

SYNTAGMA FORSCHUNG · FACHBUCHAUSGABE

Gedruckte Elektronik im 3D-Druck

Leiter, Platinen, Magnetik und Halbleiter; Übungen

Thomas Schüller

ORCID 0009-0003-9799-6747 · DRUCKHL-PROV0001 · Fachbuchausgabe 1.0 · 14.10.2026

Impressum

Autor	Thomas Schüller, Syntagma Forschung, Wien · ORCID 0009-0003-9799-6747 · forschung@tschueller.com
Kennung	DRUCKHL-PROV0001
Stand	14.10.2026 · Fachbuchausgabe 1.0
Lizenz	Texte: alle Rechte vorbehalten. Leiterbahn-Rechner und Datenschicht: MIT.
Bezug	syntagma-science.com/werke/gedruckte-elektronik/

Herstellerwerte der Leitmaterialien als Größenordnung; Literatur nicht verifiziert; Messreihen V1-V4 und V7 stehen aus.

Inhalt

- Teil 1: Gedruckte Elektronik im 3D-Druck
- Teil 2: Druckbare Dioden und Halbleiter
- Teil 3: Printed electronics in 3D printing (English)
- Teil 4: Übungen
- Teil 5: Messprotokoll (Vorlage)

Gedruckte Elektronik im 3D-Druck: Leiter, Platinen, Magnetik und Halbleiter

Arbeitskennung: DRUCKHL-PROV0001 (vorläufig) · **Fassung:** 1 · **Stand:** 12.10.2026 **Autor:** Thomas Schüller, Schicht-Werk · **Linie:** Syntagma Forschung / Schicht-Werk / DoYourself **Status:** Arbeitsfassung aus Fachwissen, ohne Websuche. Alle Zahlenwerte sind Größenordnungen und vor Verwendung zu messen oder beim Hersteller zu prüfen. Literatur ist nicht verifiziert.

1 Zweck und Einordnung

Das Papier ordnet, was sich mit FDM und SLA/MSLA an elektrischer Funktion direkt im Bauteil erzeugen lässt: Leitungen, ganze Platinen, Magnetik und Motoren, lichtgesteuerte Verfahren, Dioden und Halbleiter. Es benennt je Ansatz den Reifegrad und die Grenze. Es ist die Grundlage für Versuchsreihen, Übungen der Lernplattform und ein späteres Auslegungswerkzeug im Verbund mit Materialwerk, Verbindungswerk, Grünwerk, Sehnenhand und dem Roboterarm-Strang.

2 Drei Ebenen

Ebene	Inhalt	Realistisch im Druck
1 Leiter	Leitungen, Platine, Kontakte, Sensorflächen	ja, mehrere Wege
2 Magnetik und Aktoren	Spulen, Magnetrotoren, Aktorik	teilweise; Spule und Rotor ja, Leistung begrenzt
3 Halbleiter	Dioden, Transistoren	nur Versuchsstufe, nicht im Standard-FDM

Die Ebenen bauen aufeinander auf. Wer Ebene 1 beherrscht, hat die Fertigungsbasis für Ebene 2 und 3.

3 FDM-Ansätze

3.1 Leitfähige Filamente

Kohlenstoff-gefüllte Filamente (Carbon-Black- oder Graphit-PLA, -TPU) leiten, aber schlecht. Metallgefüllte Filamente sind deutlich besser, aber teurer und empfindlich im Druck.

Material	spez. Widerstand (Größenordnung)
Kupfer	$1,7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$
Carbon-Black-PLA, in der Schicht	etwa $1 \Omega \cdot \text{cm}$
Carbon-Black-PLA, quer zu den Schichten	etwa $100 \Omega \cdot \text{cm}$
Metallgefülltes Filament	etwa $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$

Wesentlich: **Anisotropie**. Quer zu den Schichten leitet ein Druck deutlich schlechter. Leiterbahnen werden daher in der Schichtebene geführt, Durchkontaktierungen (Vias) sind die Schwachstelle.

Rechenbeispiel: Bahn $0,4 \times 0,2 \text{ mm}$ ($0,08 \text{ mm}^2$), 50 mm lang. Kupfer: $0,011 \Omega$. Metallgefüllt ($10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$): etwa 62Ω . Carbon-Black ($1 \Omega \cdot \text{cm}$): etwa $6,3 \text{ k}\Omega$. Daraus folgt: Kohlenstofffilament taugt für Sensoren, Heizflächen und Signalleitungen mit sehr geringem Strom, nicht für Versorgung.

3.2 Kanalverfahren (der robusteste Weg zur vollständigen Platine)

Der Druck erzeugt offene oder verdeckte Kanäle, die nachträglich mit Metall gefüllt werden: -

Niedrigschmelzende Legierung (z. B. Field's Metal, Schmelzpunkt rund 62 °C; Bi-Sn-Eutektikum rund 138 °C). Spezifischer Widerstand etwa $3\cdot 10\cdot 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$, also rund das 20- bis 60-Fache von Kupfer bei sehr guter Stromtauglichkeit im Vergleich zu Druckpasten. - **Leitsilberpaste oder -lack** in offenen Rinnen: einfach, aber hoher Übergangswiderstand, begrenzte Stromdichte. - **Flüssigmetall** (Gallium-Legierungen): verdeckte Kanäle möglich, verträgt Dehnung; greift Aluminium an, braucht dichte Einhausung.

Grenzen: Das Bauteil darf im Betrieb den Schmelzpunkt der Füllung nicht erreichen (bei Field's Metal unter etwa 50 °C bleiben). Das Substrat muss die Gießtemperatur aushalten (PLA für Field's Metal knapp, PETG oder höher besser). Legierungen mit Cadmium oder Blei (z. B. Wood's Metal) sind ausgeschlossen.

Rechenbeispiel Spule: Kanal $0,6 \times 0,4 \text{ mm}$ ($0,24 \text{ mm}^2$), 20 cm Länge. Field's Metal ($5\cdot 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$): etwa $0,42 \Omega$. Carbon-Black ($1 \Omega\cdot\text{cm}$): etwa $8,3 \text{ k}\Omega$. Für Spulen und Motoren scheidet Kohlenstofffilament damit aus.

3.3 Einlegetechnik (Druckpause)

Druck anhalten, Bauteil einlegen (Mikrocontroller, Sensor, Magnet, Draht, Spulenkörper), Druck fortsetzen. Kontaktierung über Leitpaste, Leitkleber oder Schmelzmetall. Das ist heute der **produktreife Weg** für „fertige Bauteile mit Elektronik“: gedruckte Gehäuse und Bahnen, bestückte Standardchips. Voraussetzung ist ein Konstruktionsraster für Bauteiltaschen mit Toleranz.

3.4 Pastenkopf (Direct Ink Writing)

Ein Spritzen- oder Pastenextruder am Drucker schreibt Leitsilber, Kohlenstoff- oder Dielektrikumstinte auf den Druck oder einen Träger. Auflösung etwa 150–400 μm , Aushärtung bei 60–150 °C. Verbindet 3D-Druck und Leiterplatte, zwei- bis mehrlagig mit Isolierschicht dazwischen.

3.5 Komplette Platine in einem Druck

Schichtmodell: Trägerplatte (Isolator) → Leiterbahnebene (Kanal mit Füllung oder Pastenschrift) → Isolierlage → zweite Ebene → Bauteiltaschen → Deckschicht. Stand: Prototypen mit wenigen Lagen sind machbar, Serienqualität (Wiederholbarkeit der Füllung, Vias, Lötbarkeit) nicht gesichert. Lötbarkeit ist der kritische Punkt: Standardlot haftet nicht auf Kunststoff, Kontakte laufen über Leitkleber, Klemmung oder eingelegte Metallpads.

3.6 Magnetik und Motoren

- **Hartmagnetisch:** Filamente mit Magnetpulver (gebundener NdFeB oder Ferrit). Rund eine Zehnerpotenz schwächer als gesinterte Magnete, nach dem Druck zu magnetisieren (Impulsmagnetisierer). Das Maß ist durch Messung zu klären.
- **Weichmagnetisch:** Eisen- oder Ferrit-gefüllte Filamente als Flusskern. Die Permeabilität ist niedrig, die Wirkung begrenzt.
- **Spulen:** Kanalverfahren (3.2) oder eingelegter Kupferlackdraht auf gedrucktem Spulenkörper. Der Draht ist der Standard, die gedruckte Spule das Experiment.
- **Motorkonzept „in einem Druck“:** Axialflussmotor. Stator als gedruckte Spulenplatine (Kanäle mit Schmelzmetall), Rotor mit eingedruckten oder eingelegten Magneten, Lagerung als Print-in-place-Gleitlager. Realistisch sind kleine Motoren und Aktoren mit niedrigem Drehmoment (Demonstration, Feinantrieb, Sensorik). Leistungsgrenzen setzen Spulenwiderstand, Wärmeabfuhr (Kunststoff leitet kaum) und Erweichung des Kunststoffs.
- **Weitere Wirkprinzipien ohne Magnete:** Piezo- und dielektrische Elastomeraktoren, elektrostatische Aktoren, thermische Biegeaktoren (Heizbahn aus Leitfilament).

4 SLA/MSLA-Ansätze

SLA und MSLA härten Photoharz aus. Leitfähige Füller streuen und absorbieren Licht und erhöhen die Viskosität, deshalb ist direkter Druck leitfähiger Harze begrenzt. Brauchbare Wege:

1. **Kanal und Füllung:** hochauflösende Kanäle (rund 100 µm), Resin vollständig auswaschen, mit Leitpaste oder Schmelzmetall füllen. Beste Auflösung der Druckverfahren, Waschbarkeit ist die Hürde.
2. **Selektive Metallisierung:** Oberfläche aktivieren (Katalysator), stromlos Kupfer abscheiden, galvanisch verstärken. Klassisch als 3D-MID bekannt (Laser-Direktstrukturierung), für Harzteile als Versuch.
3. **Photoreduktion:** Silbersalz- oder Metallionenharze, bei denen Licht Metall abscheidet. Forschungsstand, nicht als Werkstattverfahren etabliert.
4. **MSLA als Belichter für Leiterplatten:** Das LCD und die 405-nm-Lichtquelle eines MSLA-Druckers belichten Trockenfilm-Fotolack auf Kupferlaminat, danach Entwickeln und Ätzen. In der Maker-Praxis berichtet, Auflösung begrenzt durch Pixelgröße (rund 30–50 µm) und Lackempfindlichkeit bei 405 nm. Das ist „Photoschaltung auf Trägermaterial“ im engeren Sinn und ein sehr günstiger Weg zu feinen Leiterbahnen, ohne dass der Drucker Material druckt. Als Versuch V6 vorgesehen, Praxisbericht ohne Fachquelle.
5. **Funktionsharze:** Harz mit Magnet- oder Keramikpulver (Streuung, Sedimentation, geringe Füllgrade) oder dielektrische Harze für Kondensatoren.
6. **Pyrolyse:** Harzteile zu Kohlenstoff verkoken (Glaskohlenstoffstrukturen als Elektroden). Hoher Schwund, Ofenatmosphäre nötig, eher Forschung.

5 Dioden und Halbleiter

Im Standard-FDM nicht möglich. Der Konzeptraum (Cu₂O-Gleichrichter, gedruckte Schottky-Diode, pn-Heteroübergang, OECT, Memristor; Dotierung per Tinte, Tropfenraster und elektrochemisch) ist im Chat-Vorlauf vom 08.10.2026 ausgearbeitet und im Ordner 06_WERKZEUGE/kennlinie mit einem Auswerteverfahren hinterlegt. **Das Pastenverfahren (3.4) ist die Brücke:** dieselbe Anlage kann Halbleitertinten schreiben. Für SLA ist Halbleiter derzeit nur als Photoreduktion und Kohlenstoffpyrolyse denkbar (Kapitel 4).

Zielwerte für Versuchsbauteile: Gleichrichtungsverhältnis über 10 bei 1 V, Idealitätsfaktor unter 3, Alterung in Tagen dokumentiert.

6 Entscheidungsbaum für die Werkstatt

1. Fertiges Produkt mit Elektronik? → Einlegetechnik (3.3) mit Standardchips.
2. Platine ohne Ätzen, grob? → Pastenkopf (3.4) oder Kanal mit Schmelzmetall (3.2).
3. Feine Bahnen unter 0,2 mm? → MSLA-Belichtung von Fotolack (4.4) oder SLA-Kanal (4.1).
4. Strom über rund 100 mA? → Metallkanal oder eingelegter Draht, kein Kohlenstofffilament.
5. Antrieb? → eingelegte Magnete und Draht; gedruckte Spule nur als Versuch.
6. Halbleiter selbst drucken? → Pastenkopf mit Tinte, Messplatz, Versuchsstufe.

7 Grenzen im Überblick

Thema	Grenze
Leitfähigkeit Filament	10 ⁴ - bis 10 ⁶ -fach schlechter als Kupfer
Vias und Anisotropie	Übergang zwischen Schichten schwach, streut
Lötbarkeit	kein Standardlot auf Kunststoff
Temperatur	Substrat erweicht (PLA rund 55–60 °C, PETG rund 80 °C), Schmelzmetall begrenzt Betrieb
Strombelastung	Joulesche Wärme ohne Wärmeabfuhr, Leiterquerschnitt klein
Frequenz	Induktivität und Kapazität der Geometrie, kein HF-Material
Reproduzierbarkeit	Füllung, Benetzung, Druckqualität streuen
Normen	EMV, Berührungsschutz und CE gelten für das Produkt; gedruckte Leiter nur für Kleinspannung