

NORMUNGSINITIATIVE ADDITIVE FERTIGUNG IN DER ELEKTROTECHNIK GEDRUCKTE MULTIMATERIALSYSTEME ALS SCHLÜSSEL FÜR PRODUKTINNOVATIONEN UND NEUE TECHNOLOGIEN

Hansgeorg Haupt

*Zentrum für Konstruktionswerkstoffe MPA/IfW und Additive Manufacturing Center,
Technische Universität Darmstadt, Grafenstr. 2, 64283 Darmstadt*

Michael Schleicher

*Semikron Danfoss Elektronik GmbH & Co. KG,
Sigmundstraße 200, 90431 Nürnberg*

Leitermaterialien gewährleisten in Kombination mit – meist polymeren – Isolierstoffen in elektrischen Isoliertechniken grundlegende elektrische Funktionalität. Ferner bilden Druckverfahren zum Aufbau elektronischer Baugruppen und gedruckter Schaltungsträger (Leiterplatten), aber auch in der Mikroelektronik, seit langer Zeit den Stand der Technik ab. Additive Fertigungsverfahren ergänzen als neue, hochinnovative Technologie die etablierten Verfahren und eröffnen für verschiedene elektrotechnische Technologiefelder völlig neue Möglichkeiten. Anwendungen finden sich u.a. im Bereich der (ggf. dreidimensionalen) gedruckten Elektronik, der Mechatronik und Sensorintegration, aber auch in der elektrischen Energietechnik, dem Elektromaschinenbau und der Hochspannungstechnik sowie für die Elektromobilität. Mittlerweile beginnt sich die vergleichsweise anspruchsvolle additive Fertigung von Multimaterialsystemen technologisch zu etablieren. Offen ist derzeit jedoch, in welcher Weise das elektrotechnische Normenwerk an die neuen Technologien angepasst werden kann und muss. Hierbei sind nicht nur Aspekte der elektrotechnischen Funktionalität, sondern auch prozessrelevante Informationen sowie Nachhaltigkeits- und Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen. Seitens der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) versuchen daher die Technischen Komitees IEC TC 15 (Solid electrical insulating materials), IEC TC 91 (Electronics assembly technology), IEC TC 112 (Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems) und IEC TC 119 (Printed Electronics) gemeinsame Wege zur Entwicklung zukünftiger Normen zu finden. Hierzu ist eine Kooperation mit dem für die Normung Additiver Fertigungsverfahren zuständigen Komitee ISO/TC 291 (Additive Manufacturing) der Internationalen Organisation für Normung (ISO) im Rahmen einer Joint Working Group geplant. ISO/TC 291 erarbeitet Normen für die additive Fertigung außerhalb der Elektrotechnik und kooperiert dabei in vielen Fällen mit der amerikanischen Normungsorganisation ASTM. In Deutschland werden diese Aktivitäten seitens der zuständigen Nationalen Normungsorganisationen, dem Deutschen Institut für Normung (DIN) und der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE), koordiniert.

1. Ausgangssituation

1.1. Additive Fertigung

Additive Fertigungsverfahren sind in der Technik nicht grundsätzlich neu. Bereits die Pyramiden im alten Ägypten wurden – Stein auf Stein – „additiv“ erstellt. Additive Fertigung im engeren Sinne ist aber erst mit der Verfügbarkeit moderner Produktions- und Informationstechnologien möglich. Im Jahre 1981 erfand Chuck Hall die Stereolithografie (SLA, STL), bei der ein flüssiges Harz in Schichten durch Lichteinwirkung ausgehärtet wird. Seit dieser Zeit ist es somit grundsätzlich

möglich, Bauteile aus Isolierstoffen durch additive Fertigung herzustellen. Nach der Jahrtausendwende wurden, auch getrieben durch das Auslaufen von Patenten für das SLA-Verfahren, verschiedene Verfahren zur additiven Fertigung von Metallen entwickelt. Mittlerweile stellt die additive Fertigung mit Metallen für den professionellen Bereich eine bedeutsame Ergänzung zu konventionellen Fertigungsverfahren dar, da völlig neue Bauteilgeometrien und Designs ermöglicht werden. Ein wichtiger Vertreter dieser Verfahren ist das Selektive Laserschmelzen (SLM), bei dem ein

Metallpulver in einem Pulverbett durch lokales Aufschmelzen prozessiert wird (PBF-LB/M). Aufgrund der spezifischen Absorptionseigenschaften von Kupfer, war dessen Verarbeitung im Gegensatz zu „silberfarbenen“ Metallen anfangs noch nicht möglich. Inzwischen existiert jedoch eine Reihe von Anlagen mit „grünem“ Laser, so dass auch die additive Fertigung von Kupferbauteilen kein Problem mehr darstellt.

Mit speziellen Verfahren (z.B. mittels Laser Induced Forward Transfer) können mittlerweile auch Multimaterialsysteme aus Werkstoffen gefertigt werden, die hinsichtlich ihrer Verarbeitungseigenschaften eigentlich inkompatibel sind. Diese sind allerdings im Gegensatz zu den bereits seit langer Zeit etablierten Verfahren zur Herstellung gedruckter Schaltungsträger noch nicht sehr verbreitet. Schaltungsträger und Leiterplatten werden unabhängig von den oben beschriebenen Entwicklungen schon sehr lange durch Druckverfahren erzeugt. Auch dreidimensionale Designs (z.B. spritzgegossene 3D Moulded Interconnect Devices, 3DMID) bilden den Stand der Technik ab. Zunehmend werden Multimateril-3D-Druckverfahren relevant, wobei derzeit die Leiterstrukturen in der Regel noch durch hochgefüllte leitfähige Polymere erzeugt werden. Diese Leiterwerkstoffe bilden mit parallel prozessierten elektrischen Isolierstoffen elektrische Isolierteile, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

1.2. Elektrische Isolierteile

Elektrische Isolierteile sind seit Beginn der Elektrotechnik (erste Ansätze in frühen physikalischen Experimenten etwa seit der Zeit der Renaissance und dann insbesondere seit dem 19. Jahrhundert) grundsätzliche Voraussetzung für elektrische Funktionalität.

Zur Sicherstellung der Eigenschaften elektrischer Isolierteile existiert ein umfangreiches Normenwerk, welches in wesentlichen Teilen bei der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC)

erarbeitet wird. Von Bedeutung sind dabei u.a. spezifischer Durchgangs- und Oberflächenwiderstand von Isolierstoffen, die Permittivität und der dielektrische Verlustfaktor, die elektrische Durchschlagfestigkeit, aber auch das elektrische Verhalten unter Fremdschichten (Tracking). Oftmals kommen Isolierteile für Investitionsgüter der elektrischen Energietechnik zum Einsatz, deren Lebensdauer weit über 30 Jahre beträgt. Daher ist auch die Ermittlung von Langzeiteigenschaften ein wesentlicher Gegenstand der Normung, und zwar insbesondere bei hohen Temperaturen mit ggf. weiteren, überlagerten Beanspruchungen. Hierbei müssen auch Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Werkstoffen, die in einem Isolierteil zum Einsatz kommen, betrachtet werden, wodurch Lebensdaueranalysen in der Regel sehr komplex werden. Des Weiteren beeinflussen Teilentladungen sowie z.B. durch Inhomogenitäten, Spitzenwirkung und/oder Rauigkeit verursachte lokale Feldstärkeüberhöhungen maßgeblich die Lebensdauer. Auch die für die Herstellung von Isolierteilen relevante Prozesskette ist von Einfluss. Dieses hohe Maß an Komplexität stellt bereits für konventionell gefertigte Isolierteile eine Herausforderung dar, der u.a. in IEC 60505 [1]), Rechnung getragen wird. Für additiv gefertigte Isolierteile stellen sich zusätzliche Herausforderungen, wobei neben den eigentlichen Werkstoffeigenschaften insbesondere die Teilentladungsfreiheit und Rauigkeit von inneren Oberflächen zu nennen sind.

2. Nationale, Europäische und Internationale Normung

Abbildung 1 zeigt eine Zuständigkeitsmatrix für die Nationale, Europäische und Internationale Normung. Während die Zuständigkeit für die Elektrotechnische Normung grundsätzlich bei der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) liegt, ist für fast alle anderen Arbeitsgebiete (mit Ausnahme der Telekommunikation) die Internationale Organisation für Normung (ISO) zuständig.

Diese Organisationen sind privatrechtlich organisiert; die Normung stellt insoweit keine hoheitliche Aufgabe dar. Gleiches gilt grundsätzlich auch für die Europäische Normung, wobei hier jedoch teilweise ein Bezug zu rechtlich relevanten Europäischen Richtlinien und Verordnungen besteht (insbesondere bei harmonisierten Europäischen Normen). Die Aktivitäten erfolgen hier bei CENELC (für die Elektrotechnische Normung) und bei CEN (für andere Anwendungen, mit Ausnahme der Telekommunikation).

	Allgemein	Elektrotechnik	Telekommunikation
International			
Europäisch (regional)			
Deutsch (national)			

Abbildung 1: Zuständigkeiten auf verschiedenen Gebieten der Normung (Bildquelle: DKE)

Die für verschiedene Normungsprojekte zuständigen Gremien bei ISO und IEC bzw. CEN und CENELC (in der Regel Working Groups, WGs) werden in Deutschland national durch das Deutsche Institut für Normung (DIN) bzw. die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) gespiegelt. In den dort angesiedelten Gremien werden dementsprechend die internationalen Projekte aus deutscher Perspektive bearbeitet. Rein nationale Projekte sind möglich, werden inzwischen jedoch nur in Ausnahmefällen realisiert.

2.1. Nicht-elektrotechnische Normung

Im Folgenden soll auf die Aktivitäten auf dem Gebiet der Additiven Fertigung eingegangen werden. Die hier genannten Internationalen bzw. Europäischen Gremien werden seitens des DIN durch den Normenausschuss Werkstofftechnik (NWT) gespiegelt, und zwar im Fachbereich DIN NA 145-04 FBR.

2.1.1. ISO/TC 261 – Additive Manufacturing

Das bedeutendste internationale Gremium auf dem Gebiet der Additiven

Fertigungsverfahren ist das ISO/TC 261, welches unter dem folgenden Scope agiert:

Standardization in the field of Additive Manufacturing (AM) concerning their processes, terms and definitions, process chains (Hard- and Software), test procedures, quality parameters, supply agreements and all kind of fundamentals.

Sowohl Chair als auch Sekretariat dieses Komitees werden derzeit von Deutschland gehalten. Auch wichtige Arbeitsgruppen (WGs) werden von Experten aus Deutschland betreut. Aufgrund der relativen Neuheit der Technologie gibt es in ISO/TC 261 eine vergleichsweise große Zahl laufender und zum Teil sehr umfangreicher Projekte, welche ein großes Spektrum verschiedener Themenbereiche (Abbildung 2) innerhalb der Additiven Fertigung adressieren.

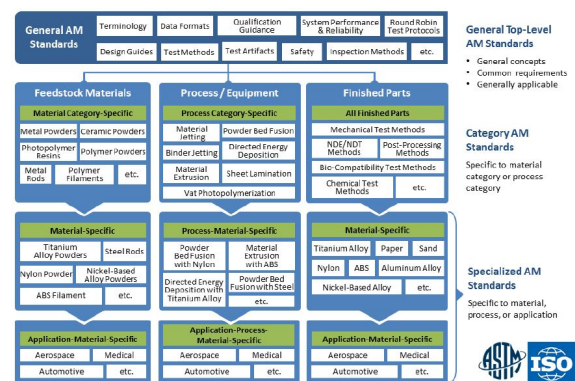


Abbildung 2: Themenbereiche der Normung Additiver Fertigungsverfahren bei ISO und ASTM (Bildquelle: ISO)

Eine Besonderheit stellt in Bezug auf das ISO/TC 261 eine Kooperation mit ASTM International dar, auf welche im Folgenden kurz eingegangen werden soll.

2.1.2. ASTM Committee F 42 – Additive Manufacturing Technologies

Mit dem ISO/ASTM PSDO Agreement wurde im Jahre 2013 eine Kooperation zwischen ISO und der amerikanischen Normungsorganisation ASTM International (ursprünglich American Society for Testing and Materials) vereinbart. Diese private Organisation aus den USA vertritt den Anspruch, eine internationale Normungsorganisation zu sein, da sie auch

Mitglieder außerhalb der USA aufnimmt. Die Anbindung des ISO/TC 261 erfolgt hierbei an das ASTM Committee F42 (Additive Manufacturing). Einen Überblick über dessen Aktivitäten vermittelt Abbildung 3.

Es handelt sich um die bisher erste und einzige Kooperation zwischen ISO und ASTM dieser Art. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit, Dual-Logo-Standards ISO/ASTM herauszugeben, die ggf. auch in das Europäische (EN ISO/ASTM) oder Nationale Normenwerk (DIN EN ISO/ASTM) übernommen werden können.

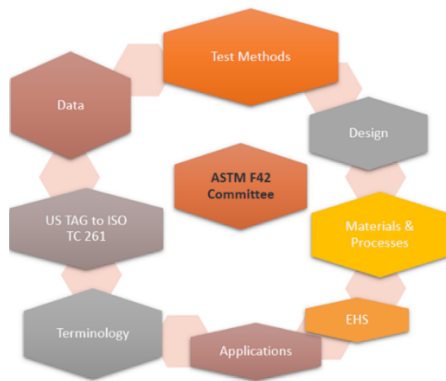


Abbildung 3: Normung Additiver Fertigungsverfahren im ASTM Committee F42 (Bildquelle: ASTM)

2.1.3. CEN/TC 438 – Additive Manufacturing

Die Europäische Normung erfolgt auf dem Gebiet der Additiven Fertigung durch das CEN/TC 438 unter folgendem Scope:

Standardization in the field of Additive Manufacturing (AM).

Chair und Sekretariat werden derzeit durch Frankreich betreut. Neben der Übernahme von ISO- bzw. ISO/ASTM-Normen in das Europäische Normenwerk (EN), ist insbesondere auch die Berücksichtigung bestimmter europäischer rechtlicher Regelungen relevant (siehe oben). Dies gilt beispielsweise für die Maschinenrichtlinie (2006/42/EG [1]) sowie die Anwendung der additiven Fertigung für Druckgeräte (vgl. 2014/68/EU [2] und Abbildung 4).

Hierbei sind noch weitere Europäische Normungsgremien involviert, mit denen eine entsprechende Abstimmung erfolgen muss. Des Weiteren erfolgt über das CEN/TC 438 eine Einbindung europäisch geförderter

F+E-Projekte, deren Ergebnisse die Normungsarbeit unterstützen.



Abbildung 4: Additiv gefertigter Druckbehälter/Autoklav (Bildquelle: BASF SE)

2.1.4. Nationale Spiegelkomitees beim Deutschen Institut für Normung (DIN)

Wie erwähnt werden die Internationalen und Europäischen Gremien in Deutschland für die Normung außerhalb der Elektrotechnik und der Telekommunikation durch das DIN gespiegelt. In Ausnahmefällen kann es jedoch zu einer Mitträgerschaft eines DIN-Normenausschusses auch für Projekte aus der Elektrotechnik kommen. Dies ist derzeit im Bereich der Additiven Fertigung nicht der Fall, könnte aber zukünftig relevant werden, wenn die Additive Fertigung für elektrotechnische Anwendungen in Normungsprojekten von allgemeinem Interesse adressiert wird.

2.2. Elektrotechnische Normung

Im Folgenden soll auf aktuell laufende Aktivitäten zur Normung Additiver Fertigungsverfahren für Anwendungen in der Elektrotechnik und somit im Zuständigkeitsbereich der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) eingegangen werden. Hierzu haben sich Experten aus Gremien der Aufbau- und Verbindungstechnik (IEC TC 91) und der Isoliersysteme (IEC TC 112) sowie weiterer IEC-Gremien miteinander vernetzt. Ziel dieses Netzwerks ist es, eine belastbare Grundlage für ein zukünftiges elektrotechnisches Normenwerk im Bereich der Additiven Fertigung zu schaffen und dieses weiterzuentwickeln. Dabei sollen die

bestehenden Aktivitäten im ISO/TC 261 Berücksichtigung finden, geeignete Formen der Kooperation gefunden werden und insbesondere Doppelnormung vermieden werden.

2.2.1. IEC TC 91 - Electronics assembly technology

Bereits relativ weit fortgeschritten sind Additive Fertigungsverfahren im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie auf dem Gebiet der gedruckten Elektronik (vgl. Abbildung 5). Die technologische Entwicklung erfolgte zeitweise parallel und unabhängig zu den eher für nicht-elektrotechnische Anwendungen gedachten Verfahren, wobei sich hier jedoch zunehmend Synergien schöpfen lassen.

Für die Normung zuständig ist das IEC TC 91, welches unter folgendem Scope tätig ist:

To prepare international standards on design, manufacturing and testing of electronic assemblies including the requirements and tests for materials and components used to manufacture circuit boards and electronic assemblies, as well as the formats of electronic data and libraries for describing these products and processes.

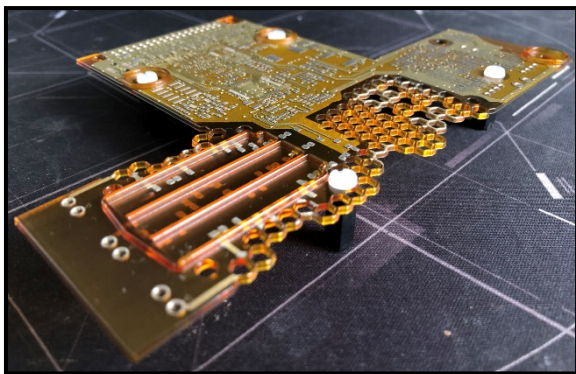


Abbildung 5: Additiv gefertigte Leiterplatte, (Bildquelle: Semikron Danfoss Elektronik GmbH)

Der Chair dieses wichtigen Komitees liegt bei Deutschland, so dass – ähnlich wie im Falle des ISO/TC 261 – eine besonders enge Anbindung an die nationale Normungsarbeit erfolgen kann. Das Sekretariat wird von Japan gehalten. IEC TC 91 ist durch eine Liaison eng an das IEC

TC 119 (Printed electronics) angebunden, dessen Chair ebenfalls durch Deutschland gestellt wird.

2.2.2. IEC TC 112 – Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems

Auf die Bedeutung elektrischer Isoliersysteme wurde bereits in Abschnitt 1.2 eingegangen. Zuständig ist IEC TC 112, welches unter folgendem Scope tätig ist:

To prepare International Standards covering methods of evaluation and qualification for electrical and electronic insulating materials, and electrical insulation systems. Horizontal Safety Function: Test methods for resistance to tracking.

NOTE: An electrical insulating material has negligibly low electric conductivity, used to separate conducting parts at different electrical potentials. An electrical insulating system is an insulating structure containing one or more electrical insulating materials together with associated conducting parts employed in an electrotechnical device.

Das Sekretariat von IEC TC 112 liegt bei Deutschland, während der Chair von den Niederlanden gehalten wird. Eine Liaison besteht zum IEC TC 15 (Solid electrical insulating materials), dessen Chair von Deutschland gehalten wird. Obwohl IEC TC 112 grundsätzlich auch für Anwendungen bei Klein- und Niederspannung zuständig ist, liegt die Expertise der dort tätigen Experten eher im Bereich von netzfrequenten Anwendungen auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik und speziell der Hochspannungstechnik. Insoweit ergänzen sich IEC TC 112 und IEC TC 91 mit den jeweiligen Scopes sehr gut.

2.3. Geplante Joint Working Group – Additive Manufacturing for Electrotechnology

Aufgrund der wachsenden Bedeutung der Additiven Fertigung für die Elektrotechnik und unter Nutzung der durch die vielen deutschen Vertreter möglichen Netzwerke bei IEC und ISO wurde eine Initiative zur Etablierung einer Joint Working Group gestartet. Hierzu wurden auf den Plenary

Meetings von IEC TC 91 und IEC TC 112 im Herbst 2023 bereits Beschlüsse zur Einrichtung einer ad-hoc-Working Group „Additive Manufacturing for Electrotechnology“ unter dem folgenden Scope gefasst:

To prepare International Standards for additive manufacturing (AM) in the field of electrotechnology, including but not limited to AM feedstock materials, AM process chains and machinery, AM design for electrotechnical applications, AM in electronics assembly technology, AM for printed electronics, as well as the respective test methods, and furthermore evaluation and qualification methods for AM of conductive, semi-conductive or insulating materials and insulating systems, and respective specifications and requirements.

Die weitere Umsetzung wird durch gemeinsame Projekte erfolgen, wobei zunächst eine Richtlinie (z.B. in Form einer Technical Specification (IEC/TS) oder eines Technical Reports (IEC/TR)) für das Gebiet der additiv gefertigten Elektronik unter Federführung des IEC TC 91 geplant ist. Sobald dieses Projekt läuft, kann der Status der ad-hoc-Working Group in den einer Joint Working Group (JWG) zwischen IEC TC 91 und IEC TC 112 überführt werden. Diese JWG soll national über das DKE-Komitee K 682 gespiegelt werden. In einem nächsten Schritt ist dann die Anbindung an das ISO/TC 261 geplant (Abbildung 6).

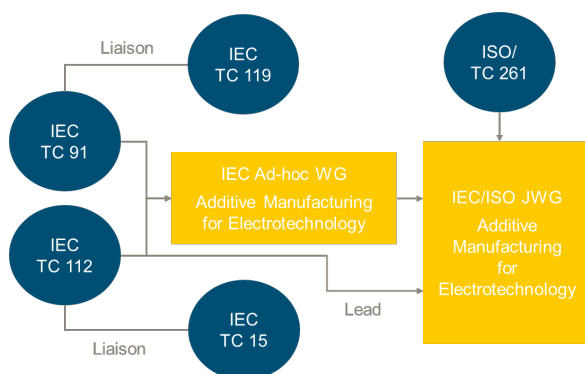


Abbildung 6: Struktur der geplanten Joint Working Group „Additive Manufacturing for Electrotechnology“

Die nationale Zuständigkeit für die Trägerschaft der Normen durch die DKE bleibt davon unberührt, jedoch ist eine Mitträgerschaft seitens des DIN beabsichtigt. Eine Anbindung der neuen JWG an ASTM International ist nicht vorgesehen, jedoch wird ein konstruktiver Austausch angestrebt.

Seitens des IEC TC 112 ist die Erarbeitung eines/einer IEC/TS oder IEC/TR zur Additiven Fertigung elektrischer Isoliersysteme geplant, und zwar in Anlehnung an IEC 60505 [1]. Dieses Dokument wird u.a. die Additive Fertigung mit massiven Kupferstrukturen und deren Isolation sowie für den Bereich der Hochspannungstechnik relevante Fragestellungen adressieren. Dies betrifft insbesondere noch zu bewältigende Herausforderung wie Teilentladungsfreiheit, Optimierung der Feldstärkeverteilung und Lebensdauer.

2.4. Möglichkeiten der Partizipation

Die Normung lebt von der aktiven Beteiligung von Experten. Bei Interesse an einer Mitarbeit auf dem Gebiet der Normung Additiver Fertigungsverfahren innerhalb und außerhalb der Elektrotechnik wenden Sie sich bitte vertrauensvoll an den Autor.

Literatur

- [1] IEC 60505, Evaluation and qualification of electrical insulation systems, 2011.
- [2] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Maschinenrichtlinie), Richtlinie, 2006.
- [3] 2014/68/EU, Richtlinie 2014/68/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Druckgeräten auf dem Markt (Druckgeräte-Richtlinie), Richtlinie, 2014.