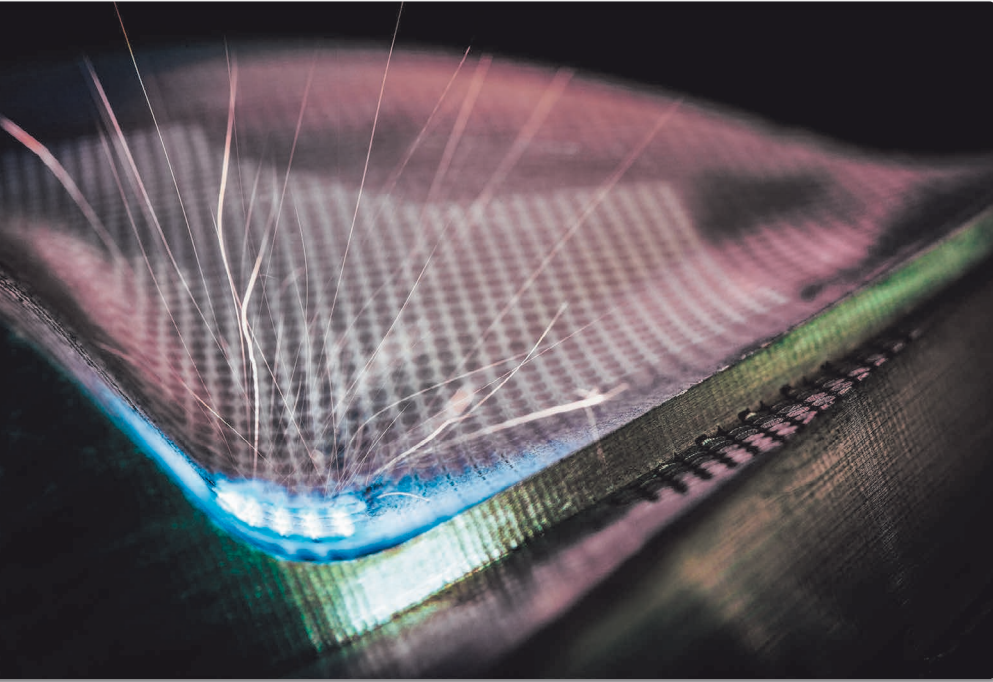


Laserverfahren für die anwendungsspezifische Oberflächengestaltung

Smart Surface Technologies

3D-Texturierung von Freiformflächen mit Ultrakurzpuls-Laser: Der UKP-Laser erzeugt hochpräzise Mikro- und Nanostrukturen auch auf komplex gekrümmten Geometrien.



So lassen sich funktionale Oberflächen mit definierten tribologischen, optischen oder benetzungsrelevanten Eigenschaften gezielt einstellen.

Background

Oberflächen bestimmen in vielen technischen Systemen maßgeblich Funktion, Lebensdauer und Effizienz. Tribologische Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit, Benetzbarkeit, optische Funktionalität oder biologische Wechselwirkungen hängen in der Regel nicht allein vom Grundwerkstoff ab, sondern stark von der Ausgestaltung der Oberfläche. Die Oberflächentechnik hat sich daher in den vergangenen Jahrzehnten von einer schützenden oder dekorativen Disziplin zu einem integralen Bestandteil der funktionalen Produktgestaltung entwickelt.

Laserbearbeitung von Oberflächen

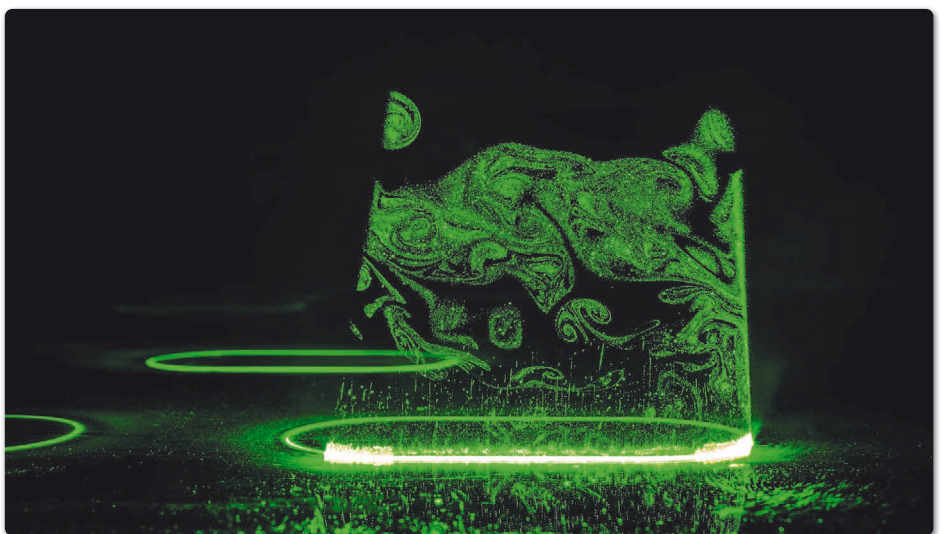
Smart Surfaces sind funktionalisierte Oberflächen, deren Eigenschaften gezielt über chemische oder physikalische Anpassung eingestellt werden, sodass sie definierte Zusatzfunktionen übernehmen oder adaptiv auf äußere Einflüsse reagieren. Laserbasierte Verfahren ermöglichen es, Oberflächen berührungslos,

lokal begrenzt und hochpräzise zu modifizieren, ohne den gesamten Bauteilkörper zu beeinflussen. Darüber hinaus lassen sich Laserprozesse in hohem Maße automatisieren sowie digital überwachen, steuern und regeln und eignen sich damit für datenbasierte Fertigungskonzepte.

Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen entwickelt seit vielen Jahren laserbasierte Verfahren zur Strukturierung, Funktionalisierung, Reinigung, Politur, Beschichtung und Wärmebehandlung von Oberflächen. Im Mittelpunkt stehen dabei nicht nur einzelne Prozesse, sondern auch deren systematische Kombination und industrielle Skalierbarkeit.

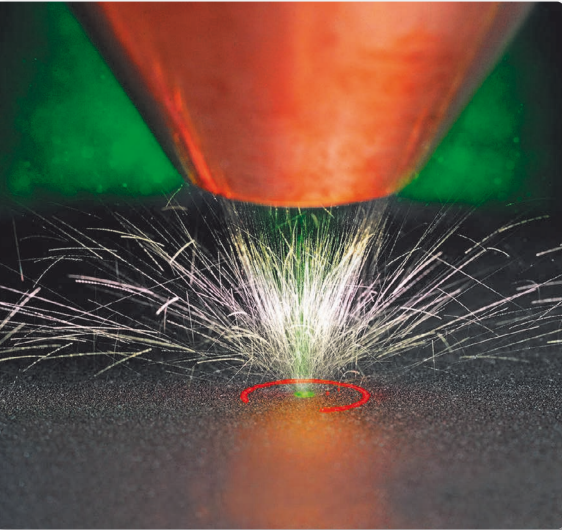
Smarte Laserverfahren

Moderne Laserverfahren werden zunehmend durch digitale Systeme überwacht, geregelt und gesteuert. Sensorik und bildgebende Verfahren ermöglichen eine In-situ-Prozessüberwachung, wodurch Abweichungen früh erkannt und Korrekturen in Echtzeit eingeleitet werden können. Typische Methoden sind u.a. die pyrometrische Temperaturmessung, kamerabasierte Schmelzbad- und Strukturüberwachung sowie spektrale Sensoren zur Prozessanalyse. Die Integration von maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz erweitert die Möglichkeiten der Prozessoptimierung. So lassen sich Laserparameter adaptiv an wechselnde Bedingungen anpassen und sichern konsistente, reproduzierbare Oberflächenergebnisse.



Ultrakurzpuls-Laser strukturieren Dünnglas nahezu ohne thermische Beeinflussung und erzeugen definierte, reproduzierbare Abtragsgeometrien. Solche präzise eingestellten Oberflächen bilden die Grundlage für funktionale Glasoberflächen.

Autor:
Dr. Christian Vedder
Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT
www.ilt.fraunhofer.de



Koaxiale Prozessüberwachung beim Laserauftrag: Die Bearbeitungslaserstrahlung (grün) richtet den Pulverfokus aus, während die Messstrahlung des Systems »bd-1« (rot) Position und Prozesszone erfasst. Die Überlagerung beider Strahlen ermöglicht eine präzise Ausrichtung, stabile Prozessführung und reproduzierbare Beschichtungsergebnisse.

Künstliche Intelligenz in der Verfahrensentwicklung

Die Verfahrensentwicklung beim Laserpolieren metallischer Oberflächen beruht bislang stark auf Expertenwissen und zeitaufwändigen Experimenten, insbesondere bei wechselnden Materialien oder variierender Anfangsrauheit, da prozessbedingte Oberflächenstrukturen die erreichbare Minimalrauheit begrenzen.

Zur Automatisierung wird ein Weißlichtinterferometer in eine industrielle Laserpolieranlage integriert und über eine Workflow-Steuerungssoftware mit Laser, Optik und Messtechnik gekoppelt. So entsteht ein geschlossener Prozess aus Polieren und In-situ-Topographiemessung.

Die Messdaten werden mittels KI-basierter Algorithmen automatisch ausgewertet und zur Bewertung geeigneter Prozessparameter genutzt. Auf Basis von mehr als 2500 Topographiefotos wird das trainierte Klassifikationsmodell hohe Erkennungsraten und reduziert den Aufwand für die Prozessparameterentwicklung um bis zu 50%. Damit rückt ein datengetriebener Laserprozess einen deutlichen Schritt näher.

Optische Neuronale Netze unterstützen die Verteilung von Photonen

In der Laserstrukturierung ist das „optische Stempeln“ ein Verfahren, bei dem ein fokussierter Laserstrahl nicht entlang wiederkehrender Strukturen scannend über die Oberfläche geführt, sondern mittels optischer Komponenten in ein frei definierbares Intensitäts- und Strukturprofil überführt und wie ein Stempel auf die Oberfläche übertragen wird.

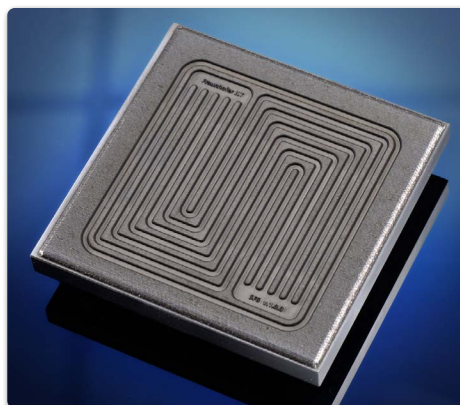
Die Realisierung erfolgt mit pixelgenauer Präzision mittels phasenmodulierender LCoS-SLMs, deren Phasenmasken unter anderem mithilfe optischer neuronaler Netze berechnet werden. So lassen sich nahezu beliebige, anwendungsspezifische Leistungsdichteverteilungen sowie Laserstrahlgeometrien softwarebasiert und mit hoher Flexibilität generieren.

In Kombination mit Ultrakurzpuls-Lasern (UKP-Laser) ermöglicht dies einen hochpräzisen, thermisch nahezu unbeeinflussten Materialabtrag und damit deterministische Mikrostrukturen mit reproduzierbarer Geometrie bei deutlich verkürzten Bearbeitungszeiten. Anwendungen reichen von der schnellen Mikrostrukturierung von Prägewalzen in der Flachstahlproduktion bis zum schnellen, selektiven Abtrag dünner Metallschichten von Low-E-Gläsern zur Verbesserung der Mobilfunkdurchlässigkeit in Zügen.

Smarte Produktion durch Laser-Prozessketten

Das Potential und die Vielseitigkeit von Laserprozessen zeigen sich sehr gut in durchgängigen Prozessketten. Bei der Herstellung von Bauteilen für Niedertemperatur-Brennstoffzellen lassen sich gleich mehrere Arbeitsschritte mit einem Werkzeug abdecken. Das Extreme Hochgeschwindigkeits-Laserauftragschweißen (EHLA) erzeugt unter Zufuhr eines geeigneten Pulvers Hartmetallbeschichtungen auf Prägewerkzeugen für die Abformung metallischer Halbplatten (Bipolarplatten). Anschließend besäumt ein Laser diese Platten und bringt Funktionslöcher ein.

Mittels UKP-Laserstrahlung werden Mikrostrukturen auf den metallischen Oberflächen erzeugt, beispielsweise um im späteren Betrieb Wasser aus der Prozesszone abzuleiten oder den elektrischen Kontaktwiderstand zu senken.



Demonstrator der EHLA-Technologie zur Herstellung strukturierter Werkzeuge für Bipolarplatten: Additive Fertigung und nachfolgende Bearbeitung erzeugen präzise, funktionale Oberflächen mit definierten Mikrostrukturen. Solche laserbasiert erzeugten Strukturen steuern etwa Kontaktwiderstand, Medienführung und Korrosionsverhalten.



Laserbasierte Optikkfertigung am Fraunhofer ILT: Die geschliffene Asphäre (hinten) streut Licht durch verbleibende Oberflächenrauheit, während die gleiche Optik nach dem Laserpolieren (vorn) eine glatte, optisch hochwertige Oberfläche zeigt. Das Verfahren ermöglicht präzise geformte, anwendungsspezifische Optiken aus Quarzglas und unterstützt durchgängige Prozessketten von der Formgebung bis zur finalen Oberflächenqualität.

Eine anschließende Lasermodifikation erzeugt aus zuvor aufgetragenen Präkursorsschichten antikorrosive, elektrisch leitfähige Schutzschichten. Laserschweißen verbindet die beiden Metallhalbplatten zur Bipolarplatte oder die Compound-Bipolarplatte mit der Dichtung. Multi-strahlverfahren und schnellablenkende Scanner erhöhen am Fraunhofer ILT die Produktivität und nutzen die Leistung des derzeit stärksten UKP-Lasers für die Strukturierung und Entschichtung funktionaler Bauteile.

Temperaturgeregelte Laserverfahren reduzieren die Trocknungszeit von nasschemisch aufgetragenen Membrankatalysatorschichten von Minuten auf Sekunden. Weitere Arbeiten zielen auf die Erzeugung mikro- und nanoskopischer Oberflächenporositäten für hochaktive Oberflächen für die Wasserstoffelektrolyse.

Laserbasierte Optikfertigung

Die digitale laserbasierte Optikfertigung führt die Idee der laserbasierten Fertigungsketten konsequent weiter. Nachdem mittels Selective Laser-Induced Etching (SLE) oder UKP-Laserabtrag eine gewünschte Geometrie aus Glas erzeugt wird, reduziert Laserpolieren die verbleibende Rauheit auf optische Qualität. Verbleibende Formabweichungen wie Welligkeiten (mid-spatial frequency errors) lassen sich messen und mittels LBF (Laser Beam Figuring) korrigieren.

Neben Mikrobautteilen für Mikrofluid-Analyse oder Faser-Faser/Chip-Kopplern in der Optoelektronik entstehen auch Mikrolinsenarrays bis hin zu Makrooptiken mit Durchmessern >100 mm. Klassische Schleif- und Polierverfahren erzeugen oft Mikrorisse im Material. Laserpolieren kann solche Defekte ausheilen und zeigt das Potenzial, die laserinduzierte Zerstörschwelle (LIDT) zu erhöhen. Das ist entscheidend für Optiken, die bei hohen Laserleistungen eingesetzt werden, etwa in der Laserfusion.

Freiformoptiken und sphärische Linsen lassen sich mit vergleichbarem Aufwand fertigen. Ebenso entstehen Vorder- und Rückseitenform im SLE-Verfahren in einer Aufspannung und bei hohen Geschwindigkeiten, so dass Justageaufwände entfallen. Zudem ermöglicht die Technologie Waferlevel-Optiken: Statt viele Linsen einzeln aufwändig zu justieren und zu optischen Systemen zu montieren, werden ganze Wafer mit mehreren Linsen kombiniert und erst anschließend vereinzelt.



Während des additiven Fertigungsprozesses integrierte Sensorik: In den Messerkopf werden Dehnungsmessstreifen direkt im LPBF-Prozess eingebettet. Der Bauvorgang pausiert kurz zum Einpassen der gedruckten Sensorelemente und wird anschließend fortgesetzt, sodass ein funktionsintegriertes, sensorisches Bauteil entsteht

Smarte Oberflächen – das fühlende Bauteil aus dem Drucker

Neben funktionalen Oberflächeneigenschaften gewinnen auch sensorische Fähigkeiten an Bedeutung. Digitale Druckverfahren bringen funktionale Strukturen aus Mikro- oder

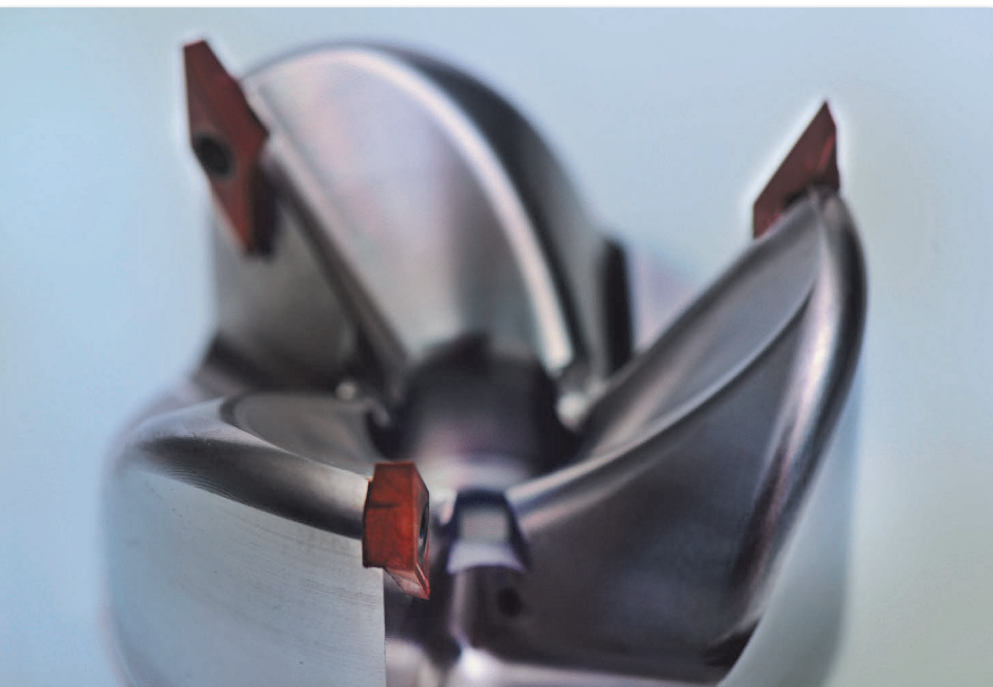
Nanopartikeln auf Bauteiloberflächen auf, die anschließend mittels Laserstrahlung versintert werden. Multimaterial-Multischichtapplikation ermöglicht es, anwendungsspezifische Sensoren und Leiterbahnen automatisiert aufzubauen und langfristig manuell applizierte Folien Sensoren zu ersetzen.

Am Fraunhofer ILT entsteht dazu die Kombination aus pulverbettbasierten 3D-Druckverfahren und Funktionsdruck von Sensoren. Ziel sind smarte Bauteile mit geschützten Sensoren an messrelevanten Stellen im Inneren des Bauteils. Sie unterstützen die Qualitätssicherung in Produktionsketten und erlauben eine dynamische Anpassung von Anlagen, um kritische Zustände früh zu vermeiden.

Fazit und Ausblick

Laserbasierte Verfahren erweitern die Möglichkeiten der Oberflächengestaltung deutlich. Sie verbinden präzise Strukturierung, funktionale Anpassung und digitale Prozessführung in durchgängigen Fertigungsabläufen. So entstehen Oberflächen und Bauteile, die nicht nur definierte Eigenschaften besitzen, sondern zunehmend auch Informationen erfassen und Prozesse unterstützen.

Mit der weiteren Integration von Sensorik, Datenanalyse und lernfähigen Modellen rücken adaptive, selbstüberwachende Systeme in den Fokus der Forschung. Daraus entwickeln sich robuste, skalierbare Lösungen für industrielle Anwendungen von energie- und ressourceneffizienten Produktionsprozessen bis hin zu funktional integrierten, intelligenten Bauteilen. ◀



Vom Bauteil zur Datenquelle: Das Fraunhofer ILT zeigt, wie sich Dehnungsmessstreifen und weitere Sensorstrukturen direkt in metallische Komponenten integrieren lassen. So entstehen smarte Bauteile mit eingebetteter Sensorik zur Zustandsüberwachung und Prozessrückmeldung