

# Hochauflösendes Direktschreiben sensorischer Strukturen unter Anwendung des Aerosoldruckverfahrens

*S.Ziesche<sup>1</sup>, S.Mosch<sup>1</sup>, M.Ihle<sup>1</sup>, U.Partsch<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Fraunhofer IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Germany

## Abstract

Die Anwendung des Aerosoldruckverfahrens in der Herstellung keramikbasierter Sensorik zeigt erhebliche Vorteile gegenüber den konventionellen Herstellungsverfahren der Dick- und Dünnschichttechnik. Im Beitrag wird das Potenzial dieser Technologie durch Vergleich mit alternativen Herstellungsverfahren aufgezeigt und anhand konkreter Beispiele ihre Praktikabilität zur Verbesserung bestehender sensorischer Lösungen verschiedener Anwendungsbereiche demonstriert.

**Keywords:** Aerosoldruck, Dickschichttechnik, Low Temperature Cofired Ceramics, LTCC, Mechanische Sensorik, Temperatursensorik, MEMS, Aufbau- und Verbindungstechnik, AVT

## Sensorprinzip - Bestandteile einer Messvorrichtung

Eine Messvorrichtung besteht grundsätzlich aus Messgrößenaufnehmern und zugehörigen Messumformern. Der Aufnehmer (Sensor) setzt das zu messende physikalische, i.d.R. nichtelektrische, Signal in ein elektrisches Signal um. Dies wird im Umformer wiederum in ein normiertes elektrisches Signal umgewandelt. Die Messvorrichtung kann nunmehr die Messgröße mittels einer Anzeige darstellen, alternativ besteht die Möglichkeit einer automatisierten Datenverarbeitung.

Der Aufnehmer ist von tragender Bedeutung für die Messung, denn er steht in unmittelbarer Wechselwirkung mit dem Messobjekt. Die Ausführung des sensorischen Elementes bestimmt wesentlich über den Messbereich, die Kennlinie, die Empfindlichkeit, die Genauigkeit, die Ansprechzeit und nicht zuletzt über die Zuverlässigkeit unter den Prozessbedingungen.

## Herstellung sensorischer Elemente

Sensorische Strukturen der Mikrosystemtechnik werden prinzipiell durch Verfahren der Dünnschicht- oder der Dickschichttechnik hergestellt. Die Dünnschichttechnologie (Schichtabscheidung, Lithografie, Ätzung) bietet eine hohe geometrische Freiheit in der Herstellung sensorischer Schichten (min. Strukturbreite < 5 µm, Dicke < 1 µm). Der Vergleich mit den gängigen Technologien der Dickschichttechnik [1] zeigt jedoch, dass die Dünnschichttechnik aufgrund der höheren Prozesskosten bis zu relativ hohen Stückzahlen (Bereich 1 Mio, [2]) die kostenintensivere Variante ist. Der Nachteil konventioneller

dickschichtbasierter Abscheideverfahren (Tab. 1) liegt wiederum in ihrem begrenzten Auflösungsvermögen (z.B. Siebdruck), während die aus der klassischen Farbdrucktechnologie bekannten Verfahren (Inkjetdruck) hohe Anforderungen an die Tinteneigenschaften stellen. Das wiederum reduziert die Anzahl erhältlicher funktionaler Tinten.

Tab. 1: Dickschichtbasierte Schichtabscheidungsverfahren

Abscheidungsverfahren	Strukturbreiten	Linienhöhen
Siebdruck	> 100 µm	1 – 100 µm
Aerosoldruck	> 10 µm – 5 mm	25 nm – 10 µm
Inkjetdruck	50 – 100 µm	< 0,5 µm
Gravurdruck	> 100 µm	< 1 µm

## Aerosoldruck sensorischer Strukturen

Die Aerosoldrucktechnologie (Abb. 1) als Direktschreibverfahren zur Schichtabscheidung überwindet eine Vielzahl der Nachteile konventioneller Abscheidetechnologien:

- das Auflösungsvermögen liegt im Bereich der Dünnschichttechnik (>10 µm),
- die abscheidbare Schichtdicke ist vergleichbar mit gängigen Dickschichtlösungen,
- die Robustheit des Prozesses gestattet das Verdrucken pastöser Halbleitungen eines breiten Viskositätsbereichs (7-2500 mPas), wie von Nanopartikeltinten und von verdünnten Dickschichtpasten,
- das Druckverfahren ist kontaktlos, maskenfrei und 3D – fähig und

- in Kombination mit sensiblen Abtragsverfahren besteht die Möglichkeit eines Reparaturdrucks.

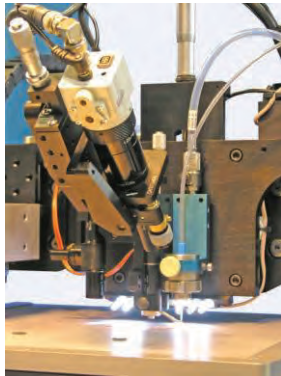


Abb. 1 Aerosoldruckeinheit mit Düse, Shutter und Kameramodul

### Aerosoldruckbasierte Sensorik am Beispiel

Die Vorteile der direktgeschriebenen Abscheidung sensorischer Strukturen mittels Aerosoldruck können an verschiedenen Sensorklassen eingehend dargestellt werden.

**Partikelsensoren** zur Detektion leitfähiger Partikel in Volumenströmen basieren beispielhaft auf dem Prinzip der Partikelabscheidung auf gedruckten resistiven Strukturen. In der Regel kommen dafür Interdigitalstrukturen, nämlich kammartig ineinandergreifende und leitfähige Finger, zur Anwendung (Abb. 2).

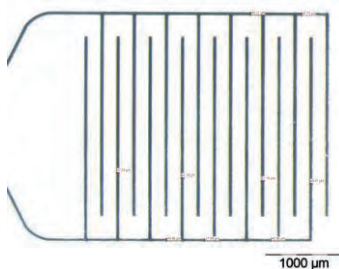


Abb. 2 Aerosolgedruckte Interdigitalstrukturen

Ein Kostenvergleich der für die Herstellung derartiger Strukturen infrage kommenden Technologien endet meist mit einer Entscheidung für die Dickschichttechnologie. Die zu erarbeitende resistive Interdigitalstruktur ist ausschlaggebend für die Sensitivität ebensolcher sensorischer Lösungen. Bereits bei der Herstellung von Teststrukturen zeigen sich die wesentlichen Vorteile der maskenlosen Direktschreibverfahren, indem sie eine unmittelbare Herstellung der Teststrukturen direkt nach deren Konzeption ermöglichen. Der Umweg einer meist nicht im Unternehmen

stattfindenden Herstellung von Masken entfällt, sodass im Entwicklungsprozess erhebliche Kosten eingespart werden können.

Relevant für die Sensitivität des Sensors ist der Abstand zwischen den Fingern der Interdigitalstrukturen (Gap). Während mit klassischen Dickschichttechnologien nur schwer Fingerabstände unter 100 µm umsetzbar sind, können mittels Aerosoldrucktechnologie Strukturbreiten bis zu 10 µm abgeschieden werden. Somit wird einerseits das Detektieren geringer Partikelkonzentrationen möglich, andererseits lässt sich über eine Stufung der Fingerabstände auch ein sensibler Mehrbereichssensor verwirklichen. Zudem gestattet eine Feineinstellung der Abscheideparameter die gezielte Anpassung des sog. Oversprays, der die Strukturierung des Leitfingerrandes, ausgehend von einer scharfen Struktur bis hin zu einem fraktalartigen Zustand, ermöglicht (Abb. 3). Dadurch kann wiederum Einfluss auf die Sensitivität der resistiven Struktur genommen werden. Mit der Möglichkeit, das Portfolio abscheidbarer Tintenwerkstoffe in Hinsicht auf die Anwendung zu erweitern, ergeben sich zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten zur Herstellung eleganter sensorischer Lösungen.

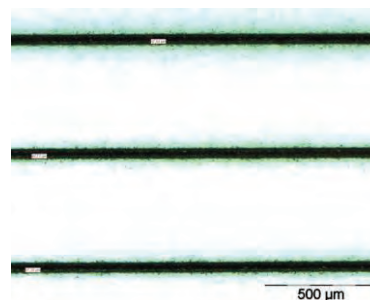


Abb. 3 Leitfinger einer direktgeschriebenen Interdigitalstruktur mit gezielt eingestelltem, sensitivitätsrelevantem Overspray

Hochtemperaturstabile resistive **Sensoren** zur Bestimmung der **Temperatur** basieren überwiegend aus gewickelten, edelmetalldrahtbasierenden Elementen oder aus auf inerten Substraten in Dünnschichttechnologie abgeschiedenen Widerstandsstrukturen. Während die drahtgewickelten Elemente flexibel herstellbar sind und das Nonplusultra hinsichtlich der Hochtemperaturstabilität darstellen, ist eine massenfertigungstaugliche, wirtschaftlich tragfähige Herstellung nur schwierig umzusetzen. Dagegen werden dünn-schichttechnologisch hergestellte Temperatursensoren standardisiert in großen

Stückzahlen produziert und sind in Bausteinform mit Anschlussdrähten, in SMT – Bauweise oder als folienbasiertes Element verfügbar. Die direkte, z.B. dickschichtbasierte Integration in die Platine, ist mit diesen Elementen nicht möglich, was die Flexibilität und den Miniaturisierungsgrad einschränkt. Eine Alternative ist daher das Verdrucken dickschichtbasierter NTC- oder PTC-Widerstandspasten auf glasfaserbasierten oder keramischen Substraten. Da aus Gründen der Messbarkeit hohe Widerstandswerte angestrebt werden, ergibt sich ein unmittelbarer Vorteil des Aerosoldrucks im Vergleich zum Standardsiebdruck. Durch die Verringerung der abscheidbaren Strukturbreiten (Abb. 4) lassen sich auf gleichen Flächen größere Widerstände abscheiden (Widerstandserhöhung) oder alternativ der notwendige Flächenbedarf eines herzustellenden Zielwiderstandes reduzieren (Miniaturisierung). Zudem ermöglicht die 3D-Fähigkeit dieser Technologie die Abscheidung von Strukturen auf gekrümmten Substraten oder sogar auf Freiformflächen. Weiteres Potential zeigt die Technologie zudem bei der Einstellung exakter Widerstände. Während die klassische Einstellung exakter Widerstände über materialschädigende Trimmverfahren erfolgt, die als Konsequenz vom regulären Materialverhalten abweichende, zur Degradation neigende Volumenelemente hinterlassen, ermöglichen die schnellen Varianten der Schichtformierung (Lasersintern, Flash-Sinterung und Blitzlampentemperung) aerosoldruckbarer Tinten die additive, defektfreie Einstellung eines exakten Zielwiderstandes.

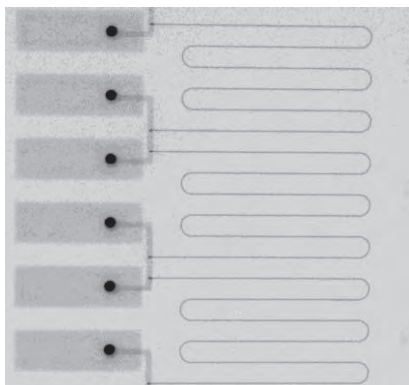


Abb. 4: Aerosolgedruckte Mäanderstruktur mit Anschlusspads

Die Vorteile aerosolbasierter Abscheidetechnologien sind gleichermaßen auf dem Gebiet der HF-Sensorik veranschaulichbar. Insbesondere zur Herstellung planarer Antennen sind hochaufgelöste Metallisierungsstrukturen

großer Randschärfe notwendig. Die traditionelle Technologie ist auch dafür die Dünnschichttechnologie, deren Nachteile eingangs ausführlich beschrieben worden sind. Der Einsatz von Direktschreibverfahren (Abb. 5) ist daher vorteilhaft, macht jedoch auch den weiteren Entwicklungsbedarf an Tinten deutlich, die einerseits kompatibel zu den klassischen HF-Substraten wie Teflon, Teflon/Glasfaser – Kompositen oder LTCC-Keramik sind und andererseits mit höchster Akkuratess mittels Aerosoldrucktechnologie abgeschieden werden müssen.

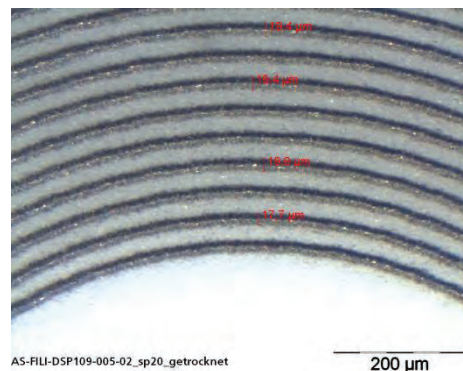


Abb. 5: Hochaufgelöste direktgeschriebene Antennenstruktur

Die 3D – Fähigkeit, als eines der tragenden Vorteile des Aerosoldrucks, kann dabei nicht nur in der Schichtabscheidung Anwendung finden, sondern zeigt gleichfalls neue Wege in der Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) auf. Die tradierte Variante der AVT für HF-Chips (z.B. für MMIC oder LNA) ist das Drahtbondverfahren, das aufgrund der Geometrie der Drahtbond-Loops parasitäre Induktivitäten in die Gesamtschaltung einbringt. Im Gegensatz dazu erlaubt der Aerosoldruck das direkte Schreiben der Chipkontaktierung vom Basissubstrat, z.B. PCB oder LTCC, auf den HF-Chip (Abb. 6). Der Gewinn an elektrischer Performance setzt jedoch ein genaues Verständnis der am Kontaktierungssystem beteiligten Partner bzw. von deren Materialverhalten voraus, damit der Gewinn an elektrischer Performance nicht auf Kosten der Zuverlässigkeit geht. Das Fraunhofer IKTS hat in der Vergangenheit dazu umfängliche Untersuchungen betrieben und verfügt über kompatible Materialsysteme zur Herstellung direktgeschriebener Kontaktierungen.



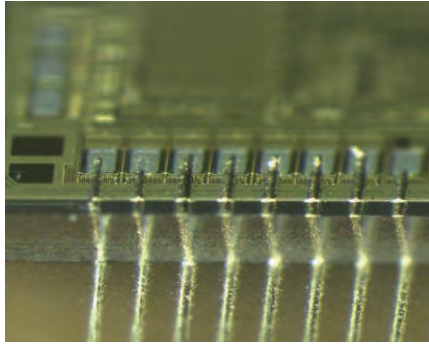


Abb.6: Chipkontaktierung mittels Aerosoldruck abgeschlossen

Ein bestehender Trend in der Sensorik ist die Vereinigung von Sensoren, Aktoren und meist einer Steuerelektronik auf einem intelligenten Substrat, einem **Mikro-elektro-mechanischen System (MEMS)**. Als Substratmaterialien werden dabei mehrheitlich 3D-strukturierbare und hybrid-funktionalisierbare Werkstoffe wie siliziumverwandte Halbleiter oder keramische Kompositmaterialien (LTCC) verwendet. Die hohe Spezialisierung derartiger sensorischer Lösungen erfordert oft eine besondere Aufbau- und Verbindungstechnik, welche die raffinierte Funktionalität der Komponente erst möglich macht. Im konkreten Beispiel (Abb. 7) bestand die Anforderung einer vertikalen Positionierung eines MEMS auf einem keramischen Trägersubstrat, die eine elektrische Kontaktierung zwischen MEMS und Substrat im rechten Winkel notwendig machte. Die unter Anwendung des Aerosoldrucks umgesetzte MEMS-Kontaktierung genügt den obig formulierten Anforderungen und ist ein Exempel für eine platzsparende AVT.

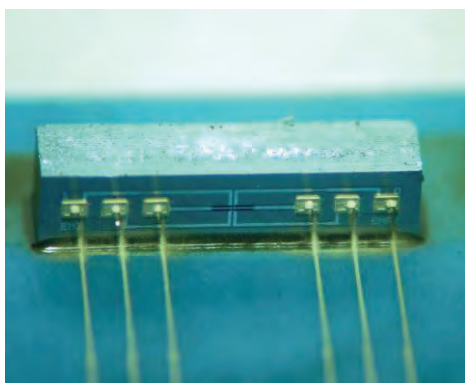


Abb. 7 Vertikal positioniertes MEMS mit direktgeschriebener, rechtwinkliger Chipkontaktierung

## Zusammenfassung

Bei den Direktschreibverfahren, insbesondere beim Aerosoldruck, handelt es sich um ein neuartiges, maskenloses Abscheidungsverfahren, das sich von den klassischen Abscheidetechnologien durch eine wesentliche Erhöhung des Auflösungsvermögens ( $>10\ \mu\text{m}$ ), durch die Möglichkeit des kontaktlosen Drucks auf dreidimensional strukturierten Substraten und durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der abscheidbaren Medien (niedrigviskose, nanopartikelbasierte Tinten bis zu höherviskosen Pasten) auszeichnet. Der breite, verarbeitbare Medienbereich gestattet aufgrund der zur Partikelgröße assoziierten Schichtformierungstemperatur das Arbeiten auf einer ausgedehnten Palette an Substratmaterialien, angefangen bei temperaturempfindlichen Kunststoff- oder FR4-Materialien bis zur hochtemperaturstabilen Keramik.

Der vorliegende Beitrag stellt dabei den umfangreichen Einsatzbereich dieser Technologie in der Sensorik, ausgehend von der Herstellung sensorisch aktiver Schichten bis hin zu originellen Varianten der Aufbau- und Verbindungstechnik dar. Der Einsatz dieser Technologie setzt jedoch profunde Kenntnisse in der Herstellung bzw. Modifikation pastöser Halbzeuge und in deren Adaption an das Abscheidungsverfahren voraus. Zudem ist für die Herstellung zufriedenstellender Druckergebnisse die tiefgehende technologische Kenntnis des Abscheidungsverfahrens zwingend notwendig. Abschliessend ist es von Bedeutung, eine hinreichende materialwissenschaftliche Expertise hinsichtlich der chemisch und thermomechanisch bedingten Wechselwirkungen der beteiligten Materialien während der Schichtformierung und während des Betriebs zu besitzen.

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei den bestehenden Druckaggregaten mehrheitlich um Lösungen mit einer Düse handelt, ist der Anwendungsbereich auf die Beschichtung kleiner Flächen mit Strukturen hoher Auflösung beschränkt. Das grenzt den Einsatzbereich unnötigerweise ein und limitiert die Prozessgeschwindigkeit. Ein Bedarf besteht somit in der Entwicklung von Druckaggregaten mit mehreren, flexibel einsetzbaren Düsen. Zudem existiert nur eine eingeschränkte Auswahl kommerziell verfügbarer, hauptsächlich silberbasierter Tinten. Hierfür existieren vielversprechende Entwicklungsansätze (Fraunhofer IKTS), welche einen zukünftige Hebung des noch ruhenden

technologischen Potentials gestatten und den Einsatzbereich erheblich verbreitern werden.

### References

- [1] Schmidt et. al.: IMAPS, München 2001, "Dickschicht – eine Alternative zu Dünnschicht-Mikrowellschaltungen im GHZ-Bereich"
- [2] Bechtold: EMPC, Rimini 2009, „A Comprehensive overview on todays ceramic substrate technologies"