

DIN EN ISO 21432



ICS 19.100

Entwurf

Einsprüche bis 2020-07-01
Vorgesehen als Ersatz für
DIN SPEC 1095
(DIN ISO/TS 21432):2009-10

**Zerstörungsfreie Prüfung –
Standardprüfverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen durch
Neutronenbeugung (ISO 21432:2019);
Deutsche und Englische Fassung prEN ISO 21432:2020**

Non-destructive testing –

Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction
(ISO 21432:2019);

German and English version prEN ISO 21432:2020

Essais non destructifs –

Méthode normalisée de détermination des contraintes résiduelles par diffraction de neutrons
(ISO 21432:2019);

Version allemande et anglaise prEN ISO 21432:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-05-01 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs
besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nmp@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP), 10772 Berlin oder Saatwinkler Damm 42/43, 13627 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 113 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Nationales Vorwort

Der Text von ISO 21432:2019 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 135, „Non-destructive testing“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als prEN ISO 21432:2020 durch das Technische Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ übernommen, dessen Sekretariat von AFNOR (Frankreich) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 062-08-22 AA „Industrielle Durchstrahlungsprüfung“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN SPEC 1095 (DIN ISO/TS 21432):2009-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Bild 1 und Bild 5 durch aktualisierte geeignetere Versionen ersetzt. Die Legenden mehrerer Bilder wurden aktualisiert, um den Inhalt der Bilder besser wiederzugeben und zu erläutern;
- b) 5.4 umgestaltet, um den Unterschied zwischen monochromatischen Geräten und Flugzeit-Geräten hervorzuheben;
- c) Abschnitt 7 und Abschnitt 6 getauscht. Die neue Reihenfolge spiegelt besser die tatsächliche Reihenfolge der Schritte wider, die bei der Vorbereitung einer Messung ergriffen werden;
- d) 7.6 aktualisiert, um zusätzliche Einzelheiten hinsichtlich der Bestimmung des spannungsfreien Referenzwertes bereitzustellen;
- e) Abschnitt 10 leicht abgeändert und die Verweisungen auf die zur Bestimmung von Unsicherheiten maßgeblichen ISO/IEC-Guides aktualisiert;
- f) 11.7 hinzugefügt, um Unsicherheiten und Fehler in den Prüfbericht einzubeziehen;
- g) A.5.4 überarbeitet und geändert, um mehr Informationen über Auswirkungen der Korngröße und die Möglichkeiten, diese abzuschwächen, bereitzustellen;
- h) A.9 hinzugefügt, um die Berechnung von Spannungen im Falle makroskopisch anisotroper Werkstoffe zu erläutern;
- i) Literaturhinweise durch Aufnahme einiger neuer Verweisungen aktualisiert;
- j) Dokument redaktionell überarbeitet.

Zerstörungsfreie Prüfung — Standardprüfverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen durch Neutronenbeugung (ISO 21432:2019)

Essais non destructifs — Méthode normalisée de détermination des contraintes résiduelles par diffraction de neutrons (ISO 21432:2019)

Non-destructive testing — Standard test method for determining residual stresses by neutron diffraction (ISO 21432:2019)

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm
Dokument-Untertyp:
Dokument-Stage: CEN-Umfrage
Dokument-Sprache: D

STD Version 2.10b

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Vorwort	6
Einleitung	8
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
4 Symbole und Abkürzungen	14
4.1 Symbole und Einheiten	14
4.2 Indizes	15
4.3 Abkürzungen	15
5 Zusammenfassung des Verfahrens	15
5.1 Allgemeines	15
5.2 Überblick über das Prinzip — Bragg'sche Gleichung	16
5.3 Neutronenquellen	16
5.4 Bestimmung der Dehnung	16
5.4.1 Allgemeines	16
5.4.2 Monochromatisches Gerät	16
5.4.3 Flugzeit-Gerät	17
5.5 Neutronendiffraktometer	17
5.6 Bestimmung der Spannung	18
6 Zweck, Geometrie und Werkstoff	22
6.1 Allgemeines	22
6.2 Zweck der Messung	22
6.3 Geometrie	22
6.4 Zusammensetzung	22
6.5 Thermische/mechanische Vorgeschichte	23
6.6 Phasen und Kristallstrukturen	23
6.7 Homogenität	23
6.8 Mikrostruktur	23
6.9 Textur	23
7 Messvorbereitungen	23
7.1 Allgemeines	23
7.2 Ausrichtung und Kalibrierung des Gerätes	23
7.3 Wahl der Beugungsbedingungen	24
7.3.1 Monochromatische Geräte	24
7.3.2 Flugzeit-Geräte	27
7.4 Vorgehensweisen zur Anordnung	28
7.5 Messvolumen	28
7.6 Verfahren zur Bestimmung des makroskopisch spannungsfreien oder Bezugs-Gitterabstandes	29
8 Anforderungen an Messung und Aufzeichnung	32
8.1 Allgemeines	32
8.2 Anforderungen an die Aufzeichnung	32

8.2.1	Allgemeines	32
8.2.2	Allgemeine Angaben — Gerät	32
8.2.3	Allgemeine Angaben — Präparat	33
8.2.4	Bestimmte Angaben, die für jede Beugungsmessung erforderlich sind	33
8.3	Präparat-Koordinaten	34
8.4	Anordnung des Präparates	34
8.5	Messrichtungen	34
8.6	Anzahl und Lage von Messorten	35
8.7	Messvolumen	35
8.8	Überlegungen zum Schwerpunkt des Messvolumens	35
8.9	Temperatur	35
9	Berechnung der Spannung	35
9.1	Allgemeines	35
9.2	Bestimmung von Normalspannungen	36
9.3	Bestimmungen des Spannungszustandes	36
9.3.1	Allgemeines	36
9.3.2	Das $\sin^2\psi$ -Verfahren	37
9.4	Wahl von elastischen Konstanten	37
9.5	Beugungsdatenanalyse	38
9.5.1	Allgemeines	38
9.5.2	Peak-Anpassungsfunktion	38
9.5.3	Untergrundfunktion	38
9.5.4	Peak-Untergrund-Verhältnis	38
9.5.5	Peak-Profil-Verzerrungen	38
10	Zuverlässigkeit	39
11	Prüfbericht	40
11.1	Allgemeines	40
11.2	Dehnungs- oder Spannungswerte	40
11.2.1	Allgemeines	40
11.2.2	Spannungsfreier Gitterabstand oder Bezugs-Gitterabstand	40
11.2.3	Umrechnung von Dehnung in Spannung	40
11.2.4	Elastische Konstanten	40
11.2.5	Anordnung	40
11.3	Neutronenquelle und Gerät	40
11.4	Allgemeine Messverfahren	41
11.5	Eigenschaften der Präparate/Werkstoffe	41
11.6	Urwerte	41
11.7	Unsicherheiten und Fehler	41
Anhang A (informativ)	Mess- und Analysemethodik	42
A.1	Allgemeines	42
A.2	Präparat-Koordinaten	42
A.2.1	Allgemeines	42
A.2.2	Präparate mit Symmetrie-Elementen	42
A.2.3	Präparate mit einer unregelmäßigen Form	42
A.3	Anordnung des Präparates	43
A.3.1	Allgemeines	43
A.3.2	Bezugspunkt	43
A.3.3	Messvolumen	43
A.3.4	Präparat	43
A.4	Anzahl und Lage von Messstellen für die Beugungsmessung	44
A.4.1	Allgemeines	44
A.4.2	Messungen an einem Ort	44
A.4.3	Dehnungsabbildung	44

A.4.4	Entfernung von Werkstoff zur Erleichterung von Messungen an schwierigen Orten.....	44
A.5	Messvolumen.....	44
A.5.1	Bestimmung des IGV.....	44
A.5.2	Ausrichtung der strahlbestimmenden Optik	45
A.5.3	Maße des Messvolumens	45
A.5.4	Korngröße	46
A.5.5	Schwächung	46
A.5.6	Zählzeit.....	47
A.6	Weitere Überlegungen zum Messvolumen	47
A.6.1	SGV und seine Lage.....	47
A.6.2	Durch Geräte verursachte Abweichungen	47
A.6.3	Verfahren zur Verringerung von Abweichungen.....	48
A.7	Datenanalyse.....	48
A.7.1	Allgemeines	48
A.7.2	Analyse zweier sich überlappender Beugungspeaks	48
A.7.3	Analyse mehrerer sich überlappender Beugungspeaks	49
A.7.4	Gesamtbildanalyse.....	49
A.8	Messung und Aufzeichnung der Temperatur.....	49
A.9	Makroskopische Werkstoffanisotropie.....	50
Anhang B (informativ) Bestimmung von Unsicherheiten in einer Messgröße.....		53
B.1	Einleitung	53
B.2	Unsicherheit bei der Spannungsbestimmung.....	53
B.3	Unsicherheit bei der Dehnungsbestimmung.....	54
B.4	Unsicherheit im Hinblick auf den Gitterabstand	54
B.5	Beispiel.....	55
Literaturhinweise.....		57

Europäisches Vorwort

Der Text von ISO 21432:2019 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 135, „Non-destructive testing“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als prEN ISO 21432:2020 durch das Technische Komitee CEN/TC 138 „Zerstörungsfreie Prüfung“ übernommen, dessen Sekretariat von AFNOR gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird CEN ISO/TS 21432:2005 ersetzen.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO 21432:2019 wurde von CEN als prEN ISO 21432:2020 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Vorwort

ISO (die Internationale Organisation für Normung) ist eine weltweite Vereinigung nationaler Normungsinstitute (ISO-Mitgliedsorganisationen). Die Erstellung von Internationalen Normen wird üblicherweise von Technischen Komitees von ISO durchgeführt. Jede Mitgliedsorganisation, die Interesse an einem Thema hat, für welches ein Technisches Komitee gegründet wurde, hat das Recht, in diesem Komitee vertreten zu sein. Internationale staatliche und nichtstaatliche Organisationen, die in engem Kontakt mit ISO stehen, nehmen ebenfalls an der Arbeit teil. ISO arbeitet bei allen elektrotechnischen Normungsthemen eng mit der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) zusammen.

Die Verfahren, die bei der Entwicklung dieses Dokuments angewendet wurden und die für die weitere Pflege vorgesehen sind, werden in den ISO/IEC-Direktiven, Teil 1 beschrieben. Es sollten insbesondere die unterschiedlichen Annahmekriterien für die verschiedenen ISO-Dokumentenarten beachtet werden. Dieses Dokument wurde in Übereinstimmung mit den Gestaltungsregeln der ISO/IEC-Direktiven, Teil 2 erarbeitet (siehe www.iso.org/directives).

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. ISO ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren. Details zu allen während der Entwicklung des Dokuments identifizierten Patentrechten finden sich in der Einleitung und/oder in der ISO-Liste der erhaltenen Patenterklärungen (siehe www.iso.org/patents).

Jeder in diesem Dokument verwendete Handelsname dient nur zur Unterrichtung der Anwender und bedeutet keine Anerkennung.

Für eine Erläuterung des freiwilligen Charakters von Normen, der Bedeutung ISO-spezifischer Begriffe und Ausdrücke in Bezug auf Konformitätsbewertungen sowie Informationen darüber, wie ISO die Grundsätze der Welthandelsorganisation (WTO, en: World Trade Organization) hinsichtlich technischer Handelshemmnisse (TBT, en: Technical Barriers to Trade) berücksichtigt, siehe www.iso.org/iso/foreword.html.

Dieses Dokument wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 135, *Non-destructive testing*, Unterkomitee SC 5, *Radiographic Testing* erarbeitet.

Diese erste Ausgabe ersetzt ISO/TS 21432:2005, die technisch überarbeitet wurde. Es enthält auch die Technische Berichtigung ISO/TS 21432:2005/Cor. 1:2008. Des Weiteren ersetzt dieses Dokument ISO/TTA3:2001.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zu ISO/TS 21432 sind folgende:

- Bild 1 und Bild 5 wurden durch aktualisierte geeignetere Versionen ersetzt. Die Legenden mehrerer Bilder wurden aktualisiert, um den Inhalt der Bilder besser wiederzugeben und zu erläutern.
- 5.4 wurde umgestaltet, um den Unterschied zwischen monochromatischen Geräten und Flugzeit-Geräten hervorzuheben.
- Der frühere Abschnitt 7 wurde zu Abschnitt 6 und umgekehrt. Die neue Reihenfolge spiegelt besser die tatsächliche Reihenfolge der Schritte wider, die bei der Vorbereitung einer Messung ergriffen werden.
- 7.6 wurde aktualisiert, um zusätzliche Einzelheiten hinsichtlich der Bestimmung des spannungsfreien Referenzwertes bereitzustellen.
- Abschnitt 10 wurde leicht abgeändert und die Verweisungen auf die zur Bestimmung von Unsicherheiten maßgeblichen ISO/IEC-Guides wurden aktualisiert.

- 11.7 wurde hinzugefügt, um Unsicherheiten und Fehler in den Prüfbericht einzubeziehen.
- A.5.4 wurde überarbeitet und geändert, um mehr Informationen über Auswirkungen der Korngröße und die Möglichkeiten, diese abzuschwächen, bereitzustellen.
- A.9 wurde hinzugefügt, um die Berechnung von Spannungen im Falle makroskopisch anisotroper Werkstoffe zu erläutern.
- Die Literaturhinweise wurden durch Aufnahme einiger neuer Verweisungen aktualisiert.
- Im gesamten Dokument wurden geringfügige Überarbeitungen des Textes vorgenommen, um kleine Fehler zu berichtigen und die Klarheit zu verbessern.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Auflistung dieser Institute ist unter www.iso.org/members.html zu finden.

Einleitung

Neutronenbeugung ist ein Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung, das bei der Bestimmung der Eigenspannungen von kristallinen Werkstoffen angewendet werden kann. Es kann auch zur Bestimmung von inneren Spannungen in Proben genutzt werden, die aufgebrachten Spannungen ausgesetzt sind. Mit dem Verfahren können Spannungen bestimmt werden, die im Innern von Werkstoffen sowie auch an den Oberflächengrenzen auftreten. Bei der Durchführung dieses Prüfverfahrens ist es erforderlich, Präparate oder maschinenbauliche Komponenten an eine Neutronenquelle zu führen. Aus den Messungen werden elastische Dehnungen abgeleitet, die wiederum in Spannungen umgerechnet werden. Der Zweck dieses Dokuments ist es, eine Internationale Norm zur zuverlässigen Bestimmung von Spannungen, die für technische Anwendungen maßgebend sind, zur Verfügung zu stellen.

WARNUNG — Dieses Dokument erhebt nicht den Anspruch, dass die möglicherweise mit seiner Anwendung verbundenen Sicherheitsprobleme angesprochen werden. Es liegt in der Verantwortung des Anwenders dieses Dokumentes, geeignete Vorkehrungen für den Arbeits- und Gesundheitsschutz zu treffen und die Anwendbarkeit einschränkender Vorschriften vor der Anwendung zu bestimmen.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument beschreibt das Prüfverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen in polykristallinen Werkstoffen durch Neutronenbeugung. Es ist sowohl bei homogenen als auch bei inhomogenen Werkstoffen anwendbar, einschließlich derjenigen Werkstoffe, die verschiedene Phasen enthalten.

Die Grundlagen des Verfahrens der Neutronenbeugung werden kurz dargestellt. Es werden Vorschläge bezüglich folgender Punkte bereitgestellt:

- die Auswahl geeigneter Beugungsgitterebenen, an denen Messungen für jeweils unterschiedliche Werkstoffkategorien erfolgen sollten;
- die Richtungen des Präparates, in denen die Messungen durchgeführt werden sollten; und
- das untersuchte Werkstoffvolumen im Verhältnis zur Korngröße des Werkstoffs und den beabsichtigten Spannungszustand.

Es werden Verfahren zur genauen Anordnung und Ausrichtung der Prüfstücke in einem Neutronenstrahl sowie zur genauen Festlegung des für die einzelnen Messungen abgetasteten Werkstoffvolumens beschrieben.

Es erfolgt eine Beschreibung der für die Kalibrierung der zur Neutronenbeugung verwendeten Geräte erforderlichen Vorkehrungen. Es werden Verfahren vorgestellt, mit denen eine spannungsfreie Referenzprobe hergestellt werden kann.

Die Verfahren zur Durchführung von Einzelmessungen mittels Neutronenbeugung werden ausführlich beschrieben. Es werden Vorgehensweisen zur Analyse der Ergebnisse und zur Bestimmung ihrer statistischen Relevanz vorgestellt. Es werden Hinweise gegeben, wie zuverlässige Schätzwerte von Eigenspannungen aus den Dehnungswerten bestimmt und wie die Unsicherheit der Ergebnisse geschätzt werden kann.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 13925-3:2015, *Zerstörungsfreie Prüfung — Röntgendiffraktometrie von polykristallinen und amorphen Materialien — Teil 3: Geräte*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1

Neutronenabsorption

Neutroneneinfang durch einen Atomkern

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine Tabelle mit Wirkungsquerschnitten des Kerneinfangs kann Literaturhinweis [1] entnommen werden.

3.2

Ausrichtung

Einstellung der Lage und Orientierung des Präparates und auch aller Gerätebestandteile, so dass Messungen genau an der gewünschten Stelle im Präparat durchgeführt werden können

3.3

Anisotropie

Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Richtung in Bezug auf die Probe

3.4

Schwächung

Verringerung der Intensität des Neutronenstrahls

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Schwächung kann durch Anwendung des so genannten „Gesamt-Neutronen-Wirkungsquerschnitts“ berechnet werden, der *Neutronenabsorption* (3.1) und unterschiedliche Kernstreuprozesse umfasst. Die Schwächungslänge ist der Weg innerhalb des Werkstoffes, für den sich die primäre Neutronenstrahlintensität um $1/e$ verringert.

3.5

Untergrund

Intensität, die als nicht zum *Beugungssignal* (3.13) gehörig betrachtet wird

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Abhängigkeit des Untergrundes vom Streuwinkel oder der *Flugzeit* (3.34) ist nicht ungewöhnlich und kann sich auf die *Peak-Position* (3.11) auswirken, die sich aus der Datenanalyse ergibt.

3.6

strahlbestimmende Optik

Anordnung von Vorrichtungen, die zur Festlegung der Eigenschaften eines Neutronenstrahls, wie beispielsweise Wellenlänge und Intensitätsverteilungen, Divergenz und Form, genutzt werden

Anmerkung 1 zum Begriff: Dazu gehören Vorrichtungen wie z. B. Aperturbliquen, Schlitzblenden, Kollimatoren, Monochromatoren und Spiegel.

3.7

Bragg-Kante

drastische Veränderung der Neutronenintensität als Funktion der Wellenlänge oder des Monochromator-Abstrahlwinkels, die dem Zustand $\lambda = 2d_{hkl}$ entspricht, wobei *hkl* eine (*hkl*)-Beugungsgitterebene des untersuchten Werkstoffes angibt

3.8

Bragg-Peak

Intensitätsverteilung des durch eine bestimmte (*hkl*)-Gitterebene gebeugten Neutronenstrahls

3.9

Peak-Höhe

Höchstzahl gezählter Neutronenimpulse des *Bragg-Peaks* (3.8) oberhalb des *Untergrundes* (3.5)

3.10

Peak-Funktion

analytischer Ausdruck zur Beschreibung der Form des *Bragg-Peaks* (3.8)

3.11

Peak-Position

Einzelwert, der die Lage eines *Bragg-Peaks* (3.8) beschreibt

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Peak-Position ist die bestimmende Größe für die Dehnungsberechnung.

3.12

Peak-Intensität

integrierte Intensität

Bereich unterhalb des *Beugungs-Peaks* (3.13) oberhalb des *Untergrundes* (3.5), der üblicherweise aus den verbundenen angepassten Parametern einer ausgewählten *Peak-Funktion* (3.10) und einer Untergrundfunktion berechnet wird

3.13

Beugung

Streuung, die durch kohärente Interferenzerscheinungen entsteht

3.14

beugungsbezogene elastische Konstanten

E_{hkl}

ν_{hkl}

elastische Konstanten, die mit der *Beugung* (3.13) aus einzelnen (*hkl*)-Gitterebenen eines polykristallinen Werkstoffs zusammenhängen

3.15

Diffraktogramm

Intensitätsverteilung gebeugter Neutronen von einem kristallinen Werkstoff über die verfügbaren Bereiche von Wellenlänge, *Flugzeit* (3.34) und/oder *Beugungswinkeln* (3.13)

3.16

Halbwertsbreite

HWB

Breite des *Bragg-Peaks* (3.8) bei halber *Peak-Höhe* (3.9) oberhalb des *Untergrundes* (3.5)

3.17

Gesamtbildanalyse

Bestimmung der kristallografischen Struktur und/oder Dehnung aus einem gemessenen (Mehrfach-Peak)-*Diffraktogramm* (3.15) eines polykristallinen Werkstoffes

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Allgemeinen wird die Gesamtbildanalyse nach dem angewendeten Verfahren bezeichnet (z. B. Rietveld-Verfeinerung). Siehe auch *Einzelpeak-Analyse* (3.31).

3.18

Messvolumen

Volumen, aus dem Informationen erhalten werden

3.19

Gitterkonstanten

Längen- und Winkelmaße der kristallografischen Elementarzelle

3.20

Gitterabstand

d-Wert

Gitterebenenabstand

Abstand zwischen aneinander grenzenden parallelen kristallografischen Gitterebenen

3.21

Spannungstyp I

Makrospannung

Spannung, die sich über eine mit der Struktur oder Komponente vergleichbare Längenskala selbst im Gleichgewicht hält, wodurch sie sich über mehrere Körner und/oder Phasen erstreckt

3.22

Spannungstyp II

Spannung, die sich über eine mit der Korngröße vergleichbare Längenskala selbst im Gleichgewicht hält

Anmerkung 1 zum Begriff: Spannungen vom Typ II und Typ III sind zusammen als Mikrospannungen bekannt.

3.23

Spannungstyp III

Spannung, die sich über eine Längenskala selbst im Gleichgewicht hält, welche kleiner als die Korngröße ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Spannungen vom Typ II und Typ III sind zusammen als Mikrospannungen bekannt.

3.24

monochromatisches Gerät

Neutronengerät, bei dem ein schmales Band von Neutronenenergien (Wellenlängen) angewendet wird

3.25

monochromatischer Neutronenstrahl

monochromatischer Strahl

Neutronenstrahl mit einem schmalen Band von Neutronenenergien (Wellenlängen)

3.26

Orientierungsverteilungsfunktion

quantitative Beschreibung der kristallografischen *Textur* (3.32)

Anmerkung 1 zum Begriff: Die orientierungsbezogene Verteilungsfunktion ist zur Berechnung der elastischen Konstanten von texturierten Werkstoffen erforderlich.

3.27

polychromatischer Neutronenstrahl

Neutronenstrahl, der ein breites Band von Neutronenenergien (Wellenlängen) enthält

3.28

Bezugspunkt

Schwerpunkt des Geräte-Messvolumens (3.18)

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe 7.5.

3.29

Vergleichpräzision

Grad der Übereinstimmung zwischen Anzeigen oder Messgrößenwerten, die unter Messbedingungen aus einer Reihe von Bedingungen erhalten wurden, welche unterschiedliche Messorte, Bearbeiter, Messsysteme und wiederholte Messungen an demselben Objekt oder an ähnlichen Objekten umfasst

Anmerkung 1 zum Begriff: Eine gültige Aussage zur Vergleichpräzision erfordert eine Festlegung der jeweils veränderten Bedingungen. Diese können das Messprinzip, das Messverfahren, den Beobachter, das Messgerät, die Referenznorm, die Lage, die Nutzungsbedingungen und die Zeit einschließen.

Anmerkung 2 zum Begriff: Vergleichpräzision kann quantitativ in Form der Dispersionseigenschaften der Ergebnisse angegeben werden.

Anmerkung 3 zum Begriff: Ergebnisse verstehen sich hier in der Regel als korrigierte Ergebnisse.

Anmerkung 4 zum Begriff: Diese Definition kombiniert ISO/IEC Guide 99:2007, 2.25, 2.15, und 2.24.

3.30

inkohärenter Streuer

Werkstoff, der auf unkorrelierte Weise Neutronen streut, was zu einem starken *Untergrundsignal* (3.5) und keinen *Bragg-Peaks* (3.8) oder lediglich einigen wenigen mit niedriger Amplitude führt

3.31

Einzelpeak-Analyse

statistisches Verfahren zur Bestimmung der Kenngrößen eines Peaks und des *Untergrundes* (3.5) aus den gemessenen *Beugungswerten* (3.13)

3.32

Textur

Vorzugsorientierung von Kristalliten, bezeichnet als kristallografische Textur, oder andere mikrostrukturelle Merkmale, bezeichnet als morphologische Textur, innerhalb eines Präparates

3.33

Oberflächen-Abtastung

Wand-Abtastung

Intensitäts-Abtastung

Verfahren zur Bestimmung der Lage einer Oberfläche oder Grenzfläche eines Präparates in Bezug auf den *Bezugspunkt* (3.28)

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Ergebnis wird oftmals als Eintrittskurve bezeichnet.

3.34

Flugzeit

Zeit, die ein Neutron mit einer bestimmten Geschwindigkeit benötigt, um den Weg von einem definierten Ausgangspunkt bis zum Detektor zurückzulegen

3.35

Unsicherheit bei einer Messung

nicht-negativer Parameter, der die Streuung der Werte charakterisiert, die der Messgröße beigeordnet ist, auf der Grundlage der benutzten Information

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Messunsicherheit schließt Komponenten ein, die sich aus systematischen Effekten ergeben wie Komponenten, die mit Korrekturen und den zugewiesenen Größenwerten von Normalen zusammenhängen, sowie die Eigenunsicherheit. Manchmal werden geschätzte systematische Effekte nicht korrigiert, sondern es werden stattdessen beigeordnete Messunsicherheitsbeiträge berücksichtigt.

Anmerkung 2 zum Begriff: Der Parameter kann beispielsweise sein: eine Standardabweichung, genannt Standardmessunsicherheit (oder ein vorgegebenes Vielfaches davon), oder die halbe Spannweite eines Intervalls mit einer angegebenen Überdeckungswahrscheinlichkeit.

Anmerkung 3 zum Begriff: Die Messunsicherheit umfasst im Allgemeinen viele Komponenten. Einige davon können mit Hilfe der Ermittlungsmethode A der Messunsicherheit aus der statistischen Verteilung der Größenwerte aus Messreihen ermittelt und durch Standardabweichungen charakterisiert werden. Die anderen Komponenten, die mit der Ermittlungsmethode B der Messunsicherheit ermittelt werden können, können ebenfalls durch Standardabweichungen charakterisiert werden, ermittelt aus Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen auf der Grundlage von Erfahrungen oder anderen Informationen.

Anmerkung 4 zum Begriff: Im Allgemeinen wird für eine Menge an Informationen davon ausgegangen, dass die Messunsicherheit einem gegebenen Größenwert beigeordnet ist, der der Messgröße zugewiesen ist. Eine Änderung dieses Größenwerts führt zu einer Änderung der beigeordneten Unsicherheit.

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.26, modifiziert – Die Benennung wurde von „Unsicherheit einer Messung“ (en: uncertainty of measurement) geändert; die alternativen Benennungen „Messunsicherheit“ (en: measurement uncertainty) und „Unsicherheit“ (en: uncertainty) wurden entfernt.]

4 Symbole und Abkürzungen

4.1 Symbole und Einheiten

a, b, c	Kantenlängen einer Elementarzelle, hier als Gitterkonstanten bezeichnet	nm
B	Untergrund an der Peak-Position	—
d	Gitterebenenabstand	nm
E	makroskopischer Elastizitätsmodul	GPa
E_{hkl}	auf die (hkl) -Beugungsgitterebenen bezogener Elastizitätsmodul	GPa
g	Spannungsgradient	mm ⁻¹
h	Plancksche Konstante	Js
hkl	Indizes einer kristallografischen Gitterebene	
ANMERKUNG Im Rest des Dokuments wird bei der Verwendung von (hkl) berücksichtigt, dass in jeder Ebene der Familie $\{hkl\}$ die Beugung jeweils unter den gleichen Bedingungen erfolgt.		
$hkil$	alternative Miller-Index-Schreibweisen einer kristallografischen Gitterebene bei hexagonalen Strukturen	
H	Peak-Höhe oberhalb des Untergrunds	—
I	integrierte Neutronenintensität eines Bragg-Peaks oberhalb des Untergrundes	
$\vec{k}_i, \vec{k}_f$	Wellenvektoren der einfallenden und gebeugten Neutronen	nm ⁻¹
L	Weglänge von der Neutronenquelle zum Detektor	m
l	Länge der Neutronenschwächung	mm
m_n	Neutronenmasse ($1,67 \times 10^{-27}$ kg)	kg
N_n	Gesamtanzahl der gezählten Neutronen	
$\vec{Q}$	Streuvektor ($\vec{k}_f - \vec{k}_i$)	nm ⁻¹
t	Flugzeit der Neutronen von der Quelle zu den Detektoren	s
T	Temperatur	°C oder K
u	Standard-Messunsicherheit	—
x, y, z	Achsen des Präparat-Koordinatensystems	
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	K ⁻¹
Δ	Schwankung oder Änderung des folgenden Parameters	
ε	elastische Dehnung	—
ε_{ij}	Komponenten des Tensors der elastischen Dehnung	—

ε_{hkl}	auf die $\{hkl\}$ -Beugungsgitterebene bezogene normale elastische Dehnung	—
λ	Wellenlänge von Neutronen	nm
ν	Poisson'sche Konstante	
ν_{hkl}	elastische Konstante, die der auf die (hkl) -Beugungsgitterebene bezogenen Poisson'schen Konstante entspricht	
$\vec{\sigma}$	Spannung	MPa
σ_{ij}	Komponenten des Spannungstensors	MPa
σ_Y	Fließspannung	MPa
2θ	Beugungswinkel	Grad
ϕ, ψ	Orientierungswinkel	Grad

4.2 Indizes

$hkl, hkil$	geben die Relevanz für die kristallografischen (hkl) - oder $(hkil)$ -Gitterebenen an
x, y, z	geben Komponenten der betreffenden Größe entlang der x -, y - und z -Achsen an
ϕ, ψ	geben die normale Komponente in der (ϕ, ψ) -Richtung der betreffenden Größe an
0 (Null)	gibt den spannungsfreien Wert der betreffenden Größe an
ref	gibt den Bezugswert der betreffenden Größe an

4.3 Abkürzungen

PSD	positionsempfindlicher Detektor (en: Position sensitive detector)
TOF	Flugzeit (en: time-of-flight)
IGV	Geräte-Messvolumen (en: instrumental gauge volume)
NGV	Nenn-Messvolumen (en: nominal gauge volume)
SGV	abgetastetes Messvolumen (en: sampled gauge volume)

5 Zusammenfassung des Verfahrens

5.1 Allgemeines

In diesem Dokument wird die Bestimmung von Eigenspannungen behandelt, die in technischen Analysen benötigt werden. Die Spannungen werden aus Messungen der Neutronenbeugung von Gitterabständen ermittelt. Aus Änderungen dieser Abstände können Werte der elastischen Dehnung abgeleitet und aus diesen wiederum Spannungen berechnet werden. Durch schrittweise Translation eines Präparates oder Bestandteils über den Bezugspunkt können Spannungen an unterschiedlichen Orten innerhalb des Präparates bestimmt werden. In diesem Abschnitt wird das Messverfahren zusammengefasst.

5.2 Überblick über das Prinzip — Bragg'sche Gleichung

Wenn das Gitter eines kristallinen Werkstoffs mit einer durchdringenden Neutronenstrahlung bestrahlt wird, die (eine) Wellenlänge(n) ähnlich den interplanären Abständen hat, wird diese Strahlung in Form deutlicher Bragg-Peaks gebeugt. Der Winkel, bei dem ein solcher Peak auftritt, ist durch die Bragg'sche Beugungsgleichung gegeben, siehe Gleichung (1).

$$2d_{hkl} \cdot \sin\theta_{hkl} = \lambda \quad (1)$$

Dabei ist

λ die Wellenlänge der Neutronen;

d_{hkl} der Abstand zwischen den für die Bragg-Peaks verantwortlichen (hkl)-Gitterebenen;

θ_{hkl} der Bragg'sche Winkel.

Der Peak wird bei einem Winkel $2\theta_{hkl}$ aus der Richtung des einfallenden Strahls beobachtet, wie in Bild 1 schematisch dargestellt.

5.3 Neutronenquellen

Bei Neutronenbeugung werden Neutronenstrahlen genutzt, die entweder durch Kernspaltung oder durch Kernzertrümmerung (Spallation) entstehen; Spaltung wird vorwiegend in kontinuierlichen Kernreaktoren angewendet und Zertrümmerung in gepulsten Spallationsquellen. In beiden Fällen werden die erzeugten Neutronen so moderiert, dass ihre Energien im thermischen Bereich, d. h. $\lambda \geq 0,09$ nm, liegen. Bei Reaktorquellen wird ein monochromatischer Neutronenstrahl üblicherweise dadurch extrahiert, dass mit einem Kristall-Monochromator aus dem ursprünglich polychromatischen Strahl ein bestimmtes schmales Neutronen-Wellenlängenband ausgewählt wird. Bei Spallationsquellen besteht der Neutronenstrahl üblicherweise aus einer Reihe von Kurzimpulsen, die jeweils ein Wellenlängenspektrum enthalten. Die Geschwindigkeit (und daher die Wellenlänge nach dem Boglie-Prinzip) eines jeden Neutrons kann durch Messung des bis zum Detektor zurückgelegten Weges und der dafür benötigten Zeit, die als TOF bezeichnet wird, bestimmt werden. TOF-Messungen sind daher wellenlängendispersiv, wobei das gesamte Diffraktogramm bei allen verfügbaren Detektorpositionen aufgezeichnet wird.

5.4 Bestimmung der Dehnung

5.4.1 Allgemeines

Aus der Bragg'schen Gleichung geht hervor, dass der Gitterabstand d , wenn λ und θ durch experimentelle Bestimmung bekannt sind, ermittelt werden kann. Die Gitterdehnung wird als relative Änderung von d in Bezug auf den spannungsfreien Gitterabstand d_0 festgelegt. Somit ist die Gitterdehnung für die mit den Miller'schen Indizes hkl gekennzeichneten Gitterebenen durch Gleichung (2) gegeben:

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_{0,hkl}}{d_{0,hkl}} = \frac{\Delta d_{hkl}}{d_{0,hkl}} \quad (2)$$

Aufgrund des Beugungsvorgangs erfolgt die Messung in Richtung des Streuvektors, $\vec{Q} = \vec{k}_f - \vec{k}_i$, der den Winkel zwischen einfallendem und gebeugtem Strahl halbiert und senkrecht zu den Beugungsebenen verläuft, wie in Bild 1 dargestellt.

5.4.2 Monochromatisches Gerät

Wenn ein Präparat mit einem monochromatischen Neutronenstrahl einer festen Wellenlänge bestrahlt wird, kann dessen Gitterabstand anhand des beobachteten Bragg'schen Winkels θ bestimmt werden, indem die

Bragg'sche Gleichung [siehe Gleichung (1)] in die Dehnungsgleichung [siehe Gleichung (2)] eingesetzt wird. Somit können elastische Gitterdehnungen direkt aus den entsprechenden Bragg'schen Winkeln θ_{hkl} und $\theta_{0,hkl}$ bestimmt und durch Gleichung (3) angegeben werden:

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{\sin\theta_{0,hkl}}{\sin\theta_{hkl}} - 1 \quad (3)$$

5.4.3 Flugzeit-Gerät

Bei einem Flugzeit-Gerät enthält der einfallende Strahl Neutronen, die einen Bereich von Geschwindigkeiten (d. h. Wellenlängen) überspannen und in Impulsen auf der Probe ankommen. In diesem Fall beugen alle Gitterebenen senkrecht zum Streuvektor Neutronen zum Detektor. Die Beugung, die jedem hkl -Peak entspricht, wird durch verschiedene Kornfamilien erzeugt. Durch Anwendung der Broglie-Beziehung und der Bragg'schen Gleichung [siehe Gleichung (1)] nimmt die Flugzeit t_{hkl} für eine bestimmte Wellenlänge, Kristallebene und einen Detektor, der sich bei Winkel 2θ befindet, die in Gleichung (4) angegebene Form an:

$$t_{hkl} = 2 \frac{m_n}{h} \times L \times \sin\theta \times d_{hkl} \quad (4)$$

Durch Lösen von d_{hkl} und $d_{0,hkl}$ und Einsetzen in die Dehnungsgleichung [Gleichung (2)] kann die elastische Dehnung für einen festen Winkel 2θ aus der Flugzeitänderung unter Anwendung von Gleichung (5) berechnet werden:

$$\varepsilon_{hkl} \equiv \frac{t_{hkl} - t_{0,hkl}}{t_{0,hkl}} = \frac{\lambda_{hkl} - \lambda_{0,hkl}}{\lambda_{0,hkl}} \quad (5)$$

oder durch Bildung des Mittelwerts über alle Ebenen unter Anwendung einer Gesamtbildanalyse wie z. B. des Verfahrens der Rietveld-Verfeinerung [2] (siehe 7.3.2 und A.7.3).

5.5 Neutronendiffraktometer

Ein monochromatisches Gerät, das üblicherweise zur Bestimmung der Dehnung bei einer kontinuierlichen Quelle eingesetzt wird, ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Der polychromatische Neutronenstrahl wird zunächst durch Beugung an einem geeigneten Monochromator auf eine festgelegte Wellenlänge in einen monochromatischen Strahl umgewandelt. Dieser monochromatische Strahl wird räumlich durch geeignete strahlbestimmende Blenden definiert, um einen Strahl mit kontrollierten Maßen zu erzeugen. Die Neutronen in diesem Strahl werden am bestrahlten Präparatvolumen gebeugt und durch einen Neutronendetektor eingefangen. In Bild 3 ist ein Beispiel für ein mit einem monochromatischen Gerät erzeugtes Beugungs-Peak dargestellt.

Bei üblicherweise an Impulsquellen eingesetzten Flugzeit-Diffraktometern erzeugt jeder Impuls ein Beugungsprofil, das sich über einen Bereich von Gitterabständen erstreckt. Bild 4 zeigt ein Flugzeit-Diffraktometer, das üblicherweise für in zwei Richtungen gleichzeitig durchgeführte Bestimmungen der Dehnung an einer Impulsquelle eingesetzt wird. Da ein fester Streuwinkel angewendet wird, nutzen die meisten Geräte an Spallationsquellen radiale Kollimation. Dadurch können Neutronen über einen weiteren Raumwinkel nachgewiesen werden, als dies mit einem Schlitz möglich wäre, wobei jedoch gleichzeitig sichergestellt ist, dass die meisten nachgewiesenen Neutronen aus einem definierten Messvolumen stammen (siehe 7.5). Die Signale der einzelnen Elemente der Detektoranordnung werden kombiniert, wobei ihre jeweils unterschiedlichen Winkelstellungen berücksichtigt werden. Zwei oder mehr Detektoren mit radialen Kollimatoren können angewendet werden, um die gleichzeitige Messung von mehr als einer $\vec{Q}$ -Richtung (Dehnung) zu ermöglichen. Bild 5 zeigt ein typisches Diffraktogramm, das bei Anwendung eines derartigen Gerätes entsteht, und das außerdem das Ergebnis einer Profilverfeinerung nach dem Rietveld-Verfahren dargestellt, bei der ein kristallografisches Modell der Struktur unter Anwendung einer Analyse der kleinsten Quadrate an die Beugungswerte angepasst wird (siehe 7.3.2).

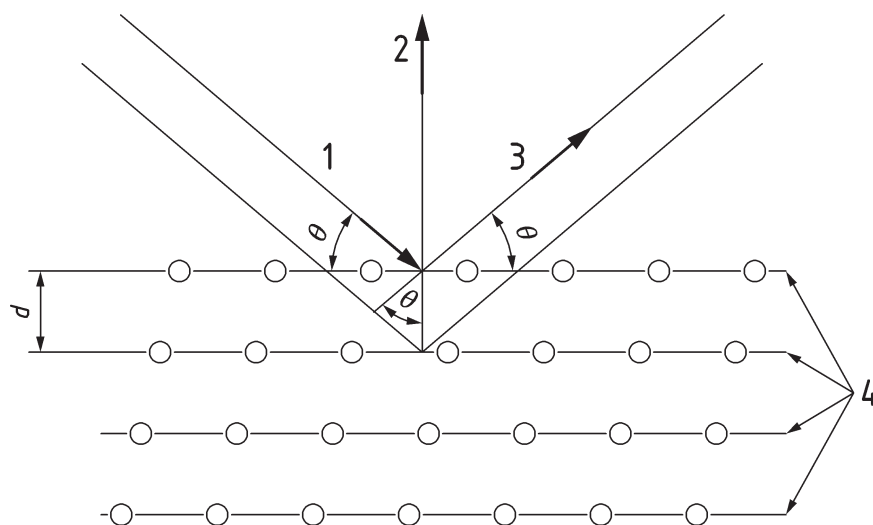
Zusätzliche Angaben bezüglich der Anpassung der Beugungswerte werden in 9.5 bereitgestellt.

5.6 Bestimmung der Spannung

Spannung und Dehnung sind Tensoren zweiter Stufe, die durch die elastischen Konstanten eines Festkörpers miteinander im Zusammenhang stehen. Da durch Neutronenbeugung elastische Dehnungen innerhalb eines definierten Volumens in einem kristallinen Festkörper ermittelt werden können, ist es möglich, die mittlere Spannung in diesem Volumen zu berechnen, vorausgesetzt, die entsprechenden elastischen Konstanten des Werkstoffes sind bekannt. Für die Ableitung des vollständigen Dehnungstensors ist die Bestimmung elastischer Dehnungen in mindestens sechs voneinander unabhängigen Richtungen erforderlich. Wenn die Hauptdehnungsrichtungen innerhalb des Körpers bekannt sind, reichen Messungen entlang dieser drei orthogonalen Richtungen aus, um die Hauptspannungen zu bestimmen. Liegen Spannungs- oder Dehnungsbedingungen einer Ebene vor, ist eine weitere Verringerung auf zwei Richtungen möglich. Im Fall einer einachsigen Belastung ist die Messung in lediglich einer Richtung ausreichend. Abschnitt 9 und A.9 stellen weitere Einzelheiten zur Berechnung von Spannungen aus abgeleiteten Dehnungen bereit.

Spannungen und Dehnungen in einem Präparat sind in der Regel richtungs- und lageabhängig. Daher ist es erforderlich, Dehnungen an mehreren Stellen und in mehr als einer Richtung zu ermitteln. Dies wiederum erfordert die genaue Ausrichtung des Präparates im Hinblick auf den kollimierten Neutronenstrahl und die Detektoren. Dies wird üblicherweise durch Befestigung des Präparates auf linearen Translations- und Drehtischen erreicht.

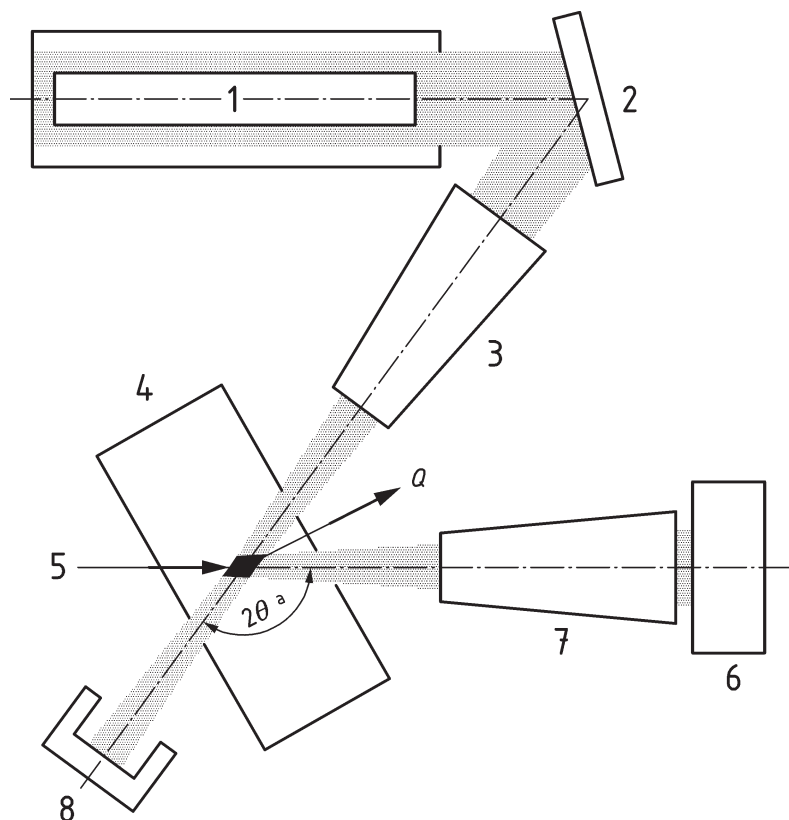
Durch eine stufenweise Bewegung des Präparates in Bezug zu dem Volumen im Raum, das durch den Schnittpunkt des einfallendem und gebeugtem Strahls bestimmt wird (bezeichnet als Messvolumen, siehe 7.5), kann die räumliche Schwankung der elastischen Dehnung und, nach Messungen in anderen Richtungen, der Spannung in einem Präparat oder Bestandteil abgebildet werden.



Legende

- 1 Vektor der einfallenden Welle $\vec{k}_i$
- 2 Streuvektor $\vec{Q}$
- 3 Vektor der gebeugten Welle $\vec{k}_f$
- 4 Beugungsebenen mit Abstand d
- θ halber Beugungswinkel

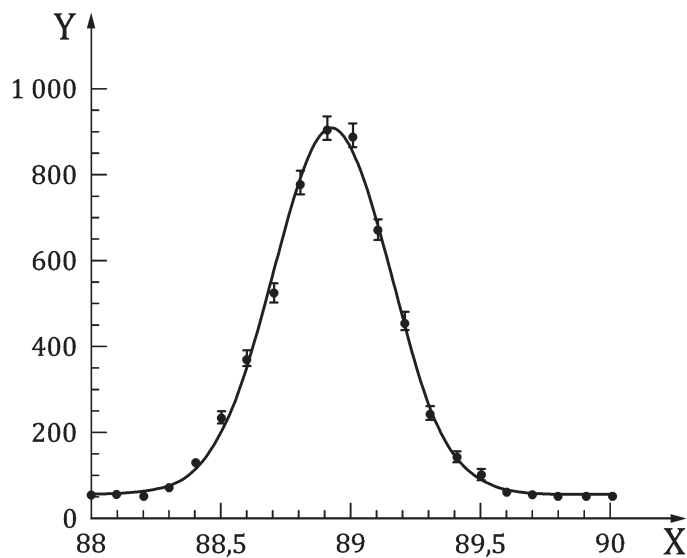
Bild 1 — Bragg'sche Beugungsgeometrie



Legende

- 1 Neutronenstrahl von der Quelle
- 2 Monochromator
- 3 strahlbestimmende Optik für den einfallenden Strahl und die Abschirmung
- 4 Präparat
- 5 Messvolumen
- 6 Detektor
- 7 strahlbestimmende Optik für den gebeugten Strahl und die Abschirmung
- 8 Strahlbegrenzer
- Q Streuvektor
- $2\theta^a$ Streuwinkel

Bild 2 — Schematische Darstellung eines zur Bestimmung der elastischen Dehnung verwendeten Diffraktometers an einer kontinuierlichen Quelle

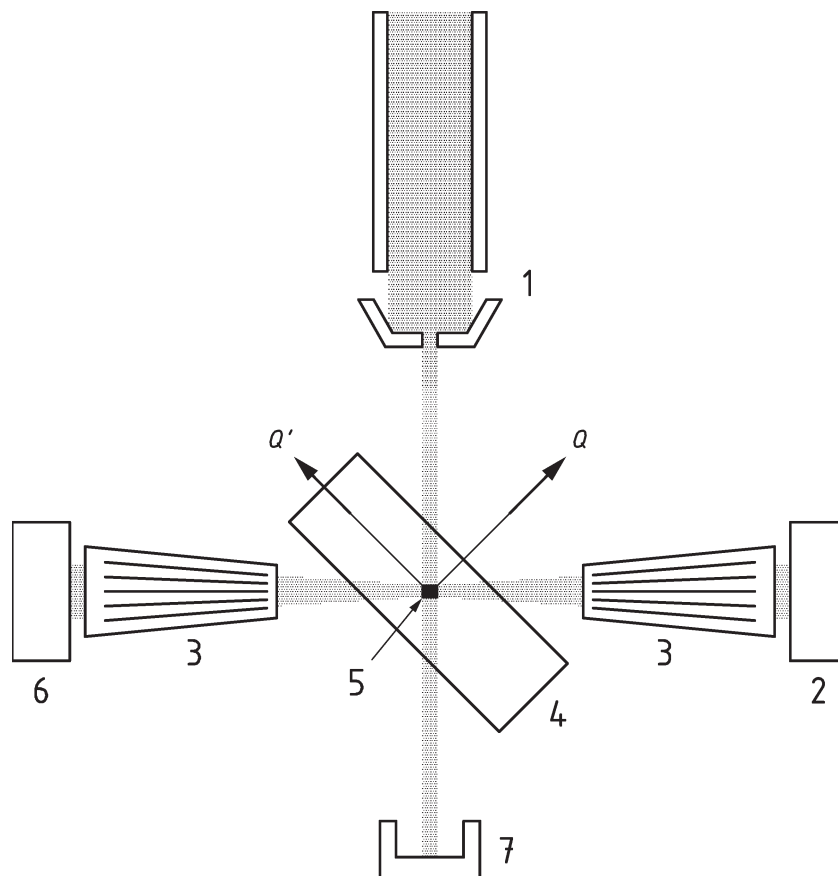


Legende

X 2θ , Grad

Y gezählte Neutronenimpulse

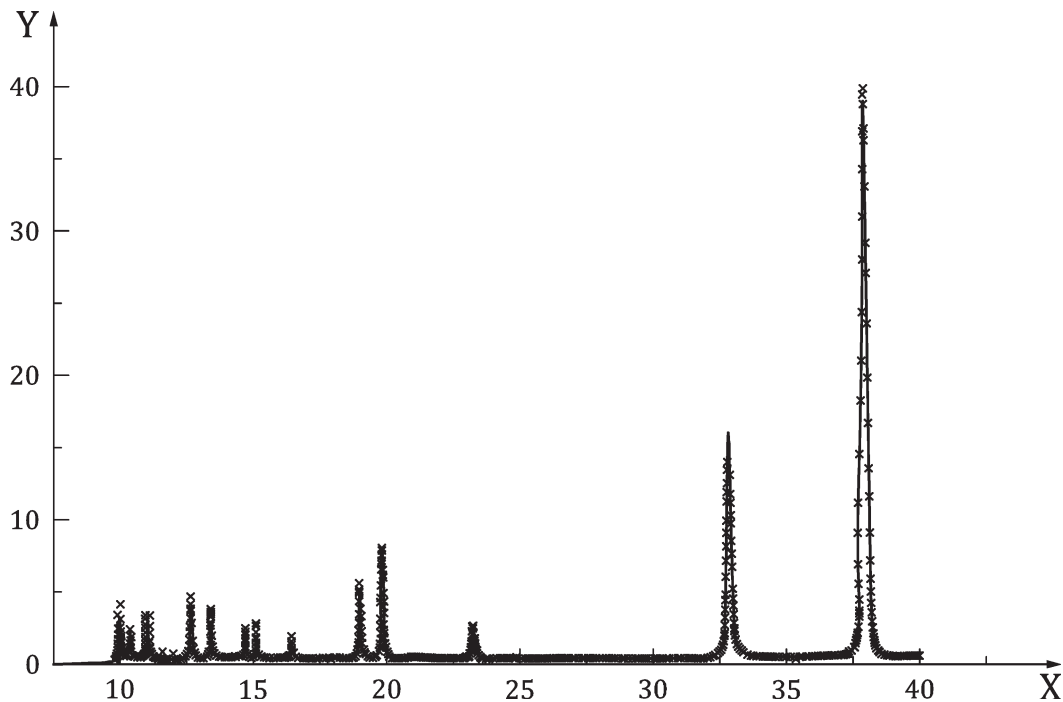
Bild 3 — Beispiel für einen Bragg-Peak bei einem Diffraktometer an einem Reaktor (kontinuierliche Quelle), angepasst mittels Gauß'scher Verteilung



Legende

- Q Streuvektor, rechter Detektor
- Q' Streuvektor, linker Detektor
- 1 Neutronenstrahl von der Quelle
- 2 rechter Detektor
- 3 radialer Kollimator
- 4 Präparat
- 5 Messvolumen
- 6 linker Detektor
- 7 Strahlbegrenzer

Bild 4 — Schematische Darstellung eines zur Bestimmung der elastischen Dehnung verwendeten Flugzeit-Diffraktometers an einer Impulsquelle



Legende

- X Flugzeit, ms
- Y Intensität
- x Daten
- Profilanpassung nach dem Rietveld-Verfahren

Bild 5 — Beispiel für ein Diffraktogramm einer Impulsquelle

6 Zweck, Geometrie und Werkstoff

6.1 Allgemeines

Die Gestaltung eines Versuchs hängt vom Zweck der Messung, den Abmessungen und der Form des Präparates, den Werkstoffen, aus denen dieser hergestellt ist sowie davon ab, wie dieser gefertigt und verwendet wurde.

6.2 Zweck der Messung

Der Zweck und Umfang der Messungen müssen festgelegt werden, da dies viele zu treffende Entscheidungen bestimmt.

6.3 Geometrie

Die Fertigungsmaße und Form des Präparates müssen bekannt sein und bei der Vorbereitung der Messung berücksichtigt werden.

6.4 Zusammensetzung

Um die Wahl geeigneter Versuchsbedingungen zu ermöglichen, sind genormte Werkstoffbezeichnungen zu verwenden, die die chemische Zusammensetzung und das Bearbeitungsverfahren angeben. Darüber hinaus müssen bei mehrphasigen Werkstoffen, einschließlich Verbundwerkstoffen, die chemische Zusammensetzung, Fraktion, Orientierung und Morphologie jeder Phase ebenfalls hinsichtlich ihres Einflusses auf die Spannungsbestimmung berücksichtigt werden.

6.5 Thermische/mechanische Vorgeschichte

Das zur Gestaltung, Formung oder Zusammensetzung des Präparates angewendete Bearbeitungsverfahren muss einschließlich Wärmebehandlung bei der Versuchsauslegung berücksichtigt werden. Bei Teilen, die außer Betrieb genommen wurden, können die früheren Betriebsbedingungen ebenfalls maßgebend sein.

6.6 Phasen und Kristallstrukturen

Die Phasen in dem zu untersuchenden Werkstoff müssen bekannt sein. Die kristallografische Struktur der für die Messungen verwendeten Phasen muss bekannt sein.

6.7 Homogenität

Angaben zu räumlichen Schwankungen in der Zusammensetzung, Mikrostruktur oder Phasenverteilung sind für den Versuch von Bedeutung. Diese können Einfluss auf das Vertrauen in die an einem bestimmten Ort in einem Präparat oder Bestandteil erhaltenen Messwerte haben sowie darauf, ob es zulässig ist, die Ergebnisse als für das gesamte Präparat oder den gesamten Bestandteil repräsentativ zu betrachten. Insbesondere können Inhomogenitäten in der Mikrostruktur und Zusammensetzung zu Schwankungen im spannungsfreien Gitterabstand mit Position im Präparat oder Bestandteil führen (siehe 7.6).

6.8 Mikrostruktur

Körner oder Verbundwerkstoff-Verstärkungen mit großen Maßen können zu Punkt-zu-Punkt-Schwankungen der Intensität der Beugungs-Peaks führen, was darauf hindeuten kann, dass die für Untersuchung entnommene Kornanzahl unzureichend ist. Folglich muss in derartigen Fällen die auf das angewendete Messvolumen und die Spannungsverteilungen bezogene Korngröße ermittelt werden.

6.9 Textur

Das Vorhandensein einer kristallografischen Textur beeinflusst die Intensität der Beugungs-Peaks und die Umwandlung von Dehnung in Spannung. Wenn bekannt ist, dass der Werkstoff infolge von Bearbeitung oder Anwendung eine Textur besitzt, sollte diese charakterisiert und mögliche Auswirkungen sollten im Bericht angegeben werden.

7 Messvorbereitungen

7.1 Allgemeines

Vor einer tatsächlichen Messung ist es erforderlich, die Ausrichtung des Gerätes vorzunehmen oder diese zu verifizieren. Anschließend müssen geeignete Bedingungen für die Beugungsmessung gewählt werden, und das Präparat ist präzise auf dem Diffraktometriergerät anzuordnen. Außerdem müssen die Maße des Volumens, anhand dessen die Beugungsdaten erfasst werden, gewählt werden.

7.2 Ausrichtung und Kalibrierung des Gerätes

Es ist erforderlich, das verwendete Diffraktometer auszurichten und nach bewährter Verfahrensweise zu kalibrieren (siehe A.5.2). Bei Anwendung eines Gerätes, das einen monochromatischen Strahl erzeugt, muss sichergestellt werden, dass während der gesamten Messreihe eine konstante Wellenlänge aufrechterhalten wird und dass das Winkelverhalten des Detektors in Übereinstimmung mit EN 13925-3:2015, Anhang C kalibriert wurde. Bei einem Flugzeit-Diffraktometer sollten sowohl die Flugbahn als auch das Winkelverhalten des Detektors kalibriert werden. Bei beiden Gerätetypen erfolgt die Kalibrierung unter Anwendung eines genormten Präparates, üblicherweise Silicium-, Zerdioxid- oder Aluminiumoxidpulver. Derartige Präparate werden gewählt, da sie Neutronen stark beugen, bekannte und wohldefinierte Gitterkonstanten sowie kleine Eigenpeak-Breiten aufweisen. Wenn Angaben zur Intensität bei einem Flugzeit-Gerät erforderlich sind, müssen der einfallende Neutronenfluss und der Wirkungsgrad des

Detektors in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmt werden. Eine Möglichkeit, dies zu tun, ist die Verwendung eines inkohärenten Streuers, wie z. B. Vanadium.

7.3 Wahl der Beugungsbedingungen

7.3.1 Monochromatische Geräte

7.3.1.1 Wahl der Wellenlänge

Bei monochromatischen Geräten muss der Nutzer die Neutronen-Wellenlänge für einen bestimmten Versuch aus dem Bereich der vorhandenen Wellenlängen auswählen. Die Wellenlänge und Beugungsebene sollten so gewählt werden, dass bei einem Beugungswinkel nahe 90° eine wirksame Durchführung des Versuchs erreicht wird. Wenn die gewählte Wellenlänge jedoch etwa das Doppelte des d -Wertes jeder beliebigen Beugungsebene im Präparat beträgt, kann eine mit der „Bragg-Kante“ zusammenhängende spektrale Verzerrung auftreten, die zu Peak-Verschiebungen führen kann, die fälschlicherweise als Dehnungen ausgelegt werden können. Diese „problematischen“ Wellenlängen wurden in Literaturhinweis [3] für mehrere gewöhnliche Metalle in Tabellenform aufgelistet. Insbesondere bei kubischen Werkstoffen sollten Beugungswinkel, die zu nahe bei 90° liegen, vermieden werden, da für alle (hkl) -Beugungsebenen eine alternierende $(h'k'l')$ -Beugungsebene existiert, die eine mit der Bragg-Kante zusammenhängende Wirkung erzeugen kann.

Der Wirkungsgrad, mit dem eine Messung durchgeführt werden kann, hängt von Parametern ab wie z. B. räumliche Auflösung, Intensität des einfallenden Strahls bei der gewählten Wellenlänge, Intensität der gebeugten Neutronen, Peak-Breite und Trennung des zu untersuchenden von den angrenzenden Peaks. Im Hinblick auf diese Faktoren kann ein von 90° bedeutend abweichender Beugungswinkel wirksamer sein als ein Winkel, der nahe bei 90° liegt.

7.3.1.2 Wahl der Beugungsgitterebene

Bei elastischer und plastischer Anisotropie in einem Werkstoff können unterschiedliche (hkl) -Ebenen unterschiedlich auf ein makroskopisches Spannungsfeld reagieren [4]. Dies kann durch Be- und Entlasten eines Zugstabes lokal in einem Neutronendiffraktometer unter gleichzeitiger Aufzeichnung der Messwerte für die Spannung und Dehnung veranschaulicht werden, wie in Bild 6 und Bild 7 dargestellt. In diesen Bildern wird die durch eine Messdose in Reihe mit einem Prüfstab aufgezeichnete Spannung in Abhängigkeit von der aus Neutronenbeugungs-Messwerten abgeleiteten elastischen Dehnung aufgetragen.

Bild 6 zeigt, dass im elastischen Bereich unabhängig von der Reihe von Gitterebenen, die für die Durchführung der Messungen verwendet werden, eine lineare Reaktion erhalten wird. Dies verdeutlicht, dass für die Bestimmung der Spannung in diesem Bereich jede (hkl) -Reflexion angewendet werden kann, vorausgesetzt, dass die geeigneten beugungsbezogenen elastischen Konstanten gewählt werden. Im Allgemeinen handelt es sich bei diesen weder um die makroskopischen elastischen Konstanten noch um die Einkristallwerte, sondern um den Wert eines polykristallinen Aggregats, der mit einer bestimmten (hkl) -Ebene zusammenhängt. Diese Konstanten können entweder wie in Bild 6 dargestellt in Versuchen ermittelt oder berechnet werden (siehe Abschnitt 9). Zu den Berechnungsverfahren gehören die Verfahren nach Reuss [5], Voigt [6], Neerfeld-Hill [7] [8] und selbstkonsistente Verfahren, z. B. nach Kröner [9]. Das Verfahren nach Neerfeld-Hill bietet in der Regel zuverlässige Näherungswerte und ist bedeutend einfacher umzusetzen als die selbstkonsistenten Ansätze. Unabhängig vom angewendeten Verfahren muss die kristallografische Textur des Präparates berücksichtigt werden. Siehe Literaturhinweise [10] und [11] für Diskussionen über die Bedeutung der Textur.

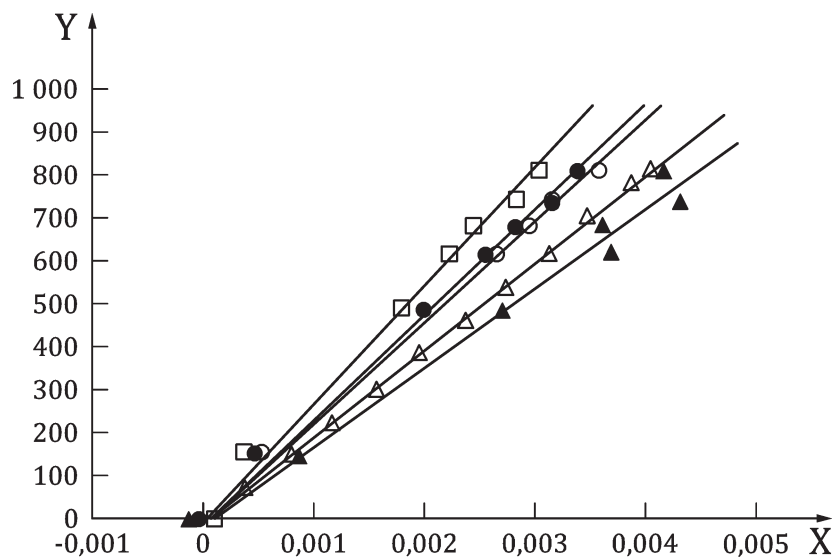
Plastische Verformung beginnt bei unterschiedlichen Spannungen, die von der Messdose in Körnern mit unterschiedlicher Orientierung aufgezeichnet werden, wie in Bild 7 dargestellt. Verdeutlicht wird dies durch eine nichtlineare Reaktion bei Belastung, gefolgt von einer linearen elastischen Entlastung. Daraus ergibt sich, dass bei Entlastung auf eine aufgebrachte Spannung von null für jede (hkl) -Ebene eine unterschiedliche elastische Restdehnung beobachtet werden kann. Diese Dehnungen werden üblicherweise als intergranulare Dehnungen bezeichnet. Nach der vollständigen Entlastung des Prüfstabes muss die technische

(makroskopische) Eigenspannung gleich null sein, um die Gleichgewichtsbedingungen zu erfüllen. Die Spannung wird aus den bei einer aufgetragenen Last von null beobachteten Restdehnungen berechnet. Jedoch kann dies eine Überlagerung von Spannungstyp I und Spannungstyp II sein. Daher ist es, wenn Spannungen vom Typ I zu ermitteln sind, wichtig, kristallografische Ebenen zu verwenden, die keine wesentliche (intergranulare) Dehnung vom Typ II tragen [z. B. Ebene (220) oder (311) in Bild 7].

In einigen Fällen ist es erforderlich und angemessen, (hkl) -Ebenen anzuwenden, die empfindlich gegenüber intergranularen Dehnungen sind. In derartigen Fällen müssen für die intergranularen Dehnungen Ausgleich geschaffen werden. Eine geeignete Herangehensweise ist es, den d_0 -Wert anhand von Plättchen zu bestimmen, die dem zu untersuchenden Präparat entnommen werden und klein genug sind, um keine Makrospannungen aufweisen [12] [13]. Beispiele für (hkl) -Ebenen mit einer hohen und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber intergranularen Dehnungen für einen Bereich von Werkstoffen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Diese Daten beruhen auf intergranularen Dehnungen, die sich in plastisch verformten einachsigen belasteten Präparaten herausgebildet haben. Allgemein kann die Verformungshistorie eines bestimmten Werkstoffes oder Bestandteils komplizierter sein.

Tabelle 1 — Beispiele für Ebenen, die eine hohe und eine geringe Empfindlichkeit gegenüber intergranularen Dehnungen aufweisen, aufgeführt für Werkstoffe mit unterschiedlicher Symmetrie

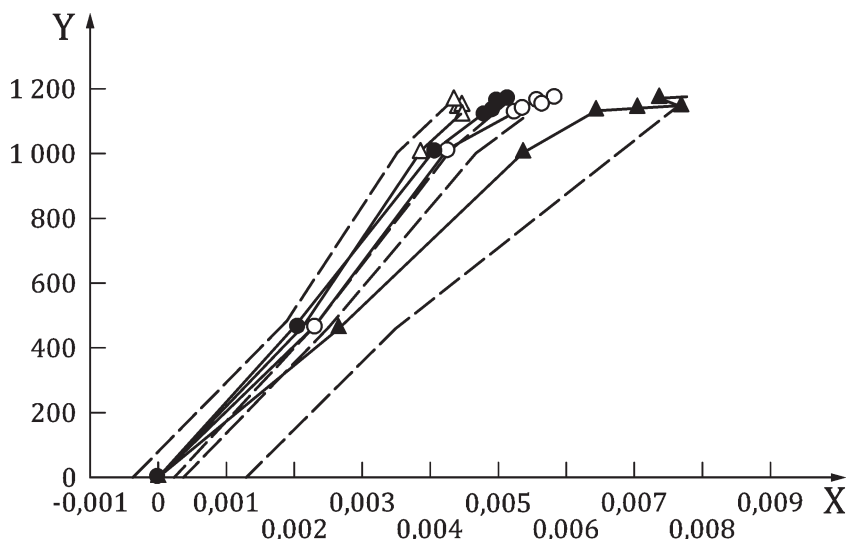
Werkstoff	Ebenen mit geringer Empfindlichkeit gegenüber intergranularen Dehnungen	Ebenen mit hoher Empfindlichkeit gegenüber intergranularen Dehnungen
kubisch-flächenzentriert (kfz) (Ni [14], Fe [15], Cu [16]), kfz (Al [17] [18]), Ni [4])	(111), (311), (422)	(200)
kubisch-raumzentriert (krz) (Fe [18])	(110), (211)	(200)
hexagonal dicht gepackt (Zirkaloy [19], Ti [20])	(10 $\bar{1}2$), (10 $\bar{1}3$),) (pyramidal)	(0002) (basal) (10 $\bar{1}0$),), (1 $\bar{2}10$),) (prismatisch)
hexagonal dicht gepackt (Be [21])	(20 $\bar{2}1$),), (11 $\bar{2}2$),) (pyramidal zweiter Ordnung)	(10 $\bar{1}2$),), (10 $\bar{1}3$),) (basal, prismatisch und pyramidal erster Ordnung)



Legende

- Ebenen (111)
- ▲ Ebenen (200)
- Ebenen (311)
- Profilverfeinerung
- △ Anzeige der Messdose
- X aufgezeichnete Gitterdehnung
- Y aufgebrachte Spannung (MPa)

Bild 6 — Elastische Reaktion unterschiedlicher kristallografischer Ebenen bei einer Nickellegierung [4]



Legende

- ▲— Ebenen (200)
- Ebenen (311)
- △— Ebenen (220)
- Profilverfeinerung
- unbelastet
- X aufgezeichnete Gitterdehnung
- Y aufgebrachte Spannung (MPa)

Bild 7 — Nachgeben als Reaktion unterschiedlicher kristallografischer Ebenen auf die Be- und Entlastung eines aus einer Nickellegierung bestehenden Zugstabes [4]

7.3.2 Flugzeit-Geräte

Wenn eine Gesamtbildanalyse wie z. B. das Rietveld-Verfeinerungsverfahren [2] angewendet wird, ergibt sich die Dehnung aus Änderungen der Gitterkonstanten, die die Maße der Elementarzelle festlegen.

Für kubische Werkstoffe mit der Gitterkonstante a_0 ist die Dehnung gegeben durch Gleichung (6):

$$\varepsilon = \frac{a - a_0}{a_0} \quad (6)$$

Dabei ist

- ε die Dehnung;
- a der sich aus der Gesamtbildanalyse ergebende Wert der Gitterkonstante [dieser Wert ersetzt in Gleichung (2) den Gitterabstand d];
- a_0 die spannungsfreie Gitterkonstante.

Bei nicht kubischen Werkstoffen ist es erforderlich, einen geeigneten Dehnungsparameter festzulegen, z. B. ist in texturfreien hexagonalen Werkstoffen ein geeigneter Ausdruck für die Dehnung in Gleichung (7) angegeben:

$$\varepsilon = \frac{2\varepsilon_a + \varepsilon_c}{3} \quad (7)$$

Dabei ist

ε die Dehnung;

ε_a die anhand der Gitterkonstante a auf gleiche Weise wie in Gleichung (6) bestimmte Dehnung [21];

ε_c die anhand der Gitterkonstante c auf gleiche Weise wie in Gleichung (6) bestimmte Dehnung [21].

7.4 Vorgehensweisen zur Anordnung

Die Vorgehensweise zur Erstausrichtung erfordert die Bestimmung der Lage des Schwerpunktes des Geräte-Messvolumens (IGV) (siehe 7.5 und Bild 9). Diese Lage ist definiert als der Bezugspunkt für alle Messungen. Im Idealfall sollte er mit dem Rotationszentrum des Probentisches übereinstimmen.

Es ist eine genaue Anordnung des Präparates erforderlich, wie in A.3 beschrieben. Der erforderliche Genauigkeitsgrad hängt bis zu einem gewissen Grad von den Zielen der durchzuführenden Messungen ab. Die Genauigkeit der Anordnung ist am wichtigsten bei großen Dehnungsgradienten und wenn Messungen nahe an Oberflächen oder Grenzflächen durchgeführt werden. Es ist wichtig, dass die Unsicherheit der Anordnung angegeben wird.

Die Ausrichtung kann zum Beispiel durch optische oder mechanische Hilfsmittel oder durch Anwendung von Oberflächenabtastungen (siehe A.3.4) erfolgen. Mit allen drei Verfahren kann die Lage einer Präparatkante in Bezug auf den Bezugspunkt mit einer Unsicherheit von 0,1 mm bestimmt werden.

Software zur Versuchsplanung und -steuerung, die die Probe und das Gerät modelliert, ist vorhanden [22]. Wenn derartige Systeme zusammen mit einer Datenerfassung angewendet werden, muss die resultierende Unsicherheit der Anordnung, welche vom Gerät, dem Modell und der Berechnung abhängt, ermittelt und im Bericht angegeben werden.

7.5 Messvolumen

Das NGV ist definiert als das Raumvolumen, das durch den Schnittpunkt der parallelen Neutronenstrahlen gebildet wird, die durch die bestimmenden Aperturbliquiden (z. B. Schlitze, Kollimatoren) sowohl für die einfallenden als auch für die gebeugten Neutronen übertragen werden (Bild 8). Der Schwerpunkt des NGV ist der geometrische Mittelpunkt dieses Volumens.

Bei einem System, das radiale Kollimatoren anwendet, ist das Prinzip identisch, außer dass jeder Schlitz des radialen Kollimators zum NGV beiträgt.

Das IGV ist das Raumvolumen, das durch die tatsächlichen Neutronenstrahlwege durch die bestimmenden Aperturbliquiden definiert ist, wobei die Strahlendivergenz und das Strahlenintensitätsprofil berücksichtigt werden (Bild 9). Verfahren zur Bestimmung des IGV, indem dieses mit einem Streuelement abgetastet wird, werden in A.5.1 vorgestellt. Die IGV-Maße können auch durch die Halbwertsbreiten (HWB) des Strahlenintensitätsprofils bestimmt werden. Es ist anzugeben, welches Verfahren angewendet wird.

Der Unterschied zwischen dem IGV und dem NGV kann besonders auffällig sein, wenn kleine Volumen abgetastet werden, bedingt durch einen relativ signifikanteren Beitrag des Halbschattens. Es ist zu beachten, dass das IGV und das NGV Eigenschaften des Diffraktometers selbst sind.

Das SGV schließlich ist der Schnittpunkt des IGV mit der zu untersuchenden Phase des Präparates (siehe Bild 10). Das heißt, es ist ein räumlich abhängiges Teilvolumen, das durch die Streuung der untersuchten Phase gewichtet wird. Folglich ist es das Volumen, für das die mittlere Dehnung bestimmt wird.

Darüber hinaus kann der Schwerpunkt des SGV (d. h. der intensitätsgewichtete Mittelpunkt der Streuung) an einer anderen Position als der des IGV nach Bild 10 sein, bedingt durch mehrere Faktoren:

- teilweise Füllung des IGV mit der zu untersuchenden Präparatphase;
- Schwächung des Neutronenstrahls innerhalb des Präparates;
- Wellenlängen- und Intensitätsverteilung im Neutronenstrahl.

Das SGV und sein Schwerpunkt sollten für jede Messung bestimmt werden. Es ist wichtig, dass die an dieser Stelle abgeleitete Dehnung im Bericht angegeben wird.

Die Wirkung der Gewichtung kann beispielsweise an Oberflächen und Grenzflächen, in stark abschwächenden Werkstoffen, großkörnigen Werkstoffen und bei Textur- oder Mikrostrukturgradienten signifikant werden. Das asymmetrische Vorhandensein eines starken inkohärenten Streuers kann die Ergebnisse ebenfalls beeinflussen.

Die sich aus einer Verschiebung des Schwerpunktes des SGV gegenüber dem Bezugspunkt ergebenden Folgen werden in A.5.5 und A.6 diskutiert. Zusätzliche Informationen können Literaturhinweis [23] entnommen werden.

7.6 Verfahren zur Bestimmung des makroskopisch spannungsfreien oder Bezugs-Gitterabstandes

Da Beugungsmessungen die Bestimmung von Gitterabständen ermöglichen (siehe 5.4 und 7.3.2), ist es für die Ermittlung von elastischen Dehnungen erforderlich, einen Bezugswert zu erhalten, in Bezug zu welchem die Dehnungen ermittelt werden können. In einigen Fällen ist es möglich, einen spannungsfreien Gitterabstand d_0 zu bestimmen. In anderen Fällen ist lediglich ein Bezugs-Gitterabstand d_{ref} (der Gitterabstand, mit dem weitere Messungen verglichen werden) möglich. Es sollte beachtet werden, dass tatsächliche Spannungswerte nur bestimmt werden können, wenn Dehnungen in Bezug auf d_0 berechnet werden. Die Anwendung von d_{ref} sollte nur erfolgen, wenn keine d_0 -Werte zur Verfügung stehen.

Gitterebenenabstände können neben der Spannung durch mehrere Ursachen beeinflusst werden. Die wichtigsten dieser Ursachen sind chemische Zusammensetzung und Temperatur. Das optimale Verfahren zur Bestimmung von d_0 (oder d_{ref}) hängt von dem speziellen jeweils betrachteten Problem ab.

In einigen Fällen kann es ausreichen, einen einzigen spannungsfreien Wert oder Bezugswert anzuwenden. In anderen Fällen kann es notwendig sein, räumlich und/oder richtungsabhängige Werte zu verwenden [24].

Wenn ein Einzelwert angewendet werden kann, darf dieser ermittelt werden durch:

- Messung in einem Werkstoff an einer Position, von der bekannt ist, dass sie eine vernachlässigbare Spannung aufweist;
- Messung an einem Pulver, das für den zu untersuchenden Werkstoff repräsentativ ist. Dieses Verfahren ist besonders für mehrphasige Werkstoffe geeignet.

Im Fall von räumlichen und Richtungsschwankungen bei d_0 können diese Werte ermittelt werden durch:

- Messung an kleinen Plättchen, die aus großen Werkstoffblöcken geschnitten werden. Dies ist besonders für Schweißnähte von Bedeutung, da die Verwendung von mehreren Plättchen die Bestimmung von Raum- und Richtungsschwankungen von d_0 in einer Schweißkonstruktion ermöglicht [12] [13] [19].

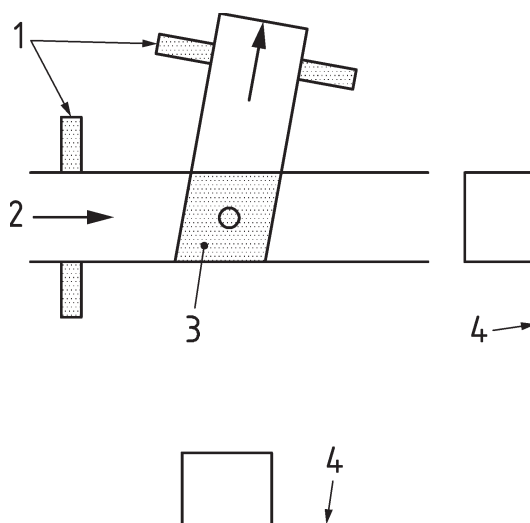
Weitere Ansätze schließen Folgendes ein:

- Bestimmung von d_0 durch Aufbringen eines Kraft- und Momentengleichgewichts (unter Beachtung, dass möglichst experimentelle Methoden angewendet werden sollten, und dass das Gleichgewicht hauptsächlich für Validierungszwecke genutzt werden sollte); und
- Bestimmung von d_0 durch Sicherstellung eines Spannungswertes von null senkrecht zu einer freien Oberfläche. Dieses Verfahren ist nur geeignet, wenn d_0 mit Entfernung von der Oberfläche nicht schwankt und eine genaue Bestimmung von oberflächennahen Dehnungen möglich ist.

Es ist ein bewährtes Verfahren um zu bestätigen, dass gemessene Spannungsergebnisse das Kraft- und Momentengleichgewicht über einen Querschnitt eines Bestandteils erfüllen. Dafür ist es erforderlich, ausreichend Messungen über einen geeigneten Querschnitt durchzuführen.

Bei der Vorbereitung einer „spannungsfreien“ Werkstoffprobe ist darauf zu achten, die Einleitung von Eigenspannungen oder eine Veränderung der Mikrostruktur oder der chemischen Zusammensetzung zu vermeiden.

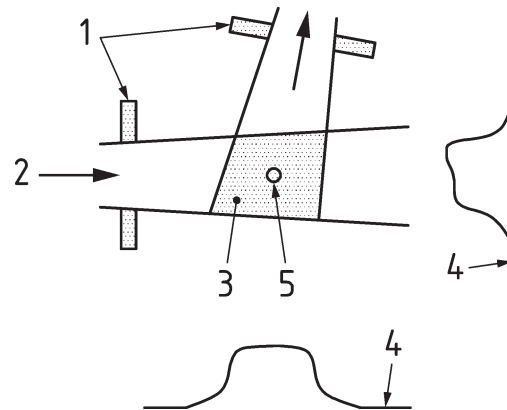
Es ist notwendig, die Bezugsprobe genau am IGV-Schwerpunkt zu zentrieren.



Legende

- 1 Aperturblenden
- 2 einfallende Neutronen
- 3 NGV
- 4 Neutronenintensitätsprofil
- Schwerpunkt des NGV

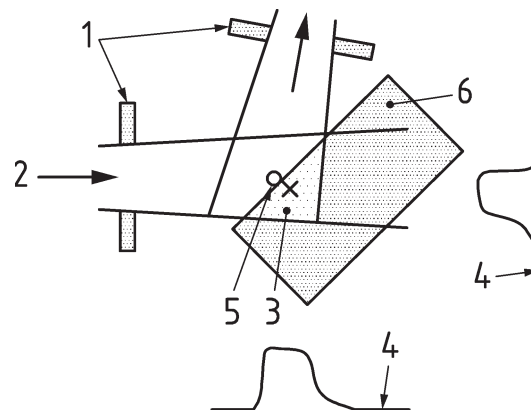
Bild 8 — Draufsicht auf das Nennmessvolumen



Legende

- 1 Aperturblenden
- 2 einfallende Neutronen
- 3 IGV
- 4 Neutronenintensitätsprofil
- 5 Bezugspunkt (Schwerpunkt des IGV)

Bild 9 — Draufsicht auf das Geräte-Messvolumen



Legende

- 1 Aperturblenden
- 2 einfallende Neutronen
- 3 SGV
- 4 Neutronenintensitätsprofil
- 5 Bezugspunkt (Schwerpunkt des IGV)
- 6 Präparat
- x Schwerpunkt des SGV

Bild 10 — Draufsicht auf das abgetastete Messvolumen

8 Anforderungen an Messung und Aufzeichnung

8.1 Allgemeines

Drei Parameter sind mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen:

- a) die Dehnung;
- b) die Richtung der Dehnungskomponente; und
- c) die Position in dem Präparat, an der die Messung durchgeführt wird.

Es müssen ausreichend Informationen aufgezeichnet werden, damit der Versuchsansatz und die Datenanalyse verstanden, beurteilt und nachvollzogen werden können. Methodiken für Messung und Analyse sowie experimentelle Betrachtungen werden in Anhang A vorgestellt. Eine Diskussion über die Bestimmung von Unsicherheiten bei einer Messgröße wird in Anhang B bereitgestellt.

8.2 Anforderungen an die Aufzeichnung

8.2.1 Allgemeines

Im Allgemeinen sind die Projektbezeichnung, die an der Untersuchung beteiligten Personen sowie die Daten der Messungen zusammen mit den folgenden Informationen bereitzustellen.

8.2.2 Allgemeine Angaben — Gerät

Auf das Gerät bezogene Angaben:

- a) für das Gerät verantwortliche Personen;
- b) Neutronenquelle und Ort, Bezeichnung und Typ des Gerätes;
- c) Temperatur $\pm$ Schwankung;
- d) Optikkomponenten des einfallenden und gebeugten Strahls; bei Schlitzen sind Höhe, Breite und Abstand zum Bezugspunkt anzugeben; bei radialen Kollimatoren müssen Brennweite, Folienlänge und -dicke, Winkel zwischen den Folien, alle Maße der Aperturblenden sowie die Schwingungsparameter des Kollimators angegeben werden.

Parameter für monochromatische Geräte:

- a) die Art des Monochromators, dessen Kristall und der angewendeten Reflexion, die Detektorart, der Abstand vom Monochromator zum Bezugspunkt, der Abstand vom Detektor zum Bezugspunkt;
- b) die Wellenlänge und wie diese bestimmt wurde;
- c) das vertikale und horizontale Intensitätsprofil, sofern für die Messung von Bedeutung;
- d) die Auflösung des Detektors.

Parameter für Flugzeit-Geräte:

- a) die Gesamtflugbahnlänge L , der Abstand vom Detektor zum Bezugspunkt, die Art des Detektors, der Winkelbereich des Detektors;
- b) der Wellenlängenbereich und wie dieser bestimmt wurde;