
Spieß, Lothar; Teichert, Gerd; Wilke, Marcus

***Die Materialcharakterisierungsverfahren
Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und
Glimmentladungsspektroskopie (GDOES) im Alltag eines
Werkstoffprüflabors***

URN: <urn:nbn:de:gbv:ilm1-2016200121>

Original published in:

The e-journal of nondestructive testing & ultrasonics. - Kirchwald : NDT.net. - Bd. 16 (2011), 1, DGzFP 2010, Session: Materialcharakterisierung, Di.1.C.1, insges. 8 S.

ISSN (online): 1435-4934

URL: <http://www.ndt.net/search/docs.php3?showForm=off&id=10077>

[*Visited:* 2016-10-27]



This work is licensed under a Creative [Commons Attribution 3.0 DE License](http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de)

Die Materialcharakterisierungsverfahren Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Glimmentladungsspektroskopie (GDOES) im Alltag eines Werkstoffprüflabors

Lothar SPIESS*, Gerd TEICHERT**, Marcus WILKE**

* TU Ilmenau, Inst. Werkstofftechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 5, 98693 Ilmenau
Tel.: +49 3677 693134; Fax: +49 3677 693171; e-mail: lothar.spiess@tu-ilmenau.de

** MFPA Weimar, Prüfzentrum Schicht- und Materialeigenschaften Ilmenau
Gustav-Kirchhoff-Str. 5, 98693 Ilmenau; Tel.: +49 3677 693334

Kurzfassung. Bauteilprüfung, Schichtdickenmessung und Bulkanalysen sind wiederkehrende Aufgaben eines Prüflabors. Im praktischen Betrieb stehen dem Anwender dabei eine Vielzahl von Analysemethoden zur Verfügung, aus denen dieser für die Bearbeitung des aktuellen Schadensfall auszuwählen hat. Der Beitrag stellt die etablierte Röntgenfluoreszenzanalyse sowie die Glimmentladungsspektroskopie als Methoden zur flexiblen bzw. komplexen Materialcharakterisierung vor. An praxisrelevanten Bauteilen und Schichtsystemen werden Beispielmessungen vorgestellt, die Ergebnisse werden in Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Elementauswahl, Auflösungsvermögen und Nachweisgrenzen diskutiert.

1. Einführung

Jegliche Prüfung der Werkstoffeigenschaften erfordert genaue und schnelle Informationen über die chemische Zusammensetzung der zu untersuchenden Proben. Der allgemeingültige Zusammenhang Struktur – Gefüge – Eigenschaften ist für die Werkstoffe von grundlegender Bedeutung und bedarf einer umfassenden Materialcharakterisierung.

Meist sind die mitgelieferten Angaben einer Probe über die chemische Zusammensetzung bzw. die ausgebildeten Phasen unzureichend und zuweilen nicht statistisch abgesichert. Bei Schadensfällen stammen die signifikanten Bruchflächen sehr oft aus Teilbereichen des Werkstoffs, in denen Inhomogenitäten der Zusammensetzung oder des Gefüges vorliegen.

Zerstörungsfrei lässt sich die chemische Zusammensetzung über die Anregung von charakteristischer Röntgenstrahlung und einer umfassenden Analyse der entstehenden Strahlung charakterisieren, die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). Die Energie der Strahlung gibt dabei Auskunft über die Atomsorte und aus ihrer Intensität erhält man die Menge im untersuchten Volumen.

Bei der optischen Glimmentladungsspektroskopie (GDOES) wird auf der Probenoberfläche mittels Niederdruck-Glimmentladung ein gleichmäßiger Materialabtrag bis zu einer Tiefe von maximal 200 µm realisiert. Während die laterale Auflösung durch den wählbaren Durchmesser der verwendeten Hohlanode, standardmäßig zwischen 1-8 mm, begrenzt wird, können sehr hohe Tiefenauflösungen mit Werten < 10 nm erreicht werden.

In Kombination mit den hohen Sputterraten, die mehrere $\mu\text{m}/\text{min}$ betragen können, steht mit der optischen Glimmentladungsspektroskopie ein Analyseverfahren zur Verfügung, das innerhalb weniger Minuten eine umfassende Schichtcharakterisierung in Hinblick auf Zusammensetzung, Schichtdicke und Kontaminationen erlaubt. Hierbei ist es möglich, selbst leichte Elemente wie C, N, O und H mit Nachweisgrenzen im unteren ppm-Bereich zu bestimmen [1-3].

2. Experimentelles

Die RFA-Untersuchungen fanden mit einem an Luft arbeitenden Gerät, FISCHERSCOPE X-RAY XAN-Helmut Fischer GmbH Sindelfingen, mit W-Röhre, wählbare Beschleunigungsspannung: 10; 30 oder 50 kV, Peltier-gekühlter Halbleiterdetektor; Energieauflösung $< 210 \text{ eV}$ für Mn-K α , mit wählbaren Kollimatoren/Messfleckgröße: 0,2; 0,6; 1 und 2 mm statt. Als Messzeit wurden 30 - 60 s gewählt. Die Auswertung erfolgt standardfrei mit der Fundamentalparameteranalyse [4, 5]. Mit der Messanordnung lassen sich so Materialzusammensetzungen ab der Ordnungszahl 13-Aluminium mit einer Nachweisgrenze von 0,1 – 0,02 wt% nachweisen.

Die GDOES Untersuchungen fanden mit einem GDA 750 Glimmentladungsspektrometer, SPECTRUMA ANALYTIK GmbH (Hof) und einer 2,5 mm DC-Quelle (Grimm-Typ) statt. Als optisches System dient ein Paschen-Runge Polychromator (2400 Striche/mm, 750 mm Durchmesser des Rowland-Kreises). Die Untersuchungen wurden mit den hinsichtlich hoher Tiefenauflösung optimierten Analyseparametern 1200 V und 13 mA (Modus: Spannung-Strom konst.) durchgeführt. Die verwendeten Elementlinien sind Fe (238,204 nm), W (429,461 nm), Nb (316,340 nm), Co (345,351 nm), Zn (330,258 nm), Cr (267,716 nm), Ti (334,941 nm), Si (288,157 nm), Al (396,152 nm), S (180,731 nm), O (130,217 nm), N (149,262 nm), C (156,143 nm) und P (177,499 nm).

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit des GDOES-Verfahrens wurden neben den angelieferten Proben spezielle Modellproben hergestellt. Die Nickelphosphorschichten wurden aus einem Milchsäure-Elektrolyten mit der Zusammensetzung Nickelsulfat, Natriumhypophosphit, Milchsäure, Propionsäure und Bleinitrat (1 mg/l Pb^{2+}) bei einem pH-Wert 4,4 - 4,6 abgeschieden. Die dispergierten Partikel aus SiC hatten eine mittlere Korngröße von 2 μm (ESK Ceramic GmbH & Co. KG, Kempten). Sie wurden zu beiden Elektrolyten in einer Konzentration von 25 g/l zugegeben. Die Abscheidung erfolgte unter intensivem Rühren, um ein Absetzen der Partikel zu verhindern.

Die Al_2O_3 -haltigen Dickschichtpassivierungen wurden aus der kommerziellen Passivierungslösung SLOTOPAS HK 31 (SCHLÖTTER GALVANOTECHNIK, Germany) sowie einem Partikelgehalt von 20 g/l sterisch stabilisierten Al_2O_3 -Nanopartikeln (13 nm, ALUC EVONIK, Germany) abgeschieden. Für Vergleichsmessungen zur Schichtdickenmessung erfolgte die Abscheidung von Passivierungsschichten auf polierten (R_a 0,2 μm) und verzinkten Stahlsubstraten mit Tauchzeiten von 75, 120 und 300 s.

3. Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Bei vielen Prüfaufgaben ist es notwendig, schnell Aussagen zur Werkstoffzusammensetzung zu erhalten. In diesem Zusammenhang zeigen die Bilder 1 und 2 die RFA-Spektren für zwei Beispielmessungen aus dem Prüfalltag. Mit der Fundamentalparameteranalyse kann dabei ohne vorherige Kalibrierung die Zusammensetzung selbst komplexer Systeme ermittelt werden. Bei Beispiel 1, Bild 1, handelt sich um eine spezielle spinodale Cu-Legierung für tribologische Anwendungen, die als Brush Wellmann Legierungen bezeichnet werden, ASTM-Bezeichnung C72900.- Bild 2 zeigt die Messung an einem Zirkon do-

tiertem Platindraht. Auch für kleine Probenmengen bzw. Probenoberflächen kann hier standardfrei eine Zusammensetzung bestimmt werden. Im aktuellen Fall bestimmt der Zirkongehalt von 1,44 m-% die Bondbarkeit und Temperaturabhängigkeit der elektrischen Konstanten.

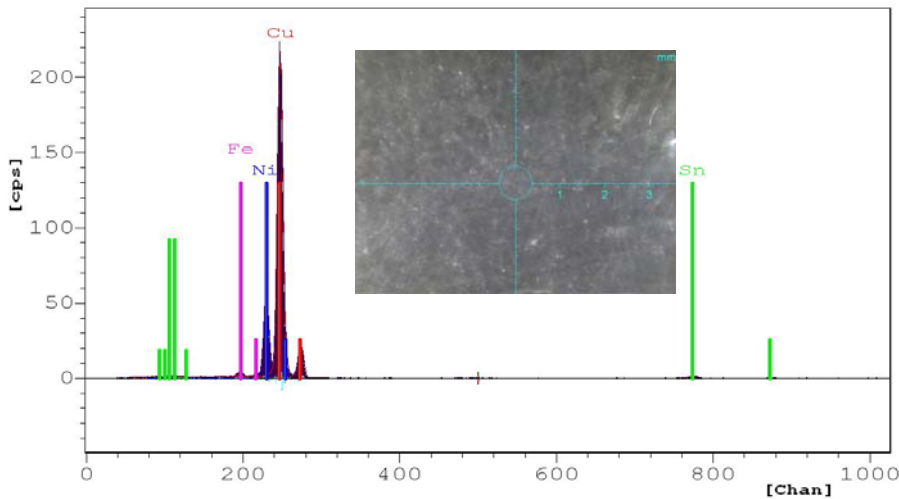


Bild 1: RFA von Werkstoff mit der Zusammensetzung: 74,18 wt% Cu; 18,51 wt% Ni; 6,82 wt% Sn 0,49 wt% Fe ergibt CuNi15Sn8 Handelsname ToughMet3

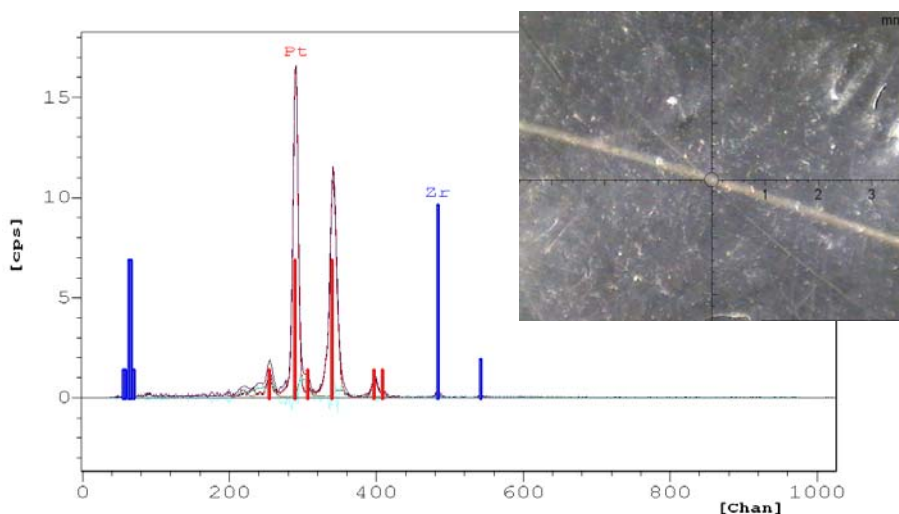
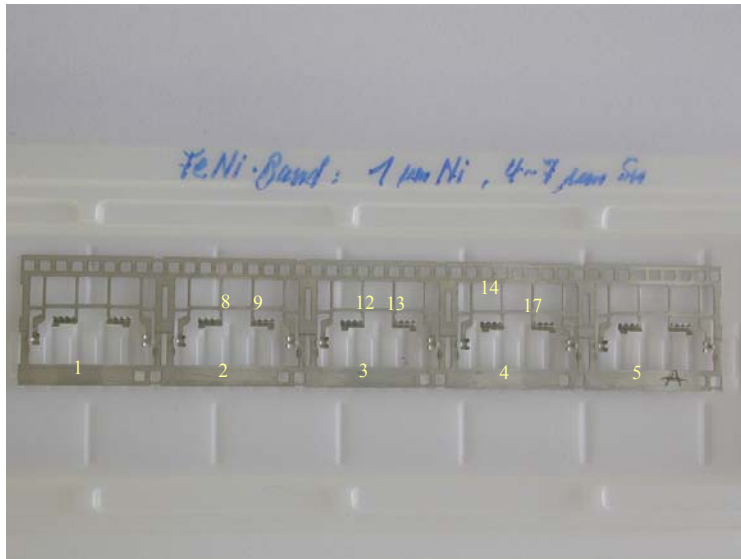


Bild 2: Gemessenes RFA-Spektrum und daraus bestimmte Zusammensetzung eines schwach mit Zirkon legierten Platindrahtes, Durchmesser 0,2 mm 98,56 wt% Pt 1,44 wt% Zr

Bei Schichtsystemen ist es möglich, bei bekannter Zusammensetzung bzw. Grundaufbau aus den gemessenen Intensitäten und einem Modell die Schichtdicken im untersuchten Bereich zu bestimmen. Somit können, wie im Bild 3 gezeigt, Schichtdickenverteilungen an einem Trägerstreifen schnell vermessen werden. Trotz Nickel im Grundwerkstoff FeNi lässt sich die Nickelschichtdicke sicher messen, Farbunterschiede repräsentieren hierbei Dickenunterschiede. Die Schichtdickenvariationen als auch die mit RFA-bestimmten Schichtdicken konnten über metallographische Schlitte verifiziert werden. Mit einer vorgeschalteten Kapillarohtik und der Verwendung eines rechnergesteuerten Messtisches, ORBIS MIKRO-EDXRF-Spektrometer Fa. AMETEK ist es möglich, Elementverteilungsbilder aufzunehmen. Bild 4 zeigt den Querschliff eines elektronischen Geräts, gelötet RoHS-konform. Mit der Einführung von bleifreien Loten seit dem Jahr 2006 treten nach wie vor Lotmischungen, Blasenbildung und fehlerhafte Lötstellen auf. Im Bild 4 ist eindeutig aus dem Silberverteilungsbild ersichtlich, dass bei vier der elf Lötspots eine teilweise Entmischung/Silberausscheidung vorliegt. Mit Hilfe dieser Vorauswahl können diese Erscheinungen z.B. im höher auflösenden Rasterelektronenmikroskop (REM) gezielter untersucht werden.



Pos.	Sn [μm]	Ni [μm]
1	4,52	1,05
2	4,44	1,1
3	4,55	1,19
4	4,29	0,92
5	4,38	1,07
8	3,31	0,67
9	3,35	0,74
10	3,43	0,53
11	3,51	0,6
12	3,03	0,46
13	3,55	0,6
14	3,44	0,63
15	3,27	0,68
16	3,34	0,48
Mittel	3,74	0,77
Stabw.	0,53	0,24

Bild 3: Trägerstreifen Grundmaterial FeNi mit ca. 1 μm Nickel- und 4-7 μm Zinn-Sollschichtdicke und an einzelnen Messpositionen gemessene Schichtdicke



40kV, 80 μA , Totzeit 200ms, Al filter
896 x 100 pixel, 24 x 3 mm

Map, Sn L

Map, Ag L

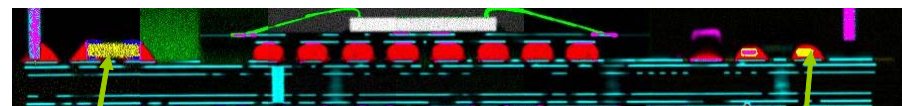
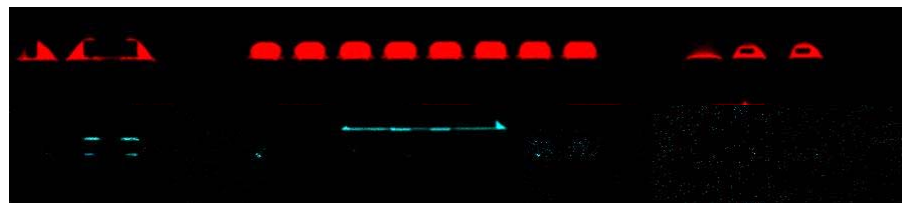


Bild 4: Video-Bild; Zinn und Silber Map; sowie Gesamtmaterialmap des Querschliffes

4. Glimmentladungsspektroskopie (GDOES)

Die optische Glimmentladungsspektroskopie, basierend auf dem kontinuierlichen Materialabtrag in einer Glimmentladungsquelle nach W. Grimm, Bild 5 und dem Spektrometer Design nach Rowland, Bild 6, wurde bereits 1967 zur Bulkanalyse von leitfähigen Proben entwickelt. Verbesserungen im Quellen- und Spektrometerdesign, Einführung der HF-Anregung für die Analyse von nichtleitfähigen Oberflächen sowie Arbeiten zur Elementquantifizierung haben die Anwendung in der Tiefenprofilanalytik erschlossen und führten zu einer weiten Verbreitung der GDOES nicht nur in der Forschung, sondern auch im industriellen Umfeld.

Der Materialabtrag und die Signalentstehung laufen bei der optischen Glimmentladungsspektroskopie in einem Zwei-Stufen-Prozess ab. Nach dem Auflegen der flachen Probe auf den Kathodenblock wird der Entladungsraum mittels O-Ring vakuumdicht verschlossen und anschließend evakuiert. Nach Anlegen der Gleichspannung zwischen Hohlanode und Probe werden die Argon-Atome des Analysegas ionisiert und im elektrischen Feld in Richtung Kathode, d.h. Richtung Probe beschleunigt. Dort lösen sie durch Sputterprozesse Probenatome aus der Oberfläche herauslösen. Die abgetragenen Atome gelangen ins Plasma und werden dort durch Zusammenstöße mit energiereichen Elektronen angeregt bzw. durch Zusammenstöße mit energiereichen Elektronen oder metastabilen Argonionen (Penning-Ionisation) ionisiert. GDOES basiert auf der Detektion der durch diese angeregten Zustände emittierten Photonen. Die auf die Detektoren auftreffende Intensität ist dabei proportional zur Elementkonzentration in der Probe. Zur Aufnahme von Tiefenprofilen erfolgt die Signaldetektion, nach der spektralen Zerlegung im Spektrometerkessel, zeitaufgelöst mittels Photomultiplier- oder einer CCD-Optik, Bild 6. Für weitere Informationen zu den Abtrags- und Anregungsprozessen sowie zur Elementquantifizierung basierend auf dem Ansatz einer konstanten Emissionsausbeute sei auf die entsprechenden Literaturstellen verwiesen [1-3].

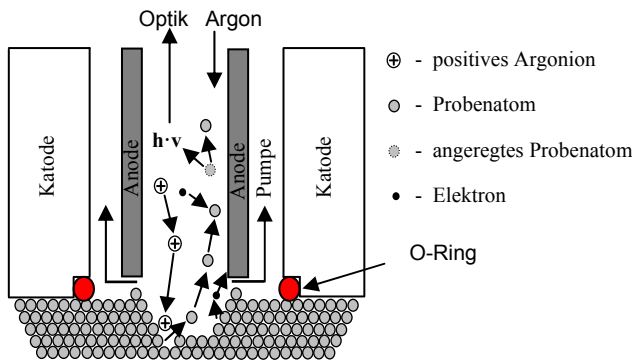


Bild 5: Schematische Vorgänge in der Glimmentladungsquelle nach Grimm [6]

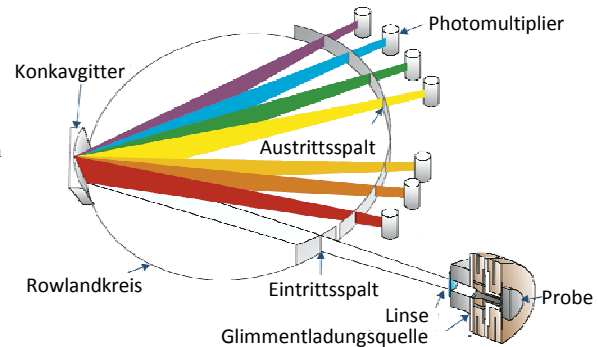


Bild 6: Schematischer Aufbau des Spektrometers [7]

An den folgenden Beispielmessungen einer NiP-Dispersionsschicht sowie Dickschichtpassivierung sollen die Vorteile der optische Glimmentladungsspektroskopie für die Analyse technischer Schichtsysteme aufgezeigt werden. Die hohe Sputterrate und Tiefenauflösung sowie die tiefen Nachweisgrenzen erlauben die wirtschaftliche Untersuchung von Schichtsystemen beginnend in nm-Bereich bis hin zu technischen Schichten mit Dicken über 100 μm . Darüber hinaus ist die Konzentrationsbestimmung für Hauptelemente bis hinab in den Spurenbereich – ppm-Region möglich.

Als erstes Beispiel soll die Untersuchung einer NiP-Dispersionsschicht mit eingelagerten SiC Hartstoffpartikeln vorgestellt werden. Der Phosphor-Gehalt dieser Nickelschichten sowie die Verteilung des Phosphors bestimmen die Korrosionsstabilität der Legierung. Auch Härte, tribologische und magnetische Eigenschaften sind vom Phosphorgehalt abhängig. Die GDOES bietet den Vorteil, dass ohne aufwändige Probenvorbereitung nicht nur gleichzeitig Konzentrationsbestimmungen und Dickenmessungen durchgeführt, sondern auch Elementverteilungen sowie der Partikeleinbau bei Dispersionsschichten im Tiefenprofil bestimmt werden können.

Bild 7 zeigt die ersten 50 μm des Tiefenprofils der NiP-Dispersionsschicht. Aufgrund der Abscheidung unter Laborbedingungen ist ein deutlicher Gradient im P-Gehalt hin zur Oberfläche sichtbar, welcher mit deutlich höherem Präparations- und Zeitaufwand ebenfalls mittels EDX im Rasterelektronenmikroskop (REM) nachgewiesen werden konnte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit kleinen Elektrolytmengen die Konstanz der

Abscheidungsbedingungen nicht gegeben ist. Im Laufe der Abscheidungszeit sinkt die Abscheidungsgeschwindigkeit, mit deren Abnahme der P-Gehalt steigt. Darüber hinaus ist dem Tiefenprofil zu entnehmen, dass ein gleichmäßiger SiC-Partikeleinbau realisiert werden konnte, der anhand des metallographischen Schlibbildes in Bild 8 bestätigt werden kann. Aus dem Tiefenprofil kann ebenfalls die Schichtdicke anhand der Wendepunkte der Hauptelemente im Interfacebereich bestimmt werden. Das Ergebnis korreliert sehr gut mit dem metallographisch bestimmten Wert von 44,6 μm .

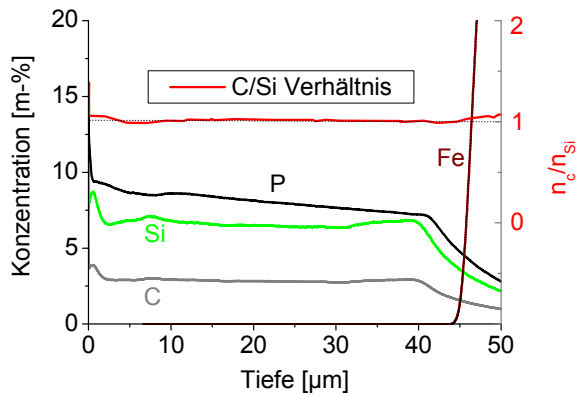


Bild 7: GDOES Tiefenprofil NiP-Dispersionsschicht (SiC-Partikel)

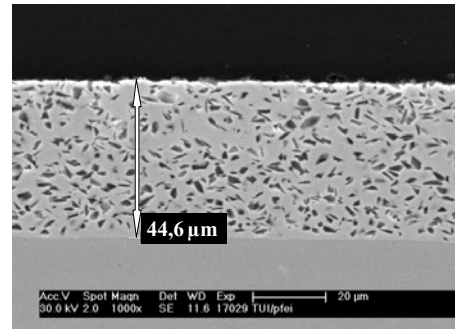


Bild 8: Querschliff der NiP-Dispersionsschicht

Als zweites Beispiel soll die Messung an einer Dickschichtpassivierung auf einem verzinkten Stahlsubstrat vorgestellt werden. Hier wird ersichtlich, dass mittels GDOES eine hohe Tiefenauflösung auch auf rauen technischen Substraten realisiert werden kann.

Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit von Zinkschichten werden diese zusätzlich mit Passivschichten versehen. Im Rahmen der EU-Altautoverordnung ist seit dem 01.07.2007 der Einsatz von Cr(VI)-haltigen Chromatierungen verboten, so dass heute als Ersatz Cr(VI)-freie Dickschichtpassivierungen eingesetzt werden. Für die langfristige Qualitätssicherung ist bei diesen Schichtsystemen die Einhaltung der Prozessparameter deutlich wichtiger und somit auch eine geeignete Schichtanalytik unerlässlich. Aufgrund der geringen Konversionsschichtdicken im Bereich von 300 – 500 nm und der im Vergleich zur Schichtdicke hohen Rauheit technischer Substrate, können die Schichtdicken als wichtigstes Korrosionsschutzmerkmal der erzeugten Dickschichtpassivierungen im Produktionsumfeld nicht direkt bestimmt werden. Vielmehr wird auf aufwändige Salzsprühnebeltests oder gravimetrische Verfahren zurückgegriffen. Hier bietet die GDOES eine interessante Alternative und ermöglicht in wenigen Sekunden eine Aussage zur Schichtdicke und genauen Zusammensetzung der erzeugten Konversionsschichten.

Bild 9 zeigt das Tiefenprofil einer durch 90 s Tauchzeit erzeugten Konversionsschicht, die aus einer Al_2O_3 -haltigen Passivierungslösung abgeschieden wurde. Anhand der Wendepunkte im Tiefenprofil der dargestellten Elemente kann die Schichtdicke zu 310 nm abgelesen werden. Dieser Wert deckt sich sehr gut mit der Bruchkantenuntersuchung im Rasterelektronenmikroskop, Bild 10. Zusätzlich erlaubt die GDOES auch eine Aussage zur Schichtzusammensetzung und zum Partikeleinbau. Die Al_2O_3 Hartstoffpartikel werden verstärkt im oberflächennahen Bereich eingebaut, was durch transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen bestätigt wurde. Der hohe Sauerstoff-Gehalt spiegelt die Bildung aus Zn-, Cr- und Co-Mischoxiden wieder, wobei das ZnO den Hauptbestandteil bildet. Bei der Schwefelkonzentration ist davon auszugehen, dass S als Sulfat vorliegt, möglicherweise gebunden an Chrom.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu Schichtdickenbestimmungen an Testproben, die für Vergleichsmessungen mittels REM und Ellipsometrie auf polierten und verzinkten

Stahlsubstraten abgeschieden wurden ($R_a < 0,23 \mu\text{m}$). Die ermittelten Schichtdickenwerte korrespondieren über den gesamten Schichtdickenbereich sehr gut mit den GDOES-Ergebnissen und bestätigen somit die hohe Tiefenauflösung des Verfahrens auf rauen Oberflächen.

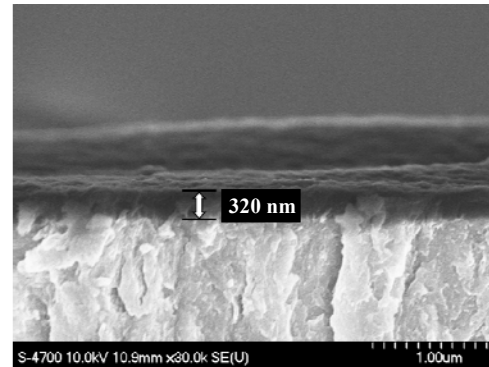
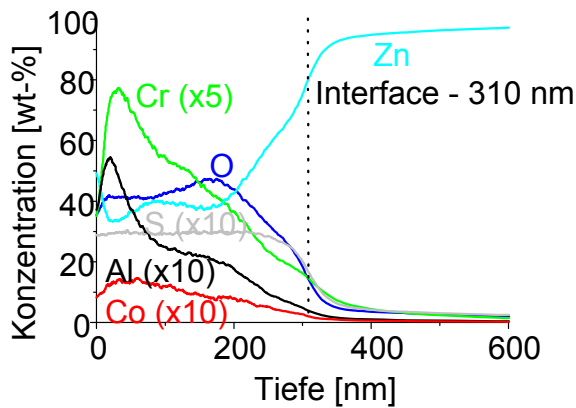


Bild 9: GDOES Tiefenprofil Al_2O_3 -haltige Dickschichtpassivierung

Bild 10: REM Bruchkantenuntersuchung der Dickschichtpassivierung

Tabelle 1: Vergleich der GDOES Schichtdickenergebnisse mit Referenzverfahren

Tauchzeit	Bruchkante - REM	Ellipsometrie	GDOES
75 s	254 nm	260 nm	250 nm
120 s	326 nm	330 nm	320 nm
300 s	578 nm	630 nm	610 nm

In Bild 11 ist das GDOES-Tiefenprofil einer TiAlN -Schicht auf einem WC-Substrat mit Mischkarbidanteilen (TiC , NbC , TaC , TiN) dargestellt. An diesen Werkzeugen/Wendeschneidplatten traten mangelnde Standzeiten auf. Als Ursache konnte eine Anreicherung von NbC und TiN im Interfacebereich zum Hartmetallsubstrat und dem damit verbundenen Zähigkeitsabfall festgestellt werden. Das Beispiel veranschaulicht, dass mit GDOES schnelle Aussagen zur Stöchiometrie- und Anreicherungsbestimmung möglich sind.

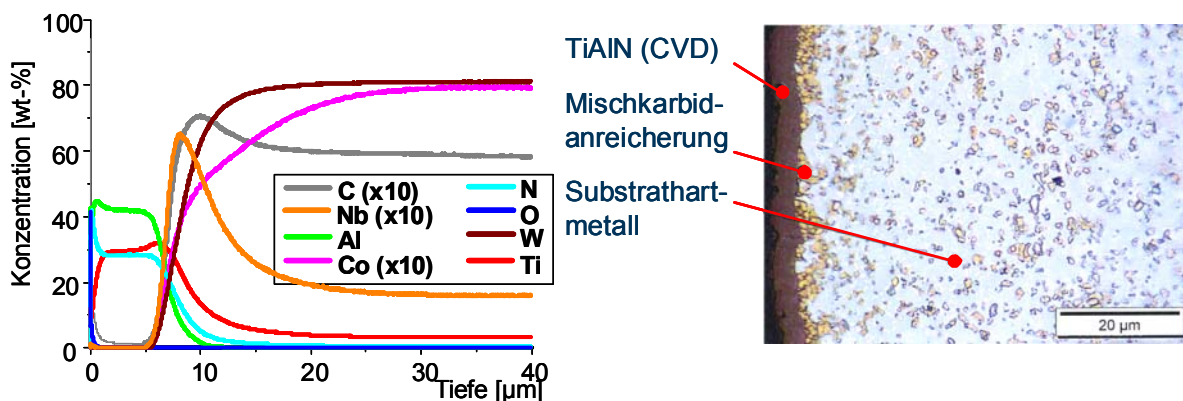


Bild 11: GDOES-Tiefenprofil an einem AlTiN -Schichtsystem auf WC-Hartmetall

Vergleichsmessungen an dieser Probe mit der RFA, Bild 12, zeigen im 40 µm tiefen GDOES-Messkrater (roter Punkt) eine geringere Nb-Konzentration an, als bei Messung an der Oberfläche. Ein Tiefenprofil ist mittels RFA-Messung nicht möglich. Ebenso können die Leichtelemente Kohlenstoff / Stickstoff und auch hier Aluminium nicht korrekt gemessen werden, deshalb sind die angegebenen Konzentrationen wegen der Aufrechnung und Normierung auf 100% fehlerhaft.

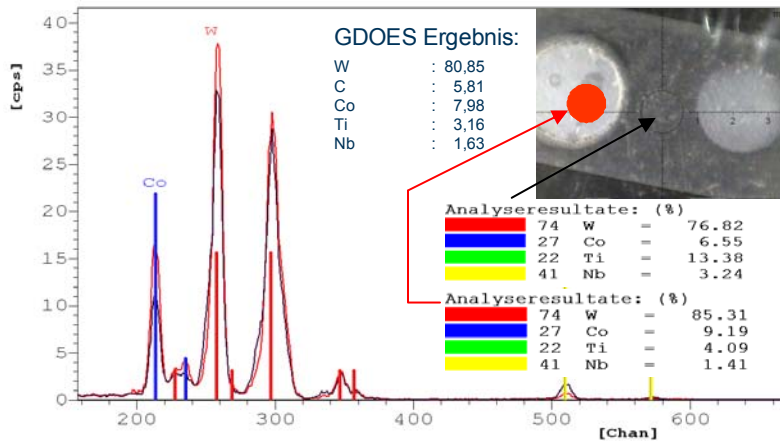


Bild 12: RFA-Spektrum und Analyseergebnisse an gleicher Probe aus Bild 11

5. Zusammenfassung

Für eine umfassende Materialcharakterisierung ist die Kombination von Analyseverfahren notwendig, dabei sollten die spezifischen Vorteile der Einzelverfahren genutzt werden. Die RFA-Analyse ist eine sehr schnelle und zuverlässige Methode für die qualitative und quantitative Elementbestimmung sowie Schichtdickenbestimmung. Aufgrund der verwendeten Detektorsysteme und des generellen Messaufbaus existieren aber Einschränkungen im Leichtelementbereich (H, B, C, N, O, Mg, (Al)). Zerstörungsfreie schnelle Schichtdickenanalysen auch komplexer Schichtfolgen und seit neuestem auch eine hohe laterale Auflösung in Kombination mit Flächen-Mappings sind möglich.

Mittels der GDOES-Analyse sind schnelle Aussagen zu Elementverläufen von Schichten im Mikrometerbereich (bis 200 µm) bis hinab in den Nanometerbereich, sowie von Haupt- und Spurenelementen einschließlich Wasserstoff, möglich. Der Nachweis von Oberflächenkontaminationen, sowie Kontaminationen im Interfacebereich, ermöglicht eine hervorragende Aussagekraft vor allem in Kombination mit weiteren Messverfahren.

Referenzen

- [1] R. Payling, D. Jones, A. Bengtson (Ed), Glow Discharge Optical Emission Spectrometry, J. Wiley, New York, 1997
- [2] R.K. Marcus, J.A.C. Broekaert (Ed), Glow Discharge Plasmas in Analytical Spectroscopy, J. Wiley, New York, 1997
- [3] T. Nelis, R. Payling, Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy: A Practical Guide, RSE, 2003
- [4] V. Röbiger, B. Nensel: Analyse von Schichten mit Röntgenfluoreszenz; Jahrbuch Oberflächentechnik 2004, Eugen Leuze Verlag, ISBN 978-3874801997, S. 1-36
- [5] V. Röbiger: Richtigkeit und Rückführbarkeit bei der Schichtanalyse mit Röntgenfluoreszenz; in: Galvanotechnik 6(2005), S. 1311-1318
- [6] W. Grimm: Eine neue Glimmentladungslampe für die optische Emissionspektroskopie; Spectrochim. Acta, Part B, 23 (1968) S. 443-454
- [7] M. Wilke, U. Schmidt: Anwendung der optischen Glimmentladungsspektroskopie (GDOES) in der Analytik galvanisch erzeugter Schichten, XVI. Workshop Plasma- und Oberflächentechnik, 25./26. Juni 2009, Ilmenau