

Oktober 2019

PRESENZ
MITTEILUNG

3D-Druck von optischen Komponenten für Terahertz-Strahlung

An der TU Braunschweig wurden dreidimensionale Beugungsgitter zur Manipulation von Terahertz-Strahlung mit dem 3D-Drucker hergestellt und im Nahfeld vermessen

Die schnelle und einfache Herstellung von Objekten aus Kunststoff ist heute für jedermann zu Hause mit Hilfe eines 3D-Druckers möglich. Die Zeiten, als 3D-Druck noch „Rapid Prototyping“ hieß und Spezialfirmen mit sehr teuren Geräten für mehrere Zehntausend Euro vorbehalten war, sind vorbei. Heute gibt es von vielen Herstellern sehr gute Geräte für einige Hundert Euro für den Hausgebrauch zu kaufen. Das Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik der TU Braunschweig, unter der Leitung von Prof. Dr. Meinhard Schilling, beschäftigt sich seit vielen Jahren mit dem Entwurf und der Verbesserung dieser Geräte und hat die Firma Fabmaker GmbH bei der Ausgründung unterstützt, um diese Technologie auch in Schulen verfügbar zu machen. Seit dem Sommersemester 2019 bietet das Institut eine neue Lehrveranstaltung zum Thema Additive Fertigung an, bei der Dr. Benedikt Hampel den Studierenden einen tiefen Einblick in die Welt des 3D-Drucks ermöglicht.

Aktuell beschäftigen sich die Forscher des Instituts mit optischen Bauelementen für Terahertz-Strahlung. Hierbei wurden erstmalig so genannte Beugungsgitter hergestellt, die eine gezielte Manipulation der hochfrequenten Strahlung erlauben. Die präzise gefertigten Strukturen wurden mit einem Stereolithografie-Drucker erzeugt und anschließend mit einer dünnen Goldschicht versehen. „Das erhöht den Reflexionsgrad der Strukturen“, erklärt Dr. Hampel, der sich bereits in seiner Doktorarbeit mit der Untersuchung der optischen Eigenschaften von 3D-gedruckten Strukturen beschäftigt hat.

Terahertz-Strahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, deren Frequenz sich oberhalb von Mikrowellen und unterhalb von sichtbarem Licht befindet. Dieser Frequenzbereich wurde in der Vergangenheit aufgrund von fehlenden Quellen und Sensoren nur selten für technische Anwendungen genutzt. Die vergleichsweise hohen Frequenzen versprechen allerdings spannende Anwendungsszenarien beispielsweise für die Kommunikation der Zukunft.

Der 3D-Druck ermöglicht zukünftig die schnelle Herstellung von Strukturen zur Manipulation von Terahertz-Strahlung. Hierfür steht am Institut unter anderem auch ein so genanntes Terahertz-Mikroskop zur Verfügung, mit dem Terahertz-Strahlung mit einer sehr hohen Ortsauflösung untersucht werden kann. Die Forschungsergebnisse können zukünftig zu neuen Applikationen von Terahertz-Strahlung für Chiptechnologien und Kommunikation führen.

Die weiteren Entwicklungen dieser optischen Komponenten werden im Nanometrologie-Forschungszentrum LENA (Laboratory for Emerging Nanometrology) und im Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik in der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik an der TU Braunschweig gemeinsam mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt PTB und im Rahmen des Exzellenzclusters „Quantum Frontiers“ vorangetrieben.

Ansprechpartner

**Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel**

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>



Abbildung 1: Additiv gefertigte Beugungsgitter zur Manipulation von Terahertz-Strahlung [1]



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik

Übersicht

1. Additive Fertigung mit 3D-Druckern
2. Funktionsweise eines 3D-Druckers
3. Beugungsgitter
4. 3D-Druck von Elektronik
5. Keramische Hochtemperatur-Supraleiter
6. Institut

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik

Additive Fertigung mit 3D-Druckern

Additive Fertigung bedeutet, dass bei der Herstellung von Objekten Material auf- und nicht abgetragen wird. So wird beim 3D-Druck das gedruckte Objekt lagenweise z.B. aus dünnen Kunststoffsträngen aufgebaut, wobei ein Computer den Druckkopf so steuert, wie es die äußere Form erfordert. Dieses Verfahren wird auch als fused filament fabrication (FFF) oder fused deposition modeling (FDM) bezeichnet und ist die Grundlage für die meisten 3D-Drucker für zu Hause. Am Institut kommt hierbei unter anderem der 3D-Drucker Renkforce RF1000 zum Einsatz. Neben diesen gibt es viele weitere Verfahren um flüssige oder pulverförmige, metallische Werkstoffe zu verarbeiten.

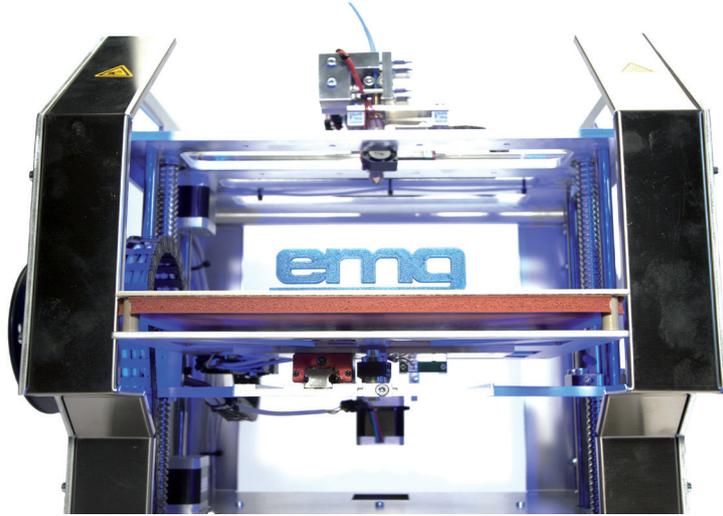


Abbildung 2: 3D-Drucker Renkforce RF1000

Für die Mikrofertigung steht eine weitere Klasse von additiven Herstellungsverfahren zur Verfügung – die so genannte Stereolithografie (SLA). Hierzu werden flüssige lichtempfindliche Harze mit einem fokussierten Laser polymerisiert und damit verfestigt.

Dies kann mit einer räumlichen Auflösung im Mikrometerbereich realisiert werden. Damit lassen sich auch mikroskopisch kleine Objekte aus Kunststoffen höchstproduzierbar und schnell herstellen. Am Institut wird hierfür der 3D-Drucker Formlabs Form 2 verwendet.

Die Objekte können mit Programmen (kostenlos z.B.: AutoCad123) am Computer selbst erstellt werden oder aber auch im Internet aus riesigen Datenbanken (kostenlos z.B.: Thingiverse) auf den Computer übertragen werden. So sind der Phantasie keine Grenzen gesetzt: Jedes Objekt kann am Computer designt und anschließend aus Kunststoff hergestellt werden.

Die Materialien können dabei aus einer sehr großen Menge an Kunststoffen jeder Farbe, Transparenz und Elastizität ausgewählt werden.



Abbildung 3: 3D-Drucker Formlabs Form 2 [1]

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik

Gängige Materialien sind PLA (umweltfreundlich aus Milchsäure hergestellt, kompostierbar), PETG (geruchsneutral, transparent, umweltresistent) und ABS (hochfest und umweltresistent). Alle diese Kunststoffe können in jeder Farbe eingefärbt und mit Zusätzen holzähnlich, metallisch glänzend oder bunt transparent gemacht werden.

Durch die Beimischung von bestimmten Additiven ist es sogar möglich, leitfähige Strukturen zu drucken [2,3]. Dies kann beispielsweise in einem sogenannten Filamentextruder, wie in Abbildung 5, geschehen.

Spezielle Pastendruckverfahren erlauben außerdem die Herstellung von Druckobjekten aus besonderen Materialien wie beispielsweise Keramiken. Damit können unter anderem Objekte aus Hochtemperatur-Supraleitern gefertigt werden [4].

Professionelle 3D-Drucker ermöglichen darüber hinaus noch feinere Strukturen und damit Oberflächen, die sehr glatt sind, fast wie bei Spritzgussobjekten. Auch können mechanische, optische und farbliche Übergänge innerhalb eines Objekts nahezu stufenlos hergestellt werden. Die additive Fertigung von Kunststoffobjekten hat für kleine Stückzahlen längst Einzug in die industrielle Fertigung gehalten. So werden für Automobile innenliegende Lüftungsteile als Ersatzteile additiv gefertigt. Aber auch die additive Fertigung von Metallteilen wird immer mehr als attraktive Alternative zu konventionellen Herstellungsverfahren realisiert. Selbst große Turbinenschaufeln für Kraftwerke oder Gussformen für Schiffsschrauben können heute additiv und damit schnell und kostengünstig hergestellt werden.



Abbildung 4: Mit einem Multimaterialdrucker gefertigtes Modell eines Froschs

Ansprechpartner

**Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel**

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>

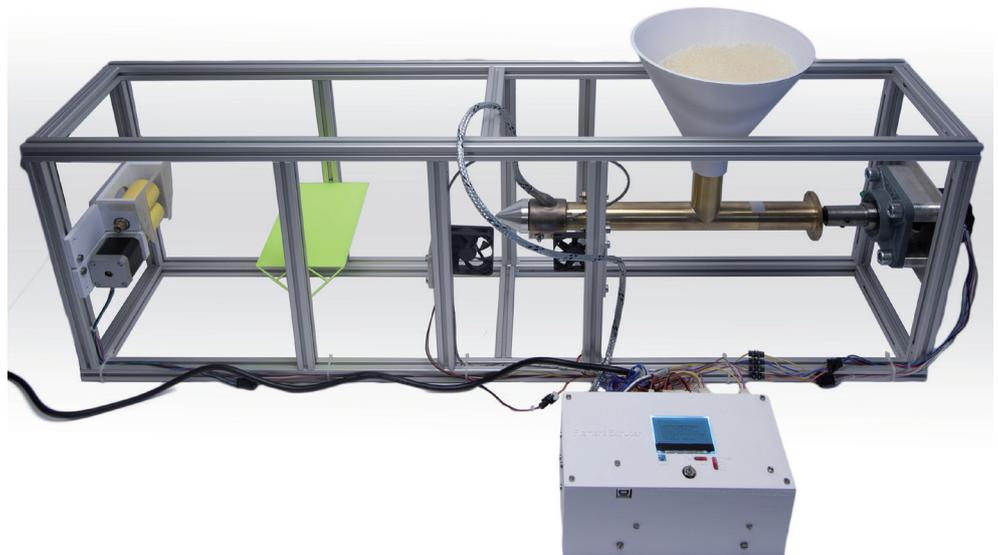


Abbildung 5: Filamentextruder zur Herstellung von druckbaren Materialmischungen



**Technische
Universität
Braunschweig**

**Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik**

Funktionsweise eines 3D-Druckers

Bei einem 3D-Drucker, der nach dem FFF bzw. FDM Verfahren funktioniert, ist das Material meist in **Filament**form auf Rollen erhältlich. Durch eine **Fördereinrichtung** wird das Material in einen so genannten **Extruder** geführt, wo es über die Schmelztemperatur im **Hot-End** aufgeheizt wird. Das flüssige Material kann schließlich durch eine Düse dosiert werden.

Die dreidimensionale Positionierung wird durch die Bewegung des Druckkopfes und/oder des **Druckbettes** erreicht. Hierbei kommen zur präzisen Positionierung häufig Schrittmotoren zum Einsatz, die über Zahnräder und Riemen angeschlossen werden.

Das Druckbett muss dem **Druckobjekt** eine gute Haftung bieten, damit es sich während des Druckprozesses nicht ablöst und somit der Druck zerstört wird. Gleichzeitig dürfen sich Druckobjekte auch nicht durch zu große Temperaturunterschiede verformen. Aus diesem Grund sind die meisten Druckbetten beheizbar. Ein beheizbarer, geschlossener Druckraum kann zusätzlich die Druckqualität erhöhen und bietet Schutz vor etwaigen Emissionen der verschiedenen Druckmaterialien.

Die Steuerung des Druckers wird in der Regel durch eine Mikrocontroller-Elektronik übernommen. Diese steuert die Temperaturen und die Bewegungen des 3D-Druckers. Zusätzliche Sensoren können an die Elektronik angeschlossen werden, um den Status des 3D-Druckers zu erfassen [6]. Befehle erhält diese Elektronik häufig von einem Steuercomputer in Form von so genanntem G-Code. Dieser ist bereits seit Jahrzehnten für die Steuerung von CNC-Fräsen in Gebrauch und bietet eine einfache Möglichkeit zur Programmierung der 3D-Drucker.

Die G-Code Programme können durch einen so genannten Slicer erstellt werden, dieser hat die Aufgabe, das virtuelle Druckobjekt in druckbare Schichten zu teilen. Er ist meistens bereits in der Steuerungssoftware (kostenlos z.B.: Repetier) für den 3D-Drucker enthalten. Objekte, die am Computer in CAD-Software (engl. Computer-Aided Design) erstellt wurden, können hierbei automatisiert verarbeitet werden. Dafür müssen einige Einstellungen für die Druckqualität und Materialparameter getroffen werden, damit daraus der G-Code zur Steuerung des Druckprozesses erzeugt werden kann.

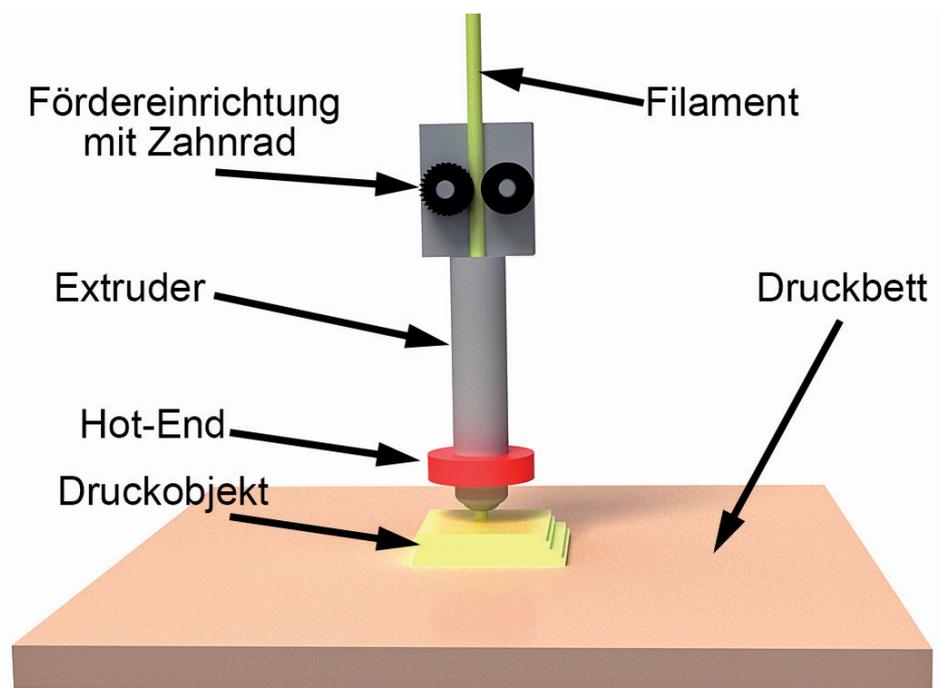


Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines FFF/FDM 3D-Druckers

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik

Beugungsgitter

Beugungsgitter bestehen aus periodisch sich wiederholenden Strukturen, die die Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung (zu der unter anderem auch sichtbares Licht und Radiowellen gehören) manipulieren kann. Bei der Reflexion (oder Transmission, je nach Gittertyp) tritt bei der Strahlung gleichzeitig Beugung und Interferenz auf, die zu einem typischen Muster führen.

Unter welchem Winkel die Strahlung gebrochen wird, hängt dabei maßgeblich von der Frequenz bzw. Wellenlänge der Strahlung und von den Abmessungen des Gitters ab. Nur bei einer präzisen Fertigung der Beugungsgitter können die beschriebenen Muster beobachtet werden.

Beugungsgitter werden in der Praxis beispielsweise für die Aufspaltung von Licht in seine Farben verwendet. Hierbei ist der Beugungswinkel von der Wellenlänge des Lichts abhängig.

Die Qualität der 3D-gedruckten Beugungsgitter wird unter anderem durch den Vergleich von simulierten und gemessenen Ergebnissen optimiert. Zusätzlich können die geometrischen Abmessungen der Gitter aber auch durch dimensionale Messmethoden analysiert werden. Hierbei lässt sich beispielsweise die Periodizität der Gitterstruktur und die Oberflächenrauigkeiten näher untersuchen.

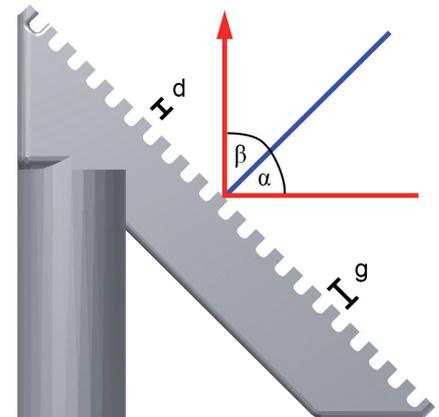


Abbildung 7: Modell eines Beugungsgitters. Die einfallende Strahlung ist rot dargestellt [1].

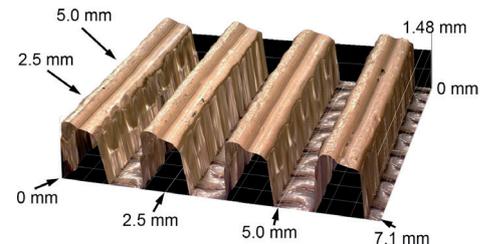


Abbildung 8: Vermessung der Oberfläche eines 3D-gedruckten Beugungsgitters mit einem Digitalmikroskop [1]

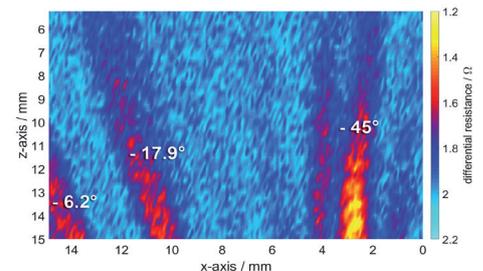


Abbildung 9: Messergebnis der gebeugten Strahlung an einem Beugungsgitter mit dem THz Mikroskop [5]

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>

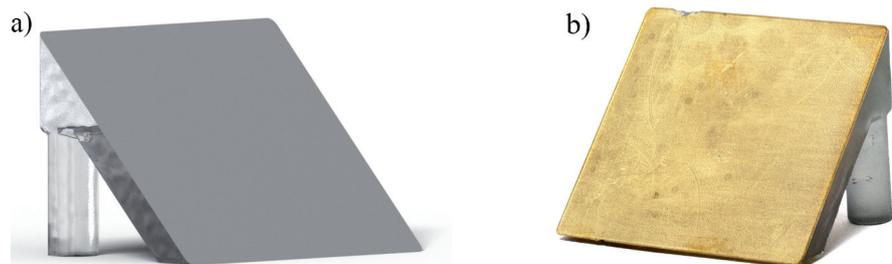


Abbildung 10: a) Computer-Modell eines 3D-gedruckten Spiegels, b) mit einer dünnen Goldschicht beschichteter 3D-gedruckter Spiegel [1]



**Technische
Universität
Braunschweig**

**Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik**

3D-Druck von Elektronik

Wäre es nicht phantastisch, wenn Elektronik direkt in mechanische Bauteile integriert werden könnte? Das Mobiltelefon bestünde nur noch aus einem Stück Kunststoff, in das alle elektronischen Komponenten schon bei der Herstellung integriert würden. Dadurch könnten viele elektronische Geräte noch wesentlich leichter, flexibler und kostengünstiger werden. Die Integration von Elektronik in das Lenkrad, von Aktoren in Flugzeugrumpf-Teile, von Batterien und Komponenten in Prothesen etc. ist schon lange im Fokus vieler Forschungsvorhaben.

Im Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik werden leitfähige Thermoplaste genutzt, um elektronische Schaltungen herzustellen. Hierbei werden zusätzliche Chips und elektronische Bauteile während des Druckprozesses mit eingedruckt, sodass eine funktionierende Schaltung gefertigt werden kann. Auch Taster, Buchsen, Leiterbahnen und sogar Widerstände lassen sich auf diese Art und Weise fertigen.

Weiterhin kann der 3D-Druck natürlich auch genutzt werden, um Gehäuse für am Institut entwickelte Schaltungen herzustellen und um Schutzhüllen und Halter für empfindliche Sensoren zu drucken. So können auf einfache Weise Sensoren in 3D-Drucker integriert werden, mit deren Hilfe die Druckqualität signifikant gesteigert werden kann [6]. Hiermit kann beispielsweise der Materialtransport während des Druckprozesses überwacht werden [7].

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>



Abbildung 11: 3D-gedruckte Blinkschaltung mit integrierten Buchsen, Schalter, Widerständen und konventionellen Komponenten [2]



Abbildung 12: 3D-gedrucktes Gehäuse für eine Pumpensteuerung

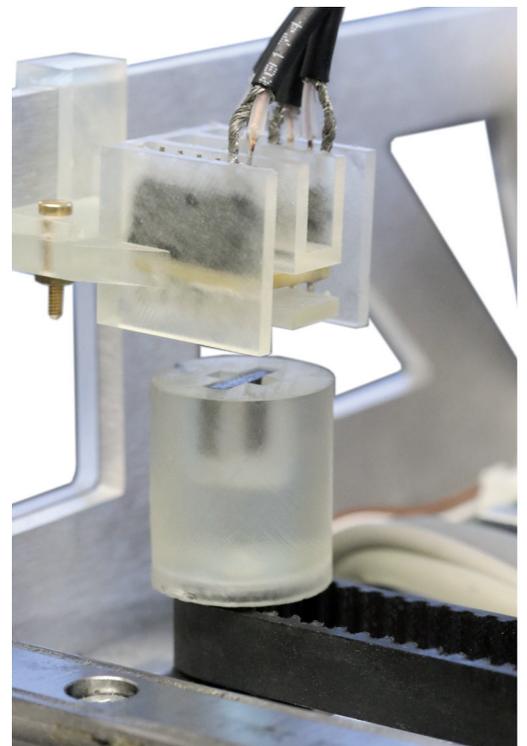


Abbildung 13: Integration eines Winkelsensors zur Kontrolle eines Motors mit Hilfe von 3D-gedruckten Haltern

Keramische Hochtemperatur-Supraleiter

Einer der ganz besonderen Vorteile der additiven Fertigungsverfahren ist die geradezu unglaubliche Vielfalt an Materialien, die im Druckprozess miteinander kombiniert werden können. Kunststoff auf Metall, Glas auf Metall, Kunststoff mit Glasfasern, leitfähige Kunststoffe auf Isolatoren, es gibt kaum Grenzen und somit auch phantastische neue Möglichkeiten für Ingenieure neue Funktionswerkstoffe und Bauelemente zu erfinden.

Ein Traum ist jetzt wahr geworden: Weltweit erstmalig konnten aus den spröden, komplizierten keramischen Hochtemperatur-Supraleitern elektronische Leiterbahnen gedruckt werden, die sich in der ebenfalls 3D-gedruckten Isolatorkeramik beliebig anordnen lassen [4].

Prof. Dr. Meinhard Schilling (TU Braunschweig) ist begeistert: „Dies ist ein großer Schritt für viele Anwendungen. Wir haben schon konventionelle elektronische Schaltungen mit 3D-gedruckten Leiterbahnen aus leitfähigem Kunststoff demonstriert. Jetzt können wir die ganze Welt der Tieftemperaturelektronik mit 3D-Druck erobern! Die Palette wurde um 3D-gedruckte supraleitende Leiterbahnen ergänzt, die sich in flüssigem Stickstoff bei -196 °C - betreiben lassen.“ Wichtige Anwendungen sind alle Elektronik-Systeme, die bei tiefen Temperaturen betrieben werden, um besonders rauscharm zu arbeiten, wie in der Radioastronomie, der Medizintechnik, für Kommunikationssysteme, Satelliten- und Raumfahrtanwendungen.

Supraleiter verlieren ihren elektrischen Gleichstromwiderstand, wenn sie unter ihre charakteristische, materialabhängige Sprungtemperatur abgekühlt werden. Dann kann Strom verlustfrei mit einem supraleitenden Kabel transportiert werden. Auch Elektromagnete lassen sich vorteilhaft aus supraleitenden Kabeln herstellen. Die meisten Magnetresonanztomographen (MRT) im Krankenhaus zur medizinischen Bildgebung und Diagnostik verwenden diese höchstleistungsfähigen Magnetspulen. In Japan fährt seit vielen Jahren eine Magnetschwebebahn im Routinebetrieb, die sich mit supraleitenden Magnetspulen in der Bahn hält.



Abbildung 14: 3D-gedruckte Leiterbahnen aus dem Hochtemperatursupraleiter YBCO auf einem 3D-gedruckten Substrat aus Strontiumtitanat auf einer Testplatte [4]

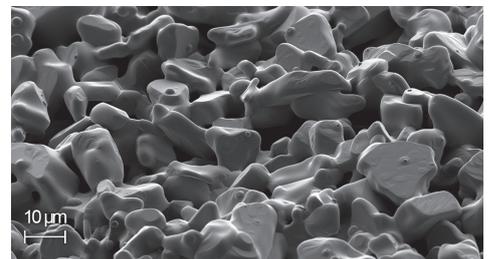


Abbildung 15: Mikroskopaufnahme von 3D-gedruckten YBCO-Strukturen, aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop [4]

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>

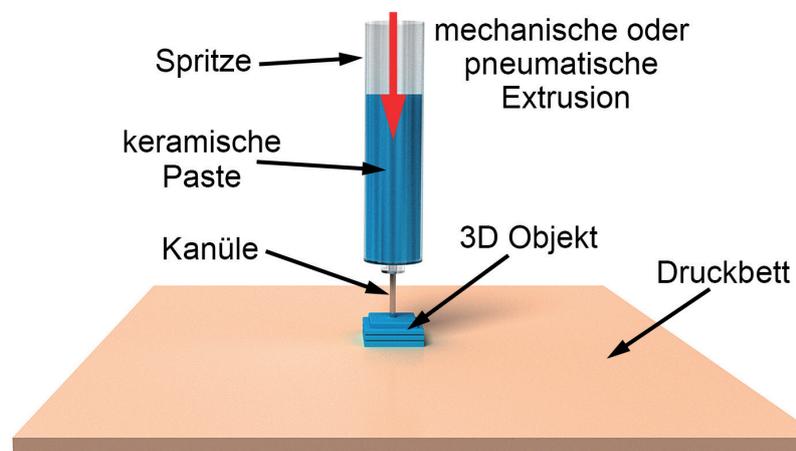


Abbildung 16: Prinzipieller Aufbau eines Pastendruckers [1]



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik

Aber auch elektronische Bauelemente aus Supraleitern bieten höchst attraktive und einmalige Möglichkeiten. Die sogenannten Josephson-Kontakte sind die schnellsten bekannten Schaltelemente und können auch diese elektronischen Funktionen nahezu verlustleistungslos realisieren. Deshalb werden seit einigen Jahren wieder verstärkt Aktivitäten in den USA und in Japan zur Herstellung supraleitender Höchstleistungscomputer vorangetrieben.

Die Sprungtemperatur für metallische Supraleiter liegt nur einige Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt (0 K bzw. $-273,15\text{ °C}$). Deshalb müssen solche Spulen und Elektroniken mit flüssigem Helium gekühlt werden. Helium ist auf der Erde in Erdöllagern in großer Menge vorhanden, ist aber dennoch in den vergangenen Jahrzehnten immer teurer geworden. Deshalb wird schon lange nach anderen supraleitenden Materialien gesucht, die nicht so weit abgekühlt werden müssen. Ende der 1980er-Jahre entdeckten Bednorz und Müller die Klasse der keramischen Hochtemperatur-Supraleiter und wurden dafür mit dem Physik-Nobelpreis geehrt. In der langen Zeit seit der Entdeckung sind die Materialien immer besser beherrschbar geworden und inzwischen sind Kabel, Drähte und Elektronik aus diesen Materialien kommerziell erhältlich und werden entsprechend eingesetzt. Die Kühlung dieser Komponenten muss hier nur noch mit flüssigem Stickstoff bei -196 °C erfolgen. Diese Temperaturen können heute problemlos mit kleinen Kältemaschinen ähnlich wie im Kühlschrank bereitgestellt werden.

Problematisch an den Hochtemperatur-Supraleitern ist jedoch ihre Sprödigkeit, die sie wie alle keramischen Materialien, nicht anders als eine Keramikfliese oder ein Blumentopf aufweisen. Drähte können nicht einfach wie aus Metall gezogen werden und auch beim 3D-Druck kann das Material nicht einfach als Schmelze gedruckt werden, denn die Schmelztemperatur liegt mit über 900 °C sehr hoch. Im Verfahren des Instituts für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik der TU Braunschweig wird keramisches Pulver mit Bindemitteln zu einer viskosen Paste vermischt, diese Paste dann mit dem 3D-Drucker verdruckt und anschließend in einem Hochtemperatur-Sinterprozess das Material in den supraleitenden Zustand überführt und das Bindemittel thermisch entfernt.

Veröffentlichungen

- [1] B. Hampel, "THz Microscopy of Additive Manufactured Microstructures", Dissertation, TU Braunschweig, Mensch und Buch, 2018
- [2] B. Hampel et al., "Properties and applications of electrically conductive thermoplastics for additive manufacturing of sensors", tm - Technisches Messen, Vol. 84, Nr. 9, 2017
- [3] B. Hampel et al., "Charakterisierung von elektrisch leitfähigen Thermoplasten für die Additive Fertigung", in XXX. Messtechnisches Symposium, S. Zimmermann, Ed., Berlin and Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2016
- [4] B. Hampel et al., "HTS Multimaterial Gradiometer Modules for YBa₂Cu₃O₇ SQUID Systems", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 27, Nr. 4, pp. 1–5, 2017
- [5] B. Hampel et al., "Josephson Cantilevers for THz Microscopy of Additive Manufactured Diffractive Optical Components", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29, Nr. 5, 2019
- [6] B. Hampel et al., "Anisotropic magnetoresistive sensors for control of additive manufacturing machines", tm - Technisches Messen, Vol. 86, Nr. 10, pp. 609–618, 2019
- [7] G. P. Greeff et al., "Closed loop control of slippage during filament transport in molten material extrusion", Additive Manufacturing, Vol. 14, pp. 31–38, 2017

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik

HINTERGRUND INFORMATION



Im Haushalt und im Auto, ebenso wie in der Industrie und Wirtschaft: Überall werden für die Steuerung und Bedienung von Geräten elektrische Sensoren eingesetzt. Das Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik der TU Braunschweig unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Meinhard Schilling untersucht, wie Sensoren kleiner, präziser und zuverlässiger produziert und in neuen Systemen für neuartige Mess- und Diagnoseverfahren eingesetzt werden können. Dazu werden Sensoren in einem modernen Reinraum mittels nanotechnologischer Verfahren hergestellt und mit analoger und digitaler Elektronik versehen. So entstehen Systeme für neue Messaufgaben für die Magnetfeldsensoren, biochemisch/medizinische Messtechnik und die Höchsthfrequenz-Messtechnik bis in den Bereich über 1000 GHz. Auf diesen Gebieten bestehen enge Kooperationen mit zahlreichen internationalen Unternehmen und Forschungseinrichtungen.

Die **magnetischen Sensoren und Systeme** werden in der magnetischen Abschirmkammer getestet. Dort ist auch ein SQUID-Magnetometersystem für biomagnetische Messungen am Herzen und Gehirn aufgebaut.

Für die Entwicklung und den Test von biochemischer Sensorik wird eng mit Biologen, Chemikern und Medizinern zusammengearbeitet.

Für Messungen der **Höchsthfrequenztechnik** steht ein Mikrowellenlabor mit Ferninfrarot-Lasersystem zur Verfügung, in dem auch das Terahertz-Mikroskop aufgebaut ist.

Ansprechpartner

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Dr. Benedikt Hampel

Telefon +49 (0) 531 391-3866
Telefax +49 (0) 531 391-5768

E-Mail: m.schilling@tu-braunschweig.de

Technische Universität Braunschweig
Fakultät für Elektrotechnik,
Informationstechnik, Physik

**Institut für Elektrische Messtechnik
und Grundlagen der Elektrotechnik**

Hans-Sommer-Straße 66
D-38106 Braunschweig

<http://www.emg.tu-bs.de>

Prof. Dr. Meinhard Schilling
Leiter des Instituts für
Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik
der Technischen Universität Braunschweig



Technische
Universität
Braunschweig

Institut für Elektrische Messtechnik und
Grundlagen der Elektrotechnik