

R2R-Laserbearbeitung flexibler Substrate

Dünn, leicht und flexibel – diese Materialeigenschaften ermöglichen heutzutage vielfältige Anwendungen flexibler Substrate in der Unterhaltungselektronik, der Medizintechnik, der Fotovoltaik oder der Beleuchtungstechnik. Für die **MASSENPDUKTION** werden jedoch performante Laserverfahren und Produktionsanlagen benötigt.

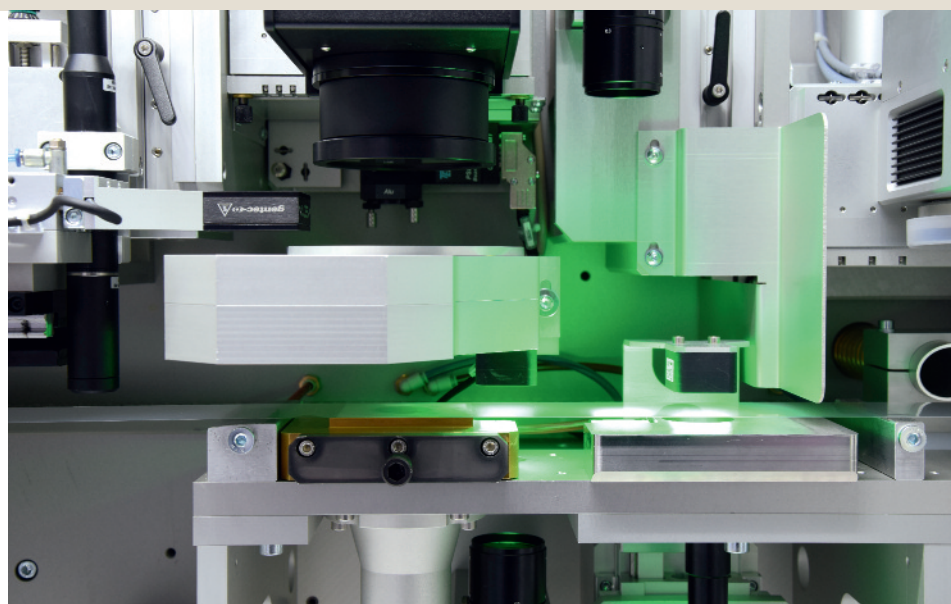


Bild 1. Der Einsatz von Laserquellen mit kurzen oder ultrakurzen Pulsen garantiert eine äußerst selektive Bearbeitung von Materialstapeln und Dünnschichtsystemen

MANDY GEBHARDT, CHRISTIAN SCHOLZ UND MAURICE CLAIR

Neben der Herstellung von Dünnschicht-Bau-elementen auf starren Substraten nimmt die Herstellung flexibler Substrate im Rolle-zu-Rolle-Verfahren (R2R) stetig zu. Die Realisierung einer Mikrobearbeitungstechnologie in einem R2R-System bedeutet jedoch, die Anforderungen von Prozesslösungen für starre Substrate auf einen R2R-Handling-Ansatz für flexible Substrate zu übertragen. Da konventionelle R2R-Systeme ursprünglich für Massenproduktionsverfahren wie den Offsetdruck entwickelt wurden, sind die Genauigkeitsanforderungen in den meisten Fällen deutlich geringer als bei der Laserbearbeitung. Darüber hinaus unterscheidet sich das Substratmaterial hinsichtlich reduzierter mechanischer und thermischer Stabilität.

Kombination von Lasermikro- und R2R-Bearbeitung

Im Gegensatz zu den achsenbasierten Systemen, bei denen ein einzelnes Werkstück auf einer entsprechenden Halterung fixiert wird, müssen R2R-

Systeme das Bahnmaterial entweder kontinuierlich oder schrittweise transportieren. Das Material darf dabei nicht durch eine zu hohe permanente Bahnspannung oder einen spontanen Ruck gedehnt werden.

Performante R2R-Systeme sind eine Kombination aus einem dedizierten R2R-Handling und einem spezifischen Laserbearbeitungsprozess. Da der Laserprozess stark von der jeweiligen Aufgabenstellung und dem Material abhängt, ist es äußerst wichtig, dass das R2R-System eine nahtlose Integration der Laserquellen und ihrer jeweiligen Strahlengänge bietet.

Die folgenden Beispiele zeigen ein Spektrum möglicher Anwendungen. Excimer-Laser sind beispielsweise für die Dünnschichtablation oder das Laserannealing bestens geeignet. Sie werden zumeist dann eingesetzt, wenn eine homogene Flächenbelichtung bei gleichzeitig geringer Absorptionstiefe erforderlich ist.

Nanosekundenlaser werden ebenfalls zum Annealing von Dünnschichtsystemen oder zum Schneiden von Metallsubstraten eingesetzt. Aufgrund der verfügbaren Laserleistung werden Nanosekundenlaser häufig verwendet, um dickere Schichten in kurzer Zeit abzutragen. Die Ablationsqualität kann dabei aufgrund der oftmals höheren thermischen Belastung durch eine längere Pulsdauer beeinträchtigt werden.

> KONTAKT

HERSTELLER
3D-Micromac AG
 D-09126 Chemnitz
 Tel. +49 371 40043-222
 sales@3d-micromac.com
www.3d-micromac.de

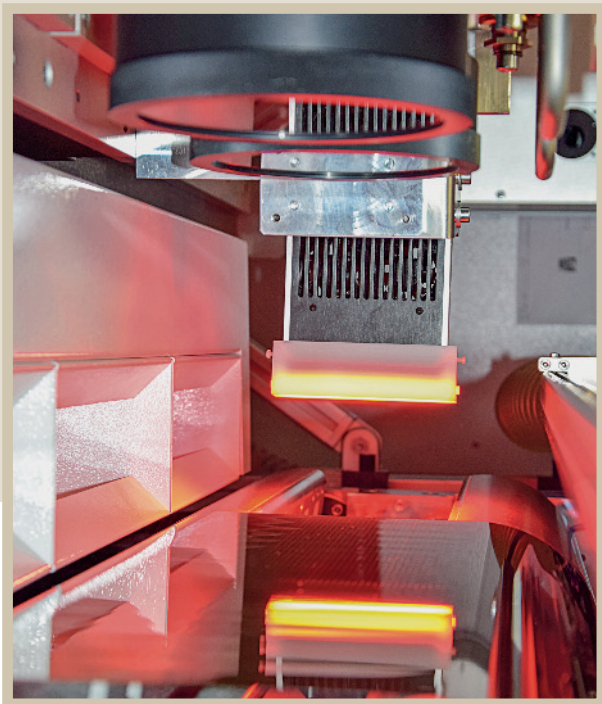


Bild 2. Laserbearbeitung flexibler Solarzellen im Rolle-zu-Rolle-(R2R-)Prozess zur monolithischen Verschaltung zu seriell verschalteten Submodulen in den Prozessschritten P1, P2 und P3

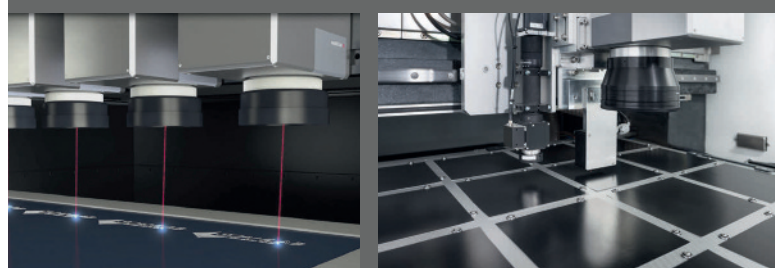
Ultrakurzpuls-Laser (UKP) werden vorwiegend zum Strukturieren oder Schneiden von Polymer- und Dünnschichtsubstraten verwendet (**Bild 1**). Der Vorteil von UKP-Lasern gegenüber Nanosekundenlasern liegt im deutlich geringeren Wärmeeintrag in das Material. Dies garantiert eine wesentlich höhere Selektivität bei der Bearbeitung von dünnsten Schichtstacks, da fast die gesamte Pulsenergie für das Verdampfen und Abtragen des Materials verwendet wird. Das Folien-substrat wird nicht beschädigt, da der Prozess gut kontrollierbar ist. Kleinste Aufwölbungen im Bereich von einigen 10 nm beeinträchtigen das Prozessergebnis in der Regel nicht. Das Prozessfenster bei UKP-Lasern ist zumeist sehr groß, um einen stabilen Abtragsprozess zu erreichen. Das ist für die R2R-Laserstrukturierung von besonderer Bedeutung.

R2R-Bearbeitung flexibler Dünnschicht-Solarzellen

Eine Anwendung, die aufgrund des Ausbaus von erneuerbarer Energie, von Rohstoffknappheit und dem Bedürfnis nach mehr Flexibilität, Leichtigkeit und größeren Designvarianten in der Architektur derzeit einen großen Auftrieb erlebt, sind Dünnschicht-Solarzellen. Obwohl damit keine mit Silizium-Solarzellen vergleichbaren Wirkungsgrade erreicht werden, eröffnet die Gewichtsreduzierung neue Möglichkeiten und Anwendungsfälle für diese Art von Fotovoltaik. Innovative Prozesse mit UKP-Lasern ermöglichen die monolithische Verbindung von Solarzellen zu seriell verbundenen Submodulen. Das Laserverfahren ermöglicht dabei die digitale Anpassung ▶



**Think Big -
Scan Large**



XL SCAN: großflächige Laser-Mikrobearbeitung

- Synchrone Ansteuerung von Scan-Kopf und XY-Tisch mit höchstmöglicher Genauigkeit
- Hoher Durchsatz dank intelligenter Ansteuerung und paralleler Bearbeitung
- Einzigartige Pfadaufteilung ermöglicht einfache Laserjob-Simulation

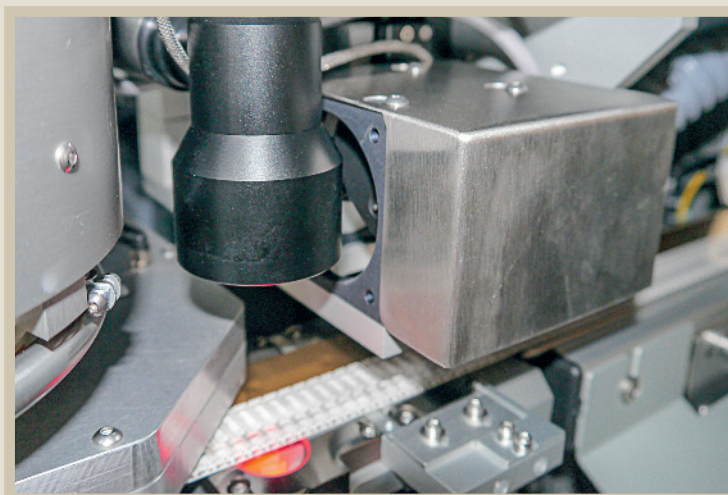


Bild 3. Ein R2R-Bearbeitungsraum für die Bearbeitung von flexiblen Sensoren mittels Excimer-Lasersystem

der Zellabmessungen und der elektrischen Leistung von Submodulen. Somit können individuelle Anforderungen unter Berücksichtigung der Ästhetik der Zellen erfüllt werden.

Am Beispiel von flexiblen Solarzellen zeigt sich jedoch, dass ähnliche Endprodukte komplett unterschiedliche Lösungen für die Umsetzung der Laserprozesse erfordern können. Abhängig vom grundsätzlichen Design und dem Prozessablauf bei der Herstellung hat 3D-Micromac, Chemnitz, zwei unterschiedliche Anlagentypen zur Herstellung von Dünnschicht-Solarzellen entwickelt.

Step-and-Repeat- oder kontinuierlicher Wickel-Modus

Der erste Maschinentyp arbeitet in einem Step-and-Repeat-Modus. Die Bahn wird vorwärts bewegt und dann in ihrer Position fixiert. Kameras erkennen entweder die Lasermarkierungen aus dem vorherigen Prozessschritt oder Marker, die bereits früher in der Produktion implementiert wurden, und richten die folgenden Prozess-Scribes daran aus. Eine weitere Kamera führt in der Zwischenzeit eine Qualitätskontrolle der bisherigen Laser-Scribes hinsichtlich Breite, Abstand und anderer Eigenschaften durch. Der Laser-Scribe selbst wird mittels Laserquelle und Galvanometer-Scanner durchgeführt, der auf einer Querachse zur Bahn bewegt wird. Komplexe Algorithmen optimieren das Zusammenspiel zwischen Scanner und Achse, um den maximalen Durchsatz für jedes gegebene Solarmodul-Layout zu erreichen. Dieser Ansatz ermöglicht eine sehr hohe Positioniergenauigkeit der Laser-Scribes von weniger als $\pm 25 \mu\text{m}$ und eine Produktivität von circa $250\,000 \text{ m}^2/\text{a}$.

Der zweite Maschinentyp arbeitet im kontinuierlichen Wickelmodus mit Prozessbahngeschwindigkeiten von bis zu 3 m/min . Dieses System wurde für maximalen Durchsatz entwickelt. Es werden mehrere Kamerasysteme zur Ausrichtung und Qualitätskontrolle verwendet, die aufgrund des kontinuierlichen Transports vor und nach dem eigentlichen Laserprozess angeordnet sind. Eine Querachse zur

Adressierung der gesamten Bahnbreite wäre mit diesem Ansatz nicht kompatibel. Daher werden mehrere Laserquellen, Strahlengänge und Scannersysteme installiert, um die gesamte Rollenbreite abzudecken. Da dies zu einem recht komplexen Prozessmodul führt, reduziert sich die tatsächliche Positionsgenauigkeit auf $\pm 75 \mu\text{m}$. Jedoch ermöglicht dieses System Produktionskapazitäten von über $1\,500\,000 \text{ m}^2/\text{a}$. Je nach zugrunde liegender Abscheidungstechnologie wurde diese Lösung bisher bereits in Atmosphäre und Vakuum realisiert (**Bild 2**).

Laser Annealing im Rolle-zu-Rolle-Verfahren

Eine zunehmend nachgefragte Technologie ist das lokale oder tiefenselektive Tempern dünner Schichten. Während typische Anwendungen wie das laserbasierte Pinning von Magnetfeldern, die ohmsche Kontaktformung oder die Dopant Activation typischerweise auf waferbasierten Substraten durchgeführt werden, wurde eine erste Anlage zum Laser Annealing auf flexiblen Metallsubstraten realisiert.

Der anfängliche Prozess wurde anhand eines bogenbasierten Prozessablaufs qualifiziert. Dabei galt es, den Gesamtdurchsatz zu verbessern. Um den erforderlichen Durchsatz zu realisieren, wurden zwei Hochleistungs-Nanosekundenlaserquellen integriert. Deren Laserstrahl wurde zu zwei 75 mm langen und weniger als $10 \mu\text{m}$ breiten Linienstrahlen geformt, während die Gesamthomogenität über dem Schwellenwert von 90 Prozent gehalten wurde – dem typischerweise für gute Annealing-Ergebnisse erforderlichen Wert. Dies führte jedoch zu einer sehr geringen Tiefenschärfe, die möglicherweise die Prozessstabilität hätte reduzieren können. Um dies zu kompensieren, wurde eine präzise Höhenmessung des Substrats in Kombination mit einer kontinuierlichen Anpassung der Fokusebene während der Bewegung der Laserstrahlen über das Substrat implementiert.

Da Zuverlässigkeit und Ertrag für den Kunden von höchster Bedeutung waren, mussten sowohl die Laserparameter als auch die Strahlparameter ständig

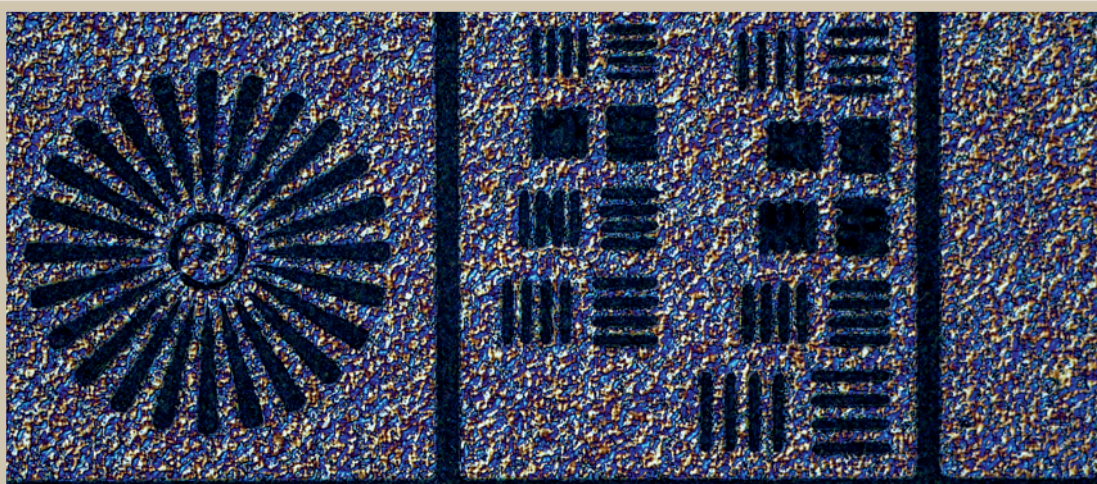


Bild 4. Ein Referenzmuster für die Sensorherstellung, welches mit einem Excimer-Laser in einem R2R-Prozess hergestellt wurde

überwacht werden. Zur Erfassung von Strahlparametern wie Linienbreite, Energieverteilung und Flankensteilheit wurde ein kamerabasierter Strahlanalysator integriert. Die Kamera lieferte nicht nur zuverlässige Daten über den aktuellen Zustand des Laserstrahls, sondern auch Langzeitdaten zur Überwachung des Zustands der Strahlformungsoptik.

Das Rolle-zu-Rolle-Bahnhandling war der zweite Ansatzpunkt, um den Durchsatz entsprechend der Kundenanforderung zu erhöhen. Da der Linienstrahl quer zur Transportrichtung der Bahn über das Substrat bewegt wurde, musste dieses in sehr präzisen Schritten transportiert werden. Nur so konnte eine vollständig getemperte Oberfläche ohne Lücken erzielt werden. Eine weitere wichtige Anforderung war, dass das Substrat zu keiner Zeit auf der siliziumbeschichteten Oberseite berührt werden darf. Um höchste Präzision und eine Positioniergenauigkeit von unter $10\ \mu\text{m}$ zu erreichen, wurde deshalb für den Bahntransport eine große angetriebene Vakuumpwalze verwendet.

Laserablation für die Produktion von Sensoren

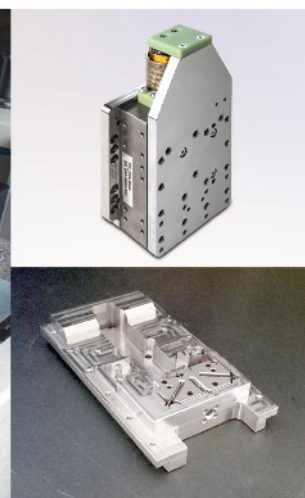
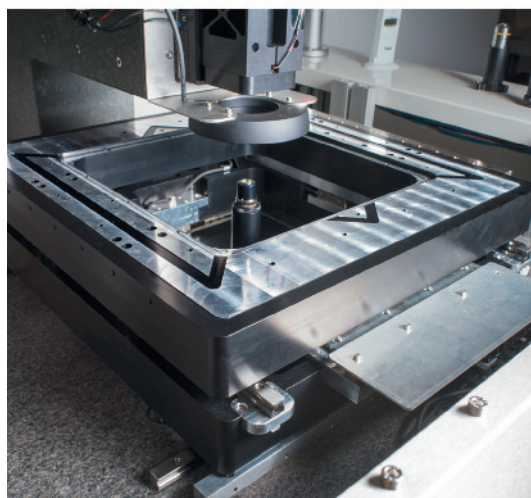
Eine weitere Anwendung für die Rolle-zu-Rolle-Bearbeitung ist das Abtragen von Dünnschichtsystemen für die Sensorfertigung mittels Laser. Trotz der Beschränkung auf sehr schmale Bahnbreiten unter $50\ \text{mm}$ kann mit einem Rolle-zu-Rolle-Prozess allein durch sehr hohe Bahngeschwindigkeiten von bis zu $50\ \text{m/min}$ ein Jahresdurchsatz von über $500\ 000\ \text{m}^2$ erreicht werden.

Die Verwendung der richtigen Laserquelle spielt dabei die entscheidende Rolle. Die Wahl fiel hierbei auf ein Excimer-Lasersystem, welches in der Lage ist, dünne Schichten unter $100\ \text{nm}$ mit einem einzigen Laserpuls auf einer vergleichsweise großen Fläche von circa $45\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ abzutragen. Ein positiver Nebeneffekt ist, dass aufgrund der Ablationsmechanismen das Metall selektiv von einem Polymersubstrat abgetragen wird, ohne es zu beschädigen. Die Kombination einer Excimer-Laserquelle mit einem

Maskenprojektionssystem ist hierbei in der Lage, Strukturgrößen bis zu $5\ \mu\text{m}$ zu erzielen. Bei Repetitionsraten bis zu $150\ \text{Hz}$ können so 150 Sensoren pro Sekunde hergestellt werden. Die hohe Bahngeschwindigkeit bedeutet aber nicht nur eine hohe Kosteneffizienz, sondern birgt auch das Risiko, dass im Falle eines Fehlers in kurzer Zeit viel Ausschuss entsteht. Deshalb wurde ein Kamerasystem installiert, welches eine 100-prozentige Qualitätskontrolle der produzierten Sensoren ermöglicht – ebenfalls mit einer Auflösung im Bereich von $5\ \mu\text{m}$ (Bilder 3 und 4).



Mecartex⁺
CREATIVITY MEETS HIGH PRECISION



THE ART OF PRECISION

Our expertise in design and manufacturing high precision product and flexures devices at your service

Via Industria 3 · 6933 Muzzano · Switzerland · mecartex.ch



Bild 5. Das hochpräzise ›microFlex‹-Lasersystem von 3D-Micromac ist als industrielle R2R Produktionsanlage in verschiedenen Konfigurationen erhältlich

Forderungen an laserbasierte R2R-Produktionsanlagen

Der Hauptaspekt beim Design der neuen R2R-Plattformen von 3D-Micromac war der hochpräzise Transport des flexiblen Bahnmaterials, damit der Laserprozess die erforderliche Genauigkeit erreichen kann. Für schmale Bahnbreiten bis 520 mm wurde eine Lösung durch den Einsatz einer direkt angetriebenen, präzisionsgefertigten Hauptwalze mit großem Durchmesser entwickelt. Diese Walze zeichnet sich durch eine perfekt bearbeitete Oberfläche mit Rundlaufabweichungen unter $10\ \mu\text{m}$ aus. Um eine genaue Beschleunigung, Verzögerung und Positionierung der Antriebsrolle zu erreichen, wurde ein hochintegrierter Torque-Motor als Hauptantrieb gewählt. Um ein eventuelles Ruckeln der Bahn beim Beschleunigen zu minimieren und auch geringe Bahnspannungen zwischen 15 und 90 N zu ermöglichen, wurden reibungsreduzierte Tänzerwalzen eingebaut. Durch die Kombination all dieser Merkmale mit einer Steuerung, die die Fähigkeiten der Komponenten voll ausnutzt, konnte eine Bahntransportgenauigkeit von weniger als $2\ \mu\text{m}$ bei einer Bahngeschwindigkeit von 6 m/min erreicht werden. Das bedeutet, dass das Substrat zu keiner Zeit mehr als $2\ \mu\text{m}$ von seiner erwarteten Position entfernt ist und somit eine hervorragende Basis für hochpräzise Laserprozesse bietet.

Für größere Bahnen bis 1500 mm wurden zwei weitere Plattformen entwickelt, die sich hauptsächlich auf die Herausforderungen der größeren Bahnbreite konzentrieren. Das sind zum einen das Gewicht der Substratrollen und zum anderen die Welligkeit des Materials. Um den Einfluss der Welligkeit des Materials zu reduzieren, wurden verschiedene Ansätze getestet, die je nach Anforderungen des Laserprozesses zur Verfügung gestellt werden. Typische Lösungen sind Streichwalzen in Kombination mit Luftlagern oder Vakuumeinheiten. So kann eine Querspannung erzielt werden, welche das Substrat glättet. Hinzu kommt eine präzise Bahnspannungsregelung, typischerweise mit mindestens zwei einzeln

geregelten Spannungszonen im Bereich zwischen 30 und 1000 N – je nach Substrat und dessen Eigenschaften.

Applikationsspezifische und skalierbare Anlagen

Die Rolle-zu-Rolle-Laserbearbeitung garantiert einen hohen Durchsatz und große Bearbeitungsflächen für die Herstellung flexibler Bauteile. Um dabei eine Kostenreduktion zu erreichen, muss die Maschinenteknik zuverlässig, ausgereift und skalierbar sein. 3D-Micromac entwickelt und fertigt seit mehr als 15 Jahren die ›microFlex‹-Lasersysteme und verfügt damit über eine Vielzahl von Erfahrungen und Referenzen für die Zusammenführung hochpräziser Laserprozesse mit einer Rolle-zu-Rolle-Massenproduktion. Die Integration verschiedener Laserquellen und Wellenlängen sowie verschiedener optischer Set-ups ermöglicht die Bearbeitung von Dünnschichtsystemen auf unterschiedlichen Substraten, wie Metallfolien, Polymer und Papier mit Substratbreiten von bis zu 1500 mm.

Darüber hinaus bietet 3D-Micromac in enger Zusammenarbeit mit dem Kunden die Entwicklung und Optimierung von Rolle-zu-Rolle-Laserprozessen und -maschinen von der ersten Idee bis zur Serienreife (**Bild 5**). Alle Phasen der Prozess- und Technologieentwicklung, von den Vorversuchen über die Machbarkeit und die Entwicklung von (Funktions-)Prototypen bis hin zur Auftragsfertigung, können im 3D-Micromac-Applikationslabor durchgeführt werden. ■ MI110722

AUTOREN

MANDY GEBHARDT ist Teamleiterin Marketing & PR bei 3D-Micromac in Chemnitz; gebhardt@3d-micromac.com

CHRISTIAN SCHOLZ ist Product Specialist microFLEX bei 3D-Micromac; scholz@3d-micromac.com

MAURICE CLAIR ist Abteilungsleiter Process Development im selben Unternehmen; clair@3d-micromac.com



MikroSystemTechnik KONGRESS 2021

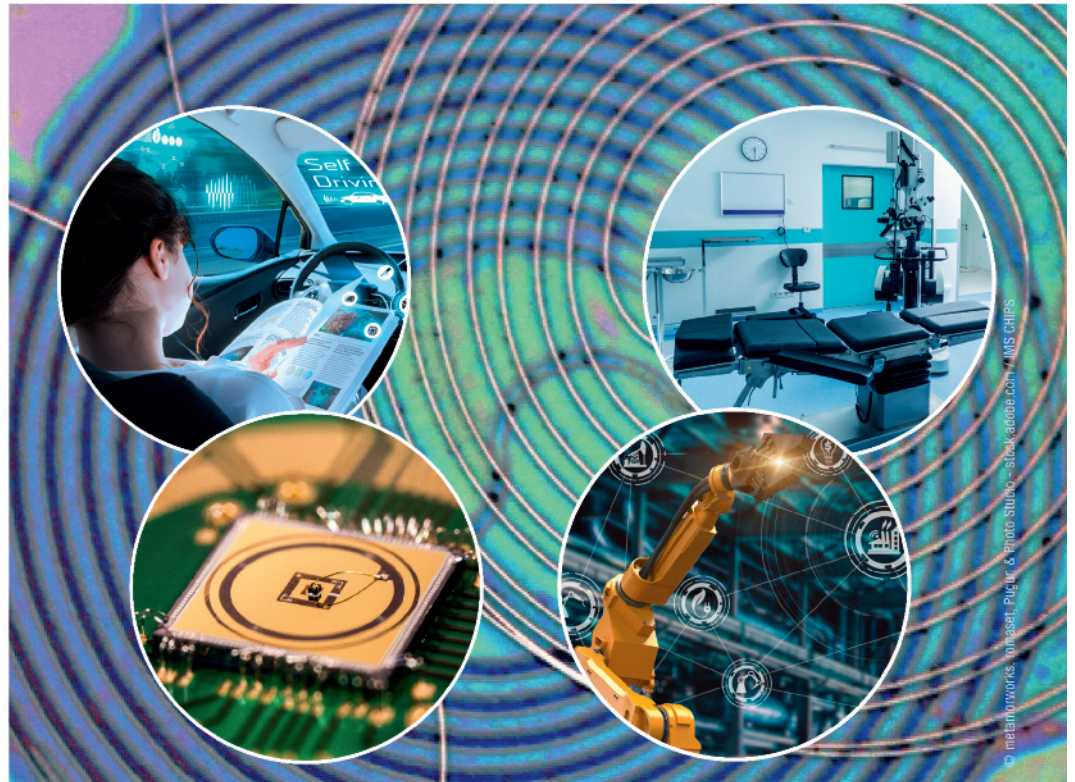
Mikroelektronik | Mikrosystemtechnik und ihre Anwendungen –
Innovative Produkte für zukunftsfähige Märkte

Forum am Schlosspark, Stuttgart-Ludwigsburg #MST2021
8. – 10. November 2021
www.mikrosystemtechnik-kongress.de

Elektronikbranche trifft sich in Ludwigsburg beim MikroSystemTechnik Kongress von BMBF und VDE

Sie erwartet ein hochkarätiges
Programm mit

- 24 wissenschaftlichen Sessions
- mehr als 100 Vorträgen
- rund 150 Posterbeiträgen und
- 40 Ausstellern aus Forschung
und Industrie
- die neuesten Trends aus den
Bereichen
MEMS, Mikrosystemtechnik,
Sensoren, Aktoren und der
Mikro-Nano-Integration,
KMU, der europäischen
Zusammenarbeit
sowie zur Förderlandschaft



Treffen Sie die Who-is-Who der Mikroelektronik beim MikroSystemTechnik-Kongress

- 500 nationale Partner und Neukunden aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft
- 45 % führende Vertreter aus der Forschung und Wissenschaft
- 30 % Branchenvertreter aus Industrie 4.0, Energie, Mobilität, Health, Living
- 25 % Nachwuchskräfte und Studenten