

DMS-Sensoren aus dem 3D-Druck mit Low-Power-Funk-Telemetrie

Manuelle Prozessschritte der üblichen Klebverfahren werden bei diesem DMS-Sensor durch digitale Druck- und Laser-Verfahren ersetzt und alle Messdaten drahtlos übermittelt.

MATTHIAS REHBERGER, MARTIN-CHRISTOPHER NOLL *

Der Dehnungsmessstreifen (DMS) ist nach über 80 Jahren Anwendung als Sensorelement für Verformungsmessungen zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Doch der steigende Qualitätsanspruch an die Reproduzierbarkeit der Messwerte und ihrer digitalen Verarbeitung stellt den konventionellen Klebesensor DMS vor neue Herausforderungen. Die additive Fertigungstechnik öffnet dem DMS neue Anwendungen und erlaubt Design-Flexibilität, Automatisierbarkeit und Reproduzierbarkeit in der Anbringung. Um den Nutzen additiv

gefertigter DMS zu erkennen, ist ein kurzer Rückblick sinnvoll.

Der traditionelle DMS und sein Einsatz

Mittels DMS lassen sich Bauteillasten wie Kräfte oder Momente als Formänderungen (Dehnungen/Stauchungen) an der Oberfläche dieser Bauteile erfassen (Bild 1). Hierzu wurden DMS in den letzten Jahrzehnten immer weiter überarbeitet, um die Messunsicherheiten zu verringern. Das grundlegende Funktionsprinzip des DMS indes hat sich nicht geändert: Ein elektrischer Leiter erfährt unter Krafteinwirkung eine Verformung: Sowohl die Länge als auch die Querschnittsfläche des Leiters ändern sich und damit unmittelbar auch sein messbarer Ohm'scher Widerstand.

Der Anwender wird den DMS in erster Linie mit der erforderlichen aufwendigen Installationsprozedur verbinden. Denn für das Aufkleben sind nicht nur viele Arbeitsschritte und entsprechendes Knowhow erforderlich. Erst Erfahrung und das notwendige Fingerspitzengefühl bei der Installation können den auf einer Trägerfolie gelieferten DMS in eine Messstelle auf dem Bauteil verwandeln, die akkurate Messwerte liefert.

Grundsätzlich ist hierbei auf größte Sauberkeit zu achten, um eine fremdkörperfreie und dünne Klebstoffschicht zu ermöglichen. Für kompakte Kraftaufnehmer, wie sie zum

Beispiel in Haushaltswaagen verwendet werden, wird hierbei das Heißklebverfahren verwendet. Hierbei wird der mit Kleber versehene DMS über der Messstelle angepresst. Das Aushärten erfolgt darauf in einem Ofen.

Kann das Bauteil aufgrund von Größe, Gewicht oder Temperaturempfindlichkeit nicht in einen Ofen verbracht werden, wird das sogenannte Kaltklebverfahren angewendet: Nach dem Aufrauen mittels Schleifpapier und Entfetten der Klebestelle wird die vorgesehene DMS-Position angezeichnet. Das Anzeichnen, die Positionierung des DMS sowie das anschließende Auftragen und gleichmäßige Verteilen des Klebstoffes erfolgen typischerweise manuell und unterliegen daher großen Unsicherheiten in der lateralen Positionierung. Beim Aushärten des Klebstoffes wird der DMS für etwa eine Minute ange-drückt. Die Dicke des ausgehärteten Klebefilms kann stark variieren und beeinflusst das Ansprechverhalten des Sensors signifikant. Das Aufkleben eines DMS ist damit in doppelter Hinsicht problematisch. Auf der einen Seite ergeben die manuellen Arbeitsschritte anwenderbedingt eine Qualitätsstreuung. Hohen Qualitätsanforderungen kann mit einer Reihe von Hilfsmitteln begegnet werden, Aufwand und Installationsdauer erhöhen sich jedoch. Bei unzureichender Qualität der Messstelle muss der DMS zerstörend entfernt und ein neuer DMS aufgeklebt werden. Auf der anderen Seite ist der Einsatz von qualifiziertem Personal der größte Kostenanteil bei der Installation eines DMS. Für größere Stückzahlen ergeben sich keine oder nur unwesentliche Skalierungseffekte der Kosten. Der Bedarf nach einer automatisierbaren Aufbringung der Sensoren ist damit gegeben.

Hinzu kommt der Aufwand für die nachfolgende Mess- und Datenübertragungskette. Insbesondere auf rotierenden Bauteilen wird es kompliziert: Der übliche Ansatz ist hier die Nutzung von induktiven Telemetrie-Systemen, die sowohl Messdaten als auch Energie über eine induktive Kopplung übertragen. Diese Systeme sind jedoch für den Serieneinsatz aufgrund hoher Preise und relativ geringer Robustheit nur bedingt geeignet. Andere Alternativen wie SAW (Sur-



* M.Sc. Matthias Rehberger
... ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Gedruckte Sensorik am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen.



Dipl.-Ing. Martin-Christopher Noll
... ist Geschäftsführer der i4M technologies GmbH, Aachen.

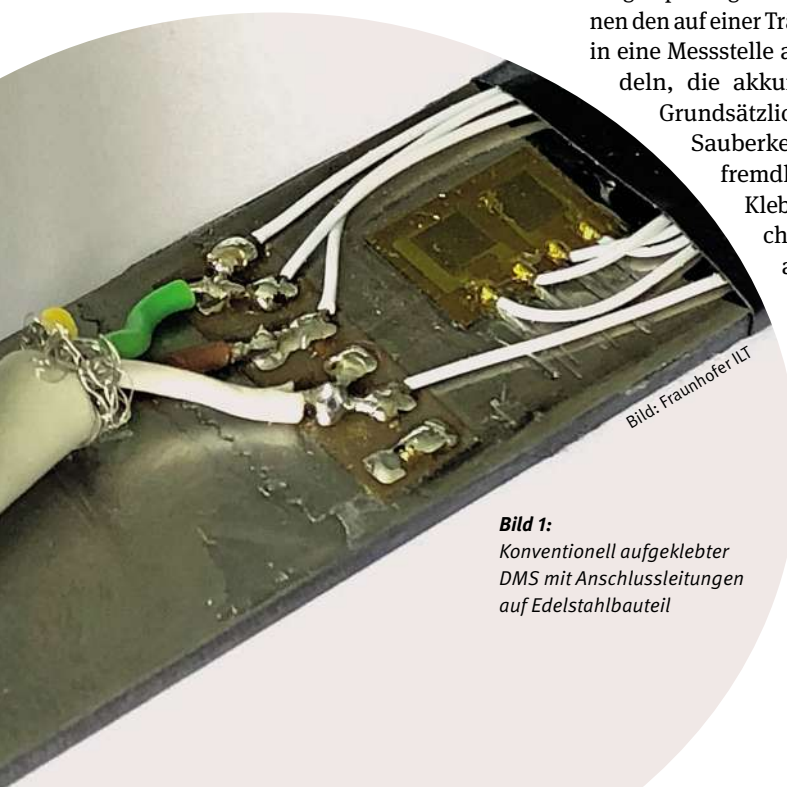


Bild: Fraunhofer ILT

Bild 1:
Konventionell aufgeklebter DMS mit Anschlussleitungen auf Edelstahlbauteil

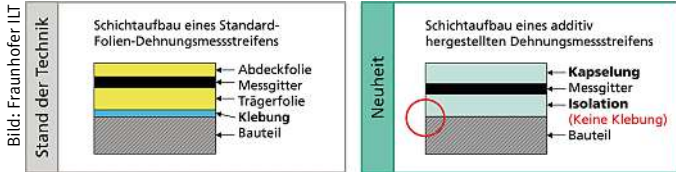


Bild 2:
Additiver DMS-Schichtaufbau (rechts) im Vergleich zu konventionellem Sensor.

face Acoustic Wave) oder magnetostruktive Sensorik eignen sich nur für bestimmte Werkstoffe oder haben sich im Feldeinsatz als störanfällig erwiesen und bislang nicht durchsetzen können. Durch den Fortschritt bei der Entwicklung von Low-Power-Industrielösungen für die Datenübertragung per Funk ergeben sich neue Möglichkeiten, die hier für die Realisierung energieautarker Sensorik genutzt werden sollen.

Der additive Materialdruck für DMS-Sensoren

Welche Möglichkeiten kann hier die additive Fertigung bieten, schließlich können bereits viele 3D-Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen gedruckt werden? Dieser Frage haben sich das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT und die i4M technologies GmbH gestellt und einen Prototypen entwickelt, der nachfolgend beschrieben ist.

Bei konventionellen DMS ist meist das resistive Messgitter zwischen einer Träger- und Abdeckfolie einlaminiert. Dieser Folien-DMS wird durch eine Klebung mit dem Bauteil verbunden. Die Dehnungsübertragung vom Bauteil auf das Messgitter erfolgt daher über zwei Zwischenschichten (Bild 2 links). Grundsätzlich sollte das Messgitter so nah wie möglich an der Bauteiloberfläche platziert sein, um Kraftübertragungsverluste zu vermeiden. Schwankt die Dicke der Klebung, schlägt sich dieses in der Kraftübertragung nieder und das Ansprechverhalten der DMS-Messstelle kann sich ändern. Bei der direkten Aufbringung des DMS mittels Druckverfahren (wie Tintenstrahl Druck), kann ein einfacheres Schichtsystem zwischen Bauteil und Messgitter verwendet werden (Bild 2). Nur eine Zwischenschicht ist erforderlich, die die Funktion der Kraftübertragung und elektrischen Isolation zwischen Bauteil und Messgitter miteinander vereint.

So entsteht der DMS in der 3D-Drucktechnik

Beim hier dargestellten Ansatz der additiven Fertigung werden drei Funktionsschichten nacheinander aufgedruckt und jeweils funktionalisiert: Eine Isolationsschicht, das metallische Messgitter und eine Abdeck- bzw. Verkapselungsschicht. Die Funktionen von Trägerfolie und Klebung beim konventi-

onellen DMS werden durch eine einzelne Isolationsschicht übernommen. Damit besteht grundsätzlich die Möglichkeit, das Messgitter näher an der Bauteiloberfläche zu positionieren. Dies verspricht eine verbesserte Dehnungsübertragung auf das sensorische Messgitter.

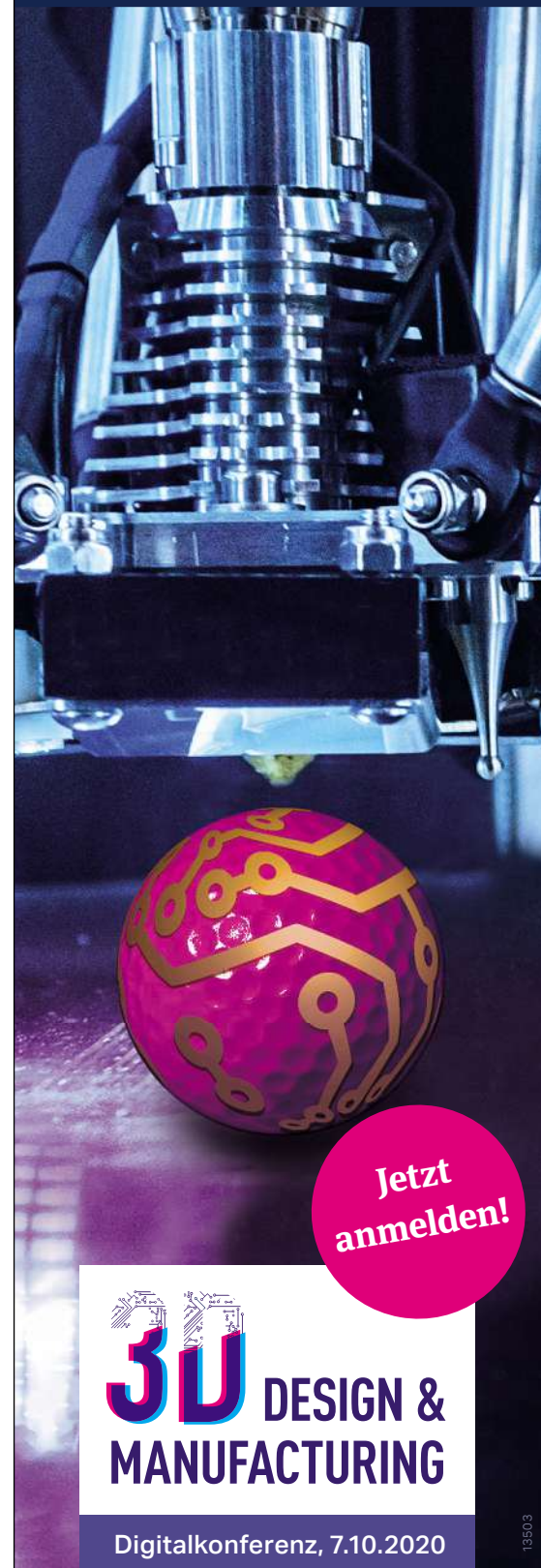
Doch welche Verfahren eignen sich für den Schichtaufbau? Die Verfahren sollten digital, ressourcenschonend und inlinefähig sein, ihre Robustheit im industriellen Fertigungsmaßstab bereits unter Beweis gestellt haben und vor allem geringe Fertigungskosten pro Sensor ermöglichen.

In Vorbereitung für die Applikation eines additiv gefertigten DMS kann die Bauteiloberfläche mittels Laserstrahlung von Fremdstoffen wie Rost, Schmierstoffen oder Oxidschichten gereinigt werden. Für eine Anrauhung der Oberfläche ist dieser Schritt anpassbar: Mittels gepulster Laserstrahlung werden gezielt mikroskopisch kleine Bereiche abgetragen, umgeschmolzen oder modifiziert, um die Haftung der später aufgetragenen Schichten zu erhöhen.

Dispenser und Inkjet-Drucker können ortselektiv die Materialien auf die Messstelle auftragen. Die Nachbehandlung erfolgt mit effizienten Lichtquellen (LED, Laser), welche die notwendige Energie schnell in die aufgedruckten Schichten einkoppeln, ohne das Bauteil unnötig zu erwärmen.

Als elektrisches Isolationsmaterial kann beispielsweise ein Hybridpolymer zur Anwendung kommen, wie das vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC erfundene ORMOCER. Es liegt in einer unvernetzten Form als zähflüssiges Material vor und kann photoinitiert (also mittels Lichtbestrahlung) vernetzt werden. Mittels Dispensen ist ein selektiver Materialauftrag möglich, das Hybridpolymer wird somit nur an den erforderlichen Stellen aufgetragen (Bild 3). Eine CNC-Steuerung übernimmt die Führung des Dispensers und sorgt für eine präzise Positionierung. Anschließend härtet eine Lichtquelle die Schicht in wenigen Sekunden aus.

Nach der Herstellung der elektrischen Isolation auf dem Metallbauteil schließt sich der Druck des resistiven Sensormessgitters an. Er erfolgt über Tintenstrahl Druck von nanopartikulären Metalltinten. Die dünnflüssige Tinte enthält Metallnanopartikel, Hilfs- und



3D DESIGN & MANUFACTURING

Digitalkonferenz, 7.10.2020

Elektronikfertigung: Die Eroberung der 3. Dimension

Erfahren Sie mehr über die Möglichkeiten, Herausforderungen und Potenziale, wenn gedruckte Elektronik, additive Fertigung und die intelligente Produktion Symbiosen eingehen.

www.3d-electronicsforum.de

Eine Veranstaltung von **ELEKTRONIK PRAXIS**

einer Marke der **VOGEL COMMUNICATIONS GROUP**

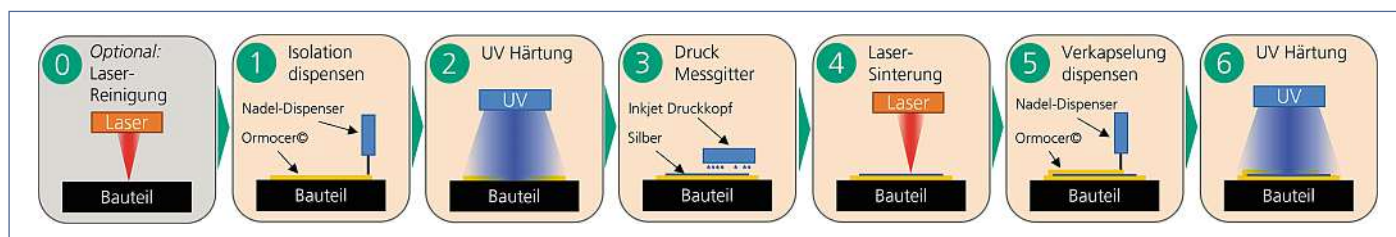


Bild: Fraunhofer ILT

Bild 3: Prozessschema der additiven, laserbasierten Fertigung eines DMS auf einem Bauteil.

Lösungsmittel und kann wie ein Bild bei einem Farbdruker hochaufgelöst auf die Isolation gedruckt werden. Schablonen oder Masken wie bei Ätzverfahren sind nicht notwendig, und die Messgitter sind digital auf die Messaufgabe anpassbar. Damit die Metalltinte leitfähig wird, müssen flüchtige Bestandteile wie Lösungsmittel wie auch die Hilfsmittel verdampft und die Metallpartikel miteinander versintert werden. Für diesen thermischen Nachbehandlungsschritt ist das Lasersintern besonders geeignet, denn hierfür ist das gesamte Bauteil nicht in einem Ofen zu erwärmen. Besonders bei temperaturempfindlichen Substraten wie gehärteten Stählen ist dies ein wichtiger Vorteil. Eine abschließende Verkapselung des Messgitters schützt dieses vor Umwelteinflüssen und kann mit denselben Materialien und Verfahren wie die Isolationsschicht gefertigt werden. Einen derart hergestellten Sensor zeigt Bild 4.

Ein digital aufgedruckter und per Laser nachbehandelter DMS bietet grundsätzlich das Potenzial, konstante, von manuellen Prozessen unabhängige Qualität bei im Serieneinsatz attraktiven Kosten zu realisieren. Besondere Stärken hat der Ansatz in der hochflexiblen Kleinserienfertigung, da ohne Werkzeugwechsel angepasste Designs erstellt werden können. Doch alle Herausforderungen der Verfahrensentwicklung sind noch nicht gelöst: So stehen bislang nur eingeschränkt metallische Tinten und Isolationmaterialien zur Verfügung, die eine werkstoffabgestimmte Temperaturkompensation bzw. eine definierte Kraftübertragung ermöglichen oder auf Laser-Funktionalisierungsverfahren hin entwickelt sind. Die ständige Weiterentwicklung gemeinsam mit Forschungspartnern und industriellen Anwendern steht im Fokus der Arbeiten des Fraunhofer ILT.

Von der Messstelle zum Smart-Sensor

Doch mit dem DMS als Sensor allein ist es nicht getan: Die Messdaten intelligenter Bauteile müssen digitalisiert, übertragen und analysiert werden. Aus Messdaten werden



Bild 4: Additiv hergestellter DMS auf einem Stahlbauteil. Das Bild darüber zeigt das Stahlbauteil mit integrierter Telemetrie.

nun „Smart Data“, wirtschaftlich verwertbare Daten. Diese können eine verbleibende Nutzungsdauer, automatisierte Wartungspläne, optimierte Regelungsstrategien und anderes mehr sein, welche die Basis für Konzepte wie Predictive Maintenance oder Industrie 4.0 bilden. Um Bauteillasten präzise messen zu können, müssen DMS-basierte Messstellen im Kraftfluss appliziert werden. Insbesondere in modernen Maschinen ist dort nicht viel Platz, ferner ist der Preisdruck für solche Lösungen hoch, vor allem dann, wenn die Stückzahlen steigen und eine serienweite Lösung erforderlich ist.

Für die Datenübertragung des additiv hergestellten Sensors wurde eine hochintegrierte Low-Power-Funk-Telemetrie entwickelt und zusammen mit dem DMS auf einem Bauteil appliziert (Bild 4 oben). Es wird hierbei aktuelle, marktübliche Hardware genutzt, die in ihrer Effizienz per maßgeschneiderter Firmware maximal ausgenutzt wird:

- Ultra Low Power SoC bestehend aus Cortex M4 MCU und 2,4-GHz-Funkmodem,
- Analog-Messfrontend mit 24-Bit-ADC sowie integriertem Signalverstärker und Referenzspannungsquelle,
- zusätzliche sechs DOF-MEMS-Sensorik (Accelerometer, Gyrometer) sowie Temperatursensoren,
- Lithium-Ionen-Akku oder Lithium-Primärzelle jeweils inklusiv Ladeelektronik und Schutzschaltung.

Für die Datenübertragung im 2,4-GHz-Band wird ein eigens entwickeltes Protokoll

genutzt, das im Vergleich etwa zu Bluetooth höhere Datenraten bei geringen Latenzen ermöglicht. Die maximal mögliche Abtastrate beträgt 19,2 kHz, welche auch live per Funk nutzbar ist. Der Leistungsbedarf und damit die Batterielaufzeiten sind jedoch direkt von der gewählten Abtastrate abhängig: Da die DMS-Messbrücke den größten Leistungsbedarf hat, wird diese gepulst betrieben, dies ist jedoch nur bis zu gewissen Abtastraten möglich. Zudem können alle Komponenten bei höheren Abtastraten nur deutlich kürzer in den sparsamen Sleep-Modi betrieben werden. Während je nach Batterie die Laufzeit bei 19,2 kHz kontinuierlich Stunden bis Tage beträgt, sind im diskontinuierlichen Betrieb bei niedrigen Abtastraten jahrelange Laufzeiten möglich.

Mithilfe dieser Lösung sind leistungsstarke, energieautarke Sensoren unter engen Bauraumbeschränkungen auf Basis von hochverfügbaren Komponenten herstellbar. Diese Sensorik wurde bereits in diversen technischen Systemen vom Getrieberad und Wälzlager, welche in warmem Öl rotieren, bis zu Bahnsystemen oder Windenergieanlagen unter starken elektrischen Störfeldern und heftigen Vibrationen erfolgreich eingesetzt. Durch die auf den MCUs vorhandenen Rechenkapazitäten lassen sich zudem Datenvorbewertungen (z.B. FFTs) auf dem Sensor durchführen. Diese Smarten Sensoren können durch Edge-Computing eine starke Reduzierung der übertragenen Datenmenge und somit einen weiteren Energieeffizienzgewinn erzielen. Ferner ermöglichen Online-Algorithmen im Sensor eine Qualitätssteigerung der gewonnenen Messwerte z.B. durch Sensor-Fusion oder geeignete Filter.

Eine Einschränkung der gezeigten Telemetrie-Lösung bleibt jedoch: der Batteriebetrieb. Jahrelange Laufzeiten sind zwar realisierbar, aber eben endlich. Deshalb kommen jetzt Energy-Harvesting-Ansätze ins Spiel. Bei der i4M technologies GmbH wurden bereits vielversprechende Ansätze, basierend auf Temperatur- und RF-Harvesting, erfolgreich untersucht. // KU

Fraunhofer ILT/i4M technologies GmbH