werden (vgl. Abb.: 4.16 (B, 3)), was zum Zeitpunkt dieser Messung noch nicht durchgeführt wurde. Als Konsequenz dessen haben lose Verbindungen die Messungen beeinflusst. Dieser Makel wurde in den nächsten Messung behoben, konnte aber leider nicht mehr für diese Untersuchungen Anwendung finden (s.a. Kpt.: 6.3, Abb.: 6.14 (C, 8)).

Durch die Verfügbarkeit der Messgeräte, wurde zu diesem Zeitpunkt des Projektes das Kalibrierungsgerät *R&S ZV-Z52* [40] (Abb.: 4.16 (C, 4)) verwendet. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wurde davon abgekommen, da das Gerät offensichtlich Mängel in der Messung generierte und nicht behoben werden konnten. Für die weitere Arbeit wurde deswegen das Kalibrierungskit *R&S ZV-Z21* [57, S. 4] verwendet, welches eine erhebliche Verbesserung der Messung generierte, bei identischem Messaufbau.

Inhomogenität des Eisens

Die Variation der Transmission $|S(2,1)|$ ist nicht lediglich auf die unterschiedliche Verteilung der Dichte der Eisenpartikel zurückzuführen. Wie bereits in Kpt. 5 erwähnt wird, ist ebenfalls die Ausrichtung der Eisenspäne für die Transmission von Bedeutung. Weiterführend sollte hierfür eine Messreihe gewählt werden, die die Dicke vom Eisenfilament im Abstand von 0.1 *mm* addiert und sich im Zentrum des Wellenleiters befindet. Außerdem sollte hierbei die Probe aus drei separaten Teilen bestehen. Hierbei wird die Eisenschicht separat gedruckt und zwei PLA-Elemente dienen dabei als Lückenfüller. So können die Eisenelemente isoliert mittels des Magnetes gefertigt werden. Die Ausrichtung des Eisenanteils sollte gleichgehalten werden, wie im Kpt. 5.3 vorgestellt. Mit dieser Vorgehensweise sollte eine Reihe von identischen Proben erstellt werden und die Ergebnisse der Auswirkung auf die Transmission $|S(2,1)|$ verglichen werden. Somit wird die Toleranz durch den Fertigungsprozess ermittelt, aber auch der Effekt auf die Eisendipole isoliert.

Inhomogenität von Permanentmagneten

Bestandteil dieses Experiments ist die Anziehungskraft von käuflichen Neodymmagneten, die nicht homogen ist. Dies soll mittels des Experiments in Abb. 5.11 verdeutlicht werden. Hierbei werden 15x *N50* $5 \times 5 \times 5$ *mm* Neodymwürfelmagneten [56] vermessen, anhand derer Gewichtskraft und Anziehungskraft [58, 8:37 Min.]. Dieser Typ von Neodymmagneten wurde verwendet für den vorgestellten Magnethalter aus Abb. 5.3 (A).

Zur Vermessung der Anziehungskraft (Abb.: 5.11 (A)) durch die Würfelmagnete, wurde eine Apparatur gefertigt. Der Magnet wird innerhalb einer PTEG-Schale (Abb.: 5.11 (A, 1)) positioniert, welches auf einem Holzstück befestigt wurde. Dieses Konstrukt wird zwischen zwei Punkten balanciert, wobei ein Ende

auf einer Digitalwaage aufliegt (Abb.: 5.11 (A, 5)) und somit austariert wird¹⁵. Durch die Positionierung eines ferromagnetischen Gegenstandes (Abb.: 5.11 (A, 2)) unterhalb des Magneten wird die Anziehungsgewichtskraft ermittelt.

Als Gegenüberstellung wird die Gewichtskraft des Magneten ermittelt, die mittels des Aufbaus aus Abb. 5.11 (B) ermittelt wurde. Bei dieser Wippe wurde darauf geachtet keine ferromagnetischen Materialien zu verwenden. Ein Holzarm wurde verbunden (Abb.: 5.11 (B, 4)), mit einem Drehpunkt (Abb.: 5.11 (B, 9)) auf der Digitalwaage (Abb.: 5.11 (B, 5)). Auf der Lastseite wurde eine PTEG-Schale für den Magneten (Abb.: 5.11 (B, 1)) mittels Isolierband befestigt. Das Gerät wurde austariert, der Magnet (Abb.: 5.11 (B, 6)) eingesetzt und die Gewichtskraft ermittelt.

Anhand des Graphen von Abb. 5.11 (C) sind die Messergebnisse dargestellt. Es ist hierbei deutlich erkennbar, dass es zu Abweichungen beim identischen Magnettypen kommen kann. Deutlich erkennbar wird dies anhand der Magnete mit 1,61 g Gewicht, deren Anziehungskraft von 0,98 g bis 1,86 g variieren kann. Da dieser Faktor von großer Bedeutung für den in Kpt. 5.1 beschriebenen Herstellungsprozess ist, wurde dies für die Wahl der eingesetzten Magnete berücksichtigt und ähnliche Anziehungskräfte verwendet. Somit gilt es vor jeder Herstellung eine Bestandsaufnahme durchzuführen und die Magnete zu referenzieren.

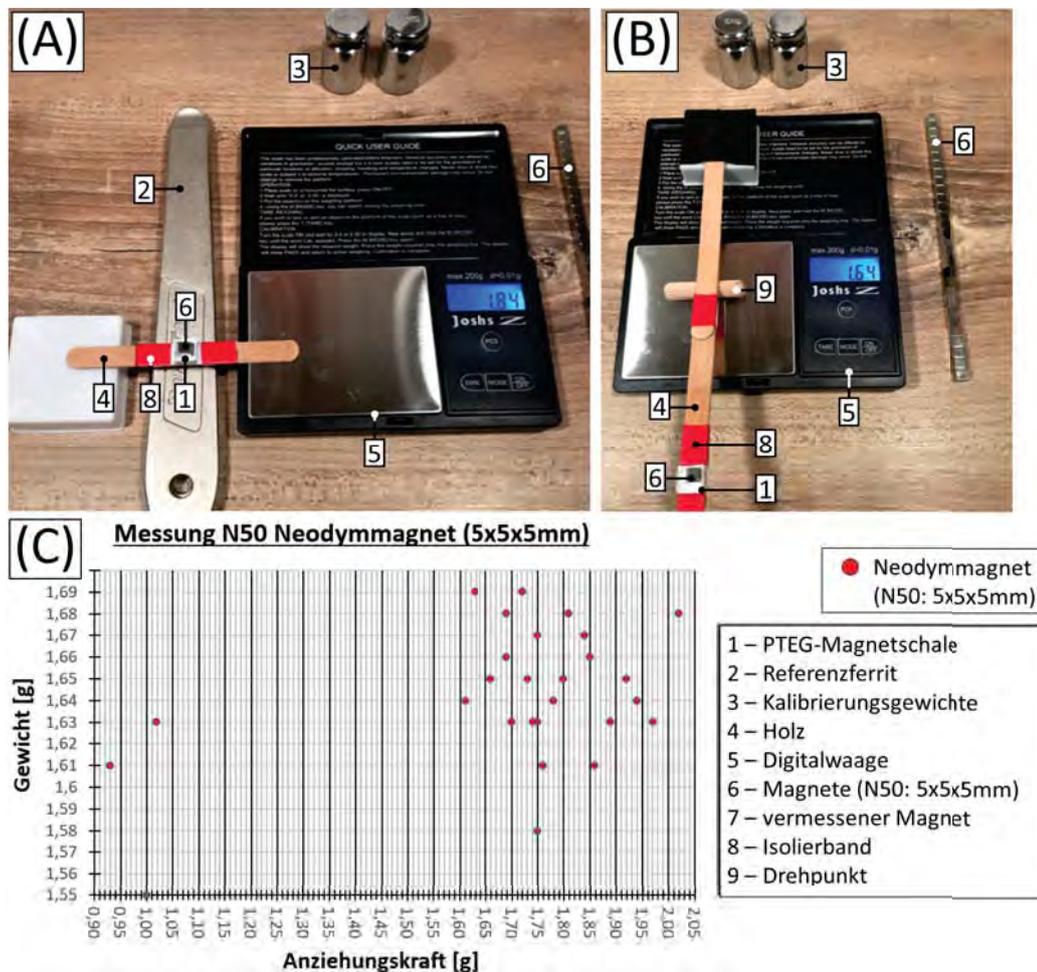


Abbildung 5.11: Vermessung der Toleranz bei N50 $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ Neodymmagneten [56]. (A) Messaufbau zur Ermittlung der Anziehungskraft des Magneten, (B) Messaufbau zur Ermittlung der Gewichtskraft des Magneten.

¹⁵Vor jeder Messung wurde eine Eichung des Gerätes durchgeführt, mittels der dafür vorgesehenen Kalibrierungsgewichte (Abb.: 5.11 (3)).

6 Filamentkomposite

In dem vorangegangenen Kpt. 5 wurde eine Methode vorgestellt, wie mithilfe des FDM-Fertigungsprozess Eisenspäne im Rohstoff mittels Permanentmagneten so dirigiert werden können, um so Geometrien in Objekte einzuprägen. Bei dieser Methode ist jedoch zu beachten, dass hierbei lediglich ein Veränderung von Materialien mit einer höheren Permeabilität $\mu_r \gg 1$ erfolgt. Im Kpt. D dieser Arbeit wurde auf das Thema Metamaterialien eingegangen und gezeigt, dass für die Ausübung des Prinzips Permittivität ε_r mit Permeabilität μ_r so zu balancieren sind, um das induzierte EM-Feld zu verändern. In dem folgenden Kapitel wird auf diese Thematik eingegangen.

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden in [59] veröffentlicht.

6.1 FDM-Druck von Filamentkomposit

Im Kpt. F.1 werden die verschiedenen Rohstoffe präsentiert, die mittels des FDM-Fertigungsprozess verarbeitet werden können. Dabei werden sekundäre Komponenten (i.e. Graphit, Eisen, Kupfer) mit dem thermoplastischen Polymer PLA als Trägermedium miteinander kombiniert, um dieses dann für den 3D-Druck verwenden zu können. Diese Rohstoffe sind kommerziell verfügbar (i.e. *Protopasta* [60, 61, 44]) oder können spezifisch gefertigt werden von KAI PARTHY [62]. Für Experimente und Entwicklungen wäre es jedoch von Vorteil die Zusammensetzung dieser Filamente zu nutzen, um anwendungsspezifisch die Zusammensetzung der Filamente selbstständig erstellen zu können (i.e. spezifische Materialzusammensetzung für Absorber oder für Linsen). Auf diese Weise können Leitwert κ , Permittivität ε_r und Permeabilität μ_r beliebig miteinander kombiniert werden.

Für den hier präsentierten Versuchsaufbau wurden sechs Filamente verwendet. Weißes Polymere (PLA) von *Janbex* [52], welchem keine weiteren Rohstoffe hinzugefügt worden sind und bereits in Kpt. 5.1 Anwendung fand. Auch in dieser Betrachtung wird es als Referenz verwendet, da basierend auf der Messung von Kpt. 5.3 eine geringe Interaktion mit dem HF-Feld von 10 GHz bis 17 GHz beobachtet wurde.

Es wurden drei Filamente vom Hersteller *Protopasta* verwendet, in den Varianten Kupfer [60], Eisen [44] und Graphit [61]. Laut dem Zertifikat vom BASF [63] besitzen 50% der in diesen Filamenten enthaltenen Partikel eine Größe von $< 3,5\ \mu\text{m}$. Wie in den Betrachtungen aus Kpt. 5.1 festgestellt wurde, bleiben die ferromagnetischen Eigenschaften dem Eisenfilament erhalten, wobei aber keines der beiden Filamente eine signifikante elektrische Leitfähigkeit aufweist. Hierfür wurde in diese Untersuchung als weiteres Filament *Protopasta* ESD [61] mit aufgenommen, wobei Graphit dem PLA hinzugefügt worden ist und dadurch elektrische Leitfähigkeit besitzt. Dieses Filament wurde konzipiert, um einfache Schaltkreise mittels FDM zu drucken, jedoch nimmt der spezifische Widerstand $\Omega \cdot m$ sehr stark zu.

Zuletzt wurde *LayBrick*-Filament verwendet, welches von der Firma *CC-Products* [62] zur Verfügung gestellt wurde [64]. Es handelte sich hierbei um eine experimentelle Sonderanfertigung mit den Elementen Calcium, Kohlenstoff und Sauerstoff (CaCO_3) mit einer geheimen Polymermischung [33]. Die Konsistenz des Filaments und Oberfläche ähnelt visuell dem von Sandstein.

Beschreibung des Druckprozesses

Zur Erstellung des Filamentkomposits werden zwei Filamente miteinander kombiniert und gemischt, um es dann weiterzuverwenden. Das Herstellungsverfahren teilt sich in zwei Schritte auf. Im ersten Schritt wird ein zweiteiliges komposit erstellt, wobei die verwendeten Filamente in einem gemeinsamen Objekt verbunden werden. Im zweiten Schritt erfolgt eine Vermischung der Komponenten zum fertigen verwend-

baren komposit.

Es wird ein eigenständiges Filament gedruckt werden, welches abermals in den FDM-Druck eingeführt wird, um die beiden Materialien miteinander zu vermischen. Die Verteilung der in den Spezialfilamenten enthaltenen Partikel vom Kupfer (Abb.: 6.1 (A, 2)) und Eisen (Abb.: 6.1 (A, 1)) ist willkürlich. Mittels des Schichtungsverfahrens vom FDM-Druck werden diese Filamente miteinander kombiniert. Es werden die einzelnen Stränge anteilig nebeneinander positioniert, um so die Zusammensetzung so zu steuern (Abb.: 6.1 (B)). Der Anteil der Materialien im gedruckten Filament kann definiert werden anhand der Summe der notwendigen Schichten (engl.: *Layer*) für den 3D-Druck, so wie in der Abb. 6.1 (B) mit insgesamt sieben *Layern*, sowie drei *Layern* Kupfer und 4 *Layern* Eisen. Diese Definition wird im Laufe diese Erläuterung weiterverwendet. Der Anteil der Materialien kann über die Faktoren der Schichten gesteuert werden, wobei die Höhe (s.a. *Layer Height*) vorab definiert wird. In diesen Betrachtungen wird fortlaufend $0,2\text{ mm}$ verwendet.

Geometrische Basis für das erstellte Filament ist das Hexagon (Abb.: 6.1 (B)). Käufliche Filamente (Abb.: 6.1 (C, 6)) besitzen eine kreisrunde Form, mit einem Durchmesser von $\approx 1,75\text{ mm}$ (s.a. Kpt.: 8). Das FDM-Fertigungsverfahren erlaubt es jedoch nicht diese Form in der vertikalen abzubilden, da somit sonst Bestandteile (i.e. Sockel) in der Luft gedruckt werden müssten. Mittels eines Hexagons wird die Kreisform am ähnlichsten abgebildet und gleichzeitig die maximal mögliche Oberfläche erreicht.

Die Herstellungstoleranzen beim FDM-Druck belaufen sich auf ungefähr $\pm 0,1\text{ mm}$ (Kpt.: F.11). Unter Einbezug dieser Toleranzen wurde das gedruckte Filament mit einem Durchmesser von $1,5\text{ mm}$ erstellt. Um mit dieser Methode die zwei Materialien über eine große Fläche zu verteilen, wird das Hexagon entlang des Verlaufes einer archimedischen Spirale gedruckt (Abb.: 6.2). Durchmesser, Windungszahl,

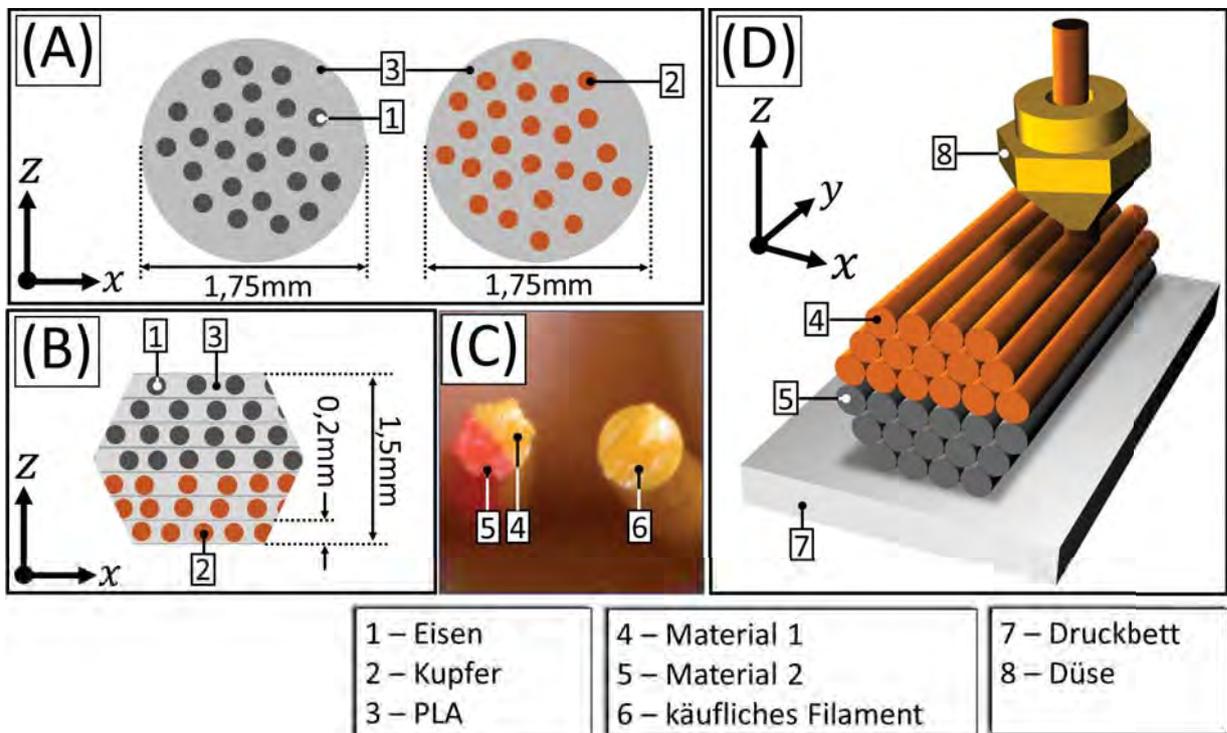


Abbildung 6.1: Erstellung von Filamentkomposit mittels FDM-Fertigungsverfahren und des Schichtungsverfahrens. (A) schematischer Querschnitt von kommerziell verfügbaren Filamenten, wie Eisenfilament und Kupferfilament, (B) schematischer Querschnitt von gedrucktem Filamentkomposit mit Kupfer- und Eisenanteil, (C) Vergleich eines gefertigten Filamentkomposit (links) mit einem käuflichen Filament (rechts), (D) schematischer Vorgehensweise des Fertigungsprozesses eines Filamentkomposits.

Windungsabstände und Auslegung geben hierbei vor, wieviel Filamentkomposit erstellt wird. Hierbei gilt es den Durchmesser möglichst großflächig zu wählen, um die spätere Wiedereinspeisung in den Extruder zu erleichtern. Als Illustration des fertigen Objektes sei hierbei auf Abb. 6.2 (B) verwiesen, mit der Kombination von weißem PLA (Unterseite) und Eisenfilament (Oberseite), als zweigeschichtetes Filamentkomposit. Zur weiteren Veredelung wird dieses zweigeschichtete Filamentkomposit erneut in den 3D-Drucker eingespeist, um erneut eine archimedische Spule zu drucken. Das Resultat dessen ist in Abb. 6.2 (C, 6) dargestellt und wird im Folgenden detaillierter erklärt.

Der konventionelle Aufbau eines Extruders für einen FDM-Drucker besitzt nicht die Fähigkeit die Bestandteile in einem Filament miteinander zu vermischen. Wie in Abb. 6.3 (C) dargestellt ist, wird beim Extrudieren des zweischichtigen Filamentkomposits (Abb.: 6.3 (A)) die Bestandteile so extrudiert, wie diese in die Düse eingeführt werden. Diese Eigenschaft kann jedoch verwendet werden, um eine relative Mischung zu generieren, wenn diese entlang einer größeren Oberfläche erfolgt. Bestimmender Faktor hierfür ist die Bewegungsrichtung $\vec{F}_{mov}(x, y)$ (Abb.: 6.3 (C)). Durch das Extrudieren des Filaments erfolgt auch eine Transformation des Filamentkomposits über mehrere kleineren Stränge, welches über den Querschnitt des Hexagons verteilt wird. Abhängig von der Größe des Auslasses der Düse (i.e. $0,4\text{ mm}$, Abb.: 6.3 (C, 3)) und der verwendeten Schichthöhe (engl.: *Layer Height*) wird eine bestimmte Anzahl von Filamentsträngen abgebildet. Bei einer *Layer Height* von $0,2\text{ mm}$ (Abb.: 6.3 (C, 5)) und einer resultierenden *Extrusion Width* von $0,48\text{ mm}$ (s.a. Kpt.: F.13), werden insgesamt 19 Stränge an Filament gedruckt.

Die relative geometrische Auslegung der zwei Filament ist hierbei abhängig von der kartesischen Bewegungsrichtung $\vec{F}_{mov}(x, y)$ der sich bewegende Düse (Abb.: 6.3 (C, 3)). Bei einer Bewegung in positiver *X*-Richtung $\vec{F}_{mov}(x, y = 0)$ (Abb.: 6.3 (D, Links)) erfolgt die Schichtung mit Eisenfilament auf der Oberseite und Kupferfilament auf der Unterseite. Anhand eines Vorzeichenwechsels dieser Bewegungsrichtung $\vec{F}_{mov}(-x, y = 0)$ (Abb.: 6.3 (D, Rechts)) erfolgt ein Umtausch dieser Schichtung. Das es sich hierbei um eine Rotation um den Koordinatenursprung der Bewegungsrichtung handelt, wird anhand der Abb. 6.3 (D, Mitte) für $\vec{F}_{mov}(x = 0, y)$ deutlich. Hierbei erfolgt der Druck des Schichtungsverhältnisses als vertikale Ausrichtung. Mittels dieses Verfahrens erfolgt eine gleichmäßige Distribution des Filamentgemisches entlang der archimedische Spule. Das Ergebnisse dieses Herstellungsverfahrens ist der Abb. 6.3 (B, 6) zu entnehmen. Weitere Iterationen würden entsprechend diesen Effekt potenzieren. Für diese Arbeit fand zur weiteren Verwendung nur eine Iteration Anwendung.

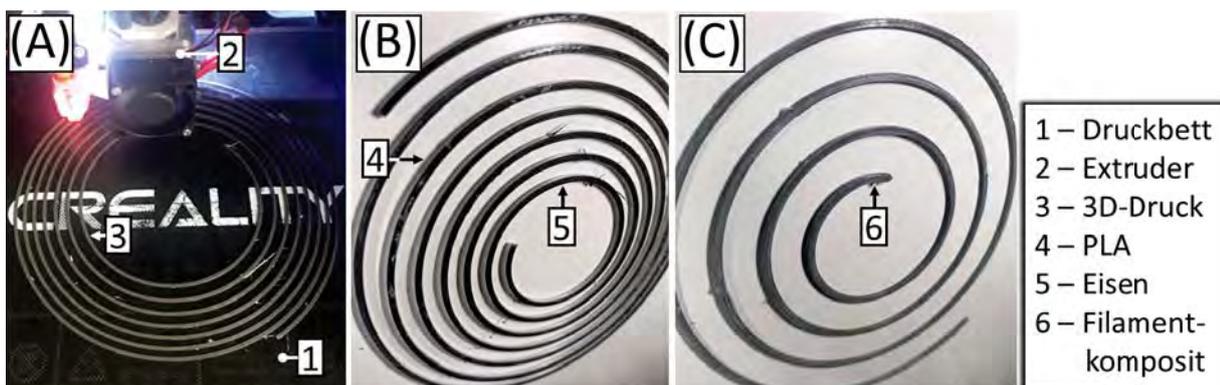


Abbildung 6.2: Herstellungsvorgang von Filamentkomposit mittels FDM-Druckverfahren. (A) Druckvorgang von Filamentkomposit, (B) erstelltes Filamentkomposit mit Eisen- und PLA-Filament, (C) gemischtes Filamentkomposit aus Eisen- und PLA-Filament.

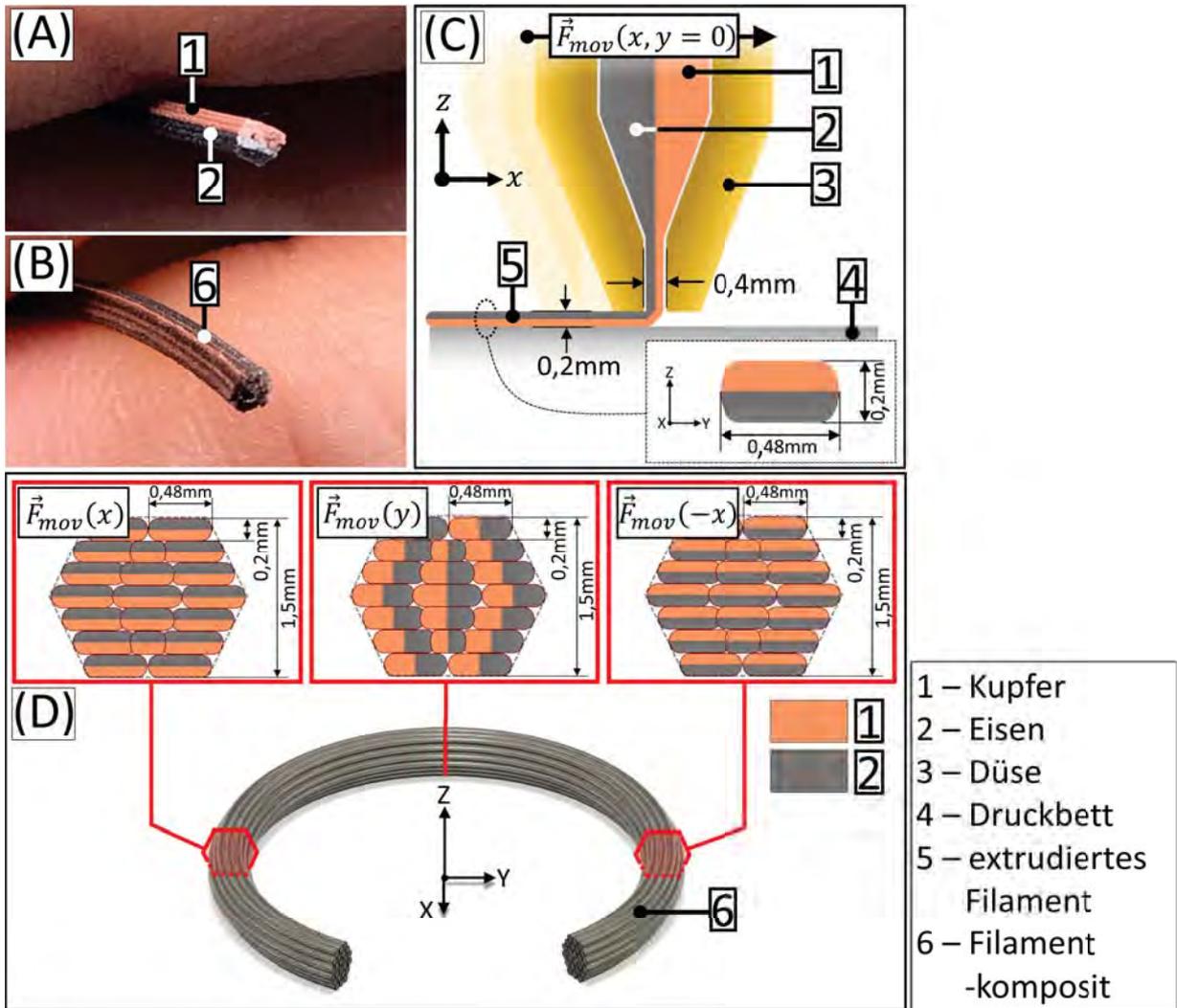


Abbildung 6.3: Fertigungsvorgang zur Veredelung des Filamentkomposits. (A) Zweisichtiges Filamentkomposit aus mit Kupfer und Eisen, (B) gemischtes Filamentkomposit aus Eisen und Kupfer, (C) Extrudierung von zweisichtigem Filamentkomposit als schematischer Querschnitt von Düse, (D) Veredelungsvorgang des zweisichtigen Filamentkomposits zum gemischten Filamentkomposit als schematische Verteilung.

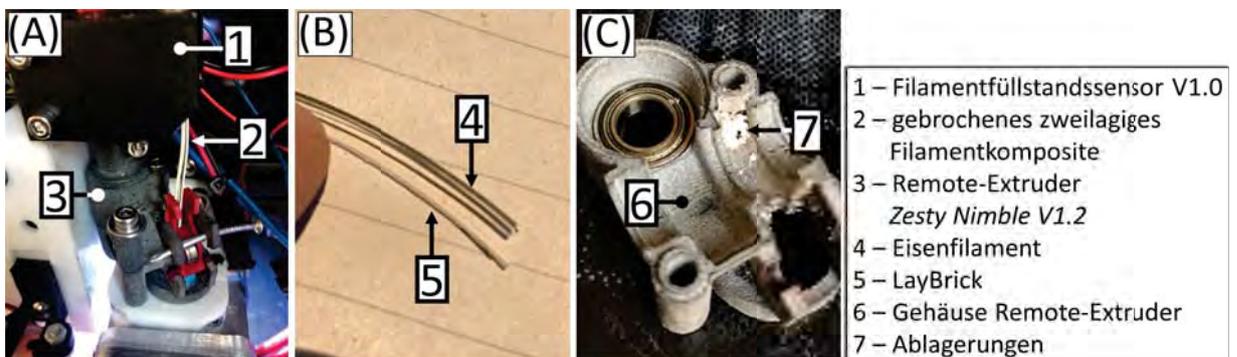


Abbildung 6.4: Fertigungsprobleme mit der Kombination von Eisenfilament [44] und LayBrick [65]. (A) Seitenansicht vom Remote-Extruder *Zesty Nimble V1.2* [66] mit gespaltenem zweilagigem Filamentkomposit, (B) Nahaufnahme von gespaltenem zweilagigen Filamentkomposit mit Eisen- und LayBrick-Filament, (C) geöffnetes Gehäuse vom *Zesty Nimble V1.2* [66] mit Filamentablagerung durch Abrieb.

Modifikationen

Zur Kombination der zwei Rohstoffe sind einige Modifikationen am FDM-Drucker notwendig, auf die verwiesen werden muss.

Der 3D-Druck von thermisch leitendem Material in einem geschlossenen Gehäuse (Kpt.: F.12) macht die Fertigung anfällig gegenüber *Heat-Creep* (Kpt.: F.8). Durch die notwendigen Modifikationen zur Vermeidung wird analog das Gewicht des Extruders (Kpt.: F.6) größer, welches die Bettabtastung (Kpt.: F.10) kompromittiert. Dies wird besonders relevant für den in diesem Abschnitt vorgestellten FDM-Fertigungsprozess der Filamentkomposit, da ein großflächiger 3D-Druck exakt hergestellt werden muss. Hierfür wurde eine Mechanik für eine doppelte Z-Achse entworfen und installiert (Kpt.: F.5).

3D-Druckeinstellungen

Im dem folgenden Abschnitt wird auf die individuellen Kalibrierungen der verwendeten Filamente eingegangen (s.a. Kpt.: F.13).

Die verwendeten Druckeinstellungen für das verwendete Eisenfilament von *Protopasta* [44] und dem weißen PLA-Filament von *Janbex* [52] wurden von der Tab. 7 übernommen.

Die in *Simplify3D* verwendeten Druckeinstellungen der folgenden Filamente ist der Tab. 8 zu entnehmen. Das verwendete Kupferfilament von *Protopasta* [60] enthält Kupferspäne und zeigt Oxidationsmerkmale bei Wasserkontakt (charakteristischer Grünspan bzw. Kupfer(II)-acetat). Ein Polieren des Materials ist möglich. Eine elektrische Leitfähigkeit mittels Multimeter konnte nicht festgestellt werden. Das Kupferfilament zeichnet sich dadurch aus, sehr weich zu sein und muss dadurch sehr langsam gedruckt werden, da bei einer Druckgeschwindigkeit von $> 30 \text{ mm/s}$ Verstopfungen in der Düse auftreten. Permanente Kühlung des Filaments beim Extrudieren (Kpt.: F.9) beugt dem vor.

Das Graphitfilament wird von *Protopasta* als ESD vermarktet und besitzt eine schwache elektrische Leitfähigkeit von $< 1 \text{ k}\Omega/\text{cm}$ [61]. Es soll damit möglich werden, Sensoren und einfache Schaltkreise herzustellen. Dieses Filament zeichnet sich durch einen höheren Schmelzpunkt aus. Sehr prägnant ist ebenfalls die Ablagerung des Filaments in der Düse, nach der Verwendung. Hierbei war es nach einem Filamentwechsel unbedingt notwendig eine mehrfache Reinigung mittels *Cold-Pull* (Kpt.: F.3) durchzuführen, um eine weiterführende Verunreinigung zu vermeiden.

Das Filament *LayBrick* [65] zeichnet sich zum Zeitpunkt der Verarbeitung durch eine hochgradige Brüchigkeit aus, bedingt durch die aufgenommene Luftfeuchtigkeit (Kpt.: F.2, Abb.: F.6 (A), Abb.: 6.4 (A)). Somit war es auch hier notwendig eine langsamere Druckgeschwindigkeit von 50 mm/s zu verwenden. Gebrochenes Filament tendiert dazu die Mechanik des Extruders zu verklemmen (Abb.: 6.4 (C)). Darüber hinaus geht dieses Material keine Adhäsion mit weiteren Verbundstoffen ein, welches zum Ablösen des Verbundes führte (Abb.: 6.4 (B)). Eine Verarbeitung ist trotzdem möglich bei Erhitzung des Druckbetts auf 80°C und Ablösen des Filaments durch thermischen Stress¹⁶. Um eine zuverlässige Mischung trotzdem zu gewährleisten, wurde das zweilagige Filamentkomposit mittels einer gesonderten 3D-Drucktechnik gefertigt, auf welche noch näher eingegangen wird.

Das Druckobjekt der archimedischen Spule wurde mittels *Inkscape* und *Fusion360* erstellt¹⁷ (Abb.: 6.5). Zur Dimensionierung des Filament wurde ein Hexagon auf die Stirnseite positioniert (Abb.: 6.5 (A)) und entlang des Funktionsverlauf der Spirale gewischt. Beim Export des Modells vom CAD-Programm wurde

¹⁶Druckbett mit Filamentkomposit nach dem Druck im Gefrierfach eines Kühlschranks platzieren. Das Druckobjekt löst sich dadurch selbstständig vom Druckbett.

¹⁷Vektorgrafik erstellen: `\Inkscape\Spirale erstellen (F9)`; Umdrehungen, Abweichungen, Inneren Radius angeben. Exportieren als *.SVG und importieren in *Fusion360* als Skizze in einer Geometrie. Mit der Version *Fusion360* (2.0.9512) ist alternativ es ebenfalls möglich mittels `\Fusion360\Create\Coil` dies als Helix zu zeichnen.

darauf geachtet eine hohe Auflösung des Objektes zu wählen¹⁸. Dadurch wird vermieden ein Objekt mit großflächigen Polygonen zu generieren, anhand dessen die *GCode*-Datei erstellt wird und Auswirkung auf die Schrittmotorbewegung hat.

In Abhängigkeit von den zu kombinierenden Materialien, wurden zwei Methoden zur Erstellung des zweilagigen Filamentkomposits angewendet. Für eine grundsätzliche Kombination von zwei Materialien, wurden in *Simplify3D* zwei Prozesse erstellt (Kpt.: C.2.2), welche abhängig von der Schichthöhe des 3D-Drucks aktiviert wurden. Hierfür wurde beispielsweise mit dem ersten Prozess der 3D-Druck Vorgang gestartet (Abb.: 6.5 (B, 5)) bis zu einer Schichthöhe von $0,8\text{ mm}$ (Schichthöhen: 1 bis 4). Beim Erreichen der Schichthöhe des zweiten Prozesses (Abb.: 6.5 (B, 4)) wird zu Beginn im *GCode* das Kommando *M600* ausgeführt, um einen Filamentwechsel zu initiieren. Der Filamentwechsel wird manuell vom Benutzer durchgeführt. Weiterführend wird 3D-Druckvorgang bei der Schichthöhe von $1,0\text{ mm}$ (Schichthöhen: 5 bis 7) fortgesetzt. In der zweiten Methode wurde für besonders brüchige Filamente, wie dem einleitend erwähnten *LayBrick* [65], ein Filamentkern im Filamentkomposit 3D-gedruckt (Abb.: 6.5 (C, 4)). Somit konnte die mechanische Stabilität so weit vergrößert werden, dass eine weiterführende Veredelung möglich wurde.

Des Weiteren hat diese Methode den Vorteil, dass eine Stabilisierung der Temperatur vor dem Fortsetzen des 3D-Druckvorgangs durchgeführt wird. Große materialabhängige Temperaturabweichungen können somit kompensiert werden. Gleichzeitig werden mittels des neugestarteten Prozesses die individuellen benötigten Druckeinstellungen aktualisiert, die für das eingesetzte Filament vorab ermittelt wurden.

Es soll in dieser Arbeit untersucht werden, wie mittels des FDM-Druckverfahrens Permeabilität und Permittivität gesteuert werden können. Folglich wurden von den Filamentkompositen unterschiedliche Mischverhältnisse erstellt, wobei die relative Permeabilität μ_r vom Eisenanteil bestimmt wird und die relative Permittivität ε_r von einem zweiten Material. Zur Steuerung der Bestandteile wird das Schichtungsverhältnis verwendet.

Die generierten Filamentkomposit sind der Abb. 6.6 und Abb. 6.7 zu entnehmen, mit Abbildungen der entsprechenden Proben. Der Index des Materialanteils wird im vorlaufenden Text wie folgt angegeben; zu Beginn wird der Anteil des Eisenfilament angegeben, gefolgt vom Anteil des variablen Materials (e.g. Kupferfilament, Graphitfilament, PLA-Filament, *LayBrick*), sowie der Summe aller vorhandenen Schichthöhen vom Filamentkomposit (i.e. $1+6=7$ -*Layern*).

¹⁸Surface Deviation: 5 mm ; Normal Deviation: $10,0$; Maximum Edge Length: $263,97\text{ mm}$

Tabelle 8: 3D-Druckeinstellung für Kupferfilament [60], Graphitfilament [61] und *LayBrick* [65] in *Simplify3D*

Kategorie	Einstellungen	Copper (Protopasta [60])	Graphit (Protopasta [61])	LayBrick (Kai Parthy [65])
Extruder	Typ	Remote Drive	Remote Drive	Remote Drive
	Nozzle Diameter	0,40 mm	0,40 mm	0,40 mm
	Extrusion Multiplier	0,92	0,87	0,93
	Retraction Distance	0,65 mm	0,65 mm	0,65 mm
	Retraction Vertical Lift	0,20 mm	0,20 mm	0,40 mm
	Retraction Speed	25 mm/s	25 mm/s	25 mm/s
Layer	Primary Layer Height	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
	Top Solid Layers	3	3	3
	Bottom Solid Layers	3	3	3
	Outline/Perimeter Shells	3	3	3
Infill	Interior Fill Percentage	0 %	0 %	0 %
Temperature	Primary Extruder	190 °C	230 °C	180 °C
	Heated Bed	60 °C	60 °C	85 °C
	Fan Speed	100 % at Layer 1	80 % at Layer 2	80 % at Layer 2
Speeds	Default Printing Speed	30 mm/s	60 mm/s	50 mm/s
	X/Y Axis Movement Speed	60 mm/s	60 mm/s	60 mm/s
Other	Horizontal Size Compensation ^a	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
	Linear Advance ^b	0,0	0,0	0,0

^as.a. Kpt.: F.11

^bs.a. Kpt.: F.15

Hergestelltes Komposit

Mit der in Kpt. 6.1 beschriebenen Vorgehensweise wurden vier Komposite erstellt, wobei stets Eisenfilament als Gegenspieler verwendet worden ist (Abb.: 6.6 (8), Abb.: 6.7 (8)). Eine Kombination von Kupferfilament und Eisenfilament ist in Abb. 6.8 dargestellt. In Abb. 6.8 (B) sind Nahaufnahmen des zweilagigen Filaments dargestellt, korrespondierend zum erzielten Aufbau von Abb. 6.8 (A). Dieses zweilagige Filamentkomposit wurde erneut eingespeist, und durch erneutes 3D-Drucken als Gemisch veredelt (Abb.: 6.8 (C)). Um eine Einschätzung der Druckqualität zu erhalten, wurden Probedrucke mit dem gefertigtem Filamentkomposit erstellt (Abb.: 6.8 (D)). Der gräuliche Anteil anhand der Proben gibt hierbei Rückschluss auf den Eisenfilamentanteil im Filamentkomposit.

Da im PLA-Filament keine zusätzlichen Partikel hinzugemischt worden sind, kann anhand der Veredlung die Verteilung des Eisenfilament eingesehen werden (Abb.: 6.9 (C, 1)). Dieses Phänomen kann anhand der Proben jedoch nicht mehr beobachtet werden (Abb.: 6.9 (D, 1)). Auch bei diesem Komposit gibt der gräuliche Anteil Rückschluss auf den Anteil des Eisenfilament in der Probe.

Das Graphit-Filament ist sehr dominant in der Verteilung im Filamentkomposit. Anhand der Abb. 6.10

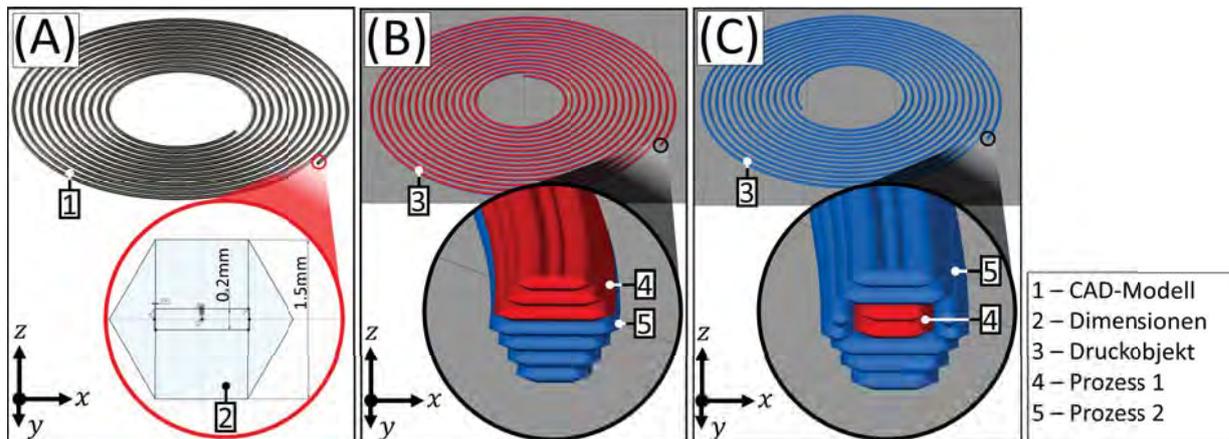


Abbildung 6.5: Erstellte archimedische Spule zur Herstellung des Filamentkomposits. (A) CAD-Modell in *Fusion360*, (B) zweilagiges Filamentkomposit als *GCode*-Vorschau in *Simplify3D*, (C) Kernherstellung eine zweilagigen Filamentkomposit als *GCode*-Vorschau in *Simplify3D*.

(B) sind selbst die Schichthöhen schwierig zu unterscheiden. Der Anteil der Vermischung in der veredelten Variante (Abb.: 6.10 (C)) wird durch ein mattes Schimmern im Filament deutlich. Es wird davon ausgegangen, dass die Graphitanteile sehr fein sind, da sich bei der Fertigung ebenfalls Ablagerung in der Düse bilden. Der Graphitanteil ist in den Proben sehr stark vertreten, was eine Unterscheidung schwierig macht¹⁹.

Das *Laybrick*-Filament [65] enthält Kalziumkarbonat (CaCO_3) und zeichnet sich durch seine besonderen Druckeigenschaften aus (Abb.: 6.11). Wie anhand der Nahaufnahmen von Abb. 6.11 (B) zu erkennen ist, zeichnet sich das Filament durch eine Grobkörnigkeit aus. Nach Rücksprache mit KAI PARTHY [62], könnte es sich hierbei um Luftfeuchtigkeit im Filament (Kpt.: F.2) handeln. Zum Zeitpunkt der Untersuchung konnte dies nicht weitergehend untersucht werden.

Um eine Kombination trotzdem zu ermöglichen, wurde die spezielle Drucktechnik aus Abb. 6.6 (C) verwendet. Hierbei wurde abhängig vom gewählten Mischverhältnis eines der verwendeten Filament umhüllt (Abb.: 6.11 (A, 1)) oder als Kern verwendet (Abb.: 6.11 (A, 3)). Mittels dieser Methode konnte verhindert werden, dass das zweilagige Filamentkomposit beim erneuten Einführen vorzeitig brechen könnte (Abb.: 6.4 (A, 2)). Die erstellten Proben (Abb.: 6.11 (D)) zeigen Zuverlässigkeit dieses Verfahrens. Abermals ist die Graufärbung ein Indiz für die Eisenanteil in diesen Proben. Es ist jedoch bei diesem Werkstoff zu beachten, dass das CaCO_3 sehr poröse Eigenschaft besitzt, wodurch die Probe unter großer mechanischer Belastung brach.

¹⁹Die Proben wurden alle markiert, um eine Verwechslung auszuschließen.

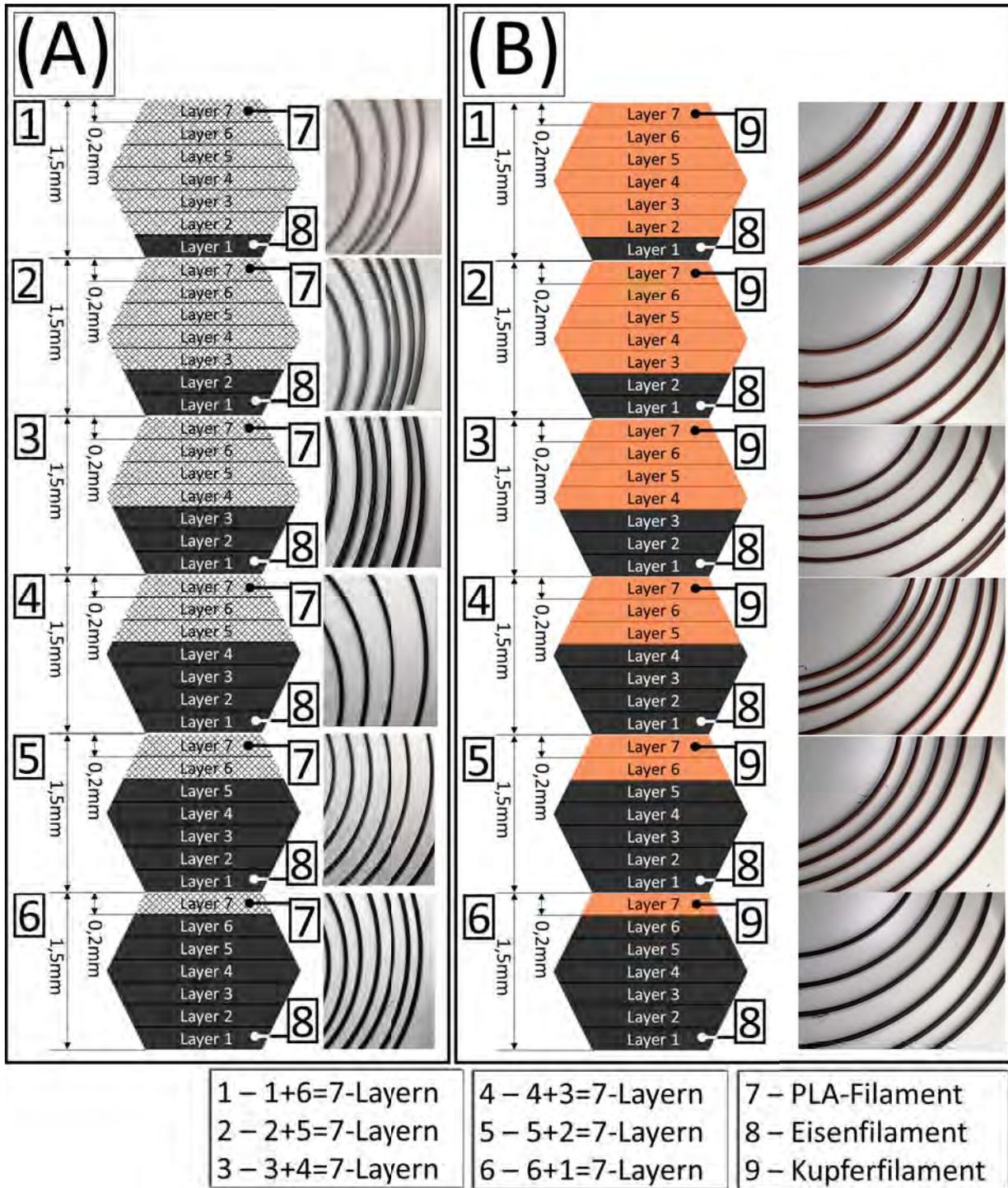


Abbildung 6.6: Erstellte Mischverhältnisse für Filamentkomposit zur Weiterverwendung. (A) Mischungen von weißem *Janbex* PLA-Filament [52] und Eisenfilament [44], (B) Mischungen von Kupfer-Filament [60] und Eisenfilament [44].

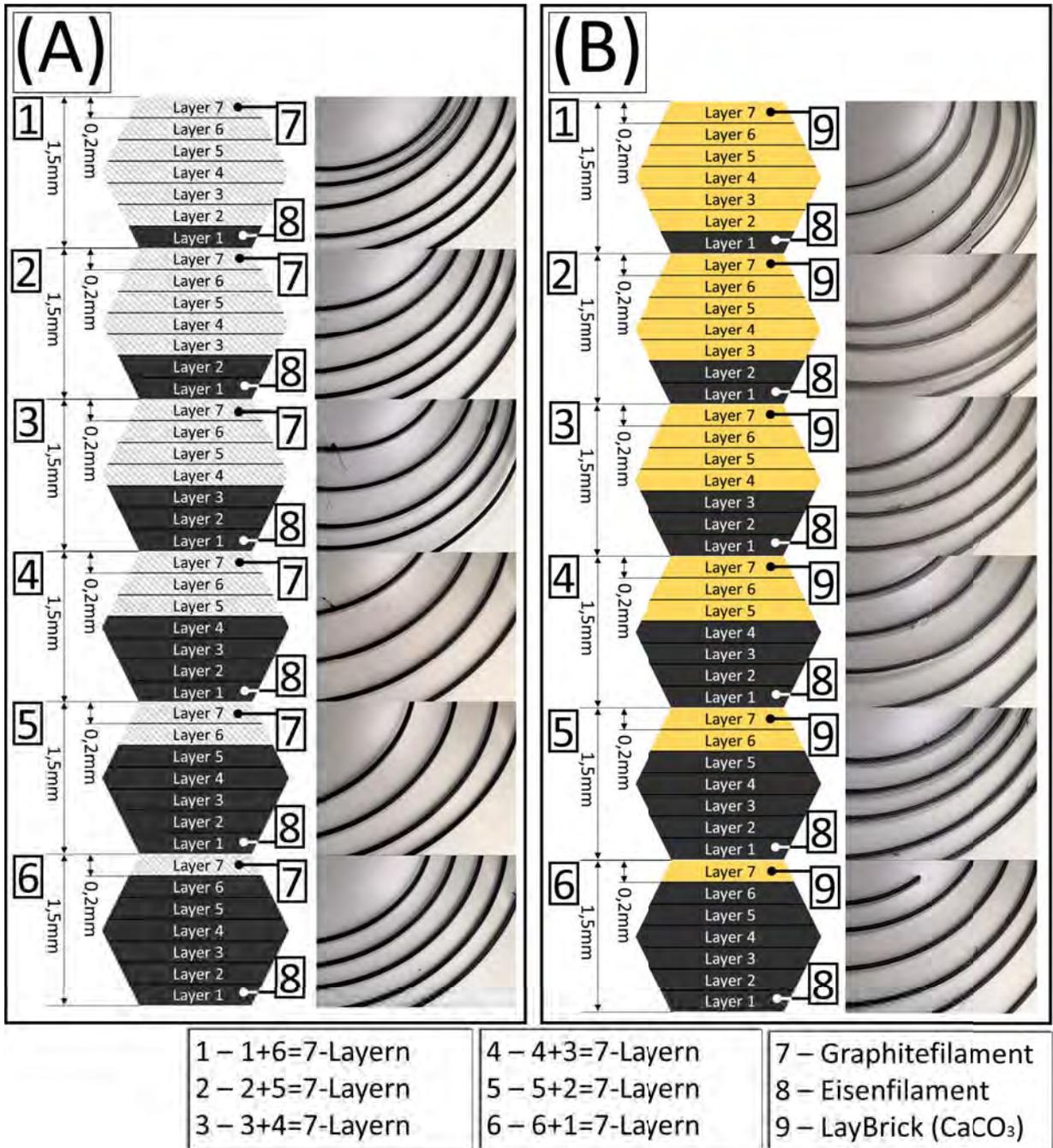


Abbildung 6.7: Erstellte Mischverhältnisse für Filamentkomposit zur Weiterverwendung. (A) Mischungen von Graphitfilament [61] und Eisenfilament [44], (B) Mischungen von LayBrick [65] und Eisenfilament [44].

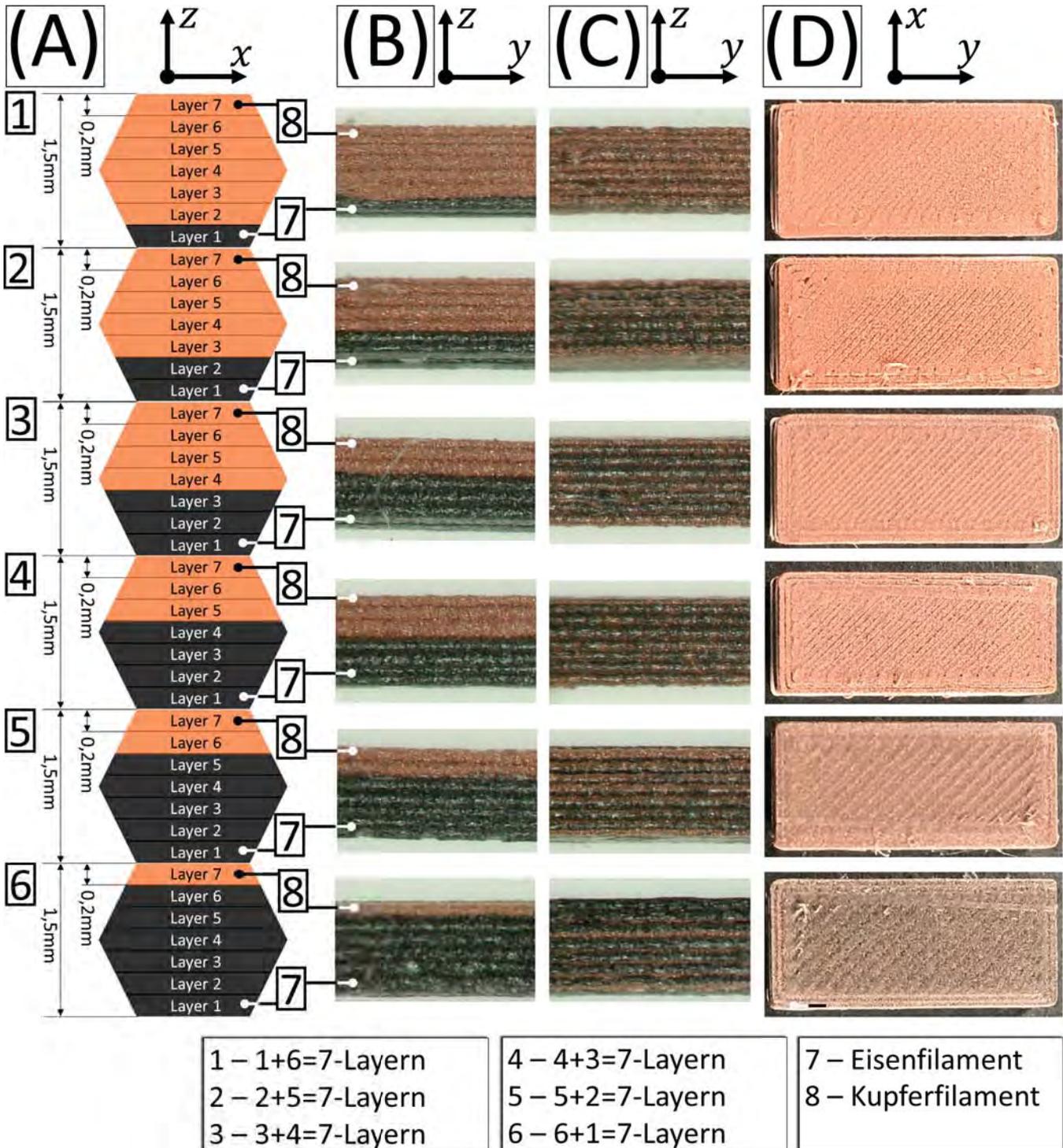


Abbildung 6.8: Zusammensetzung von Filamentkompositen aus Kupferfilament [60] und Eisenfilament [44] bis zur erstellten Messprobe. (A) Theoretische Zusammensetzung des Filamentkomposit mit Verteilung der Bestandteile, (B) Nahaufnahme des gefertigten zweilagigen Filamentkomposit, (C) Nahaufnahme von vermischem zweilagigen Filamentkomposit, (D) Draufsicht auf Probe von gefertigtem Filamentkomposit.

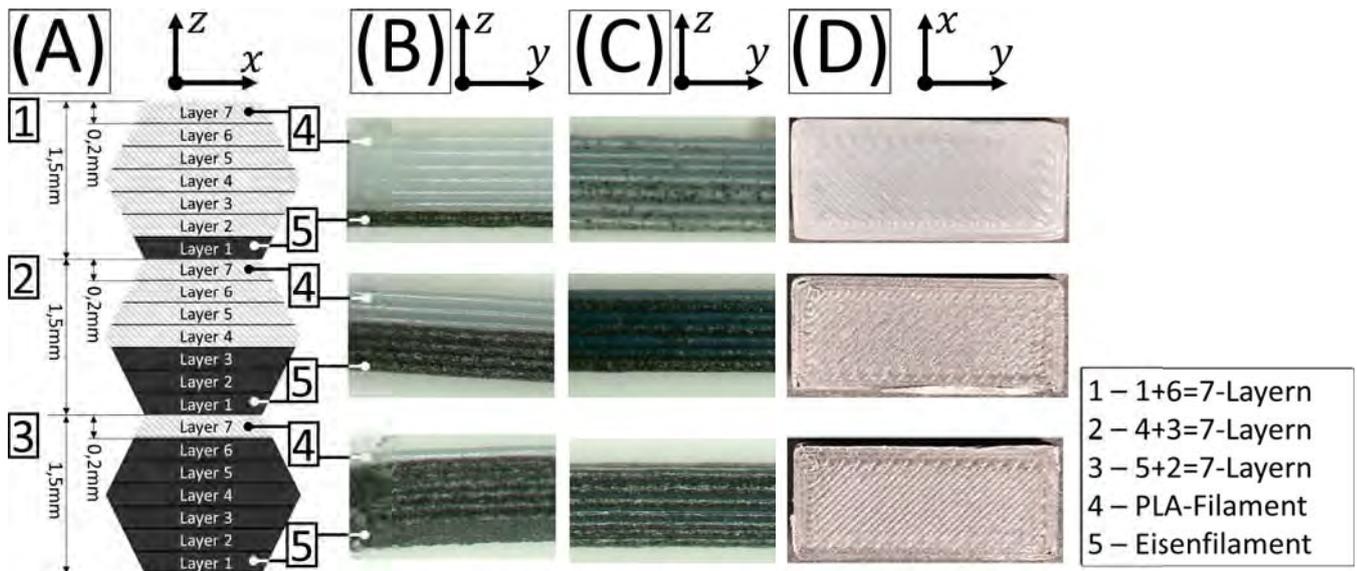


Abbildung 6.9: Zusammensetzung von Filamentkompositen aus weißem PLA [52] und Eisenfilament [44] bis zur erstellten Messprobe. (A) Theoretische Zusammensetzung des Filamentkomposits mit Verteilung der Bestandteile, (B) Nahaufnahme des gefertigten zweilagigen Filamentkomposits, (C) Nahaufnahme von vermishtem zweilagigen Filamentkomposit, (D) Draufsicht auf Probe von gefertigtem Filamentkomposit.

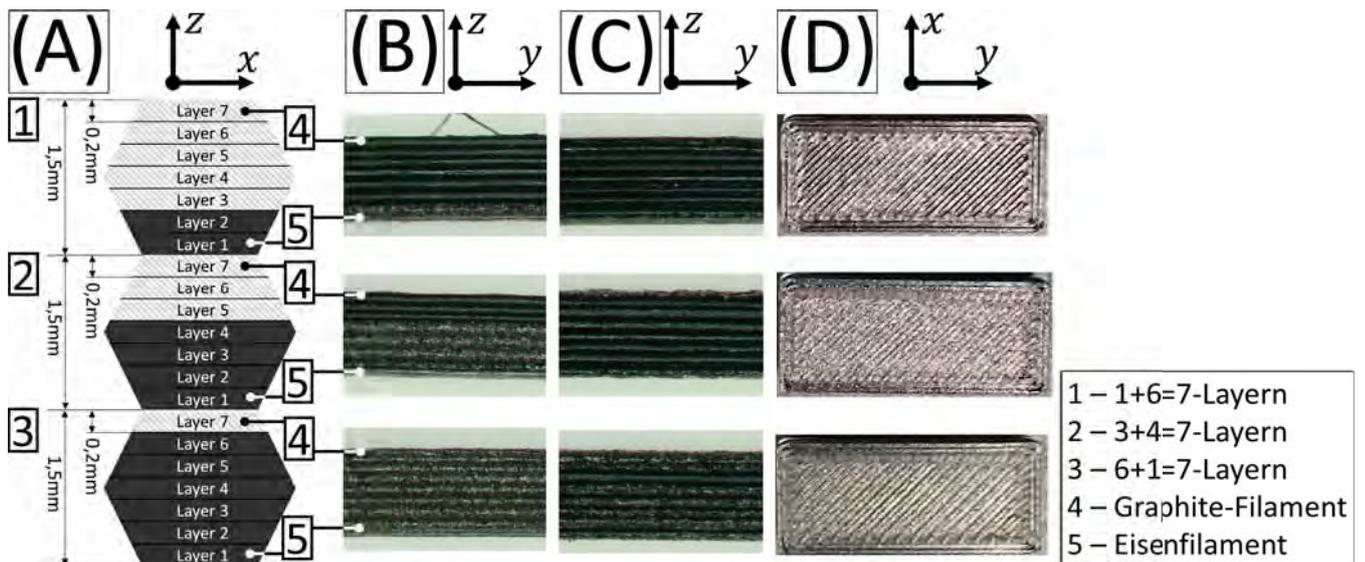


Abbildung 6.10: Zusammensetzung von Filamentkompositen aus Graphit [61] und Eisenfilament [44] bis zur erstellten Messprobe. (A) Theoretische Zusammensetzung des Filamentkomposits mit Verteilung der Bestandteile, (B) Nahaufnahme des gefertigten zweilagigen Filamentkomposits, (C) Nahaufnahme von vermishtem zweilagigen Filamentkomposit, (D) Draufsicht auf Probe von gefertigtem Filamentkomposit.

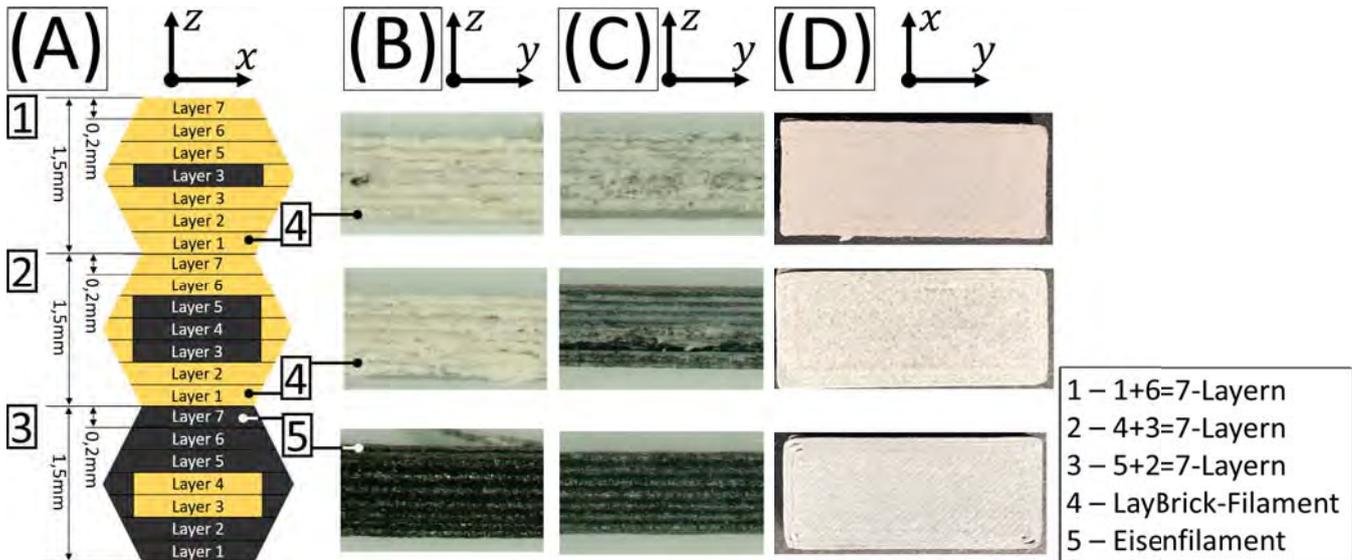


Abbildung 6.11: Zusammensetzung von Filamentkompositen aus *LayBrick*-Filament [65] und Eisenfilament [44] bis zur erstellten Messprobe. (A) Theoretische Zusammensetzung des Filamentkomposits mit Verteilung der Bestandteile, (B) Nahaufnahme des gefertigten zweilagigen Filamentkomposits, (C) Nahaufnahme von vermischtem zweilagigen Filamentkomposit, (D) Draufsicht auf Probe von gefertigtem Filamentkomposit.

6.2 Proben zur Vermessung

Die aus Kpt. 6.1 hergestellten Filamentkomposit wurden verwendet, um Proben für die HF-Messung zu erstellen. Diese Proben sind in deren Zusammensetzung identisch mit den aus den Betrachtungen und Messungen in Kpt. 5.3. Das Layerschichtverhältnis setzt sich zusammen aus 10 zu 10 Layer, mit 10 Schichten (2 mm) Filamentkomposit (Abb.: 6.12 (B, 7)) und 10 Schichten (2 mm) weißem PLA von *Janbex* [52] (Abb.: 6.12 (B, 8)). Abermals wurden hiervon die drei bekannten Typen A (Abb.: 6.12 (A, 4)), B (Abb.: 6.12 (A, 5)) und C (Abb.: 6.12 (A, 6)) erstellt, um die verschiedenen Auswirkungen durch differenzierte Ausrichtung zu untersuchen. Alle Proben wurden ohne Einflussnahme eines statischen Magnetfeldes durchgeführt.

Der Druckvorgang wurde für alle Proben Typ A (Abb.: 6.12 (A, 4)), Typ B (Abb.: 6.12 (A, 5)) und Typ C (Abb.: 6.12 (A, 6)) gleichzeitig durchgeführt, um mögliche Abweichungen im Fertigungsprozess auszuschließen.

Beim Druck des Filamentkomposits ist durch die Verwendung des Hexagons (Abb.: 6.1 (B)) als Geometrie zu beachten, dass die kleinere Oberfläche mittels des Extrusion-Multipliers (s.a. Kpt.: F.13) kompensiert werden muss. Der zugehörige Wert wurde hierfür um 120 % geändert (Tab.: 9). Die Schmelztemperatur wurde auf 220 °C erhöht. Für alle Filamentkomposit wurde die Einstellungen von Tabelle 9 materialunabhängig verwendet.

Durch den eingesetzten Fertigungsprozess hafteten die Proben sehr stark am Druckbett. Um diese beim Entfernen nicht zu zerstören, wurde das Druckbett nach Abschluss des Druckvorgangs im Gefrierfach gelagert, um mittels des provozierten thermischen Stresses die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der Probe und des Glases zu nutzen, eine Spannung zwischen den Komponenten zu erzeugen. Dadurch war es möglich ohne zusätzliche Werkzeuge oder Kraftausübung die Proben zu befreien.

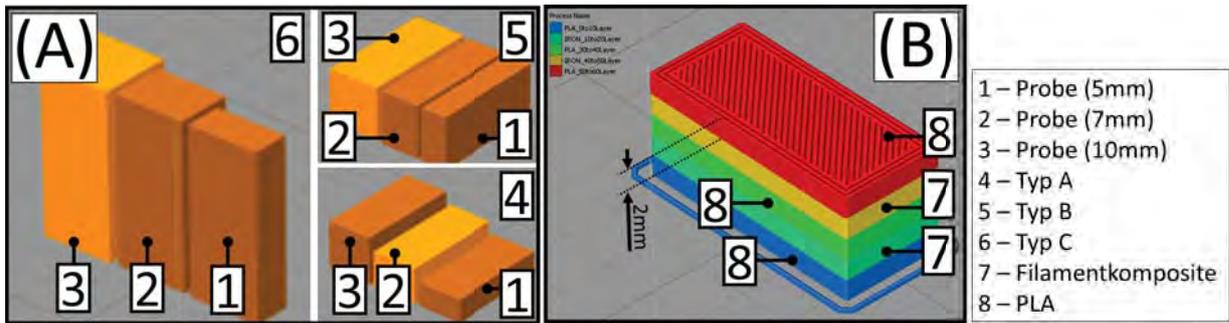


Abbildung 6.12: 3D-Druckvorschau von Probendruck mit Filamentkompositen in *Simplify3D*. (A) Anordnung der Probetypen A, B, C mit den zugehörigen Größen, (B) Struktur der verwendeten Prozesse in *Simplify3D*.

Tabelle 9: Druckeinstellung für Filamentkomposit PLA+Eisen in *Simplify3D*

Kategorie	Einstellungen	Filamentkomposit
Extruder	Typ	Direct Drive
	Nozzle Diameter	0,40 mm
	Extrusion Multiplier	1,10
	Retraction Distance	0,6 mm
	Retraction Vertical Lift	0,00 mm
	Retraction Speed	90 mm/s
Layer	Primary Layer Height	0,2 mm
	Top Solid Layers	3
	Bottom Solid Layers	3
	Outline/Perimeter Shells	3
Infill	Interior Fill Percentage	0 %
Temperature	Primary Extruder	220 °C
	Heated Bed	60 °C
	Fan Speed	80 % at Layer 2
Speeds	Default Printing Speed	60 mm/s
	X/Y Axis Movement Speed	60 mm/s
Other	Horizontal Size Compensation ^a	-0,01 mm
	Linear Advance ^b	0,14

^as.a. Kpt.: F.11

^bs.a. Kpt.: F.15

6.3 Filamentkomposite: Proben zur Vermessung

Mittels der erstellten Proben aus Kpt. 6 werden anhand von Messungen die frequenzabhängige Dämpfung der Signalübertragung zwischen den beiden Wellenleitern ermittelt. Die eingefügten Proben fungieren hierbei als Störstelle. Hierbei wird die Zusammensetzung des Filaments geändert, wobei der Anteil vom Eisenfilament und des Zweitmaterials (i.e. Kupferfilament, *LayBrick*-Filament, Graphitfilament, PLA-Filament) variiert wird. Die Schichthöhe vom PLA bleibt konstant ($10 \text{ Layer} = 2 \text{ mm}$, Abb.: 6.13). Die verwendeten Probenarten $10 \text{ zu } 10 \text{ Layer}$, sowie deren Variation der Schichtungen wurden in Abb. 6.13 visualisiert. Der Illustration sind außerdem die Position und Ausrichtung im *WR90*-Wellenleiter zu entnehmen.

Basierend auf den vorangegangenen Betrachtungen aus Kpt. 5.3 wurden die Probenhöhen beibehalten, die Probe mit 15 mm eliminiert und durch eine Probe von 7 mm ersetzt. Diese Entscheidung basiert darauf, dass Indizien der vorherigen Vermessung darauf hinwiesen, dass die Probe mit 15 mm Länge zu weit in den *WR90*-Wellenleiter hinreichte und somit bereits ungewollte Interferenzen generierte.

Der Messaufbau wurde mit freundlicher Hilfe von Prof. DAVID POMMERENKE (IFE) verbessert. So wurden die $3,5 \text{ mm}$ -SMA-Elemente aus den vorherigen Untersuchungen eliminiert und mit den gerätespezifischen N-Steckverbindern ausgetauscht. Wie am Messaufbau von Abb. 6.14 (A) dargestellt ist, wurden designierte N-Steckverbinderkabel verwendet (Abb.: 6.14 (A, 2)), die ohne Adapter am *ZVA24* (Abb.: 6.14 (A, 1)) und den *WR90*-Wellenleitern (Abb.: 6.14 (A, 9)) angeschlossen werden konnten. Die Gewinde der N-Steckverbinder wurden zudem einer Reinigung unterzogen (Abb.: 6.14 (C, 8)), vgl. Abb.: 4.16 (B, 3)). Als Kalibrationskit wurde das für N-Steckverbinder designierte *ZV-Z21* [57, S. 4] verwendet (Abb.: 6.14 (D, 3)). Im Gegensatz zum verwendeten *ZV-Z52* [40] aus Kpt. 4.2 werden beim *ZV-Z21* zur Kalibrierung die notwendigen Adapter manuell am Kabel angeschlossen. Wie der Abb. 6.14 (B) zu entnehmen ist, sind für die Kalibrierung N-Steckverbinderanschlüsse vorgesehen, dadurch SMA-Adapter obsolet macht und sich in der Qualität der Messergebnisse niederschlägt. Ein für die Betrachtung notwendiger Wellenleiterkalibrationskit konnte nicht mehr rechtzeitig für diese Arbeit beschafft oder gebaut werden.

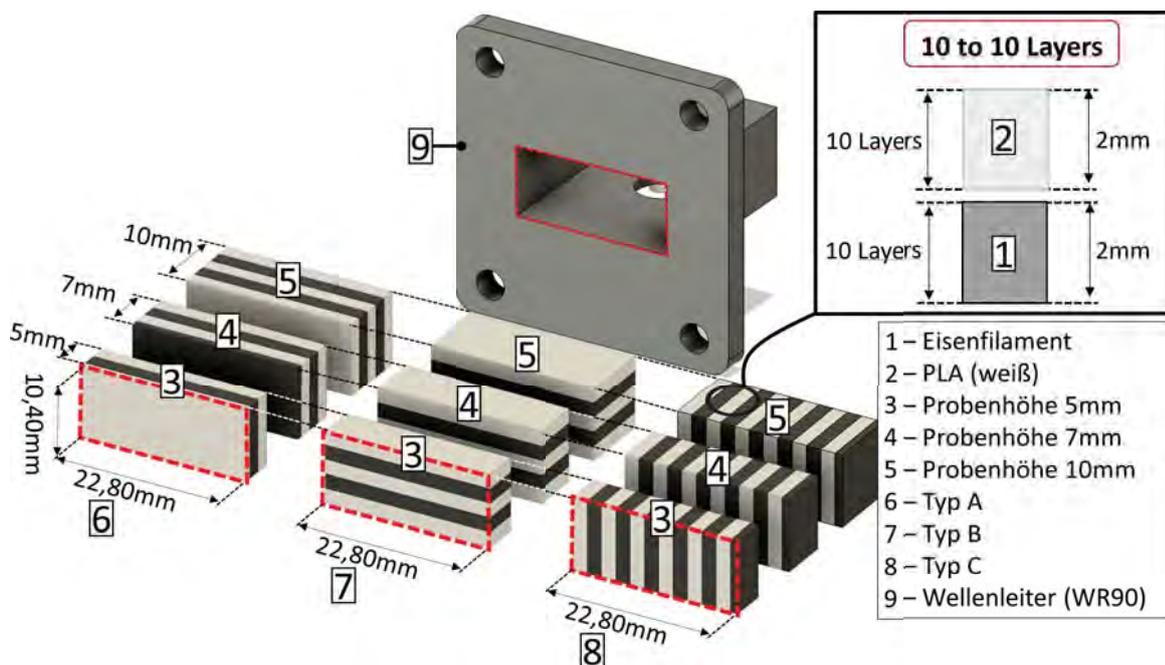


Abbildung 6.13: Ausrichtung der gedruckten Proben im platzierten *WR90*-Wellenleiter

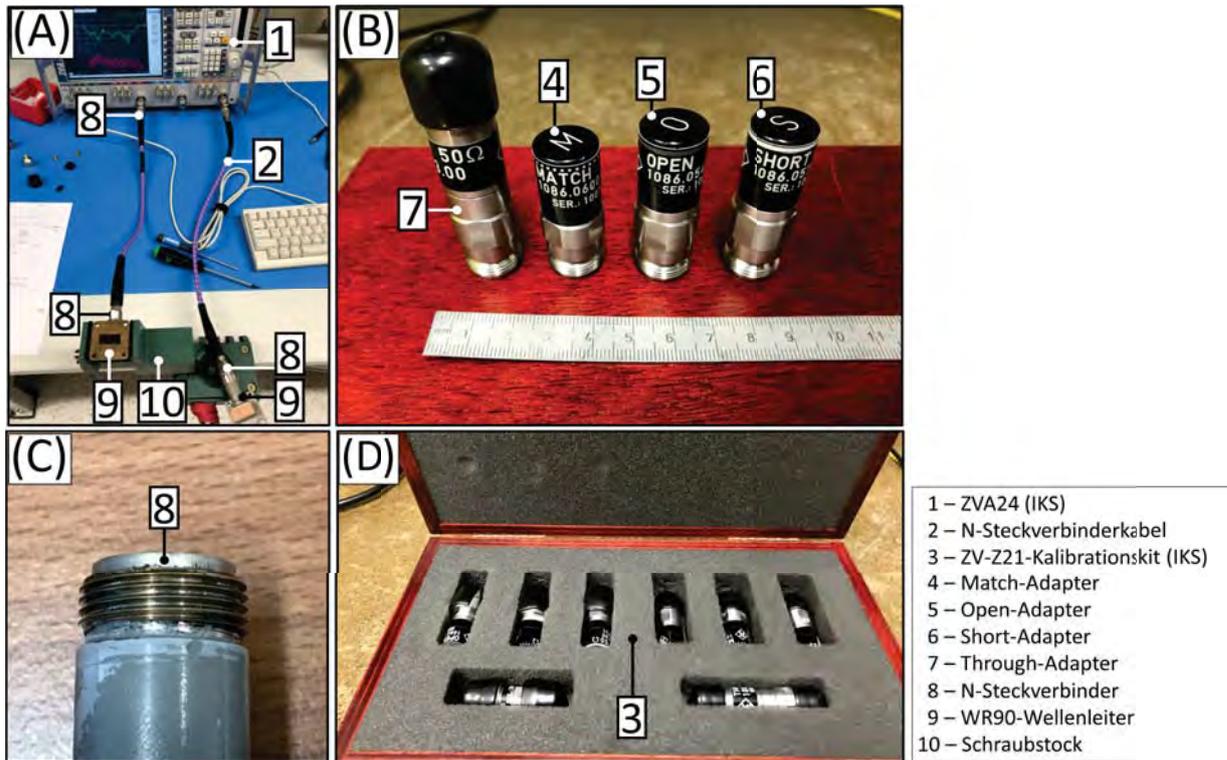


Abbildung 6.14: Verbesserter Messaufbau für Filamentkompositmessung. (A) ZVA24 mit verwendeten N-Steckverbinderkabeln und installierten WR90-Wellenleitern, (B) verwendete Adapter vom Kalibrationskit ZV-Z21 [67, S. 4], (C) gereinigtes Gewinde vom N-Steckverbinder des Wellenleiters, (D) verwendetes Kalibrationskit ZV-Z21 [67, S. 4] als Koffer.

6.3.1 PLA+Eisen

Zu Beginn sollen die Auswirkungen des Filamentkomposit von weißem *Janbex* PLA [52] mit Eisenfilament [44] untersucht werden. Grundgedanke dessen war es, dass die beiden Filamente als gemeinsame Komponente Polymere verwenden dürften und durch eine Kombination eine Verdünnung des Eisenanteils bewirken könnten.

Filamentkomposit PLA+Eisen: Typ A

In Abb. 6.15 sind die Messergebnisse $S(1,1)$ und $S(2,1)$ für das Filamentkomposit Typ A dargestellt, mit den Mischverhältnissen $1+6=7$ Layer bis $6+1=7$ Layer. Die Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ anhand des Proben Typ A 5 mm (Abb.: 6.15 (B, 1)) variiert von -1 dB [$S(2,1)$] bis -8 dB [$S(2,1)$] von 8 GHz bis 14 GHz . Der Grad dessen wird anhand des Eisenanteils im Filament bestimmt, wobei die geringsten Dämpfungen für $1+6=7$ Layer von $-1,2\text{ dB}$ [$S(2,1)$] bis -3 dB [$S(2,1)$] zu erkennen sind und die größte Dämpfung für $6+1=7$ Layer von $-1,2\text{ dB}$ [$S(2,1)$] bis -3 dB [$S(2,1)$]. Die Dämpfung ist hierbei proportional zum Eisenanteil, wobei pro hinzugefügter Eisenfilamentschicht die Dämpfung der Transmission zunimmt, bei $8,5\text{ GHz}$ und $13,5\text{ GHz}$ um $-0,3\text{ dB}$ [$S(2,1)$] und bei 11 GHz um $-0,34\text{ dB}$ [$S(2,1)$]. Dieses Verhalten ist nicht linear, wobei ausgeprägtere Dämpfungen bei den Proben $1+6=7$ Layer, $3+4=7$ Layer und $6+1=7$ Layer zu erkennen sind, mit vergleichbaren Silhouetten (Abb.: 6.15 (B)) bei $1+6=7$ Layer bei $9,7\text{ GHz}$ und 12 GHz , $3+4=7$ Layer bei $9,8\text{ GHz}$ und $11,7\text{ GHz}$, sowie bei $6+1=7$ Layer bei $9,8\text{ GHz}$ und $11,7\text{ GHz}$. Es ist hier davon auszugehen, dass es sich um eine Projektion eines Phänomens vom Wellenleiter selbst handeln muss, der eine ausgeprägte Resonanz bei $8,6\text{ GHz}$ für $S(1,1)$ dB mate-

rialunabhängig von den Proben aufweist. Ob es sich um einen systematischen Fehler handelt, muss in weiteren Betrachtungen ergründet werden.

Wie der Abb. 6.15 (C, 2) zu entnehmen ist, verändert sich beim Probentyp A 7 mm zusätzlich zur Höhe die Anordnung des Schichtungsverhältnisses. Die Messergebnisse der Probe A 7 mm zeigt eine Dämpfung der Transmission S(2,1) bei 8,5 GHz von $-2 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($1+6=7 \text{ Layer}$) bis $-3,5 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($6+1=7 \text{ Layer}$), mit Abnahme der Dämpfung von $-0,5 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($1+6=7 \text{ Layer}$) bis $-2 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($6+1=7 \text{ Layer}$). Auch bei diesem Probentypen ist die Dämpfung proportional zum Eisenanteil, wobei pro hinzugefügter Eisenfilamentschicht die Dämpfung der Transmission zunimmt, bei 9 GHz um $-0,22 \text{ dB} [S(2, 1)]$ und bei 13,5 GHz um $-0,16 \text{ dB} [S(2, 1)]$. Auch erkennbar anhand von S(1,1) (Abb.: 6.15 (A, 2)), sind zusätzliche Resonanzen von 12,2 GHz ($3+4=7 \text{ Layer}$) bis 12,8 GHz ($4+3=7 \text{ Layer}$). Dieses Merkmal ist nicht innerhalb von S(2,1) (Abb.: 6.15 (B, 2)) wiederzufinden, jedoch eine Inhomogenität der Verläufe für diese Proben von 9,4 GHz bis 12 GHz. Um ein Artefakt auszuschließen, sollte bei diesen Probentypen eine nähere Betrachtung durchgeführt werden, um Fertigungstoleranzen auszuschließen²⁰.

Es sei nun der Probentyp A 10 mm betrachtet. Im Vergleich mit den Probentypen 5 mm und 7 mm ist anhand von S(2,1) (Abb.: 6.15 (B, 3)) eine Verringerung der Dämpfung zu erkennen. Bei 8 GHz von $-0,8 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($1+6=7 \text{ Layer}$), bis $-2 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($6+1=7 \text{ Layer}$), bis 11 GHz von $-0,8 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($1+6=7 \text{ Layer}$), bis $-3,5 \text{ dB} [S(2, 1)]$ ($3+4=7 \text{ Layer}$). Im Vergleich zum leeren Wellenleiter, erfährt die Probe $1+6=7 \text{ Layer}$ die geringste Dämpfung von $< -1 \text{ dB} [S(2, 1)]$ von 8 GHz bis 11,7 GHz. Die größte Dämpfung sind bei den Proben $3+4=7 \text{ Layer}$ und $6+1=7 \text{ Layer}$ zu verzeichnen, von $-1,5 \text{ dB} [S(2, 1)]$ bis $< -7 \text{ dB} [S(2, 1)]$ von 8 GHz bis 13 GHz. Vergleicht man aufbauend dazu S(1,1) anhand von Abb. 6.15 (A, 3), so sind für diese Proben zusätzliche Resonanzen zu erkennen, für $3+4=7 \text{ Layer}$ bei 8,7 GHz und $6+1=7 \text{ Layer}$ bei 10,1 GHz. Da dies jedoch nicht für $6+1=7 \text{ Layer}$ gilt, trotz einer ebenso vorhandenen Resonanz bei 9,45 GHz, sind hierfür weitere Untersuchungen nötig.

Filamentkomposit PLA+Eisen: Typ B

In Abb. 6.16 sind die Messergebnisse S(1,1) und S(2,1) für das Filamentkomposit Typ B dargestellt, mit den Mischverhältnissen $1+6=7 \text{ Layer}$ bis $6+1=7 \text{ Layer}$. In diesen untersuchten Proben kam das gleiche Filamentkomposit zum Einsatz, wie bei den Proben von Abb. 6.15.

Betrachtet man zu Beginn die Eingangsreflexionen S(1,1) vom Probentypen B in Abb. 6.16 (A) und vergleicht diese mit dem Probentyp A in Abb. 6.15 (A), so sind vergleichbare Resonanzen vorzufinden. Probentyp A 5 mm (Abb.: 6.15 (A, 1)) und Probentyp B 5 mm (Abb.: 6.16 (A, 1)) bei 9 GHz bis 10 GHz beim Filamentkomposit $6+1=7 \text{ Layer}$ und $3+4=7 \text{ Layer}$, welches zu einer Impedanzanpassung des vom leeren Wellenleiter erzeugten Resonanz bewirkt. Entsprechend der Transmission S(2,1) in Abb. 6.16 (B, 1) erfolgt an diesen Frequenzpunkten eine geringere Transmission, mit nichtlinearem Verhalten bis 12,4 GHz. Die Dämpfung von S(2,1) variiert hierbei abermals abhängig vom Eisenfilamentanteil, mit geringerer Variation als beim Probentypen B.

Beim Probentypen B 7 mm sind bei S(1,1) zusätzliche Resonanzen zu erkennen, bei 9,3 GHz für $3+4=7 \text{ Layer}$ und 9,7 GHz für $2+5=7 \text{ Layer}$, sowie bei 12,4 GHz bis 12,6 GHz für $2+5=7 \text{ Layer}$, $3+4=7 \text{ Layer}$ und $4+3=7 \text{ Layer}$. Vergleicht man dieses mit der Transmission S(2,1) in Abb. 6.16 (B, 2), sind für diese Proben an den entsprechenden Frequenzen stärkere Dämpfungen von $-4 \text{ dB} [S(2, 1)]$ bis $-7 \text{ dB} [S(2, 1)]$ zu sehen. Für die Frequenzen von 8 GHz bis 9 GHz, sowie 12,5 GHz bis 14,3 GHz ist ein lineares Verhalten zu beobachten, identisch zur Probe Typ B 5 mm, mit der geringsten Dämpfung der Transmission für die Probe $1+6=7 \text{ Layer}$ und die größte Dämpfung für die Probe $6+1=7 \text{ Layer}$. Der Unterschied der Proben

²⁰Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Proben, befand sich der FDM-Drucker noch nicht im ausgereiften Zustand. Eine Wiederholung dieser Messung würde Aufschluss dessen geben.

ist hier geringer $< -0,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro Eisenfilamentschicht.

Beim Probentypen B 10 mm zeichnet sich anhand der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.16 (B, 3) eine Verringerung der Dämpfung im Vergleich zur 5 mm - und 7 mm -Probe. Speziell die Proben mit geringerem Eisenanteil ($1+6=7 \text{ Layer}$, $2+5=7 \text{ Layer}$, $3+4=7 \text{ Layer}$) erzeugen von 8 GHz bis 10 GHz eine geringe Dämpfung der Transmission von ca. $-1 \text{ dB } [S(2,1)]$, mit einer ebenfalls geringfügigen Differenz von $< -0,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro Eisenfilamentschicht. Größere Abweichung dessen sind für 11 GHz bis 13 GHz zu beobachten, wo das Filamentkomposit $3+4=7 \text{ Layer}$, die geringste Dämpfung der Transmission aufweist mit $-1 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-2 \text{ dB } [S(2,1)]$. Analog dazu weist die Probe für das Filamentkomposit $5+2=7 \text{ Layer}$ die stärkste Dämpfung auf von 9 GHz bis $13,4 \text{ GHz}$ von $-1,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-5 \text{ dB } [S(2,1)]$.

Filamentkomposit PLA+Eisen: Typ C

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse für den Probentyp C für das Filamentkomposit PLA+Eisen untersucht. Das Mischverhältnis wurde erneut von $1+6=7 \text{ Layer}$ bis $6+1=7 \text{ Layer}$ variiert.

Bei der Probe 5 mm Typ C sind anhand der Eingangsreflexion in Abb. 6.17 (A, 1) abermals die Ausprägung der charakteristischen Resonanz bei $9,5 \text{ GHz}$ zu erkennen, wie diese bereits in Abb. 6.15 (A, 1) und Abb. 6.16 (A, 1) vorhanden ist. Anhand der Transmission $S(2,1)$ ist für die Probe $1+6=7 \text{ Layer}$ und $2+5=7 \text{ Layer}$ eine ausgeprägtere Dämpfung zu erkennen von $-3 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-5 \text{ dB } [S(2,1)]$ von $9,7 \text{ GHz}$ bis 12 GHz . In den Bereichen von 8 GHz bis $9,5 \text{ GHz}$, sowie von $12,5 \text{ GHz}$ bis $13,5 \text{ GHz}$ ist lineares Verhalten der Proben zu beobachten, wobei das Filamentkomposit mit dem geringsten Eisenanteil ($1+6=7 \text{ Layer}$) die kleinste Dämpfung aufweist. Im Vergleich zu den Probentypen A und B, besitzt der Probentyp C bei 8 GHz bis $9,5 \text{ GHz}$ die größte Modularität, mit einer Differenz von $< -0,4 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro Eisenfilamentschicht. Die höheren Frequenzbereiche sind nahezu identisch im Verhalten mit denen vom Probentyp B und C.

Im Vergleich dazu zeigt die Probe 7 mm Typ C eine geringe Verbesserung in der Signalübertragung und lineareres Verhalten der Proben. Obwohl auch bei dieser Probe eine ausgeprägte Resonanz bei der Eingangsreflexion bei $12,2 \text{ GHz}$ zu erkennen ist (Abb.: 6.17 (A, 2)), schlägt sich dies nicht in der Transmission (Abb.: 6.17 (B, 2)) nieder. Die Dämpfung der Transmission variiert hierbei vom Eisenanteil im Filamentkomposit; die geringste Dämpfung für Probe $1+6=7 \text{ Layer}$ mit einer kontinuierlichen Dämpfung von $-0,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-2 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis 14 GHz und die größte Dämpfung für Probe $6+1=7 \text{ Layer}$ $-2,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis 14 GHz . Die Modularität von 8 GHz bis 10 GHz entspricht hierbei $-0,4 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro Eisenfilamentschicht. Von 12 GHz bis 14 GHz in etwa $-0,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht. Filamentkomposit $5+2=7 \text{ Layer}$ sei bei dieser Betrachtung ausgeschlossen, weil zusätzliche ausgeprägte Dämpfungen bei $9,6 \text{ GHz}$ und $11,8 \text{ GHz}$ zu erkennen sind, die detailliertere Untersuchungen notwendig machen würden.

Beim Probentypen 10 mm Typ C ist eine weitere Verbesserung der Signalübertragung zu erkennen. Anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ (Abb.: 6.17 (A, 3)) sind eine Vielzahl von Resonanzen zu erkennen, die sich jedoch anhand der Transmission widerspiegeln (Abb.: 6.17 (B, 3)). Erkennbar ist ein Variation der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$, wobei für das Filamentkomposit $1+6=7 \text{ Layer}$ die geringste Dämpfung von $-0,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bei 9 GHz zu erkennen ist und die maximalste Dämpfung für das Filament mit dem größten Eisenanteil $6+1=7 \text{ Layer}$ bei $-6,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bei $12,1 \text{ GHz}$. Die Modularität variiert hierbei von $-0,4 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis 11 GHz pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht, erhöht sich aber leicht bei 12 GHz bis 14 GHz um $-0,6 \text{ dB } [S(2,1)]$.

Das auffällige Verhalten der Proben $2+5=7 \text{ Layer}$ und $4+3=7 \text{ Layer}$ bedarf näheren Untersuchungen.

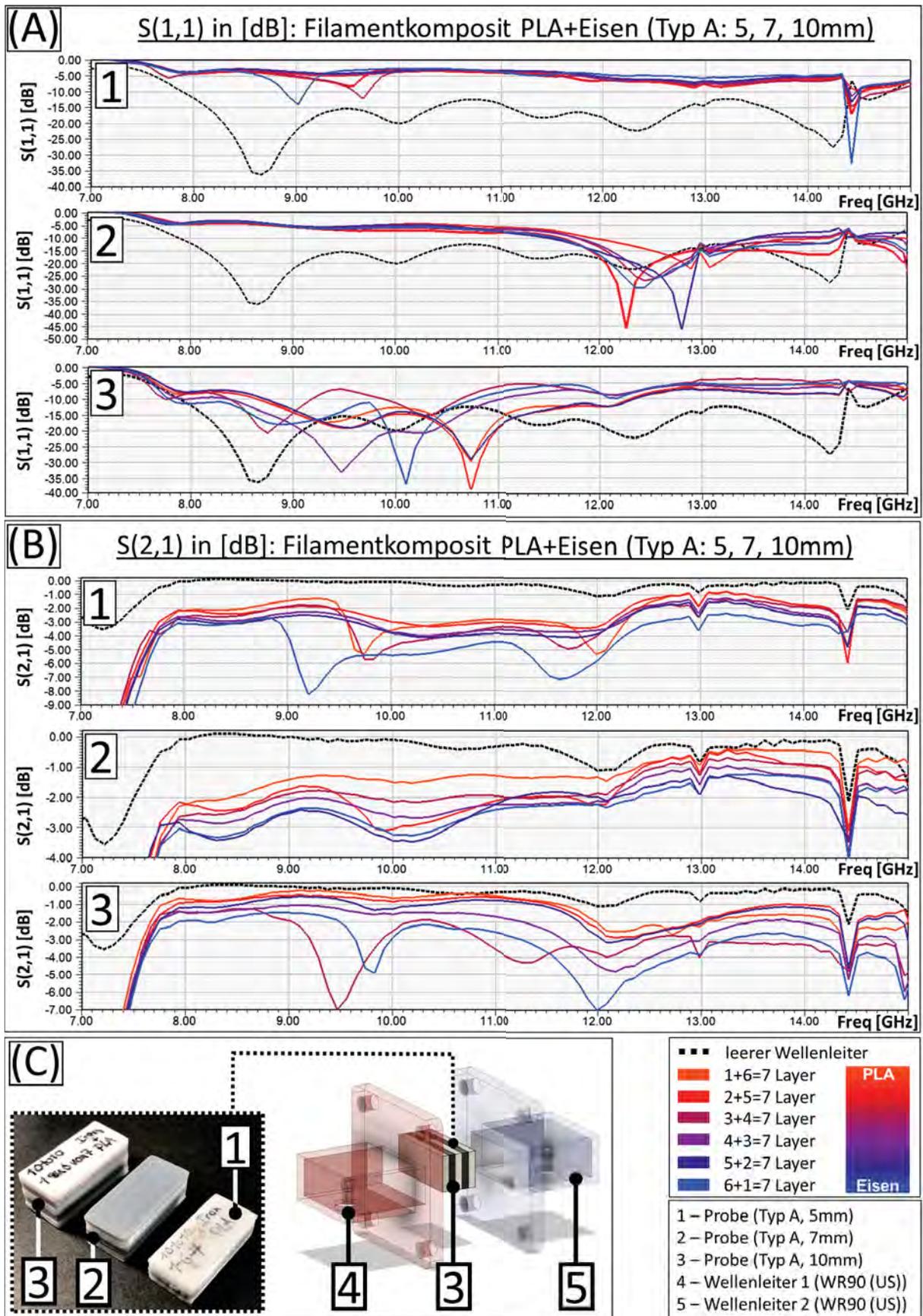


Abbildung 6.15: Vermessungen vom Filamentkomposit PLA mit Eisen für Probestyp A (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

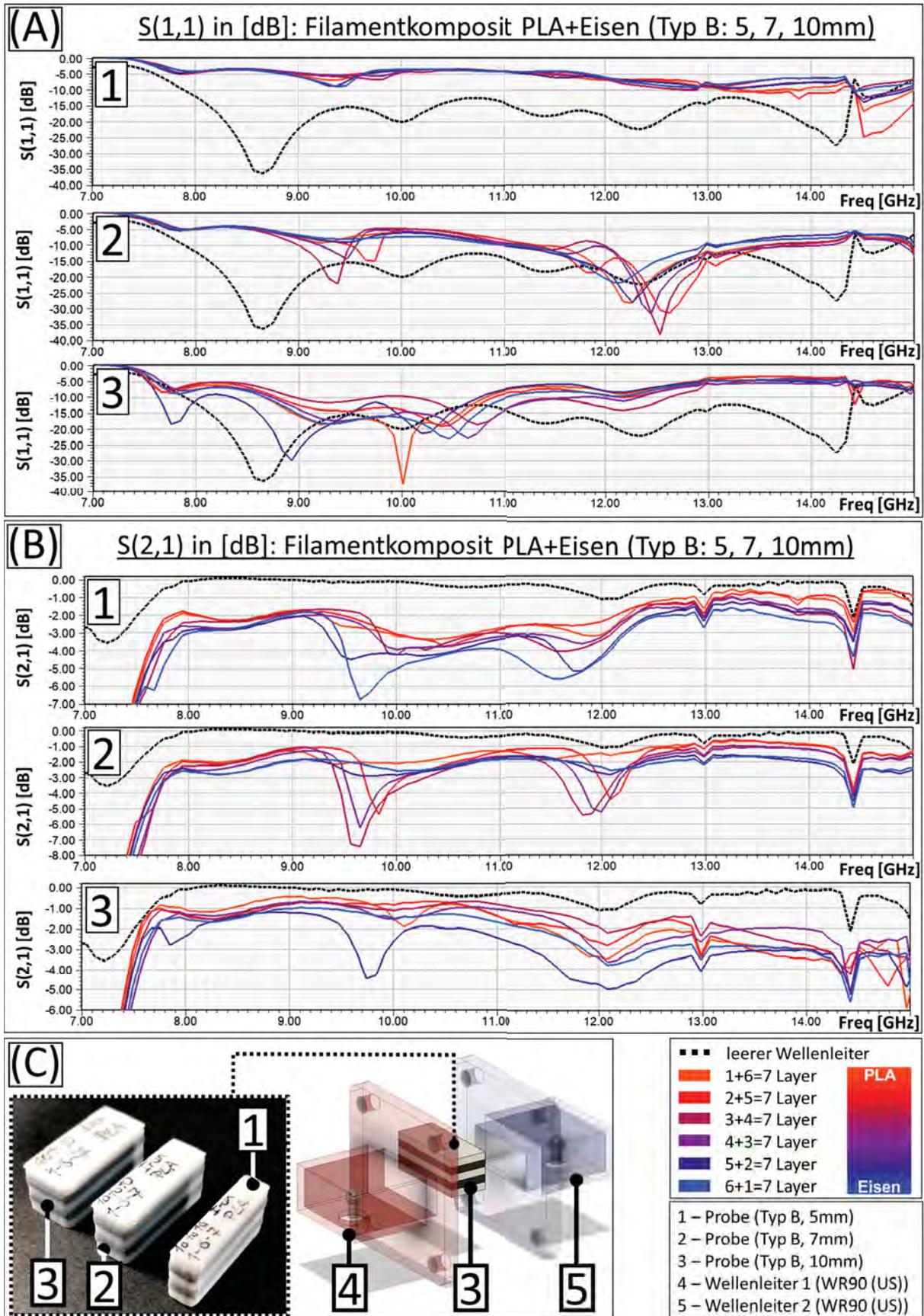


Abbildung 6.16: Vermessungen vom Filamentkomposit PLA mit Eisen für Probestyp B (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

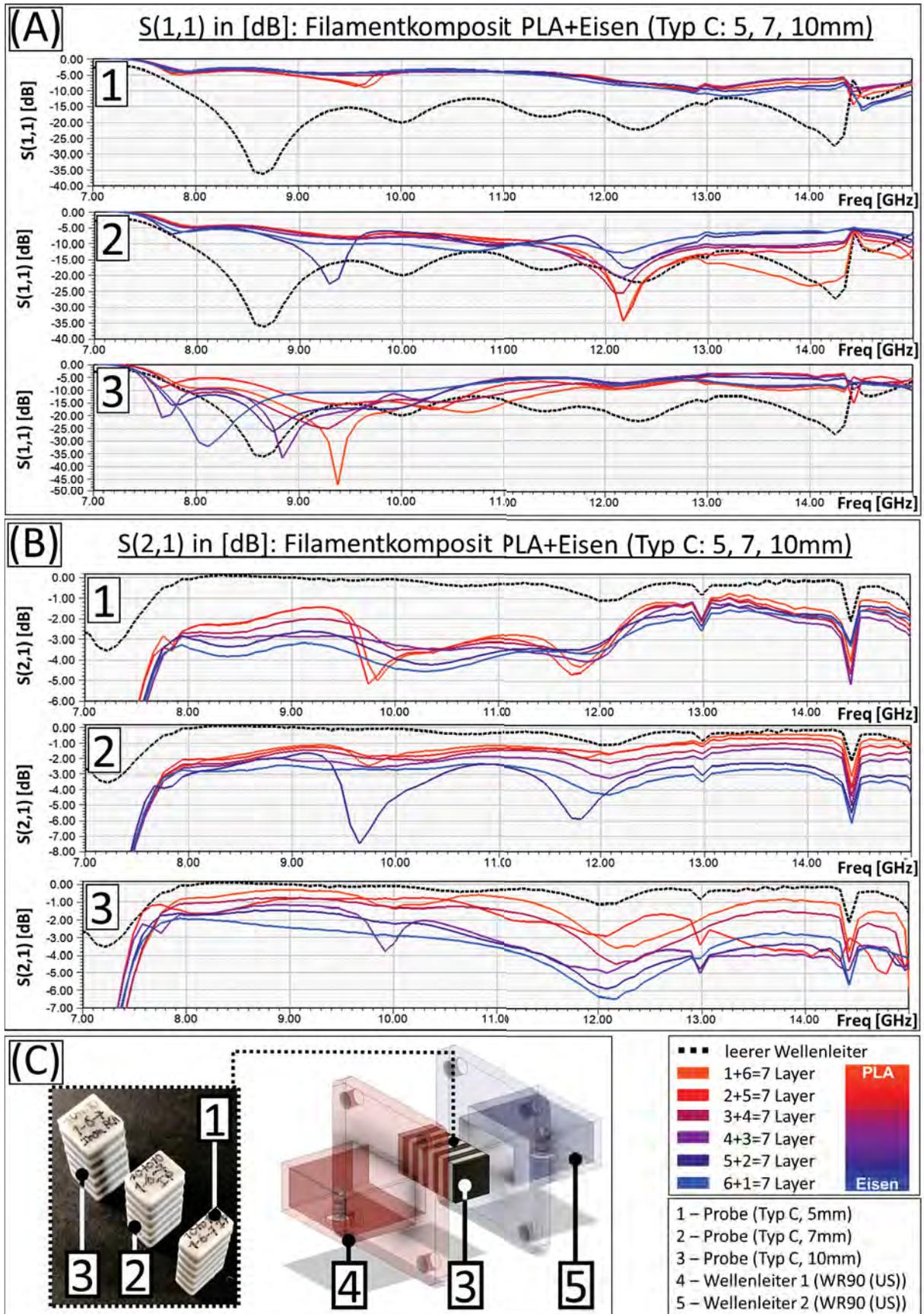


Abbildung 6.17: Vermessungen vom Filamentkomposit PLA mit Eisen für Probestyp C (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

6.3.2 Graphit+Eisen

Es sollen nun die Auswirkungen für das Filamentkomposit Graphit+Eisen untersucht werden. Wiederum werden die drei verschiedenen Probentypen A, B und C anhand verschiedener Mischverhältnisse untersucht. Das Filamentkomposit wurde anhand des Schichtverhältnisses *10 zu 10 Layer* mit dem weißen *Janbez* PLA kombiniert (Abb.: 6.12 (B)).

Filamentkomposit Graphit+Eisen: Typ A

Es sollen Messergebnisse der Probe Typ A *5 mm* betrachtet werden. Im Vergleich zur PLA+Eisen-Variante, sind bei der Graphit+Eisen-Variante keine zusätzlichen Resonanzen anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ zu erkennen (Abb.: 6.18 (A, 1)). Betrachtet man die Dämpfung der Transmission $S(2,1)$, so zeichnet sich anhand der Neukombinationen der Materialien eine neue Verteilung der Signalübertragung ab. So ist die geringste Dämpfung der Probe *5+2=7 Layer* von *8 GHz* bis *11 GHz* von $-5,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-6,4 \text{ dB } [S(2,1)]$ vorhanden und die größte Dämpfung für die Probe *6+1=7 Layer* von $-9 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-11 \text{ dB } [S(2,1)]$. Von *11,5 GHz* bis *13,5 GHz* ist eine Reduzierung der Dämpfung der Transmission um $+3 \text{ dB } [S(2,1)]$ für die Proben *4+3=7 Layer*, *5+2=7 Layer* und *6+1=7 Layer*. Für die Proben *1+6=7 Layer*, *2+5=7 Layer* und *3+4=7 Layer* erfolgt eine Fusion der Kurven zwischen $-6 \text{ dB } [S(2,1)]$ und $-7 \text{ dB } [S(2,1)]$, welches auf dessen Validität näher zu untersuchen ist.

Für die nächste Probe Typ A *7 mm* ist ein ähnliches Muster zu erkennen, wobei die Graphenverläufe ein sehr lineares Verhalten aufzeigen. Die geringste Dämpfung unter den Proben zeigt *5+2=7 Layer* mit $-6 \text{ dB } [S(2,1)]$ von *8 GHz* bis *14 GHz*. Die größte Dämpfung ist für *3+4=7 Layer*²¹ vorhanden mit $-10 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-14 \text{ dB } [S(2,1)]$ von *8 GHz* bis *14 GHz*. Die Modularität entspricht hierbei $-1,4 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht. Anhand dieser Betrachtung ist zu erkennen, dass ein zusätzliches feineres Mischverhältnis notwendige wäre, um weitere Erkenntnisse über die Modularität dieses Filaments zu erbringen (i.e. *4,5+2,5=7 Layer*, *5,5+1,5=7 Layer*).

Weiterführend sei die nächste Probe Typ A *10 mm* betrachtet, in welchen sich das Muster fortsetzt. Abermals ist die Dämpfung der Transmission für die Probe *5+2=7 Layer* am geringsten ausgeprägt, jedoch mit einer größeren Amplitude von $-5,8 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-8,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ von *8 GHz* bis *14 GHz*. Gleiches ist ebenfalls zu beobachten für die Probe *6+1=7 Layer* mit der stärksten Dämpfung von $-16 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-18 \text{ dB } [S(2,1)]$ von *8 GHz* bis *14 GHz*. Die Modularität entspricht hierbei $-2,4 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht.

Filamentkomposit Graphit+Eisen: Typ B

Es soll nun die Anordnung des Schichtungsverhältnisses geändert werden, mittels des Probentyps B. Beginnend mit dem Probe Typ B *5 mm*, sind anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ die aus den Vorbetrachtungen bekannten Resonanzen bei *9,5 GHz* erkenntlich (Abb.: 6.19 (A, 1)). Anhand von $S(2,1)$ in Abb. 6.19 (B, 1) ist eine Dämpfung der Transmission von $-2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-5 \text{ dB } [S(2,1)]$ zu erkennen, wobei die Ergebnisse der Proben über einen Raum von *1 dB* verteilt sind. Von *13 GHz* bis *15 GHz* wird eine klare Differenzierung möglich, mit abermals der Probe *5+2=7 Layer* mit der geringsten Dämpfung der Transmission von $-2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4 \text{ dB } [S(2,1)]$ und der Probe *6+1=7 Layer* mit der größten Dämpfung der Transmission von $-3 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-5,5 \text{ dB } [S(2,1)]$.

Weiterführend seien die Messergebnisse der Probe Typ B *7 mm* betrachtet. Die Eingangsreflexion $S(1,1)$ (Abb.: 6.19 (A, 2)) weist hierbei auf gering ausgeprägte Resonanzen hin bei *9,5 GHz* und *12,1 GHz*.

²¹Die Probe *6+1=7 Layer* ist bei den Messungen zerstört worden und konnte nicht rechtzeitig ersetzt werden.

Vergleicht man dies mit $S(2,1)$ aus Abb. 6.19 (B, 2), so sind in diesem Bereich Artefakte und ausgeprägte Amplituden der Dämpfung der Transmission zu erkennen. Prägnantes Merkmal hierbei ist die Frequenz von $8,8\text{ GHz}$ bis $9,4\text{ GHz}$, mit der Probe $5+2=7\text{ Layer}$ als geringste Dämpfung von $-2\text{ dB}[S(2,1)]$ und der Probe $1+6=7\text{ Layer}$ als größte Dämpfung von $-5,9\text{ dB}[S(2,1)]$. Diese Variation verteilt sich bis in etwa zu einer Frequenz von 12 GHz , wo die aus den Vorbetrachtungen für Typ A Graphit+Eisen bekannten Verteilung für die Filamentkomposit wieder erkennbar werden. Hierbei zeigt das Filamentkomposit $5+2=7\text{ Layer}$ die wenigste Dämpfung von $-2\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-3\text{ dB}[S(2,1)]$ und das Filamentkomposit $6+1=7\text{ Layer}$ die größte Dämpfung von $-5\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-7\text{ dB}[S(2,1)]$. Die Modularität entspricht bei diesem Frequenzbereich einem Wert von ca. $-1\text{ dB}[S(2,1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht.

Zuletzt sei die Probe Typ B 10 mm betrachtet. Die anfänglich erwähnten Resonanzen werden anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ besonders deutlich bei 8 GHz und 10 GHz (Abb.: 6.19 (A, 3)). Die Auswirkungen dessen sind ebenfalls anhand der Transmission in $S(2,1)$ in Abb. 6.19 (B, 3) zu erkennen, durch eine irreguläre Verteilung der Graphen. Die kleinste Dämpfung von $S(2,1)$ ist hierbei für die Probe $5+2=7\text{ Layer}$ zu erkennen, mit $-2\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-3\text{ dB}[S(2,1)]$ von 8 GHz bis 9 GHz . Die ausgeprägteste Dämpfung der Transmission von $-9,2\text{ dB}[S(2,1)]$ ist bei $8,9\text{ GHz}$ für die Probe $6+1=7\text{ Layer}$ in Abb. 6.19 (B, 3) zu sehen. Dies korrespondiert jedoch nicht mit den Beobachtungen der Eingangsreflexion $S(1,1)$ aus Abb. 6.19 (A, 3) und bedarf hierfür weitere Untersuchungen. Besonders erkennbar wird die Eingangsreflexion im Frequenzbereich von 10 GHz bis 15 GHz . Hierbei variiert die Dämpfung der Transmission von $6+2=7\text{ Layer}$ von $-4,5\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-5,5\text{ dB}[S(2,1)]$ von 10 GHz bis 12 GHz , sowie von $-3\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-6\text{ dB}[S(2,1)]$ von 12 GHz bis 15 GHz . Vergleicht man dieses mit den Graphen aus den Vorbetrachtungen für Graphit+Eisen, so ist keine Korrespondenz wiederzufinden, weswegen diese Probe näher untersucht werden sollte. Entgegen dieses Ausreißers stimmen die verbliebenen Proben mit den Erwartungen überein. Von 12 GHz bis 15 GHz zeigt die Probe $5+2=7\text{ Layer}$ die geringste Dämpfung von $-3\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-6\text{ dB}[S(2,1)]$ und die Probe $3+4=7\text{ Layer}$ die größte Dämpfung von $-6\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-8,5\text{ dB}[S(2,1)]$. Unter Ausschluss der Probe $6+1=7\text{ Layer}$, entspricht die Modularität bei diesem Frequenzbereich einem Wert von ca. $-1,075\text{ dB}[S(2,1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht.

Filamentkomposit Graphit+Eisen: Typ C

Es soll nun die dritte Anordnung des Schichtungsverhältnis betrachtet werden, beginnend mit dem Probetypen C 5 mm . Zu Beginn sei abermals zunächst das Augenmerk auf die Eingangsreflexion $S(1,1)$ gerichtet (Abb.: 6.20 (A, 1)). Wie auch beim Probetypen B (Abb.: 6.19 (A, 1)) ist bei $9,5\text{ GHz}$ und bei $12,8\text{ GHz}$ eine gering ausgeprägte Resonanz von $-2\text{ dB}[S(1,1)]$ bis $-10\text{ dB}[S(1,1)]$ zu erkennen. Im Vergleich mit der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ von Abb. 6.20 (B, 1), ist eine Übereinstimmung anhand der Dämpfung der Transmission bei $9,5\text{ GHz}$ zu beobachten, durch Überschneidungen der Graphenverläufe von $4+3=7\text{ Layer}$ mit $2+5=7\text{ Layer}$ und $3+4=7\text{ Layer}$ mit $1+6=7\text{ Layer}$. Ob es sich hierbei um eine wiederkehrende Eigenschaft dieser Probe handeln sollte, muss näher untersucht werden, da ein ähnliches Phänomen bereits in Abb. 6.18 (A, 1) beobachtet wurde. Ab der Frequenz von 12 GHz bis 15 GHz ist ein lineares Verhalten der Messergebnisse zu beobachten, mit der geringsten Dämpfung bei Probe $5+2=7\text{ Layer}$ von $-6\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-8\text{ dB}[S(2,1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe $6+1=7\text{ Layer}$ von $-17\text{ dB}[S(2,1)]$ bis $-20\text{ dB}[S(2,1)]$. Die verfügbare Modularität für dieses Material in dieser Ausrichtung ist bei diesem Frequenzbereich ein Wert von ca. $-1,6\text{ dB}[S(2,1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht.

Weiterführend soll die Probe C 7 mm betrachtet werden. Anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ aus Abb. 6.20 (A, 2) ist ein ähnliches Verhalten wie bei Probe C 5 mm zu beobachten, jedoch mit einer geringeren Ausprägung der Resonanz bei $9,2\text{ GHz}$. Als Konsequenz dessen sind anhand der Dämpfung der Transmis-

sion keine Überschneidungen der Graphen in Abb. 6.20 (B, 2) zu erkennen. Abweichungen sind abermals bei den Proben $1+6=7$ Layer bei $9,6\text{ GHz}$ und bei $2+5=7$ Layer bei 9 GHz zu erkennen, welches abermals auf das Indiz hindeutet diese Proben zu erneuern. Der Verteilung der Ausprägung der Dämpfung der Transmission von Probe C 7 mm (Abb.: 6.20 (B, 2)) ist hierbei ähnlich der von Probe C 5 mm (Abb.: 6.20 (B, 1)), wobei die Verteilung konsistenter entlang 8 GHz bis 15 GHz ist. Mit der geringsten Dämpfung bei Probe $5+2=7$ Layer von $-6\text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-8\text{ dB } [S(2, 1)]$ und der größeren Dämpfung bei der Probe $6+1=7$ Layer von $-17\text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-26\text{ dB } [S(2, 1)]$. Die Modularität variiert dadurch über ein größeres Spektrum von ca. $-2,8\text{ dB } [S(2, 1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht.

Zuletzt soll der Probetyp C 10 mm betrachtet werden, beginnend mit der Eingangsreflexion $S(1,1)$ aus Abb. 6.20 (A, 3). Wie es charakteristisch für den Probetypen C ist, ist eine Resonanz von $-10\text{ dB } [S(1, 1)]$ bei 8 GHz zu erkennen. Vergleicht man dieses mit der Dämpfung der Transmission aus Abb. 6.20 (B, 3), so ist kein Indiz dessen am selbigen Frequenzpunkt zu finden. Wie auch bereits bei $S(2,1)$ der Probe C 7 mm (Abb.: 6.20 (B, 2)) ist eine ausgeprägtere Linearität der Ergebnisse zu beobachten. Abermals besitzt die Probe $5+2=7$ Layer die geringste Dämpfung von $-9\text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-13\text{ dB } [S(2, 1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe $6+1=7$ Layer von $-22\text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-40\text{ dB } [S(2, 1)]$. Wie auch bereits bei den Ergebnissen von Probe C 5 mm (Abb.: 6.20 (B, 1)) und Probe C 7 mm (Abb.: 6.20 (B, 2)) sind Abweichungen bei den Proben $1+6=7$ Layer bei $8,6\text{ GHz}$, $9,6\text{ GHz}$, sowie 12 GHz zu sehen. Und auch bei $2+5=7$ Layer bei $9,6\text{ GHz}$. Dies könnte abermals ein Indiz für ein Problem mit den Proben sein und für eine Erneuerung sprechen. Anhand dieser Messung entspricht die verfügbare Modularität dieser Materialien einem ungefähren Wert von ca. $-2,4\text{ dB } [S(2, 1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht.

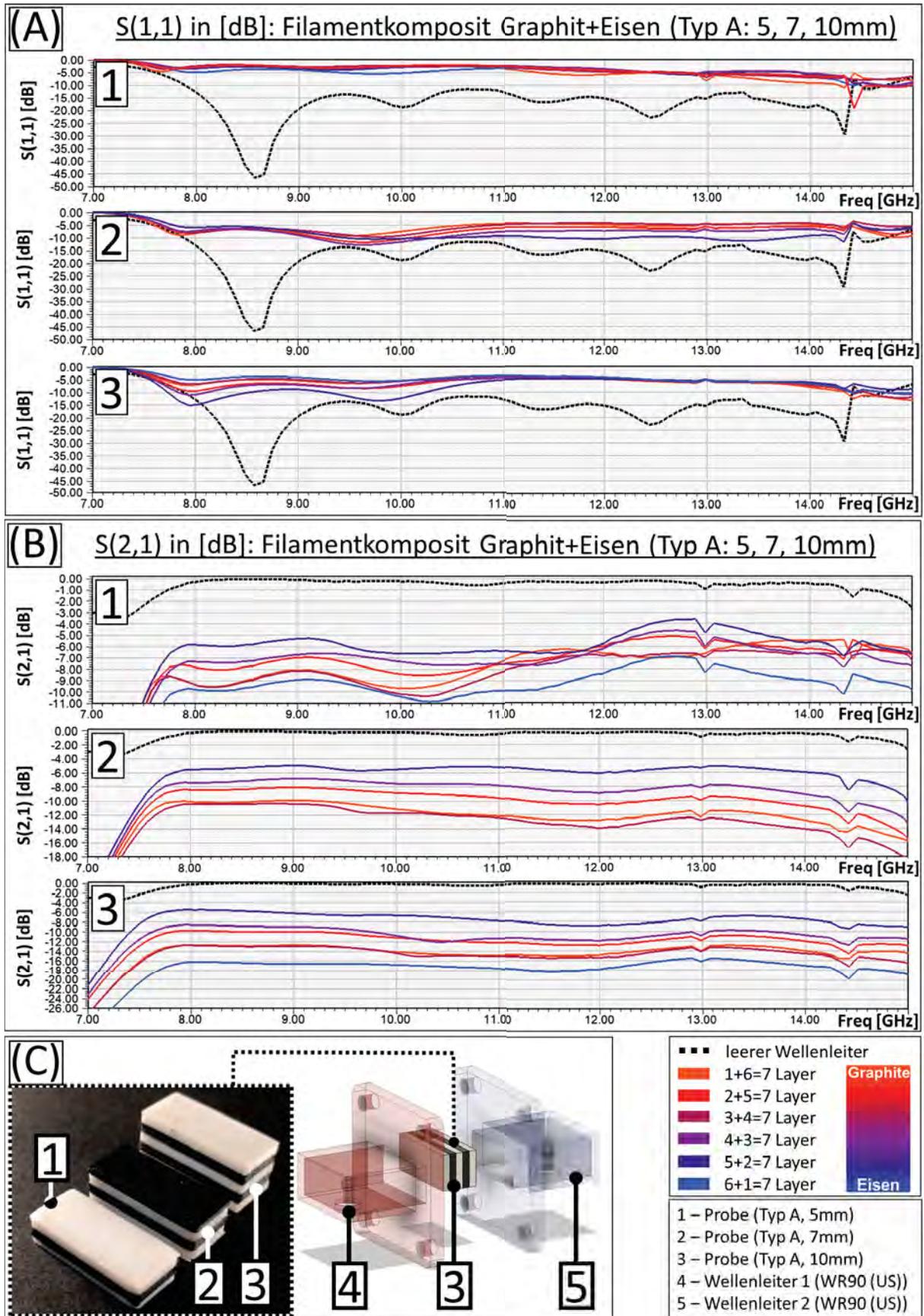


Abbildung 6.18: Vermessungen vom Filamentkomposit Graphit mit Eisen für Probentyp A (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

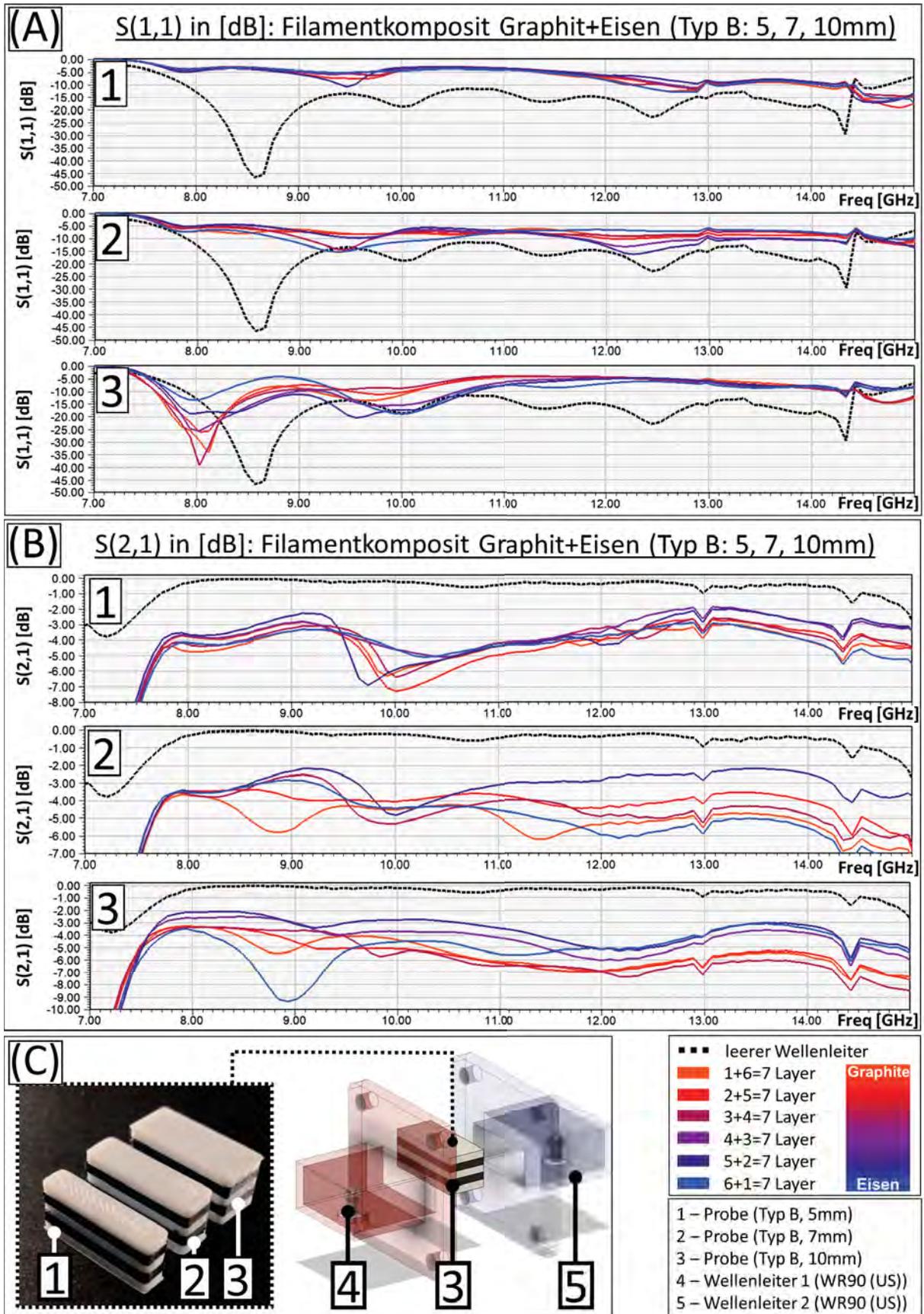


Abbildung 6.19: Vermessungen vom Filamentkomposit Graphit mit Eisen für Probestyp B (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

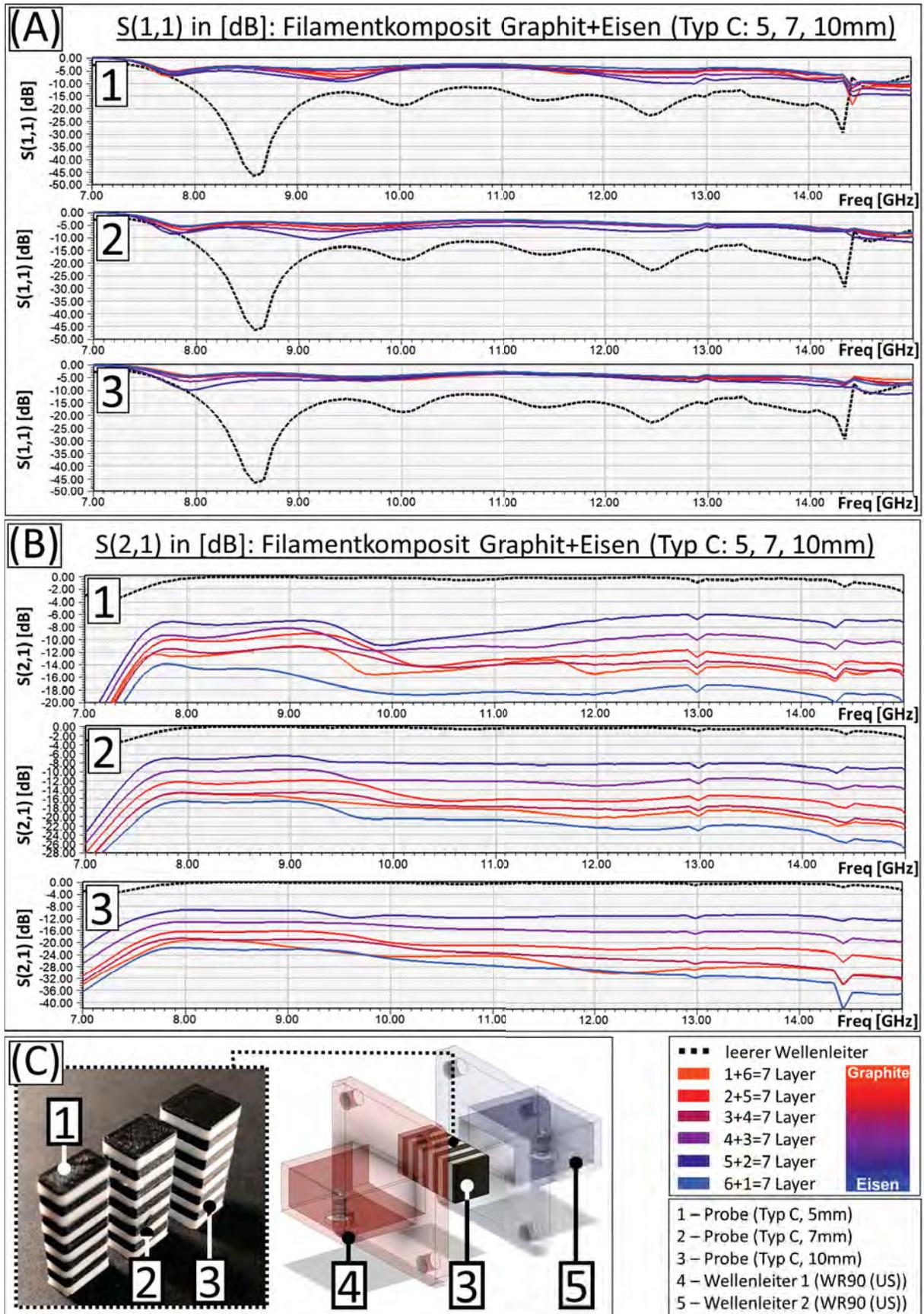


Abbildung 6.20: Vermessungen vom Filamentkomposit Graphit mit Eisen für Probentyp C (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

6.3.3 Kupfer+Eisen

Es sollen nun die Auswirkungen für das Filamentkomposit Kupfer+Eisen untersucht werden. Abermals ist das Objekt der Untersuchung die drei verschiedenen Proben A, B, C. Anhand des Schichtverhältnisses *10 zu 10 Layer* werden zehn Schichten (*2 mm*) weißes *Janbex* PLA [52] mit zehn Schichten (*2 mm*) Filamentkomposit in einer Probe kombiniert und anhand der Auswirkung das hochfrequente Feld untersucht (Abb.: 6.12 (B)).

Filamentkomposit Kupfer+Eisen: Typ A

Zu Beginn soll der Probentyp A *5 mm* von Abb. 6.21 betrachtet werden. Bei der Eingangsreflexion $S(1,1)$ (Abb.: 6.21 (A, 1)) ist wenig Variation zu beobachten unter den Proben und lediglich *6+1=7 Layer* weist auf eine Abweichung bei *12,8 GHz* hin. Vergleicht man dies nun mit der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.21 (B, 1) so ist ebenfalls keine klare Differenzierung anhand der Filamentmischungen zu erkennen. Hierbei variiert die Dämpfung der Transmission von *8 GHz* bis *12 GHz* von $-2,8 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-7 \text{ dB } [S(2,1)]$. Die Modularität ist hierbei schwer zu differenzieren, weil alle Filamentkomposit sehr eng entlang von $1 \text{ dB } [S(2,1)]$ fluktuieren. Besonders ausgeprägt ist dies für die Probe *6+1=7 Layer* bei *11,8 GHz* und *5+1=7 Layer* bei *10,4 GHz*. Eine klare Differenzierung ist ab einer Frequenz von *12,5 GHz* bis *15 GHz* zu erkennen, mit der geringsten Dämpfung bei der Probe *3+4=7 Layer* von $-9 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-13 \text{ dB } [S(2,1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe *5+2=7 Layer* von $-3 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-10 \text{ dB } [S(2,1)]$. Anhand der Überschneidungen lässt sich für diese Proben keine klare Modularität unter den Proben erkennen.

Weiterführend soll die Probe Typ A *7 mm* betrachtet werden. Auch hier soll einleitend die Eingangsreflexion $S(1,1)$ betrachtet werden (Abb.: 6.21 (A, 2)). Innerhalb des Frequenzbereiches *11,9 GHz* bis *12,9 GHz* sind ausgeprägte Resonanzen zu erkennen, für Probe *6+1=7 Layer* bei *11,9 GHz* von $-25 \text{ dB } [S(2,1)]$, für Probe *5+2=7 Layer* bei *12,15 GHz* von $-30 \text{ dB } [S(2,1)]$, für Probe *2+5=7 Layer* bei *12,5 GHz* von $-17 \text{ dB } [S(2,1)]$, für Probe *4+3=7 Layer* bei *12,5 GHz* von $-27 \text{ dB } [S(2,1)]$, für Probe *3+4=7 Layer* bei *12,7 GHz* von $-34 \text{ dB } [S(2,1)]$ und für Probe *1+6=7 Layer* bei *12,9 GHz* von $-34 \text{ dB } [S(2,1)]$. Anhand der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.21 (B, 2) ist bei diesen Frequenzen kein vergleichbares Verhalten zu beobachten. Wie auch bereits in der Probe A *5 mm* (Abb.: 6.21 (B, 1)) ist für die Probe A *7 mm* (Abb.: 6.21 (B, 1)) von *8 GHz* bis *12 GHz* keine klare Differenzierung der unterschiedlichen Proben auszumachen, da die Messergebnisse entlang eines Korridors von $1 \text{ dB } [S(2,1)]$ gemischt verteilt sind. Für die Probe *6+1=7 Layer* sind zusätzlich ausgeprägtere Dämpfungen bei *9,9 GHz* und *12 GHz* zu erkennen, wie es ebenfalls für PLA+Eisen in Abb. 6.15 (B, 1), (B, 3) zu beobachten ist. Auch hier ist erst ab einer Frequenz von *12,5 GHz* bis *15 GHz* eine Differenzierung möglich, mit der geringsten Dämpfung bei der Probe *1+6=7 Layer* von $-0,6 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-3 \text{ dB } [S(2,1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe *6+1=7 Layer* von $-1,6 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-5 \text{ dB } [S(2,1)]$. Die Modularität ist hierbei nicht klar unterscheidbar, jedoch kann von einer ungefähren Differenzierung von ca. $-0,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht ausgegangen werden.

Nun soll die Probe Typ A *10 mm* betrachtet werden. Einleitend soll auch hier zunächst die Eingangsreflexion $S(1,1)$ betrachtet werden, in Abb. 6.21 (A, 3). Wie bereits anhand $S(1,1)$ der vorherigen Probe Typ A *7 mm* in Abb. 6.21 (A, 2) zu erkennen ist, sind abermals ausgeprägte Resonanzen vorhanden, hier jedoch von *9 GHz* bis *10,1 GHz*. Prägnantes Merkmal hierbei ist, dass die Reihenfolge der Ausbildungen der Resonanzen für den Probentypen A *10 mm* nahezu identisch ist mit denen des Probentypen A *7 mm*. Innerhalb des Frequenzbereiches *9 GHz* bis *10,1 GHz* sind die Resonanzen vorhanden für Probe *6+1=7 Layer* bei *9 GHz* mit $-20 \text{ dB } [S(2,1)]$, für Probe *5+2=7 Layer* bei *9,1 GHz* mit $-18 \text{ dB } [S(2,1)]$,

für Probe $1+6=7$ Layer bei $9,2\text{ GHz}$ mit -24 dB [$S(2,1)$], für Probe $4+3=7$ Layer bei $9,5\text{ GHz}$ mit -17 dB [$S(2,1)$], für Probe $3+4=7$ Layer bei $9,6\text{ GHz}$ mit -30 dB [$S(2,1)$] und für Probe $2+5=7$ Layer bei $10,1\text{ GHz}$ von -38 dB [$S(2,1)$]. Anhand der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ (Abb.: 6.21 (B, 3)) ist auch hier keine klare Differenzierung der Messergebnisse von 8 GHz bis 12 GHz möglich. Die Ergebnisse für die Proben $1+6=7$ Layer, $2+5=7$ Layer, $3+4=7$ Layer und $4+3=7$ Layer, sind hierbei entlang eines 1 dB -Korridors verteilt, welcher zwischen -1 dB [$S(2,1)$] und -7 dB [$S(2,1)$] schwankt. Auch hier ist erst ab einer Frequenz von $12,5\text{ GHz}$ bis 15 GHz eine Differenzierung möglich, mit der geringsten Dämpfung bei der Probe $4+3=7$ Layer von -2 dB [$S(2,1)$] bis -6 dB [$S(2,1)$] und der größten Dämpfung bei der Probe $4+3=7$ Layer von $-3,8\text{ dB}$ [$S(2,1)$] bis $-7,2\text{ dB}$ [$S(2,1)$]. Dieses korrespondiert jedoch nicht mit den Ergebnissen der Probe A 5 mm oder Probe A 7 mm . Die Modularität ist hierbei ebenfalls nicht klar unterscheidbar, jedoch kann von einer ungefähren Differenzierung von ca. $-0,36\text{ dB}$ [$S(2,1)$] pro zusätzlicher Eisenfilamentschicht ausgegangen werden.

Anhand dieser Proben ist bereits erkennbar, dass durch die fehlende klare Differenzierung eine weitere Verwendung als schwierig zu erachten ist.

Filamentkomposit Kupfer+Eisen: Typ B

Es sollen nun die Probetypen B untersucht werden, um die Auswirkungen der nächsten Ausrichtung zu beobachten.

Einleitend soll anhand der Probe B 5 mm auch hier zunächst die Eingangsreflexion $S(1,1)$ in Abb. 6.22 (A, 1) betrachtet werden. Erkennbar hierbei sind die charakteristische Resonanz von $8,7\text{ GHz}$ bis $9,4\text{ GHz}$, die ebenfalls bei den Proben Graphit+Eisen (Abb.: 6.19) und PLA+Eisen (Abb.: 6.16) beobachtet werden können. Am ausgeprägtesten hierbei die Probe $3+4=7$ Layer bei $9,4\text{ GHz}$ mit -16 dB [$S(2,1)$]. Die Verteilung der Silhouette des Graphen für Kupfer+Eisen Typ B ist hierbei ähnlich denen der Beobachtung von PLA+Eisen Typ B. So ist eine ausgeprägtere Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ auch hier für die Proben $5+2=7$ Layer bei 9 GHz und die Proben $6+1=7$ Layer bei $9,4\text{ GHz}$ vorhanden, deren Eisenanteil am höchsten ist. Gegenproportional dazu die Proben mit einem höheren Kupferanteil besitzen bei $9,5\text{ GHz}$ ($1+6=7$ Layer) und bei $9,6\text{ GHz}$ ($3+4=7$ Layer) eine ausgeprägtere Dämpfung bei $-7,5\text{ dB}$ [$S(2,1)$]. Dieses Verhalten setzt sich ebenfalls fort für die Frequenz $11,6\text{ GHz}$ bis $11,8\text{ GHz}$. Für die Proben $2+5=7$ Layer und $4+3=7$ Layer ist dieses Verhalten nicht zu beobachten, wobei von 8 GHz bis 12 GHz eine Variation der Dämpfung der Transmission zwischen $-2,5\text{ dB}$ [$S(2,1)$] und -5 dB [$S(2,1)$] zu beobachten ist. Bei dieser Probe wird eine klare Differenzierung erst ab der Frequenz von $12,5\text{ GHz}$ bis 15 GHz möglich, mit der geringsten Dämpfung bei der Probe $2+5=7$ Layer von -1 dB [$S(2,1)$] bis $-2,5\text{ dB}$ [$S(2,1)$] und der größten Dämpfung bei der Probe $6+1=7$ Layer von -2 dB [$S(2,1)$] bis $-3,6\text{ dB}$ [$S(2,1)$].

Weiterführend sollen nun die Ergebnisse der Probe B 7 mm untersucht werden. Anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ (Abb.: 6.22 (A, 2)) sind abermals Resonanzen im Bereich von 9 GHz bis $9,7\text{ GHz}$ zu erkennen, sowie stark ausgeprägte Resonanzen von $11,5\text{ GHz}$ bis 13 GHz , welche identisch mit denen aus der Beobachtung von Probe B 5 mm aus Abb. 6.21 (A, 2) sind. Die Auswirkungen dessen sind jedoch innerhalb der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.21 (B, 2) nicht zu erkennen. So ist von 8 GHz bis 9 GHz abermals keine klare Differenzierung unter den Ergebnissen vernehmbar. Von 9 GHz bis 12 GHz ist wieder für die Proben mit dem höchsten Eisenfilamentanteil eine ausgeprägtere Dämpfung erkenntlich, bei $9,4\text{ GHz}$ für $5+2=7$ Layer und bei $9,5\text{ GHz}$ für $6+1=7$ Layer. Analog dazu sind ebenfalls für die kupferhaltigsten Proben gleichwertige Dämpfungen der Transmission bei $9,3\text{ GHz}$ ($3+4=7$ Layer) und $9,8\text{ GHz}$ ($1+6=7$ Layer) zu erkennen. Auch bei diesen Proben wird eine klarer Differenzierung erst ab der Frequenz von $12,5\text{ GHz}$ bis 15 GHz möglich, hier jedoch mit der geringsten Dämpfung bei der Probe

$1+6=7$ Layer von $-0,8 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-2 \text{ dB } [S(2, 1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe $5+2=7$ Layer von $-2 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-3,1 \text{ dB } [S(2, 1)]$.

Abschließend für diese Probetypen sei die Probe B 10 mm untersucht. Anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ ist für die Probe $2+5=7$ Layer bei $8,8 \text{ GHz}$ mit $-37 \text{ dB } [S(1, 1)]$ eine Resonanz zu beobachten und eine breitbandige Resonanz von 9 GHz bis $10,2 \text{ GHz}$ mit $-40 \text{ dB } [S(1, 1)]$ für Probe $3+4=7$ Layer. Auch dieses Verhalten ist innerhalb der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ nicht zu vorzufinden. Abermals zeigen die Proben mit dem höchsten Eisenfilamentanteil ausgeprägtere Dämpfung von 9 GHz bis 12 GHz , mit Probe $6+1=7$ Layer bei $9,9 \text{ GHz}$ und $12,1 \text{ GHz}$, sowie Probe $5+2=7$ Layer bei $9,5 \text{ GHz}$, $9,8 \text{ GHz}$ und $11,8 \text{ GHz}$. Analog dazu verhalten sich die Proben mit höherem Kupferanteil, wie Probe $2+5=7$ Layer bei $9,5 \text{ GHz}$ und 12 GHz , sowie Probe $1+6=7$ Layer bei $9,7 \text{ GHz}$ und $12,1 \text{ GHz}$. Auch bei diesen Proben wird eine klare Differenzierung erst ab der Frequenz von $12,5 \text{ GHz}$ bis 15 GHz möglich, hier jedoch mit der geringsten Dämpfung bei der Probe $4+3=7$ Layer von $-2 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-5 \text{ dB } [S(2, 1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe $2+5=7$ Layer von $-3,2 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-4,8 \text{ dB } [S(2, 1)]$. Keine dieser Ergebnisse korrespondiert mit der vorherigen Betrachtung der Kupfer+Eisen-komposit.

Filamentkomposit Kupfer+Eisen: Typ C

Zuletzt sollen die Proben C des Filamentkomposits Kupfer+Eisen untersucht werden. Beginnend mit der Probe C 5 mm und der zugehörigen Eingangsreflexion $S(1,1)$ aus Abb. 6.23 (A, 1) sind minder ausgeprägte Resonanzen bei $9,5 \text{ GHz}$ zu erkennen, welches ein wiederkehrendes Merkmal unter diesen Proben ist (vgl. Abb.: 6.20 (A, 1), Abb.: 6.17 (A, 1)). Anhand der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.23 (B, 1) ist von 8 GHz bis 10 GHz eine wilde Kombination der Graphen erkennbar. Speziell bei den Proben mit höherem Eisenanteil ($4+3=7$ Layer, $5+2=7$ Layer, $6+1=7$ Layer) ist eine bei $9,1 \text{ GHz}$, $9,4 \text{ GHz}$ und $9,7 \text{ GHz}$ erhöhte Dämpfung der Transmission um $-8 \text{ dB } [S(2, 1)]$ zu erkennen. In weniger ausgeprägter Form haben die Proben ebenfalls eine ausgeprägtere Dämpfung bei $9,3 \text{ GHz}$ bei $-5,5 \text{ dB } [S(2, 1)]$ für $1+6=7$ Layer, bei $9,55 \text{ GHz}$ bei $-7 \text{ dB } [S(2, 1)]$ für $3+4=7$ Layer und bei $9,9 \text{ GHz}$ bei $-7 \text{ dB } [S(2, 1)]$ für $2+5=7$ Layer. Dieses Phänomen wiederholt sich bei der Frequenz $11,8 \text{ GHz}$ für diese Proben. Eine Struktur ist hierbei jedoch nicht zu erkennen. Ebenfalls wie bei den Proben A und B bereits beobachtet, wird eine klare Differenzierung erst ab der Frequenz von $12,5 \text{ GHz}$ bis 15 GHz möglich, mit der geringsten Dämpfung bei der Probe $1+6=7$ Layer und $2+5=7$ Layer von $-1,7 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-4,7 \text{ dB } [S(2, 1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe $4+3=7$ Layer und $5+1=7$ Layer von $-2,5 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-5 \text{ dB } [S(2, 1)]$. Eine korrekte Bestimmung der Modularität ist hierbei nicht möglich, da die Verläufe der Graphen nicht homogen verteilt sind.

Weiterführend soll nun die Probe C 7 mm untersucht werden. Die Messergebnisse der Eingangsreflexion in Abb. 6.23 (A, 2) zeigen zusätzliche ausgeprägte Resonanzen. Erkennbar bei der Probe $5+2=7$ Layer bei $8,6 \text{ GHz}$ und 13 GHz , sowie bei Probe $4+3=7$ Layer bei $9,3 \text{ GHz}$ und 12 GHz , außerdem bei Probe $6+1=7$ Layer bei $11,6 \text{ GHz}$. Vergleicht man dies mit der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ aus Abb. 6.23 (B, 2), so ist keine Korrespondenz zu erkennen. Wie bereits bei der Probe C 5 mm zu erkennen war, sind bei der Probe C 7 mm die Proben mit größten Eisenfilamentanteil diejenigen mit der größten Dämpfung der Transmission $S(2,1)$, wie die Probe $5+2=7$ Layer bei $9,1 \text{ GHz}$ mit $-11 \text{ dB } [S(2, 1)]$ und bei $11,6 \text{ GHz}$ mit $-8 \text{ dB } [S(2, 1)]$, die Probe $4+3=7$ Layer bei $9,65 \text{ GHz}$ mit $-9 \text{ dB } [S(2, 1)]$ und bei $11,7 \text{ GHz}$ mit $-5 \text{ dB } [S(2, 1)]$, die Probe $6+1=7$ Layer bei $9,75 \text{ GHz}$ mit $-7 \text{ dB } [S(2, 1)]$ und bei 12 GHz mit $-5 \text{ dB } [S(2, 1)]$. Hier ist jedoch keine klare wiederkehrende Struktur zu erkennen. Eine klare Differenzierung wird abermals erst ab der Frequenz von $12,5 \text{ GHz}$ bis 15 GHz möglich, mit der geringsten Dämpfung bei der Probe $3+4=7$ Layer und $2+5=7$ Layer von $-1,5 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-4,2 \text{ dB } [S(2, 1)]$ und der größten Dämpfung bei der Probe $6+1=7$ Layer von $-2,1 \text{ dB } [S(2, 1)]$ bis $-5 \text{ dB } [S(2, 1)]$. Jedoch sind

diese Graphen abermals nicht homogen verteilt.

Zuletzt sei die Probe C 10 mm betrachtet, beginnend mit der Eingangsreflexion S(1,1) in Abb. 6.23 (A, 3). Erkennbar sind schmalbandige Resonanzen für die Probe $4+3=7$ Layer bei 8,15 GHz mit -27 dB [S(2,1)] und die Probe $1+6=7$ Layer bei 8,65 GHz mit -25 dB [S(2,1)]. Eine breitbandige Resonanz ist für die Probe $3+4=7$ Layer von 9 GHz bis 9,7 GHz mit -25 dB [S(2,1)] erkennbar, wie auch bereits für Probe A (Abb.: 6.21 (A, 3)) und Probe B (Abb.: 6.22 (A, 3)) festgestellt wurde. Auch für die Probe C 10 mm soll nur die Transmission S(2,1) näher betrachtet werden. Abermals ist bei diesen Graphen zu erkennen, dass das Verhältnis der Materialzusammensetzung die Homogenität des Verlaufes der Messkurve bestimmt. Erkennbar wird dieses anhand der Probe $3+4=7$ Layer, dessen Graphenverlauf resonanzfrei ist von 8 GHz bis 15 GHz von $-1,2$ dB [S(2,1)] bis $-5,8$ dB [S(2,1)]. Die These deckt sich ebenfalls mit den zugehörigen Graphenverläufen von Probe A (Abb.: 6.21 (A, 3)) und Probe B (Abb.: 6.22 (A, 3)). Betrachtet man dagegen die Proben mit höherem Eisenanteil, wie Probe $3+4=7$ Layer, so sind ausgeprägtere Dämpfungen bei 9 GHz zu erkennen. Ebenfalls gilt dieses für die Probe $4+3=7$ Layer bei 9,3 GHz mit -5 dB [S(2,1)] und für die Probe $6+1=7$ Layer bei 9,85 GHz mit -6 dB [S(2,1)]. Ab der Frequenz von 12,5 GHz bis 15 GHz sind erneut differenziertere Unterscheidungen unter den Proben möglich, mit der geringsten Dämpfung bei der Probe $6+1=7$ Layer von -3 dB [S(2,1)] bis -6 dB [S(2,1)] und der größten Dämpfung bei der Probe $3+4=7$ Layer von $-4,2$ dB [S(2,1)] bis -6 dB [S(2,1)]. Keines dieser Ergebnisse korrespondiert jedoch mit den vorangegangenen Ergebnissen und besitzt dadurch keine Aussagekraft.

Aus dieser Betrachtung für das Filamentkomposit von Kupfer+Eisen sollte geschlussfolgert werden, weitere Betrachtungen vorzunehmen, da sich kein klares Ergebnis aus den vorhandenen Messergebnissen schließen lässt.

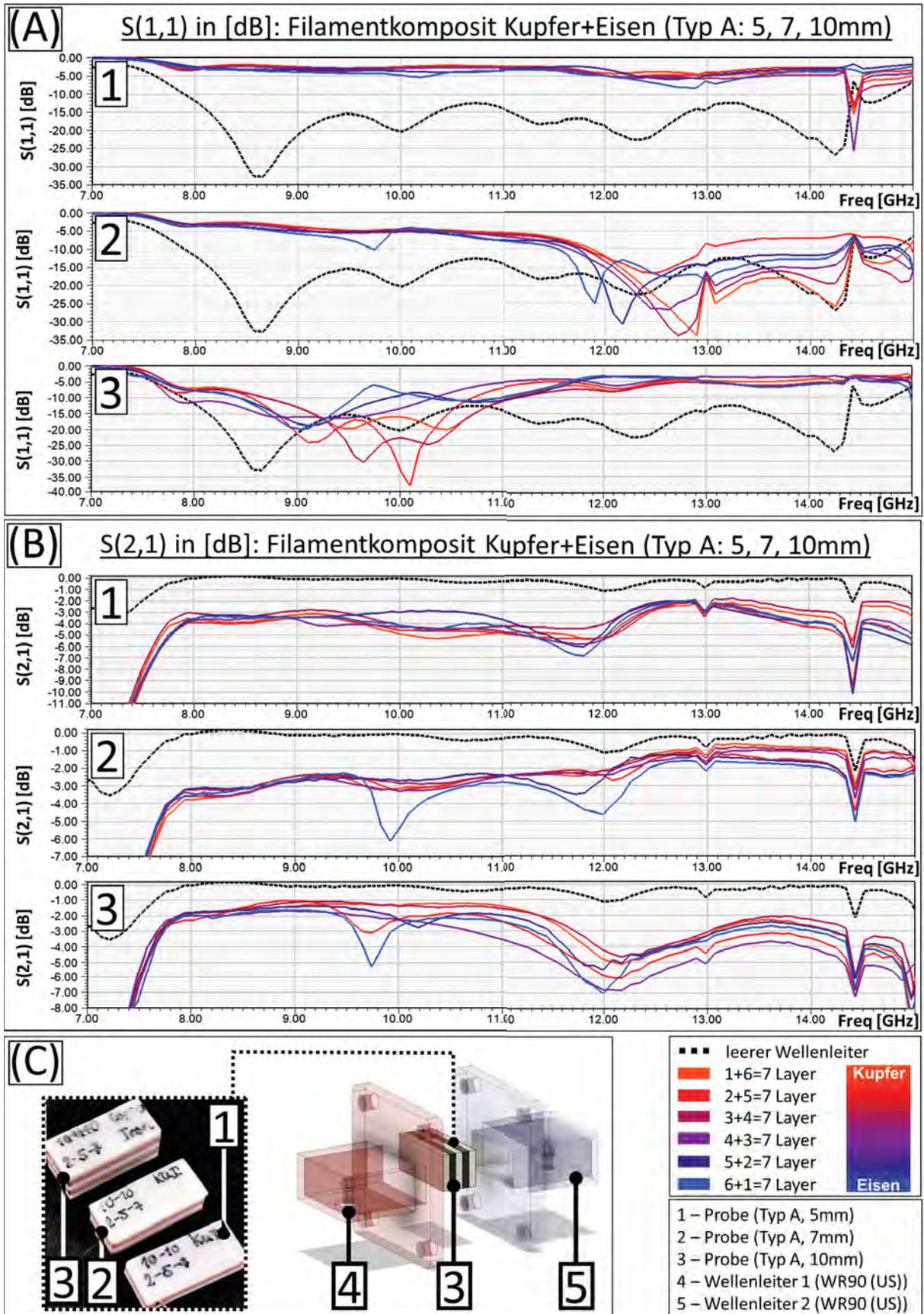


Abbildung 6.21: Vermessungen vom Filamentkomposit Kupfer mit Eisen für Probestyp A (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

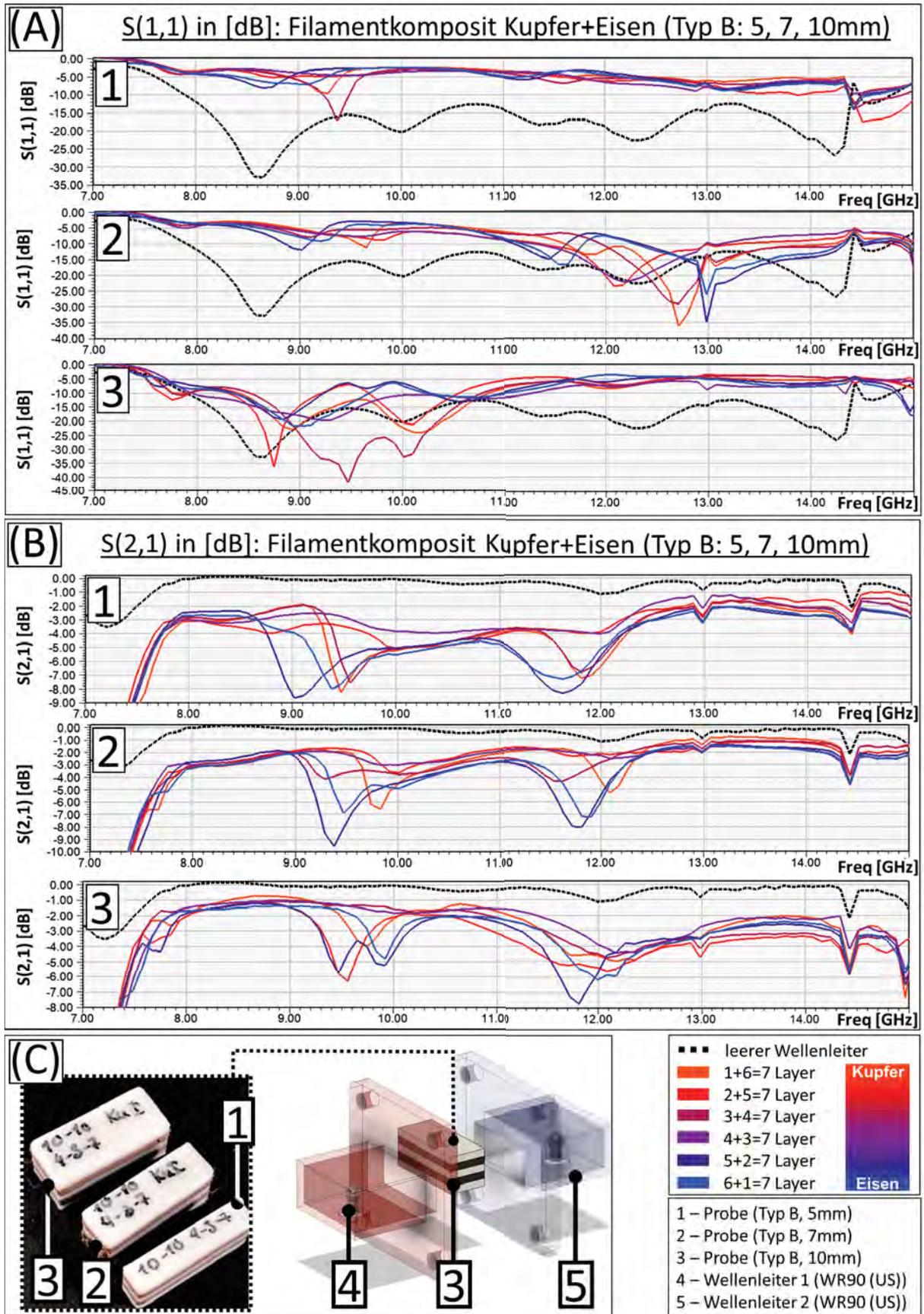


Abbildung 6.22: Vermessungen vom Filamentkomposit Kupfer mit Eisen für Probestyp B (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

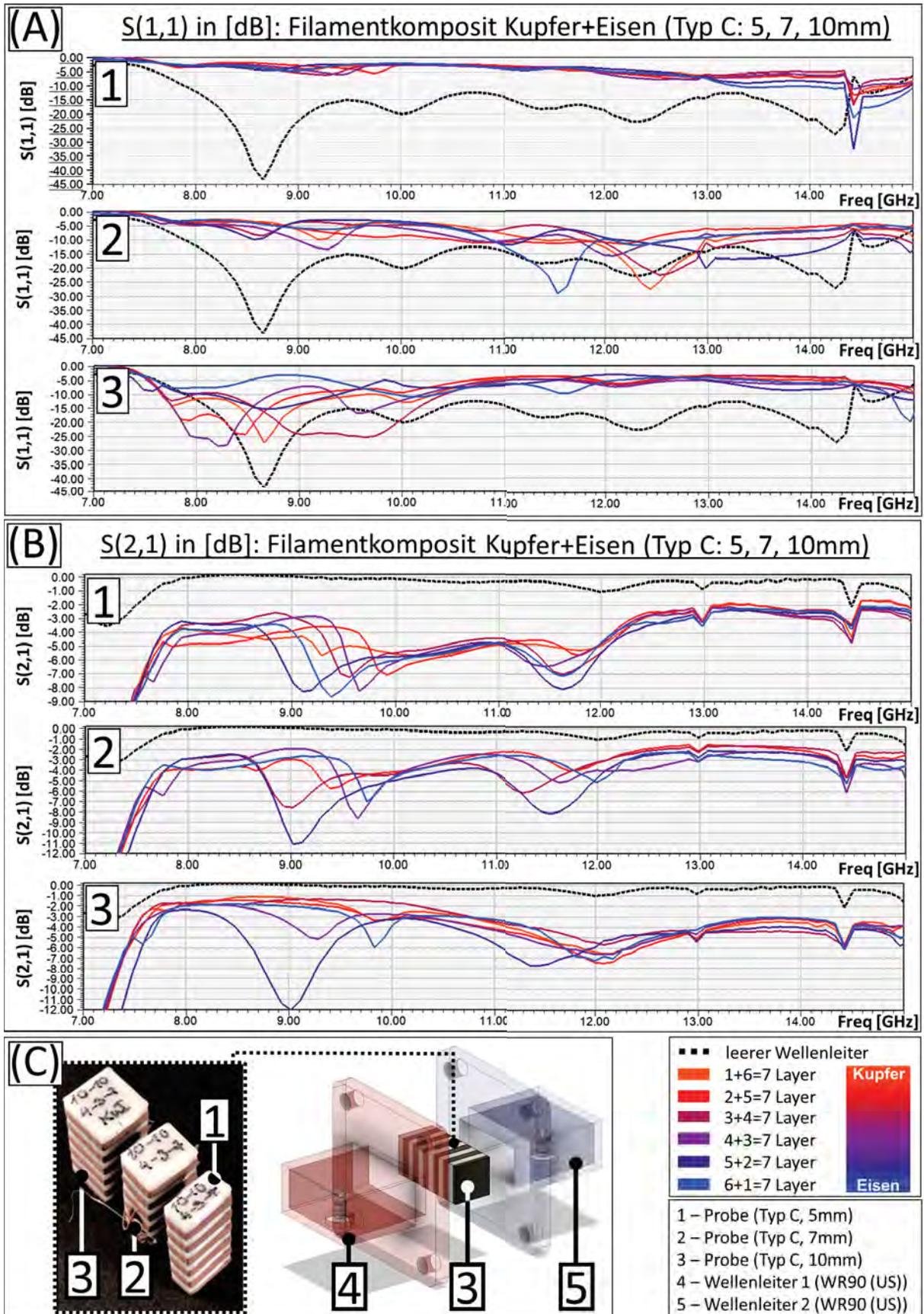


Abbildung 6.23: Vermessungen vom Filamentkomposit Kupfer mit Eisen für Probestyp C (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

6.3.4 CaCO₃+Eisen

Mittels des verwendeten Filaments *LayBrick* [65] von KAI PARTHY, sollen nun die Auswirkungen überprüft werden, wenn Kalziumkarbonat (CaCO₃) mit Eisenfilament kombiniert wird. Auch hier findet die gleiche Vorgehensweise statt, wobei die drei verschiedenen Probentypen A, B, C, anhand des Schichtverhältnisses *10 zu 10 Layer* miteinander kombiniert werden. Zehn Schichten (2 mm) weißes *Janbex* PLA [52] mit zehn Schichten (2 mm) Filamentkomposit werden innerhalb einer Probe kombiniert und anhand dessen die Auswirkungen auf das hochfrequente Feld untersucht (Abb.: 6.12 (B)).

Filamentkomposit CaCO₃+Eisen: Typ A

Zu Beginn soll die Eingangsreflexion $S(1,1)$ der Probe A 5 mm betrachtet werden (Abb.: 6.24 (A, 1)). Erkennbar ist hierbei ein homogener Verlauf aller Kurven von 8 GHz bis 14 GHz, mit einer geringen Ausprägung der Resonanz bei 9,5 GHz bis 10 GHz. Weiterführend seien die Dämpfungen der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.24 (B, 1) betrachtet. Die Unterscheidung der Verläufe kann hierbei in zwei Sektoren unterschieden werden. Von 8 GHz bis 9,5 GHz sind die Proben mit höherem CaCO₃-Anteil *1+6=7 Layer*, *2+5=7 Layer*, *3+4=7 Layer* von $-1,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-2,8 \text{ dB } [S(2,1)]$ verteilt. Mit identischen Graphenverläufen, jedoch mit einem Offset von $-0,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ unterhalb derer Ergebnisse, sind die Proben mit höherem Eisenfilamentanteil *4+3=7 Layer*, *5+2=7 Layer*, *6+1=7 Layer* von $-2,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-3,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ verteilt. Ab 10 GHz bis 11 GHz ist eine Auflösung dieser Verteilung für die Proben *1+6=7 Layer*, *3+4=7 Layer*, *4+3=7 Layer* zu erkennen. Dieser Zusammenhang setzt sich von 11,5 GHz bis 15 GHz fort, wobei die Proben mit höherem CaCO₃-Anteil weiterhin eine geringere Dämpfung der Transmission von $S(2,1)$ von $-0,8 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4 \text{ dB } [S(2,1)]$ aufweisen und die Proben mit höherem Eisenfilamentanteil eine höhere Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ $-1,3 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-6 \text{ dB } [S(2,1)]$. Dieses Verhalten ist ähnlich den Ergebnissen von PLA+Eisen aus Abb. 6.15 (A, 1).

Weiterführend soll die Probe A 7 mm betrachtet werden. Anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ aus Abb. 6.24 (A, 2) sind die bei Probe A 5 mm bereits beobachtete Resonanz bei 9,5 GHz bis 10 GHz zu erkennen, mit identischen Ausprägungen, aber mit Schwerpunkt auf die komposit mit höherem CaCO₃-Anteil. Zusätzlich sind weitere Resonanzen von 11,9 GHz bis 12,8 GHz zu erkennen, dessen Grad der Ausprägung proportional zum Eisenfilamentanteil zunimmt, erkennbar an der Probe *2+5=7 Layer* mit $-16 \text{ dB } [S(1,1)]$ bei 12 GHz und Probe *6+1=7 Layer* mit $-39 \text{ dB } [S(1,1)]$ bei 12,7 GHz. Weiterführend soll die Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.24 (B, 2) betrachtet werden. Die Ausprägung der Graphen für Probe A 7 mm ist für die Bereiche von 8 GHz bis 12 GHz nahezu identisch mit den Ergebnissen der Probe A 5 mm. So besitzen die Proben mit höherem CaCO₃-Anteil eine geringere Dämpfung als die Proben mit höherem Eisenfilamentanteil. Diese Verteilung ist konstant mit identischen Verläufen von 8 GHz bis 9 GHz, von $-1,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-3,5 \text{ dB } [S(2,1)]$. Bei der Frequenz von 10 GHz löst sich diese Verteilung auf, wie es ebenfalls bei der Probe A 5 mm der Fall ist. Bei dieser Probe sind jedoch keine konsistente Ergebnisse von 12 GHz bis 15 GHz zu erkennen, da die Probe *3+4=7 Layer* von $-0,8 \text{ dB } [S(1,1)]$ bis $-2 \text{ dB } [S(1,1)]$ die geringste Dämpfung aufweist und die Probe *4+3=7 Layer* von $-1,2 \text{ dB } [S(1,1)]$ bis $-3,2 \text{ dB } [S(1,1)]$ die größte Dämpfung. Ein kausaler Zusammenhang kann hierfür nicht hergestellt werden.

Aufbauend sollen die Ergebnisse der Probe A 10 mm betrachtet werden. Anhand der Ergebnisse der Eingangsreflexion von $S(1,1)$ sind ausgeprägte Resonanzen von 7,8 GHz von 10,5 GHz zu erkennen, ähnlich denen der Betrachtung von Kupfer+Eisen aus Abb. 6.21 (A, 3). Anhand der Dämpfung der Transmission in Abb. 6.21 (B, 3) ist im Vergleich zu Probe A 5 mm und Probe A 7 mm eine Verbesserung der Signalübertragung für die Proben mit höherem CaCO₃-Anteil, wie *1+6=7 Layer* und *3+4=7 Layer* von 8 GHz bis 14 GHz mit $-0,5 \text{ dB } [S(1,1)]$ bis $-3,1 \text{ dB } [S(1,1)]$ festzustellen. Wobei diese Proben konsistente Ergebnisse der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ aufweisen, zeigen die Proben mit Eisenanteil ausgeprägtere

Dämpfungen von $9,2\text{ GHz}$ bis $9,9\text{ GHz}$, wie Probe $5+2=7\text{ Layer}$ bei $9,2\text{ GHz}$ mit $-9\text{ dB } [S(1,1)]$, Probe $4+3=7\text{ Layer}$ bei $9,5\text{ GHz}$ mit $-6\text{ dB } [S(1,1)]$ oder Probe $6+1=7\text{ Layer}$ bei $9,8\text{ GHz}$ mit $-3\text{ dB } [S(1,1)]$. Eine Modularität für diese Proben ist nur bedingt zu entnehmen, da die Wechsel der Graphen nicht auf konsistente Ergebnisse hinweisen. Detailliertere Untersuchungen sind hierfür notwendig.

Filamentkomposit CaCO_3 +Eisen: Typ B

Es soll nun die Ausrichtung der Filamentkomposit verändert werden, mittels des Probetypen B. Einleitend sollen die Ergebnisse der Probe B 5 mm untersucht werden. In Abb. 6.22 (A, 1) soll die Eingangsreflexion $S(1,1)$ betrachtet werden, die Resonanzen bei 9 GHz bis $9,8\text{ GHz}$, sowie eine ausgeprägte Resonanz für Probe $4+3=7\text{ Layer}$ bei $8,75\text{ GHz}$ mit $-20\text{ dB } [S(1,1)]$. Vergleicht man dies mit der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ (Abb.: 6.22 (B, 1)), so ist ebenfalls für die Probe $4+3=7\text{ Layer}$ bei $9,1\text{ GHz}$ ein ausgeprägter Wert von $-8\text{ dB } [S(2,1)]$ zu erkennen. Dies korrespondiert mit den Beobachtungen von Probe A (Abb.: 6.21), wobei die Dämpfung gegenproportional zum CaCO_3 -Anteil und proportional zum Eisenfilamentanteil ist. Erkennbar wird dies anhand der Probe $1+6=7\text{ Layer}$, welche von 8 GHz bis $9,5\text{ GHz}$ die geringste Dämpfung der Transmission von $-1,5\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-3\text{ dB } [S(2,1)]$ aufweist, sowie von $10,5\text{ GHz}$ bis $11,8\text{ GHz}$ von $-2,2\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4\text{ dB } [S(2,1)]$. Die größte Dämpfung ist anhand der Probe $4+3=7\text{ Layer}$ zu beobachten, von $8,6\text{ GHz}$ bis 13 GHz von $-3\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-9\text{ dB } [S(2,1)]$. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass keine konsistenten Ergebnisse den restlichen Proben zu entnehmen sind und dieses Verhalten vertiefend betrachtet werden sollte. Wie auch bei den vorherigen Betrachtungen, sind kohärente Werte erst ab $12,5\text{ GHz}$ bis 15 GHz zu erkennen, wobei Probe $1+6=7\text{ Layer}$ die geringste Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ zeigt von $-1\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-3,5\text{ dB } [S(2,1)]$ und Probe $6+1=7\text{ Layer}$ mit der größten Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ von $-1,3\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4,2\text{ dB } [S(2,1)]$. Die Probe $5+2=7\text{ Layer}$ wird für diese Betrachtung ausgeschlossen, auf Grund der irreführenden Ergebnisse.

Aufbauend sei die Probe B 7 mm näher betrachtet. Anhand der Eingangsreflexion in 6.22 (A, 2) sind ausgeprägte Resonanzen zu beobachten, für die Probe $3+4=7\text{ Layer}$ bei $8,6\text{ GHz}$ mit $-27\text{ dB } [S(1,1)]$, für die Probe $4+3=7\text{ Layer}$ bei $8,8\text{ GHz}$ mit $-25\text{ dB } [S(1,1)]$ und für die Probe $2+5=7\text{ Layer}$ bei $9,45\text{ GHz}$ mit $-22\text{ dB } [S(1,1)]$. Wie auch bereits bei Probe A 7 mm (Abb.: 6.21 (A, 2)) ist ebenfalls bei Probe B 7 mm eine Resonanz für alle Proben bei $12,5\text{ GHz}$ zu erkennen. Betrachtet man nun weiterführend die Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.21 (B, 2) so zeigen abermals die Proben mit höherem CaCO_3 -Anteil die geringere Signalreduktion, wie Probe $1+6=7\text{ Layer}$ mit $-1\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-2,5\text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis 12 GHz . Wie auch schon bei Probe B 5 mm , hat die Probe B 7 mm mit dem komposit $4+3=7\text{ Layer}$ die größte Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ von 8 GHz mit $-2\text{ dB } [S(2,1)]$ bis 12 GHz mit $-9\text{ dB } [S(2,1)]$. Hierbei ist zu beachten, dass als wiederkehrende Eigenschaft besonders an den Frequenzpunkten $9,5\text{ GHz}$ und $11,5\text{ GHz}$ Oszillationen bei den Ergebnissen zu beobachten sind und dadurch näher betrachtet werden sollten. Auch bei diesen Betrachtungen werden die Ergebnisse ab $12,5\text{ GHz}$ bis 15 GHz eindeutiger, mit der geringsten Signaldämpfung bei Probe $1+6=7\text{ Layer}$ mit $-0,5\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-2,5\text{ dB } [S(2,1)]$ und der Größten bei Probe $4+3=7\text{ Layer}$ mit $-2\text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4\text{ dB } [S(2,1)]$. Dies korrespondiert mit den Betrachtungen aus Abb. 6.21 (A, 1) für Probe B 5 mm .

Die Probe B 7 mm $6+1=7\text{ Layer}$ wurde bei den Messungen zerstört.

Zuletzt sei die Probe B 10 mm näher betrachtet. Laut der Eingangsreflexion $S(1,1)$ in Abb. 6.22 (A, 3) sind ausgeprägte Resonanzen für alle Proben von 9 GHz bis $10,5\text{ GHz}$ zu erkennen. Auffällig hierbei sind die Probe $1+6=7\text{ Layer}$ mit $-28\text{ dB } [S(1,1)]$ bei $9,2\text{ GHz}$, die Probe $5+2=7\text{ Layer}$ mit $-38\text{ dB } [S(1,1)]$ bei $9,5\text{ GHz}$ und die Probe $2+5=7\text{ Layer}$ mit $-33\text{ dB } [S(1,1)]$ bei $10,4\text{ GHz}$. Anhand der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ ist erneut die Bevorzugung der Übertragung von CaCO_3 -haltigen Proben zu erkennen. Die Probe $1+6=7\text{ Layer}$ zeigt hierbei die geringste Dämpfung der Transmission mit $-0,5\text{ dB } [S(2,1)]$

bis $-1,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis $9,6 \text{ GHz}$, sowie $-1 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-2,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ von $10,2 \text{ GHz}$ bis $12,2 \text{ GHz}$. Die größte Dämpfung der Transmission ist hierbei für die Probe mit dem höchsten Eisenanteil zu erkennen, Probe $6+1=7 \text{ Layer}$ von 8 GHz bis $9,5 \text{ GHz}$ mit $-2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-2,5 \text{ dB } [S(2,1)]$, $10,5 \text{ GHz}$ bis $11,8 \text{ GHz}$ mit $-2,2 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4 \text{ dB } [S(2,1)]$ und 13 GHz bis $14,3 \text{ GHz}$ mit $-3,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-6 \text{ dB } [S(2,1)]$. Eine Modularität ist anhand dieser Ergebnisse nicht erkennbar.

Filamentkomposit CaCO_3 +Eisen: Typ C

Im Folgenden soll nun der Probetyp C untersucht werden.

Beginnend mit der Probe C 5 mm sind anhand der Eingangsreflexion $S(1,1)$ (Abb.: 6.23 (A, 1)) erneut Resonanzen bei 9 GHz zu erkennen. Vergleicht man die Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ aus Abb. 6.23 (B,1) mit den vorherigen Betrachtungen der Probetypen A und B, so korrespondiert abermals, dass die Proben mit höherem CaCO_3 -Anteil eine geringere Signaldämpfung besitzen; die Geringste bei der Probe $1+6=7 \text{ Layer}$ $-1,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis $10,1 \text{ GHz}$ und die Größte bei der Probe $4+3=7 \text{ Layer}$ $-4,1 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-5,9 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis $11,1 \text{ GHz}$. Hier ist abermals zu erkennen, dass innerhalb des Bereiches vermehrt Oszillationen auftreten, welche es gilt näher zu untersuchen. Ab einer Frequenz von $12,5 \text{ GHz}$ bis 15 GHz werden die Ergebnisse eindeutiger, doch trotzdem kann keine genaue Modellierung bestimmt werden, da die Werte von $3+4=7 \text{ Layer}$ und $6+1=7 \text{ Layer}$ nicht eindeutig zugeordnet werden können.

Weiterführend die Ergebnisse von Probe C 7 mm . Anhand von der Eingangsreflexion $S(1,1)$ in Abb. 6.23 (A, 2) sind abermals verstärkte Resonanzen zu erkennen, wie für die Probe $4+3=7 \text{ Layer}$ mit $-21 \text{ dB } [S(1,1)]$ bei $9,4 \text{ GHz}$ oder Probe $2+5=7 \text{ Layer}$ mit $-17 \text{ dB } [S(1,1)]$ bei $9,85 \text{ GHz}$. Außerdem sind weitere Resonanzen bei 12 GHz zu sehen, mit $-22 \text{ dB } [S(1,1)]$ bei Probe $1+6=7 \text{ Layer}$. Betrachtet man weiterführend die Ergebnisse anhand der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ in Abb. 6.23 (B,2), so kristallisiert sich hierbei abermals heraus, dass CaCO_3 -haltige Proben eine geringe Dämpfung aufweisen. Die Proben $1+6=7 \text{ Layer}$, $2+5=7 \text{ Layer}$ und $3+4=7 \text{ Layer}$. zeigen hierbei die geringsten Dämpfungen von $-1 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-4 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis 15 GHz . Hierbei ist jedoch nicht eindeutig welche dieser Proben, da die Werte hierfür variieren. Analog dazu besitzen die Proben mit hohem Eisenfilamentanteil die größte Signaldämpfung von $S(2,1)$, für Probe $4+3=7 \text{ Layer}$, $5+1=7 \text{ Layer}$ und $6+1=7 \text{ Layer}$ von $-2,5 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-9,2 \text{ dB } [S(2,1)]$. Die Modularität ist aufgrund der Variation der Werte nicht genau bestimmbar.

Zuletzt sollen die Ergebnisse von Probe C 10 mm betrachtet werden. Die Eingangsreflexion $S(1,1)$ (Abb.: 6.23 (A, 3)) zeigt hierbei ausgeprägte Resonanzen für die Probe $5+2=7 \text{ Layer}$ mit $-45 \text{ dB } [S(1,1)]$ bei $8,85 \text{ GHz}$, sowie Probe $2+5=7 \text{ Layer}$ mit $-40 \text{ dB } [S(1,1)]$ bei $9,85 \text{ GHz}$. Anhand der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ (Abb.: 6.23 (B, 3)) sind erneut die geringsten Signaldämpfungen für die Probe mit höherem CaCO_3 -Anteil zu sehen, wie Probe $2+5=7 \text{ Layer}$ $-0,8 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-3 \text{ dB } [S(2,1)]$ von 8 GHz bis 13 GHz . Die Proben mit dem höchsten Eisenfilamentanteil ($4+3=7 \text{ Layer}$, $5+2=7 \text{ Layer}$, $6+1=7 \text{ Layer}$) zeigen hierbei die größte Dämpfung, von $-1,8 \text{ dB } [S(2,1)]$ bis $-6,5 \text{ dB } [S(2,1)]$. Die Kurvenverläufe sind hierbei jedoch nicht eindeutig und sollten deswegen unter Berücksichtigung der neuen Fertigungsmethoden erneut untersucht werden.

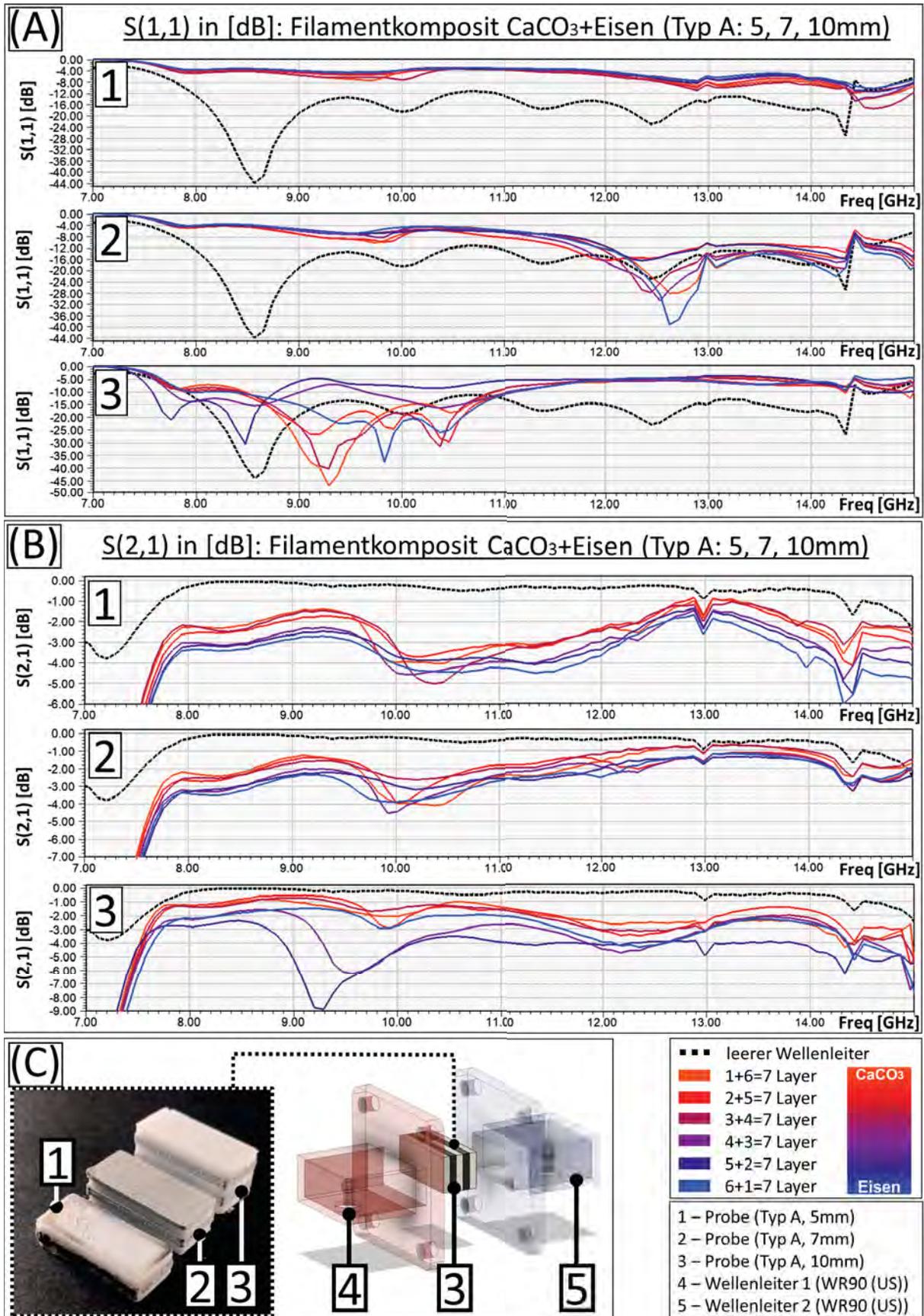


Abbildung 6.24: Vermessungen vom Filamentkomposit CaCO_3 mit Eisen für Probestyp A (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

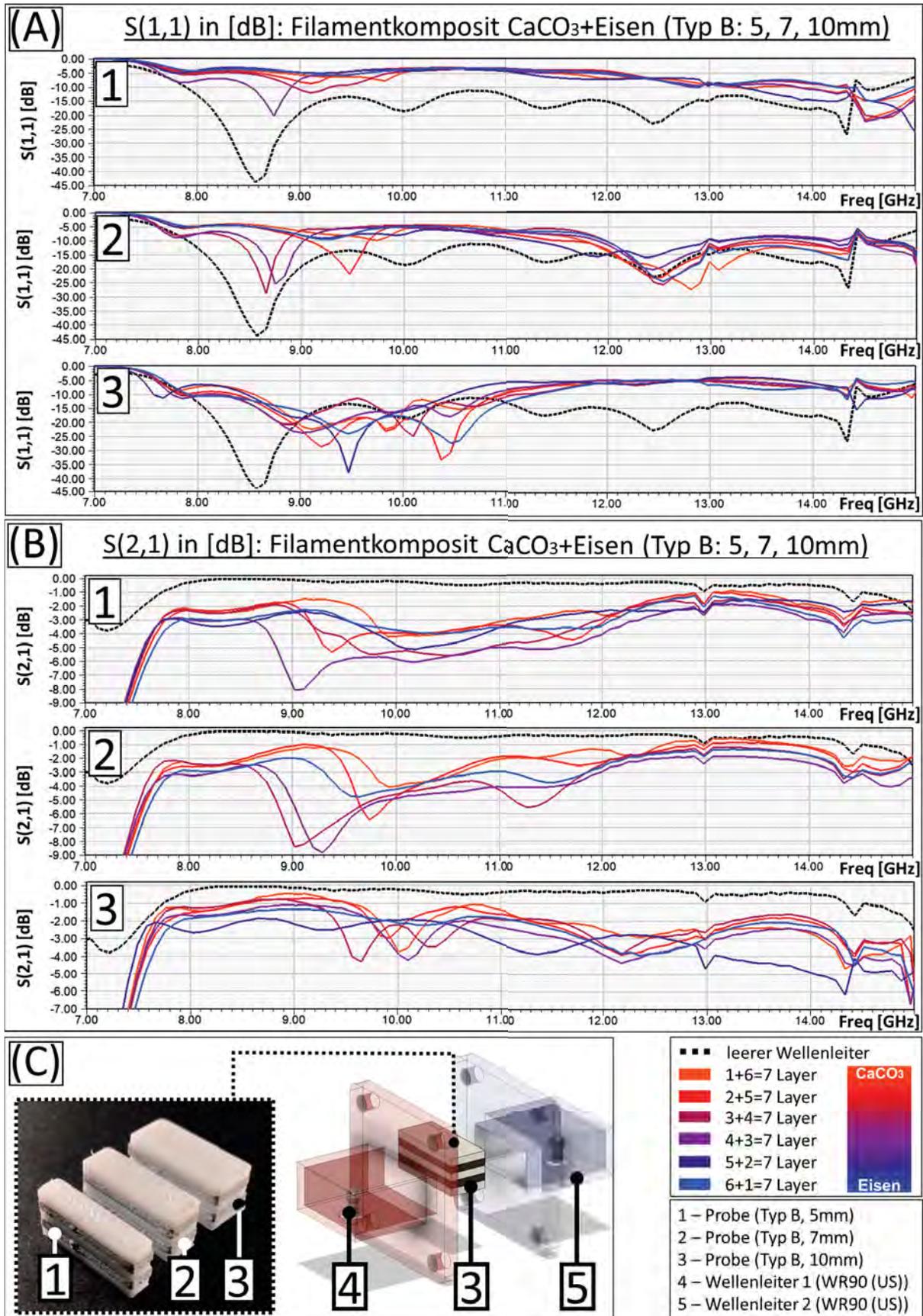


Abbildung 6.25: Vermessungen vom Filamentkomposit CaCO_3 mit Eisen für Probentyp B (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsexreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

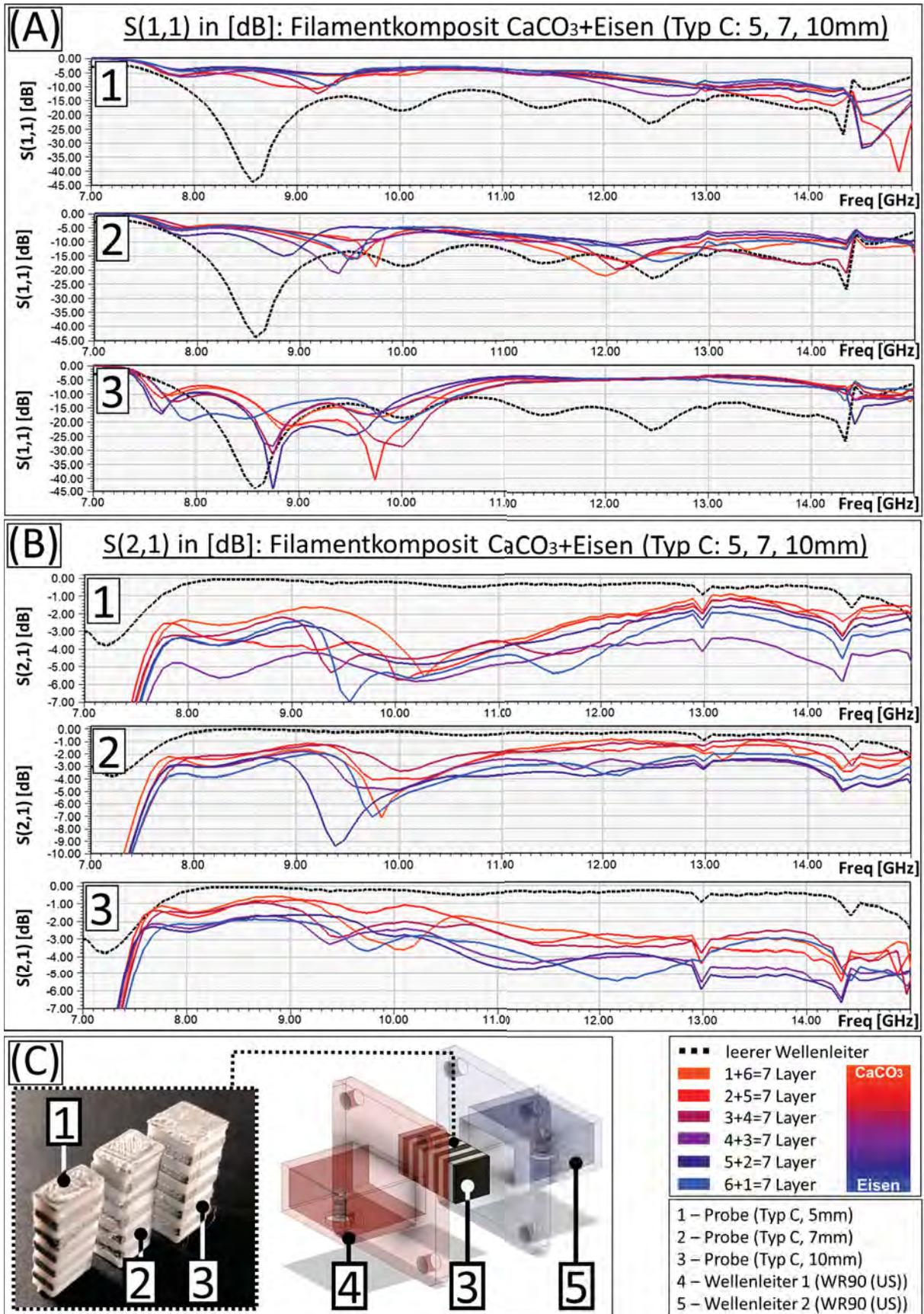


Abbildung 6.26: Vermessungen vom Filamentkomposit CaCO_3 mit Eisen für Probestyp C (5, 7, 10 mm). (A) Eingangsreflexion $S(1,1)$ in [dB], (B) Vorwärtstransmission $S(2,1)$ in [dB], (C) Verwendete Proben und Installation für die Vermessung.

6.4 Filamentkomposit: Zusammenfassung

In den vorangegangenen Kapitel 6.3 wurden ausführlich die Proben der Filamentkomposite analysiert. Hierbei wurde ein innovatives Verfahren vorgestellt, wie spezielle Komposite für die Hochfrequenztechnik erstellt werden können. Das Herstellungsverfahren erlaubt es Anwendungsspezifische Materialkombinationen zu erstellen, um so eine spezifische Dämpfung bei einer spezifischen Frequenz zu erzeugen. Anhand der Messergebnisse wurden verschiedene Materialkombinationen miteinander verglichen und bestimmt, welche der Komposite für eine Weiterverwendung geeignet sind. Das Verfahren und die Ergebnisse wurde in [68] veröffentlicht.

In diesem folgenden Kapitel sollen diese Ergebnisse ausgewertet und ein Ausblick gegeben werden.

Verwendung der Messergebnisse

Die in Kpt. 6.3 ausgewerteten Messergebnisse zeigten die Verwendbarkeit der erstellten Filamentkomposite von 8 GHz bis 15 GHz .

Anhand der verschiedenen verwendeten Prototypen konnte ebenfalls gezeigt werden, welche verschiedenen Einflüsse die Geometrie mit der Materialkombination Einfluss auf das hochfrequente Feld nimmt. Erkennbar war so beim Probetypen C 5 mm die Ausprägung einer Resonanz bei $9,5\text{ GHz}$, welche mit zunehmender Länge der Probe sich zu niedrigeren Frequenzen verschob (i.e. Probe C 7 mm zu 9 GHz , Probe 10 mm zu $8,5\text{ GHz}$). Hierbei bestimmte die Materialzusammensetzung, wie stark die Dämpfung der Transmission $S(2,1)$ ausgeprägt sein würde. Folglich wäre es hierbei denkbar eine passive Struktur zu erstellen, die mittels eines Gradienten im Material und einer eingepprägten Struktur das hochfrequente Feld zum Strahlungselement dirigieren könnte. Verwendung hierfür würde das Filamentkomposit und das in Kpt. 5.1 vorgestellte Konzept finden.

So ist anhand der Ergebnisse der Transmission $S(2,1)$ von Probentyp A 10 mm (Abb.: 6.15 (B, 3)) für $1+6=7\text{ Layer}$ bei 9 GHz bis 11 GHz eine Reduzierung der Dämpfung zu beobachten. Aufbauend sollte hierfür der Anteil des Eisenfilaments im Schichtungsverhältnisses zusätzlich reduziert werden und weitere Filamentkomposite erstellt werden (i.e. $0.5+6.5=7\text{ Layer}$). Eine Integration an diesem Frequenzpunkt zur Unterstützung eines Antennenelements wäre damit bereits denkbar, in welchem beispielsweise ein Gehäuse für ein PCB 3D-gedruckt werden könnte.

Die Messergebnisse für Graphit+Eisen-Messungen zeichneten sich durch ihre Eignung für der Weiterverwendung aus. Hierbei sei jedoch zu untersuchen, ob es sich bei diesen Ergebnissen um das Resultat der Fertigungsverfahren handelt oder ob es sich um eine materialspezifische Eigenschaft handelt.

Bei der Kombination von Kupfer+Eisen hat sich herausgestellt, dass sich mit dieser Kombination der Rohstoffe keine klare Differenzierung des Verhaltens ableiten ließe. Folglich sollte in aufbauende Betrachtungen eine feinere Abstufung der Bestandteile vollzogen werden oder eine speziellere Anfertigung des Kupferfilaments. Die Konstellation der verwendeten Rohstoffe zeigt auf ein Maß an Unvorhersehbarkeit hin. Damit ist diese Filamentkombination nicht von der Weiterverwendung ausgeschlossen, sondern sollte ebenfalls zusätzlich untersucht werden für den Fall, wenn die Eisenpartikel von den Kupferpartikeln durch ein statisches Magnetfeld getrennt würde (vgl. Kpt.: 5.1).

Die Betrachtung von Kalziumcarbonat (CaCO_3) wurde durchgeführt ohne Einbezug der Filamenttrocknung aus Kpt. F.2. Die Auswirkung dessen wurde erst nach näherer Bestimmung des Filamenttyps mit KAI PARTHY [62] deutlich, wodurch die Proben nicht rechtzeitig zur Vollendung dieser Arbeit erneuert werden konnten. Da die Auswirkungen sich als signifikant herausstellten, sollte eine erneute Durchführung der Messungen basierend auf dieser Betrachtung durchgeführt werden. Außerdem sollten anhand der Ergebnisse von der Betrachtung aus Kpt. 6.3.4 die Relevanz der verschiedenen Kombinationen der Filament

verdeutlicht werden. Das modifizierte Herstellungsverfahren, welches zur Mischung vom CaCO_3 -Filament verwendet wurde, ist in Kpt. 6.1 (Abb.: 6.5 (C)) vorgestellt. Basierend darauf sollte der Veredlungsvorgang für dieses Filamentkomposit um eine weitere Iteration wiederholt werden. Ebenfalls sollten diese Proben unter Einflussnahme der statischen Magnetfelder aus Kpt. 5.2 erneut betrachtet werden.

Detailiertere Mischungen von Filamentkompositen

Anhand der Messergebnisse ist zu erkennen, dass abhängig vom Mischverhältnis der Filamente unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten möglich sind.

Basierend auf den Beobachtungen von Abb. 6.15 (B, 3), Abb. 6.16 (B, 3) und von Abb. 6.17 (B, 3) ist davon auszugehen, dass die 10 mm-Proben für PLA+Eisen die Transmission begünstigen. Der Probentyp B zeigte hierbei eine geringe materialabhängige Variation der Dämpfung der Transmission $S(2,1)$, weswegen die Probentypen A und C zu bevorzugen wären.

Gleichzeitig sollte in einer aufbauenden Untersuchung ermittelt werden, ob statt des verwendeten Hexagons als Geometrie eine Würfelstruktur verwendet werden sollte, um so die Anteile der Materialien differenzierter steuern zu können.

Da die Verfügbarkeit der Messgeräte zum Zeitpunkt dieser Arbeit begrenzt waren, konnte eine Wiederholung dieser Messungen nicht durchgeführt werden.

Extruder mischen nicht

Die Kombination von FDM-Filamenten ist abhängig von den Bestandteilen. Die Modellierung des Filaments als CAD-Modell liefert eine große Zahl an Möglichkeiten Rohstoffe miteinander zu kombinieren (Abb.: 6.5). Die Kombination und das Vermischen der Bestandteile ist hierbei letztendlich abhängig von der Partikelgröße. Wie der Abb. 6.8 (C) zu entnehmen ist, erfolgte die Vermischung beider Materialien punktuell und inhomogen. Ein möglicher Grund hierfür könnte die Verklumpung der Bestandteile sein. Ein erster Schritt hierfür wäre es, die Vermischung des veredelten Filamentkomposits zu steigern, durch mehrmalige Iterationen des Veredelungsvorgangs.

Gleichzeitig sollte ein besonderes Augenmerk auf die Konsequenzen der gereinigten Düse beim Filamentwechsel gelegt werden. Hierbei sollte das in Kpt. F.3 verwendete *Cold-Pull*-Verfahren mehrmals nach jedem Filamentwechsel durchgeführt werden und anhand der Messergebnisse differenziert werden, ob dies die Messergebnisse beeinträchtigt. Im Verlauf dieser Arbeit wurde nur anhand der Verfärbung des weißen PLA-Filaments Rückschluss auf eine notwendige Reinigung geschlossen und sonst darauf verzichtet.

Diese Betrachtung ist Bestandteil der Ermittlung der Fertigungstoleranzen und sollte unbedingt Element für weitere Untersuchungen dieser Arbeit sein, um Eindruck auf die Einflüsse der Fertigungen zu erhalten.

Filamentkomposite mit statischen Magnetfeldern

Die Beschreibung der elektromagnetischen Eigenschaften der erstellten Filamentkomposit wäre der letzte Schritt zur Weiterverwendung innerhalb von FEM-Designs. Aufbauend darauf sollte zusätzlich bestimmt werden, welche Auswirkungen die in Kpt. 5.1 verwendeten Untersuchungen mit Permanentmagneten auf die Ergebnisse hätten. Mittels der identischen Vorgehensweise würden hierbei diese Proben nochmals erstellt werden, um so einen Vergleich zum reinen Filamenteisenanteil herstellen zu können, um dann aufbauend die Zusammensetzung der Permanentmagnete zu ändern. Wie in Kpt. 5.3 gezeigt worden ist,

sind Änderungen im hochfrequenten Verhalten zu erwarten. Aufbauend darauf kann mittels der Änderung durch die Magnete die charakteristische Materialzusammensetzung verändern. Somit würde dieser Fertigungsprozess ein geschlossenes allumfassendes System repräsentieren.

Verwendete Messgeräte

Die verwendeten Modifikationen aus Abb. 6.14 (C, 8) brachten erhebliche Verbesserungen für die Betrachtungen der Filamentkomposit. Weitere aufbauende Messungen wären durchaus möglich mittels dieser Konstellation. Die letzte ausschlaggebende Verbesserung wäre es, die Kalibrierung des Messaufbaues am Wellenleiterausgang durchzuführen. Hiermit wäre es außerdem möglich die verschiedenen Einflüsse der verwendeten Signalkabel und Steckverbinder zu isolieren. Um die dadurch resultierenden hohen Anschaffungskosten zu eliminieren, wurde an einer entsprechenden selbstgebauten Variante gearbeitet, doch leider nicht mehr rechtzeitig für diese Arbeit fertiggestellt ²².

²²Um Aluminium fräsen zu können, hätte die CNC-Fräse *Genmitsu 3018* einen Umbau mit einem stärkeren 500W-Spindelmotor benötigt. Obwohl dieses für weitere Projekte geplant ist, hätte dies jedoch das homogene Zusammenleben und den Hausfrieden des Homeoffice negativ beeinträchtigt [43].

7 Magnetschlitten

In den vorangegangenen Kapiteln dieser Arbeit wurde gezeigt wie mittels des FDM-Fertigungsverfahren das Spezialfilament *Protopasta Iron* [44] mit enthaltenen Eisenpartikeln verwendet werden kann zur Herstellung von eingepprägten Strukturen (Kpt.: 4.4.3), was der Grad der Dämpfung des hochfrequenten Felds ist und dessen Manipulation mittels statischem Magnetfeldes (Kpt.: 5.3) und der Kombination mit weiteren Filamenten zu Kompositen (Kpt.: 6). Speziell bei den Kompositen war zu beobachten, dass die Vermischungen teilweise zu unregelmäßigen Ergebnissen führten. Jedoch wurde im Kpt. 5.3 gezeigt, dass eine Ausrichtung der Eisenanteile beim 3D-Druckvorgang diese Ergebnisse erneut verändert. Wobei in den ersten Experimenten das Magnetfeld mittels eines 3D-gedruckten Magnethalter provoziert wurde, soll in diesem Abschnitt ein mobiles Konzept vorgestellt werden.

In dem folgenden Kapitel wird die Zusammensetzung des fertiggestellten und funktionsfähigem Aufbaus des s.g. Magnetschlittens gezeigt. Vermessung und Probenherstellungen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt und gehören zum Ausblick.

Einschränkung vom Magnethalter

In Kpt. 4.4.1 (Abb. 4.4.1) und Kpt. 4.4.1 (Abb. 4.4.1) wurde gezeigt, wie verschiedene Neodymmagnete so miteinander kombiniert werden können, dass das resultierende statische magnetische Feld bestimmte Geometrien abbildet. Zur weiteren Illustration wurden in Abb. 7.1 weitere Kombinationen von Permanentmagneten gezeigt. Hierbei soll verdeutlicht werden, dass das resultierende statische Feld die unterschiedlichsten Ausrichtungen der Eisenspäne generieren kann, lediglich durch Veränderung der Polarisierung. Wobei in Abb. 7.1 (D, oben) ein Hexagon geformt wird, werden die Eisenspäne in Abb. 7.1 (D, unten) in das Zentrum des Hexagons dirigiert. Dieses Phänomen wird bereits industriell genutzt und ist unter dem Namen *Halbach-Array* bekannt.

Die Kombination von Permanentmagneten bringt jedoch einige Nachteile mit sich. Insbesondere bei dem in dieser Arbeit vorgestelltem Verfahren, zur Einprägung solcher Geometrien in FDM-Drucke. So ist die einprägbare Geometrie stets von der Dimension der verfügbaren Permanentmagnete abhängig. Würde beispielsweise eine Rasterstruktur verwendet werden, wie in Abb. 7.1 (A, oben) dargestellt, so könnte die Größe des Gitters nicht verändert werden. Zusätzlich sind die verfügbaren Geometrien limitiert, anhand der Installation der Magnete.

Ein weiteres prägnantes Merkmal ist die Inhomogenität von Permanentmagneten, wie es in Kpt. 5.4 dargestellt wurde. Die Bedeutung dessen wird besonders deutlich anhand der Abb. 7.1 (B, unten), (D, unten) und (F, unten). Durch die unterschiedlichen magnetischen Feldstärken der Magnete, ist die Ansammlung der Eisenspäne im Zentrum inhomogen. Diese Inkonsistenz würde ebenfalls im FDM-Druck miteingepägt werden. Eine Gegenmaßnahme hierfür wäre es, anhand des in Kpt. 5.4 und in Abb. 5.11 (A) und (B) vorgestellten Messverfahrens nahezu identische Permanentmagnete zu ermitteln, um diese dann für die Halterung zu verwenden.

Dem Verfasser dieser Arbeit ist dieser Lösungsansatz zu unbefriedigend.

Aufbau des Magnetschlittens

Die in Kpt. 7 genannten Einschränkungen können eliminiert werden durch einen mobilen Magnethalter. Wie in Abb. 7.2 (A) dargestellt, wird hierbei parallel zum Extruder (Abb.: 7.2 (A, 2)), der verwendete Magnethalter (Abb.: 7.2 (A, 8)) parallel mitbewegt und somit permanent die gleiche Position einnehmen. Auf

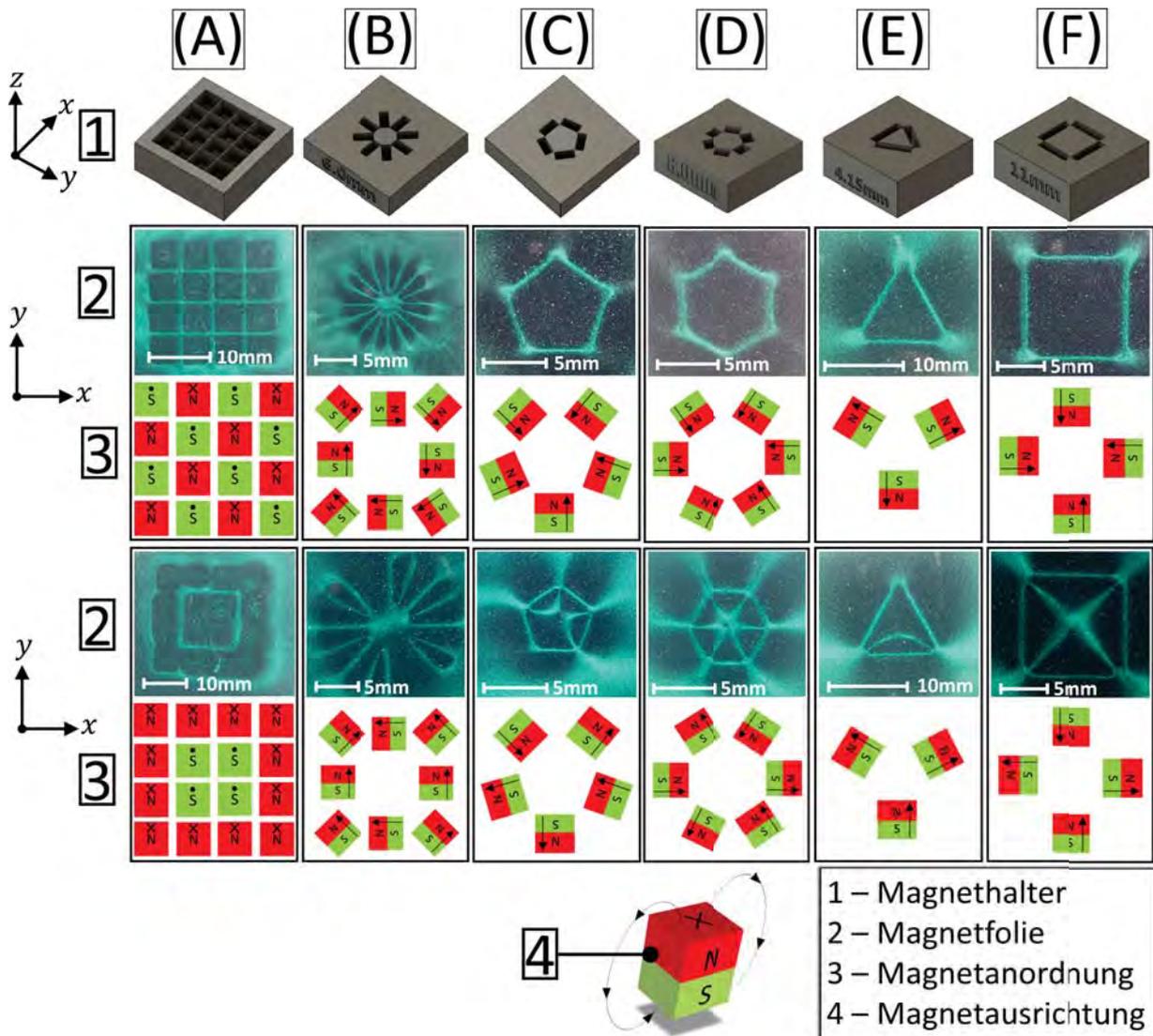


Abbildung 7.1: Beispiele für unterschiedliche Anordnung von Magneten in Magnethaltern und zugehöriger Darstellung der Ausrichtung des resultierenden statischen Magnetfeldes anhand von Magnetfolien. (A) Magnethalter mit 16 Stück $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ Magnete [56], (B) Magnethalter mit 8 Stück $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}$ Magnete [69], (C) Magnethalter mit 5 Stück $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}$ Magnete [69], (D) Magnethalter mit 6 Stück $8 \times 4 \times 3 \text{ mm}$ Magnete [49], (E) Magnethalter mit 3 Stück $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}$ Magnete [49], (F) Magnethalter mit 4 Stück $10 \times 10 \times 2 \text{ mm}$ Magnete [49].

diese Weise wird es möglich ein beliebiges und gewünschtes Magnetfeld im Magnethalter zu installieren, welches dann in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung des FDM-Druckers die gewünschten Strukturen anhand der Platzierung der Düse in die 3D-gedruckte Struktur einprägt. Somit ist keine Einschränkung mehr aufgrund der Geometrien vorhanden, die von den Permanentmagneten abgebildet werden können. Speziell die Bauweise des kartesischen 3D-Druckers erlaubt es eine solche zusätzliche Modifikation zu integrieren, dessen elektronische und mechanische Bauweise die in Abb. 7.2 (A) illustriert ist. Um die Bewegung des Magnethalters zu ermöglichen, wird ein zusätzlicher Schrittmotor (Abb.: 7.2 (A, 6)) parallel dem Schrittmotor der x-Achse (Abb.: 7.2 (A, 5)) angeschlossen. Da hierbei ein einzelner Schrittmotortreiber (Abb.: 7.2 (A, 4)) verwendet wird, erfolgen die Bewegungsanforderungen simultan. Hierfür ist es notwendig die Stromversorgung für die x-Achse zu verdoppeln, anhand von `\Marlin\configuration_adv.h\#define X_CURRENT zu 500 mA.`

Der Antrieb des Magnethalters erfolgt anhand eines GT2-Zahnriemens (Abb.: 7.2 (A, 8)), welcher mittels einer Spannvorrichtung (Abb.: 7.2 (D, 11)) auf Zugspannung gebracht wird. Der Magnethalter wird am Zahnriemen mittels eines aus PLA gedrucktem Schlittens bewegt, welcher durch Klemmen das Objekt aufnimmt.

Als Druckfläche ist eine Epoxyd-Glasfaserplatte vorgesehen (Abb.: 7.2 (C, 9)). Diese wurde gewählt, da durch die geringe Stärke des Materials (3 mm) wenig Magnetfeld verloren geht und somit die Weitergabe des statischen Magnetfeldes an das Eisenfilament möglich ist. Gleichzeitig zeichnet sich dieses Material von einer hohen Zugfestigkeit aus. Um den Einfluss der Unebenheiten im Epoxyd-Druckbett zu verhindern, wurde eine Apparatur zum Spannen entworfen (Abb.: 7.2 (E)). Hierfür wurde das Epoxydbett an einer 10 mm Profilstange (Abb.: 7.2 (E, 14)) mit Befestigungsschrauben (Abb.: 7.2 (E, 12)) beidseitig verankert. Dieses Konstrukt wurde einseitig an einer Spanholzplatte (Abb.: 7.2 (E, 10)) befestigt, wobei an der Stirnseite eine Spannvorrichtung (Abb.: 7.2 (E, 13)) für das Epoxydbett angebracht worden ist, um Zugspannung auszuüben. Das Drucken auf dieser Fläche wird somit möglich. Die Spanholzfläche ist beschichtet und sorgt für eine reibungsarme Bewegung des Magnethalters über die Oberfläche. Gleichzeitig verhindert das Holz eine Interaktion mit den installierten Permanentmagneten.

Einschränkung des Magnetschlittens

Obwohl diese Bauweise bereits funktionsfähig ist, ist sie weitab von perfekt.

Die Ausrichtung vom Magnethalter zur Düse erfolgt bei dieser Apparatur auf Sicht. Sollte es beim Drucken zum Schrittmotorverlust kommen, so wäre eine Pausierung des 3D-Drucks notwendig²³ oder Installation einer zusätzlichen Kontrolleinheit, wie der S42B (Abb.: F.10 (B) 3), um die Umdrehung der Motoren nachkorrigieren zu können.

Durch die fehlende starre Verbindung von Magnethalter mit dem 3D-Drucker, kann es speziell beim 3D-Druck der aller ersten Schichten zu Interaktionen des Magneten mit den Metallteilen des Extruders kommen, wobei diese sich gegenseitig anziehen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Zugkraft auf den Zahnriemen nur in x -Richtung wirkt. Gleichzeitig wirkt die Zugkraft des Epoxydbetts nur in y -Richtung. Die Anziehungskraft des Magneten wirkt jedoch in z -Richtung. Alternativ sollte eine Profilschiene oder ein Konstruktionsprofil eingesetzt werden. Hierfür könnte eine identische Profilschiene verwendet werden, wie sie bereits für die Achse zum Einsatz kommt, die nicht mit der z -Achse verbunden ist (vgl. Kpt. 8, Abb. 8.6 (12)). An diesem sollte eine Führungsfahrzeug installiert werden, in welchem die Magnethalter befestigt und ausgetauscht werden könnten. Dieses Führungsfahrzeug sollte hierfür aus PLA gedruckt werden, um nicht mit dem Magnetfeld zu interferieren.

Zu einem tiefgreifenden Einsatz des *Magnetschlittens* kam es im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr.

²³Ausführung des *M600*-Kommandos und manuelle Verschiebung des Magnetschlittens.

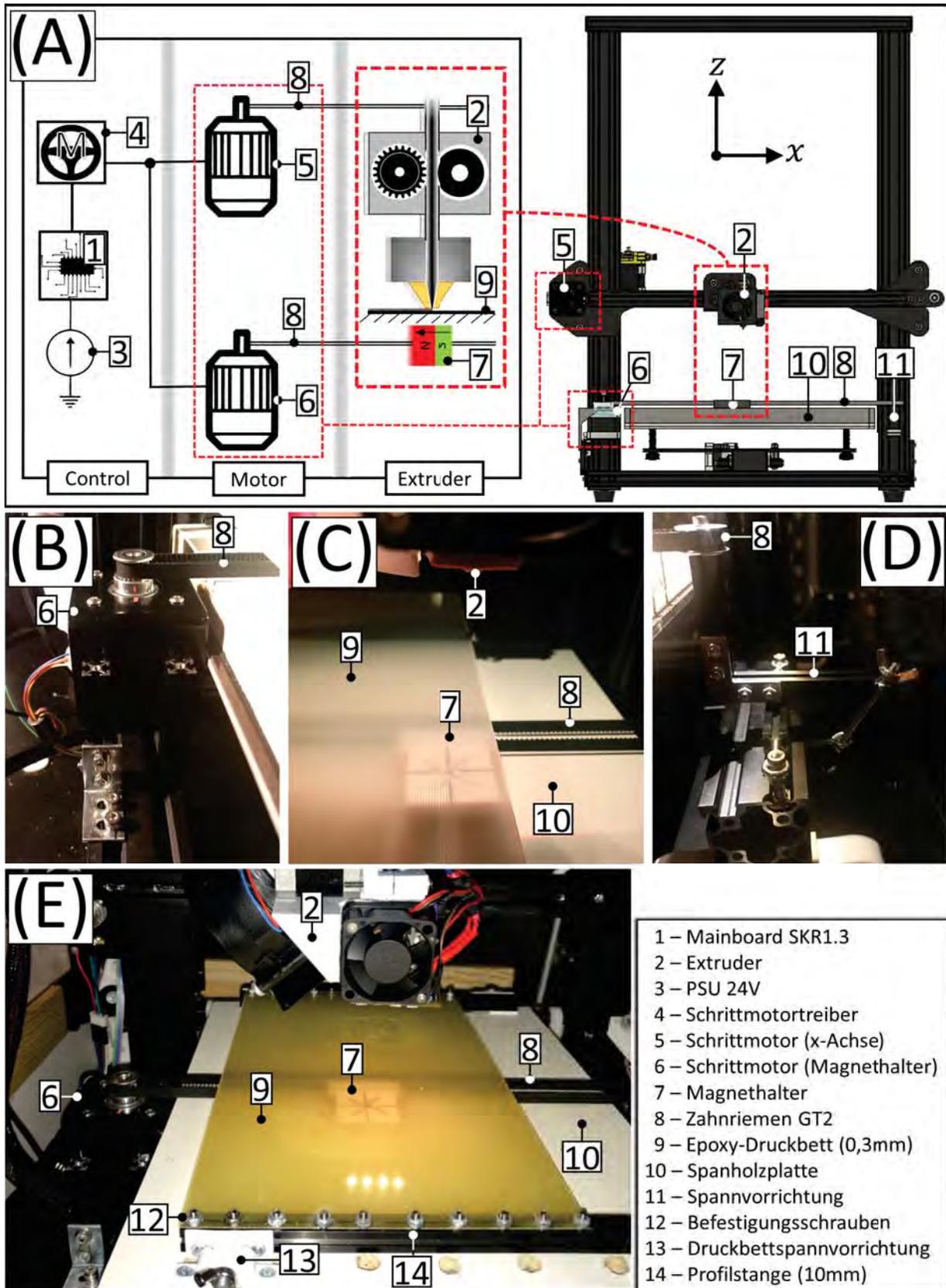


Abbildung 7.2: Aufbau und Funktionsweise vom *Magnetschlitten*. (A) Bauteile vom Aufbau mit Elektronik und Mechanik, (B) Schrittmotor vom mobile Magnethalter mit Montage und Zahnriemen, (C) mobilen Magnethalter unter Extruderdüse mit Epoxyd-Druckbett, (D) Spannvorrichtung für Zahnriemen vom Magnethalter, (E) Übersicht vom funktionsfähigem *Magnetschlitten*.

8 Ausblick

In dieser vorliegenden Arbeit wurden eine Vielzahl von Ideen umgesetzt. In diesem letzten Kapitel ein Ausblick gegeben werden, welche weiteren Ziele noch integriert werden sollen, um weitere Entwicklungen für die Hochfrequenztechnik zu generieren.

Gradienten-Hornantenna für Patch-Antenna

Mit der entwickelten Fertigungsmethode können nun eine Vielzahl von Weiterentwicklungen kreiert werden, die begünstigend wirken. Einige Beispiel hierfür sollen in diesem Abschnitt gezeigt werden.

In Abb. 8.1 sind zwei nahe beieinander positionierte Patchantennen (Abb.: 8.1 (1)) dargestellt. Im Betrieb würden diese Antenne miteinander interferieren, durch Kopplungen der Felder, sowie Verstimmung der Impedanzen, was die Qualität des Gesamtsystems reduzieren würde. Zur Vermeidung dessen wäre hierbei denkbar, um die Patchantenne eine umrandende Box zu installieren, mit mehreren Außenringen. Bei jedem dieser Außenringe werden Filamentkomposite verwendet, deren Dämpfung zum äußersten Ring zunehmen. Wie in der Abb. 8.1 gezeigt, würde hierfür das Filamentkomposite Graphite+Eisen verwendet werden (Kpt.: 6.3.2). Es sei bei dieser Betrachtung zu beachten, dass die gewählte 3D-Druckweise in der Abbildung symbolisch ist und das Objekt als Ganzes gedruckt werden würde. Somit würde ein nahtloser Übergang der Filamentkomposite erfolgen.

Auf diese Weise könnten die Patchantennen unempfindlicher gegenüber benachbarter Interferenz gemacht werden²⁴ und auch weiteren Leitern, die sich in unmittelbarer Nähe befinden würden. Wie einleitend in dieser Arbeit als Ziel gesetzt, wären somit auch sehr viel kompaktere PCB-Aufbauten möglich. Weiterführend könnten dann bei einem 3D-gedruckten allumfassenden Gehäuse diese Struktur integriert werden.

Als weitere Idee ist ebenfalls die Verbesserung der Feldcharakteristik von Patchantennen möglich. Wie in Abb. 8.2 dargestellt, könnte die in Kpt. 6.3 verwendeten Proben auf der Patchantenne positioniert werden. Bei dieser Struktur werden die Schichten der Materialien so gewählt, dass ein wenig Dämpfung der Transmission im Nahfeld ist (Abb.: 8.2 (3)), wobei zu höheren Lagen der Materialanteil sich so verändert, dass eine Direktion stattfindet. Somit könnten die Feldausbreitungseigenschaften durch diesen passiven Direktor geändert werden. Als weitere Filterwirkung würden zusätzlich mittels des in Kpt. 6.3 vorgestell-

²⁴Ausbreitung die innerhalb des Substrates stattfinden werden hierbei ausgeschlossen.

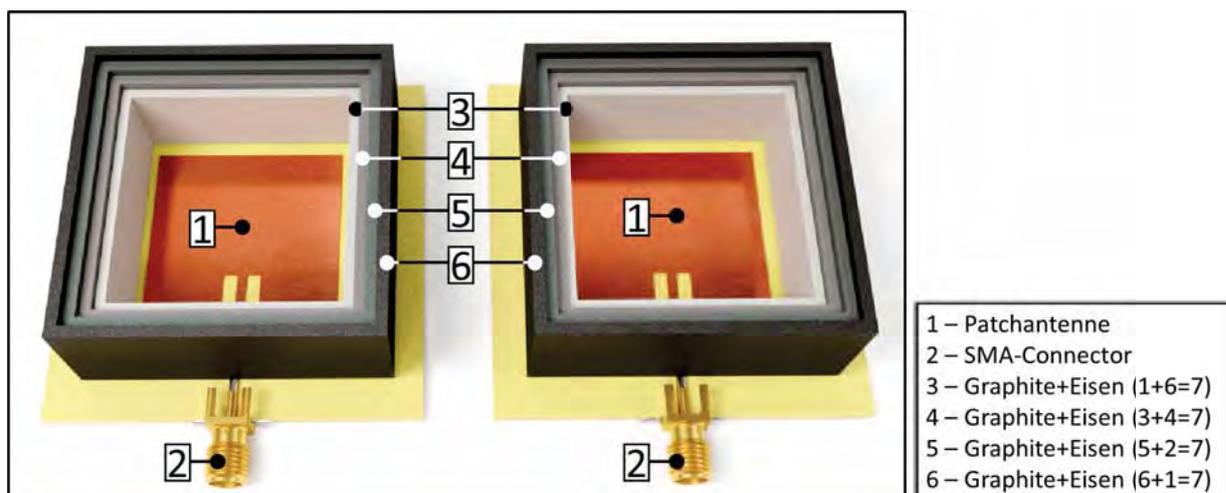


Abbildung 8.1: Filamentkompositebox aus Graphite+Eisen zur Schirmung von zwei nahe beieinander liegender Patchantennen, durch Verwendung eines Gradienten in der Materialzusammensetzung.

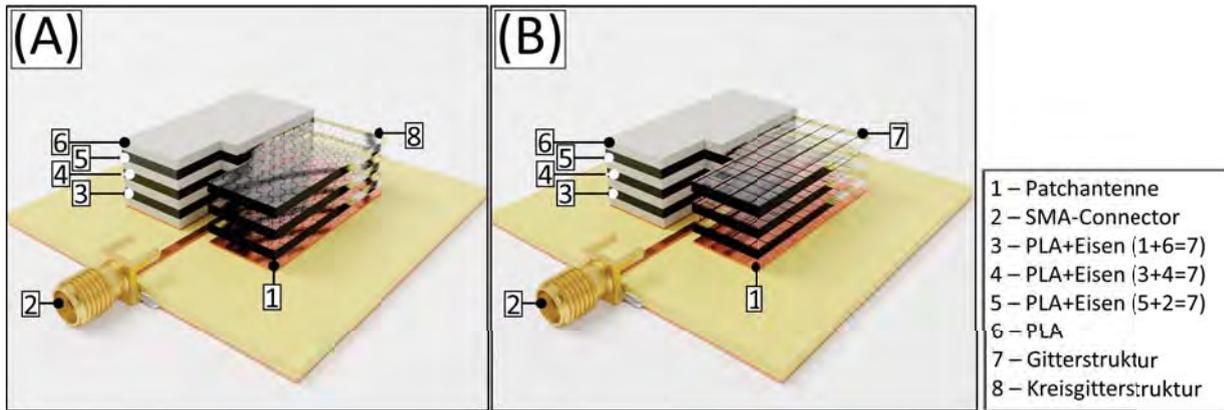


Abbildung 8.2: Verwendung eines geschichteten passiven Filters mit Filamentkompositen als Gradienten und eingepägten Geometrien im Filamentkomposite mittels statischer Magnetfelder. (A) Kreisgitterstruktur im Composite, (B) Gitterstruktur im Composite.

ten Verfahrens Geometrien in das Composite eingepägt werden, wie eine Gitterstruktur (Abb.: 8.2 (B, 7)) oder Kreisgitterstruktur (Abb.: 8.2 (A, 8)) oder jede andere erdenkbare Geometrie, die additiv die Felddausbreitung begünstigen würde.

Schlussendlich könnten damit hochgradig komplexe Strukturen gefertigt werden, wie in Abb. 8.3. So könnten mehrere individuelle Hornantennen gefertigt werden, die sich in Materialzusammensetzung und Ausrichtung der Eisenspäne unterscheiden würde. Beispielsweise könnte jede Hornantenne einen Materialgradienten erhalten (Abb.: 8.3 (B)), wobei die Anteile von Graphite+Eisen vom Boden von $6+1=7$ bis zur Spitze mit $1+6=7$ kontinuierlich geändert werden könnten. Diese gesamte Struktur würde wie in Kpt. 4.4.2 gezeigt in photopolymerem Harz eingebunden werden, um dieses als Kuppel auf der Patchantenne zu positionieren. Solche Konstrukte sind mit existierenden Technologien noch nicht so herstellbar gewesen. Der Autor dieser Arbeit hat bereits einige Konzepte entwickelt, wie existierende HF Technologien mittels 3D Komponentendruck verbessert werden könnten.

Programmierbares Filament

Um Filamentwechsel unnötig zu machen, ist es ebenfalls möglich s.g. programmierte Filamente zu verwenden. Hierfür wird abermals ein eigenständiges Filament gedruckt mit der aus dieser Arbeit vorgestellten Methode. Hierbei wird jedoch berücksichtigt, wie sich das Objekt anhand der verschiedenen Filament-

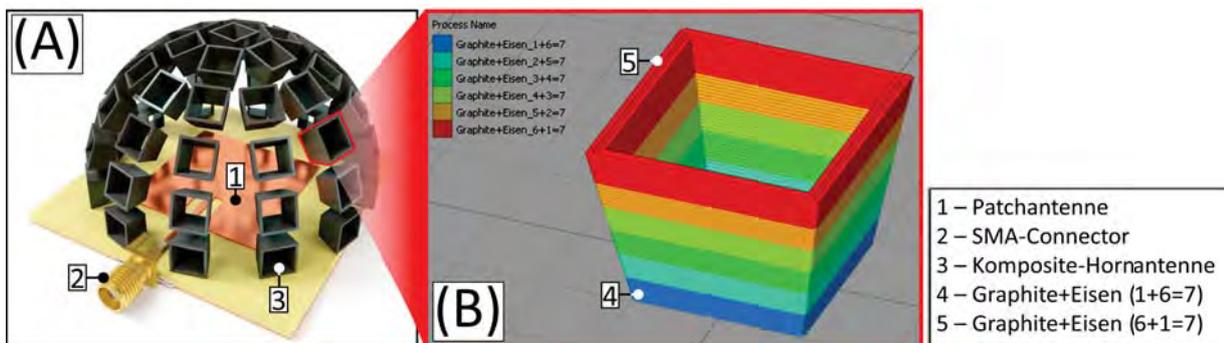


Abbildung 8.3: Abstrahlungsformung durch Composite-Hornantennen für Patchantenne. (A) Patchantenne mit 3D-gedruckter Hornantennenkuppel aus Filamentkompositen, (B) Druckvorschau von einzelner Composite-Hornantenne in *Simplify3D*.

typen zusammensetzt. Dieses Verfahren wurde in der Veröffentlichung [70] vorgestellt. In Abb. 8.4 (C) werden hierfür ein Testobjekt mit regulärer Druckmethode (Abb.: 8.4 (C, 3)) und ein mehrfarbiges Objekt, mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Filamenten (Abb.: 8.4 (C, 2)). Hierfür wird ebenfalls das FDM-Druckverfahren verwendet, um ein Filament zu drucken. Jedoch wird dieses Filament in Segmente unterteilt, in die unterschiedliche Filamenttypen implementiert werden (Abb.: 8.4 (A, 1)). Auf diese Weise wird ein Filament erzeugt, welches spezifisch für ein mehrfarbiges Objekt vorab zugeschnitten wird. In Kombination mit dieser vorliegenden Arbeit, wäre es ebenfalls denkbar stattdessen eine Vielzahl unterschiedlicher Materialfilamente zu integrieren (i.e. Kupferfilament, Graphitefilament, Eisenfilament).

Mit dieser Methode ist es möglich auf einen aufwändigen Mehrfarbendrucker Aufbau zu verzichten, welches gleichzeitig ein Opferobjekt zusätzlich zum Testobjekt benötigen würde. Gleichzeitig wird es damit nicht mehr notwendig Filamentwechsel durchzuführen, die einen homogenen, durchgängigen Druckvorgang gewährleisten würden.

Für diese Methode sei jedoch ebenfalls zu beachten, dass eine exakte Kalibrierung notwendig wäre für alle verwendeten Filamenttypen, da sich beispielsweise Schrittlängenverluste auf diese Weise potenzieren würden. Ein zuverlässiges Gerät ist hierbei vorausgesetzt, da dies sonst den Verlust des Filaments und des Druckobjekts mit sich bringen würde. Problematisch wäre dies besonders bei Filamenten, die unterschiedliche Schmelzpunkte besäßen. Als Kompensation dessen wäre eine Druckpause denkbar (M600) oder eine kurzzeitige Reduktion der Druckgeschwindigkeit, um die Temperatur einpendeln zu lassen.

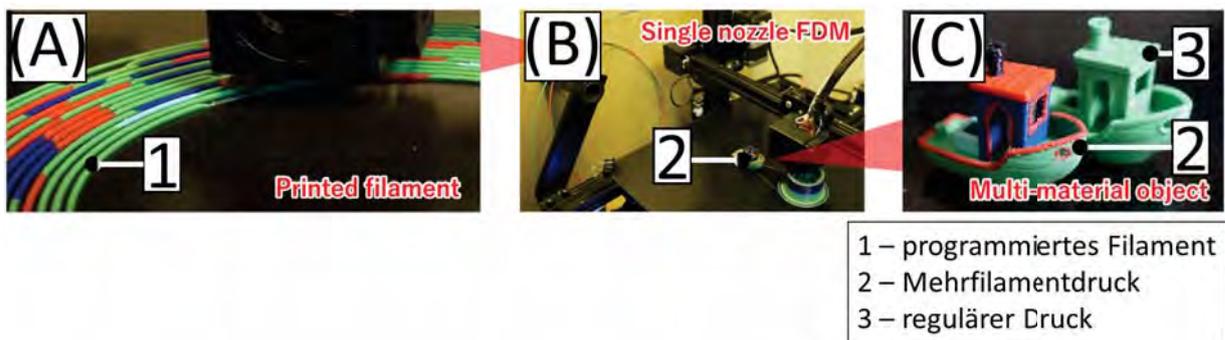


Abbildung 8.4: Programmierbares Filament mit gedruckten Proben. (A) Herstellungsprozess eines programmierten, mehrfarbigen Filaments, (B) Draufsicht des Herstellungsprozesses, (C) Gegenüberstellung von Testdrucken mit regulärem Verfahren und programmiertem Filament [70, S. 1].

Erweiterung mit freier magnetischer Abstößung

Im Verlaufe der Arbeit wurde aufgezeigt, wie Permanentmagnete mit dem FDM-Fertigungsprozess verbunden werden können. Hierbei wurden in einer Halterung mehrere Permanentmagnete miteinander kombiniert, wodurch die Interaktion der Magnetfelder die Feldlinien in der Weise veränderten, dass die Silhouetten der Feldlinien Geometrien formten. Da sich besonders Materialien mit einer hohen Permeabilität entlang dieser Feldlinien ausrichten (e.g. Eisen), wurde dieser Effekt genutzt, um in PLA enthaltene Eisenspäne auszurichten. Diese Idee kann jedoch erweitert werden.

In der Veröffentlichung [72] wird ein Experiment beschrieben, in welchem ein Permanentmagnet mit seinem Dipol rotiert wird, befestigt an einem Bürstenmotor (Abb.: 8.5 (A)). In Abhängigkeit vom Verhältnis der Umdrehungszahl des Bürstenmotors und der Magnetfeldstärke \vec{B} des Dipol (Abb.: 8.5 (B)), erreichen die anziehende und abstößende Wirkung im richtigen Verhältnis einen Zustand des Equilibriums. In Kombination eines zweiten Permanentmagneten wird, wie in Abb. 8.5 (A) illustriert, auf diese Weise ein magnetisches Schweben bewirkt. Besonders hierbei ist es, dass dieser Effekt generiert werden kann ohne

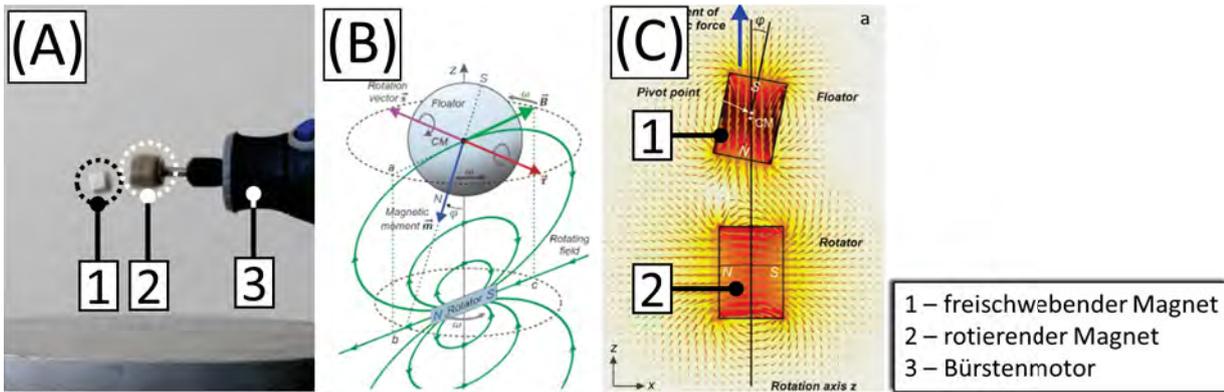


Abbildung 8.5: Magnetisches Schweben durch Rotation von Permanentmagnete. (A) Versuchsaufbau mit rotierendem installiertem Permanentmagnet an Bürstenmotor [71, 5:14 Min.], (B) theoretische Verteilung der Felder von magnetischem Equilibrium [72, Fig. 5.1 R], (C) theoretische statische Feldverteilung des Magnetfeldes anhand des Vektorfeldes und spezifischer Phase [72, Fig. 5.13 a].

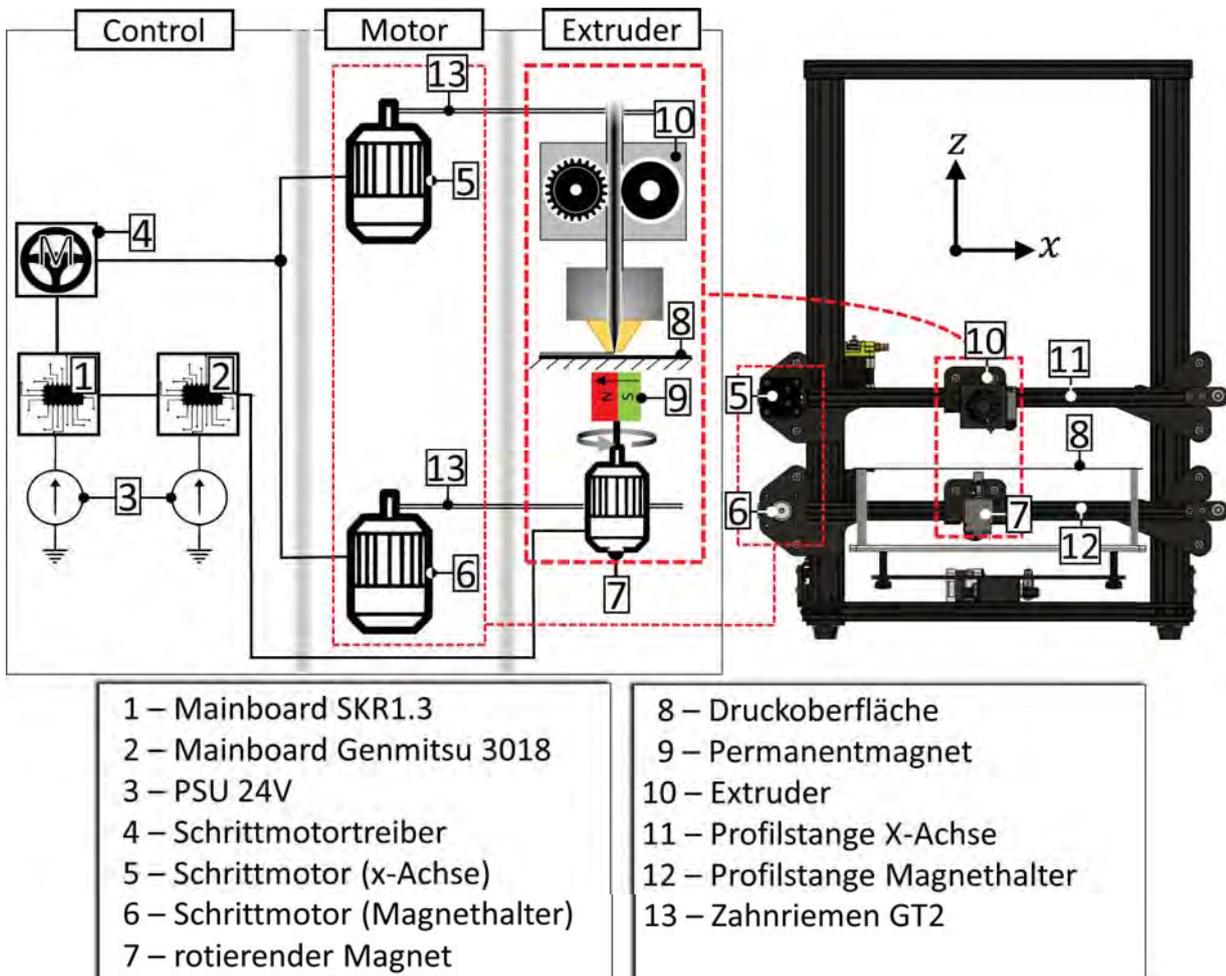


Abbildung 8.6: Konzept zur Integration von rotierendem Permanentmagneten für FDM-Drucker.

zusätzliche Chemikalien (e.g. Flüssigstickstoff), so wie es von Supraleitern bekannt ist.

Das in dieser Arbeit vorgestellte FDM-Fertigungsverfahren sollte im nächsten Schritt mit diesem Experiment kombiniert werden. Statt der Verwendung des Schlittens für die Permanentmagnete, könnte an dieser Stelle ein Bürstenmotor installiert werden (Abb.: 8.6 (7)), welcher unterhalb der Düse synchron mitbewegt werden würde. Gleichzeitig würde hier ebenfalls ein Permanentmagnet zum Rotieren gebracht werden. Dadurch wäre es möglich, in Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke \vec{B} und der Umdrehungszahl U/Sec , die Eisenspäne im PLA sequentiell auszurichten. Wie im Konzept von Abb. 8.6 dargestellt, könnte eine zusätzliche Steuereinheit eines CNC-Routers (e.g. Genmitsu 3018) in die Elektronik integriert werden, um eine genau Steuerung des Bürstenmotors zu ermöglichen. Die Steuerung würde systemübergreifend mittels *GCode* erfolgen. Auf diese Weise könnte auf die konventionellen Ausrichtungen der Magnetfelder verzichtet werden, sowie der Wechsel der Halter, um dadurch einen fließenden Fertigungsprozess zu gewährleisten. Weitere Untersuchungen müssen hierfür getätigt werden.

Extrusionmultiplier direkt dem Filamentdurchmesser anpassen

Das in dieser Arbeit vorgestellte und verwendete Verfahren zur Filamenterstellung ist nicht perfekt. Das Kalibrierungsverfahren setzt voraus, dass der verwendete Durchmesser über die gesamte Länge des Filaments homogen verteilt sein würde. Das Selbe gilt für die von den Herstellern angebotenen Filamente (Kpt.: F.1). Käufliche Filamente besitzen Abweichungen vom Durchmesser, welche im Datenblatt vermerkt sind, wie beispielsweise für die Filamente *Prusament* von $\pm 0,02\text{ mm}$ [75], *Protopasta* von $\pm 0,025\text{ mm}$ [76], *DAS FILAMENT* von $\pm 0,05\text{ mm}$ [77]. Um Einsicht über eben diese Abweichungen zu erhalten, werden von der Firma *Prusa* die hergestellten Filamente vor der Auslieferung über die gesamte Länge vermessen. Diese mittels Lasermikrometer erstellten Ergebnisse sind freizugänglich unter [73]. Für einen verfeinerten Druckprozess sollten diese Abweichungen implementiert werden, wobei der Extrusion-Multiplier (Kpt.:

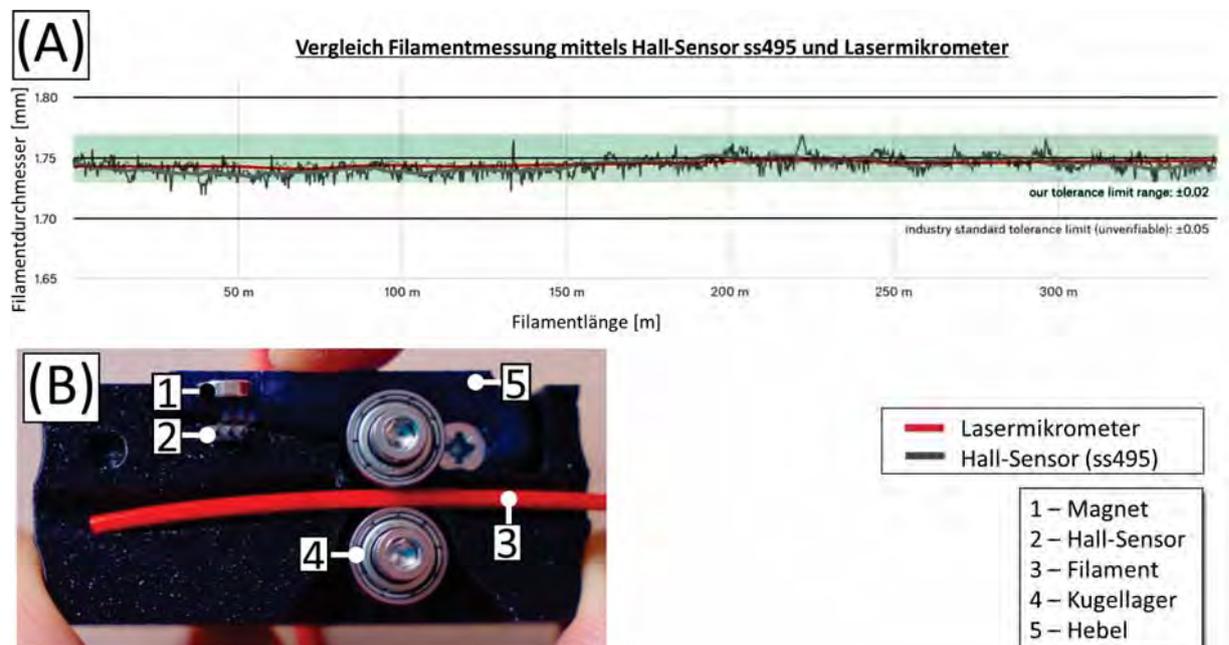


Abbildung 8.7: Verwendung von Hall-Sensor im FDM-Druck, zur Kompensation von Toleranzen im Filamentdurchmesser. (A) Vergleich von Messungen des Durchmessers vom Filament mittels Lasermikrometer [73] und Hall-Sensor ss495 [74], (B) Aufbau zur Integration des Hall-Sensor ss495 für Filamentmessung [74, 6:29 Min.].

F.13) dynamisch der Abweichung des Durchmessers angepasst würde. Besonders für diese Arbeit wäre dieses relevant, welches aber aus Zeitgründen nicht mehr Anwendung fand.

Ein entsprechender Sensor hierfür soll trotzdem vorgestellt werden, wie dieser bereits von THOMAS SANLADERER [74]. Die Abweichung des Durchmessers wird hierbei dem Extrusion-Multiplier während der Einführung des Filaments hinzugefügt. Dafür wird mittels Hall-Sensor ss495 der Abstand zu einem Magneten gemessen (Abb.: 8.7 (B)). Der Magnet ist hierfür mittels eines mechanischen Hebels verbunden (Abb.: 8.7 (B, 5)), der anhand des Anpressdrucks Rückschluss auf den Filamentdurchmesser gibt. Da es sich bei dieser Bauweise um einen sehr rudimentären Sensor handelt, werden die Ergebnisse denen des Lasermikrometers gegenübergestellt (Abb.: 8.7 (A)). Anhand der Abb.: 8.7 (A) sind deutliche Abweichungen in den Messergebnissen zu erkennen, wobei die Verläufe jedoch Ähnlichkeiten aufweisen. Laut den Angaben von [74, 13:46 Min.] wären somit Genauigkeiten von bis zu $2,723 \mu\text{m}$ möglich. Hierfür müsste jedoch eine Anwendbarkeit noch geprüft werden, welches über den Rahmen dieser Arbeit hinausging.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Fertigungsverfahren für den 3D-Druck *Fused Deposition Modeling* (FDM) entwickelt, um Verbundstoffe (*Komposite*) zu erstellen, die durch ihre Zusammensetzung den Dämpfungsgrad variieren können, um so neuartige passive Hochfrequenzstrukturen herzustellen.

In [12] wurde auf die neue Generation der Funkkommunikation eingegangen. Hierbei wurden die Vorteile erläutert, wenn neuartige passive Strukturen in bestehende PCB-Systeme integriert werden könnten, da dies sich begünstigend auf die EMV auswirken würde. Auf diese Weise könnten Interferenzen von benachbarten Komponenten reduziert werden (i.e. Leistungsbaulemente), sowie Strahlungselemente (i.e. Antennen) unterstützende fokussierende Eigenschaften erhalten oder frequenzspezifische Kopplungen reduziert werden. Solche maßgeschneiderten Bauelemente würden zusätzlich auf dem PCB installiert werden.

Basierend auf dieser Hypothese, wurde auf Basis von *Metamaterial* eine passive Linsenstruktur weiterentwickelt, bestehend aus mehreren transformierten Omega-Elementen. Die geometrische Struktur und Zusammensetzung wurde so verändert, dass die feldformende Eigenschaften eines Bandpass generierte und somit die Strahlung bei der Übertragung unterstützt. Das Metamaterial wurde in [42] veröffentlicht, wobei theoretische Betrachtungen vorgenommen worden sind, mit Simulationen, Fertigung und Vermessungen. Zusätzlich wurde ebenfalls ein Verfahren vorgestellt, welches einen direkten Vergleich der Fertigungstoleranzen mit den Simulationsergebnissen vornimmt, noch bevor eine Messung durchgeführt wird (Kpt.: 4.2.2).

Basierend auf dieser Beobachtung, wurde versucht ein ähnliches charakteristisches Merkmal mithilfe von FDM zu replizieren. Hierfür wurde in Kpt. 4.4 mithilfe vom Eisenfilamentrohstoff das *Metamaterial* abgebildet und in photopolymerem Harz eingebunden. Die Messergebnisse zeigten, dass auf dieses Weise keine Replizierung möglich war und detailliertere Untersuchung durchgeführt werden müssen.

Gleichzeitig wurde bei diesen Untersuchung auch die Empfänglichkeit des Eisenfilaments gegenüber statischen Magnetfeldern beobachtet. Bei der Erhitzung des Filaments werden die enthaltenen Eisenpartikel mechanisch mobil und immobil nach dem Auskühlen. So können unterschiedliche statische Magnetfeldentwicklung genutzt werden, um so mithilfe des Eisenfilaments diese abzubilden und einzuprägen. Zur Bestimmung der Auswirkungen dieser Materialeigenschaften wurde in Kpt. 5 eine Messreihe von unterschiedlichen Proben erstellt, die die Einflussnahme dieses Fertigungsverfahrens bestimmen sollte. In Kapitel 5.1 wurde festgestellt, dass die Transmission und Dämpfung anhand der Veränderung dieser permeablen Eigenschaften aktiv gesteuert werden kann. So wurde mittels 3D-gedruckter Magnethalterungen verschiedene Silhouetten und Geometrien abgebildet, die für die Herstellung der Messproben verwendet wurden. Dabei stellte sich heraus, dass die unterschiedlichen Einprägungen zu verschiedenen Messergebnissen führten, die teilweise sogar begünstigend auf die Feldausbreitung wirken. Wie in [78] dargestellt wurde, sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Anordnungen der Permanentmagnete möglich, welches gleichzeitig zu einer Vielzahl von möglichen Konstellationen kombiniert werden kann. Gleichzeitig ist diese Bauweise auch abhängig von den verfügbaren Permanentmagneten, sowie deren Herstellungstoleranzen. Aufbauend auf den vorherigen Betrachtungen, wurde in Kpt. 6 die Idee weitergeführt und eine Methode zum Erstellen von Verbundstoffen entwickelt. Die s.g. *Komposite* ermöglichen es den permeablen Anteil μ_r des Eisenfilaments mit einem weiteren Filament zu kombinieren, um so beispielsweise den permittiven Anteil ε_r zu erweitern. Hierfür wurden in [51] vier kommerziell verfügbare Filamente verwendet, die versetzt sind mit Kupferspänen, Graphitstaub, Calciumcarbonate (CaCO_3) und PLA. Hierbei werden zwei der Rohstoffe aufeinander geschichtet und entlang einer Spirale 3D-gedruckt. Mithilfe des für FDM typischen Fertigungsverfahrens kann der Anteil der Bestandteile für das fertige Komposite gesteuert werden. Dieses zweikomponentige Filament wird vermischt, durch erneutes Einspeisen in den 3D-Druckvorgang

und erneutem Drucken entlang einer Spirale. Dieses Semi-Mischverfahren führt zu einer Verteilung der Bestandteile und wird als Veredlungsprozess bezeichnet. Der Nutzen dieser Fertigung wurde anhand von hochfrequenten Feldern und einer Spektrumanalyse untersucht. In dieser zugehörigen Messreihe wurden die Bestandteile der Komposite variiert und verschiedene Proben eingepreßt, wobei die relative Ausrichtung des Materials zum ausbreitenden Welle ebenfalls berücksichtigt wurde. Die Messergebnisse zeigten unterschiedliche Grade an Dämpfungen der Transmission, abhängig vom gewählten Rohstoff. Laut den Ergebnissen ist die Qualität stark abhängig vom gewählten Material, welches mit dem Eisenfilament kombiniert wird. Exzellente Ergebnisse wurden beispielsweise für die Kombination von Graphit und Eisen ermittelt, wobei die Balance von Permittivität und Permeabilität eine reflektionsfrei Materialkombination zulassen würde. Die Messergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass eine Kombination der Filamente als *Komposite* definitiv möglich ist und von großem Vorteil für die Hochfrequenztechnik ist.

In der letzten Betrachtung in Kpt. 7 wurde das Fertigungsverfahren nochmals verbessert. Eine zusätzliche Achse wurde hinzugefügt. Hierbei werden die Permanentmagnete innerhalb eines mobilen Magnethalters montiert und simultan zur Düse des Extruders mitbewegt. Dadurch wird der Faktor eliminiert nur Geometrien in FDM-Drucke einprägen zu können, die anhand der räumlichen Auslegung der Permanentmagnete vorgegeben werden. Weitere Forschungen werden an diesem Punkt fortgesetzt.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Fertigungsverfahren ermöglicht es durch FDM maßgeschneiderte passive HF-Komponenten für jegliche existierende Elektronik zu designen. So können Abbilder der Elektronik erstellt und die passiven Strukturen im Negativ des Gehäuses eingepreßt werden. Durch die vielseitige, sparsame und schnelle Produktion dieser Bauteile, kann eine Vielzahl von Iterationen erstellt werden, die den Ansprüchen und Vorgaben entsprechen. So werden Schlagschutz und HF-Komponente in einem Objekt kombiniert. Gleichzeitig ermöglicht dies anhand der *Komposite* Gradienten in die Strukturen einzuprägen. Aktuelle Fertigungsverfahren existieren in dieser Form bislang so nicht.

Um diese Arbeit umsetzen und zum Erfolg führen zu können, wurden parallel eine Vielzahl von zusätzlichen Verbesserungen für den FDM-Druck entwickelt, die ebenfalls die allgemeine Verwendung des Gerätes verbessern:

Einen Antrieb für doppelte z -Achsen für schwere Extruder, durch Verwendung eines einzelnen Schrittmotors, mit integrierten Magnetdämpfern (Kpt.: F.5).

Ein verbessertes Konzept zur Filamentkühlung für thermisch leitende Filamente, welches in geschlossenem Gehäuse angewandt werden kann (Kpt.: F.9).

Die thermische Isolation vom Heizelement, mittels einer maßgeschneiderten Isolationssocke aus thermisch resistentem Silikonkautschuk für E3D-Hotends (Kpt.: F.7).

Ein verbessertes Kalibrierungsverfahren zur Justierung der X-/Y-Kalibrierung am karthesischen 3D-Drucker mit einer Genauigkeit von $\pm 10 \mu m$ (Kpt.: F.11).

Die Verhinderung von Verstopfungen der Düse durch *Heat Creep*, durch Installation eines Kühlrippenlüftungskanals, welches die Verarbeitung von thermisch leitenden Filamenten (i.e. Eisen- und Kupferfilamente) im geschlossenem Gehäuse möglich macht (Kpt.: F.8).

Eine Neuentwicklung eines kompakten Direct-Drive-Extruders, mit sehr kurzer Wegstrecke zur Filamenteführung, integriertem Filamentfüllstandsensoren und integriertem Kugelgelenk für das Hotend (Kpt.: F.6).

Eine automatisierte Reinigungsbürste, um die Düse während des Druckvorgangs von Verschmutzungen zu befreien und ohne Verlust den 3D-Druck fortzusetzen (Kpt.: F.14).

Ein abgeschlossenes Gehäuse für den FDM-Drucker, als thermische Isolation (Kpt.: F.12).

9.1 Final Conclusion

The thesis work presented pushes the boundaries of 3D printing for the production of new types of passive high-frequency components. In this thesis a new manufacturing process for variable composite materials for *Fused Deposition Modeling* (FDM) was developed.

The background basis for further investigations, an approach to improve the new generation of telecommunications devices, was given in [12]. The introduction of new types of passive structures, which when implemented with an existing PCB systems, enable the controlling of the *electromagnetic interferences* (EMI). The benefit thereof being, components in close proximity could have less coupling (i.e. power components), the performance of radiating components (i.e. Antennas) could be improved, or frequency dependent interferences could be reduced. These tailored components can be integrated into existing PCB components with little added complexity.

This hypotheses lead to a *Metamaterial* structure which was designed for the presented work. A passive lens, consisting of several transformed Omega shaped elements, which by its field bending behavior focuses the energy and the transmission of a radiating device, with bandpass like properties. The development steps of this *Metamaterial*, with simulation, manufacturing and measurements, are present in [42] and this work. Additionally a method was developed, in which an pre-estimation of the expected performance can be obtained before measurement, by comparing the manufactured component with its simulation (Chp.: 4.2.2).

Based on the results obtained, an alternative approach of manufacturing the developed *Metamaterial* using FDM was attempted. Chapter 4.4 describes the use of special filament combined with iron particles to print the *Metamaterial* which was then encapsulated in photosensitive resin. The measurements of the manufactured samples is present, however variations in the results would require some further analysis (out of scope of the project) to investigate fully.

Additional investigation showed a special property of the iron filament, because it is prone to external static magnetic fields. While it is being manufactured, with the filament being heated for extrusion, the iron particles within the filament become mechanical mobile and immobile after cooling. By using different external combinations of permanent magnets it becomes possible to depict different shapes and geometries, which can be embedded into a 3D print sample. In chapter 5 this modification is discussed in more detail with measurements and several samples presented. The result showed, that the attenuation of the transmission can be adjusted by distributing the iron in certain areas (Chp. 5.1). To study this effect in more detail different silhouettes and geometries (Fig.: 7.1) of the magnetic field were created with 3D printed magnet holders and used to create the samples, by printing on top of it. The high-frequency measurements showed different levels of transmission and attenuation depending on the geometry. As published in [78], a great variety of permanent magnet combinations are possible, by which several high-frequency responses could be generated. The performance however, will strongly depend on the homogeneity of the permanent magnets used .

Those observations formed the basis for of chapter 6, in which a new method for creating *composite* materials was developed. Having a higher relative permeability μ_r , the iron filament could be also combined with a second filament to add a certain permittivity ϵ_r . In [51] four commercially available filaments were used for this experiment, one with copper shavings, with particles of graphite, with calcium carbonate (CaCO_3) and white PLA. The filaments were fused together by utilizing the typical layering process of FDM while printing it along a spiral to creating a new individual filament. Then to mix the materials

together, the same filament is inserted again and a spiral print repeated. This semi-mixing technique distributes the two filaments along a bigger surface area, to create the wanted *composite*. To observe the quality of this manufacturing process in more detail, high-frequency measurements were done using a VNA. The several samples measured showed a large influence on the transmitted electromagnetic field depending on the mixture. This highlights certain composite could be useful for further investigations and which could already have practical applications. As an example, an excellent *composite* is the combination of graphite and iron, which balances the permittivity and the permeability in a particular way, making it suitable for antenna applications. This study proves the concept and highlights the advantages of filament *composite*, making it novel for the field of high frequency engineering.

In the last chapter 7 the manufacturing process was improved by the addition of an extra axis to the FDM printer. This was needed to remove the restriction of the static permanent magnets and the associated tolerances. The used magnet holders were mounted onto a mobile sled, which moves simultaneously beneath the nozzle, making it possible to draw with the magnetic field into 3D printed structures. This concept removes the need for identical permanent magnets and removes the limitation of just being able to use the available silhouettes formed by the constellations. This work can be the starting point for further investigations and experiments.

The presented methods and concepts of this work enables the novel possibility for the manufacturing of tailored HF-components using FDM. For example, it is now possible to create an image or an silhouette of existing electronics and create an enclosure for it, based on the needed EMI requirements. A complex material gradient could be included with this into a protective casing. This method is relatively simple, quick and cheap with the ability of several iterations, until the needed requirements are met. Current manufacturing processes in this form have not yet been implemented.

Additional inventions and modification were developed within this work, to enable the the implementation of the previously described processes possible. However these can also be used to improve any FDM machine:

A modified Z-Axis for heavy extruders, with a single stepper motor and integrated magnetic dampers (Chp.: F.5).

Better filament cooling system for thermally conductive filaments, which can be also used inside of an enclosure (Chp.: F.9).

Thermally isolating silicon socks for E3D hotends (Chp.: F.7).

A Calibration method for the X-/Y-axis of an Cartesian FDM printer with an accuracy of $\pm 10 \mu m$ (Chp.: F.11).

Cooling fin setup for hotend to prevent `\textit{Heat Creep}` and handling highly thermally conductive filaments (i.e. copper filament, iron filament) inside of an enclosure (Chp.: F.8).

A novel *Direct Drive Extruder* with very short filament insert, integrated filament runout sensor, integrated ball joint for interchangeable hotend for both 1,75 mm- and 2,85 mm filaments (Chpt.: F.6).

An automated nozzle cleaning system for FDM 3D printing nozzle (Chpt.: F.14).

A thermally isolated enclosure for FDM 3D printing (Chpt.: F.12).

10 Liste der Veröffentlichungen dieser Arbeit

Diese Arbeit ist im Rahmen des WISDOM-Projektes durch die großzügige Unterstützung der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) entstanden. Dank der tatkräftigen Zuarbeit der Mitarbeiter des WISDOM-Projektes, IHF, IFE, IKS, KU Leuven, University of Warwick, sowie University of Kent sind die hier aufgelisteten Veröffentlichung generiert worden.

J. Köhler, J., M. E. Gadringer, W. Bösch, „Emerging Technologies and Concepts for 5G Applications“, 16 Apr 2018, (Accepted/In press) *International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications: Proceedings of Technical Papers*. 3 p., DOI: 10.1109/VLSI-DAT.2018.8373287, ISBN: 978-1-5386-4260-3 [12]

J. Köhler, W. Bösch, E. Leitgeb and R. Teschl, "Field Bending Omega-Type Metamaterial Lens For Ku Band," 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Porto, Portugal, 2020, pp. 1-5, DOI: 10.1109/CSNDSP49049.2020.9249578, ISBN: 978-1-7281-6743-5 [42]

J. Köhler, W. Bösch, E. Leitgeb, R. Teschl and D. J. Pommerenke, "Manipulating Iron Filament with Permanent Magnets for FDM Printing for X-Band," *2020 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)*, Graz, Austria, 2020, pp. 1-7, DOI: 10.1109/CoBCom49975.2020.9174185, ISBN: 978-1-7281-7492-1 [78]

J. Köhler, W. Bösch, E. Leitgeb, R. Teschl and D. J. Pommerenke, "Mixing of Commercially Available 3D Printing Filaments for Novel RF Components," *2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, Split, Croatia, 2020, pp. 1-6, DOI: 10.23919/SoftCOM50211.2020.9238163, ISBN: 978-953-290-099-6 [51]

J. Köhler, M. E. Gadringer, W. Bösch, Technician for FWF Final Report of Project WISDOM, Mar 2020

J. Köhler, „Investigation of a planar Lens for sub-THz Communication“, *15th International Conference on Telecommunications (ConTEL) Workshop*, Jul 2019 [79]

Literatur

- [1] D. E. H. Jones, *The further inventions of Daedalus*. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [2] “Patent and litigation trends for 3d printing technologies | iam,” 13.05.2021. [Online]. Available: <https://www.iam-media.com/patent-and-litigation-trends-3d-printing-technologies>
- [3] YouTube, “3d printing is changing the world,” 13.05.2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=GV8zPtqOyqg>
- [4] World Stem Cell Summit, “Dr. anthony atala explains the frontiers of bioprinting for regenerative medicine at wake forest - world stem cell summit,” 2019. [Online]. Available: <https://www.worldstemcellsummit.com/2019/04/30/dr-anthony-atala-explains-the-frontiers-of-bioprinting-for-regenerative-medicine-at-wake-forest/>
- [5] YouTube, “Making strong shelves with topology optimization,” 13.05.2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=3smr5CEdksc&t=258s>
- [6] O. Martin and L. Avérous, “Poly(lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multi-phase systems,” *Polymer*, vol. 42, no. 14, pp. 6209–6219, 2001.
- [7] S. Koltzenburg, M. Maskos, and O. Nuyken, *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*, ser. Lehrbuch. Berlin and Heidelberg: Springer Spektrum, 2014.
- [8] AllThat3D.com, “Petg filament complete guide | durability, flexibility and reliability.” [Online]. Available: <https://www.allthat3d.com/petg-filament/>
- [9] M. Bonnet, *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung: Verstehen und zuverlässig auswählen*, 1st ed., ser. Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [10] M. Koike, K. Martinez, L. Guo, G. Chahine, R. Kovacevic, and T. Okabe, “Evaluation of titanium alloy fabricated using electron beam melting system for dental applications,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 8, pp. 1400–1408, 2011.
- [11] A. Kindtner, M. Kindtner, W. Kollenberg, “Realisierung keramischer prototyping mittels 3d-druck und heißgießen.” [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20131029193311/http://www.wzr.cc/veroeffentlichungen/veranstaltungen/keramik_prototyping_3ddruck_heissgiessen.pdf
- [12] J. Köhler, M. E. Gadringer, and W. Bosch, “Supporting 5g performance by modern passive pcb filter structures,” in *International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications: Proceedings of Technical Papers*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/VLSI-DAT.2018.8373287>
- [13] *2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe: Wrocław, Poland, September 5-9, 2016 : proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=7602833>
- [14] V. Sangwan, D. Kapoor, and C. M. Tan, “Simulation of emi at design level for integrated circuits,” in *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*. IEEE, 52016, pp. 385–387.
- [15] *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, 122017.
- [16] R. Gillon, Ed., *2011 8th Workshop on Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo 2011): Dubrovnik, Croatia, 6 - 9 November 2011*. Piscataway, NJ: IEEE, 2011.

-
- [17] *IEEE 9th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging (Cat. No.00TH8524)*. IEEE, 2000.
- [18] Y.-C. Chang, P.-Y. Wang, D.-C. Chang, and S. S. H. Hsu, "A low-loss fully integrated cmos active probe for gigahertz conducted emi test," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 67, no. 4, pp. 1652–1660, 2019.
- [19] David R. Smith, "Metamaterial, circuit metamaterials: Creating artificial response with metamaterials," 30.11.2015. [Online]. Available: http://people.ee.duke.edu/~drsmith/metamaterials/metamaterial_elements.htm
- [20] W. Zhu, C. Wu, Q. Liu, and J. Du, "Frequency tunable metamaterials based on ferroelectric substrate," in *IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011*. Piscataway, NJ: IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [21] D. Ramaccia, F. Bilotti, and A. Toscano, "Accurate analytical model of coupled omega particles for metamaterial design," 24.2.2020.
- [22] Z. Sheng and V. V. Varadan, "Tuning the effective properties of metamaterials by changing the substrate properties," *Journal of Applied Physics*, vol. 101, no. 1, p. 014909, 2007.
- [23] D. Hu, R. Zhao, L. Du, and Y. Wang, "Design, simulation and measurement of an omega metamaterial at x band," 26.2.2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8420921>
- [24] L. Di Palma, F. Bilotti, A. Toscano, and L. Vegni, "Design of a waveguide diplexer based on connected bi-omega particles," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 22, no. 3, pp. 126–128, 2012.
- [25] D. Ramaccia, F. Bilotti, A. Toscano, and M. Barbuto, "Complete transmission through short waveguide bends using connected bi-omega particles," in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. IEEE, 72015, pp. 256–257.
- [26] S. Dubey and V. J. Dongre, "Dual band patch antenna with enhanced gain using metamaterial," 26.2.2020.
- [27] C. Guo, J. Li, J. Xu, and H. Li, "An x-band lightweight 3-d printed slotted circular waveguide dual-mode bandpass filter," in *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. IEEE, 72017, pp. 2645–2646.
- [28] K. V. Hoel, S. Kristoffersen, J. Moen, K. G. Kjelgard, and T. S. Lande, "Broadband antenna design using different 3d printing technologies and metallization processes," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 42016, pp. 1–5.
- [29] M. Schwentenwein, P. Schneider, and J. Homa, "Lithography-based ceramic manufacturing: A novel technique for additive manufacturing of high-performance ceramics," *Advances in Science and Technology*, vol. 88, pp. 60–64, 2014.
- [30] A. Vallecchi, S. Chu, E. Shamonina, and C. J. Stevens, "Optimization of meta-atoms for 3d printed metamaterial structures," in *2018 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*. IEEE, 82018, pp. 410–412.

- [31] G. McKerricher, A. Nafe, and A. Shamim, "Lightweight 3d printed microwave waveguides and waveguide slot antenna," in *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & US-NC/URSI National Radio Science Meeting*. IEEE, 2015, pp. 1322–1323.
- [32] K. Lomakin, M. Sippel, K. Helmreich, and G. Gold, "Design and analysis of 3d printed slotted waveguides for d-band using stereolithography and electroless silver plating," in *2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*. IEEE, 2020, pp. 177–180.
- [33] Kai Parthy, "Frage / polymer backbone," Graz, 17.02.2021.
- [34] *2011 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSP-CC)*. IEEE, 2011.
- [35] *2009 Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*. IEEE, 2009.
- [36] *2013 7th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS): 16 - 21 Sept. 2013, Bordeaux, France*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=6799450>
- [37] H. Henke, *Elektromagnetische Felder: Theorie und Anwendung*, ser. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg and s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2001. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-06975-2>
- [38] K. Finkenzerler, *RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC*, 5th ed. München: Hanser, 2008. [Online]. Available: http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3099014&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- [39] Rogers Corporation, "Ro4000 series: High frequency circuit materials," S. Roosevelt Avenue, Chandler, AZ 85226, 2018. [Online]. Available: <https://www.rogerscorp.com/-/media/project/rogerscorp/documents/advanced-connectivity-solutions/english/data-sheets/ro4000-laminates-ro4003c-and-ro4350b---data-sheet.pdf>
- [40] Rohde & Schwarz, "R&S@zV-z52/-z53/-z54/-z55 technical information: Technical information," Oct-2014. [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/us/manual/r-s-zv-z52-z53-z54-z55-technical-information-manuals-gb1_78701-29180.html
- [41] Starrett, "Datasheet 798 electronic slide calipers," Mai 2010. [Online]. Available: [https://www.starrett.com/vdoc/798%20Electronic%20Slide%20Calipers%20\(Bulletin%20386\)](https://www.starrett.com/vdoc/798%20Electronic%20Slide%20Calipers%20(Bulletin%20386))
- [42] J. Kohler, W. Bosch, E. Leitgeb, and R. Teschl, "Field bending omega-type metamaterial lens for ku band," in *2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [43] Wikipedia, "Covid-19-pandemie," 15.02.2021. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/COVID-19-Pandemie>
- [44] Proto-Pasta, "Magnetic iron pla: Technical data sheet," <https://www.proto-pasta.com>, 2020. [Online]. Available: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0717/9095/files/TDS__Iron_PLA_1.0.1.pdf?1771
- [45] H. Stöcker, Ed., *Taschenbuch der Physik [Medienkombination]Ä: Formeln, Tabellen, Übersichten*, 4th ed. Thun: Deutsch.

-
- [46] P. A. Tipler and D. Gerlich, Eds., *Physik*, neuaufl. ed., ser. Spektrum Lehrbuch. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl., 2004.
- [47] G. Vertesy, I. Tomas, B. Skrbek, T. Uchimoto, and T. Takagi, “Investigation of cast iron matrix constituents by magnetic adaptive testing,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 55, no. 3, pp. 1–6, 2019.
- [48] Supermagnete.at, “Würfelmagnet 12 mm: Datenblatt artikel w-12-n,” <https://www.supermagnete.de>, 23.11.2011. [Online]. Available: https://www.supermagnete.de/data_sheet_W-12-N.pdf
- [49] —, “Quadermagnet 8 x 4 x 3 mm: Datenblatt artikel q-08-04-03-n,” <https://www.supermagnete.de>, 23.11.2011. [Online]. Available: https://www.supermagnete.de/data_sheet_Q-08-04-03-N.pdf
- [50] —, “Quadermagnet 10 x 10 x 2 mm: Datenblatt artikel w-12-n,” <https://www.supermagnete.de>, 23.11.2011. [Online]. Available: https://www.supermagnete.de/data_sheet_W-12-N.pdf
- [51] J. Köhler, W. Bösch, E. Leitgeb, R. Teschl, and D. J. Pommerenke, “Mixing of commercially available 3d printing filaments for novel rf components,” in *2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2020, pp. 1–6.
- [52] Johann Taag, 2021. [Online]. Available: <http://www.janbex.eu/>
- [53] *2016 22nd International Conference on Applied Electromagnetics and Communications (ICECOM)*. IEEE, 92016.
- [54] S. Aranda, *3D Printing Failures: 2020 Edition: How to Diagnose and Repair ALL Desktop 3D Printing Issues*. Independently Published, 2019.
- [55] pasternack.com, “Waveguide size: The engineer’s rf source.” [Online]. Available: <https://www.pasternack.com/pages/Technical-Charts/Waveguide-Size.pdf>
- [56] Supermagnete.at, “Würfelmagnet 5 mm w-05-n50-n: Datenblatt artikel w-05-n50-n,” <https://www.supermagnete.de>, 10.03.2017. [Online]. Available: https://www.supermagnete.de/data_sheet_W-05-N50-N.pdf
- [57] Rohde & Schwarz, “Zv-z2xx calibration kits,” January 2013. [Online]. Available: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZV-Z2xx_dat_sw_en.pdf
- [58] Christoph Laimer, “3d-printed halbach motor - building instructions,” 03.05.2017. [Online]. Available: <https://youtu.be/YsSm65DAcCg?t=508>
- [59] *2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. IEEE, 9172020.
- [60] Proto-Pasta, “Brass fill, bronze fill, copper fill htpla: Technical data sheet,” <https://www.proto-pasta.com>, 2020. [Online]. Available: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0717/9095/files/TDS__BrassBronzeCopper_HTPLA_1.0.0.pdf?1771
- [61] —, “Electrically conductive composite pla: Technical data sheet,” 2020. [Online]. Available: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0717/9095/files/TDS__Translucent_Sparkly_HTPLA_1.0.0.pdf?1759

- [62] Kai Parthy, “Produktentwicklung - innovationen / ing.- büro kai parthy,” 2009. [Online]. Available: <http://cc-products.de/contact.html>
- [63] Matthias Hopfner, “Inspection certificate 3.1 according to en 10204: Carbonyl iron powder ew,” 11.07.2014.
- [64] Kai Parthy, “Safety data sheet,” 10.10.2017. [Online]. Available: https://filament2print.com/gb/index.php?controller=attachment&id_attachment=351
- [65] “Laybrick sandstone filament - 1.75 mm - 250g | 3d prima - 3d-skrivare till bra pris samt tillbehör,” 24.05.2021. [Online]. Available: <https://www.3dprima.com/se/filament/special-filament-1-75mm/laybrick-sandstone-filament-1-75-mm-250g/a-20287/>
- [66] Zesty Technology, “Nimble v1: Nimble documentation,” 2017. [Online]. Available: <https://zestytechnology.readthedocs.io/en/latest/nimble/nimblev1/index.html>
- [67] “R&s zv-z2xx calibration kits specifikation: Rohde & schwarz zv-z32 network analyzer calibration kit,” January 2013. [Online]. Available: <https://www.conrestestequipment.com/wp-content/uploads/2019/11/ZV-Z218.pdf>
- [68] J. Kohler, W. Bosch, E. Leitgeb, R. Teschl, and D. J. Pommerenke, “Mixing of commercially available 3d printing filaments for novel rf components,” in *2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. IEEE, 9172020, pp. 1–6.
- [69] Supermagnete.at, “Quadermagnet 5x5x2mm: Datenblatt artikel q-05-05-02-n,” <https://www.supermagnete.de>, 08.03.2017. [Online]. Available: https://www.supermagnete.de/data_sheet_Q-05-05-02-N.pdf
- [70] R. Bernhaupt, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ser. ACM Digital Library. New York, NY, United States: Association for Computing Machinery, 2020.
- [71] The Action Lab, “Magnetic locking without a superconductor!” 07.01.2021. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=V5FyFvgxUhE>
- [72] Hamdi Ucar, “Polarity free magnetic repulsion and magnetic bound state,” 2009. [Online]. Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2009/2009.07082.pdf>
- [73] Joseph Prusa, “Inspect your filament online,” 2021. [Online]. Available: <https://prusament.com/>
- [74] Thomas Sanladerer, “Make your own inline filament diameter sensor (under \$5)!” www.YouTube.com, 19.02.2021. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=RYgdLPe_T0c
- [75] Technical Data Sheet, “: Prusament petg by prusa polymers,” <https://prusament.com>, 2021. [Online]. Available: https://prusament.com/media/2020/01/PETG_TechSheet_ENG.pdf
- [76] Protopasta, “Brass fill, bronze fill, copper fill htpla,” 2020. [Online]. Available: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0717/9095/files/TDS__BrassBronzeCopper_HTPLA_1.0.0.pdf?1771
- [77] PLA Filament - 1,75 mm - Anthrazit V2 - Refill 800 g, <https://www.dasfilament.de>, 2021. [Online]. Available: <https://www.dasfilament.de/filament-refill/pla-1-75-mm/446/pla-filament-1-75-mm-anthrazit-v2-refill-800-g?c=54>

- [78] J. Kohler, W. Bosch, E. Leitgeb, R. Teschl, and D. J. Pommerenke, "Manipulating iron filament with permanent magnets for fdm printing for x-band," in *2020 International Conference on Broadband Communications for Next Generation Networks and Multimedia Applications (CoBCom)*. IEEE, 72020, pp. 1–7.
- [79] "Wisdom workshop | contel 2019," 11.09.2020. [Online]. Available: <https://www.contel.hr/2019/wisdom-workshop/index.html>
- [80] Prof. Dr. -Ing. habil. G. Mönich, "Antennen und wellenausbreitung (aw1): Skript," Ph.D. dissertation, Technische Universität, Berlin.
- [81] "Ansys q3d extractor: 3d quasi-static field solver," 2020. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-q3d-extractor/q3d-extractor-capabilities>
- [82] Ansoft, "Hfss: 3d electromagnetic field simulator for rf and wireless design," 2020. [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>
- [83] H.-J. Bungartz, M. Griebel, and C. Zenger, *Einführung in die Computergraphik: Grundlagen, Geometrische Modellierung, Algorithmen*, ser. Mathematische Grundlagen der Informatik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1996. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-92925-9>
- [84] Thomas Jedrzejak, "Aufbau historischer städtischer 3d-szenarien für eine nutzung unter google earth, basierend auf daten von terrestrischem laserscanning, photogrammetrie und archivinformationen. diplomarbeit an der hs bochum," Juli 2008.
- [85] H. B. Kief and H. A. Roschiwal, *CNC-Handbuch 2009/2010: CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Simulation, Fachwortverzeichnis*. München: Hanser, 2009.
- [86] Ultimaker, "Ultimaker cura," 2011 - 2020. [Online]. Available: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>
- [87] "Makerbot print," One MetroTech Center, 21st Fl, Brooklyn, NY 11201 USA, 2009-2020. [Online]. Available: <https://www.makerbot.com/3d-printers/apps/makerbot-print/download/>
- [88] Prusa Research, "Prusa slicer," 2020. [Online]. Available: <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>
- [89] "Simplify3d wiki," 26 February 2020. [Online]. Available: https://simplify3dwiki.com/w/index.php/Simplify3D_Wiki
- [90] "Marlin (firmware)," 17 October 2020. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Marlin_\(firmware\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Marlin_(firmware))
- [91] "What is marlin?" 2020. [Online]. Available: <https://marlinfw.org/docs/basics/introduction.html>
- [92] 3D Printing Industry, "Gina häufige is the founder and main developer of octo-print," Retrieved 22 February 2019. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/interview-gina-hausge-creator-octoprint-reprap-10th-anniversary-134013/>
- [93] Prof. Mönich, "Antennen- und wellenausbreitung (aw1)," *TU Berlin (Skript)*, vol. 2008.
- [94] S. A. Ramakrishna, "Physics of negative refractive index materials," *Reports on Progress in Physics*, vol. 68, no. 2, pp. 449–521, 2005.

- [95] Niels Boeing, 28. Dezember 2009. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Metamaterial>
- [96] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, no. 2075, 1999.
- [97] K. Petermann, "Hochfrequenztechnik 1 + 2: Volesungsskript," 2008.
- [98] Florian Ohnimus, "A comparative study of integrated antennas for 60 ghz applications." [Online]. Available: https://www.izm.fraunhofer.de/en/news_events/tech_news/florian_ohnimus_vomfraunhoferizmerhaeltenerwin-stephan-preis.html
- [99] Georg Pichler, "Neue herzpumpe aus dem 3d-drucker." [Online]. Available: <https://www.presstext.com/news/20120530024>
- [100] A. Gebhardt, *Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, 5th ed. München: Hanser, 2016. [Online]. Available: <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446444010>
- [101] Carl R. Deckard, "Apparatus for producing parts by selective sintering." [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US5597589?q=US5597589>
- [102] filamentworld.de, "Fünf 3d druck tipps mit nylon-filament." [Online]. Available: <https://www.filamentworld.de/fuenf-3d-druck-tipps-mit-nylon-filament/>
- [103] Thomas Sanladerer, "Easier fiber-reinforced resin printing! stronger and conductive resin prints?" [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=BQWV12kIy6E>
- [104] Gunther Kirsch, "Formlabs fuse 1 sls 3d printer demo! adam savage's tested." [Online]. Available: <https://youtu.be/IrFYt3uUdrI?t=536>
- [105] sculpteo, "Stereolithography (sla)." [Online]. Available: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-technologies-and-processes/compare-fdm-sla-sls-dls/>
- [106] "Supervolcano nozzles," 2020. [Online]. Available: <https://e3d-online.com/collections/nozzles/products/supervolcano-nozzles>
- [107] Thomas Hermann, "Hoch much abrasive filaments damage your nozzle! in this video we'll investigate how 3d printers nozzles wear and how print-quality is affected by that." 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=uvlMeTnjriQ&t=711s>
- [108] Bondtech AB, "Drivegear kits," 2020. [Online]. Available: <https://www.bondtech.se/en/product/drivegear-kits/>
- [109] W. König and F. Klocke, "Fertigungsverfahren."
- [110] Stefan Hermann, "The best 3d printing material? comparing pla, petg & asa (abs) - feat. prusament by josef prusa," www.YouTube.com, Feb, 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ycGDR752fT0&t=423s>
- [111] Reprap Wiki, "Pla," 4 April 2011. [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20110716065424/http://reprap.org/wiki/PLA>
- [112] R. A. Giordano, B. M. Wu, S. W. Borland, L. G. Cima, E. M. Sachs, and M. J. Cima, "Mechanical properties of dense polylactic acid structures fabricated by three dimensional printing," *Journal of biomaterials science. Polymer edition*, vol. 8, no. 1, pp. 63–75, 1996.

- [113] Stefan Hermann, “A 4th dimension for 3d prints - colorfabb light-weight, foaming pla,” [www.YouTube.com](https://www.youtube.com/watch?v=2tmgzwgi2UI), Feb, 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=2tmgzwgi2UI>
- [114] —, “Why you need to dry your filaments!” 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=FAXUjZZER5E>
- [115] —, “Vacuum vs dehydrator! what’s the best way to dry filament?” [www.YouTube.com](https://www.youtube.com/watch?v=eqQRN9TUw08), Apr 25 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=eqQRN9TUw08>
- [116] “Deluxe dörroautomat.” [Online]. Available: <https://www.wogibtswas.at/p/17223416>
- [117] L. BigtreeTechnology Co., “Bigtreotech skr v1.3 anleitung,” 15.03.2019. [Online]. Available: https://shop.geckosys.ch/shop/ProdukteDetails/BIGTREEEOTECH%20SKR%20V1_3%20Anleitung%20deutsch.pdf
- [118] Trinamic, “Tmc2209 datasheet: Step/dir drivers for two-phase bipolar stepper motors up to 2.8a peak-stealthchop™ for quiet movement-uart interface option-sensorless stall detection stallguard4.” Hamburg, Germany, 2019. [Online]. Available: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC2209_Datasheet_V103.pdf
- [119] B. G. Lipták, *Process control*, 3rd ed., ser. Instrument engineers’ handbook. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2000, vol. / Béla G. Lipták ed.-in-chief ; 2.
- [120] CNC Kitchen, “Design & cast your own hotend silicone socks!” YouTube, Juli 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=O5UiXky85hA>
- [121] TFC Troll Factory, “Produktinformationen "tfc dubliersilikon s-rot mittelhart shore 33 1:1 hb": A-nr.: Tfc5020,” 2019. [Online]. Available: <https://trollfactory.de/produkte/silikon-kautschuk/haertegrad-shore/mittel-shore-a26-45/5698/tfc-dubliersilikon-s-rot-mittelhart-shore-33-1-1-hb>
- [122] Extrusion Systems for 3D Printing, “V6 all-metal-hotend: Illustration vom aufbau.” [Online]. Available: <https://e3d-online.com/collections/hotends/products/v6-all-metal-hotend>
- [123] E3D-Online, “V6 troubleshooting: Common solutions to issues with your v6 hotend.” [Online]. Available: https://e3d-online.dozuki.com/Wiki/V6_Troubleshooting
- [124] David Petsel, “Petsfang modular: Petsfang duct for cr10 micro-swiss/stock/e3dv6/volcano/tevetornado /tarantula hot end/e3dv6 cnc mount & 5015 fan bullseye,” 2018. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2759439>
- [125] CNC Kitchen, “Much stronger 3d prints due to less cooling! testing pla & petg,” YouTube, 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Bl2ESvtBiLo>
- [126] Creative Tools, “#3dbenchy - the jolly 3d printing torture-test by creativetools.se,” Halmstad, Sweden, 2015. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:763622>
- [127] Olivier RT, “Ultimate 3d printer cooling fan - 5015 vs berd-air vs 300cfm mega cooling,” YouTube, Aug 5, 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Kyxqv4XoolI>
- [128] Torsten Juch, “Fanduct for mk3 bmg e3d v6 - no support,” Thingiverse, 2020. [Online]. Available: https://www.thingiverse.com/thing:4491533?fbclid=IwAR2ZYZ41gSML1Pndxob4QMIRIKOBq_ErL3kqCjqN2AX8ke3za6f8xoUewQw

- [129] ebmpapst, "Produktdatenblatt148-19/14," 06.02.2019. [Online]. Available: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/de/001926265DS01/datenblatt-1926265-ebm-papst-9592207002-radialluefter-24-v-28-mh.pdf>
- [130] Wham Bam Systems, "Flexible build system," 2018. [Online]. Available: <https://whambamsystems.com/flexible-build-system>
- [131] ANTClabs, "Bltouch :: Auto bed leveling sensor for 3d printers," April 2017. [Online]. Available: https://cdn-3d.niceshops.com/upload/file/BLTouch_Manual.pdf
- [132] Woody1978, "Ikea lack enclosure creality ender 3 compilation," www.thingiverse.com, 04.09.2018. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:3083358>
- [133] IKEA, "Ikea lack," 2021. [Online]. Available: <https://www.ikea.com/de/de/p/lack-beistelltisch-weiss-30449908/>
- [134] Uriah Welcome, "Temperaturefailsafe," 14.04.2017. [Online]. Available: <https://plugins.octoprint.org/plugins/temperaturefailsafe/>
- [135] Hughe Chung, "Retraction test," <https://www.thingiverse.com>, 2015. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:909901>
- [136] Stefan Hermann, "Can you 3d print trimmer line?!" www.YouTube.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=XsrkFiuQEZM>
- [137] Syn Ja, "Fast informative temperature tower," www.thingiverse.com, 2018. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:3127899>
- [138] thierryzoller, "Junction deviation," Github, Apr 9 2020. [Online]. Available: <https://github.com/pinguinpflieger/ASWX1-FW-MOD/issues/9>
- [139] Marlin, "K-factor calibration pattern," 2020. [Online]. Available: https://marlinfw.org/tools/lin_advance/k-factor.html

A Anhang

In dem folgenden Abschnitt werden alle relevanten Themen für das Verständnis dieser Arbeit im Detail erläutert. Eingegangen wird auf die physikalischen Grundlagen, die verwendeten Werkzeuge und Programme, wie diese Programme für diese Arbeit verwendet wurden und was zu beachten ist.

Schwerpunkt sind hierbei speziell für FDM die notwendigen Modifikation der Prozesse, die notwendig für diese Arbeit geworden sind, da es sich bei dieser Arbeit um kein konventionelles Verfahren handelt, welche in der Literatur zu finden sind. Hierbei sei zu betonen, dass eine Umsetzung dieser Herstellungsverfahren mit gängigen Methoden nicht möglich, da eine Vielzahl von physikalischen Phänomen auftreten werden und den Arbeitsfluss behindern werden. Die notwendigen Änderungen wurden in einer Vielzahl an Überlegungen und Versuchen erarbeitet. Die Zusammenstellungen dieser Ergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen und können somit mit geringem Aufwand reproduziert werden, um somit die Vorteile zur Weiterverwendung nutzen zu können. Die Weiterentwicklungen sind so nicht in der Literatur zu finden und sind ebenfalls vorteilhaft für die normale Verwendung der Gerätschaften, da dies zu besseren Herstellungsergebnissen führt oder den Prozess energiesparender macht. Hierbei sollen alle diese Weiterentwicklungen als Ganzes gesehen werden, wobei teilweise einzelne hinzugefügte Komponenten voraussetzen, dass andere Bauteile ebenfalls hinzugefügt werden müssen (e.g. schwerer Extruder setzt die Verwendung einer doppelten Z-Achse voraus).

Der verwendete FDM-Drucker wurde speziell für diese Arbeit entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein hochpräzises Fertigungsgerät, dessen Qualität abhängig vom langfristigen Zusammenspiel der individuellen Komponenten ist. Hierbei zu betonen, dass es stets Verbesserungspotential am Gerät geben wird und keine Voraussage über die langfristigen Auswirkungen gegeben werden kann. So wurde sich beispielsweise im Rahmen dieser nicht auseinandergesetzt, welche Auswirkung die EMV auf die Herstellungsqualität hat. Weitere Untersuchung sind hierfür notwendig.

Die Struktur des Anhang gliedert sich wie folgt:

- Physik von Metamaterial (Kpt.: D)
- Funktionsweise von 3D-Druckern (Kpt.: E)
- Werkzeuge der Feldberechnung (Kpt.:B)
- Werkzeuge des 3D-Drucks (Kpt.: C)
- Modifikationen für FDM (Kpt.: F)
- Liste der Veröffentlichungen dieser Arbeit (Kpt.: F)

B Werkzeuge der Feldberechnung

Im Rahmen dieser Arbeit kamen eine Vielzahl unterschiedlicher Werkzeuge zum Einsatz, die in diesem Kapitel kurz charakterisiert werden, um diese in fortlaufenden Kapiteln zu referenzieren. Dieses Kapitel teilt sich in zwei Teilbereiche auf. Im Ersten werden die Werkzeuge der numerischen Feldberechnung der Hochfrequenztechnik beschrieben. Im Zweiten wird auf die Werkzeuge des 3D-Drucks eingegangen. Charakterisierung und Anfertigung von hochfrequenten Komponenten (e.g. Antennen, Filtern) erfolgt mittels computergestützten numerischen Lösungsverfahren. Somit können vorab Rückschlüsse auf die Eigenschaften und das Verhalten einer Struktur gezogen werden. Die Berechnung und Formulierung der elektrischen und magnetischen Felder erfolgt anhand der Maxwellgleichung, anhand von drei Kategorien:

- statischer Ansatz
- quasi-statischer Ansatz
- Full-Wave Ansatz

Diese Ansätze sollen im folgenden Abschnitt genauer erklärt werden.

B.1 Berechnungsansätze

Alle Berechnungen beruhen auf den Maxwellischen Feldgleichungen, werden aber in den Programmen nochmals differenziert angewandt.

Der **statische Lösungsansatz** bezieht sich nur auf Betrachtungen, die sich nicht zeitlich oder frequenzabhängig verändern. Mit dieser Methode ist es möglich, über eine zeitlich unabhängige Ladungsverteilung oder Stromdichte die statischen Felder zu ermitteln. Dadurch ist es möglich Kapazitäten und Induktivitäten von beispielsweise Antennen zu ermitteln, anhand der entstehenden Felder und der gespeicherten Feldenergie. Es gilt für die Berechnung des E -Feldes und des H -Feldes:

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \rightarrow \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_E \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = 0 \rightarrow \nabla \times \vec{E} = \vec{J}_H \quad (\text{B.2})$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{q_E}{\epsilon} \quad (\text{B.3})$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \frac{q_H}{\mu} \quad (\text{B.4})$$

Hierbei repräsentiert \vec{E} das elektrische Feld und \vec{H} das magnetische Feld. Die Dichte der Ladungen wird durch \vec{J}_E für das elektrische Feld repräsentiert und \vec{J}_H für das magnetische Feld. Analog dazu gelten die Dielektrizitätskonstante ϵ für die elektrische Leitfähigkeit und Permeabilitätskonstante μ für die magnetische Leitfähigkeit. Diese werden in ein Verhältnis mit der elektrischen Ladung q_E und der magnetischen Ladung q_H gebracht. Zu beachten ist hierbei, dass die magnetische Ladung nur ein mathematisches Hilfsmittel darstellt und der Maxwellischen Gleichung zu ihrer Symmetrie verhelfen. Magnetische Ladung besitzen keine reale Existenz.

Mit diesem Verfahren ist es möglich die Ladungsverteilung in einem statischen Feld zu ermitteln.

Der **quasi-statische Lösungsansatz** betrachtet bereits die Felder in Abhängigkeit von Zeit und Frequenz, aber zeitlich langsam veränderlich. Das bedeutet, dass die Ausbreitung der elektromagnetischen

Felder verhindert wird, sowie frequenzabhängige Effekte (e.g. *Skin-Effekt*, *Proximity-Effekt*) beobachtet werden können. Als Hintergedanken für die Maxwell'schen Gleichungen wird hier angenommen, dass die elektrischen Leitungsströme \vec{J}_E die Verschiebungsströme stark überwiegen, so das gilt:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \vec{E} \ll \vec{J}_E \quad (\text{B.5})$$

Und resultierend daraus für die Maxwell'schen Gleichungen:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_E \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \times \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H} + \vec{J}_M. \quad (\text{B.7})$$

Der **Full-Wave-Lösungsansatz** betrachtet die Wechselwirkung von \vec{E} -Feldern und \vec{H} -Feldern in Abhängigkeit von Frequenz und Zeit. Somit kann die Wellenausbreitung im Leiter und im Raum dargestellt werden, was vor allem wichtig für den Designprozess ist. In der Berechnung werden aus den beiden Maxwell'schen Gleichungen B.8 und B.9 die inhomogene Wellengleichung B.10 hergeleitet [80, S. 4-5]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \times \vec{H} = \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \vec{E} + \vec{J}_E \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H} + \vec{J}_M \quad (\text{B.9})$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varepsilon \mu \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{J}_E + \nabla \times \vec{J}_M. \quad (\text{B.10})$$

B.2 Finite-Elemente-Methode (FEM)

Um den statischen, den quasi-statischen und den Full-Wave-Lösungsansatz berechnen zu können, wird das Werkzeug der **Finiten-Elemente-Methode** verwendet. Dieses wird im folgenden Kapitel erläutert. Der mittels *Computer-Aided-Design* (CAD) erstellte Aufbau wird in mehrerer Tetraeder unterteilt, ein sogenanntes *Mesh* (Abb.: B.1). Entlang der Tetraederseiten können die Maxwell'schen Gleichungen mit den angegebenen Randbedingungen berechnet werden. Die Feldfunktionen ermöglichen so Rückschlüsse auf die Feldstärke im Inneren des Tetraeders.

Als Ausgangsbedingung sind die Feldlösungen unbekannt, sowie in den Tetraederelementen unterschiedlich. Durch eine lineare Annäherung wird aus der Anzahl N der Elemente, die Funktion a_N für jeder Element generiert, um so die gesuchte Feldfunktion $f(x)$ zu ermitteln:

$$f(x) = \sum_N a_N f_N(x). \quad (\text{B.11})$$

Um daraus das gewünschte \vec{E} -Feld oder \vec{H} -Feld zu erhalten, werden alle Elemente integriert und analog eine Matrix gebildet. Wie anhand dieser Beschreibung bereits ersichtlich, sind solche Simulationen mit viel Rechenaufwand verbunden, was zu gleich ein Nachteil ist. Denn diese *FEM*-Lösungsverfahren sind zeitintensiv und leistungshungrig.

Ein wichtiges Kriterium zur Lösung der Differentialgleichungen sind die Randbedingungen (engl.: *Boundaries*). Diese repräsentieren die elektrische und magnetische Leitfähigkeit in den übergeordneten Räumen. Sie werden ebenfalls auch als „Wände“ der Simulation bezeichnet. Die Randbedingungen werden von den Programmen selbst festgelegt. So stellt im Programm Q3D [81] die Struktur selbst die Boundary dar.

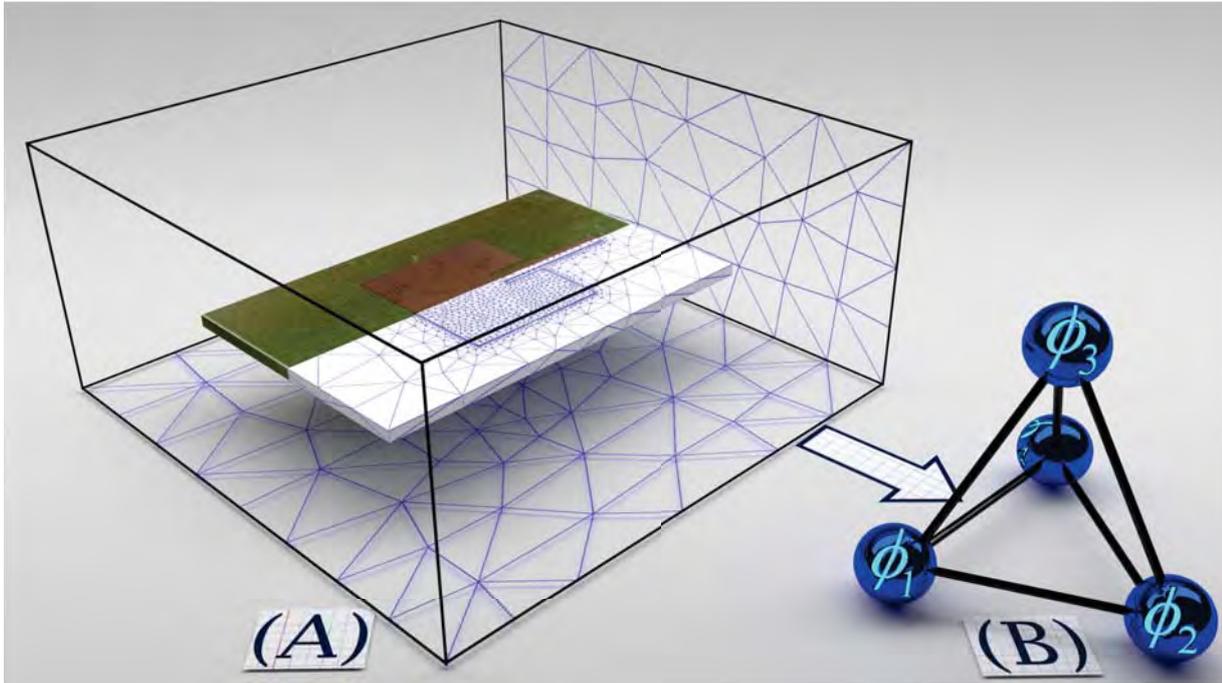


Abbildung B.1: Illustration der Auflösung eines CAD-Modells in Tetraeder zur Weiterverarbeitung. (A) Patch-Antenne mit Verteilung der Tetraeder, (B) Zusammensetzung eines einzelnen Tetraeders.

HFSS [82] stattdessen begrenzt eine äußere Box die Struktur, welche diskretisiert wird. Die Randbedingungen können perfekt elektrisch (Abk.: PEC, engl.: *perfect electric conductor*) sein, perfekt magnetisch leitend (Abk.: PMC, engl.: *perfect magnetic conductor*) sein oder beides.

B.3 Full-Wave-Simulator HFSS

Für die Studien dieser Arbeit wurde das Programm *High-Frequency-Structure-Simulator* (HFSS)²⁵ der Firma *Ansys* verwendet. HFSS ist ein 3D Full-Wave-Field-Solver, in welchem Strukturen nachgebaut und Materialparametern zugewiesen werden. Dieser Aufbau kann nun elektrisch angeregt werden, wobei es mit sogenannten Ports versehen wird, die beispielsweise eine Anregung über einen Wellenleiter simulieren. Die resultierenden ausbreitenden Felder im Aufbau richten sich dabei nach der Impedanz am Punkt der Einspeisung. Auf diese Weise können Reflektionen am Eingang und Ausgang des Ports vermieden werden, die in Fehlanpassungen resultieren würden.

Die Felder innerhalb des Aufbaues werden mit der beschriebenen FEM (Abs.: B.2) berechnet, nur das hierbei sich das Programm dem s.g. adaptiven Mesh-Refinement behilft. So wird der Feinheitsgrad, in Form der Tetraederzahl, in mehreren Lösungsdurchläufen um einen festgelegten Prozentsatz erhöht. Mit dieser Methode wird eine hohe Genauigkeit in der Simulation erreicht. Das Mesh wird hierbei besonders in den Bereichen feiner aufgelöst, wo die Feldveränderungen am größten sind. Kriterium für die Qualität einer Berechnung ist die Konvergenz, die sich stetig mit der Anzahl der Lösungsdurchläufe verändert. Hierfür müssen unterhalb eines bestimmten Levels Δ_s die Ergebnisse stagnieren, um als Exakt bezeichnet werden zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für die Analyse eine Kombination verschiedener Randbedingungen gewählt. Optimal hierbei wäre es, dass die erzeugten Felder reflektionsfrei absorbiert werden und ein unendlich großer Raum um das Modell vorgetäuscht werden könnte. Da die Randbedingungen aber letztendlich

²⁵Version 18.0.0 als Teil des Simplorer-Pakets Electromagnetics Suite

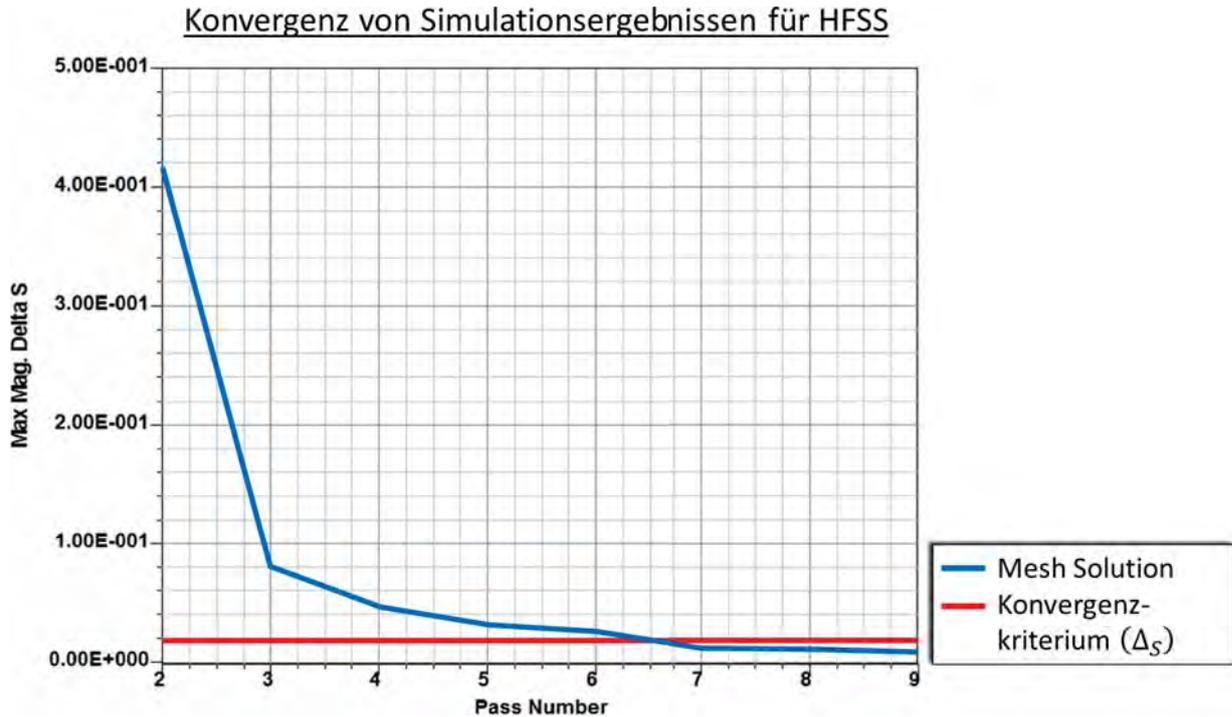


Abbildung B.2: Konvergenz einer HFSS-Lösung, aufgetragen über die Anzahl der Durchläufe (engl.: Passes).

doch von äußeren Wänden als abschließender Raum begrenzt werden, müssen diese Einflüsse ebenfalls berücksichtigt werden. Um dieses zu umgehen, wurde sich der Umwandlung der Eigenschaften der λ -, $\lambda/2$ - oder $\lambda/4$ -Transformatoren bedient. Der Abstand zwischen Simulationsmodell und begrenzender Außenbox wird in diesem Verhältnis und der angewendeten Frequenz dimensioniert. Da der Rechenaufwand und der verbundene Zeitaufwand abhängig von der Größe des Modells ist, wird häufig ein Abstand von $\lambda/4$ der Nutzfrequenz verwendet²⁶. Somit wird verhindert, dass Reflektionen an der Boundary die Ergebnisse im Aufbau zusätzlich beeinflussen.

Das Konvergenzkriterium Δ_s dieser Arbeit war eine Mindestzahl von drei Lösungsdurchläufen und einem geeigneten Wert. Die Abb. B.2 verdeutlicht dieses.

²⁶Abstand des Modells zur Boundary

C Werkzeuge des 3D-Drucks

Die Fertigung von 3D-gedruckten Objekten erfolgt anhand von mehreren computergestützten Teilschritten. Im ersten Schritt erfolgt die Transformation von der analogen in die digitale Welt, mit der Hilfe von *Computer-Aided Design* (CAD). Hierbei wird ein auf Vektoren basierendes dreidimensionales Objekt erstellt, auf dessen Prozess hier im Detail eingegangen wird. Aufbauend darauf erfolgt die Übersetzung dieses Objekts in Maschinensprache, in welchem dem 3D-Drucker Anweisungen zur Herstellung gegeben werden, als s.g. *GCode*-Programmiersprache. Parallel zum Herstellungsprozess erfolgt die Überwachung des Herstellungsprozesses. Dieses gibt Einblick und Rückschluss auf die Herstellung, also auch die Möglichkeit einer Schnittstelle für die Geräte-Nutzer-Kommunikation parallel zum Betriebsablauf. Alle Vorgänge lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

- Design
- Slicing
- Communication and Monitoring

Diese Ansätze sollen im folgenden Abschnitt genauer erklärt werden.

C.1 Erstellung von 3D-Modellen

Alle auf computergestützten basierenden *Designs* fallen unter den Oberbegriff *CAD* (engl.: computer-aided design). Hierbei erfolgt vektororientierte geometrische Modellierung, in welchen anhand aus Linien zweidimensionalen Flächen aufgespannt werden, die in einem Drahtgittermodell resultieren [83, S. 6f.]. Insbesondere kommen hierfür Geometrien wie Geraden, Freiformen, Kreisbögen und einzelne Punkte im Raum zum Einsatz. Aufbauend darauf werden komplexere Modelle kreiert (Abb.: C.1).

Die dreidimensionale Beschreibung eines Objekts ist die Voraussetzung für die Verwendung von CAD-Programmen und unterstützt damit die virtuelle Produktentwicklung, die entsprechend umfangreiche Übungen mit den Modellierungswerkzeugen voraussetzt. So sei im Rahmen dieser Arbeit zu betonen, dass es sich hierbei maßgeblich um einen kreativen Schaffensprozess handelt, dessen Attribute mittels Mathematik in ein 3D-Modell transformiert werden. Die Modellierung gestaltet sich hierbei aus darstellungsbezogenen Zeichnungen, Fotografien, Montage- oder Bedienungsanleitungen, welche mittels räumlicher Operationen transformiert werden und somit digital dargestellt werden.

Für diese Arbeit wurden die folgenden Verfahren zur Darstellung verwendet, **Direkte Modellierung** und **Parametrische Modellierung**.

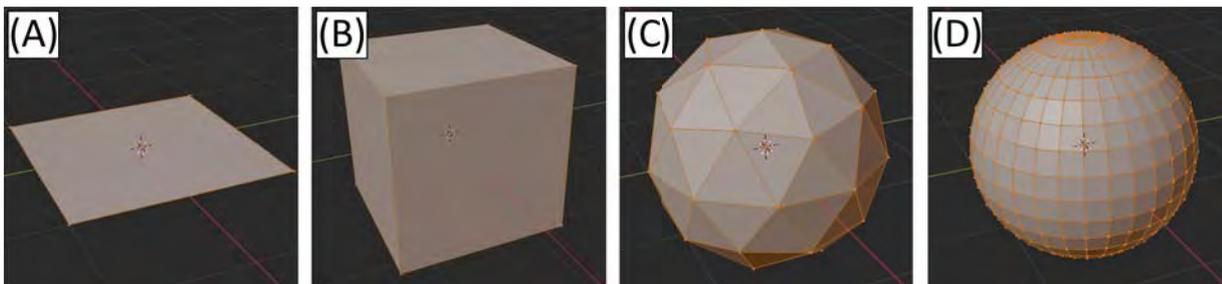


Abbildung C.1: Drahtgittermodelle im Programm *Blender*, die zur Modellierung verwendet werden. (A) Ebene, (B) Würfel, (C) Ikosaeders, (D) angenäherte Kugel.

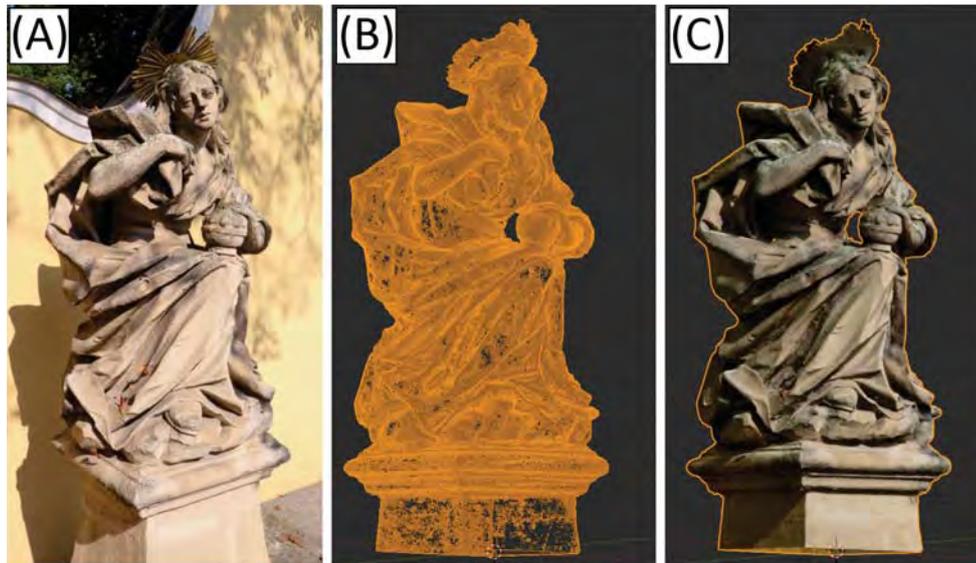


Abbildung C.2: Erstelltes 3D-Modell der *Jungfrau Maria in GRAZ* mittels Photogrammetrie und Direkter Modellierung. (A) Foto, (B) Punktwolke aus erstelltem Foto in *Blender*, (C) Punktwolke mit versehenen Texturen als Farbwerte in *Blender*.

Bei der **Direkten Modellierung** (engl.: explicit modeling) erfolgt die Erfassung eines geometrischen Elements anhand einer Skalierung (e.g. Messschieber²⁷), wodurch das geometrische Element einen festen Wert erhält. Entsprechend dem verwendeten Programm, erfolgt die Änderung interaktiv, in dem beispielsweise mittels Maus einzelne oder viele Stützpunkte im Modell verändert werden. Somit ist es möglich realitätsnahe Objekte zu erstellen, die nicht nur eine Kombination von geometrischen Grundkörpern ist. Zur Illustration sei hierbei auf das in dieser Arbeit verwendete Programm *Blender*²⁸ verwiesen, welches dem Nutzer beispielsweise die Möglichkeit gibt Objekte lehmähnlich zu formen. Anwendung findet dieses in der Photogrammetrie, in welcher ein erzeugtes 3D-Modell aus Fotos erstellt und als Referenz weiterverwendet wird (Abb.: C.2). Somit wird es möglich Details nachträglich und manuell zu korrigieren, wie es in Abb. C.2 (A), (C) an der Krone der Statue zu erkennen ist. Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist es, dass es keine Entstehungschronologie gibt und somit nicht parametrisch Bestandteile geändert werden können.

Parametrische Modellierung ermöglicht es Geometrien Variablen zu vergeben, die objektübergreifend in das Modell integriert werden, um so Dimensionen und Prozessparameter verändern zu können. Dem Nutzer wird es dadurch möglich individuelle Bemaßungen im Modell zu integrieren und es dadurch vollständig variabel zu machen. Dies ist besonders von Vorteil für Normteile (e.g. Schrauben, Muttern, Bohrungen, Komponenten). Diese Methodik setzt jedoch sauberes und fehlerfreies Konstruieren vom Benutzer voraus. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierfür mit dem Programm *Autodesk Fusion 360*²⁹ gearbeitet, welches diese Parametrisierung ermöglicht. Wie im Laufe dieser Arbeit erklärt wird, bedarf der Fertigungsprozess des 3D-Drucks dieser Eigenschaft, um so den Herstellungsprozess zu verfeinern. Anhand von Abb. C.3 wird die Vorgehensweise der 3D-Modellierung illustriert, in dem das 3D-Modell für eine WR62-Wellenleiter erstellt wurde, mit den zugehörigen Skizzen der Einzelteile (Abb.: C.3 (1), (2), (3)). Erkennbar ist, dass das resultierende Modell aus der Summe von zweidimensionalen technischen Zeichnungen besteht.

Die Exportierung des fertigen Modells erfolgt systembedingt in CAD-Systemneutralen Datenformaten,

²⁷Für diese Arbeit verwendetes Modell: 798A-6/150 mm. Auflösung: 0.01 mm

²⁸Version 2.91

²⁹Version: 2.0.9313

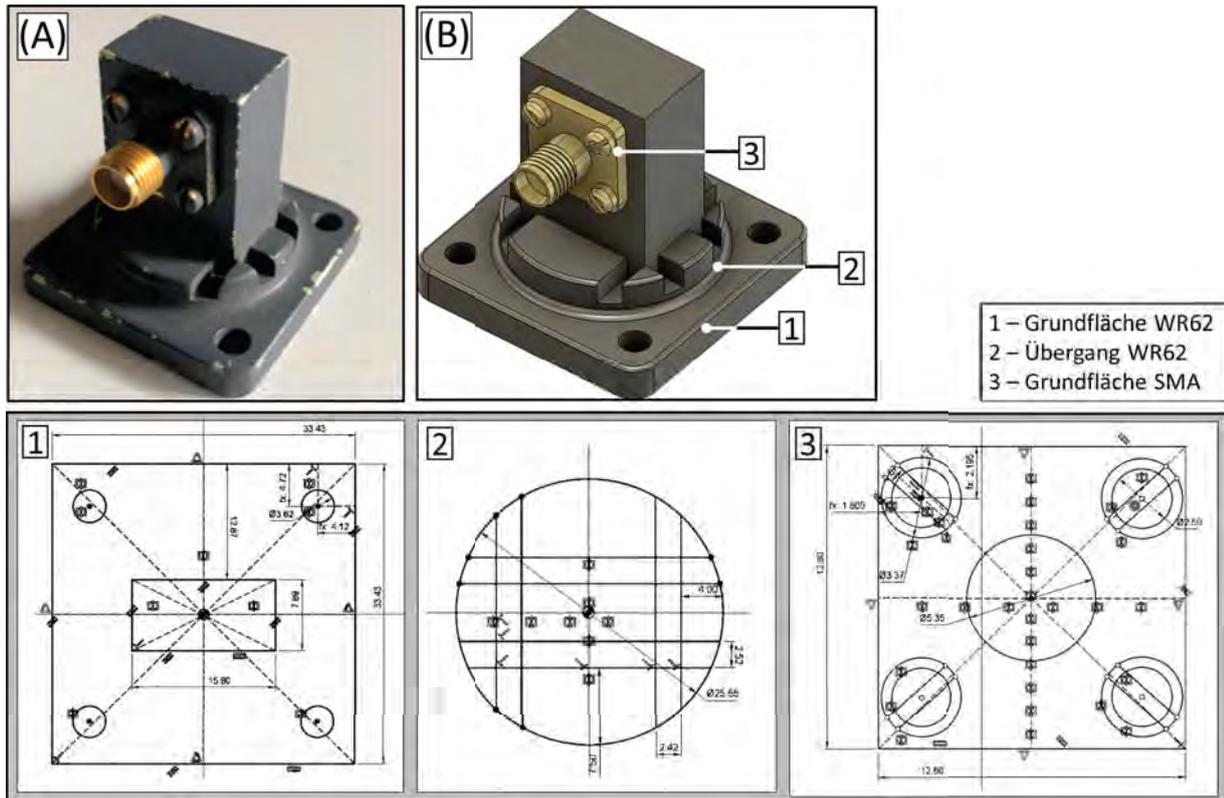


Abbildung C.3: Erstelltes 3D-Modell eines WR62 Wellenleiters mittels **Parametrischer Modellierung**. (A) Photographie vom Objekt, (B) erstelltes Modell in *Autodesk Fusion 360* mit zugehörigen Skizzen der Grundflächen.

die einen plattformübertragenden Datenaustausch ermöglichen (e.g. DXF³⁰, STEP³¹, STL³²). Im Rahmen dieser Arbeit wurde hauptsächlich das STL-Format verwendet. Der Design-Prozess wurde aus einer Kombination von mehreren Formaten durchgeführt.

C.2 Übersetzung vom 3D-Modell in 3D-Druckersprache

Die Vorbereitung des 3D-Modells für den 3D-Druckprozess erfolgt mittels des s.g. **Slicers** (deut.: Schneider). Der Begriff bezieht sich dabei auf den Sachverhalt, dass das Objekt in Schichten aufgebaut wird und somit aus einzelnen gestapelten Schichten besteht. Hiermit werden die notwendigen Steuerinformationen für den 3D-Drucker generiert, wobei das Modell durch Abfahren der Achsen konstruiert wird und simultan das Werkzeug verwendet wird³³. Der Slicer erlaubt es dem Anwender noch vor der Bearbeitung und Herstellung des Objekts Einblick in den Prozessvorgang zu erhalten.

³⁰Etabliertes Format zum Datenaustausch, welches von allen CAD-Systemen unterstützt wird. Diese können nur zweidimensionale Daten lesen, in welchen Bemaßungen, Farben und Notizen verlorengehen.[84, 3.1.2.1, 3 Absatz]

³¹International verwendetes Austauschformat für dreidimensionale Geometrien, die auch Notizen, Farben, Baugruppen übergibt. Wird nicht von allen CAD-Programmen unterstützt

³²Übergabe von Modell zusammengesetzt aus Dreiecksflächen (Mesh), dessen Detailgrad justiert werden kann. Verwendung häufig für 3D-Druck. Keine Übergabe von Farben, Notizen oder Baugruppen.

³³FDM-Drucker gehören zur der Rubrik der CNC-Werkzeugmaschinen (Computerized Numerical Control), deren Steuerungstechnik identisch ist.

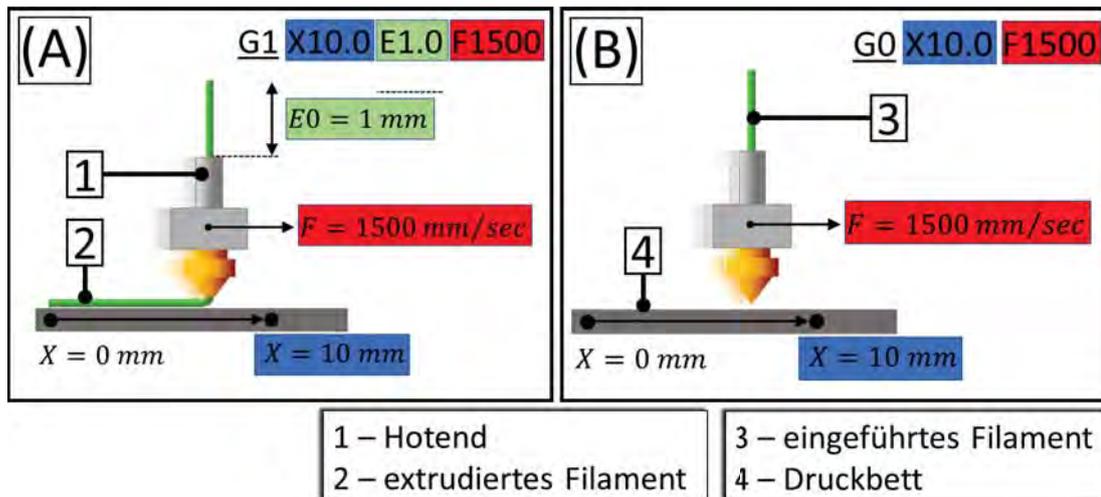


Abbildung C.4: Bewegungsabläufe beim FDM-Druck laut *GCode*. (A) *G1*-Bewegung mit extrudiertem Filament, (B) *G0*-Bewegung ohne extrudiertes Filament.

Tabelle 10: Beispiele für Programmierbefehle von *GCode*

G-Befehle	Bedeutung	M-Befehle	Bedeutung
G0	Lineare Bewegung der Achsen X, Y, Z, ohne Filament zu extrudieren	M42	Zustandsänderung von Pins (S0 = Aus; S255 = An)
G1	Lineare Bewegung der Achsen X, Y, Z, mit Extrudieren von Filament	M43	Debug Pins
G12	Reinigung der Düse	M75	Starten des Printjob-Timers
G28	Homing aller Achsen	M104	Beheize das <i>Hotend</i> und lasse andere Kommandos zu
G28 X Y	Homing für X- und Y-Achse durchführen	M106	Filamentlüfter justieren mittels PWM (S0 = Aus; S255 = Maximale)
G28 Z	Homing für Z-Achse durchführen	M109	Beheize das Druckbett und warte
G29 T	Einsicht der Z-Kompensationswerte als topologische Karte	M140	Beheize das Druckbett und lasse andere Kommandos zu
		M155	BLTouch-Vermessung starten
		M190	Beheize das Druckbett und warte
		M221	Justierung des Flow-Wertes (e.g. S 100 für 100%)
G90	Verwendung von absoluter Position der Achsen	M500	Speichern der aktuellen Einstellungen zum EEPROM
G91	Verwende relative Position der Achsen	M501	Wiederherstellung aller Werte
G92	Setze aktuelle Position der Achse für weitere Verwendung	M502	Werkseinstellungen zurückgesetzt
G92 E0	Reset des Distanz des Extruders	M600	Filamentwechsel durchführen
		M900	Linear Advance verwenden (e.g. K 0.09)

C.2.1 DIN/ISO-Programmierung (GCode)

Beim *GCode* handelt es sich um die Programmierung der Steuerinformation laut Norm DIN 66025/ISO 6983 [85]. Diese beinhaltet die Bewegungsanweisung für das Gerät, um eine Positionsänderung oder Fertigungsanweisung durchzuführen. Unterschieden wird hierbei in *G-* und *M-Befehle*. Wobei beim *G-Befehl* eine Bewegung durchgeführt wird (e.g. X-, Y-, Z-, E-Bewegungen), erfolgt beim *M-Befehl* eine Zustandsänderung (e.g. logische Zustandsänderung eines logischen Pins). Dieses Programmierverfahren erlaubt es dem Nutzer über eine einfache und verständliche Programmiersprache Befehle an die Maschine zu übermitteln. Die Befehle werden chronologisch abgearbeitet, wobei Koordinaten nacheinander abgefahren werden und simultan weitere Befehle durchgeführt werden können. Wie in Abb. C.4 illustriert, wird von der relativen Ausgangsposition (e.g. Home-Position *G28*) eine neue Position vorgegeben zu der das *Hotend* gefahren wird. Es kann hierbei differenziert werden, ob parallel Filament extrudiert werden soll (Abb.: C.4 (A)), ob es sich um eine Positionsänderung handelt (Abb.: C.4 (B)) und mit welcher Maximalkraft *F* (Abb.: C.4) die Bewegung vollzogen werden soll³⁴. Der sehr schlichte Syntax ermöglicht es Fehler vorzubeugen, macht es dennoch aber gleichzeitig notwendig sehr umfangreiche Quelltexte zu formulieren. Die s.g. *GCode*-Datei wird hierfür vom Slicer-Programm erstellt, welche eine visuelle Vorschau ermöglicht. Darauf wird im nächsten Abschnitt eingegangen.

In der Tabelle 10 sind einige Beispiele der Befehle aufgelistet, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kamen und individuell eingefügt worden sind.

C.2.2 Programmiersoftware (Slicer)

Die **Slicer**-Software konvertiert das importierte *CAD*-File in Maschinensprache als *GCode* und liefert gleichzeitig eine Vorschau aller Fertigungsschritte. Um die Verkäufe der eigenen Geräte zu steigern, vertreiben eine Vielzahl an Herstellern diese Programme zur freien Nutzung, wie *Ultimaker (Cura)* [86], *Makerbot (Makerbot Print)* [87] und *Prusa (Slic3r)* [88]. Für diese Arbeit wurde die kommerzielle Slicer-Software *Simplify3D* [89] verwendet, da die Bedienung eingängiger ist, es dem Nutzer erlaubt manuell Stützstrukturen einzufügen und individuelle Prozesse zu verwenden. Stützstrukturen sind Opferstrukturen im FDM-Druck, die es ermöglichen freischwebende Elemente zu fertigen (Abb.: C.5 (B), (C)). Essentiell für diese Arbeit ist die Möglichkeit von *Simplify3D* individuelle Prozesse verwenden zu können. Wie in Abb. C.5 (D) visualisiert, erhalten einzelne Komponente Fertigungsprozesse zugeschrieben, mit spezifischen Einstellungen (e.g. Filament austausch, Änderung der Druckgeschwindigkeit, Änderung der Belüftung). Hierfür werden diese Objekte einzeln in *Simplify3D* eingefügt, aber anhand ihrer gemeinsamen Koordinatenursprünge miteinander ausgerichtet³⁵. Voraussetzung hierfür ist es, dass die Objekte innerhalb eines gemeinsamen Projekts erstellt werden.

In der verwendeten **Slicer**-Software wird der generierte G-Code manipuliert, in dem die Bewegungsabläufe mit Konstanten multipliziert werden oder zusätzliche Bewegungsabläufe hinzugefügt werden können, ohne dafür den Quelltext manuell zu verändern. Dem Nutzer wird es so ermöglicht maßgeschneiderte 3D-Druckprofile zu generieren. Wie im Laufe dieser Arbeit zu sehen sein wird, war es anhand der vielen verschiedenen Filamente notwendig die individuellen und optimalen Druckeigenschaften der Rohstoffe zu ermitteln, um eine Anwendung zu ermöglichen. Die Einstellungsmöglichkeiten in allen verfügbaren **SlicerN** sind größtenteils programmübergreifend, jedoch nicht deren Bezeichnungen. Um im Laufe dieser Arbeit sich im Text darauf referenzieren zu können, werden in Tab. 11 die verwendeten Begriffe aufgelistet, wie sie in *Simplify3D* als Einstellungen verfügbar sind.

³⁴Es muss in der Bedienungsfläche *Marlin* angegeben werden, welche maximale Bewegungskraft für die Achse gestattet ist in `#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {X, Y, Z, E}`. Sollte der geforderte F-Befehl diesen übersteigen, so wird nur der maximal angegebene Werte verwendet.

³⁵`\Simplify3D\Edit\Align Selected Model Origins\`

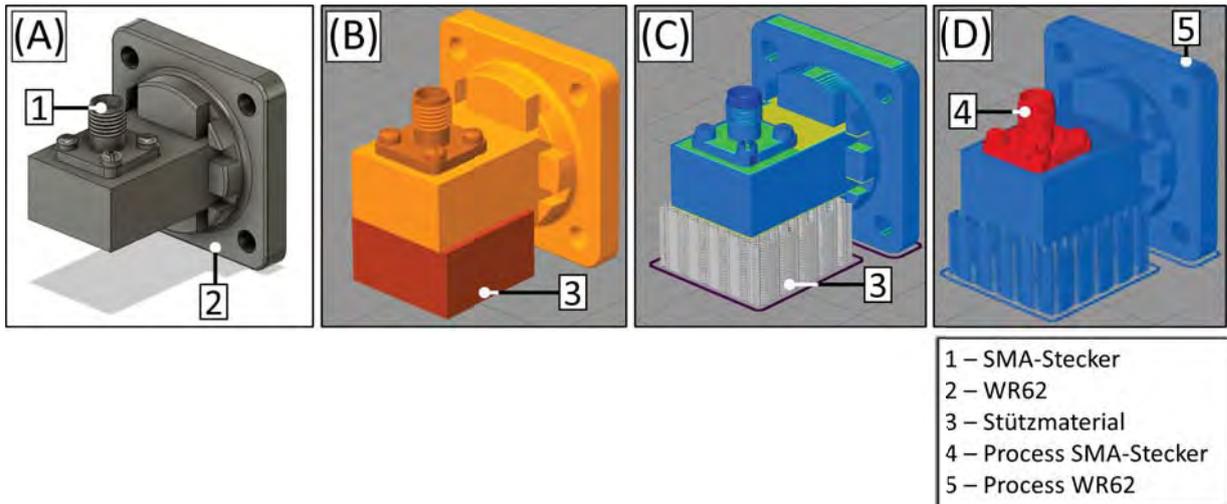


Abbildung C.5: Verwendung der Eigenschaft mehrerer Prozesse in *Simplify3D*. (A) Erstelltes CAD-Modell vom WR62-Waveguide in *Fusion 360*, (B) WR62-Waveguide mit hinzugefügtem Stützmaterial in *Simplify3D*, (C) Druckvorschau in *Simplify3D* mit Stützmaterial und Feature-Typs, (D) Druckvorschau in *Simplify3D* mit Visualisierung der unterschiedlichen Prozesse für SMA-Stecker und WR62-Waveguide.

Tabelle 11: Einstellungsmöglichkeiten in *Simplify3D*

Kategorie	Einstellungen	Bedeutung und Einheit
Extruder	Nozzle Diameter	Auslassdurchmesser der verwendeten Düse (<i>mm</i>)
	Extrusion Multiplier	Zielgröße der Extrudierung (<i>mm</i>)
	Retraction Distance	Distanz für Filamentrückzug (<i>mm</i>)
	Retraction Vertical Lift	Hebedistanz für Düsenbewegungen (<i>mm</i>)
	Retraction Speed	Geschwindigkeit des Filamentrückzug (<i>mm/s</i>)
Layer	Top Solid Layers	Anzahl der Schichten auf der Oberseite ($\mathbb{N} = \{0; 1; 2; 3; \dots\}$)
	Bottom Solid Layers	Anzahl der Schichten auf der Unterseite ($\mathbb{N} = \{0; 1; 2; 3; \dots\}$)
	Outline/Perimeter Shells	Anzahl der Schichten auf der Außenseite ($\mathbb{N} = \{0; 1; 2; 3; \dots\}$)
Infill	Interior Fill Percentage	Geometriedichte im Inneren (%)
Temperature	Primary Extruder	Zieltemperatur der Düse (Layer 1 $\rightarrow \mathbb{N} = \{1; 2; 3; \dots\}$ mit $0 \rightarrow 275^\circ C^a$)
	Heated Bed	Zieltemperatur der Druckbetts (Layer 1 $\rightarrow \mathbb{N} = \{1; 2; 3; \dots\}$ mit $0 \rightarrow 150^\circ C^b$)
Speeds	Default Printing Speed	Druckgeschwindigkeit (<i>mm/s</i>)
	X/Y Axis Movement Speed	horizontale Bewegungsgeschwindigkeit (<i>mm/s</i>)
Other	Horizontal Size Compensation	Justierfaktor für horizontale Ebene (<i>mm</i>)

^aMaximaler Wert in definiert in *Marlin* als `#define HEATER_0_MAXTEMP`

^bMaximaler Wert in definiert in *Marlin* als `#define BED_MAXTEMP`

C.3 Kommunikation und Überwachung

Die elektronische Steuerung des 3D-Druckers (Abb.: C.6 (B, 4)) erfolgt in zwei Teilen. Die Kontrolle der Echtzeitaktivitäten wird mittels der installierten Firmware *Marlin*³⁶ der Hauptplatine (Abb.: C.6 (B, 3)). Die externe Kontrolle, während des Fertigungsprozesses, erfolgt über die serielle Kommunikation *Octoprint*³⁷ (Abb.: C.6 (B, 5)) oder dem *12864 LCD Display* Bedienungsinterface (Abb.: C.6 (B, 6)).

Die direkte Steuerung des FDM-Druckers wird von *Marlin* durchgeführt. Diese primär für FDM-Drucker entwickelte Software basiert auf der *Arduino*-Plattform, unterstützt 8-bit AVR, sowie 32-bit ARM basierte Mikrocontroller und ist die am meisten genutzte 3D-Drucker-Software [90]. Alle notwendigen Einstellungen für den 3D-Drucker werden mittels *Visual Studio*³⁸ und der Erweiterung *Platformio IDE Extension*³⁹ innerhalb von *Marlin* vorgenommen und dann mittels eines Bootloaders oder einer SD-Karte auf das Mainboard geflashed.

C.3.1 Marlin

Aktuelle Temperaturüberwachung, Sensorüberwachung, mechanische Steuerung der Schrittmotoren, Lichtsteuerung und senden von Bewegungsinformationen werden von dieser Firmware übernommen. Es ist ein Standalone-Open-Source-Projekt seit August 2011[91], ist eine Erweiterung der Software *Sprinter*, sowie *grbl* und wird mittlerweile als Eigenständige Software auf *Github* veröffentlicht. Auf Grund der Fülle an Einstellmöglichkeiten, soll in dieser Arbeit nur auf die relevanten Teile eingegangen werden, die maßgeblich entscheidend waren. Die Software ermöglicht dem Nutzer Details zum individuellen Aufbau anzugeben, wie Mainboard (e.g. *Creality Melzi 1.1.X*, *Makerbase MKS Gen L*, *BigTreeTech SKR V1.3*), Schrittmotortreiber (e.g. A4988, TMC2130, TMC2208), Motoransteuerung (e.g. Beschleunigung, Geschwindigkeit, Schrittweite), Spannungsversorgung (e.g. PSU, Thermistorwiderstand), Sensoren (e.g. Filament-Run-Out, Bettabtafung), Peripherien (e.g. Filamentreiniger, Neopixel-Beleuchtung), PID-Justierung (e.g. Druckbett, *Hotend*), sowie Spezialfeatures (e.g. *Linear Advance*, *S-Curve*, *Junction Deviation*). Speziell in dieser Arbeit war es notwendig, einige Änderungen vorzunehmen, auf welche im Detail eingegangen wird.

C.3.2 Octoprint

Wie der Abb. C.6 (A) zu entnehmen ist, *OctoPrint* ist eine webbasierte open source Bedienungsfläche von GINA HÄUßIG [92] zur Kontrolle von 3D-Druckern. Hierbei wird es dem Nutzer ermöglicht *GCode*-Dateien an das Gerät zu senden, welche mittels USB mit einem *RaspberryPi* verbunden ist. Somit ist es möglich die seriell Schnittstelle über LAN zu verwenden. Dem Nutzer wird somit in Echtzeit Einblick in den Verlauf des 3D-Drucks gegeben (e.g. Webcam, *GCode*), Temperaturverläufe (e.g. *Hotend*, Druckbett), Steuerungen (e.g. Schrittmotoren, Lüftung, Sensoren), Protokolle (e.g. Filamentverbrauch, Nutzungsdauer, Nutzungsanzahl), Zustandsabfragen (e.g. TMC Debugging, Pin-Debugging, Serial Baud Rate), sowie Notabschaltungen (e.g. Powerloss-Protection, Thermal Run Away Protection, PSU-Control). Diese Einstellungen können während des Vorgangs mittels Konsoleneingaben eingesehen und geändert werden.

³⁶Version: 2.0.7.2

³⁷Version: 0.17.0

³⁸Version: 1.51.1

³⁹Version: 2.2.1

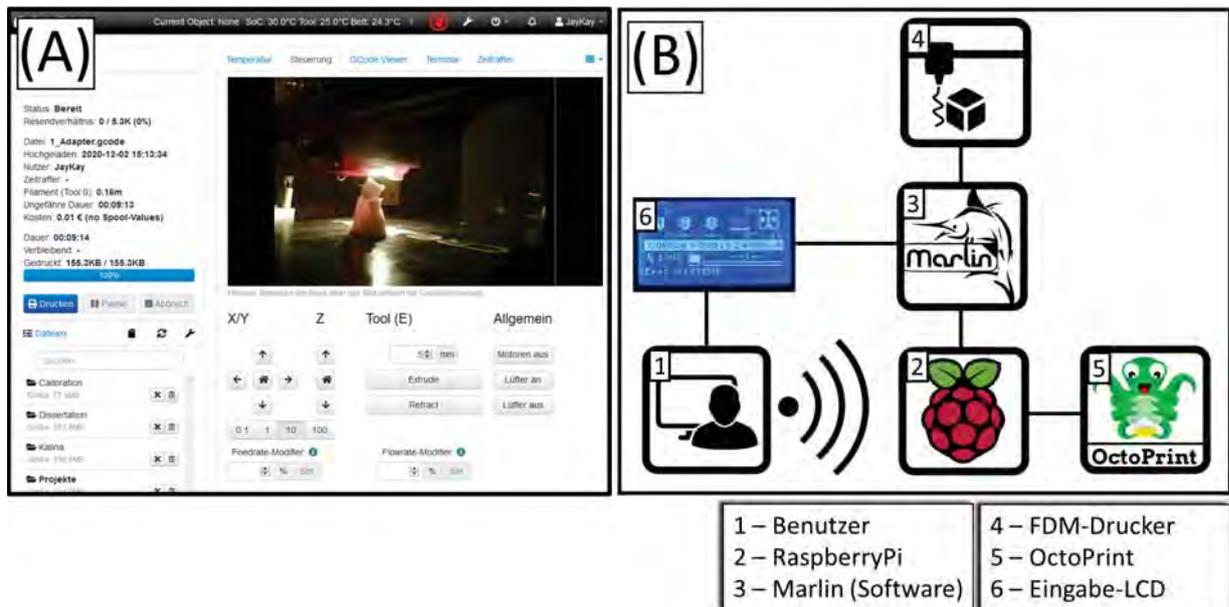


Abbildung C.6: Überblick der verwendeten Architektur für FDM-Druck. (A) Nutzerinterface von Octoprint, (B) Logikbaum für Architektur.

D Physik von Metamaterial

In dem folgenden Abschnitt wird auf die Physik, die Entwicklung, die Testung und die Limitierung des *Metamaterials* eingegangen. Die in diesen folgenden Kapiteln beschriebenen Ergebnisse wurden in [?] veröffentlicht.

Metamaterialien sind Strukturen, die von einem induzierten elektromagnetischen Feld die elektrischen und magnetischen Anteile so verändern, dass das austretende Feld eine neue Richtung und Form besitzt. Der Teilbegriff *Meta* bezieht sich hierbei auf die relative mittlere elektrische Größe eines einzelnen individuellen Elements, das weder als elektrisch klein oder elektrisch groß zu bezeichnen. Diese neuen Eigenschaften können hierbei genutzt werden für Absorption, Ablenkung, aber auch Fokussierung.

Dies macht es besonders interessant für die Funkkommunikation, da auf diese Weise Veränderungen am hochfrequenten Feld vorgenommen werden können, die sonst nur von der Art der Antenne abhängig waren und wie diese in bestehende Elektronik integriert wurde.

Antennen besitzen die Funktion der drahtlosen Informations- und Energieübertragung. Diese entwickelt sich im Raum in eine bestimmte Richtung und wird mittels des Poynting-Vektors \vec{S} beschrieben. Dies kann ebenfalls als Leistungsflussvektor beschrieben werden [93, S. 14]. Somit beschreibt dieser, in welche Richtung die Energie transportiert wird und setzt sich aus einem elektrischen \vec{E} und magnetischen Feldanteil \vec{H} zusammen:

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}. \quad (\text{D.1})$$

Da sich diese Energie aus einer Summe von Teilenergien zusammensetzt, kann die gesamte abgestrahlte Energie P_T als Kreisintegral um diesen Vektor berechnet werden:

$$P_T = \oiint \oiint \Re e (\vec{S}) d\vec{O}. \quad (\text{D.2})$$

Es wird hierbei der Raum als Oberfläche um die Antenne beschrieben, der auch durch seine Randbedingungen die Feldentwicklung bestimmt.

Physik

Prinzip von Metamaterial

Metamaterialien balancieren den Brechungsindex in Materialien und verändern die Feldentwicklung im freien Raum. Hierfür wird die vorhandene Permittivität ϵ_r (i.e. PCB) durch eine kreierte Permeabilität μ_r entgegengewirkt, so dass der komplexe Brechungsindex < 0 wird [94, S. 449-521]. Dieser Effekt basiert darauf, dass die Geschwindigkeit der elektromagnetischen Welle (EMW) sich im Vakuum λ (Gl.: D.3) und im Substrat λ_{eff,ϵ_r} (Gl.: D.4) unterscheiden. So entstehen Phasenunterschiede, die sich vor allem in der elektrischen Länge niederlegen.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2,99 \cdot 10^8 \left(\frac{m}{s}\right)}{15 GHz} \approx 19,9 mm \quad (\text{D.3})$$

$$\lambda_{eff,\epsilon_r} = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{19,9 mm}{\sqrt{3,48}} \approx 10,7 mm \quad (\text{D.4})$$

$$\lambda_{eff,\mu_r} = \frac{\lambda}{\sqrt{\mu_r}} = \frac{19,9 mm}{\sqrt{1}} = 19,9 mm \quad (\text{D.5})$$

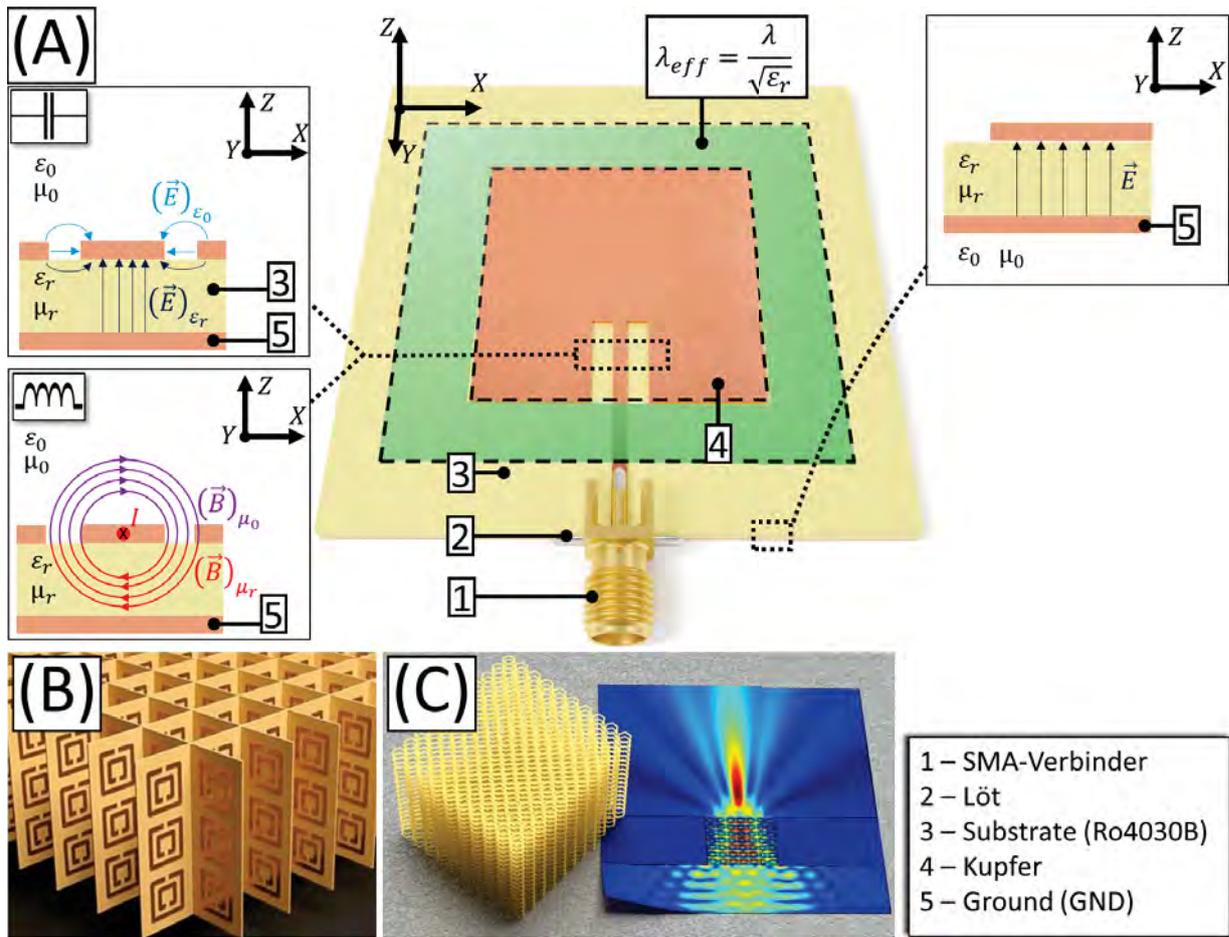


Abbildung D.1: (A) Zusammensetzung einer Patch-Antenne mit den zugehörigen Feldverteilungen, (B) Zusammengesetzte Metamaterialien für eine Mikrowellenanwendung [95], (C) mögliche Feldverteilung einer elektromagnetischen Welle durch induzieren in ein Metamaterial.

Diese Änderung wird erst durch die unterschiedlichen Ausbreitungsmöglichkeiten der EMW in Materialien möglich. Betrachtet werden hierfür Produkte aus der Leiterplattentechnologie (Abk.: PCB, engl.: *printed circuit board*)⁴⁰, wie das in dieser Arbeit verwendete *Rogers 4030B* [39, S. 3], welches vorherrschend eine höhere Permittivität von $\epsilon_r = 3,48$ besitzt. Als Folge dessen werden beispielsweise mit dieser Technologie gefertigte Patch-Antennen, auf den s.g. Substraten, geometrisch kleiner in ihrer Dimension auf dem PCB aufgebracht, als Ergebnis der elektrischen effektiven Wellenlänge λ_{eff,ϵ_r} (Abb.: D.1 (A)). Der magnetische Feldanteil wird davon nicht berührt, da die Permeabilität $\mu_r = 1$ ist und dadurch die magnetische effektive Wellenlänge λ_{eff,μ_r} (Gl.: D.5) identisch ist mit der Wellenlänge im Vakuum (Gl.: D.3). Dieser Phasenwechsel kann jedoch bewirkt werden durch das Aufbringen von magnetisch resonanten Strukturen, die diese magnetisch effektive Wellenlänge λ_{eff,μ_r} erzeugen.

Diese passiven Strukturen besitzen einen hohen induktiven Anteil L , auf Grund der Ringstruktur die sie abbilden. Deswegen werden diese als künstliche magnetische Metamaterialien bezeichnet (engl.: *Artificial Magnetic Metamaterials*) (Abb.: D.2 (B)). Analog zu diesen existieren ebenfalls Strukturen die nur den elektrischen Feldanteil ansprechen, s.g. künstliche dielektrische Metamaterialien (engl.: *Artificial Dielectric Metamaterials*) (Abb.: D.2 (A)). Aus designtechnischen Gründen macht es deswegen Sinn diese beiden Typen miteinander zu kombinieren, welches der Rubrik der s.g. resonanten elektrischen Metamaterialien

⁴⁰Sind faserverstärkte Träger, die mittels aufgebrachtem Kupfer es ermöglichen elektrische Verbindungen durch fräsen, lasern oder ätzen zu erstellen.

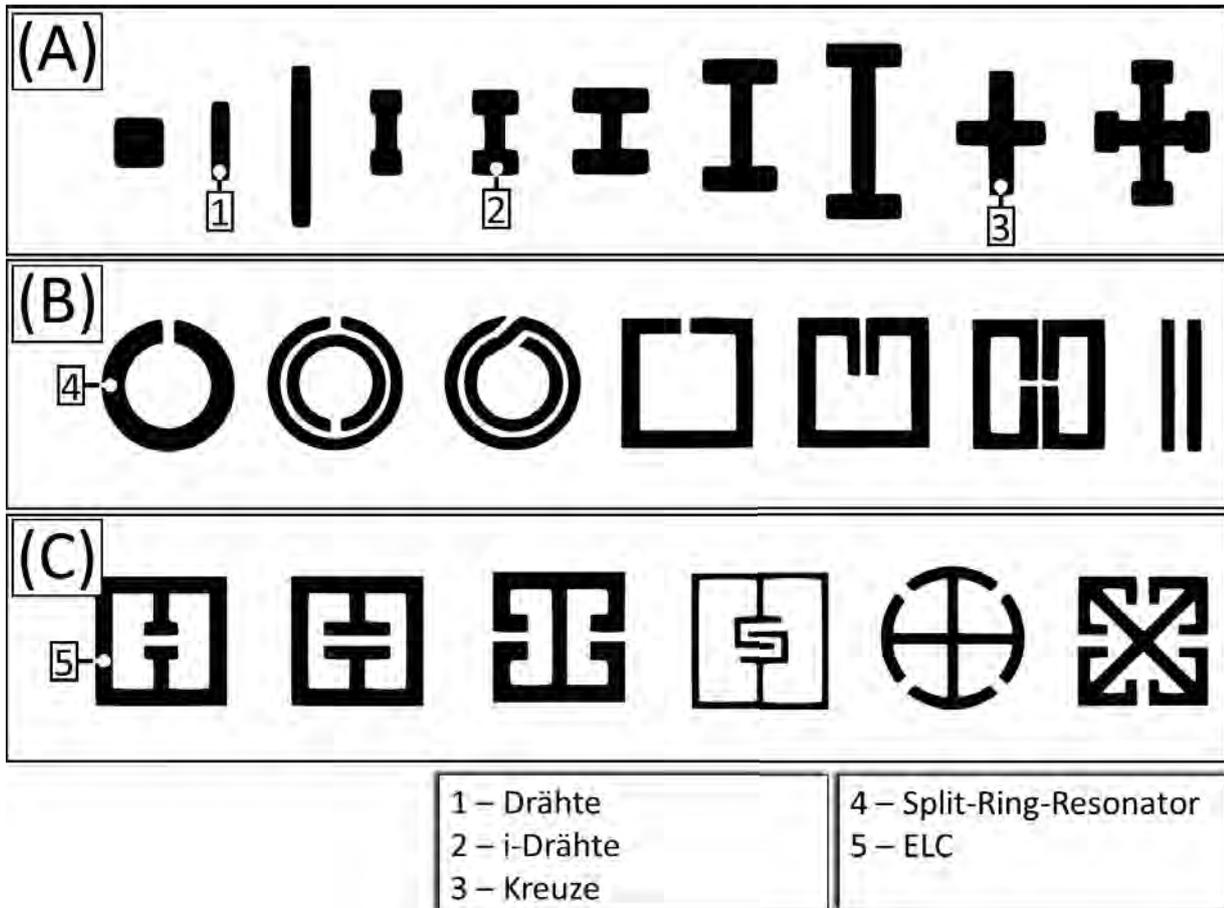


Abbildung D.2: Beispiele von Metamaterialtypen (A) Artificial Dielectric Metamaterials, (B) Artificial Magnetic Metamaterials, (C) Resonant Electric Metamaterials (ELC). [96]

zugehörige ist (engl.: *Resonant Electric Metamaterials* (ELC)) (Abb.: D.2 (C)).

Die Interaktion der Summe aller individuellen passiven Strukturen, die als homogene Einheit gemeinsam die EMW verändern, definiert das Metamaterial (Abb.: D.1 (C)).

Verluste im Metamaterial

Parallel zu höheren Frequenzen ($> 1\text{ GHz}$), nehmen ebenfalls die Begleiteffekte zu (e.g. Abstrahlung, Skinneffekt). Als Visualisierung sei hierbei auf eine Mikrostreifenleitung verwiesen, die sich mit folgender Differentialgleichung darstellen lässt [97]:

$$\frac{\partial P(z)}{\partial z} = -P_V. \quad (\text{D.6})$$

z repräsentiert hierbei die Transportrichtung der elektromagnetische Welle und ist dadurch einen mögliche Lösung der Gleichung wie folgt:

$$P(z) = P_0 e^{-\alpha z}. \quad (\text{D.7})$$

Die Konstante α repräsentiert hierbei all die Verluste, die in z -Richtung Einfluss nehmen. Diese Verluste setzen sich zusammen aus:

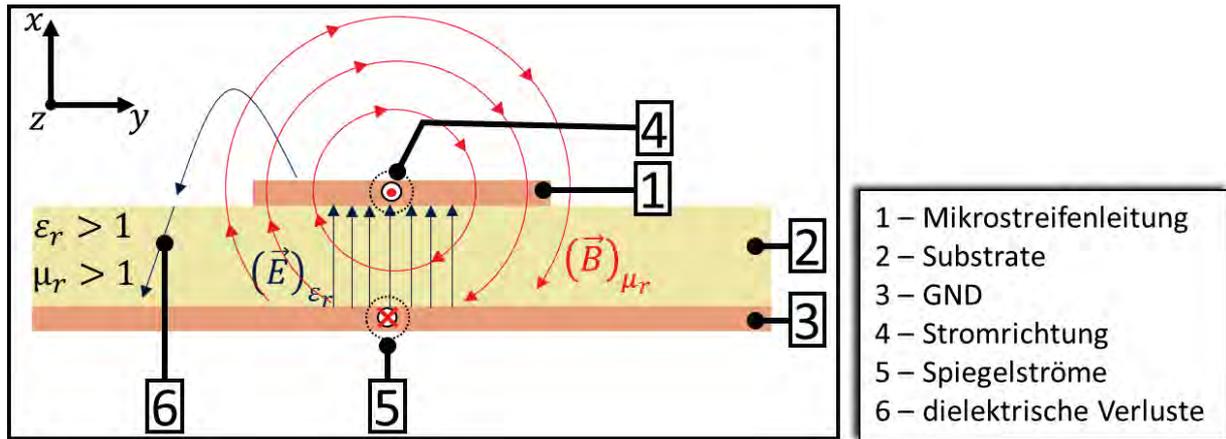


Abbildung D.3: Verluste innerhalb einer Mikrostreifenleitung als Querschnitt [98, S. 27]

$$\alpha = \alpha_{\Omega} \cdot \alpha_{\varepsilon} \cdot \alpha_{\text{Strahlung}} \quad (\text{D.8})$$

Hierbei enthalten sind die ohmschen Verluste α_{Ω} , die dielektrischen Verluste α_{ε} und ungewollte Strahlungsverluste $\alpha_{\text{Strahlung}}$ (Abb.: D.3).

Die ohmschen Verluste α_{Ω} sind die durch endliche Leitfähigkeit bestimmt. Zu dem nimmt mit höheren Frequenzen die Eindringtiefe ab (s.a. Skinneffekt) in Kombination mit der Rauigkeit des Kupfers.

Die dielektrischen Verluste α_{ε} sind die thermischen Verluste im Substrat. Materialien mit einem $\tan \delta > 0$ setzen dies voraus. Diese Verluste sind proportional zur Frequenz $\alpha_{\varepsilon} \sim f$ und nehmen mit zunehmender Frequenz zu. Die Wahl des Substrats kann dieses beeinflussen.

Die Strahlungsverluste $\alpha_{\text{Strahlung}}$ entstehen durch Unterbrechungen, wie Durchführungen oder Richtungswechsel. Besonders im Nahfeld führen diese zu ungewünschten Kopplungen.

$$\beta = \beta_{\Omega} \cdot \beta_{\mu} \cdot \beta_{\text{Strahlung}} \quad (\text{D.9})$$

Die dielektrischen Verluste α sind auf die gleiche Weise auf die magnetischen Verluste β übertragbar, würde das Substrat eine zusätzliche Permeabilität μ_r besitzen. Die permeablen Verluste β_{μ} sind durch die Mobilität der Dipole (s.a. WEISSCHEN Bezirke) bedingt, deren Rotation endlich ist. Hier gilt ebenso; bei höheren Frequenzen werden thermische Verluste generiert, bis hin zu einem hochohmigen Verhalten.

E Funktionsweise von 3D-Druckern

3D-Druck beschreibt ein Fertigungsverfahren, welches ein Werkstück durch schichtweises kombinieren von Rohstoffen zusammenfügt. Durch das Aufeinanderfolgen von aufgetragenen Schichten werden so dreidimensionale Gegenstände erzeugt. Als Werkstoff werden hierfür Kunststoffe, Kunstharze oder Keramiken [99] verwendet, die geräte- und verwendungsabhängig zum Einsatz kommen.

Das 3D-Druckverfahren gehört zur Rubrik der CNC (engl.: Computerized Numerical Control), wobei zur Fertigung eines Werkstücks ein Werkzeug (i.e. Extruder, Dremel, Laser) computergesteuert entlang von Maschinenachsen bewegt wird. Die Regelung der Bewegungen erfolgt mittels Regelschaltkreisen, die geschlossen und verschachtelt sind und von einem Computer kontrolliert werden.

Das verwendete Werkzeug definiert das Fertigungsverfahren des 3D-Drucks. *Selective Laser Sintering* (SLS) und *Stereolithografie* (SLA) verwenden über Spiegel gesteuerte Laser (Abb.: E.1 (1)), um dünne Schichten von Material auszuhärten und zu verbinden.

SLA (Abb.: E.1 (B)) nutzt hierfür ein Bad an flüssigem lichtempfindlich Kunststoff (Photopolymer), (Abb.: E.1 (B, 6)), in welches das Werkstück um wenige Millimeter abgesenkt wird, um es schicht- und flächenweise aufzutragen. Nach der Fertigung muss dieses Harz mit Lösungsmittel gewaschen und unter UV-Licht vollständig ausgehärtet werden [100, S. 121: SLA = 'StereoLithography Apparatus' ist eine geschützte Bezeichnung von 3D Systems Inc., Rock Hill, South Carolina, USA].

SLS ist in seiner Vorgehensweise identisch zu SLA, wobei die verwendete höhere Laserklasse (i.e. Kohlendioxidlaser [101]) es ermöglicht weiterführend Partikel in Puderform zu verbinden (Abb.: E.1 (A)). Somit können Plastik, als auch Metalle, Keramik oder Glas verarbeitet werden. Dieser als Sintern bezeichnete Fertigungsprozess, ist im Gegensatz zu SLA oder FDM nicht abhängig von s.g. Stützmaterial oder Opferstrukturen (engl.: *Support Material*) (Abb.: E.1 (3)). Nachteil dessen ist, dass hohle Strukturen von der Fertigung ausgeschlossen werden, denn Rohmaterial würde eingeschlossen werden.

Der Prozess *Fused Deposition Modeling* (FDM) verwendet als Rohstoff thermales Plastik (s.g. Filament), welches in eine erhitzte Düse eingespeist, geschmolzen und entlang eines Rasters aufgetragen wird (Abb.: E.1 (C)). Auf diese Weise wird eine 3D-dimensionale Struktur generiert. Im Gegensatz zu SLA und SLS ermöglicht dieses Verfahren die Verwendung vieler unterschiedlicher Materialien. Diese Materialien können unterschiedliche Polymere sein, wie *Polymilchsäure* (PLA) [6], *Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer* (ABS) [7, S. 416], *Polyethylenterephthalat mit Glycol* (PTEG) [8], *Thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis* (TPU) [9, S. 55] oder *Nylon* [102]. Gleichzeitig können diese Rohstoffe erweitert werden mit sekundären Materialien (e.g. Kupferspänen, Eisenspänen, Graphiten, Kalziumkarbonat, Holz, photolumineszente Bestandteile, Titanoxid, Carbon), um somit zusätzliche Eigenschaften zu implementieren. Im Gegensatz zu SLA, kann bei FDM der Anteil dieser sekundären Materialien um ein Vielfaches höher, mit bis zu 97%⁴¹ (Expertenaussage von KAI PARTHY [65]). Als Vergleich sei hierfür auf das Experiment von [103, 7:17 Min.] verwiesen, wobei ab einem Materialanteil von 15% eine Herstellung mit SLA nicht mehr möglich war.

⁴¹Zertifizierte Materialprüfung vom BASF 2014-07-11; Material 51258672 für *Carbonyl Iron Powder*; Zertifikat-Nr.: 8050

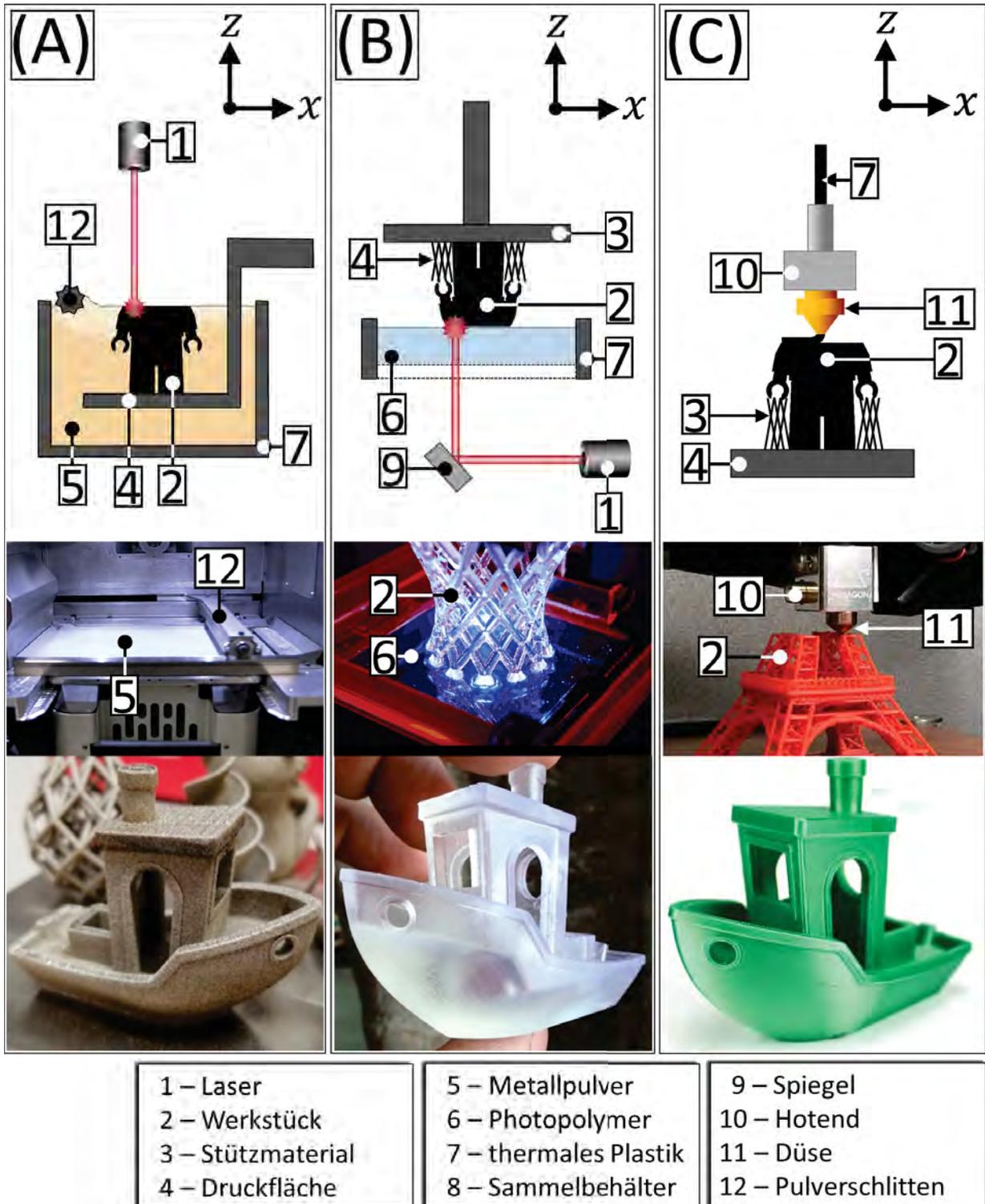


Abbildung E.1: Vergleich von 3D-Drucktechnologien anhand von Prozess (Oben), Werkzeug (Mitte), gefertigtes Werkstück (Unten). (A) Selektives Laser Sintering (SLS) [104], (B) Stereolithografie (SLA) [105], (C) Fused Deposition Modeling (FDM).

E.1 Aufbau und Prinzip

3D-Drucker positionieren Rohmaterial entlang eines dreidimensionalen vektoriellen Rasters. Typische 3D-Druckergeräte hierfür sind der CoreXY-Drucker (Abb.: E.3 (A)), der Delta-Drucker (Abb.: E.3 (B)) und der kartesische Drucker (Abb.: E.3 (C)). Geräteunabhängig wird beim 3D-Drucker stets eine Düse (Abb.: E.3 (D, 1)) entlang der Achsen x , y , z bewegt. Der für das Rohmaterial zuständige Extruder (Abb.: E.3 (C, 6)) repräsentiert die vierte Achse e . Dieser sorgt für die Einspeisung des Rohmaterials (Filament, Abb.: E.3 (C, 5)) in das Heizelement, um eine kontrollierte Schmelzung des Kunststoffes durchzuführen. Das analog durch den Auslass der Düse extrudierte geschmolzene Filament wird anhand eines festgelegten Rasters positioniert (Abb.: E.3 (E, 7)).

Die Bewegungsrichtungen in den x , y , z - Dimensionen bestimmen, um welche Kategorie von FDM-3D-Drucker es sich handelt. Systematisch wird hierbei stets einer der Achsen von einem Schrittmotor angetrieben, die mittels eines kraftübertragenden Bauteils (e.g. Zahnriemen, Trapezgewindestange) die Apparatur oder Führungsschiene (e.g. Profilschienenführung, Aluminium V-Slot-Schiene mit Führungsrad) bewegt. Die Ausführung dessen bestimmen die Genauigkeit, Schnelligkeit, Zuverlässigkeit und Dimension mit der ein Objekt gedruckt wird. Für diese Arbeit wurde ein kartesischer 3D-Drucker verwendet (Abb.: E.3 (C)).

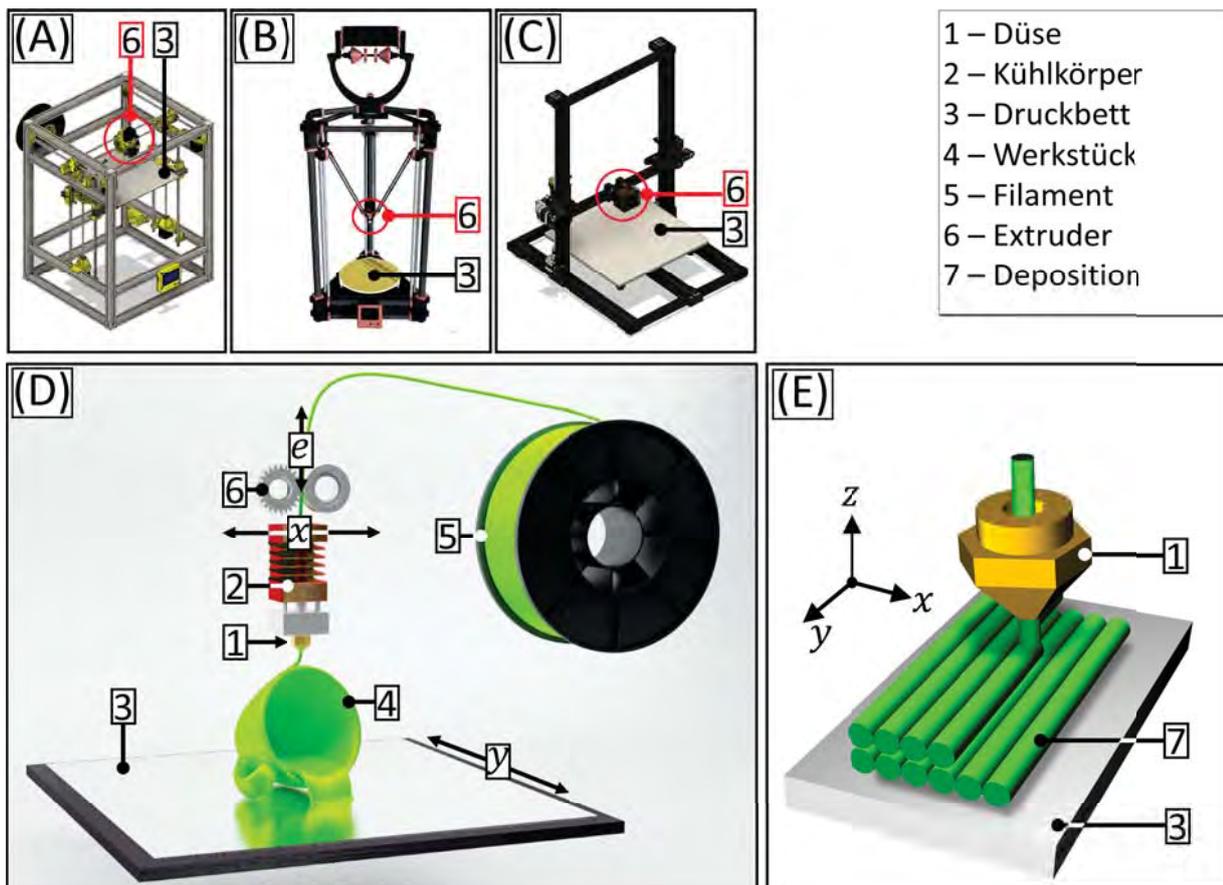


Abbildung E.2: Mechanische Funktionsweise von FDM-3D-Druckern. (A) CoreXY-Drucker, (B) Delta-3D-Drucker, (C) kartesischer 3D-Drucker, (D) Bewegungsrichtung und Interaktion vom Extruder mit Werkstück, (E) Schemata von Deposition von extrudiertem Filament.

E.2 Heizelement

Das *Hotend* ist das wichtigste Bauteil des 3D-Druckers, welches in einem kontrollierten Zusammenspiel für das Einführen, das Schmelzen und das Ausgeben des Filaments zuständig ist. Diese Bezeichnung wurde gewählt, da der Heizblock (engl.: *Hotend*, Abb.: E.3 (1)) für die Erhitzung zuständig ist, wobei der Kühlkörper für die Kühlung sorgt (engl.: *Coldend*, Abb.: E.3 (6)). Eine Vielzahl von Komponenten mit individuellen Eigenschaften sind hierfür notwendig, welche hier im Detail beschrieben werden sollen.

Wie in Abb. E.3 visualisiert, besteht das *Hotend* aus sechs Bauteilen, der Düse (Abb.: E.3 (2)), dem Heizblock (Abb.: E.3 (1)), dem Wärmestopp (Abb.: E.3 (3)), dem Kühlkörper (Abb.: E.3 (6)), sowie einer Heizkartusche (Abb.: E.3 (5)) und einer Thermistorkartusche (Abb.: E.3 (4)).

Das unbearbeitete Filament wird oberhalb des Kühlkörpers (Abb.: E.3 (C, 8)) mittels des Extrudermotors (Abb.: E.3 (C, 9)) eingeführt und bis zum Heizblock befördert. Im Heizblock wird das Filament bis auf dessen Schmelztemperatur gebracht (i.e. 200°C⁴²). Die Erhitzung vom Heizblock erfolgt durch die eingelassene und verschraubte Heizkartusche (Abb.: E.3 (A, 5)). Der Messfühler für die Temperatur, ist eine in den Heizblock, bei der Düse eingelassene Thermistorkartusche (Abb.: E.3 (A, 4)). Das geschmolzene Filament wird durch eine metallische Düse (Abb.: E.3 (A, 2)) hindurchgepresst. Diese Düsen bestehen zu

⁴²Die Werte variieren hierbei stark in Abhängigkeit vom verwendeten Rohmaterial, als auch von der Bauweise der verwendeten Einzelteile. Es können starke Abweichungen auftreten, da die Genauigkeit dieser Werte von der verwendeten Thermistorkartusche abhängen und nicht universell gültig sein müssen.

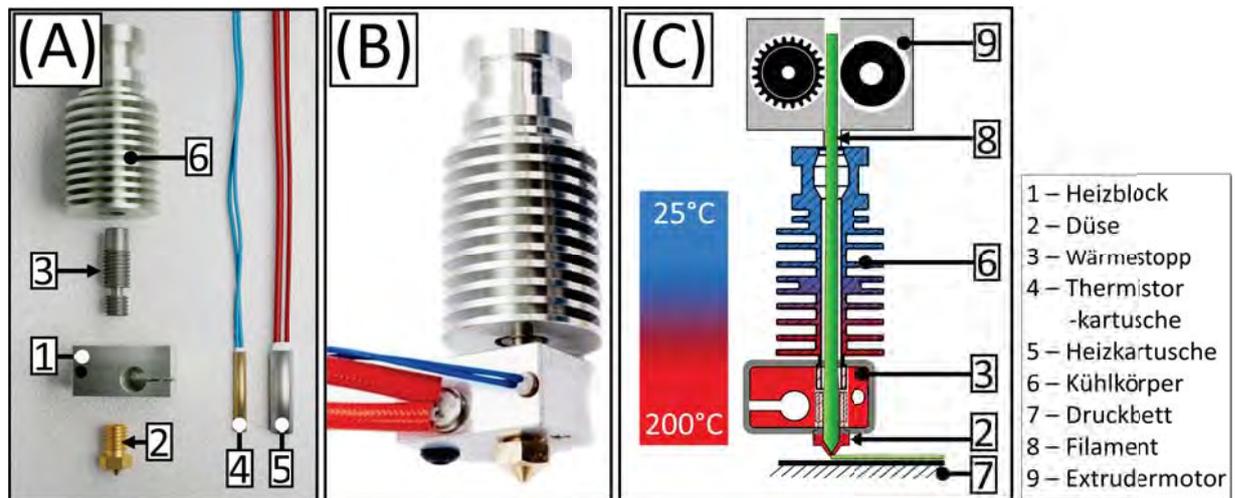


Abbildung E.3: Zusammensetzung eines E3D-V6-Hotend für FDM-3D-Drucker. (A) Einzelkomponente des E3D-V6-Hotends, (B) zusammengesetztes E3D-V6-Hotend, (C) Querschnitt des E3D-V6-Hotends mit Temperaturverteilung.



Abbildung E.4: Düsen für E3D-Hotend mit unterschiedlichen Durchmessern (von links: 0,25 mm, 0,35 mm, 0,40 mm, 0,50 mm, 0,80 mm) für FDM-3D-Drucker.

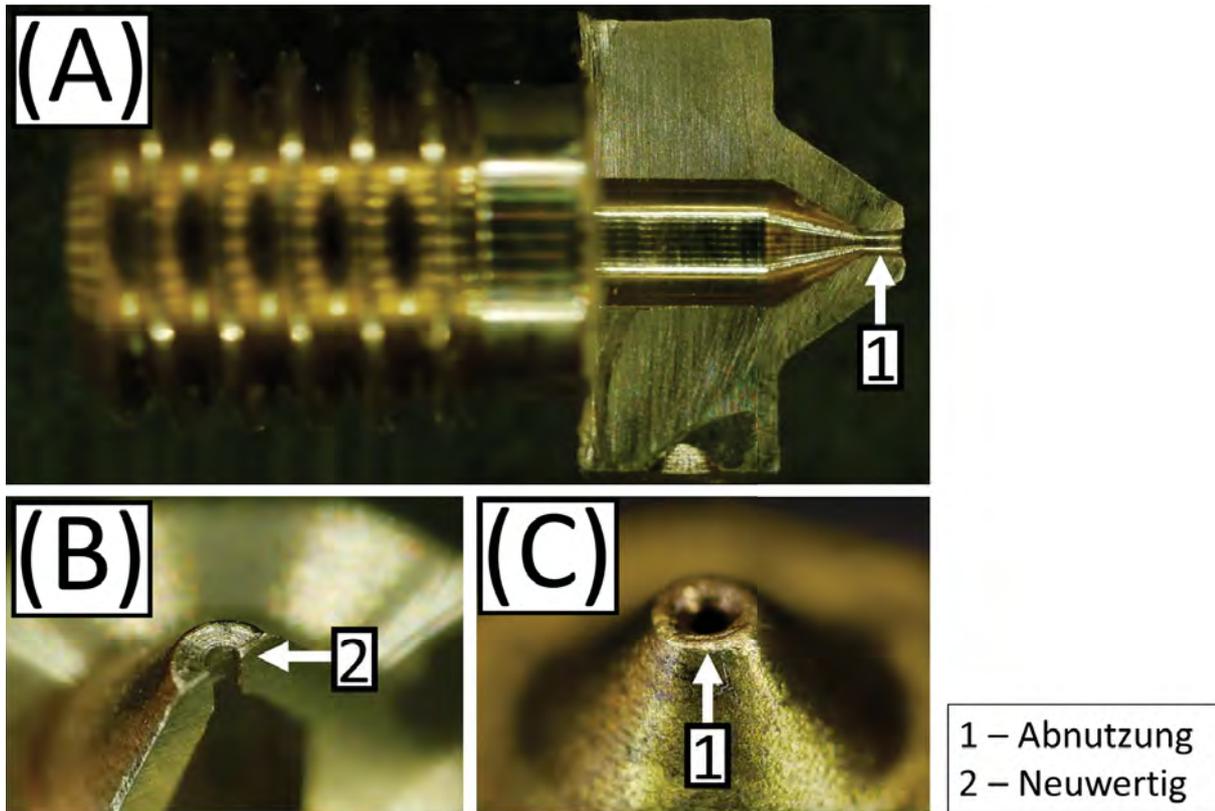


Abbildung E.5: Nahaufnahmen von Düsen für E3D-Hotend. (A) Querschnitt von neuwertiger 0,4 mm Düse [107, 12:21 Min.], (B) Nahaufnahme vom Auslass von neuwertiger 0,4 mm Düse [107, 13:14 Min.], (C) Nahaufnahme vom Auslass von abgenutzter 0,4 mm Düse [107, 13:44 Min.].

meist aus Messing, Stahl oder Kupfer [106] und sind in bestimmten Auslassdurchmessern verfügbar (e.g. 0,15 mm bis 0,80 mm, Abb.: E.3).

Die Extrudierung des Filaments ist abhängig davon, dass im angemessenen Verhältnis das eingeführte Filament seine Schmelztemperatur erreicht und abgegeben wird. Um hohe Druckgeschwindigkeit (i.e. 100 mm/s) oder sehr große Düsendurchmesser (i.e. > 1,0 mm) kompensieren zu können, kann entweder die Schmelztemperatur erhöht werden (e.g. >230°C für PLA) oder aber die Länge der Düse vergrößert werden (i.e. E3D-Volcano oder E3D-Supervolcano), welche verlängerte Heizblöcke besitzen und analog eine größere Wegstrecke, um das Filament zu schmelzen.

Alle Konfigurationen für den 3D-Druckvorgang sind davon abhängig, ein Äquilibrium vom Schmelzvorgang und Extrudieren des thermoplastischen Polymeres herzustellen. Da jedoch diese Abhängigkeit nicht universell für alle Materialien gelten kann, müssen die individuellen Fließeigenschaften mittels Kalibrierungen kompensiert werden, welches den Durchmesser des Düsenauslass als Konstante voraussetzt. Zur Visualisierung sei hierbei auf Abb. E.5 verwiesen, wo die Querschnitte einer abgenutzten (Abb.: E.5 (C, 1)) und neuwertigen Düse (Abb.: E.5 (B, 2)) miteinander verglichen werden. Die Weitung des Düsenauslass ist in Verbindung mit der Reibung des Filaments zu sehen. So sind Abrundungen der Ränder am Auslass zu erkennen, welche durch die charakteristischen Seitwärtsbewegungen beim 3D-Drucken entstehen. Dies macht die Düse vom FDM-Drucker zu dem Bauteil, welches die größte mechanische Belastung erfährt.

E.3 Extruder

Der Begriff des *Extruders* beschreibt den Motor, der zuständig für die Zufuhr des Filaments in das *Hotend* ist. Alle existierenden Extrudertypen übertragen hierfür die Kraft des Schrittmotors über eine gezahnte Riemenscheibe (Abb.: E.6). Die Zahnriemenscheibe übermittelt diese Kraft durch Einprägung des Profils in das kalte Filament. In Abb. E.6 werden die drei unterschiedlichen Zahnriemenscheibensysteme visualisiert, die an Extrudern verwendet werden. Hierbei soll das kreisrunde Filament gegriffen werden, um es so zu befördern. Die Art der Ausführung variiert hierfür.

In Abb. E.6 (B) dargestellt ist die Riemenscheibe mit geraden Zähnen und mit einem Kugellager mit Nut. Der Anpressdruck vom Kugellager zum Filament bestimmt hierbei den Grad der Reibung.

In Abb. E.6 (C) wird dieses Prinzip invertiert, wobei die Riemenscheibe zusätzlich ein Nut erhält und ein gerades Kugellager verwendet wird.

In Abb. E.6 (A) ist das s.g. *Bondtech Driver Gear Kit* illustriert [108], wobei zwei Riemenscheiben mit Nut über Zahnräder miteinander verbunden sind.

Alle diese Systeme wurden im Rahmen dieser Arbeit getestet und die Variante mit geraden Zähnen gewählt (Abb.: E.6 (B)), da weniger Abrieb bzw. Span vom Filament entstand. Gleichzeitig können mittels dieser verwendeten Mechanik und dem in dieser Arbeit entworfenem System mehrere Filamentdurchmesser verwendet werden (i.e. 1,75 mm, 2,85 mm).

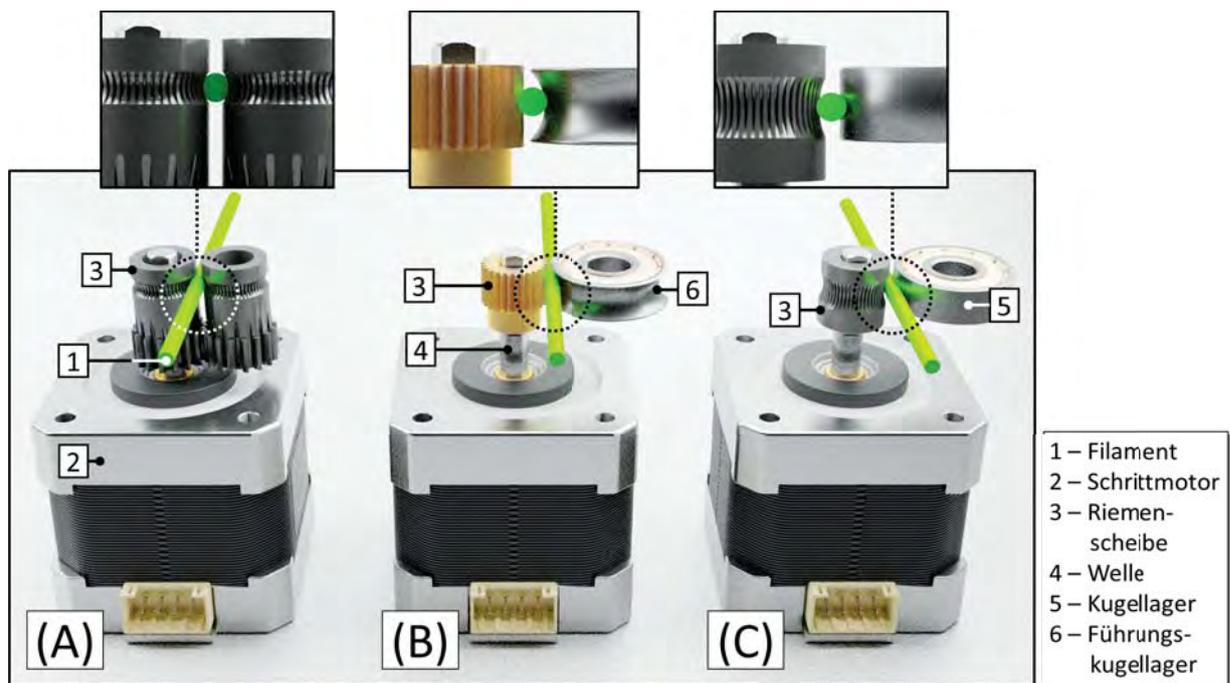


Abbildung E.6: Zahnriemenscheibensysteme die am Extruder von 3D-Druckern Verwendung finden. (A) *Bondtech* Doppelryemenscheibensystem, (B) Riemenscheibe mit geraden Zähnen, (C) Riemenscheibe .

F Modifikationen für FDM

In den folgenden Abschnitten wird auf alle Veränderungen und Modifikationen des 3D-Druckeraufbaus im Detail eingegangen. Im Rahmen des vorangegangenen Textes wird auf diese Teilkapitel individuell referenziert, um so dem Leser eine Übersicht zu geben. Gleichzeitig war es im Rahmen dieser Arbeit notwendig mehrere Weiterentwicklungen zu kreieren, die spezifisch erklärt werden müssen, da diese so nicht in der Fachliteratur zu finden sind.

F.1 Rohmaterial Filament

Die Essenz des 3D-Drucks, ist die Verarbeitung des Rohmaterials. In den folgenden Abschnitten wird näher darauf eingegangen.

Standardfilamente

Der verwendete Rohstoff im 3D-Druck ist s.g. thermoplastische Polymere, wie Polylactide, Polyvinylalkohol oder thermoplastische Elastomere. Zusammenfassend wird der in Drahtform auf Rollen vertriebene Rohstoff als **Filament** bezeichnet. Typischerweise werden diese mittels der charakteristischen Akronyme vertrieben, wie PLA, ABS, PTEG, TPU. Hinter diesen Kürzeln verbergen sich unterschiedliche Eigenschaften, wie Steifigkeit, Wasserfestigkeit, Flexibilität, Optik und Verarbeitung.

Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) zeichnet sich durch eine hohe Stabilität aus und wurde zu Beginn der Entwicklung der FDM-Druckverfahrens häufig verwendet [109, S. 240] (Abb.: F.1 (A, 2)). Dieses Material wird typischerweise bei einer Temperatur von 230°C bis 250°C verarbeitet, benötigt jedoch ebenfalls zwingend einen thermisch abgeschlossenen Raum, wobei das Druckbett auf 100°C permanent aufgewärmt bleiben muss. Die mechanische Steifigkeit von ABS beträgt 2300 MPa (340 ksi) [110, 11:49 Min.]. Das Material bringt den Vorteil mit sich beständig gegenüber UV-Licht zu sein. Dennoch besitzt ABS einen strengen süßlichen Geruch bei der Verarbeitung, was es für FDM-Druck in geschlossenen Räumen unangenehm macht.

Eine signifikante Verbesserung brachte deswegen die Verwendung von *Polymilchsäure* (engl.: Polylactide, PLA) [111], welche geruchslos verarbeitet wird (Abb.: F.1 (A, 1)). Das synthetische Polymere besitzt einen Schmelzpunkt von 130°C bis 180°C , wobei das Druckbett auf 60°C erhitzt sein muss⁴³. Die mechanische Steifigkeit von PLA beträgt 3300 MPa (490 ksi) [110, 11:49 Min.]. Dieser Rohstoff ist spröde. Dennoch zählt PLA zu dem am häufigsten genutzten Material für das FDM-Druckverfahren [112, S. 63-75].

Das Filament PETG steht für *Polyethylene Terephthalate* (PET) dem *Glycol* hinzugefügt worden ist (Abb.: F.1 (A, 3)). Dieses Material ist deswegen sehr attraktiv, weil es die positiven Eigenschaften von PLA und ABS miteinander vereint. Es ist wasserfest, weniger spröde und beständig gegenüber UV-Licht. Dieses Material wird typischerweise bei einer Temperatur von 240°C bis 260°C verarbeitet, mit einem beheizten Druckbett von 50°C bis 70°C und einer mechanischen Steifigkeit von 1900 MPa (280 ksi) [110, 11:49 Min.]. Dennoch ist die Verarbeitung des Materials anspruchsvoll, da es sehr hydrophil (Kpt.: F.2) ist und somit Fäden bei der Verarbeitung zieht (Abb.: F.4 (A)).

Alle diese drei Materialien kamen im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz. Hierbei musste differenziert werden, was das Einsatzgebiet des gefertigten Bauteils sein würde. Hierbei ist es jedoch sehr wichtig zu beachten, dass die Zusammensetzung der Materialien herstellerabhängig variiert und nicht auf das Akronym allein beschränkt ist.

Vertrieben werden diese Filamente in Kilogramm, aufgewickelt auf einem Träger in Spulenform. Der Nut-

⁴³Laut den Untersuchungen dieser Arbeit, konnte durch Verwendung eines abgeschlossenen Gehäuses (Kpt.: F.12) auch im Verlaufe des Drucks auf das beheizte Druckbett verzichtet werden.

zer hat hierbei die Wahl zwischen zwei Durchmessern von 1,75 mm und 2,85 mm (Abb.: F.1 (C, D)), wobei zumeist nur einer davon kompatibel mit dem verwendeten Gerät ist. Für diese Arbeit wurde das System so erweitert, dass beide Durchmesser verarbeitet werden konnten (Kpt.: F.6).

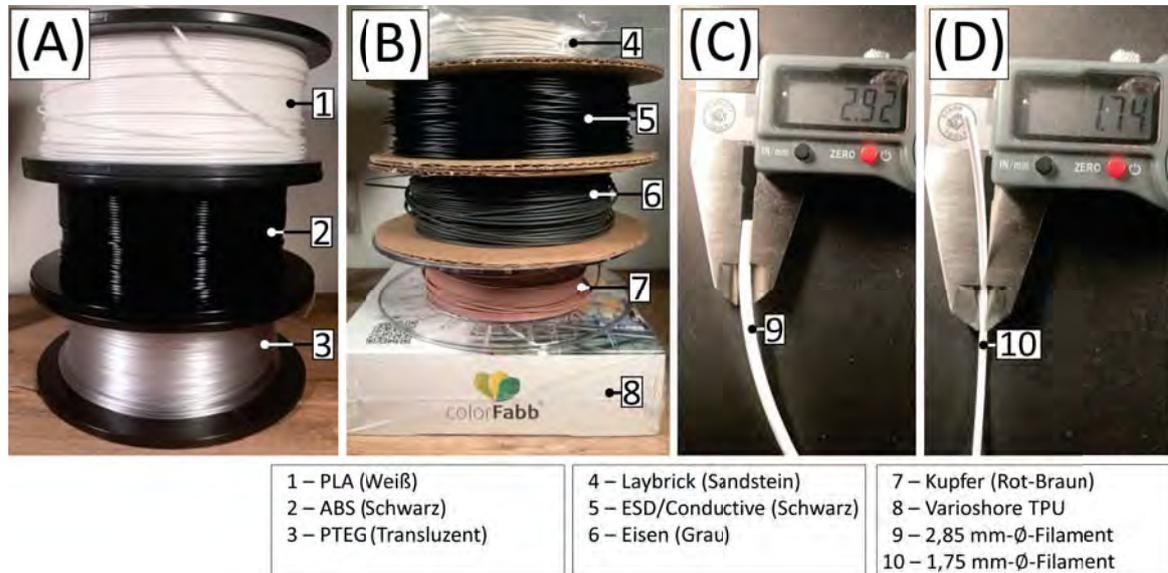


Abbildung F.1: Auswahl von verwendeten Filamenttypen für FDM-3D-Druckverfahren. (A) Standardfilamente PLA, ABS, PTEG, (B) Spezialfilament *Layfomm* (*CC-Product*), ESD (*Protopasta*), Eisen (*Protopasta*), Kupfer (*Protopasta*), *Varioshore* (*colorFabb*), (C) FDM-3D-Druckfilament mit dem Durchmesser von 2,85 mm, (D) FDM-3D-Druckfilament mit dem Durchmesser von 1,75 mm

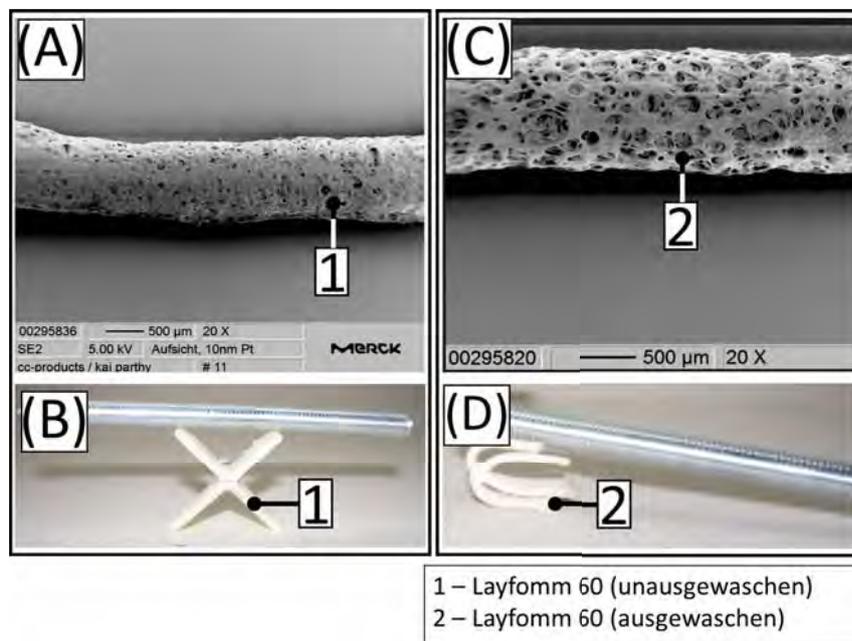


Abbildung F.2: Spezialfilament *Layfomm60* von KAI PARTHY. (A) Nahaufnahme von gedrucktem Filament *Layfomm60*, (B) mechanischen Eigenschaften von gedrucktem *Layfomm60*-Filament (nicht ausgewaschen), (C) Nahaufnahme von ausgewaschenem Filament *Layfomm60*, (D) mechanischen Eigenschaften von gedrucktem *Layfomm60*-Filament (ausgewaschen).

Spezialfilamente

Spezialfilamente sind der große Trumpf des FDM-Druckverfahrens. Durch das Schmelzschichtungsverfahren wird es möglich auch verschiedene Materialien miteinander zu kombinieren, die auch verschiedene Eigenschaften haben. Hierfür werden dem Polymere Partikel beigemischt, wie Kupfer- oder Eisenstaub (Abb.: F.1 (B, 6) [44], (B, 7) [60]). Unter denen von der Firma *Protopasta* angeboten Filamenten wird ebenfalls ein Filament mit beigemischt Graphit (Abb.: F.1 (B, 7)) [61] angeboten, welches dadurch eine elektrische Leitfähigkeit erhält.

Laut dem Zertifikat vom BASF [63] sind 50% der Partikel in diesen Filamenten $< 3,5 \mu\text{m}$.

In Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. KAI PARTHY wurden mit einer Vielzahl von weiteren Filamenten experimentiert, wie *Laybrick* (Abb.: F.1 (B, 4)) mit 35% Calciumcarbonat (CaCO_3), *Laywood* welches mit Holzpartikeln versetzt ist oder Carbonyl Eisen (Bestandteil: 85%).

Eine Vielzahl weiterer Typen von Filament werden permanent entwickelt. Es soll ein Augenmerk auf eine weitere Erfindung von KAI PARTHY aus Abb. F.2 gelegt werden. Das Filament besitzt hierbei die Eigenschaft Steifigkeit während des Druckvorgangs einzunehmen (Abb.: F.2 (B)). Wird das Filament oder gedruckte Objekt in Wasser eingelegt, so werden Bestandteile aus dem Material gelöst (Abb.: F.2 (C)), wodurch das gedruckte Objekt flexibel wird.

Weitere Spezialfilamente machen es möglich, anhand der verwendeten Schmelztemperatur die mechanischen Eigenschaften während des Druckvorgangs zu ändern. Das Filament *varioShore TPU* (Abb.: F.3) setzt Gase ab einer Verarbeitungstemperatur von 220°C (Abb.: F.3 (B, 2)) frei, wodurch Luftpneinschlüsse im Material entstehen (Abb.: F.3 (A, 1)). Hierdurch erhält das Material zusätzliche Flexibilität (Abb.: F.3 (C, 3)), als auch eine Gewichtsabnahme von 60% im Vergleich zu einem aus PLA gedrucktem Objekt. Um Filamente mit unterschiedlichen Füllstoffen (i.e. Kupfer, Eisen, Graphit, Kalzium-Carbonat) für das FDM-Verfahren zu erstellen, sind eine Vielzahl an Kombinationen möglich. Laut der Expertenaussage von KAI PARTHY [33], ist es bei der Entwicklung dieser Spezialfilamente wichtig, dass das „Backbone“-Polymer einen hohen *Melt-Flow-Index* (Abk.: MFI) und eine hohe Bruchdehnung besitzt. Dies gewährleistet die Druckbarkeit, in dem beim Erreichen der Schmelztemperatur das Extrudieren gewährleistet werden kann, ohne die Düse zu verstopfen. Gleichzeitig muss bei der Zusammensetzung berücksichtigt werden, dass während des Abspulens vom Träger und Einführung in den Extruder das Filament nicht bricht. Auf Grund der komplexen Zusammenhänge dieses Herstellungsprozesses wurden die Fachkenntnisse von KAI PARTHY für die Erstellung dieser Arbeit hinzugezogen.

Die besondere Eigenschaft, Rohstoffe auf diese Weise zu kombinieren, um neuartige Strukturen zu fertigen, um diese dann für die Hochfrequenztechnik zu nutzen, ist die Essenz dieser vorliegenden Arbeit.

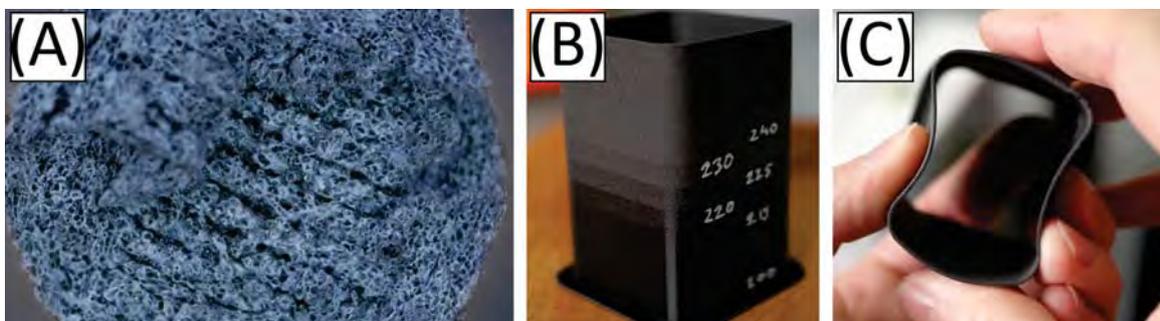


Abbildung F.3: Spezialfilament *varioShore TPU*. (A) Nahaufnahme vom Querschnitt des aufgeschäumten Materials mit Luftpneinschlüssen [113, 1:35 Min.], (B) Testobjekt mit stufenweiser variierender Temperatur aus *varioShore TPU* [113, 3:52 Min.], (C) mechanische Belastung auf Testobjekt mit resultierender Flexibilität [113, 4:52 Min.].

F.2 Trocknung von Filamenten

Alle im FDM-Druck verwendeten Filamente besitzen hydrophile Eigenschaft, wobei die Luftfeuchtigkeit des Raums absorbiert und eingelagert wird (Abb.: F.4 (B)). Dieser Effekt führt zu unerwünschten Begleiterscheinungen, wobei das Filament beim 3D-Drucken Fäden zieht (Abb.: F.4 (A)) und mechanische Stabilität verliert [114, 9:18 Min]. Der kurzzeitige Zeitpunkt der Erhitzung des Filaments in der Düse reicht nicht aus, um den Wasseranteil im Filament vollständig zur Verdunstung zu bringen. Ein charakteristisches Indiz für ein feuchtes Filament sind beispielsweise Bläschen auf der Oberfläche des Filaments nach dem Extrudieren (Abb.: F.4 (C)), verbunden mit akustischen Knackgeräuschen während des Prozesses. Die erzeugte Verklumpung führt zu einer inhomogenen Verteilung des Rohstoffes, wodurch sich analog das hochfrequente Verhalten von Proben chaotisch verändert. Relevant ist dies beispielsweise für die in dieser Arbeit hergestellten Composite, die nach der Fertigung gelagert wurden. So war es im Rahmen dieser Arbeit notwendig diese Problematik zu lösen, welche im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Um die Trocknung des Filaments durchzuführen, wurden verschiedene Konzepte abgewogen, die während der aktuell vorherrschenden Pandemie umsetzbar waren. Zur Trocknung vom Filament ist eine Vorrichtung zur kontrollierten Erzeugung von Wärme notwendig. Laut den Betrachtungen von [115] ist es hierfür möglich einen häuslichen Backofen, Dörrautomat oder Vakuumtrocknung zu verwenden. Für diese Arbeit wurde ein handelsüblicher Dörrautomat⁴⁴ verwendet, auf Grund der Verfügbarkeit und der Möglichkeit niedrigere Temperaturen erzeugen zu können⁴⁵. Ziel des Gerätes ist die Dehydratation von Lebensmitteln, um diese so haltbarer zu machen. Der Wasserentzug erfolgt hierbei durch warme Luft, welche an der Oberfläche vorbeiströmt und somit das verdunstende Wasser an die Umgebung abgibt. Analog bedeutet dies eine Gewichtsabnahme durch diesen Verlust.

Der verwendete Aufbau zur Trocknung des Filaments kann der Abb. F.5 entnommen werden. Wie an der Abb. F.5 (A) zu erkennen ist, wurde das Gerät [116] so modifiziert, dass ein Filamentträger untergebracht werden kann. Die am Dörrautomat eingestellte Temperatur wurde mittels Infrarot-Thermometerpistole⁴⁶ (Abb.: F.5 (B)) abgeglichen, wobei eine Abweichung von $\pm 2.5^\circ C$ beobachtet wurde. Die Gewichtsmessung erfolgte mithilfe einer Digitalwaage⁴⁷ (Abb.: F.5 (C)), welche vorab mit Kalibrierungsgewichten (100 g,

⁴⁴Deluxe Dörrautomat von Kitchenware

⁴⁵Regelbar von $33 - 70^\circ C$

⁴⁶Bosch PTD1 -20 bis $+200^\circ C$

⁴⁷Josh Z Mini Scale Modell Z200

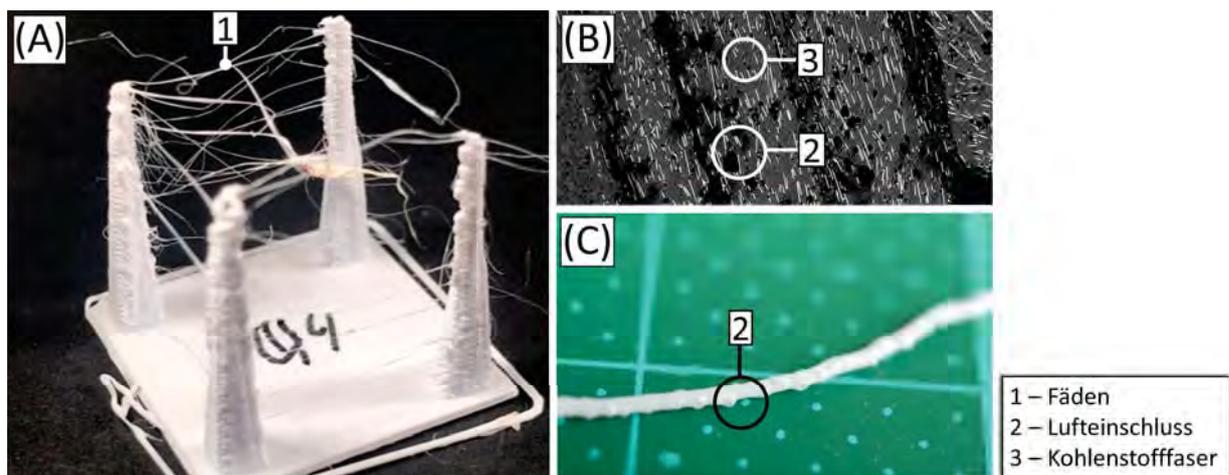


Abbildung F.4: Auswirkungen auf FDM-Druck bei Wassereinlagerung im Filament. (A) Testobjekt mit unerwünschten Fäden bei PTEG, (B) Makroskopische Aufnahme von Filament mit Luft einschüssen [114, 0:56 Min], (C) Bläschenbildung an extrudierten feuchten Filament [114, 0:40 Min].

200 g) vorab justiert wurde.

Wie im Graphen von Abb. F.6 (A) zu sehen ist, wurde das Filament *Laybrick*[65] über einen Zeitraum von 6,5 h im Dörrautomat getrocknet, wobei analog dessen Masseänderung beobachtet wurde. Wie erkennbar ist, verliert der Rohstoff über diesen Zeitraum an 0,65% an Masse⁴⁸, wobei eine Konvergenz ab 5,5 h zu erkennen ist und somit von einer maximalen möglichen Austrocknung auszugehen ist mit dieser Methode. Mittels des getrockneten *Laybrick* Filaments wurde eine Probe gedruckt (Abb.: F.6 (C)) und mit der nicht getrockneten Variante gegenübergestellt (Abb.: F.6 (B)). Bei der getrockneten Variante sind weniger Fäden im Objekt zu erkennen. Ebenfalls sind die Kanten des Sockels der vier Türme ausgeprägter, wobei dies ebenfalls zur Hälfte der Druckhöhe konsistent bleibt. Das Filament *Laybrick* ist ein sehr weicher Rohstoff, weswegen analog Proben mit PTEG miteinander verglichen werden sollen, abermals mit einer nicht getrockneten Variante (Abb.: F.6 (D)) und einer getrockneten (Abb.: F.6 (E)). An der ungetrockneten PTEG-Variante ist hierbei Fadenbildung zu erkennen und die Auflösung der Geometrie der vier Türme auf der Hälfte der Druckhöhe. Dem gegenübergestellt sind dagegen bei der getrockneten PTEG-Variante keine Fäden mehr zu beobachten. Zudem ist keine signifikante Veränderung der geometrischen Struktur anhand der vier Türme ersichtlich.

Zusammenfassend ist somit davon auszugehen, dass die Trocknung des Filaments eine Notwendigkeit für das FDM-Druckverfahren ist und somit permanente Anwendung im Rahmen dieser Arbeit finden muss.



Abbildung F.5: Modifizierter Dörrautomat zur Trocknung des Filaments mit digitaler Waage. (A) Überblick der verwendeten Geräte, (B) Temperaturmessung des zu trocknenden Filaments mittels Infrarotpistole, (C) Gewichtsmessung mit Digitalwaage.

⁴⁸Der zu erkennende Sprung im Zeitraum 01:30 bis 02:00 ist durch unachtsame Handhabung zu begründen, wobei ein Teil abgebrochen ist.

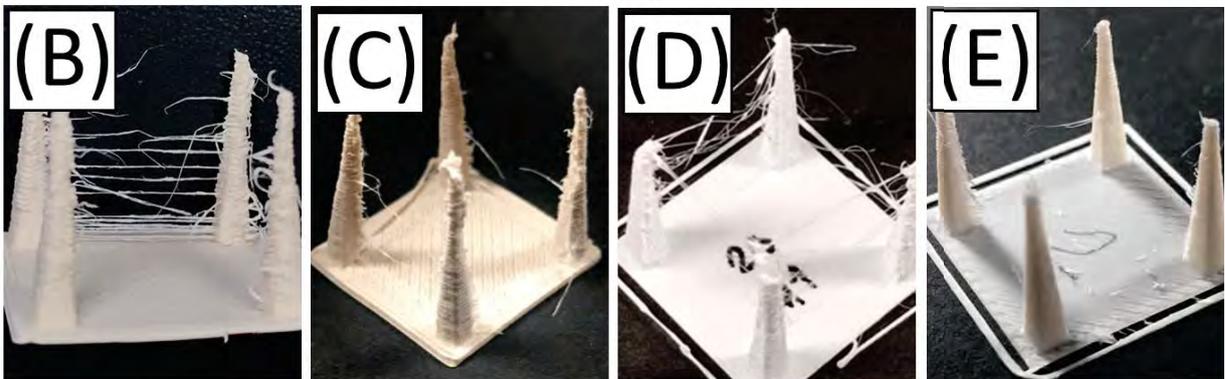
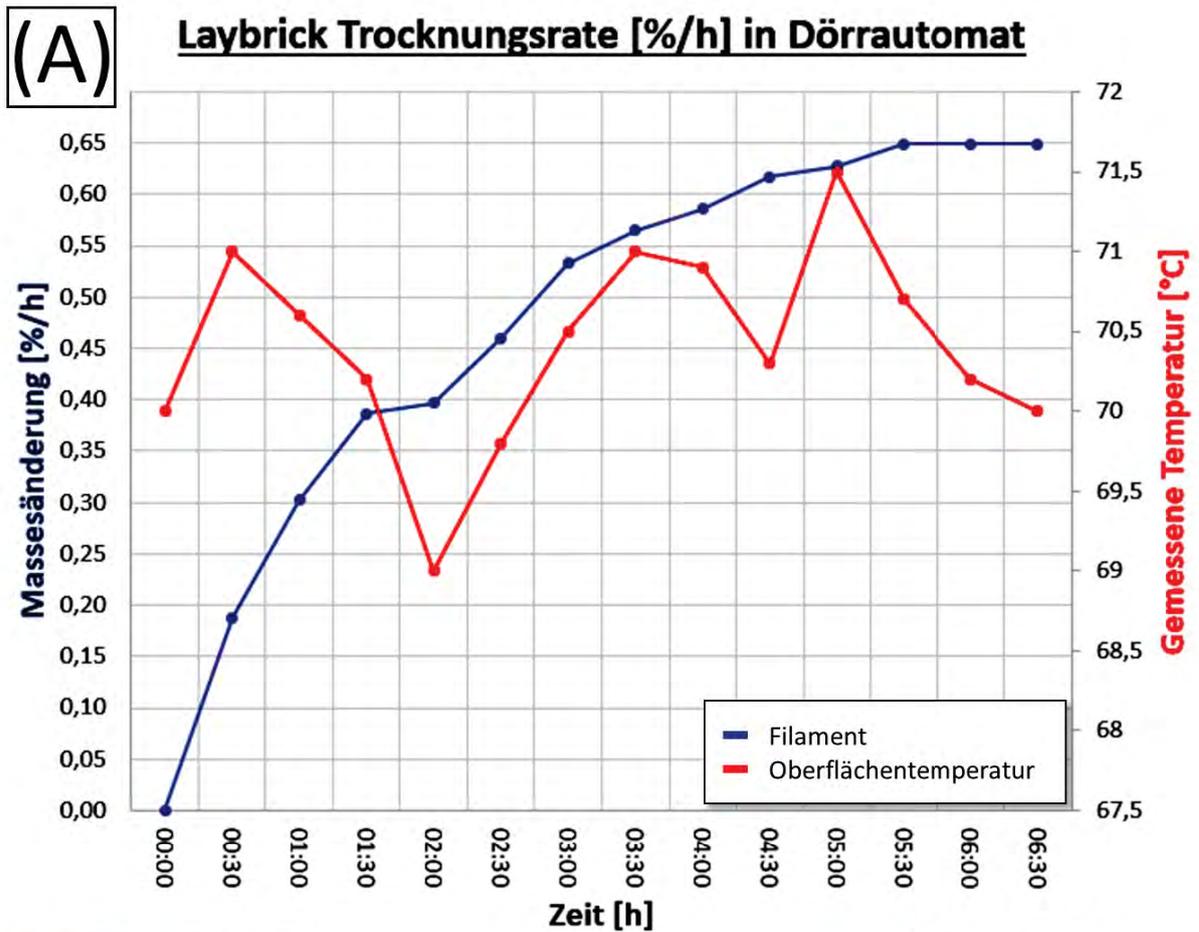


Abbildung F.6: Auswirkung von Filamenttrocknung auf Filament für FDM-Druck. (A) Masseänderung von Laybrick-Filament bei Trocknung im Dörrautomaten (Teilstück abgebrochen bei 02 : 00 h), (B) Probe mit Laybrick-Filament vor Trocknung, (C) Probe mit Laybrick-Filament nach Trocknung, (D) Probe mit PTEG-Filament vor Trocknung, (E) Probe mit PTEG-Filament nach Trocknung.

F.3 Modifiziertes Cold-Pull-Verfahren

Der ungestörte Durchfluss des Filaments durch die Düse ist von höchster Wichtigkeit für das Gelingen des 3D-Drucks. Nicht nur um allein einer Verstopfung vorzubeugen, sondern um zu verhindern, dass Staub- und Filmreste sich nicht im neu eingespeisten Filament einbinden und so zu ungewollten Effekten führen. Beispielsweise wurde im Verlauf dieser Arbeit mit Graphitstaub versetztes Filament verwendet, welches sich in der Düse anlagerte. Folglich, um dieses vorzubeugen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, um eine Reinigung vorzunehmen⁴⁹.

Eine Automatisierung hierfür ist mit sehr viel Mehraufwand verbunden und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen⁵⁰. Deswegen wird in diesem Abschnitt das essentielle Handwerk für ein manuelles Verfahren illustriert, welches wiederholt zur Anwendung kam und hier mehrfach referenziert wird. Referenzen dazu sind ebenfalls unter dem Begriff *Cold-Pull-Verfahren* zu finden, welches jedoch erweitert wurde, da es große mechanische Belastung auf die verwendeten Teile ausübt.

Vorgang

Die Ausgangssituation ist in Abb. F.7 (A) illustriert, wobei ein Fremdkörper in die Düse gelangt ist und sich am unteren Ende angelagert hat. Dies können Staubpartikel sein, Span von Metallen oder Reste von Filamentgemischen (i.e. Graphit, Holz, Kupfer, Eisen). Um welche Verunreinigung es sich auch handelt, die Größe der Partikel verhindert eine Entfernung über den Düsenauslass.

Um die Partikel zu entfernen, wird die Heizkartusche inklusive der Düse auf die Schmelztemperatur von PLA erhitzt (i.e. $> 200^\circ\text{C}$) und das Filament eingeführt (Abb.: F.7 (B)). Vorzugsweise sei hierbei weißes Filament verwendet, um die Entwicklung der Reinigung sichtbar zu machen. Abhängig vom Grad der Verunreinigung sei darauf zu achten, dass das Filament aus der Düse extrudiert wird. Das nun eingeführte Filament umschließt die Verunreinigung und dient als Trägermedium. Die Heizkartusche wird nun abgeschaltet, so dass diese sich auf einen Wert von $< 50^\circ\text{C}$ abkühlt und das Filament erstarrt.

Um das erkaltete Filament aus der Düse entfernen zu können, muss wie in Abb. F.7 (C) eine mechanische Zugkraft F_{ext} am Filament ausgeübt werden, entgegen der Extrudierungsrichtung. Hierbei sei jedoch nicht das Ziel das Filament im kalten Zustand auszureißen, da dies zur Beschädigung der Mechanik und der Kalibrierung führen würde. Um das Filament nur von den Wänden der Düse zu lösen, wird die Heizkartusche erneut erhitzt, bis das Filament der Zugkraft F_{ext} nachgibt.

Programmierung

Es werden die Eigenschaften von `#define ADVANCED_PAUSE_FEATURE` verwendet, da dieses bereits viele notwendige Teilschritte für die Reinigung enthält (i.e. Erhitzung und Abkühlung der Düse, Extrudieren des Filaments).

Ergebnis

Anhand der Abb. F.7 (D) wurde die Reinigung der Düse mittels weißem PLA von schwarzem Graphitstaub illustriert. Hierbei wurde der beschriebene Reinigungsvorgang viermal wiederholt und die Iteration

⁴⁹Von einer Reinigung mittels einer Nadel sei abzuraten, wobei ein feines Objekt durch die Düse eingeführt wird und somit die Verunreinigung zerstoßen werden kann. Das härtere Metall führt zur Weitung des Düsenauslass, da die Enden abgerundet werden.

⁵⁰Es wäre hierfür notwendig, den Schrittmotor vom Extruder eine permanente, entgegen der Extrudierungsrichtung ausübende Zugkraft erzeugen zu lassen. Gleichzeitig würde man die Funktion *Stall-Guard-Protection* der *Trinamic TMC2130*-Schrittmotortreiber nutzen, wobei eine Blockierung des Schrittmotors diesen dazu animieren würde, weiterhin Zugkraft auszuüben. Hierbei würde der Motor aufhören am Filament zu zerrn, wenn ein Ausbleiben der Blockierung am Schrittmotor detektiert würde. Letztendlich müsste diese Automatisierung mit der Entfernung des Endstücks vom Filament abgeschlossen werden, dessen Länge ebenfalls bestimmt werden müßte.

nebeneinander aufgereiht. Anhand der ersten Iteration (Abb.: F.7 (D) links) ist anhand der Schattierung zu erkennen, dass große Teile von Graphit noch in der Düse vorhanden waren und mit dem eingeführten PLA vermischt worden sind. Mit zunehmender Wiederholung ist erkennbar, dass diese Schattierungen abnehmen, bis diese in der vierten Iteration verschwunden sind (Abb.: F.7 (D) rechts).

Des Weiteren ist anhand der entnommenen Proben ebenfalls am Ende des Düsenauslasses erkennbar, an welchem der Abnutzungsgrad der Düse ermittelt werden kann.

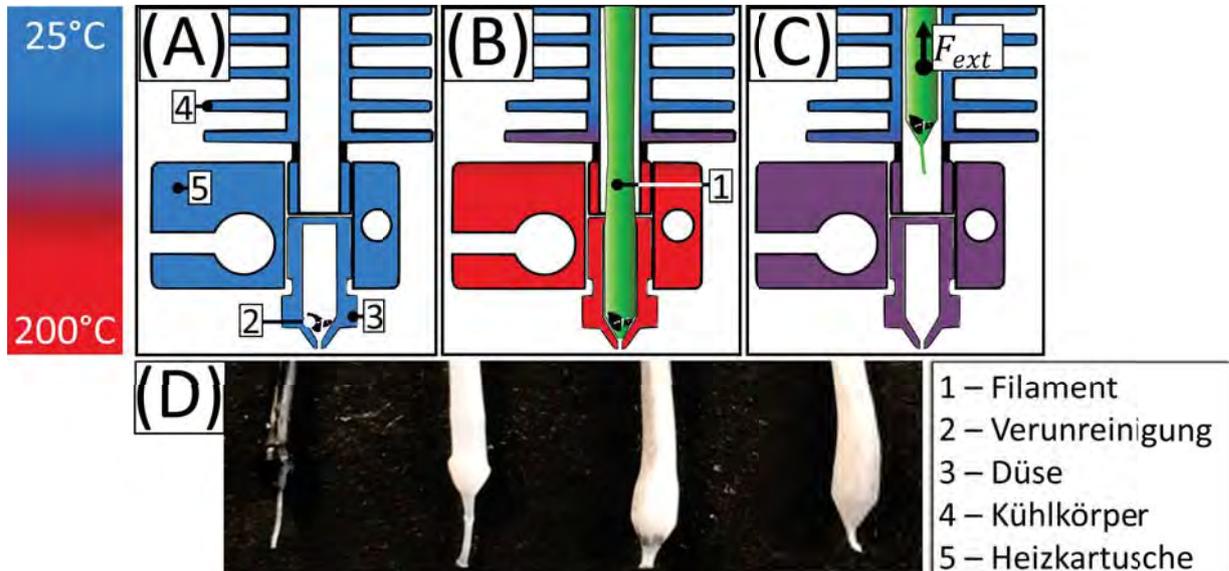


Abbildung F.7: Entfernung von Verunreinigungen der Düse beim FDM-Drucker mittels modifiziertem *Cold-Pull*-Verfahren, (A) Ausgangssituation mit verunreinigter Düse, (B) Einführung von Filament, um Verunreinigung einzuschließen, (C) Entfernung der Verunreinigung von der Düse, (D) Fotos von vier Iterationen des Reinigungsverfahrens.

F.4 Elektrische Hardware

Im folgenden Abschnitt wird auf die verwendete elektrische Hardware des 3D-Drucker-Designs eingegangen. Mehr Iterationen wurden hierfür verwendet, welche maßgeblich Einfluss auf die Resultate hatten. Diese Entscheidungen müssen begründet werden.

Mainboard

Die Hauptplatine (engl.: *Mainboard*) ist verantwortlich für alle ausführenden Funktionen des 3D-Druckers. Es führt die Anweisungen des *GCodes* (Kpt.: C.2.1) aus, reguliert die Temperaturen und reguliert die Bewegungen. Zusätzlich ist es hierbei sehr wichtig auf die Modifizierbarkeit des Mainboards zu achten. Bei dem ursprünglichen mit dem *Ender 3 Pro* mitgelieferten Mainboard handelt es sich um ein *Creativity Melzi 1.1.X*⁵¹, welches über vier festinstallierte *A4988* Schrittmotortreiber verfügt und keine zusätzlichen I/O-Pins. So ist es beispielsweise notwendig für die Verwendung eines Abtasters des Druckbetts (s.a. Kpt. F.10) den zusätzlichen Pin 27 des Displays zu verwenden. Für die Verwendung eines Filamentsensor (s.a. Kpt. F.6) muss bereits ein weiterer Pin verlötet werden, um Zugang zum Pin 29 zu erhalten. Hinzu kommt die Problematik des geringen Speichers, da das *Creativity Melzi 1.1.X* nur über eine Kapazität von 130048 Bytes verfügt, was es notwendig macht mehrere Funktionen zu deaktivieren⁵². Für den Rahmen der Verwendung dieser Arbeit ist das Mainboard deswegen ungeeignet.

Die Weiterentwicklungen von 32-Bit-Systemen und speziell des *ARM Cortex-M3 LPC 1768 (NXP)* erlaubten es ein günstiges und leistungsstarkes *Mainboard* für den 3D-Drucker zu erwerben, welches den Ansprüchen dieser Arbeit genügt. Verwendet wurde das *Big Tree Tech SKR (BIQU) V1.3* (Abb.: F.8 (A)). Es verfügt über eine Vielzahl benötigter modularer Eigenschaften, wie auswechselbare Schrittmotortreiber (Abb.: F.8 (A, 1)) mit SPI- und UART-Mode für *TMC*-Schrittmotortreiber, eine mittels PWM steuerbare modulare Spannungsversorgung für 12/24 V (Abb.: F.8 (A, 5)), sowie eine Vielzahl freier I/O-Pins für zusätzliche Peripherien (Abb.: F.8 (A, 8)). Die Speicherkapazität ist bei diesem Mainboard nicht auf den internen Speicher beschränkt, sondern ist modulierbar durch die entnehmbare Micro-SD-Karte. In den weiteren Ausführungen dieser Arbeit wird auf die Verwendung dieses Mainboards eingegangen.

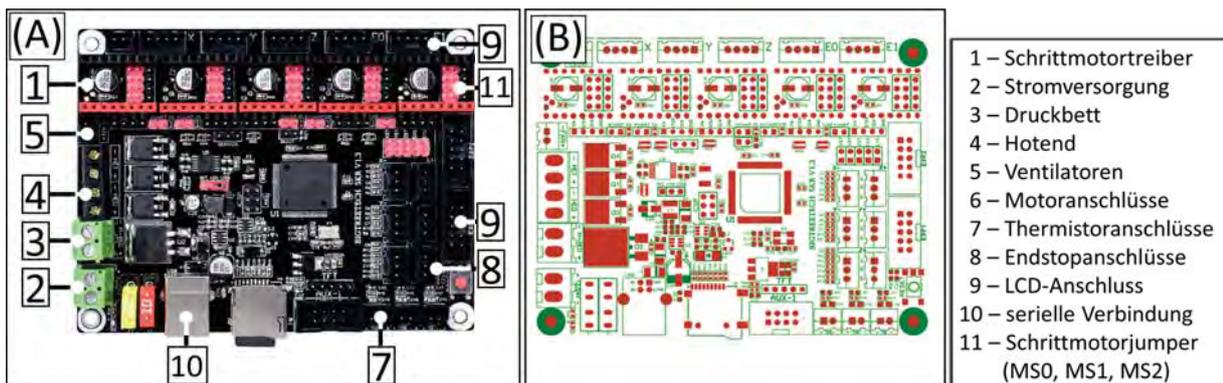


Abbildung F.8: Verwendete Hauptplatine *BigTreeTech SKR V1.3*. (A) Draufsicht der Anschlüsse am Mainboard mit allen wichtigen Anschlüssen, (B) Anschlussdiagramm des Mainboards [117, S. 8].

⁵¹Eigenschaften: 1284P Mikrocontroller; 128 KB Flash, 16 KBRAM, 4 KP EEPROM

⁵²Zu deaktivierende Funktionen: speaker; bootscreen, arc_support_disable_M503, slim_lcd_menus

32-Bit statt 8-Bit

Die Standardausführung der Hauptplatine *Creality Melzi 1.1.X* eines *Ender 3* ist mit dem 8-Bit-System *ATMEGA 2560* versehen, der über einer Taktfrequenz von 16 MHz verfügt. Dieses Mikrocontroller-Board koordiniert die Bewegungsabläufe der vier Achsen, die Stromversorgung der Heizelemente (i.e. *Hotend*, Druckbett), die simultane Übertragung des Offsets vom Bett (s.a. Kpt. F.10), die Integration von Beschleunigung und Bremsvorgang (s.a. F.15), sowie die notwendige Erweiterung zur geometrischen Verfeinerung (s.a. F.15). Als Folge dessen kommt es besonders bei zirkularen Bewegungen (Kpt.: 6) dazu, dass ein Stottern und Stocken beim Druckprozess stattfindet, was zum Verlust des Drucks führt, wie beispielsweise Ebenenverschiebungen. Um diese Fehler zu eliminieren wurde die ARM-Architektur mit 32 Bit und 100 MHz Taktrate gewählt.

Raspberry Pi

Es wird für die Ausführung des 3D-Drucker vorausgesetzt, dass eine externe Erstellung des Machinencodes (*GCode* (Kpt.: C.2.1)) vorgenommen wird und durch Zugriff auf einen Dateispeicher der Druckauftrag ausgeführt werden kann. Optional ist es aber ebenfalls möglich die serielle Verbindung des Mainboard zu verwenden (Abb.: F.8 (A, 10)), um mittels *Prontaface* oder *Machine Control Panel*⁵³ das Terminal auszulesen und Kommandos zu senden. Um dem gesamten System des 3D-Druckers zusätzliche Mobilität zu geben, wird das Auslesen der seriellen Kommunikation an einen *Raspberry Pi* übergeben, wobei das webbasierte *Octoprint* (s.a. Kpt. C.3.2) die Steuerung übernimmt (Abb.: F.9 (A)). Zusätzlich zum Terminal hat der Nutzer gleichzeitig die Möglichkeit Datenbanken der *GCodes* zu erstellen, sowie Dokumentationen des Druckvorgangs als LOG-Datei in Schrift und Bild, um so Fehler nachvollziehen zu können. Hierbei ist zu beachten, dass die Eigenschaften des *Raspberry Pi*'s ebenfalls maßgeblich den Druckvorgang bestimmen, da es Einfluss auf die Performanz des 3D-Druckers nimmt. So wurde in einer ersten Variante des Aufbaues ein *Raspberry Pi 3 Model B*⁵⁴ verwendet, dessen UFL-Antenne mittels einer externen ISM-Antenne erweitert wurde, um die Reichweite zu erhöhen. Die Leistungsfähigkeit des Gerätes war jedoch nicht ausreichend, um alle Anforderung zu bedienen (i.e. Videoüberwachung, Datentransfer, Terminalüberwachung, simultane Druckauftragsausübung). Ein Austausch mit der leistungsstärkeren Variante, dem *Raspberry Pi 4 Model B*⁵⁵, konnte die Probleme beheben.

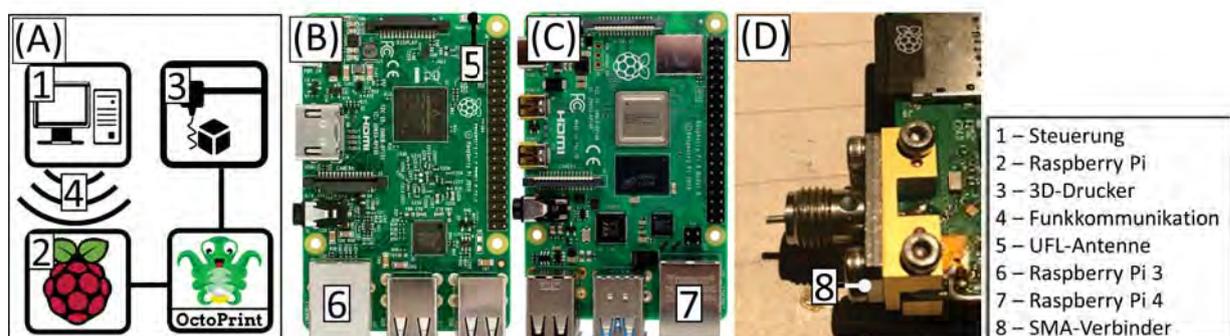


Abbildung F.9: Verwendete Architektur für 3D-Druckeraufbau. (A) Logik des Aufbaues, (B) Draufsicht auf *Raspberry Pi 3 Model B* mit installierter UFL-Antenne, (C) Draufsicht auf *Raspberry Pi 4 Model B*, (D) Seitenansicht von *Raspberry Pi 3 Model B* mit installiertem SMA-Stecker für externe ISM-Antenne.

⁵³Simplify3d: \Simplify3D\Tools\Machine Control Panel\

⁵⁴RPi 3 Mod. B: CPU Cortex-A53 1,4 GHz, RAM 512 MB, Wifi 2,4 GHz b/g/n

⁵⁵RPi 4 Mod. B: CPU Cortex-A72 1,5 GHz, RAM 2048 MB, Wifi 2,4 & 5 GHz b/g/n/ac

Schrittmotoren

Für diese Arbeit wurden zwei Typen von *NEMA17*-Schrittmotoren verwendet, da diese den benötigten Anforderungen entsprachen. Diese Hybridschrittmotoren zeichnen sich durch ihre Umdrehungsgenauigkeit aus, wobei $1,8^\circ$ Vollschrittwinkel ausgeführt werden können, resultierend in 200 Schritte je Vollumdrehung. Für die Z-Achse wurde ein kleiner Nema-17-Motor (Abb.: F.10 (A, 1)) verbaut, welcher im Standardlieferumfang des *Ender 3* enthalten ist. Die kleinere Gehäusedimension dessen (32 mm) korrespondiert in einem reduziertem Haltemoment von $1,6\text{ kg} \cdot \text{cm}$ ($0,1569\text{ Nm}$). Dieser Faktor wurde jedoch im Verlaufe dieser Arbeit kompensiert, durch den Einsatz eines Kraftwandlers (engl.: *Mechanical Advantage*) (s.a. Kpt. F.5). Da dies für die X-, Y- und E-Achse nicht möglich war, wurden stattdessen Nema-17-Motoren größerer Gehäusedimension (42 mm) verwendet, welche ein Haltemoment von $4,0\text{ kg} \cdot \text{cm}$ ($0,3922\text{ Nm}$) besitzen (Abb.: F.10 (A), (B, 2)). An der X-Achse wurde dies notwendig auf Grund des schwereren Extruders (Kpt.: F.6) und für die Y-Achse wegen des Aufbaus auf dem Druckbett (Kpt.: 8.6). Der Auslieferungszustand des *Ender 3* setzt als Standard die Nutzung eines stärkeren Motors für die E-Achse voraus, da diese die meiste Belastung erfährt.

Die Verwendung der größeren Motoren ist auf die ausgebliebene Verwendung von Rückmeldesysteme (engl.: *Closed Loop Communication*) an den Schrittmotoren zurückzuführen. Hierbei wird mittels der zusätzlichen Kontrolleinheit *S42B* (Abb.: F.10 (B, 3)) die Umdrehung der Motoren nachvollzogen und nachkorrigiert.

Es soll hier kurz auf die Funktionalität dieser Schrittmotoren eingegangen werden, da dies relevant für die Wahl der Schrittmotortreiber ist (Kpt.: F.4). In Abb. F.11 (A) wird das Schema eines Schrittmotors dargestellt, dessen Rotor zur Rotation gebracht wird, durch das erzeugte magnetische Feld in den Statorspulen. Die Stromrichtung bestimmt die Position des Rotors, wobei im Beispiel von Abb. F.11 (A) vier möglich sind. Eine höhere Auflösung dagegen kann mit Hybridmotoren (Abb.: F.11 (B)) bewirkt werden, die über acht Statorspulen verfügen. Ermöglicht wird dies durch die versetzte Verzahnung des Rotors (Abb.: F.11 (C, 4)), der es dadurch erlaubt mehrere Positionen einzunehmen. Eine noch höhere Auflösung ist mit der Wahl der Schrittmotortreiber möglich.

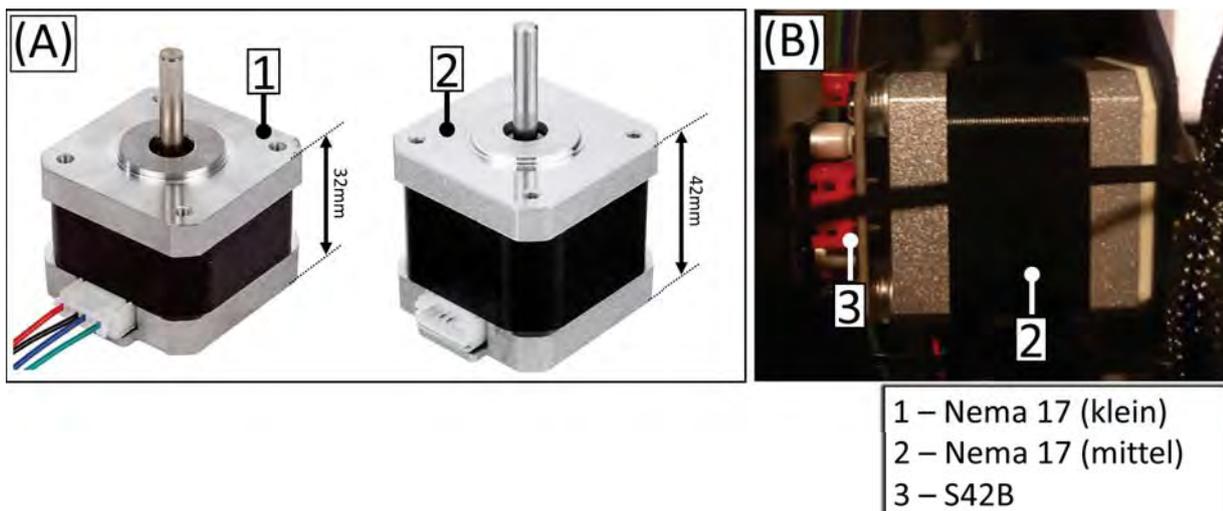


Abbildung F.10: *Nema-17*-Motoren am verwendeten Aufbau. (A) Größenvergleich von zwei Motoren, (B) installierter *Nema-17*-Motor (42 mm) an der X-Achse mit S42B.

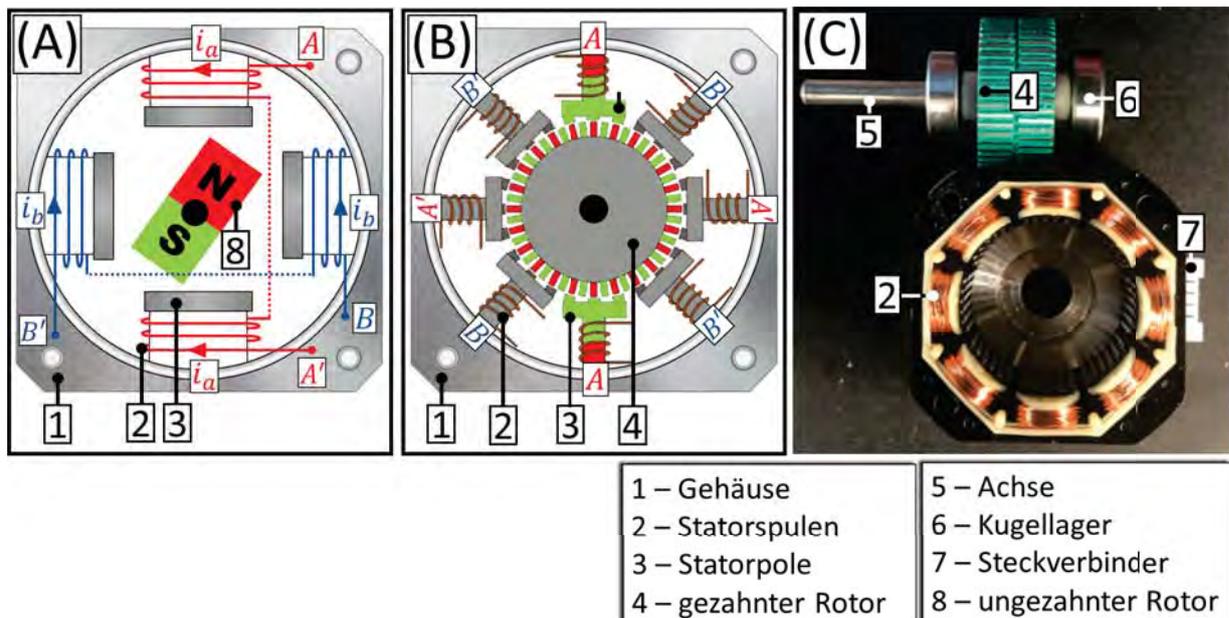


Abbildung F.11: Funktionsweisen von Elektromotoren als (A) Querschnitt eines Schrittmotors mit vier Schritten für eine Umdrehung, (B) zweiphasiger Hybridschrittmotor mit 8 Wicklungen im Querschnitt, (C) zweiphasiger Hybridschrittmotor mit ausgebautem Rotor.

Schrittmotortreiber

Die Wahl der Schrittmotoren haben maßgeblich Einfluss auf die Qualität des Drucks. Abhängig vom Modell werden Vibrationen am 3D-Drucker erzeugt, die sich auf die Genauigkeit der Bewegung der Achsen auswirkt. Hierfür werden Berechnungen von der Firmware *Marlin* vorgenommen, basierend auf dem gesendeten *GCode* (Kpt.: C.2.1) und der angegebenen Schrittmotorweite (Kpt.: F.11), die als Sequenz von Pulsen vom Schrittmotortreiber als Mikroschritte (engl.: *Microstepping*) an den Schrittmotor gesendet werden. Die elektronische Schrittteilung ermöglicht es den Schrittwinkel zusätzlich zu verkleinern. Dafür werden die Phasen nicht an- und ausgeschaltet, sondern stufenweise geändert, welches eine zweigestufte phasenverschobene Sinus-Funktion ergibt. Die entstehende Schrittteilung ergibt sich als geteiltes Vielfaches, wie Halbschrittbetrieb (Abb.: F.12 (A)) oder Achtelschrittbetrieb (Abb.: F.12 (B)). Somit wird eine höhere Laufruhe geliefert, da ein gleichmäßiges Drehmoment geliefert wird. Für diese Arbeit wurde eine Mikroschrittweite von Achtelschrittbetrieb gewählt, durch Entfernen der zugehörigen Jumper am *BIQU SKR V1.3* für MS0, MS1 und MS2 [117, S. 5] (Abb.: F.8 (A, 11)).

In Abb. F.12 (C) sind die verschiedenen Schrittmotortreiber dargestellt, mit welchen im Rahmen dieser Arbeit experimentiert wurde. Die Modelle *A4988* und *DRV8825* wurden auf Grund ihrer geringen Einstellmöglichkeiten nicht für die Arbeit verwendet. Im Gegensatz dazu besitzen alle TMC-Modelle die Eigenschaft mittels des Terminals und dem Befehl M122 Zustandsrückmeldungen zu geben, um beispielsweise den induzierten Strom an die Schrittmotoren verändern zu können. Dies wird möglich mit dem s.g. UART-Mode (engl.: *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*), wobei mittels Überbrückungen die serielle Schnittstelle der Schrittmotortreiber angesprochen werden kann (Abb.: F.12 (D)). Basierend auf der eingestellten Referenzspannung von $R_{Ref} = 0,76\text{ V}$, wurde der Strom gewählt mit X und $Y = 230\text{ mA}$, $Z = 300\text{ mA}$, $E = 450\text{ mA}$ ⁵⁶. Diese Einstellung ist sehr wichtig für diese Arbeit, da somit die Betriebs-

⁵⁶Berechnung erfolgt wie folgt:

V_{Ref} Referenzspannung

I_{Rms} Quadratisches Mittel (engl.: Root Mean Square) des Stroms der Phase ($I_{Rms} = I_{Max}/1,41$)

I_{Max} Maximaler Strom der Phase ($I_{Max} = I_{Rms} \cdot 1,41$)

temperatur der Motoren gesteuert werden konnte. Das verwendete Gehäuse (Kpt.: F.12) verhinderte eine passive Kühlung der Hybridmotoren, welche sonst nicht in Kombination von 3D-gedruckten Bauteilen hätte verwendet werden können. Da die Motoren eine Betriebstemperatur von bis zu 60°C erreichen können, würden diese die mechanische Integrität der Teile kompromittieren.

Von den gezeigten TMC-Schrittmotortreibern (Abb.: F.12 (C)) kam für diese Arbeit nur das Modell TMC2209 in Betracht, da nur diese mit *Linear Advance* (Kpt.: F.15) verwendet werden konnte. Die Vorgängerversion TMC2208 erlaubt keine Verwendung von Linear Advance in Kombination mit Stealthchop und generierte so eine Vielzahl von Ebenenverschiebungen durch Schrittmotorverluste. Die Version TMC2130 wurde nicht auf Grund des fehlerhaften SPI-Modes verwendet, welcher Rückmeldung zu möglichen Blockaden geben sollte.

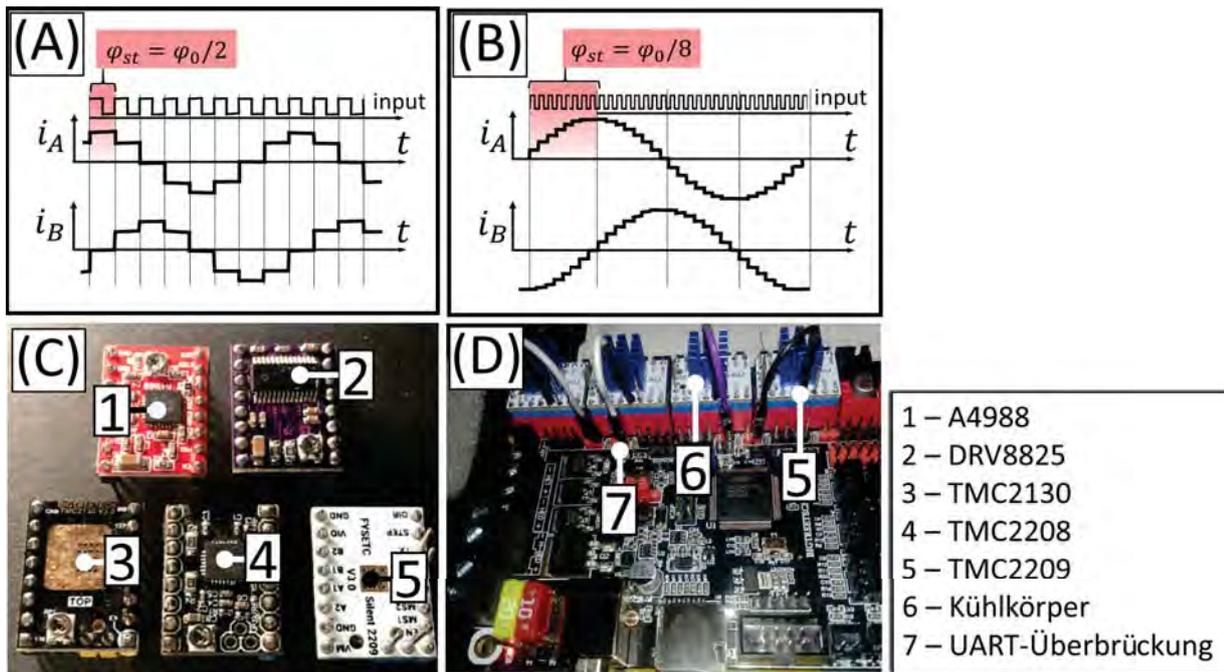


Abbildung F.12: Funktionsweise von Schrittmotortreibern (A) elektronische Schrittteilung mit zwei aufeinanderfolgenden Phasen als Halbschrittbetrieb, (B) elektronische Schrittteilung mit zwei aufeinanderfolgenden Phasen als Achterschrittbetrieb, (C) Überblick der verwendeten Schrittmotortreiber, (D) Verbaute Schrittmotortreiber mit UART-Überbrückung.

$$V_{Ref} = (I_{Rms} \cdot 25 V) / 1,77 A = I_{Rms} \cdot 1,41 = I_{Max}$$

$$I_{Rms} = (V_{Ref} \cdot 1,77 A) / 2,5 V = V_{Ref} \cdot 0,71$$

F.5 Doppelte Z-Achse

Einen großflächigen Druck an einem FDM-Drucker zu erstellen, ist eines der Qualitätsmerkmale eines jeden Gerätes. Die erfolgreiche Umsetzung dessen ist abhängig von der Bauweise der FDM-Drucker und deren Komponenten. Für diese Arbeit ist dies essenziell gewesen, da bei der Erstellung der Filamentkomposite großflächig das Druckbett mittels Spulen bedruckt wurde. Eine geringe Abweichung in der vertikalen Höhe des hergestellten Filamentkomposites hatte zur Folge, dass dieses für die Weiterverwendung ungeeignet war, da ein variierender Durchmesser eine weitere Einführung verhinderte. Wie in Abb. F.13 (A), (B) illustriert, variiert der gedruckte Durchmesser des Filaments von $1,5\text{ mm}$ zu $1,8\text{ mm}$. Der Grund hierfür ist, dass die Gewichtskraft F_G vom Extruder als Hebelwirkung an der X-Achse wirkt (Abb.: F.13 (C), (D)), wobei der Ankerpunkt das einzelne Trapezgewinde ist. Hierbei entsteht eine Variation in der Druckhöhe, die auch mit Abtastung des Druckbetts nicht kompensiert werden kann (Kapitel F.10). Diese vertikale Abweichung zeigt sich, wenn großflächige Objekte gedruckt werden, wobei auf der linken Seite Z_L des Druckbetts diese Abweichung nicht erkennbar ist, potenziert sich dieser Effekt auf der rechten Seite Z_R . Die Lösung dieser Problematik wird in diesem Abschnitt gezeigt.

Die Standardbauweise des *Ender3* setzt voraus, dass das bewegte Gewicht am Schlitten der X-Achse klein und die Funktionalität mittels einer einzelnen Trapezgewindestange beizubehalten ist. Die mechanische Bewegung der X-Achse erfolgt bei diesem Modell mittels flacher V-Führungsrollen, entlang eines

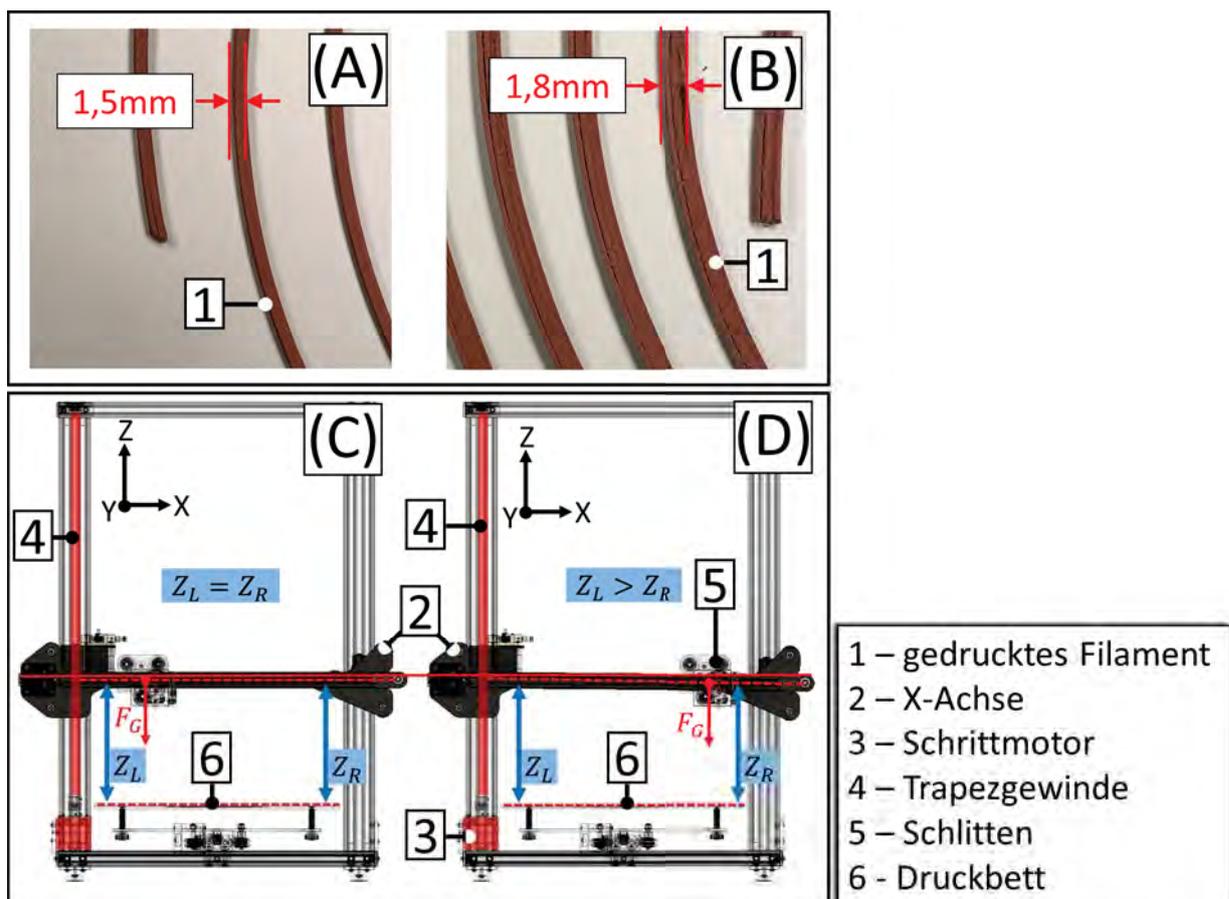


Abbildung F.13: Auswirkung auf Druckqualität bei nicht austarierter X-Achse (A) gedrucktes Filament auf der Seite Z_L mit $1,5\text{ mm}$ Durchmesser, (B) gedrucktes Filament auf der Seite Z_R mit $1,8\text{ mm}$ Durchmesser, (C) Balancierung der X-Achse mit Schlitten auf der linken Seite Z_L , (D) Balancierung der X-Achse mit Schlitten auf der rechten Seite Z_R .

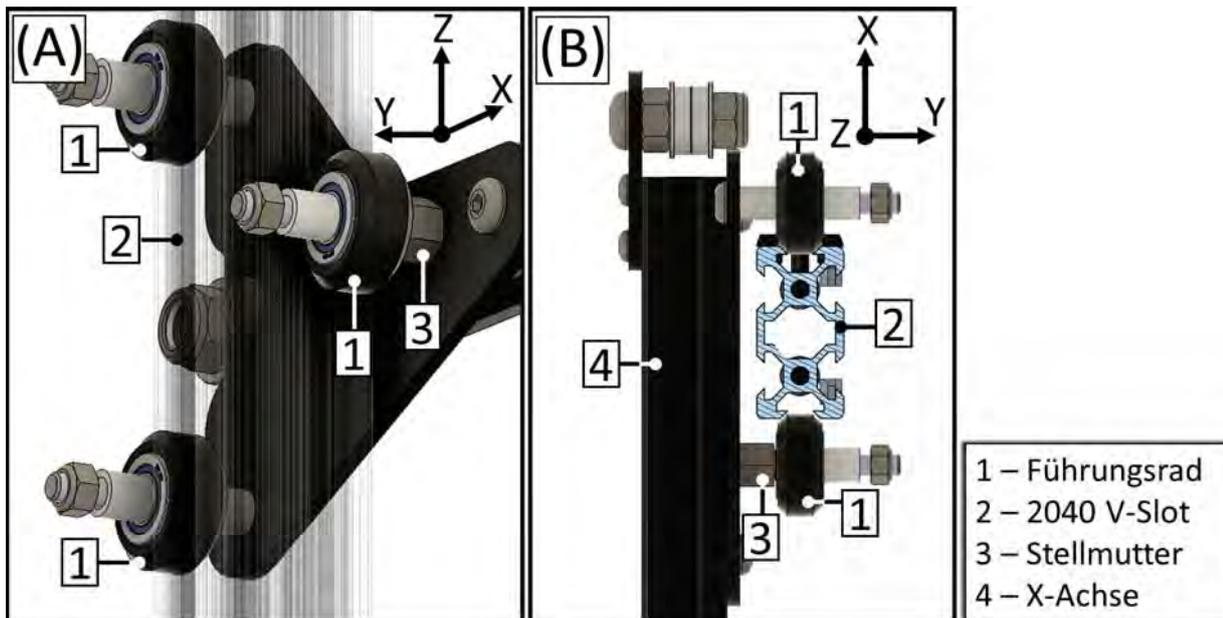


Abbildung F.14: Zusammensetzung der Gleitmechanik an der vertikalen Achse eines FDM-Druckers. (A) Seitenansicht auf Zusammensetzung der Führungsräder, (B) Draufsicht auf installierte Führungsräder an der Z-Achse mit 2040 V-Slot Aluminiumprofil.

2040 V-Slot Aluminiumprofils (Abb.: F.14). Die im gleichschenkligen Dreieck angeordneten Führungsräder, werden innerhalb der Kerbe vom Aluminiumprofil geführt, wobei der Anpressdruck beim sich an der Spitze befindenden Führungsrad mittels Stellschraube justiert wird. Dieses war jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da zusätzliche Anforderungen nötig waren.

Diese benannte Problematik wird speziell bei FDM-Druckern mittels eines zweiten Schrittmotors gelöst, welcher eine zusätzliche Trapezgewindestange auf der rechten Seite Z_R antreibt. Hierfür werden beide für die Z-Achse zuständigen Motoren miteinander elektrisch parallel verschaltet und über einen Schrittmotortreiber angetrieben. Hierfür wird vorausgesetzt, dass die Schrittmotoren baugleich sind und sehr geringe Herstellungstoleranzen besitzen. Alternativ können diese auch mit individuellen Schrittmotortreibern angesteuert werden. Keiner dieser Optionen kam für diese Arbeit in Betracht und ein eigenes Konzept wurde entworfen.

Vorgang

Die doppelte Z-Achse wurde mittels eines einzelnen Schrittmotortreibers realisiert (Abb.: F.15). Die Kraftübertragung erfolgt mittels eines geschlossenen GT2 Zahnriemens (Abb.: F.15 (A, 2)), der über zwei Zahnriemenscheiben (Abb.: F.15 (1)) die Trapezgewindestangen (Abb.: F.15 (4)) antreibt. Der Schrittmotor wird hierfür im Zentrum am Querbalken des 2020 Aluminiumprofils installiert. Durch die Erhitzung des Motors und der Stauhitzte in der Druckkammer, werden zur Befestigung Metallwinkel (Abb.: F.15 (7)) verwendet. Wie anhand der Abb. F.15 (C) illustriert wurde, erlaubt es das Konstrukt eine Spannung des Zahnriemens vorzunehmen, wobei die Kraftübertragung am Motor mittels einer Zahnriemenscheibe $\varnothing 9,6 \text{ mm}$ (Abb.: F.15 (1)) erfolgt, die über zwei unbezahnte Spannrollen (Abb.: F.15 (3)) weitergegeben wird. Analog ermöglicht dies der Zahnriemenscheibe größtmögliche Oberfläche des Zahnriemens greifen zu können. Auf der antriebslosen Seite ist die Zahnriemenscheibe $\varnothing 37,9 \text{ mm}$ mit dem Trapezgewinde verbunden (Abb.: F.15 (B)). Das Trapezgewinde wird mittels eines Z809-Kugellagers kombiniert und anhand einer 3D-gedruckten Halterung am Rahmen befestigt. Als Rückschlagsdämpfer werden in diesem Kon-

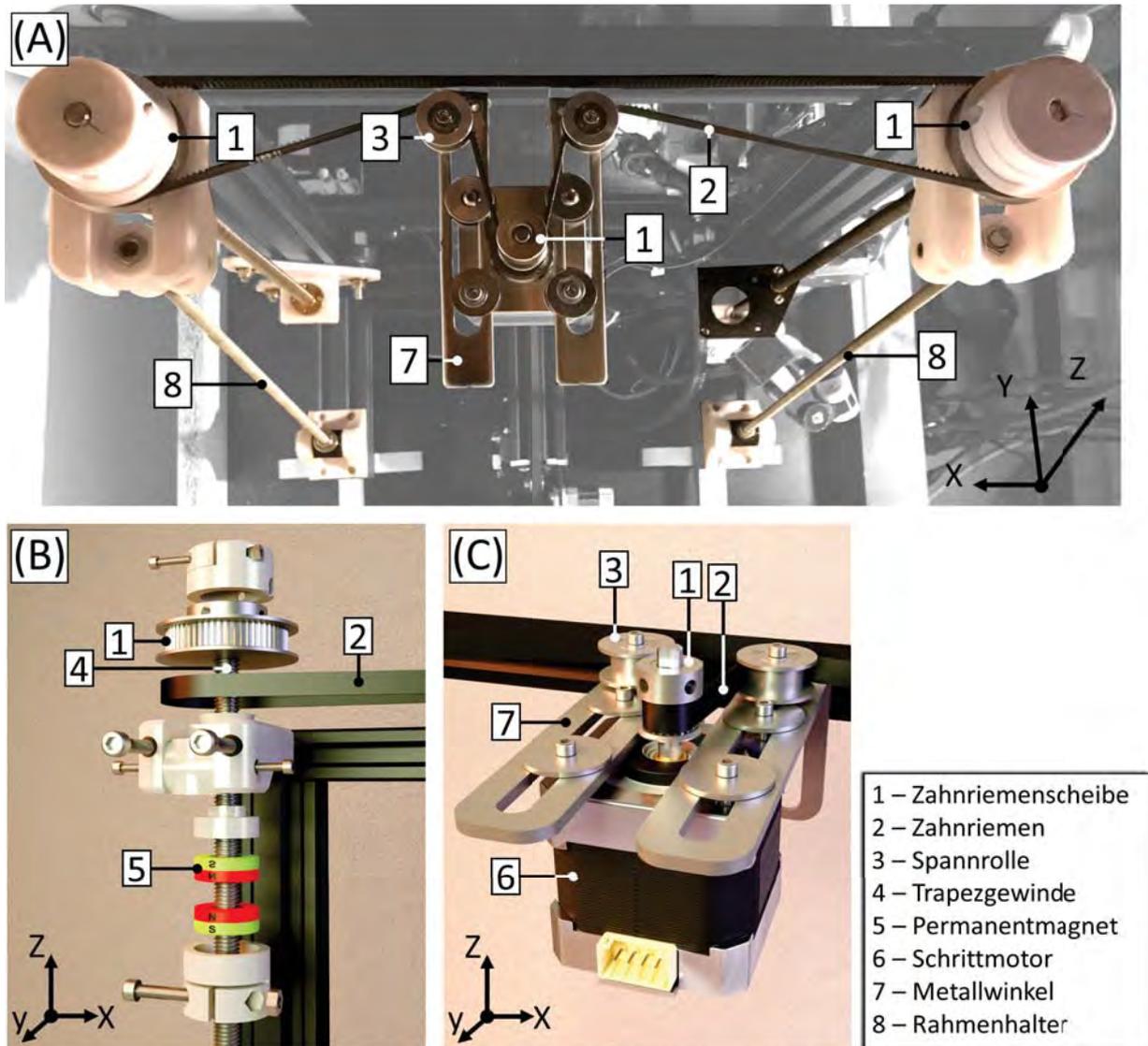


Abbildung F.15: Aufbau von dualer Z-Achse mit individuellem Schrittmotor. (A) Draufsicht auf angewandte Installation, (B) Zusammensetzung eines Halters für Trapezgewindestange, (C) Antrieb mit Schrittmotor und Spannvorrichtung.

strukt entgegenpolarisierte Ringmagnete verwendet (Abb.: F.15 (B, 5)). Hierbei ist der obere Ringmagnet im Rahmenhalter eingelassen und der untere Ringmagnet am Trapezgewinde befestigt. Beide Permanentmagnete werden somit zusammengeschoben, so dass eine mechanisch abstoßende Spannung entsteht, in welcher dieser diese fixiert werden.

Zusätzlich wurde die duale Z-Achse mit Rahmenhaltern kombiniert (Abb.: F.15 (A, 8)), um zusätzliche Steifigkeit zu ermöglichen und Orthogonalität zum Druckbett zu gewährleisten.

Programmierung und elektrischer Entwurf

Als Schrittmotortreiber wurde ein *Trinamic TMC2209* verwendet, in Kombination eines *Nema17*-Schrittmotors. Die Verkabelung erfolgt mittels Dupontverbindern, sowie zur Kompensierung des induktiven Anteils eine Ferritkern auf der Motorseite.

Basierend auf dem *RMS Strom* am Schrittmotor von $0,45\text{ A}$, wurde als Referenzspannung V_{ref} am Schrittmotortreiber von $0,66\text{ V}$ eingestellt [118, S. 40]. Laut des Datenblatts können die Schrittmotortreiber nur

bis zu einem maximalen Strom von $1,2 A_{RMS}$ betrieben werden, wobei die Spannung am Treiber über das eingebaute Potentiometer von 0 bis $2,5 V$ justiert werden kann. So berechnet sich der maximal mögliche Strom I_{MAX} aus der eingestellten Referenzspannung V_{REF} und dem Strom pro Spulenwicklung I_{RMS} ⁵⁷.

$$I_{RMS} = \frac{(V_{REF} \cdot 1,77 A)}{2,5 V} = V_{REF} \cdot 0,71 \quad (F.1)$$

$$V_{REF} = \frac{(I_{RMS} \cdot 2,5 V)}{1,77 A} = I_{RMS} \cdot 1,41 = I_{MAX} \quad (F.2)$$

Der ermittelte Wert wird im Quellcode von Marlin als `#define Z_CURRENT 450` definiert. Die eingestellten Mikroschritte des Treibers wurden als `#define X_MICROSTEPS 16` eingestellt. Durch das veränderte Übersetzungsverhältnis der Durchmesser der Zahnriemenscheiben, ist eine vergrößerte Schrittweite möglich und dadurch analog eine höhere Genauigkeit in der Z-Ebene. Definiert wird dies in `#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT`, für den Z-Wert mit `1198,3`.

Ergebnis

Zur Validierung des Aufbaus und Austarierens wurden zwei Testobjekte von $150 mm$ Länge erstellt, die in der Z-Ebene 3D-gedruckt wurden⁵⁸. Hierbei ist das Ziel, ein möglichst langes Objekt zu drucken, da sich ein Fehler mit zunehmender Distanz potenzieren würde und sich somit offenbart. Diese Testobjekte wurden hierbei auf der linken Z_L (Abb.: F.16 (A)) und rechten Seite Z_R (Abb.: F.16 (C)) des Druckbetts erstellt, um die Eliminierung des anfänglich beschriebene Durchhängens der X-Achse zu ermitteln. Die Proben wurden mittels Messlehre⁵⁹ auf deren Dimension überprüft. Wie in Abb. F.16 (B) illustriert, wurden für die linke Seite Z_L die geforderten $150 mm$ exakt abgebildet. Wiederum für die rechte Seite Z_R , wie in Abb. F.16 (D) dargestellt, sind ebenfalls die geforderten $150 mm$ exakt erstellt worden. Folglich ist somit davon auszugehen, dass bis zu dieser Dimension diese Genauigkeit erreichbar ist, sollten keine zusätzlichen Interferenzen hinkommen (e.g. Verunreinigungen des Trapezgewindes).

⁵⁷Analog gelten diese Einstellungen ebenfalls für die Schrittmotoren der X-, Y- und E-Achse.

⁵⁸ $150 mm$ wurde gewählt, da dieses der maximal messbare Wert mit der verwendeten Messlehre ist, obwohl das Herstellungsvolumen des FDM-Druckers dies übersteigt.

⁵⁹Genauigkeit von $10 \mu m$

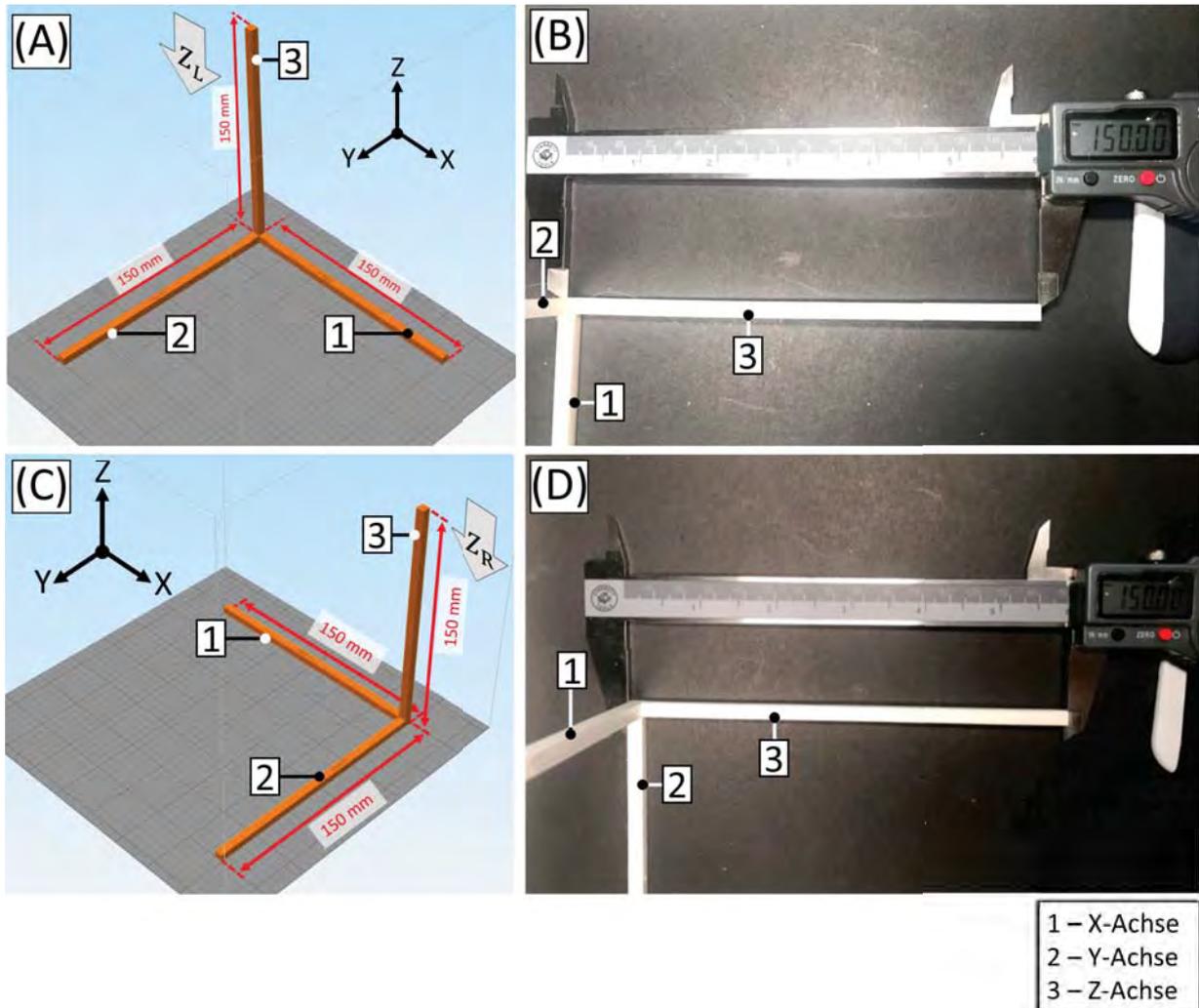


Abbildung F.16: Messungen von 150 mm Messobjekten für duale Z-Achse. (A) Vorschau des Messobjekts in *Simplify 3D* für Druck auf der linken Seite Z_L , (B) Messung des Messobjekts für Druck auf der linken Seite Z_L , (C) Vorschau des Messobjekts in *Simplify 3D* für Druck auf der rechten Seite Z_R , (D) Messung des Messobjekts für Druck auf der rechten Seite Z_R .

F.6 Design des Extruders

Die vorherigen Betrachtungen waren die Grundlagen gewesen, um ein optimales Design für den *Extruder*⁶⁰ zu entwerfen, dessen Überlegungen und Umsetzungen in diesem Kapitel vorgestellt werden. Es gilt mehrere Bauteile kompakt und funktionell miteinander zu vereinen, wie den Antrieb (e.g. Extruder), die Zahnriemenscheibe, die Filamentzufuhr, die Lüftung (e.g. Filamentkühlung, Hotendkühlung), die Sensoren (e.g. Bettabtaster, *Filament-Runout*) und die Beleuchtung (e.g. *Neopixel*). Der *Extruder* ist das wichtigste Bauteil für die Filamentplatzierung. Deswegen wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Iterationen durchlaufen, um eine noch bessere Variante zu entwerfen, die nicht trivial ist und deswegen einiger Erklärung bedarf.

Direkter Extruder

Die Gesamtansicht des Extruders ist der Abb. F.17 (A) zu entnehmen. Verwendet wurde hierbei das Konzept des *Direct-Extruders*, wobei der Schrittmotor am Wagen (Abb.: F.17 (B, 11)) installiert ist und gleichzeitig in möglichst kurzer Distanz zum *Hotend* (Abb.: F.17 (B, 7)) angebracht ist. Diese Positionierung beinhaltet mehrere Vorteile, unter anderem besitzt das Filament Filament besitzt so stets einen geringen Grad an Flexibilität. Gleichzeitig benötigt das *Hotend* eine PTFE-Zuleitung⁶¹, um das Filament einführen zu können. Speziell bei s.g. *Bowden-Extrudern* wird hierbei der Motor entfernt vom *Hotend* positioniert, um somit die Filamente zuzuführen. Wie in Abb. F.18 (C) dargestellt ist, besitzen diese PTFE-Zuleitung jedoch Toleranzen im Innendurchmesser, welches sich als Variation der Wegstrecke des Filaments auswirkt, abhängig davon welche Position es in jenem Moment in der Zuleitung einnimmt. Dies gilt es zu vermeiden, in dem die Länge der PTFE-Zuleitung so kurz wie möglich gehalten wird. Für diese Arbeit wurde diese Länge auf 30 mm reduziert, welches ebenfalls die beschriebenen Toleranzen reduzierte.

⁶⁰In diesem Abschnitt wird der Begriff *Extruder* aus Zweckmäßigkeit als Sammelbegriff verwendet, wobei hierbei die Summe aller Bauteile gemeint sind, die für das Extrudieren, Platzieren und Aushärten des Filaments zuständig sind.

⁶¹Polytetrafluorethylen (Teflon) ist ein Polymer basierend auf Flor und Kohlenstoff. Es wird vorzugsweise verwendet für die Zuleitung, da es reibungsarm ist.

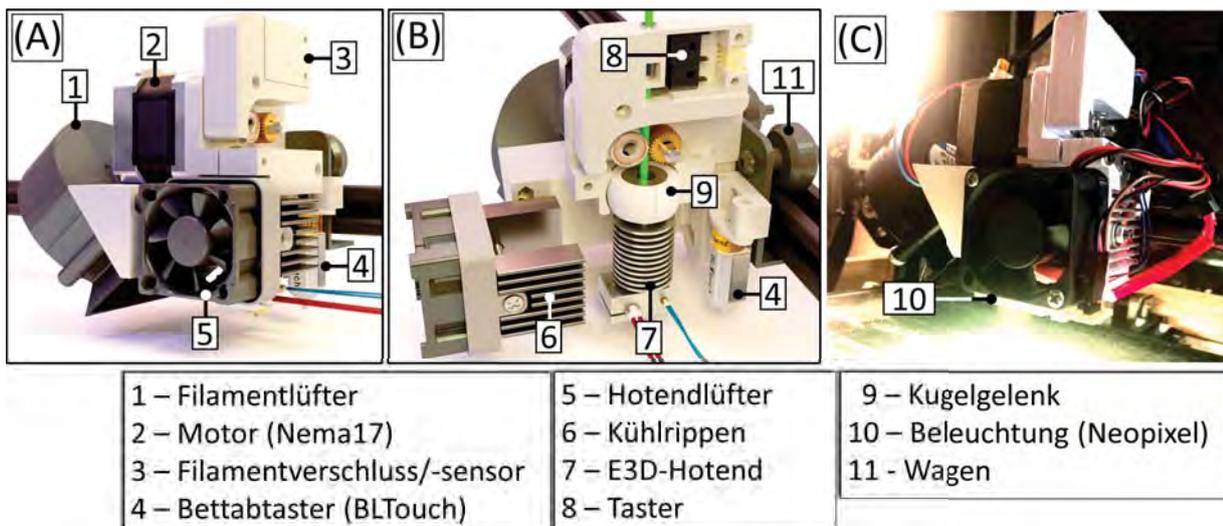


Abbildung F.17: Verwendetes Extruderdesign für diese Arbeit. (A) Schrägansicht der verwendeten Teile, (B) Seitenansicht auf *Hotend* mit Kugelgelenk, entfernten Kühlrippen und geöffnetem Filamentsensor mit integriertem Taster im Filamentverschluss, (C) Fotografie vom Extruder mit eingeschalteter Beleuchtung unterhalb des Lüfters.

Diese Änderung bringt gleichzeitig den Vorteil mit sich, dass Filamente dadurch nicht mehr vorzeitig brechen würden, da dadurch die parallel geringer werdende Reibung weniger Druck auf die senkrechtstehende Fläche erzeugt werden muss.

Hotend mit Kugelgelenk

Dem Extruder wurde ein Kugelgelenk hinzugefügt, womit das *Hotend* nachjustiert werden kann (Abb.: F.17 (B, 9)). Laut der Recherche für diese Arbeit, findet diese Komponente sehr wenig Beachtung, obwohl diese ein wesentliches Qualitätsmerkmal ist. Wie in Abb. F.18 (A) visualisiert, ermöglicht diese Installation nachträglich eine parallele Ausrichtung der Düse mit der Druckfläche und gewährleistet dadurch Orthogonalität. Diese Eigenschaft wird häufig vorausgesetzt. Zusätzlich ermöglicht dieses Bauprinzip auch den erleichterten Austausch mit anderen Hotends. Wie am Beispiel in der Abb. F.18 (B) für das *17:30 Fullmetal Hotend* visualisiert, wird hierfür lediglich die Sphäre dem Gerät angepasst und eingesetzt. Notwendig wurde dies im Rahmen dieser Arbeit, da für die beiden verfügbaren Filamentdurchmesser (1,75 mm und 2,85 mm) unterschiedliche Hotends verwendet wurden.

Die Einspeisung des Filaments erfolgte hierbei mittels einer geraden Riemenscheibe und einem Kugellager mit Nut.

Das E3D-*Hotend* wurde mit zusätzlichen Kühlrippen erweitert (siehe Kapitel F.8), welches mittels eines $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}$ Ventilators versehen ist. Auf der Unterseite dessen wurden vier Neopixel-LEDs installiert, um die Sicht auf Düse zu verbessern (Abb.: F.17 (C, 10)). Hierfür wurde ein individuelles PCB gefertigt, um die notwendigen Dimensionen erfüllen zu können, wodurch vier LEDs nebeneinander positioniert werden konnten und eine Installation unterhalb des Lüfters möglich wurde.

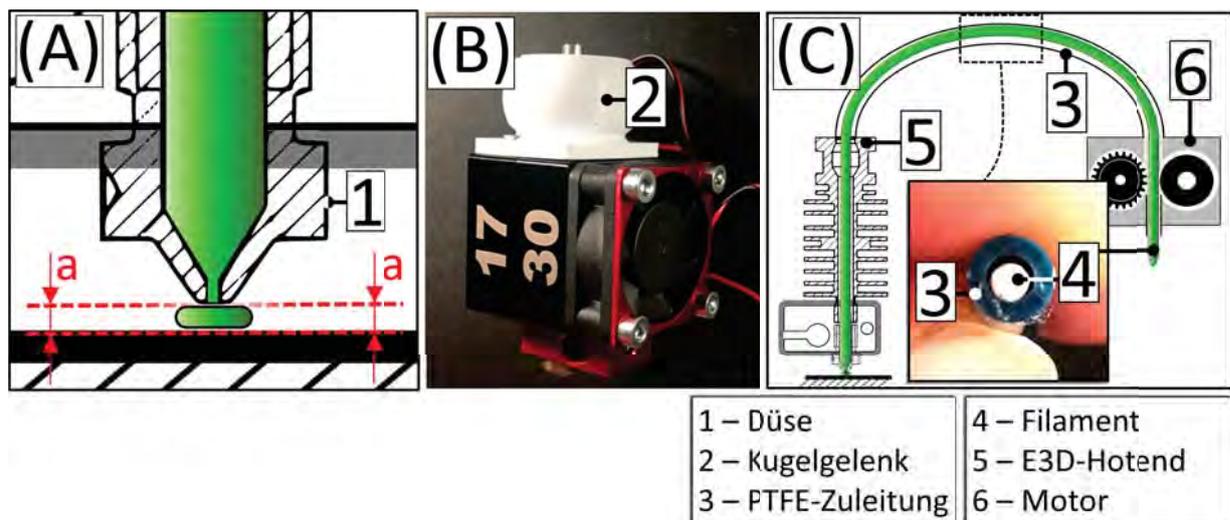


Abbildung F.18: Designentscheidung für den Entwurf des *Extruders*. (A) Auswirkungen auf das Extrudieren von Filament, bei parallel Positionierung von Düse zu Druckfläche, (B) *17:30 Fullmetal Hotend* mit Kugelgelenkadapter, (C) Auswirkung auf Filamentbewegung bei Verwendung von E3D-*Hotend* mit verlängerter PTFE-Zuleitung.

Filamentfüllstand

Die automatische Überprüfung des Filamentfüllstands ist zwingend notwendig, da der 3D-Drucker ohne diese Rückmeldung den Herstellungsvorgang ohne Nachfuhr von Rohstoff fortsetzen würde und dadurch der Druck verloren wäre. Besonders für diese Arbeit war diese Komponente wichtig, da die im Verlauf erstellten Filamentkomposite nur in bestimmten Längen hergestellt wurden und somit nachgefüllt werden mussten.

Die Durchführung erfolgte mittels eines Tastschalters (Abb.: F.19 (A, 4)), der vom eingeführten Filament mittels Anpressdrucks geschaltet wird⁶². Der Zustand des Schalters wird geändert, wenn sich kein Filament mehr in der Kammer befindet. Da davon auszugehen war, dass die verfügbaren Längen der Filamente kurz sein werden, musste der Sensor sehr nah am *Hotend* installiert werden, weswegen eine Integration im Filamentanpresshebel erfolgt. Die Reibung des Filaments am Tastschalter würde zu Inkonsistenzen in der Druckqualität führen und möglichen Ablagerungen, weswegen ein Taster mit Führungsrad (Abb.: F.19 (A, 3)) gewählt wurde. Wie einleitend bereits erwähnt wurde, musste dieser 3D-Drucker die Möglichkeit besitzen zwei Filamentdurchmesser verarbeiten zu können, was dadurch ebenfalls für diesen Sensor berücksichtigt werden musste. Hierfür wurde die Außenhülle eines Fahrradventils (Abb.: F.19 (A, 2)) verwendet, mit einer Ausfräsung für die Führungsrolle. Diese Komponente muss metallisch gewählt werden, da das Filament an diesem Bereich besonders viel Reibung erfährt und nach längerfristigem Gebrauch das Gehäuse des Sensors abscheuern würde. Die Funktionalität des Mechanismus wurde in Abb. F.19 (B) für 1,75 mm und in Abb. F.19 (C) für 2,85 mm dargestellt.

Die Verschaltung des Filamentsensors ist der Abb. F.20 zu entnehmen. Es wurde der ungenutzte Anschlag-Pin *P1_28* für die X-Achse verwendet⁶³. *P1_28* wird mittels Masse kurzgeschlossen, sollte der Taster ausgelöst werden. Hierbei ist lediglich die Zustandsänderung relevant, da das gewünschte Verhalten in der Firmware von *Marlin* unter `#ifdefn FIL_RUNOUT_PIN` definiert wird. Ungenutzt befinden sich alle diese Output-Pins im permanenten High-Zustand, durch die integrierten Pullup-Widerstände.

⁶²GCode-Befehl M75 muss hierfür im Startcode vermerkt sein. Sollte der Schalter eine Zustandsänderung erfahren, wird ein M600-Befehl gegeben, wodurch ein automatischer Filamentwechsel stattfindet.

⁶³Die Festlegung des Pins als Filamentrunout erfolgt in: `\Marlin\src\lpc1768\pins_BIGTREE_SKR_V1.3.h\#define FIL_RUNOUT_PIN P1_28\`

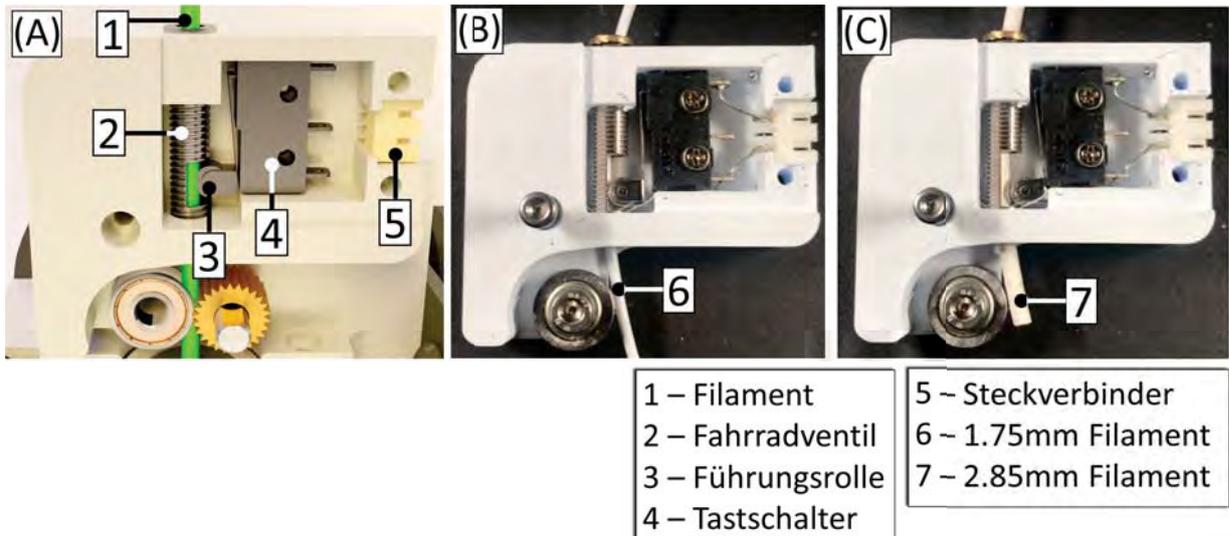


Abbildung F.19: Filamentfüllstandsensoren integriert in Filamentanpresshebel. (A) Überblick der Bauteile für Filamentfüllstandsensoren, (B) Funktionsansicht des Filamentfüllstandsensors mit 1,75 mm Filament, (C) Funktionsansicht des Filamentfüllstandsensors mit 2,85 mm Filament.

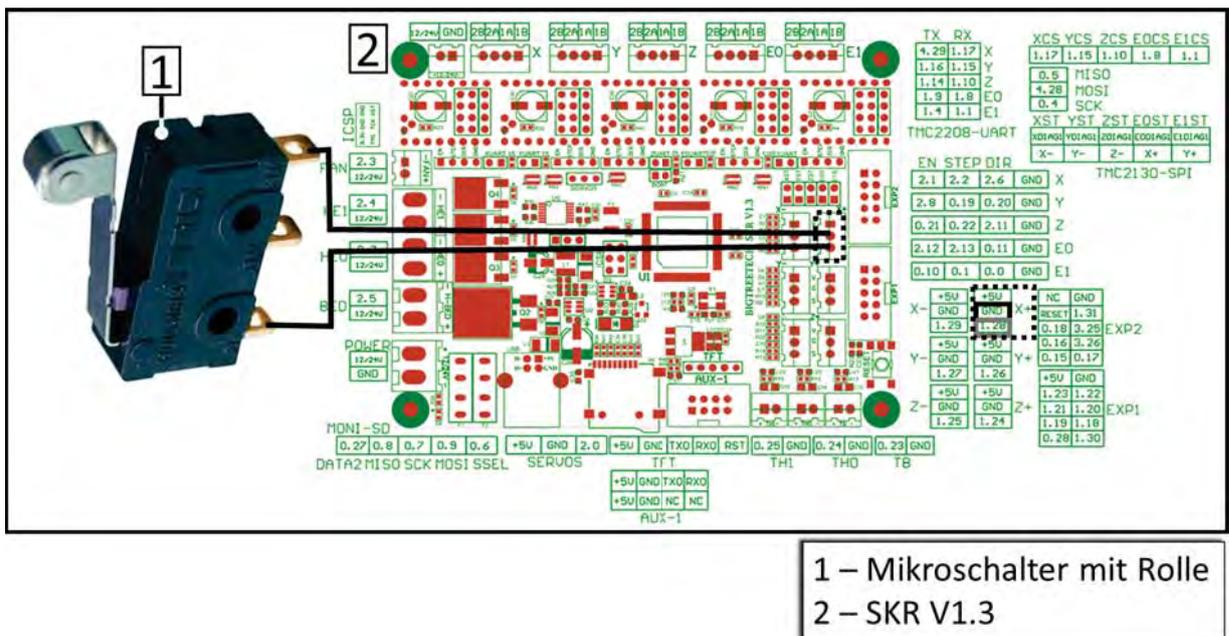


Abbildung F.20: Elektrische Verschaltung des Filamentsensors als Mikroschalter mit dem Mainboard *BigTreeTech SKR V1.3*.

F.7 Thermische Isolation vom Heizelement

Es soll die thermische Energie im Heizblock konserviert werden, ohne dass die Filamentkühlung Einfluss darauf nimmt. Gleichzeitig soll oberhalb des Heizblocks über den Kühlkörper die Temperatur schnell abfallen, um beispielsweise Verstopfung zu verhindern (s.a. Kpt.: F.8). Parallel dazu soll ebenfalls das Filament gekühlt werden, ohne mittels des erzeugten Luftstroms den Heizkörper zu treffen, wie in Abb. F.21 (C) illustriert. Folglich ist es naheliegend den Heizkörper thermisch zu isolieren. Der Hersteller *E3D* liefert für sein Produkte eine thermische Isolation mit, wobei eine blaue Isolationssocke aus thermisch resistentem Kautschuk um den Heizblock gelegt wird. Um dieses Bauteil komfortable installieren zu können, sind mehrere Auslassungen vorhanden, beispielsweise für Düse, Thermistor und Heizkartusche. Primär ist diese Socke dafür vorgesehen, den Heizkörper vor externer Verschmutzung zu bewahren. Die Folgen einer dauerhaften Nutzung ohne solch einen Schutz ist in Abb. F.29 (B) am Heizkörper illustriert. Diese Komponente besitzt sehr viel Auslassungen, die dazu führen, dass keine thermische Isolation stattfinden kann. Beispielsweise trägt hierzu die Auslassung der Oberseite des Heizkörpers bei (Abb.: F.29 (A)).

Diese werden miteinander verglichen, indem die Ergebnisse der *PID-Loop* untersucht werden. Als Bestandteil des Betriebssystems von *Marlin*, justiert dieser Wert die Oszillation der Temperatur am Heizblock. Wie auch dem englischen Begriff bzw. der Abkürzung der Bezeichnung *Proportional-Integral-Derivative-Controller* (PID) zu entnehmen, setzt sich der zu ermittelnde Wert aus den folgenden drei Kenngrößen zusammen: *proportional gain* K_p , *integral gain* K_i und *derivative gain* K_d [119, S. 20-29]. Diese Kenngrößen können für den 3D-Druck ermittelt werden durch Eingabe des Kommandos *M303 E-0 S220 C8*. Hierbei werden acht Heizzyklen durchlaufen, bei einer Zieltemperatur von $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Als Ergebnis dessen werden die drei benötigten Kenngrößen ausgegeben, als Werte K_p , K_i und K_d . Um diese Werte zu übernehmen und im EEPROM zu speichern, wird das zugehörige Kommando *M301P [Wert] I [Wert] D [Wert]* gesendet. Diese Vorgehensweise wird im Laufe dieses Abschnitts referenziert und als *PID-Loop* bezeichnet.

In einem Versuchsaufbau wurde hierfür eine zweite Isolationssocke so zugeschnitten, um eine mehrseitige thermische Isolation zu testen (Abb.: F.21 (B)).

Für beide Versuchsaufbauten wurden mittels *PID-Loop* die zugehörigen Werte ermittelt, um möglichst

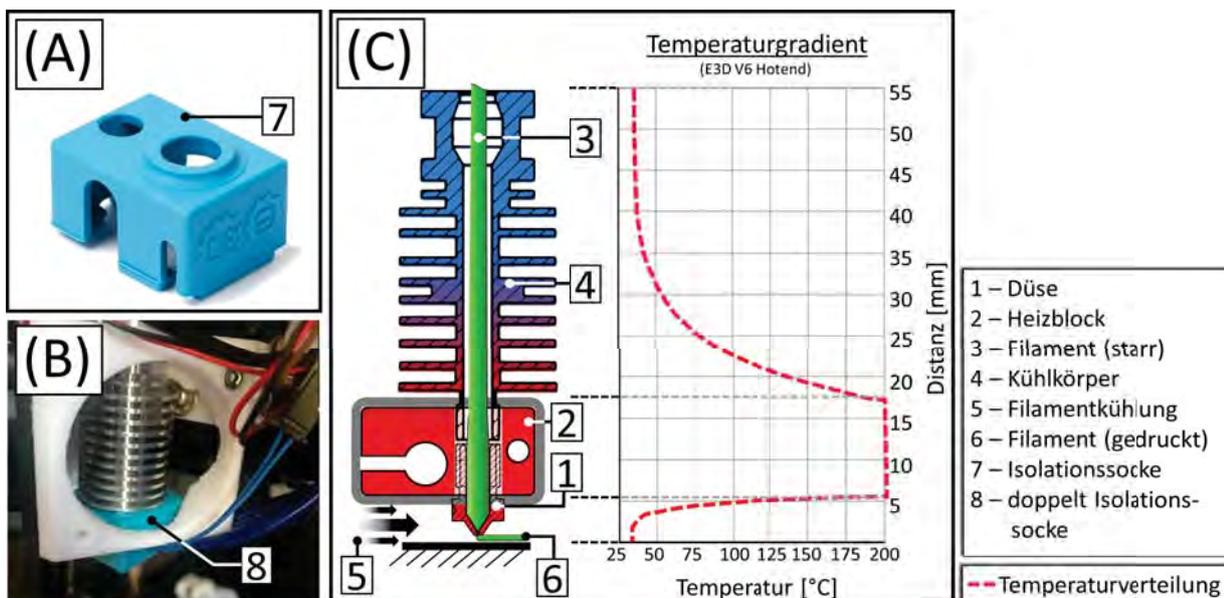


Abbildung F.21: E3D-Isolationssocke und theoretischer Temperaturgradient am E3D-V6-Hotend für den optimalen Fall. (A) E3D-Isolationssocke als Bestandteil des Lieferumfangs, (B) experimenteller doppelter Isolationssockenaufbau am E3D-Hotend, (C) optimaler Temperaturgradient für E3D-Hotend.

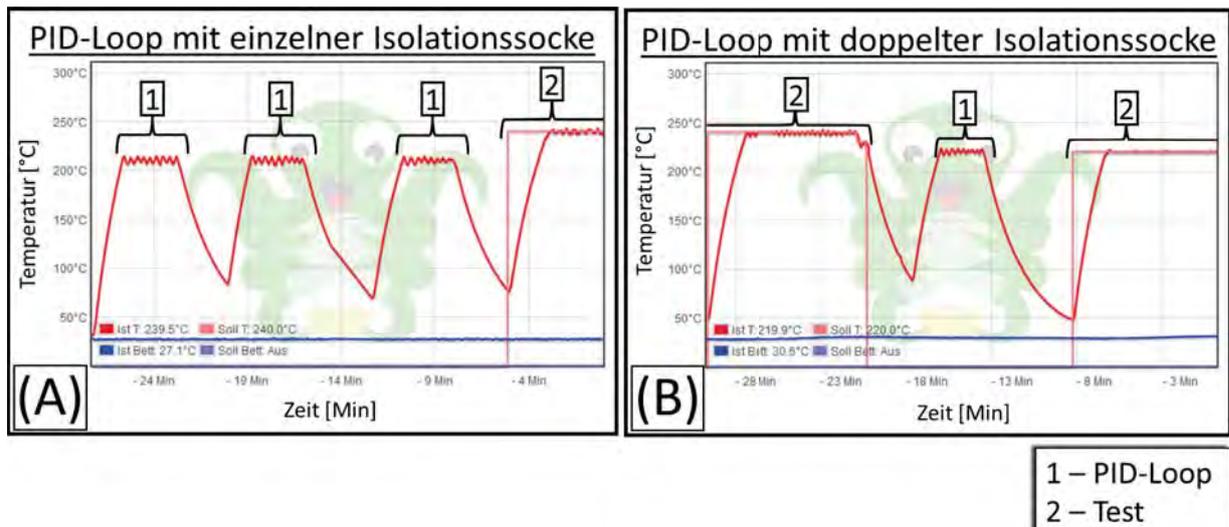


Abbildung F.22: PID-Autotune-Loop, sowie Testung für (A) einzelne E3D-Isolationssocke und (B) doppelter Isolationssocke.

konsistente Temperaturwerte zu erhalten. Wie Abb. F.22 dargestellt, wurde zunächst eine Kalibrierung vorgenommen (Abb.: F.22 (1)), danach ein Testlauf gestartet (Abb.: F.22 (2)). Im Testlauf wurde die Verwendung simuliert, in dem die Filamentkühlung eingeschaltete wurde und die Auskühlung der Düse provozieren sollte.

Beim Testaufbau in Abb. F.22 (A) wurden im Fall einer einzelnen Socke drei *PID-Loops* durchgeführt, wobei ein Wert ermittelt wurde von $K_p = 16,96$, $K_i = 1,82$, $K_d = 39,62$. Anhand des Testdurchlaufs in Abb. F.22 (A, 2) ist zu erkennen, dass die Temperatur um den Sollwert oszilliert. Folglich ist dieses mitgelieferte Produkt nicht genügend thermisch isoliert und dadurch nicht optimal für eine Verwendung. Im zweiten Testlauf wurde für die Doppelsocke erneut eine *PID-Loop* durchgeführt, welche einen Wert von $K_p = 19,36$, $K_i = 2,62$, $K_d = 35,68$. Als Vergleich der Ergebnisse sind in Abb. F.22 (B, 2) die Testläufe dargestellt mit einzelner Socke (Abb.: F.22 (B, 2), links) und mit doppelter Socke (Abb.: F.22 (B, 2), rechts). Es ist hier deutlich erkennbar, dass weniger Oszillation im Fall der Doppelsocke zu beobachten ist. Folglich ist diese Bauweise zu bevorzugen.

Ein vollkommend umschließendes Bauelement für den Heizblock ist zu bevorzugen. Da dieses Bauteil nicht kommerziell verfügbar ist, wurde ein eigenes hergestellt. Basierend auf [120] wurde mittels hitzebeständigem Abformsilikon⁶⁴ und einer 3D-gedruckten Gießform eine maßgeschneiderte thermische Isolation gefertigt. Das Modell der Gießform ist der Abb. F.23 (A), (B) zu entnehmen. Hierbei wurde anhand eines Abbildes des Heizblocks von E3D-V6-Hotend eine aus fünf Teilen (Kern, Ober-, Unterseite, Seitenwänden) bestehende allumschließende Gießform erstellt, die mit Montageschrauben (Abb.: F.23 (B, 6)) fixiert wird. Die Gussform selbst wurde mittels des FDM-Druckverfahrens aus PLA gefertigt. Über das Einfüllungsloch (Abb.: F.23 (A, 1)) wird mittels einer Spritzkanüle das vorbereitete Dubliersilikon eingelassen. Hierbei handelt es sich um ein 2-Komponenten Silikonkautschuk[121], der bei Raumtemperatur vulkanisiert und bis zu einer Anwendungstemperatur von $450\text{ }^\circ\text{C}$ einsetzbar ist. Nachdem das Silikon ausgehärtet ist, wird der Kern der Form (Abb.: F.23 (B, 5)) entnommen, indem entlang der Außenkanten und den Installationslöchern für die Kartuschen mittels Skalpell Einschnitte gesetzt werden. Über diese Einlassung wird ebenfalls die Installation am Heizelement vorgenommen, die sich gleichzeitig auf der abweisenden Seite der Filamentkühlung befindet (Abb.: F.24 (B)).

⁶⁴Kautschuk, TFC, Typ 3, Dubliersilikon mittelhart für Zinguss und Bleiguss

Eine erneute Kalibrierung mittels *PID-Loop* ergab einen Wert von $K_p = 20,03$, $K_i = 1,74$, $K_d = 57,78^{65}$. Ein erneuter Temperaturtest ergab einen kohärenten Temperaturverlauf, wie in Abb. F.24 (A) dargestellt. Die hier verwendete Isolationssocke besitzt eine Wandstärke von $1,5\text{ mm}$, dessen Wert nicht weiter variiert wurde. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine Vergrößerung förderlich sein könnte und die thermische Isolation verbessern könnte.

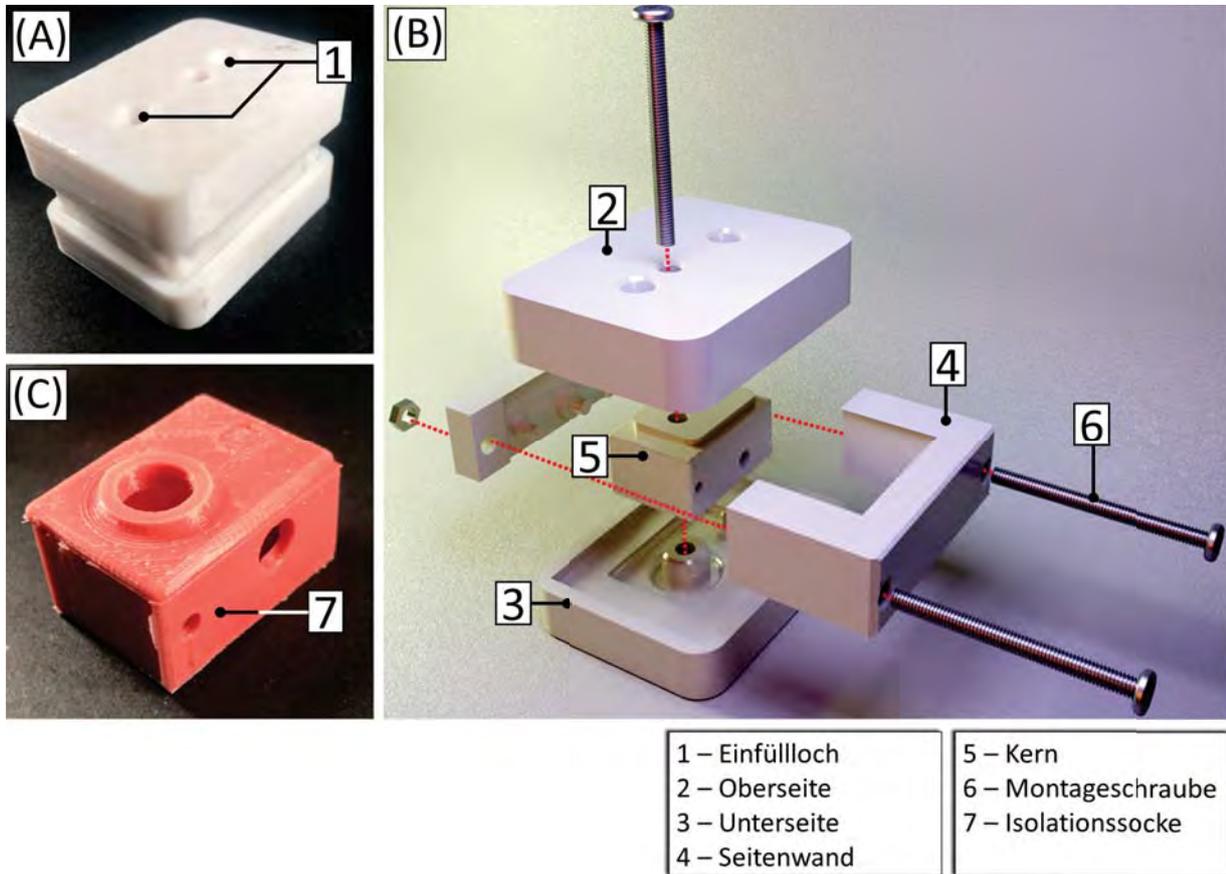


Abbildung F.23: Herstellung von Isolationssocke für E3D V6 mit (A) Gießform, (B) Einzelteile der Gießform, (C) gefertigte Isolationssocke.

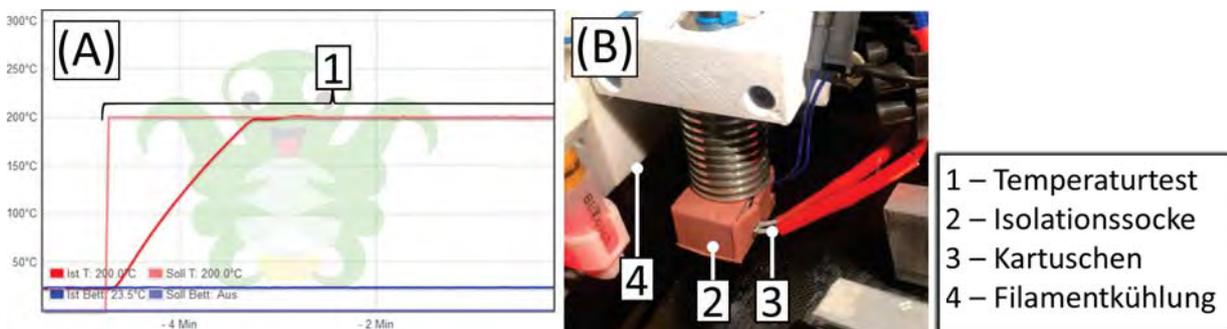


Abbildung F.24: Hergestellte Isolationssocke für E3D V6 mit (A) Temperaturtest, (B) Installation am E3D-V6-Heizblock.

⁶⁵Es sei bei diesen Ergebnissen zu beachten, dass diese mit unterschiedliche Versionen von Marlin ermittelt wurden. Die ersten Ergebnisse dieses Abschnitts wurden mit *Marlin 1.9.0* erstellt, die letzten Ergebnisse mit *Marlin 2.0.7*. Eine numerische Abweichung ist dadurch möglich.

F.8 Heat Creep und dessen Vermeidung

Der englische Begriff *Heat-Creep* beschreibt übermäßiges und vorzeitiges Schmelzen bzw. Erweichen des Filaments, welches zur Verstopfung führt. Lapidar vom englischen Begriff übersetzt als *Kriechwärme*, handelt es sich hierbei um eine thermische Weiterleitung der Hitze vom Heizblock an den Kühlkörper (Abb.: F.25 (B)). Bei diesem Phänomen erweicht das Filament bereits vor dem Erreichen des eigentlichen Schmelzpunkts, wodurch das eingeführte Filament vorzeitig an Steifigkeit verliert und vorm Einführen in die Düse zu einer Blockade am Rand der Düse führt (Abb.: F.25 (C)).

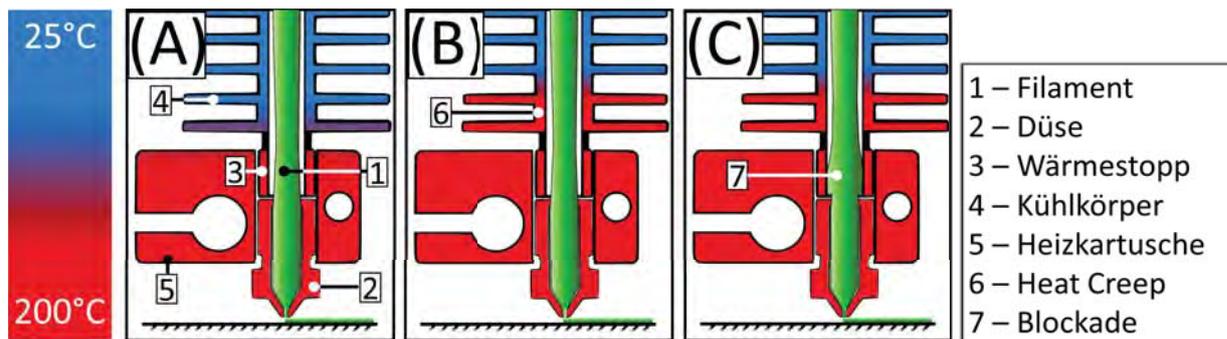


Abbildung F.25: Seitenansicht vom Vorgang für *Heat Creep* am E3D-V6-Hotend. (A) Benennung involvierter Bauteile und Illustrierung vom regulären Druckprozess, (B) thermische Weitergabe der Hitze an den Kühlkörper und Beginn vom *Heat Creep*, (C) entstandene Blockade des Filaments.

Um dieses zu vermeiden liefert der Hersteller E3D [122] deren Produkt mit einem zusätzlich aktiven $30 \times 30 \times 10 \text{ mm}$ Ventilator aus, der mittels einer Plastikhalterung am Kühlkörper angebracht ist und einen Luftstrom über den Kühlkörper generiert. Im Rahmen dieser Arbeit stellte sich heraus, dass dies jedoch ungeeignet für die hier verlangten Anforderungen ist. So setzt diese Installation voraus, dass kein isolierendes Gehäuse am 3D-Drucker verwendet wird, welches eine permanente Kühlung durch die Umgebungstemperatur gewährleistet [123, Inadequate cooling and Filament Jamming]. Der beschriebene *Heat-Creep*-Effekt potenziert sich zu dem, sollten Filamente verwendet werden, die thermische Leitung begünstigen, wie beispielsweise mit Metallen versetzte Filamente. Hierbei wird solches spezielles Filament zunächst regulär gedruckt, wie illustriert in Abb. F.25 (A). Jedoch mit voranschreitender Druckzeit wirkt dieses begünstigend für die beschriebene Blockade.

Um *Heat-Creep* zu vermeiden, wurde die aktive Kühlung erweitert mit einem größeren $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}$ Ventilator. Außerdem wurde die mitgelieferte Plastikhalterung für die Lüfter ausgetauscht mit Kühlrippen aus Aluminium.

Eine genaue Unterscheidung, mittels thermischer Messungen, welche der beiden Aufbauten *Heat Creep* am Wärmestopp verhindert, war nicht möglich. Hierfür hätte etwa ein Thermistor in das *Hotend* eingeführt werden müssen, um am Wärmestopp die Temperatur zu messen oder eine Wärmebildkamera hätte die thermische Dispersion aufgezeichnet. Dies war technisch nicht möglich. Stattdessen wurden mehrere empirische Experimente durchgeführt, wobei das Kühlungssystem mehrfach verändert wurde (Abb.: F.26). Alle illustrierten Modelle verfolgen die gleiche Systematik; die Halterung besteht aus zwei Hälften, die im Zentrum das E3D-V6-Hotend halten. Der vordere Halter dient als Adapter für die aktiven Ventilatoren, die hintere Hälfte zur Befestigung am Schlitten des 3D-Druckers. An jedem Modell wurden $40 \times 40 \times 20 \text{ mm}$ Ventilatoren installiert. Alle Halter wurden mittels PLA gedruckt.

Das Modell der *Petsfang*-Serie [124] der Abb. F.26 (A) isolierte den Luftstrom, so dass der Luftstrom nicht zu den Seiten ausweichen konnte. Zudem konnte der Vorteil nicht genutzt werden, die metallische

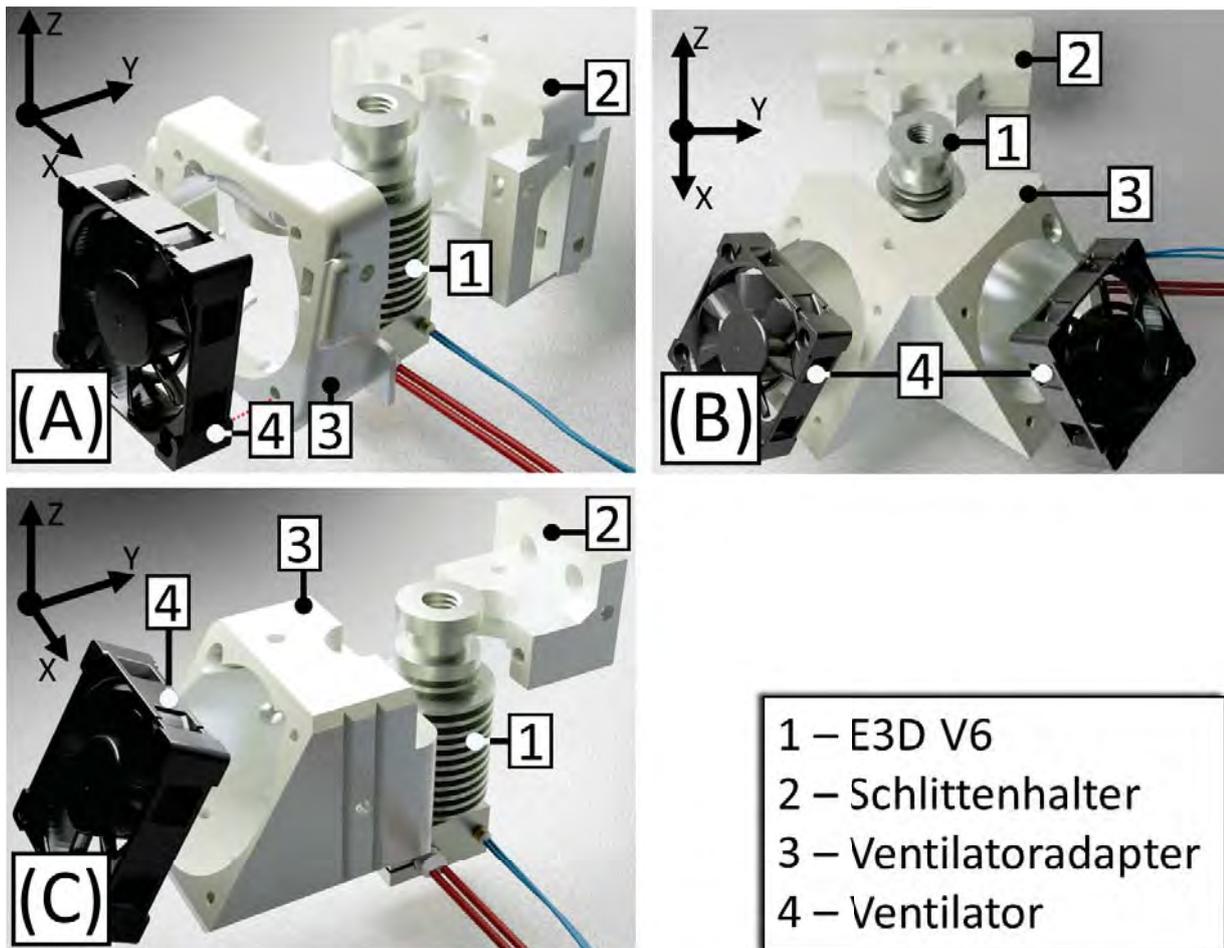


Abbildung F.26: Zusammenstellung von verschiedenen erstellten experimentellen Lüfterhaltern, um *Heat-Creep* zu vermeiden. (A) Petsfang Modular V2 [124], (B) Doppellüfterhalter, (C) Kühlrippenverdichter.

Oberfläche des Schlittens mitzuverwenden, um so die thermisch leitende Oberfläche zu vergrößern. So wurde die Halterung entfernt und nur auf die obere Hälfte beschränkt (Abb.: F.26 (B)). Zusätzlich wurde ein zweiter Ventilator hinzugefügt, die beide diagonal die Kühlrippen belüften sollten. In der dritten Iteration wurde eine Abwandlung vom mitgelieferten E3D-Adapter erstellt, wobei ein Lüftungskanal spezifisch die Kühlrippen kühlen sollte (Abb.: F.26 (C)). Mit keinem dieser Designvorschläge war es möglich *Heat-Creep* zu vermeiden, wodurch geschlussfolgert wurde, das möglicherweise das verwendete PLA ungeeignet ist. Folglich musste eine Halterung verwendet werden, welche die thermische Oberfläche der bestehenden Kühlrippen des *Hotends* vergrößert und gleichzeitig eine Halterung für den Ventilator bietet.

Hierfür wurde ein $100 \times 25 \times 10 \text{ mm}$ Kühlkörper als Basis verwendet, wobei zwei 27 mm -Elemente entfernt wurden, sowie mit Einbuchtungen und jeweils einem Bohrloch erweitert wurden. Wie in Abb.F.27 (C) dargestellt, wird der Aufbau mit einer 45 mm langen M3-Schraube fixiert (Abb.:F.27 (C, 6)). Hierbei befinden sich die präparierten Kühlrippen auf beiden Seiten des *Hotends*. Ein aus PLA gedruckter Halter (Abb.:F.27 (C, 5)) ermöglicht die Installation des Ventilators, der somit den Luftzug auf den Kühlkörper des *Hotends* und die Kühlrippen dirigiert. Der Aufbau wird auf den Kühlkörper des *Hotends* geschoben und hält durch Klemmen. Dieses Konstrukt bietet somit die geforderte vergrößerte thermische Oberfläche, sowie einen Lüftungskanal für den installierten Ventilator, was letztendlich zur gänzlichen Unterdrückung von *Heat-Creep* geführt hat.

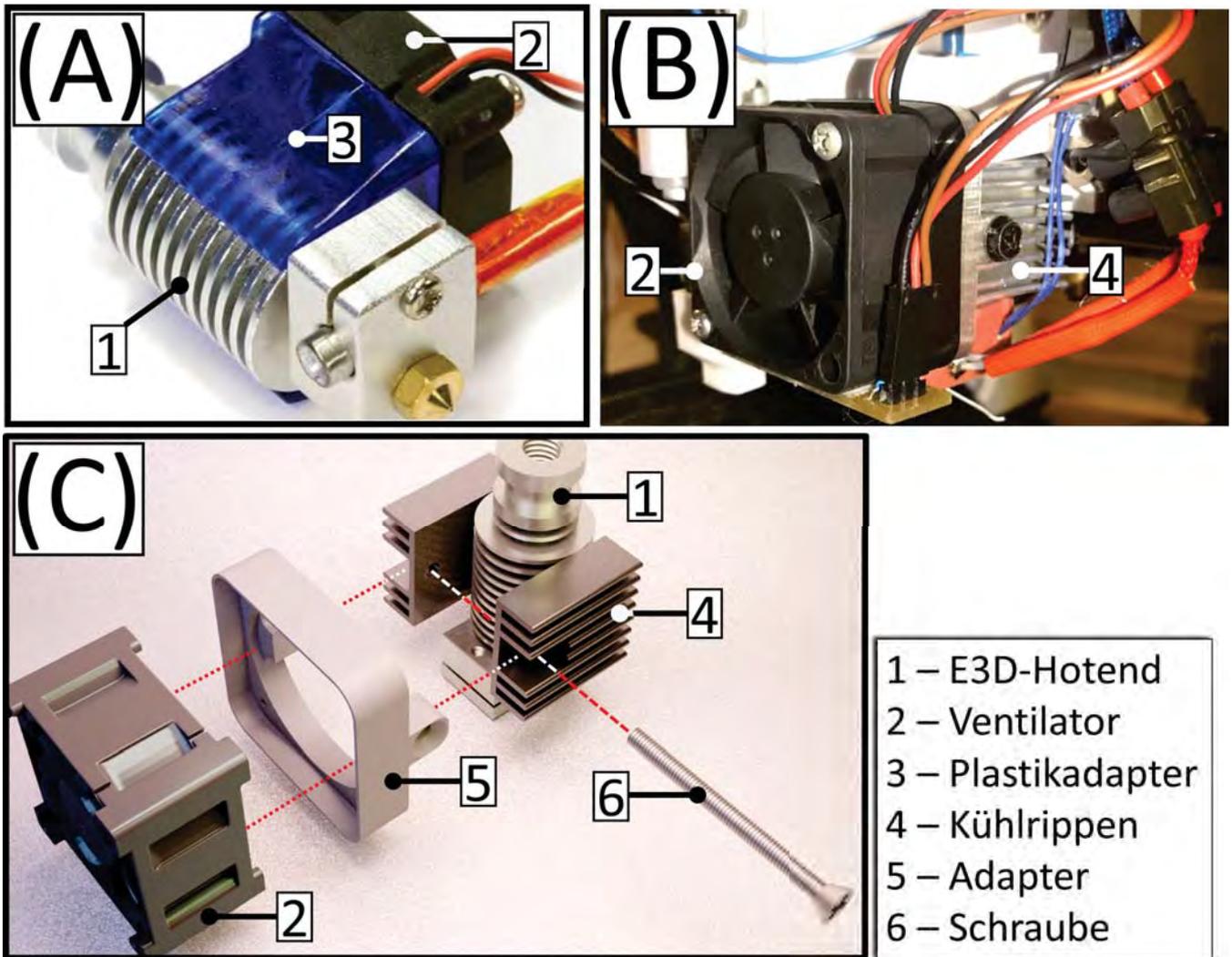


Abbildung F.27: Kühlrippenaufbau für *E3D-V6-Hotend*, zur Vermeidung von *Heat-Creep* in geschlossen Gehäusen. (A) *E3D-V6-Hotend* mit mitgeliefertem Plastikadapter für $30 \times 30 \times 10 \text{ mm}$ Ventilator, (B) installierter und verwendeter Kühlrippenaufbau am 3D-Drucker, (C) Zusammensetzung vom Kühlrippenaufbau mit Einzelteilen.

F.9 Filamentkühlung

Das Ziel beim FDM-Druck ist es, konsistente Druckergebnisse zu generieren. Die Schwierigkeit dessen wird deutlich, wenn der Fertigungsprozess erneut deutlich gemacht wird. So gilt es ein starres Material einzuführen, es in einer spezifischen Position auf seinen Schmelzpunkt zu erhitzen, um es dann durch Extrudieren entlang eines Rasters zu positionieren. Hierbei soll das Filament nur punktuell geschmolzen werden, um beispielsweise *Heat-Creep* (siehe Kapitel F.8) zu vermeiden. Analog soll das extrudierte Filament nachdem es ausgegeben wurde, unmittelbar erstarren, um korrekt entlang des Rasters seine Position einzunehmen. Hierfür wird ein konstanter Luftstrom unterhalb der Düse benötigt, welcher das Filament abkühlt, jedoch gleichzeitig nicht die Düse selbst. Der Entwurf der notwendigen thermischen Isolation hierfür wurde in Kpt. F.7 vorgestellt. Die Notwendigkeit dessen wurde in [125] dargestellt, wobei ein Referenzobjekt (Abb.: F.28 (A)) aus PLA gedruckt wurde, mit eingeschalteter (Abb.: F.28 (B)) und ausgeschalteter (Abb.: F.28 (C)) Filamentkühlung. Wie beim Fall mit angeschalteter Filamentkühlung erkennbar, hebt sich die Druckqualität vom Gegenstück in Abb. F.28 (C) hervor. Spezielles Augenmerk lege man hierbei auf die Außenwände (i.e. Bug in Abb. F.28 (C)), Überhänge (i.e. Kopfseite des Vorderfenster in Abb. F.28 (C)) und Details (i.e. Schornstein in Abb. F.28 (C)), die die Notwendigkeit unterstreichen.

Die Balance zwischen optimaler Filamentkühlung im Einklang mit Integrierbarkeit und Funktionsausübung ist eine wiederkehrende Problematik beim FDM-Druck. Aus diesem Grund wird auf *Thingiverse* eine Vielzahl von unterschiedlichsten Designvorschlägen zur Verfügung gestellt. Unabhängig von der Positionierung der angebotenen Bauteile und Richtung des Luftstroms, wird in jedem der angebotenen Komponenten versucht ein größtmögliches Volumen von Luft über das Filament zu bewegen, um dadurch einen maximalen Temperaturgradienten zu erzeugen. In [127] wurde hierfür eine Gegenüberstellung von drei verschiedenen Belüftungssystemen vorgenommen. Die populärste Bauweise verwendet einen Ventilator in unmittelbarer Nähe der Düse, wobei ein gedruckter Adapter den Luftstrom unterhalb zentriert (Abb.: F.29 (A)). Gleichzeitig ist dies jedoch stets eine Kompromisslösung, da der Ventilator fest angebracht werden muss und dabei trotzdem effektiv den Luftstrom dirigieren soll. Sollte zusätzlich das beheizte Bett aktiviert sein, so wird die warme Luft auf das Filament befördert. Eine externe Zufuhr mittels Druckluft kann dies umgehen, wie in Abb. F.29 (B) illustriert. Eine externe Luftzufuhr mittels eines Luftkompressors ermöglicht eine gezielte Kühlung, die gleichzeitig weniger Raum am Düsenkopf benötigt. Vorteilhaft hierbei ist es, dass extern der Luftdruck reguliert werden kann. Gleichzeitig muss bei diesen Bautypen

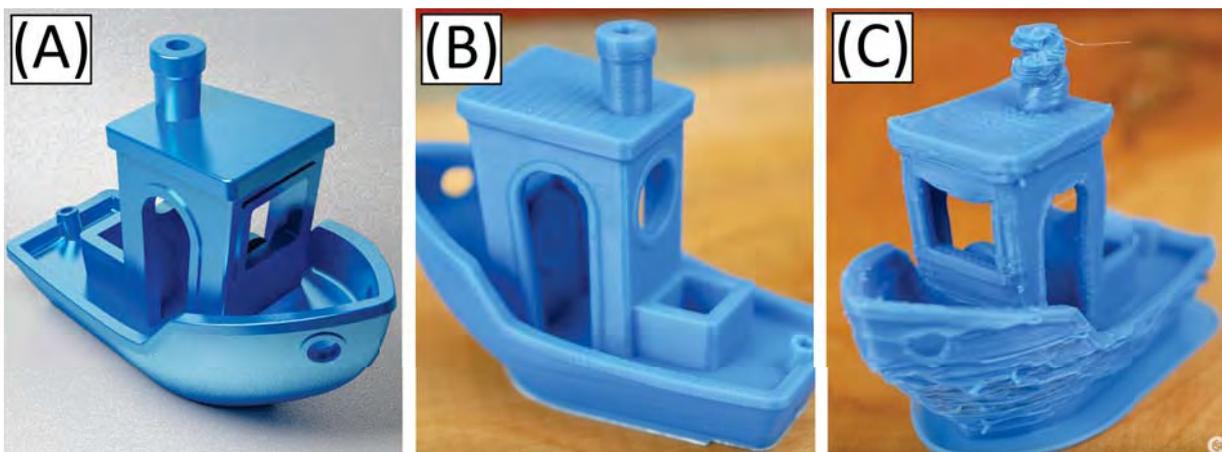


Abbildung F.28: Draufsicht des Testdruckobjekts *3D-Benchy* [126]. (A) CAD-Modell als Referenz, (B) gedrucktes Testdruckobjekt aus PLA mit 100% Filamentkühlung [125, 00:20 Min.], (C) gedrucktes Testdruckobjekt aus PLA mit 0% Filamentkühlung [125, 11:01 Min.].

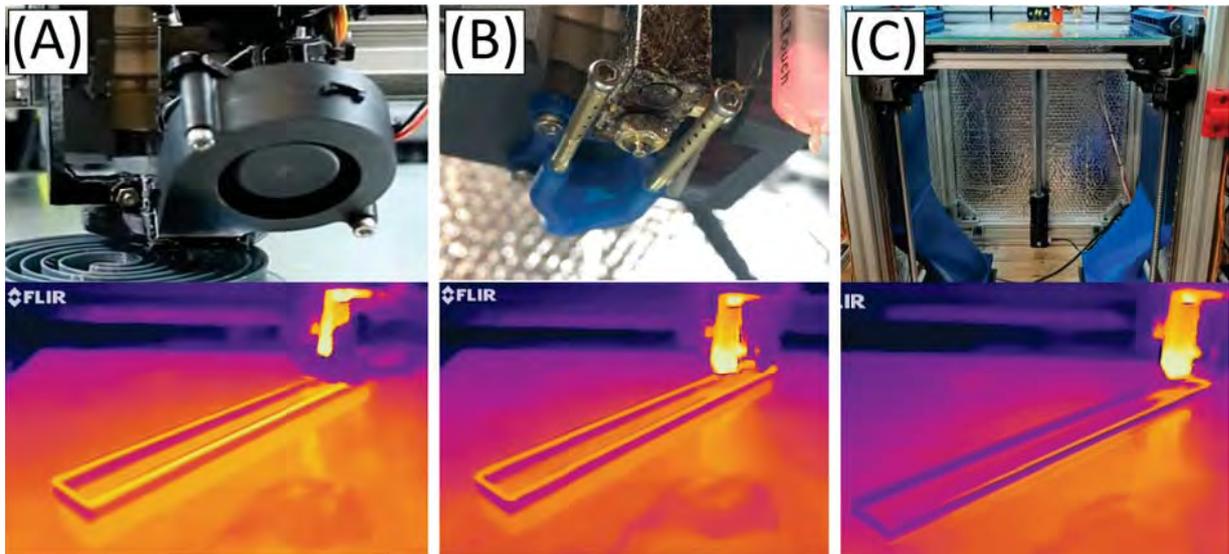


Abbildung F.29: Vergleich von verschiedenen Filamentkühlungssystemen mit Aufbau (oben) und Thermographie (unten) während des Drucks [127]. (A) Radiallüfter mit gedrucktem Halter [128], (B) Druckluftventilator, (C) externe Belüftung für Druckbett.

beachtet werden, dass Schläuche installiert werden müssen. Das letzte System (Abb.: F.29 (C)) zeichnet sich durch größtmögliche Filamentkühlung aus. Hierbei wird per externer Ventilatoren das gesamte Druckbett beidseitig belüftet. Wie anhand der thermographischen Aufnahmen zu erkennen ist, erkaltet das Filament momentan nach der Ausgabe. Jedoch sollte nicht geschlussfolgert werden, dass dieses die zu bevorzugende Methode für das FDM-Druckverfahren ist. Dieses Kühlungssystem wird stets über die gesamte Fläche des Druckbetts verteilt und nicht gezielt auf das momentan gedruckte Filament. Die in Abb. F.29 illustrierten Thermographien sind hierbei alle auf Objekte beschränkt, mit geringer Druckhöhe. Mit zunehmender Druckzeit und Drückhöhe würde dieses Kühlsystem den Effekt *Warping* provozieren, wodurch der Druck sich vom Bett lösen würde. Des Weiteren sind signifikant mehr technische Peripherien für diese Bauweise nötig, wie beispielsweise ein beweglicher Lüftungskanal parallel zum Druckbett.

Basierend auf diesen Betrachtungen wurde ein eigenes Konzept entworfen. Dies ist für diese Arbeit aus dem Aspekt relevant, da ein geschlossenes Gehäuse verwendet werden muss, um die gewünschten Druckergebnisse generieren zu können. So wird bei den gängigen freiverfügbaren Modellen für FDM-Druck davon ausgegangen, dass kein Gehäuse verwendet wird, weswegen zu kleine Ventilatoren mit 40 mm Durchmesser verwendet werden. Zusätzlich problematisch wird dies bei thermisch leitendem Filament, welches in dieser Arbeit zum Einsatz kam, wie mit Eisen[44], Kupfer[60] oder Graphite[61] versetztem PLA.

Es wurde vom Konzept des kleineren 40 mm Lüfters mit $12,07\text{ m}^3/\text{h}$ abgewichen und ein 76 mm Radiallüfter mit einem Luftdurchsatz von $28\text{ m}^3/\text{h}$ [129, S. 5] installiert (Abb.: F.30 (A)). Hierbei wurde eine Halterung entworfen, welche den Lüfter am Schlitten der X-Achse befestigt und Stabilität gewährleistet. Der Luftstrom wird hierbei unterhalb diagonal zu der Düse befördert, so dass die Düse nicht direkt getroffen wird, trotzdem zentral darunter ist (Abb.: F.30 (C)).

Dieses Konzept wurde in Kpt. F.6 erneut überarbeitet, um die Anordnung der Komponenten erneut zu optimieren. Hierfür wurden alle Betrachtungen dieses Abschnitts einbezogen, um die optimale Position für die Filamentlüftung zu bestimmen, und zwar einer angewinkelten Ausrichtung zur Düse (Abb.: F.30 (D)). So wird in der finalen Fassung auf eine zentrierende Düse verzichtet, weil durch die entstehende Komprimierung der Luft der Ventilator gedämpft wurde. Gleichzeitig konnte durch die thermische Isolation (Kpt.: F.7) ein großflächiger Luftfluss ermöglicht werden, weil es dadurch nicht mehr notwendig

wurde den Luftstrom von der Düse fernzuhalten. Auf diese Weise wurde der Luftstrom begünstigt, wie es in Abb. F.29 (C) dargestellt wurde, wobei das gesamte Objekt erfasst wird, auch wenn die Düse sich momentan nicht über dem extrudierten Filament befindet. Der verwendete Aufbau in seiner Gesamtheit ist der Abb. F.30 (E) zu entnehmen.

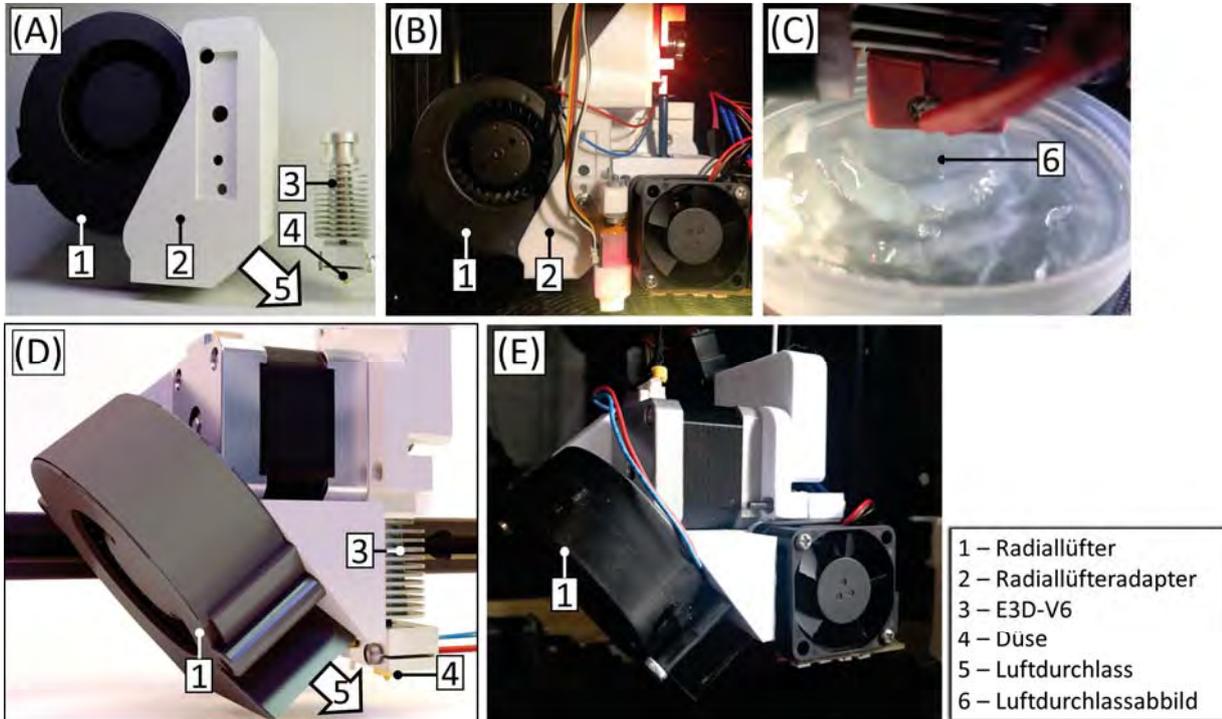


Abbildung F.30: Filamentkühlungssysteme mit Radiallüfter und 3D-gedruckter Halterung als (A) Zusammensetzung der Einzelteile und Ausrichtung, (B) verwendeter Aufbau am FDM-Drucker, (C) Abbild der Luftströmung des Filamentkühlungssystems unterhalb der Düse anhand von Wasser, (D) finale Installation des Radiallüfters seitlich am Extruder, ohne Kühlrippen mit Hotend-Ventilator, (E) finaler verwendeter Aufbau in seiner installierten Gesamtheit.

F.10 Abtaster der Druckoberfläche

Im Verlaufe dieser Arbeit wurde die Druckoberfläche so weit verändert, dass es notwendig wurde einen Abtastmechanismus zu integrieren.

Die adhäsive Verbindung von der ersten Filamentschicht mit dem Druckbett ist der wichtigste Schritt beim FDM-Druck, welcher maßgeblich über das Gelingen des 3D-Drucks entscheidet. Bereits wenige Zehntel Mikrometer entscheiden bereits darüber, wie anhand der Auswirkungen in Abb. F.31 illustriert wurde. Bei einem zu geringen Abstand (Abb.: F.31 (A)) zum Bett, erfolgt ein Überquellen des Filaments, und es kann zu einer Verstopfen des Extruders kommen⁶⁶. Ein zu geringer Abstand (Abb.: F.31 (C)) könnte zum Ablösen des Drucks führen.

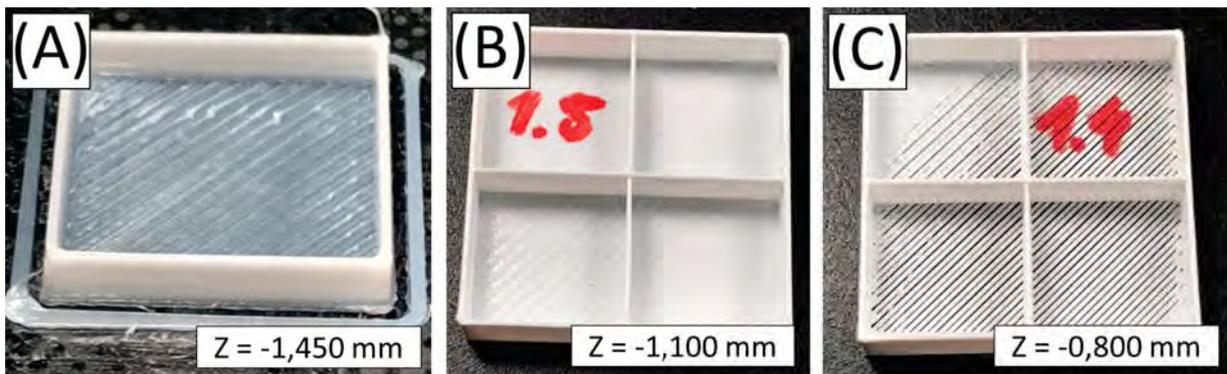


Abbildung F.31: Auswirkung von unterschiedlichen Abständen der Düse zum Druckbett mit (A) zu kleinem Abstand, (B) richtiger Abstand, (C) zu großem Abstand.

Die manuelle Justierung dessen erfolgt durch Ermittlung des Abstands zwischen Düse und Druckbett mittels Einklemmens eines Papierstücks zwischen den beiden Komponenten. Der Anpressdruck auf das Papierstück determiniert den gewünschten Abstand, welcher mittels der vier Stellschrauben an den Ecken des Druckbetts justiert wird (Abb.: F.32 (D)). Diese Methode ist jedoch sehr rudimentär, da es so beispielsweise eine planare Druckfläche voraussetzt. Dies ist jedoch unmöglich einzuhalten und widersprüchlich. Sollte das 3D-gedruckte Objekt sehr gut am Druckbett haften, so muss ein entsprechend großer mechanischer Aufwand betrieben werden dieses zu entfernen, wodurch wiederum der Abstand von Düse zu Druckbett verstellt wird. Dies könnte wiederum vermieden werden, in dem das Druckbett gelöst werden kann und für den Zeitraum des 3D-Drucks geklemmt wird, wie in Abb. F.32 (A) illustriert. Alternativ kann aber auch auf magnetische Druckbetten zurückgegriffen werden[130], die durch ihre Flexibilität es erlauben den fertigen Druck durch Biegen zu lösen (Abb.: F.32 (B)). Beide Varianten setzen jedoch voraus, dass keine der Fläche eben ist und die Kalibrierung dadurch nichtig wird. Eine zuverlässige Adhäsion vom Glasbett mit dem Filament ist so nur möglich durch Verwendung von Papierkleber. Die magnetische Wirkung am Druckbett ist gerichtet (Abb.: F.32 (C)), wodurch nur durch übereinstimmende Polarisierung mit der Gegenseite des Magneten auf der Bettseite eine zuverlässige Bindung eingegangen wird, die dennoch uneben sein wird. Eine Gegenüberstellung beider abgetasteter Oberflächen ist in Abb. F.33 (A), (B) einzusehen.

⁶⁶Geht häufig einher mit einem überdrehendem Geräusch der Riemenscheibe

Vorgang

Der folgende beschriebene Vorgang wurde in Abbildung F.33 (C) visualisiert. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Komponente handelt es sich um einen *BLTouch-Classic V1.0* [131, S. 1], welche nahe der Düse installiert wird. Hierbei handelt es sich um eine Sonde mit ausfahrbarem Tastkopf (Abb.: F.33 (C, 4)). Die Abtastung erfolgt durch Nullung mittels *G-Codes* G28 der X-, Y- und Z-Achse, dem s.g. *Homing*. Im Falle der X- und Y-Achse werden hierbei Kippschalter an einem Anschlag ausgelöst. Für die Z-Achse wird hierfür der Düsenkopf mit Sonde in das Zentrum des Druckbetts gefahren. An der Sonde wird der Tastkopf ausgefahren und simultan der Abstand zum Druckbett verringert. Durch Berühren des Tastkopfs mit dem Druckbett, wird dieser mechanisch eingefahren. Darauffolgend wird das Druckbett an definierten Punkten vermessen mittels *G-Codes* G29. Hierbei wird anhand einer festgelegten Matrix an bestimmten Punkten der Höhenunterschied erneut gemessen. In Abb. F.33 (C) wurde der Bewegungsablauf für eine 3×3 -Matrix visualisiert. Die ermittelten Werte der Abtastung werden automatisch und abhängig vom gewählten Algorithmus interpoliert, um daraus einen *Z-Offset* zu ermitteln (Abb.: F.33 (A), (B)). Der ermittelte Wert wird dem Bewegungsprofil des 3D-Drucks automatisch hinzuaddiert, um so eine kohärente Druckfläche zu erzeugen. Der *Z-Offset* muss hierbei innerhalb eines bestimmten vordefinierten Wertes bleiben, ohne einen automatischen Abbruch zu provozieren.

Mechanischer Entwurf

Die Komponente *BLTouch-Classic* ist kommerziell verfügbar. Es wird vorausgesetzt, dass die Sonde möglichst nahe zur Düse installiert wird, um entsprechend übertragbare Messwerte zu erhalten. Für den in dieser Arbeit verwendeten Aufbau wurde eine Halterung am Wagen der X-Achse erstellt (Abb.: F.34 (A)). Der Tastkopf wurde außerdem mit einer schützenden Hülle versehen (Abb.: F.34 (B, 7)), um mechanische Schäden am Tastkopf vorzubeugen.

Elektrischer Entwurf

Die elektrische Verschaltung des BLTouch ist der Abb. F.35 zu entnehmen. Die Spannungsversorgung von 5 V wird hierbei vom Pin für vorgesehene Servomotoren bezogen, sowie dem zugehörigen Masseanschluss. Der I/O-Pin *P 2.20* dient hierbei lediglich zur Kommunikation des Zustands der eingebauten LED in der Sonde bei der Bettabtastung. Endstop-Pin *P 1.24* kommuniziert den Zustand der ausgefahrenen Sonde weiter und initiiert einen Halt der Z-Achse beim Auslösen.

Programmierung

Grundlegende Änderungen am Quelltext zur Aktivierung sind die Aktivierung von `#define BLTOUCH`, Festlegung des Pins der Servomotoren als `P2_00`, sowie `#define BABYSTEP_ZPROBE_OFFSET` einhergehend mit `#define BABYSTEPPING`, welches die manuelle Justierung der Druckhöhe während des Druckvorgangs ermöglicht.

Der Detailgrad der Abtastung wird festgelegt in `#define GRID_MAX_POINTS`, wobei hier das Ausmaß der Matrix definiert wird. In dieser Arbeit wurde eine 6×6 -Matrix verwendet.

Der Algorithmus der Interpolierung der Messpunkte wird in `#define AUTO_BED_LEVELING_BILINEAR` deklariert. Es stehen hierfür noch weitere Optionen zur Verfügung, auf die nicht weiter eingegangen werden soll.

Zu Letzt ist es sehr wichtig den Abstand der Messsonde zur Düse zu deklarieren. Dies erfolgt in `#define NOZZLE_TO_PROBE_OFFSET` wobei der Abstand in Millimetern für alle kartesischen Achsen ange-

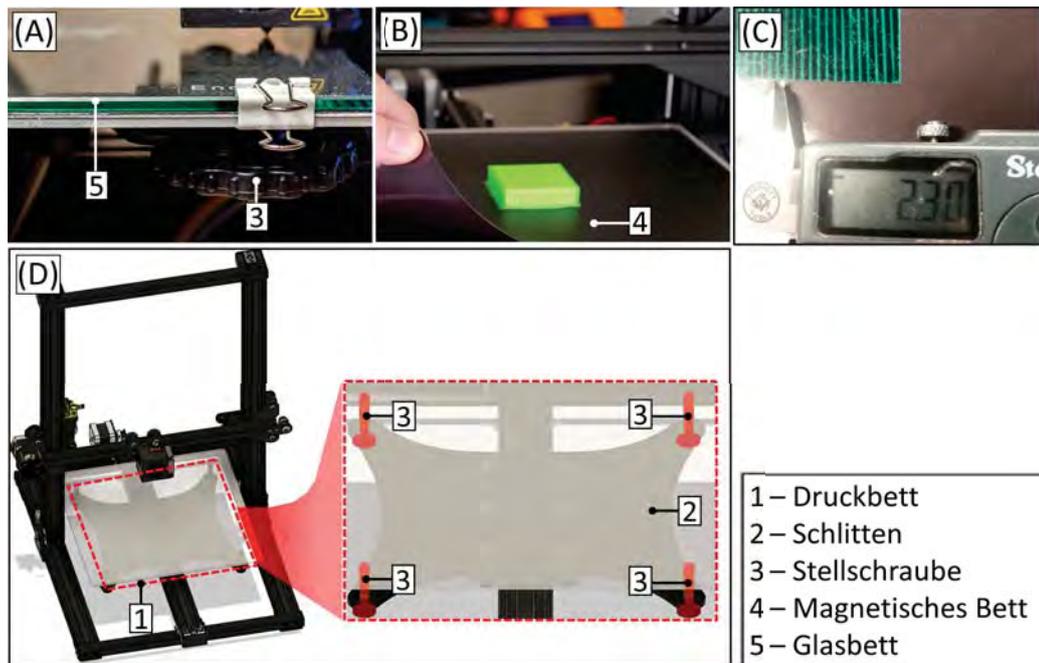


Abbildung F.32: Zusammensetzung des Druckbetts eines FDM-Druckers mit (A) Glasfläche als Grundlage, (B) ablösbares magnetisches Bett, (C) Rückseite von kommerziell erwerblichem, magnetischem Druckbett mit Illustration der Magnetisierung, (D) Einzelteile des Druckbetts mit Stellschrauben.

geben wird. Für den in dieser Arbeit verwendeten Aufbau wurde ein Wert von $\{5, 30, -1\}$ verwendet.

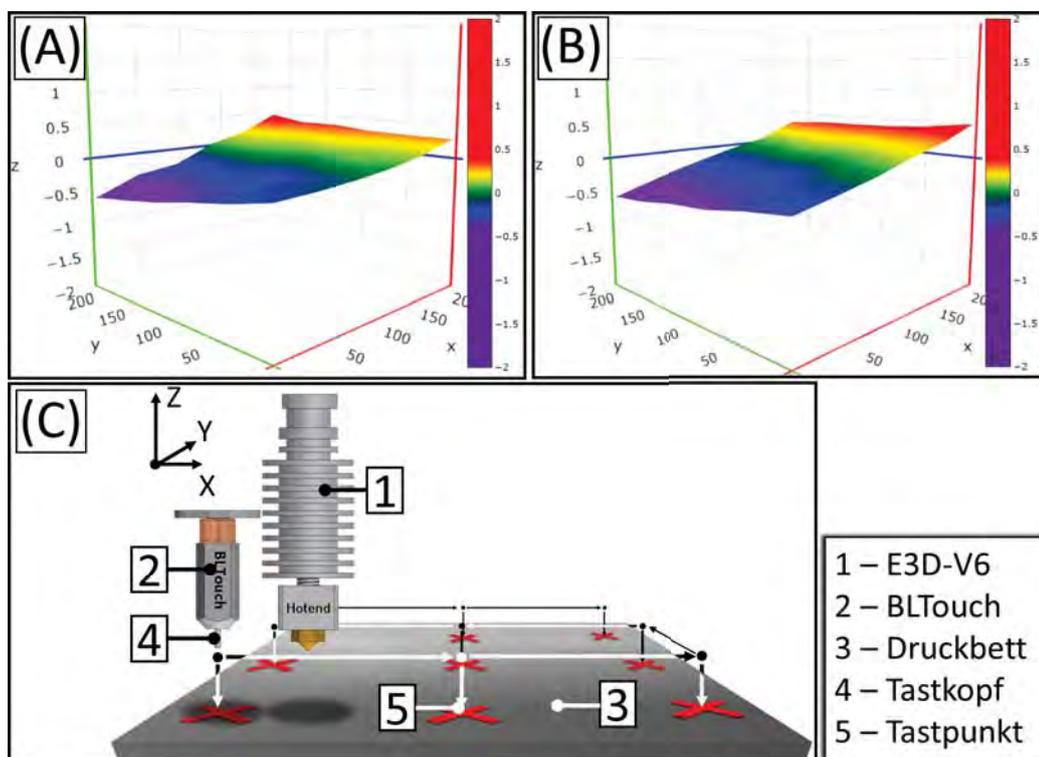


Abbildung F.33: Abtastvorgang des Druckbetts beim FDM-Drucker mittels Messspitze (A) Oberflächenstruktur von abgetastetem magnetischem Bett mit 6×6 -Matrix, (B) Oberflächenstruktur von abgetastetem Glasbett mit 6×6 -Matrix, (C) Bewegungsablauf bei Abtastung des Druckbetts mit 3×3 -Matrix.

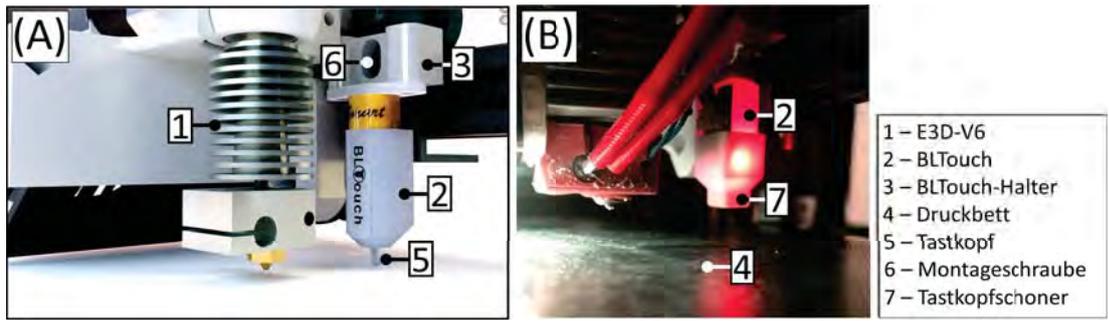


Abbildung F.34: Abtaster der Druckoberfläche BLTouch für FDM-Drucker als (A) eingesetzte Installation, (B) Einzelteile für Installation.

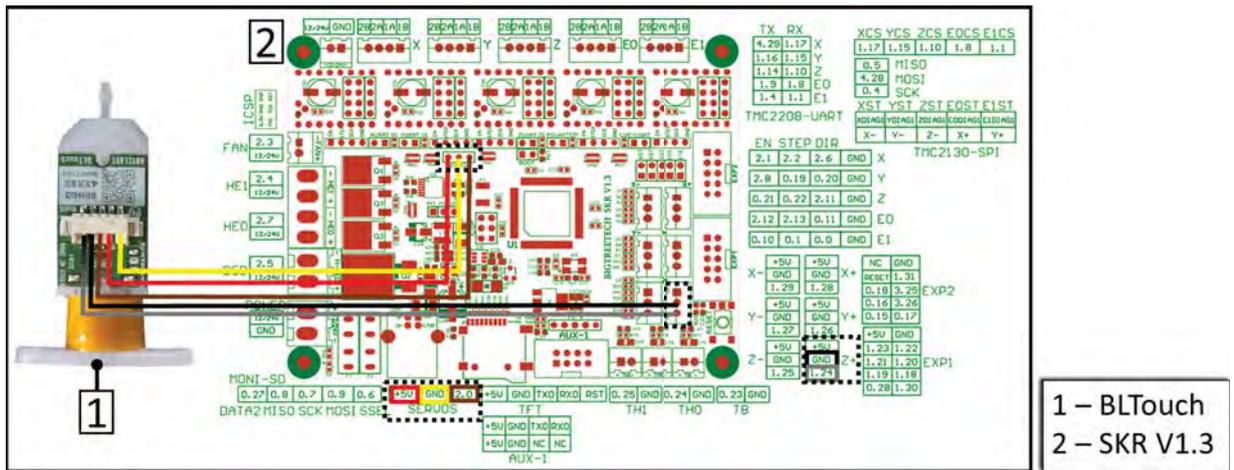


Abbildung F.35: Elektrische Verschaltung des BLTouch mit dem Mainboard BigTreeTech SKR V1.3

Zuverlässigkeitsprüfung

Das Qualitätsmerkmal der Messung durch die Sonde des BLTouch ist abhängig von Wiederholbarkeit der Messergebnisse. Hierfür ist in der Firmware von Marlin der s.g. BLTouch-Wiederholbarkeitstest⁶⁷ (engl.: *Repeatability Test*) integriert. Durch aufrufen mittels des Kommandos M48 werden mehrere aufeinanderfolgende Messzyklen durchgeführt, wobei mehrmals die gleiche Stelle in kurzen Abständen gemessen wird. Die Ergebnisse dieser Messung liefern deren Standardabweichung. Hiermit ist es dem Nutzer möglich darauf rückzuschließen, ob ein mechanischer Fehler in der Messsonde vorliegen sollte, bevor der Druckvorgang gestartet wird. Der ermittelte Wert für den Aufbau dieser Arbeit, mit allen integrierten Modifikationen betrug $2,363 \mu\text{m}$. Die beobachtete Variation dieses Wertes waren $\pm 5 \mu\text{m}$ bei weiteren unabhängigen Betrachtungen.

Größere Abweichung wurden auf einen Verlust der Magnetisierung vom integrierten Mechanismus zurückgeführt. Hierfür wurden die Weißschen Bezirke im Mechanismus erneut ausgerichtet, durch Verwendung eines externen Neodym-Magnets, der über den Sensor gestreift wurde.

⁶⁷Freischaltung dieser Funktion ist möglich unter: `\Marlin\configuration.h\#define Z_MIN_PROBE_REPEATABILITY_TEST\`

F.11 X-/Y-Kalibrierung mit Horizontal Size Compensation

Die Kalibrierung der X- und Y-Achse des 3D-Druckers hat sehr große Auswirkung auf die Druckgenauigkeit und muss deswegen minutiös durchgeführt werden. Obwohl eine Vielzahl von Einstellungen möglich ist, wurde innerhalb der Literaturrecherche kein zusammenhängender Vorgang ausfindig gemacht und das hier vorgestellte eigene Verfahren entwickelt. Mit dessen ist es möglich eine geometrische Genauigkeit von $10\ \mu\text{m}$ zu erzeugen. Hier erfolgt eine kombinierte Justierung der Schrittmotorbreite, sowie des Justierungseinstellung *Horizontal Size Compensation* des Slicers Simplify3D.

Vorgang

Zu Beginn der Kalibrierung erfolgt eine grobe Ermittlung der Bewegungsdistanz der beiden betrachteten Achsen, wobei die erwartete Distanz X_{tar} , mit der gemessenen Distanz X_{mea} , mit der alten Schrittmotorweite multipliziert wird $X_{OldStep}$, um die neue Schrittmotorweite $X_{NewStep}$ zu ermitteln (Gl.: F.3). Hierbei wird ein beliebiger fester Referenzpunkt am Rahmen des Gerätes gewählt. Dieser Vorgang sollte mehrmals wiederholt werden, um mögliche mechanische Probleme auszuschließen.

$$X_{tar}/X_{mea} \cdot X_{OldStep} = X_{NewStep} \in Z \quad (\text{F.3})$$

Die Grundlage der aufbauenden Kalibrierungen ist ein quadratischer Kasten (Abb.: F.36 (A)) welcher möglichst nicht zu klein gewählt werden sollte, da sich der Fehleranteil sonst nicht potenzieren würde. Das Ziel ist es, diese Werte so exakt wie möglich mit dem 3D-Drucker zu replizieren. Wie in der Vorschau des Drucks der Abb. F.36 (B) zu erkennen, wird hierbei eine einzelne Wandstärke⁶⁸ verwendet, eine Infill als Rautenmuster⁶⁹ und ein einzelnes Layer als Grundfuss⁷⁰. Um eine Verfälschung der Messwerte am Fuße des Drucks zu vermeiden (e.g. *Elephants-Foot*), wurde vorbeugend eine Schräge an den Kanten von $0,6\ \text{mm}$ hinzugefügt.

Anhand des ersten Testdrucks in Abb. F.36 (C) ist zu erkennen, dass keine der Dimensionen den Sollwerten entsprechen.

- ⁶⁸in Blau
⁶⁹in Orange
⁷⁰in Grün

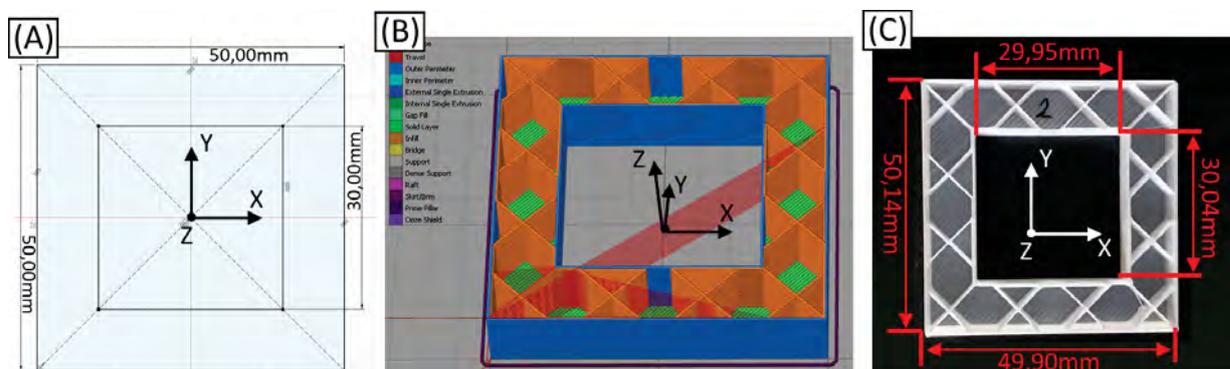


Abbildung F.36: Kalibrierungsobjekt zur Justierung der X- und Y-Achsen am FDM 3D-Drucker. (A) Dimensionen des Kalibrierungsobjekts, (B) Vorschau des zu druckenden Kalibrierungsobjektes, (C) gedrucktes Kalibrierungsobjekt mit gemessenen Dimensionen.

Die Kalibrierung unterteilt sich aufbauend in drei Teilschritte. Im ersten Schritt wird die Schrittmotorweite entsprechen Gl. F.3 angepasst. Hier sei beispielhaft die Schrittmotorweite für X berechnet (Gl.: F.4).

$$50,00 \text{ mm} / 49,90 \text{ mm} \cdot 80,33 = 80,17 \quad (\text{F.4})$$

Dieser ermittelte Wert wird in der Firmware des Druckers eingetragen oder mittels der Konsole als Kommando gesendet *M92 X80.17*. Analog sei dieses Vorgehen für Y zu vollziehen und erneut ein Testdruck zu erstellen.

Anhand des Testdrucks von Abb. F.37 (A) ist zu erkennen, dass die Außenseiten des Testobjektes mit dem Erwartungswert von $50,00 \text{ mm}$ mit denen von Abb. F.36 (A) korrespondieren. Gleichzeitig weichen jedoch die X -, Y -Innenseiten des Drucks um $0,05 \text{ mm}$ ab. Die Justierung dessen erfolgt in *Simplify3D* mit der Variabl *Horizontal Size Compensation* (HSC), wobei eine horizontale Dehnung des Objektes erfolgt, um innenliegende Dimensionen zu kompensieren. Hierfür erfolgt etwa eine Schrumpfung oder Dehnung, um eine bestimmte Distanz, um den Sollwert im Druckobjekt zu ermöglichen. Da dies alle horizontalen Seiten des Objektes betrifft, wird hierfür die Hälfte der überstehenden Seite abgezogen (Gl.: F.5).

$$(X_{tar} - X_{mea}) \cdot 0,5 = HSC_X \quad (\text{F.5})$$

$$(30,00 \text{ mm} - 30,05 \text{ mm}) \cdot 0,5 = 0,025 \text{ mm} \approx 0,03 \text{ mm} \quad (\text{F.6})$$

Der ermittelte Wert von $0,03 \text{ mm}$ wird im Programm eingetragen und ein erneuter Testdruck gestartet. Anhand des Ergebnisses von Abb. F.37 (B) ist zu erkennen, dass nun die Innenseiten des Testdrucks mit $30,00 \text{ mm}$ mit den Erwartungswerten von Abb. F.36 (A) übereinstimmen. Parallel dazu weichen nun die Außenseiten des Objektes um $0,08 \text{ mm}$ ab.

Im letzten Teilschritt erfolgt nun eine Zusammenführung der vorgestellten Kalibrierungen, wobei von den Messungen die jeweilige halbierte Teilstrecke verwendet wird. Der Grund hierfür ist, dass HSC zur Berechnung des Objektes eine mittlere Wegstrecke zwischen der Außen- und Innenseite eines Objektes zeichnet, dessen Umfang vergrößert oder verkleinert wird, abhängig vom Nutzer angegebenen Wert. Das Ziel ist es jedoch, diesen Wert möglichst klein zu halten, da somit Fehljustierungen entstehen. Diese Hilfslinie HSC_{Δ} wird ermittelt, durch Subtraktion der Differenz von der Außenseite $X_{Au\ddot{a}u\text{en}}$ zur Innenseite X_{Innen} der Kalibrierung von Abb. F.37 (B).

$$(X_{Au\ddot{a}u\text{en}} - X_{Innen}) \cdot 0,5 = (50,08 \text{ mm} - 30,00 \text{ mm}) \cdot 0,5 = 0,04 \text{ mm} = HSC_{\Delta} \quad (\text{F.7})$$

Mit dem errechneten Wert wird nun die Schrittmotorweite angepasst, wobei der neu Referenzwert X_{tar} mit der ermittelten Hilfslinie HSC_{Δ} addiert wird.

$$(X_{tar} + HSC_{\Delta}) / X_{mea} \cdot X_{OldStep} = X_{NewStep} \in Z \quad (\text{F.8})$$

$$(50,00 \text{ mm} + 0,04 \text{ mm}) / 50,08 \text{ mm} \cdot 80,17 = 80,1059 \approx 80,11 \quad (\text{F.9})$$

Die dargestellte Berechnung in Gl. F.9 sei hierbei für die X -Achse und gilt analog für die Y -Achse. Diese Werte werden erneut in der Firmware des Druckers gespeichert. Des Weiteren wird die Kalibrierungswert für HSC ebenfalls halbiert von $0,03 \text{ mm}$, auf $0,01 \text{ mm}$. Hierbei ist zu erkennen, dass anhand der Rundung des Wertes eine Ungenauigkeit von $10 \mu\text{m}$ entstehen können. In Abb. F.37 (C) illustriert, ist der dritte Testdruck, mit allen implementierten Justierungen, sowie der gewünschten Korrespondenz zu den Sollwerten von Abb. F.36 (A). Die nun eingestellten Werte generieren die gewünschte Genauigkeit für

Objekte dieser Größe. Ein höhere Genauigkeit kann mit dem gleichen Verfahren erzeugt werden, wenn ein größeres Kalibrierungsobjekt verwendet wird. Es sei hierbei darauf zu achten, dass rechtwinklige Objekte verwendet werden, um eine Isolierung der Achsen zu ermöglichen.

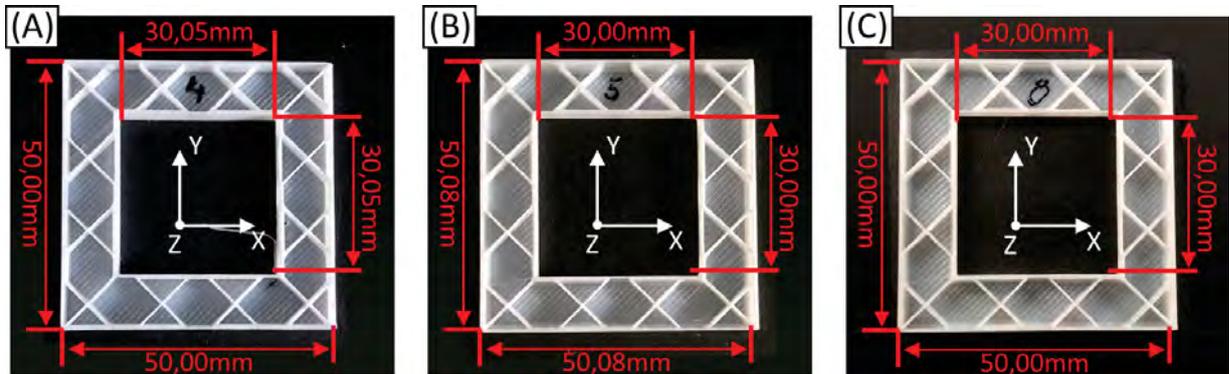


Abbildung F.37: Kalibrierungsobjekt zur Justierung der X- und Y-Achsen am FDM 3D-Drucker. (A) nach Justierung der Schrittmotorweite, (B) nach Justierung, (C) gedrucktes Kalibrierungsobjekt mit gemessenen Dimensionen.

F.12 Gehäuse

FDM-Druck profitiert maßgeblich von der Verwendung eines thermal umschließenden Gehäuses. Auf diese Weise werden konsistente Druckergebnisse generiert, als auch der Energieverbrauch des Gerätes nachhaltig reduziert. Als Teil dieser Arbeit entstand außerdem die Notwendigkeit, weil beispielsweise das Gerät so verändert wurde, dass das beheizte Druckbett mit Holz isoliert wurde, um so den Druck auf einer kalten Druckfläche durchzuführen (Kpt.: 7). Eine ungewünschte Begleiterscheinung dessen ist in Abb. F.38 (C) dargestellt, wobei ein Ablösen des Drucks (engl.: Warping) von der Druckfläche zu beobachten ist. Grund hierfür ist die herstellungsbedingte thermische Differenz (Abb.: F.38 (A)). Hierbei entsteht ein Temperaturgefälle zwischen der ersten Druckebene (erkaltetes Filament) und dem momentan extrudierten Filament (geschmolzenem Filament). Durch den s.g. Wärmeausdehnungskoeffizienten erfolgt hierbei eine Veränderung der Abmessung des Stoffes durch die Temperaturveränderung (s.a. thermaler Stress). Das gedruckte Objekt zieht sich zusammen. Der Kennwert F_{Σ} symbolisiert hierbei das physikalische Schrumpfen in vertikaler Ebene und setzt sich aus der Summe der Teilmengen F_w der individuell gedruckten Ebenen zusammen. Diese Eigenschaft ist herstellungsbedingt und unvermeidlich, jedoch sind einige Maßnahmen als Entgegenwirkung hierfür vorgesehen. Es ist essentiell für die erfolgreiche Durchführung des Drucks, dass die erste Kontaktschicht eine zuverlässige Adhäsion mit dem Druckbett eingeht (Abb.: F.38 (A, 6)). Hierfür wurden die Leitlinien von [54, S.18-24] eingehalten, wobei die erste gedruckte Schicht sehr langsam gedruckt wurde (10 – 20 mm/s), ohne Ventilation des Filaments, mit Papierkleber als zusätzlichem Ver-

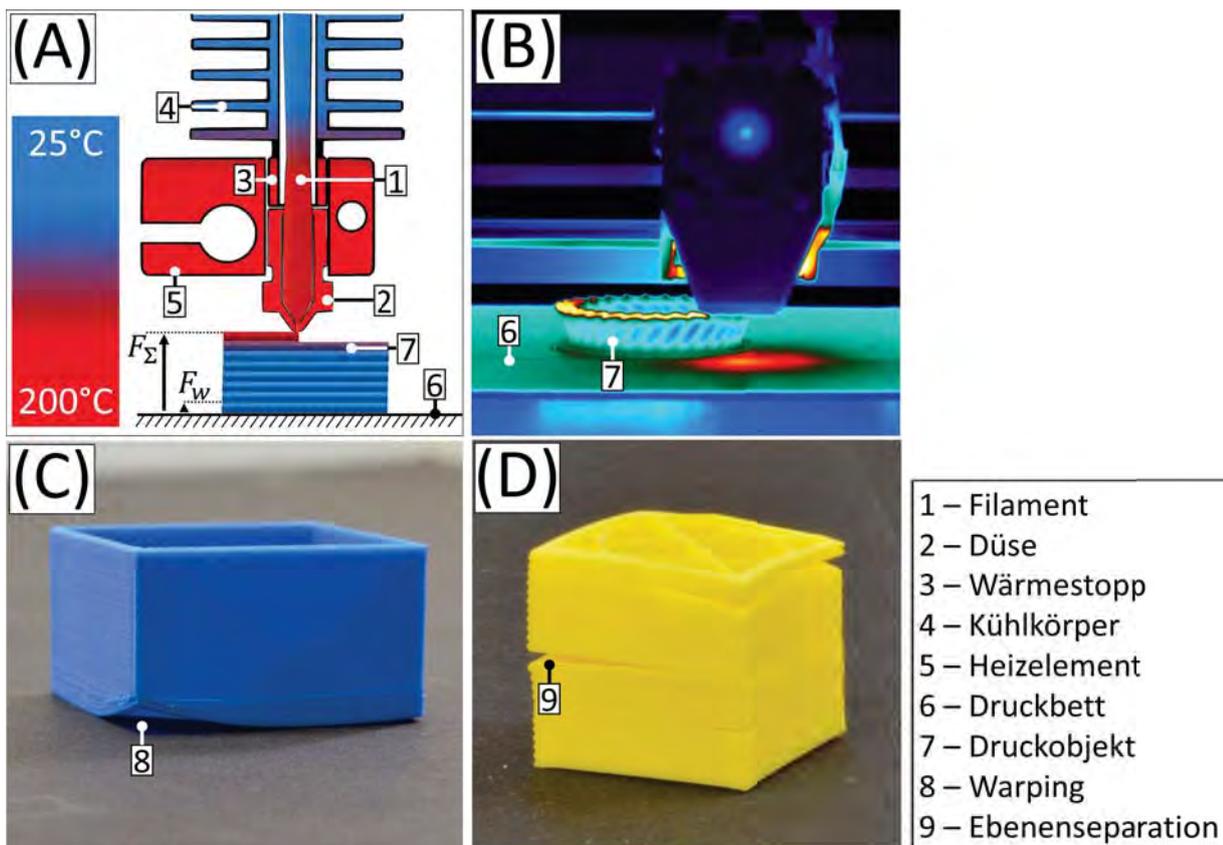


Abbildung F.38: Thermale Verteilung beim FDM-Druck und dessen Auswirkungen. (A) Schematischer Querschnitt mit thermaler Verteilung, (B) thermales Abbild von FDM-Druckvorgang ohne umschließendes Gehäuse, (C) abgelöst Druck durch thermischen Stress (engl.: Warping), (D) Ebenenseparation (engl.: Layer Separation) im Druck.

bindungsmittel, sowie mit erhitztem Druckbett⁷¹. Betrachtet man hierfür als Beispiel die Abb. F.38 (B), so wird die inhomogene thermale Verteilung deutlich, wobei im Zentrum der Lagen der größte thermale Gradient zu beobachten ist. Als Folge entsteht dadurch der beschriebene thermale Stress nun im Zentrum des Druckobjekts, wodurch eine s.g. Ebenenseparation (engl.: Layer Separation) stattfindet (Abb.: F.38 (D, 9)), das Ablösen von einzelnen Ebenen. Alle diese Effekte können einfach dadurch verhindert werden, in dem der FDM-Druckvorgang innerhalb eines Gehäuses vorgenommen wird, der die Wärmeabgabe reduziert.

Die Zusammensetzung des Aufbaus wurde in Abb. F.39 illustriert. Die Grundlage des Konstrukts wurde [132] entnommen und verfeinert. Als Basis wird ein IKEA-Beistelltisch (Abb.: F.39 (A, 4), (B, 4)) verwendet [133], weil die geometrischen Eigenschaften mit denen des 3D-Druckers korrespondieren, als auch durch die eingelassenen Papierluftlöcher eine gute thermische Isolation gewährleisten. Um die Höhe des Gehäuses zu erhöhen, wurden zusätzliche Adapter aus PLA gedruckt, die die mitgelieferten Füße des IKEA-Lack-Tisches verlängern und an den Eckpunkten des Tisches befestigt wurden. Dadurch konnten Plexiglasscheiben⁷² an allen vier Seiten eingelassen werden und daran befestigt werden. Für zusätzliche Stabilität und thermische Dichte wurden zusätzliche an der Kopf- und Fußseite Holzleisten installiert und an der Stirnseite mit Holzleim verklebt. Das gesamte Gehäuse soll abnehmbar bleiben, um Montagearbeiten vornehmen zu können. Um dadurch nicht die Isolation zu kompromittieren, wurde die Fußleiste mit Schaumstoff versehen, auf welchem das Gehäuse lagert. Das Filament wird oberhalb von außen eingeführt (Abb.: F.39 (A, 1)). Hierfür wurde eine Einlassung gebohrt und mittels einer aus PLA gedruckten Führungsschiene erweitert, die passgenau für ein PTFE-Führungsröhrchen ist. Die Filamentbehälter sind hierbei staubdichte Aufbewahrungscontainer, die die auf Kugellagern installierten Filamentspulen durch das PTFE-Führungsröhrchen in das Gehäuse einführen. Mittels diesen Systems wurden drei Filamentspulen nebeneinander positioniert, die einen erleichterten Wechsel der Filamente ermöglichen. Auf diese Weise kann die warme Luft nicht über die Oberseite eindringen. Gleichzeitig ermöglicht dieses Bauprinzip Schwingungen am 3D-Drucker zu reduzieren, weil die Filamentspulen nicht am Rahmen gelagert werden. Der Zugang zum Gerät wird mittels einer auf Scharnieren gelagerten Tür ermöglicht. Umrandend an dieser Tür wurden Magnetbänder installiert, die ein Entweichen der Wärme unterbinden sollen (Abb.: F.39 (A, 3)).

Das erstellte Gehäuse erlaubte es nicht die Steuerung im selbigen unterzubringen (Abb.: F.39 (D, 13)). Durch die erhöhte Umgebungstemperatur würde die Lebensdauer der Elektronik verringert, die selbst im Normalbetrieb eine eigenen aktiven Lüftung bedarf. Speziell die verwendeten Schrittmotortreiber (Abb.: F.39 (B, 9), (D, 9)) benötigen permanente Kühlung, die durch eine aktive Ventilation und installierten Kühlrippen realisiert sein muss, weil die Effizienz sonst um 50% reduziert wird [118, S.7, Abb.: 1.3]. Hierfür wurde die Steuerung des 3D-Druckers außerhalb des Gehäuses installiert, wobei die Verkabelung in das Gehäuse zu den Motoren (Abb.: F.39 (D, 6)) und dem Extruder (Abb.: F.39 (D, 11)) hingeführt wurden. Die externe Elektronik wird hierbei von zwei 80 mm-Ventilatoren beidseitig belüftet. Die thermische Überwachung der Elektronik erfolgt mittels *Octoprint* oder dem manuellen Aufruf der Operationstemperatur (OT) für die Schrittmotortreiber mittels *M122* in der Kommandozeile. Die Überwachung und Kommunikation wird mittels des *Raspberry Pi's* (Abb.: F.39 (C, 7), (D, 7)) durchgeführt, welcher über eine serielle Verbindung mit dem Mainboard verbunden ist. Gleichzeitig übernimmt der *Raspberry Pi* die Schaltung der Energieversorgung des Netzteils (engl.: Power Supply Unit (PSU)). Diese Komponente dient als zusätzlicher Schutz des Nutzers und des Geräts, da ein defekter MOSFET nicht vom IC des Mainboards erkannt werden kann und somit Kabelbrüche am beweglichen Druckbett unerkannt bleiben

⁷¹Die notwendigen Temperaturen für eine adequate Adhäsion mit dem Druckbett sind werkstoffabhängig (i.e. PLA: 50 – 60 °C; PTEG: 50 – 80 °C; ABS: 105 °C [54, S. 19])

⁷²Stärke: 5 mm

würden. Zusätzlich sieht die Firmware *Marlin* vor, dass mittels der Einstellung *Thermal Runaway Protection*⁷³ ein permanenter Abgleich der Werte der Thermistoren von *Hotend* und Druckbett stattfindet. Bei fehlender Korrespondenz der PWM mit diesen Werten, erfolgt eine Notabschaltung durch *Marlin*, gefolgt durch eine Deaktivierung der PSU mittels Schaltung des Relais (Abb.: F.39 (D, 13)) durch den *Raspberry Pi* durch das Plugin *Temperature Failsafe* [134].

Mittels dieses Konstrukts des Gehäuses ist es möglich eine gleichmäßige Umgebungstemperatur von 30 °C zu erhalten, die für die Zwecke diese Arbeit genügen. Eine hermetische Abschließung mittels dieses Gehäusetyps ist nicht möglich.

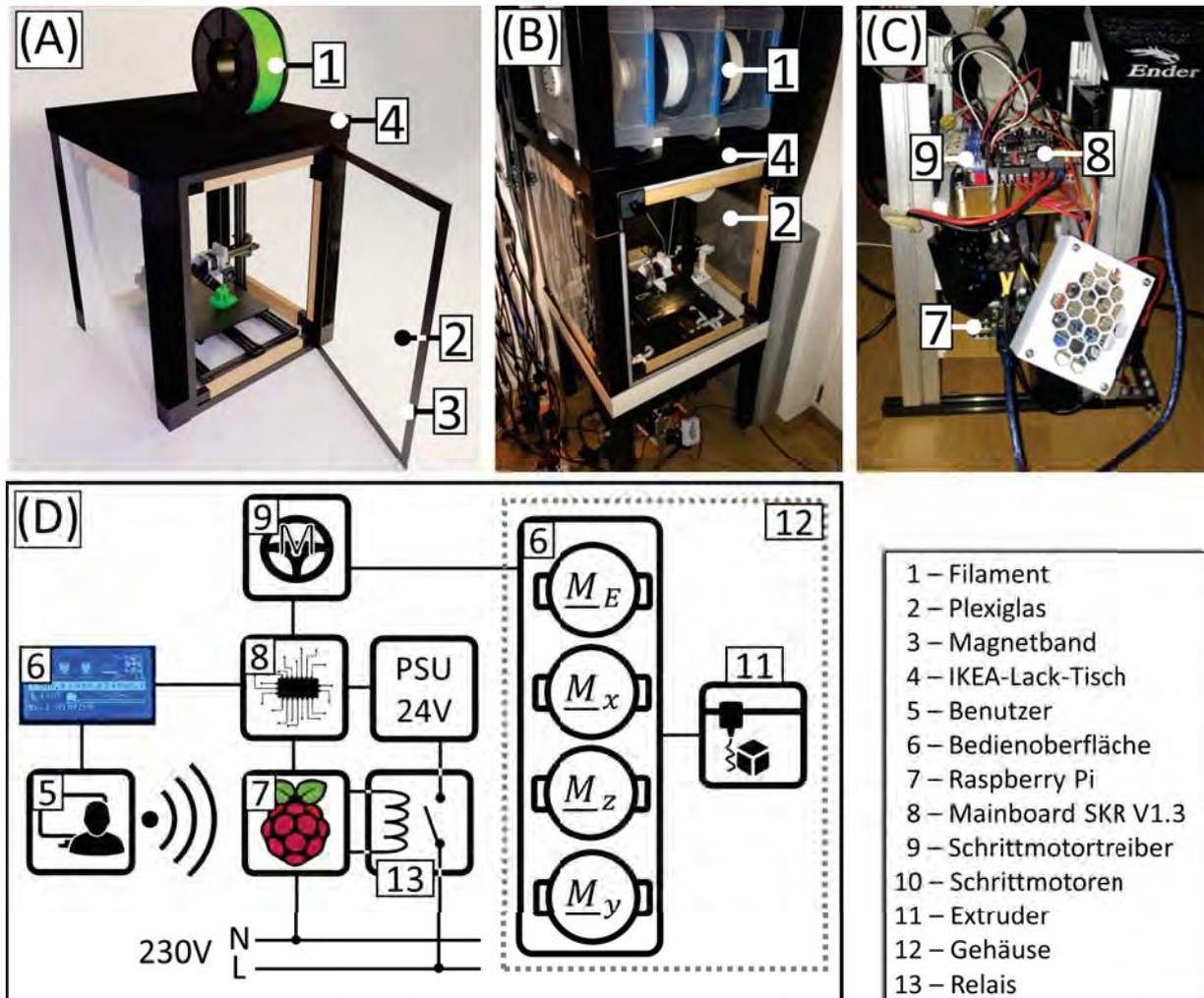


Abbildung F.39: Verwendetes Gehäuse. (A) Zusammensetzung der Bauteile, (B) eingesetzter Aufbau in seiner Gesamtheit, (C) externe Elektronik vom 3D-Drucker, (D) Schema vom Aufbau und Verteilung der Komponenten.

⁷³\Marlin\configuration.h\#define THERMAL_PROTECTION_HOTENDS\

F.13 Filamentkalibrierung

Individuelle Kalibrierung von Filamenten ist essentiell für den FDM-Druck. Herstellerangaben sind stets nur Richtwerte, die nicht übergreifend universell auf alle Geräte anwendbar sind. Gleichzeitig gibt dies ebenfalls Einblick in die Qualitätsmerkmale des Rohstoffs, als auch die Qualität der Funktionsausübung des eigenen Gerätes. Es ist wichtig zu beachten, dass der FDM-Drucker ein feinmechanisches Werkzeug ist, mit einer Vielzahl von Einzelteilen, die alle Einfluss auf die Druckqualität nehmen. So kann bei einem gleichbleibenden Kalibrierungsverfahren Einblick auf den Zustand des Gerätes genommen werden und die Funktionsweise der individuellen Komponenten. In diesem Abschnitt wird auf diese Kalibrierungsverfahren eingegangen.

Extrusion Multiplier

Die Grundlage der Kalibrierung ist ein einwandfrei funktionsfähiger FDM-Drucker. Eine Vielzahl von mechanischen Modifikation werden im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt, die dieses gewährleisten. Zu Beginn erfolgt die Kalibrierung des Schrittmotors am Extruder, welcher für die Zufuhr des Filaments in die Düse zuständig ist. Hierfür muss die Schrittweite $E_{OldStep}$ angepasst werden, um eine definierte Umdrehungszahl per Distanz (s.g. *Steps/mm*) zu erhalten. Hierzu werden zu Beginn Randbedingungen geschaffen, welche auch beim 3D-Druck vorherrschen würden. So wird das Hotend erhitzt (i.e. $200\text{ }^{\circ}\text{C}$), sowie das Druckbett (i.e. $60\text{ }^{\circ}\text{C}$), sowie die Tür der Kammer geschlossen und vorgeheizt. Das bereits eingeführte Filament wird an einer bestimmten Stelle mit einem Abstand von 100 mm (E_{tar}) markiert und extrudiert⁷⁴. Die Differenz E_{mea} zur Markierung wird ermittelt und multipliziert mit der bestehenden Schrittweite $E_{OldStep}$, um die neue Schrittweite $E_{NewStep}$ zu erhalten:

$$E_{tar}/E_{mea} \cdot E_{OldStep} = E_{NewStep} \cdot \epsilon \mathbb{Z} \quad (\text{F.10})$$

Die ermittelte rationale Zahl wird auf zwei Kommastellen gerundet und in der Firmware von Marlin gespeichert, durch Eingabe in der Console als `M92 E[ENewStep]` oder der Firmware `#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { XNewStep, YNewStep, ZNewStep, ENewStep }`⁷⁵. Dieser Wert wird als grobe Justierung verwendet, wobei geringe Abweichungen erlaubt sind. Die Feinjustierung erfolgt innerhalb des Slicers, mittels des s.g. *Extrusion Multipliers*⁷⁶. Dieser Wert erlaubt es dem Nutzer Feinjustierung des extrudierten Filaments vorzunehmen, wobei ein einzelner Strang von Filament gedruckt und vermessen wird. Die Einstellung dessen erfolgt in *Simplify3D* unter dem Pfad `|Edit Process Settings|Extruder|Overview|`, wobei die Angabe des Düsendurchmessers in *Nozzle Diameter* erfolgt

⁷⁴GCode zur Extrudierung des Filaments von 100 mm : G1 E100 F100

⁷⁵`\Marlin_Firmware\Marlin\Configuration.h`

⁷⁶Begriff wird nicht universell von allen Slicer-Programmen verwendet. *Simplify3D*, *Slic3r*, *PrusaSlicer* = Extrusion Multiplier, *Cura* = Flow Rate.

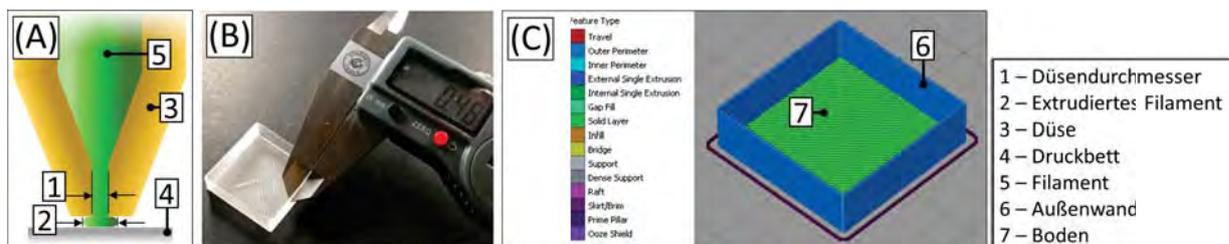


Abbildung F.40: Testobjekt zur Kalibrierung der Schrittweite des Extruders. (A) Seitenansicht der Düse mit extrudiertem einzelnen Filamentstrang, (B) gedruckter Testkörper mit vermessener Wandstärke, (C) Vorschau des Druckobjektes in *Simplify3D*.

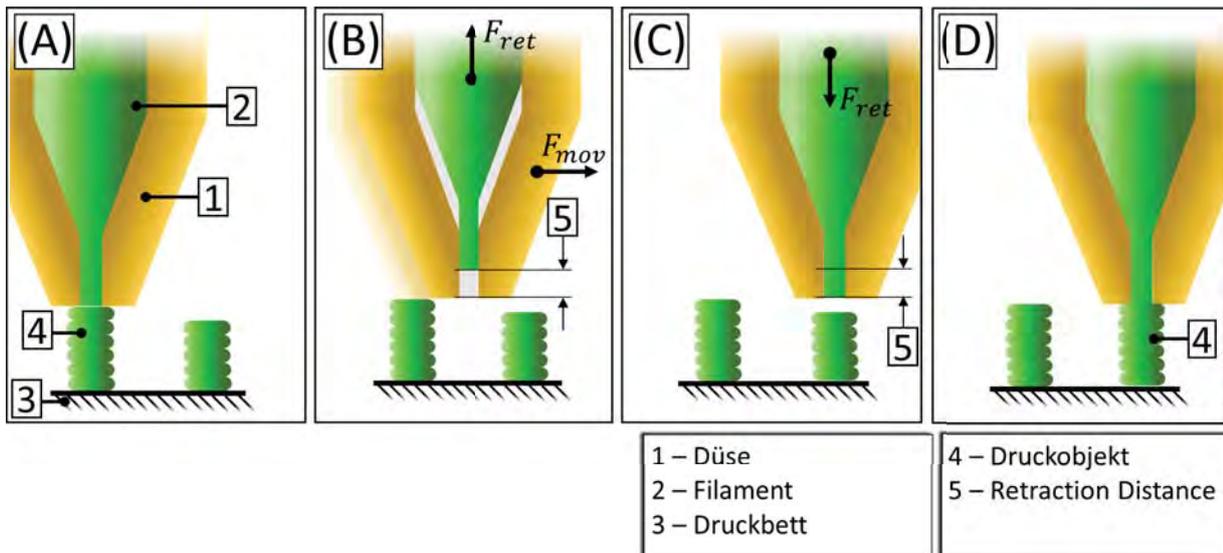


Abbildung F.41: Vorgang des Retraction Distance beim FDM-Druck. (A) Durchführung des Drucks vom linken Druckobjekt, (B) Bewegung der Düse zum zweiten Druckobjekt und simultane Durchführung vom *Reverse Retraction*, (C) Durchführung vom *Forward Retraction*, um Druck fortzusetzen, (D) Fortsetzung Druckvorgangs auf der rechten Seite.

und dem *Extrusion Multiplier*. Die Angabe der *Extrusion Width* erlaubt eine manuelle Einstellung der Wandstärke auf einen gewünschten Zielwert. Der Richtwert hierbei soll 120 % des Auslasses der Düse betragen. Wird von einem Düsendurchmesser von $0,4\text{ mm}$ ausgegangen, so soll die Wandstärke $0,48\text{ mm}$ betragen. Zur Illustration dieses Sachverhalts sei auf Abb. F.40 (A) verwiesen⁷⁷. Als Kalibrierung wird hierfür ein Quader gedruckt, der sich aus einer einzelnen umlaufenden Wand zusammensetzt (Abb.: F.40 (C)). Mittels des *Extrusion Multipliers* wird erneut die Schrittweite des Extrudermotors justiert, unter Verwendung der Gleichung F.10. Der berechnete Wert hiervon wird im jeweiligen Programm eingetragen, um mit diesem weiterverfahren zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Wert von $0,93$ verwendet, um eine Wandstärke von $0,48\text{ mm}$ generieren zu können, für das Material PLA. Diese Werte variierten jedoch, da Faktoren wie eingestellte Temperatur, Abnutzung der Düse und der mechanischen Bauteile dies beeinflussen.

Retraction Distance

Geschmolzenes Plastik läuft selbstständig aus einer Düse heraus, sollte diese erhitzt sein und unbewegt bleiben. Um dies zu verhindern existiert das s.g. *Retraction Distance* (Abb.: F.41). Hierbei wird kurzzeitig und impulsiv das Filament entgegen der Extrudierungsrichtung über eine bestimmte Distanz eingezogen, wenn ein Ortswechsel der Düse stattfindet (Abb.: F.41 (B)). Bevor der Druckprozess fortgesetzt wird, erfolgt eine Rückführung des Filaments, bezeichnet als *Forward Retraction* (Abb.: F.41 (C)). Erst danach wird der Druckvorgang fortgesetzt (Abb.: F.41 (D)).

$$F_{rect} = m_{Fil} \cdot \frac{l_R}{t_R} \quad (\text{F.11})$$

Diese Funktion F_{rect} , die auch kurz als *Retraction* bezeichnet wird, unterbindet das Herausquellen des Plastiks. Maßgeblich beeinflussende Faktoren hierfür sind die *Retraction Distance* l_R , der *Retraction Speed* t_R und die Temperatur der Düse. Diese Einstellungen gilt es zu kalibrieren, da dies individuell abhän-

⁷⁷Es sei zu beachten, dass die erste gedruckte Schicht mit Druckbett stets breiter ist, um genügend Haftung mit dem Druckbett zu bewirken (s.a. *Elephants Food*)

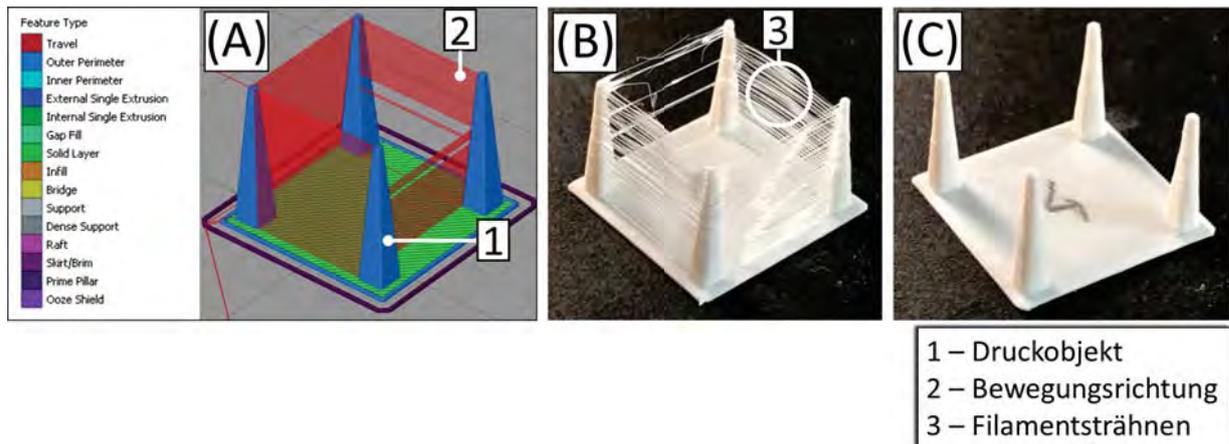


Abbildung F.42: Testobjekt zur Ermittlung der *Retraction Distance* und Eliminierung von Filamentsträhnen. (A) Druckvorschau in *Simplify3D* mit Bewegungsrichtung der Düse, (B) gedrucktes Testobjekt mit stark ausgeprägten Filamentsträhnen mit weißem PLA-Filament, (C) gedrucktes Testobjekt ohne Filamentsträhnen mit weißem PLA-Filament und einer *Retraction Distance* von $0,2\text{ mm}$.

gig sind vom verwendeten FDM-Drucker. Da im Rahmen dieser Arbeit mit unterschiedlichen Filamenten experimentiert wurde, galt es hierfür ein optimales Vorgehen zu entwickeln, welches in diesem Abschnitt beschrieben wird.

Ein typisches Anzeichen für Kalibrierungsbedarf in Form des *Retraction* sind feine Haarbildungen im Druck, in Form von Filamentsträhnen (Abb.: F.42 (B)). Dieser Effekt kann provoziert mittels eines geeigneten Testobjekts werden, welches sich zusammensetzt aus vier im Quadrat angeordneten spitz zulaufenden Pyramiden[135]. Wie in Abb. F.42 (A) illustriert, wird hierbei der FDM-Drucker angewiesen die vier Türme individuell anzufahren (Abb.: F.42 (A, 2)), wobei jeweils das in Abb. F.41 illustrierte *Retraction* durchgeführt wird. Die Justierung hierfür erfolgt in Iterationen von mehreren individuellen Testobjekten der Abb. F.42 (A), wobei die Schrittweite beginnend von $0,0\text{ mm}$ in $0,1\text{ mm}$ Inkrementen verändert wird. So wurde für diese Arbeit ein Wert von $0,2\text{ mm}$ ermittelt. Nach Ermittlung dieses Wertes wird aufbauend mit der gleichen Vorgehensweise ebenfalls der Wert für den *Retraction Speed* t_R ermittelt, wobei dieser in einer Schrittweite von 10 mm/s verändert wird. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein optimaler Wert von 80 bis 90 mm/s ermittelt.

Temperatur

Die eingestellte Temperatur der Düse bewirkt die Verflüssigung des eingeführten starren Filaments, wodurch dieses anhand des Rasters aufgetragen wird und durch anschließendes Erhärten an der gewünschten Position dessen Lage einnimmt. Die Justierung dieser Schmelztemperatur bestimmt die mechanische Belastbarkeit, die geometrische Genauigkeit und das optische Erscheinungsbild. Hersteller von Filament geben für ihre Produkte Richtwerte an, jedoch gilt es diese zu überprüfen und feinjustieren. Da im Rahmen dieser Arbeit unterschiedliche Filamente zum Einsatz kamen, galt es für diese die geeigneten Einstellungen zu ermitteln. Auf die Vorgehensweise wird in diesem Abschnitt eingegangen.

Um andere Einflüsse auszuschließen, wird in diesem Schritt vorausgesetzt, dass der *Extrusion Multiplier* und die *Retraction Distance* vorher bereits konfiguriert wurden. Somit kann per Ausschlußverfahren davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse des Temperaturtests von diesen nicht berührt werden. Es wird das Verfahren von [136, 7:31 Min] verwendet und das gewählte Testobjekt von [137] (Abb.: F.43 (A)). Bei diesem Testobjekt werden mehrere Eigenschaften gleichzeitig getestet, die von der Temperatur beeinflusst werden. Wie auch bei der Kalibrierung der *Retraction Distance*, sollen Filamentsträhnen vermieden wer-

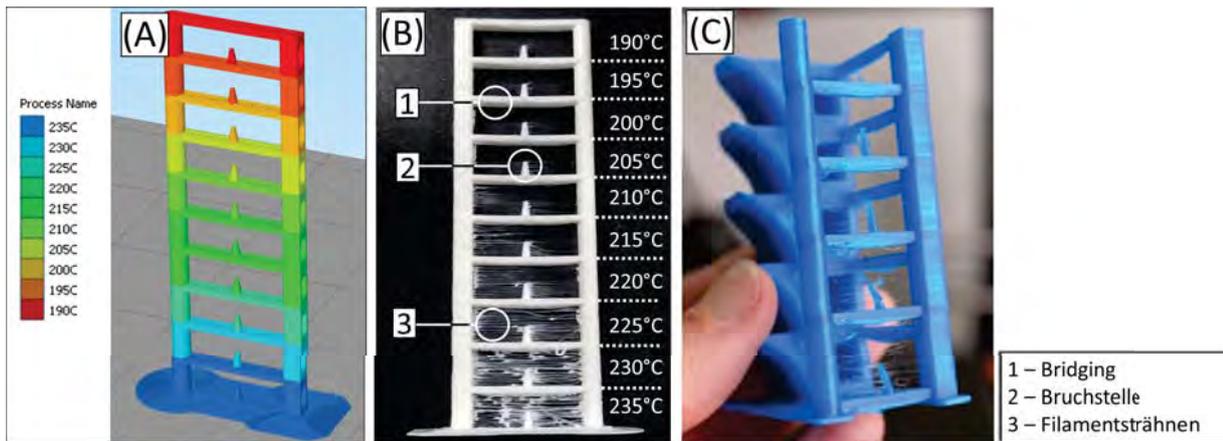


Abbildung F.43: Testobjekt für FDM-3D-Druck zur Ermittlung der optimalen Temperatur der Schmelztemperatur von Filament. (A) Vorschau des Testobjekts in *Simplify3D* mit verändernder Temperatur der Düse, (B) gedrucktes Testobjekt mit resultierenden Auswirkungen auf das Filament, (C) Testobjekt mit abgebrochenen Bruchstellen um die mechanische Festigkeit zu prüfen [136, 7:34 Min].

den. Anhand von Abb. F.43 (B, 3) zu erkennen, sind diese abhängig von der Temperatur, wobei bei $235\text{ }^{\circ}\text{C}$ starke Filamentsträhnen zu beobachten sind, nimmt dieser Effekt zu niedrigeren Temperaturen sukzessiv ab.

Gleichzeitig soll die mechanische Belastbarkeit überprüft werden, anhand der Verbindung der Schichten. Hierfür wurden dornenförmige Bruchstellen erstellt (Abb.: F.43 (B, 2)), die es gilt mit dem Finger abzubrechen. Der entfernte Dorn soll hierbei vorzugsweise beim Abbrechen eine Basis zurücklassen, welches Indiz ist für eine mechanisch starke Verbindung zum Druck (Abb.: F.43 (C)).

Zuletzt wird die Komponente des *Bridging* geprüft. Dieser Effekt beschreibt die Möglichkeit beim FDM-Druck, extrudiertes Filament mittels schneller Bewegung an zwei Punkten anzuhängen, ähnlich dem eines Seils, welches zwischen zwei Ankerpunkten gespannt wird. Hierbei erstarrt das geschmolzene Filament, bevor es anfangen kann sich zu setzen. Die Qualität und die Temperaturabhängigkeit dieses Prozesses ist anhand von Abb. F.43 (B, 1) zu erkennen. Ungewünscht hierbei sind Schlaufenbildungen, wie bei $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, oder eine Durchhängen des Filaments im Zentrum, wie bei $220\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zur Konfiguration des *Bridging* wurden ebenfalls ein weiteres Konfigurationsverfahren entworfen, auf welches in dieser Arbeit aber nicht näher eingegangen wird.

F.14 Düsenreinigung

Die äußerliche Reinigung der Düse vom FDM-Drucker erhält häufig wenig Beachtung, da diese Stelle schwierig zu erreichen ist, sowie zusätzliche Werkzeuge benötigt werden, die im konventionellen Aufbau nicht verfügbar sind. Es ist jedoch notwendig dem Beachtung zu schenken, da eine Vielzahl von Problemen vorgebeugt werden können. So zum Beispiel ist es von Vorteil innerhalb eines stattfindenden Druckvorgangs eine Reinigung vorzunehmen, ohne den bestehenden Druckablauf zu stören, sowie einen unvollständigen Druck verlieren zu müssen. In diesem Abschnitt soll deswegen auf die Notwendigkeit der Erweiterung eingegangen werden, sowie der Entwurf einer Reinigungsautomatik. Dies ist essenziell für diese Arbeit, da eine Vielzahl von unterschiedlichen Filamenten verwendet und miteinander kombiniert werden.

Es ist davon auszugehen, dass Ablagerungen am Messing (Abb.: F.44 (A, links)) durch den vom Lüfter mitbeförderten Staub entstehen. Diese Partikel verrußen bei Berührung mit der heißen Düse, lagern sich ab und bieten dadurch dem Filament eine Klebefläche. Wiederum verkleben dadurch Filamentreste die Düse äußerlich. Ein zusätzlich fördernder Effekt könnte hierbei ebenfalls die zyklische thermische Belastung sein. Vergleicht man hierfür eine neuwertige Düse (Abb.: E.5 (B)) mit einer abgenutzten Düse (Abb.: E.5 (C)), so ist eine starke Rauigkeit zu beobachten.

Beispielhaft sind negative Begleiteffekte einer äußerlichen Verunreinigung der Düse in Abb. F.44 (B) und Abb. F.44 (C) dargestellt. Die mitgeführten Ablagerungen am Düsenkopf lagern sich beim Druck ungewollt ab (Abb.: F.44 (B)) oder führen zur Unterbrechung des Filamentflusses (Abb.: F.44 (C)). Die Gründe hierfür können vielfältig sein, wie zum Beispiel eine verlängerte Standzeit zur Erwärmung, wobei Filament aus der Düse selbstständig hinausläuft. Dieser negative Effekt potenziert sich speziell bei zähflüssigen Filamenten (e.g. PTEG) oder Filamenten mit erhöhter thermischer Leitfähigkeit mit Eisen- oder Kupferpartikeln (e.g. Protopasta Iron [44], Protopasta Copper [60]).

Solche Verunreinigung können permanent während des Herstellungsprozesses auftreten, da selbst kleinste Unregelmäßigkeiten über die Dauer des Drucks sich aufsummieren und spät im Zeitverlauf ein Problem darstellen können. Zu verhindern wäre dies durch eine regelmäßig Reinigung zu Beginn des 3D-Drucks, um so eine fehlerfreie Ausgangslage zu schaffen. Eine Reinigungsautomatik kann hierbei selbstständig innerhalb des Druckprozesses eingebunden werden, um beispielsweise in regelmäßigen Abständen selbstständig eine Reinigung vorzunehmen oder spontan bei Bedarf.



Abbildung F.44: Verunreinigung der Düse beim FDM-Druckverfahren. (A) Vergleich von 0,25 mm verunreinigter Düse (links) und neuwertiger Düse (rechts), (B) Filamentablagerungen im Testwürfel mit Stützstellen, (C) inkonsistente Schichtung des Filaments beim Testwürfel.

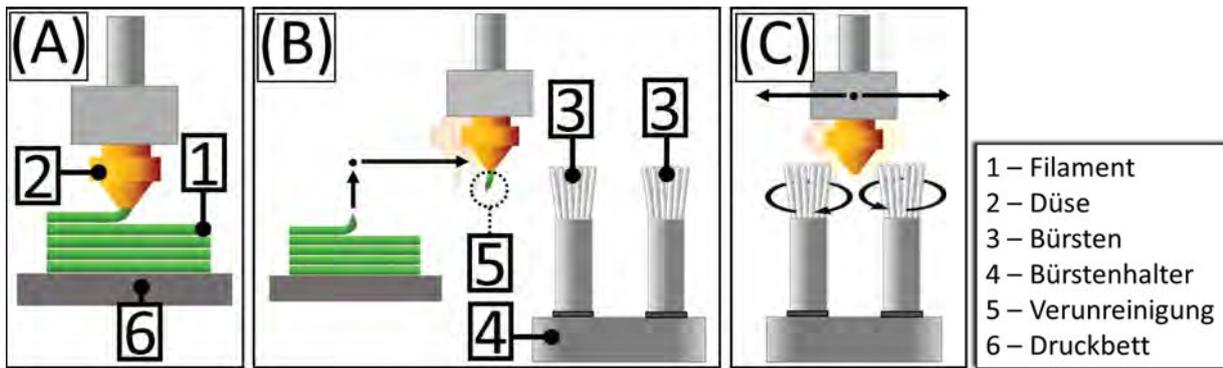


Abbildung F.45: Düsenreinigungsvorgang für FDM-Drucker. (A) Ausgangslage vor Beginn des Reinigungs Vorgangs, (B) Bewegungsablauf des zum Reinigungs Vorgangs der Düse, (C) Durchführung des Reinigungs Vorgang der Düse.

Vorgang

Der nun beschriebene Reinigungs Vorgang der Düse wurde in Abb.: F.45 visualisiert. Die Ausgangslage wird in Abb.: F.45 (A) dargestellt, wobei ein beliebiger Druck Vorgang vonstattengeht und Filament aus der Düse extrudiert wird. Der Reinigungsprozess wird mittels des *G-Codes G12* gestartet (Abb.: F.45 (B)), wobei der Druck Vorgang pausiert wird und die Düse in vertikaler Richtung um 2 mm gehoben wird. Anschließend wird die Düse entlang der X-Achse zum installierten Bürstenhalter gefahren. Wie in Abb. F.45 (C) dargestellt, wird die Düse zwischen die beiden rotierenden Bürstenköpfe gefahren, wobei durch wiederholtes Abstreifen die Reinigung vorgenommen wird. Nach Vollendung wird die Düse zum Ausgangspunkt zurückbewegt und der Druck Vorgang fortgesetzt. Eine unmittelbare Wiederholung der Reinigung ist möglich.

Mechanischer Entwurf

Der mechanische Entwurf setzt sich aus rotierenden Bürsten zusammen, die durch ihre vertikale Ausrichtung direkten Kontakt zur Düse haben und nicht zu den umliegenden Flächen.

Der Antrieb der Bürsten ist ein 5,9 V Servomotor (Abb.: F.46 (B, 1)), der über einen Keilriemen (Abb.: F.46 (C, 6)) drei Führungsräder (Abb.: F.46 (C, 5)) antreibt, die über individuelle Kugellager (Abb.: F.46 (B, 2)) die Kraft an zwei Bürstenhalter (Abb.: F.46 (B, 3)) übertragen. Um eine entgegengesetzte Rotationsrichtung der Bürstenköpfe erzeugen zu können, wurden drei Kugellager gewählt, sowie eine geschlängelte Führung des Keilriemens (Abb.: F.46 (C)). Die Komponenten wurden alle in ein Gehäuse eingepresst (Abb.: F.46 (B, 4)). Alle Bauteile wurden mittels PTEG erstellt, welches sich durch eine größere Stabilität auszeichnet.

Die verwendeten Bürstenköpfe wurden aus Kunststoffborsten⁷⁸ einer WC-Bürste gefertigt, welche mittels Aderendhülsen und Crimpzange zusammengedrückt wurden.

Eine permanente Nutzung dieses Reinigers soll gewährleistet sein, um beispielsweise eine spontane Reinigung vornehmen zu können. Hierfür wurde der Düsenreiniger an die sich vertikal mitbewegende x-Achse⁷⁹ installiert. Auf diese Weise wird eine Kollision mit den gefertigten Bauteilen vorgebeugt.

⁷⁸0,5 mm Stärke

⁷⁹kartesischen FDM 3D-Drucker

Elektrischer Entwurf

Das verwendete Mainboard *BigTreeTech-SKR-V1.3* besitzt nur wenige frei verfügbar I/O-Pins. Des Weiteren sind diese Eingänge mittels eines Pull-Up-Widerstands versehen (e.g. Endstops *Y-1.26*, Thermistor *TH1 0.25*) und einem permanent anliegenden High-Pegel (3,3 V). Da zur Versorgung eines zusätzlichen Motors weder die Versorgungsspannung noch die Ansteuerung möglich sind, muss eine zusätzliche elektrische Schaltung hinzugefügt werden.

Der Entwurf gestaltete sich wie folgt.; der digitale Eingang zur I/O-Pins wird mittels einer Inverterschaltung (Abb.: F.47 (A, 2)) auf einen Low-Pegel gebracht. Hierfür wurde der NPN-Kleinsignaltransistor *BC337-40* verwendet, der über seine Basis mit dem Pin *P1.26* der Hauptplatine verbunden wurde, sowie einem $220\ \Omega$ Vorwiderstand. Es werden 5 V von der Hauptplatine bezogen, mit dem Kollektor des *BC337-40* angeschlossen, sowie einem $1\ k\Omega$ Vorwiderstand installiert.

Um eine Energieversorgung des Motors zu realisieren, wird sich der von der Hauptplatine zur Verfügung gestellte +24 V Eingangsspannung bedient. Diese dienen der Energieversorgung des Heizblocks der Düse und werden bei Bedarf zugeschaltet. Somit kann der Motor der Reinigungsdüsen im kalten Zustand der Düse nicht aktiviert werden, wodurch einer möglichen Beschädigung vorgebeugt wird. Zur Steuerung der Spannungsversorgung wird ein *High-Side-Transistor-Switch* verwendet. Hierbei wird für die Kleinsignalseite ein *BC327-40* PNP-Transistor verwendet und für die Spannungsversorgung ein *BD239C* NPN-Transistor (Abb.: F.47 (A, 3)).

Die Transformation der +24 V Eingangsspannung zu +5,9 V, erfolgt mittels eines vorgefertigten *LM2596-DC-DC* Abwärtswandlers (Abb.: F.47 (A, 4)).

Als Antrieb wurde ein High-Torque-Zylinder-Mini-Motor verwendet (Abb.: F.47 (A, 5)), welcher von einem CD-ROM-Laufwerk bezogen wurde.

Für diese Schaltung ist es wichtig, dass die Masseflächen des Inverters vom *High-Side-Transistor-Switch* getrennt sein müssen, da dies zur ungewollten Schaltung führt und 24 V auf der Kleinsignalseite anliegen würden.

Programmierung

Der Quellcode von Marlin sieht einen Reinigungsvorgang vor, der für diese Zwecke aktiviert und modifiziert werden muss. Im Quellcode von *Configuration.h* wird die Eigenschaft `#define NOZZLE_CLEAN_FEATURE` aktiviert, welches es nun ermöglicht mittels des Kommandos *G12* den Reinigungsvorgang zu starten. Der

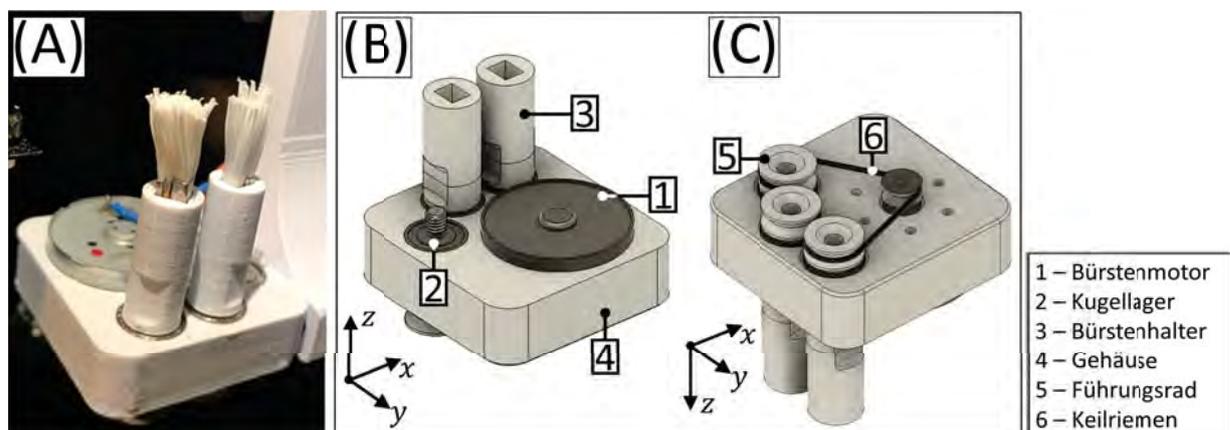


Abbildung F.46: Illustration vom gefertigten Düsenreiniger für FDM-Drucker mit (A) gefertigtem Düsenreiniger, (B) Bürstenseite (CAD-Modell), (C) Antriebsseite (CAD-Modell).

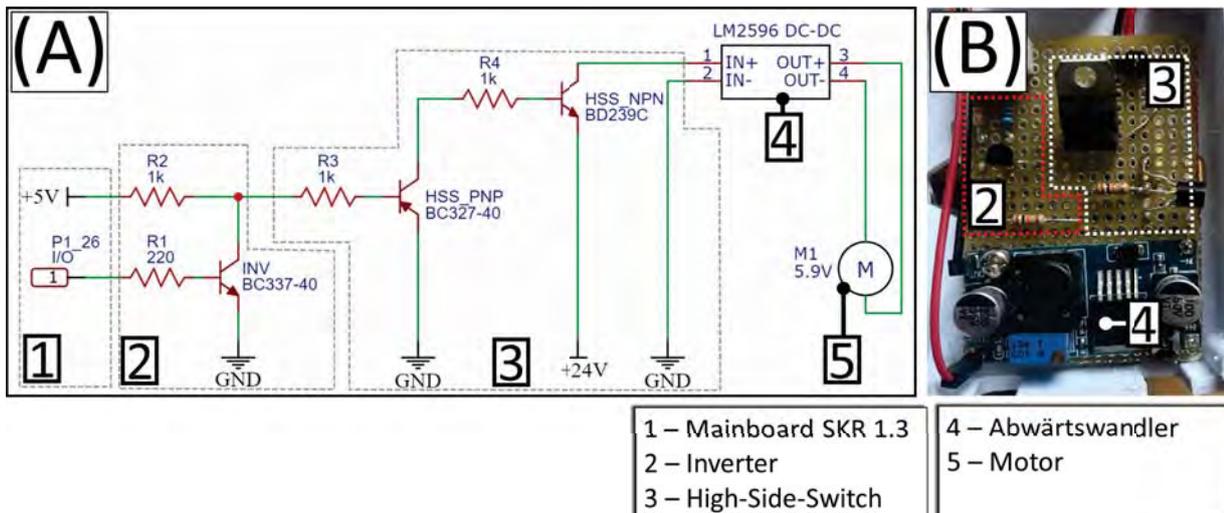


Abbildung F.47: Der 3D-Drucker-Hauptplatine vorgeschaltete elektrische Schaltung zur Ansteuerung der Reinigungsbürsten für den FDM-Drucker, mit (A) Schaltplan zur Ansteuerung, (B) angefertigte Schaltung.

Reinigungsvorgang geht davon aus, dass ein sich wiederholender, abstreifender Bewegungsablauf stattfindet, wobei die Düse über die Bürste gefahren wird. Die Position der Bürstenköpfe muss vorbestimmt werden, wobei in `#define NOZZLE_CLEAN_START_POINT { { XMin, YMin, ZMin } }` die Startposition und in `#define NOZZLE_CLEAN_END_POINT { { XMax, YMax, ZMax } }` die Endposition des Bewegungsablaufs angegeben werden. Da die Bürstenköpfe sich außerhalb des Druckbetts befinden, gehen diese über diese Dimension hinaus. Die Angabe erfolgt in Millimetern, wobei das Minimum angegeben wird als $X_{Min} = 225$ und das Maximum als $X_{Max} = 245$. Es soll eine Kollisionsvermeidung stattfinden, wie es in Abb. F.45 (B) illustriert wird. Hierfür wird für Z_{Max} und Z_{Min} die aktuelle vertikale Position der z-Höhe als Variable `current_position.z` zugewiesen. Zusätzlich soll die Düse gehoben werden, welches mit der Variable `NOZZLE_PARK_Z_RAISE_MIN` erfolgt.

Vor jedem Reinigungsvorgang wird die Rotation der Bürstenmotoren aktiviert durch das Kommando `M42 P126 S0`, wobei hierbei eine Adressierung des Pins erfolgt (`M42`), die Angabe des spezifischen Pins auf der Hauptplatine (`P126` für Endstop-Pin 1.26) und Zuweisung des Zustands (`S0` für Aktivierung und `S255` für Deaktivierung).

Seit der Version `Marlin 2.0.7.1` ist es notwendig `#define DIRECT_PIN_CONTROL` zu aktivieren, um eine direkte Adressierung der Pins freizuschalten. Zusätzlich kann der Status aller Pins abgerufen werden durch Eingabe von `M43` in der Konsole und Freischaltung von `#define PINS_DEBUGGING` in der Firmware. Zusätzlich ist es notwendig eine Baudrate von 115200 einzuhalten.

Ergebnis

In der Abb. F.48 (A) ist die Unterseite einer Düse gezeigt, wobei weiße Filamentreste vorhanden sind. Diese entstehen dadurch, dass während der Erwärmung bereits Filament in der Düse vorhanden ist, dieses geschmolzen wird und herausläuft. Da diese Filamentreste zu Fehlern beim Druck führen, sollte dieses stets entfernt werden. Eine manuelle Entfernung ist vor dem Druck möglich, jedoch nicht innerhalb des laufenden Druckprozesses.

Von der Seitenansicht der Abb. F.48 (C) ist zu erkennen, wie die Düse zu den Reinigungsbürsten gefahren wird. In Abb. F.48 (D) ist die Illustration der Reinigung zu sehen, wobei die Düse zwischen den beiden

Bürstenköpfen von links nach rechts abgestriffen wird ⁸⁰. Das Ergebnis dieses Vorgangs ist der Abb. F.48 (B) zu entnehmen. Dem ist zu entnehmen, dass speziell der Auslassbereich der Düse und Teile der Unterseite gereinigt wurden, jedoch nicht an den Rändern. Da diese für die Funktionsausübung des 3D-Drucks von wenig Bedeutung sind, wurde der Aufbau nicht weiter verändert.

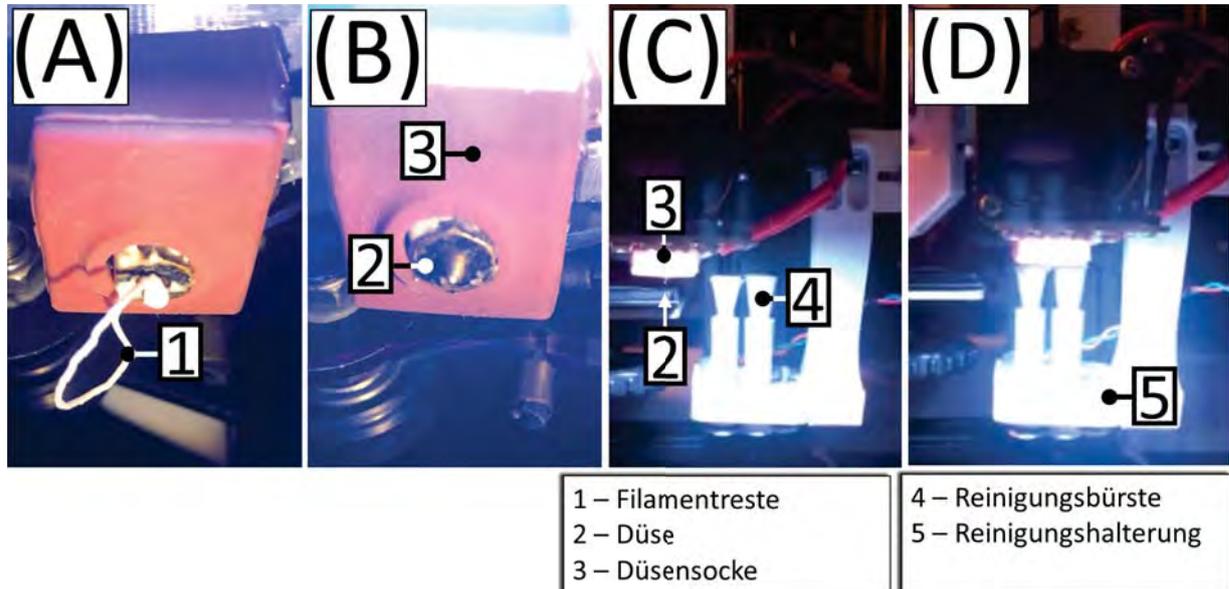


Abbildung F.48: Fotos vom Reinigungsvorgang am FDM-Drucker, (A) Düse mit Verunreinigung, (B), gereinigte Düse, (C) initiiertes Reinigungsvorgang, (D) Durchführung des Reinigungsvorgang.

⁸⁰Das Abstreifen der Düse wird mittels `#define NOZZLE_CLEAN_STROKES` gesteuert, wobei in dieser Arbeit ein Wert von 12 verwendet wurde, was einer sechsmaligen Links-Rechtsbewegung entspricht.

F.15 Konfigurationen

Jeder 3D-Drucker bedarf individueller Konfiguration. In diesem Abschnitt wird auf diese eingegangen.

Velocity, Acceleration, Jerk

Die gewählten Komponenten und die Bauweise haben Einfluss auf die Bewegungen, da diese einen spezifischen Impuls generieren. Der Gesamtimpuls ist hierbei abhängig von der Geschwindigkeit und der kinetischen Energie. Um dem entgegen zu wirken, verfügt die Firmware *Marlin* über die Einstellungen **Geschwindigkeit** (engl.: *Velocity* u.a. *Feedrate*), **Beschleunigung** (engl.: *Acceleration*) und **Stauchung** (engl.: *Jerk*). Mit Hilfe dieser Parameter werden die Bewegungen der Schrittmotoren der vier Achsen (X, Y, Z, E) justiert, welche unterschiedliche Aufgaben erfüllen müssen. Betrachtet man hierfür den kartesischen Bautypen dieser Arbeit, sind die auftretenden Belastungen auf die X-, und Z-Achse konstant (Abb.: F.49 (B)), wobei bei der Y-Achse das Druckbett bewegt werden muss und das zusätzliche, zunehmende Gewicht des Drucks aufaddiert wird. Die Betrachtung dieser Einstellung ist besonders für diese Arbeit relevant, weil im späteren Verlauf der X- und Y-Achse zusätzliche Apparaturen hinzugefügt wurden.

Zur Verdeutlichung der beschriebenen Einstellungen, sei auf den Graphen in Abb. F.49 (A) verwiesen, der den Bremsvorgang visualisiert. Die **Geschwindigkeit** (Abb.: F.49 (A, 6)) der Bewegungen im 3D-Drucker wird von der Kommandoingabe $M203$ ⁸¹ definiert, wobei eine Limitierung der maximalen Geschwindigkeit erfolgt und als Wert in *mm/s* angegeben wird.

Die **Beschleunigung** (Abb.: F.49 (A), 8) bezieht sich hierbei auf den Anstieg der Geschwindigkeitsänderung, unabhängig davon, ob diese negativ oder positiv sei. Dessen Kommandoingabe hierfür ist $M201$ ⁸². Um den plötzlichen Wechsel der beiden Zustände zu vermeiden, erfolgt über die Einstellung **Jerk** (Abb.: F.49 (A, 7)) die Möglichkeit eine graduelle Veränderung zu bewirken. Nach einem vollständigen Halt, wird mit diesem Wert die Momentangeschwindigkeit angegeben, zu welcher der Motor wieder seine Bewegung fortsetzen soll [54, S. 218]. Folglich erfolgt die Angabe des Wertes ebenfalls in *mm/s*. Die Eingabe dessen erfolgt über das Kommando $M205$ ⁸³. Seit der Einführung von *Marlin 2.0* wurde diese Einstellung jedoch von dem Parameter **Junction Deviation** ersetzt, welches im Gegensatz zu festen Werten eine dynamische Veränderung der Richtungsänderung erlaubt (Gl.: F.12).

$$Junction\ Deviation = 0,4 \left(\frac{Jerk^2}{Acceleration} \right) \quad (F.12)$$

Im Laufe dieser Arbeit sind viele Probleme mit diesem experimentellen Parameter aufgetreten und wurde deswegen nicht verwendet. Unter anderem wurden Ebenenverschiebungen (Abb.: F.49 (C)) und Stottern in zirkularen Bewegungsabläufen beobachtet [138], welche besonders relevant waren bei der Erstellung der Filamentkomposite. Hierbei stellte sich heraus, dass dieser Parameter nicht korrespondiert mit den verwendeten *TMC2208*- und *TMC2209*-Schrittmotortreibern, sowie der Verwendung von *Linear Advance*.

⁸¹Komplette Eingabe für Velocity: M201 X200 Y300 Z300 E25

⁸²Komplette Eingabe für Acceleration: M201 X1500 Y1500 Z100 E1000

⁸³Komplette Eingabe für Jerk: M205 X10 Y10 Z0.3 E10

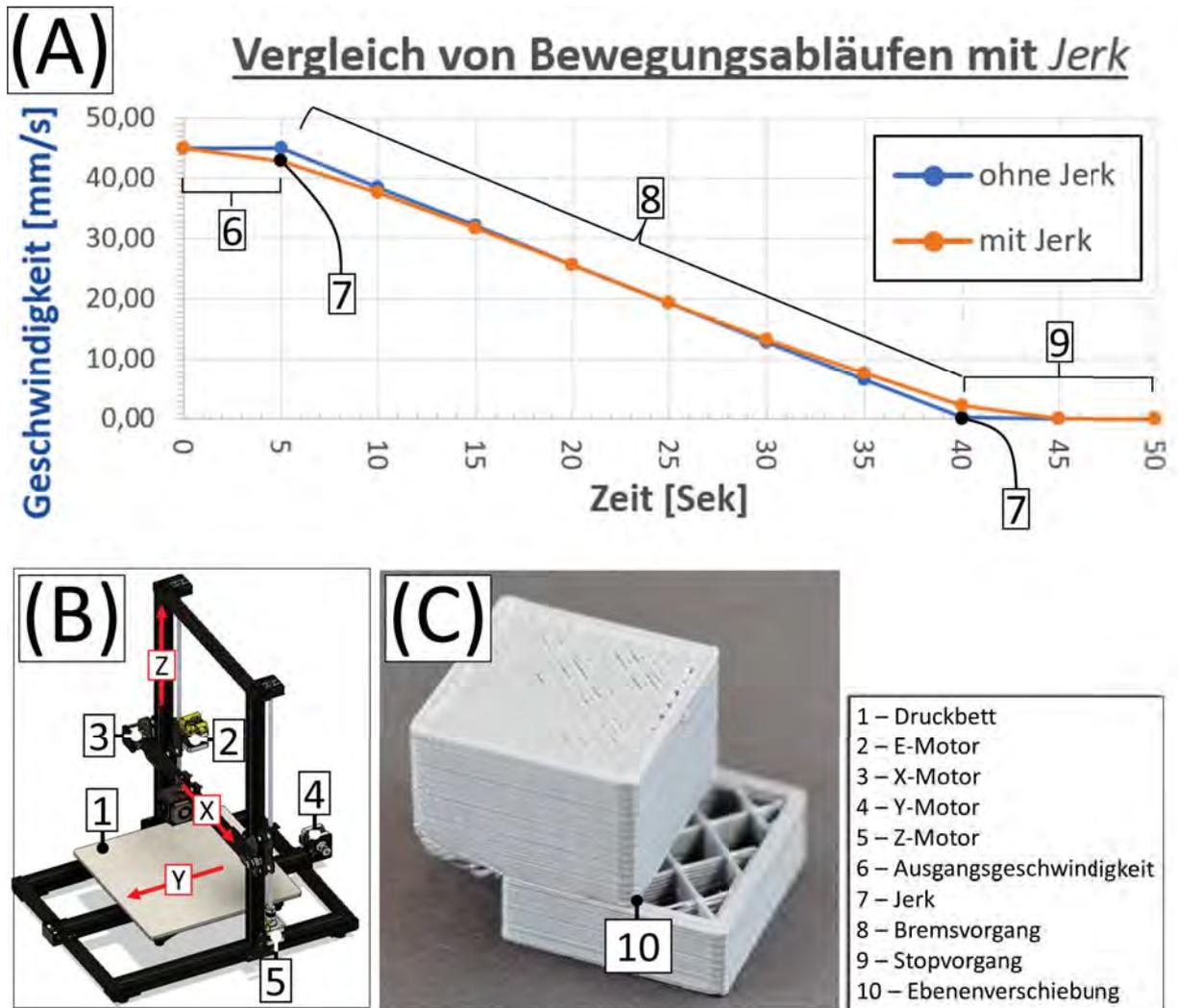


Abbildung F.49: (A) Vergleich der Bewegungsabläufe mit und ohne Jerk, (B) Verteilung der Bewegungsrichtungen in Abhängigkeit der Schrittmotoren am kartesischem 3D-Drucker, (C) Ebenenverschiebung anhand eines Testwürfels.

Die verwendeten Werte für den Versuchsaufbau sind der Tabelle 12 zu entnehmen. Diese Werte wurden entsprechend des erstellten Aufbaues des 3D-Druckers gewählt. Für die Y-Achse wurde das zusätzliche Gewicht berücksichtigt und eine verringerte Geschwindigkeit gewählt. Eine langsamere Bewegung war ebenfalls für die Z-Achse notwendig, weil mechanische Dämpfer hinzugefügt wurden und Oszillation vermieden werden sollte. Gleichzeitig sollte eine höhere Genauigkeit bei der Bettabtastung gewährleistet werden. Beim Extruder wurde der **Jerk** reduziert, weil speziell bei sehr kurzen Bewegungen Filamentlöcher entstanden sind.

Linear Advance

Der Extruder zählt zu den wichtigsten Bauteilen am 3D-Drucker. Er determiniert wie das Filament in das *Hotend* eingeführt, sowie ausgegeben wird und dadurch maßgeblich die Druckqualität bestimmt. Im Gegensatz zu der X-, Y- und Z-Achse werden vom Extruder jedoch keine linearen Bewegungen ausgeführt, weil dies bedingt ist durch die zähflüssige Viskosität des Filaments. Deutlich wird dies anhand von linearen Bewegungen, wobei zusätzliches Filament am Ende der Bewegung weiterhin extrudiert wird. Auswirkung

Tabelle 12: Verwendete Einstellungen in Marlin für Versuchsaufbau

Kategorie	Geschwindigkeit ^a (mm/s)	Beschleunigung ^b (mm/s)	Jerk ^c (mm/s)
Extruder	200	10000	5,0
X-Achse	300	1500	10,0
Y-Achse	200	1500	10,0
Z-Achse	300	100	0,3

^aM203

^bM201

^cM205

hat dies beispielsweise auf Ecken im Druck, wobei diese vom zusätzlichen Filament an Schärfe verlieren (engl.: *bleeding edges*) (Abb.: F.50 (C)) oder es kommt zu Nasenbildung. Dieser Effekt tritt besonders bei höheren Druckgeschwindigkeiten in Erscheinung und parallel problematisch. Dies ist besonders relevant für diese Arbeit, weil Filamente mit höherer thermischer Leitfähigkeit verwendet wurden (e.g. Eisenfilament, Kupferfilament), die eine Verstopfung durch *Heat Creep* (Kpt.: F.8) provozierten und deshalb rasch verarbeitet werden mussten. Um diesen Effekt zu kompensieren bedarf des Parameters *Linear Advance*⁸⁴. Diese Konfiguration berücksichtigt den Fluss des Filaments durch das Hotend und muss geräteabhängig individuell eingestellt werden. Hierfür wird von Marlin ein Testmuster angeboten, welches mittels eines Generators einen GCode erstellt [139] und anhand dessen dem Nutzer ermöglicht iterativ die besten Einstellungen für sein Gerät zu wählen. Zur Visualisierung des Vorgangs sei hierbei auf Abb. F.50 (A) verwiesen, welcher in zwei Segmente unterteilt wird. Zu Beginn und am Ende erfolgt eine langsame Bewegung des Extrudierens, welche die Ankunft und das Ende einer plötzlichen Richtungsänderung simulieren soll (Abb.: F.50 (A, 1, 6)). Der schnelle Bewegungsteil in der Mitte wird als Indikator verwendet, um das optimale Verhältnis vom extrudierenden Filament zu ermitteln. Zu Beginn wird hierbei ein plötzlicher Druck durch Extrudieren aufgebaut (Abb.: F.50 (A, 2)), das Filament über eine Strecke verteilt (Abb.: F.50 (A, 3)), um danach den Druck in der Düse wieder abzubauen (Abb.: F.50 (A, 4)). Ziel hierbei ist es, die Trägheit des Filaments zu ermitteln, während es von der Düse aufgetragen wird. Anhand der Abb. F.50 (B) ist das ausgeführte Testmuster dargestellt, welches zur Ermittlung des optimalen Verhältnisses für *Linear Advance* ist, wobei die zugehörigen k -Werte in der Skala mit angegeben wurden (Abb.: F.50 (B, 7)). Es werden mehrere aufeinanderfolgende Durchläufe durchgeführt, wobei der k -Wert variiert wird. Vergleicht man jedoch das Testmuster von Abb. F.50 (B), mit den Testmustern von Abb. F.50 (C), (D), (E), können Variationen in den Ergebnissen entstehen. So wird bei der Verwendung von *Linear Advance* davon ausgegangen, dass der Druckvorgang einheitlich mit der gleichen Geschwindigkeit stattfinden würde. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch bei der Fertigung darauf geachtet, dass die äußersten Wände des Drucks stets mit einer langsameren Geschwindigkeit gedruckt wurden, die 60%⁸⁵ des Solls entsprach. Das Testmuster in Abb. F.50 (B) wurde mit einer maximalen Druckgeschwindigkeit von 100 mm/s erstellt, wobei ein Wert von $k < 0,02$ verwendet werden müsste und *Linear Advance* dadurch keine Anwendung finden könnte. Zur vertiefenden Überprüfung wurde erneut ein Testmuster erstellt, wobei der k -Wert variiert wurde bei einer Druckgeschwindigkeit von 42 mm/s. Dargestellt in Abb. F.50 (C) mit $k = 0,09$ treten die beschriebenen ausbeulenden Ecken auf, bedingt durch übermäßiges Filament im Richtungswechsel. Gegenüberstellend dazu in Abb. F.50 (E) mit $k = 0,13$ erfolgt eine Abrundung der Ecken, da zu wenig Filament extrudiert wird. Das Optimum für diese Arbeit wurde somit bei $k = 0,11$ gewählt (Abb.: F.50 (D)) und wurde so im Verlauf dieser Arbeit angewandt.

⁸⁴Die Standardeinstellungen von *Marlin* sehen eine Nutzung dessen nicht voraus. Eine Freischaltung ist möglich durch entkommentieren von `\configuration_adv.h\#define LIN_ADVANCE\`

⁸⁵Standardgeschwindigkeit: 100% (70 mm/s); Außenwand: 60% (42 mm/s); Infill: 90% (63 mm/s); Support: 80% (56 mm/s);

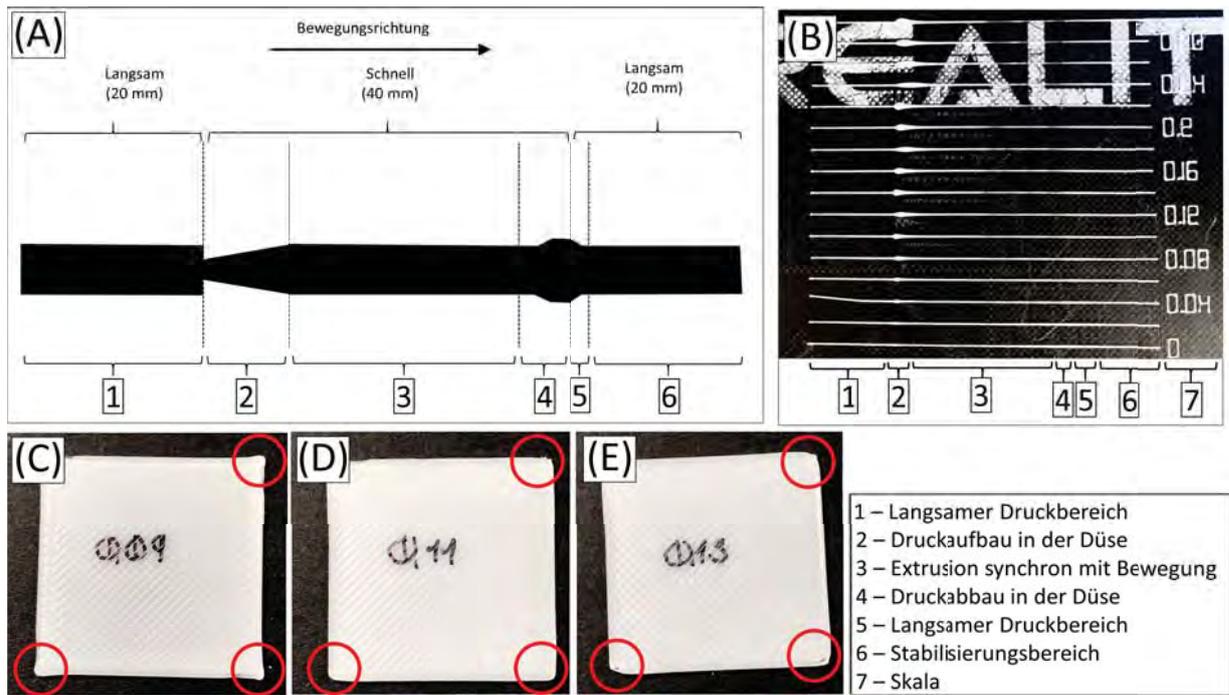


Abbildung F.50: Verwendung von *Linear Advance* für 3D-Drucker anhand von Testproben. (A) Schematischer Aufbau des Testmusters für *Linear Advance*, (B) gedrucktes Testmuster für *Linear Advance* bei einer maximalen Druckgeschwindigkeit von 100 mm/s, (C) Probe für *Linear Advance* mit bleeding edges ($k = 0,09$), (D) Optimum von *Linear Advance* ($k = 0,11$), (E) Probe für *Linear Advance* mit überausgeprägten Rundungen der Ecken ($k = 0,13$).

Die Anwendung von *Linear Advance* erfolgt durch Implementierung des Kommandos *M900 K0.11* zu Beginn des Quellcodes im GCode des Drucks. Die Verwendung dieser Einstellung setzt hierbei voraus, dass das verwendete System instande ist diese zusätzliche Information zu kommunizieren und zu verarbeiten. Zusätzlich setzt eine Anwendung voraus, dass alle Parameter des 3D-Druckers (e.g. *Extrusion Multiplier* (Kpt.: F.13), Beschleunigung, Geschwindigkeit, *Jerk* (Kpt.: F.15), Schrittmotorweite (Kpt.: F.11)) kalibriert sind und nicht mehr verändert werden dürfen.

Zusätzliche Konfigurationen

Simplify3D ermöglicht dem Anwender zu Beginn eines jeden Druckauftrags einführende Kommandos zu verankern, um vor dem Druck eine Routine durchzuführen. Hierfür wurde stets folgende Abfolge durchgeführt. Die Details des verwendeten Quellcodes sind dem Anhang F.16 zu entnehmen.

Nach der Durchführung dieser Routinen, beginnt der Druckvorgang.

G28 X Y Nullpunkt der X- und Y- Achse ermitteln durch Auslösen der Endstops.

G28 Z Mittels BLTouch (Kpt.: F.10) den Abstand zum Druckbett ermitteln und damit den Nullpunkt der Z-Achse.

G75 Druckauftragstimer starten, um den Füllstand des Filaments zu ermitteln (Kpt.: F.6).

M900 K0.11 Verwende *Linear Advance* mit der angegebenen Konstante (Kpt.: F.15).

G29 T Abtastung der Druckoberfläche und exportieren des Reliefs (Kpt.: F.10, Abb.: F.33).

G1 X10 E15 F600 Nullpunktsetzung des Extruders, in dem 15 mm Filament entladen werden.

F.16 Quellcode Marlin

Hier ist eine Zusammenfassung der angewandten Quellcode im Rahmen dieser Arbeit.

Startskript für GCodes

```
G28 X Y ; home axis X and Y
G1 Y100 F3600; move to Position Y center
G28 Z ;home axis Z
M75 ;start printer job timer for filament runout detection
M221 S100 ; justierter Wert vom Flow
M900 K0.08 ;linear Advance
M155 S30; BLTouch measurment
@BEDLEVELVISUALIZER
G29 T
M155 S3
G1 X220 Y0 Z5.0 F4000 ; move to cleaning position
M42 P126 S0 ;activate cleaning motor
G12 ;clean Nozzle
M42 P126 S255 ;deactivate cleaning motor
G1 X160 Y5 Z0.2 F3000 ; get ready to prime
G92 E0 ; reset extrusion distance
M106 ;activate filament fan full speed
G1 X10 E15 F600 ; prime nozzle
M107 ;deaktiviere filament fan
G1 X220 Y0 Z5.0 F4000 ; move to cleaning position
G92 E0
M42 P126 S0 ;activate cleaning motor
G12 ;clean Nozzle
M42 P126 S255 ;deactivate cleaning motor
```

Änderung am Quellcode in Marlin

configuration.h

```
// #define SHOW_BOOTSCREEN
#define SERIAL_PORT_2 -1
#define BAUDRATE 115200
#define MOTHERBOARD BOARD_BTT_SKR_V1_3
#define CUSTOM_MACHINE_NAME "Jans Ender 3 SKR v1.3"
#define TEMP_SENSOR_0 5
#define TEMP_SENSOR_BED 11
#define DEFAULT_Kp 20.09
#define DEFAULT_Ki 2.77
#define DEFAULT_Kd 36.38
#define PIDTEMPBED
#define DEFAULT_bedKp 82.34
#define DEFAULT_bedKi 14.90
```

```

#define DEFAULT_bedKd 303.30
#define X_DRIVER_TYPE TMC2209
#define Y_DRIVER_TYPE TMC2209
#define Z_DRIVER_TYPE TMC2209
#define E0_DRIVER_TYPE TMC2209
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { 160.1, 160.2, 1198.5, 200 }
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE { 300, 200, 5, 500 }
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION { 1500, 1000, 100, 10000 }
#define DEFAULT_ACCELERATION 1500 // X, Y, Z and E acceleration for printing moves
#define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 1500 // X, Y, Z acceleration for travel (non printing)
moves
#define CLASSIC_JERK
#define DEFAULT_XJERK 5.0
#define DEFAULT_YJERK 5.0
#define DEFAULT_EJERK 10.0 // May be used by Linear Advance
#define S_CURVE_ACCELERATION
#define BLTOUCH
#define NOZZLE_TO_PROBE_OFFSET { 5, 30, -1 }
#define Z_MIN_PROBE_REPEATABILITY_TEST
#define INVERT_X_DIR true
#define INVERT_E0_DIR true
#define X_BED_SIZE 220
#define Y_BED_SIZE 210
#define Z_MAX_POS 230
#define FILAMENT_RUNOUT_SENSOR
#define FILAMENT_RUNOUT_DISTANCE_MM 5
#define AUTO_BED_LEVELING_BILINEAR
#define RESTORE_LEVELING_AFTER_G28
#define GRID_MAX_POINTS_X 6
#define LCD_BED_LEVELING
#define Z_SAFE_HOMING
#define HOMING_FEEDRATE_Z (40*60)
#define EEPROM_SETTINGS // Persistent storage with M500 and M501
#define PREHEAT_1_TEMP_HOTEND 200
#define PREHEAT_1_TEMP_BED 60
#define PREHEAT_2_TEMP_BED 100
#define NOZZLE_PARK_FEATURE
#define NOZZLE_CLEAN_FEATURE
#define NOZZLE_CLEAN_START_POINT { { 234, 0, current_position.z + NOZZLE_PARK_Z_RAISE_MIN
} }
#define NOZZLE_CLEAN_END_POINT { { 254, 0, current_position.z + NOZZLE_PARK_Z_RAISE_MIN
} }
#define CR10_STOCKDISPLAY
#define NEOPIXEL_LED #if ENABLED(NEOPIXEL_LED)
#define NEOPIXEL_TYPE NEO_GRB // NEO_GRBW / NEO_GRB - four/three channel driver type
(defined in Adafruit_NeoPixel.h)

```

```
#define NEOPIXEL_PIN P0_00 // LED driving pin
#define NEOPIXEL_PIXELS 4
#define NEOPIXEL_BRIGHTNESS 255
#define NEOPIXEL_STARTUP_TEST
```

configuration_adv.h

```
#define E0_AUTO_FAN_PIN P2_04
#define BLTOUCH_DELAY 500
#define LED_CONTROL_MENU
#define LED_USER_PRESET_STARTUP
#define STATUS_HEAT_PERCENT
#define BABYSTEPPING
#define BABYSTEP_MULTIPLICATOR_Z 12
#define DOUBLECLICK_FOR_Z_BABYSTEPPING
#define BABYSTEP_ZPROBE_OFFSET
#define BABYSTEP_ZPROBE_GFX_OVERLAY
#define LIN_ADVANCE
#define LIN_ADVANCE_K 0.0
#define EXPERIMENTAL_SCURVE
#define MINIMUM_STEPPER_POST_DIR_DELAY 20
#define MINIMUM_STEPPER_PRE_DIR_DELAY 20
#define MINIMUM_STEPPER_PULSE 3
#define MAXIMUM_STEPPER_RATE 150000
#define ADVANCED_PAUSE_FEATURE
#define ADVANCED_PAUSE_PURGE_LENGTH 5
#define X_CURRENT 230
#define X_MICROSTEPS 32
#define Y_CURRENT 230
#define Y_MICROSTEPS 32
#define Z_CURRENT 300
#define E0_CURRENT 450
#define E0_MICROSTEPS 32
#define CHOPPER_TIMING CHOPPER_DEFAULT_24V
#define MONITOR_DRIVER_STATUS
#define TMC_DEBUG
// #define LASER_POWER_INLINE
#define DIRECT_PIN_CONTROL
#define PINS_DEBUGGING
```

platformio.ini

```
default_envs = LPC1768
```