

Zerstörungsfreie Untersuchung der Feinstruktur der Werkstoffe mittels Röntgeninterferenzen

Autor(en): **Brandenberger, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **117/118 (1941)**

Heft 22

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-83561>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Zerstörungsfreie Untersuchung der Feinstruktur der Werkstoffe mittels Röntgeninterferenzen. — Vom Bau der Strassenbrücke über die Tara in Jugoslawien. — Näherungsweise Bestimmung von Knicklasten. Die Trelement-Holzskelett-Bauweise. — Verhütung von Schwitzwasser an Schaufenstern. — Mitteilungen: Der Brown Boveri-Turbokompressor «Isotherm». Türkisches Eisenbahnnetz. Die Schweiz. Stiftung für Psycho-

technik. Ungewöhnliche Versetzmethode für Senkkästen. Neue Reform-Kirche in Zürich-Altstetten. Zur Güterzugentgleisung am Piano Tondo. Eisenbetonmasten Herznach-Frick. — Wettbewerbe: Vergrößerung der St. Martinskirche und Neubau des Rathauses in Visp. Erweiterung des Kreisspitals Männedorf. — Nekrologe: Julius Degen. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Vortragskalender.

Band 118

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung

Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet

Nr. 22

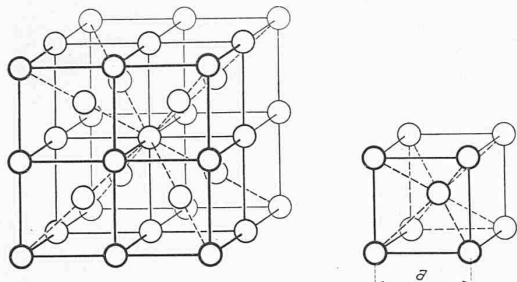


Abb. 1. Kristallgitter des Eisens (innenzentrierte Würfelgitter), daneben ein Elementarwürfel, aus dessen lückenloser Aneinanderreihung sich das Kristallgitter ergibt. a = Gitterkonstante

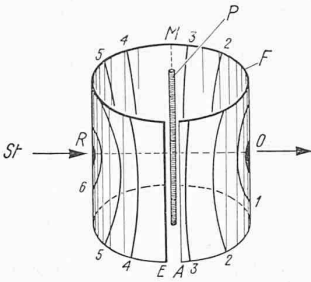


Abb. 2. Versuchsanordnung zur Aufnahme des vollständigen Interferenzmusters. P das zylindrische Präparat, F der die Interferenzstrahlen auffangende photographische Film, St das einfallende Strahlenbündel. Links (Abb. 3) der abgerollte Film mit den Interferenzen 1 bis 6, symmetrisch um die Einstichpunkte O und R des Primärstrahls St angeordnet

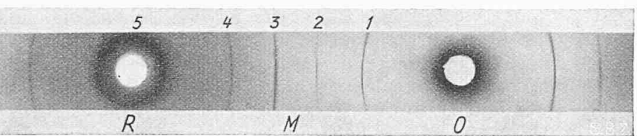


Abb. 3. Vollständiges Röntgendiagramm von Eisen

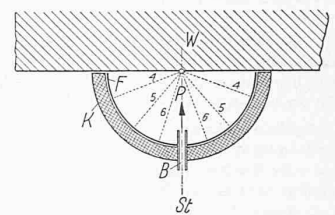
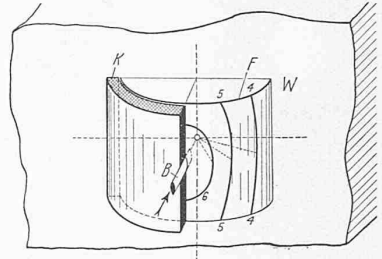


Abb. 4. Versuchsanordnung zur Aufnahme des «halben» Interferenzmusters. W das beliebig grosse Werkstück, F der Film, B die Blende zum Ausblenden des Strahlenbündels St, P der Aufnahmepunkt, 4 bis 6 die entstehenden Interferenzlinien, K die Kassette zum Schutz des Films gegen direkte Bestrahlung

Zerstörungsfreie Untersuchung der Feinstruktur der Werkstoffe mittels Röntgeninterferenzen

Von P.-D. Dr. E. BRANDENBERGER, Abteilungschef des Laboratoriums für Röntgenographie und Feinstrukturuntersuchung an der EMPA und am Mineralogischen Institut der E. T. H.

Einer der wesentlichen Fortschritte der Materialprüfung im letzten Jahrzehnt ist die Entwicklung *zerstörungsfreier Prüfverfahren*, d. h. jener Untersuchungsmethoden, die ohne Eingriff am Werkstück (insbesondere ohne Probe-Entnahme) und ohne Veränderung des Werkstoffs eine materialtechnische Aussage über das Werkstück oder dessen Werkstoff ermöglichen. Solche Prüfverfahren gestatten:

1. an dem fertigen Werkstück, der vollendeten Konstruktion, dem errichteten Bauwerk eine letzte Prüfung ihrer Eignung vorzunehmen;
2. die Einflüsse des Betriebes auf das Objekt zu kontrollieren, während des Betriebes selbst oder doch ohne Beeinträchtigung des Objektes, womöglich auch ohne dessen Ausbau;
3. das beschädigte Objekt zu prüfen, ohne die durch den Schaden gegebenen Verhältnisse zu verändern.

Während einzelne dieser zerstörungsfreien Methoden der Materialprüfung und die Möglichkeiten ihrer Anwendung bereits allbekannt sind (wie z. B. die Röntgendurchstrahlung), gilt dies weniger für die Methoden der Röntgeninterferenzen und die mit ihr zu gewinnenden Einblicke in die Natur der Werkstoffe, in an diesen sich abspielende Veränderungen und durch besondere Verhältnisse verursachte Sonderzustände. Im Nachstehenden soll über diese zerstörungsfreie Feinstrukturuntersuchung, speziell metallischer Werkstoffe, im Laboratorium, in der Werkstätte oder auf dem Bauplatz, und über die damit erzielbaren Ergebnisse und deren Deutung ein Ueberblick gegeben werden¹⁾.

Die Röntgenrückstrahlaufnahme

Wie die meisten Materialien der Technik ergeben die metallischen Werkstoffe als Haufwerke kleiner Kristalle, wenn ein feines paralleles Bündel Röntgenstrahlen bestimmter Wellenlänge sie trifft, charakteristische *Interferenz-(Beugungs-)Erscheinungen*. Diese Beugung der einfallenden monochromatischen Röntgenstrahlung an den Atomgittern der Metallkristalle (Abb. 1) liefert in der Versuchsanordnung nach Abb. 2 auf einem photographischen Film festgehalten das Interferenzmuster der Abb. 3. Dieses besteht aus einem System von Interferenzlinien 1 bis 5, deren jeder in einfacher Weise ein bestimmter Beugungswinkel zugeordnet ist. Unter den Kristallen des Haufwerks sind nur diejenigen am Zustandekommen einer Interferenz beteiligt, bei

denen die betreffende beugende «Netzebene» mit dem einfallenden Strahl gerade den Beugungswinkel einschliesst. Interferenzstrahlen, die «nach vorn» (im Bereich OM der Aufnahme Abb. 3) gerichtet sind, haben Beugungswinkel unter 45°, während die «nach hinten» gerichteten Interferenzstrahlen (im Bereich MR) Beugungswinkel zwischen 45° und 90° besitzen. Ein solches *vollständiges* Abbild der Röntgeninterferenzen eines Stoffes erhält man mit einer Probe in Gestalt eines Zylinders von nicht über 2 mm Durchmesser und höchstens einigen cm Höhe (Metalldraht, herausgearbeitetes Stäbchen, Span).

Dagegen können die Interferenzen mit Beugungswinkeln über 45° *am beliebig grossen und beliebig geformten Werkstück ohne Zerstörung* aufgenommen werden, wie Abb. 4 erkennen lässt. Sehr oft beschränkt man die Aufnahme auf die sogen. «letzten» Interferenzlinien und verfährt dann nach Abb. 5. Gerade im Falle der metallischen Werkstoffe mit ihrem fast durchwegs sehr einfachen Gitteraufbau lassen sich sowohl das nach Abb. 4 gewonnene «halbe» Interferenzmuster als auch die nach Abb. 5 aufgenommenen «letzten» Interferenzen immer einfach und eindeutig beurteilen.

Der einfache Gitterbau der Metalle bedingt allerdings eine nur geringe Anzahl von Interferenzlinien, sodass nicht für jede Wellenlänge der einfallenden Röntgenstrahlung eine der besonders aufschlussreichen Interferenzen unter sehr grossem Beugungswinkel besteht. Nur eine solche Röntgenstrahlung wird sich für die Rückstrahlaufnahme eignen, für deren Wellenlänge

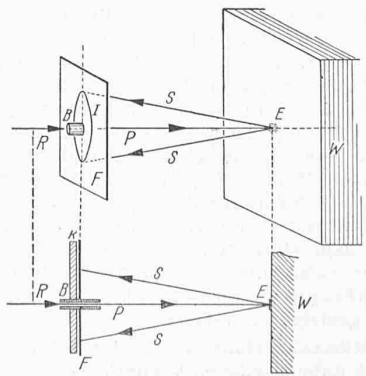


Abb. 5. Versuchsanordnung zur Aufnahme der «letzten» Interferenzen.

W das beliebig grosse Werkstück, F der Film, B die Blende zum Ausblenden des Strahlenbündels P, S die sich ergebenden Interferenzstrahlen, die auf dem Film den Interferenzkreis I erzeugen, K die Kassette, E der in Aufnahmepunkt aufgestreute Eichstoff. R bezeichnet die Lage der Röntgenröhre

¹⁾ Vergl. zum Folgenden z. B. F. Regler, Röntgenograph. Feingefügeuntersuchungen an Brückentragwerken. «SBZ», Bd. 105 (1935), Nr. 2, S. 13*.

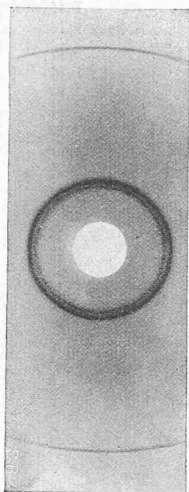


Abb. 6. Rückstrahlaufnahme an einem Stahl, das «halbe» Interferenzmuster umfassend

Abb. 8 (rechts). Lage des einfallenden Strahls bei den vier Rückstrahl-aufnahmen, wie sie an ein und demselben Aufnahme-punkt zur Ermittlung des Spannungszustandes erforderlich sind

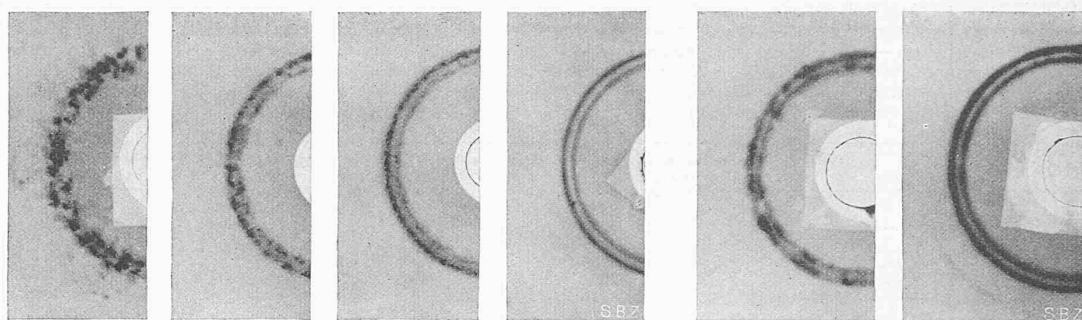
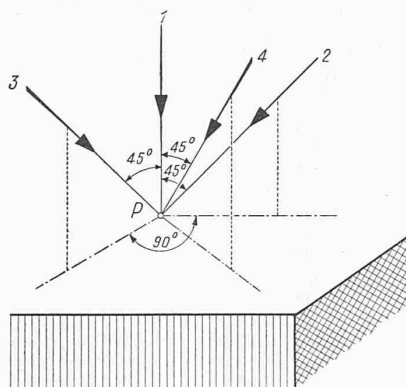


Abb. 9. Beschaffenheit der Interferenzlinien bei abnehmender Kristallgrösse



eine Interferenz mit möglichst nahe bei 90° liegendem Beugungswinkel besteht. Im Falle von Eisen und Stahl erweist sich die an einer Antikathode aus Kobalt erzeugte, sogen. Co-K-Strahlung, als besonders geeignet zur Aufnahme der «letzten» Interferenz, der sogen. (310)-Linie des Fe-Gitters, während das «halbe» Interferenzensystem auch mit der an einer Eisenantikathode entstehenden Fe-K-Strahlung aufgenommen werden kann. Aluminium und seine Legierungen lassen sich mit Co-K-Strahlung oder mit der Strahlung einer Kupfer-Antikathode (mit sogen. Cu-K-Strahlung) untersuchen. Alle diese sogen. K-Strahlungen sind nicht streng monochromatisch, sondern bestehen zur Hauptsache aus drei verschiedenen Wellenlängen, λ_β , λ_{α_1} und λ_{α_2} , wobei λ_{α_1} und λ_{α_2} einander nahe benachbart sind. Daher tritt jede Interferenz dreifach auf: einmal als sogen. β -Linie, sodann mit grösserer Intensität als Doppellinie, die erst unter grossen Beugungswinkeln als Linien-dublett wahrzunehmen ist. Aufnahmen hergestellt nach der Anordnung von Abb. 4 und 5 heissen *Rückstrahl-aufnahmen*; Abb. 6 zeigt ein Beispiel einer solchen mit dem «halben» Interferenzmuster; Abb. 9 enthält nur die «letzten» Interferenzen (nur zur Hälfte abgebildet).

Die Schaffung *transportabler Feinstruktur-röntgenapparate* ermöglicht es, Rückstrahl-aufnahmen in der Werkstätte und auf dem Bauplatz in gleicher Weise und von gleicher Qualität wie im Laboratorium herzustellen. Ein Röntgengerät, das Sicherheit (Hochspannungs- und Strahlen-Schutz) mit leichter Beweglichkeit und rascher Inbetriebnahme vereinigt, zeigt die Abb. 7 in der Aufstellung für eine Rückstrahl-aufnahme an einem grösseren Schienenabschnitt. Der Röhrenbehälter Bh enthält die Röntgenröhre R. Sie steht während des Betriebes unter ständiger Wasserkühlung durch die Kühlwasserschläuche W. Durch die feine Lochblende B wird ein Bündel paralleler Röntgenstrahlen ausgeblendet, dessen Querschnitt im Aufnahme-punkt P auf der Oberfläche des Schienenfusses rd. 2 mm^2 misst. Senkrecht zur Blendenaxe ist der um diese drehbare Filmträger T angebracht. Der Film F, lichtdicht in Papier verpackt, ist zur Hälfte mit einer Bleischeibe S abgedeckt. Der Filmträger T und damit der Film F können mittels eines kleinen Motors M, angeschlossen mit einer biegsamen Welle L, um die Blendenaxe gleichmässig gedreht oder um einen variablen Winkel hin und her geschwenkt werden. Ein Schlitten gestattet, den Röhrenbehälter nach drei Richtungen zu verschieben und um drei Axen zu drehen, sodass der Blendenaxe und damit dem einfallenden Strahl jede gewünschte Richtung erteilt werden kann. Der Verlauf des Strahlenbündels zwischen dem rückwärtigen Blendenende und dem Aufnahme-punkt P ist in Abb. 7 gestrichelt markiert.

Die Herstellung einer Rückstrahl-aufnahme erfordert bei Verwendung von Co-K-Strahlung unter normalen Verhältnissen eine

Abb. 10. Rückstrahl-aufnahme mit peripher verbreiterten Interferenzpunkten

Belichtungszeit von $30 - 60 \text{ min}$, wenn die Formgebung des zu prüfenden Objekts erlaubt, den Film im normalen Abstand von 60 mm vom Aufnahme-punkt anzubringen. Ist eine solche Annäherung an die gewünschte Aufnahme-stelle nicht möglich, so erhöht sich die Belichtungszeit. Um den Filmabstand zu ermitteln, wird das Gebiet des Aufnahme-punkts mit einer dünnen Schicht eines Eichstoffs bestreut. Aus der Lage der Interferenzlinien des Eichstoffs kann der genaue Abstand Film-Aufnahme-punkt gefunden werden. Als Eichstoffe werden feines Gold- und Silber-Pulver höchster Reinheit oder Diamantpulver benutzt.

Die langwellige Röntgenstrahlung, die sich allein für die Herstellung von Rückstrahl-aufnahmen eignet, dringt nur sehr wenig in den angestrahlten Werkstoff ein (normale Eindringtiefe um $0,01 \text{ mm}$), sodass die in der Aufnahme erfassten Interferenzen durchwegs von Kristallen aus der äussersten Oberflächenschicht des Werkstücks stammen. Diese Tatsache ist bei der Bewertung der Rückstrahl-aufnahmen ständig im Auge zu behalten. Vor Herstellung einer Rückstrahl-aufnahme sind deshalb störende Oberflächenüberzüge wie Zunderschichten u. dgl. zu entfernen. Da die äusserste Werkstoffschicht zumeist eine Kaltverformung als Folge der Oberflächenbearbeitung erlitten hat, diese mit dem Zustand des Werkstoffs im Innern jedoch in keinem Zusammenhang steht, wird normalerweise vor dem Anfertigen der Aufnahme das Gebiet des Aufnahme-punkts um rd. $0,2 \text{ mm}$ abgeätzt und auf diese Weise die gestörte Oberflächenzone entfernt.

Auswertung und Deutung der Rückstrahl-aufnahme

Aus dem Abstand symmetrisch um den Punkt R (Abb. 2) liegender Interferenzlinien im «halben» Interferenzmuster, bzw. aus den Durchmessern der Kreise der «letzten» Interferenzen lassen sich bei bekanntem Abstand Film-Probe (Aufnahme-punkt) leicht die Beugungswinkel ermitteln und aus diesen die Kantentlängen der Gittermaschen, die sogen. *Gitterkonstanten*, berechnen. Bei Eisen und Stahl oder Aluminium und seinen Legierungen handelt es sich lediglich darum, eine einzige Gitterkonstante, nämlich die *Kantentlänge des Elementarwürfels*, zu bestimmen. Eine *Veränderung der Gitterkonstanten eines Werkstoffs*, bedingt durch irgendwelche Umstände, lässt sich der Rückstrahl-aufnahme als *Verschiebung der Interferenzlinien* entnehmen und zwar folgt aus einem Kleinerwerden der Linienabstände (der Interferenzkreis-Durchmesser) ein Sinken, aus einer Vergrösserung der Linienabstände ein Ansteigen der Gitterkonstanten. Dabei eignet sich die Rückstrahl-aufnahme ganz besonders zur *genauen* Bestimmung der Gitterkonstanten, vor allem, wenn dazu die «letzten» Interferenzen herangezogen werden. Unter Verwendung eines Eichstoffs ist eine Messung der Gitterkonstanten mit einer Genauigkeit von $0,01\%$ möglich. Diese Präzision übersteigt bereits die durch Temperaturschwankungen bedingten Verschiebungen der Gitterkonstanten, sodass während der Aufnahme auf möglichst gleich bleibende Temperatur zu halten und zum Vergleich verschiedener Aufnahmen unter sich für jede die herrschende Temperatur zu vermerken ist.

Beanspruchung durch äussere Kräfte oder irgendwelche Eigenspannungen (Schwind-, Verformungs-, Wärme-, Zwangsverspannungen) haben zunächst (neben einer möglicherweise bestehenden plastischen) stets eine einheitliche *elastische Verformung* über makroskopisch ausgedehnte Bezirke des Kristallhaufwerks zur Folge. Diese besteht über grössere Gebiete in einer gleichen Verschiebung der Atome aus ihren Normallagen (den Gitterpunkten), also in einer Änderung der Gitterkonstanten und damit der Interferenzlinien. Umgekehrt können aus einer durch elastische Spannungen bewirkten Verschiebung der Interferenzen die entsprechende Veränderung der Gitterkon-

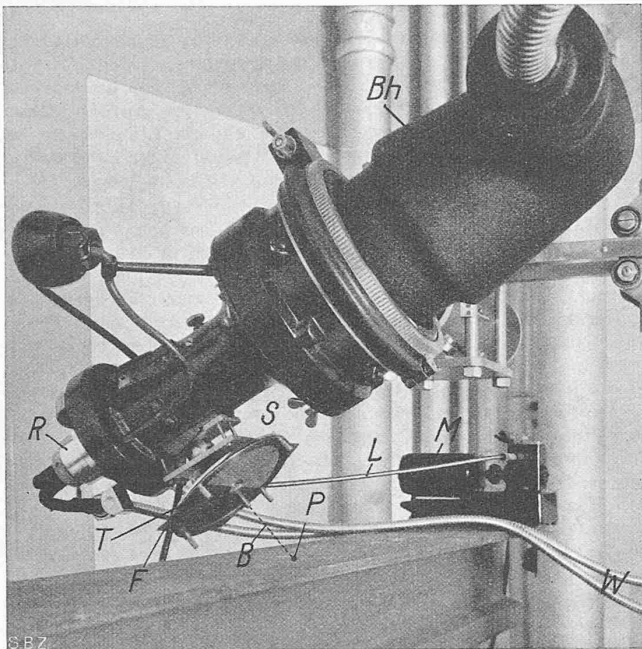


Abb. 7. Gesamtversuchsanordnung bei einer Rückstrahlaufnahme

stanten und daraus die im Aufnahmepunkt herrschenden *Oberflächenspannungen* bestimmt werden. Aus den Gitterkonstanten im elastisch gespannten und im spannungsfreien Zustand lässt sich nämlich die in Richtung der Normalen zur Werkstückoberfläche vorhandene Dehnung finden, und hieraus ist bei bekanntem Elastizitätsmodul und bekannter Poisson'scher Zahl durch einfache Rechnung die Summe der Oberflächenspannungen im Aufnahmepunkt anzugeben. Die röntgenographische Spannungsmessung benutzt also die Bestimmung der Gitterkonstanten zur Dehnungsmessung und benötigt zur vollständigen Kennzeichnung des im Aufnahmepunkt herrschenden Spannungszustandes (Grösse und Lage der beiden in der Oberfläche liegenden Hauptspannungen) insgesamt 4 Rückstrahlaufnahmen: eine Senkrecht- und 3 Schräg-Aufnahmen (Strahl rd. 45° zur Werkstückoberfläche geneigt) in drei verschiedenen Richtungen (Abb. 8). Es erübrigt sich also, die Gitterkonstante im spannungsfreien Zustand gesondert zu bestimmen (d. h. dem Werkstück eine Materialprobe zu entnehmen). Ist nur die Summe der beiden in der Oberfläche des Werkstücks liegenden Hauptspannungen zu bestimmen, so ist, bei bekannter Gitterkonstante des Werkstoffs in entspanntem Zustand, mit der Senkrechtaufnahme allein auszukommen. Die Genauigkeit der röntgenographischen Spannungsmessung beträgt in der Regel $\pm 2 \text{ kg/mm}^2$. Sie ermittelt den Spannungszustand in einem praktisch punktförmigen Bereich; wie erwähnt, beschränkt sie sich auf die Messung der Oberflächenspannungen, sagt also nichts aus über die im Innern des Werkstücks vorhandenen Eigenspannungen. Allerdings pflegen diese an der Oberfläche ihren Höchstwert zu erreichen, was der Bestimmung des in der Oberfläche bestehenden Spannungszustandes besondere Bedeutung verleiht. Liefert ein Werkstoff scharfe Interferenzlinien, so kann eine röntgenographische Spannungsmessung bei geeichten Aufnahmen ohne besondere Hilfen vorgenommen werden, während im Falle radial verbreiteter Linien (siehe weiter unten) ein Photometrieren der Aufnahmen erforderlich ist.

Eine Verschiebung der Interferenzlinien kann ferner durch eine auf *Entmischung des Werkstoffs* zurückgehende Aenderung der Gitterkonstanten bewirkt werden. Allgemein werden nämlich die Werte der Gitterkonstanten durch *Legierungszusätze* in stetiger Weise verschoben. Erfolgt nun eine Aenderung im Legierungsgehalt, etwa dadurch, dass legierende Atome aus dem Gitter des Werkstoffs austreten, so hat eine solche Entmischung desselben eine Aenderung der Gitterkonstanten und damit eine Verschiebung der Interferenzlinien zur Folge. Sehr häufig treten solche Entmischungen nur örtlich auf, was sich in einer nur lokalen Gitterkonstantenänderung äussert.

Statt gleichmässig geschwärzter Interferenzlinien wie in Abb. 9 rechts können auch Rückstrahlaufnahmen erhalten werden, in denen, z. B. in Abb. 9, sich die Interferenzlinien aus einzelnen Schwärzungspunkten (*Interferenzpunkten*) zusammensetzen. Dies dann, wenn ein Werkstoff mit größerem Korn, also verhältnismässig grossen Einzelkristallen, vorliegt.

Wie erwähnt, sind in dem bestrahlten Kristallhaufen nur die Kristalle in interferenzfähiger Lage an den Interferenzen beteiligt. Jeder dieser Kristalle erzeugt einen *Interferenzpunkt*; aus deren Ueberlagerung ergibt sich bei genügender Punktzahl die *Interferenzlinie*. Die Grösse der einzelnen Schwärzungspunkte fällt bei gegebenem Blendendurchmesser umso grösser aus, je grösser die Abmessungen der Kristalle sind. *Grobkristallines* Material ist durch grosse Interferenzpunkte in nicht übermässiger Zahl gekennzeichnet; *feinkörnig* ausgebildete Werkstoffe liefern sehr viele, kleine Schwärzungspunkte, die sich zur homogen geschwärzten Interferenzlinie vereinigen und darin einzeln nicht mehr zu erkennen sind. Wird der Film während der Aufnahme um die Blendenachse gedreht (bzw. geschwenkt), so ergeben sich auch im Falle eines grobkristallinen Materials gleichmässig geschwärzte Interferenzlinien, da durch die Drehung des Films der einzelne Interferenzpunkt beim ebenen Film zu einem Interferenzkreis wird. Bei feinkristallinem Material unterscheiden sich hingegen Aufnahmen mit ruhendem Film und solche mit bewegtem Film nicht voneinander. Für die Bestimmung der Gitterkonstanten und die Beantwortung aller mit ihr zusammenhängenden Fragen ist eine Rückstrahlaufnahme mit gleichmässig geschwärzten Linien, die sich allein genau vermessen lassen, bei grobkörnigen Stoffen also eine Drehung des Films erforderlich.

Die Abhängigkeit der Beschaffenheit der Interferenzen von der mittleren Kristallgrösse (siehe Abb. 9) erlaubt auf röntgenographischem Wege eine Aussage über die mittleren Kristalldimensionen im Aufnahmepunkt zu machen:

1. Bestehen die Interferenzlinien lediglich aus Interferenzpunkten, so liegen Kristalle vor mit einer mittleren Grösse über 10^{-3} cm , in der Regel um 10^{-2} cm .

2. Sind keine Interferenzpunkte erkennbar, sondern erscheint die Interferenz als homogen geschwärzt, so beträgt die mittlere lineare Kristallgrösse weniger als 10^{-3} cm ; bei normaler Schärfe der Linien misst die durchschnittliche Kristallgrösse dann $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ cm}$.

3. Sind auf einer kontinuierlich geschwärzten Interferenzlinie einzelne Interferenzpunkte wahrzunehmen, so besagt dies, dass neben einer vorzugsweise um $10^{-4} \div 10^{-5} \text{ cm}$ betragenden linearen Kristallgrösse einzelne grössere Kristalle mit linearen Abmessungen über 10^{-3} cm vorkommen.

4. Besteht eine Interferenz grösstenteils aus Interferenzpunkten, erscheint daneben noch eine zusätzliche kontinuierliche Schwärzung der Interferenzlinie, so kommen im Aufnahmepunkt neben den vorzugsweise über 10^{-3} cm messenden Kristallen vereinzelte mit Dimensionen zwischen 10^{-4} und 10^{-5} cm vor.

Im Rahmen einer zerstörungsfreien Ueberprüfung der Kristallgrösse stellen sich beispielsweise der Feinstrukturuntersuchung die folgenden Aufgaben:

1. Feststellung einer im Zusammenhang mit einer plastischen Verformung des Materials eingetretenen Abnahme der Kristallgrösse durch eine *Kornzertrümmerung*.

2. Nachweis der mit einem Glühen des Werkstücks über der Rekristallisationstemperatur verbundenen *Kristallneubildung* (Kornneubildung) und Ueberprüfung der damit erreichten *Gleichmässigkeit im Korn*. Eine solche Feststellung einer Kornneubildung (z. B. nach vorangegangener plastischer Verformung oder, etwa im Falle einer Schweißung, nach rasch erfolgter Abkühlung) ist zugleich eine Kontrolle der thermischen Behandlung beim Normalisieren des Werkstücks (Glühtemperatur, Glühdauer, passende Abkühlungsgeschwindigkeit, usw.).

3. Abklärung einer möglicherweise eingetretenen *Kornvergrößerung*, indem eine Zunahme der mittleren Kristallgrösse gefunden wird.

Nicht immer sind die Interferenzpunkte scharf begrenzt und von ungefähr elliptischer Gestalt. Häufig ist vielmehr eine *Verbreiterung der Interferenzpunkte* in peripherer und radialer Richtung festzustellen. Die fortgesetzte periphere Verbreiterung der Interferenzpunkte (siehe Abb. 10) führt zur homogen geschwärzten Interferenzlinie, indem die zunächst zu Segmenten unscharfer Begrenzung auseinander fließenden Interferenzpunkte sich mehr und mehr überdecken, vorerst noch eine peripher schwankende Intensität der Interferenzlinie abgeben, um schliesslich zur einheitlichen Schwärzung auszuarten. Die radiale Verbreiterung der Interferenzpunkte, die fast immer der peripheren in einem gewissen Umfang parallel geht, bedingt (unabhängig davon, ob sie von Auge erkennbare oder bereits in einer gleichmässig geschwärzten Linie enthaltene Interferenzpunkte erfasst) eine Verbreiterung der ganzen Interferenzlinie in radialer Richtung: die Trennung der α_1 - von der α_2 -Linie, die Aufspaltung in das K_α -Dublett, wird daher zunehmend beeinträchtigt. Ein cha-

rakteristisches Stadium ist erreicht, wenn die Trennung der α_1 -Linie von der α_2 -Interferenz noch eben erkannt werden kann. Die weitergehende radiale Verbreiterung bewirkt zunächst das vollständige Verschwinden der beiden Linien in eine einzige, also das Verschwinden jeglicher Aufspaltung in die α_1 - und α_2 -Interferenz, anschliessend die zunehmende Verbreiterung dieser einen Linie bis zu einem gewissen Grenzwert maximaler Linienbreite. Mit dem Verbreitern der Linien in radialer Richtung geht ein Flauerwerden derselben, im Besondern ein Verwaschen der ehemals scharfen Linienränder, Hand in Hand. Zugleich ist eine Abnahme der Intensität der Interferenzen, speziell der «letzten» unter ihnen, festzustellen, die soweit gehen kann, dass man selbst bei wesentlich verlängerter Belichtungszeit überhaupt keine «letzten» Interferenzen mehr erhält, sondern nur noch einen kontinuierlich geschwärtzten Untergrund. Dabei wird der Nachweis der Interferenzlinien noch dadurch erschwert, dass die Schwärzung des Untergrundes, von der zunehmenden diffusen Streustrahlung stammend, mehr und mehr ansteigt, der Schwärzungssprung: Untergrund-Interferenzlinie also in doppelter Weise herabgesetzt wird.

Die periphere Verbreiterung der Interferenzpunkte (Abb. 10) besagt, dass die beugende Netzebene, die den Interferenzpunkt ergibt, nicht in einer einzigen Lage, sondern in verschiedenen, einander allerdings eng benachbarten Stellungen auftritt. Der Aufbau eines Kristalls, der zum Auftreten peripher verbreiteter Interferenzpunkte Anlass gibt, ist schematisch in Abb. 11 dargestellt; dabei sind allerdings die unter den einzelnen Kristallblöcken bestehenden gegenseitigen Verdrehungen übertrieben gross angenommen worden. In Wirklichkeit betragen sie nur um 2°. Darum kann ein solcher in Teilblöcke zerfallener Kristall bei einer mikroskopischen Betrachtung noch sehr wohl wie ein einheitliches, ungestörtes Gebilde aussehen und die hier im Röntgendiagramm bereits deutlich fassbare Erscheinung der *Kornzertrümmerung und Verdrehung* noch nicht wahrnehmen lassen.

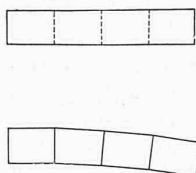


Abb. 11. Kornzerfall und Kornverdrehung im Gefolge einer plastischen Verformung (schemat. Darstellung)

Die *radiale* Verbreiterung der Interferenzen (Abb. 12) hat ihre Ursache entweder in einer Störung der normalen Gitterordnung im Kristall oder in einer abnormal geringen Kristallgrösse (lineare Abmessungen der Kristalle zwischen 10^{-6} und 10^{-7} cm). Treten auf verbreiterten Interferenzlinien noch einzelne Interferenzpunkte auf, so darf die radiale Verbreiterung eindeutig auf

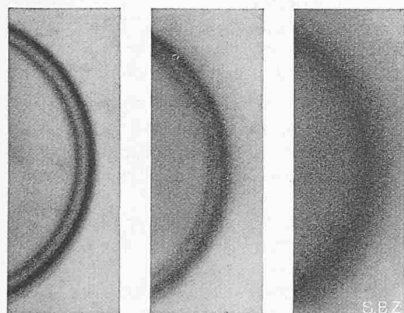


Abb. 12. Zunehmende radiale Verbreiterung der Interferenzlinien unter völligem Verschwinden der Dublett-Aufspaltung

einen mangelhaft geordneten Zustand des Kristallgitters zurückgeführt werden. In andern Fällen kann zwischen den beiden Möglichkeiten einer Erklärung radial verbreiteter Linien nicht ohne weiteres entschieden werden. Eine *Störung der Gitterordnung* kann darin bestehen:

1. dass die Gitterkonstanten in den einzelnen Kristallen nicht gleich gross sind, sondern von Kristall zu Kristall etwas schwanken (eine Variation der Gitterkonstanten um rd. 2% bewirkt das Verschwinden der K_{α} -Dublett-Aufspaltung), Abb. 13 links;

2. dass in ein und demselben Kristall die Gitterkonstanten sich ändern, die Kristalle sich also aus Bereichen mit etwas verschiedener Gitterkonstante aufbauen, Abb. 13 Mitte;

3. dass die einzelnen Atome sich nicht in ihren normalen Gitterplätzen befinden, sondern aus den Gitterpunkten gesetzmässig oder zufällig verrückt sind (Abb. 13 rechts). Eine damit verwandte Anordnung im Kristallgitter wird ja durch die Wärmebewegung der Atome, ihre thermischen Schwin-

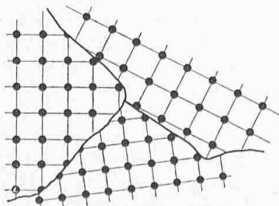


Abb. 13. Einige Typen gestörter Gitterordnung: links zwischen verschiedenen Kristallen schwankende Gitterkonstante, Mitte in ein und demselben Kristall schwankende Gitterkonstante, rechts Gitterstörung im Zusammenhang mit plastischer Verformung

gungen um die in den Gitterpunkten zu denkenden Ruhelagen, verursacht.

Die Interferenzpunkte sind somit auf ihre Schärfe und allfällige periphere Verbreiterung, die Interferenzlinien auf ihre Linienbreite zu untersuchen. Die Beurteilung der Interferenzpunkte auf periphere Verbreiterung setzt eine Aufnahme mit ruhendem Film voraus, während die radiale Linienbreite bei grobkörnigen Stoffen zweckmässig an Hand einer Rückstrahl-Aufnahme mit gedrehtem Film geprüft wird.

Die *periphere Verbreiterung der Interferenzpunkte* ist vor allem als Kriterium der beginnenden *plastischen Verformung* bedeutsam und eignet sich, um deren Fortschreiten bis zu mittleren Dehnungen zu verfolgen. Allgemein gilt, dass eine *Belastung über der Streckgrenze* Anzeichen einer peripheren Verbreiterung der Interferenzpunkte auslöst. Deren Anstieg mit wachsender Belastung zeigt die in Abb. 14 wiedergegebene Aufnahmereihe an einem statisch bis zum Bruch beanspruchten Aluminium-Einkristall. Wird an einem Werkstück eine *periphere Verbreiterung der Interferenzpunkte festgestellt*, so ist damit *im Aufnahmepunkt eine plastische Verformung der Kristalle als Folge einer über der Streckgrenze liegenden Beanspruchung erwiesen*. Der Grad der eingetretenen plastischen Verformung lässt sich aus der Grösse der bestehenden peripheren Verbreiterung abschätzen, insbesondere dann, wenn an einer Vergleichprobe des fraglichen Werkstoffs eine Aufnahmereihe mit wachsender Beanspruchung nach Art der Abb. 14 hergestellt wird.

Die *radiale Verbreiterung der Interferenzlinien* lässt allgemein den Kristallzustand, die *Vollkommenheit der Gitterordnung in den Kristallen* beurteilen. An Beispielen seien die folgenden genannt:

1. *Hoch legierte Metalle* liefern in der Regel Rückstrahl-Aufnahmen mit stark verwaschenen Interferenzlinien ohne jegliche Andeutung einer Aufspaltung in das K_{α} -Dublett. Der Einbau gitterfremder Atomarten stört die Gitterordnung, indem um jedes Fremdatom der normale Gitterbau nach Art der schematischen Abb. 15 verändert wird.

2. Mit der peripheren Verbreiterung der Interferenzpunkte geht bei den meisten Werkstoffen (Eisen, Stahlsorten, Al-Legierungen, indessen nicht bei reinem Aluminium) eine *radiale Linienverbreiterung infolge der plastischen Verformung* der Kristalle parallel; sie kann zum Nachweis einer solchen benutzt werden und gibt ein Mass vor allem für Verformungen mit grossen Dehnungen. Wird an einem Werkstoff, der im normalen Zustand scharfe Interferenzlinien, also das klar aufgespaltene K_{α} -Dublett liefert, eine radiale Linienverbreiterung festgestellt,

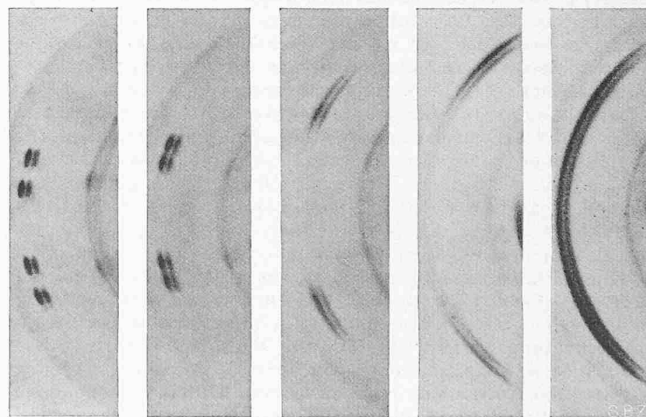


Abb. 14 a e Zunehmende periphere Verbreiterung der Interferenzpunkte bei steigendem Reckungsgrad: a Ausgangsmaterial (Aluminium-Einkristall), b 2% gereckt, c 15% gereckt, d 40% gereckt, e nach erfolgreichem Bruch, 55% gereckt

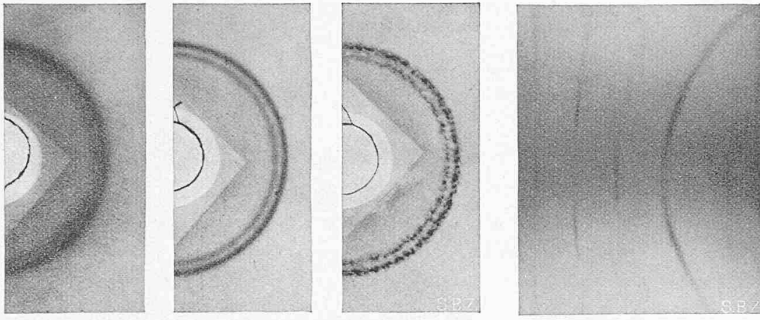


Abb. 16. Rückstrahl-aufnahmen nach verschiedener thermischer Behandlung: a Ausgangsmaterial, b nach Glühen bei 620° (spannungsfrei gegläht), c nach Glühen bei 920° (normalisiert)

Abb. 17. Fasertextur bei Wolfram (halbe Rückstrahl-aufnahme nach Abb. 4)

die bei der Bearbeitung, Beanspruchung oder schon bei der Erzeugung des Werkstoffs physikalisch ausgezeichnet war, eingestellt haben und so gewisse Lagen bevorzugen. Aufnahmen, die über die Anordnung der Kristalle im Verband des Kristallhaufwerks Aufschluss geben sollen, sind durchwegs mit ruhendem Film anzufertigen.

Einige Beispiele der angewandten zerstörungsfreien Feinstrukturuntersuchung

1. Bestimmung der *innern elastischen Spannungen an geschweissten Objekten*, im Bereich der Schweissnähte selber oder in deren Umgebung. Feststellung des Einflusses eines Spannungsfrei-Glühens durch eine zweite Messreihe nach erfolgter Glühbehandlung.

2. Untersuchung der mit irgendwelcher Oberflächenbeanspruchung und an der Oberfläche einsetzendem Materialabtrag verbundenen Aenderungen des Werkstoffs, wie etwa im Falle der *Abnutzung, der Kavitation, der Erosion*, usw.

3. Kontrolle des Spannungsfrei-Glühens, des Normalisierens und Homogenisierens eines Objekts durch *Glühbehandlung*, z. B. nach einer vorgängig erfolgten, durch Betriebsstörung entstandenen plastischen Verformung des Werkstücks.

4. Untersuchung der Tiefenausdehnung einer oberflächlich eintretenden *Kaltverformung* bei verschiedener Bearbeitung eines Werkstücks. Dabei ist eine Reihe von Rückstrahl-aufnahmen unter schrittweisem Abätzen der Werkstückoberfläche herzustellen. Weil die oberflächliche Kaltverformung sich in der Regel auf eine Zone geringer Dicke (unter 0,2 mm) beschränkt, kann das Verfahren, auch wenn es ein Abätzen um einen solchen Betrag erheischt, dennoch als zerstörungsfrei angesehen werden.

5. Feststellung der im Gebiet eines Bruchs des Werkstücks vorhandenen Veränderungen in der Feinstruktur des Werkstoffs. *Statischer Bruch* und *Dauerbruch* bewirken eine verschiedene Störung der ursprünglichen Struktur eines Werkstoffs. Während mit einem statischen Bruch eine vollständige periphere Verbreiterung der Interferenzpunkte und eine starke radiale Linienverbreiterung verbunden sind, werden im Falle eines Dauerbruchs im allgemeinen nur geringfügige, oftmals überhaupt keine Veränderungen im Interferenzbild beobachtet. Aufnahmen zur Kennzeichnung eines Bruches werden zweckmässig nicht an der Bruchfläche selber, wo oft Sekundäreffekte durch Scheuerwirkung bestehen, sondern in der Nachbarschaft des Bruches hergestellt, indem dort die Unterscheidung der beiden Arten von Brüchen mittels Rückstrahl-aufnahmen besonders deutlich ausfällt.

6. Verfolgung der Veränderungen der Feinstruktur eines Werkstoffs im Zusammenhang mit einer bestimmten *mechanischen* und *thermischen Behandlung*, wobei die interessierenden Werkstoff-Eigenschaften in Abhängigkeit von dieser Behandlung untersucht werden. Auswahl der passenden Bedingungen. Deren Kennzeichnung mittels Rückstrahl-aufnahmen. Kontrolle der eingehaltenen Bedingungen bei der Herstellung eines Werkstücks nach dessen Vollendung.

7. Nachweis von im Laufe des Betriebs sich ergebenden Veränderungen in der Feinstruktur des Werkstoffs, gegeben durch dessen *Altern* oder infolge der *durch den Betrieb verursachten Beanspruchung*. Hinweis auf einen möglicherweise zu erwartenden Schadenfall.

8. Kennzeichnung von *Oberflächenüberzügen* auf metallischen Werkstoffen aus Oxyden u. dgl., entstanden durch chemischen Angriff während des Betriebs usw.

Wo immer möglich soll die Feinstrukturuntersuchung in sinngemässer Kombination mit andern einschlägigen Prüfverfahren angewendet werden. Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Methode werden dabei sehr oft den Ausgangspunkt der weiteren Versuche (z. B. Parallelversuche) bilden.

Das Ziel einer jeden Feinstrukturuntersuchung an Werkstoffen erstrebt, die Befunde des Röntgendiagramms, hier der Rückstrahl-aufnahmen, mit den Materialeigenschaften in Beziehung zu setzen, um diese einerseits aus dem molekularen Feinbau der Werkstoffe zu deuten und andererseits das *Röntgen-Diagramm als Kriterium für die Qualitäten eines Werkstoffs* verwenden zu können. Nicht immer sind allerdings aus einer beschränkten Anzahl von Rückstrahl-aufnahmen derart umfassende Schlussfolgerungen möglich, und es ist in solchen Fällen ohne *systematische* Untersuchungen nicht auszukommen. Ferner gibt es Fälle von Materialeigenschaften und Veränderungen solcher, die das Röntgendiagramm nicht erfasst, sodass trotz veränderten Werkstoffeigenschaften ein und dieselbe Röntgenaufnahme erhalten wird. Dies gilt für alle jene Eigenschaften eines

so beweist dies, dass im Gebiet des Aufnahmeortes das Material über die Streckgrenze, in der Regel beträchtlich darüber hinaus, beansprucht worden ist. Der Grad der radialen Verbreiterung wird zum Masstab für die erfolgte plastische Verformung des Werkstoffs, falls an einer Vergleichprobe in einer Aufnahmereihe analog jener von Abb. 14 (alle Aufnahmen mit gedrehtem Film herzustellen), der Verlauf der wachsenden Linienbreite mit steigender Belastung erkundet wurde. Dabei ergänzen sich im Falle grobkristalliner Werkstoffe die Betrachtung der peripheren Interferenzpunkte und der radialen Linienbreite, während bei feinkörnigen Stoffen allein das Mittel der radialen Linienbreite zur Beurteilung einer allfälligen plastischen Verformung besteht.

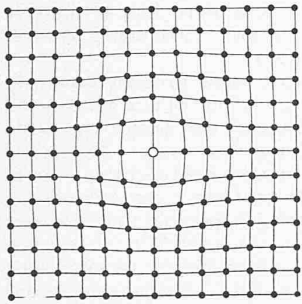


Abb. 15. Gitterstörung um ein Fremdatom in einem legierten Metall (das Fremdatom in der Mitte. Schemat. Darstellung)

an Hand der radialen Linienbreite experimentell verfolgen. So zeigt beispielsweise Ferrit in der Nachbarschaft mit Martensit nach allen bisher gemachten Erfahrungen durchwegs ein völlig verwachsenes K_{α} -Dublett als (310)-Interferenz, während die Martensitkristalle selber einen derartig gestörten Gitterbau aufweisen, dass von ihnen, mit *Co-K*-Strahlung untersucht, überhaupt keine «letzten» Interferenzen anzutreffen sind.

4. Durch geeignete Behandlung des Materials (vor allem durch eine passende *thermische Behandlung*, unter Umständen bereits durch *Altern*, in andern Fällen auch durch eine *Wechselbeanspruchung*) kann durch eine Behebung der Gitterstörungen die normale Gitterordnung herbeigeführt werden. Immer dann wird einem Prozess eine solche entstörende Wirkung einer *Kristallerholung* oder *Kristallausheilung* zuzuschreiben sein, wenn nach seinem Ablauf der Werkstoff in der Rückstrahl-aufnahme Interferenzen grösserer Schärfe liefert als zuvor. Glühen von Stahl- und Eisenproben bei 550° bedingt z. B. den Uebergang von stark verwachsenen «letzten» Interferenzen in Linien ausgezeichneter Schärfe. Die Linien bleiben dabei völlig homogen geschwärzt, was darauf hinweist, dass eine Kristallneubildung im eigentlichen Sinne nicht eintritt, entgegen einem Glühen bei höheren Temperaturen (Abb. 16). Auch die Beurteilung der radialen Linienbreite an Hand von Rückstrahl-aufnahmen kann in solcher Weise zur *Kontrolle einer thermischen Behandlung* herangezogen werden.

In andern Fällen schliesslich werden an Stelle gleichmässig geschwärzter Interferenzlinien solche mit längs des Umfanges wechselnder Intensität angetroffen, wie dies Abb. 17 veranschaulicht. Stellen maximaler Intensität sind hier neben Bereichen, wo die Interferenz fast völlig verschwindet, in symmetrischer Abfolge wahrzunehmen. Ein derartiges Aussehen der Interferenzlinien geht auf eine geregelte Anordnung der Kristalle in dem von ihnen aufgebauten Haufwerk zurück. Der Werkstoff ist dann im Aufnahmeort nicht ein regelloses Kristallhaufwerk, sondern er besitzt eine bestimmte *Textur*, indem die Kristalle sich mit einer *Axe* (Fläche) parallel einer bestimmten Richtung (Ebene),

Materials, die nicht mit dem durchschnittlichen, mittleren Verhalten seiner Kristalle, ihrem Aufbau und ihrem Zustand, ihrer Gestalt, Grösse und ihrer Anordnung, zusammenhängen, sondern durch individuelle Kristalleigentümlichkeiten oder durch das Verhalten einer Minderheit von Kristallen gegeben sind. Auch bei der zerstörungsfreien Feinstrukturuntersuchung der Werkstoffe muss man sich der natürlichen Grenzen, die ihr wie jeder Methode der Materialprüfung gezogen sind, ständig bewusst bleiben.

Vom Bau der Strassenbrücke über die Tara in Jugoslawien

Von RICHARD CORAY, Bauingenieur, Chur

In den Jahren 1938/40 ist in Jugoslawien eine Strassenbrücke aus Eisenbeton erstellt worden, die durch ihre grosse Höhe, in der ein weitgespannter Bogen das Tal überbrückt, bemerkenswert ist¹⁾. Die Länge der Brücke beträgt rd. 350 m, ihre Höhe über Wasserspiegel 150 m, und die Brückenbreite 7 m. Das Hauptgewölbe über der tiefen Schlucht hat eine Spannweite von 116 m. Die vier Anschlussbögen auf der linken Flussseite mit je 47 m Pfeilerabstand liegen in einer Kurve (Abb. 1). Die Tara ist ein Nebenfluss der Drina und entspringt in Montenegro.

Für die Festlegung der Brückenaxe wählte man die Stelle aus, die die kleinste Spannweite für den grossen Bogen ergab. Das rechtsufrige Widerlager musste auf einem überhängenden Felsen angelegt werden. Die auf Abb. 2 u. 3 sichtbare Felswand hängt nämlich auf 70 m Höhe um 6 m über ihren Fusspunkt hinaus. Es schien deshalb ratsam, das Widerlager soweit in den Berg hinein zu setzen, dass ein gewisser «Anzug» im Innern des Gesteins erreichbar war. Demzufolge legte man die Spannweite des grossen Bogens von 116 m erst fest, nachdem im Lauf des Fundamentaushubes gesunder Fels für die Anlage der Widerlager angetroffen worden war.

Im Jahre 1938 wurden zwei Anschlussbögen erstellt, im folgenden Jahre wieder zwei, und im Jahre 1940 wurde die grosse Öffnung überbrückt; im November 1940 wurde die Brücke, wie vorgesehen, dem Verkehr übergeben. Für die Gerüste gelangte ausschliesslich Kantholz zur Verwendung, das man nicht weit von der Baustelle aus einer waldreichen Gegend gewann. Kies und Sand fand sich in guter Qualität am Flusse vor. Die übrigen Materialien, wie Zement und Eisen, mussten jedoch auf weiten Transporten herbeigeschafft werden. Eine elektrische Anlage auf der Baustelle, mit einer Dampfmaschine betrieben, lieferte den Strom für den Betrieb der Bauplatzeinrichtungen, Betonmischer, Aufzüge und des Kabelkrans mit Hub- und Fahrbewegung für die Montage des grossen Lehrgerüsts über die Tara. Dieses Gerüst wurde während sechs Arbeitsmonaten im Herbst 1939 und Frühjahr 1940 fertig erstellt. Es erforderte 650 m³ Kantholz; die Montageleistung betrug im Durchschnitt 8 m³/Tag.

Das Gewölbe wurde in drei Ringen betoniert, wobei das Gerüst nur den ersten Ring voll zu tragen hatte. Auf jeden Ring entfiel ein Drittel des Gesamtquerschnitts des Bogens. Das Gewölbe besteht aus zwei parallelen Bogenrippen, die in ihrer Axe durch eine Platte miteinander verbunden sind. Der Querschnitt ist also ein liegendes Doppel-T-Profil. Bei jeder Fahrbahnsäule

¹⁾ Vgl. auch die Baubilder in Bd. 115, S. 250* (1. Juni 1940).

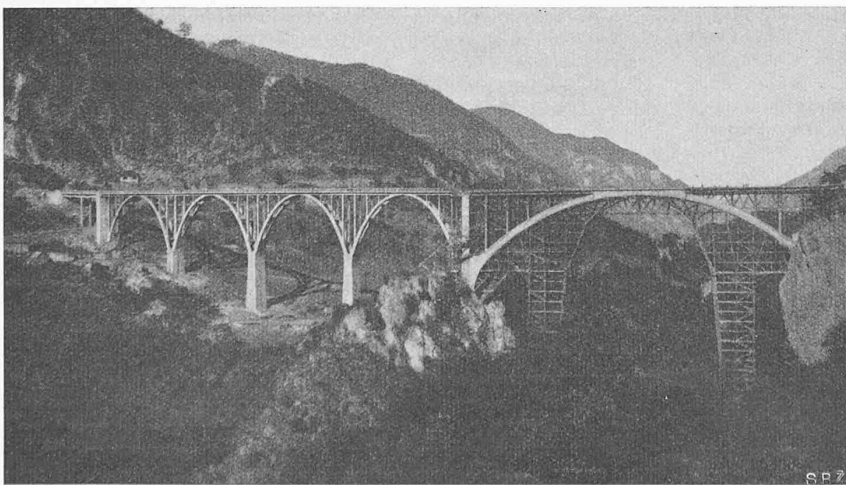


Abb. 1. Gesamtbild der Tarabrücke, kurz vor der Vollendung

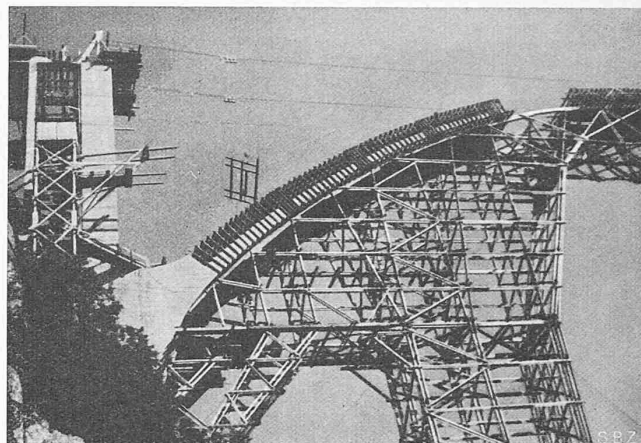


Abb. 5. Montage der Bogenschalungs-Rahmen

ist ein Querriegel angeordnet, aber nur unterhalb der Platte. Diese Riegel dienten auch zur Aussteifung des ersten Ringes, als dieser zum Tragen des zweiten Ringes herangezogen wurde. Als zweiter Ring folgte die Platte und als dritter der darüberliegende Teil der beiden Bogenrippen. Das Betonieren der einzelnen Ringe begann an den beiden Kämpfern und erfolgte in der üblichen Weise in Abschnitten, jedoch fortlaufend symmetrisch bis zum Scheitel (Abb. 2, unten).

Hierbei zeigte das Lehrgerüst trotz seiner grossen Konstruktionshöhe von 141 m eine Einsenkung von nur 63 mm im Scheitel infolge des Betonierens des ersten Ringes; der zweite und dritte Ring verursachten je eine Einsenkung von weitem 10 mm im Scheitel. Mit Hilfe eines solchen steifen Lehrgerüsts war es möglich gewesen, die plangemässe Bogenform in der Ausführung praktisch genau herzustellen. Im Uebrigen hielt das Gerüst ausser der Nutzlast starken Seiten-Drücken durch den Wind in der Talrichtung stand; oft wurde das Holz durch heftige Gewitter und dann auch durch das ständige Nasshalten des jungen Betons durchnässt. Die Stabilität gegen Ausknicken dieser unter Druck und Biegung stehenden, über 100 m hohen und schlanken Gerüsttürme erwies sich in der Praxis und anhand von Kontrollmessungen über die seitlichen Ausbiegungen ihrer Stabaxen als vollkommen genügend. Das Material bestand aus Fichtenholz, das mangels einer Sägerei einrichtung von geübten Holzhauern vierseitig mit der Axt von Hand zu Kantholz behauen worden war, unter Belassung des Markes. Als Holzverbindungen dienten ausschliesslich kräftige Schraubenbolzen mit entsprechenden Unterlagsplatten, was eine solide, zimmermannsmässige und bautechnisch gute Ausführung ergab.

Die ringweise Erstellung von armierten Betonbögen ist heute ein aktuelles Thema und verdient deshalb eine nähere Betrachtung unter Verwendung der Erfahrungsergebnisse vom Bau der Tarabrücke. Grundsätzlich eignen sich wohl alle Lehrgerüstarten, seien es Bogen-, Fächer- oder Turmkonstruktionen für die ringweise Erstellung von Eisenbetonbögen. Das Zusammenwirken von Gerüst und erstem Ring, das heisst die Beteiligung beider Tragwerke an der nachfolgenden Lastaufnahme, ist in jedem Falle gegeben. Bei Bogengerüsten wird durch genügende Schub-sicherung zwischen Gerüst und erstem Ring nur noch die mangelnde Steifigkeit, das Trägheitsmoment, vergrössert. Der grosse Vorzug, namentlich in bau- und betriebstechnischer Hinsicht, aller Gerüste mit direkter Abstützung (Fächer- und Turmgerüste), erwiesen durch das Verhalten des Lehrgerüsts über die Tara, besteht jedoch darin, dass sie wohl in den meisten Fällen gestatten, unter Sicherung der plangemässen Bogenform, die Ringe symmetrisch von den Kämpfern bis zum Scheitel, ohne Unterbrechungen, in einem Zuge zu betonieren, sei es auch in Tag- und Nachtarbeit. Wenn die Gerüstkonstruktion eine solche Erstellung der Ringe unter Ausschaltung der Querfugen gestattet, was wesentlich zur Hebung der Qualität des Bauwerkes beiträgt, gelangt man dazu, die Ringe neben- oder übereinander, voneinander durch offene Längsfugen getrennt herzustellen, wobei die einzelnen