

Interview mit Dr.-Ing. Stefan Makowski, Fraunhofer IWS: Mit Oberflächenwellen zur Werkstoffinformation

Interview with Dr.-Ing. Stefan Makowski, Fraunhofer IWS: Using Surface Waves for Material Information



Dr.-Ing. Stefan
Makowski (©
Fraunhofer IWS)

Dr.-Ing. Stefan
Makowski (©
Fraunhofer IWS)

Das am Fraunhofer IWS entwickelte LAwave-Messsystem dient zur schnellen und zerstörungsfreien Charakterisierung von Schichten und Oberflächen. Das zugrundeliegende Verfahren ist wissenschaftlich etabliert und gewinnt zunehmend auch Bedeutung für industrielle Forschung, Entwicklung und Qualitätskontrolle. Es basiert auf dem Prinzip der laserakustischen Oberflächenwellen-Spektroskopie. Im Interview erklärt Dr.-Ing. Stefan Makowski, Gruppenleiter Schichtcharakterisierung beim Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS, wie die zerstörungsfreie Prüfung damit funktioniert und was für die Zukunft geplant ist.

Wie genau funktioniert das Verfahren?

LAwave steht für laserakustische Oberflächenwellen-Spektroskopie. Ein Laser regt dabei breitbandig Oberflächenwellen an. Die Eindringtiefe der Oberflächenwellen hängt von der Frequenz ab. Wenn ich die verschiedenen Frequenzen mit unserer Software analysiere, breiten sich die Oberflächenwellen in unterschiedlichen Tiefen des Materials aus. Daraus gewinne ich meine Werkstoffinformationen. Unterschiedliche Schichten oder veränderte Oberflächen haben immer verschiedene

mechanische Eigenschaften. Diese Unterschiede werden durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen sichtbar. Die Herausforderung und zugleich der Kern des Verfahrens liegt darin, die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Oberflächen präzise zu messen.

Sind Material, Oberfläche und thermische Beschichtung für die Mess-Funktion irrelevant?

In gewisser Weise kann man das sagen. Unser Verfahren misst mechanische Eigenschaften und ist daher ein Werkstoffprüfverfahren. Es ist weitgehend unabhängig von den spezifischen Werkstoffen, da das Prinzip der Wellenausbreitung in allen Festkörpern existiert. Es gibt jedoch einige Randbedingungen zu beachten. Zum Beispiel benötigen wir ein Material, das den Laser einkoppelt, also nicht lasertransparent ist. Wir benötigen auch ein Material, in dem die Welle nicht zu stark gedämpft wird. Bei extrem porösen oder nachgiebigen Materialien wie Polymeren ist die Dämpfung der Welle so stark, dass sie normalerweise nicht gemessen werden kann, da sie auf dem Weg zum Sensor einfach verloren geht. Abgesehen davon können wir auf allen Arten von Metallen und Keramiken sowie Schichten im Bereich von Nanometern bis hin zu fast einem Millimeter messen. Der eigentliche Mehrwert dieser Methode liegt in ihrer Geschwindigkeit und Zerstörungsfreiheit. Durch die Messung mechanischer Eigenschaften erfassen wir alle Defekte im Material, wie Risse, Poren und Einschlüsse. Dies ist besonders wichtig bei thermischen Spritztechniken oder beim Laserstrahlauftragschweißen, da diese Verfahren prozessbedingte Fehler erzeugen können, die kontrolliert werden müssen. Alternative Verfahren wie Querschliffverfahren bieten nur Hilfsgrößen.

The LAwave measurement system developed at Fraunhofer IWS allows the rapid and non-destructive characterization of coatings and surfaces. The underlying method is scientifically established and is gaining more and more significance for industrial research, development and quality control. It is based on the principle of laser-acoustic surface wave spectroscopy. In this interview, Dr.-Ing. Stefan Makowski, Group Leader for Coating Characterization at the Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology IWS, explains how non-destructive testing works with this system and what plans are in place for the future.

How exactly does the method work?

LAwave stands for laser-acoustic surface wave spectroscopy. A laser stimulates surface waves across a broad range. The penetration depth of the surface waves depends on the frequency. When analyzing the different frequencies with our software, we find the surface waves propagate at various depths of the material. This is how I obtain my material information. Different layers or altered surfaces always have different mechanical properties. These differences become visible through the wave propagation speed. The challenge at the core of the method is to precisely measure the wave propagation speed on surfaces.

Are material, surface and thermal coating irrelevant to the measurement?

In a way, yes. Our method measures mechanical properties and is therefore a material testing method. It largely relies on specific materials, as the principle of wave propagation exists in all solids. However, there are some boundary conditions to consider. For example, we need materi-

al that absorb the laser, meaning it is not laser-transparent. We also need material where the wave is not too strongly dampened. In extremely porous or soft materials like polymers, the damping of the wave is so strong that it usually cannot be measured because it is simply lost on the way to the sensor. Apart from that, we can measure on all types of metals and ceramics, as well as layers ranging from nanometers to almost a millimeter. The actual added value of this method lies in its speed and non-destructive nature. By measuring mechanical properties, we detect all defects in the material, such as cracks, pores and inclusions. This is particularly important in thermal spray techniques or laser cladding, as these processes can produce process-related errors that need to be controlled. Alternative methods, such as cross-section preparation only offer visual.

Is X-ray an alternative?

Yes, the X-ray method is often considered an alternative. It is well-suited for examining large structures and cracks. However, it reaches its limits when it comes to small structures and finely distributed porosity, which we typically encounter in our measurements. Moreover, the effort is high. Micro X-ray tomography is now possible, but it requires substantial investments. This method does not measure the effective mechanical impact; it only measures the pore volume. However, this volume alone does not tell us how the pores affect the material. An example is a non-open crack that may be compressed by residual compressive stress. This crack is probably so small that it is not visible on the X-ray, but still has a significant mechanical impact. Our method, on the other hand, generates an elastic wave that passes through the crack, causing a short-term compres-

Ist Röntgen eine Alternative?

Ja, das Röntgenverfahren wird oft als Alternative betrachtet. Es eignet sich gut zur Untersuchung großer Strukturen und Risse. Jedoch stößt es an seine Grenzen, wenn es um kleine Strukturen und fein verteilte Porosität geht, wie wir sie typischerweise bei unseren Messungen haben. Zudem ist der Aufwand hoch. Mikroröntgentomographie ist zwar mittlerweile möglich, aber mit enormen Investitionskosten verbunden. Außerdem misst diese Methode nicht den effektiven mechanischen Einfluss, sondern lediglich das Porenvolumen. Dieses Volumen allein sagt jedoch nichts darüber aus, wie sich die Poren in dem Werkstoff auswirken. Ein Beispiel dafür ist ein nicht geöffneter Riss, der möglicherweise durch Druckeigen- spannung zusammengedrückt wird. Dieser Riss ist wahrscheinlich so klein, dass er beim Röntgen nicht sichtbar ist, aber dennoch einen erheblichen mechanischen Einfluss hat. Unser Verfahren hingegen erzeugt eine elastische Welle, die durch den Riss geht und dabei eine kurzzeitige Druck- und Zugbewegung verursacht. Wenn der Riss dabei geöffnet wird, überträgt das Material die Welle nicht mehr, was sich sofort auf das Messergebnis auswirkt. Daher ermöglicht unser Verfahren die Messung der effektiven mechanischen Eigenschaften, die besonders bei mechanisch beanspruchten Schichten wie thermischen Spritz- oder Laserstrahl auftraggeschweißten Schichten von Interesse sind. Die Querschliffpräparation dagegen bietet lediglich Informationen über die Anzahl und Verteilung von Rissen und Poren, jedoch keine direkten Einblicke in ihre mechanische Wirkung auf den Werkstoff.

Wer sind die Hauptanwender?

Seit den neunziger Jahren hat sich das LAwave-Verfahren vor allem in wissenschaftlichen Einrichtungen sowie zur Qualitätskontrolle und Prozessentwicklung von PVD-Beschichtungen, zum Beispiel in der Automobil- oder Halbleiterindustrie Einzug gehalten. PVD-Beschichtungen von Motorkomponenten, insbesondere Kohlenstoffschichten, werden in großen Stückzahlen hergestellt und sind daher ein Massenprodukt. Mit LAwave können

wir eine schnelle und effiziente Qualitätskontrolle durchführen, die es ermöglicht, innerhalb weniger Minuten wichtige Informationen über die Beschichtung, wie ihre Härte und Dicke, zu erhalten. Andererseits sehen wir den Mehrwert aber auch dort, wo schlicht keine geeignete zerstörungsfreie Alternative besteht. Ein aktuelles Beispiel ist die Bremsscheibenbeschichtung, für die viele Unternehmen in naher Zukunft neue Lösungen auf den Markt bringen müssen. Mit LAwave können wir innerhalb kurzer Zeit eine umfassende Vermessung der Bremsscheibe durchführen und wertvolle Informationen über ihre Beschichtung und mechanische Integrität liefern. Das Interesse der Industrie ist da groß. Besonders gute Eignung sehen wir beim thermischen Spritzen, wo teilweise die Einzelstückkosten hoch sind und eine zerstörende Prüfung nicht in Frage kommt. Darüber hinaus können wir auch Variationen im Prozess, beispielsweise orts- und temperaturabhängige Veränderungen genau erfassen und messen.

Wird im Labor oder vor Ort geprüft?

Derzeit haben wir Systeme mit einem Messraum in der Größe eines Schuhkartons aufgebaut. Standardmäßig führen wir die Messungen an einem festen Ort durch, an dem das Messgerät installiert ist. Allerdings arbeiten wir im Rahmen eines Forschungsprojekts bereits an der Entwicklung eines mobilen Kopfs. Unser Ziel ist es, die Größe eines mobilen Messkopfs auf die einer Getränkedose zu reduzieren, um die Anwendbarkeit auf verschiedene Bauteile zu ermöglichen, auch auf besonders große wie beschichtete Walzen. Wir streben ebenfalls eine Automatisierung in der mobilen Anwendung an. Eine weitere interessante Anwendung ist die Bewertung von Härteverfahren. Wir haben festgestellt, dass sich mit der Härte von Stahl auch der E-Modul verändert, weil es die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle beeinflusst. Dadurch können wir indirekt Härteprofile messen. Die von uns genutzte akustische Welle verursacht nur minimale Verformungen, die im elastischen Bereich bleiben und somit keine Beschädigung der Beschichtungen verursachen. Unsere Methode ist also absolut zerstörungsfrei.

tion and tension movement. If the crack opens in the process, the material no longer transmits the wave, which immediately affects the measurement result. Therefore, our method allows for the measurement of effective mechanical properties, which are particularly relevant for mechanically stressed layers such as thermal sprayed or laser-cladded layers. The cross-sectional preparation, on the other hand, only provides information about the number and distribution of cracks and pores but no direct insights into their mechanical impact on the material.

Who are the main users?

Since the 1990s, the LAwave method has been mainly adopted in scientific institutions as well as for quality control and process development of PVD coatings, for example, in the automotive or semiconductor industries. PVD coatings of engine components, particularly carbon coatings, are produced in large quantities and are thus a mass product. With LAwave, we can perform quick and efficient quality control, allowing us to obtain important information about the coating, such as its hardness and thickness, within minutes. On the other hand, we also see added value where there is simply no suitable non-destructive alternative. A current example is brake disc coatings,

for which many companies will soon have to bring new solutions to the market. With LAwave, we can conduct a comprehensive measurement of the brake disc in a short time and provide valuable information about its coating and mechanical integrity. The interest from the industry is significant. We see particularly good suitability in thermal spraying, where the cost per piece is sometimes high and destructive testing is not an option. Additionally, we can precisely detect and measure variations in the process, such as location- and temperature-dependent changes.

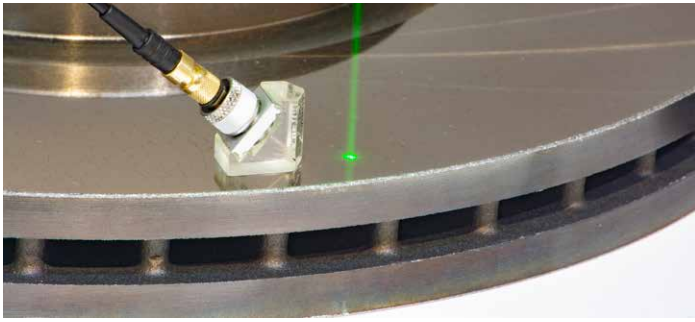
Is testing conducted in the lab or on-site?

Currently, we have systems set up with a measurement space the size of a shoebox. Usually, we conduct the measurements at a fixed location where the measuring device is installed. However, as part of a research project, we are already working on developing a mobile sensor. Our goal is to reduce the size of a mobile measurement sensor to that of a beverage can to enable its applicability to various components, even large ones like coated rolls. We are also aiming for automation in mobile applications. Another interesting application is the evaluation of hardening processes. We have found that with the hardness of steel, the modulus



Das am Fraunhofer IWS entwickelte LAwave-Messsystem dient zur schnellen und zerstörungsfreien Charakterisierung von Schichten und Oberflächen. (© Jürgen Jeibmann/ Fraunhofer IWS)

The LAwave measurement system developed at Fraunhofer IWS serves for the rapid and non-destructive characterization of coatings and surfaces. (© Jürgen Jeibmann/ Fraunhofer IWS)



Das LAwave-Verfahren ermöglicht die laserakustische Untersuchung von Beschichtungen auf Brems Scheiben. © Fraunhofer IWS

The LAwave method enables the laser-acoustic examination of coatings on brake discs. © Fraunhofer IWS

Gibt es Weiterentwicklungspläne in Richtung Industrie 4.0?

Industrie 4.0 ist aktuell noch nicht final implementiert, wir haben uns aber auf den Weg gemacht. Früher war unsere Software wissenschaftlich geprägt und bestand aus zwei Komponenten: einer für die Messung und einer für die Auswertung. Inzwischen haben wir diese Komponenten zusammengeführt und die Software auf eine schlanke und zeitgemäße Bedienung mit weitgehenden Automatisierungsmöglichkeiten bspw. mit Rezeptfunktionen umgestellt. Wichtig für die Industrie ist es, alle Daten rückverfolgbar zu machen. Mit unserer neuen Software können wir nun genau nachvollziehen, wer wann was gemessen hat und mit welchen Parametern das Ergebnis erzielt wurde. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass wir jetzt alle Schnittstellen nutzen können, um Prozesse weiter zu automatisieren. Es ist denkbar, solche Daten auch automatisiert in der Cloud zu speichern und weiterzuarbeiten. Grundsätzlich bestehen hier große Freiheiten, sodass wir spezifische Kundenanforderungen umsetzen können.

Wird die Technologie in der Industrie genutzt?

Ja, denn die LAwave-Kerntechnologie haben wir sukzessive weiterentwickelt, sodass sie bereits in unterschiedlichen Branchen zum Einsatz kommt. Typische Anwendungen sind Materialentwicklung, Prozessverständnis und Qualitätssicherung etwa von PVD-Schichten. Ein weiterer Kunde hat zahlreiche Messungen für über 250 Teile bei uns durchführen lassen und damit seine Prozes-

se evaluiert. Ein aktuelles Projekt, das gerade in den Anfängen steht, betrifft die Beschichtung von Brems scheiben. Wir können die Messungen durchführen, aber die quantitative Auswertung ist anspruchsvoll, weil die Schichten relativ dick und heterogen sind und Defekte aufweisen. Diese Herausforderung werden wir nun angehen, indem wir die Vermessung der Brems scheiben vollautomatisch durchführen, ein umfassendes Datenprofil erzeugen, um dann mit externen Partnern die Auswertung zu verbessern. Dabei wollen wir auch KI-Methoden einsetzen, da die manuelle Auswertung bei der großen Datenmenge an ihre Grenzen stößt.

Soll es perspektivisch also auch neue Funktionalitäten geben?

Ja, besonders in der Automatisierung, konkret für Brems scheiben. Das ist eines unserer nächsten Themen. Wir haben ein laufendes Projekt mit einem potenziellen Anwender, bei dem wir verschiedene Fehlerarten identifizieren. Der Partner hat absichtlich definierte Fehler in Oberflächen eingebracht, während das Beschichtungssystem ansonsten identisch blieb (gleiche Schichtdicke, gleiches Materialsystem). Es wurden sechs verschiedene Proben erstellt, eine davon als Referenz und fünf mit unterschiedlichen Fehlergrößen. Unsere Primärdaten zeigen deutlich, dass jede Probe im Diagramm einen charakteristischen Kurvenverlauf hat und wir alle fünf Fehlertypen zerstörungsfrei voneinander unterscheiden können. Dies wird derzeit wissenschaftlich ausgewertet. Wir versuchen, diese Daten mit einem Materialmodell zu hinterlegen, um das

of elasticity also changes because it affects the wave propagation speed. This allows us to indirectly measure hardness profiles. The acoustic wave we use causes only minimal deformations, remaining in the elastic range and thus causing no damage to the coatings. Our method is absolutely non-destructive.

Are there any development plans towards Industry 4.0?

Industry 4.0 is not yet fully implemented, but we are on our way. Previously, our software was scientifically oriented and consisted of two components: one for measurement and one for evaluation. In the meantime, we have merged these components and updated the software for a streamlined and modern operation with extensive automation possibilities, e.g., through recipe functions. It is important for the industry to make all data traceable. With our new software, we can now precisely track who measured what and when and with which parameters the result was achieved. Another important point is that we can now utilize all interfaces to further automate processes. It is conceivable to store and process such data automatically in the cloud. Essentially, it gives us flexibility, allowing us to implement specific customer requirements.

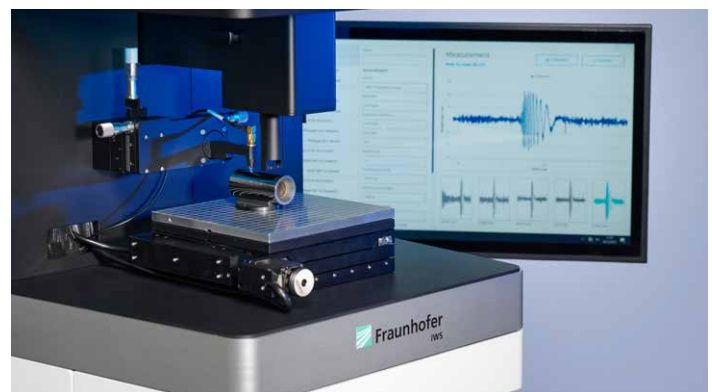
Is the technology used in the industry?

Yes, because we have continuously developed the LAwave core technology, it is already used in various indus-

tries. Typical applications are material development, process understanding and quality assurance, for example, of PVD coatings. One customer had numerous measurements conducted on over 250 parts with us to evaluate their processes. A current project, which is just beginning, concerns the coating of brake discs. We can conduct the measurements, but the quantitative evaluation is challenging because the coatings are relatively thick, heterogeneous, and have defects. We will now tackle this challenge by performing fully automated brake disc measurements, generating a comprehensive data profile, and then working with external partners to improve the evaluation. We also plan to use AI methods, as manual evaluation reaches its limits with the large amount of data.

Are there plans for new functionalities in the future?

Yes, especially in automation, specifically for brake discs, this is one of our next tasks. We have an ongoing project with a potential user where we identify various types of defects. The partner has deliberately introduced defined errors in surfaces, while the coating system remained otherwise identical (same layer thickness, same material system). Six different samples were created, one as a reference and five with different error sizes. Our primary data clearly show that each sample has a characteristic curve in the diagram, and that we can non-destructively distinguish all five error



Die eigens entwickelte Software steuert die Messung und erlaubt die reproduzierbare und automatisierte Auswertung mittels definierbarem Materialmodell. © Jürgen Jeibmann/Fraunhofer IWS

The specially developed software controls the measurement and allows reproducible and automated evaluation by means of a definable material model. © Jürgen Jeibmann/Fraunhofer IWS

zugrunde liegende Verständnis zu erweitern. Dies könnte eine präzise Qualitätskontrolle für dieses Materialsystem ermöglichen, bei der nicht nur eine Abweichung von der Referenz festgestellt, sondern auch die Art der Abweichung identifiziert werden kann.

Ein weiterer wichtiger Entwicklungsbereich ist der bereits erwähnte mobile Messkopf. Wir möchten die Messung direkt zum Bauteil bringen und damit ein weiteres, großes Feld erschließen. Das betrifft nicht nur die Produktion, sondern auch die Lebensdauerkontrolle. Beispielsweise könnten Beschichtungen von extrem großen Walzen präzise auf ihre verbleibende Lebensdauer hin überprüft werden, ohne dass sie ausgebaut werden müssen. Das wäre ein erheblicher Vorteil und könnte auch für große Rohre, die von innen beschichtet und derzeit schwer zu messen sind, relevant sein. Hier wagen wir einen Sprung aus dem Labor in die Industrie. Weitere Entwicklungen, die wir bereits im Labormaßstab umgesetzt haben, sind

Messungen bei erhöhten Temperaturen und von keramischen wie metallischen Folien. Früher war unser Messsystem so wissenschaftlich, dass es von Fachleuten mit hohem Aufwand bedient werden musste. Jetzt sind verschiedene Bedientypen in der Lage, das Gerät nach einer Einweisung zu nutzen. Man kann festlegen, welche Schicht und welches Substrat erwartet werden und die Auswertung nach einem bestimmten Schema durchführen, inklusive spezifischer Filtereinstellungen und Bewertungskriterien. Beispielsweise könnte man prüfen, ob die Schichtdicke größer als 200 Mikrometer ist und den E-Modul entsprechend bewerten. Der gesamte Messprozess kann bis zur finalen Bewertung vorprogrammiert werden – wir nennen das „One-Click-Measurement“. Der Prüfer wählt einfach das passende Rezept für das jeweilige Teil aus und der Messprozess läuft automatisch ab, einschließlich der Bewertung. Das ist neu und war früher nicht möglich.

Vielen Dank für das Gespräch!

types from each other. This is currently being scientifically evaluated. We are trying to back these data with a material model to expand the underlying understanding. This could enable precise quality control for this material system, where not only a deviation from the reference is detected but also the type of deviation identified. Another important development area is the aforementioned mobile measuring sensor. We want to bring the measurement directly to the component, opening up new possibilities for applications. This concerns not only production but also lifespan control. For example, coatings of extremely large rolls could be precisely checked for their remaining lifespan without having to be removed. This would be a significant advantage and could also be relevant for large pipes that are coated internally and currently difficult to measure. Here, we are taking a leap from the lab to the industry. Other developments we have already implemented on a

lab scale include measurements at elevated temperatures and of ceramic as well as metallic foils. Previously, our measurement system was so scientific that it had to be operated by specialists with significant effort. Now, various operator types can use the device after an introduction. One can define which layer and which substrate are expected and perform the evaluation according to a specific scheme, including specific filter settings and evaluation criteria. For example, one could check if the layer thickness is greater than 200 micrometers and evaluate the modulus of elasticity accordingly. The entire measurement process can be pre-programmed up to the final evaluation – we call this “one click measurement”. The examiner simply selects the appropriate recipe for the respective part and the measurement process runs automatically, including the evaluation. This is new and was not possible before.

Thank you for speaking with us!