

**Eigenspannungsanalyse mit Neutronen
an STRESS-SPEC**



1. Einleitung

Dieser Versuch soll Ihnen einen Einblick in die Möglichkeiten eines Neutronendiffraktometers geben und Sie mit Grundbegriffen der Eigenspannungsanalyse und der Diffraction vertraut machen.

Mechanische Spannungen in Festkörpern sind über die elastischen Materialeigenschaften mit den elastischen Dehnungen verknüpft, d.h. es ändern sich die Abstände und relativen Positionen der Gitterpunkte eines Kristalls. Mit Beugungsmethoden können Netzebenenabstände äußerst genau vermessen werden und Dehnungen und Spannungen im Material bestimmt werden. Hierbei kann man mit Neutronendiffraktion aufgrund der gegenüber Röntgenstrahlung grundsätzlich anderen Streumechanismen sehr viel tiefer in Materialien eindringen und Spannungstiefenprofile erhalten. Die Auswertung und Interpretation der diffraktometrischen Dehnungs- und Spannungsbestimmung erfordert grundsätzliche Kenntnisse über Definitionen und Zusammenhänge der Elastizitätstheorie, die im Folgenden näher erläutert werden. Auf eine Einführung in die Neutronenstreuung an polykristallinen Proben (Bragg-Streuung) wird hier weitestgehend verzichtet und auf entsprechende Literatur verwiesen [1,2].

2. Grundlagen

Spannungen und Dehnungen

Innerhalb eines Materials üben benachbarte Materialgebiete Kräfte aufeinander aus, da sie sich bei Erwärmung, Phasenumwandlung oder Verformung unterschiedlich ausdehnen und somit gegenseitig behindern. Um die Kontinuität des Materials zu erhalten sind Kräfte notwendig die diese Dehnungsinkompatibilitäten ausgleichen. Die Stärke dieser elastischen Wechselwirkung zwischen benachbarten Gebieten wird durch den Begriff der Spannungen beschrieben.

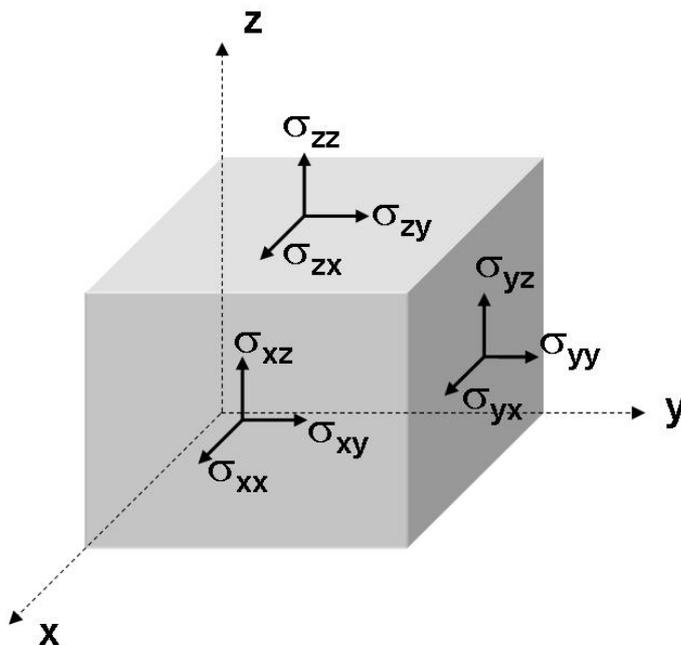


Abb. 1- Zur Definition des Spannungstensors.

Zur Definition der Spannungen betrachtet man ein kleines Volumen innerhalb des Materials (Abb. 1). Die direkte Umgebung übt Kräfte auf die Oberfläche dieses Elements aus. Die Kraft F auf eine Fläche A ist proportional zum Flächeninhalt und hängt von der Flächenlage, also dem Normalenvektor m ab sowie vom Belastungszustand des Materials. Diese Kraft soll nun neben dem Normalenvektor, der die Lage beschreibt, durch Größen ausgedrückt werden, die nicht mehr von der Lage des Flächenelements abhängen, sondern nur noch vom Belastungszustand des Materials. Diese Größen werden die Komponenten σ_{ij} des Spannungstensors sein, dessen Definition lautet

$$\sigma_{ij} m_j = \frac{F_i}{A}$$

Die Indizes der Spannungen σ_{ij} sind jeweils bestimmten Raumrichtungen zugeordnet und verhalten sich bei Drehungen wie die Indizes eines Vektors. Sie bilden damit einen Tensor 2. Stufe mit 9 Komponenten.

Durch das Auftreten der Spannungen wird ein Raumpunkt x eine Verschiebung $u(x)$ und das Material einen Dehnung erfahren. Beide werden im Folgenden als klein angenommen. Im eindimensionalen Fall (z.B. Saite mit der Länge L_0) ist die Dehnung definiert als $\varepsilon(x) = du/dx$. Wenn ε homogen ist gilt:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Im dreidimensionalen Fall beschreibt der Dehnungstensor ε_{kl} die Änderung und Form des Volumens eines Volumenelements und bildet ebenfalls einen symmetrischen Tensor 2. Stufe mit 9 Komponenten. Die Beträge und Vorzeichen der einzelnen Komponenten hängen i. A. von der Wahl des Koordinatensystems ab, bezüglich dessen sie dargestellt werden. Wegen der Symmetrie $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ bzw. $\varepsilon_{kl} = \varepsilon_{lk}$ sind jeweils nur 6 der 9 Komponenten unabhängig und damit ausreichend zur Beschreibung des Spannungs- bzw. Dehnungszustandes.

Elastische Materialeigenschaften

Sobald Spannungen, denen ein Material unterliegt, entfernt werden relaxiert ein Teil der durch sie hervorgerufenen Dehnungen. Dieser Anteil wird als elastische Dehnungsanteil ε^{el} bezeichnet, der verbleibende Anteil als plastische Dehnung ε^{pl} .

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl}$$

Solange die Spannungen die Elastizitätsgrenze nicht überschreiten und die Dehnungen klein sind Dehnungen und Spannungen linear zueinander. Dies wird durch das Hooke'sche Gesetz beschrieben. Für den eindimensionalen Fall gilt

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{mit } E \dots \text{Elastizitätsmodul in [MPa] bzw. [N/mm}^2\text{]}$$

Die allgemeine 3-dim. lineare Beziehung zwischen Spannungs- und Dehnungstensor ist gegeben, wenn jede Spannungskomponente von jeder der neun Dehnungskomponenten abhängt und umgekehrt. Hierdurch wird der Steifigkeitstensor c_{ijkl} , ein Tensor 4. Stufe mit 81 Komponenten, definiert.

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Aufgrund von Symmetriebedingungen reduziert sich die Anzahl der Komponenten des Steifigkeitstensors auf 21. Diese Zahl wird durch Symmetrieeigenschaften des Kristallgitters weiter reduziert. Im Falle eines elastisch isotropen, kubischen Gitters gibt es nur noch zwei Komponenten (auf eine genaue Ableitung wird hier verzichtet, s.a. [2-4]). Das Verhalten elastisch isotroper Körper kann so z.B. durch den E-Modul und die Querkontraktionszahl ν beschrieben werden.

Entstehung und Einteilung von Eigenspannungen

Eigenspannungen sind mechanische Spannungen, die in einem abgeschlossenen System vorliegen, auf das weder äußere Kräfte noch Momente wirken. Aus dieser Definition folgt unmittelbar, dass sich die aus den Eigenspannungen resultierenden Kräfte und Momente im mechanischen Gleichgewicht befinden. Eigenspannungen sind immer eine Folge inhomogen verteilter elastischer und elastisch-plastischer Verformungen im Werkstoff. Entsprechend den unterschiedlichen angewandten technischen Herstellungs- und Bearbeitungsverfahren entstehen charakteristische Eigenspannungszustände. In den Ingenieurwissenschaften werden daher oft Eigenspannungen ursachenbezogen klassifiziert. Man spricht z.B. unter anderem von Schweißeigenspannungen, Bearbeitungseigenspannungen oder Umformeigenspannungen.

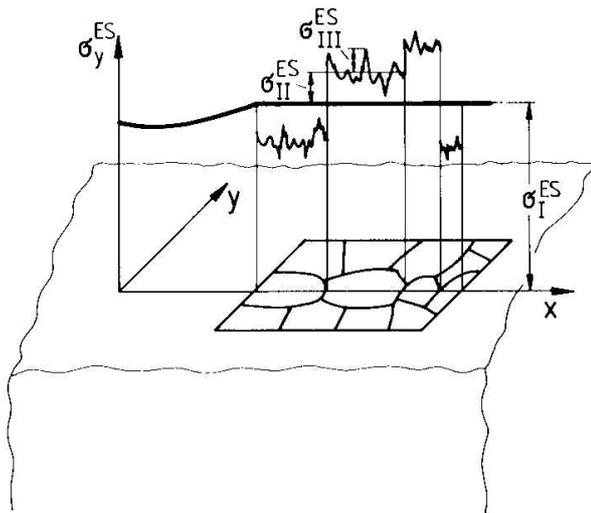
Um diese Eigenspannungen grundlegend zu betrachten, hat es sich als sinnvoll erwiesen, diese Eigenspannungen nicht ursachenbezogen zu klassifizieren sondern nach Eigenspannungen I., II. und III. Art zu unterscheiden und lokal vorliegende Eigenspannungen σ^{ES} als deren Summe gemäß

$$\sigma^{\text{ES}} = \sigma^{\text{ES}}_{\text{I}} + \sigma^{\text{ES}}_{\text{II}} + \sigma^{\text{ES}}_{\text{III}}$$

anzugeben.

In der Regel werden in der Literatur Eigenspannungen I. Art als Makroeigenspannungen und Eigenspannungen II. und III. Art als Mikro-eigenspannungen bezeichnet. Eigenspannungen I. Art kommen nie in reiner Form vor, sondern sind immer mit Eigenspannungen II. und III. Art überlagert, die bei einer makroskopischen Betrachtung jedoch eine untergeordnete Rolle spielen.

Abb. 2 gibt schematisch die nach dieser Definition in den einzelnen Kristalliten eines vielkristallinen Werkstoffs vorliegenden Verhältnisse wieder. Eigenspannungen I. Art sind demnach als Mittelwerte der lokal vorliegenden inhomogenen Eigenspannungen über hinreichend viele Körner (einkristalliner Bereich innerhalb eines Festkörpers) zu verstehen und sind eine Folge großvolumiger Deformationsinkompatibilitäten. Eigenspannungen II. Art stellen die Abweichung zwischen den für individuelle Körner oder Kornbereiche bestimmten Eigenspannungsmittelwerten und den Eigenspannungen I. Art dar. Sie sind auf Deformationsinkompatibilitäten zwischen einzelnen Körnern oder Kornbereichen zurückzuführen. Eigenspannungen III. Art entsprechen den Schwankungen der wahren örtlichen Eigenspannungen um den jeweiligen Wert der Summe der Eigenspannungen I. und II. Art. Entscheidende Werkstoffabmessung für diese Differenzierung ist also die Korngröße des betrachteten Werkstoffs oder ein nicht näher definierter Teilbereich dieser Körner.



$$\sigma^I = \frac{1}{V_{\text{makro}}} \int \sigma(x) dV$$

$$\sigma^{II} = \frac{1}{V_{\text{Kristallit}}} \int (\sigma(x) - \sigma^I) dV$$

$$\sigma^{III} = \sigma(x) - \sigma^I - \sigma^{II}$$

Abb. 2 – Schematische Verteilung von Eigenspannungen I., II. und III. Art in einem homogenen (einphasigen) Werkstoff.

Bei der diffraktometrischen Eigenspannungsanalyse verursachen die Eigenspannungen I. und II. Art eine Interferenzlinienverschiebung, während die Eigenspannungen III. Art lediglich durch eine Braggreflexverbreiterung identifiziert werden können.

Abb. 3 beschreibt in Anlehnung an Abb. 2 schematisch die bei einem zweiphasigen Werkstoff mit den Phasen A und B vorliegenden Verhältnisse. Im Unterschied zu einphasigen Werkstoffen treten dort phasenspezifische Eigenspannungen II. Art und III. Art auf, während die Eigenspannungen I. Art als Mittelwerte über im Vergleich zu den Kristallitabmessungen der Phasen sehr viel größere Bereiche definitionsgemäß phasenunabhängig sind.

Wichtig für diffraktometrische Spannungsanalyse ist in diesem Fall, dass die Messung phasenselektiv ist. Daher sind weder die Eigenspannungen I. Art noch diejenigen II. Art einer Messung direkt zugänglich. Vielmehr werden unmittelbar nur die phasenspezifischen Eigenspannungen $\sigma_{P,A}^{ES}$ und $\sigma_{P,B}^{ES}$ der beiden Phasen A und B gemessen. Sie setzen sich, wie aus Abb. 3 hervorgeht, aus den Eigenspannungen I. Art sowie den Mittelwerten der Eigenspannungen II. Art zusammen [2].

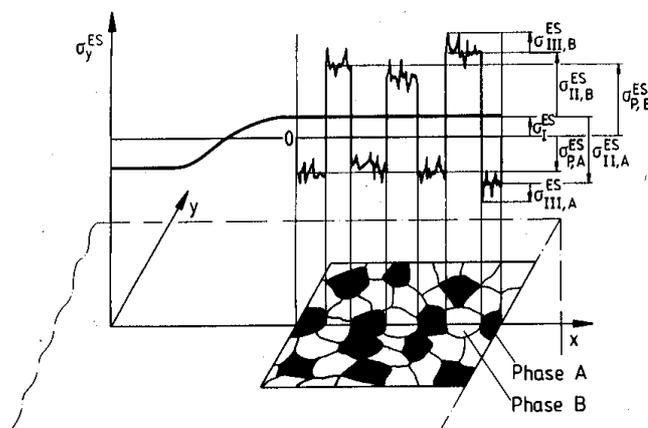


Abb. 3 – Überlagerung von Eigenspannungen I, II. und III. Art in einem zweiphasigen Werkstoff mit den Phasen A und B (schematisch).

Grundgleichung der Eigenspannungsanalyse mittels Beugungsmethoden

Gitterabstände können in kristallinen oder teilkristallinen Festkörper sehr präzise mit Beugungsmethoden gemäß der Bragg'schen Gleichung,

$$\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta_{hkl},$$

bestimmt werden. Diese verknüpft die Wellenlänge λ der einfallenden Neutronen mit dem gemessenen Beugungswinkel $2\theta_{hkl}$ und den Abständen der Gitterebenen der Kristallite, d_{hkl} . Jede Interferenzlinie eines Beugungsbildes kann somit einer Gitterebnenschar und einem Gitterebenenabstand zugeordnet werden. Die Messrichtung in deren Richtung der Gitterebenenabstand bestimmt wird, steht jeweils senkrecht auf der Ebenenschar, Abb. 4.

Durch mechanische Spannungen werden die Gitterebenenabstände etwas variiert, so dass sich die Interferenzlinien verschieben, Abb. 5.

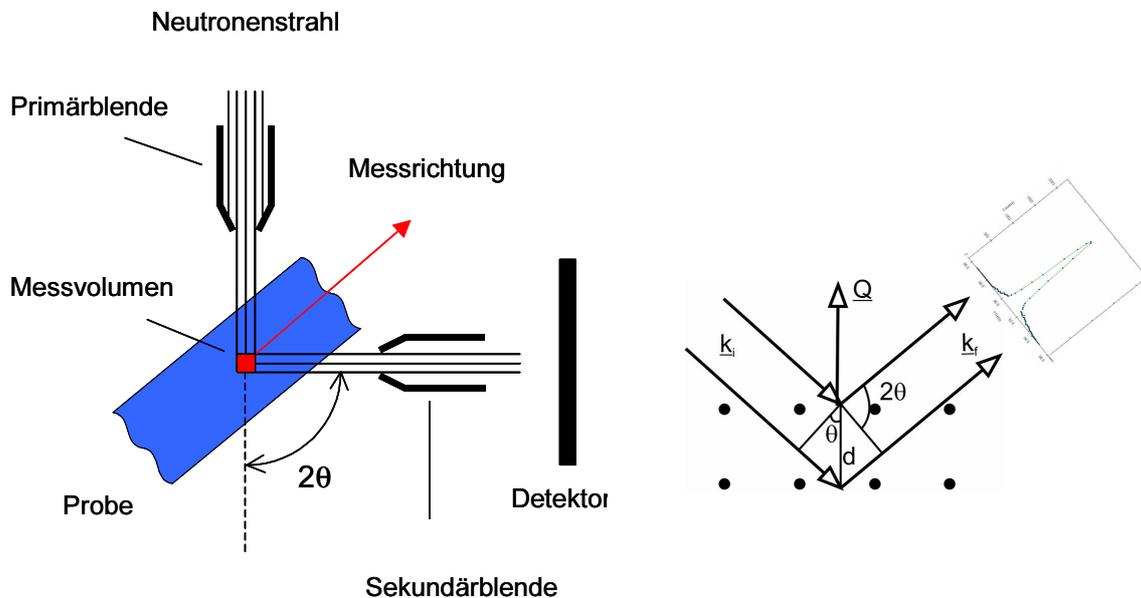


Abb. 4 – Prinzipielle Anordnung für ein Experiment zur Eigenspannungsanalyse mittels Neutronendiffraktometrie. Die räumliche Auflösung wird durch Begrenzung des einfallenden und des um den Winkel 2θ gebeugten Neutronenstrahls mittels fein justierbarer Blenden erreicht. Der Schnittpunkt dieser Strahlen definiert dann das Streuvolumen. Mit Hilfe eines computergesteuerten XYZ-Tisches kann dann jede Position in der Probe in das Streuvolumen gebracht und untersucht werden.

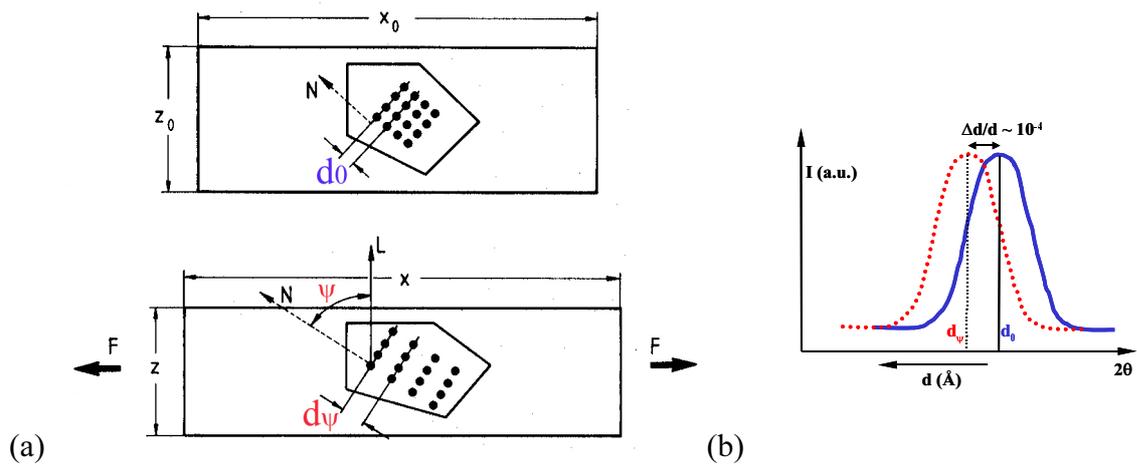


Abb. 5 – (a) Definition von makroskopischen Dehnungen und Gitterdehnungen. (b) Zu- gehörige Interferenzlinienverschiebung

Durch die Messung eines unverspannten Gitters erhält man einen $2\theta_0$ -Wert, den sog. Referenzwert. Aus den Änderungen der Interferenzlinienlagen des verspannten relativ zum unverspannten Gitter lassen sich die Gitterdehnungen $\epsilon_{\varphi,\psi}^{hkl}$ bestimmter Netzebenen $\{hkl\}$ direkt berechnen:

$$\epsilon_{\varphi,\psi}^{hkl} = \frac{d_{\varphi,\psi} - d_0}{d_0} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} - 1$$

Aus den in verschiedenen Richtungen gemessenen Gitterdehnungskomponenten kann der dreidimensionale Eigenspannungszustand mit Hilfe des verallgemeinerten Hooke'schen Gesetzes berechnet werden, wenn eine regellose Orientierungsverteilung der Kristallite (Quasiisotropie) vorliegt. **Das ist das Grundprinzip der Spannungsermittlung mittels Beugungsverfahren.** Es kann in diesem Falle gleichermaßen für Last- wie auch für Eigenspannungsbestimmungen angewandt werden.

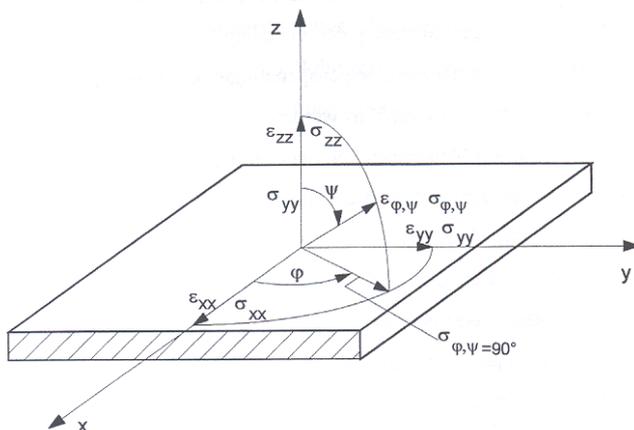


Abb. 6 – Koordinatensystem zur Messung von Eigenspannungen

Der Zusammenhang zwischen, der durch Neutronenbeugung unter dem Neigungswinkel ψ und dem Azimut φ (Abb. 6) bestimmbarer Gitterdehnung $\epsilon_{\varphi,\psi}^{hkl}$ und dem wirksamen Spannungszustand, ergibt sich über die Gleichungen der linearen Elastizitätstheorie zu

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\varphi,\Psi}^{hkl} &= \frac{1}{2} S_2^{hkl} \left[(\sigma_{xx} \cos^2 \varphi + \sigma_{yy} \sin 2\varphi + \sigma_{yy} \sin^2 \varphi - \sigma_{zz}) \sin^2 \Psi \right] + \sigma_{zz} \cos^2 \Psi + \\ &+ \frac{1}{2} S_2^{hkl} \sigma_{zz} - S_1^{hkl} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \\ &+ \frac{1}{2} S_2^{hkl} \left[(\sigma_{xz} \cos \varphi + \sigma_{yz} \sin \varphi) \sin 2\Psi \right] \end{aligned}$$

mit

$$S_1^{hkl} = \frac{\nu^{hkl}}{E^{hkl}} \quad \text{und} \quad \frac{1}{2} S_2^{hkl} = \frac{\nu^{hkl} + 1}{E^{hkl}}$$

Durch die Verwendung von **Beugungselastizitätskonstanten** E^{hkl} (Elastizitätsmodul) und ν^{hkl} (Querkontraktionszahl) für die vermessenen Gitterebenen $\{hkl\}$ wird dabei die Anisotropie der selektiv erfassten Kristallite sowie deren Kopplung im Vielkristall berücksichtigt. Im Allgemeinen sind mindestens 6 unabhängige Messungen der Gitterdehnungen nötig um den kompletten Spannungstensor zu messen. Sind aber aufgrund von z.B. Probenform und –symmetrie die 3 Hauptspannungsrichtungen bekannt ist die Messung dieser Richtungen ausreichend. Im Fall, dass diese Richtungen mit den Koordinatenachsen des Laborsystems übereinstimmen, kann man die Gleichung umformen und erhält vereinfacht für die Spannung:

$$\sigma_{xx} = \frac{E^{hkl}}{(1 + \nu^{hkl})} \left[\varepsilon_{xx} + \frac{\nu^{hkl}}{1 - 2\nu^{hkl}} (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \right]$$

Bei der Spannungsanalyse heterogener, mehrphasiger Werkstoffe mittels Neutronenbeugung ist zu beachten, dass phasenspezifische Spannungen ermittelt werden, die Makro- als auch homogene Mikroeigenstressanteile enthalten können. Eine Separation beider Anteile kann erreicht werden, wenn Messungen in allen Phasen möglich und die jeweiligen Phasenanteile bekannt sind [3].

Eindringtiefen

Der besondere Vorteil von Neutronen in der Eigenspannungsmessung beruht auf der geringen Intensitätsschwächung des Neutronenstrahls beim Durchgang von Materie und der damit verbundenen großen Eindringtiefen (Abb. 7).

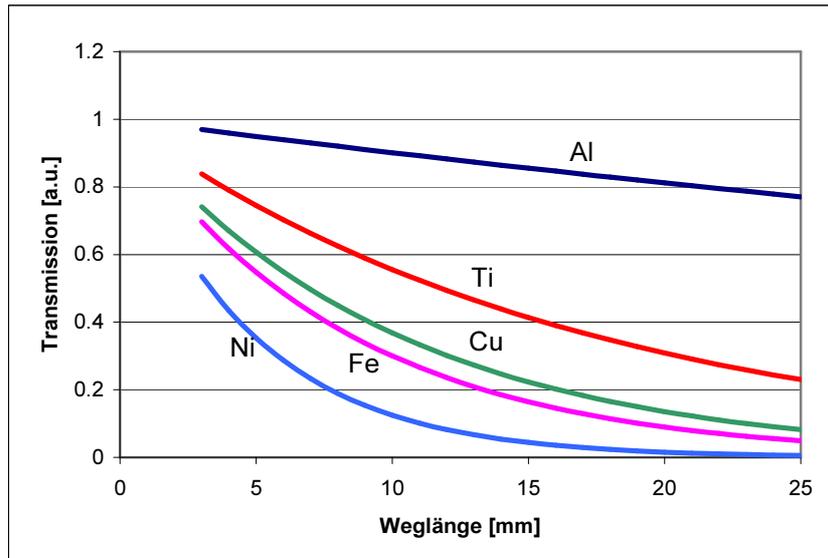


Abb. 7 – Schwächung von Neutronenstrahlung für verschiedene Materialien.

Die Schwächung der Intensität des Neutronenstrahls gehorcht einem Exponentialgesetz:

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot x)$$

Darin ist x der Laufweg der Neutronen innerhalb der Probe und μ der Absorptionsfaktor des Materials. Dieser errechnet sich aus

$$\mu = \Sigma_{ges} \cdot \rho$$

mit

ρ = atomare Dichte [Atome/cm³]

Σ_{ges} = Gesamtabsorptionsquerschnitt [barn]

Hierbei setzt sich Σ_{ges} folgendermaßen zusammen

$$\Sigma_{ges} = \sigma_{inc} + \sigma_{abs}(\lambda) + \sigma_{coh}$$

$$\sigma_{coh} = \pi(2R)^2 = 4\pi b^2$$

mit

σ_{inc} = inkohärenter Wirkungsquerschnitt [barn = 100 fm²]

$\sigma_{abs}(\lambda)$ = Absorptionswirkungsquerschnitt bei Wellenlänge λ [barn]

σ_{coh} = kohärenter Wirkungsquerschnitt [barn]

$R = b$ = Streulänge [fm]

Zur Definition der Streulänge b als Radius des effektiven Wirkungsquerschnitts.

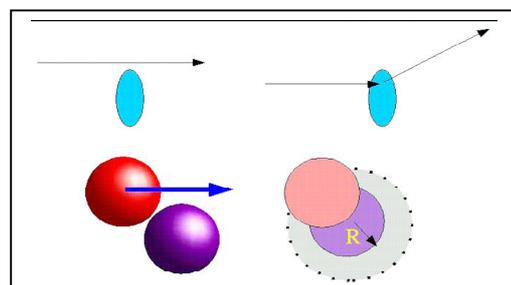


Tabelle 1

Name	Gitterkonstante [Å]	Gittertyp	σ_{inc}	$\sigma_{\text{abs}}(\lambda=1,798 \text{ \AA})$	σ_{coh}
Al	4.0409	fcc	0.0082(6)	0.231(3)	1.495(4)
α -Fe	2.88	bcc	0.38(21)	2.56(3)	11.44(14)

Frage:

1. Im Vorfeld des Versuchs bestimmen Sie bitte den Absorptionskoeffizienten von Aluminium (Al) und Eisen (Fe).
2. Informieren Sie sich über die Begriffe kubisches Kristallsystem, Gittertyp und Miller'sche Indizes. Hiermit sollten Sie in der Lage sein eine optimale Wellenlänge λ für einen Streuwinkel $2\theta = 90^\circ$ für den Al (311)-Reflex und den Fe (211)-Reflex zu bestimmen.

3. Versuchsaufbau

STRESS-SPEC ist ein Neutronendiffraktometer optimiert für die Ermittlung von Eigenspannungsverteilungen und Texturen innerhalb kristalliner Materialien und industriell relevanten Bauteilen (Abb. 8). Es ist am Strahlrohr SR 3 in der Experimentierhalle des FRM II aufgebaut. Die einzelnen Komponenten werden im Folgenden kurz erläutert:

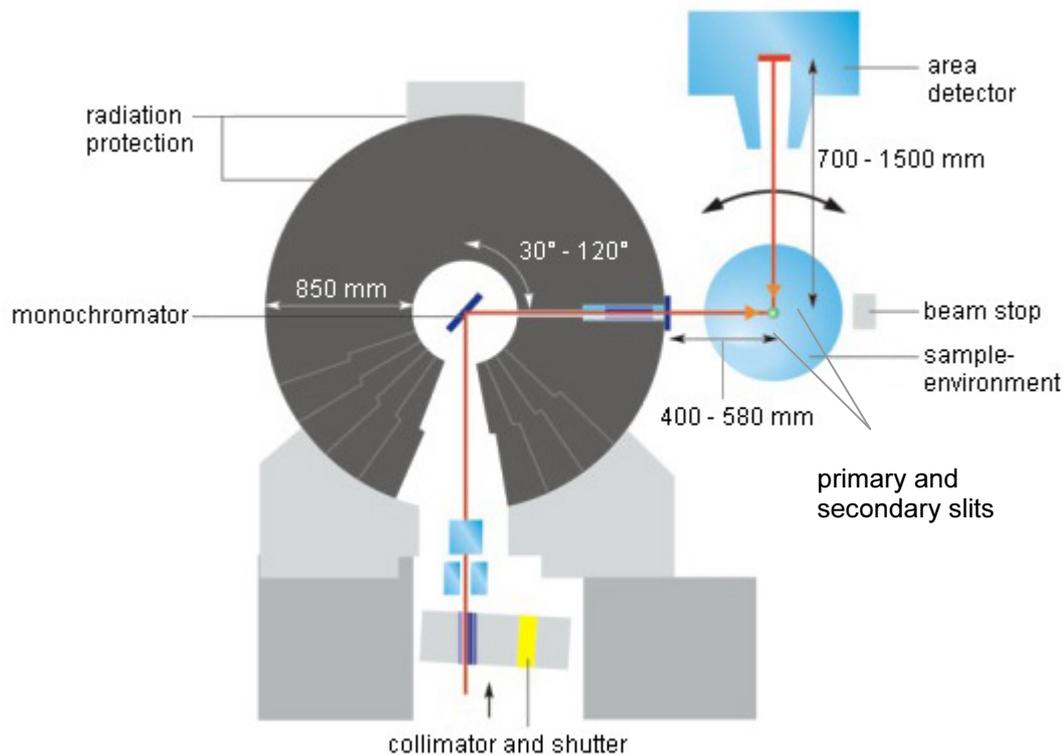


Abb. 8 – Schematischer Aufbau des Diffraktometers STRESS-SPEC

Abschirmung und Monochromatoren

Im Strahlrohr befindet sich eine Kollimatortrommel, die es erlaubt, entweder mit natürlicher Kollimation (ca. 60') zu arbeiten, mittels Kollimatoren von 25' bzw. 15' die Divergenz des Neutronenstrahls zu reduzieren. Die Monochromator-Trommel erlaubt eine kontinuierliche Variation der Wellenlänge über Einstellung der entsprechenden Braggbedingung am Monochromator:

$$2d \sin \theta_{\text{Mono}} = n\lambda$$

Diese für ein Diffraktometer ungewöhnliche Forderung ergibt sich aus der Notwendigkeit, an diesem Gerät vorgesehene Spannungsmessungen in der Regel bei $2\theta_{\text{Probe}} = 90^\circ$ durchzuführen und zwar aus zwei Gründen:

- zum Einen wird in diesem Fall für eine gegebene Schlitzbreite vor und hinter der Probe die beste Ortsauflösung erreicht (quader- oder würfelförmiges Volumenelement),
- zum Anderen ist hier die nutzbare vertikale Strahldivergenz nach der Probe am größten.

Zum Erzielen einer hohen Wellenlängenauflösung, die für anspruchsvolle Spannungsanalysen, insbesondere an keramischen Werkstoffen, aber auch für ausgewählte Texturprobleme erforderlich ist, sollten sehr große Monochromator take-off Winkel bis mindestens $2\theta_{\text{Mono}} = 120^\circ$ erreichbar sein. Für Messungen, bei denen keine hohe Auflösung erforderlich ist (z.B. Texturbestimmungen an metallischen Werkstoffen), sind zwecks Erhöhung der Intensität relativ niedrige Monochromatorwinkel von Vorteil. Das Gerät ist deshalb für take-off Winkel von $30^\circ < 2\theta_{\text{Mono}} < 120^\circ$ ausgelegt.

Es stehen drei Monochromatoren zur Verfügung (Ge (511), PG (002) und Si (400)), damit für jede gewünschte Wellenlänge der take-off Winkel entweder sehr groß (hohe Auflösung) oder relativ klein (hohe Intensität) gewählt werden kann. Vor dem Monochromator ist ein Blendensystem angebracht um den Primärstrahl der Messgeometrie anzupassen. Sekundärseitig des Monochromators kann die Divergenz durch die Wahl unterschiedlicher Einschübe sowie unterschiedlicher Kollimatoren (20', 40') gezielt eingestellt werden.

Probentisch und Probenaufnahme

Zur Probenaufnahme steht ein großer Probentisch zur Verfügung, der mit einem XYZ-Translationsstisch für Proben bis zu 300 kg ausgestattet ist. Der Probentisch kann entlang der Strahlachse mit hoher Präzision verfahren werden.

Blenden- und Justiersysteme

Zur Definition des Proben(mess-)volumens sind vor und hinter der Probe mechanisch auf 0.01 mm genau justierbare Blendensysteme installiert. Zur Justierung von Bauteilen sind Lasersysteme installiert.

Detektoren

Es sind zwei Detektorsysteme vorhanden. Ein Detektor ist mit 5 ^3He -Zählrohren bestückt und speziell für die Spannungsanalyse bei $2\theta_{\text{Probe}} = 90^\circ$ ausgelegt. Der zweite Detektor ist ein ^3He -Flächendetektor mit einer nutzbaren Detektionsfläche von $200 \times 200 \text{ mm}^2$ unterteilt in maximal 256×256 Pixel. Dieser Detektor kann sowohl für Spannungsmessungen als auch Texturbestimmung (diese auch bei anderen Probenwinkeln, $2\theta_{\text{Probe}}$) verwendet werden. Der Abstand zwischen Probe und Detektor ist variabel und kann zwischen 0.75 m bis 1.7 m eingestellt werden.

4. Versuchsdurchführung

Das Materialforschungsdiffraktometer STRESS-SPEC ist konzipiert um den kompletten Eigenspannungstensor in industriell relevanten Bauteilen zu erfassen. Um die Auswertung dieses Praktikumversuchs nicht unnötig zu erschweren wird auf vollständige Eigenspannungsanalyse verzichtet.

Alle Messungen werden unter Nutzung der Instrumentsteuerung und Auswertesoftware wie bei normalem Experimentierbetrieb am Instrument durchgeführt. Aufgrund der Komplexität des Instruments wird ein Instrumentenbetreuer immer vor Ort sein.

Der Ablauf des Versuchs sei wie folgt skizziert:

1. Bestimmung des Absorptionskoeffizienten für Aluminium und Stahl, anhand von Intensitätsmessungen an Proben verschiedener Dicke.
2. Zur Bestimmung des kristallographisch richtungsabhängigen E-Moduls (mikroskopisches E-Modul) werden Zugversuche an Zugproben aus Stahl am Fe(220) Reflex durchgeführt. Die Versuchsdurchführung beinhaltet folgende Punkte:
 - Probeneinbau und Aufbau eines Extensometers zur Dehnungsmessung
 - Probenjustierung
 - In situ Messung der Änderung des Netzebenenabstandes der Fe(220)-Gitterebenen senkrecht zur Zugrichtung. Dabei soll auf die Probe eine kontinuierlich ansteigende Kraft wirken, die die Probe schließlich plastisch verformt. Der 2θ Wert für eine Kraft von 0N wird später als Referenzwert dienen.
 - Auswertung des mikroskopischen E-Moduls für die gemessene Netzebene
3. Wiederholung von Schritt 2 für den Fe(211) Reflex. (Nachtmessung)
4. Bestimmung der ortsabhängigen Gitterdehnung eines in einem uniaxialen ex situ Biegeversuch plastisch deformierten Stahlbalken an einem aus den Schritten 2 und 3 auszuwählenden Stahlreflex. Die Versuchsdurchführung beinhaltet:
 - Aufbau eines geeigneten Probenhalterungssystems
 - Probenjustierung
 - Erstellen einer „Command Sequence“ zum automatischen Anfahren der einzelnen Messpunkte
 - Mit Hilfe des in den Schritten 2 bzw. 3 erhaltenem Referenzwert den genauen Eigenspannungsverlauf durch die Probe bestimmen

5. Auswertung

Wie üblich ist im Anschluss an die Durchführung eine Ausarbeitung anzufertigen. Sie muß alle durchgeführten Arbeiten kurz beschreiben. Dabei soll klar werden, dass der Sinn und Zweck der einzelnen Schritte verstanden wurde. Wenn Sie bereits während der Durchführung ausführlich alle Schritte mitprotokollieren, reduziert sich der spätere Arbeitsaufwand.

Im Anschluss daran ist eine Interpretation der Messungen zu geben. Vermeiden Sie die Wiederholung theoretischer Inhalte, die bereits Teil der Anleitung sind. Die Darstellung sollte dennoch in sich schlüssig sein.

Im Einzelnen:

1. Berechnen Sie den Absorptionkoeffizienten der jeweiligen Probe und vergleichen Sie diese mit den experimentell ermittelten Werten.
2. Zeichnen Sie Spannungs-Gitterdehnungs-Diagramme für beide durchgeführten Zugversuche. Berechnen Sie jeweils das mikroskopische E-Modul anhand der Messdaten. Entscheiden Sie welcher für die makroskopische Eigenspannungsanalyse besser geeignet ist. Vergleichen Sie hierfür die experimentell ermittelten mikroskopischen E-Module mit dem makroskopischen E-Modul des Stahls.
3. Bestimmen Sie mit dem ermittelten mikroskopischen Elastizitätsmodul den Eigenspannungsverlauf der plastisch verformten Stahlprobe und zeichnen Sie den Verlauf über den Querschnitt des Balkens. Benutzen Sie dafür den Referenzwert den Sie aus den Zugversuchen erhalten ($F = 0\text{N}$). Bewerten Sie die mögliche Unsicherheit in der Ermittlung des Referenzwertes d_0 unter Berücksichtigung des mechanischen Kräftegleichgewichts.

Hilfe: Nähere Informationen über charakteristische Eigenspannungsverläufe in Biegebalken finden Sie unter anderem in [4,5].

Literatur

- [1] G.L. Squires, Introduction to the Theory of Thermal Neutron Scattering, Dover reprints (1978)
- [2] M.T. Hutchings *et al.*, Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction, Taylor&Francis (2004)
- [3] L. Spieß *et al.*, Moderne Röntgenbeugung , B.G.Teubner Verlag (2005)
- [4] H.-J. Bargel, G. Schulze (Hrsg.), Werkstoffkunde, Springer-Verlag (2005).
- [5] W. Beitz, K.-H. Grote (Hrsg.), Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag (1997).