



(12) Ausschließungspatent

(11) DD 299 012 A7

Erteilt gemäß § 18 Absatz 2
Patentgesetz der DDR
vom 27. 10. 1983
in Übereinstimmung mit den entsprechenden
Festlegungen im Einigungsvertrag

5(51) G 01 N 23/20

DEUTSCHES PATENTAMT

(21)	DD G 01 N / 332 459 1	(22)	08.09.89	(45)	26.03.92
(71)	Akademie der Wissenschaften, Institut für Mechanik, PSF 4 08, O - 9010 Chemnitz, DE; Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Institut für Maschinenwesen, Moskau, SU				
(72)	Kämpfe, Bernd, Doz. Dr. sc. techn., DE; Körtel, Günther, Dr.-Ing., DE; Zenker, Rolf, Dr. sc. techn., DE; Efanow, Valeri, Dr.-Ing., SU; Frenkler, Norbert, Dipl.-Ing., DE; Semjonow, Alexej, Dipl.-Ing., SU; Dietrich, Stefan, Dipl.-Ing., DE				
(73)	Institut für Mechanik, PSF 4 08, O - 9010 Chemnitz, DE; Institut für Maschinenwesen, „A. A. Blagonrawowa“, Griboedowstraße 4, 101830 Moskau, SU; Technische Universität Chemnitz, PSF 9 64, O - 9010 Chemnitz, DE				
(54)	Verfahren zur Prüfung von Spannungszuständen in Prüflingen				

(55) Prüfung; Spannungszustand; Prüfling; kristalline Struktur; Diffraktion; Röntgendiffraktion; Strahlenquelle; Strahlenempfänger; Kippwinkel; Drehwinkel; Reflexionswinkel; Prüfkriterien

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prüfung von Spannungszuständen in Prüflingen aus kristallinen Werkstoffen, wobei zwei Hauptspannungsachsen als in der Prüflingsoberfläche verlaufend angenommen werden, unter Verwendung der Diffraktion des von einer Strahlenquelle ausgehenden und von einem Strahlenempfänger aufgefangenen Strahlenbündels an den Kristallgitterebenen des Prüflings, insbesondere durch Röntgendiffraktion, wobei der einer Art von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel unter einem konstanten Kippwinkel in verschiedenen Drehwinkelstellungen vermessen wird. Die Erfindung ist anwendbar zur Kontrolle von Spannungszuständen in Prüflingen insbesondere nach technologischen Prozessen mit hohem Energieeintrag sowie zur Überwachung. Gemäß der Erfindung wird in den Drehwinkelstellungen φ_1 , $\varphi + 120^\circ$ und $\varphi_1 - 120^\circ$ der Reflexionswinkel gemessen, daraus das arithmetische Mittel gebildet, drei Differenzwerte aus den Reflexionswinkeln und dem arithmetischen Mittel bestimmt und die Differenzwerte bezüglich ihrer Übereinstimmungen nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten verwendet.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Prüfung von Spannungszuständen in Prüflingen aus Werkstoffen mit kristalliner oder teilkristalliner Struktur, wobei zwei Hauptspannungsachsen als in der Prüflingsoberfläche verlaufend angenommen werden, unter Verwendung der Diffraktion des von einer Strahlenquelle ausgehenden und von einem Strahlenempfänger aufgefangenen Strahlenbündels an den Kristallgitterebenen des Prüflings, insbesondere durch Röntgendiffraktion, wobei der einer Art von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel unter einem konstanten Kippwinkel in verschiedenen Drehwinkelstellungen vermessen wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß zunächst, wie an sich bekannt, der Prüfling bezüglich einer ersten Drehwinkelstellung (φ_1) parallel zu einer Hauptspannungsachse ausgerichtet und in dieser Stellung ein erster Reflexionswinkel (ϑ_1) gemessen wird, anschließend in einer zweiten Drehwinkelstellung (φ_2), die zur ersten Drehwinkelstellung (φ_1) um $+120^\circ$ verdreht ist, ein zweiter Reflexionswinkel (ϑ_2) sowie in einer dritten Drehwinkelstellung (φ_3), die zur ersten Drehwinkelstellung (φ_1) um -120° verdreht ist, ein dritter Reflexionswinkel (ϑ_3) gemessen wird, weiterhin aus den gemessenen Reflexionswinkeln (ϑ_1 ; ϑ_2 ; ϑ_3) das arithmetische Mittel ($\bar{\vartheta}$) gebildet wird, und drei den drei Drehwinkelstellungen (φ_1 ; φ_2 ; φ_3) zugeordnete Differenzwerte (Δ_1 ; Δ_2 ; Δ_3) jeweils aus den gemessenen Reflexionswinkeln (ϑ_1 ; ϑ_2 ; ϑ_3) und dem arithmetischen Mittel ($\bar{\vartheta}$) bestimmt werden, wobei als Prüfkriterien die Übereinstimmung des zweiten mit dem dritten Differenzwert ($\Delta_2 = \Delta_3$) und des ersten mit dem negativen doppelten Wert des zweiten Differenzwertes ($\Delta_1 = -2\Delta_2$) bzw. mit dem negativen doppelten Wert des dritten Differenzwertes ($\Delta_1 = -2\Delta_3$) verwendet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß aus den drei Differenzwerten (Δ_1 ; Δ_2 ; Δ_3) nach an sich bekannten Beziehungen der linearen Elastizitätstheorie die Differenz der in der Prüflingsoberfläche verlaufenden Hauptspannungen ($\sigma_1 - \sigma_2$)

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2(\Delta_2 + \Delta_3 - 2\Delta_1)}{3 \tan \theta \cdot 1/2s_2 \cdot \sin^2 \psi}$$

bestimmbar ist (wobei $1/2s_2$ eine bekannte röntgenographische Elastizitätskonstante ist).

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Prüfung von Spannungszuständen in Prüflingen aus Werkstoffen mit kristalliner oder teilkristalliner Struktur, wobei zwei Hauptspannungsachsen als in der Prüflingsoberfläche verlaufend angenommen werden, unter Verwendung der Diffraktion des von einer Strahlenquelle ausgehenden und von einem Strahlenempfänger aufgefangenen Strahlenbündels an den Kristallgitterebenen des Prüflings, insbesondere durch Röntgendiffraktion, wobei der einer Art von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel unter einem konstanten Kippwinkel in verschiedenen Drehwinkelstellungen vermessen wird.

Die Erfindung ist anwendbar zur Kontrolle von Spannungszuständen in Prüflingen insbesondere nach definierten technologischen Prozessen mit hohem Energieeintrag, wie Elektronenstrahl-, Laserstrahl- oder Plasmastrahlbehandlung, aber auch zur Überwachung von Bauteilen oder Konstruktionen, die unter (sich verändernder) mechanischer Belastung stehen.

Charakteristik des bekannten Standes der Technik

Nach dem üblichen $\sin^2\psi$ -Verfahren (Macherauch, E.; Müller, P. „Das $\sin^2\psi$ -Verfahren der röntgenographischen Spannungsmessung“, Zeitschr. angew. Phys. 13 [1961], S. 305–315) wird unter der Voraussetzung, daß zwei Hauptspannungsachsen in der Oberflächenebene des Prüflings verlaufen und eine Spannungskomponente rechtwinklig zur Oberflächenebene vernachlässigbar ist, der einer Art von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel ϑ bei unterschiedlichen Kippwinkeln ψ des Röntgenprimärstrahls zur Oberflächenebene aufgenommen, wobei bei diesem Meßvorgang der Drehwinkel φ konstant gehalten wird. Aus den Meßwerten für den Reflexionswinkel werden unter Verwendung des Reflexionswinkels ϑ_0 für den unverzerrten Netzebenenabstand Differenzwerte $\Delta\vartheta$ bestimmt, welche über $\sin^2\psi$ aufgetragen, die bekannte $\sin^2\psi$ - $\Delta\vartheta$ -Gerade ergeben. Aus deren Ordinatenabschnitt ist die Summe der Hauptspannungen bestimmbar, woraus in einem weiteren Schritt die Hauptspannungen und deren Winkel zum Hauptachsensystem ermittelbar sind. Nach Dölle, H.; Hauk, V. „Röntgenographische Spannungsermittlung für Eigenspannungssysteme allgemeiner Orientierung“, HTM 31 (1976) 3, S. 165–168, ist es weiterhin bekannt, unter der Voraussetzung einer beliebigen Lage der Hauptspannungsachsen und bei Kenntnis des unverzerrten Netzebenenabstandes den vollständigen Dehnungstensor zu bestimmen. Dabei werden in drei Drehwinkel-Einstellungen $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ jeweils mindestens unter zwei verschiedenen Kippwinkeln die Reflexionswinkel vermessen, woraus Spannungsdifferenzen und -summen bestimmt werden. In einem weiteren Schritt werden hieraus die Hauptspannungen ermittelt.

Auch nach dem Verfahren nach Hauk, V.; Vaessen, G. „Auswertung nichtlinearer Gitterdehnungsverteilungen“, HTM-Beiheft 1982, S. 38–48, zur Dehnungs- bzw. Spannungsermittlung werden unter Drehwinkelstellungen von $\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ bzw. 0° und 90° verschiedene Kippwinkel (positive und negative Kippwinkel) eingestellt (S. 42–43), wobei im letztgenannten Fall der Winkel $\varphi = 0^\circ$ die Messung des Reflexionswinkels in Richtung einer Hauptspannungsachse bestimmt.

Vorstehende bekannte Verfahren sind mit verschiedenen Nachteilen behaftet. Gemeinsam ist ihnen, daß Vermessungen der Reflexionswinkel mit unterschiedlichen Kippwinkel-Einstellungen erfolgen. Dabei treten systematische Meßfehler auf, die insbesondere beim Vorliegen breiter Reflexe, wie sie bei Prüflingen mit stark gestörter kristalliner Struktur entstehen, ergebnisverfälschend wirken. Da weiterhin die Eindringtiefe der Röntgenstrahlung in den Prüfling vom Kippwinkel abhängig ist, werden bei unterschiedlichen Kippwinkel-Einstellungen unterschiedliche Prüflingstiefen angeregt. Oberflächenschichten mit stark gestörter kristalliner Struktur weisen i. d. R. starke Eigenspannungsgradienten in der Prüflingstiefe auf, so daß bei der Spannungsbestimmung aus Meßwerten mit variablem Kippwinkel teilweise erhebliche Fehler auftreten.

Die Notwendigkeit der Einstellung verschiedener Kippwinkel erschwert weiterhin die Automatisierung des gesamten Meßvorganges. Außerdem ist bei vorstehenden bekannten Verfahren der meßtechnische Aufwand relativ hoch, da eine größere Anzahl von Meßwerten genommen werden muß.

Weiterhin ist ein Verfahren zur röntgenographischen Spannungsanalyse, insbesondere bei lokalen Spannungsverteilungen bekannt (DD-PS 259 919), wobei der Prüfling zunächst mit einer Hauptspannungskomponente so justiert wird, daß der Drehwinkel $\varphi = 90^\circ$ ist. Anschließend wird ein spezieller Kippwinkel ermittelt und eingestellt. Aus dem registrierten Reflexionswinkel kann nun die Hauptspannungskomponente berechnet werden.

Dieses Verfahren ist an bestimmte Kippwinkel gebunden, die ggf. unter der Voraussetzung grobkörniger Werkstoffe zu nicht auswertbaren Reflexionserscheinungen führen.

Es ist des weiteren aus DD-PS 270 450 ein Verfahren zur Bestimmung von in Oberflächenschichten von Prüflingen wirkenden Scherspannungskomponenten bekannt. Nach diesem Verfahren ist die explizite Darstellung der Scherspannungskomponenten möglich durch die Differenzbildung der Kristallgitterdehnungen, die bei gleichem Kippwinkel, aber um 180° verschiedenen Drehwinkeln bestimmbar sind durch entsprechende Messung der Reflexionswinkel. Als Verfahren zur Prüfung von Spannungszuständen ohne deren definierte Bestimmung ist dieses bekannte Verfahren nicht vorgesehen und anwendbar. Dementsprechend hoch ist sein Meß- und Auswerteaufwand.

Es hat sich gezeigt, daß es nicht in jedem Fall erforderlich ist, zur Kontrolle des Spannungszustandes in Prüflingen alle Spannungswerte in relativ aufwendigen Meßreihen definitiv zu bestimmen.

Ziel der Erfindung

Es ist Ziel der Erfindung, ein Verfahren zur Kontrolle von Spannungszuständen mittels Diffraktion anzugeben, wobei bei Vermeidung der definierten Bestimmung aller Spannungswerte ein einfacher, leicht auszuwertender und zu automatisierender Meßzyklus anwendbar ist.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Prüfung von Spannungszuständen in Prüflingen aus Werkstoffen mit kristalliner oder teilkristalliner Struktur, wobei zwei Hauptspannungsachsen als in der Prüflingsoberfläche verlaufend angenommen werden, unter Verwendung der Diffraktion des von einer Strahlenquelle ausgehenden und von einem Strahlenempfänger aufgefangenen Strahlenbündels an den Kristallgitterebenen des Prüflings, insbesondere durch Röntgendiffraktion, wobei der einer Art von Kristallgitterebenen zugeordnete Reflexionswinkel unter einem konstanten Kippwinkel in verschiedenen Drehwinkelstellungen vermessen wird, zu schaffen, wobei unter speziellen Drehwinkelstellungen, die die Nutzung vorteilhafter Symmetrieverhältnisse der Dehnungsfunktion gestatten, wenige Messungen des Reflexionswinkels bei einer konstanten, durch den Strahl angeregten Prüflingstiefe erfolgen.

Erfindungsgemäß wird das dadurch erreicht, daß zunächst, wie an sich bekannt, der Prüfling bezüglich einer ersten Drehwinkelstellung parallel zu einer Hauptspannungsachse ausgerichtet und in dieser Stellung ein erster Reflexionswinkel gemessen wird, anschließend in einer zweiten Drehwinkelstellung, die zur ersten Drehwinkelstellung um $+120^\circ$ verdreht ist, ein zweiter Reflexionswinkel sowie in einer dritten Drehwinkelstellung, die zur ersten Drehwinkelstellung um -120° verdreht ist, ein dritter Reflexionswinkel gemessen wird, weiterhin aus den gemessenen Reflexionswinkeln das arithmetische Mittel gebildet wird, und drei den drei Drehwinkelstellungen zugeordnete Differenzwerte jeweils aus den gemessenen Reflexionswinkeln und dem arithmetischen Mittel bestimmt werden, wobei als Prüfkriterien die Übereinstimmungen des zweiten mit dem dritten Differenzwert und des ersten mit dem negativen doppelten Wert des zweiten Differenzwertes bzw. mit dem negativen doppelten Wert des dritten Differenzwertes verwendet werden.

Sofern die Prüfkriterien als richtig ermittelt werden, ist es möglich und vorteilhaft, daß aus den drei Differenzwerten nach an sich bekannten Beziehungen der linearen Elastizitätstheorie die Differenz der in der Prüflingsoberfläche verlaufenden Hauptspannungen

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2(\Delta_2 + \Delta_3 - 2\Delta_1)}{3 \tan \bar{\theta} \cdot 1/2s_2 \cdot \sin^2 \psi}$$

bestimmbar ist (wobei $1/2s_2$ eine bekannte röntgenographische Elastizitätskonstante ist).

Ausführungsbeispiel

Die Erfindung wird nachfolgend an einem Ausführungsbeispiel näher erläutert.

Die Untersuchung wird an einem prismatischen Prüfling aus dem Stahl C45 durchgeführt. Durch Elektronenstrahlhärten ist auf einer Prüflingsoberfläche eine 10 mm breite und 0,5 mm tiefe Härtebahn erzeugt worden. Die dabei auftretende martensitische Gefügeumwandlung führte zu einem hohen Kontraktionszustand in dieser Spur, d. h., es ist ein Eigenspannungszustand mit Hauptspannungsachsen in Längs- und Querrichtung der Härtebahn zu erwarten. Dieser Eigenspannungszustand soll geprüft werden.

Dazu erfolgt die Untersuchung auf röntgendiffraktometrischem Wege unter Verwendung einer CrK_α -Strahlung bei Beugung an den (211)-Kristallgitterebenen des Martensits. Der Prüfling wird im Röntgendiffraktometer so fixiert, daß die Längsrichtung der Härtebahn einer ersten Drehwinkelstellung φ_1 entspricht, d. h., eine erste Meßrichtung weist in Richtung einer Hauptspannungsachse. Nun wird der Prüfling aus der üblichen symmetrischen Reflexionsstellung um den (konstanten, zweckmäßig gewählten) Kippwinkel $\psi = 45^\circ$ verkippt und in dieser Stellung ein erster Reflexionswinkel $\vartheta_1 = 78,04^\circ$ in üblicher Weise als das Maximum einer über die Halbwertsbreite des (211)-Reflexes aufgespannten Meßpunktparabel mittels Ausgleichsrechnung bestimmt.

Anschließend wird der Prüfling um einen Drehwinkel von $+120^\circ$ in eine zweite Drehwinkelstellung φ_2 verdreht, und in dieser Stellung wird ein zweiter Reflexionswinkel $\vartheta_2 = 78,14^\circ$ gemessen.

Nun wird der Prüfling in eine dritte Drehwinkelstellung φ_3 positioniert, die zur ersten Drehwinkelstellung um -120° verdreht ist, und in dieser Stellung wird ein dritter Reflexionswinkel $\vartheta_3 = 78,15^\circ$ bestimmt.

Aus den gemessenen Reflexionswinkeln $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ wird weiterhin das arithmetische Mittel $\bar{\vartheta} = 78,11^\circ$ gebildet, unter dessen Verwendung den drei Drehwinkelstellungen $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ zugeordnete Differenzwerte

$$\Delta_1 = \vartheta_1 - \bar{\vartheta} = -0,07^\circ \quad (1)$$

$$\Delta_2 = \vartheta_2 - \bar{\vartheta} = +0,03^\circ \quad (2)$$

$$\Delta_3 = \vartheta_3 - \bar{\vartheta} = +0,04^\circ \quad (3)$$

bestimmbar sind.

Als Prüfkriterien bezüglich der eingangs festgelegten Annahmen des Spannungszustandes (zwei Hauptspannungsachsen in der Oberflächenebene des Prüflings verlaufend; eine Richtung einer Hauptspannungsachse in Richtung φ_1) gelten nun die Übereinstimmungen des zweiten mit dem dritten Differenzwert

$$\Delta_2 = \Delta_3 \quad (4)$$

sowie des ersten mit dem negativen doppelten Wert des zweiten Differenzwertes

$$\Delta_1 = -2\Delta_2 \quad (5)$$

bzw. mit dem negativen doppelten Wert des dritten Differenzwertes

$$\Delta_1 = -2\Delta_3 \quad (6)$$

Da die Reflexionswinkelbestimmung an diesem Prüfling mit Fehlern $\Delta\vartheta \approx 0,22^\circ$ verbunden ist, kann aus den Relationen der Δ -Werte gemäß Gleichungen (4) bis (6) der erwartete und oben beschriebene Eigenspannungszustand in der Härtebahn bestätigt werden.

Vorstehender Verfahrensweise liegen folgende Überlegungen zugrunde:

Unter der Annahme, daß zwei Hauptspannungsrichtungen in der Oberfläche des Prüflings verlaufen und davon eine die Richtung φ_1 definiert, gilt für die elastische Kristallgitterdehnung $\varepsilon_{\varphi,\psi}$

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \varepsilon_I \sin^2\psi \cos^2\varphi + \varepsilon_{II} \sin^2\psi \sin^2\varphi + \varepsilon_{III} \cos^2\psi \quad (7)$$

($\varepsilon_I, \varepsilon_{II}, \varepsilon_{III}$ sind die Hauptdehnungen).

Unter der Voraussetzung eines konstanten Kippwinkels ψ ist dies gemäß

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = k_1 + k_2 \sin^2\varphi \quad (8)$$

(k_1 ist eine Konstante, k_2 hängt von $\varepsilon_{II} - \varepsilon_I$ ab)

im wesentlichen eine Funktion von $\sin^2\varphi$, die infolge der bekannten Abhängigkeit

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = -\cot\vartheta_0 (\vartheta_{\varphi,\psi} - \vartheta_0) \quad (9)$$

(ϑ_0 = Reflexionswinkel für den verzerrungsfreien Kristallgitterabstand)

auch für den Reflexionswinkel $\vartheta_{\varphi,\psi}$ gilt:

$$\vartheta_{\varphi,\psi} = k_3 + k_4 \sin^2\varphi \quad (10)$$

Der Funktionsverlauf ist bezüglich der Ordinate symmetrisch; die Ordinatenverschiebung (bezüglich der φ -Achse als Abszissenachse) läßt sich durch die Mittelwertbildung des Funktionsverlaufes bestimmen. Wie leicht nachweisbar ist, kann für die vorliegende spezielle Funktion deren Mittelwert einfach aus dem arithmetischen Mittel $\bar{\vartheta}$ von drei Werten des (gemessenen) Reflexionswinkels $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ unter Drehwinkelstellungen $\varphi_1, \varphi_2 = \varphi_1 + 120^\circ, \varphi_3 = \varphi_1 - 120^\circ$ gewonnen werden. Aus dem

symmetrischen Verlauf der Θ -Funktion ergibt sich außerdem, daß die jeweils auf den Mittelwert $\bar{\Theta}$ bezogenen Ordinatenwerte (Differenzwerte) Δ in den genannten speziellen Drehwinkelstellungen in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen, d. h. die den Drehwinkelstellungen φ_2 und φ_3 zugeordneten Differenzwerte Δ_2 und Δ_3 sind gleich groß und der der Drehwinkelstellung φ_1 entsprechende Differenzwert Δ_1 besitzt den negativen doppelten Wert.

Unter dem Gesichtspunkt, daß annahmegemäß ein exakter $\sin^2\varphi$ -Verlauf gemäß Gleichung (10) vorliegt, wären weitere Drehwinkelstellungen ($\varphi_2 = \pm 60^\circ$ bzw. -120° , $\varphi_3 = +120^\circ$ bzw. -60°) sowohl für die Mittelwert- als auch für die Differenzwertbildung nutzbar.

In praktisch auftretenden beliebigen Spannungszuständen sind jedoch Schubspannungskomponenten nicht auszuschließen, die durch $\sin$ - bzw. $\cos$ -Glieder zu unsymmetrischen Modifizierungen des Funktionsverlaufes führen. Es wurde gefunden, daß bei derartigen Funktionsverläufen die Mittelwert- und die Differenzwertbildung gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren unter den speziellen Drehwinkelstellungen φ_1 , $\varphi_1 + 120^\circ$, $\varphi_1 - 120^\circ$ durchführbar ist.

In Erweiterung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es möglich, für den Fall des Zutreffens der Prüfkriterien (innerhalb von sinnvollen Fehlergrenzen) nach den Gleichungen (4), (5) und (6) aus den ermittelten Differenzwerten Δ nach an sich bekannten Beziehungen der linearen Elastizitätstheorie die Differenz der Hauptspannungen $\sigma_1 - \sigma_2$ zu bestimmen:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2(\Delta_2 + \Delta_3 - 2\Delta_1)}{3 \tan \bar{\Theta} \cdot 1/2s_2 \cdot \sin^2 \psi} \quad (11)$$

(wobei $1/2s_2$ eine bekannte röntgenographische Elastizitätskonstante ist).

In dieser Beziehung wurde mit ausreichender Näherung der Reflexionswinkel Θ_0 für den verzerrungs-freien Kristallgitterabstand durch das arithmetische Mittel $\bar{\Theta}$ der gemessenen Reflexionswinkel Θ ersetzt.

Mit den Zahlenwerten dieses Ausführungsbeispiels erhält man

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 179 \text{ MPa}$$

(wobei der für die Werkstoff-Strahlungs-Kombination übliche Wert $1/2s_2 = 5,76 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ verwendet wurde und zu berücksichtigen ist, daß Gleichung (11) die Werte für Δ_1 , Δ_2 und Δ_3 im Winkelbogenmaß erfordert).

Vorstehendes Beispiel wurde anhand der Röntgen-Diffraktion erläutert. Die Erfindung ist jedoch darüber hinaus für Beugungsmessungen aller der Strahlungen geeignet, deren Wellenlänge in der Größenordnung der Abstände der Kristallgitterebenen liegt. Das betrifft vorrangig Neutronen- und Elektronenstrahlung.