

Untersuchung zur Isolationswirkung additiv gefertigter Probenkörper

Jean-Luc von Wilcken, Markus Zimmerer, Jannik Thiel, Philipp Reimann, Malte Kröger,
Prof. Dr.-Ing. Christian Seidel

Hochschule für angewandte Wissenschaften München
Smart Manufacturing Lab
Lothstraße 34, 80335 München, Deutschland

https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2024_017

Zusammenfassung Für das Anwendungsgebiet der elektronischen Gerätetechnik sind vor allem die elektrischen Eigenschaften von additiv gefertigten Bauteilen ausschlaggebend. Eine dieser Eigenschaften ist die Isolationswirkung der Oberfläche, um das Auftreten von Kriechströmen einschätzen zu können. In dieser Arbeit wird die Isolationsleistung an der Oberfläche additiv gefertigter Bauteile aus Kunststoff untersucht. Dabei wird der Einfluss von Druckparametern, wie der Schichthöhe und der Druckrichtung, sowie verschiedener Vorbehandlungen betrachtet. Aus den Ergebnissen lässt sich feststellen, dass mit den angewandten Methoden kein klarer Einfluss der Druckparameter auf die Isolationsleistung ermittelt werden konnte. Die Haupteinflussgröße ist die gewählte Vorbehandlung. Dabei gilt, dass die Isolationsleistung der Probenkörper mit zunehmender Feuchtigkeit um bis zu 98 % abnimmt. Des Weiteren konnten im Rahmen der Experimente Einflussfaktoren in den fünf Kategorien Mensch, Material, Maschine, Mitwelt und Methode identifiziert werden, deren Auswirkung auf die Oberflächenisolation anwendungsspezifisch bewertet werden sollte.

Abstract In the application area of electronic equipment technology, the electrical properties of additively manufactured components are particularly crucial. One of these properties is the insulation effect on the surface to assess the occurrence of leakage currents. Within this paper, the surface insulation performance of plastic components produced by Material Extrusion with thermal reaction bonding (MEX-TRB/P) is discussed. The influence of printing parameters such as layer height, printing direction, and various pre-treatments were examined. From the results, it can be concluded that hardly any influence of printing parameters on the insulation performance was determined with the applied methods. The main influencing factor is the selected pre-treatment, which showed that the insulation performance decreased up to 98 % with increasing humidity of the samples. Moreover, influencing factors in five categories were identified for future work.

Einleitung und Stand der Technik

Die additive Fertigung, auch als Additive Manufacturing bezeichnet und allgemein bekannt als 3D-Druck, charakterisiert Fertigungsverfahren, die den schichtweisen Aufbau einer gewünschten dreidimensionalen Geometrie ermöglichen. Dieser Prozess erlaubt die nahezu werkzeuglose Herstellung von Bauteilen mit komplexen Geometrien.

Ein Fertigungsverfahren in der additiven Fertigung ist die Materialextrusion. Dabei wird ein Werkstoff gezielt durch eine Düse aufgetragen [10]. Für die Extrusion von Kunststoffen werden beispielsweise thermoplastische Filamente aus Polymer (/P) verwendet. Diese werden durch eine thermische Reaktion (-TRB) plastifiziert und mithilfe einer Düse auf einem Druckbett aufgetragen. Nach [10] wird dieser Prozess als MEX-TRB/P abgekürzt. Verschiedene Druckparameter, wie die Temperatur, die Schichthöhe oder die Ablegereihenfolge des Filaments, sowie die Bauteilorientierung beeinflussen die mechanischen Eigenschaften und die Oberflächenqualität.

Die Anwendung der additiven Fertigung im Bereich der Elektrotechnik befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Espalin et al. [1] zeigten erste Anwendungsbeispiele der additiven Fertigung zur Herstellung von Substraten für Leiterplatten. Die Technologie wurde auch eingesetzt, um Kupferdrähte in Leiterplatten einzubetten und so dreidimensionale Schaltungen zu realisieren. Liu et al. [2] stellten das Konzept der Integration von Drucktechnologie und Topologieoptimierung zur Herstellung funktional gradierter Isolatoren zur Verbesserung des elektrischen Widerstands vor.

Im Hochvoltbereich ist es wichtig, die Eigenschaften der additiv gefertigten Isolatoren zu kennen, um eine angemessene Einschätzung der Sicherheitsfaktoren treffen zu können. Eine besonders relevante Materialeigenschaft ist die Durchschlagfestigkeit, die die Eignung des Materials für den Einsatz in der elektronischen Gerätetechnik bestimmt.

Es wurden bereits Untersuchungen zur elektrischen Leitfähigkeit und Durchschlagfestigkeit durchgeführt. Li et al. [6] untersuchten die Durchschlagfestigkeit von Testkörpern, die mithilfe verschiedener additiver Fertigungsverfahren hergestellt wurden. Es zeigte sich, dass die Probekörper aus ABS, die mittels MEX-TRB hergestellt wurden, eine höhere Durchschlagfestigkeit von 33 kV/mm aufweisen als die aus PLA mit 30 kV/mm.

Vesely et al. [7] untersuchten die Leitfähigkeit verschiedener Kunststoffe, wie PLA, PET-G und ABS, in Abhängigkeit der Schichthöhe. Mit ansteigender Schichthöhe zeigten PLA und PET-G eine schlechtere elektrische Leitfähigkeit aufgrund der größeren Lufträume zwischen den abgelegten Linien und Schichten. Im Gegensatz dazu zeigte ABS keine statistisch signifikante Änderung der elektrischen Leitfähigkeit bei erhöhter Schichthöhe. Generell sind alle drei getesteten Kunststoffe als Isolatoren akzeptabel, jedoch ist ABS aufgrund seiner höheren Durchschlagfestigkeit am besten geeignet. Es wurde ebenfalls vermerkt, dass die Messwerte aufgrund der schlechteren Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften bei der Herstellung mittels Low-cost-Fertigungssystemen schwanken.

Die Leitfähigkeit additiv gefertigter Oberflächen, insbesondere hinsichtlich des sogenannten Kriechstroms, ist bisher kaum erforscht. In dieser Arbeit werden Untersuchungen zu den Isolationseigenschaften von Bauteilen durchgeführt, die mittels MEX-TRB/P gefertigt wurden.

Materialien und Methoden

Zur Untersuchung der Isolationswirkung additiv gefertigter Bauteile wurde ein Probenkörper mit einer definierten Prüfstrecke verwendet. Durch das Ändern von Druckparametern, wie der Schichthöhe und der Bauteilorientierung, entstehen unterschiedliche Oberflächen auf dieser Prüfstrecke. Die Geometrie sowie die schematische Darstellung der geplanten Druckorientierungen, die zu unterschiedlichen Oberflächen führen, sind in Abbildung 1 und Abbildung 2 dargestellt.

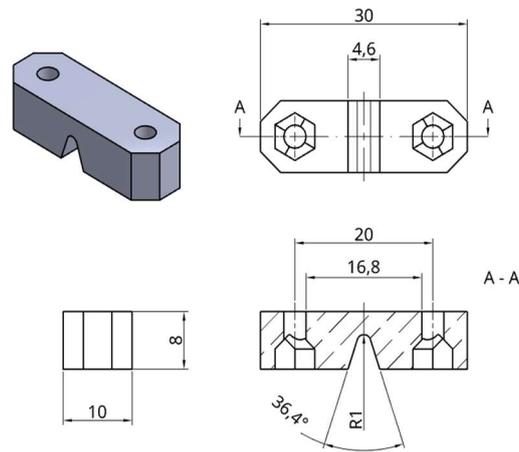


Abbildung 1: Wesentliche Abmessungen und Geometrie des Probenkörpers

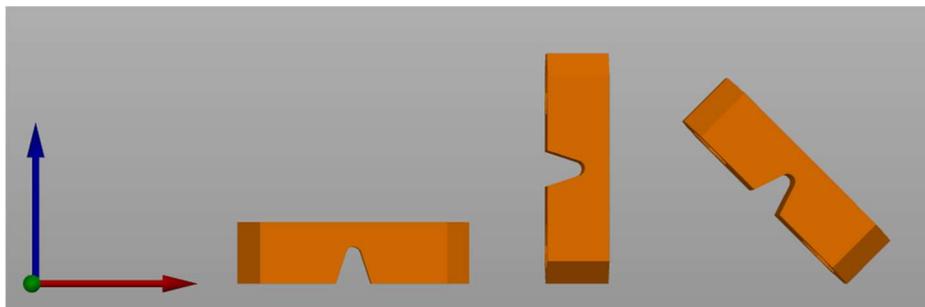


Abbildung 2: Druckausrichtung der Probenkörper beschrieben in Tabelle 1, horizontal (links), vertikal (Mitte, entspricht der Aufbaurichtung Z) und 45 Grad (rechts)

Der Druck erfolgte sequenziell mit einer 0,4-mm-Düse auf einem Prusa i3 MK3S. Für die Herstellung der Probenkörper wurden PLA- und PETG-Filamentrollen von zwei verschiedenen Herstellern verwendet. Das PLA-Filament stammt von BASF mit dem Markennamen „Innofil3D“ in der Farbe schwarz und das PETG-Filament von Prusament in der Farbe „Jet Black“. Die empfohlenen Druckprofile aus dem Prusa Slicer v2.5.2 wurden verwendet, um eine definierte Druckqualität zu erzielen.

Aus den beiden Materialien wurden Probenkörper mit unterschiedlicher Druckorientierung und Schichthöhe hergestellt. Tabelle 1 zeigt die gewählten Parameter für die Probenkörper.

Tabelle 1: Konfiguration der angefertigten Probenkörper

Schichthöhe [mm]	Konfiguration		
0,1	-	Vertikal	45 Grad
0,2	Horizontal	Vertikal	45 Grad
0,3	Horizontal	Vertikal	45 Grad

Probenpräparation

In DIN 60664-1 [8] und DIN 60112 [9] wird beschrieben, dass Umgebungsbedingungen, Oberflächenverschmutzung und Vorbehandlung Einfluss auf die Messung haben. Aus diesem Grund wurden alle Proben einer thermischen Vorbehandlung unterzogen und anschließend im Messlabor in mit Silikat gefüllten Druckverschlussbeuteln 24 Stunden akklimatisiert. Für die Vorbehandlung wurden vier Verfahren verwendet, die in Tabelle 2 dargestellt sind.

Tabelle 2: Durchgeführte Vorbehandlungen

Vorbehandlung		Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Dauer [h]
Nr. 1	Trockene Wärme	40	-	96
Nr. 2	Feuchte Wärme	55	85	48
Nr. 3	Exponierte Lagerung	20	-	48
Nr. 4	Wasserbad	-	100	96

Für die Vorbehandlungen wird ein Weiss WKL64 Klimaschrank verwendet. In der Abbildung 3 sind die Proben in der Klimakammer sowie im Wasserbad zu sehen. Die Proben aus dem Wasserbad wurden vor der Messung nur oberflächlich getrocknet. Das vorbehandelte Silikat soll sicherstellen, dass die Umgebungsbedingungen im Druckverschlussbeutel konstant bleiben, abgesehen von der Temperatur. Um Verschmutzungen zu vermeiden, wurden bei der Handhabung der Proben Handschuhe getragen.

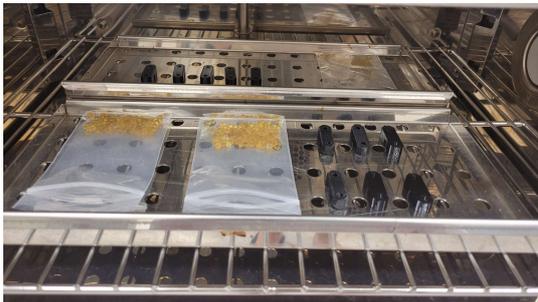


Abbildung 3: Probenkörper in Klimakammer mit Aufbewahrungsbehälter (links) und im Wasserbad (rechts)

Messung

Die Messungen wurden in einem Messlabor bei konstanten 20°C Umgebungstemperatur durchgeführt. Die Luftfeuchtigkeit konnte nicht exakt reguliert werden. Um Störgrößen,

wie zirkulierende Luft oder versehentliches Berühren der Prüfkörper, während der Messung zu vermeiden, wurden die Probenkörper mit einer einfachen Kunststoffdose abgedeckt. Abbildung 4 zeigt eine Detailaufnahme eines Probenkörpers sowie den Versuchsaufbau mit und ohne Abdeckung.



Abbildung 4: Versuchsaufbau offen (links & Mitte) und abgedeckt (rechts)

Zur Messung des Oberflächenwiderstands und des Kriechstroms wurde der Isolationstester „FLUKE 1555 FC 10kV“ verwendet. Die Messgenauigkeit des Isolationstester beträgt $\pm 5\%$ (10 M Ω bis 200 G Ω) und $\pm 20\%$ (200 G Ω bis 2 T Ω) des Messwerts [11]. Die Probenkörper wurden mit zwei M3-Schrauben und Kabelschuhen am Messgerät befestigt. Um sicherzustellen, dass der Strom als Kriechstrom an der Oberfläche fließt und nicht durch den Probenkörper, wurde eine Prüfspannung von 10 kV gewählt. Bei einer Prüfstrecke von 11,3 mm ergibt sich eine anliegende Spannung von unter 1 kV/mm. Diese liegt nach Li et al. [3], Truman et al. [4] und Tichý et al. [5] unterhalb der elektrischen Durchschlagfestigkeit von sowohl PLA als auch PETG. Um konstantere Messergebnisse zu erzielen, wurden für jede Konfiguration fünf Probekörper aus jedem Material hergestellt.

Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der einzelnen Versuche gebündelt dargestellt. Die Ergebnisse lassen sich in zwei Kategorien einordnen, die in die Themenbereiche Luftfeuchtigkeit und Anzugsmoment unterteilt werden.

Luftfeuchtigkeit

Bei allen Versuchen wurde der Widerstand über die Prüfstrecke sowie die dazugehörige Stromstärke gemessen. Die signifikantesten Ergebnisse sind in den Abbildung 5 bis 7 dargestellt. Allgemein ist ein deutlicher Trend erkennbar, der darauf hinweist, dass die Feuchtigkeit der Probenkörper den größten Einfluss auf die Messwerte ausübt. Die Ergebnisse zeigen, dass feuchte Proben unmittelbar nach der Entnahme aus einem gesättigten Verschlussbeutel oder einem Wasserbad einen niedrigeren Widerstand aufweisen als exponierte Probenkörper oder solche aus dem Ofen. Dies lässt sich vor allem in Abbildung 5 erkennen, in welcher die Widerstandsmesswerte verschiedener Vorbehandlungen von PLA und PETG miteinander verglichen werden.

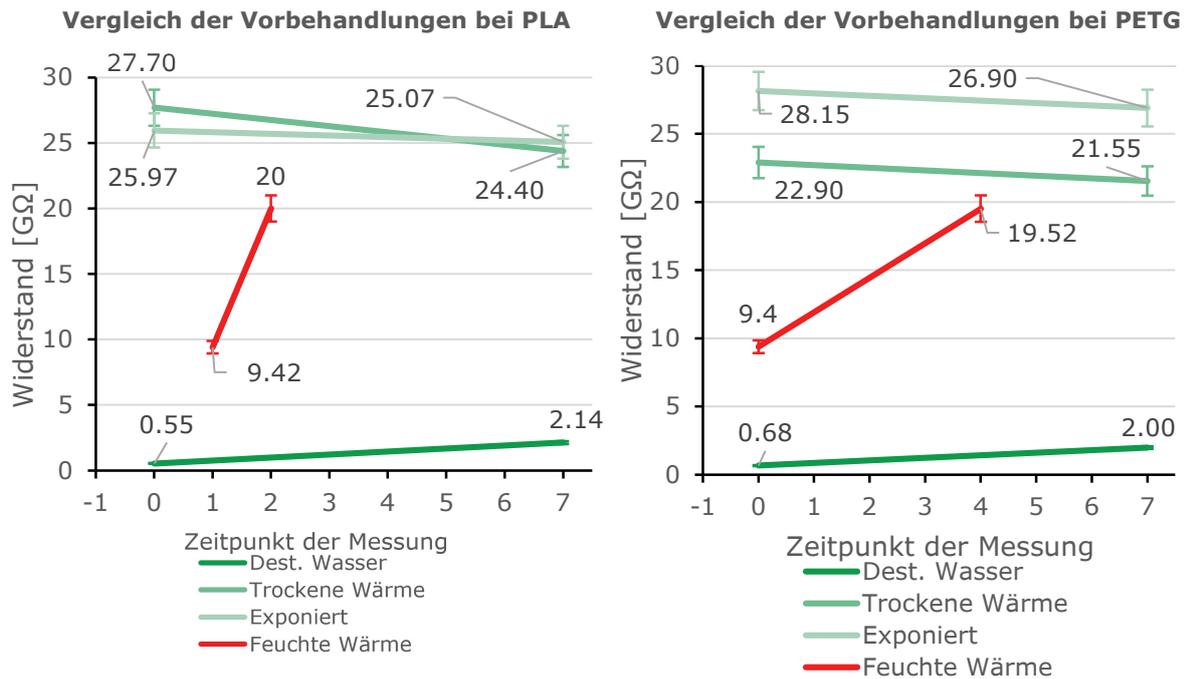
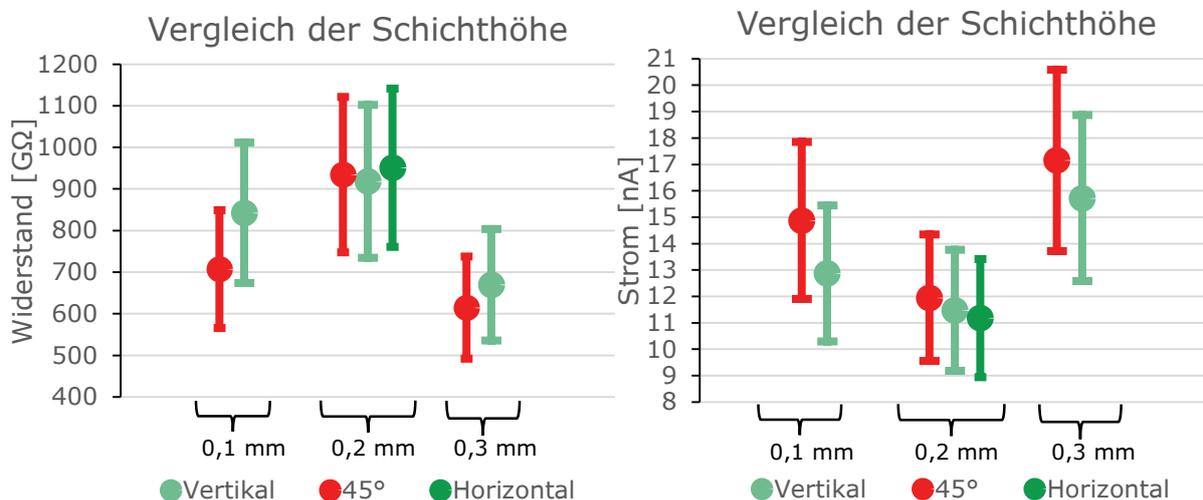


Abbildung 5: Widerstand und Stromstärke von Probenkörpern aus PLA und PETG mit verschiedenen Vorbehandlungen über definierte Messintervalle

Der Oberflächenwiderstand der exponierten und trockenen Proben beider Materialien nimmt mit der Zeit ab, was auf eine Aufnahme von Wasser aus der Umgebungsluft deutet. Im Gegensatz dazu steigt der Widerstand bei den feuchten Proben mit den Vorbehandlungen Nr. 3 und Nr. 4. Die Feuchtigkeit diffundiert über die Dauer des Testintervalls aus den Probenkörpern. Dadurch nähern sich die Widerstände der Proben einander an. Es muss in einem längeren Versuch weiter überprüft werden, auf welchen finalen Wert diese hinauslaufen. Daraus lässt sich schließen, dass die Feuchtigkeit der Proben ein entscheidender Faktor für deren Oberflächenisolierwirkung ist. Diese Vermutung wird weiterhin durch die Tatsache bestätigt, dass bei den Messungen kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Messwerten und der Druckorientierung festgestellt werden konnte, wie in Abbildung 6 dargestellt.



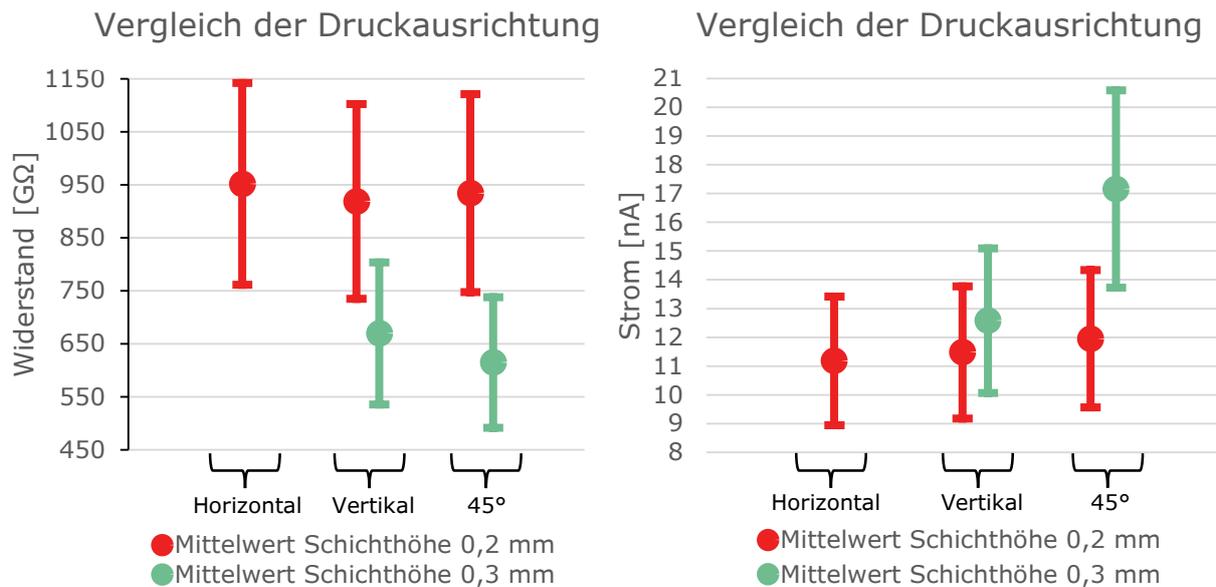


Abbildung 6: Vergleich von Widerstand und Stromstärke der drei verschiedenen Schichthöhen (oben) und Druckausrichtung bei einer Schichthöhe von 0,2mm (unten)

Abbildung 6 zeigt die gemessenen Werte in Bezug auf die Druckausrichtung und Schichthöhe sowie deren Messungenauigkeiten. Aus den Messwerten lässt sich kein eindeutiger Trend ablesen, da die Messungenauigkeiten der einzelnen Werte sich überlappen. Lediglich die Feststellung, dass Parameter wie die Schichthöhe und die Druckorientierung keinen Einfluss auf die Isolationswirkung der Oberfläche haben, kann getroffen werden. Bei genauerer Betrachtung der Messwerte fällt jedoch auf, dass die an diesem Tag gemessenen Werte deutlich höher sind (Faktor 10) als die der anderen Messungen. Die Ursache für die erhöhten Messwerte konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend festgestellt werden. Im folgenden Abschnitt werden mögliche Ursachen für diese starke Messabweichung detaillierter erläutert.

Drehmoment

Bei den ersten Testmessungen wurden leichte Verformungen der Probenkörper festgestellt. Diese sind auf das Anzugsmoment der Schrauben zurückzuführen. In einem darauffolgenden Versuch wurden die Auswirkungen genauer untersucht.

Es werden dafür vier Proben aus dem Werkstoff PLA getestet. Die Schrauben werden mithilfe eines Drehmomentschlüssels in einem Bereich von 0,2 bis 0,8 Nm in 0,2 Nm-Schritten angezogen. Anschließend werden der Widerstand und die Stromstärke gemessen.

Abbildung 7 zeigt die gemessenen Oberflächenwiderstände und die dazugehörige Stromstärke in Abhängigkeit des Anzugsmoments. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Anzugsmoment der gemessene Widerstand steigt bzw. die gemessene Stromstärke abnimmt, wie durch die linearen Trendlinien dargestellt ist. Die Messungenauigkeiten sind durch die Fehlerindikatoren in dem Diagramm gekennzeichnet. Die Annahme kann nicht eindeutig bestätigt werden. Innerhalb des Bereichs der Fehlerindikatoren sind auch andere Trendlinien möglich. Es bedarf weiterer Untersuchungen, um den genauen Einfluss des Anzugsmoments abzuschätzen. Auf Basis

der vorliegenden Ergebnisse kann allerdings bereits die Empfehlung abgeleitet werden, dass alle Probenkörper mit demselben Anzugsmoment fixiert werden sollten.

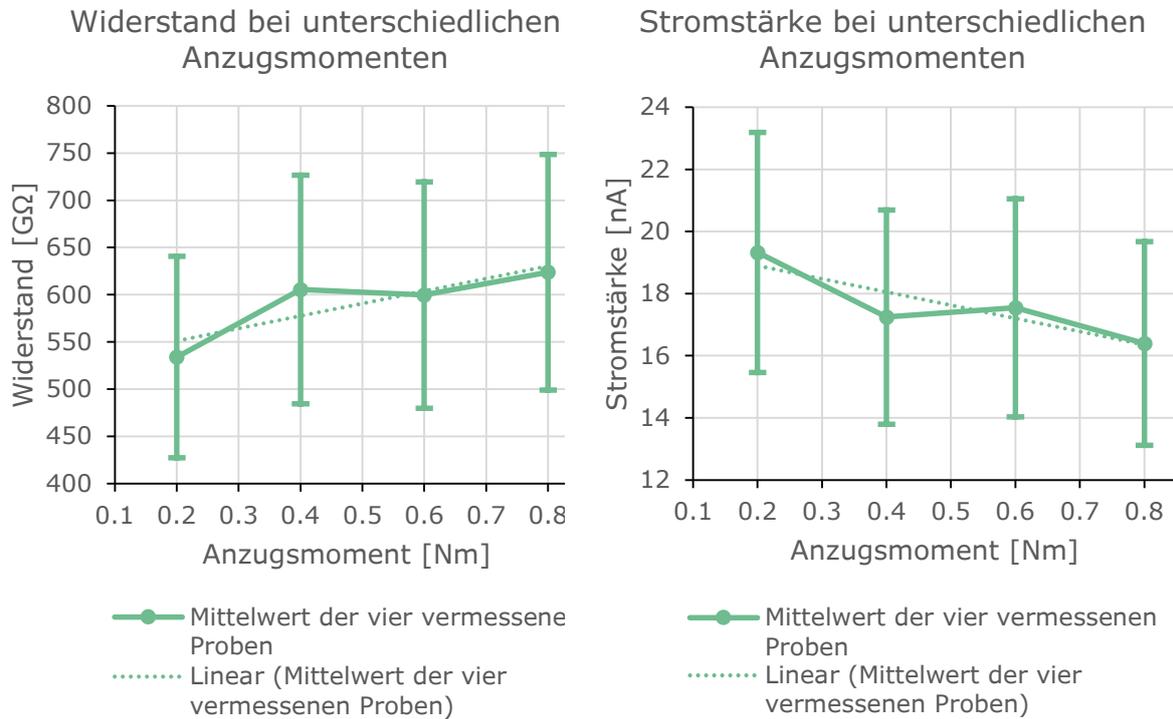


Abbildung 7: Gemessener Oberflächenwiderstand und Stromstärke in Abhängigkeit vom Anzugsmoment drei gleicher Probenkörper

Beurteilung möglicher Einflussparameter auf die Messung

Um Abweichungen in den gemessenen Werten zu klären, werden in diesem Abschnitt die Parameter diskutiert, die potenziell Einfluss auf die Messergebnisse haben können. Die Identifikation der Parameter erfolgte auf Basis einer vereinfachten Ursache-Wirkungs-Analyse nach Ishikawa. Dabei wurden Einflussgrößen in den Kategorien Mensch, Material, Maschine, Mitwelt und Methode gesammelt. Im Folgenden werden die Umgebungsbedingungen, Verschmutzungen, die Lagerung der Proben, das Messgerät, das Anzugsmoment, die Elektronenwolke, die Feuchte der Bauteile sowie deren Akklimatisierung, der Fertigungsprozess, die Oberflächenbeschaffenheit und das Material behandelt. Es handelt sich hierbei um alle identifizierten Parameter, die während der Versuche aufgefallen sind. Es ist zu beachten, dass es sich damit nicht um eine vollständige Liste handelt, sondern um alle identifizierten Parameter, die während der Versuche aufgefallen sind.

Mensch

Verschmutzung

Je nach Art der Verschmutzung der Prüfstrecke können sich die Messergebnisse beeinflussen, wie in [8] und [9] beschrieben. Um dies zu vermeiden, wurden bei der Handhabung der Proben stets Handschuhe verwendet.

Anzugsmoment

Gemäß Abbildung 7 hat das Anzugsmoment einen Einfluss auf die Messung. Um diesen potenziellen Einfluss zu minimieren, wurden bei allen Messungen die Schrauben mit einem Anzugsmoment von 0,4 Nm festgezogen. Infolgedessen kann der Einfluss für die vorliegenden Untersuchungen als vernachlässigbar betrachtet werden.

Material

Fertigungsprozess

Der Fertigungsprozess kann die Messergebnisse beeinflussen, da er die Druckqualität der Bauteile direkt steuert. Um sicherzustellen, dass die Messungen vergleichbar sind, wurden alle Probenkörper aus demselben Filament und auf demselben Drucker sowie mit identischen Slicer-Einstellungen gedruckt. Daher kann dieser Parameter bei der Analyse der Messergebnisse vernachlässigt werden.

Oberfläche

Entgegen der ursprünglichen Annahme konnte kein nachweisbarer Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Messergebnisse festgestellt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass in den durchgeführten Versuchen nur unbehandelte Oberflächen mit verschiedenen Oberflächenmustern vermessen wurden. Eine nachträgliche Bearbeitung der Oberfläche, wie bspw. Schleifen, könnte potenziell die Messergebnisse beeinflussen.

Chemische Zusammensetzung

Es wurde kein direkter Zusammenhang zwischen den verwendeten Materialien und den Messergebnissen festgestellt. Diese Beobachtung ist jedoch überraschend, da PETG bekanntermaßen hydrophiler ist als PLA und daher mehr Feuchtigkeit aufnehmen sollte. Da dieser Effekt jedoch nicht in den Messergebnissen erkennbar ist, wird davon ausgegangen, dass alle Probenkörper in gleichem Maße gesättigt waren. Es ist jedoch möglich, dass bei längeren Testintervallen und zusätzlichem Material Unterschiede festgestellt werden können.

Maschine – Messgerät

Bei der Auswertung der Ergebnisse müssen Messungenauigkeiten berücksichtigt werden. Die ermittelten Messwerte wurden manuell abgelesen, nachdem sich der Messwert stabilisiert hatte. Es wäre sinnvoll, mehrere Messwerte über einen definierten Zeitraum zu erfassen und anschließend über diese zu mitteln. Leider war dies mit dem verwendeten Messgerät nicht möglich.

Mitwelt – Umgebungsbedingungen

Temperatur

Die Messungen wurden bei einer kontrollierten Temperatur von 20°C im Labor durchgeführt. Es konnte kein erkennbarer Zusammenhang zwischen der Temperatur der Probenkörper und ihrem Oberflächenwiderstand festgestellt werden. Es scheint, dass die unterschiedlichen Temperaturen aus den Vorbehandlungen keinen Einfluss auf diese Messgrößen haben. Dies könnte daran liegen, dass alle Proben vor der Messung 24 Stunden lang auf die Labortemperatur akklimatisiert wurden.

Luftfeuchte

Anhand der durchgeführten Recherche lässt sich feststellen, dass die Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft während der Messung einen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Für die vorliegenden Versuche konnte die genaue Luftfeuchtigkeit jedoch nicht ermittelt werden, da das Klimagerät im Labor aufgrund eines Defekts nicht regelbar war. Somit ist der Einfluss auf die Messergebnisse schwer einzuschätzen. Dennoch lassen sich aus den Messergebnissen Trends erkennen, unabhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung. Die Messergebnisse weisen teilweise Unterschiede auf, die auf andere Parameter zurückzuführen sind. Der zeitliche Verlauf in Abbildung 5 zeigt, dass eine Akklimatisierung an das Raumklima insbesondere bei den feuchten Probenkörpern zu deutlichen Veränderungen der Messwerte führte.

Luftzug

Während der initialen Probemessungen stellte sich heraus, dass Bewegungen in der Umgebungsluft um den Prüfkörper herum die Messwerte der Stromstärke und des Widerstands beeinflussen. Es wurde festgestellt, dass das Anpusten oder Anwehen der Probenkörper während der Messung zu Schwankungen führte, die größer als die Messgenauigkeit des Messgerätes waren. Aus diesem Grund wurden bei allen abschließenden Messungen die Probenkörper und Anschlüsse vollständig abgedeckt.

Methode

Lagerung

Die Umgebungsbedingungen, denen die Proben vor der Messung ausgesetzt waren, haben einen direkten Einfluss auf die Probenkörper und beeinflussen daher das Messergebnis, wie in Abbildung 5 dargestellt. Grundsätzlich wurden die Probenkörper nach der Vorbehandlung in einem Behälter mit Silikat aufbewahrt, der ebenfalls der gleichen Vorbehandlung unterzogen wurde. Die offenen Proben wurden gemeinsam gelagert und vermessen, um sicherzustellen, dass alle Proben die gleiche Akklimatisierung erfahren haben.

Elektronenwolke

Bei der Prüfung der Proben kann ionisierte Luft in der Umgebung der Prüfstrecke auftreten, die aufgrund der hohen Spannung entsteht. Es ist unklar, wie dieser Effekt die Messergebnisse beeinflusst. Da die Ionisierung sowohl von der relativen Luftfeuchtigkeit als auch von der Luftzirkulation im Raum beeinflusst wird, ist sie schwer nachzuweisen und wurde bei den Messungen nicht ermittelt.

Feuchte der Bauteile

Die Messergebnisse zeigen, dass die gemessenen Werte hauptsächlich von der relativen Luftfeuchtigkeit während der Vorbehandlung und somit von der Feuchtigkeit der Bauteile abhängen. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde bis zur Durchführung der Messungen konstant auf dem Niveau der Vorbehandlung gehalten. Dazu wurden die Aufbewahrungsbehälter, einschließlich des Silikats, gemeinsam mit den Probenkörpern der gleichen Vorbehandlung unterzogen. Dadurch wurde sichergestellt, dass trockene Proben bis zum Beginn der Messungen trocken und feuchte Proben feucht blieben. Erst ab dem Zeitpunkt der Messungen waren die Probenkörper der direkten Umgebungsluft ausgesetzt. Die Proben, die im Wasserbad gelagert wurden, wurden vor der Messung lediglich oberflächlich getrocknet. Dieser Parameter kann daher als kontrolliert betrachtet werden.

Akklimatisierung

Die Akklimatisierung spielt eine wichtige Rolle, da sie sowohl die Temperatur als auch die Feuchtigkeit der Probenkörper beeinflusst. Um eine einheitliche Behandlung aller Prüfkörper mit Ausnahme der im Wasserbad gelagerten zu gewährleisten, wurden diese vor jeder Messung 24 Stunden lang auf Prüftemperatur abgekühlt. Dabei fand aufgrund der Aufbewahrungsbehälter kein Feuchtigkeitsaustausch statt, sodass die Probenkörper gemäß ihrer Vorbehandlung gesättigt vermessen wurden.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus den durchgeführten Versuchen lässt sich festhalten, dass die Druckparameter Schichthöhe und Bauteilausrichtung während der additiven Fertigung von Bauteilen keinen nachweisbaren Einfluss auf die Isolationswirkung an der Oberfläche hatten. Es hat sich gezeigt, dass der Feuchtegehalt der Körper eine zentrale Einflussgröße auf die Isolationswirkung darstellt.

Zudem wurden mittels einer vereinfachten Ursache-Wirkungs-Analyse Faktoren identifiziert, die das Messergebnis beeinflussen. Diese Faktoren wurden in den Kategorien Mensch, Material, Maschine, Mitwelt und Methode unterteilt. Es war im Verlauf dieser Arbeit nicht möglich, den Einfluss dieser Faktoren abschließend zu quantifizieren. Generell ist aufgrund der Messungenauigkeiten davon auszugehen, dass insbesondere Relativvergleiche innerhalb einer Messreihe eine hohe Aussagekraft aufweisen.

Diese Grundlagenuntersuchungen haben gezeigt, dass bei einer industriellen Anwendung eine bauteilspezifische Absicherung der Isolationswirkung unter Einsatzbedingungen notwendig ist. Insbesondere gilt es, die zulässigen Luftfeuchtebereiche sorgfältig zu ermitteln und während der Nutzung einzuhalten. Für weitere Forschungen im Bereich der Kriechstrommessung additiv gefertigter Körper wird empfohlen, die bereits genannten Einflussfaktoren genauer zu untersuchen und zu isolieren. Die Messgenauigkeit des Messgerätes erwies sich als entscheidender Einflussfaktor auf die Messergebnisse.

Literatur

Zeitschriften

- [1] Espan, David, „3D Printing multifunctionality: structures with electronics“, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 72, 963-978
- [2] Liu, Zhe, „Topology optimization and 3D-Printung fabrication feasibility of high voltage FGM insulator“, In: 2016 Tagungsband der Konferenz: IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 19-22 September 2016 in Chengdu, China, IEEE, Chengdu 2016
- [3] Li, Xiao-Ran, „Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts“, In: 2018 Tagungsband der Konferenz: IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, 10-13 September 2018 in Athens, Greece, IEEE, Athens 2018
- [4] Logan, Truman, „Conductive 3D printing: resistivity dependence upon infill pattern and application to EMI shielding“, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31, 14108-14117
- [5] Tomáš, Tichý, „Application Possibilities of Fused Filament Fabrication Technology for High-Voltage and Medium-Voltage Insulation Systems“, In: 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology, 15-19 May 2019 in Wroclaw, Poland, IEEE, Poland 2019
- [6] X. -R. Li et al., "Analysis of Morphology and Electrical Insulation of 3D Printing Parts," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642096
- [7] P Veselý and T Tichý and O Šefl and E Horynová, "Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/461/1/012091

Normen

- [8] DIN EN 60664-1 Isolationskoordination für Niederspannungsbetriebsmittel, 2012-06, Teil 2-1
- [9] DIN EN 60112 Verfahren zur Bestimmung der Prüfzahl und der Vergleichszahl der Kriechwegbildung von festen, isolierten Werkstoffen, 2022-11
- [10] DIN EN ISO/ASTM 52900:2022, Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie

Internet

- [11] Fluke Corporation, [Online], Internet: <https://www.fluke.com/de-de/produkt/elektrische-pruefungen/isolationsmessgeraete/fluke-1555>, 2023-06-28.

Kontaktangaben

Jean-Luc von Wilcken, Prof. Dr.-Ing. Christian Seidel

Hochschule für angewandte Wissenschaften München
Smart Manufacturing Lab

Lothstraße 34, 80335 München, Deutschland

E-Mail: Smart-Manufacturing-Lab-fk06@hm.edu

WEB: <https://sci.hm.edu/>