

„Röntgen“ kann noch mehr

Lothar SPIESS*, Gerd TEICHERT**

* TU Ilmenau Institut für Werkstofftechnik, Gustav-Kirchhoff-Str. 5;

** MFPA Weimar, Prüfzentrum Schicht- und Materialeigenschaften an TU Ilmenau
(lothar.spiess@tu-ilmenau.de)

Kurzfassung. Die Radiographie ist nicht das einzige Verfahren zur Bauteil- und Materialcharakterisierung. Zerstörungsfreie Materialcharakterisierungsverfahren unter Einsatz von Röntgenstrahlen sind auch die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und die bisher vernachlässigte Röntgendiffraktometrie (XRD) einschließlich Kleinwinkelstreuung (SAXS) und Röntgenreflektometrie (XRR, GISAXS). Die Leistungsfähigkeit, die Grenzen und die Anwendbarkeit dieser anderen Röntgenverfahren werden vorgestellt und so die klassische Radiographie um weitere zerstörungsfreie Materialcharakterisierungsverfahren ergänzt. Es werden Beispiele an Materialanalysen an Messingwerkstoffen gezeigt.

Einführung

Die zerstörungsfreie Materialprüfung wird sehr häufig auf gängige Verfahren wie Radiographie, Ultraschall, Thermografie und Wirbelstromverfahren eingeschränkt. Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit Röntgenstrahlen ist auch unter dem Begriff Röntgen-Grobstrukturprüfung bekannt und wird seit Jahrzehnten zum Aufspüren von Rissen, Lunkern, größeren Materialinhomogenitäten etc. erfolgreich angewendet.

Durch den Einsatz von Bauteilen mit immer höherer Komplexität in Verbindung mit angepassten Werkstoffen und erhöhten Sicherheitsanforderungen kommt der zerstörungsfreien Materialcharakterisierung zur Bestimmung von Materialkennwerten ein immer größerer Stellenwert zu. Die Beziehung „Struktur-Gefüge-Eigenschaften“ wird immer bedeutender. Zerstörungsfreie Materialcharakterisierungsverfahren unter Einsatz von Röntgenstrahlen sind neben der Radiographie/Computertomographie (CT) incl. der stark zunehmenden Mikro-CT zur Beurteilung der Homogenität von Ausscheidungen im Material (z. B. Pb in Messing oder Stahl [1, 2]), die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) [3] zur Bestimmung von Zusammensetzung und Schichtdicken sowie die bisher vernachlässigte Röntgendiffraktometrie (XRD) mit der klassischen qualitativen Phasenanalyse, der quantitative Phasenanalysen, der Texturbestimmung, der röntgenografischen Eigenspannungsanalyse (RSM) [4]. Mit Hilfe der Kleinwinkelstreuung (SAXS) lassen sich Objektgrößen im unteren Nanobereich (< 10 nm) und gegebenenfalls auch Delaminationen in Faserverbundwerkstoffen aufspüren [5]. Mittels der Röntgenreflektometrie (XRR) lassen sich Schichtdicken, Dichten und Dichtegradienten (GISAXS) und Interfacerauheiten messen [4]. Bestimmt man die Struktur und das Gefüge eines Werkstoffs mit diesen Verfahren, dann lassen sich häufig die Eigenschaften bzw. Eigenschaftsänderungen sehr genau und auch zerstörungsfrei ermitteln. Dies wird hier an defekten, rissbehafteten Heizungsver-schraubungen aus Messing, an strahlbehandelten Werkzeugen und einem kunsthistorischen Objekt gezeigt.



Verfahren und Messgrößen

Röntgenfluoreszenzverfahren (RFA)

Wird eine zu untersuchende Probe mit polychromatischer Röntgenstrahlung, Gamma- oder Ionenstrahlung angeregt, so werden Kern nahe Elektronen von inneren Schalen des Atoms herausgeschlagen. Elektronen aus höheren Energieniveaus springen auf die freien Plätze unter Abgabe der dabei freiwerdenden Energie in Form von elementspezifischer Fluoreszenzstrahlung. Diese Fluoreszenzstrahlung wird von einem Strahlungsdetektor entweder auf die Energie (EDRFA) oder die Wellenlänge (WDRFA) ausgewertet. Die RFA ermöglicht prinzipiell eine Identifizierung und Konzentrationsbestimmung aller Elemente ab Ordnungszahl $Z = 4$ (Beryllium). Sichere quantitative Analysen sind erst ab Fluor möglich, da die Röntgenstrahlung der leichteren Elemente sehr stark absorbiert wird, dass sie gar nicht erst in den Detektor eindringen kann. Die heute üblichen Halbleiterdetektoren können in Normalatmosphäre erst ab Magnesium/Aluminium die Energie der Fluoreszenzstrahlung sicher messen. Zur Anregung bestimmter, gewünschter Elemente oder zur Unterdrückung von Hintergrundrauschen können Filter aus verschiedenen Elementen zwischen die Röntgenquelle und die Probe geschaltet werden. Die Energieauflösung beschreibt die Trennschärfe zweier spektraler Peaks. Sie wird meist für die Röntgenenergie von 5,9 keV (Mn-K α -Linie) angegeben und sind im Bereich von 600 eV bis 120 eV. Es gibt Überlagerungen von z.B. Si-K α -Linien mit W-M-Linien oder S-K α - mit Mo-L-Linien. Die Auflösung eines WDXRF-Systems ist abhängig vom Detektorkristall und es sind bei längeren Messzeiten Auflösungen von 20 eV bis 5 eV möglich. Mit WDXRF-Systemen können auch nahe beieinander liegende Peaks noch sicher getrennt werden.

Für die Quantifizierung von Mengenanteilen wird ausgenutzt, dass die Intensität einer Fluoreszenzlinie letztlich der Menge an Atomen dieser Sorte im angeregten Probenvolumen proportional ist. Durch Kalibrierung mit Standardproben oder mit der Fundamentalparametermethode lassen sich solche Mengenbestimmungen sehr genau, schnell und völlig zerstörungsfrei bestimmen. Die Messung der Intensität der Fluoreszenzstrahlung für ein chemisches Element wird auch zur Schichtdickenbestimmung ausgenutzt.

An Messingverschraubungen für Heizungsverteilungen traten nach dem Einbau verstärkt Undichtigkeiten heraus. Es zeigte sich, dass dabei trotz gleichen Anzugsmoment mal Risse in den Verschraubungen auftraten und an anderen Bauteilen nicht. Es wurden von Schadens- und Gutteilen metallografische Schliffe erstellt und im Schadensteil eindeutig Risse festgestellt werden. Ebenso treten Unterschiede im Gefügebild auf.

RFA-Messungen an den Dichtflächen und am Schliff zeigen Unterschiede im Zink-Kupfergehalt die gerade im Übergangsbereich der α - und β -Messingphase liegen, siehe Phasen- und Eigenschaftsdiagramm aus [2]. Die unterschiedlichen Zusammensetzungen bewirken auch Härteunterschiede, Tabelle 1 und lassen so indirekt auf eine andere Konzentration der spröderen und härteren β -Messingphase schließen.

Tabelle 1. Ergebnisse der RFA-Analyse in [wt%] an Messingbauteilen und Härte HV 1

	Cu	Zn	Pb	HV1
Gutteil - Dichtfläche	61,9	37,1	1,0	143
Schadensteil - Dichtfläche	57,7	40,3	2,0	195
Gutteil - Schliff	61,2	36,9	1,9	108
Schadensteil - Schliff	57,8	39,5	2,6	147

Röntgendiffraktometrie (XRD) mit Phasenanalyse, Textur- und Eigenspannungsbestimmung (RSM)

Tritt ein monochromatischer Röntgenstrahl mit einer Probe in Wechselwirkung und wird dieser Strahl winkelabhängig eingestrahlt und im gleichen Winkel in Rückstreuung detektiert, dann ergeben sich bei Existenz von Netzebenen parallel zur Oberfläche bei Erfüllung der BRAGG'schen Gleichung Beugungsinterferenzen. Damit lassen sich durch verschiedene Mess- und Auswerteverfahren der Beugungsinterferenzen die nachfolgenden Materialparameter zerstörungsfrei ermitteln [4].

- kristalline Legierungsphasen; tritt eine intermetallische Phase auf, sind sofort größere Härte, Sprödigkeit bzw. Rissanfälligkeit ableitbar
- quantitative Phasenanalyse – Bestimmung der Mengenanteile der vorkommenden Phasen
- Kristallitgröße im Bereich 5 - 120 nm, tritt keine Verbreiterung der Interferenz auf, ist die Kristallitgröße größer als 120 nm
- Verbreitern der Interferenz in Folge von Fehlern im Kristallit – Spannungen III. Art; dies ist proportional der Versetzungsdichte, der Konzentration an Leerstellen bzw. weiterer Fehlern 0-dimensionaler Art
- hochpräzise Messung der Verschiebung der Beugungspeaks in Abhängigkeit vom Verkipfungswinkel Ψ und Verdrehungswinkel ϕ und daraus Bestimmung der röntgenografischen Eigenspannungen I. und II. Art im einachsigen bis dreiachsigen Zustand
- auftretende Textur - die Intensität einer Beugungsinterferenz ist proportional zum Strukturparameter; damit lässt sich an Hand von Intensitätsverhältnissen der Texturgrad der Probe bestimmen [7]; die Textur lässt sich noch besser mit der Aufnahme von Polfiguren und der Bestimmung der Orientierungsdichtefunktion ermitteln

In Abb. 1 sind zwei Beugungsdiagramme am Querschliff eines Messingbauteils gezeigt, die sich bezüglich auftretender Phasen unterscheiden. Im Schadensteil tritt zusätzlich die β -Messingphase auf. In Tabelle 2a sind die aus den Diffraktogrammen bestimmten Phasenanteile aufgeführt. Der schon durch RFA festgestellte höhere Zinkgehalt im Schadensteil bewirkt die verstärkte Ausbildung der intermetallischen β -Messingphase bezüglich Phasenzusammensetzung und ist somit die Ursache für die mögliche Rißanfälligkeit [6].

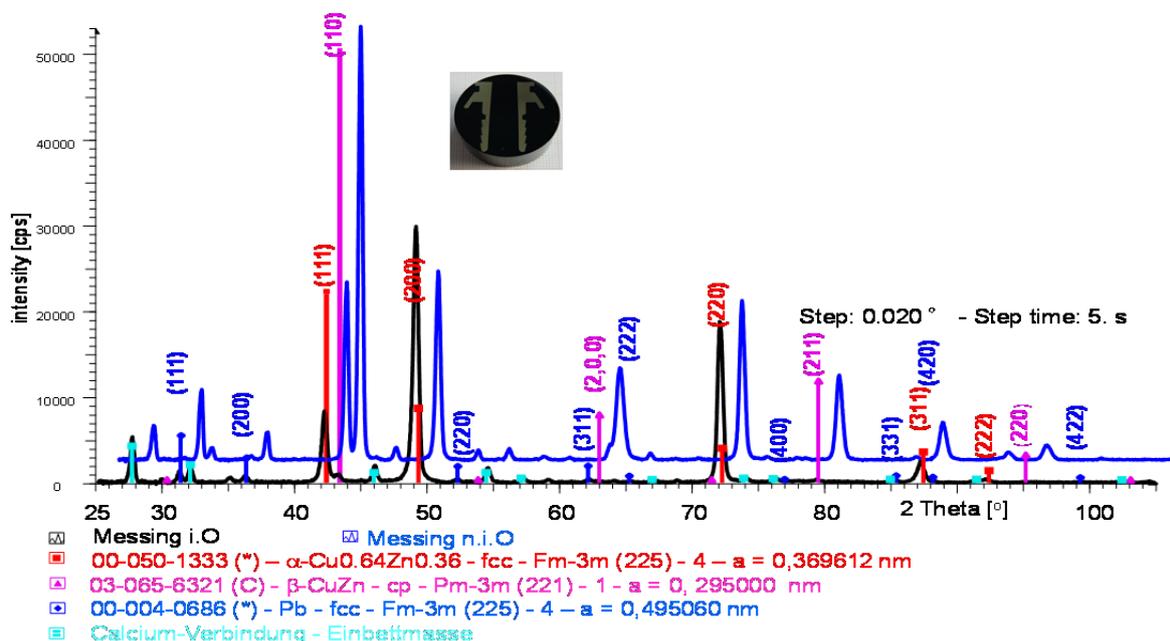


Abb. 1: Beugungsdiagramm und identifizierte Phasen von Gut- und Schlechtteil aus Messing

Misst man bei verschiedenen Verkippungswinkeln Ψ jeweils einen Beugungspeak, z.B. β -Messing (211), bestimmt die Peaklage und trägt die erhaltenen Werte über $\sin^2\Psi$ auf, dann lassen sich mit den elastischen Konstanten der einzelnen Phasen die Eigenspannungen I. und II. Art ermitteln, Abb. 2. Bei untexturierten Proben wird die Peakintensität mit zunehmendem Verkippungswinkel kleiner, bei texturierten Proben ergeben sich höhere Peakintensitäten bei $\Psi > 0^\circ$ als bei $\Psi = 0^\circ$

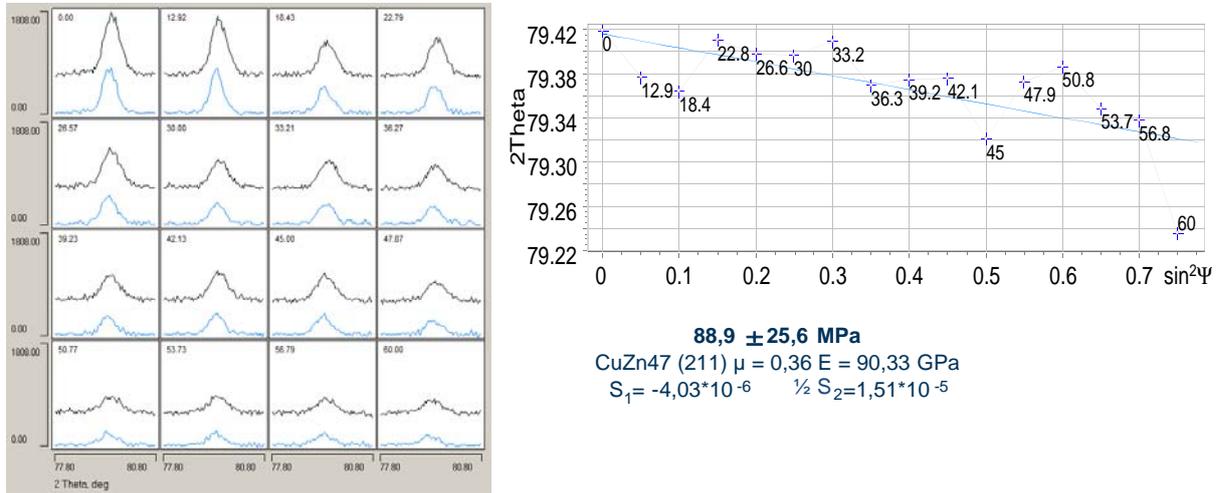


Abb. 2: Beugungsinterferenzen bei verschiedenen Verkippungswinkeln und Auftrag Peakpositionen über $\sin^2\Psi$ zur Bestimmung der Spannung – positive Spannungswerte ergeben Zugspannungen, negative Werte ergeben Druckspannungen

In Tabelle 2b sind die ermittelten Spannungswerte aufgeführt. Dem nahezu spannungsfreien Zustand im Gutteil stehen Zugspannungen – positive Werte - im Schadensteil entgegen. Zugspannungen vermindern die Festigkeit bei einer Belastung – beim Anpressen von Schläuchen. Die Empfindlichkeit der Spannungsmessung zeigen die unterschiedlichen Werte der Messung an der Dichtungsseite. Die Dichtungsseite wurde plangedreht. Beim Drehen entstehen meist Druckspannungen, die nachgewiesen wurden.

Tabelle 2. a) Bestimmung Phasenanteile [wt%] mit RIETVELD Methode
b) Bestimmung der röntgenografischen Spannung [MPa] an verschiedenen Phasen und Interferenzen

Phasenanteil [wt%]	α -Messing	β -Messing	Blei	RWP-FIT	Tiefenbereich
Gutteil	90,9 %	8,55 %	0,55 %	14,35	9 μ m - BB
Schadensteil	42,54	55,8	1,66	14,89	9 μ m - BB
Gutteil	98,28 %	0,95 %	0,77 %	16,26	2,2 μ m - GID
Schadensteil	71,75 %	27,79 %	0,45 %	10,37	2,2 μ m - GID

Spannung [MPa]	α -200	α -220	α -311	β -211	
Gutteil - Dichtfläche	-401,8 \pm 24,5	-141,7 \pm 21,1	-194,6 \pm 22,2	nicht messbar	texturiert
Schadensteil - Dichtfläche	-539,6 \pm 33,9 -512,7 \pm 18,4	-303,6 \pm 24,7 -373,9 \pm 81,5	-366,6 \pm 37,2 -405,0 \pm 61,7	-572,6 \pm 81 -234,6 \pm 52,7	normal
Gutteil - geschliffene Dichtfläche	nicht gemessen	14,6 \pm 47,7	-44,5 \pm 10,8	nicht messbar	texturiert
Schadensteil - geschliffene Dichtfläche	nicht gemessen	124,3 \pm 110,2	-76,1 \pm 13,0	70,1 \pm 129,6	texturiert
Gutteil - Schliff	25,6 \pm 19,8	-5,6 \pm 20,2	-19,6 \pm 21,7	nicht messbar	texturiert
Schadensteil - Schliff	201,9 \pm 23,2	109,6 \pm 15,9	49,0 \pm 15,5	88,9 \pm 25,6	normal

Druckspannungen müssen bei Belastung überwunden werden um zu Rissen, zu Bauteilversagen zu führen. Entfernt man durch metallographisches Präparieren die Bearbeitungszone – Dichtfläche geschliffen - und misst erneut die Spannung, treten kleinere Beträge an Druckspannungen auf. Eine Aussage zur Bewertbarkeit der erhaltenen Spannungswerte ist immer deren Schwankung, ermittelt aus der Abweichung der Regressionsgerade beim Auftrag über $\sin^2\Psi$ zu den gemessenen BRAGGwinkeln bei entsprechender Verkippung Ψ . Ist dieser Wert kleiner 20% des Messwertes, dann liegt eine sichere Messung vor. Schwankt der Messwert zwischen -50 – 50 MPa, dann wird Spannungsfreiheit angenommen. Bei Schwankungen von größer 20 % bei größeren Messwerten sind sehr oft Texturen vorhanden. Der Auftrag über $\sin^2\Psi$ ist bei starken Texturen nicht linear sondern eher S-förmig. Bei starken Texturen ist die Anwendung der $\sin^2\Psi$ Methode nur eingeschränkt möglich [4].

Wegen der Aussagekraft von Spannungsmessungen werden diese oft zur Beurteilung von Strahlnachbehandlungen an Bauteilen eingesetzt. Hoch belastete Bauteile/Bauteiloberflächen sollten eine Druckspannung an der Oberfläche aufweisen. Bei bestimmten Legierungsbildungen bzw. Herstellungsverfahren entstehen aber in den Bauteilen Zugspannungen. Über Messungen des Spannungszustandes lassen sich beim nachträglichen Strahlen die optimalen Strahlparameter ermitteln und auch deren Einhaltung im Prozess kontrollieren. Abb. 3 zeigt die Veränderung der Beugungsinterferenzen an Zr(C, N)-Schichten vor und nach der Strahlnachbehandlung, ebenso die jeweils ermittelten Spannungswerte.

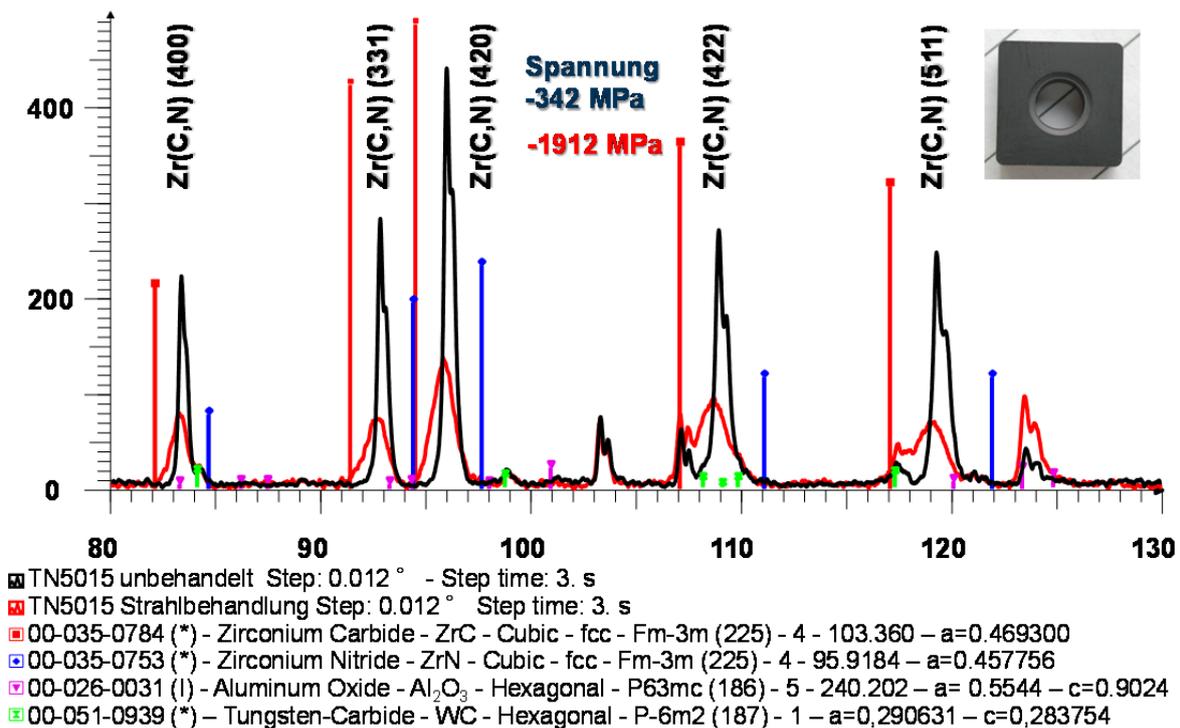


Abb. 3: Beugungsdiagramm von Zr(C, N)-Schichten auf Wolframcarbidgegrundkörper vor und nach Strahlbehandlung, ebenso jeweils ermittelte Spannungswerte

Texturen geben Aussagen zum Bearbeitungszustand eines Bauteils wider. Durch Walzen werden viele Kristallite in Vorzugsrichtungen ausgerichtet. Polykristallinität geht in einen Vorzugsrichtungszustand – Textur – über. Mit Bestimmung des Texturzustandes lassen sich so z.B. Bearbeitungsverfahren an Bauteilen nachträglich völlig zerstörungsfrei nachweisen [7].

Reflektometrie (XRR, GISAXS)

Im Zeitalter der Anwendung von dünnen Schichten wird es immer wichtiger, exakte Kenntnisse der Schichtdicke und der Oberflächen- und Grenzflächenrauheiten zerstörungsfrei zu bestimmen. Die Totalreflexion und das Eindringvermögen der energiereichen Röntgenstrahlung werden zur Schichtdickenbestimmung ausgenutzt. Die Röntgenreflektometrie (XRR) erlaubt es, Schichtdicken d an ebenen Proben (bei dieser Methode ist es unerheblich, ob die Schicht aus kristallinem oder amorphem Material besteht) im Bereich von 2 – 300 nm mit einer reproduzierbaren Genauigkeit von 0,1 – 0,3 nm zerstörungsfrei zu messen. In der Reflektometrie ist ein Winkelbereich von 0° - ca. 5° interessant. Das Reflexionsverhalten lässt sich mit den FRESNEL-Gleichungen aus der Optik beschreiben. Die Unterschiede im Brechungsindex und die interessanten Winkelbereiche sind aber entgegen der Lichtoptik wesentlich kleiner. Es ist nur notwendig, dass Brechzahlunterschiede zwischen Schicht und Substrat existieren. Oftmals weisen gerade Schichten aus dem gleichen Material wie das Substrat durch den Schichtherstellungsprozess geringfügige Dichteunterschiede auf. Damit existiert auch ein Unterschied in der Elektronendichte an den Grenzflächen der Schicht und damit ein Unterschied in der Brechzahl, der bei Anwendung mit Röntgenstrahlung nachweisbar ist.

Der Brechungsindex n für Röntgenstrahlen ist immer kleiner eins. Bis zu einem bestimmten materialabhängigen Einfallswinkel, dem kritischen Winkel θ_C , dringt die Röntgenstrahlung nicht in die Probe ein, es findet eine äußere Totalreflexion an der Trennfläche Luft/Oberfläche Material/Schicht statt. Der Strahl wird wie an einem Spiegel reflektiert. Der Totalreflexionswinkel ist eine Funktion der Elektronenkonzentration und der Dichte in der Schicht. Bei weiterer Vergrößerung des Einfallswinkels dringt der Röntgenstrahl in die Schicht ein. An einem Schicht-Substrat-System wird damit nur ein Teil der Strahlung reflektiert, der „Rest“ dringt in die Schicht ein. Es gibt daher zwei Winkel der Totalreflexion, und zwar an den Grenzflächen Luft/Schicht und an der Grenzfläche Schicht/Substrat. Die reflektierte Intensität oszilliert, es treten lokale Maxima und Minima auf. Die Oszillation kommt dadurch zustande, dass der Oberflächenreflexionsstrahl und der Grenzflächenreflexionsstrahl wegen des entstehenden Phasenunterschiedes miteinander interferieren. Auf die Schärfe des entstehenden Interferenzbildes wirken sich Oberflächenrauheiten und die optischen Dichten von Schicht- und Substratmaterial aus. Die intensivsten und schärfsten Interferenzbilder erhält man, wenn der Brechungsindex des Substratmaterials kleiner ist als der Brechungsindex des Schichtmaterials sowie Oberfläche und Grenzfläche extrem glatt sind.

Die Schichtdicke d lässt sich aus dem Abstand der Oszillationsmaxima bestimmen. Die Grenzflächenrauheit, also eine „vergrabene“ Rauheit, ist ebenfalls messtechnisch zugänglich. Erklärbar wird die Zugänglichkeit dieser Größe damit, dass an der rauen Ober- bzw. Grenzfläche eine diffuse Reflexion auftritt, die die reflektierte Intensität schwächt. Die Rauheit kann mit lokalen Dickenschwankungen erklärt werden.

Mit einer Zielschichtdicke von je 100 nm sind Multilayerschichten auf Silizium mittels Sputterverfahren an einer neuen Anlage mit noch unbekanntem Sputterraten hergestellt worden. Das gemessene XRR-Diagramm ist in Abb. 4 zu sehen. Deutlich wird, dass unabhängig vom Schichtaufbau die Totalreflexionswinkel nach ihrer Dichte auftreten, kleine Totalreflexionswinkel bei kleinen Dichten. Die danach auftretenden Oszillationen kennzeichnen schon die ersten Einzelschichtdicken. Die Oszillationen im Winkelbereich $>1,5^\circ$ sind dann zum Teil Mehrfachüberlagerungen an den hier 3 Grenzflächen.

Mit dieser Methode werden derzeit kommerzielle Multilayerschichten für Röntgenoptiken zu 100% als zerstörungsfrei geprüft.

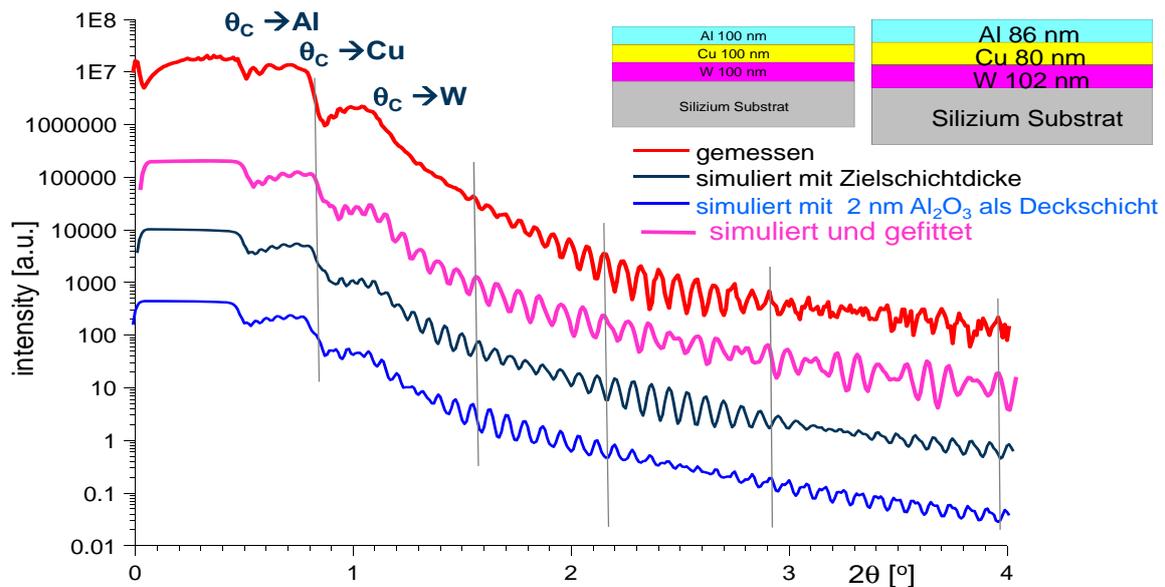


Abb. 4: XRR Messdiagramm und simulierte bzw. angefittete Diagramme und Bestimmung der Einzelschichtdicken der Multilayerschichtenfolge

Kleinwinkelstreuung (SAXS)

Mit SAXS, der Röntgenkleinwinkelstreuung, werden Partikel und Domänen in Nanogröße (im Bereich zwischen 1 nm und 200 nm) analysiert, die bei kleinen Winkeln streuen. Atome und interatomare Distanzen streuen zu großen Winkeln. Das erzielte Röntgenweitwinkel Streuungsmuster liefert Informationen über den Phasenzustand, die Kristallsymmetrie und die Molekularstruktur. Partikel können Proteine und Polymere in flüssiger Lösung, Defekte oder amorphe Strukturen in Festkörpern sein. Diesen Systemen fehlt die Eigenschaft der Ausbildung einer langreichweitigen Ordnung, wie sie für klassische Diffraktometermessungen notwendig ist. Ferner sind diese Strukturen unorientiert, d.h. es liegt keine bevorzugte Ausrichtung vor. Mit SAXS erhält man Informationen über Größe, Gestalt und Dispersivität der untersuchten Materialien. Gegenüber dem Umgebungsmedium betrachtet man diese Strukturen als teilchenförmige Inhomogenitäten. Es ist im Bereich der Kleinwinkelstreuung (SAXS, SANS, SALS) üblich, die Streuwinkel in q anzugeben, und nicht als Streuwinkel 2θ , der normalerweise im Bereich XRD verwendet wird. Der Vorteil: Es können Ergebnisse erzielt werden, die von der Wellenlänge unabhängig sind, q ist auch als Impulsübertragung bekannt.

$$(1.1) \quad q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta$$

Auf diese Weise können Aussagen über die Nanostruktur der Probe gewonnen werden. Eine theoretische Beschreibung der Streuung an solchen Partikeln muss folglich sowohl deren endliche Größe berücksichtigen, wie auch dem Umstand gerecht werden, dass die Teilchen ungeordnet im Raum verteilt sind und keine bevorzugte Orientierung besitzen [5].

Mit SAXS lassen sich nachfolgende Materialgrößen bestimmen.

- Form (Bestimmung von Langperioden, Charakterisierung der Hohlraumstruktur)
- Größe (mittlere spezifische innere Oberfläche)
- Innenstruktur
- Kristallinität
- Porosität (Oberfläche pro Volumen, mittleres Porenvolumen, mittlere Porendurchschusslänge)

Anwendung der SAXS sind:

- Charakterisierung der Hohlraumstruktur z. B. von Cellulosefasern
- Ermittlung von Langperioden z. B. von Polypropylen-Bändchen
- Charakterisierung der Hohlraumstruktur in Knochenersatzstoffen
- Delamination von Fasern [8]

Zusammenfassung

Die zerstörungsfreie Prüfung zur Bestimmung der Fehler in Messingproben bzw. in Schlif-
fen (Rückstellprobe) mit den dokumentierten Fehlern konnte gezeigt werden. Röntgenver-
fahren außerhalb der Radioographie liefern Ergebnisse zur chemischen Zusammensetzung,
zur Ausbildung von Phasen, zur Ausbildung von inneren mechanischen Spannungen und
zur Textur. Am Beispiel des Messings wurde die Existenz der harten und spröden interme-
tallischen β -Messingphase nachgewiesen. Die Messung der Spannungen bestätigt die Er-
gebnisse der Phasenanalyse, die in Schadensteilen vorkommende intermetallische β -Mes-
singphase verursacht z.T. ungünstigere Spannungszustände.

Diese hier vorgestellten Röntgenverfahren sind somit in der Lage, zerstörungsfrei
notwendige Materialparameter zur Ermittlung der Materialeigenschaften zu bestimmen. Es
werden bei speziellen Werkstoffgruppen und Bauteilen schon diese Verfahren erfolgreich
in der zFP eingesetzt.

Die Verfahrensweise und die Messabläufe erscheinen dem klassischen Werkstoff-
prüfer auf Grund der Komplexität und auf Grund der nicht einfach und schnell zu verste-
henden Grundlagen kompliziert und fremd. Es ist aber notwendig, diese Verfahren weiter
zu entwickeln und zu noch breiteren Einsatz zu bringen, denn diese Verfahren sind
manchmal die einzigen Verfahren, die Ergebnisse bzw. Erkenntnisse liefern können, siehe
Beispiele kunsthistorische Objekte [7], Rückstellproben, Nanopartikeleinschlüsse, Delami-
nationen oder Röntgenoptiken.

Diese Verfahren gehören unzweifelhaft auch zu den zFP-Methoden.

Referenzen

- [1] Stock, S. R.: MicroComputed Tomography: Methodology and Applications; 2008; CRC Press, ISBN-978-1420058765, 336 Pages
- [2] Spieß, L.; Wilke, M; Kais, A.; Teichert, G.: Materialcharakterisierung an Messing-Legierungen, Computertomographie zur Gefügebeurteilung; DGZFP-Jahrestagung 2012, Graz, Poster P20, Tagungsband
- [3] B. Beckhoff u.a.: Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis. Springer, 2006, ISBN 3-540-28603-9
- [4] Spieß, L.; Teichert, G.; Schwarzer, R.; Behnken, H.; Genzel, Ch.: Moderne Röntgenbeugung; Vieweg-Teubner, 2009, 2. Auflage
- [5] P. Lindner, Th. Zemb: Neutrons, X-Rays and Light: Scattering Methods Applied to Soft Condensed Matter, North-Holland (2002)
- [6] Erning, J. W.; Zunkel, A.; Klein, U.: Untersuchungen zu Prüfvorschriften zur Spannungsrisskorrosion an Messinglegierungen, VDI-Berichte Nr. 1985, 2007, S 151-163
- [7] Spieß, L.; Weidauer, U.; Kais, A.; Teichert, G.: Zerstörungsfreie Materialuntersuchungen an einem Pferdemaulkorb aus dem Jahr 1597 aus dem Angermuseum Erfurt; DGZFP-Jahrestagung 2012, Graz, Vortrag Di.1.C.1, Tagungsband
- [8] Trappe, V.; Günzel, S.; Goebbels, J.: Zerstörungsfreie Charakterisierung des Schädigungszustandes von Kurzglasfaserverstärkten Thermoplasten mit Röntgenverfahren, DGZFP-Jahrestagung 2012, Graz, Vortrag Mo.3.C.4, Tagungsband