

## Mikroverklebungen aus dem Tintenstrahldrucker

Dipl.-Phys. Wilhelm Meyer, Microdrop Technologies GmbH

Mit zunehmender Miniaturisierung von Bauteilen bzw. den Produkten stehen auch die Entwickler geeigneter Produktionstechnologien vor neuen Herausforderungen. Insbesondere wenn es um das Fügen von Kleinstbauteilen geht, kommen die bislang etablierten Technologien bei der Herstellung von stoffschlüssigen Verbindungen an ihre Grenzen. Die Bauteildimensionen von wenigen hundert Mikrometern und kleiner machen es notwendig, Klebstoffmengen, deren Volumina im Picoliter- bis Mikroliterbereich liegen, mit hoher Präzision zu applizieren. Diese hohe Präzision ist sowohl für die applizierte Menge, als auch für die Position, gefordert.

*With the increasing miniaturisation of components and production in general, new demands are called for by developers in fabrication processes. In particular, when the joining of the very smallest components is involved, one finds that conventional technologies such as adhesive bonding, have reached their limits. For components measuring less than a few hundred microns, adhesive volumes in the picolitre up to microlitre range are involved and these must be dispensed with high accuracy. Such accuracies apply not only to the volume of adhesive but also its positioning.*

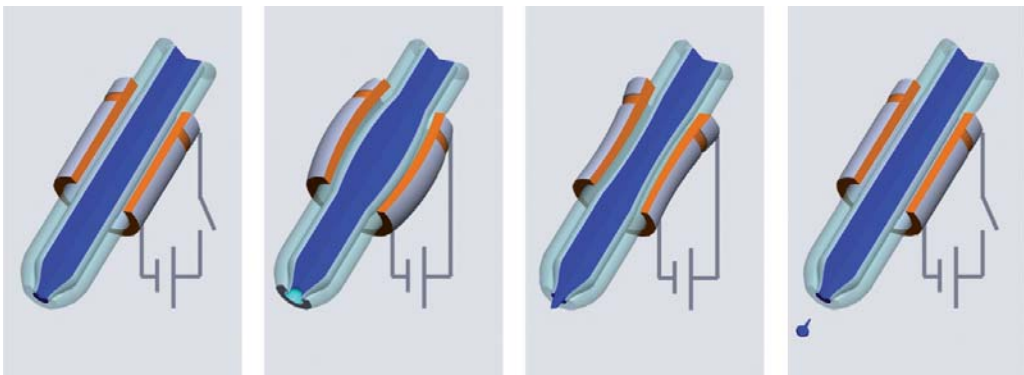


Abb.1: Funktionsprinzip Mikrodispenser

So groß wie die Zahl der verfügbaren Klebstoffe, ist auch die Zahl der Anwendungen bzw. Dosieraufgaben und Anforderungen der Fügetechnik in mikrotechnischen Bereichen wie Mikrooptik, Medizintechnik, Mikroelektronik. Es müssen kleine Linsensysteme, Lichtleiter oder andere miniaturisierte Komponenten miteinander verbunden werden. Neben der klassischen Verbindung ist auch die Herstellung von Bauteilbeschichtungen und Verkapselungen von großem Interesse.

Für eine Reihe der hier benannten Aufgaben zur Herstellung von Mikroverklebungen bietet sich die Nutzung der Tintenstrahltechnologie als Alternative

zu anderen Verfahren an. Mit dieser Technologie ist es möglich, kleinste Flüssigkeitsmengen berührungsfrei abzugeben. Es werden einzelne frei fliegende Tröpfchen im Sub-Nanoliter-Bereich erzeugt, die ohne direkten Kontakt mit dem Target appliziert werden. Warum also diese Technik nicht auch für die Mikroverbindungstechnik einsetzen und Klebstofftröpfchen punktgenau und berührungsfrei dosieren? Allerdings ist der Tintenstrahldrucker, wie er in fast jedem Büro zu finden ist, für die Applikation von Klebstoffen nicht geeignet. Beim Bürodruker ist die Tinte auf den Druckkopf abgestimmt, andere technische Flüssigkeiten wie Klebstoffe, andere funktionale

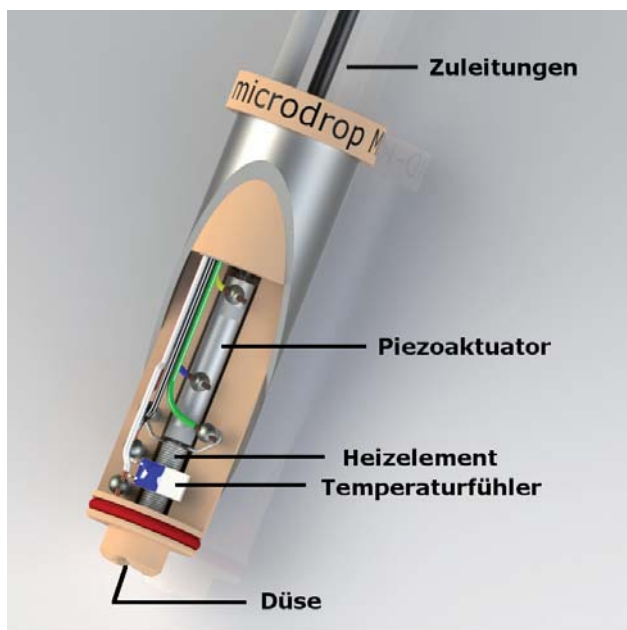


Abb. 2: Microdrop-Mikrodispenser MD-K-140

Polymere oder Öle zu verwenden ist nicht möglich. Insbesondere haben Klebstoffe deutlich andere rheologische Eigenschaften als herkömmliche Tinten. Sie werden aus einer Vielzahl unterschiedlicher Rohstoffen hergestellt und besitzen in der Regel deutlich höhere Viskositäten und sehr komplexe Fließeigenschaften. Durch die Weiterentwicklung der Tintenstrahltechnologie wird diese Möglichkeit eröffnet. Mit einem sogenannten Mikrodispenser wird auch die Erzeugung und Abgabe von Kleinstmengen unterschiedlichster Klebstoffmaterialien möglich, in dem die Mikrodispensersysteme an die rheologischen Eigenschaften der Klebstoffe angepasst werden.

Die grundlegende Funktionsweise des Mikrodispensers ist der des Tintenstrahl Druckers sehr ähnlich. In einer mit Flüssigkeit gefüllten Druckkammer werden kurzzeitig derart hohe Drücke erzeugt, dass die Kapillarkräfte in einer Düse überwunden werden und sich kleinste Tröpfchen bilden. Die Tröpfchen fliegen frei von der Düse weg und können so berührungslos auf ein Target übertragen werden. Der Vorteil ist, dass die Flüssigkeitsmenge sehr präzise und unabhängig von der Materialwechselwirkung zwischen Flüssigkeit und Target erzeugt und aus der Distanz aufgetragen wird. Da man Einzeltropfen und Tropfenserien

bis zu Frequenzen von einigen tausend Tröpfchen pro Sekunde erzeugen kann, lassen sich so auch größere Mengen additiv erzeugen. In *Abbildung 1* ist das Verfahren illustriert: Ein röhrenförmiger Piezoaktuator umschließt eine Glaskapillare, die am vorderen Ende zu einer Düse verengt ist. Beim Anlegen einer Spannung an die Elektroden auf der Innen- und Außenflächen des Aktuators reagiert dieser mit einer Kontraktion, d. h. der Innendurchmesser verkleinert sich. Die Deformation ist sehr gering, ( $< 0,1 \mu\text{m}$ ) reicht aber aus, um eine Schallwelle, die durch das Glasröhrchen in die Flüssigkeit übertragen wird, zu erzeugen. Die Schallwelle breitet sich in der Flüssigkeit aus und führt im Bereich der Düse zu einer Beschleunigung der Flüssigkeit. Es wird kurzzeitig ein sehr hoher Druck erzeugt. Dieser Druck wirkt der Kapillarkraft in der Düse entgegen und die Flüssigkeit schießt aus der Düse heraus. Nachdem sich der Druck wieder abgebaut hat, setzt eine Abbremsung des Flüssigkeitsstromes ein. Diese führt dazu, dass sich ein Teil des austretenden Volumens abschnürt, nachfolgend abreißt und sich zu einem Tröpfchen formt, das mit einer Geschwindigkeit von ca. 2 m/s davon fliegt. Die Tröpfchenvolumina, die sich mit diesem Verfahren erzielen lassen, liegen – in Abhängigkeit vom Düsendurchmesser (30 bis  $100 \mu\text{m}$ ) – im Bereich von ca. 30 bis 500 Picolitern. Dieser Prozess ist sehr präzise und es können Volumenstreuungen von einem Prozent und kleiner erzielt werden. Es lassen sich eine Reihe von unterschiedlichen Materialien – von wässrigen Lösungen bis zu funktionalen Polymeren – mit dem hier beschriebenen Mikrodispensersystem applizieren. In der Mikroproduktion hat sich insbesondere die Dosierung von Ölen und Klebstoffen etabliert.

Bei entsprechender Auslegung der Mikrodispenser können Materialien mit Viskositäten von ca. 100 mPas bei Raumtemperatur dosiert werden. Durch Integration eines Heizelements in die Mikrodispenser lassen sich Materialien mit Viskositäten von bis zu einigen tausend mPas applizieren, indem die Viskosität durch die erhöhte Temperatur verringert

wird. In *Abbildung 2* ist die typische Bauform eines Microdrop-Mikrodispensers dargestellt. Neben dem Tropfengenerator, bestehend aus Piezoaktuator und Glaskapillare sind zusätzlich ein Heizelement sowie ein Temperaturfühler integriert.

Innerhalb des Düsenbereiches der Mikrodispenser entstehen sehr hohe Scherraten bis  $10^5 \text{ s}^{-1}$  und größer. Diese hohen Scherraten haben großen Einfluss auf das Fließverhalten der Klebstoffe, denn in der Regel haben diese Materialien ein nicht-lineares, d. h. ein nicht-Newtonsches Fließverhalten. Je nach Zusammensetzung verhalten sich die Materialien viskoelastisch – bei kleinen Scherraten zeigen sie eine geringe Viskosität, bei größeren ein elastisches Verhalten oder sie sind thixotrop; die Materialien sind zäh bei kleinen Scherraten und dünnflüssig bei hohen Scherraten. Aufgrund der hohen Scherraten in den Mikrodispensern lässt sich das Tropfenbildungsverhalten nicht aus den Viskositätsdaten der Klebstoffe bestimmen, da diese Daten für deutlich kleinere Scherraten angegeben werden. Erst anhand

von empirischen Tests kann ermittelt werden, ob das jeweilige Material für die Dosierung mit dem Mikrodispenser geeignet ist.

Die Vorteile des Mikrodispenserverfahrens sollen hier anhand einiger Anwendungsbeispiele demonstriert werden. Es können feinste Tröpfchen im Durchmesser kleiner als  $100 \mu\text{m}$  berührungslos appliziert werden. Diese Vorteile eröffnen eine Reihe von produktspezifischen Möglichkeiten die benötigten Klebstoffmengen gezielt zu applizieren. So gelingt es, die kleinen Tröpfchen gezielt in kleinste Kavitäten, die kaum größer sind als die Durchmesser der Tröpfchen, einzubringen. Der Vorteil ist, dass Sacklöcher oder Spalte mit sehr kleinen Abmessungen definiert und ohne Lufteinschlüsse mit Klebstoff gefüllt werden können, indem die Kavitäten von unten aufgefüllt werden. Über die Zahl der abgegebenen Tröpfchen kann die Gesamtklebstoffmenge sehr präzise bestimmt werden, sodass die genau benötigte Menge aufgetragen wird. Anhand einer nachgeschal-

teten Qualitätskontrolle kann anschließend bestimmt werden, ob der Klebstoff vollständig in die Kavität eingebracht wurde. Sollte dieses nicht der Fall sein, würde zumindest ein Rest des Materials überstehen. Ein gutes Praxisbeispiel für eine solche Anwendung ist das Einkleben kleinerer Elemente wie Drähte oder Fäden in ein größeres Trägerbauteil.

Damit eine mechanisch stabile Klebeverbindung entsteht, müssen diese Elemente über einen längeren Abschnitt in den Träger eingesetzt und anschließend verklebt werden. Hierzu werden zur Aufnahme der dünnen Elemente Sacklochbohrungen mit entsprechender Tiefe in den Träger eingebracht. Die Aufgabe ist es nun, die benötigte Klebstoffmenge möglichst

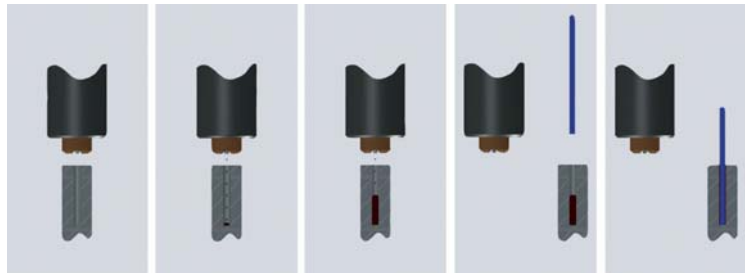


Abb. 3: Herstellung einer Klebstoffverbindung durch das Auffüllen einer Sacklochbohrung mit Einzeltröpfchen

genau in die Sacklochbohrungen einzubringen. Für makroskopische Verfahren, bei denen die benötigte Menge mit einem Mal aufgetragen wird, ist das eine echte Herausforderung. Die Gefahr ist groß, dass Lufteinschlüsse das Hineinfließen des Materials verhindern und der Klebstoff das Sackloch nicht vollständig ausfüllt. Mit dem Mikrodispenser ist es dagegen möglich, kleine Klebstofftröpfchen sukzessive einzubringen, um das Sackloch vom Boden her aufzufüllen (*Abb. 3*). Über die Zahl der Tröpfchen wird die eingebrachte Menge sehr genau bestimmt. In einem weiteren Prozessschritt kann das einzuklebende Element eingebracht werden, ohne dass es zu einem Klebstoffüberstand kommt.

Aus der Tatsache, dass es sich beim Mikrodispenser um ein berührungsfreies Verfahren handelt, bietet sich ein weiterer Vorteil für die Klebstoffdosierung. Insbesondere bei kleinen optischen Bauteilen, wie Laserdioden, Linsen, optische Fasern etc. ist es wichtig, dass diese sehr genau zueinander gefügt werden.

Über die Genauigkeit der Anordnung wird beispielsweise die Signalstärke oder die Präzision einer Messordnung bestimmt. Gerade bei kleinen Bauteilen oder hochintegrierten optischen Anordnungen ist es aus Platzgründen oder auch aus Kostengründen nicht möglich, eine mechanische Justagemöglichkeit in die Einheit zu integrieren. Es ist daher wünschenswert, die Bauteile im Fertigungsprozess, nach optimaler Justage zueinander, bleibend zu fixieren, in dem ein Klebstoff berührungsfrei in die Montagespalte eingebracht wird. Neben der sukzessiven Dosierung der Tropfen, wie bereits diskutiert, kommt hier die berührungsfreie Dosierung als weiterer Vorteil zum Tragen. Denn es treten durch diese Methode keine mechanischen Kräfte auf, die die Justage der Bauteile beeinflussen könnten. Für dieses Verfahren bieten sich idealerweise UV-härtende Materialien zur Fixierung an, da das Aushärten des Klebstoffes mit UV-Licht sehr kontrolliert gestartet werden kann. Es treten keine nachträglichen Bauteilverschiebungen durch thermische Ausdehnung oder Schrumpfungsprozesse auf, da die Bauteile für den Aushärtprozess nicht aufgeheizt werden müssen.

Auch für Zwei-Komponenten-Klebstoffe mit Epoxid- oder Acrylaten als Basismaterial ist das Mikrodispenser-Verfahren gut geeignet. Die beiden Komponenten werden getrennt aus zwei Mikrodispensern dosiert. Das benötigte Mischungsverhältnis zwischen Härter- und Harzkomponente wird über die Zahl der Tropfen bestimmt, sodass keine Tropfzeiten des Materials berücksichtigt werden müssen. Zudem fällt auch kein Abfall aus vorgemischten Komponenten an. Werden die beiden Mikrodispenser so justiert, dass die Tropfen der beiden Komponenten aufeinandertreffen, ist eine Vormischung des Materials gewährleistet.

Ein Beispiel aus der Praxis kommt aus der Lichtleitertechnik. Hier sollen Präzisionsdrehteile für einen optischen Faserstecker miteinander verklebt werden. Die ineinander zu fügenden Teile haben einen Außen- bzw. Innendurchmesser von ca. 2 mm. Die Durchmesser der beiden Zylinder sind sehr genau aufeinander abgestimmt, damit ein sehr präziser Klebespalt entsteht. Für die spätere Montage und Kalibrierung der optischen Lichtleitfaser ist der Klebespalt sehr eng toleriert. Daraus ergibt sich auch eine sehr genaue Anforderung an die Menge des Klebstoffes, die in den Spalt eingebracht werden muss.

Durch den Einsatz der Mikrodispenser konnte ein automatisierter Fügeprozess etabliert werden. Im ersten Schritt werden auf die Außenflächen des inneren Zylinders die beiden Klebstoffkomponenten in entsprechend benötigtem Tropfenverhältnis (Mischungsverhältnis) und definierter Gesamttropfenzahl (Gesamtmenge) aufgebracht. Im nächsten Schritt werden die beiden Zylinder ineinander geschoben. Zur Sicherstellung der optimalen Durchmischung der Härter- und Binderkomponenten und zur Herstellung eines möglichst homogenen Klebespalts werden die Komponenten, nachdem sie ineinander gesteckt sind, mechanisch gegeneinander verdreht. Anschließend werden die gefügten Teile zur thermischen Aushärtung des Klebstoffes in einen Wärmeofen gegeben.

Mit dem Mikrodispenser können der Klebstoffe auch sehr fein strukturiert auf beliebige Oberflächen aufgetragen werden. Es handelt sich hier um ein digitales bzw. additives Auftragsverfahren. Dabei lassen sich die Einzelvolumina an beliebiger Position auf eine Oberfläche setzen, indem Mikrodispenser und Substrat relativ zueinander bewegt werden. Wenn die frei fliegenden Tröpfchen so dicht nebeneinander auf eine Oberfläche platziert werden, dass diese ineinander fließen können, entstehen dünne Linien oder Klebstoffraupen. Die dabei entstehende Geometrie einer Linie (Schichtdicke und Breite) wird wesentlich durch das Fließverhalten des Klebstoffes auf dem Substrat und die Abstände zwischen den applizierten Tropfen bestimmt. Wenn die Abstände so gewählt sind, dass sich die Einzeltröpfchen auf dem Substrat gerade noch berühren und ineinander fließen, können sehr dünne Linien mit kleinen Schichtdicken erzielt werden. Je nach Materialpaarung bezüglich Klebstoff und Substrat lassen sich sehr kleine und dünne Linienbreiten von ca. 50 bis 100 µm mit Schichtdicken von wenigen Mikrometern realisieren. Bei geringem Abstand zwischen den Klebstofftropfen fließen diese stärker ineinander sodass sich deutlich dickere Klebstoffraupen bilden.

Natürlich ist es auch möglich, komplexere Muster als einfache Linien mit diesem digitalen Auftragsverfahren zu erzeugen. Beispielsweise können beliebige Konturen eines Substrates abgefahren werden. In *Abbildung 4* wird der Auftrag einer Kleberaube auf eine dünne Lautsprechermembran gezeigt. Der Durchmesser der Membran beträgt ca. 10 mm. Die benötigte Kleberaube wird kreisförmig entlang des

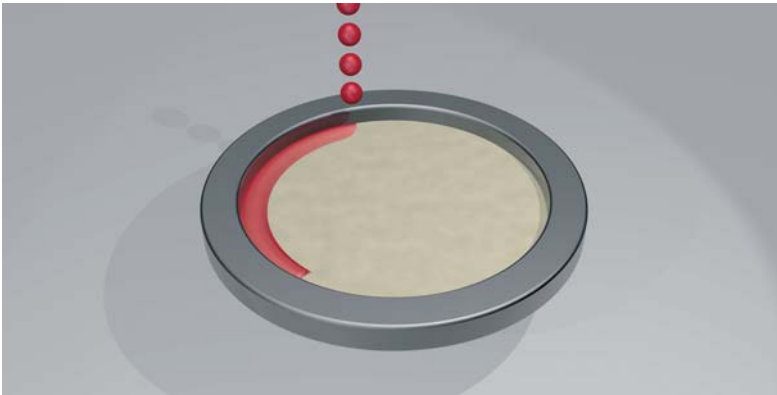


Abb. 4: Klebstoffauftrag auf eine dünne Lautsprechermembran

Außenringes aufgetragen. Die entstehende Linienbreite beträgt ca. 300 µm und die Dicke der Schicht ca. 20 µm. Das Ziel ist ein möglichst gleichmäßiger Klebstoffauftrag, damit das akustische Übertragungsverhalten nicht gestört wird. Da der Klebstoff berührungslos aufgetragen wird, ist auch gewährleistet, dass die empfindliche Membran nicht mechanisch verformt oder beschädigt wird. Nach dem Auftrag der Klebstoffraupe wird die Anregungsspule des Lautsprechersystems auf die Membran aufgesetzt und der Klebstoff – in diesem Fall mittels UV-Licht – ausgehärtet.

Das strukturierte Auftragen von Klebstoffen in Größenordnungen von einhundert Mikrometern und kleiner bietet weitere Möglichkeiten. So können Klebstoffpunkte, Bahnen oder andere Strukturen auf beliebige Oberflächen gebracht werden. Die entstehenden Strukturen sind sehr maßhaltig und reproduzierbar, sodass diese als Abstandshalter (sog. Spacer) oder zur elektrischen Isolation dienen können. Da der Mikrodispenser das Material berührungsfrei in einem Abstand von ca. 1 mm aufträgt, können auch unebene oder vorstrukturierte Oberflächen (z. B. Batteriefächer) beschichtet werden. Aufgrund der hohen Präzision und Formtreue der aufgetragenen Strukturen wird dieses Verfahren auch zum Aufbau von Mikrolinsen verwendet.

Die Tatsache, dass sich kleinste Strukturen und Klebepunkte von einhundert Mikrometern und kleiner erzielen lassen, macht das Verfahren auch für die Mikroelektronik interessant. Denn die Strukturgrößen der Klebstoffpunkte liegen in der gleichen Größenord-

nung wie Löt-Bumps für die Kontaktierung von Halbleiter-Chips. Mit einem geeigneten leitfähigen Klebstoff ließen sich damit sehr flexibel leitfähige Verbindungen zwischen Bauteilen und Substraten herstellen. So könnte man auf Masken oder Siebe zum Aufbringen des Materials verzichten, in dem die Klebstoffpunkte digital

aufgetragen werden. Die leitfähigen Klebstoffe sind typischerweise mit Silberpartikeln gefüllt um eine nennenswerte elektrische Leitfähigkeit herzustellen. Die verwendeten Partikelgrößen können bei diesen Klebstoffen bis zu 10 bis 30 µm betragen. Durch Sedimentation und Agglomeration in der Düse kommt es schnell dazu, dass die Partikel sich im Düsenbereich aufstauen und diese verstopfen.

Es gibt aber erste Ansätze, neue anisotrop elektrisch leitfähige Klebstoffe zu entwickeln, die für das Mikrodispenserverfahren optimiert sind. Das Fraunhofer-Institut IVAM hat einen ein solches Material im Rahmen eines gemeinsamen EU-Projektes (*'Nano-joining' G1RD-CT-202-00656*) entwickelt. Der Klebstoff basiert auf einer Acrylat-Epoxy-Matrix mit einer Silberpartikelbeimengung von 70 % Gewichtsanteil. Die Größenverteilung der Silberpartikel ist sehr eng definiert. Die mittlere Partikelgröße beträgt ca. 2,4 µm und die Größenverteilung ist so gewählt, dass die Partikel nicht größer als 4 µm sind. Mit einem Coating wird verhindert, dass die Silberpartikel versintern oder agglomerieren und in Suspension bleiben. Dadurch ist auch gewährleistet, dass die Sedimentation gering ist und sich nicht störend auf die Dosierung auswirkt. Das Material kann mit dem Mikrodispenserverfahren gut dosiert werden. Es konnten Punkte und Strukturen in Größenordnungen von ca. 100 µm erzielt werden (s. a. *Abb. 5*).

Nach dem Auftrag kann das Material durch Bestrahlung mit UV-Licht vorgehärtet werden, sodass die Substrate lagerfähig sind. In weiteren Prozessschritten werden die Bauteile auf die Substrate aufgesetzt und



die Klebstoffverbindungen thermisch ausgehärtet.

Mit diesem Verfahren wurden viele weitere Applikationen, insbesondere dort wo Kleinstmengen von wenigen einhundert Picolitern berührungsfrei und sehr präzise abgegeben werden müssen, realisiert. Häufig sind dies Anwendungen und Prozesse zur Fertigung innovativer Produkte, deren Details nicht veröffentlicht werden dürfen. Um dennoch die Präzision dieses Verfahren zu illustrieren, wird hier ein Verfahren zur Stent-Beschichtung, dass mit dem Mikrodispenserverfahren durchgeführt wurde und einem Klebstoffauftrag sehr ähnlich ist, beschrieben.

Stents sind zylindrische Drahtgeflechte, die man als medizintechnische Produkte zur Stabilisierung wiedereröffneter Blutgefäße operativ einsetzt. Damit es beim Patienten zu keinen Abstoßungsreaktionen gegenüber dem Stent kommt, muss dieser mit einem Polymer, in das ein Medikament eingebettet ist, beschichtet werden. Das Polymer hat die Aufgabe, das Medikament über einen längeren Zeitraum in

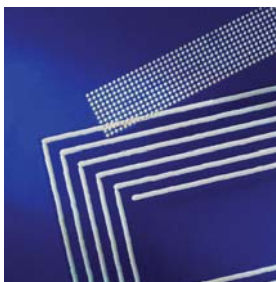


Abb. 5: Hier wurde ein elektrisch leitfähiger Klebstoff mit dem Mikrodispenser aufgetragen

die Blutgefäße abzugeben. Bei der Beschichtung ist es wichtig, dass diese nur auf der Außenfläche des Stents aufgebracht wird, um zu verhindern, dass das Medikament direkt in die Blutbahn gerät. Die Stents sind aufgrund ihrer Abmessungen (2-3 mm Durchmesser, 100 µm Wandstärke, 20-30 mm lang) sehr biegsam und flexibel. Beim Aufspannen dieser Elemente, kommt es daher zu leichten Verschiebungen zwischen den Drahtstegen, sodass die Bauteile

individuell in Bezug auf die Lage der einzelnen Drahtelemente beschichtet werden müssen. Aus diesem Grund wird die aktuelle Lage der einzelnen Drahtelemente vor dem eigentlichen Beschichtungsprozess optisch erfasst.

Aus diesen Daten wird anschließend berechnet, wo die einzelnen Tropfen mit dem Polymer/Medikamentengemisch auf den ca. 100 µm breiten Stegen aufgetragen werden müssen. Der Mikrodispenser wird längs der Zylinderachse über den rotierenden Stent gefahren und die Tropfen werden genau zu dem Zeitpunkt ausgelöst, wenn sich das jeweilige Drahtelement unterhalb der Düse des Mikrodispensers hindurch bewegt. Das Ergebnis ist in *Abbildung 6* dargestellt. Die Einzeltropfen auf der rechten Hälfte des Stents, hier grün eingefärbt, sind deutlich auf den ca. 100 µm breiten Drahtstegen des Stents erkennbar.

Anhand der genannten Beispiele ist ersichtlich, wie vielseitig das Mikrodispenserverfahren für den Klebstoffauftrag bei der Fertigung miniaturisierter Produkte einsetzbar ist. Dank der Entwicklung neuer Materialien erweitert sich das Anwendungspotential zunehmend. Insbesondere für die Mikrooptik- und -mechanik, Medizintechnik und Elektronik bietet das Mikrodispenserverfahren viele innovative Lösungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik.

#### Kontakt:

Dipl.-Phys. Wilhelm Meyer, Microdrop Technologies GmbH,  
Mühlenweg 143, 22844 Norderstedt  
[www.microdrop.de](http://www.microdrop.de)

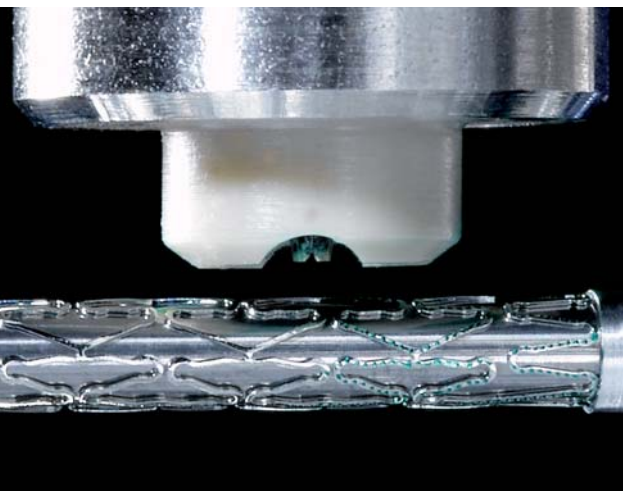


Abb. 6: Beschichteter Stent mit Tropfen und Mikrodispenser