

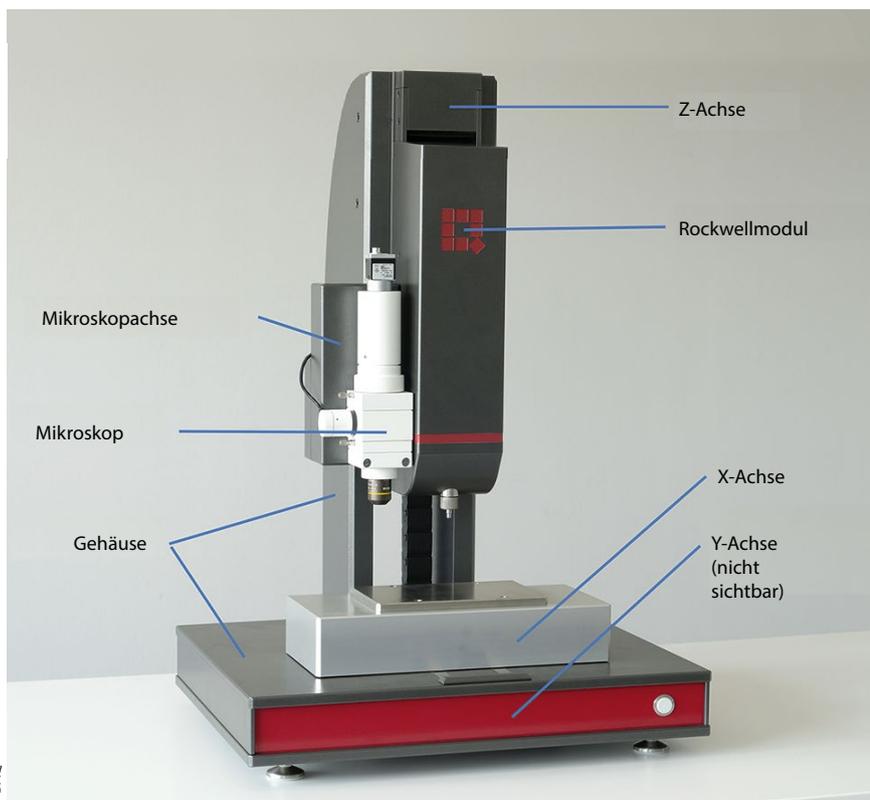
# Rockwell-Schichthaftungstest – der maschinelle Blick

Die Haftung von Hartstoffschichten ist ein wesentliches Qualitätskriterium für die Funktionssicherheit von beschichteten Bauteilen. Bei der visuellen Auswertung des Rockwell-Schichthaftungstests sind die Ergebnisse teils subjektiv und nicht genau genug. Ein neues, auf maschinellem Lernen basierendes Verfahren ermöglicht es, die Bewertung zu automatisieren.

An zentraler Stelle der Beschichtungsqualität moderner reib- und verschleißmindernder Hartstoffschichten steht die Schichthaftung. Sie wird üblicherweise mit der Rockwell-Eindringprüfung bewertet. Dieses Verfahren ist in den Normen DIN 4856 „Kohlenstoffschichten und andere Hartstoffschichten – Rock-

welleindringprüfung zur Bewertung der Haftung“ und DIN EN ISO 26443 „Hochleistungskeramik – Rockwell-Eindringprüfung zur Bewertung der Haftung von keramischen Schichten“ genormt. Auf dem beschichteten Bauteil wird wie bei einer Rockwellhärteprüfung ein Härteeindruck mit einem Diamantindenter erzeugt. Aus

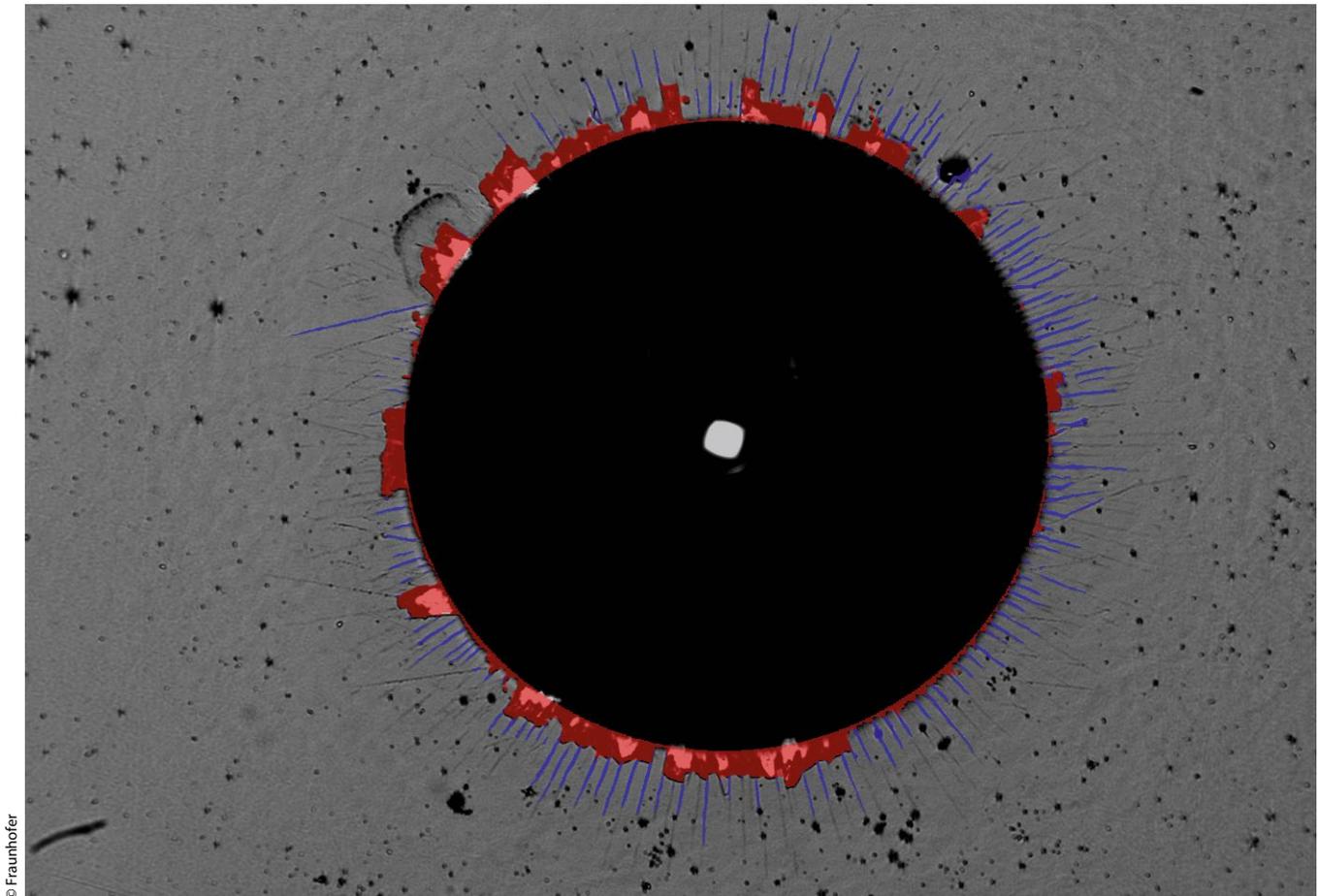
der Anzahl und Größe der Schichtschädigungen rund um den Eindruck kann man auf die Güte der Schichthaftung schließen. Dazu werden schematische Vergleichsbilder herangezogen. Die sichtbaren Schichtschädigungen und Risse werden nach visuellem Eindruck gemäß DIN 4856 in sechs Haftklassen (HF1 bis HF6) bzw. gemäß DIN EN ISO 26443 in vier Haftklassen (Klasse 0 bis Klasse 3) eingeteilt.



## Visuelle Beurteilung erschwert Qualitätssicherung

Das Ergebnis dieser Haftungsprüfungen hat jedoch je nach Erfahrungsschatz der Prüfperson eine subjektive Note. Eine Stichprobe von gut 500 Rockwelleindrücken von verschiedenen Schichtsystemen, die von vier Fachleuten unabhängig voneinander beurteilt wurden, ergab vielfache Unterschiede: Gute (HF1) bzw. schlechte Schichthaftungen (HF5 und HF6) wurden von verschiedenen Prüfpersonen meist einheitlich bewertet. Bei mittleren Schichthaftungen (HF2 bis HF4) traten allerdings häufig Bewertungsdifferenzen auf. Industrielle Anwender haben daher den Bedarf nach einer objektiven Bewertung, die es ermöglicht, die Schichtqualität unabhängig von der Prüfperson oder vom Standort zu machen. Zusätzlich ist gewünscht, eine feinere Unterteilung der Haftklassen mit einer Nachkommastelle zu erhalten, um die Prozesssicherheit der Beschichtungsprozesse besser steuern zu können.

**Bild 1** > Von BAQ im Projekt entwickelte Prüfstation für automatisierte Rockwell-Schichthaftungstests.



© Fraunhofer

**Bild 2** > Von der Software analysierter Rockwelleindruck einer DLC-Schicht auf einer 100Cr6-Probe, zugeordnete DIN-Haftklasse HF3,3, Fachleutebewertung HF3,5; blau: erkannte Risse; rot: erkannte Schichtschädigungen.

### Neues, automatisiertes Auswerteverfahren

In einem Verbundprojekt des Fraunhofer IST mit dem Fraunhofer ITWM sowie den Unternehmen BAQ und Schaeffler wurde eine neue Prüfstation für die Bewertung der Schichthaftung entwickelt, die diese Ziele erreicht. Die Erzeugung des Rockwell-eindrucks sowie die Mikroskopaufnahme werden dabei vollautomatisch von einer von BAQ neu entwickelten Prüfstation durchgeführt (*Bild 1*). Die automatische Ermittlung der Haftklassen geschieht mit einer vom Fraunhofer ITWM entwickelten Software, die die mit dem Mikroskop aufgenommenen Rockwelleindrücke mithilfe von maschinellem Lernen auswertet.

### Prüfstation erfüllt hohe mechanische Anforderungen

Die beschichteten Proben werden automatisch zwischen Diamantindenter und Mikroskop verfahren. Hierzu ist eine Po-

sitioniergenauigkeit sämtlicher Achsen im Mikrometer-Bereich erforderlich (*Bild 1*). Die Eindringtiefe des Indentors während dieses Prüfablaufs wird mit einer Genauigkeit von 0,1 µm gemessen. Die erforderliche hohe Steifigkeit wurde durch FEM-Simulationen sichergestellt. Die gesamte Prüfung der Haftfestigkeit läuft über eine neu entwickelte PC-Bediensoftware, in die die vom ITWM entwickelte Bildauswertung integriert ist.

Das Fokussieren der Probenoberfläche erfolgt mit der Z-Achse (grob) und der Mikroskopachse (fein). Anschließend können mehrere Messpunkte auf der Probenoberfläche definiert werden. Dann wird der automatisierte Prüfablauf gestartet: Die Messpunkte werden automatisch angefahren und die Rockwelleindrücke nach DIN EN ISO 6508 gesetzt. Sie werden anschließend nacheinander unter das Mikroskop gefahren und mit einer hochauflösenden Kamera aufgenommen. Die Aufnahmen werden an die Bildauswertung übergeben, die nach kurzer Analyse die Ergebnisse für

alle Eindrücke liefert. Diese beinhalten die Segmentierungsmasken (Indenter, Abplattungen und Risse – *Bild 2*), die ein- und ausgeblendet werden können, sowie die Haftklassen nach beiden Normen.

### Auswertesoftware nutzt maschinelles Lernen

Die automatische Analyse des Schadensbilds erfolgt mittels elektronischer Bildverarbeitung auf der Basis von maschinellem Lernen. Grundlage ist ein Testdatensatz von 500 Rockwelleindrücken. Die vom Fraunhofer ITWM entwickelte Software beruht auf einer Merkmalanalyse auf der Grundlage der in den Normen vorhandenen schematischen Skizzen jeder Haftklasse. Für jede Aufnahme werden in drei separaten Segmentierungsschritten die Bereiche von Eindruck, Schichtschädigungen und Rissen vom Hintergrund getrennt (*Bild 2*), und anschließend aus ihnen quantitative Merkmale berechnet. Die Segmentierung des Indentoreindrucks und

der Beschichtungsschädigungen wurde durch eine Kombination klassischer Bildverarbeitungstechniken erreicht, während für die Segmentierung von Beschichtungsrissen ein neuronales Netzwerk verwendet wurde. Anschließend wird eine Reihe von Merkmalen berechnet, die Schichtschädigungen und Rissbildung quantifizieren, zum Beispiel Fläche der Schichtschädigungen oder Länge der Risse. Mithilfe eines Random-Forest-Regressionsmodells kann schließlich die Adhäsionsklasse entsprechend der Normen mit einer Nachkommastelle angegeben werden: zum Beispiel HF3,6 entsprechend DIN 4856 oder Klasse 1,9 entsprechend DIN EN ISO 26443.

### Wissenschaftliche Erprobung

Am Fraunhofer IST wurde die Software anhand von insgesamt 472 Aufnahmen von Rockwelleindrücken auf DLC-Beschichtungen getestet. Als Referenz wurden DIN-Haftklassenwerte herangezogen, die in einer Diskussion mit fünf Fachleuten aus Industrie und Wissenschaft mit einer Nachkommastelle festgelegt wurden.

Bei 85 % der Beschichtungen mit guter bis mittlerer Schichthftung (HF1 bis HF3,9) zeigte die automatisierte Auswertung den gleichen ganzzahligen Haftklassenwert wie aus der Fachleutebewertung. Die Differenzwerte zwischen beiden Methoden waren deutlich kleiner als 1,0. In 12 % der automatisierten Auswertungen betrug die Abweichung zur Fachleutebewertung 1,0 bis 2,0. In 3 % der Fälle betrug der Haftklassenunterschied mehr als 2,0. In diesen Fällen wurden Oberflächenbereiche fehlerhaft analysiert. Die Software wird momentan weiterentwickelt, um diese Fehlinterpretationen noch weiter zu reduzieren.

Im Haftklassenbereich HF4 bis HF6 zeigte die softwarebasierte Auswertung bei allen Aufnahmen den gleichen ganzzahligen Haftklassenwert wie aus der Fachleutebewertung. Beschichtungen mit schlechter Schichthftung können also mit hoher Sicherheit als Ausschuss erkannt werden.

### In der Serienfertigung bewährt

Die neue Prüfstation wurde außerdem bei der Firma Schaeffler über einen längeren Zeitraum unter industriellen Bedingungen in der Serienfertigung erprobt. Insgesamt wurden 1000 Aufnahmen von Rockwelleindrücken amorpher Kohlenstoffbeschichtungen (DLC) getestet. Es ergab sich eine sehr hohe Übereinstimmungsrate von 98,4 % zwischen der automatisierten Auswertung mittels der neuentwickelten Prüfstation und der herkömmlichen visuellen Einschätzung durch das Personal in der Fertigung. Die Prüfpersonen bezeichneten die Prüfstation als ein robustes Equipment mit einem sehr professionellen Aussehen sowie einer guten Bedienoberfläche.

### Standardisierung der Ergebnisse geplant

Aufgrund der sehr guten Ergebnisse ist geplant, das neue Prüfverfahren in einer DIN-Norm zu standardisieren, damit es von der Industrie in einheitlicher Form als verlässliche Methode genutzt werden kann.

Das Projekt „Automatisierte Schichthftungsprüfung – AUROS“ wurde im Rahmen des Förderprogramms Wipano durchgeführt. Das Projekt wurde gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und

Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags. //

### Autoren

**Dr.-Ing. Jan Gäbler, Teamleiter Wasser**

**Reinhold Bethke**, Projektingenieur  
Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik IST, Braunschweig  
jan.gaebler@ist.fraunhofer.de  
www.ist.fraunhofer.de

**Damjan Hatic**, Doktorand Abteilung „Bildverarbeitung“

**Dr. Markus Rauhut**, Abteilungsleiter „Bildverarbeitung“

**Dr. Thomas Weibel**, Mitarbeiter Abteilung „Bildverarbeitung“

**Dr. Xiaoyin Cheng**, Mitarbeiterin Abteilung „Bildverarbeitung“

Fraunhofer-Institut für Wirtschafts- und Technomathematik ITWM, Kaiserslautern  
markus.rauhut@itwm.fraunhofer.de  
www.itwm.fraunhofer.de

**Michael Eder**, Geschäftsführer

**Stephan Eder**, Geschäftsführer  
BAQ GmbH, Braunschweig  
info@baq.de  
www.baq.de

**Dr.-Ing. Nazlim Bagcivan**, Vice President  
Surface Technology

**Dr.-Ing. Serhan Bastürk**, Head of Quality  
Department  
Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG,  
Herzogenaurach  
bagcinzi@schaeffler.com  
www.schaeffler.de

# BRANCHEN- VERBUNDEN

Jetzt registrieren:

[www.springerprofessional.de/mynewsletters](http://www.springerprofessional.de/mynewsletters)



Der neue Newsletter  
„Kleb- und Dichttechnik“  
von **adhäsion**

Alle Top-News und Branchen-Highlights aus der Welt der Kleb- und Dichttechnik, regelmäßig in Ihrem Postfach: Bestellen Sie jetzt unseren kostenlosen Newsletter.

**adhäsion** KLEBEN+  
DICHTEN