

## Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec $\mu$ -X360 Gerät – Vergleichende Untersuchungen

Sebastian Matthes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Ilmenau; Kontakt: sebastian.matthes@tu-ilmenau.de

**KURZFASSUNG** | Mit stetig wachsenden Anforderungen an Bauteile und die verwendeten Werkstoffe ist es notwendig, das Eigenschaftspotential dieser voll auszuschöpfen. Besonders bei wechselbeanspruchten Bauteilen ist es erforderlich, die Lebensdauer und Belastungsgrenzen zu erhöhen. Eigenspannungen in den Oberflächen haben einen sehr großen Einfluss auf die Wöhlerkurve, die in vielen Gebieten der Wissenschaft und Technik Parameter für die Bauteilauslegung liefert. Die Bestimmung des Eigenspannungszustands kann durch verschiedene Messmethoden realisiert werden. In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung konnte sich das röntgenographische Verfahren der  $\sin^2 \psi$ -Methode etablieren. Eine alternative Methode ist das  $\cos \alpha$ -Verfahren, dessen Grundlagen durch Taira et al. [1] im Jahr 1978 erarbeitet wurden.

In diesem Beitrag steht das zurzeit weltweit kleinste und leichteste Eigenspannungsmessgerät Pulstec  $\mu$ -X360s (Entwicklung im Jahr 2016) im Fokus. Durch eine einzige Bestrahlung kann ein Debye-Scherrer-Ring mithilfe einer Bildplatte als zwei-dimensionalen Detektor aufgenommen und daraus die Eigenspannungen ermittelt werden. Wegen mangelnden Erfahrungswerten müssen die Einflussparameter und Grenzen des Geräts näher untersucht werden. Die Variation des Auswertungsbereichs der Debye-Scherrer-Ringe sowie die Untersuchungen bei verschiedenen Lichtverhältnissen repräsentieren einen Auszug aus den Untersuchungspunkten. Es konnte gezeigt werden, dass die Einrichtung der Messung sehr genau erfolgen sollte und sich einige Zusatzkomponenten, wie z. B. ein x-y-Tisch für die Probenpositionierung, als sehr nützlich erwiesen haben. Aufgrund verschiedener Probegeometrien ist es möglich, dass die Debye-Scherrer Ringe teilweise abgeschattet werden. Um den Einfluss dieser Unregelmäßigkeiten zu vermindern, ist es notwendig, den Auswertungsbereich teilweise einzuschränken. Im Vergleich zu Messungen mit der  $\sin^2 \psi$ -Methode konnten bei nahezu allen Ergebnissen äquivalente Werte erzielt werden, was die Validität des Geräts und der  $\cos \alpha$ -Methode bestätigt. Dennoch ist anzumerken, dass es Verbesserungsbedarf hinsichtlich des Laserpunkts, der Einrichtungsmöglichkeit des Geräts und der Auswertungssoftware gibt.

### Einleitung

Eigenspannungen sind innere mechanische Spannungen, die ohne Anliegen äußerer Kräfte im Kräfte- und Momentengleichgewicht stehen. Sie entstehen durch inhomogene plastische Formänderungen aufgrund von z. B. thermischen oder mechanischen Einflüssen. Mit immer höheren Ansprüchen von Bauteilen hinsichtlich Zuverlässigkeit, Gewicht, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer ist es notwendig das Werkstoffpotential voll auszuschöpfen. Besonders die Druckeigenspannungen in der Oberfläche können zu einer Verbesserung der Lebensdauer und Belastbarkeit beitragen. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Eigenspannungen nach dem Superpositionsprinzip mit den Lastspannungen überlagern, haben sie enormen Einfluss auf die lokalen Versagensgrenzen. Vor allem Druckeigenspannungen führen zu einer Erhöhung der Dauerfestigkeit in bestimmten Bauteilen. Eine Voraussetzung zum Erreichen des anwendungsbezogenen Optimums ist die genaue Kenntnis über die Eigenspannungszustände im Bauteil. [3–6]

Zur Ermittlung der Eigenspannungen können verschiedenste Techniken herangezogen werden, die sich zunächst in zerstörende und zerstörungsfreie Methoden unterteilen. Die größte Bedeutung im Bereich der zerstörungsfreien Methoden stellt die Röntgenographische Spannungsanalyse dar. Das angewendete Verfahren der  $\sin^2 \psi$ -Methode konnte sich hinsichtlich Genauigkeit sowie Zuverlässigkeit etablieren und ist bis heute ein sehr weit verbreitetes Verfahren zur Eigenspannungsanalyse. Durch methodische und apparative Weiterentwicklungen konnte die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieses Verfahrens erhöht werden, bei gleichzeitiger Verringerung der Messzeit. [2, 7, 8]

Dennoch ist der gesamte Zeitaufwand einer Spannungsermittlung (Einrichtung und Messung) der konventionellen standorttreuen Geräte als relativ hoch zu bewerten. Unter kritischer Betrachtung ist diese Methode nicht bedingungslos unter den zerstörungsfreien Prüfverfahren einzuordnen, da der Probenraum oftmals begrenzt ist und dadurch ein Freischneiden der Messstelle erfolgen muss.

Infolgedessen kann es sowohl zum Auslösen als auch zum Eintrag bzw. zur Umlagerung von Eigenspannungen am Prüfling kommen, bei gleichzeitiger Zerstörung des Bauteils.

An diesen Kritikpunkten soll ein neues zerstörungsfreies Eigenspannungsmessgerät der Firma Pulstec ansetzen. Es verwendet die  $\cos \alpha$ -Methode, die im Jahr 1978 von Taira et al. [1] vorgestellt wurde. Wegen technischer Schwierigkeiten, besonders hinsichtlich Detektion und Bildverarbeitungsmethoden, konnte erst im Jahr 2012 ein kommerzielles Eigenspannungsmessgerät basierend auf dieser Methode von der Firma Pulstec auf den Markt gebracht werden. Das derzeit aktuelle Modell, das Pulstec  $\mu$ -X360s (Entwicklung im Jahr 2016) verwendet eine zweidimensionale Bildplatte in Verbindung mit der digitalen Lumineszenzspektroskopie zur Detektion der gebeugten Röntgenstrahlung. Der Spannungswert von beispielsweise Stahl-Prüflingen wird durch die Vermessung des gesamten Debye-Scherrer-Rings (DS-Rings) der (211)-Netzebene ermittelt. Dabei erfolgt die Unterteilung des DS-Rings in 500 radiale Messpunkte, was einer Schrittweite von  $0,72^\circ$  entspricht. Durch diese Aspekte verringert sich die Messzeit im Gegensatz zum  $\sin^2 \psi$ -Verfahren erheblich (Messzeit je nach Kollimator: 10 s bis 120 s). Weiterhin wird kein aufwändiges Goniometer benötigt, da eine exakt winkeltreue Positionierung zwischen Messgerät und Prüfling nicht notwendig ist. Das Gerät arbeitet mit einer Metall-Keramik-Röhre (Cr- Anode), die mit einer maximalen Leistung von 50 W angegeben ist. Dadurch ist es möglich, ohne aufwändige Wasserkühlung auszukommen und das Gerät mit einer einfachen Luftkühlung zu betreiben. Genauso wie beim  $\sin^2 \psi$ -Verfahren werden zur Ermittlung der Spannungswerte nicht die exakten spannungsfreien Parameter ( $d_0$  bzw.  $\theta_0$ ) benötigt. Zusammenfassend repräsentiert das Pulstec  $\mu$ -X360s das derzeit weltweit kleinste und leichteste Eigenspannungsmessgerät in der zerstörungsfreien Prüfung. Zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der Validität der Messwerte, insbesondere auch zum Vergleich mit dem  $\sin^2 \psi$ -Verfahren, wurden durchgeführt [9–16].

Die veröffentlichten Ergebnisse haben nicht alle Einflussparameter zufriedenstellend abgedeckt, was die Notwendigkeit von weiteren Untersuchungen erforderlich machte. [17]

**Grundlagen**

Die Entwicklung des  $\cos \alpha$ -Verfahrens geht bis auf das Jahr 1978 zurück, als Taira, Tanaka und Yamasaki eine Methode vorstellten, bei der die Spannungsermittlung durch die Betrachtung und Auswertung der Dehnungswerte entlang des gesamten Debye-Scherrer-Rings erfolgt. Die schematische Messanordnung ist in Abb. 1 dargestellt. Die vom Probenstück zurückgebeugten Röntgenstrahlen werden mit Hilfe einer Bildplatte (Image Plate – IP) in Verbindung mit der digitalen Lumineszenzspektroskopie detektiert. Während der Belichtung mit Röntgenstrahlen werden die fotoempfindlichen Kristalle in einen metastabilen Zustand angeregt, wodurch der latente Zustand der Beugungsprofile zwischengespeichert wird. Zum Auslesen wird die Bildplatte durch einen entsprechenden Laser rasterartig in radialer Richtung beleuchtet. Dadurch werden die metastabilen Kristalle zum Aussenden von Photonen angeregt, deren Quantität ein Maß für die Intensität der Röntgenstrahlung ist.

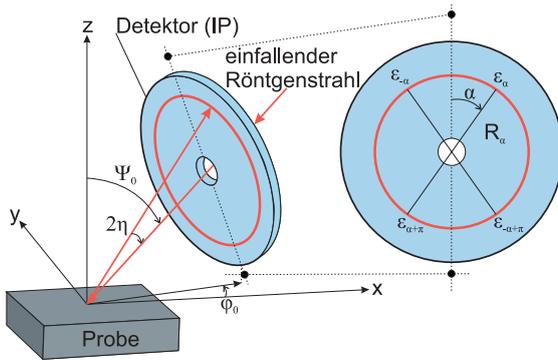


Abb. 1: Schematische Darstellung der Messanordnung mit eingetragenen Dehnungen, in Anlehnung an [19]

Zur Bestimmung der Normalspannungskomponente  $\sigma_x$  werden die ermittelten Dehnungen des Debye-Scherrer-Rings verwendet. Die vier eingezeichneten Dehnungen  $\epsilon_\alpha, \epsilon_{-\alpha}, \epsilon_{\alpha+\pi}$  und  $\epsilon_{-\alpha+\pi}$  sind alle abhängig vom Umfangswinkel  $\alpha$  des Debye-Scherrer-Rings. Mit Hilfe dieser lässt sich der neu eingeführte Parameter  $a_1$  wie folgt ermitteln:

$$a_1(\varphi_0) = \frac{1}{2} [(\epsilon_\alpha - \epsilon_{\alpha+\pi}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{-\alpha+\pi})]$$

Unter Verwendung der entsprechenden Richtungskosinus sowie der Grundgleichung der röntgenographischen Spannungsanalyse [7] ergibt sich für die Ermittlung der Normalspannungskomponente  $\sigma_x$ :

$$\sigma_x = -\frac{E}{1 + \nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\Psi_0} \left( \frac{\partial a_1(\varphi_0 = 0^\circ)}{\partial \cos \alpha} \right) \quad (1)$$

Unter der Annahme, dass die Parameter  $E, \nu, \eta$  und  $\Psi_0$  als konstant betrachtet werden, kann  $\sigma_x$  mit Hilfe des Anstiegs der Regressionsgeraden von  $a_1$  und  $\cos \alpha$  ermittelt werden. Zum Verständnis sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der vollständige DS-Ring zur Auswertung in eine Vielzahl an Beugungspunkten (je  $0,72^\circ \pm 500$  Punkte) unterteilt wird, um somit eine große Menge an  $a_1$ -Werten zu generieren. Je mehr Datenpunkte beim Erstellen der Geraden vorhanden sind, desto besser und vor allem genauer kann diese bestimmt werden [18].

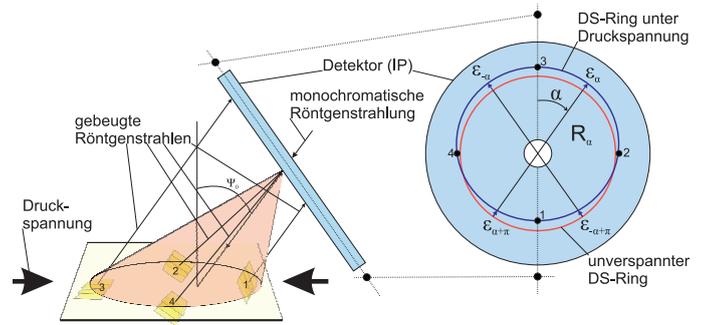


Abb. 2: Schematische Darstellung zur Veränderung des Debye-Scherrer-Rings bei anliegender Druckspannung

Mit Hilfe von Abb. 2 soll die Veränderung des DS-Rings unter Druckspannungen erläutert werden, dabei werden die Verzerrungen stark übertrieben dargestellt. Innerhalb des Brennflecks der Röntgenstrahlung sind die Normalenvektoren der Netzebenen unterschiedlich orientiert. Im Falle einer spannungsfreien Probe ergibt sich an jedem Winkel  $\alpha$  der gleiche Radius  $R_\alpha$  und es ergibt sich ein „perfekter“ Kreis. Liegt im Probekörper eine Druckspannung vor, so hat die unterschiedliche Lage der Normalenvektoren der Netzebenen zum Spannungsvektor einen Einfluss. Dadurch wird die Netzebene 1 in Normalenrichtung gestaucht, wohingegen Netzebene 3 in Normalenrichtung gedehnt wird. Die Netzebenen 2 und 4 liegen relativ gesehen gleich zur Belastungsrichtung, was zur Änderung der Netzebenenabstände in gleichem Maße führt. Infolgedessen wird der Debye-Scherrer-Ring verzerrt, wodurch sich bei unterschiedlichen Umfangswinkeln  $\alpha$  unterschiedliche Radien  $R_\alpha$  ergeben, was schließlich zu verschiedenen Dehnungswerten ( $\epsilon_\alpha, \epsilon_{-\alpha}, \epsilon_{\alpha+\pi}$  und  $\epsilon_{-\alpha+\pi}$ ) führt.

**Experimentelles**

**1. Untersuchungen bei verschiedenen Lichtverhältnissen**

Die Untersuchungen bei verschiedenen Lichtverhältnissen sind aufgrund der Detektionsart des Gerätes mit Hilfe einer Bildplatte und der Möglichkeit von mobilen Messungen notwendig. Zur Untersuchung sind verschiedene Proben aus einem Round-Robin-Test mit bekannten Eigenspannungswerten verwendet wurden, deren Ergebnisse als Sollwerte angesetzt sind.

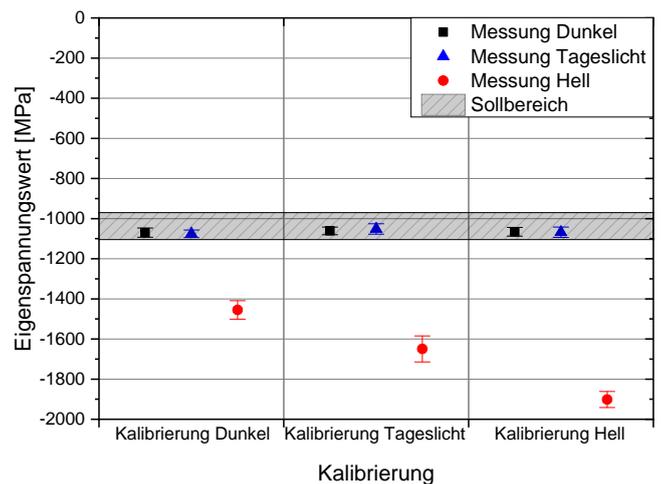


Abb. 3: Grafische Darstellung der Messergebnisse von Probe A7-90° bei verschiedenen Lichtverhältnissen während der Kalibrierung und Messung

Die Messungen erfolgten bei verschiedenen eingeteilten Lichtverhältnissen: „Dunkel“  $\approx (3 \pm 1) \text{ lm/m}^2$ , „Tageslicht“  $\approx (500 \pm 100) \text{ lm/m}^2$ , „Hell“  $\approx (18000 \pm 1000) \text{ lm/m}^2$ . Die zunächst im Labor untersuchten Helligkeiten wurden mittels Abdeckungen bzw. einer externen Lichtquelle erzeugt. Weiterhin ist die Kalibrierung des Gerätes bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen durchgeführt worden, um Anpassungsmöglichkeiten des Gerätes an verschiedene Lichtverhältnisse zu untersuchen. Exemplarisch sind die Ergebnisse in Abb. 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass lediglich die Messungen im „Hellen“ deutlich außerhalb des Sollbereichs liegen. Dies kann durch eine beobachtete unregelmäßige Intensitätsverteilung des Debye-Scherrer-Rings sowie eine deutlich erhöhte Grundintensität der Bildplatte erklärt werden. Diese Fremdintensitäten können einen so großen Einfluss besitzen, dass die Auswertungssoftware den DS-Ring nur unzureichend anfittet kann und somit zu starken Ergebnisabweichungen zum Sollbereich führt. Bei weiteren Messungen im Freien mit einer Beleuchtungsstärke  $\approx (33000 \pm 1000) \text{ lm/m}^2$  führte die sehr hohe Grundintensität der Bildplatte dazu, dass kein Debye-Scherrer-Ring mehr sichtbar war und entsprechend keine Auswertung durchgeführt werden konnte.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass unter Laborbedingungen (Beleuchtungsstärke  $\approx (500 \pm 100) \text{ lm/m}^2$ ) keine bzw. eine nicht signifikante Änderung der Messergebnisse vorhanden ist. Besonders bei mobilen Messungen sollte darauf geachtet werden, dass das Messgerät bzw. der Detektor einer nicht zu hohen Beleuchtungsstärke ausgesetzt wird. Dies gilt gleichzeitig für reflektierende Proben- oder Unterlagenoberflächen, die den Detektor ungewollt beleuchten könnten. Bestenfalls sollte bei mobilen Messungen eine Abdeckung für das Gerät verwendet werden, denn auch bei bedecktem Himmel kann die Beleuchtungsstärke bis zu  $10.000 \text{ lm/m}^2$  erreichen. Bei Einsatz des Gerätes zur Überwachung in der Produktion sollte dies auch bei stark ausgeleuchteten Werkshallen berücksichtigt werden.

## 2. Variation des Auswertungsbereichs der Debye-Scherrer-Ringe

Besonders durch schwer zugängliche Messstellen, starke Textur oder grobes Gefüge können einzelne Abschnitte des DS-Rings abgeschattet oder verfälscht werden. Dies kann dazu führen, dass die standardmäßige Auswertung falsche Ergebnisse liefert. Durch die Möglichkeit der Re-Analysis (erneute Analyse mit veränderbaren Parametern) kann der standardmäßige Auswertungsbereich ( $18^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ ) verändert werden. Aufgrund der Berechnungsgrundlage für den Parameter  $a_1(\varphi_0)$ , siehe Gleichung (1), ist dies allerdings nicht uneingeschränkt möglich. Die 4 Dehnungen  $\epsilon_\alpha$ ,  $\epsilon_{-\alpha}$ ,  $\epsilon_{\alpha+\pi}$  und  $\epsilon_{-\alpha+\pi}$  müssen bei jedem Umfangswinkel  $\alpha$  erhalten bleiben, da ansonsten die Berechnung scheitert. Dadurch ergibt sich ein bestimmtes

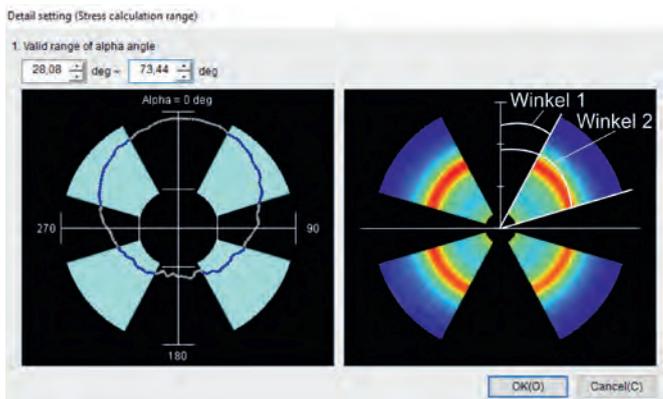


Abb. 4: Darstellung der Möglichkeit der Variation des Auswertungsbereichs mit Hilfe der Re-Analysis

Segmentierungsmuster für das Einschränken des Auswertungsbereichs, siehe Abb. 4.

Aufgrund der hohen Anzahl der Winkelkombinationen sind die Ergebnisse mit Hilfe einer 3D-Oberfläche inklusive der Datenpunkte (schwarz) dargestellt, siehe Abb. 5.

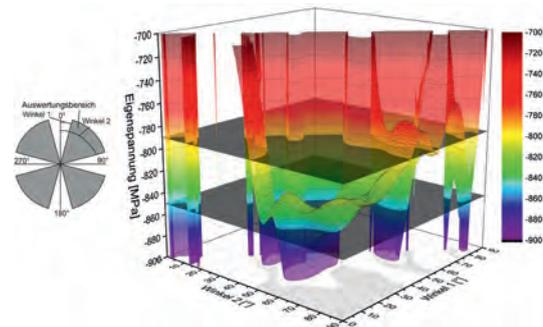


Abb. 5: 3D-Darstellung der Ergebnisse der verschiedenen Winkelkombinationen der Probe A3-90° inklusive des Sollbereichs (schwarze Ebenen) und der Projektion der Datenpunkte, die im Sollbereich liegen, auf die xy-Ebene

Der Sollbereich der Proben ( $\pm 30 \text{ MPa}$ ) ist durch die beiden schwarzen Flächen gekennzeichnet. Zusätzlich sind alle Datenpunkte, die sich im Sollbereich befinden durch die Projektion in die xy-Ebene eingetragen. Unter Betrachtung der Round-Robin-Proben ist festzustellen, dass die Winkelbereiche, deren Ergebnisse im Sollbereich liegen, stark variiert werden können. So ist es teilweise möglich, dass nur zwei  $a_1$ -Werte ausreichend sind, um Eigenspannungen zu ermitteln, die sich im Sollbereich befinden. Im Allgemeinen kann durch einen hohen Winkel 2 und einen niedrigen Winkel 1, das bedeutet ein großer Auswertungsbereich, der Sollbereich fast immer erreicht werden. Somit nehmen Einschränkungen von + (bei Winkel 1) bzw. - (bei Winkel 2)  $20^\circ$  einen nicht signifikanten Einfluss auf das Messergebnis. Weiterhin ist dies vom Gefüge der Probe, genauer der Korngröße und deren Verteilung, abhängig. Bei einem grobkörnigen Gefüge tragen beim standardmäßigen Auswertungsbereich vergleichsweise wenig Kristallite zur Beugung bei, bezüglich stark texturierter Proben verstärkt sich dieser Effekt zusätzlich. Schränkt man diesen Bereich noch weiter ein, so reduziert sich die Anzahl der ausgewerteten Kristallite stetig. Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf Messungen, deren DS-Ringe als gut, hinsichtlich Intensität und deren Verteilung über den Umfangswinkel  $\alpha$ , anzusehen sind. Im Folgenden wird ein Beispiel beschrieben, bei dem es zwingend notwendig ist den Auswertungsbereich anzupassen. In Abb. 6(a) ist ein teilweise abgeschatteter DS-Ring dargestellt. Der ermittelte Wert der standardmäßigen Auswertung lag nicht im Sollbereich. Erst durch eine starke Einschränkung des Auswertungs-

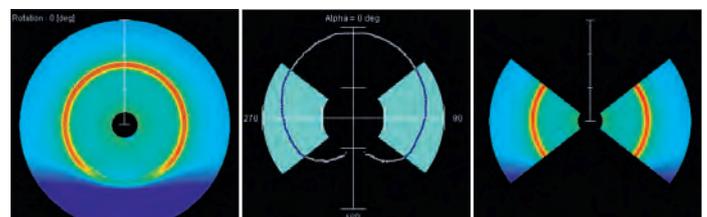


Abb. 6: Darstellung einer teilweise abgeschatteten Messung (a) Debye-Scherrer-Ring (b) Einfluss der abgeschatteten Stelle und Einschränkung des Messbereichs während der Re-Analysis

bereichs konnte der Einfluss der Abschattung eliminiert werden, s. Abb. 6(b). In diesem Beispiel ist es ohne diese nachträgliche Einschränkung nicht möglich, den wahren Eigenspannungswert zu erhalten. Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Auswertungsbereich, in Verbindung mit Datenverlust, sehr stark eingeschränkt werden kann und dennoch valide Ergebnisse generiert werden können. Es gilt das Prinzip, dass der Auswertungsbereich so groß wie möglich und so klein wie nötig gewählt werden sollte. Bei weiteren Messungen ist besonders auf das Profil des Debye-Scherrer-Rings zu achten, um bestenfalls Unregelmäßigkeiten, wie z. B. in Abb. 6(a), nicht mit in die Auswertung einfließen zu lassen.

### Fazit und Ausblick

Die theoretischen Ausarbeitungen zeigen, dass die Validität der  $\cos \alpha$ -Methode gegeben ist. Sie hat im Vergleich zum  $\sin^2 \psi$ -Verfahren einige Vorteile, wie z. B. eine deutlich verkürzte Messzeit, die Möglichkeit des mobilen Einsatzes und einen 2D-Detektor, der es ermöglicht, mehr Messpunkte mit einer Messung aufzunehmen [18]. Die Beleuchtungsstärke des Detektors sollte vor allem während des mobilen Einsatzes beachtet werden. Zur Verhinderung von zu hohen Beleuchtungsstärken ist eine Abdeckung für das Gerät vorzusehen, um eine deutliche Erhöhung der Grundintensität der Bildplatte durch externe Lichtquellen (z. B. Hallenausleuchtung, Sonne) zu verhindern. In Folge dieser Fremdintensitäten kann die Intensität des Debye-Scherrer-Rings nicht von der Grundintensität differenziert werden und eine Ermittlung der Eigenspannung ist nicht mehr möglich. Dies resultiert aus der verwendeten Detektionstechnik, die durch einen 2-dimensionalen Detektor in Form einer Bildplatte in Verbindung mit der digitalen Lumineszenzspektroskopie umgesetzt wurde. Unter den Lichtverhältnissen im Laborbereich sind keine Veränderungen des Messergebnisses zu erkennen. Durch die Re-Analyse ist die Möglichkeit gegeben, den Auswertungsbereich der Debye-Scherrer-Ringe in Form einer Segmentierung einzuschränken. Es zeigte sich, dass mit nur wenigen Datenpunkten korrekte Eigenspannungswerte ermittelt werden können. Weiterhin ist es teilweise zwingend notwendig, den Auswertungsbereich einzuschränken. Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass trotz der Variation von verschiedenen Parametern, wie z. B. Verkippungswinkel, Krümmungsradius und grobkörnigem Gefüge, die  $\cos \alpha$ -Methode valide Messergebnisse liefert. Es sind Erkenntnisse entstanden, die in weiteren Messungen unbedingt Berücksichtigung finden müssen. Trotz der einfachen geometrischen Rahmenbedingungen, was den Entfall eines Goniometers ermöglicht, muss auf eine exakte Einrichtung der Messung geachtet werden. Durch zusätzliche Komponenten wie einen verstellbaren x-y-Tisch oder Stellschrauben zur Einstellung des Verkippungswinkels, ist es möglich, die Messeinstellung zu erleichtern. Zur Ausschöpfung des vollen Potentials des Gerätes muss vor allem die Software überarbeitet und neue Anwendungsmöglichkeiten hinterlegt werden. Dazu zählen die Möglichkeit, Intensitäten mehrerer Debye-Scherrer-Ringe miteinander zu kombinieren, die Auswertung auf die Fourieranalyse zurückzuführen (Entfall der typischen Segmentierung beim Einschränken des Auswertungsbereichs) und einen Programmablauf zur Bestimmung des vollständigen Eigenspannungszustands zu entwickeln. Weiterführende Aufgabenbereiche, wie z. B. quantitative Korngrößenbestimmung auf Basis der Debye-Scherrer-Ringe, Analyse von texturierten Probekörpern oder der Einsatz in der automatisierten Serienteilüberwachung, könnten zukünftig durch die  $\cos \alpha$ -Methode realisiert werden.

*Die Messungen sind im Rahmen einer Masterarbeit bei der ZF Friedrichshafen AG im Bereich Zentrale Forschung und Entwicklung/Werkstofftechnik durchgeführt worden.*

### LITERATURVERZEICHNIS

- [1] TAIRA, S.; TANAKA, K.; YAMASAKI, T.: A Method of X-Ray Microbeam Measurement of Local Stress an Its Application to Fatigue Crack Growth Problems. In: *Journal of the Society of Materials Science, Japan* März 1978, Nr. 27.294, S. 251–256
- [2] BARON, H.-U.; BEHNKEN, H.; EIGENMANN, B.; GIBMEIER, J.; HIRSCH, T.; PFEIFFER, W.: *Röntgenographische Ermittlung von Spannungen – Ermittlung und Bewertung homogener Spannungszustände in kristallinen, makroskopisch isotropen Werkstoffen*, 2000
- [3] HUBEL, S.; BAMBERG, J.; DILLHÖFER, A.; HESSERT, R.; PREIKSZAS, C.; RIEDER, H.; SPIES, M.: *Grundlegende Untersuchungen zur Spannungsmessung mittels Ultraschall an Werkstoffen im Triebwerksbau*. In: *DACH-Jahrestagung Graz 2012*, S. 1–9
- [4] EIMS, E.-H.: *Anwendung eines konischen Blendensystems zur tiefenaufgelösten Bestimmung von Eigenspannungen in Materialien mittels Synchrotronstrahlung*. Diplomarbeit. Feb./2011
- [5] STRAUSS, T.: *Ermittlung von fertigungsprozessbedingten Eigenspannungen bei komplexer Bauteilgeometrie*. Karlsruhe. Dissertation. 2013
- [6] POSSEL-DÖLKEN, I.: *Röntgenographische Bestimmung von Mikrospannungen in polykristallinen Werkstoffen und ihr Verhalten bei statischer Verformung und schwingender Beanspruchung*. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Dissertation. 2007
- [7] SPIEL, L.; TEICHERT, G.; SCHWARZER, R.; BEHNKEN, H.; GENZEL, C.: *Moderne Röntgenbeugung: Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*. 3. Aufl. : Springer & Spektrum, 2019
- [8] *Deutsche Norm DIN EN 15305. 2008. Zerstörungsfreie Prüfung – Röntgendiffraktometrisches Prüfverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen*
- [9] DELBERGUE, D.; TEXIER, D.; LÉVESQUE, M.; BOCHER, P.: *Comparison of Two X-Ray Residual Stress Measurement Methods:  $\sin^2 \psi$  and  $\cos \alpha$ , Through the Determination of a Martensitic Steel X-Ray Elastic Constant*. In: *Residual Stresses 2017*, Nr. 10, S. 55–60
- [10] KOHRI, A.; TAKAKU, Y.; NAKASHIRO, M.: *Comparison of X-Ray Residual Stress Measurement Values by  $\cos \alpha$  Method and  $\sin^2 \psi$  Method (2017)*, S. 103–108
- [11] MATSUDA, M.; OKITA, K.; NAKAGAWA, T.; SASAKI, T.: *Application of X-ray stress measurement for residual stress analysis by inherent strain method - Comparison of  $\cos \alpha$  and  $\sin^2 \psi$  method*. In: *Mechanical Engineering Journal* 2017, Nr. 4.5, S. 1–13
- [12] LING, J.; LEE, S.-Y.: *Characterization of a Portable X-Ray Device for Residual Stress Measurements*. In: *JCPDS-International Centre for Diffraction* 2015, S. 153–162
- [13] MIYAZAKI, T.; SASAKI, T.: *X-Ray Residual Stress Measurement of Austenitic Stainless Steel Based on Fourier Analysis*. In: *Nuclear Technology* Apr. 2016, Nr. 106.3, S. 111–116
- [14] PETERSON, N.; KOBAYASHI, Y.; TRAEGER, B.; SANDERS, P.: *Assessment and Validation of  $\cos \alpha$  Method for Residual Stress Measurement (2017)*, S. 80–86
- [15] RAMIREZ-RICO, J.; LEE, S.-Y.; LING, J. J.; NOYAN, I. C.: *Stress measurement using area detectors: a theoretical and experimental comparison of different methods in ferritic steel using a portable X-ray apparatus*. In: *Journal of Materials Science* Juni 2016, Nr. 51.11, S. 5343–5355
- [16] SASAKI, T.; HIKARU, S.: *X-Ray Stress Measurement of Austenitic Stainless Steel with  $\cos \alpha$  Method and Two-Dimensional X-Ray Detector*. In: *Materials Science Forum* 2017, Nr. 879, S. 1679–1684
- [17] MATTHES, S.: *Röntgendiffraktometrie mit dem Pulstec  $\mu$ -x360 Gerät – Vergleichende Untersuchungen*. Technische Universität Ilmenau. 2019
- [18] SPIEL, L.; GRÜNING, A.; MATTHES, S.: *Röntgenographische Spannungsmessung. Vergleich von  $\sin^2 \psi$  – u.  $\cos \alpha$ -Verfahren*. In: *ZfP heute*. 2020, S. 39–41
- [19] KAMURA, N.; FUJITA, T.; SASAKI, T.: *Evaluation of Rolling Contact Fatigue by X-ray Diffraction Ring*. In: *NTN Technical Review* Feb.'16, Nr. 83, S. 67–74