

Messtechnische Untersuchungen von Durchgangs- und Oberflächenwiderständen additiv hergestellter Proben

Baysa Lkhamsuren*, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland
*l.baysa@hsu-hh.de

Kurzfassung – Dieser Artikel beschreibt die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen der Durchgangs- und Oberflächenwiderstände von additiv hergestellten Probekörpern im Rahmen des Teilvorhabens der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg im Verbundprojekt FIONA - Funktions-Integrierte Optimierte Neuartige Additive Strukturen. Ziel dieses Teilvorhabens ist die Entwicklung und praktische Erprobung von Testverfahren zur Bestimmung elektrischer Eigenschaften additiv hergestellter Bauteile für Luftfahrtanwendungen mit integrierten elektrischen Funktionen. In diesem Beitrag wird ein genormtes Prinzip zur Messung des Durchgangs- und des Oberflächenwiderstandes beschrieben. Zunächst wird auf die theoretischen Grundlagen und das Messprinzip eingegangen. Im weiteren Kapitel werden das Messgerät und die Messelektroden beschrieben. Anschließend werden die Messergebnisse zusammengefasst.

Stichworte – Funktionsintegration, Testverfahren, Additive Fertigung, Luftfahrtanwendung, Durchgangswiderstand, Oberflächenwiderstand

NOMENKLATUR

BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
FIONA	Funktions-Integrierte Optimierte Neuartige Additive Strukturen
FE	Fischer Elektronik
TO-3	TeraOhmmeter
TOM 300-2	Hochohm-Schirmkammer

I. EINLEITUNG

Elektrische Isoliersysteme müssen einer Vielzahl von technischen Anforderungen genügen. Neben den mechanischen und thermischen Eigenschaften müssen die Bauteile gute isolierende Eigenschaften aufweisen [1].

Die additive Fertigung mit thermoplastischen Werkstoffen setzt sich als anerkanntes Fertigungsverfahren für Flugzeugkomponenten durch. Durch die Kombination verschiedener Filamente mit thermoplastischem Material können optimale Materialeigenschaften erreicht werden, sodass funktionale Bauteile herstellbar sind [2]. Das Kernziel des Verbundvorhabens FIONA ist die Integration von Funktionen in additiv hergestellte Luftfahrtkomponenten. Die

Integration von elektrischen Funktionen kann entweder in den Herstellungsprozessen oder durch die Funktionalisierung von Materialien umgesetzt werden.

Für die Erprobung der Testverfahren von additiv hergestellten Komponenten werden die bestehenden Prüfmethode analysiert und auf Adaptionsmöglichkeiten geprüft, sodass neue Verfahren für die additiv hergestellten Komponenten entstehen. Dies ermöglicht die Validierung unterschiedlicher Technologien und Materialkombinationen hinsichtlich der Parameter Spannungsfestigkeit, Stromtragfähigkeit, Isolierfähigkeit und elektromagnetische Verträglichkeit.

Die Bestimmung des Durchgangs- und des Oberflächenwiderstands eines Bauteils dient zur Charakterisierung von Materialeigenschaften der Probekörper, die mit additiven Fertigungsverfahren hergestellt wurden.

Zur Bestimmung der Durchgangs- und Oberflächenwiderstände additiv hergestellter Probekörper wird das TeraOhmmeter TO-3 mit normierten Elektroden und mit einer Hochohm-Schirmkammer vom Hersteller Fischer Elektronik eingesetzt.

Im Rahmen des Teilvorhabens der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg wurde für die Testverfahren ein Teststand mit obengenannten Instrumenten aufgebaut und in Betrieb genommen. Da es sich um nicht leitfähige Materialien handelt, werden die Messungen nach DIN EN 62631-3-1 und DIN EN 62631-3-2 durchgeführt.

In diesem Artikel werden die Messeinrichtung und die ersten Messergebnisse der im Labor additiv hergestellten Probekörper vorgestellt.

II. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die Messung des Durchgangswiderstandes und des Oberflächenwiderstandes erfolgt nach DIN EN 62631-3-1 bzw. DIN EN 62631-3-2. Beides sind Gleichspannungsverfahren mit den typischen Prüfspannungen 10 V, 100 V, 500 V, 1000 V und 10 000 V [3], [4].

A. Durchgangswiderstand

Als Durchgangswiderstand R_D wird der Widerstand eines Materials gegen den Stromdurchfluss bezeichnet. Ein Messschema nach DIN EN 62631-3-2 zeigt ABBILDUNG 1. Der Durchgangswiderstand des Probematerials wird nach dem

ohmschen Gesetz aus dem Quotienten der angelegten Messspannung U_M und dem zwischen den Elektroden 1 und 3 fließenden Strom I_D bestimmt [3]:

$$R_D = \frac{U_M}{I_D} \quad (1)$$

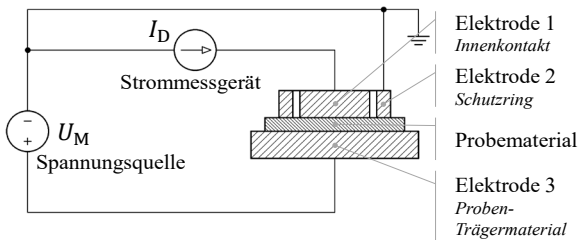


ABBILDUNG 1: GRUNDSCHALTUNG ZUR MESSUNG DES DURCHGANGSWIDERSTANDES NACH [3], [6].

B. Oberflächenwiderstand

Der Oberflächenwiderstand R_{SC} der Messfläche der Probekörper wird aus dem Quotienten der angelegten Spannung U_M und dem nach einer bestimmten Zeit zwischen den Messelektroden fließenden Strom I_O bestimmt [4]. „Allerdings ist der Oberflächenwiderstand an sich keine Materialeigenschaft. Der Oberflächenwiderstand hängt hauptsächlich von Parametern bei Verarbeitung, Umwelteinflüssen, Oberflächenalterungsphänomenen und Verschmutzung ab.“ [4]

Die Messelektroden sind in der ABBILDUNG 2 als Elektrode 1 (Innenkontakt) und Elektrode 2 (Schutzring) dargestellt. Der Probekörper ist in der ABBILDUNG 2 als Messfläche dargestellt.

$$R_{SC} = \frac{U_M}{I_O} \quad (2)$$

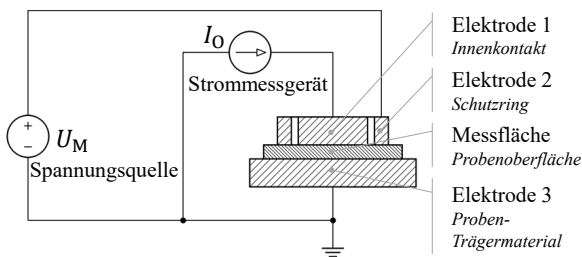


ABBILDUNG 2: GRUNDSCHALTUNG ZUR MESSUNG DES OBERFLÄCHENWIDERSTANDES NACH [4], [6].

III. MESSEINRICHTUNG TO-3

Laut DIN EN 62631-3-1 und DIN EN 62631-3-2 darf jede kommerziell erhältliche Prüfeinrichtung verwendet werden. Das Widerstandsmessgerät TO-3 von der Firma Fischer Elektronik wird zur Messung elektrischer Widerstände leitender und nichtleitender Werkstoffe sowie zur Messung kleiner Gleichströme in Niederspannungsstromkreisen angewendet. Die TABELLE I zeigt die Leistungsmerkmale des Widerstandsmessgeräts TO-3.

TABELLE I: LEISTUNGSMERKMALE DES WIDERSTANDSMESSGERÄTS TO-3 [8].

Merkmal	Wertebereich
Messbereich	0,9 kΩ ... 1,6 PetaΩ
Messspannung	10 V, 100 V, 500 V oder variabel bis 500 V
Messstrom	max. 3 mA
Messfehler	Messbereich 1 bis 5: ±0,3% + 2 Digit Messbereich 6: ±0,5% + 2 Digit Messbereich 7: ±1% + 2 Digit
Temperaturfehler	15°C bis 35°C: +/- 0,1 % K
Temperaturfehler der Messspannung	+/- 0,01 % K
Normen und Prüfvorschriften	- DIN EN 62631-3-1:2017-01 - VDE 0307-3-1:2017-01
	- DIN EN 62631-3-2:2016-10 - VDE 0307-3-2:2016-10
	- DIN IEC 61340-4-1 - DIN EN 1149-1/-2 - DIN 53482
Zubehör	Schutzringelektroden FE 25 nach: - DIN IEC 60093 - DIN EN 62631-3-1 - DIN EN 62631-3-2
	Schutzringelektroden FE 50 nach: DIN EN 62631-3-1 DIN EN 62631-3-2
	Hochohm-Messelektrode HOW 1
	Hochohm-Messelektrode AE 30-DIN nach: DIN EN 61340-2-3 DIN EN 61340-5-1
	Grundplatte GP14
	Hochohm-Schirmkammer TOM300-2

Um Störungen durch elektrische Felder und äußere Einflüsse zu vermeiden, finden die Messungen in der Messkammer TOM300-2 statt. Laut Norm DIN EN 62631-3-2 ist ab einem Widerstandswert von $10^{10} \Omega$ eine Schirmkammer während der Messungen zu nutzen. Als Personenschutz entlädt eine, in der Kammer integrierte, Schutzschaltung den Probekörper [7].

Die ABBILDUNG 3 zeigt die Messschaltung des Widerstandsmessgeräts TO-3. Der Mikroprozessor steuert die Messspannung (U_M) über einen D/A-Wandler. Beim Einschalten der Spannung fließt durch den Probekörper (R_{PROBE}) ein Strom. Dieser Strom erzeugt am Referenzwiderstand R_{REF} einen Spannungsabfall, der umgekehrt proportional zum Widerstand R_{PROBE} ist. Der Referenzwiderstand kann von 100Ω bis $1 \text{ G}\Omega$ in 7 Schritten umgeschaltet werden. Der Spannungsabfall an R_{REF} wird mit dem Eingangsverstärker zu U_{REF} verstärkt. Der Mikroprozessor liest die verstärkte Spannung U_{REF} gegen das Bezugspotential über den A/D-Wandler ein. Der Widerstand wird nach dem ohmschen Gesetz als Quotient der Messspannung und des Messstromes bestimmt.

Für die Messungen mit variablen Messspannung wird die Funktion vm-step aktiviert.

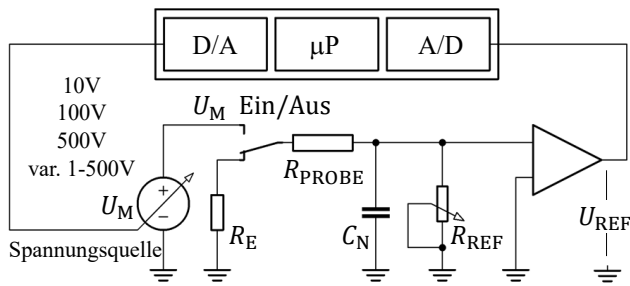


ABBILDUNG 3: PRINZIPSCHALTUNG DES WIDERSTANDSMESSGERÄTES TO-3 [5].

IV. MESSSTAND UND MESSERGEBNISSE

A. Versuchsaufbau und Durchführung

Für die Inbetriebnahme und für die Messungen wurden runde Probekörper mit einem Durchmesser von 55 mm und quadratische Probekörper mit einer Abmessung von 100 mm x 100 mm in je 3 verschiedenen Dicken von 0,5 mm, 1 mm und 2 mm gedruckt. Die Formen der Probekörper richten sich nach den Formen der eingesetzten Elektroden. Zum Vergleich wurden Messungen an einer Isolierfolie vom Typ CMC70075 und an Probekörper aus Papier durchgeführt.

Die TABELLE II zeigt die Eigenschaften des Druckverfahrens und des Filaments.

TABELLE II: LEISTUNGSMERKMALE VON DRUCKER UND FILAMENT.

Druckereigenschaften	Prozess	Fused Filament Fabrication (FFF)
	Volumen	320x132x154 mm
	Schichthöhe	200 μ m
Filament	Bezeichnung	Onyx
	Zugfestigkeit	37 MPa
	Zugmodulus	2.4 GPa

Um den Einfluss der Messspannung und der Messzeit zu betrachten, wird der Messmodus vm-step mit Strommessung gewählt. Die Messspannung wird vom 10 V bis 500 V in 5 V Schritten erhöht. Die gemessenen Werte können als Messreihe bzw. als grafische Darstellung gespeichert und weiterbearbeitet werden.

Das Widerstandsmessgerät TO-3 verfügt über eine grafische Benutzeroberfläche, mit der man die in TO-3 integrierten Befehle und Funktionen vom PC aus aufrufen und ausführen kann. Das Messgerät kann über eine serielle RS232 Schnittstelle mit dem PC ferngesteuert werden. Für die Aufbereitung und für die Weiterverarbeitung der Messwerte stehen Funktionen für Messungen mit variablen Messspannung (vm-step), für die grafische Darstellung der Messungen (graph) und für die Speicherung der Messwerte (store) zur Verfügung.

B. Auswertung der Messungen

Nach dem Start der Messung ist es möglich, die gemessenen Daten grafisch auf dem Bildschirm darzustellen und die aktuell aufgenommenen Daten grafisch als Bild abzuspeichern.

Für weitere Vergleiche und Analysen wurden die gemessenen Messreihen als Wertetabelle in einer Datei gespeichert und mittels MATLAB bearbeitet. Die ABBILDUNG 4 und die ABBILDUNG 5 zeigen die Strom-Spannungs-Kurven der Durchgangs- und Oberflächenwiderstandsmessung von Onyx-Probekörper (schwarz) unterschiedlicher Größe, Dicke und Form. Zum Vergleich sind die Messwerte von Papier (rot) und Isolierfolie CMC70075 (blau) dargestellt.

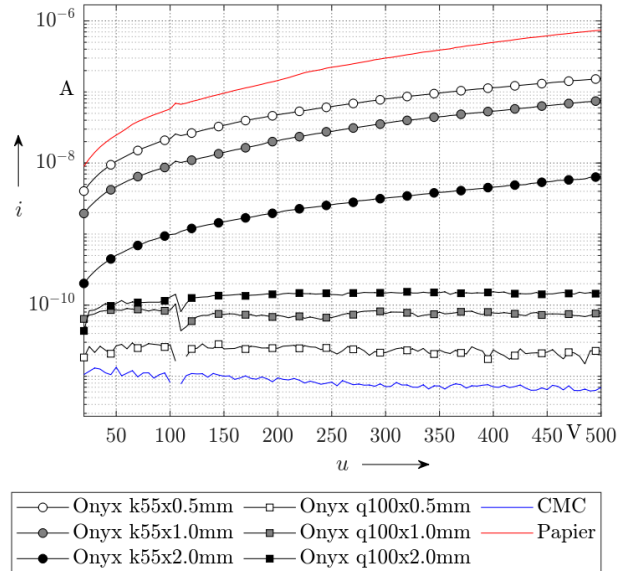


ABBILDUNG 4: STROM-SPANNUNGSMESSUNG ZUR BESTIMMUNG DES DURCHGANGSWIDERSTANDS.

Für die Messung von Oberflächenwiderständen wird die Schaltung in der Hochohm-Schirmkammer umgebaut und eine Strommessung mit variabler Messspannung von 10 V bis 500 V in 5 V Schritten durchgeführt. Das Zeitintervall beträgt wie bei der Messung vom Durchgangswiderstand 5 Sekunden.

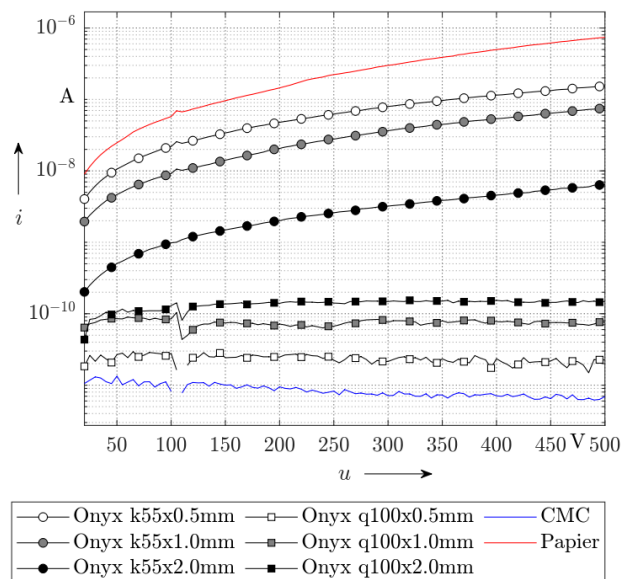


ABBILDUNG 5: STROM-SPANNUNGSMESSUNG FÜR DIE BESTIMMUNG DES OBERFLÄCHENWIDERSTANDS.

C. Ergebnis der Messungen

Der Durchgangswiderstand und der Oberflächenwiderstand der Probekörper werden aus dem gemessenen Strom und der angelegten Spannung nach den Gleichungen (1) und (2) berechnet.

Das Ergebnis der Berechnung des Durchgangswiderstands ist in ABBILDUNG 6 und das Ergebnis des Oberflächenwiderstands in ABBILDUNG 7 grafisch dargestellt.

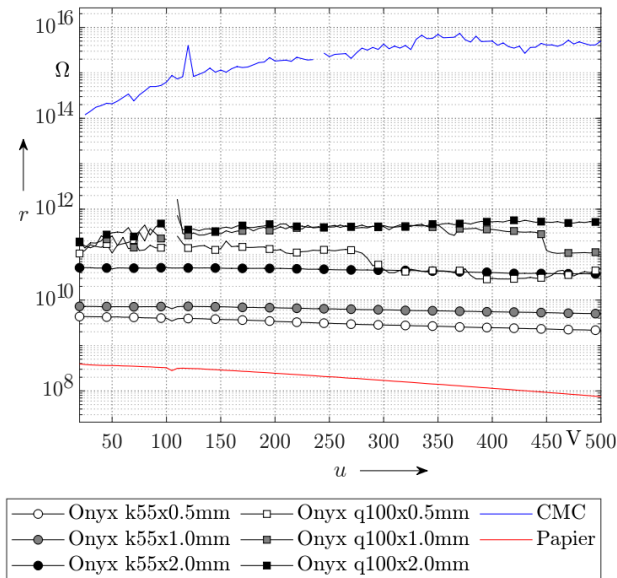


ABBILDUNG 6: DURCHGANGSWIDERSTAND IN ABHÄNGIGKEIT DER MESSSPANNUNG.

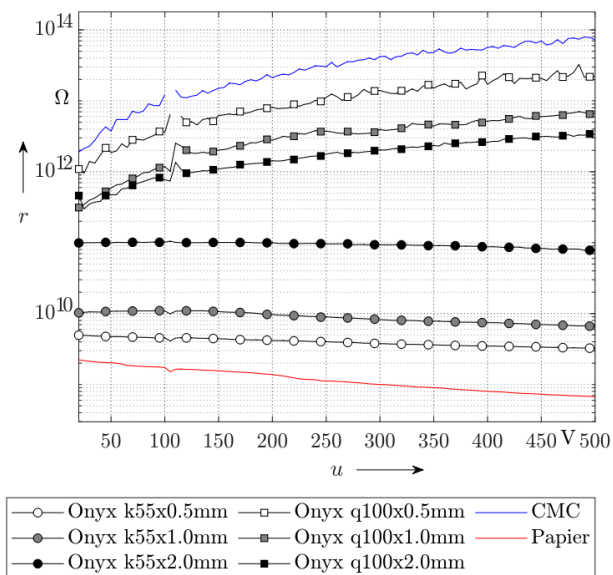


ABBILDUNG 7: OBERFLÄCHENWIDERSTAND IN ABHÄNGIGKEIT DER MESSSPANNUNG.

V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In diesem Artikel werden ein Messstand für die Bestimmung von Durchgangswiderständen und von

Oberflächenwiderständen additiv hergestellter Probekörper und die ersten Messergebnisse vorgestellt. Die gemessenen Probekörper wurden aus dem Filament Onyx in 2 verschiedenen Formen und in 3 unterschiedlichen Dicken hergestellt. Onyx ist ein mit Mikrokohlefaser gefülltes Nylon, aus dem sich Teile mit sehr guter Oberflächenbeschaffenheit präzise herstellen lassen. Es hat eine hohe Festigkeit, Widerstandsfähigkeit sowie chemische und mechanische Beständigkeit. Die für diese Messung verwendeten Proben haben beinahe die Materialeigenschaften der Filamente, die für Luft- und Raumfahrtanwendungen eingesetzt werden, wie Onyx FR, Onyx ESD und Ultem 9085. Bei den untersuchten Probekörper liegen die Oberflächenwiderstände etwa 2 Dekaden höher als die Durchgangswiderstände. Als weitere Schritte müssen die Probekörper auf ihr Teilentladungsverhalten und die Durchschlagfestigkeit geprüft werden. Weiterhin müssen Probekörper mit den Filamenten, die für Luft- und Raumfahrtanwendungen zugelassen sind, gedruckt und mit der Messeinrichtung gemessen werden. Die Ergebnisse der zukünftigen Untersuchungen werden zeigen, ob die neuartig hergestellten Werkstoffe die hohen Erwartungen erfüllen können.

VI. DANKSAGUNG

Das in diesem Beitrag vorgestellte Vorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Verbundprojekts FIONA (FKZ: 20W1913C) gefördert.

LITERATUR

- [1] Küchler Andreas, *Hochspannungstechnik Grundlagen - Technologie - Anwendungen*. Berlin: Springer, 2009. ISBN 9783540784128.
- [2] M. F. Meyer, H. Wienken, B. Lkhamsuren, and D. Schulz, "Entwicklung und praktische Erprobung von adaptierten elektrischen Testverfahren für additiv hergestellte Bauteile für Luftfahrtanwendungen mit integrierten elektrischen Funktionen." Universitätsbibliothek der HSU/UniBwH, 2021. doi: 10.24405/13963
- [3] DIN EN 62631-3-1 (VDE 0307-3-1):2017-01, Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Isolierstoffe – Teil 3-1: Bestimmung resistiver Eigenschaften (Gleichspannungsmethoden) – Durchgangswiderstand und spezifischer Durchgangswiderstand, Basisverfahren
- [4] DIN EN 62631-3-2 (VDE 0307-3-2):2016-10, Dielektrische und resistive Eigenschaften fester Isolierstoffe: Teil 3-2: Bestimmung resistiver Eigenschaften (Gleichspannungsverfahren) – Oberflächenwiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand
- [5] *Benutzerhandbuch TeraOhmmeter TO-3*, Fischer Elektronik GmbH & Co. Industrie- und Labortechnik KG, Mittenwalde.
- [6] *Benutzerhandbuch: Schutzringelektroden*, Fischer Elektronik GmbH, & Co. Industrie- und Labortechnik KG, Mittenwalde.
- [7] *Benutzerhandbuch Hochohm-Schrimkammer TOM 300-2*, Fischer Elektronik GmbH, & Co. Industrie- und Labortechnik KG, Mittenwalde.
- [8] "Fischer Messtechnik 2000," *Fischer-messtechnik-2000.de*, 18-Nov-2018. [Online]. Available: <https://fischer-messtechnik-2000.de/>. [Accessed: 27-Sep-2022].