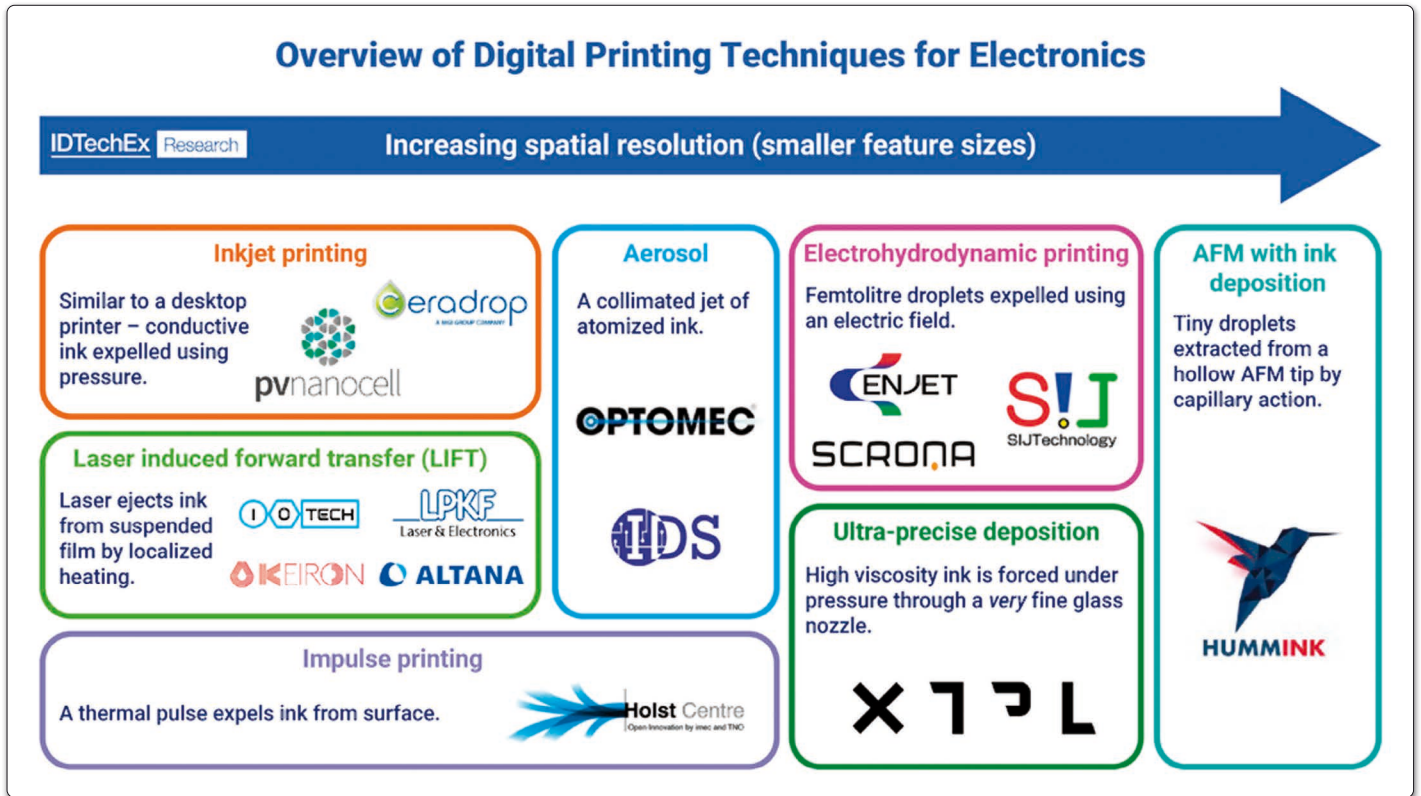


# Gedruckte Elektronik für die additive digitale Fertigung

Wie kann die Elektronikfertigung für unser digitales, umweltbewusstes Zeitalter umgestaltet werden?



Der Bericht von IDTechEx „Manufacturing Printed Electronics 2023-2033“ enthält eine detaillierte Analyse konkurrierender analoger und digitaler Herstellungsverfahren, einschließlich Unternehmensprofilen, technologischem Entwicklungsstand und Anwendungsbeispielen.

Der Bericht von IDTechEx „Conductive Ink Market 2023-2033“ untersucht diesen Markt umfassend, vergleicht die Eigenschaften vieler leitfähiger Tintentypen von verschiedenen Anbietern und bewertet die Anwendungen, für die sie am besten geeignet sind.

Gegenwärtig erfolgt die Elektronikfertigung meist analog und subtraktiv, was Produktion und Prototyping von Kleinserien relativ teuer macht und zudem Abfallmaterial und Ätzmittel produziert. Gedruckte Elektronik bietet eine Alternative: Die additive Fertigung durch selektive Abscheidung von leitfähiger Tinte anstelle von subtraktivem chemischem Ätzen reduziert den Material- und Energieverbrauch, während digitale Abscheidungsmethoden schnelles Prototyping und sogar Massenanpassung ermöglichen.



Autor:  
Dr. Matthew Dyson  
Leitender Analyst  
IDTechEx  
www.idetechex.com

## Additive Verfahren auf dem Vormarsch

Wenn man den Bereich der Elektronikfertigung in additive/subtraktive und analoge/digitale Verfah-

ren unterteilt, wird deutlich, dass sich die additiven Fertigungsverfahren stark ausbreiten. Während die gedruckte Elektronik oft mit der hochvolumigen Rolle-zu-Rolle-Produktion unter Verwendung analoger Methoden, die aus dem konventionellen Grafikdruck übernommen wurden, in Verbindung gebracht wird, gibt es umfangreiche Innovationen bei den digitalen Fertigungsverfahren.

Die breite Palette analoger und digitaler Druckverfahren bedeutet, dass die additive Elektronikfertigung ein sehr breites Spektrum an Auflösungen und Durchsätzen abdecken kann. So können beispielsweise mit verschiedenen Techniken Leiterbahnen mit einem Durchmesser von bis zu 1 µm digital strukturiert werden, was

die Herstellung von Mikroelektronik ermöglicht. Darüber hinaus eignen sich die verschiedenen Verfahren für unterschiedliche Viskositätsbereiche der Tinte, was die Kompatibilität mit einer Vielzahl von leitfähigen Tintenzusammensetzungen ermöglicht.

## Additiv vs. subtraktiv

Die Dichotomie zwischen additiver und subtraktiver Fertigung lässt sich auf die Fertigung im Allgemeinen und auf die Elektronik anwenden. Wie der Name schon sagt, geht es bei der subtraktiven Fertigung darum, Material zu entfernen, um die gewünschte Form zu erhalten wie beim CNC-Fräsen und chemischen Ätzen. Der Hauptvorteil der subtraktiven Fertigung liegt wohl in der Wiederhol-

Segmenting the Electronics Manufacturing Space

	Additive	Subtractive
Digital	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inkjet printing</li> <li>Extrusion</li> <li>Laser induced forward transfer (LIFT)</li> <li>Electrohydrodynamic (EHD) printing</li> <li>Aerosol</li> <li>Impulse printing</li> <li>Print-then-plate</li> <li>Laser direct structuring (LDS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laser etching</li> <li>Focused ion beam (FIB) etching</li> </ul>
Analogue	<ul style="list-style-type: none"> <li>Screen printing</li> <li>Flexography</li> <li>Gravure printing</li> <li>Offset printing</li> <li>Reverse offset printing</li> <li>Pad printing</li> <li>Chemical and physical vapor deposition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Photolithography (chemical etching)</li> <li>Mechanical etching</li> </ul>

barkeit, insbesondere bei kleinen Längenskalen. Tatsächlich ist es die Wiederholbarkeit der Fotolithografie und des anschließenden chemischen Ätzens, die kostengünstige ICs und damit die bemerkenswerte Erschwinglichkeit der Computerleistung ermöglicht hat. Die subtraktive Fertigung ist jedoch von Natur aus verschwenderisch, vor allem wenn viel Material entfernt werden muss, und auch der Ätzmittel- und Wasserverbrauch wirft Fragen der Nachhaltigkeit auf.

Im Gegensatz dazu werden bei der additiven Fertigung die Komponenten von Grund auf neu hergestellt. Ein klassisches Beispiel ist der 3D-Druck, der inzwischen nicht nur bei Kunststoffen, sondern auch bei Keramik und Metallen weitverbreitet ist, aber auch das Spritzgießen. Additive Ansätze zeigen zwei klare Vorteile: geringen Materialverbrauch und die Möglichkeit, mit Techniken wie dem 3D-Druck komplexe Strukturen wie innere Hohlräume zu erzeugen.

Gedruckte Elektronik ist ein Beispiel, da die Leiterbahnen nur dort angebracht werden, wo sie benötigt werden. Komplexere mehrschichtige Schaltungen entstehen durch aufeinanderfolgendes Drucken von dielektrischen und leitenden Schichten. So können beispielsweise Überkreuzungen an den gewünschten Stellen gedruckt werden, ohne dass eine ganze zusätzliche leitende Schicht eingefügt werden muss.

Die additive Elektronikfertigung ist vor allem dann interessant, wenn

Komponenten, wie z.B. montierte LEDs, in großem Abstand zueinander angeordnet sind.

Rolle-zu-Rolle-Fertigung

Der vielleicht bekannteste Anwendungsfall für gedruckte Elektronik ist die kontinuierliche Rolle-zu-Rolle-Fertigung (R2R), die die verlockende Vision bietet, elektronische Schaltkreise fast so schnell und kostengünstig wie Zeitungspapier zu drucken. Die R2R-Produktion wird bereits für RFID-Etiketten eingesetzt, von denen jährlich Milliarden Stück produziert werden. Die kontinuierliche Fertigung mit hohem Durchsatz ermöglicht es, die Fixkosten auf sehr hohe Stückzahlen zu verteilen, was die Elektronik für kostenempfindliche Anwendungen wie Einweg-Hautpflaster zur Gesundheitsüberwachung und intelligente Verpackungen interessant macht.

Die R2R-Fertigung kann auch zur Herstellung großflächiger Elektronik verwendet werden, insbesondere für Solarpaneele, bei denen entweder organische oder Perowskit-Halbleiter als photovoltaisches (PV) Material auf flexible Substrate gedruckt werden. Im Vergleich zu den etablierten Siliziumzellen werden diese neuen Photovoltaik-Technologien wahrscheinlich zunächst einen geringeren Wirkungsgrad und/oder eine geringere Lebensdauer haben, aber diese Nachteile werden durch Flexibilität, Leichtigkeit, geringere Kosten und eine viel geringere eingebettete Energie ausgeglichen.

Natürlich ist die R2R-Elektronikfertigung mit zahlreichen Herausfor-

derungen verbunden, wie z.B. hohen Kapitalkosten, schwieriger Produktionsoptimierung, effizienter Befestigung von Komponenten und der Notwendigkeit einer Qualitätskontrolle in Echtzeit. Das wohl größte Hindernis ist die Suche nach einem Markt für ausreichend große Mengen vergleichsweise einfacher Schaltungen, um die Vorteile der kontinuierlichen Produktion nutzen zu können. Die Umstellung von analogen auf digitale Druckverfahren würde dieses Problem in gewisser Weise lösen, da eine breite Palette unterschied-

licher Schaltkreisdesigns auf derselben Substratrolle hergestellt werden könnte.

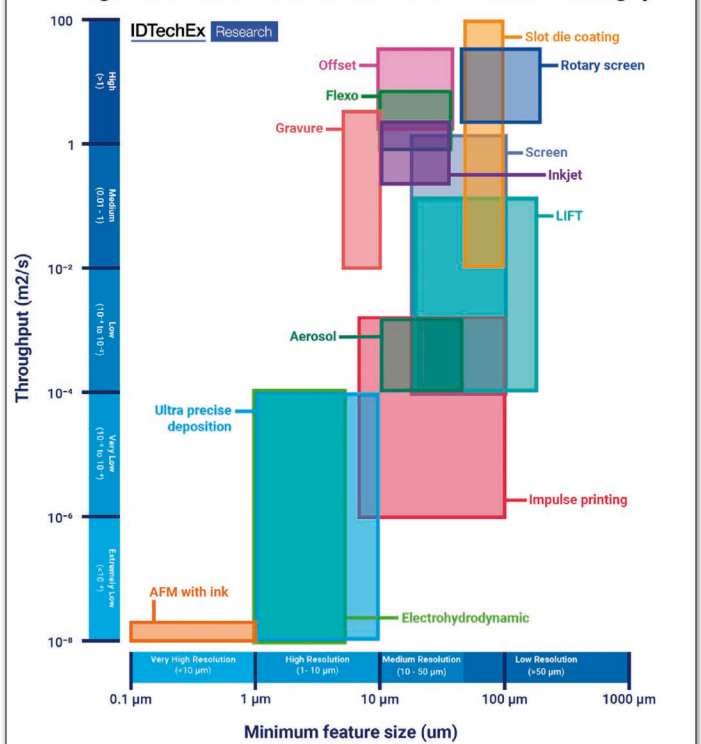
Leitfähige Tinten

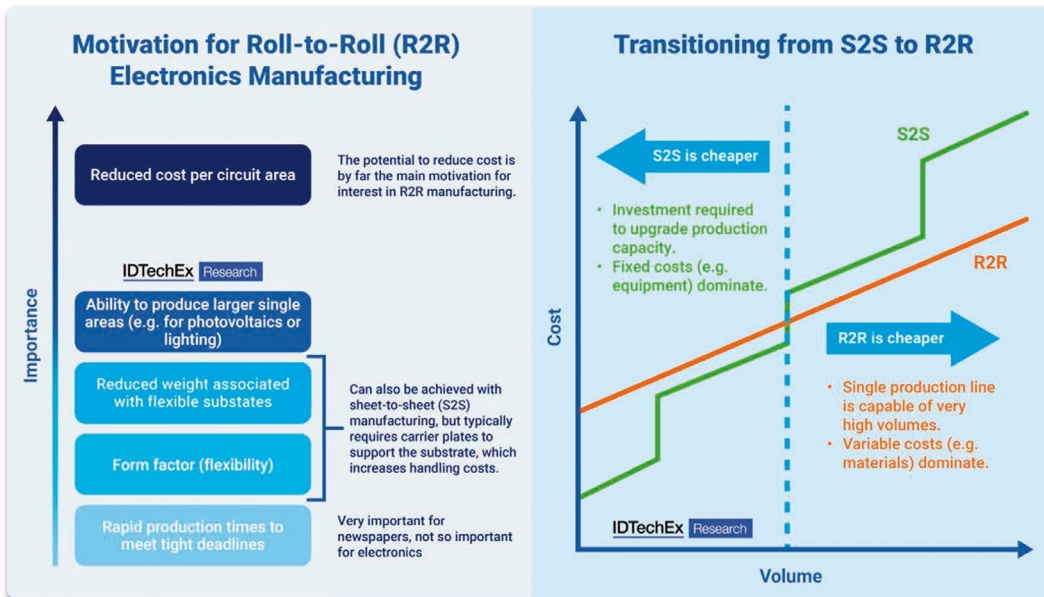
Leitfähige Tinten sind natürlich von grundlegender Bedeutung für die additive Elektronikfertigung - ohne ein lösungsfähiges leitfähiges Material wäre gedruckte Elektronik nicht möglich. Derzeit basieren die meisten Tinten auf mikrometergroßen Silberplättchen, die eine ausgezeichnete Haltbarkeit und hohe Viskosität aufweisen und mit der vorherrschenden Abscheidungs-technik des Siebdrucks kompatibel sind. Es gibt jedoch eine Vielzahl unterschiedlicher Alternativen.

Besonders erwähnenswert sind partikelfreie Druckfarben, die im Gegensatz zu herkömmlichen leitfähigen Druckfarben keine Suspension von Metallpartikeln enthalten. Stattdessen wird eine transparente Lösung eines solvatisierten Metallsalzes in situ chemisch umgewandelt, um ein Metall zu erzeugen. Die chemische Reaktion wird durch Wärme, Licht oder Plasma ausgelöst und führt zu einer glatten, leitfähigen Metallschicht.

Dieser Partikelansatz bietet drei wesentliche Vorteile: hohe Leitfähigkeit, niedrige Viskosität und eine glatte Oberfläche. Diese Kombina-

Printing Methods for Electronics: Resolution vs Throughput





tion von Eigenschaften macht partikelfreie Druckfarben besonders interessant für die EMI-Abschirmung im Hochfrequenzbereich.

Ebenfalls auf dem Vormarsch sind Tinten auf Kupferbasis mit Additiven, die die Oxidation während des Sinterns verhindern. Kupfertinten sind zwar seit langem ein Ziel der Forschung und Entwicklung, aber da das zugrundeliegende Metall etwa 100-mal billiger ist als Silber, hat sich die kostengünstige Vermeidung von Oxidation während des Sinterns in der Vergangenheit als schwierig erwiesen. Mit der neuen Generation von Tinten, die Additive enthalten, konnte diese Schwierigkeit weitgehend gelöst werden.

**Digital vs. analog**

Jeder, der einen Tintenstrahl- oder 3D-Drucker besitzt, kennt den Hauptvorteil der digitalen Fertigung: Jede Seite oder jedes Objekt kann anders sein, ohne dass zusätzliche Einrichtungszeit oder -kosten anfallen. Diese Vorteile gehen jedoch in der Regel mit einem geringeren Durchsatz im Vergleich zu analogen Verfahren wie Flexodruck oder Spritzguss einher.

Der gleiche Kompromiss ist in der Elektronikindustrie zu beobachten. Heute entstehen die meisten Leiterplatten mit analogen Verfahren, bei denen eine Maske der Strukturierung des Kupferlaminats dient. Dies ermöglicht die effiziente Herstellung großer Mengen von Leiterplatten in hohen Stückzahlen, führt aber dazu, dass alle Schaltungen identisch sind.

Im Gegensatz dazu wird die digitale Fertigung für das wesentlich langsamere Desktop-PCB-Prototyping verwendet, bei dem leitfähige Tinte aus einer Düse aufgebracht wird.

Die digitale Elektronikfertigung hat großes Interesse am hochauflösenden Druck geweckt, und es gibt eine breite Palette von Methoden. Dazu gehören Aerosol, elektrohydrodynamischer Druck (EHF), ultrapräziser Abscheidungsdruck, der erst kürzlich entwickelte Impulsdruck und sogar der Druck von einer modifizierten Rasterkraft-Mikroskopspitze (AFM).

Die Fähigkeit, auf 3D-Oberflächen zu drucken, wird häufig als Vorteil dieser Systeme genannt, da bei den meisten analogen Druckverfahren nicht gegeben. Die ideale Abscheidungsmethode für die Elektronikfertigung wäre wohl eine digitale additive mit hohem Durchsatz und hoher Ausbeute. Dies würde eine effiziente Fertigung mit hohem Durchsatz und geringen Stückzahlen bei minimalem Materialabfall ermöglichen und die „Mass Customization“ erleichtern, einen viel diskutierten Trend, der es ermöglicht, dass jedes Produkt spezifische Kundenanforderungen erfüllt und gleichzeitig die Kostenvorteile der Massenproduktion beibehält.

**Laser-induzierte Vorwärtsübertragung**

Eine aufkommende digitale Druckalternative sowohl für die Abscheidung von leitfähigen als auch von dielektrischen Tinten ist

der laser-induzierte Vorwärtstransfer (LIFT). Diese Druckmethode kann als eine Mischung aus Laser-Direkt-Strukturierung (LDS) und Tintenstrahl-Druck angesehen werden, da ein Laser für die Strukturierung verwendet wird, ohne dass das Substrat spezielle (d.h. additiv-induzierte) Eigenschaften aufweisen muss.

Daher eignet es sich für eine Vielzahl von Materialien, sowohl leitfähige als auch dielektrische, mit unterschiedlichen Viskositäten, da keine Gefahr der Düsenverstopfung besteht. Da sich ein Laserstrahl durch sehr kleine Bewegungen eines Spiegels steuern lässt, kann die Strukturierung viel schneller erfolgen als durch die mechanische Bewegung einer Düse. Darüber hinaus ist die erforderliche Spurdicke in nur einem Durchgang erreichbar. LIFT kann in Verbindung mit der R2R-Fertigung eingesetzt werden, was eine schnelle und kostengünstige Herstellung von kundenspezifischen Schaltungen ermöglicht.

**Mehrdüsendruck**

Eine weitere Innovation, die digitale additive Fertigung mit einem vergleichsweise hohen Durchsatz für die Auflösung verspricht, ist der elektrohydrodynamische Mehrdüsendruck (EHD). Hier wird die Tinte durch ein elektrisches Feld aus einer Düse „gezogen“ und nicht herausgedrückt. So lassen sich bis zu 1 µm schmale Spuren drucken. Aufgrund des geringen Durchsatzes hat sich das Verfahren kaum durchsetzen können. Die Kombination mögli-

cherweise hunderter einzeln adressierbarer Düsen in einem einzigen MEMS-Chip (mikroelektromechanisches System) könnte jedoch den Kompromiss zwischen Auflösung und Durchsatz bei der additiven Fertigung von Elektronik in kleinem Maßstab überwinden. Zu den vielversprechenden Anwendungen für diese Innovation gehören Halbleiterverpackungen und fälschungssichere Muster.

**Impulsdruck**

Das Drucken von Elektronik auf 3D-Oberflächen, manchmal auch als teiladditive Elektronik bezeichnet, ist ein aufstrebender Ansatz, bei dem der Platzbedarf für eine Leiterplatte entfällt. Es ermöglicht die Leitfähigkeit um gekrümmte Oberflächen (z.B. den Rand von Glasrückwänden).

Während eine Vielzahl digitaler Abscheidetechniken, insbesondere der Aerosoldruck und die Extrusion, leitfähige Tinten auf konforme Oberflächen auftragen können, ist kürzlich eine neue Technik aufgetaucht. Beim sogenannten Impulsdruck wird ein schneller Wärmeimpuls von einer steuerbaren Anordnung von Heizelementen verwendet, um die Tinte von einer flachen „Übertragungsfläche“ auf das Zielobjekt zu bringen. Ohne Düse ermöglicht dieses Verfahren einen hohen Durchsatz, da die Tinte gleichzeitig von der gesamten erhitzten „Übertragungsfläche“ ausgestoßen werden kann.

**Zusammenfassung**

Die jüngsten Engpässe in der Lieferkette und die geopolitischen Spannungen haben viele Unternehmen und sogar Regierungen dazu veranlasst, die Art und Weise und den Ort der Produktion von Waren, insbesondere von Elektronik, neu zu bewerten. Der Wiederaufbau von Produktionsstätten an neuen Standorten bietet eine großartige Gelegenheit, in neue Methoden wie die gedruckte Elektronik zu investieren, die geringere Umweltauswirkungen, digitale Fertigung auf Abruf und niedrigere Kosten bieten. Gedruckte Elektronik wird bereits in vielen kommerziell erhältlichen Produkten eingesetzt. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Akzeptanz von neuen Anwendungen zunimmt. ◀