

3D-DRUCK VON ISOLATOREN: HERSTELLUNG UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Masterarbeit

durchgeführt an der



Technischen Universität Graz
am



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement

Graz, im September 2022

Verfasser: Benjamin Roposch, BSc
Betreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler
Ass.Prof. Dr. Oliver Pischler
Begutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Benjamin Roposch, Graz, 05.09.2022

STATUTORY DECLARATION

I declare in lieu of an oath that I have written this paper independently, have not used any sources/aids other than those indicated, and that I have marked the passages taken from the sources used, both literally and in terms of content, as such. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master thesis.

Benjamin Roposch, Graz, 05.09.2022

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von 3D-Druckverfahren zur Herstellung von Isolatoren. Ziel ist die Fertigung und Untersuchung von 3D-gedruckten Isolator-Prüflingen mit Feldsteuerelementen. Im ersten Teil wurde untersucht, welche 3D-Druckverfahren sich am besten zur Herstellung von Isolatoren eignen, wobei die Wahl auf das MSLA-Druckverfahren fiel. Zur Realisierung einer feldsteuernden Wirkung bei Wechselfeldspannung wurde aufgrund der hohen Permittivität Bariumtitanat-Pulver als Zusatzstoff gewählt. Um entsprechende Feldsteuerelemente mit erhöhter Permittivität drucken zu können, wurde ein kommerziell verfügbarer MSLA-Drucker modifiziert, wobei die Beimengung von Füllstoffen im Vordergrund stand. Mit diesem 3D-Drucker wurden anschließend erfolgreich Plattenproben und Isolator-Prüflinge mit Feldsteuerelementen hergestellt, welche zuvor mit Hilfe von automatisierten FEM-Feldsimulationen dimensioniert wurden. Dielektrische Messungen und Durchschlagversuche zeigten, dass sich das entwickelte 3D-Druckverfahren zur Herstellung Isolatoren hoher Güte eignet. Die Untersuchungen bestätigten außerdem, dass der beigemengte Füllstoff zu keinen negativen Auswirkungen bezüglich der elektrischen Eigenschaften der Prüflinge führt.

Schlüsselwörter:

3D-Druck, Isolator, Feldsteuerung, TE-Messung, Durchschlagfestigkeit, Permittivität, FGM.

Abstract

This thesis deals with the use of 3D printing techniques for the manufacture of insulators. The aim is to manufacture and investigate 3D printed insulator test specimens with field grading elements. In the first part, it was investigated which 3D printing processes are best suited for the fabrication of insulators. Ultimately, the MSLA printing process was chosen. To realize a field grading effect at AC voltage, barium titanate powder was chosen as an additive due to its high permittivity. In order to print appropriate field control elements with increased permittivity, a commercially available MSLA printer was modified, focusing on the addition of fillers. This 3D printer was then used to successfully manufacture plate specimens and insulator test specimens with field control elements, which were previously designed using automated FEM field simulations. Dielectric measurements and breakdown tests showed that the developed 3D printing process is suitable for producing high quality insulators. The tests also confirmed that the added filler does not lead to any negative effects with regard to the electrical properties of the test specimens.

Keywords:

3D printing, insulator, field grading, PD measurement, breakdown, permittivity, FGM.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	3D-gedruckte Isolationskörper/stoffe	3
2.1	3D-gedruckte Isolatoren	3
2.2	3D-Druckverfahren	3
2.2.1	FDM (Fused Deposition Modeling)	3
2.2.2	SLS (Selective Laser Sintering)	6
2.2.3	SLA (Stereolithography) und MSLA (Masked Stereolithography).....	7
2.2.4	Vergleich SLA, SLS und FDM.....	11
2.3	Gewähltes Druckverfahren und Druckmaterial	13
2.3.1	Druckverfahren	13
2.3.2	Druckmaterial	14
2.3.3	FGM (Functionally Graded Material).....	15
3	Fertigung der Prüflinge	16
3.1	Vorversuche zu Material und Druckverhalten.....	16
3.1.1	Ermittlung der Eindringtiefe des UV-Lichtes	16
3.1.2	Ermittlung der Permittivität und des Verlustfaktors in Abhängigkeit des BaTiO ₃ -Anteils	17
3.1.3	Vorversuche mit dem SLA-Drucker am EMT	18
3.1.4	Anforderungen an das Drucksystem nach Vorversuchen.....	19
3.2	Aufbau eines für den FGM-Druck geeigneten Drucksystems	20
3.2.1	Gewähltes Drucksystem	20
3.2.2	Probleme beim Druck mit Füllstoff	21
3.2.3	Erweiterungen des Druckers.....	23
3.2.4	Gewählte Druckparameter	25
3.2.5	Nachbearbeitung der gedruckten Prüflinge	26
4	Prüflinge.....	28
4.1	Prüflingstypen.....	28
4.2	Plattenproben	28
4.3	Kegelstümpfe.....	30
4.4	Kegelstümpfe mit Feldsteuerelement	31
4.4.1	FEM (Finite Elemente Methode) Simulation	31
4.4.2	Minimale Feldstärke bei gegebener Schichthöhe	33

4.4.3	Minimale Feldstärke bei gegebener Permittivität	34
5	Eingesetzte Messverfahren	36
5.1	Ziele der Messungen	36
5.2	Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften	36
5.2.1	Permittivität	36
5.2.2	Verlustfaktor	38
5.3	Teilentladungsmessung	39
5.4	Durchschlagfestigkeit	40
5.4.1	Durchschlagspannung	40
5.4.2	Überschlagspannung	42
6	Ergebnisse der Messungen an Scheibenproben	43
6.1	Übersicht der durchgeführten Messungen an Scheibenproben	43
6.2	Ergebnisse der dielektrischen Untersuchungen an Scheiben	43
6.2.1	Randbedingungen	43
6.2.2	Abhängigkeit der Permittivität und des Verlustfaktors vom BaTiO ₃ -Anteil	43
6.2.3	Frequenzabhängigkeit von Permittivität und Verlustfaktors	45
6.2.4	Zusammenfassung	46
6.3	Ergebnisse Durchschlagspannungsversuche an Scheiben	46
6.3.1	Ergebnisse Durchschlagspannung in Öl	46
6.3.2	Zusammenfassung	47
7	Ergebnisse der Messungen an Kegelstumpfproben	48
7.1	Übersicht der durchgeführten Messungen an Kegelstumpfproben	48
7.2	Ergebnisse dielektrische Untersuchungen an Kegelstümpfen	48
7.2.1	Randbedingungen	48
7.2.2	Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors	48
7.2.3	Zusammenfassung	49
7.3	Ergebnisse TE-Messung	50
7.3.1	Randbedingungen	50
7.3.2	Kegelstumpf Typ 1 unter Stickstoff	50
7.3.3	TE-Messungen an Kegelstümpfen in Luft	51
7.3.4	Zusammenfassung	52
7.4	Ergebnisse Überschlagspannungsversuche an Kegelstümpfen	53

7.4.1	Allgemeines zur Messung	53
7.4.2	Ergebnisse Überschlagversuche in Stickstoff	53
7.4.3	Ergebnisse Überschlagversuche in Luft	53
7.4.4	Zusammenfassung	54
8	Ausblick	55
8.1	Weitere mögliche Untersuchungen:	55
8.2	Erweiterung des Drucksystems	55
9	Zusammenfassung	56
10	Literaturverzeichnis.....	58
11	Abbildungsverzeichnis	60
	Tabellenverzeichnis	63
	Anhang	64
Anhang A:	Auflistung hergestellter Prüflinge	65
Anhang B:	Datenblätter	67
Anhang C:	Tabellen Messergebnisse	72
Anhang D:	3D- Drucker an der TU Graz.....	74

1 Einleitung

In der Elektrotechnik und dabei insbesondere in der Energietechnik besteht häufig der Bedarf, spannungsführende Teile mechanisch zu fixieren und sie von anderen Elementen zu separieren, ohne dabei eine ungewollte elektrische Verbindung herzustellen. Hierzu kommen sogenannte Isolatoren zum Einsatz. In der Energietechnik finden Isolatoren beispielsweise vielfältigen Einsatz auf Freileitungen oder in Umspannwerken. Aufgrund ihrer Wichtigkeit und Anwendung in großen Stückzahlen sind Isolatoren hinsichtlich ihrer Bauform standardisiert, wobei auch nur einige wenige Technologien zu unterscheiden sind. Die Herstellung erfolgt daher im industriellen Maßstab, wobei eine steigende Abwanderung der entsprechenden Produktionsstätten in Niedriglohnländer zu beobachten ist. Diese Entwicklung hat in der jüngeren Vergangenheit jedoch zu einer zunehmenden Stagnation des technologischen Fortschritts geführt. Die wenig flexiblen Produktionsprozesse erschweren zusätzlich die Herstellung von Prototypen und von Isolatoren für Spezialanwendungen, wie sie beispielsweise für innovative Applikationen im Bereich der Erschließung erneuerbarer Energieträger benötigt werden.

In diesem Spannungsfeld soll die gegenständliche Masterarbeit dazu beitragen, die technologische Lücke, welche in Bezug auf Isolatoren zwischen der Herstellung von etablierten Standardkomponenten einerseits und maßgeschneiderten Spezialbauteilen andererseits besteht, zu schließen. Aufgrund ihrer Schnelligkeit, Flexibilität, wirtschaftlichen Vorteile und Anwenderfreundlichkeit sind 3D-Druck-Verfahren in diesem Zusammenhang von besonderem Interesse.

Der erste Teil der Arbeit widmet sich dem Vergleich, welche der etablierten 3D-Druck-Verfahren am besten für die Fertigung elektrischer Isolatoren geeignet sind. Der Fokus liegt hierbei auf der Herstellung von Spezialisolatoren in Kleinserie, welche später beispielsweise Anwendung in leistungselektronischen Baugruppen, Windkraftanlagen oder Photovoltaik-Parks finden sollen.

Da keines der aktuellen verfügbaren Drucksysteme die notwendigen Anforderungen vollumfänglich erfüllen konnte, erfolgte die Modifikation eines kommerziell erhältlichen MSLA-Druckers, womit insbesondere die Verarbeitung von mit Füllstoff versetzten Harzen ermöglicht werden sollte. Mit diesem Drucker wurden zur grundlegenden Charakterisierung der verfügbaren Werkstoffe und des entwickelten Verfahrens Plattenprüflinge hergestellt, an denen dielektrische Messungen und Durchschlagversuche durchgeführt wurden. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde anschließend untersucht, ob die technologischen Eigenschaften gedruckter Isolatoren durch Beimengung sogenannter Nano-Füllstoffe, wie beispielsweise Bariumtitanat, die auch schon in anderen Bereichen der Elektrotechnik zum Einsatz kommen, verbessert werden können. Die Realisierbarkeit und Wirksamkeit einer feldsteuernden Bariumtitanat-Harz-Schicht wurde mithilfe unterschiedlicher Isolator-Probekörper experimentell untersucht. Eine solche materialtechnische

Optimierung dient als weiteres Alleinstellungsmerkmal des 3D-Drucks von Isolatoren, wodurch sich dieser noch deutlicher von traditionellen und starren Methoden der Fertigung abheben soll.

Zusammenfassend soll diese Masterarbeit die Voraussetzungen dazu schaffen, für die Energietechnik dringend benötigte Spezialisolatoren, die hohen technologischen Ansprüchen genügen, mithilfe eines zukunftssträchtigen und flexiblen 3D-Druck-Fertigungsverfahrens herstellen zu können.

2 3D-gedruckte Isolationskörper/stoffe

2.1 3D-gedruckte Isolatoren

Die 3D-Drucktechnik ist aufgrund ihrer hohen Flexibilität sehr gut für die Fertigung von Isolatoren für Spezialanwendungen geeignet. Um mit den klassischen Herstellungsprozessen Isolatoren für Spezialanwendungen zu fertigen, ist die Herstellung eigens dafür entwickelter Gussformen oder Werkzeuge notwendig. Dies macht die Produktion von kleinen Stückzahlen sehr aufwendig und teuer. Mit der 3D-Drucktechnik könnten solche Spezialisolatoren jedoch schnell und vergleichsweise kostengünstig gefertigt werden. Für die Fertigung von Prototypen ist der 3D-Druck auch wegen der kurzen Iterationszeiten von Vorteil. Änderungen an der Geometrie lassen sich schneller umsetzen als bei anderen Verfahren.

2.2 3D-Druckverfahren

2.2.1 FDM (Fused Deposition Modeling)

Beim FDM-Druckverfahren (Fused Deposition Modeling) wird Kunststoff, meist als Faden mit 1,75 mm Durchmesser, welcher als Filament bezeichnet wird, oder auch in Form von Kunststoffpellets als Ausgangsmaterial verwendet. Es ist eine große Anzahl von Thermoplasten einsetzbar. Die Drucktemperatur der am häufigsten verwendeten Materialien liegt zwischen 180 und 250 °C. Das Filament wird in einem Extruder geschmolzen und in Bahnen Schicht für Schicht auf dem Druckbett aufgebracht. Dazu wird je nach Drucker entweder der Extruder oder die Plattform entsprechend bewegt. Das Funktionsprinzip eines häufig verwendeten Aufbaus ist aus Bild 2.1 ersichtlich. Die maximale Druckgeschwindigkeit hängt hierbei hauptsächlich von den maximalen Beschleunigungen der Achsen (mit entsprechender Genauigkeit) ab. Die Zeit, welche eine gedruckte Schicht zum Abkühlen benötigt, bevor die nächste darüber gedruckt werden kann, wirkt sich speziell bei kleinen Teilen ebenfalls auf die Druckgeschwindigkeit aus. FDM-Drucker sind auch mit mehreren Extrudern erhältlich, was z. B. das gleichzeitige Drucken von mehreren Materialien unterschiedlicher Eigenschaften ermöglicht.

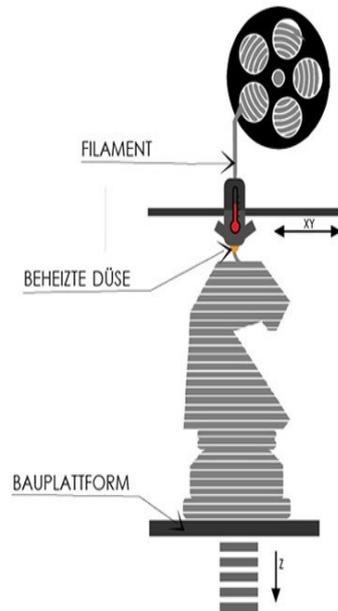


Bild 2.1: Prinzip FDM-Druck [1]

Prinzipbedingt ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Vor- und Nachteile, wobei für eine detaillierte Betrachtung auf [2, 3] verwiesen wird.

Vorteile:

Verfügbarkeit, Schnelligkeit, unterschiedliche Materialien, sequenzieller Druck mehrerer Objekte, gleichzeitiges Drucken mehrerer Materialien möglich.

Nachteile:

Lufteinschlüsse, Stützstrukturen notwendig, raue Oberfläche, geringe Wärmeformbeständigkeit, geringe Auflösung, hohe Temperaturen bei Druckvorgang (eventuell Brandgefahr), material- und temperaturabhängige Belastung durch austretende Dämpfe während des Druckvorgangs, geschichteter Aufbau.

Eignung zum Druck von FGM-Isolatoren:

Da es mit dem FDM-Druckverfahren möglich ist, mit mehreren Materialien gleichzeitig zu drucken, ergeben sich Möglichkeiten, FGM-Isolatoren herzustellen. Mit dem Standard-Druckverfahren können Objekte bestehend aus Bereichen unterschiedlicher Materialien hergestellt werden. Ein kontinuierlicher Verlauf ist nicht möglich.

Beispiele für FDM-Isolatoren aus verschiedenen Publikationen:

In Bild 2.2 ist ein FGM-Isolator abgebildet, welcher mit dem FDM-Verfahren hergestellt wurde. Hier wurde im blauen Bereich ein ABS-Filament mit einem Volumenanteil von 27 % Bariumtitanat (BaTiO_3) verwendet. Die relative Permittivität dieses Materials beträgt $\epsilon_r = 7$.

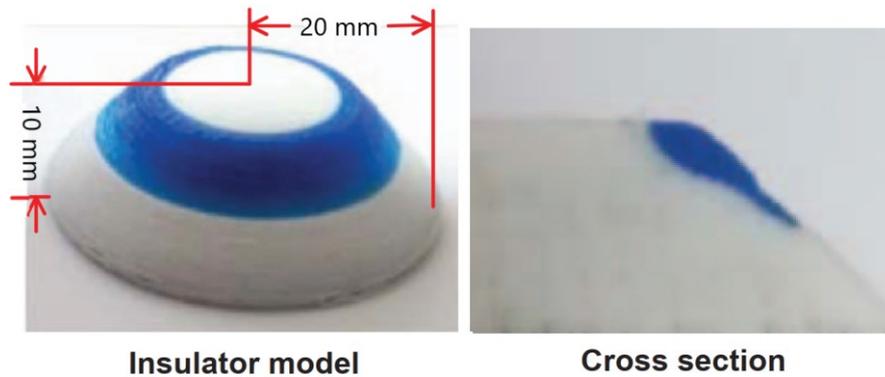


Bild 2.2: FDM-Isolator mit BaTiO₃ [4]

Der Aufbau eines Isolators, bei welchem im oberen Bereich (türkis) eine Zone mit einem Material höherer Leitfähigkeit gedruckt wurde, ist in Bild 2.3 dargestellt. Dadurch kann, wie in Bild 2.4 ersichtlich ist, die Feldstärkeverteilung entlang der Oberfläche gleichmäßiger verteilt werden [5].

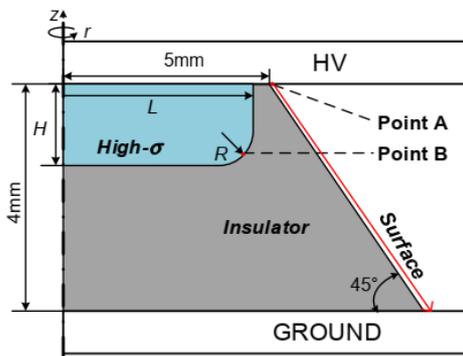


Bild 2.3: Aufbau FDM-Prüfling [5]

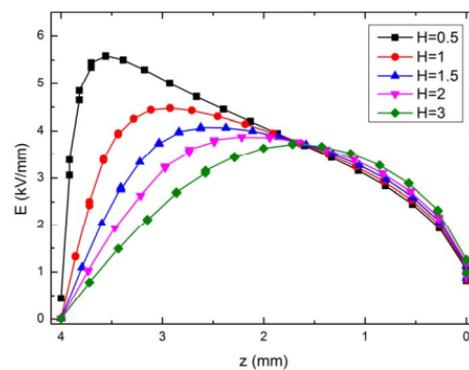


Bild 2.4: Feldstärkeverteilung in Abhängigkeit der Schichtdicke [5]

Mit dem in Bild 2.5 vorgestellten AM-FDM (Active Mixing-FDM) Verfahren wäre es möglich, auch Isolatoren mit sich kontinuierlich ändernden Materialeigenschaften herzustellen, allerdings ist dieses Verfahren noch in der Entwicklungsphase. Beim AM-FDM Verfahren gibt es dieselben Nachteile wie beim FDM-Verfahren mit Lufteinschlüssen, niedriger Wärmeformbeständigkeit und der Richtungsabhängigkeit der Durchschlagfestigkeit.

Prüfobjekte, welche mit dem AM-FDM (Active Mixing-FDM) Verfahren hergestellt wurden, sind in Bild 2.6 dargestellt. Dabei diente PLA als Grundmaterial. Mit Hilfe des in Bild 2.5 schematisierten Druckverfahrens wurde der Anteil von keramischen Zusätzen wie Al₂O₃, TiO₂, BaTiO₃ oder SrBaTiO₃ und damit die Permittivität in diesen Bereichen verändert.

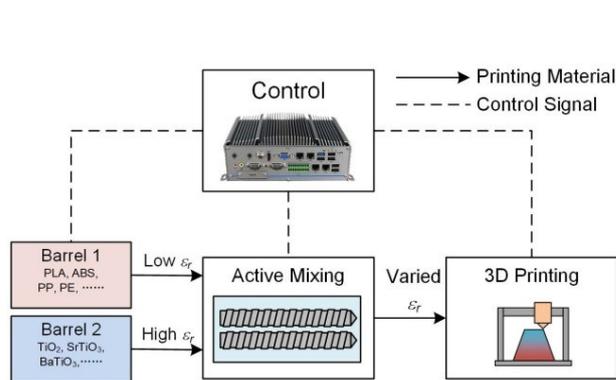


Bild 2.5: Übersicht AM-FDM [6]

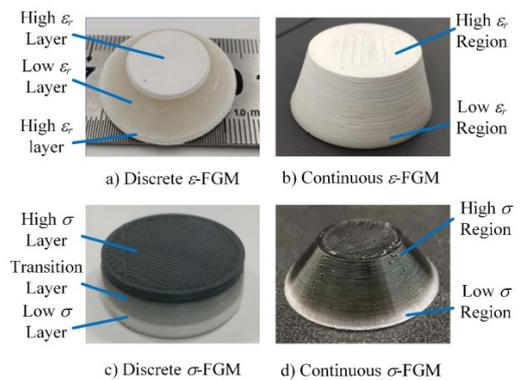


Bild 2.6: Prüflinge AM-FDM [6]

2.2.2 SLS (Selective Laser Sintering)

Bei der SLS (Selective Laser Sintering)-Drucktechnologie dient ein Kunststoffpulver als Ausgangsmaterial. Dieses wird in einer dünnen Schicht auf die Bauplattform aufgebracht und anschließend mit einem über Spiegel gesteuerten Laserstrahl an den gewünschten Punkten aufgeschmolzen. Im nächsten Schritt wird erneut eine dünne Pulverschicht aufgebracht und der Druck so Schicht für Schicht aufgebaut. Bei diesem Druckverfahren kann der Druckraum am besten ausgenutzt werden, da keine Stützstrukturen benötigt werden und auch mehrere Teile übereinander gedruckt werden können. Nach dem Druckvorgang wird das überflüssige Pulver gesiebt, gereinigt und wiederverwendet. Das Funktionsprinzip des SLS-Druckverfahrens ist in Bild 2.7 dargestellt.

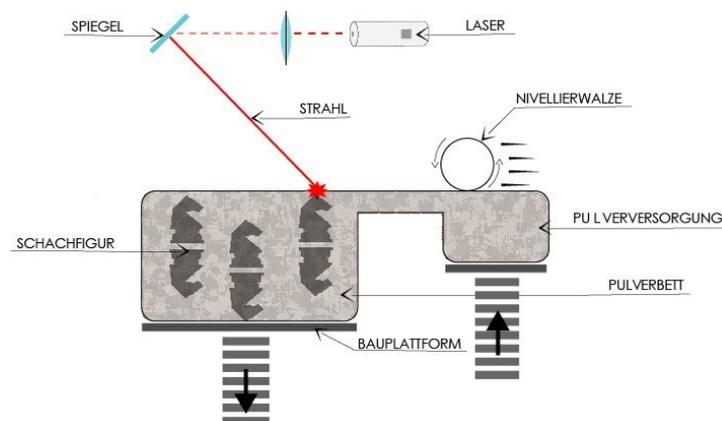


Bild 2.7: Funktionsprinzip SLS [7]

Vorteile:

Präzise Druckergebnisse, hohe Detailgenauigkeit, keine Chemikalien, keine Stützstrukturen notwendig.

Nachteile:

Drucker sehr teuer, Lufteinschlüsse, raue Oberfläche, Entfernen des überschüssigen Pulvers nötig, Sicherheitsmaßnahmen gegen Feinstaub, Filterung und Aufbereitung der Pulverreste zur Wiederverwendung notwendig.

Eignung zum Druck von FGM-Isolatoren

Für den Druck von FGM-Isolatoren ist das SLS-Verfahren nicht geeignet. Dem pulverförmigen Ausgangsmaterial müssten abhängig von den Anforderungen an die jeweilige Schicht Zusätze beigemischt werden, um die elektrischen Eigenschaften zu verändern. Durch den schichtweisen Auftrag mischt sich die neue Pulverschicht mit den zuvor aufgetragenen. Dadurch würden sich unkontrollierte Mischungen von Grundmaterial und Zusatz innerhalb einer Schicht ergeben. Ein weiteres Problem würde sich bei dieser Technologie üblichen Recycling des nicht aufgeschmolzenen Pulvers ergeben, da dieses nun sowohl den Ausgangskunststoff wie auch den Zusatz enthält und eine Trennung kaum möglich ist.

2.2.3 SLA (Stereolithography) und MSLA (Masked Stereolithography)

Da sich die SLA und MSLA nur geringfügig voneinander unterscheiden, werden sie hier zusammen behandelt.

A) SLA

Beim SLA-Druckverfahren wird eine Bauplattform in ein Becken mit flüssigem, unter UV-Licht aushärtendem Polymer getaucht (Bild 2.8). Den Boden des Beckens bildet eine spezielle UV-lichtdurchlässige Folie aus Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer (FEP). Unter dem Beckenboden befindet sich ein beweglicher Spiegel, über welchen ein Laserstrahl gesteuert wird. An jenen Stellen, wo das UV-Laserlicht auf die flüssige Polymerschicht zwischen Bauplattform und FEP-Folie trifft, härtet das Polymer aus. Wenn eine Schicht fertig gedruckt ist, wird die Bauplattform um einige Millimeter angehoben, damit sich das verfestigte Polymer von der Folie löst. Anschließend wird die Bauplattform wieder nach unten gefahren, bis nur noch ein Spalt in der Größe der gewünschten Schichtdicke zwischen angefangenem Druck und der Folie verbleibt. Der Vorgang wiederholt sich Schicht für Schicht, bis der 3D-Körper vollständig gedruckt ist.

Die Zeit, welche zum Druck einer Schicht benötigt wird, ist hierbei auch davon abhängig, wie groß die in dieser Schicht zu druckende Fläche ist, da der Laserstrahl nur die zu druckenden Bereiche abfährt.

Die Nachbearbeitung bei diesem Verfahren ist vergleichsweise aufwendig, da flüssige Polymerreste von der Objektoberfläche entfernt werden müssen (meist mit Isopropanol). Anschließend muss das Druckobjekt noch unter UV-Licht fertig ausgehärtet und von nicht mehr benötigten Stützstrukturen befreit werden.

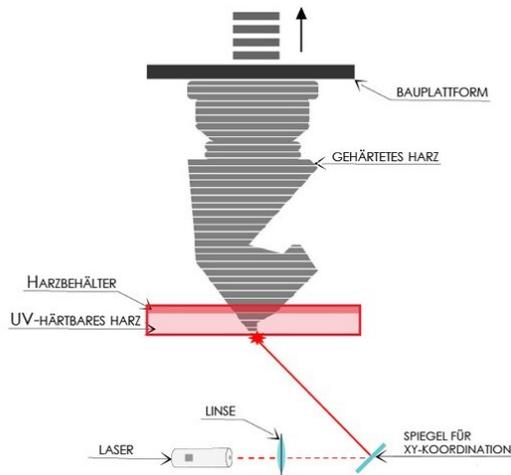


Bild 2.8: Prinzip SLA-Druck [1]

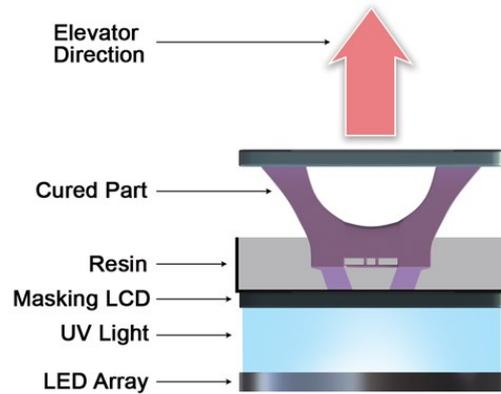


Bild 2.9: Prinzip MSLA-Druckverfahren [8]

B) MSLA

Das MSLA-Verfahren, welches häufig auch als DLP- (Digital Light Processing) Verfahren bezeichnet wird, funktioniert ähnlich wie das SLA-Verfahren. Der zentrale Unterschied ist, dass hier als UV-Lichtquelle kein Laser, sondern LEDs verwendet werden. Die Belichtung wird über ein LCD (Liquid Crystal Display) gesteuert, welches sich direkt unter der FEP-Folie, welche den Boden des Beckens bildet, befindet (Bild 2.9). Durch die Belichtung durch das LCD kann immer eine Schicht auf einmal belichtet werden und muss nicht sukzessive mit einem Laserstrahl abgefahren werden. Daher ist bei diesem Druckverfahren die Druckzeit pro Schicht konstant. Durch den einfacheren Aufbau dieser Drucker sind diese im Vergleich zu SLA-Druckern, welche auf der exakten Steuerung eines Laserstrahls basieren, kostengünstiger. Die Bezeichnung DLP ist auf die Anfangszeit dieser Technologie zurückzuführen, als mit UV-Lampen umgebaute DLP-Projektoren zur Belichtung benutzt wurden. DLP steht hierbei für Digital Light Processing und ist eine vom Unternehmen Texas Instruments registrierte Projektionstechnik.

Vorteile:

Glatte Oberfläche im Vergleich zu den anderen vorgestellten Druckverfahren, keine Lufteinschlüsse, Materialien mit hoher Wärmeformbeständigkeit verwendbar, hohe Auflösung.

Nachteile:

Drucknachbearbeitung aufwendiger, da flüssige Polymerreste entfernt werden müssen, fertig aushärten unter UV-Licht notwendig, Stützstrukturen notwendig, Umgang mit reizenden Flüssigkeiten (flüssiges Polymer, Isopropanol), Entflammbarkeit Isopropanol, eventuell Dämpfe (Geruch) bei Druckvorgang, richtiger Umgang mit Chemikalien (Schutzausrüstung).

Eignung zum Druck von FGM-Isolatoren:

Die SLA- und MSLA-Druckverfahren eignen sich besonders gut zum Druck von Isolatoren, da bei diesen Verfahren im Vergleich zu den anderen verfügbaren Technologien keine prinzipbedingten Lufteinschlüsse auftreten. Die Materialeigenschaften der gedruckten Teile weisen nur eine geringe Abhängigkeit der Druckrichtung auf [9]. Des Weiteren sind Materialien verfügbar, welche eine sehr gute Wärmeformbeständigkeit aufweisen. Zum Druck von FGM-Isolatoren gibt es auf dem Markt derzeit noch keine fertig verfügbaren Lösungen, sondern nur verschiedene Prototypen. Technologiebedingt können durch den schichtweisen Aufbau keine Objekte mit kontinuierlich verlaufenden Materialeigenschaften hergestellt werden. Auch ist es mit dieser Technologie nicht möglich, die Materialeigenschaften innerhalb einer Schicht zu variieren.

Beispiele für SLA-Isolatoren aus verschiedenen Publikationen:

Ein SLA-Drucksystem, mit welchem es möglich ist, Prüfkörper aus Schichten unterschiedlicher Permittivität oder Leitfähigkeit herzustellen, ist in Bild 2.10 abgebildet. Dazu wird während des Druckvorganges das Mischungsverhältnis zweier Polymere, unterschiedlicher Permittivität oder Leitfähigkeit verändert. Im rechten Teil der Abbildung ist ein mit Hilfe dieses Verfahrens hergestellter Prüfkörper bestehend aus zwei Schichten dargestellt.

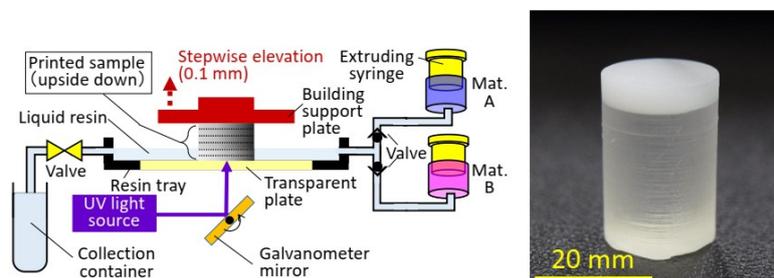


Bild 2.10: Drucksystem und Probekörper aus [10]

Ein mit dem SLA-Verfahren direkt auf ein Metallrohr gedruckter Isolator ist in Bild 2.11 abgebildet. Der Druck wurde durch einen speziell umgebauten Drucker ermöglicht. Dazu wurde das Rohr an einer höhenverstellbaren Drehvorrichtung über dem Polymertank befestigt [11].

In Bild 2.12 ist ein SLA-Druckverfahren dargestellt mit welchem Prüfkörper, welche als Vakuumisolatoren zum Einsatz kommen sollen, hergestellt wurden. Hierbei taucht das Druckobjekt im Vergleich zu den meisten anderen SLA-Druckverfahren schrittweise in einem Polymerbad unter und die oberste Schicht wird durch einen Laserstrahl ausgehärtet. Beispiele vom Aufbau von Isolatoren, die mit diesem Verfahren hergestellt wurden, sind in Bild 2.13 abgebildet.

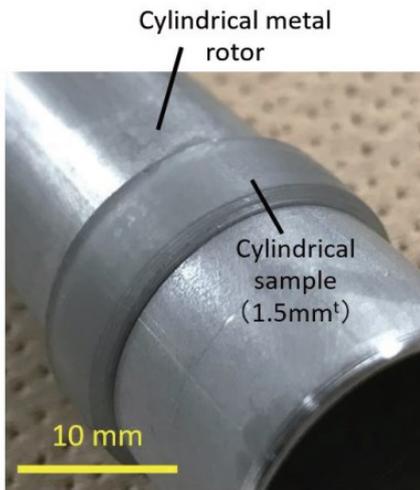


Bild 2.11: Druck auf Rohr mit Spezialdrucker [11]

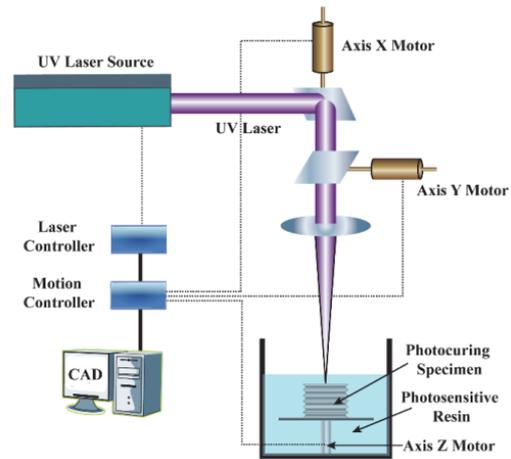


Bild 2.12: SLA-Drucksystem, Druck Vakuumisolator [12]

SEM(Scanning Electron Microscope)-Aufnahmen des Querschnittes von mit SLA-Technik erzeugten Probekörpern sind in Bild 2.14 zu sehen. Dem flüssigen Polymer wurden zur Erhöhung der Permittivität Al_2O_3 , SrTiO_3 und BaTiO_3 Pulver verschiedener Korngrößen und Verhältnisse (AL_L_20 steht hierbei für eine Beimischung von 20 Volumenprozent Al_2O_3 , L bedeutet große Partikel) beigemischt.

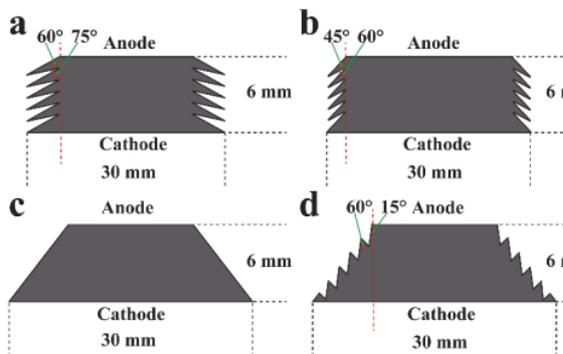


Bild 2.13: Aufbau verschiedener Vakuumisolatoren [12]

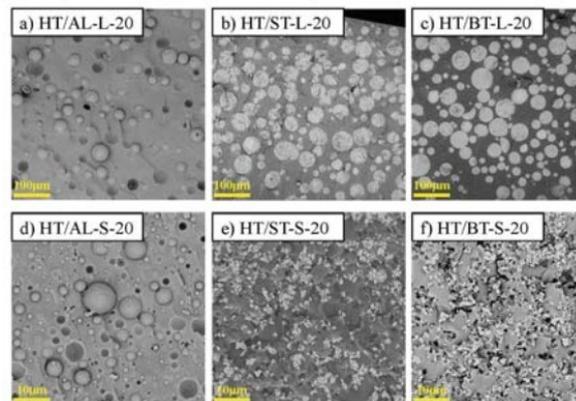


Bild 2.14: SEM-Aufnahmen von Harz-Füllstoff-Mischungen unterschiedlicher Körnung [13]

Bild 2.15 zeigt das Ergebnis von Durchschlagspannungsversuchen dieser Prüfkörper bei verschiedenen Anteilen des jeweiligen Keramikpulvers. Auffällig ist hierbei, dass die Durchschlagfestigkeit aller Proben mit steigendem Füllstoffgehalt abnimmt.

Die Abhängigkeit der Permittivität vom Mischungsverhältnis des jeweiligen Keramikpulvers und Polymers zeigt Bild 2.16. Wie zu erkennen ist, steigt die Permittivität mit zunehmendem Füllstoffanteil. Es zeigt sich, dass Al_2O_3 als Füllstoff die mit Abstand geringste Erhöhung der Permittivität verursacht.

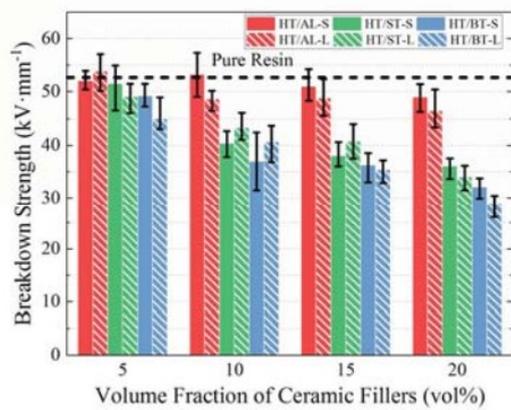


Bild 2.15: Durchschlagfeldstärke verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13]

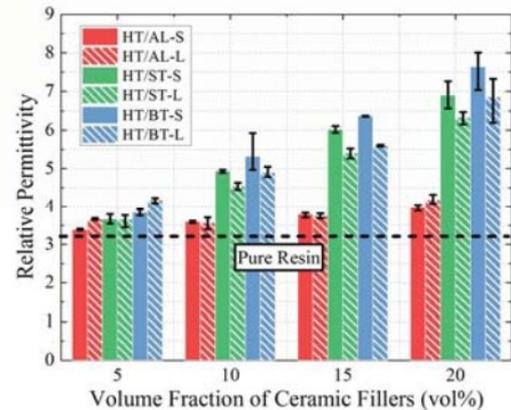


Bild 2.16: Permittivität verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13]

Der Füllstoff beeinflusst auch die dielektrischen Verluste. In Bild 2.17 wird die Abhängigkeit des Verlustfaktors vom Mischungsverhältnis des jeweiligen Keramikpulvers und Polymers gezeigt.

Die Viskosität des Polymer-Keramikpulver-Gemisches in Abhängigkeit des Anteils des Keramikpulvers ist in Bild 2.18 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Viskosität ab ca. 20 % Keramikpulver sehr stark ansteigt, was ein Drucken dieser höheren Konzentrationen erheblich erschwert.

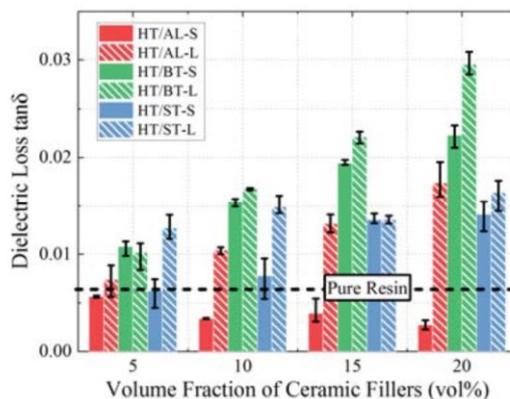


Bild 2.17: Verlustfaktor verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13]

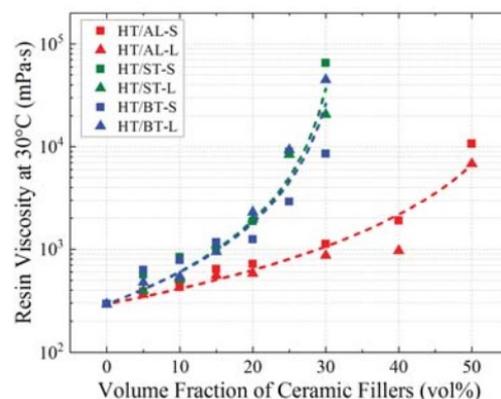


Bild 2.18: Viskosität verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13]

2.2.4 Vergleich SLA, SLS und FDM

In Bild 2.19 sind Querschnitte von Prüfkörpern mit dem SLA- (High Temp), FDM- (PLA und ABS) sowie SLS- Druckverfahren (PA2200) hergestellter Prüfkörper abgebildet. Der Schnitt wurde hierbei senkrecht zur Druckplattform durchgeführt. Bei den Aufnahmen des FDM-Drucks sind die entstandenen Hohlräume deutlich wahrzunehmen. Beim SLS-Druck ist zu

erkennen, dass die Schnittfläche in XZ-Richtung ungleichmäßig ist. Bei der mit dem SLA-Verfahren hergestellten Probe sind keine Einschlüsse sichtbar.

Die Oberfläche der Probeteile parallel zur Druckplattform ist in Bild 2.20 dargestellt. Bei den mit dem FDM-Verfahren gedruckten Körpern sind die Drucklinien, in welchen das Material aufgebracht wird, sehr deutlich zu erkennen. Auch beim mit SLS hergestellten Körper sind die einzelnen Pulverpartikel sehr gut wahrzunehmen. Das SLA-Verfahren zeigt auch hier das beste Ergebnis und es sind nur feine Riefen sichtbar.

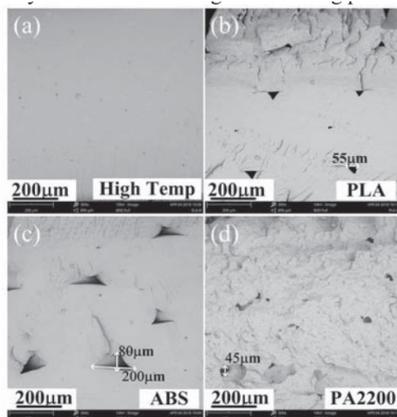


Bild 2.19: XZ-Querschnitt verschiedener Druckobjekte [14]

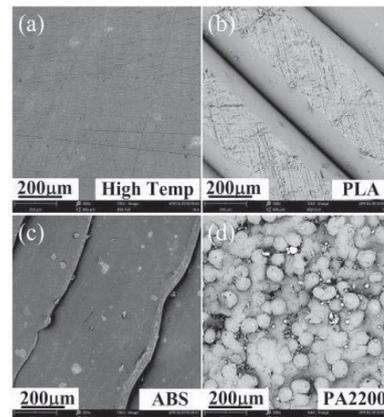


Bild 2.20: XY-Oberfläche verschiedener Druckobjekte [14]

In Bild 2.21 ist die Durchschlagfestigkeit der in den Bild 2.19 und Bild 2.20 dargestellten FDM-, SLA- und SLA-Prüfkörper abgebildet. Die mit dem SLA-Verfahren aus "high temp Harz" hergestellten Prüflinge weisen hier die höchste Durchschlagfestigkeit auf.

Bei mit dem FDM-Verfahren gedruckten Prüflingen ist die elektrische Festigkeit anisotrop, da der Druck in Linien erfolgt und sich entlang der Linien Luftkanäle ausbilden (Bild 2.19). In Bild 2.22 ist ersichtlich, dass die Durchschlagfeldstärke parallel zur Druckplattform bei den meisten Materialien nur ca. 30 % von jener orthogonal zur Druckplattform beträgt.

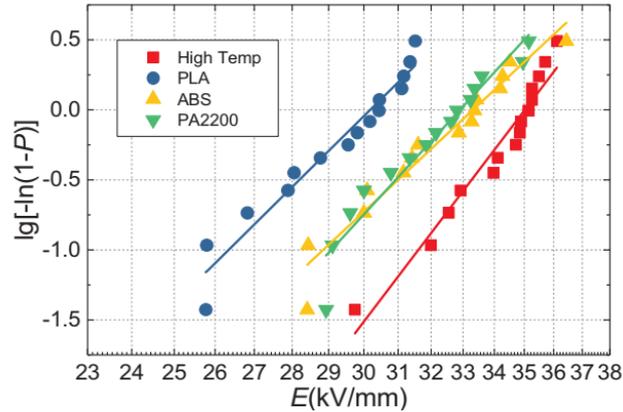


Bild 2.21: Weibull-Plot der Durchschlagfestigkeit verschiedener Druckobjekte [14]

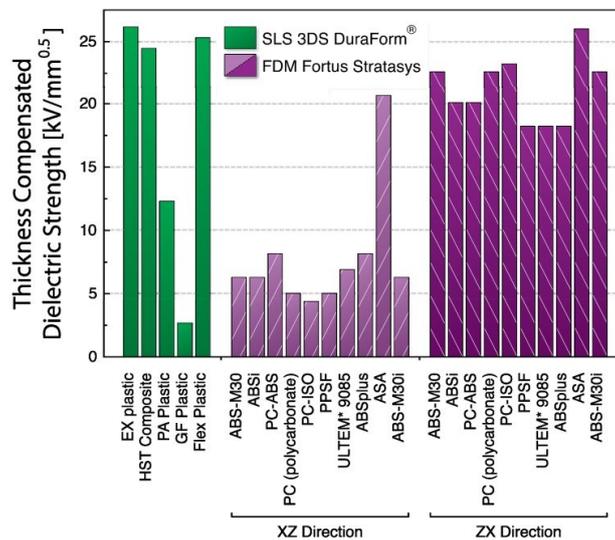


Bild 2.22: Richtungsabhängigkeit der elektrischen Festigkeit verschiedener SLS- und FDM-Materialien [9]

2.3 Gewähltes Druckverfahren und Druckmaterial

2.3.1 Druckverfahren

Basierend auf der durchgeführten Recherche über die verschiedenen 3D-Druckverfahren sind das SLA- und MSLA-Druckverfahren die einzigen Druckverfahren, bei welchen keine Lufteinschlüsse im Druckobjekt vorhanden sind und die Materialeigenschaften die geringste Richtungsabhängigkeit besitzen. Daher sind diese Druckverfahren von all den betrachteten jene, welche am besten zur Herstellung von Isolatoren geeignet sind.

Da an der TU Graz zudem bereits SLA-Drucker in der Fablab sowie am Institut für Messtechnik und Sensorik (EMS) vorhanden sind, wurde dieses Druckverfahren gewählt, um erste Vorversuche durchzuführen. Es zeigte sich, dass diese Drucker die benötigten Anforderungen nicht erfüllen konnten (Kapitel 3.1.4). Daher wurde für die nachfolgenden Versuche ein MSLA-Drucker entsprechend den Anforderungen modifiziert.

2.3.2 Druckmaterial

Für das SLA/MSLA-Druckverfahren gibt es mittlerweile eine große Anzahl an verschiedenen Druckmaterialien. Die zum Zeitpunkt dieser Arbeit verfügbaren 3D-Druckharze wurden alle auf deren mechanischen und optischen Eigenschaften hin optimiert. Über die elektrischen Eigenschaften ist in den entsprechenden Produktdatenblätter nur vereinzelt Information vorhanden.

Die Auswahl des verwendeten Harzes erfolgte aufgrund nachfolgender Kriterien:

- Elektrische Leitfähigkeit
- Verlustfaktor
- Permittivität
- Temperaturbeständigkeit
- Mechanische Eigenschaften

Nach ausführlicher Recherche wurde das "high temp v2 Harz" des Herstellers Formlabs gewählt [15]. Dieses Harz wurde bereits in mehreren Publikationen mit Bezug auf den 3D-Druck von Isolatoren [13, 14, 16] verwendet. Daher sind die elektrischen Eigenschaften bereits näherungsweise bekannt. Zudem besitzt es sehr gute thermische und mechanische Eigenschaften (Tabelle 1).

Tabelle 1: Eigenschaften "high temp v2 Harz" [13, 17]

Dielektrischer Verlustfaktor	60·10 ⁻⁴ (bei 50 Hz)
Relative Permittivität	3,2 (bei 50 Hz)
Durchschlagfestigkeit	52 kV/mm (bei 50 Hz)
Viskosität	200 mPa·s (bei 30°C)
Zugfestigkeit	58,3 MPa
Bruchdehnung	3,3 %
Zugmodul	2,75 GPa
Biegefestigkeit	94,5 MPa
Biegemodul	2,62 GPa

2.3.3 FGM (Functionally Graded Material)

Als FGM-Materialien werden Stoffe bezeichnet, bei welchen sich die Materialeigenschaften über die Dicke oder das Volumen kontinuierlich ändern [18]. Diese können in der Hochspannungstechnik zur Feldstärkesteuerung verwendet werden. Bei FGM-Materialien für Isolatoren ist für Gleichspannungsanwendungen die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit innerhalb des Volumens von Interesse, bei Wechselfeldspannungsanwendungen hingegen die Änderung der Permittivität. Für diese Arbeit wurde die Änderung der Permittivität für Wechselfeldspannungsanwendungen untersucht. Um die Permittivität innerhalb eines Materials ändern zu können, kommen Füllstoffe mit hoher Permittivität zum Einsatz. Das verwendete 3D-Druckharz als Basismaterial weist eine relative Permittivität von $\epsilon_r = 3,2$ auf (Tabelle 1). Um den benötigten Volumenanteil eines Füllstoffes möglichst gering zu halten, wird ein Füllstoff mit möglichst hoher Permittivität gewählt.

Die Wahl für den Füllstoff fiel auf Bariumtitanat, da dieses eine sehr hohe Permittivität bei relativ geringer elektrischer Leitfähigkeit besitzt und auch bereits in anderen Publikationen erfolgreich in Kombination mit dem gewählten Harz eingesetzt wurde [13].

Es wurde ein Bariumtitanat-Pulver mit einer Korngröße von $0,85\ \mu\text{m}$ bis $1,45\ \mu\text{m}$ (0.03 % Max. (+325 Mesh), (Horiba, D50)) gewählt (Bild 2.23).

Die Temperaturabhängigkeit der Permittivität von Bariumtitanat wurde im Zuge dieser Arbeit nicht berücksichtigt [19].

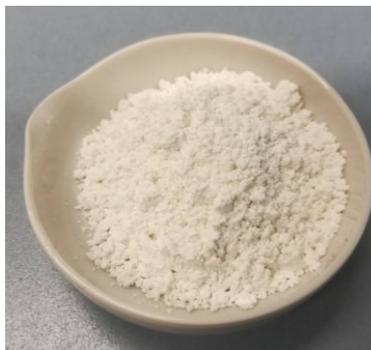


Bild 2.23: Bariumtitanat-Pulver

3 Fertigung der Prüflinge

3.1 Vorversuche zu Material und Druckverhalten

3.1.1 Ermittlung der Eindringtiefe des UV-Lichtes

Der Anteil des beigemischten Bariumtitanat-Pulvers beeinträchtigt die Eindringtiefe des UV-Lichtes in das Harz-BaTiO₃-Gemenge erheblich. Für einen erfolgreichen Druckvorgang ist es notwendig, dass innerhalb der eingestellten Belichtungszeit eine Schicht mit mindestens der eingestellten Druckschichthöhe ausgehärtet werden kann. Um dies besser abschätzen zu können, wurden Vorversuche durchgeführt, bei welchen verschiedene BaTiO₃-Volumenanteile zum Harz hinzugefügt wurden.

Das BaTiO₃-Harz-Gemisch wurde auf eine mit einem Trennmittel behandelte Glasscheibe aufgebracht und anschließend mit Hilfe des UV-Lichtes des MSLA-Druckers für eine voreingestellte Zeit belichtet (Bild 3.1). Es bildet sich eine dünne feste Schicht an der Glasplatte. Das sich über dieser Schicht befindliche noch flüssige Harz-Füllstoff-Gemisch wurde vorsichtig entfernt, die Probe mit Isopropanol gereinigt und die Schichtdicke gemessen. Bei diesen Vorversuchen zeigte sich, dass die Viskosität des Harz-Füllstoff-gemenges sehr stark mit dem Füllstoffanteil zunimmt. Bei einem Volumenanteil von 40 % Bariumtitanat-Pulver hat das Gemisch bei Raumtemperatur bereits so eine hohe Viskosität, dass es nicht mehr von selbst verläuft, sondern sich eher wie eine zähe Masse verhält. Um das Beimengen des BaTiO₃-Pulvers zu erleichtern, wurde das Gemisch auf etwa 70 °C erwärmt, wodurch die Viskosität deutlich verringert wurde. In Bild 3.2 ist die ausgehärtete Schichtdicke in Abhängigkeit des Volumenanteil von Bariumtitanat-Pulver dargestellt. Die Dicke der ausgehärteten Schicht nimmt bis zu einem Volumenanteil von ca. 7 % Bariumtitanat-Pulver stark ab.

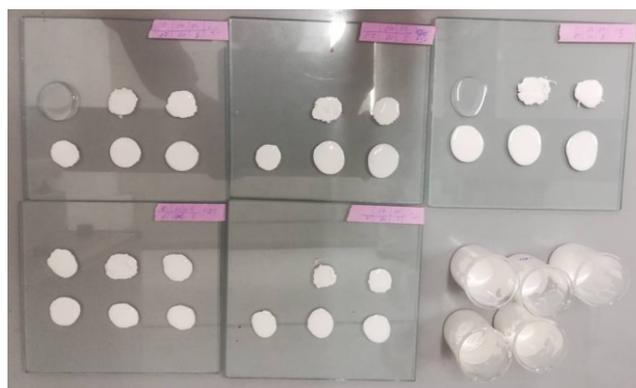


Bild 3.1: Herstellung der Proben zur Bestimmung der Eindringtiefe

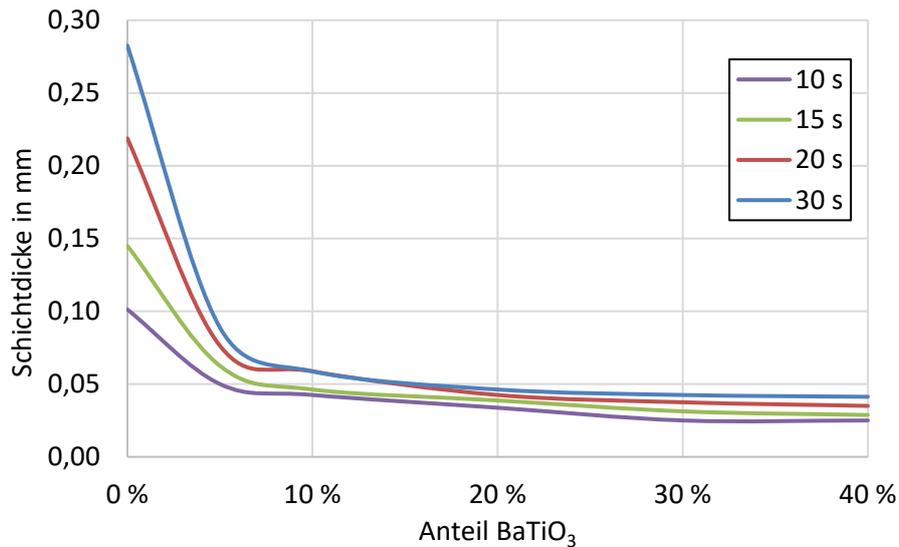


Bild 3.2: Ausgehärtete Schichtdicke in Abhängigkeit der Belichtungszeit

3.1.2 Ermittlung der Permittivität und des Verlustfaktors in Abhängigkeit des BaTiO₃-Anteils

Um die Permittivität und den Verlustfaktor in Abhängigkeit des BaTiO₃-Anteils bestimmen zu können, wurden Scheiben gegossen. Dazu wurden 3D-gedruckte Gussformen verwendet. Diese wurden auf eine mit Trennmittel behandelte Glasplatte aufgebracht und anschließend wurde das zur Verringerung der Viskosität auf etwa 70 °C erwärmte Harz-BaTiO₃-Gemisch in diese eingefüllt. Im nächsten Schritt wurde eine zweite Glasplatte, welche ebenfalls mit Trennmittel behandelt wurde, auf die über deren Rand gefüllte Gussform gelegt und niedergedrückt. Die Glasplatten wurden danach mit 3D-gedruckten Klemmen zusammengeklammert, wobei unter Zuhilfenahme einer Mikrometerrmessschraube überprüft wurde, dass die Glasplatten möglichst parallel zueinander liegen (Bild 3.3). Die zusammengepressten Glasplatten wurden anschließend zum Aushärten des sich dazwischen befindlichen Harz-BaTiO₃-Gemisches mit UV-Licht bestrahlt. Nach dem Aushärten wurden die Glasplatten und Gussformen entfernt und die Proben mit Hilfe einer eigens gefertigten Schablonenklemme mit Leitsilber beschichtet (Bild 3.4). Die Messungen an den mit Leitsilber beschichteten Plattenproben erfolgte gleich wie bei den 3D-gedruckten Plattenproben mit einem Dirana-Messsystem der Firma Omicron (Kapitel 5.2). Die Ergebnisse der Messungen sind in Kapitel 6.2.2 in Bild 6.1 und Bild 6.2 dargestellt.

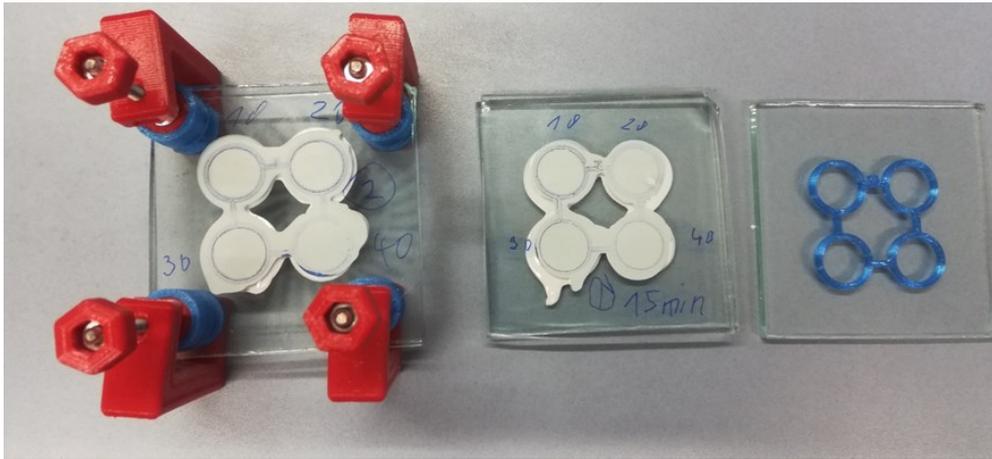


Bild 3.3: Fertigung von gegossenen Plattenproben



Bild 3.4: Mit Leitsilber beschichtete Plattenproben

3.1.3 Vorversuche mit dem SLA-Drucker am EMT

Die ersten Prüflinge wurden am Institut für Innovation und Industrie Management (IIM) im Fablab in Auftrag gegeben. Dabei handelte es sich um Kegelstümpfe ähnlich denen, die auch in der Literatur verwendet werden, welche auf einem "Form 2L SLA-Drucker" des Herstellers Formlabs gedruckt wurden.

Die ersten selbst durchgeführten Drucke von Prüflingen erfolgten am Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik (EMS), ebenfalls mit einem "Form 1-SLA-Drucker" der Firma Formlabs (Bild 3.6). Mit Hilfe der Software Preform wurden aus den 3D-Modellen der Prüflinge die für den Drucker benötigten Druckdateien erstellt. Gedruckt wurde mit dem "high temp v2 Harz" des Herstellers Formlabs (Kapitel 2.3.2).

Am EMS wurden zum Vergleich der Druckergebnisse vorerst dieselben Kegelstümpfe (Bild 3.5) gedruckt wie bereits am IIM. Der Vergleich der Drucke zeigte, dass sich die Prüflinge kaum voneinander unterscheiden. Es wurden daher alle weiteren Vorversuche am EMS durchgeführt.

Zur Realisierung von orientierenden Durchschlagversuchen wurden zylindrische Plattenproben verschiedener Dicken gedruckt. Dabei wurden verschiedene Ausrichtungen erprobt. Die dabei zu beachtenden Probleme werden in Kapitel 4.2 genauer betrachtet.

Um 3D-gedruckte FGM Isolatoren herstellen zu können ist es notwendig, Materialien mit unterschiedlichen Permittivitätswerten drucken zu können. Daher wurden Druckversuche mit 5 Vol.-% Bariumtitanat-Pulver im "high temp v2 Harz" durchgeführt. Diese waren nicht erfolgreich, da das Formlabs Drucksystem nur die Verwendung von Harzkartuschen, welche von Formlabs hergestellt werden, vorsieht. Diese werden über einen integrierten Chip vom Drucker erkannt. Da sich die benötigte Belichtungszeit durch die Beimischung des BaTiO₃-Pulvers erhöht, war der Druck beim Einsetzen einer "high temp v2 Kartusche" nicht erfolgreich. Die ausgehärtete Schicht haftete nicht auf der Bauplattform. Um mit Einstellungen für Keramikharz drucken zu können, wurde versucht eine verschlossene Kartusche mit Keramikharz in den Drucker einzusetzen. Dies führte dazu, dass die ersten Schichten erfolgreich an der Druckplattform hafteten, wenn in diesem Bereich zuvor eine 0,1 mm dicke Verbindungsschicht aus reinem "high temp v2 Harz" gedruckt wurde. Allerdings schlug der Druck bald darauf fehl und die höchste erreichte gedruckte Struktur hatte nur 1 mm. Dies lag auch daran, dass sich das BaTiO₃-Pulver mit fortschreitender Druckdauer am Boden des Beckens abzusetzen beginnt.

Da der Form-1-Drucker keine Änderung von Belichtungszeit, Ablösegeschwindigkeit, Fahrweg und Wartezeit zwischen den gedruckten Schichten ermöglicht, wurde nach einem alternativen Drucksystem zur Herstellung der Prüflinge gesucht.

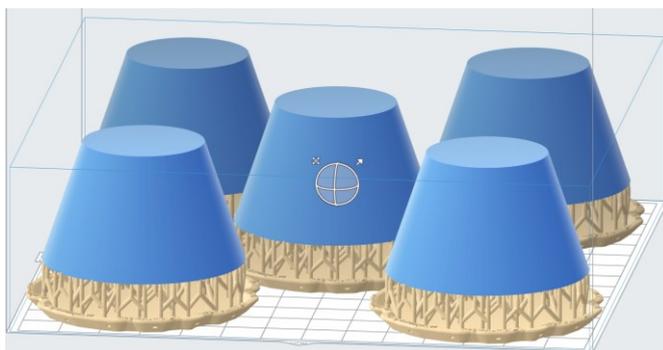


Bild 3.5: Kegelstümpfe in Preform-Software

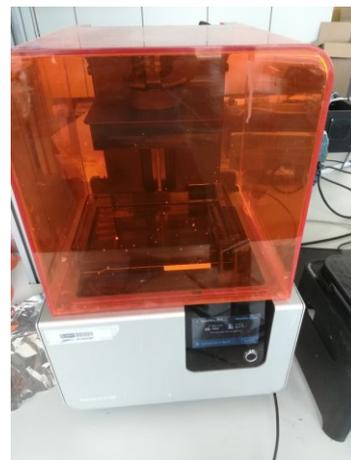


Bild 3.6: Form 1 SLA-Drucker

3.1.4 Anforderungen an das Drucksystem nach Vorversuchen

Die durchgeführten Vorversuche haben gezeigt, dass das Drucksystem zur Herstellung von Prüflingen mit Füllstoffanteil folgende Voraussetzungen erfüllen muss.

Freie schichtweise Wahl der Belichtungszeit:

Um eine stabile Verbindung mit der Druckplattform zu erreichen, müssen die ersten gedruckten Schichten, deutlich länger als die nachfolgenden belichtet werden. Durch den Füllstoffanteil und die dadurch bedingte langsamere Aushärtung des Harz-Füllstoff-Gemisches muss auch die Belichtungszeit der folgenden Schichten beliebig einstellbar sein. Eine zu kurze Belichtungszeit führt dabei zu einer nicht ausreichend verfestigten Schicht. Die Verbindung mit der zuvor gedruckten Schicht reicht nicht aus, die unvollständig ausgehärtete Schicht bleibt am FEP-Film haften und es besteht keine Verbindung mehr zur Bauplattform, wodurch der Druck fehlschlägt.

Einstellbarkeit der Geschwindigkeit zum Ablösen der Schicht:

Um das fehlerfreie Ablösen der gedruckten Schicht von der FEP-Folie zu gewährleisten, ist die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Bauplattform nach dem Belichten nach oben bewegt, entscheidend.

Vermengen des Harz-Füllstoff Gemisches zwischen den gedruckten Schichten:

Um die Sedimentation des Füllstoffpulvers zu verhindern, ist es notwendig, das Harz-Füllstoff-Gemisch in regelmäßigen Abständen zu durchmischen. Dies kann nicht während der Belichtungszeit erfolgen, da dadurch der Aushärtvorgang beeinträchtigt wird.

Temperieren des Harzbeckens:

Die Viskosität des Harz-Füllstoff-Gemisches nimmt mit steigendem Füllstoffanteil stark zu. Um die Viskosität zu verringern und damit die Druckbarkeit sicherzustellen, ist es notwendig, das Harz-Füllstoff-Gemisch zu erwärmen.

3.2 Aufbau eines für den FGM-Druck geeigneten Drucksystems

3.2.1 Gewähltes Drucksystem

Als 3D-Drucker für die folgenden Untersuchungen wurde der "MSLA-Drucker Mars 2 pro" des Herstellers Elegoo gewählt (Bild 3.7).

Die Wahl wurde aufgrund folgender Überlegungen getroffen:

- Flexibilität bezüglich Belichtungszeit, Geschwindigkeit der z-Achse, Fahrhöhe zwischen den Schichten, Möglichkeit den Druck zu pausieren und das Druckbecken zu tauschen
- Verfügbarkeit von Ersatzteilen, zusätzliche Druckplattform, Harzbecken, FEP-Folien
- Umfangreiche Software, welche es erlaubt, die Belichtungszeit und andere Parameter wie Schichtdicke für verschiedene Bereiche eines Drucks zu variieren
- Erprobtes Drucksystem, Drucker bereits mehrfach verbessert und erweitert, daher bereits viele „Kinderkrankheiten“ beseitigt, große online Community
- Preis-/Leistungsverhältnis

Der Drucker besitzt ein monochromes LCD-Display, einen Bauraum von 129 mm x 80 mm x 160 mm, eine Auflösung von 50 μm und eine Belichtungszeit bei Standard-3D-Druckharz von 1 – 2 s. Als UV-Lichtquelle dienen UV-LEDs mit einer Wellenlänge von 405 nm. Die z-Achsen-Genauigkeit beträgt 1,25 μm . Die Schichtdicke kann im Bereich von 0,01 – 0,2 mm variiert werden [20]. Das Druckbecken wird bei diesem Drucker nicht temperiert. Eine Temperaturregelung wurde im Zuge dieser Arbeit ergänzt.



Bild 3.7: 3D-Drucker "Mars 2 Pro"

3.2.2 Probleme beim Druck mit Füllstoff

Sedimentation des BaTiO₃-Pulvers:

Da die Dichte des BaTiO₃-Pulvers 3,5-mal so hoch ist wie jene des 3D-Druckharzes, kommt es bereits nach kurzer Zeit zur Sedimentation des BaTiO₃-Pulvers und es beginnt sich am Boden des Druckbeckens abzusetzen. Dies hat zur Folge, dass der BaTiO₃-Anteil mit zunehmender Schichtanzahl abnimmt, da sich immer mehr Füllstoff am Boden absetzt. Nimmt die Ausdehnung des Druckkörpers mit steigender Schichtzahl zu, werden zuvor noch unbenutzte Bereiche des Druckbeckens belichtet. Wenn sich in diesen Bereichen bereits BaTiO₃-Pulver abgesetzt hat, führt dies entweder zu einem Bereich mit sehr hohem BaTiO₃-Anteil oder, wenn die sedimentierte Schicht bereits zu dick ist, zu einem Fehldruck in diesem Bereich, da das UV-Licht nicht mehr in der Lage ist, die erforderliche Schichthöhe auszuhärten.

Um dem Sedimentieren entgegenzuwirken, wurden folgende Möglichkeiten in Betracht gezogen:

- Installation eines Wischers im Druckbecken, um zwischen den einzelnen Schichten den Beckeninhalte neu zu durchmischen.
- Vermischung des Beckeninhaltes mit Hilfe einer Pumpe.

Wischer

VT: gleichmäßige Durchmischung im ganzen Becken

NT: Bauplattform muss nach jeder Schicht sehr hoch angehoben werden, damit der Wischer darunter durch passt

aufwendigerer Aufbau im Vergleich zu Pumpe

Kollisionsgefahr bei Fehlfunktion von Wischer

Zerkratzen des FEP-Films bei zu geringem Abstand zwischen Wischer und Beckenboden

Bei vollem Becken nur langsame Wischerbewegung möglich (Gefahr des Überschwappens)

Druckflächenverlust durch benötigten Platz für Wischer am Beckenrand

Pumpe

VT: einfacher Aufbau

NT: zusätzliches Harzvolumen erforderlich

Druckflächenverlust durch benötigten Platz für Düsen im Druckbecken

Gleichmäßige Durchmischung durch Düsen kaum möglich

Hohe Viskosität des Harz-Füllstoff-Gemisches:

Da das "high temp v2 Harz" im Vergleich zu den meisten anderen 3D-Druckharzen eine vergleichsweise hohe Viskosität besitzt, führt das Beimischen von Füllstoff bereits bei niedrigem Füllstoffanteil zu einer für einen erfolgreichen Druck zu hohen Viskosität. Die Viskosität des verwendeten Harzes nimmt allerdings mit steigender Temperatur stark ab. Daher ist eine Erwärmung des Harzes auf 35 °C ausreichend, um mit einem Füllstoffanteil von 7,5-Vol.% erfolgreich drucken zu können.

Feuchtigkeit von Harz oder Füllstoff:

Um Feuchtigkeitseinflüsse von Harz und Füllstoff bestmöglich zu verhindern, wurde das BaTiO₃-Pulver vor dem Vermischen mit dem Harz für 6 h bei 60 °C unter Vakuum getrocknet. Das Vermischen des Harzes mit dem Füllstoff erfolgte anschließend mit einem Magnetrührer ebenfalls unter Vakuum für 3 Stunden bei 40 °C.

3.2.3 Erweiterungen des Druckers

Spritzenpumpe:

Um dem in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Problem mit der Sedimentation des BaTiO₃-Pulvers entgegenzuwirken, wurde eine Spritzenpumpe entwickelt und gebaut, um das Harz-Füllstoff-Gemisch zu untermengen. Die Spritzenpumpe wurde Großteils aus mit dem FDM-Druckverfahren hergestellten Bauteilen aufgebaut. Als Antrieb dient ein Schrittmotor, welcher über eine Zahnriemenscheibe als Übersetzung eine Kugelumlaufspindel antreibt. An der Kugelumlaufspindel sind zwei 100-mL-Spritzen befestigt. Da die Viskosität des Harz-Füllstoff-Gemisches vor allem im ausgekühlten Zustand sehr hoch ist, ist die Übersetzung notwendig, um einen Schrittverlust des Schrittmotors durch Überlastung zu vermeiden.

Die Steuerung der Spritzenpumpe erfolgt mit Hilfe eines Arduino Mega. Um den Pumpenbetrieb zeitlich auf die Belichtungszeit anzupassen, wurde im Drucker ein lichtabhängiger Widerstand eingebaut. Dadurch erkennt die Steuerung wann belichtet wird und kann den Pumpbetrieb entsprechend steuern. Sobald die Belichtung einer Schicht beendet ist, pumpt die Spritzenpumpe eine definierte Menge in einer vorgegebenen Zeit aus dem Becken und anschließend vor dem Start der Belichtung der folgenden Schicht wieder retour. Um Schrittverluste erkennen zu können, wurden weitere Endschalter in der Spritzenpumpe verbaut. Spricht einer dieser während des Pumpvorganges an, wird die Startsequenz erneut initialisiert und der Ausgangspunkt neu definiert.

Um eine zu starke Erwärmung des Schrittmotors zu verhindern, wurde ein Lüfter verbaut. Die Temperatur des Motors wird mit einem Thermoelement vom Controller überwacht und der Lüfter entsprechend gesteuert. Der Aufbau der Spritzenpumpe ist in Bild 3.9 dargestellt. Am unteren Bildende befindet sich der Schrittmotor, darüber Übersetzung, Kugelumlaufspindel, Schlitten mit Kolbenhalterung, Spritzen und Verbindungsschlauch.

Um eine möglichst gleichmäßige Durchströmung des Beckens zu erreichen, wurden seitlich im Becken Einsätze mit Düsen verbaut (Bild 3.8, Bild 3.10). Diese Düsen sind nahe dem Boden des Beckens angeordnet, um das Ansaugen von Luft bei niedrigen Füllständen zu verhindern. An die Beckeneinsätze, welche mit dem "Mars 2 pro" gedruckt wurden, kann der Verbindungsschlauch zu den Spritzen direkt angeschlossen werden.

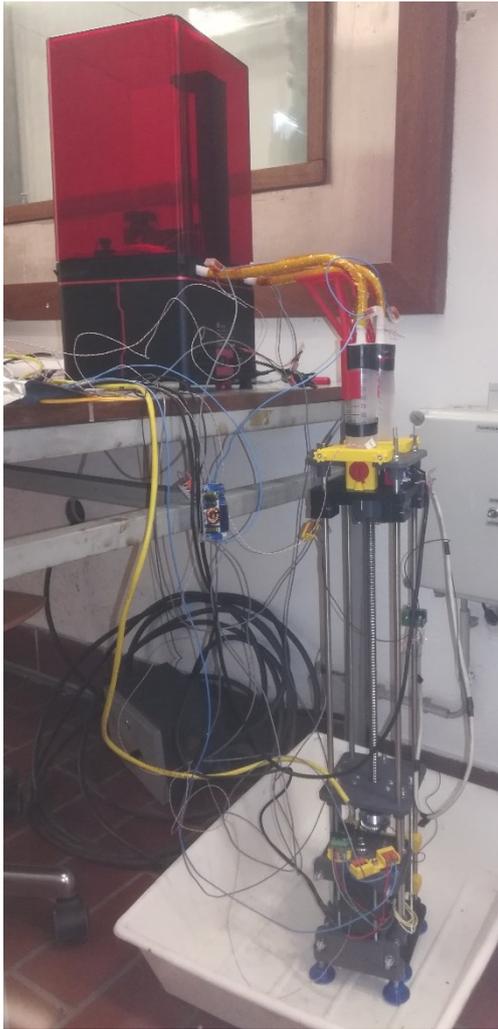


Bild 3.9: Spritzenpumpe und Drucker



Bild 3.8: Druckbecken mit Einsatz

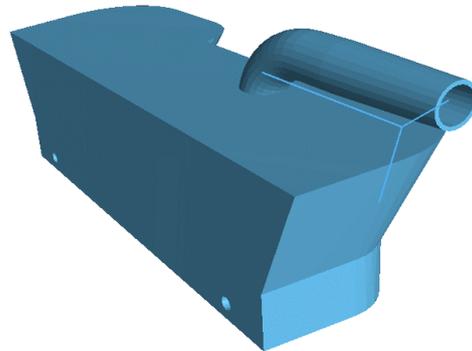


Bild 3.10: 3D-Modell des Beckeneinsatzes

Temperieren des Harz-Füllstoff-Gemisches:

Um die Viskosität des Harz-Füllstoff-Gemisches zu reduzieren, wurde eine Temperaturregelung realisiert. Die Temperatur wurde im Harzbecken, am Verbindungsschlauch von Spritze und Becken sowie an einer der beiden Spritzen mit einem Thermoelement erfasst. Geheizt wurde mit Heizfolien außen am Aluminiumdruckbecken, sowie außen an den Spritzenpumpen. Die Verbindungsschläuche zwischen Spritze und Becken wurden zusätzlich mit Heizdraht (Bild 3.11) umwickelt. Die gesamte verfügbare Heizleistung der Folien und Heizdrähte beträgt 48 W. Die Temperatursteuerung erfolgte primär nach der im Druckbecken gemessenen Temperatur. Die Temperatursensoren an der Spritze sowie am Schlauch dienten dazu, eine Überhitzung von Spritze und Schlauch zu verhindern. Beim Druck der Proben wurde die Temperatur der Harz-Füllstoff-Mischung im Becken auf 36 °C eingestellt. Die Maximaltemperatur außen an den Verbindungsschläuchen und Spritzen wurde mit 50 °C gewählt.



Bild 3.11: Spritzen und Verbindungsschläuche mit Heizelementen

3.2.4 Gewählte Druckparameter

Schichtdicke:

Die gewählte Schichtdicke beim Druck von Prüflingen aus reinem Harz lag bei 0,05 mm. Bei Prüflingen, welche mit einem Bariumtitanat-Anteil gedruckt wurden, wurde die Schichtdicke auf Grund der geringeren Eindringtiefe des UV-Lichtes auf 0,025 mm reduziert.

Belichtungszeit der ersten Schichten:

Beim Druck von reinem Harz wurden die ersten 5 Schichten für 35 s belichtet. Beim Druck von Harz mit Füllstoffanteil wurde zusätzlich eine einzelne Schicht aus reinem Harz auf die Druckplattform als Verbindungsschicht gedruckt, anschließend wurde die Druckplattform gereinigt und der Druck mit Füllstoffanteil begonnen, die ersten 5 Schichten wurden dabei mit 45 s belichtet.

Belichtungszeit:

Beim reinen Harz betrug die Belichtungszeit 4 s, beim BaTiO₃-Harz-Gemisch 7,5 s.

Standzeit zwischen den Schichten:

Das Drucken von reinem "high temp v2 Harz" benötigte keine Pause nach dem Ablösen des Drucks von der Bauplattform. Nach Erreichen der Höhe von 5 mm über dem Beckenboden begann sich die Bauplattform direkt wieder abzusenken. Beim Druck mit BaTiO₃-Anteil ist es zur Verhinderung der Sedimentierung notwendig, den Beckeninhalt zwischen den Schichten neu zu durchmischen, daher wurde eine Standzeit von 4 s gewählt, bevor sich die Druckplattform wieder absenkt.

Auffahrt Geschwindigkeit:

Zur Ablösung der ersten Schichten wurde bei allen Materialien eine Geschwindigkeit von 60 mm/min gewählt. Beim Druck aller nachfolgenden Schichten betrug die gewählte Geschwindigkeit 80 mm/min.

Pumpgeschwindigkeit und Menge:

Um eine gute Durchmischung des Harzes mit dem Füllstoff während des Druckvorganges zu erreichen, wurden nach jeder gedruckten Schicht 50 ml innerhalb von 2 s aus dem Becken abgesaugt und anschließend in der gleichen Zeit dem Becken wieder zugeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Füllstand des Beckens hoch genug ist, um ein Ansaugen von Luft zu verhindern. Das Ansaugen von Luft hat die Bildung von Luftblasen zur Folge, wodurch sich die Wahrscheinlichkeit von Lufteinschlüssen im gedruckten Prüfling deutlich erhöht.

3.2.5 Nachbearbeitung der gedruckten Prüflinge

Am Ende des Druckvorganges fährt die Druckplattform mit den daran anhaftenden gedruckten Teilen auf maximale Höhe hoch. Die gedruckten Teile sind durch den Druckvorgang noch mit einer flüssigen Harzschicht benetzt und tropfen nach. Nachdem der Abtropfvorgang abgeschlossen ist, wird die Druckplattform vom Drucker gelöst und zur Entfernung der flüssigen Harzreste in einer Reinigungsstation für ca. 15 min mit Isopropanol gespült (Bild 3.12). Nach dem Spülvorgang werden die gedruckten Teile mit einer Spachtel von der Druckplattform abgelöst. Die nun nicht mehr benötigten Stützstrukturen werden abgebrochen, da die gedruckten Teile noch etwas weicher sind als nach dem abschließenden Nachaushärten, wodurch Ausbrüche weniger stark ausgeprägt sind. Im nächsten Schritt erfolgt die vollständige Aushärtung in einer Aushärtestation. Dabei werden die gedruckten Teile auf einem Drehteller platziert und mit UV-Licht bestrahlt. Nach dem Aushärtevorgang können eventuell verbliebene Stützstrukturreste durch Abschleifen entfernt werden. Beim Druck von Teilen deren Grundfläche parallel zur Druckplattform ausgerichtet war, muss die Grundfläche aufgrund der unter Kapitel 4.2 erläuterten Probleme plangeschliffen werden.

Beim Nachaushärten von dünnen Plattenproben kommt es aufgrund der ungleichmäßigen Belichtung zum Verformen der dünnen Scheiben. Um dem entgegenzuwirken, wurden die Plattenproben während des Aushärtevorganges zwischen zwei Glasplatten eingespannt (Bild 3.13).



Bild 3.12: Kegelstumpf nach dem Druck auf Bauplattform mit Stützstruktur

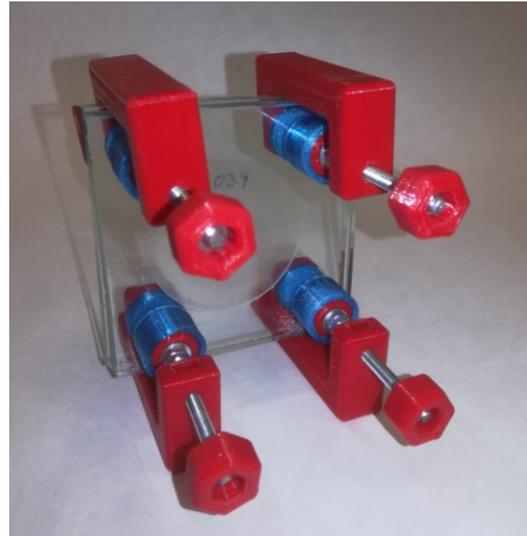


Bild 3.13: Plattenprobe zwischen Glasplatten eingespannt

4 Prüflinge

4.1 Prüflingstypen

Um die elektrischen Eigenschaften von 3D-gedruckten Bauteilen bestimmen zu können, wurden zwei Typen von Prüflingen verwendet.

A) Plattenproben

Plattenproben geringer Dicke wurden zur Charakterisierung des Materials verwendet.

B) Kegelstümpfe

Um die Auswirkung von lokalen Feldüberhöhungen betrachten zu können, wurden 2 Arten von Kegelstümpfen als Versuchsisolatoren eingesetzt. Die Abmessung des Typs 1 wurden aufgrund von in anderen Forschungsarbeiten verwendeten Geometrien gewählt, um die Ergebnisse vergleichen zu können [13, 21–23]. Die Abmessungen des Typs 2 wurden selbst gewählt.

4.2 Plattenproben

Es wurden Plattenproben mit Durchmessern von 24 mm, 50 mm und 80 mm und einer Höhe von 1 – 2 mm verwendet. Die Plattenproben mit 24 mm und 80 mm Durchmesser wurden für dielektrischen Messungen gefertigt. Plattenproben mit einem Durchmesser von 50 mm wurden für Durchschlagversuche mit verschiedenen Elektrodenanordnungen verwendet.

Die im 3D-Druck hergestellten Plattenproben wurden mit zwei verschiedenen Ausrichtungen zur Druckplattform gefertigt.

Parallel zur Druckplattform:

Beim Druck der Plattenproben parallel zur Druckplattform muss die Plattenprobe mit Hilfe einer Stützstruktur gedruckt werden, da ein direktes Drucken auf der Druckplattform nicht möglich ist (Bild 4.1). Beim Drucken parallel zur Druckplattform sind die gedruckten Schichten orthogonal zur Durchschlagsrichtung, wodurch sich die Durchschlagfestigkeit der einzelnen Schichten gut beurteilen lässt. Bei Druckfehlern in einer Schicht kommt es bei dieser Ausrichtung meist nur zu einer lokalen Fehlstelle innerhalb der Probe, die darunter und darüber liegenden Schichten sind nicht betroffen.

Durch das mechanische Entfernen der Stützstruktur nach dem Druckvorgang entstehen Ausbrüche an der Oberfläche. Beim Drucken parallel zur Druckplattform kommt es beim Übergang von Stützstruktur zu Plattenprobe dazu, dass die erste gedruckte Schicht der Plattenprobe frei zwischen den Stützstrukturen hängt. Daher muss der Abstand der Stützstrukturen zueinander sehr eng gewählt werden, wodurch sich die Anzahl der Ausbrüche weiter erhöht.

Die ersten gedruckten Schichten der Plattenprobe sind daher aufgrund der fehlenden Stabilität zwischen den Stützstrukturen und den damit verbundenen Unebenheiten in der Oberfläche sowie auf Grund der Ausbrüche an der Oberfläche mechanisch entfernt worden.

Die Ausbrüche in der Plattenprobe bedingt durch das Entfernen der Stützstruktur sind unterschiedlich stark ausgeprägt. Daher muss je nach Stärke der Ausbrüche unterschiedlich viel Material mechanisch entfernt werden, um eine fehlerfreie Oberfläche zu erhalten. Dies führt wiederum zu unterschiedlichen Dicken der Plattenproben. Der gleichmäßige mechanische Materialabtrag bei den nur etwa 1 mm dicken Plattenproben stellt eine weitere Herausforderung dar.

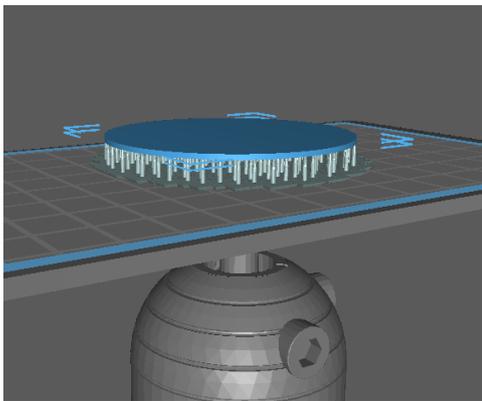


Bild 4.1: Druck einer Scheibenprobe parallel zur Druckplattform

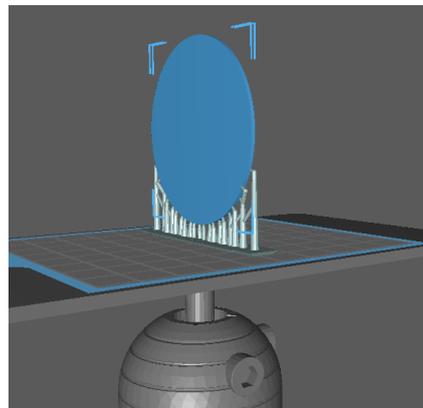


Bild 4.2: Druck einer Scheibenprobe orthogonal zur Druckplattform

Orthogonal zur Druckplattform:

Werden die Plattenproben orthogonal zur Druckplattform ausgerichtet, können in einem Druckvorgang erheblich mehr Plattenproben gedruckt werden, da der Flächenbedarf pro Probe auf der Druckplattform viel geringer ist, jedoch steigt die Druckzeit bedingt durch die höhere Schichtanzahl.

Die gedruckten Schichten sind bei dieser Ausrichtung in einer Ebene mit der Durchschlagrichtung, daher ist eine fehlerfreie Verbindung der einzelnen Schichten entscheidend.

Die Plattenproben wurden stehend mit einem Abstand von der Druckplattform parallel zueinander angeordnet. Die Stützstrukturen wurden so platziert, dass diese seitlich an den Plattenproben mit diesen verbunden sind, um Fehlstellen in der Kreisfläche durch Ausbrüche zu vermeiden (Bild 4.2).

Unabhängig von der Druckrichtung:

Beim Nachaushärten der Plattenproben unter UV-Licht kam es zu einer Verformung der Plattenproben. Dies ist vermutlich auf die ungleichmäßige Aushärtengeschwindigkeit bedingt durch die ungleichmäßige UV-Lichtintensität zurückzuführen. Um das Verziehen der Proben zu verhindern, wurden die Plattenproben während des Aushärtvorganges zwischen Acrylglasplatten eingespannt.

Mit zunehmendem Durchmesser der Plattenproben werden diese beim Druck instabiler und es kommt zu leichtem Versatz der einzelnen Schichten, aufgrund der Kräfteinwirkung beim Abziehen vom FEP-Film. Um diese Auswirkung zu verringern, wurden bei den Plattenproben größerer Durchmesser, diese in ca. 8 mm Abstand parallel zueinander angeordnet und die Stützstrukturen der einzelnen Proben miteinander verbunden. Um auch die am weitesten von der Druckplattform entfernten Teile der Plattenprobe gegen seitlichen Versatz zu stützen, wurde die Stützstruktur bis über die Plattenprobenmitte hinaus gedruckt.

4.3 Kegelstümpfe

Es wurden Kegelstümpfe zweier Typen verwendet, welche beim 3D-Druck mit der Kegelgrundfläche parallel zur Druckplattform ausgerichtet wurden (Bild 4.3). Der Abstand zwischen Druckplattform und Kegelstumpf wurde mit einer Stützstruktur überbrückt. Das direkte Drucken auf der Druckplattform ist nicht möglich, da sich das fertige Teil dann nicht von der Plattform ablösen lässt. Die Ausrichtung mit der Kegelgrundfläche parallel zur Druckplattform erfolgte, da bei dieser Ausrichtung keine Stützstrukturen auf den Seitenflächen des Kegelstumpfs notwendig sind und es somit in diesen Bereichen auch zu keinen Fehlern in der Oberfläche durch das spätere Entfernen der Stützstruktur kommt. An der Kegelstumpfgrundfläche wird in nachfolgenden Versuchen zudem die Erdelektrode positioniert, daher sind bei dieser Fehlstellen weniger kritisch als auf der oberen Kegelstumpffläche, welche auf Hochspannungspotential gelegt wird. Die obere Kegelstumpffläche muss nach dem Druck daher nicht mechanisch nachbearbeitet werden. Dies führt zu einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Das Drucken parallel zur Druckplattform führt dazu, dass die Dichte der Stützstrukturen sehr hoch gewählt werden muss, da die gesamte Kegelgrundfläche innerhalb einer Schicht aufgebaut wird. Durch die geringe Dicke der Schicht hält diese dem Ablösen von der FEP-Folie bei zu großen Spannweiten zwischen den Stützstrukturen nicht stand. Dadurch kommt es zu einer sehr ungleichmäßigen Oberfläche oder zum Fehlschlagen des Drucks.

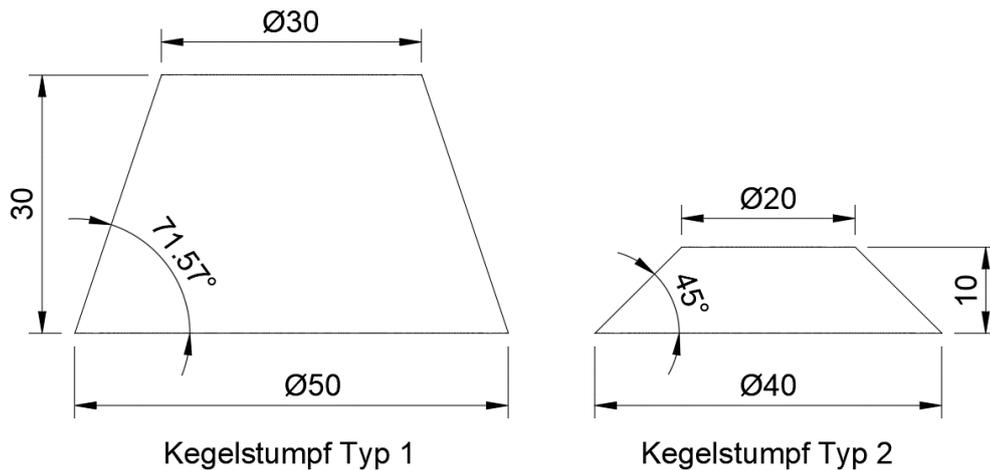


Bild 4.3: Abmessungen der verwendeten Kegelstümpfe in mm

4.4 Kegelstümpfe mit Feldsteuerelement

4.4.1 FEM (Finite Elemente Methode) Simulation

Um die feldsteuernde Wirkung von gedruckten Kegelstümpfen mit Zusatzschicht vorab beurteilen und optimieren zu können, wurden elektrostatische FEM-Simulationen durchgeführt.

Zur Reduktion der elektrischen Feldstärke im Zwickelbereich zwischen Hochspannungselektrode, Kegelstumpf und Luft wurde im oberen Bereich des Kegelstumpfes eine Schicht mit höherer Permittivität eingebracht. Um die optimale Höhe der oberen Schicht bei gegebener Permittivität sowie die optimale Permittivität bei gegebener Höhe bestimmen zu können, wurden Feldberechnungen mit der Software ElecNet durchgeführt. Mit Hilfe des Softwaretools Matlab wurde die Berechnung der einzelnen Feldstärkeverläufe unter Berücksichtigung der Rotationssymmetrie der Prüflinge automatisiert. In Bild 4.4 ist eine 3D-Abbildung des Aufbaus eines Kegelstumpfes mit Feldsteuerelement aus ElecNet dargestellt.

Hierbei wurde der Durchmesser der Erd- und der Hochspannungselektrode für die Simulation mit jeweils 200 mm definiert. Für den Nahbereich wurde eine maximale Mesh-Größe von 0,01 mm und für den Fernbereich von 10 mm gewählt. Die Permittivität des Grundmaterials der Kegelstümpfe wurde entsprechend jener des "high temp v2 Harzes" mit $\epsilon_r = 3,9$ gewählt (Kapitel 6.2.3).

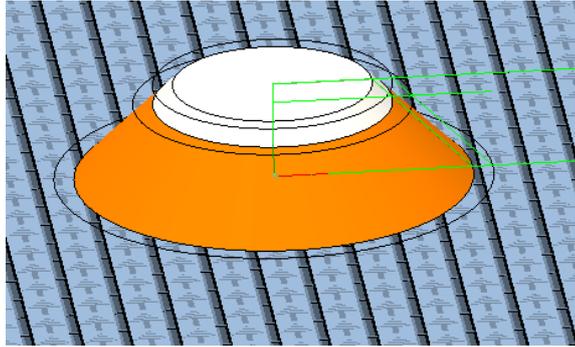


Bild 4.4: 3D-Abbildung von Kegelstumpf Typ 2 mit Feldsteuerelement in ElecNet

Die Gesamthöhe der Kegelstümpfe ist durch den Typ gegeben. Wird eine Zusatzschicht mit einer Permittivität, welche von der des Grundmaterials abweicht, aufgebracht, so ändert sich die Feldstärkeverteilung. Die Feldstärkeverteilung eines Kegelstumpfs des Typ 1 aus "high temp v2 Material" ($\epsilon_r = 3,6$) ist in Bild 4.5 dargestellt. Im oberen Bereich wurde eine 0,5 mm hohe Schicht mit $\epsilon_r = 6,1$ (entspricht 7,5 Vol.-% BaTiO₃-Pulver) eingefügt. Damit ergibt sich der Verlauf der Äquipotentiallinien und des elektrischen Feldes gemäß Bild 4.6. Der Vergleich der Feldbilder zeigt, dass die Feldstärke im Zwickelbereich, an welchem Hochspannungselektrode, Kegelstumpf und Luft aufeinandertreffen, durch die Zusatzschicht sichtbar verringert werden konnte.

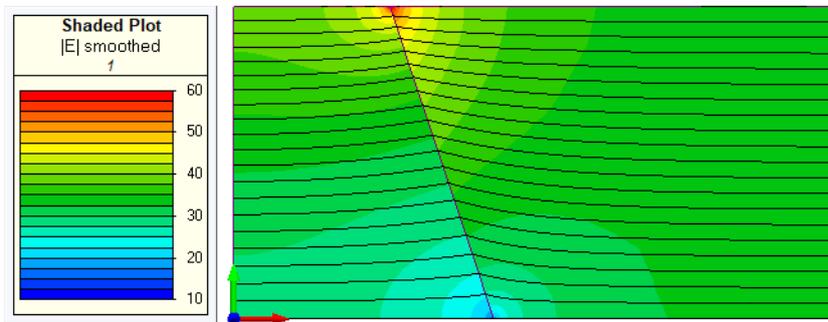


Bild 4.5: Feldstärkeverteilung in Kegelstumpf Typ 1 ohne Feldsteuerelement

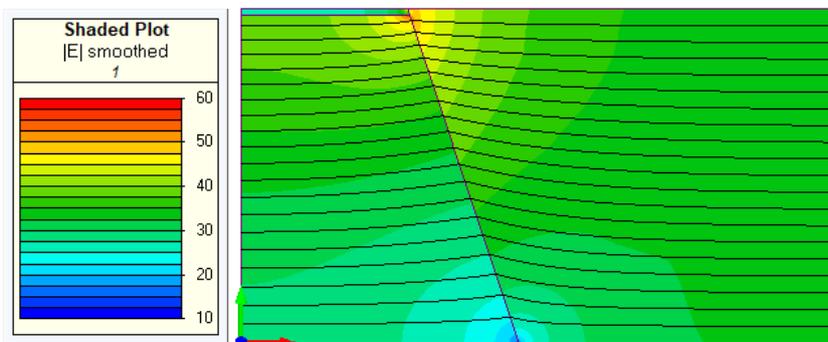


Bild 4.6: Feldstärkeverteilung in Kegelstumpf Typ 1 mit Feldsteuerelement

4.4.2 Minimale Feldstärke bei gegebener Schichthöhe

Um bei einem Kegelstumpf mit Feldsteuerelement vorgegebener Höhe die maximal auftretende Feldstärke zu minimieren, wurde die Permittivität der Schicht optimiert. Dazu wurde die Permittivität der Zusatzschicht variiert, um die Auswirkung auf den Feldstärkeverlauf untersuchen zu können. In Bild 4.7 ist der Feldstärkeverlauf für einen Kegelstumpf des Typ 1 entlang der Kegelstumpfoberfläche dargestellt. Hierbei wurde die Höhe der Zusatzschicht mit 5 mm festgelegt und die Permittivität variiert. Die Kurve mit $\epsilon_r = 3,9$ zeigt den Kegelstumpf ohne eine Änderung der Permittivität gegenüber dem Grundmaterial. Hierbei ergibt sich eine stetig abnehmende Feldstärke. Es zeigt sich, dass die maximal auftretende Feldstärke für $\epsilon_r = 8 - 9$ am geringsten ist. Der geringste Maximalwert der Feldstärke ergibt sich, wenn die Feldstärkewerte bei $x = 0$ (Zwickelpunkt) und $x \approx 6$ mm (Strecke bis zum Schichtwechsel entlang der Oberfläche) gleich groß sind.

In Bild 4.8 ist der Feldstärkeverlauf für den Kegelstumpf des Typ 2 für eine Zusatzschichthöhe von 2 mm dargestellt. Es zeigt sich, dass die optimale Permittivität der Zusatzschicht in diesem Fall zwischen $\epsilon_r = 20 - 25$ liegt. Durch die Veränderung der Permittivität der Zusatzschicht kann die maximal auftretende Feldstärke um etwa 30 % reduziert werden. Um eine kleinere Permittivität der optimalen Zusatzschicht zu erhalten, müsste deren Höhe reduziert werden.

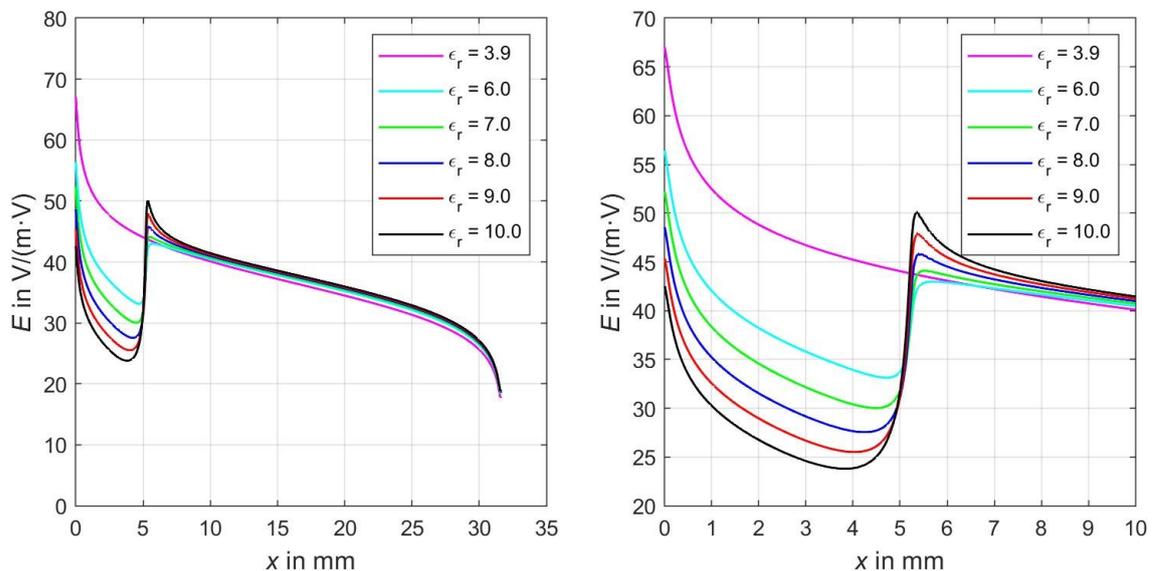


Bild 4.7: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 1 mit 5-mm-Feldsteuerelement, Variation der Permittivität

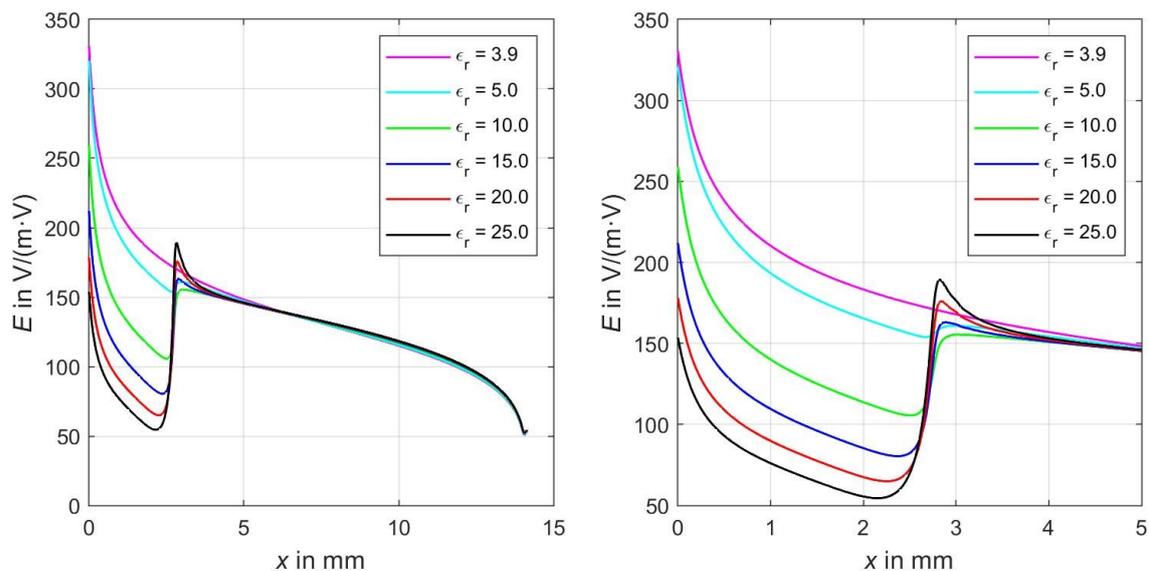


Bild 4.8: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 2 mit 2-mm-Feldsteuerelement, Variation der Permittivität

4.4.3 Minimale Feldstärke bei gegebener Permittivität

Wenn die Gesamthöhe und die Permittivität der beiden Bereiche eines zweischichtigen Kegelstumpfes vorgegeben sind, wird eine Optimierung hinsichtlich der maximal auftretenden Feldstärke durch die Veränderung des Verhältnisses der beiden Schichthöhen zueinander erreicht. Für die Berechnung in ElecNet wurde für die Permittivität des Grundmaterials mit $\epsilon_r = 3,9$ (high temp v2) und die der oberen Schicht mit $\epsilon_r = 6,1$ (7,5 Vol.-% BaTiO₃) gewählt.

Aus dem Feldstärkeverlauf in Bild 4.9 ist ersichtlich, dass beim Kegelstumpf des Typ 1 eine Schichthöhe zwischen 0,5 mm und 1 mm zur geringsten Maximalfeldstärke führt. Durch die Einbringung der Zusatzschicht kann die maximal auftretende Feldstärke um etwa 20 % verringert werden.

Beim Kegelstumpf Typ 2 beträgt die optimale Schichthöhe ca. 0,1 mm (Bild 4.10), dies führt zu einer Reduzierung der Maximalfeldstärke um ca. 20 % gegenüber dem Kegelstumpf ohne Zusatzschicht.

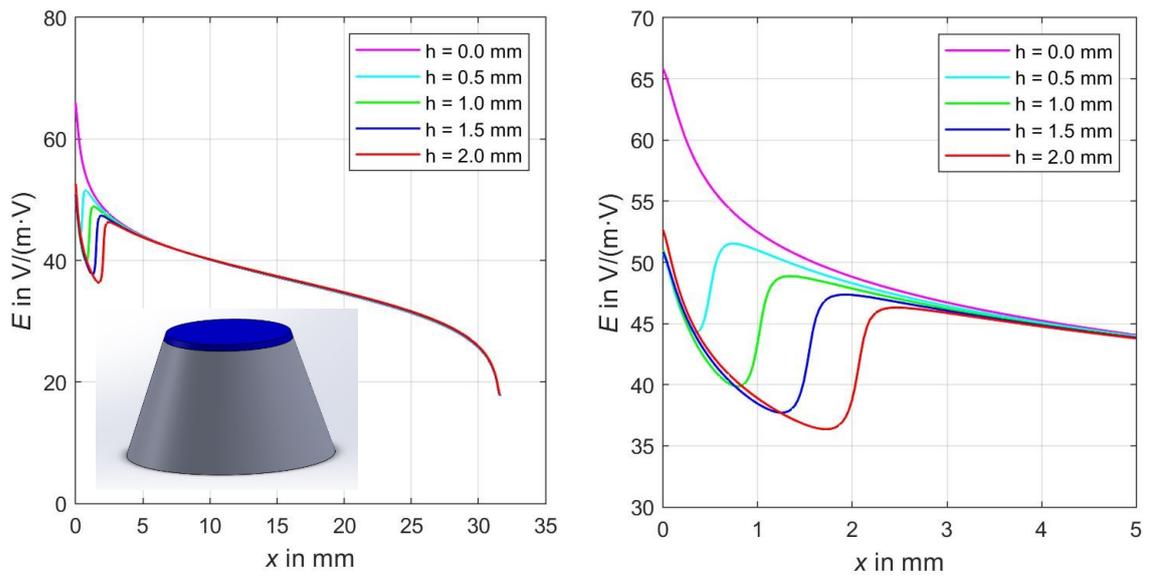


Bild 4.9: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 1 mit Feldsteuerelement, Variation der Schichthöhe

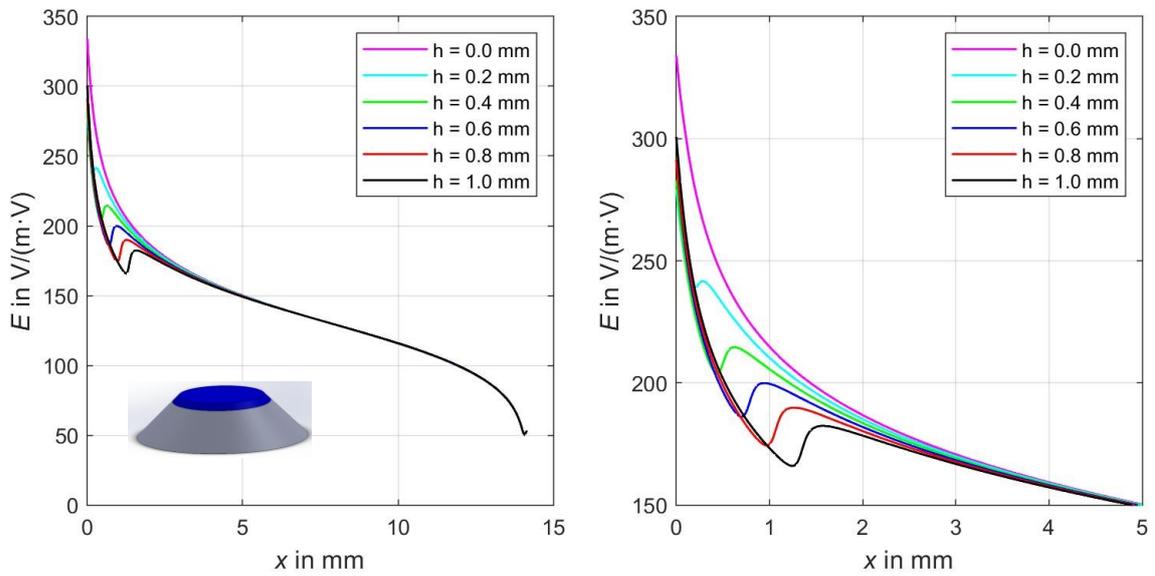


Bild 4.10: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 2 mit Feldsteuerelement, Variation der Schichthöhe

5 Eingesetzte Messverfahren

5.1 Ziele der Messungen

Das Ziel der Messungen ist die Charakterisierung der verwendeten Materialien und Verfahren, sowie der feldsteuernden Wirkung durch die FGM-Elemente. Differenziert wird dabei zwischen dem reinen Harz und jenem mit BaTiO₃-Anteil. Zudem wird nach dem Herstellungsverfahren sowie des Typs der Probe unterschieden. Die Permittivität und der Verlustfaktor werden in Kapitel 5.2 diskutiert. Die Bestimmung der Durchschlagspannung anhand von Plattenproben sowie der Überschlagspannung an den Kegelstumpfproben erfolgt im Kapitel 5.4.

5.2 Untersuchung der dielektrischen Eigenschaften

5.2.1 Permittivität

Ziel der Messung ist es, einen Zusammenhang zwischen Füllstoff-Anteil und Permittivität herzustellen. Bestimmt wurde die Permittivität an gedruckten sowie gegossenen Plattenproben. Die Plattenproben wurden zur Messung mit Leitsilber beschichtet, um die Auswirkungen eines möglichen Luftspalt zwischen Messelektrode und Prüfling zu unterbinden (Bild 3.4). Die Materialprobe befindet sich zur Messung zwischen zwei Elektroden. An der unteren Messelektrode ist ein geerdeter Schutzring angebracht, welcher die Oberflächenströme ableitet. Mit dem Dirana-Messsystem des Herstellers Omicron wurde die Kapazität der Elektrodenanordnung bei verschiedenen Frequenzen bestimmt.

Zur Bestimmung der Permittivität der Plattenprobe wurde die Vakuumkapazität C_0 (Gleichung (2)) der Messanordnung nach IEC 62631 bestimmt. Dazu muss zur Berechnung der wirksamen Fläche A (Gleichung (3)) der Faktor B iterativ nach IEC 62631 bestimmt werden [24]. Aus der gemessenen Kapazität C (Gleichung (1)) und der berechneten C_0 wird die Permittivität ϵ_r bestimmt. Der für B ermittelte Wert für den in Bild 5.1 dargestellten Messelektrodenaufbau für eine 1 mm dicke Plattenprobe bei einer Permittivität $\epsilon_r = 3,6$ beträgt $B = 0,78$. Der Faktor B wurde für jede gemessene Probendicke mit der Zielwertsuche in Excel bestimmt.

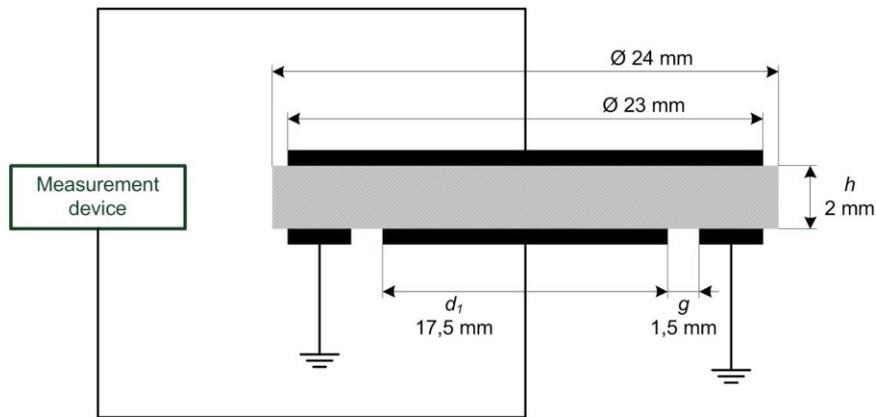


Bild 5.1: Elektrodenaufbau mit Schutzring zur Kapazitätsbestimmung

$$C = C_0 \cdot \varepsilon_r \quad (1)$$

$$C_0 = \varepsilon_0 \cdot \frac{A}{h} \quad (2)$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1 + B \cdot g)^2 \quad (3)$$

Aus der mit dem Dirana-Messsystem gemessenen Kapazität und der aus der Geometrie bestimmten Kapazität C_0 wurde die Permittivität des Materials berechnet. Die Permittivität mit Hilfe des Dirana-Messsystems wurde vorerst an 80-mm-Plattenproben mit einer Elektrodenanordnungen mit einem Außendurchmesser von 70 mm bestimmt. Da auch eine Vielzahl von gegossenen Plattenproben untersucht wurde und sich die Herstellung von großen gegossenen Plattenproben als problematisch herausstellte, wurde auf eine Elektrodenanordnung für Plattenproben mit 24 mm Durchmesser umgestellt (Bild 5.3). Dadurch konnte der benötigte Materialbedarf für die Prüflinge selbst sowie für das Leitsilber deutlich reduziert werden. Die Messungen wurden bei einer Spannung von 200 V und in einem Frequenzbereich zwischen 10 mHz und 1 kHz durchgeführt. Bei einer Prüffrequenz von 50 Hz werden keine Messwerte ermittelt, da es sonst leicht zu unerwünschten Beeinflussungen durch die Netzfrequenz kommen kann. Der verwendete Messaufbau ist in Bild 5.2 dargestellt.

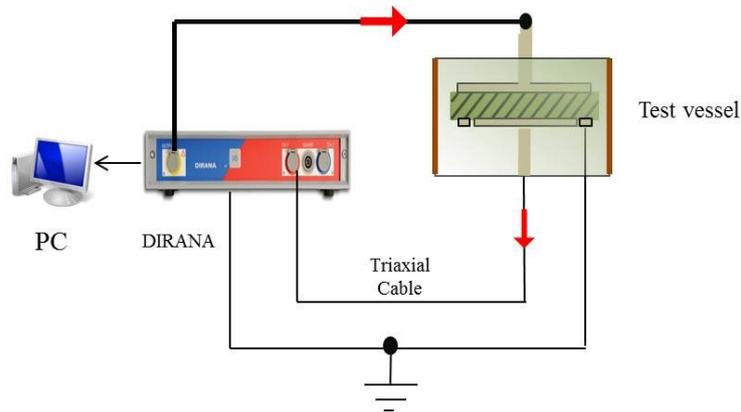


Bild 5.2: Dirana-Messaufbau



Bild 5.3: Messelektrode mit Schutzring

5.2.2 Verlustfaktor

Der Verlustfaktor ist sowohl von der elektrischen Feldstärke als auch von der Frequenz abhängig, daher erfolgte die Bestimmung auf zwei Arten. Einerseits mit Hilfe des Dirana-Messsystems, gleichzeitig mit der Ermittlung der Kapazität C_0 , andererseits mit der Omicron MI600-Messbrücke (Bild 5.4). Die Bestimmung des Verlustfaktors erfolgte mit zwei unterschiedlichen Methoden, da mit dem Dirana-Messsystem die Messspannung auf 200 V begrenzt ist. Um die Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors für diese Prüflingstypen zu bestimmen, sind jedoch deutlich höhere Spannungen notwendig.

Die Messung des Verlustfaktors mit der MI600-Messbrücke erfolgte an Kegelstümpfen, welche zwischen zwei Elektroden mit einem Durchmesser von 75 mm eingespannt wurden (Bild 5.5). Um die Prüflinge möglichst mittig an den Elektroden auszurichten, wurde eine 3D-gedruckte Zentriervorrichtung verwendet.

Die Messung des Verlustfaktors erfolgte unter Umgebungsluft sowie bei Vorversuchen in Stickstoff bei einem absoluten Druck von 7 bar (Bild 5.6). Um einen Überschlag bei der Messung zu verhindern, wurde die Spannung auf ein Drittel der zu erwartenden Überschlagsspannung begrenzt.

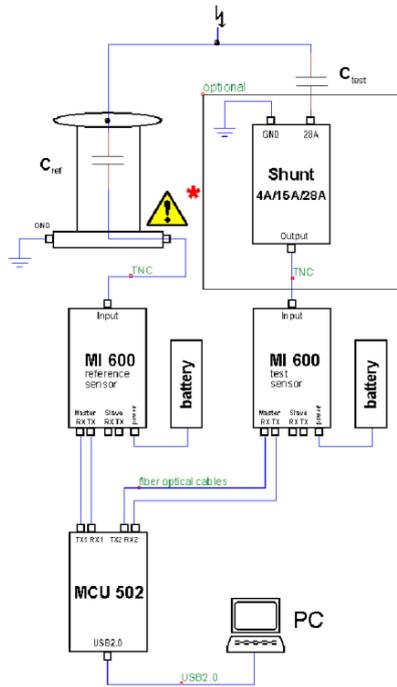


Bild 5.4: Messschaltung
Verlustfaktormessung mit Omicron
Messbrücke MI600



Bild 5.5: Kegelstumpfprobe zwischen
Messelektroden



Bild 5.6: Verlustfaktormessung an Kegelstümpfen im Druckgefäß

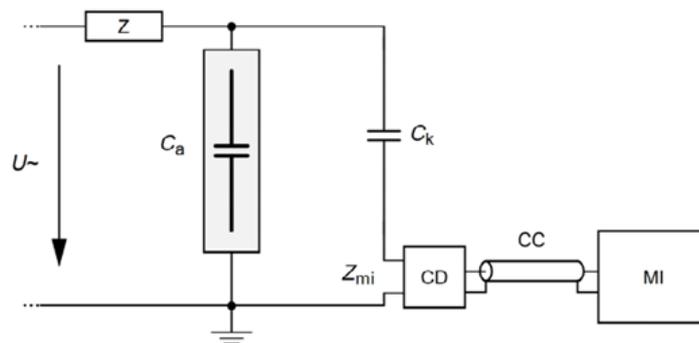
5.3 Teilentladungsmessung

Teilentladungen (TE) sind ein wichtiges Kriterium für die Qualitätskontrolle von Isoliersystemen. TE sind elektrische Entladungen, welche die Isolierung zwischen den Elektroden nur teilweise überbrücken. Dies kann sowohl innerhalb eines Isolators, z. B. in Hohlräumen, sowie auch an der Isolatoroberfläche auftreten.

Die TE-Messungen wurden nach IEC 60270 mit der Messschaltung aus Bild 5.7 durchgeführt. Um den Ankoppelvierpol bei einem Durchschlag am Prüfling nicht zu gefährden,

wird dieser erdseitig in Serie zum Koppelkondensator geschaltet. Eine weitere mögliche Schaltung sieht die Serienschaltung von Prüfling und Ankoppelvierpol vor, diese wurde hier nicht verwendet, da ein Durchschlag des Prüflings zur Folge hat, dass der Ankoppelvierpol mit Hochspannung belastet wird.

Die TE-Messung erfolgte breitbandig mit dem Omicron MPD600-Messsystem nach IEC 60270 im Frequenzbereich von $100 \text{ kHz} < f < 900 \text{ kHz}$. Die Kalibrierung erfolgte mit 5 pC , der Grundstörpegel lag bei allen Messaufbauten unter 1 pC . Begleitend zur TE-Messung erfolgte die Messung der Durchschlagfestigkeit (Kapitel 5.4).



$U\sim$...	Hochspannungsversorgung	Z_{mi} ...	Eingangsimpedanz des Messsystems
C_a ...	Prüfling	C_k ...	Koppelkondensator
MI...	Messgerät	CD...	Koppeleinheit (AKV)
CC...	Verbindungskabel	Z...	Filter

Bild 5.7: TE-Messung mit Parallelankopplung [25]

5.4 Durchschlagfestigkeit

5.4.1 Durchschlagspannung

Um die Durchschlagfestigkeit der gedruckten Prüflinge zu bestimmen, wurden mit den 50-mm-Plattenproben im Zuge der TE-Messung Durchschlagversuche durchgeführt. Dazu wurden die Plattenproben in einem Isoliermedium zwischen zwei Elektroden eingespannt und die Spannung bis zum Durch- oder Überschlag der Plattenprobe erhöht.

Als Isoliermedium wurde in Vorversuchen Vakuum sowie Stickstoff unter einem absoluten Druck von 7 bar verwendet. Versuche mit Plattenproben bei der Verwendung von zylindrischen Elektroden (75 mm unten, 25 mm oben) führten allerdings zu keinen Durchschlägen, sondern zu Gleitentladungen auf der Oberfläche. Eine Erhöhung des Drucks war mit dem verwendeten Druckgefäß nicht möglich.

In allen weiteren Durchschlagversuchen wurde Öl (Nynas Nytro 4000 A) als Isoliermedium verwendet. Da es bei den zylindrischen Elektroden weiterhin zu Gleitentladungen kam, wurden diese durch VDE-Kalotten ersetzt. Der Aufbau ist dadurch mit jenem aus [13]

vergleichbar, bei welchem Durchschlagversuche an Plattenproben zwischen zwei Kugelelektroden mit einem Durchmesser von 25 mm in Öl durchgeführt wurden. Um die Plattenproben zwischen den VDE-Kalotten auszurichten, wurde eine 3D-gedruckte Vorrichtung verwendet (Bild 5.8, Bild 5.9). Der verwendete Messaufbau ist in Bild 5.10 dargestellt.

Zur Bestimmung der Durchschlagfeldstärke wurde nach dem Durchschlag die Dicke der Plattenprobe mit einer Mikrometerschraube gemessen.

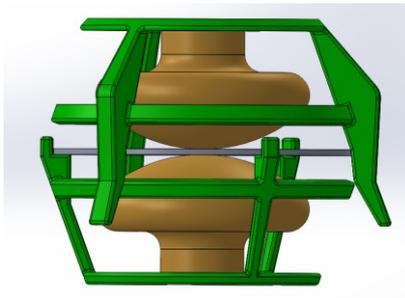


Bild 5.8: Scheibenprobenhalter mit VDE-Kalotten



Bild 5.9: Probenhalter für VDE-Kalotten



Bild 5.10: Messaufbau zur Messung der Durchschlagspannung

5.4.2 Überschlagspannung

Um die Wirkung der Feldsteuerelemente, welche in Kapitel 4.4 optimiert wurden, zu überprüfen, wurde die Überschlagspannung an Kegelstümpfen mit und ohne Feldsteuerelementen bestimmt. Die Messung erfolgte zwischen zwei Elektroden mit 75 mm Durchmesser. Vorversuche wurden unter Stickstoff bei einem absoluten Druck von 7 bar durchgeführt (Bild 5.11). Alle weiteren Versuche wurden unter Umgebungsluft durchgeführt. Ein Vorteil, die Versuche unter Umgebungsbedingungen durchzuführen besteht, in der wesentlich kürzeren Umbauzeit beim Wechsel von Prüflingen.

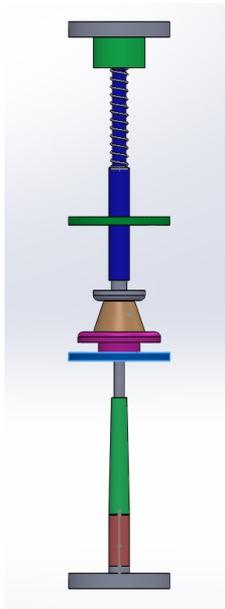


Bild 5.11: Innenaufbau des Druckgefäßes zur Bestimmung der Überschlagspannung

6 Ergebnisse der Messungen an Scheibenproben

6.1 Übersicht der durchgeführten Messungen an Scheibenproben

Ein Überblick über die durchgeführten Messungen an 3D-gedruckten Plattenproben ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Messungen an 3D-gedruckten Scheibenproben

	Material	„high temp v2 Harz“				„high temp v2 Harz“ + 7,5 Vol.-% BaTiO ₃		
Abmess.	Durchmesser in mm	24	50	50	80	24	50	80
	Höhe in mm	1	1	2	1	1	1	1
Anzahl	tan δ	5			7	5		3
	ϵ_r	5			7	5		3
	Durchschlagversuche		30	10	10		5	5

Zusätzlich wurden jeweils 4 Scheibenproben mit 24 mm Durchmesser und einer Höhe von 0,5 mm mit 10, 20, 30 und 40 Vol.-% BaTiO₃-Anteil gegossen, an welchen ebenfalls die Permittivität und der Verlustfaktor gemessen wurden.

6.2 Ergebnisse der dielektrischen Untersuchungen an Scheiben

6.2.1 Randbedingungen

Die dielektrischen Untersuchungen wurden an Plattenproben mit 24 und 80 mm Durchmesser durchgeführt. Die Messungen zur Abhängigkeit von Permittivität und Verlustfaktor vom Füllstoffanteil erfolgten an gegossenen, alle weiteren Messungen an 3D-gedruckten Scheiben. Details zur verwendeten Messschaltung, der Elektrodenanordnung sowie zu Berechnungen sind in Kapitel 5.2 beschrieben. Die Messungen erfolgten mit dem Dirana-Messsystem bei einer Spannung von 200 V.

6.2.2 Abhängigkeit der Permittivität und des Verlustfaktors vom BaTiO₃-Anteil

An den in den Vorversuchen gegossenen Plattenproben mit unterschiedlichem BaTiO₃-Anteil (Kapitel 3.1.2) wurde mit dem Dirana-Messsystem die Permittivität und der Verlustfaktor bestimmt. Die Auswertung der Abhängigkeiten vom Füllstoffgehalt erfolgte bei einer Frequenz von 50 Hz. Mit zunehmendem Füllstoff-Anteil steigt auch die Permittivität an (Bild 6.1). In [13] wurde ebenfalls die Abhängigkeit der Permittivität, in Abhängigkeit des BaTiO₃-Anteils untersucht. Die Messwerte aus den blauen Balken für HT/BT-S (“high temp“ / Barium-Titanat-Small) aus Bild 2.16 zeigen, dass die dort ermittelten Permittivitätswerte

für 0 – 20 Vol.-% Bariumtitanat-Pulver ca. 10 – 25 % geringer sind als die hier ermittelten (Bild 6.1). Dies liegt vermutlich an der unterschiedlichen Partikelgröße des verwendeten Bariumtitanat-Pulvers. Wie in Bild 2.16 ersichtlich, ist die Permittivität der Mischungen mit kleineren Partikeln tendenziell höher. (Durchschnittliche Partikelgröße für BaTiO₃-Small 3,27 µm in [13], hier 0,85 µm bis 1,45 µm)

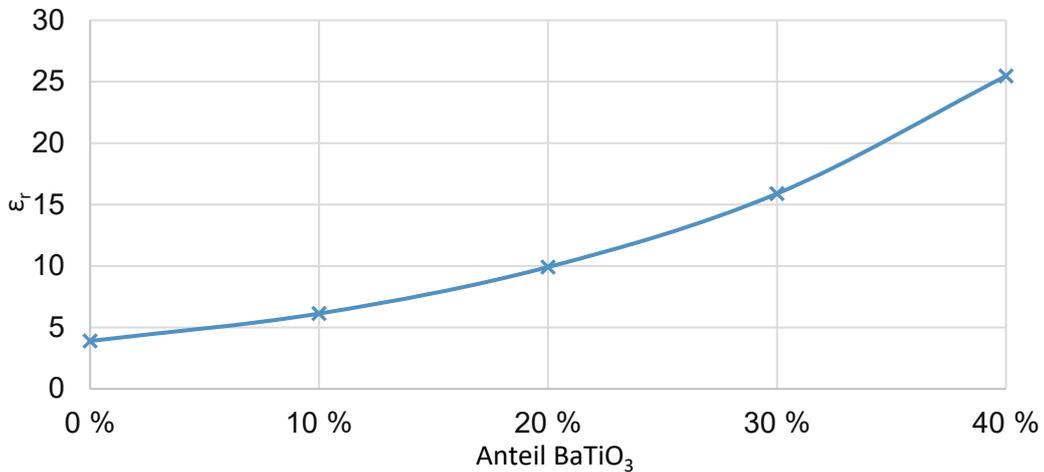


Bild 6.1: Abhängigkeit der Permittivität vom BaTiO₃-Volumenanteil bei 50 Hz

Die Abhängigkeit des Verlustfaktors ist in Bild 6.2 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der Verlustfaktor mit zunehmendem BaTiO₃-Anteil deutlich ansteigt. Hier zeigt der Vergleich mit dem Balkendiagramm aus [13] in Bild 2.17, dass der dort ermittelte Verlustfaktor für HT/BT-S (grün) mit steigendem Füllstoffanteil ebenfalls ansteigt. Die Ergebnisse sind bei Berücksichtigung der unterschiedlichen verwendeten Partikelgrößen sowie Dicken der Plattenproben durchaus vergleichbar. Der hier ermittelte Verlustfaktor ist bei gleicher Konzentration um ca. 30 – 60% höher als jener für HT/BT-S in [13].

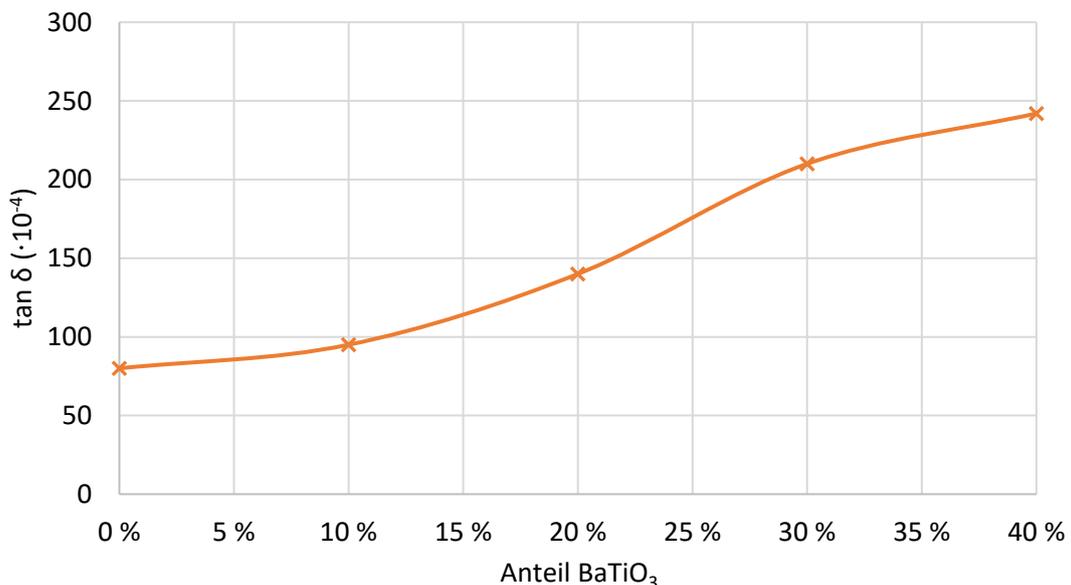


Bild 6.2: Abhängigkeit des Verlustfaktors vom BaTiO₃-Volumenanteil bei 50 Hz

6.2.3 Frequenzabhängigkeit von Permittivität und Verlustfaktors

Die Frequenzabhängigkeit der Permittivität von gedruckten Plattenproben mit und ohne Füllstoffanteil ist in Bild 6.3 dargestellt. Gemessen wurde bei einer Spannung von 200 V. Die Permittivität nimmt bei beiden Verläufen mit steigender Frequenz ab. Bei der Plattenprobe mit BaTiO₃-Anteil ist die Frequenzabhängigkeit stärker ausgeprägt. Dies kann auf die stärkere Frequenzabhängigkeit von BaTiO₃ zurückgeführt werden [26].

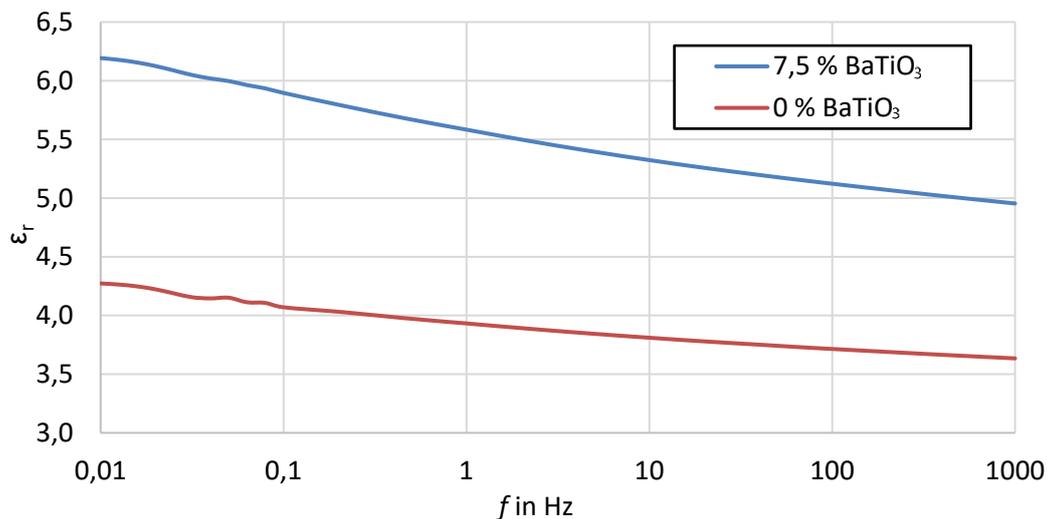


Bild 6.3: Frequenzabhängigkeit der Permittivität von gedruckten Prüflingen mit und ohne Füllstoffanteil

Der Verlustfaktor nimmt mit steigender Frequenz ab (Bild 6.4). Der Verlustfaktor der Proben mit BaTiO₃-Anteil ist etwa 50 % höher als jener der Proben aus reinem Harz.

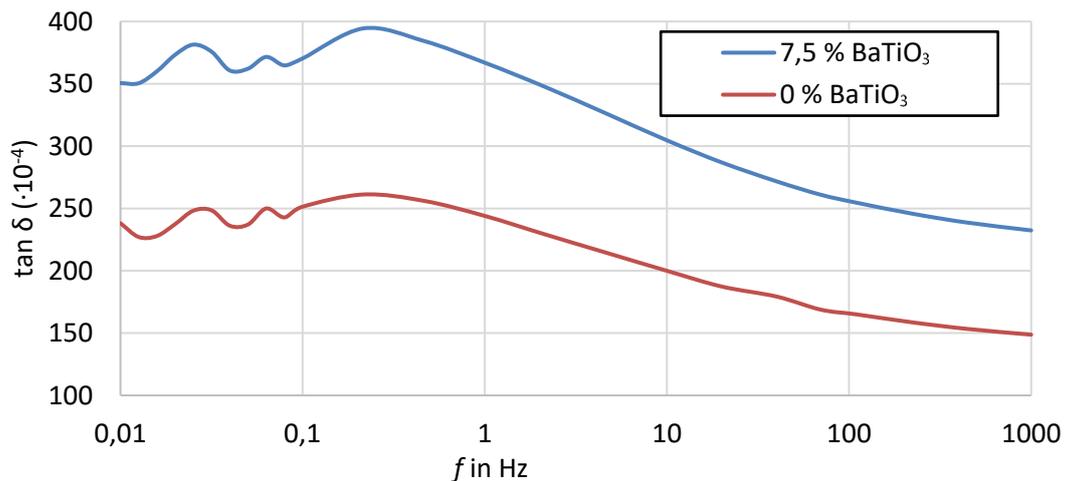


Bild 6.4: Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors von gedruckten Prüflingen mit und ohne Füllstoffanteil

6.2.4 Zusammenfassung

Die gewünschte Veränderung der Permittivität durch Beimischen von BaTiO₃-Pulver wurde durch die Ergebnisse bestätigt. Bei den gedruckten Plattenproben mit 7,5 Vol.-% BaTiO₃ ist der Verlustfaktor bei 50 Hz ca. 100 % höher, bei jenen ohne Zusatzstoff. Der Vergleich der Verlustfaktoren von gegossenen und gedruckten Plattenproben zeigt, dass bei gleichem Füllstoff-Anteil der Verlustfaktor der gedruckten Proben etwa 300 % höher ist als jener der gegossenen (Bild 6.2 und Bild 6.4).

6.3 Ergebnisse Durchschlagsspannungsversuche an Scheiben

6.3.1 Ergebnisse Durchschlagsspannung in Öl

Die Durchschlagmessungen wurden mit dem in Kapitel 5.4 beschriebenen Aufbau in Öl zwischen zwei VDE-Kalotten an 3D-gedruckten Scheiben durchgeführt. Ein typischer Verlauf der Durchschlagsspannungsprüfung an einer 1 mm dicken gedruckten Scheibenprobe mit 50 mm Durchmesser aus "high temp v2 Material" ist in Bild 6.5 dargestellt. Die Spannung wurde mit 1 kV/s gesteigert. Bei 28,8 kV kam es bei dieser Probe (Probe 103) zum Durchschlag und die Messung wurde automatisch beendet. Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass mit 25 kV beginnend sehr hohe Teilentladungsimpulse auftraten, bevor es zum Durchschlag der Probe kam.



Bild 6.5: Spannungsverlauf der Durchschlagsspannungsprüfung an Scheibenprobe Nr. 103

Das Beimischen von BaTiO₃-Pulver hat die Durchschlagfestigkeit der Plattenproben kaum beeinflusst, wie aus Bild 6.6 hervorgeht. Die gedruckten Plattenproben mit Füllstoff-Anteil waren um etwa 10 % dicker als jene aus reinem Harz. An jeder Plattenprobe wurde die Materialdicke an der Durchschlagstelle mit einer Mikrometermessschraube gemessen und daraus die Durchschlagfestigkeit für die jeweilige Probe errechnet. Der Vergleich mit Bild 2.15 zeigt, dass dort die Durchschlagfestigkeit mit steigendem Füllstoffgehalt abnimmt. Die Abnahme der Durchschlagfestigkeit in [13] beträgt ca. 8 % bei 5 Vol.-% Füllstoffanteil und 32 % bei 10 Vol.-% Füllstoffanteil. Daraus würde sich für die hier verwendeten 7,5 Vol.-% BaTiO₃ abgeschätzt eine Verringerung um ca. 20 % ergeben. Im vorliegenden Fall ergibt sich jedoch eine Steigerung um ca. 5 %. Beim Vergleich der Durchschlagfestigkeit für

7,5 Vol.-%-BaTiO₃-Anteil liegt diese in [13] bei etwa 50 kV/mm (genähert) im Vergleich zu den hier erhaltenen 31 kV/mm. Die in [13] hergestellten Proben wurden gegossen, sind 0,5 mm dick und wurden zwischen Kugeln mit 25 mm Durchmesser auf die Durchschlagfestigkeit hin untersucht. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

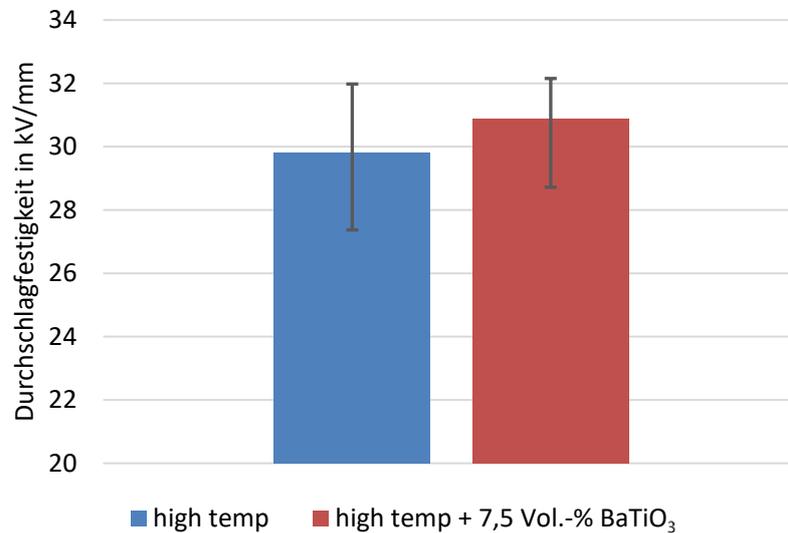


Bild 6.6: Durchschlagfestigkeit der Plattenproben

6.3.2 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass die Beimischung von BaTiO₃-Pulver zu keiner signifikanten Änderung der Durchschlagfestigkeit der 3D-gedruckten Proben führte. Dies steht in einem gewissem Widerspruch zu den Ergebnissen aus [13] (Bild 2.15).

7 Ergebnisse der Messungen an Kegelstumpfproben

7.1 Übersicht der durchgeführten Messungen an Kegelstumpfproben

Ein Überblick über die durchgeführten Messungen an Kegelstümpfen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht über die an Kegelstümpfen durchgeführten Messungen

		Kegelstumpf Typ 1			Kegelstumpf Typ 2			
Schichthöhe in mm		0	1	2	0	0,4	0,8	1,6
Anzahl	TE	10	3	3	4	2	4	4
	tan δ	10	3	3	4	2	4	4
	Überschlag	10	3	3	4	2	4	4

7.2 Ergebnisse dielektrische Untersuchungen an Kegelstümpfen

7.2.1 Randbedingungen

Die dielektrischen Untersuchungen erfolgten an Kegelstümpfen des Typs 1 und Typs 2 mit und ohne Feldsteuerelement. Die Messungen zur Bestimmung der Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors wurden mit der Omicron MI600-Messbrücke durchgeführt (Kapitel 5.2.2).

7.2.2 Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors

Die Messung der Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors erfolgte in Luft. Für den Kegelstumpf Typ 1 wurde die Spannung dabei bis auf 10 kV gesteigert, bei Typ 2 bis auf 7,5 kV.

Die Messergebnisse zur Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors an Kegelstümpfen des Typ 2 mit einer 1,6 mm hohen Zusatzschicht und mit 7,5 Vol.-% BaTiO₃ Pulver sind in Bild 7.1 dargestellt. Es zeigt sich, dass im betrachteten Spannungs- bzw. Feldstärkebereich keine Abhängigkeit des Verlustfaktors von der Höhe der Feldstärke festzustellen ist, dies trifft auf alle gemessenen Kegelstümpfe zu. In Tabelle 4 sind die Mittelwerte des Verlustfaktors für die Kegelstümpfe mit unterschiedlichen Schichthöhen angeführt.

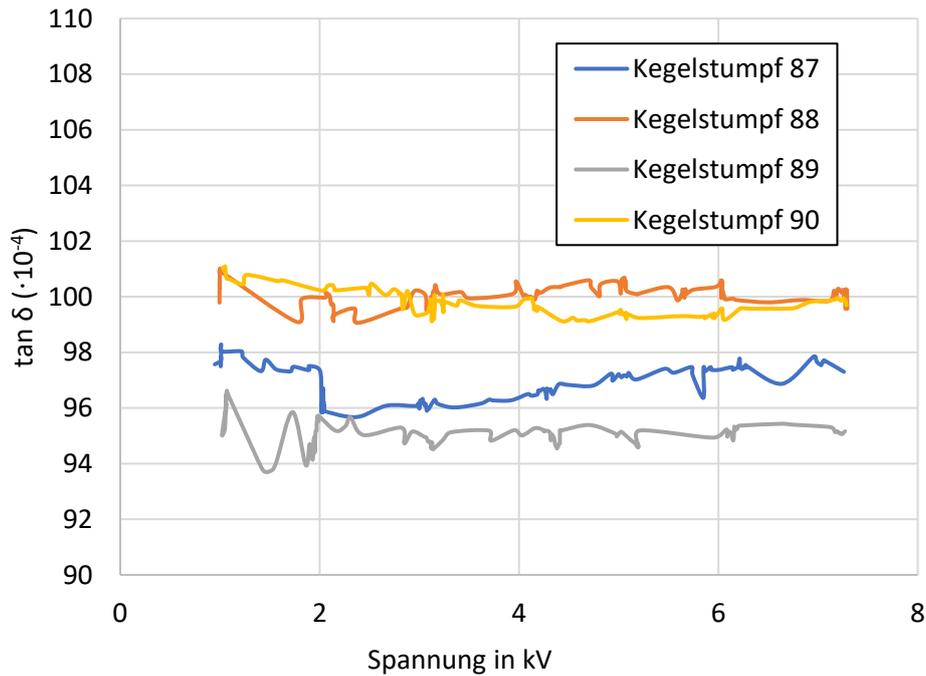


Bild 7.1: Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors eines Kegelstumpfes des Typ 2 mit einer Schichthöhe von 1,6 mm

Tabelle 4: mittlere Verlustfaktoren der Kegelstumpfe mit und ohne FGM-Element für den Feldstärkebereich $E = 33 - 330$ V/mm (Typ 1) und $E = 100 - 750$ V/mm (Typ 2)

Kegelstumpf Typ 1		Kegelstumpf Typ 2	
FGM-Schichthöhe	$\tan \delta$	FGM-Schichthöhe	$\tan \delta$
mm	10^{-4}	mm	10^{-4}
0	100	0	110
1	125	0,4	90
2	125	0,8	100
		1,6	98

7.2.3 Zusammenfassung

Es konnte bis zu einer Feldstärke von 750 V/mm keine Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors festgestellt werden. Um das Messsystem nicht zu gefährden, wurde die Spannungsobergrenze so gewählt, dass es bei den Messungen zu keinen Überschlängen kommt. Durch die Verwendung eines Isoliergases wäre es möglich, den Verlustfaktor auch bei höheren Spannungen zu messen.

7.3 Ergebnisse TE-Messung

7.3.1 Randbedingungen

Die TE-Messungen wurden mit der Omicron MPD600-Messsystem an Kegelstümpfen des Typs 1 und Typs 2 durchgeführt (Kapitel 5.3). Dabei wurde die Spannung stufenweise bis zum Überschlag erhöht.

7.3.2 Kegelstumpf Typ 1 unter Stickstoff

Das Ergebnis der TE-Messung an einem Kegelstumpf des Typs 1 ohne Feldsteuerelement unter Stickstoff bei 8 bar ist in Bild 7.2 dargestellt. Dabei wurde die Spannung automatisiert in 10-kV-Stufen von 30 kV bis 100 kV erhöht. In diesem Fall kam es zu keinem Überschlag. Wie aus dem Verlauf der Teilentladungen erkennbar ist, sind diese sehr gering und liegen größtenteils unter 1 pC. Die höheren TE-Impulse treten bei der Steigerung der Spannung auf und sind auf den Antrieb des Regeltransformators zurückzuführen. Die TE-Einsetz- und Überschlagspannung an den Kegelstümpfen des Typ 1 ohne Feldsteuerelement welche am EMS und IIM hergestellt wurden sind in Bild 7.3 dargestellt.

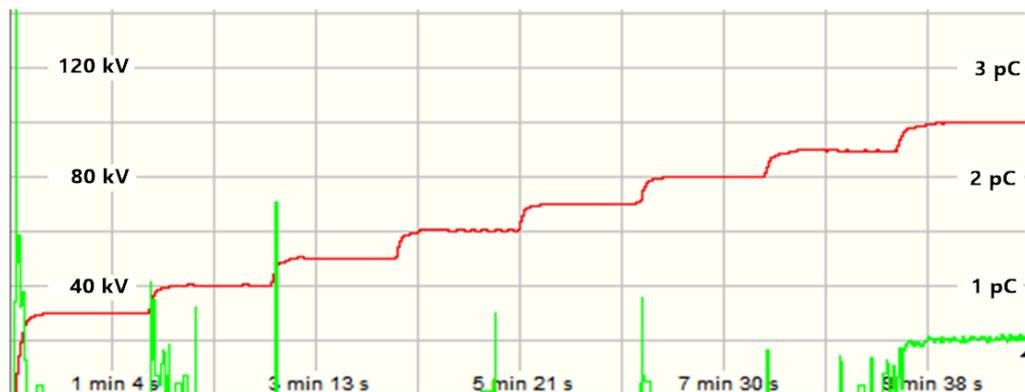


Bild 7.2: TE-Messung an einem Kegelstumpf des Typ 1 ohne Füllstoffanteil (Prüfling 6)

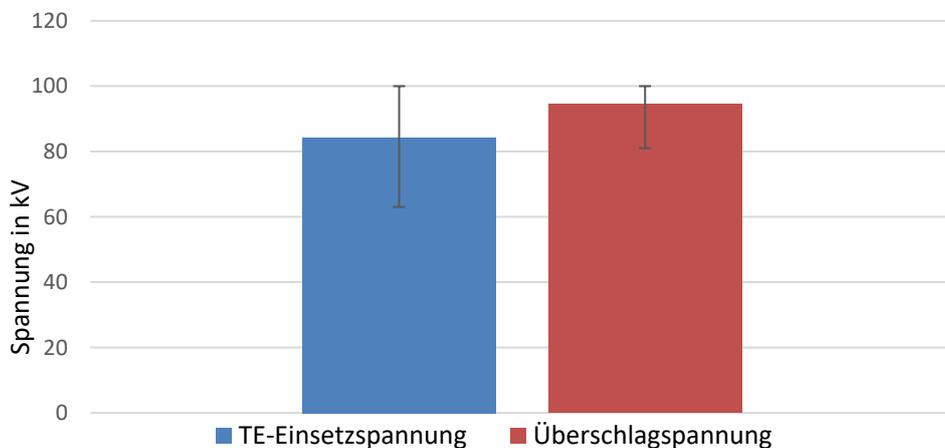


Bild 7.3: TE-Einsetz- und Überschlagspannung an Kegelstümpfen Typ 1 unter Stickstoff

7.3.3 TE-Messungen an Kegelstümpfen in Luft

Beispielhaft für die TE-Messung an Kegelstümpfen mit und ohne Feldsteuerelement sind die Spannungs- und Teilentladungsverläufe von einem Kegelstumpf des Typ 1 ohne Feldsteuerelement und einem mit Feldsteuerelement mit einer Höhe von 2 mm in Bild 7.4 und Bild 7.5 dargestellt.

Beim Vergleich der Verläufe zeigt sich, dass bis zum Erreichen der Überschlagspannung keine TE über 1 pC auftreten.

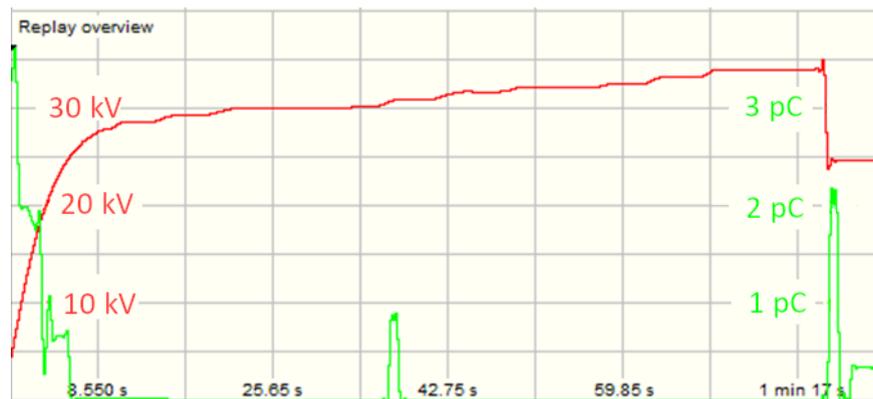


Bild 7.4: TE-Messung an Kegelstumpf ohne Feldsteuerelement (Prüfling 04)

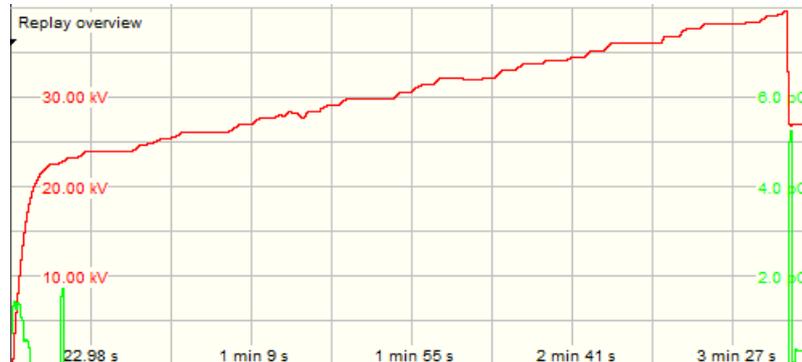


Bild 7.5: TE-Messung an Kegelstumpf mit 2 mm hohem Feldsteuerelement (Prüfling 76)

Das Aufbringen der Feldsteuerschicht führt bis zum Erreichen der Überschlagspannung in Luft tendenziell zu einer leichten Erhöhung der TE-Einsatzspannung, dies ist auch in den folgenden Balkendiagrammen ersichtlich (Bild 7.6, Bild 7.7). Für eine signifikante Aussage überschneiden sich die dargestellten Fehlerbalken jedoch zu stark.

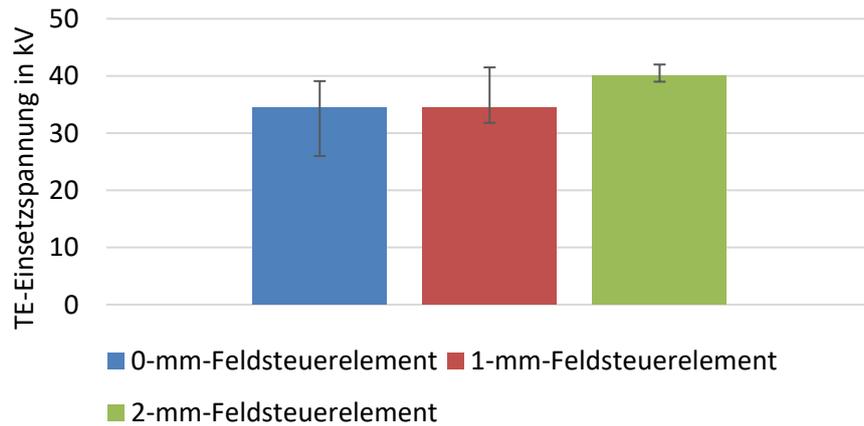


Bild 7.6: TE-Einsatzspannung bei Kegelstümpfen des Typ 1 mit unterschiedlich hohen Feldsteuerelementen

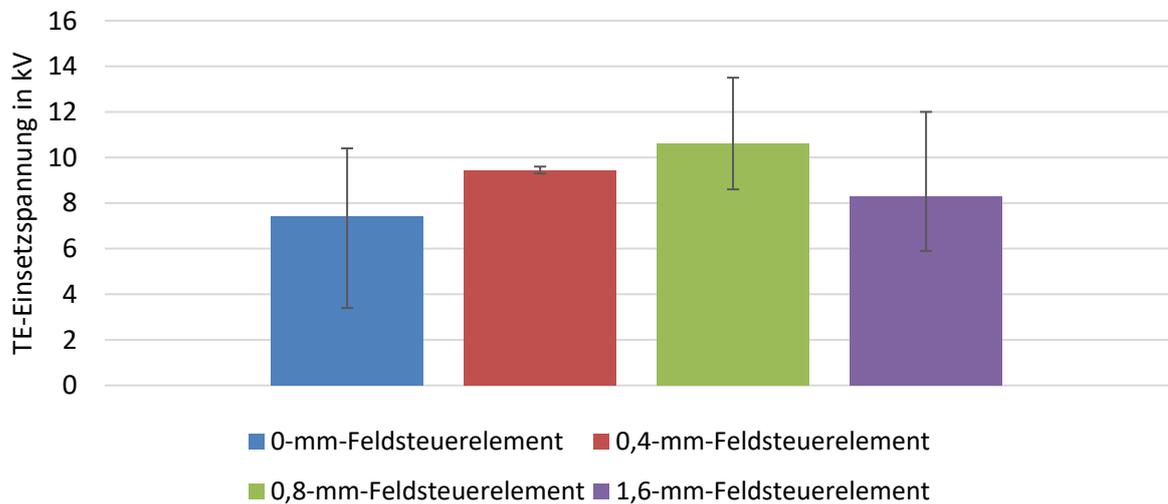


Bild 7.7: TE-Einsatzspannung bei Kegelstümpfen des Typ 2 mit unterschiedlich hohen Feldsteuerelementen

7.3.4 Zusammenfassung

Es zeigte sich, dass die Feldsteuerelemente zu keiner signifikanten Erhöhung der TE-Einsatzspannung führen und die beiden verwendeten Kegelstumpftypen vergleichbare Ergebnisse lieferten. Bei sämtlichen Messungen wurden keine inneren TE festgestellt. Angesichts der geringen Anzahl an Prüflingen und der Überlappung der Fehlerbalken sind weiterführende Untersuchungen notwendig, um eine abgesicherte Aussage über die Wirkung der Feldsteuerelemente treffen zu können.

7.4 Ergebnisse Überschlagsspannungsversuche an Kegelstümpfen

7.4.1 Allgemeines zur Messung

Überschlagmessungen an Kegelstümpfen des Typ 1 wurden in Vorversuchen unter Stickstoff bei einem Druck von 7 bar abs. in einem Druckgefäß, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, durchgeführt. Die Versuche wurden mit Wechselspannung bei 50 Hz durchgeführt. Die Spannung wurde in Stufen von 10 kV gesteigert, bis es zum Überschlag kam, oder die maximal verfügbare Spannung von 100 kV erreicht wurde.

Die Messung der Überschlagsspannung an Kegelstümpfen mit Feldsteuerelementen erfolgte unter Luft. Die Spannung wurde in Stufen von 2 kV gesteigert, bis es zum Überschlag kam. Der verwendete Aufbau ist in Kapitel 5.4.2 beschrieben.

7.4.2 Ergebnisse Überschlagversuche in Stickstoff

Stellvertretend ist in Bild 7.8 der Spannungsverlauf bei der Ermittlung der Überschlagsspannung an einem Kegelstumpf aus "high temp v2 Material" dargestellt. Nach dem Erreichen der 80-kV-Spannungsstufe kam es zum Überschlag. Die Aufzeichnung stoppt automatisch mit dem Eintreten des Überschlags. Aus den mitgemessenen TE-Impulsen ist ersichtlich, dass sich der Überschlag bereits durch verstärkt auftretende Teilentladungen ankündigte.

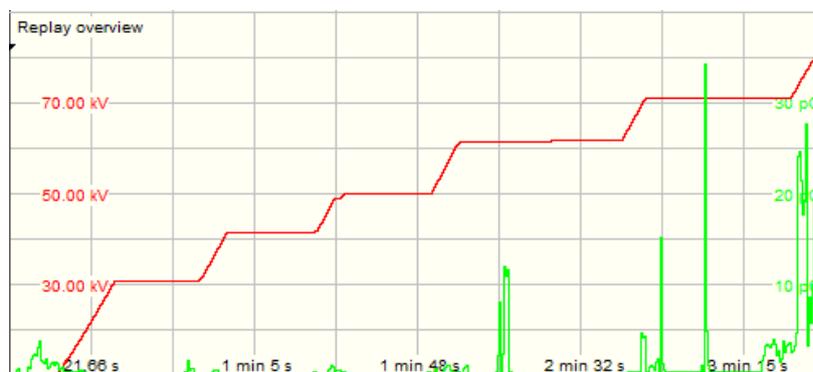


Bild 7.8: Überschlagversuch an Kegelstumpf Typ 1 unter Stickstoff (Prüfling 06)

7.4.3 Ergebnisse Überschlagversuche in Luft

Die Überschlagversuche in Luft an Kegelstümpfen wurden gemeinsam mit der TE-Messung durchgeführt. Der Spannungsverlauf bis zum Überschlag an Kegelstümpfen ohne und mit Feldsteuerelement ist in Bild 7.4 und Bild 7.5 dargestellt. Tendenziell lässt Bild 7.9 auf eine Erhöhung der Überschlagsspannung mit steigender Schichthöhe schließen. Für die mit ElecNet berechnete optimale Schichtdicke von 1 mm für Kegelstumpf Typ 1 ergibt sich eine geringere Überschlagsspannung als für eine Schichthöhe von 2 mm. In Bild 7.10 ist kein Zusammenhang zwischen der Schichthöhe und Überschlagsspannung erkennbar.

In ElecNet wurde auf die Minimierung des Maximalwertes der auftretenden Feldstärke hin optimiert, dadurch ergeben sich zwei lokale Maxima, im Zwickelpunkt, sowie am Übergangspunkt der Schichten. Da der Überschlag an der Hochspannungselektrode startet, ist die Höhe der auftretenden Feldstärke im Schichtübergang bei gleichen Feldstärkemaximalwerten nicht der Ausgangspunkt des Überschlags. Zur Erhöhung der Überschlagfestigkeit könnte die Feldstärke an der Schichtgrenze höher gewählt werden als jene im Zwickelpunkt.

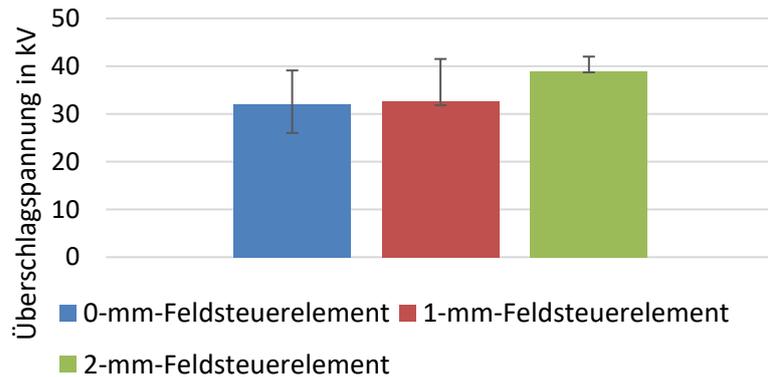


Bild 7.9: Überschlagspannung an Kegelstümpfen des Typ 1 bei verschiedenen Höhen der feldsteuernden Schicht

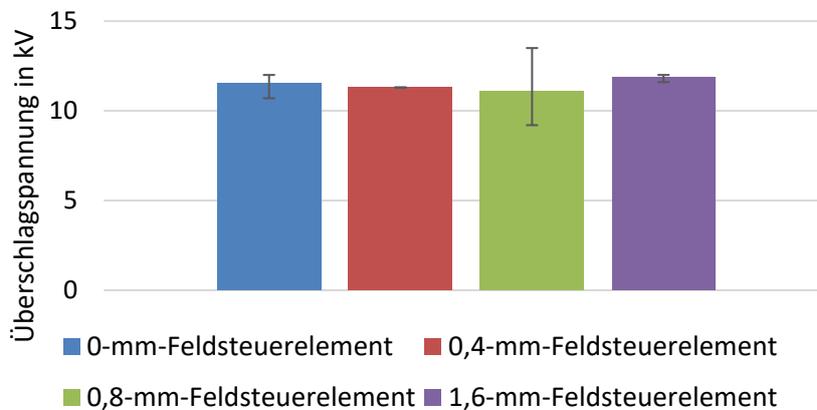


Bild 7.10: Überschlagspannung an Kegelstümpfen des Typ 2 bei verschiedenen Höhen der feldsteuernden Schicht

7.4.4 Zusammenfassung

Eine Erhöhung der Überschlagspannung durch die Feldsteuerelemente trat nicht in jenem Ausmaß auf, wie aus der Simulation in Kapitel 4.4 hervorgeht. Dies könnte auch auf den Optimierungsansatz in ElecNet zurückzuführen sein, bei welchem die Feldstärkemaxima im Zwickelpunkt sowie an der Schichtgrenzen dieselben sind. Die Tatsache, dass der Überschlag an der Hochspannungselektrode startet, wurde in der ursprünglichen Auslegung nicht berücksichtigt.

8 Ausblick

8.1 Weitere mögliche Untersuchungen

Elektrische Werkstoffeigenschaften

- Untersuchung der Temperaturabhängigkeit von Permittivität und Verlustfaktor bei verschiedenen Füllstoffanteilen an gedruckten Prüflingen
- Veränderung der Leitfähigkeit bei FGM-Isolatoren mit entsprechenden Füllstoffen für Gleichspannungsanwendungen
- Untersuchung des Einflusses der Korngröße und Form des Füllstoffs auf die elektrischen Eigenschaften
- Versuche mit alternativen Isoliergasen, um höhere Überschlagspannungen für eine bessere Differenzierbarkeit der Messergebnisse zu erreichen

Mechanische Werkstoffeigenschaften

- Untersuchungen der Temperaturabhängigkeit von Viskosität und Aushärteverhalten bei verschiedenen Füllstoffanteilen

Fertigung

- Versuche zum maximal druckbaren Füllstoffanteil, um höhere Permittivitätswerte zu erreichen
- Erhöhung der Schichtanzahl, um die Feldsteuerung zu verbessern und sich einem gleichmäßigen Materialübergang anzunähern
- Verwendung von anderen auf dem Markt verfügbaren 3D-Druckharzen

8.2 Erweiterung des Drucksystems

Fertigung eines Drucksystems basierend auf dem MSLA-Verfahren.

1. Mischen von reinem Harz und Harz mit hohem Füllstoffanteil mit einem Statikmischer
2. Auftrag einer dünnen Harz-Füllstoff-Schicht auf eine FEP-Folie über eine breite Düse, welche sich unter der Druckplatte hindurchbewegt
3. Druck einer Schicht, durch Herabfahren der Druckplattform, belichten und wieder hochfahren (kein Umbau notwendig)
4. Entfernen der auf der Folie verbleibenden Harzreste mit einem Wischer. Auffangen des entfernten Harz-Füllstoff-Gemisches in einem Becken
5. Separieren von Harz und Füllstoff durch Separator (Durchlaufzentrifuge)
6. Auftragen nächster Schicht

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Betrachtungen zum 3D-Druck von Isolatoren, deren Herstellung sowie Untersuchungen der elektrischen Eigenschaften von entsprechenden 3D-gedruckten Prüflingen. Zur Ermittlung der dielektrischen Eigenschaften sowie zur Bestimmung der Durchschlagfestigkeit von 3D-gedruckten Bauteilen wurden Plattenproben gewählt. Um die feldsteuernde Wirkung der FGM-Elemente untersuchen zu können, wurden Kegelstümpfe verwendet.

Recherche und Auswahl 3D-Druckverfahren

Eingangs wurde mit der Recherche über 3D-Druckverfahren sowie deren Eignung zur Herstellung von FGM-Isolatoren begonnen. Dabei zeigte sich, dass das SLA-Druckverfahren von allen betrachteten Druckverfahren am besten für die Herstellung von Isolatoren geeignet ist, da es beim Druck zu keinen Lufteinschlüssen kommt, wie dies bei den anderen betrachteten Verfahren der Fall ist.

3D-Druck erster Prüflinge

Die ersten Prüflinge wurden an der TU Graz (IIM, EMS) auf SLA Druckern des Herstellers Formlabs erfolgreich gedruckt. Dabei zeigten sich die ersten Probleme: Beim Entfernen der Stützstruktur kommt es zu Ausbrüchen an der Oberfläche. Das Nachaushärten der gedruckten Plattenproben unter UV-Licht führte zum Verziehen der Proben.

Erste Charakterisierung des Materials

TE-Messungen an den 30 mm hohen Kegelstümpfen unter Stickstoff zeigten, dass diese bis 100 kV TE-frei sind. Versuche an Plattenproben mit 1 mm Dicke ergaben eine Durchschlagfestigkeit von ca. 30 kV/mm.

Vorversuche mit BaTiO₃ als Füllstoff

Um FGM-Isolatoren herstellen zu können, ist es für Wechselfeldanwendungen notwendig, die Permittivität entlang des Isolators zu ändern. Dazu kommen Füllstoffe hoher Permittivität zum Einsatz. Gewählt wurde Bariumtitanat-Pulver als Füllstoff, da es eine sehr hohe relative Permittivität von $\epsilon_r = 10^4$ besitzt. Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Permittivität vom BaTiO₃-Anteil des Harzes wurden in einem Gießverfahren Scheibenproben gefertigt. Messungen zeigen, dass sich die Permittivität des "high temp v2 Harzes" durch Beimischen von 20 Vol.-% BaTiO₃-Pulver von $\epsilon_r = 3,6$ auf $\epsilon_r = 10$ erhöht.

3D-Druck mit Füllstoff

Zur Herstellung von Prüflingen mit Füllstoffanteil wurde ein kommerziell verfügbarer 3D-Drucker adaptiert. In den Vorversuchen mit BaTiO₃-Pulver als Füllstoff zeigte sich bereits, dass die Viskosität mit steigendem Füllstoffanteil stark zunimmt. Um dem entgegenzuwirken, wurde das Füllstoff-Harz-Gemisch während des Drucks mit Heizelementen auf 36 °C erwärmt. Ein weiteres Problem stellt die Sedimentation des BaTiO₃-Pulvers dar. Um zu verhindern, dass sich das BaTiO₃-Pulver am Boden des Druckbeckens absetzt, wurde

mit Hilfe einer Spritzenpumpe und mit im Druckbecken verbauten Düsen für eine Durchströmung des Harzes im Druckbecken gesorgt.

Zur Untersuchung der Auswirkung des Füllstoffes auf die dielektrischen Eigenschaften und die Durchschlagfestigkeit wurden Plattenproben mit einem BaTiO₃-Volumenanteil von 7,5 % mit dem adaptierten 3D-Drucker hergestellt. Zur Untersuchung der Wirkung von FGM-Elementen wurden zweischichtige Kegelstümpfe gedruckt. Das Grundmaterial besteht dabei aus dem "high temp v2 Harz", die zweite Schicht aus "high temp v2 Harz" mit 7,5 Vol.-% BaTiO₃-Pulver.

FEM Simulation zur Optimierung der Feldstärke

Um die Wirkung der Feldsteuerelemente an zweischichtigen Kegelstümpfen zu optimieren, wurde eine FEM Simulationen mit der Software ElecNet durchgeführt. Bei Kegelstümpfen bestehend aus zwei Schichten festgelegter Permittivität, mit festgelegter Gesamthöhe wurde das Verhältnis der Schichthöhen so angepasst, dass die maximal auftretende Feldstärke minimiert wird.

Messungen und Ergebnisse

Die dielektrischen Eigenschaften wurden mit dem Dirana-Messsystem von Omicron an Plattenproben bestimmt. Die ermittelte Permittivität der 3D-gedruckten Scheiben mit 7,5 Vol.-% BaTiO₃-Pulver beträgt $\epsilon_r = 6,1$. Der Verlustfaktor der gedruckten Proben mit Füllstoff ist ca. 30 % höher als jener der Proben aus reinem "high temp v2 Harz".

Die Messung der Durchschlagspannung wurde an den Plattenproben unter Öl durchgeführt. Es zeigte sich, dass bei den gedruckten Plattenproben die Beimischung des Füllstoffes zu keiner signifikanten Änderung der Durchschlagfestigkeit führt.

Die TE-Messung an den Kegelstümpfen erfolgte unter Stickstoff und Luft. Bei den Messungen in Luft ergab sich keine signifikante Erhöhung der TE-Einsatzspannung durch die FGM-Elemente.

An den Kegelstümpfen erfolgte die Messung der Überschlagspannung in Luft, dabei konnte keine eindeutige Erhöhung der Überschlagspannung durch die feldsteuernde Schicht festgestellt werden.

Fazit

Es konnte ein Druckverfahren zur Herstellung von Isolator-Prüflingen mit Feldsteuer-elementen entwickelt werden. Das Aufbringen der Zusatzschicht mit Füllstoff führte zu keiner Verminderung der Durchschlagfeldstärke und Überschlagspannung. Auch das TE-Verhalten hat sich durch das Einbringen der Zusatzschicht nicht verändert.

10 Literaturverzeichnis

- [1] 3Druck.com: „Übersicht aktueller 3D-Druckverfahren“, <https://3druck.com/3d-druck-grundkurs/uebersicht-3d-druckverfahren/>, abgerufen am 22. April 2021.
- [2] M. Baechle-Clayton, E. Loos, M. Taheri, H. Taheri: „Failures and Flaws in Fused Deposition Modeling (FDM) Additively Manufactured Polymers and Composites“, *J. Compos. Sci.*, Bd. 6, Nr. 7, S. 1 – 17, 2022.
- [3] all3dp.com: „Fused Deposition Modeling: FDM 3D Printing Simply Explained“, <https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>, abgerufen am 20. August 2022.
- [4] Z. Liu u. a.: „Topology optimization and 3D-printing fabrication feasibility of high voltage FGM insulator“, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, S. 1 – 4, Chengdu, China, 2016.
- [5] Z. Liu, W.-D. Li, L.-Y. Zhang, X.-R. Li, J.-B. Deng, G.-J. Zhang: „Simulation design and 3D-printing fabrication of conductivity graded insulator“, *1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, S. 171 – 174, Xi'an, China, 2017.
- [6] W.-D. Li u. a.: „Surface Insulation Performance of 3D Printed Functionally Graded Insulator Fabricated by Active-Mixing Fused Deposition Modeling (AM-FDM)“, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Report 10799, Peking, China, 2020.
- [7] Stratasys.com: „3D Printing Materials Safety Data Sheets“, <https://www.stratasys.com/sds>, abgerufen am 7. Mai 2021.
- [8] C. Stapleton: „Redefining the Dental Laboratory Workflow with 3D Printing | Inside Dental Technology“, <https://www.aegisdentalnetwork.com/idt/2018/03/redefining-the-dental-laboratory-workflow-with-3d-printing>, abgerufen am 22. April 2021.
- [9] W. J. Monzel, B. W. Hoff, S. S. Maestas, D. M. French, S. C. Hayden: „Dielectric breakdown of additively manufactured polymeric materials“, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Bd. 22, Nr. 6, S. 3543 – 3549, 2015.
- [10] M. Kurimoto, Y. Suzuoki, K. Uchida: „3D Printed Solid Insulator: Possibilities and Challenges“, *48th Cigre Session Paris*, Report D1-305, Paris, Frankreich, 2020.
- [11] M. Kurimoto, „Topology Optimization and 3D Printing: Toward a Functionally Graded Solid Insulator“, *International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*, S. 107 – 110, Tokyo, Japan, 2020.
- [12] W. Liu, Y. Huo, C. Ke, J. Cheng, Y. Guo: „3D Printed Polymer Vacuum Insulator“, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Bd. 28, Nr. 1, S. 28 – 32, 2021.
- [13] W.-D. Li, L.-Y. Zhang, C. Wang, X.-R. Li, M. Xu, G.-J. Zhang: „Dielectric Properties and 3D Printing Fesibility of UV Curable Polymer Composites“, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Report O-IS6-2, Peking, China, 2020.
- [14] X.-R. Li u. a.: „Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts“, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Report O-IS6-3, Athen, Griechenland, 2018.
- [15] Formlabs.com: „High temp Formlabs SLA 3D Printers Tech Specs“, <https://formlabs.com/3d-printers/form-3/tech-specs/>, abgerufen 22. April 2021.

- [16] X. Yang, W. Li, C. Wang, Z. Jiang, M. Chen, G. Zhang: „Enhancement in Electrical Properties of UV-cured Resin by Establishing H-bonding Between Al₂O₃ Nanoparticles and Acrylate Molecular Chain“, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Report 10139, Peking, China, 2020.
- [17] Formlabs.com: „High_Temp_Technical.pdf“, https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/High_Temp_Technical.pdf, abgerufen am 18. August 2022.
- [18] A. Ruys, D. Sun: „Functionally Graded Materials (FGM) and Their Production Methods“, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1592>, abgerufen am 30. Juli 2022.
- [19] T. Sulong, R. Aina, M. Idris, Z. Jamal: „Structural and electrical properties of Barium Titanate (BaTiO₃) and Neodymium doped BaTiO₃ (Ba 0.995 Nd 0.005 TiO₃)“, *EPJ Web Conf.*, Bd. 162, Nr. 1050, S. 1 – 6, 2017.
- [20] Elegoo.com: „ELEGOO Mars 2 Pro Mono LCD MSLA Resin 3D Printer“, <https://www.elegoo.com/products/elegoo-mars-2-pro-mono-lcd-3d-printer>, abgerufen am 10. August 2022.
- [21] M. Kurimoto, H. Ozaki, Y. Yamashita, T. Funabashi, T. Kato, Y. Suzuoki: „Dielectric properties and 3d printing of uv-cured acrylic composite with alumina microfiller“, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Bd. 23, Nr. 5, S. 2985 – 2992, 2016.
- [22] Y. Zhang, W. Li, H. Yin, C. Wang, J. Deng, G. Zhang: „3D Printing and Flashover Voltage Test of Polypropylene-based Dielectric Functionally Graded Insulator“, *International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO)*, S. 682 – 687, Peking, China, 2021.
- [23] H.-Y. Yin u. a.: „Characterization of Polypropylene/Titanium dioxide composites used for 3D printing of dielectric functionally graded insulators“, in *22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021)*, S. 1588 – 1592, Xi'an, China, 2021.
- [24] IEC 62631-2-1: „Dielectric and resistive properties of solid insulating materials“. 2018.
- [25] DIN EN 60270: „Hochspannungs-Prüftechnik-Teilentladungsmessung“, 2016.
- [26] A. Kholodkova u. a.: „Bi₂O₃-Modified Ceramics Based on BaTiO₃ Powder Synthesized in Water Vapor“, *Inorganics*, Bd. 8, Nr.2, S. 1 – 8, 2020.
- [27] Thermo Fisher Scientific: „Bariumtitanat(IV), 99 %, Thermo Scientific™“, <https://www.fishersci.de/shop/products/barium-titanate-iv-99-thermo-scientific/10694892>, abgerufen am 10. August 2022.

11 Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Prinzip FDM-Druck [1]	4
Bild 2.2: FDM-Isolator mit BaTiO ₃ [4].....	5
Bild 2.3: Aufbau FDM-Prüfling [5]	5
Bild 2.4: Feldstärkeverteilung in Abhängigkeit der Schichtdicke [5]	5
Bild 2.5: Übersicht AM-FDM [6]	6
Bild 2.6: Prüflinge AM-FDM [6]	6
Bild 2.7: Funktionsprinzip SLS [7].....	6
Bild 2.8: Prinzip SLA-Druck [1]	8
Bild 2.9: Prinzip MSLA-Druckverfahren [8]	8
Bild 2.10: Drucksystem und Probekörper aus [10]	9
Bild 2.11: Druck auf Rohr mit Spezialdrucker [11].....	10
Bild 2.12: SLA-Drucksystem, Druck Vakuumisolator [12].....	10
Bild 2.13: Aufbau verschiedener Vakuumisolatoren [12].....	10
Bild 2.14: SEM-Aufnahmen von Harz-Füllstoff-Mischungen unterschiedlicher Körnung... 10	
Bild 2.15: Durchschlagfeldstärke verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13].....	11
Bild 2.16: Permittivität verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13]	11
Bild 2.17: Verlustfaktor verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13]	11
Bild 2.18: Viskosität verschiedener Harz-Füllstoff-Mischungen [13].....	11
Bild 2.19: XZ-Querschnitt verschiedener Druckobjekte [14]	12
Bild 2.20: XY-Oberfläche verschiedener Druckobjekte [14].....	12
Bild 2.21: Weibull-Plot der Durchschlagfestigkeit verschiedener Druckobjekte [14].....	13
Bild 2.22: Richtungsabhängigkeit der elektrischen Festigkeit verschiedener SLS- und FDM-Materialien [9]	13
Bild 2.23: Bariumtitanat-Pulver	15
Bild 3.1: Herstellung der Proben zur Bestimmung der Eindringtiefe.....	16
Bild 3.2: Ausgehärtete Schichtdicke in Abhängigkeit der Belichtungszeit	17
Bild 3.3: Fertigung von gegossenen Plattenproben	18
Bild 3.4: Mit Leitsilber beschichtete Plattenproben	18
Bild 3.5: Kegelstümpfe in Preform-Software	19
Bild 3.6: Form 1 SLA-Drucker	19
Bild 3.7: 3D-Drucker "Mars 2 Pro"	21
Bild 3.8: Druckbecken mit Einsatz	24
Bild 3.9: Spritzenpumpe und Drucker	24
Bild 3.10: 3D-Modell des Beckeneinsatzes	24
Bild 3.11: Spritzen und Verbindungsschläuche mit Heizelementen	25
Bild 3.12: Kegelstumpf nach dem Druck auf Bauplattform mit Stützstruktur	27
Bild 3.13: Plattenprobe zwischen Glasplatten eingespannt.....	27
Bild 4.1: Druck einer Scheibenprobe parallel zur Druckplattform	29
Bild 4.2: Druck einer Scheibenprobe orthogonal zur Druckplattform	29

Bild 4.3: Abmessungen der verwendeten Kegelstümpfe in mm	31
Bild 4.4: 3D-Abbildung von Kegelstumpf Typ 2 mit Feldsteuerelement in ElecNet	32
Bild 4.5: Feldstärkeverteilung in Kegelstumpf Typ 1 ohne Feldsteuerelement.....	32
Bild 4.6: Feldstärkeverteilung in Kegelstumpf Typ 1 mit Feldsteuerelement	32
Bild 4.7: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 1	33
Bild 4.8: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 2	34
Bild 4.9: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 1	35
Bild 4.10: Feldstärkeverlauf entlang der Kegeloberfläche, Kegel Typ 2	35
Bild 5.1: Elektrodenaufbau mit Schutzring zur Kapazitätsbestimmung	37
Bild 5.2: Dirana-Messaufbau	38
Bild 5.3: Messelektrode mit Schutzring.....	38
Bild 5.4: Messschaltung Verlustfaktormessung mit Omicron Messbrücke MI600	39
Bild 5.5: Kegelstumpfproube zwischen Messelektroden	39
Bild 5.6: Verlustfaktormessung an Kegelstümpfen im Druckgefäß.....	39
Bild 5.7: TE-Messung mit Parallelankopplung [25].....	40
Bild 5.8: Scheibenprobenhalter mit VDE-Kalotten	41
Bild 5.9: Probenhalter für VDE-Kalotten	41
Bild 5.10: Messaufbau zur Messung der Durchschlagspannung.....	41
Bild 5.11: Innenaufbau des Druckgefäßes zur Bestimmung der Überschlagspannung	42
Bild 6.1: Abhängigkeit der Permittivität vom BaTiO ₃ -Volumenanteil bei 50 Hz.....	44
Bild 6.2: Abhängigkeit des Verlustfaktors vom BaTiO ₃ -Volumenanteil bei 50 Hz.....	44
Bild 6.3: Frequenzabhängigkeit der Permittivität von gedruckten Prüflingen mit und ohne Füllstoffanteil.....	45
Bild 6.4: Frequenzabhängigkeit des Verlustfaktors von gedruckten Prüflingen mit und ohne Füllstoffanteil.....	45
Bild 6.5: Spannungsverlauf der Durchschlagspannungsprüfung an Scheibenprobe Nr. 103	46
Bild 6.6: Durchschlagfestigkeit der Plattenproben	47
Bild 7.1: Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors eines Kegelstumpfes des Typ 2 mit einer Schichthöhe von 1,6 mm	49
Bild 7.2: TE-Messung an einem Kegelstumpf des Typ 1 ohne Füllstoffanteil (Prüfling 6)	50
Bild 7.3: TE-Einsetz- und Überschlagspannung an Kegelstümpfen Typ 1 unter Stickstoff	50
Bild 7.4: TE-Messung an Kegelstumpf ohne Feldsteuerelement (Prüfling 04)	51
Bild 7.5: TE-Messung an Kegelstumpf mit 2 mm hohem Feldsteuerelement (Prüfling 76)	51
Bild 7.6: TE-Einsetzspannung bei Kegelstümpfen des Typ 1 mit unterschiedlich hohen Feldsteuerelementen	52

Bild 7.7: TE-Einsetzspannung bei Kegelstümpfen des Typ 2 mit unterschiedlich hohen Feldsteuerelementen	52
Bild 7.8: Überschlagversuch an Kegelstumpf Typ 1 unter Stickstoff (Prüfling 06).....	53
Bild 7.9: Überschlagspannung an Kegelstümpfen des Typ 1 bei verschiedenen Höhen der feldsteuernden Schicht	54
Bild 7.10: Überschlagspannung an Kegelstümpfen des Typ 2 bei verschiedenen Höhen der feldsteuernden Schicht	54
Bild B.1: Datenblatt Formlabs high temp v2 Harz, Seite 1 von 4	67
Bild B.2: Datenblatt Formlabs high temp v2 Harz, Seite 2 von 4	68
Bild B.3: Datenblatt Formlabs high temp v2 Harz, Seite 3 von 4	69
Bild B.4: Datenblatt Formlabs high temp v2 Harz, Seite 4 von 4	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften "high temp v2 Harz" [13, 17].....	14
Tabelle 2: Übersicht der Messungen an 3D-gedruckten Scheibenproben	43
Tabelle 3: Übersicht über die an Kegelstümpfen durchgeführten Messungen	48
Tabelle 4: mittlere Verlustfaktoren der Kegelstümpfe mit und ohne FGM-Element für den Feldstärkebereich $E = 33 - 330$ V/mm (Typ 1) und $E = 100 - 750$ V/mm (Typ 2).....	49
Tabelle 5: 3D-gedruckte Prüflinge, Teil 1 von 2.....	65
Tabelle 6: 3D-gedruckte Prüflinge, Teil 2 von 2.....	66
Tabelle 7: Materialeigenschaften Bariumtitanat-Pulver	71
Tabelle 8: Überschlag- und TE-Einsetzspannung Kegelstumpf Typ 1 in Luft	72
Tabelle 9: Überschlag- und TE-Einsetzspannung Kegelstumpf Typ 2 in Luft	72
Tabelle 10: Durchschlag- und TE-Einsetzspannung an 3D-gedruckten Scheiben in Öl zwischen VDE-Kalotten	73
Tabelle 11: FDM-Drucker im FabLab	74
Tabelle 12: SLA-Drucker im FabLab	74
Tabelle 13: SLS-Drucker im FabLab	74
Tabelle 14: FDM-Drucker in der Digitalwerkstatt	74
Tabelle 15: FDM-Drucker am Institut für Fertigungstechnik	75
Tabelle 16: SLM Drucker am Institut für Fertigungstechnik.....	75
Tabelle 17: SLA-Drucker am Institut für elektrische Messtechnik und Sensorik	75

Anhang

Anhang A: Auflistung hergestellter Prüflinge

Tabelle 5: 3D-gedruckte Prüflinge, Teil 1 von 2

Seriennummer	Abmessungen	Drucker	Material	Ausrichtung bei Druck
1	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 3L Fablab	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
2	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 3L Fablab	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
3	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 3L Fablab	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
4	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 3L Fablab	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
5	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 3L Fablab	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
6	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
7	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
8	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
9	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
10	Kegelstumpf, 50,30,30	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
11	Scheibe D=100, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
12	Scheibe D=100, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
13	Scheibe D=50, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
14	Scheibe D=50, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
15	Scheibe D=50, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
16	Scheibe D=50, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
17	Scheibe D=50, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
18	Scheibe 100 mm, h=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend
19	Scheibe 50 mm h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
20	Drehteil D1=103, h1=30, D2=30, h2=50	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	103 mm Grundfläche parallel Druckplattform
020.1	Scheibe aus Drehteil D=100 h=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	-
020.2	Scheibe aus Drehteil D=100 h=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	-
020.3	Scheibe aus Drehteil D=100 h=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	-
020.4	Scheibe aus Drehteil D=30 h=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	-
020.5	Scheibe aus Drehteil D=30 h=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	-
020.6	Scheibe aus Drehteil D=30 h=3	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	-
21	Scheibe D=50, hm=2, hr=3	Form 2 EMS	Formlabs clear v4	liegend, eingedellte Seite zu Druckplattform
22	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs clear v4	stehend
23	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
24	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
25	Scheibe D=50, h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
26	Scheibe D=50, h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
27	Scheibe D=50, h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend
28	Scheibe D=50, h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend
29	Scheibe D=80, h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	liegend
30	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
31	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
32	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
33	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
34	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
35	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
36	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
37	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
38	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
39	Scheibe D=50, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
40	Scheibe D=50, h=1,5	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
41	Scheibe D=50, h=1,5	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
42	Scheibe D=80, h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
43	Scheibe D=80, h=2	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
44	Scheibe D=80, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
45	Scheibe D=80, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
46	Scheibe D=80, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
47	Scheibe D=80, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
48	Scheibe D=80, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
49	Scheibe D=80, h=1	Form 2 EMS	Formlabs high temp v2	stehend
50	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Elegoo ABS-like grau	stehend
51	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Elegoo ABS-like grau	stehend
52	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Elegoo ABS-like grau	stehend
53	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Elegoo ABS-like grau	stehend
54	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
55	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
56	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
57	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
58	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
59	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
60	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend

Tabelle 6: 3D-gedruckte Prüflinge, Teil 2 von 2

Seriennummer	Abmessungen	Drucker	Material	Ausrichtung bei Druck
61	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
62	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
63	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
64	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
65	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
66	Scheibe D=24, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
67	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
68	Scheibe D=80, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
69	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
70	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
71	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
72	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
73	Kegelstumpf, 50,30,30, 1 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
74	Kegelstumpf, 50,30,30, 1 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
75	Kegelstumpf, 50,30,30, 1 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
76	Kegelstumpf, 50,30,30, 2 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
77	Kegelstumpf, 50,30,30, 2 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
78	Kegelstumpf, 50,30,30, 2 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
79	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
80	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
81	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
82	Kegelstumpf, 40,20,10	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	Grundfläche parallel Druckplattform
83	Kegelstumpf, 40,20,10, 0,8 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
84	Kegelstumpf, 40,20,10, 0,8 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
85	Kegelstumpf, 40,20,10, 0,8 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
86	Kegelstumpf, 40,20,10, 0,8 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
87	Kegelstumpf, 40,20,10, 1,6 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
88	Kegelstumpf, 40,20,10, 1,6 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
89	Kegelstumpf, 40,20,10, 1,6 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
90	Kegelstumpf, 40,20,10, 1,6 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
91	Kegelstumpf, 40,20,10, 0,4 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
92	Kegelstumpf, 40,20,10, 0,4 mm Feldst.	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	Grundfläche parallel Druckplattform
93	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
94	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
95	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
96	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
97	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
98	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2 + 7,5% BaTiO ₃	stehend
99	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
100	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
101	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
102	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend
103	Scheibe D=50, h=1	Mars 2 pro	Formlabs high temp v2	stehend

Anhang B: Datenblätter

MATERIAL DATA SHEET

High Temp

High Temp Resin for Heat Resistance

\$199 / L

High Temp Resin offers a heat deflection temperature (HDT) of 238 °C @ 0.45 MPa, the highest among Formlabs resins. Use it to print detailed, precise prototypes with high temperature resistance.

Hot air, gas, and fluid flow

Molds and inserts

Heat resistant mounts, housings, and fixtures



FLHTAM02

formlabs 

Prepared 09 . 15 . 2016
Rev 02 12 . 05 . 2018

To the best of our knowledge the information contained herein is accurate. However, Formlabs, Inc. makes no warranty, expressed or implied, regarding the accuracy of these results to be obtained from the use thereof.

Bild B.1: Datenblatt Formlabs "high temp v2 Harz" [15], Seite 1 von 4

Material Properties Data Metric

	METRIC ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁴	
Thermal Properties				
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	43.6 °C	99.2 °C	101 °C	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	49.3 °C	142 °C	238 °C	ASTM D 648-16

	METRIC ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ⁵	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁶	
Mechanical Properties				
Ultimate Tensile Strength	20.9 MPa	58.3 MPa	51.1 MPa	ASTM D 638-14
Elongation at break	14 %	3.3 %	2.4 %	ASTM D 638-14
Tensile modulus	0.75 GPa	2.75 GPa	2.9 GPa	ASTM D 638-14
Flexural strength at break	24.1 MPa	94.5 MPa	93.8 MPa	ASTM D 790-15
Flexural modulus	0.69 GPa	2.62 GPa	2.62 GPa	ASTM D 790-15
Impact Properties				
Notched IZOD	32.8 J/m	18.2 J/m	24.2 J/m	ASTM D 256-10
Thermal Properties				
Thermal Expansion (0-150 °C)	118.1 (µm/m/°C)	79.6 (µm/m/°C)	74 (µm/m/°C)	ASTM E 831-13

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, High Temp settings, washed for 5 minutes in Form Wash and air dried without post cure.

³ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes.

⁴ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 180 minutes.

⁵ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes.

⁶ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 90 minutes.

Bild B.2: Datenblatt Formlabs "high temp v2 Harz" [15], Seite 2 von 4

Material Properties Data Imperial

	IMPERIAL ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁴	
Thermal Properties				
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	110.48 °F	210.56 °F	213.8 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	120.74 °F	287.6 °F	460.4 °F	ASTM D 648-16

	IMPERIAL ¹			METHOD
	Green ²	Post-Cured ⁵	Post-Cured + Thermally Post-Cured ⁶	
Mechanical Properties				
Ultimate Tensile Strength	3031 psi	8456 psi	7411 psi	ASTM D 638-14
Elongation at break	14 %	3.3 %	2.4 %	ASTM D 638-14
Tensile modulus	109 ksi	399 ksi	421 ksi	ASTM D 638-14
Flexural strength at break	3495 psi	13706 psi	13605 psi	ASTM D 790-15
Flexural modulus	100 ksi	400 ksi	400 ksi	ASTM D 790-15
Impact Properties				
Notched IZOD	0.61 ft-lbf/in	0.34 ft-lbf/in	0.45 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Thermal Properties				
Thermal Expansion (0-150 °C)	65.6 µin/in/°F	44.2 µin/in/°F	41.1 µin/in/°F	41.1 uin/in/°F

¹ Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

² Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, High Temp settings, washed for 5 minutes in Form Wash and air dried without post cure.

³ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes.

⁴ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 80 °C for 120 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 180 minutes.

⁵ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes.

⁶ Data was obtained from parts printed using a Form 2, 100 micron, High Temp settings, and post-cured with Form Cure at 60 °C for 60 minutes plus an additional thermal cure in a lab oven at 160 °C for 90 minutes.

Bild B.3: Datenblatt Formlabs "high temp v2 Harz" [15], Seite 3 von 4

Solvent Compatibility

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 hr weight gain (%)	24 hr size gain (%)	Solvent	24 hr weight gain (%)	24 hr size gain (%)
Acetic Acid, 5 %	<1	<1	Hydrogen peroxide (3%)	<1	<1
Acetone	<1	<1	Isooctane (aka gasoline)	<1	<1
Isopropyl Alcohol	<1	<1	Mineral oil (light)	<1	<1
Bleach ~5% NaOCl	<1	<1	Mineral oil (Heavy)	<1	<1
Butyl Acetate	<1	<1	Salt Water (3.5% NaCl)	<1	<1
Diesel Fuel	<1	<1	Sodium Hydroxide solution	<1	<1
Diethyl glycol Monomethyl Ether	<1	<1	Water	<1	<1
Hydraulic Oil	<1	<1	Xylene	<1	<1
Skydrol 5	<1	<1	Strong Acid (HCl conc)	1.2	<1

Bild B.4: Datenblatt Formlabs "high temp v2 Harz" [15], Seite 4 von 4

Tabelle 7: Materialeigenschaften Bariumtitanat-Pulver [27]

Chemischer Name oder Material	Barium titanate(IV)
Namenshinweis	99%
CAS Min. %	98.5
CAS Max. %	100.0
Farbe	Weiß
Schmelzpunkt	1625.0°C
Menge	500g
Prozentgehaltsbereich	0.988 to 1.000 (BaO+ SrO)/TiO ₂ Mole Ratio
Strukturformel	BaTiO ₃
Merck Index	15, 996
Löslichkeitsinformationen	Solubility in water: insoluble. Other solubilities: insoluble in alkalies, slightly soluble in diluted acids, soluble in concentrated h ₂ so ₄ and hf
Formelmasse	233.24
Physikalische Form	Pulver
Reinheit (%)	99%
Glühverlust	0.5% max.
Aluminiumoxid	0.04% max.
Verpackung	Kunststoffflasche
Partikelgröße	0.03% Max. (+325 Mesh), 0.85 to 1.45 Micron (Horiba, D50)
Siliciumdioxid	0.02% max.
Natriumoxid	0.03% max.
Löslichkeit	Solubility in water: insoluble. Other solubilities: insoluble in alkalies, slightly soluble in diluted acids, soluble in concentrated h ₂ so ₄ and hf
Relative Dichte	6.08
Zusätzliche Informationen	SrO: 0.15% max.
Dichte	6.0800g/mL

Anhang C: Tabellen Messergebnisse

Tabelle 8: Überschlag- und TE-Einsatzspannung Kegelstumpf Typ 1 in Luft

Prüfling	Abmessungen	Material	Überschlagspannung	TE-Einsatzspannung	Kegelstumpfhöhe
	mm		kV	kV	mm
1	50, 30, 30	high temp	40,0	38,0	29,5
2	50, 30, 30	high temp	34,0	34,0	29,4
3	50, 30, 30	high temp	36,0	36,0	29,5
4	50, 30, 30	high temp	37,7	34,7	29,4
5	50, 30, 30	high temp	32,0	32,0	29,3
6	50, 30, 30	high temp	41,5	41,5	29,2
7	50, 30, 30	high temp	32,0	32,0	28,9
8	50, 30, 30	high temp	26,0	26,0	29,0
9	50, 30, 30	high temp	38,0	38,0	29,1
10	50, 30, 30	high temp	32,0	32,0	29,2
73	50, 30, 30, 1	high temp + 1 mm 7,5 % BaTiO ₃ Schicht	31,8	31,8	29,7
74	50, 30, 30, 1	high temp + 1 mm 7,5 % BaTiO ₃ Schicht	39,1	39,1	29,9
75	50, 30, 30, 1	high temp + 1 mm 7,5 % BaTiO ₃ Schicht	32,7	32,7	30,2
76	50, 30, 30, 2	high temp + 2 mm 7,5 % BaTiO ₃ Schicht	39,3	39,3	29,8
77	50, 30, 30, 2	high temp + 2 mm 7,5 % BaTiO ₃ Schicht	42,0	42,0	30,0
78	50, 30, 30, 2	high temp + 2 mm 7,5 % BaTiO ₃ Schicht	39,0	39,0	30,1

Tabelle 9: Überschlag- und TE-Einsatzspannung Kegelstumpf Typ 2 in Luft

Prüfling	Abmessungen	Überschlagspannung	TE-Einsatzspannung	Kegelstumpfhöhe
	mm	kV	kV	mm
79	40, 20, 10	10,7	7,2	9,3
80	40, 20, 10	11,6	10,4	9,3
81	40, 20, 10	12,0	3,4	10,0
82	40, 20, 10	11,8	8,6	9,9
83	40, 20, 10, 0,8	9,2	11,7	10,4
84	40, 20, 10, 0,8	11,0	8,6	10,3
85	40, 20, 10, 0,8	10,7	8,6	10,0
86	40, 20, 10, 0,8	13,5	13,5	9,9
87	40, 20, 10, 1,6	11,6	5,9	10,0
88	40, 20, 10, 1,6	12,0	12,0	10,5
89	40, 20, 10, 1,6	12,0	9,0	10,1
90	40, 20, 10, 1,6	12,0	6,3	10,0
91	40, 20, 10, 0,4	11,3	9,3	9,9
92	40, 20, 10, 0,4	11,3	9,6	9,8

Tabelle 10: Durchschlag- und TE-Einsatzspannung an 3D-gedruckten Scheiben in Öl zwischen VDE-Kalotten

Prüfling	Abmessungen	Ausrichtung	Durchschlagspannung	TE-Einsatzspannung	Dicke an Durchschlagstelle	Durchschlagspannung
	mm		kV	kV	mm	kV/mm
14	D=50, h _m =2, h _r =3	liegend	56,60	56,60	2,23	25,38
15	D=50, h _m =2, h _r =3	liegend	48,20	47,80	2,14	22,52
16	D=50, h _m =2, h _r =3	liegend	47,60	47,60	2,11	22,56
17	D=50, h _m =2, h _r =3	liegend	52,90	52,90	2,00	26,45
19	50, 1	stehend	46,70	45,00	1,98	23,59
25	50, 2	stehend	50,00	50,00	2,01	24,88
27	50, 2	liegend	65,00	50,10	2,36	27,54
29	80, 2	liegend	51,50	45,00	2,43	21,19
31	50, 1	stehend	29,80	25,60	1,01	29,50
32	50, 1	stehend	32,70	24,70	1,01	32,38
33	50, 1	stehend	29,70	29,00	0,99	30,00
34	50, 1	stehend	32,80	29,00	0,98	33,47
36	50, 1	stehend	34,30	32,60	0,99	34,65
37	50, 1	stehend	32,20	32,20	1,01	31,88
38	50, 1	stehend	33,30	30,00	1,00	33,30
39	50, 1	stehend	29,00	27,00	1,00	29,00
40	50, 1,5	stehend	41,50	40,00	1,54	26,95
41	50, 1,5	stehend	40,80	39,50	1,52	26,84
42	80, 2	stehend	43,90	36,80	2,00	21,95
44	80, 1	stehend	31,30	27,70	0,98	31,94
46	80, 1	stehend	34,50	33,60	1,04	33,17
47	80, 1	stehend	33,80	33,60	1,03	32,82
48	80, 1	stehend	34,60	32,30	1,01	34,26
50	80, 1	stehend	29,40	27,10	1,05	28,00
51	80, 1	stehend	28,20	24,10	1,06	26,60
52	80, 1	stehend	31,50	24,00	1,07	29,44
53	80, 1	stehend	30,40	25,00	1,08	28,15
54	80, 1	stehend	35,10	27,60	1,09	32,20
55	80, 1	stehend	36,40	28,80	1,09	33,39
56	80, 1	stehend	35,70	30,00	1,10	32,45
57	80, 1	stehend	35,40	27,80	1,10	32,18
67	80, 1	stehend	33,60	20,60	0,91	36,92
68	80, 1	stehend	30,50	27,00	0,86	35,47
93	50, 1	stehend	37,30	33,40	1,16	32,16
94	50, 1	stehend	33,60	29,00	1,17	28,72
95	50, 1	stehend	37,00	29,80	1,16	31,90
96	50, 1	stehend	35,40	23,00	1,15	30,78
99	50, 1	stehend	30,70	28,10	0,96	31,98
100	50, 1	stehend	26,00	18,00	0,95	27,37
101	50, 1	stehend	28,40	21,50	0,98	28,98
102	50, 1	stehend	29,40	24,00	0,99	29,70
103	50, 1	stehend	28,80	25,30	0,93	30,97
104	80,1	stehend	32,00	26,80	1,07	29,91
G1	80,1		31,50	30,20	1,05	30,00

Anhang D: 3D- Drucker an der TU Graz

D.1: Fablab (Institut für Innovation und Industrie Management)

FDM

Tabelle 11: FDM-Drucker im FabLab

Bezeichnung	Bauraum in mm	Material	Dual-Extrusion	Düsendurchmesser in mm
BigRep ONE	1000x1000x1000	PLA, PET-G	ja	1
Crealty – CR10S Pro	300x300x400	PLA, PET-G	nein	0,4
Renkforce - RF1000	245x200x230	PLA, PET-G, TPU	nein	0,5
Renkforce - RF2000	180x200x230	PLA, PET-G	ja	0,4
Ultimaker 2+ extended	195x195x305	PLA, PET-G	nein	0,4
Ultimaker 3	195x195x198	PLA, PET-G	ja	0,4
Wanhao-Duplicator i3 +	190x190x175	PLA,PET-G	nein	0,4

SLA

Tabelle 12: SLA-Drucker im FabLab

Bezeichnung	Bauraum in mm	Material	Durchmesser Laser in mm
Formlabs – Form 2	145x145x175	clear, grey, heat resistant	0,14
Formlabs – Form 3L	335x200x300	clear, grey, heat resistant	0,085

SLS

Tabelle 13: SLS-Drucker im FabLab

Bezeichnung	Bauraum in mm	Material	Durchmesser Laser in mm
Formlabs – Fuse 1	165x165x300	Nylon	0,0002 – 0,2

D.2: Institut für Architektur und Medien (Digitalwerkstatt)

FDM

Tabelle 14: FDM-Drucker in der Digitalwerkstatt

Bezeichnung	Bauraum in mm	Material	Dual-Extrusion	Düsendurchmesser in mm
Dimension Elite	203x203x305	ABS	ja	0,4

D.3: Institut für Fertigungstechnik

FDM

Tabelle 15: FDM-Drucker am Institut für Fertigungstechnik

Bezeichnung	Bauraum in mm	Material	Dual-Extrusion	Düsendurchmesser in mm
Ultimaker 2+ extended	195x195x305	-	nein	0,4

SLM

Tabelle 16: SLM Drucker am Institut für Fertigungstechnik

Bezeichnung	Bauraum in mm	Material	Maximale Auflösung in mm
SLM 280HL	280x280x350	Metall	0,2

D.4: Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik

SLA

Tabelle 17: SLA-Drucker am Institut für elektrische Messtechnik und Sensorik

Bezeichnung	Bauraum in mm	Material	Durchmesser Laserstrahl in mm
Formlabs – Form 2	145x145x175	black,clear, high temp, durable, flexible	0,14
Formlabs – Form 3	145x145x185	black,clear, high temp, durable, flexible	0,085