Nur für den Dienstgebrauch des Empfängers

L - 6 II C 19

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung im Flugzeug- und -Motorenbau

Von H. STEUDEL, Dessau

Bei der üblichen Prüfung der Werkstoffe läßt sich eine Beschädigung oder Zerstörung der zu untersuchenden Teile nicht verhindern. Um den Verlust an oft wertvollem Material zu vermeiden, hat man schon seit langem versucht, zerstörungsfreie Prüfverfahren zu finden. Die zerstörungsfreie Prüfung gewinnt um so mehr an Bedeutung, je weiter sie sich von der Untersuchung der Werkstoffe an sich entfernt und sich auf halbfertige oder fertige Bauteile ausdehnt.

In vorliegender Abhandlung wird zunächst ein Überblick gegeben über die verschiedenen Prüfverfahren, die im Flugzeug- und -Motorenbau Anwendung finden, in Sonderheit bei metallischen Werkstoffen. Die einzelnen Verfahren werden dann näher beschrieben und Beispiele aus der Praxis für ihre Verwendbarkeit gegeben. Weiter wird kurz hingewiesen auf neuere Verfahren, die Aussichten für spätere praktische Anwendung haben, aber sich z. Z. noch in der Entwicklung befinden.

I. Einleitung

II. Übersicht über die Verfahren und die damit feststellbaren Werkstoff-Eigenschaften bzw. -Fehler

- *1. Allgemeine Gliederung*
- *2. Gliederung nach ihrer Anwendbarkeit in der Werkstatt*
- *3. Unterteilung in „ganz" und nur „bedingt zerstörungsfreie" Prüfungen*

III. Beschreibung der einzelnen Prüfverfahren mit Beispielen

- *1. Allgemeine Fehlerprüfung*
- *2 Werkstoff- und Bauteil-Eigenschaften*
- *3. Chemische Prüfung*

Schrifttum

9659 524

Ringbuch der Luftfahrttechnik. Eigentum des Reichsluftfahrtministeriums

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung im Flugzeug- und -Motorenbau

I. Einleitung

Die übliche Werkstoffprüfung ist eine „Zerstörprüfung", die untersuchten Teile gehen meistens für eine spätere Verwendung verloren. Für die chemische Analyse müssen Späne abgearbeitet werden; die Ermittlung der meisten Festigkeitseigenschaften, wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung, Schwingungsfestigkeit usw., verlangt besondere Probestäbe, die zerstört werden müssen; auch die metallographische Untersuchung ist in den meisten Fällen nicht ohne Zerschneiden der Prüfstücke durchzuführen.

Soweit dies nur die laufende Überwachung der angelieferten Roh- oder Halbzeuge betrifft, ist der entstehende Materialverlust noch tragbar. Tritt aber bei einzelnen halb oder ganz fertig bearbeiteten Bauteilen Verdacht auf Werkstoff- oder Verarbeitungsfehler auf, so ist die Nachprüfung nach den üblichen Methoden meist gleichbedeutend mit dem Verlust der betreffenden Stücke. Ganz ausgeschlossen ist hiernach die restlose Nachkontrolle aller fertigen Bauteile auf das Fernsein von inneren Ungänzen, feinen Anrissen oder Gefügefehlern, die bei sehr hochbeanspruchten Teilen aus Sicherheitsgründen an jedem Stück durchgeführt werden sollte.

Man hat sich daher besonders bemüht, zerstörungsfreie Prüfverfahren zu entwickeln, die an fertigen Bauteilen anwendbar sind. Naturgemäß kann man ohne Zerstörung immer nur ein begrenztes Gebiet der Werkstoffeigenschaften bestimmen und auch nicht mit sehr großem Genauigkeitsgrad; für die meisten Zwecke genügen aber derartige, vereinfachte Prüfungen durchaus. Durch geschickte Kombination verschiedenartiger Prüfarten kann man heute schon eine recht sichere Beurteilung der betreffenden Prüflinge erzielen.

Es ist nun nicht immer möglich, ganz ohne jede Beschädigung der zu untersuchenden Stücke auszukommen; kleine Spuren der Prüfbehandlung bleiben oft zurück. Man hat danach zu unterscheiden zwischen „ganz zerstörungsfreien" und „bedingt zerstörungsfreien" Methoden; zu den letzten gehört die schon seit Jahrzehnten bekannte Härte- und Festigkeitsprüfung nach Brinell, während zu den ersteren die modernen magnetischen und Röntgenprüfungen zu rechnen sind. Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung umfaßt jedoch ein viel weiteres Gebiet, das je nach dem Industriezweig, in dem es verwendet wird, besonders den dort hergestellten Erzeugnissen anzupassen ist.

Für den Flugzeug- und Flugmotorenbau kommen hauptsächlich die in folgender Zusammenstellung angegebenen Verfahren in Frage; zur allgemeinen Übersicht sind diese in physikalische und chemische Verfahren unterschieden (s. Tafel 1). In der Zusammenstellung sind die vollkommen beschädigungsfreien Verfahren und die *bedingt zerstörungsfreien*, die mit leichten Verletzungen der Oberfläche verbunden sind, durch ausgezogene bzw. punktierte Umrandung kenntlich gemacht. Bei den meisten chemischen Methoden, so bei der Gefügeprüfung und der Tüpfelprobe, oft auch bei der Mikroanalyse, ist es möglich, die entstandenen feinen Angriffspuren durch nachträgliches Überschleifen oder -polieren wieder vollständig zu entfernen. Bei den übrigen bleiben zwar kleine Spuren oder Eindrücke zurück; diese lassen sich aber leicht so anbringen, daß sie an weniger beanspruchte Stellen zu liegen kommen und die Gebrauchsfähigkeit der Teile nicht beeinträchtigen.

II. Übersicht über die Verfahren

1. Allgemeine Gliederung (s. Tafel 1).

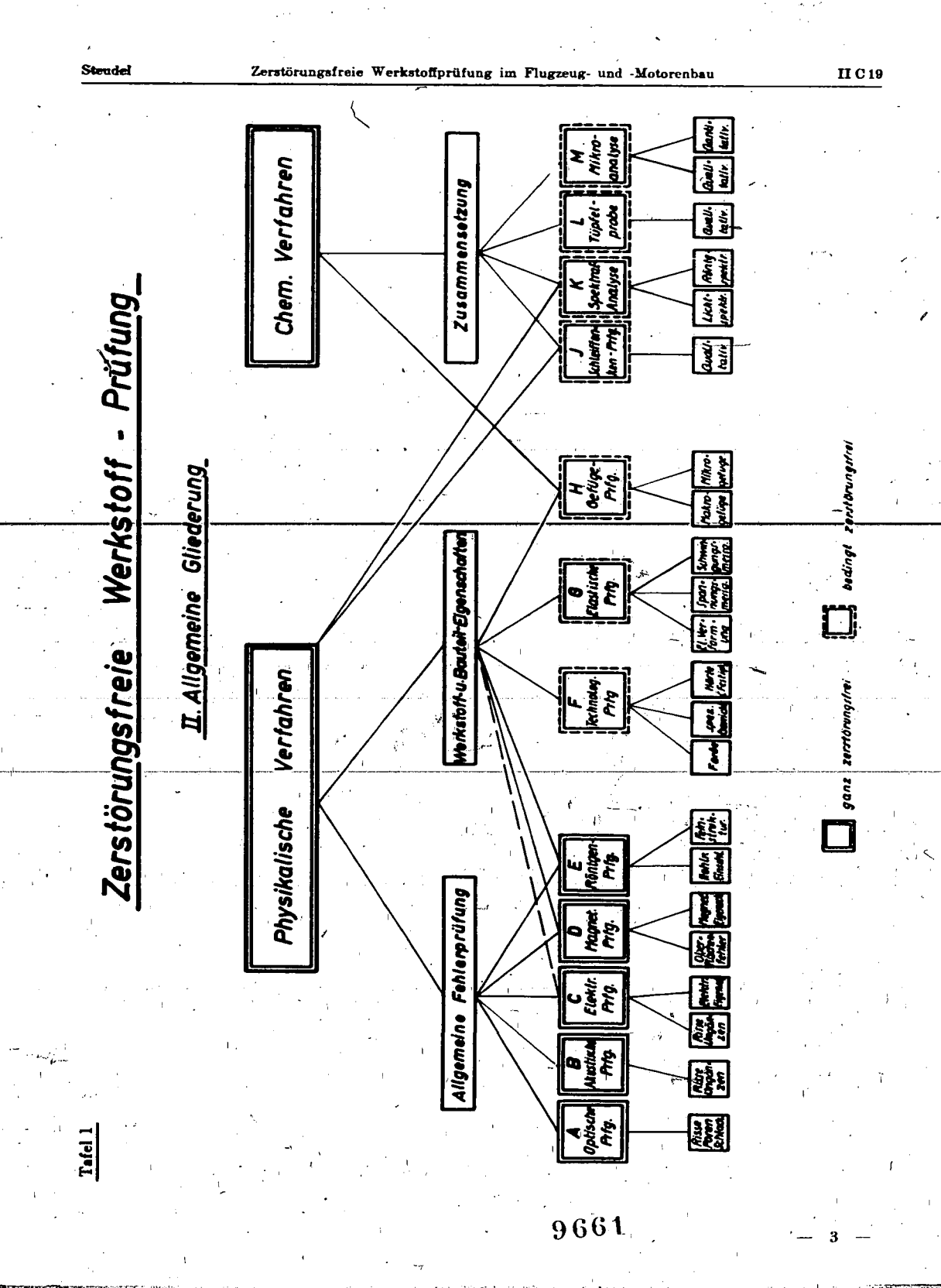
Ordnet man die Verfahren nach ihrer mehr oder weniger leichten Durchführbarkeit in der Betriebskontrolle an, so kommt man zu folgender Reihenfolge:

2. Gliederung nach Anwendbarkeit in der Werkstatt

1. **A** Optische Prfg. — **B** Akustische Prfg.
   Sind mit verhältnismäßig einfachen Mitteln fast überall durchführbar.
2. **J** Schleifflunken-Prfg.
   Benötigt nur einfache Schleifscheibe, erfordert aber besonders veranlagten und ausgebildeten Prüfer.
3. **L** Tüpfelprobe
   In der Werkstatt ausführbar; erfordert nur wenig Gerät und leicht anzulernende Kräfte, muß aber von Chemikern (vom Laboratorium) laufend überwacht werden.
4. **H** Gefüge-Prfg.
   Z. T. mit einfachen Mitteln im Betriebe durchführbar, verlangt aber sachverständige Beurteilung durch metallographisch geschulte Kräfte, zumal durch diese Prüfungen meist metallurgische Fehler aufgedeckt werden sollen.
5. **F** Technolog. Prfg. — **U** Magnet Prfg. — **C** Elektr. Prfg. — **E** Röntgen-Prfg.
   Erfordern besondere, z. T. recht teure Einrichtungen und gut ausgebildetes Fachpersonal. Die Durchführung kann in den Werkstätten erfolgen; die Röntgenprüfung erfordert jedoch einen abgeteilten Raum mit Strahlenschutz.
6. **G** Elastische Prfg.
   Beschränkt sich auf fertige Bauteile und erfordert Sondereinrichtungen. Die Versuche sind hauptsächlich im Festigkeitslaboratorium durchzuführen und nur gelegentlich in der Werkstatt, wie z. B. die Federnprüfung.
7. **M** Mikroanalyse — **K** Spektralanalyse
   Können betriebsmäßig kaum durchgeführt werden, erfordern besonderes Laboratorium und sehr gute Fachkräfte (Chemiker).

9660

Tafel 1


Zerstörungsfreie Werkstoff - Prüfung
II. Allgemeine Gliederung
Physikalische Verfahren
Chem. Verfahren
Allgemeine Fehlerprüfung
Werkstoff- u. Bauteil-Eigenschaften
Zusammensetzung
A Optische Prfg.
B Akustische Prfg.
C Elektr. Prfg.
D Magnet. Prfg.
E Röntgen-Prfg.
F Technolog. Prfg.
G Plastische Prfg.
H Gefüge-Prfg.
J Schleifton-Unt.-Prfg.
K Spektral-Analyse
L Tüpfel-probe
M Mikro-analyse
ganz zerstörungsfrei
bedingt zerstörungsfrei

Die vorgenannten Verfahren sind meist in der Praxis genügend erprobt; einige sind noch in der Entwicklung. So die Ultraschall- und die elektrischen Verfahren, für die die entsprechenden Prüfapparaturen erst Eingang finden. Auch die Röntgenfeinstrukturprüfungen wurden bisher nur in geringem Umfang auf unserem Sondergebiet verwendet; dies gilt auch für die Röntgenspektralanalyse.

Bei der Mannigfaltigkeit der zerstörungsfreien Prüfmethoden und ihrem z. T. schon sehr erheblichen Umfang ist es in der nachfolgenden näheren Beschreibung der Verfahren nur möglich, einen allgemeinen Überblick über ihre Durchführung und Eignung zu geben, bezüglich Einzelheiten muß auf die Fachliteratur hingewiesen werden. Soweit Veröffentlichungen über einige Prüfmethoden noch nicht oder nicht genügend vorliegen, mußte deren Beschreibung etwas ausführlicher gehalten werden.

Wegen der Fülle des Stoffes ist es notwendig geworden, den vorliegenden Ringbuchbeitrag in drei Hefte zu unterteilen, die nacheinander erscheinen als

Teil 1: Allgemeine Fehlerprüfung	Heft II C 19,
Teil 2: Werkstoff- und Bauteileigenschaften	Heft II C 20,
Teil 3: Chemische Verfahren	Heft II C 21.

III. Beschreibung der Prüfverfahren

Teil 1: Allgemeine Fehlerprüfung

A. Optische Prüfung

a) Vorbesichtigung

Jeder Werkstoff- oder Bauteilprüfung soll eine Besichtigung der Oberfläche mit dem bloßen Auge vorausgehen, um vor Einsetzen weiterer Untersuchungen schon die gröbsten Fehler ausscheiden zu können. Hierzu gehören:

1. bei Gußstücken: Blasen und Poren, Schaumstellen, Sogstellen, Kaltschweißen, Brandstellen (z. B. bei Leichtmetallen), Oxyd- oder Abdecksalzeinschlüsse, Spannungsrisse, ferner mechanische Beschädigungen, stehengebliebene Kernnähte, ein- oder angegossene Kernstifte;
2. bei Walzmaterial, Preß- und Schmiedestücken: Überlappungen, Falten, Schiefer, eingedrückter Zunder, Risse; bei Preßteilen und Schmiedestücken ist auch auf Anrisse zu achten, die durch unsachgemäßes Abgraten entstehen können; bei Walzstangen: Riefen, Grate, Profilversetzungen; bei Blechen: Blasen, Doppelungen, Randrisse usw.;
3. bei gezogenem Material: Ziehriefen, Faltungen, Schiefer, Poren, Risse.

Soweit die Toleranzen es zulassen, kann man oft derartige Fehlstellen verputzten; sie müssen dann aber mit feineren Hilfsmitteln auf restlose Beseitigung nachkontrolliert werden. Dies gilt auch für Fehlstellen, die durch die normale Bearbeitung der Rohlinge beseitigt werden.

b) Lupenprüfung

Reicht das bloße Auge für die Erkennung kleinerer Fehler nicht mehr aus, so nimmt man die Lupe oder das Mikroskop zu Hilfe. Meistens genügen 6- und 10fach, in seltenen Fällen bis zu 30fach vergrößernde Lupen. Sehr zu empfehlen sind binokulare Lupen, die durch ihr plastisches Bild die Erkennbarkeit der Fehler sehr erleichtern; ihr Vergrößerungsbereich ist zweckmäßig etwa 10- bis 100fach. Stärkere Vergrößerungen mit dem Mikroskop kommen nur bei bearbeiteten Oberflächen in Frage zur Beobachtung von feinsten Rissen, Schlackeneinschlüssen und dergleichen; über 200- bis 300fache Vergrößerung wird man dabei kaum hinausgehen.

Bearbeitete Flächen lassen im allgemeinen die Fehler besser erkennen als rohe, jedoch muß man darauf achten, daß die Bearbeitbarkeit mit scharfen Werkzeugen geschieht; stumpfe drücken leicht feinere Risse und dergleichen zu oder überschmieren sie mit einer dünnen Werkstoffschicht, so daß die Erkennbarkeit herabgesetzt wird. Verdächtige Stellen sollen daher durch Nachschleifen mit neuem, immer feiner werdendem Schmirgelpapier oder Abziehsteinen nachgeschliffen werden, um derartige Verschmierungen sicher zu beseitigen.

Zur Erkennung feinster Risse und Einschlüsse ist oft noch ein Polieren erforderlich, das aber nicht mit einer Schwabbelscheibe geschehen darf, da sich hierbei eine neue Überschmierung bilden würde. Das Polieren muß vielmehr sorgfältigst mit einem Stück Tuch und feinster Aufschwemmung von Tonerde, Magnesiumoxyd oder Chromoxyd, genau wie bei der Herstellung metallographischer Schliffe, ausgeführt werden, auch wenn es weitaus länger dauert.

Auf polierten Flächen kann man schon mit dem bloßen Auge bei reflektierender Beleuchtung sehr viel sehen: Feinste Risse, z. B. Schleifrisse in gehärtetem Stahl, feine Schlackenfäden, besonders in ihrer Gesamtverteilung, kleinste Poren usw. Oft werden die Fehlstellen noch deutlicher, wenn man die polierte Fläche anhaucht: um die Fehler herum bildet sich ein deutlicher Rand, in dem sich die Feuchtigkeitströpfchen nicht niederschlagen. Auf diese Weise kommen besonders Schleifrisse und Ausbröckelungen von kleinsten Einschlüssen sehr klar zur Anschauung.

Zur genaueren Feststellung, besonders von Einschlüssen, muß man natürlich stärkere Lupen und das Mikroskop heranziehen.

Für die Erkennbarkeit der Fehler spielt noch die Art der Beleuchtung eine Rolle. Sie soll hell, aber möglichst diffus sein und nicht blenden; störende Schatten sind zu vermeiden [1][1]). Risse, Kratzer und feine Poren sind oft bei schräger Beleuchtung (bei Mikroskopbetrachtung sog. „Dunkelfeldbeleuchtung"), besser zu sehen als bei reflektierender; sie leuchten dabei hell auf dunklem Grund auf. Einfarbiges Licht, erzeugt durch Metalldampflampen, läßt Farbunterschiede leichter erkennen, wodurch z. B. unter Quecksilberlampen verchromte Teile von vernickelten sicher unterschieden werden können. Undichte oder unvollständige Metallüberzüge werden dabei durch Aufleuchten des Grundmetalls in anderer Farbe erkannt. Auch beim Absuchen von fertig bearbeiteten Bauteilen, wie Achsen, Kurbelwellen und dergleichen, können bei Quecksilberdampflicht feine Schlackenfäden von Rissen deutlich unterschieden werden.

c) Lichtschnittverfahren

Wie bekannt, wirken nicht nur Werkstoffehler, wie die beschriebenen, herabsetzend auf die Belastbarkeit von Bauteilen, insbesondere bei schwingender Beanspruchung, sondern die Güte der Oberflächen, ob unbearbeitet oder mit spanabhebenden Werkzeugen mehr oder weniger geglättet, ist von erheblichem Einfluß auf die Lebensdauer hochbelasteter Teile (vgl. Abb. 1). Es sei daher bei der großen Wichtigkeit einwandfreier Oberflächen im Luftfahrzeugbau kurz auf deren Nachprüfung eingegangen.

Zunächst ist darauf zu achten, daß nicht an hochbeanspruchten Stellen grobe Riefen und dergleichen zurückbleiben, z. B. bei Gußstücken durch Abschneiden von Eingüssen und Steigern, bei Schmiedestücken durch Verputzen der Preßgrate, bei gezogenem Material (z. B. Federn!) durch Ziehreifen und dergleichen, die infolge ihrer Kerbwirkung die Bauteile stark gefährden können.

Die Kontrolle der spanabhebenden Bearbeitung, deren mehr oder weniger feine, zurückbleibende Riefen ebenfalls wie Kerbe wirken, geschieht am besten mit dem

[1]) Siehe Schrifttum.

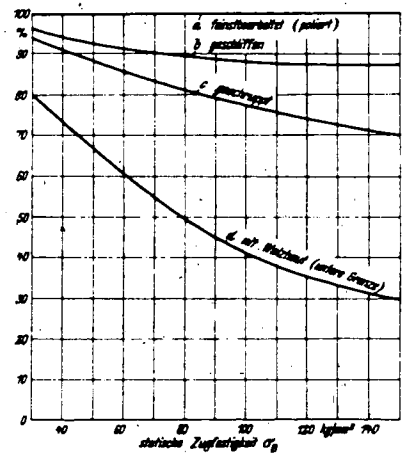


Abb. 1 Einfluß verschiedener Oberflächenzustände auf die Dauerfestigkeit von Stählen

Oberflächenprüfer von G. Schmaltz, der nach dem Lichtschnittverfahren arbeitet [2] (Abb. 2). Bei diesem Gerät wird ein schmaler Lichtspalt schräg auf die bearbeitete Fläche gerichtet, dessen Reflex mittels eines Mikroskops vergrößert ausgemessen oder photographiert wird. Das Schema des Verfahrens gibt Abb. 3 wieder, Abb. 3 a zeigt die Veränderung des zuerst parallelen Lichtbandes beim schrägen Anleuchten der Fläche, wobei die Höhe der Rauhigkeiten noch etwas vergrößert wird. Abb. 3 b gibt den im Okular erscheinenden Ausschnitt des Lichtstreifens in entsprechender Vergrößerung wieder, an dem mittels Mikrometer die Tiefen der bei der Bearbeitung entstandenen Rillen ausgemessen werden. Diese betragen bei geschruppter Oberfläche etwa 40 bis 60 μ (Tausendstel Millimeter), während sie bei Feinschliff auf etwa 1 bis 3 μ und an polierten Oberflächen weit unter 1 μ herabgehen (Abb. 4).

Zu bemerken ist noch, daß auch unter gleichen Bearbeitungsbedingungen nicht alle Werkstoffe das gleiche Oberflächenbild ergeben, sondern infolge deren verschiedenen Zähigkeiten sich unterschiedliche Lichtbänder zeigen, so daß gewisse grobe Werkstoffverwechslungen u. U. schon bei der Betrachtung mit dem Schmaltz-Gerät erkannt werden können.

Es sei noch erwähnt, daß bei den optischen Prüfungen die Augen der Prüfer nicht überanstrengt werden dürfen, da sonst die Schärfe der Fehlererkennung nachläßt; es ist daher durch zwischenzeitliche Beschäftigung mit anderen Dingen für Ausruhmöglichkeiten zu sorgen.

Zuweilen genügt die bloße Betrachtung der Prüfstücke auch bei stärkster Vergrößerung noch nicht, um alle Fehler zu finden und ihre Art aufzuklären; hier muß man dann die Oberfläche noch weiter vorbereiten. Risse und Poren kommen gut heraus durch das „Einfärb"- und das „Ölkochverfahren", sowie in gewissen Fällen durch Anätzen der Oberfläche, womit auch Einschlüsse und Seigerungen erkannt werden können (vgl. II. Gefügeprüfung). Schließlich besteht an magnetischen Werkstoffen die Möglichkeit, die Fehler durch das sog. „Magnetpulververfahren" verstärkt sichtbar zu machen (vgl. D. Magnetische Prüfung).

d) Einfärbverfahren

Oberflächenfehler, die etwas in die Tiefe gehen, sind leichter aufzufinden durch Einreiben mit einer geeigneten Farbe, die dann oberflächlich wieder abgewischt wird und in den Fehlstellen zurückbleibt. Geeignet dafür sind:

1. eine Paste von feinstem Ruß und Öl oder dergleichen;
2. Kohlepapier von der Schreibmaschine, mit dem das Prüfstück eingerieben wird;
3. bei Vorhandensein von ultravioletten Lichtquellen: Bestreichen der Teile mit Flüssigkeiten, die im U-Licht fluoreszieren, z. B. eine Lösung von Anthrazen in Tetrachlorkohlenstoff.

Vorteile: Sehr einfache Handhabung.

Nachteile: Nur bei relativ kleinen Teilen und glatten Oberflächen anwendbar; bei rauhen macht das Wiederabwischen der Farbe Schwierigkeiten.

e) Ölkochprobe

Die Auffindung von Rissen und porösen Stellen, besonders bei Gußteilen und größeren Schmiedestücken, wird sehr erleichtert durch ein Verfahren, das die obigen Fehler in verstärktem Umfang und auffällig zu Gesicht bringt und das als Ölkoch-, Puder- oder Kalkmilchprobe in verschiedener Durchführung immer weitere Verbreitung findet. Der Grundgedanke dabei ist, die Risse und Hohlräume mit Öl anzufüllen, das nachher durch Anwärmen oder dergleichen wieder zum Austreten gebracht wird und so die Fehlstellen erkennen läßt. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit kann man die Teile vor dem Wiederausschwitzen des Öls sandstrahlen oder mit einem lockeren weißen Puderüberzug versehen.

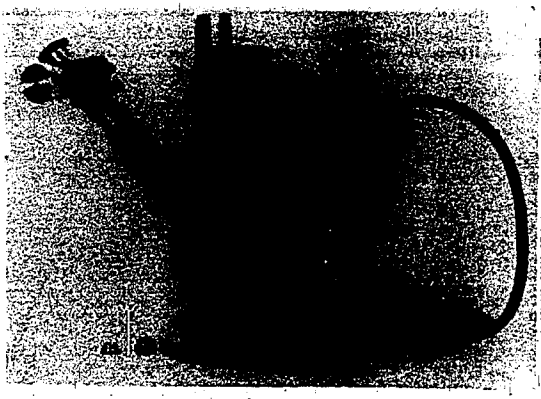


Abb. 2 Oberflächenprüfer nach Schmaltz

Abb. 3
a) Einfall des Lichtbandes
b) Rauhigkeitsmessung im Okular

9663

Die zu prüfenden Teile müssen zunächst gut gereinigt und entfettet werden, was durch Abwischen oder Spülen mit Gasöl, Petroleum, Benzin (Feuersgefahr!), Tetrachlorkohlenstoff oder dergleichen geschehen kann.

Die Teile werden dann in Öl „gekocht", wozu dickes Öl, z. B. Heißdampfzylinderöl (Flammpunkt $\geq 300°$ C) oder auch altes Flugmotorenöl oder zähes Maschinenöl (Flammpunkt $> 180°$ C) genommen werden kann. Die Badtemperatur beträgt zweckmäßig 150 bis 180° C, bei Öl mit geringerem Flammpunkt etwa 130° C; Kochzeit ½ bis 1 Stunde, bei niederer Temperatur bis zwei Stunden. Nach dem Herausnehmen aus dem Öl werden die Teile vom überschüssigen Öl wie oben an der Oberfläche gereinigt, wobei rasch vorgegangen werden muß, damit das in die Fehlstellen eingedrungene Öl nicht wieder ausgewaschen wird. Die Nachbehandlung geschieht dann wie folgt:

1. Sandstrahlprobe

a) Noch warm mit feinem Sand abstrahlen und stehen lassen. Beim Erkalten tritt das Öl aus den Poren und erzeugt auf der hellen (bei Leichtmetall silbrigen) Oberfläche dunkle Flecken.

b) Statt Ölkochen Einlegen in kaltes Petroleum oder Trichloräthylen; mit Lappen abwischen und sandstrahlen. Einfacher, aber geringere Fehlererkennbarkeit.

Anwendung: Nur für rohe oder vorgearbeitete, nicht fertig bearbeitete Stücke brauchbar, da letztere durch Sandstrahlen verdorben werden. Das Sanden darf nur leicht geschehen, da sonst feinere Fehler dabei zugehämmert werden.

2. Puderprobe

a) Nach Behandlung im Ölbad und Abwischen Einpudern mit Talkumpuder; Fehlstellen verursachen Ölflecken auf dem Pulverniederschlag.

b) Abwandlung für Rißprüfung von Motorteilen nach dem Probelauf: Ausbauen und Abwischen der öligen Teile, Einpudern. Etwa entstandene Anrisse haben durch das „Atmen" beim Lauf genügend Öl aufgenommen, um sich in der Talkumschicht deutlich abzuzeichnen.

Anwendung: Für rohe und fertig bearbeitete Teile. Talkumschicht ist schwierig gleichmäßig zu erhalten, feinere Fehler sind daher nicht ganz leicht zu erkennen. Durch Überdecken der Teile mit einer passenden Haube, in die Talkumnebel eingeblasen wird, kann man jedoch sehr gleichmäßige Überzüge bekommen.

3. Kalkmilchprobe

a) Nach Vorbehandlung mit Ölbad noch warm Anpinseln einer Schlämmkreideaufschwemmung in Spiritus, etwa so dick wie Malertünche (rd. 1 kg Kreide in 3 Liter), Anzünden des Spiritus bzw. Abbrennen mit Lötlampe, wonach sich auf dem Stück ein dichter Kreideüberzug bildet. Nach dem Abkühlen erscheinen in diesem die Fehlstellen als dunkle Flecke.

b) Statt Anpinseln Eintauchen der Teile in dünner angesetzte Aufschwemmung (1,5 bis 2 kg Kreide in 10 Liter Spiritus), dann behandeln wie a. Feinere Risse kommen wegen der dünneren Kreideschicht besser heraus.

c) Nach Erprobung obiger Verfahren bei den Junkers-Werken am besten bewährt, besonders für Elektroguß, auch im chromatgebeizten Zustand: Vorreinigen der Teile mit Tetrachlorkohlenstoff (wichtig zum Aufschließen der Fehlstellen!), ½ Stunde erhitzen im Ölbad, säubern von überschüssigem Öl mit Sägespänen und Preßluft. Kurzes Tauchen in Aufschwemmung von 10 Gewichtsteilen Talkum und 90 Gewichtsteilen Tetra, bis zur Beurteilung zwei Stunden stehen lassen.

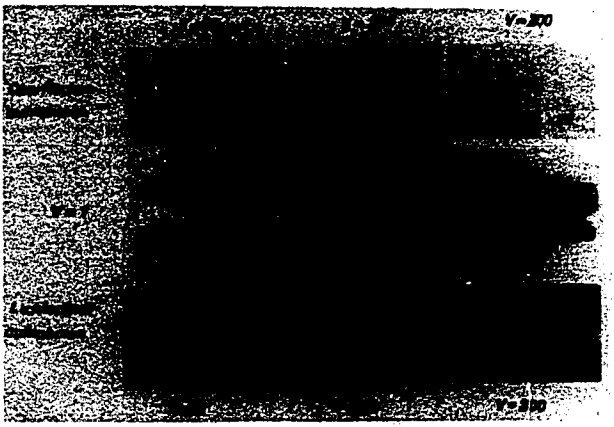


Abb. 4 Bolzen mit Schrupp-, Feinschliff- und Polierbearbeitung, in Oberflächen- und Lichtschnittaufnahmen

d) Es hat sich gezeigt, daß sehr feine Fehlstellen oft beim „Kochen" das Öl nicht genügend aufnehmen, da die darin enthaltene Luft schwer entweicht. Hier kann man durch abwechselndes Tauchen in heißes und kaltes Öl eine Art „Pumpwirkung" erzeugen, die die Luft ganz herausbringt und damit auch bei sehr kleinen Fehlstellen die Ölaufnahme sichert.

Leistungsfähigkeit der Ölkochprobe

Grundsätzlich zeigt diese Probe nur Hohlstellen an, wie Poren, Feinlunker, Kaltschweißen und Risse, nicht dagegen Einschlüsse, wie Oxydhäute, Schlackenfäden und dergleichen. Größere Schlacken, die in sich wieder Hohlstellen haben, werden natürlich auch erkennbar.

Die geschilderten Verfahren haben sich in erster Linie bei Leichtmetallguß bewährt, insbesondere bei Guß aus Mg-Legierungen zur Auffindung von Mikrolunkern, die für diesen typisch und gießtechnisch kaum ganz zu vermeiden sind. Hier kommt es in erster Linie darauf an, daß die Lunker nicht in Gebieten höchster Beanspruchung liegen, und hierfür ist die Ölkochprobe, besonders als Kalkmilchtauchprobe, unerläßlich. Auch bei Gußstücken aus den meisten Al-Legierungen gibt sie gute Ergebnisse. Bei Silumінguß täuschen die an bearbeiteten Stellen freigelegten typischen Bläschen leicht größere Fehler vor, während Korngrenzenlunker hier nicht auftreten.

Beispiele für das Aussehen von Fehlstellen nach den verschiedenen Ölkochproben sind in Abb. 5 bis 8 dargestellt.

Abb. 5 Elektrongehäuse nach der Ölkochprobe

9664

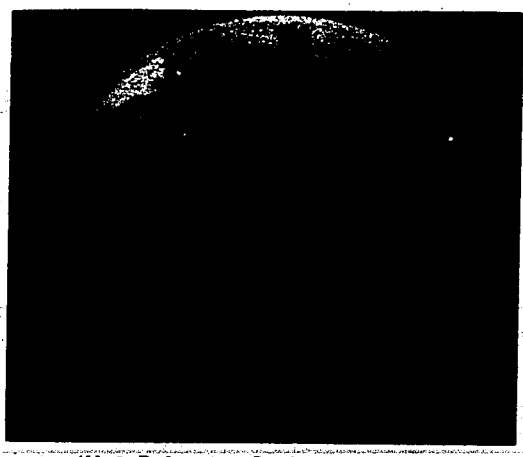


Abb. 6 Boden eines Leichtmetallkolbens

Abb. 5 zeigt ein Elektrongehäuse aus dem Gebiete des Flugzeugbaues, auf dem zahlreiche größere und feinere dunkle Flecken die Anwesenheit von darunterliegenden porösen Stellen verraten, die sich besonders am Übergang zu Querschnittsanhäufungen finden. Das Gußstück wurde nach Verfahren 3 c behandelt.

Abb. 6 zeigt den Boden eines Kolbens aus Aluminiumkokillenguß, nach Verfahren 3 b behandelt, der zahlreiche feine Poren und einen sternförmigen Gußspannungsriß in der Mitte erkennen läßt.

Weniger scharfe Fehleranzeigen gibt die Ölkochprobe bei Stahlguß und Gußeisen, bei rohen Schmiedestücken und Schweißteilen, da deren Oberflächen stärker oxydiert und rauher sind; durch vorheriges Sandstrahlen oder auch Abbeizen der Kruste können die Ergebnisse verbessert werden.

Die Erkennbarkeit von Rissen bleibt aber nur bedingt, da diese oft mit Zunder ausgefüllt sind, die auch durch das Abbeizen nicht immer geöffnet werden. Wo die Einrichtungen vorhanden, ist bei Eisen und Stahl die magnetische Prüfung vorzuziehen.

Schmiedeteile aus Nichteisenmetallen können natürlich auch nach der Ölkochprobe auf Risse und dergleichen untersucht werden, schärfer als diese ist jedoch hier die Beizprobe, die später (unter H. Gefügeprüfung) behandelt wird.

In Abb. 7 sind zwei Schmiederohlinge aus legiertem Einsatzstahl für Kegelräder wiedergegeben, die nach der Kalkmilchprobe 3 b Längsschmiederisse zeigten. Bei dem linken Rohling wurde versucht, durch Anschleifen die Tiefe des Risses festzustellen; obwohl dieser im Grunde der Schleifrille (s. Pfeil) zunächst verschwand, trat er nach dem zweiten Tauchen doch wieder deutlich hervor. An den Stücken sind noch die Drähte zu sehen, an denen diese zweckmäßig in die Kalktünche getaucht werden.

Mitunter findet man auch hierbei die unter A a 2 erwähnten Anrisse in der Teilebene von Gesenkschmiede- und Preßteilen, die durch falsches Abgraten entstehen; im allgemeinen werden diese aber erst durch die magnetische (bei Stahl) oder die Ätzprüfung (bei Buntmetallen) sichtbar (s. später).

Abb. 8 gibt ein Beispiel für die Puderprobe nach Verfahren 2 a. Es zeigt einen Teil einer Überwurfmutter aus Nickelbronze, die innen einen feinen Eigenspannungsriß in der Längsachse aufweist. Der Riß war zunächst nach dem Einpudern noch nicht zu sehen, da die aus ihm austretende Ölmenge zu gering war, um die Talkumschicht genügend zu tränken. Nach Fortblasen des überschüssigen Talkums von der glatt bearbeiteten Fläche kam der Riß dadurch zum Vorschein, daß etwas Talkum an dem ausgetretenen Öl hängen geblieben war. Der Riß wurde übrigens zuerst entdeckt durch die im folgenden beschriebene Klangprobe.

f) Lackprobe

In neuester Zeit ist vorgeschlagen worden, die auf Oberflächenrisse zu prüfenden Teile mit einem spröden Lack zu überziehen und die Stücke dann raschen Schwingungen auszusetzen [3]. Hierbei soll an den Fehlstellen infolge stärkerer Beanspruchung der Lack aufreißen und so deren Lage kenntlich machen. Die Anwendbarkeit dieser Methode konnte bisher noch nicht nachgeprüft werden.

B. Akustische Prüfung

a) Die Klangprobe

Eine der ältesten zerstörungsfreien Prüfungen ist die Klangprobe, die weniger für die Werkstoffe selbst, für Bauteile aber häufig angewendet wird. Am verbreitetsten ist sie als Prüfung von keramischen Erzeugnissen auf Risse, die jeder Hausfrau bekannt ist. Die Klangprobe ist ihrer Natur nach keine absolute, sondern eine Vergleichsprobe. Sie ist auch nicht sehr scharf und ziemlich subjektiv; gröbere Abweichungen im Klang werden allgemein erkannt, für feinere Unterschiede ist aber ein empfindliches und geübtes Ohr erforderlich.

Die zu untersuchenden Teile müssen für die Prüfung so unterstützt, besser aufgehängt werden, daß sie frei schwingen können.

An gleichartigen Stücken kann man schon verschiedene Werkstoffe unter sich recht gut auseinanderhalten: Gußeisen klingt weniger als Stahl, Elektron anders als Aluminiumlegierungen, Zinn- und Bleilegierungen noch weniger gut usw., so daß mitunter Verwechslungen rasch aufgeklärt werden können. Stangen und dergleichen mit

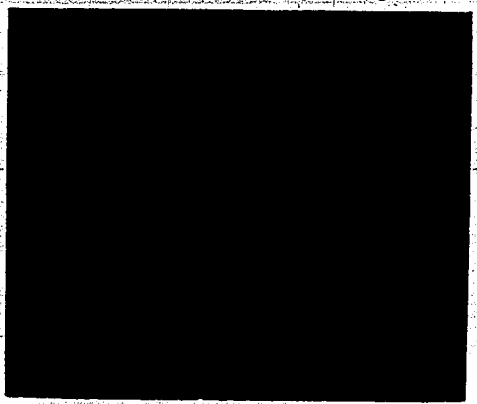


Abb. 7 Rohlinge für Kegelräder mit Schmiederissen

Abb. 8 Bronzering mit Spannungsriß

9665

Walzschiefern, Rissen und anderen groben Ungänzen geben einen weniger hellen Klang als einwandfreie, ebenso können auch oft derartige Fehler in kleineren Bauteilen erkannt werden, vgl. Abb. 8.

Besondere Bedeutung hat die Klangprobe für zusammengesetzte Bauteile, wie für Lagerschalen, die mit Weißmetallen, Bleibronzen oder dergleichen ausgegossen sind. Hier machen sich gröbere Fehler in der Bindung recht gut bemerkbar. Auch schlecht gebundene Lötungen oder Schweißungen geben oft einen schlechteren Klang als einwandfreie Teile und können so erkannt werden. Bei größeren Bauteilen kann man auch durch Abklopfen und Abtasten mit einem Stethoskop (ärztlichen Abhörinstrument mit Gummischläuchen) die Lage gröberer Fehlstellen auffinden.

Allgemeingültige Anweisungen sind hier der Sache nach noch nicht möglich, immerhin kann die Klangprobe in geschickten Händen zu einer sehr einfachen Vorprüfung in der laufenden Fabrikation werden.

b) Prüfung mit Ultraschallwellen

Die in den letzten Jahren näher erforschten Ultraschallwellen bieten gewisse Möglichkeiten, sie zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit heranzuziehen [1].

Als Ultraschall bezeichnet man schnelle mechanische Schwingungen, die oberhalb der Hörgrenze des menschlichen Ohres liegen und mehr als 16 000 Wechsel in der Sekunde (= 16 kHz) ausführen.

Zur Erzeugung der Ultraschallwellen in den Prüfstücken werden diese mit sog. Schallgebern verbunden, die nach verschiedenen Verfahren arbeiten.

Für feste Körper kommen hauptsächlich in Frage:

1. Der Magnetostriktionsschallgeber, bei dem ein Stab aus magnetischem Werkstoff in einem elektromagnetischen Wechselfeld zu Schwingungen angeregt wird; mit diesen kann man bis zu etwa 50 kHz kommen.
2. Der Quarzschallgeber, bei dem die Eigenschaft des Quarzes, unter einem elektrischen Wechselfeld Schwingungen auszuführen, der sog. piezo-elektrische Effekt, ausgenützt wird; hiermit können bis zu 200 000 kHz erreicht werden.

Um recht kräftige Wellen zu erhalten, regelt man die magnetischen bzw. elektrischen Wechselfelder so, daß sie mit den Eigenschwingungen des Gebers in Resonanz arbeiten.

Mit den Ultraschallwellen können eine Reihe interessanter Wirkungen erzielt werden, die u. a. auch in der Metallkunde zur Erzeugung von sonst nicht herstellbaren Legierungen auf dem Wege der Emulsion Anwendung gefunden haben [4] [5].

Für die Werkstoffprüfung mit Ultraschall sind folgende Eigenschaften dieser Wellen ausnutzbar:

1. Ihre große Durchdringungsfähigkeit und geradlinige Ausbreitung. Sie können daher ähnlich verwendet werden wie die Röntgenstrahlen zur Auffindung von Hohlstellen, Rissen und Ungänzen, von denen sie „Schallschatten" erzeugen, die zwar nicht direkt zu photographieren, aber in anderer Weise ausmeßbar sind. In der hohen Durchdringungskraft der Schallwellen liegt der Hauptanreiz ihrer Verwendung zur zerstörungsfreien Prüfung; während für Röntgen- bzw. Gammastrahlen die wirtschaftliche Grenzdicke bei Stahl mit etwa 150 bzw. 200 mm anzusetzen ist, macht die Durchschallung von mehrere Meter starken Stücken keine Schwierigkeiten.

   Das Schema dieser Prüfung zeigt Abb. 9 [6]. Von dem Schallgeber *a* breiten sich die Wellen strahlig durch das Prüfstück *b* aus, ihre Intensität wird durch den Empfänger *d* gemessen. Ist ein Hohlraum *c* im Prüfstück, so werden hier die Wellen durch Reflexion und Absorption geschwächt, so daß der Empfänger in der Stellung *d* eine geringere Energie aufnimmt. Durch Abtasten kann der Umfang des Fehlers *c* festgestellt werden.

2. Die Dämpfungsfähigkeit der Schallwellen durch Hohlstellen. Dabei wird die Veränderung der in das Werkstück eingeleiteten Schwingungen beobachtet, die gegenüber gesunden Stücken auftritt.

   a) Eine solche vielseitiger verwendbare Versuchsanordnung nach Sokoloff [7] gibt Abb. 10 wieder. In dem Gehäuse *c* des Schallsenders sind eine größere Zahl gleich dicker Quarze *q* zwischen zwei starken Stahlplatten *a* und *b* eingekittet, an die die hochfrequente Wechselspannung angelegt wird. Das Prüfstück *e* wird über den Schallgeber hinweggeführt unter Zwischenschaltung einer Quecksilberschicht *g*, die zur guten Übertragung der Schallwellen dient. Zur Sichtbarmachung der durchgehenden Strahlen und ihrer Intensitätsänderungen durch etwaige Fehlstellen ist über dem Prüfstück unter Zwischenfügung eines Tropfens Öl eine flache Schale *h* mit Öl befestigt, an dessen Oberfläche ein Lichtbündel von der Lichtquelle *l* nach dem Schirm *s* reflektiert wird. Der durch das Werkstück gehende Schallstrahl versetzt das Öl in der Schale in Wallungen, die auf dem Schirm abgebildet werden. Fehler im Werkstoff machen sich dann durch Änderungen des Lichtflecks auf dem Schirm bemerkbar.

   Um auch feinere Hohlräume usw. mit Schallwellen nachweisen zu können, müssen die Wellenlängen im Werkstück kleiner als die Fehler sein; es ergeben sich so für Metalluntersuchungen Frequenzen von mindestens 1000 kHz und als Geber nur Piezoquarze. Es ist jedoch Meyer und Buchmann gelungen, mit einfachen, magnetostriktiven Gebern von nur 22 kHz Risse in Betonbalken aufzufinden [8].

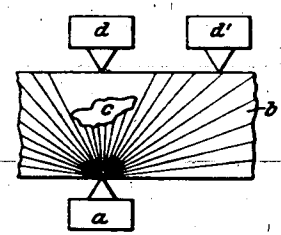


Abb. 9 Feststellung eines Hohlraumes mit Ultraschallwellen nach O. Mühlhäuser

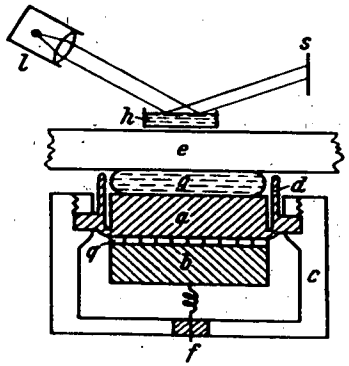


Abb. 10 Ultraschallprüfung für größere Werkstücke

9666

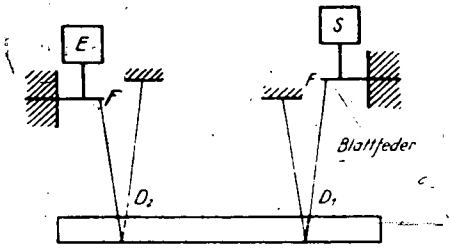


Abb. 11 Rißprüfung mit Ultraschall. Aufhängung des Prüfkörpers —

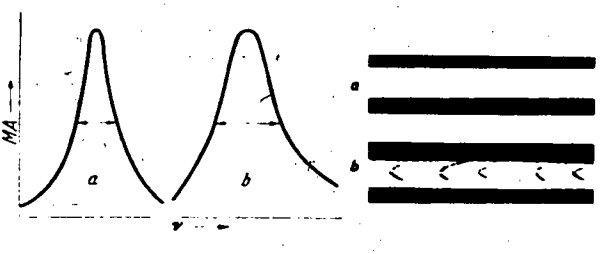


Abb. 12 Dämpfung von fehlerfreiem (a) und überzogenem (b) Draht

b) Förster und Köster haben in neuester Zeit die Anwendung des Ultraschalls für die zerstörungsfreie Prüfung weiter ausgebaut, und zwar hauptsächlich zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Dämpfung der Werkstoffe [9].

Die Meßmethoden und ihre Ergebnisse werden in dieser Abhandlung unter „G. Elastische Prüfung" näher besprochen. Hier seien nur zwei Beispiele angeführt, wie aus der Veränderung der Dämpfung auf das Vorhandensein von Rissen und dergleichen in Werkstücken geschlossen werden kann.

Abb. 11 zeigt eine Versuchsanordnung für Stäbe: Der Prüfstab hängt in zwei Drahtschlingen $D1$ und $D2$; je ein Ende der Schlingen führt zu Blattfedern F, die mit dem Schallsender bzw. dem -empfänger verbunden sind. Durch den Sender wird nun der Stab zunächst zu Schwingungen unter seiner Eigenfrequenz angeregt, die dann über diese hinaus gesteigert werden. Hierbei kommt der Stab in Resonanzschwingungen, deren Verlauf mit dem Empfänger in Form einer Kurve aufgenommen wird. Diese Resonanzkurven haben je nach der Dämpfungsfähigkeit der Stäbe verschiedene Breite, nach der schon die Werkstoffe unter sich auseinandergehalten werden können. Auch innere Werkstoffehler verbreitern die normale Dämpfungskurve, so daß sich hierdurch Risse und dergleichen kenntlich machen, vgl. Abb. 12.

Durch die Aufhängung des Prüfstabes an Blattfedern werden nur Schwingungen in der Senkrechten bzw. deren vertikale Komponente auf den Empfänger übertragen. Wenn man also dabei allmählich den Stab um seine Achse dreht, kann man die Verteilung der Dämpfung in radialer Richtung feststellen, die bei einem überall gleich dichten Körper natürlich einen Kreis ergeben muß. Ist der Stab aber mit inneren Fehlern behaftet, so wird die Dämpfung stellenweise größer, so daß sich eine Polarkurve ergibt.

Ganze Bauteile können ebenfalls bei geeigneter Aufhängung auf Ungänzen geprüft werden, wie Abb. 13 zeigt.

Leistungsfähigkeit der Ultraschallprüfung

Die Prüfung ist noch zu jung, um eine Kritik der damit erreichbaren Ergebnisse geben zu können; sie erscheint jedoch als geeignet, in Zukunft über den Rahmen wissenschaftlicher Versuche hinaus eine weitere praktische Bedeutung zu erlangen, wenn erst die Schwierigkeiten in der Auswertung und Beurteilung ihrer Ergebnisse überwunden sind [10].

Die ersten käuflichen Geräte für diese Prüfung erscheinen jetzt im Handel. Bekannt wurde bisher das Thyssen-Elastometer der Firma Seismos G. m. b. H., Hannover, das für Gesteinsuntersuchungen gebaut wurde, sich aber auch für andere Werkstoffe eignet. Weiterhin haben Köster und Förster im Kaiser-Wilhelm-Institut für Metallforschung in Stuttgart die ersten Geräte herausgebracht. Beide Prüfgeräte sollen in Kapitel „G. Elastische Prüfung" noch näher behandelt werden.

C. Elektrische Prüfung

Diese Prüfung bildet den Übergang zu den Verfahren, die nicht nur zur Aufdeckung von Fehlern, sondern auch zur Feststellung von Eigenschaften des Werkstoffes an sich benutzt werden können (vgl. Tafel 1).

Die rein elektrischen Verfahren zur Auffindung von Fehlstellen sind in der Werkstoffprüfung der Luftfahrt erst in der allerersten Entwicklung begriffen. Ausgenommen hiervon ist die bereits weiter verbreitete elektromagnetische Prüfung, die im nächsten Kapitel, D., für sich behandelt werden soll, da der elektrische Strom hierbei nur Hilfsmittel zur Erzeugung der benötigten starken magnetischen Felder ist.

Die Messung der elektrischen Eigenschaften der Werkstoffe, wie z. B. der Leitfähigkeit, ist zwar bekannt, hat aber bisher wenig Eingang auf unserem Gebiete gefunden, da die Anwendungsmöglichkeiten beschränkt sind. Die übrigen elektrischen Werkstoffkonstanten, wie Isolierfähigkeit, Durchschlagfestigkeit, Dielektrizitätszahl usw., die für den Bau elektrischer Luftfahrtgeräte zwar von Wichtigkeit sind, sollen hier nicht behandelt werden, da sie den eigentlichen Luftfahrzeugbau nur indirekt angehen. Die für den letzteren verwendbaren elektrischen Prüfverfahren können unterschieden werden in:

a) Prüfung der elektrischen Eigenschaften.
   1. Leitfähigkeitsmessungen.
b) Fehler- bzw. Bauteilprüfungen.
   1. Spannungsabfallmessungen.
   2. Induktionsverfahren.

Zu a) Prüfung der elektrischen Eigenschaften

1. Leitfähigkeitsmessungen

Die Anwendung ist hauptsächlich gegeben bei gleichmäßigen Profilen geringeren Querschnitts, insbesondere bei Drähten; bei stärkeren Abmessungen werden die Widerstände sehr gering und nicht mehr ohne weiteres

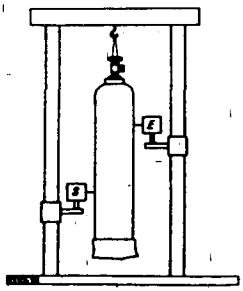


Abb. 13 Prüfung einer Stahlflasche mit Ultraschall

genügend genau meßbar. Es besteht die Möglichkeit, nach der Leitfähigkeit in einfacher Weise verschiedene Metallgruppen unter sich sowie auch deren verschiedene Legierungen auseinanderzuhalten, wenn sie nicht, wie etwa an der Farbe, ohne weiteres zu erkennen sind. Praktisch kommen für den Luftfahrzeugbau in Frage: Schweiß- und Federstahldrähte, Draht oder dünne Rohre aus Kupfer und -legierungen (Kupfer verschiedener Reinheit, Bronzen, Messinge); Heiz- und Widerstandsdrähte aus Chrom- und Nickellegierungen usw., und schließlich Leichtmetalldrähte, die für die Herstellung von Nieten und anderem benutzt werden.

Als Meßinstrument ist am besten zu verwenden die Thomson-Brücke, die die geringen Widerstände der in Frage kommenden Drähte am einfachsten zu messen gestattet. Die Genauigkeit der Messung beträgt etwa $\pm$ 1 vH. Zu achten ist auf möglichst gleichbleibende Temperatur, da diese die Meßwerte stark beeinflußt.

Tafel 2 gibt einige eigene Messungen an verschiedenen im Flugzeug- und Flugmotorenbau verwendeten Drähten wieder, die eine Übersicht über die Verwendbarkeit der Methode gibt. Zu beachten ist, daß der Zustand der Werkstoffe von wesentlicher Bedeutung ist. Im allgemeinen ist die Leitfähigkeit im geglühten Zustand am höchsten, sie wird verringert durch Kaltverfestigung und noch mehr durch Warmbehandlungen, bei denen Legierungsbestandteile in feste Lösung gehen. Hierbei kommt es natürlich auch zu Überdeckungen der verschiedenen Zustände, so daß für die Beurteilung oft ein Nachglühen der Proben erforderlich ist.

Es lassen sich so die üblichen Eisen- und Stahldrähte deutlich voneinander unterscheiden. Auch die Kupferlegierungen sind gut auseinanderzuhalten; lediglich Messing und Silberlot zeigen gleiche Leitfähigkeit, letzteres ist aber an seiner weißlicheren Farbe leicht zu erkennen.

Bei den Aluminiumlegierungen erkennt man weiter die starke Erniedrigung der Leitfähigkeit durch Magnesiumzusatz und durch Aushärtung, bei den Magnesiumlegierungen den Einfluß der mischkristallbildenden Zusätze Aluminium und Zink gegenüber dem unlöslichen Mangan.

Zu b) Fehler- bzw. Bauteilprüfung

1. Spannungsabfallmessungen

Mißt man in einem stromdurchflossenen Leiter den Abfall der Spannung über dessen Länge, so ergibt sich ein stetiges Absinken, wenn der Werkstoff gleichförmig ist; enthält er Fehlstellen, so treten hier Unstetigkeiten auf. Hat der Prüfkörper über seine Länge außen oder innen veränderlichen Querschnitt, so entstehen an den Übergangsstellen ebenfalls Störungen in der Spannungsabfallinie.

a) Nach dieser Methode arbeitet ein Gerät, das in Amerika serienmäßig zur Kontrolle von Eisenbahnschienen auf Querrisse angewendet wird [11], in Deutschland aber anscheinend noch nicht erprobt ist. Diese Prüfung ist auch geeignet für Stangen, Rohre, Bleche usw., ferner soll sie auch für Schweißungen verwendbar sein.

Elektrische Leitfähigkeit von Drähten.

ø bis 3mm Temperatur 20 — 22 °C

Schwermetalle

Bezeichnung Werkstoff	Fliegnorm bzw. DIN	Zustand	Elektr. Leitfähigkeit $K = 1/\varrho \frac{m/\Omega}{mm^2}$ angeliefert	geglüht
I. Eisen und Stahl				
Schweißdraht	1011 0 1011 0	ohne Nachbeh. geglüht 750°	8,45	8,45
Nietdraht	1030 2 1030 2	normal gez. geglüht 750°	7,52	7,55
Federdraht	1181.8 1181.2	gut gezogen geglüht 750°	4,81	4,82
Cr—Ne—Schweißdraht	1453 0 1453 2	ohne Nachbeh. geglüht 750°	5,4	5,2
Cr—Si—Schweißdraht	1510 0 1510 2	ohne Nachbeh. geglüht 750°	1,70	1,70
Austenitischer Schweißdraht nichtrostend	1430 3 —	sondergezogen —	1,43	—
II. Kupfer und -Legierungen				
Kupferdraht	2000 7 2000 1	halbhart gez. geglüht 600°	57,0	57,5
Messing Ms 63	2160 8 2160 1	hart gezogen geglüht 600°	13,4	14,4
Alum. Bronze 10% Al	2321.1 2321.1	geglüht geglüht 600°	8,0	8,1
Alum. Bronze 5% Al	2320 8 2320 1	federhart gez. geglüht 600°	9,15	10,1
Silberlot	DIN 1719 Ag L 25	gezogen geglüht 600°	13,2	14,4

Leichtmetalle

Bezeichnung Werkstoff	Fliegnorm bzw. DIN	Zustand	Elektr. Leitfähigkeit $K = 1/\varrho \frac{m/\Omega}{mm^2}$ angeliefert	geglüht
III. Aluminium und Legierungen				
Rein-Aluminium	3000 7 3000 1	gezl. halbh. gez. geglüht 350°	35,2	36,0
Al-Cu-Mg-Leg. Duralumin-Normal	3115. 7 3115. 1	gezl. halbh. gez. geglüht 350°	25,6	29,3
Al-Cu-Mg-Leg. hochfestes Dural	3125. 5 3125. 1	ausgeh. nachgez. geglüht 350°	18,3	27,0
Al—Mg—Leg. Hy 5	3305.2 3305.1	gezl. nachgez. geglüht 350°	16,9	16,8
Al—Mg—Leg. Hy 7	3310.2 3310.1	gezl. nachgez. geglüht 350°	14,3	14,2
Al-Mg-Si-Leg. Pantal	3355 5 3355 1	ausgeh. nachgez. geglüht 350°	24,0	29,2
Al-Schweißdr. mit 4-5% Si	— —	gezl. halbh. gez. geglüht 350°	31,6	32,4
IV. Magnesium-Legierungen				
Mg—Mn—Leg. Elektron AM503	3501.2 3501.1	gezl. nachgerich. geglüht 300°	19,7	20,8
Mg—Al—Leg. Elektron AZM	3518.2 3518.1	gezl. nachgerich. geglüht 300°	7,20	7,45

Werk 2376

9668

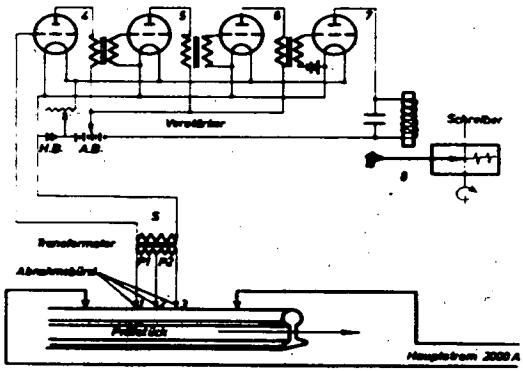


Abb. 14 Schaltbild Spannungsabfallgerät

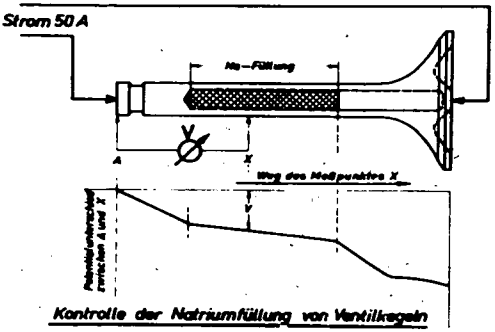


Abb. 15 Kontrolle der Natriumfüllung von Ventilkegeln durch Spannungsabfallmessung

Abb. 14 zeigt schematisch die Anordnung. Durch das Prüfstück wird Gleichstrom hoher Stromstärke geschickt. Über den Prüfling gleitet ein Abtastgerät mit drei Schleifkontakten 1, 2 und 3, die zu zwei Spulen $P1$ und $P2$ führen, die die Primärwindungen eines Transformators bilden. Diese Spulen sind gegeneinandergeschaltet, so daß in der Sekundärspule kein Strom induziert wird, wenn die Kontakte über ein gesundes Werkstück mit gleichmäßigem Spannungsabfall gleiten. Enthält das Stück jedoch eine Fehlstelle, z. B. einen Riß, so tritt in dem Augenblick, in dem diese zwischen Kontakt 1 und 2 kommt, ein Stromstoß auf, der sich in einen entgegensetzten umwandelt, wenn der Riß zwischen 2 und 3 tritt. Die Stromstöße werden über die Verstärker 4 bis 7 in einem Galvanometer angezeigt oder dem Schreiber 8 zugeführt, der sie in Kurvenform auf vorbeilaufendem Film oder Papier aufzeichnet.

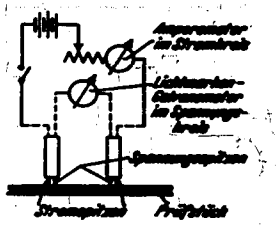
b) Ein zweites ähnliches, aber apparativ einfacheres Verfahren ist für die Kontrolle der hohlen Auspuffventile von Flugmotoren mit Natriumfüllung auf richtige Ausbohrung und Füllung ebenfalls in Amerika in Gebrauch [12].

Abb. 15 zeigt schematisch die Prüfanordnung mit eingezeichneter Spannungsabfallkurve. Da die verwendeten austenitischen Stähle gegenüber Natriummetall etwa den 10fachen Widerstand haben, tritt eine deutliche Leitfähigkeitsverbesserung an den Stellen ein, wo im hohlen Schaft die Natriumfüllung beginnt; am Ende der Füllung nimmt der Widerstand sprunghaft wieder zu, so daß sich ein zweiter Knick in der Potentialkurve ergibt.

c) Zum Messen von Wandstärken an Bauteilen, die einer direkten Messung nicht zugänglich sind, ist folgendes Verfahren vorgeschlagen worden [13].

An der zu messenden Stelle werden auf einer geraden Linie vier Körnerpunkte mit einer Lehre eingeschlagen; zwischen den äußeren Körnern wird ein Strom eingeleitet, dessen Spannungsabfall zwischen den beiden inneren Punkten gemessen wird. Die Schaltung ist aus Abb. 16 links zu ersehen; gemessen wird die Stromstärke, die zur Erzeugung eines bestimmten Spannungsabfalls zwischen den inneren Spitzen erforderlich ist. Das Bild zeigt rechts ein Eichschaubild für Flußstahl bei 184 mm Abstand zwischen den Strom- und 153 mm zwischen den Spannungsspitzen, das bei eigener Nachprüfung erhalten wurde. Das Gerät ermöglicht zuverlässige Dickenmessungen unter der Voraussetzung, daß nicht nur zwischen den Meßspitzen, sondern auch in einem gewissen Abstand ringsherum genügend Material gleicher Wandstärke vorhanden ist, da sonst Störungen in der Stromverteilung auftreten. Abb. 17 zeigt entsprechend die Spannungsausschläge in einem Stahlblech begrenzter Größe.

Ein ähnliches Verfahren, bei dem der Spannungsabfall neben der Strombahn gemessen wird [14], ergab dagegen keine einwandfreien Ergebnisse.



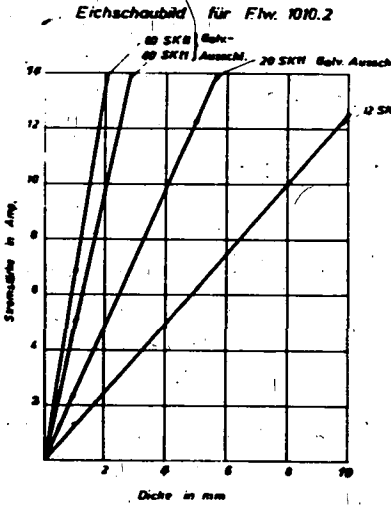


Abb. 16 Elektrische Wandstärkenmessung nach Thornton
Abstand der Stromspitzen: 184 mm
Abstand der Spannungsspitzen: 152 mm

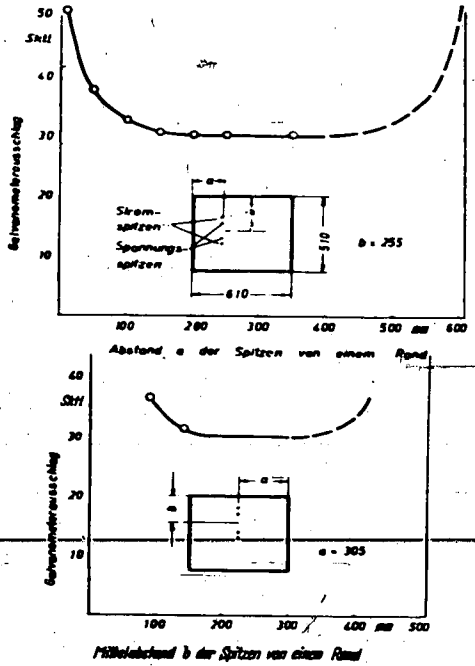


Abb. 17 Einfluß der Lage der Meßpunkte auf den gemessenen Spannungsausschlag
Abstand der Stromspitzen: 184 mm, Abstand der Spannungsspitzen: 152 mm, Stromstärke 3,3 A, Blechstärke 1,0 mm, Werkstoff Flw. 1010.2

2. Induktionsverfahren

Zur Erkennung von Fehlstellen, wie Rissen, Überwalzungen, Schlackenzeilen und dergleichen, hat die Reichs-Röntgenstelle Berlin-Dahlem auf Grund eines Vorschlages von Gerlach ein induktives Prüfungsgerät entwickelt (Hersteller: Dr. R. Claren, Düsseldorf), das für die Untersuchung von Stangen, Rohren und dergleichen, insbesondere aus Nichteisenmetallen, geeignet ist. Bei der Anwendung des Gerätes auf Stahl haben sich Störungen gezeigt, die zur Zeit eine einwandfreie Benutzung hierfür noch nicht ermöglichen. Da das Verfahren im Ringbuch II C 12 „Magnetische Werkstoffprüfung" von R. Berthold und W. Schirp bereits beschrieben wurde, seien hier nur eine Abbildung und einige Ergänzungen gebracht, die seine Anwendung näher erläutern.

Das Gerät, das 1938 zuerst gezeigt wurde, ist im letzten Jahr weiterentwickelt worden, so daß es jetzt Eingang in die Serienprüfung finden kann (Abb. 18).

Die Tiefenwirkung des Gerätes beträgt einige Millimeter; es können daher dünne Stangen über den ganzen Querschnitt, stärkere nur in der äußeren Zone sicher geprüft werden. Am besten eignet sich also die Anwendung für Rohre.

Angezeigt werden Fehler, die vorwiegend längs liegen, da die erzeugten Wirbelströme konzentrisch zur Achse der Spule verlaufen; reine Querrisse werden daher nicht angezeigt. Zur bequemen Auffindung der Lage der Fehlstellen ist neuerdings eine Glimmindikatorröhre im Anzeigegerät eingebaut, die durch ihre Glimmlänge die Größe des Fehlers erkennen läßt.

Zur Messung verschieden starker und geformter Profile sind auswechselbare Spulensysteme zu verwenden, da die Spulen sich den Profilen möglichst genau anpassen und nur einen geringen Luftspalt dazwischen lassen sollen.

Leistungsfähigkeit der elektrischen Prüfungen.

Die Prüfungsverfahren sind noch zu wenig eingeführt, um eine eingehende Beurteilung abgeben zu können. Es erscheint jedoch aussichtsreich, sie weiter zu entwickeln, zumal die moderne Elektrotechnik sehr vielseitige und genaue Meßmethoden an die Hand gibt[1a]).

D. Magnetische Prüfung.

Die magnetischen Fehlerprüfverfahren haben in der Luftfahrtindustrie, vor allem im Motorenbau, große Verbreitung gefunden, da mit diesen an den Bauteilen mit höchster Beanspruchung, die ja zum größten Teil aus magnetisierbarem Werkstoff bestehen, sehr bequem und mit hoher Sicherheit die feinsten Werkstoffunregelmäßigkeiten aufgefunden werden können.

Die rein magnetischen Eigenschaften der Werkstoffe an sich, wie Magnetisierbarkeit, Remanenz usw., erfordern seltener eine Nachprüfung. Sie sind von Bedeutung beim Einbau metallischer Teile in der Nähe des Kompasses im Flugzeug, im Motorenbau für die Unterscheidung hochlegierter Stähle und schließlich im Instrumentenbau, der hier aber nur indirekt interessiert.

Die magnetischen Prüfverfahren für den Luftfahrzeugbau lassen sich daher unterscheiden in

a) Prüfung der magnetischen Eigenschaften:
   1. Magnetische Anziehungskraft,
   2. Magnetisierbarkeit.
b) Fehler- bzw. Bauteilprüfungen:
   1. Magnetpulververfahren,
   2. Magnetinduktive Verfahren.

Zu a) Magnetische Eigenschaften

1. Magnetische Anziehung

Die meisten Stähle sind stark magnetisch und sind daher mit einfachen Mitteln nicht voneinander zu unterscheiden. Einige hochlegierte Sonderstähle werden jedoch vom Magneten gar nicht oder nur schwach angezogen. Es sind dies die rein austenitischen, ferner die halbaustenitischen Stähle, z. B. die mit austenitisch-martensitischem oder austenitisch-ferritischem Gefüge. Solche Sonderstähle werden verwendet als hochhitze- und zunderbeständige Werkstoffe für Ventilkegel, Abgasturbinen, Auspufftöpfe und dgl. sowie als nichtrostende Stähle.

Da deren magnetische Eigenschaften z. T. abhängig sind von ihrer Warmbehandlung oder Kaltverformung, kann auch aus diesen auf richtige oder falsche Verarbeitung der daraus hergestellten Teile geschlossen werden.

Auch andere Metallegierungen auf Nickel-, Chrom-, Wolfram- oder ähnlicher Grundlage sind mehr oder weniger magnetisch, ebenso verschiedene Bronzen mit Nickel-, Eisen- oder Mangansusätzen.

Zur Unterscheidung stark, schwach und unmagnetischer Werkstoffe genügen meist ein kräftiger Hufeisenmagnet, ein Stück modernen Magnetstahls oder ein einfacher Taschenkompaß. Für feinere Unterscheidungen kann man auch Induktionsspulen benutzen, die mit einem empfindlichen Galvanometer verbunden sind.

[1a]) Während der Drucklegung dieser Arbeit, die durch den Krieg verzögert wurde, sind noch weitere elektrische und elektromagnetische Geräte zur Werkstoffprüfung bekanntgeworden, insbesondere von Köster und Förster auf der Arbeitstagung des K. W. I.-Metallforschung, Stuttgart, am 25./26. 3. 1941, die schon recht vielseitige Anwendungsgebiete eröffnen. Da hier eine Einschaltung nicht mehr möglich ist, sollen die wichtigsten Angaben darüber noch in Kapitel D bei den dort zu beschreibenden Geräten des K. W. I. mit aufgenommen werden.

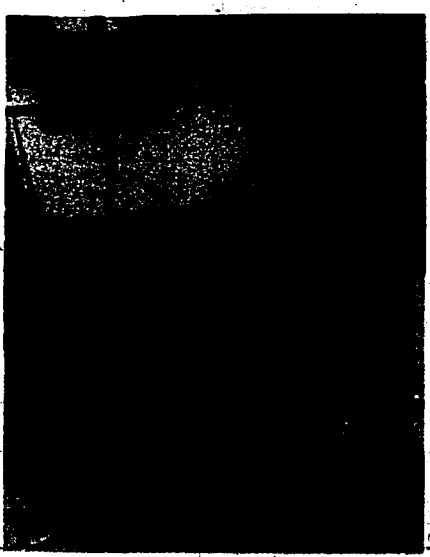


Abb. 18 Prüfgerät „Periflux" der Reichs-Röntgenstelle
a Prüfstange
b Anzeigegerät
c Induktionsspule
d weitere Induktionsspule

2. Magnetisierbarkeit

In neuester Zeit ist von H. Lange vorgeschlagen worden, die Änderungen der Magnetisierbarkeit von Stahl durch verschiedene Warmbehandlungen zur Nachprüfung der Vergütung einfacher gleichartiger Stahlteile zu verwenden [15]. Benutzt wurde für diese Versuche das „Ferrometer" von Siemens sowie ein abgewandeltes Gerät, das mit Gleichstrom statt Wechselstrom arbeitet. Die Zuverlässigkeit dieser Prüfmethode soll die der üblichen Härteprüfung mindestens erreichen.

Zu b) Fehler- bzw. Bauteilprüfung

Die Grundlagen der magnetischen Fehlerprüfung sind bereits im Ringbuch Heft II C 12 von R. Berthold und W. Schirp eingehend beschrieben worden, so daß hier nur einige Ergänzungen gebracht werden sollen, insbesondere Hinweise für ihre Anwendung in der Luftfahrt, einige praktische Erfahrungen und weitere Schrifttumsangaben [16 bis 25].

Leistungsfähigkeit der Magnetpulverprüfung

Dieses Prüfverfahren ist bisher das vollkommenste zur Aufdeckung der verschiedensten Oberflächenfehler bei magnetisierbaren Werkstoffen. Es leistet viel mehr als die Ölkochprobe, die daher vorwiegend bei Nichteisenmetallen verwendet wird. Auch die ermüdende optische Prüfung mit Auge und Lupe kann weitgehend eingeschränkt werden.

Am klarsten zeigen sich natürlich auftretende Fehler bei glatt bearbeiteten Stücken, jedoch können auch rohe Schmiede- oder Schweißstücke nachgeprüft werden, wenn man gefärbte Metallöle anwendet, die rote oder grüne Niederschläge ergeben. Auch durch vorheriges Überziehen der rohen Prüfteile mit einer weißen oder Aluminiumfarbe kann man die Sichtbarkeit der Magnetpulveranhäufungen verbessern. Häufig werden auch die rohen Teile gebeizt, um vorhandene Risse von Zunder zu befreien; sie zeichnen sich dann beim Magnetisieren besser ab. Auch ein schwaches Kadmieren trägt zur leichteren Erkennbarkeit bei, sowie auch ein leichtes Klopfen während des Magnetisierens.

Das Festhalten der Magnetbilder für die spätere Auswertung geschieht meist photographisch. Zweckmäßig ist es, dazu die Fehler vorher mit einem farblosen Lack zu fixieren. Man verdrängt zunächst unter Beibehaltung des magnetischen Feldes das Prüföl durch Benzin, läßt dieses verdunsten und übersprüht mit Fixativ. Oft genügt auch ein Tauchen der Teile nach dem Magnetisieren in Benzin und nach Abdunsten in Zaponlack. In vielen Fällen, besonders bei runden Gegenständen oder solchen mit einspringenden Flächen, bedient man sich vorteilhaft des Abzugverfahrens [22], indem man weißes, etwas saugfähiges Papier fest auf die vorher vom Öl möglichst gereinigten Flächen drückt. Das Metallpulver bleibt an dem Papier hängen und gibt so ein klares Spiegelbild des Magnetbildes (s. Abb. 28). Bei schwach unebenen Flächen kann man das Papier vor dem Andrücken etwas einweichen, jedoch lassen sich stark gekrümmte, nicht abwickelbare Flächen, wie z. B. Hohlkehlen an Kurbelwellen, nicht abziehen. Bei diesem Verfahren erübrigt sich auch ein heller Anstrich roher Prüfstücke oder die Verwendung gefärbter Metallöle.

Nicht ganz leicht ist die richtige Beurteilung der Magnetbilder, worüber bereits im Ringbuch Heft II C 12 das Grundlegende gesagt wurde. Ergänzend seien dazu noch einige Beispiele gebracht. Man darf dabei nicht vergessen, daß die Pulverniederschläge meist breiter sind als die Fehler, so daß diese vergrößert erscheinen, was andererseits die Erkennbarkeit erleichtert.

Abb. 19 zeigt einen Kolbenbolzen in Ansicht nach dem Magnetisieren und im angeätzten Querschnitt. Man sieht starke Pulveransammlungen an den Stellen, wo innen der Querschnitt dicker wird; außerdem zeigen sich im mittleren Teil leichte Anhäufungen dort, wo der Bolzen tiefere Einsatzhärtung hat. Man sieht also, daß plötzliche Änderungen des Querschnittes und solche der magnetischen Durchlässigkeit Störungen im Magnetfeld bewirken, die u. U. Fehler vortäuschen können. Ähnliche Pulveransammlungen erscheinen, wenn örtliche Kaltverformungen an den Stücken auftreten, z. B. bei der Bearbeitung mit stumpfen Werkzeugen oder beim Anreißen mit der Reißnadel, auch wenn die Bearbeitungsspuren durch Nachschleifen oder dergleichen wieder ent-

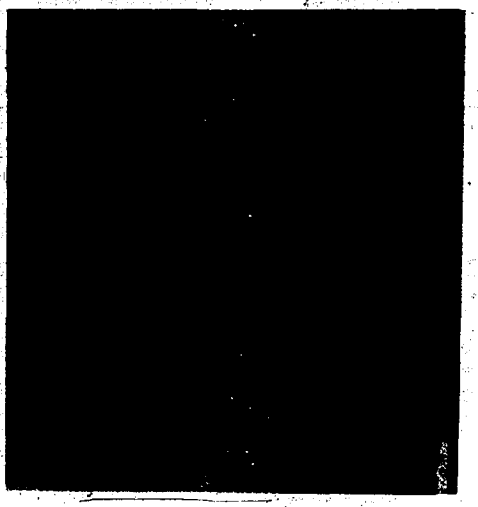


Abb 19 Magnetisierter Kolbenbolzen, rechts geätzter Längsschliff

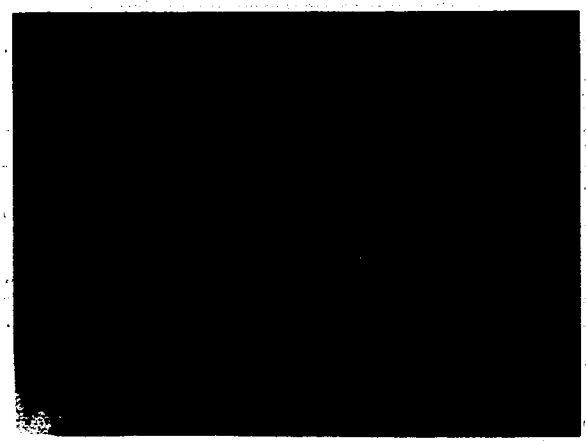


Abb. 20 Kurbelwellenzapfen mit Seigerungen

fernt worden sind [23]. Ebenfalls können gewisse Gefügeunterschiede Magnetanzeigen geben, die nicht leicht zu deuten sind. So zeigt sich bei zu hoher Aufkohlung von Einsatzstahl, besonders wenn die Einsatztemperatur etwas hoch war, ein feines Netzwerk, das durch zusammenhängende Karbide verursacht wird und leicht mit Schleifrissen verwechselt werden kann [24]. Auch ursprüngliche Ungleichmäßigkeiten im Werkstoff, z. B. Seigerungen und davon herrührende Faserstruktur, machen sich deutlich im Magnetbild kenntlich, so daß oft Zweifel an der Verwendbarkeit der Prüfstücke auftauchen. So zeigt Abb. 20 einen Kurbelwellenzapfen, der bei zu langer Magnetisierung nach Verfahren 1 b mit 90 s bei 600 Amp. starke Linien aufwies, während bei normaler Prüfdauer von 10 s nur eine schwache Andeutung zu sehen war. Solche Seigerungen, insbesondere wenn sie unter der Oberfläche liegen, können meist als harmlos gelten.

Je nach Verwendungszweck können auch mehr oder weniger feine Schlackenfäden, wie sie bei der Erschmelzung der Stähle nicht ganz zu vermeiden sind, zugelassen werden, vor allem solche, die nicht an die Oberfläche treten. Letztere sind daran zu erkennen, daß sie nach Wegwischen des Eisenpulvers mit der Lupe nicht mehr aufzufinden sind; tiefer liegende Fehler erscheinen auch verwaschener als ausstreichende. Als größte erkennbare Fehlertiefe kann man bei hohen Feldstärken etwa 2 bis 3 mm annehmen.

Es gehört also zur Beurteilung der Zulässigkeit der angezeigten Magnetbilder große Erfahrung, zumal noch auf die Höhe der Beanspruchung der Teile Rücksicht genommen werden muß sowie auf die Verteilung der Belastungen innerhalb des Stückes. Man kann u. U. recht grobe Fehler zulassen, wenn sie an Stellen sehr geringer Beanspruchung liegen, was natürlich vom wirtschaftlichen Standpunkt aus sehr zu beachten ist.

Als Beispiel sind zwei Aufnahmen einer Luftschraubennabe wiedergegeben, Abb. 21. Die rechte Nabe mit ihren starken und langen Schlackeneinschlüssen ist zweifellos Ausschuß, während die linke an der Grenze liegt. Solche Naben konnten noch verwendet werden, wenn die Schlackenfäden zum größten Teil unter der Oberfläche lagen, zumal an dieser Stelle keine sehr hohen Beanspruchungen vorhanden waren.

Das häufigere Vorkommen derartiger Schlackennester führte darauf, daß das Stahlwerk für die Schmiederohlinge zuviel von den Kopfenden der Ausgangsblöcke mitverarbeitet hatte, in denen sich die Verunreinigungen des Gusses anreichern. Durch stärkeres Abschopfen der Blöcke konnte dann der allgemeine Reinheitsgrad der Naben erheblich verbessert werden.

Bei der meist sehr geringen Stärke der Schlackenfäden in Schmiede- und Walzmaterial sind sehr oft durch leichtes Nacharbeiten außenliegender, an sich bedenklicher Einschlüsse die Fehler zum Verschwinden zu bringen, so daß hierdurch manches wertvolle Stück gerettet werden kann.

Mitunter treten jedoch auch gröbere Schlacken auf, die sich nicht so leicht wegarbeiten lassen. So zeigt Abb. 22 ein Getriebetellerrad, bei dem die z. T. verwaschene Magnetpulveranhäufung auf einen nach innen sich verzweigenden Einschluß schließen ließ; ein Querschliff durch das ausschußgemachte Stück bestätigte diese Annahme.

Es ist sehr schwierig, den zahlenmäßigen Einfluß solcher Schlackeneinschlüsse auf die Bauteilfestigkeit festzustellen. In einem Fall gelang dies an einer Flugmotorenkurbelwelle, die nach dem Vorlauf beim Magnetisieren in einer Hohlkehle zwischen Zapfen und Wange einen schwachen Anriß durch eine feine Schlacke zeigte, die zufällig an der im Betrieb höchst beanspruchten Stelle lag. Ein anschließender Dauerbiegeversuch mit der Welle erwies, daß diese nur eine Beanspruchung aushielt, die 11 vH unter der unteren Streugrenze der Dauerfestigkeit einwandfreier Wellen lag (Abb. 23).

Ein sehr gefährlicher Fehler tritt oft bei Gesenkschmiedestücken an deren Preßnaht auf. An dieser Stelle quillt beim Pressen das überschüssige Material als Grat nach außen, der nachher wieder beseitigt werden muß. Meist wird der Grat abgestanzt, seltener fortgeschliffen. Da die Werkstoffaser hier nach außen tritt (vgl. Skizze Abb. 24), treten beim Abgraten Spannungen quer zur Faser auf, die manchmal schon hierbei zum Aufreißen führen, oft auch erst bei der nachfolgenden Warmbehandlung. Nicht selten lösen sich die Spannungen aber erst nach Einbau der Teile im Betriebe aus. Derartig hoch beanspruchte Teile müssen daher bei der Ferti-

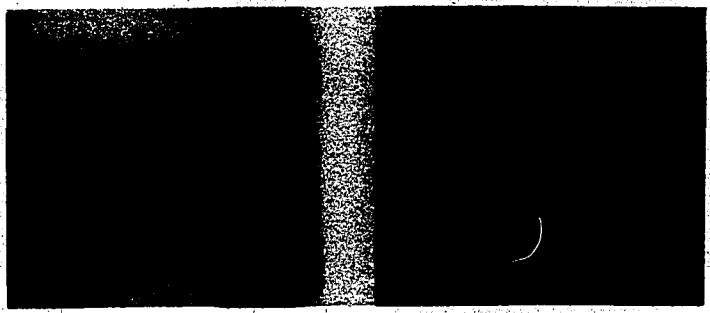


Abb. 21 Luftschraubennaben mit Schlackenfäden

9672

Abb. 22 Getriebetellerrad mit größeren Schlackeneinschlüssen. Unten: Mikrobild, Querschliff. V = 100

Abb. 23 Dauerbruchentleitung durch kleine Schlacke an Kurbelwelle
Links: Magnetbild nach Vorlauf
Rechts: Anbruch freigelegt nach Dauerversuch

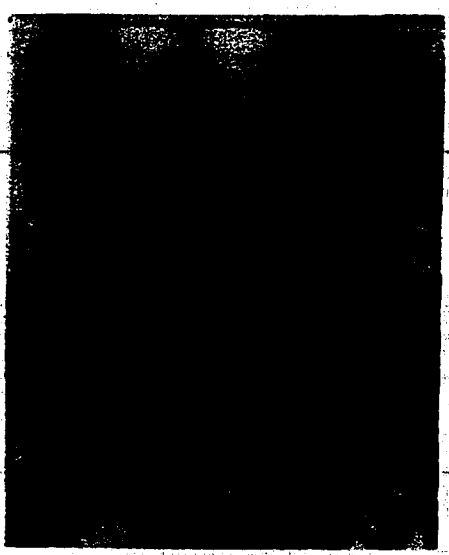


Abb. 25 Schubstange mit Preßgratfehlern; unten Mikrobild: austretende Faser. V = 60

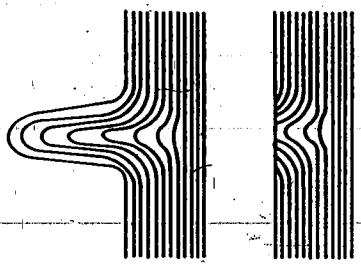


Abb. 24 Faserverlauf am Preßgrat eines Gesenkstückes vor und nach Entfernen des Grates

gung sowie auch bei Betriebsüberholung besonders sorgfältig an den früheren Preßgraten nachgeprüft werden. Als Beispiel gibt Abb. 25 das Auge einer Schubstange mit Magnetpulveranhäufungen wieder; an der Gratstelle zeigen sich im Querschliff die austretende Faser sowie Schlackeneinschlüsse und Seigerungen als Ursache des Magnetbildes.

Besonders scharf zu beurteilen sind wirkliche Werkstofftrennungen, wie Schmiederisse, Fadenlunker, Flocken, Härte-, Vergüte- und sonstige Spannungsrisse, die meist zur Ausschußerklärung führen. So zeigt Abb. 26 eine Kurbelwellenwange mit langer Fehlstelle, die nach Anpolieren unter dem Mikroskop mit Oxyden umgeben erschien und danach als Schmiederiß gedeutet werden konnte.

Spannungsrisse sind meist besonders scharf zu sehen, weil sie unter Zugspannungen entstehen und daher etwas klaffen; ihre Magnetspur erscheint bereits klar nach 5 s. Durchflutung bei 600 Amp. Abb. 27 zeigt als Beispiel eine eingesetzte Nockenwelle mit Härterissen, Abb. 28 ein gehärtetes Zahnrad mit Schleifrissen. Es kann aber auch vorkommen, daß feine Anrisse, z. B. Härterisse, beim Abkühlen wieder unter Druckspannungen kommen; in diesem Fall ergibt sich kein Magnetbild, da das Kraftfeld kaum gestört wird. Derartige Risse zeigen sich jedoch an polierten Flächen bei der optischen Prüfung durch veränderte Lichtreflexion.

Die Frage, ob die magnetisch angezeigten Fehlstellen Einschlüsse, Seigerungen oder Risse darstellen, ist mitunter nicht leicht zu beantworten; sie ist aber durch Anpolieren und mikroskopische Untersuchung zu klären (vgl. auch späteres Kapitel: Ätzprüfung), natürlich nur an feinstbearbeiteten oder polierten Flächen.

Bei den Einschlüssen in Stählen ist mitunter eine Unterscheidung zwischen oxydischen und sulfidischen möglich, weil letztere als unmagnetische Fäden die magnetischen Kraftlinien mehr stören und daher schärfer erscheinen. Umgekehrt kann man sogar in an sich unmagnetischen Stählen, wie austenitischen, oxydische Einschlüsse bei der Magnetprüfung auffinden, da sie magnetisierbar sind und das Metallpulver anziehen.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß u. U. durch die magnetische Prüfung Fehlstellen an gesunden Teilen erzeugt werden können, und zwar durch Verbren-

9673

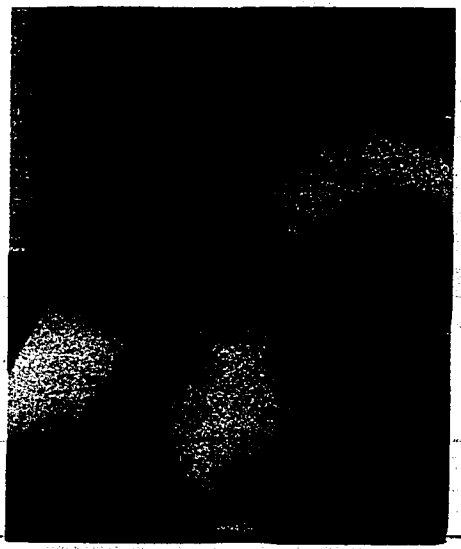


Abb. 26 Kurbelwange mit Schmiedefehler. Links oben Mikrobild: Riß mit Oxyden. V = 100

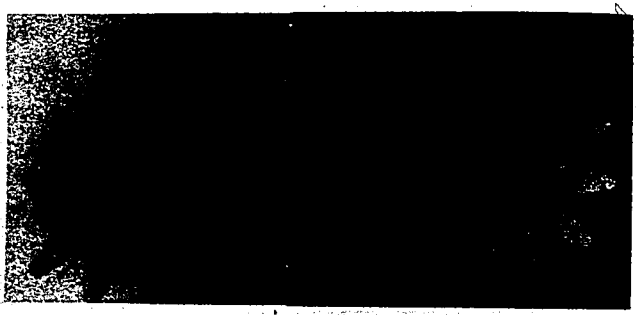


Abb. 28. Zahnrad mit Schleifrissen. Links: Papierabzug des Magnetpulverbildes, Spiegelbild. Rechts: Magnetpulverbild direkt photographiert

Abb. 27 Teil einer Nockenwelle mit Längshärterissen, verlaufend in Richtung der ehemaligen Gesenknaht

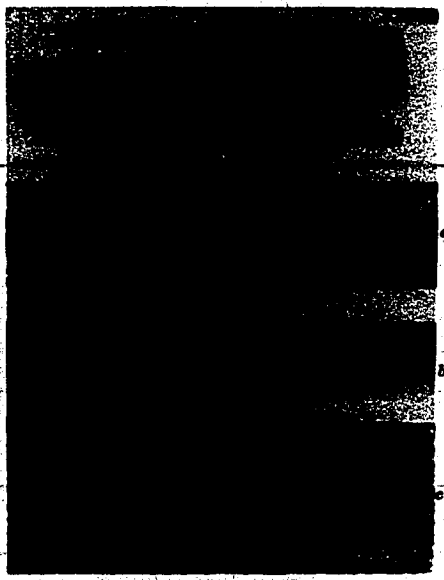


Abb. 29 Durch Anschmorung gerissener Kolbenbolzen
a Dauerbruch aufgeklappt. Beginn am Pfeil
b Anschmorungen in der Bohrung
c Anschmorstelle im Querschliff. V = 150

nungen bei nicht einwandfreiem Einspannen der Stücke. Diese Erscheinung tritt allerdings nur auf bei Wechselstromgeräten, da diese mit hoher Stromstärke arbeiten. Ist der Übergangskontakt zum Prüfstück nicht vollkommen, so können sich kleine Lichtbögen ausbilden und an den Stücken Anschmorungen erzeugen. Bei geglühten Werkstücken sind solche Stellen mehr als Schönheitsfehler zu werten, bei warmbehandelten, insbesondere gehärteten Teilen, können sie diese aber verderben, wie aus folgendem Beispiel hervorgeht.

Abb. 29 zeigt einen Kolbenbolzen, der im Betrieb durch Dauerbruch zerstört wurde. Bei der Untersuchung stellte sich heraus, daß sich beim Magnetisieren mit Wechselstromfremderregung innen eine kleine Brandstelle mit Haarrissen gebildet hatte, deren Kerbwirkung, unterstützt durch die Gefügeveränderung des Werkstoffs um die Brandstelle herum, den Dauerbruch eingeleitet hatte. Es ist daher auf einwandfreien Kontakt beim Einspannen zu achten, ferner dürfen die Prüfstücke nie unter Strom aus dem Gerät herausgenommen werden.

Gegenüber den vielseitigen, erfolgreichen Anwendungen der magnetischen Rißprüfung muß noch auf ein Gebiet hingewiesen werden, wo sich diese wider Erwarten nur ganz beschränkt einführen konnte, und zwar bei der Kontrolle von geschweißten Flugzeugknotenstücken, bei denen auch die Ölkochprobe meist versagt. Die Formen der Stücke sind so vielgestaltig, daß sie sich kaum richtig durchfluten lassen, auch das Abtasten mit beweglichen Magnetgeräten bringt nicht viel Erfolg, so daß darauf eine serienmäßige Massenuntersuchung nicht aufgebaut werden kann.

Als Richtzahlen für die günstigste Stärke der Stromdurchflutung seien noch genannt: Zeit 10 bis 15 s, Stromstärke für kleinere Teile 400 A, für mittlere Teile 600 A, für größere 800 bis 1000 A.

2. Magnetinduktive Verfahren

Das Grundlegende über diese Verfahren ist bereits im Ringbuchheft II C 12, S. 11, gesagt, so daß hier einige Ergänzungen genügen mögen.

a) Abtastverfahren mit Schwingspule

Von den dort beschriebenen Geräten hat sich nach bisherigen Feststellungen der Schweißnahtprüfer in der Praxis nicht bewährt, wohl aber der Seilprüfer der Reichs-Röntgenstelle, von dem Abb. 30 eine Ansicht zeigt. Dieser wurde gebaut zur laufenden Kontrolle im Betrieb befindlicher Seile von Drahtseilbahnen auf Drahtbrüche

9674

Abb. 30 Seilprüfer der Reichs-Röntgenstelle

und grobe Werkstoffehler, die zuverlässig angezeigt werden. In verkleinerter Ausführung könnte das Gerät im Flugzeugbau zur Nachprüfung von Steuer- und Verspannungsseilen gute Dienste leisten; die Entwicklung eines für dünne Seile geeigneten Gerätes ist von der Reichs-Röntgenstelle bereits beabsichtigt.

b) Kraftlinienspaltmessung

Zur Bestimmung der Schichtstärke von unmagnetischen Überzügen auf magnetischen Werkstoffen sind von verschiedenen Seiten magnetinduktive Geräte vorgeschlagen worden. Praktisch wird dieses Verfahren bereits angewendet zum Nachmessen des Ausgusses von Lagern mit Stahlstützschalen, wofür Ausführungen von AEG, Vickers und Junkers bekanntgeworden sind. Letzteres Gerät hat sich bei der laufenden Kontrolle von Bleibronzeschalen auf Ausgußstärke vor allem deshalb bewährt, weil es infolge einer Sonderschaltung gegen Netzschwankungen unempfindlich ist. Abb. 31 zeigt das Schaltschema, Abb. 32 das Äußere des Schichtstärkenmessers.

Das Gerät besteht aus zwei Transformatoren und zwei Induktionsspulen mit einem Miliampèremeter in Brückenschaltung. Von den Induktionsspulen dient die eine als Meßkopf, der auf das zu prüfende Lager aufgesetzt wird (s. Abb. 32 rechts), die andere als Abgleich. Die beiden Spulen sind zunächst so abgeglichen, daß im Meßgerät kein Strom fließt. Wird jedoch der Meßkopf an einen magnetisierbaren Körper herangebracht, so wird das Kraftlinienfeld der Spule geändert und es fließt ein Strom durch das Amperemeter, der abhängig ist von dem Abstand der Stahlschale und damit von der Dicke des Lagerausgusses. Zum Eichen und zur Nachkontrolle des Gerätes dienen plane Klötzchen mit bekannter Bleibronzeauflage (in der Abbildung vorn); die Meßgenauigkeit des Gerätes beträgt etwa 0,05 mm.

Es wurde auch versucht, mit dem Instrument die Tiefe der aufgekohlten Schichten von einsatzgehärtetem Stahl festzustellen, doch ergaben sich keine klaren Ergebnisse. Auch ein anderes käufliches Gerät, das für diesen Zweck empfohlen wird und auf ähnlicher Grundlage beruht, lieferte bei eigenen Versuchen stark widersprechende Anzeigen an verschieden behandelten Einsatzproben; bei ausgeglühten trat überhaupt kein Meßausschlag auf. Derartige Instrumente zeigen nur Unterschiede im Mengenverhältnis des gebildeten Martensits zum Ferrit an, das je nach dem Werkstoff und der Warmbehandlung verschieden ist. Zahlenmäßige Rückschlüsse auf die Einsatztiefe sind daher nur möglich, wenn bei gleichen Teilen aus gleichem Stahl die Härtungsbedingungen ganz genau gleich gehalten werden; in der Praxis ist dies jedoch selten der Fall, die Anwendbarkeit des Geräts also sehr gering.

E. Röntgenprüfung.

Die Röntgenstrahlen und die in ihren Wirkungen ähnlichen Radiumstrahlen (Gamma-Strahlen) gehören zu den kurzwelligen elektromagnetischen Schwingungen. Sie haben Wellenlängen von etwa 10 Å bis herab zu etwa 0,005 Å (1 Å = Angströmeinheit = $^1/_{10}$ $\mu\mu$ = 1 mal 10^{-7} mm). In der Werkstoffprüfung verwendet werden davon Röntgenstrahlen mit etwa 3 Å bis 0,03 Å sowie die durchdringendsten Gammastrahlen von etwa 0,005 Å [26].

Ihre Anwendung verdanken sie folgenden Eigenschaften:

1. Ihrem großen Durchdringungsvermögen fester Stoffe (Grobstrukturuntersuchung);
2. ihrer Beugungsfähigkeit an Kristallgittern (Feinstrukturuntersuchung);
3. ihrer Fähigkeit, in festen Körpern Eigenstrahlungen zu erregen (Röntgenspektralanalyse).

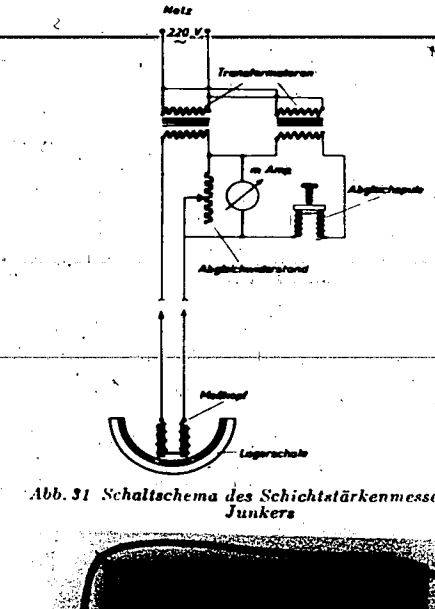


Abb. 31 Schaltschema des Schichtstärkenmessers von Junkers

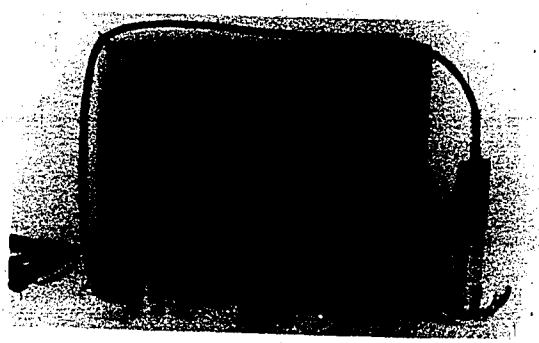


Abb. 32 Schichtstärkenmesser, rechts Meßkopf, darvor zwei Eichklötzchen

9675

Von diesen Anwendungen hat sich die Grobstrukturuntersuchung bereits in großem Umfang in der Luftfahrttechnik eingeführt zur Auffindung von Fehlern in Gußstücken, Schweißungen und Nietungen sowie anderen Bauteilen, insbesondere aus Leichtmetallen, die entsprechend ihrem geringeren Atomgewicht durchlässiger sind als Schwermetalle.

Feinstrukturuntersuchungen werden noch wenig bei der praktischen Prüfung angewendet, wohl aber in den wissenschaftlichen Laboratorien, wo sie außerordentlich tiefe Einblicke in den inneren Aufbau der Werkstoffe geben. Neuerdings werden in steigendem Maße mittels Interferenzaufnahmen auch Spannungsmessungen durchgeführt, die auf der elastischen Verformbarkeit der Atomgitter beruhen. Am wenigsten benutzt wird noch die Röntgenspektralanalyse, da sie trotz mancher Vorteile vor der optischen Spektralanalyse weniger empfindlich und bequem ist als diese.

Die Werkstoffprüfungen mit durchdringenden Strahlen lassen sich hiernach einteilen in:

a) Grobstrukturuntersuchungen.
   1. Fehlerprüfung mit Röntgenstrahlen,
   2. Fehlerprüfung mit Gammastrahlen.

b) Feinstrukturuntersuchungen mit Röntgenstrahlen.
   1. Unterscheidung verschiedener sowie Klärung der Vorbehandlung gleicher Werkstoffe,
   2. Spannungsmessungen,
   3. Spektralanalyse.

In diesem Kapitel sollen zunächst nur Grob- und Feinstrukturuntersuchungen behandelt werden, soweit sie sich auf die Erkennung von Werkstoff- und -verarbeitungsfehlern anwenden lassen, während die Röntgenspektralanalyse in Kapitel E bei den chemischen Prüfungen zu besprechen ist. Die Spannungsmessungen sind im Ringbuchbeitrag II C 16 von R. Glocker für sich eingehend behandelt.

Entstehung der Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen bilden sich beim Aufprall von Kathodenstrahlen (Elektronen) auf feste Körper. Ihre Erzeugung geschieht in fast bzw. vollkommen luftleeren Röhren, meist aus Glas, in die hochgespannte Ströme durch zwei Elektroden eingeführt werden. An der Kathode entstehen entweder durch Ionisierung der vorhandenen Luftreste (Ionenröhre) oder durch besondere Aufheizung (Elektronenröhre) Elektronenschwärme, die durch die angelegte Hochspannung beschleunigt und auf die Anode geschleudert werden. Beim Abbremsen auf dieser wird ihre Energie zum größten Teil in Wärme und zu einem kleineren Teil (unter 1 vH) in Röntgenstrahlen umgewandelt.

Für die Werkstoffprüfung verwendet man z. Z. Spannungen von etwa 20 000 bis zu mehreren 100 000 Volt bei Stromstärken von etwa 30 bis 4 Milliampère. Der Strom wird in Transformatoren erzeugt und muß im allgemeinen erst in Gleichstrom umgewandelt werden, da er nur in einer Richtung durch die Röhre fließen darf. Da aber die Röntgenröhre bis zu einem gewissen Grad selbst als Gleichrichter wirkt, kann man Elektronenröhren bei sehr guter Anodenkühlung unter geringen Spannungen auch direkt mit Wechselstrom betreiben (Feinstrukturröhren). Für stärkere Röhrenbeanspruchungen wird der Wechselstrom durch Glühventilröhren, die ähnlich wie die Röntgenröhren selbst gebaut sind, gleichgerichtet. Unter Zuhilfenahme von Kondensatoren und verschiedenartigen Schaltungen (z. B. Villard- oder Greinacherschaltung) wird eine pulsierende bzw. konstante Gleichspannung erhalten, mit der die Röntgenröhre gespeist wird.

Die modernen Geräte besitzen vollkommenen Hochspannungs- und Strahlenschutz, so daß ein gefahrloses Arbeiten damit ermöglicht ist.

Besonders hingewiesen sei hier noch auf die Beachtung der Vorschriften für den Strahlenschutz, die bei den Durchleuchtungs- oder Aufnahmearbeiten zu befolgen sind, da das unvorsichtige Umgehen mit Röntgen- und Radiumstrahlen die schwersten Gesundheitsschädigungen zur Folge haben kann [27].

Zu a) Grobstrukturuntersuchungen

1. Fehlerprüfung mit Röntgenstrahlen

Die Aufdeckung von inneren Fehlern in Bauteilen bei der Röntgendurchstrahlung beruht auf deren verschiedener Absorption durch Stellen unterschiedlicher Stärke und Dichte. Dadurch können Unterschiede in der Wanddicke, Hohlräume, Risse, Einschlüsse und Seigerungen als Schattenbilder auf einem Röntgenschirm direkt beobachtet oder mit einer photographischen Platte aufgenommen werden. In neuester Zeit geht man auch dazu über, die Intensität der durch das Prüfstück gegangenen Strahlen quantitativ zu messen (Zählrohrverfahren) und so Ungleichmäßigkeiten aufzudecken.

Die Fehlererkennbarkeit hängt neben der Größe und Lage der Fehlstellen sowie ihrer Dichte gegenüber dem Grundmaterial von verschiedenen Faktoren ab. Sie ist höher bei Werkstoffen geringerer Dichte, schwächeren Wandstärken, kleinerem Brennfleck und größerem Abstand der Röntgenröhre, geringerer Entfernung von der Bildschicht sowie kleineren Betriebsspannungen, da diese kontrastreicher arbeiten und weniger Streustrahlen hervorrufen, die das Bild verschleiern.

Von den drei Verfahren zur Sichtbarmachung der Strahlen ergibt der Leuchtschirm eine geringere Zeichenschärfe als die photographische Platte, während das Zählrohr zwar empfindlicher anspricht, aber nur Dichteunterschiede größerer Flächen aufdeckt.

Die Röntgengeräte

Das Äußere einer neuzeitlichen Röntgenapparatur für Grobstrukturuntersuchungen bei 250 kV Scheitelspannung maximal zeigt Abb. 33[2]). Das Gerät ist zwecks leichterer Beweglichkeit in mehrere Teile aufgelöst, die für sich ohne Schwierigkeiten auch an schwere Prüfstücke in der Werkstatt herangebracht werden können. Links steht der Schalttisch mit den Überwachungsinstrumenten, daneben der zweiteilige Hochspannungstransformator mit den eingebauten Glühventilröhren. Die Transformatorhälften können zwecks Erreichung höherer Spannung hintereinander oder für höhere Stromstärke nebeneinander geschaltet werden. Weiter rechts ist eine kleine Ölkühlpumpe zu sehen, die mittels Schlauchleitungen mit der Röntgenröhre verbunden ist und die Anode mit Öl bespritzt, um deren zu starke Erhitzung zu vermindern. Auf dem Stativ ganz rechts ist

Abb. 33 Bewegliches Röntgengerät für Grobstrukturprüfung

[2]) Ausführung: Siemens & Halske, Berlin.

9676

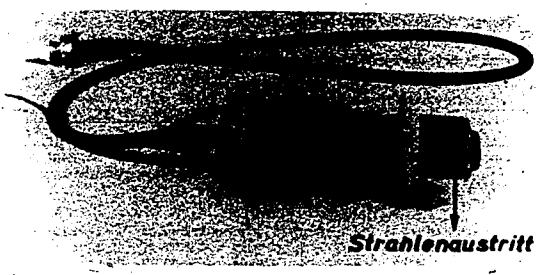


Abb. 34 Einpolröhre

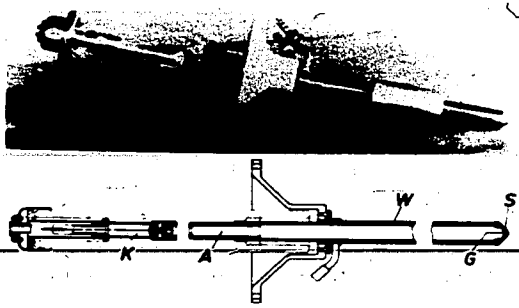


Abb. 35 Hohlanodenröhre

die Röntgenröhre einstellbar gehaltert; durch lange bewegliche, hochspannungsgesicherte Kabel ist sie an die beiden Transformatoren angeschlossen.

Die zweipoligen Röhren haben den Nachteil, daß sie wegen ihrer Länge und des in der Mitte angeordneten Fensters oft das Herankommen an begrenzte Stellen größerer Bauteile behindern. Auch kann man mit ihnen kleinere Hohlkörper, Bohrungen und dergleichen nicht von innen durchstrahlen.

Hierfür leisten die in den letzten Jahren entwickelten Einpolröhren gute Dienste, die kürzer sind und den Strahlenaustritt an ihrem Ende tragen (Abb. 34)[2a]). Da sie an die Hochspannung nur mit der Kathode angeschlossen sind, brauchen sie nur ein Hochspannungskabel und sind somit beweglicher. Die Anode wird geerdet und gestattet daher direkten Anschluß an die Wasserleitung, wodurch eine intensivere Kühlung und damit höhere Belastbarkeit des Brennflecks ermöglicht wird.

Der Strahlenaustritt war bei den ersten Einpolröhren, wie üblich, seitlich. Für die Innendurchstrahlung von Hohlräumen wurde dann die Anode als dünnes, axiales Rohr ausgebildet, in dessen konischer Spitze das Elektronenbündel zum Brennfleck vereinigt wird. Dies geschieht durch eine übergeschobene Magnetspule, die die Eigenschaft hat, die Elektronenstrahlen ähnlich zu sammeln, wie eine optische Linse das Licht (s. Elektronenmikroskop). Durch Verschieben der Spule und Regeln des durchfließenden Stroms kann der Brennfleck ausgerichtet und in der erforderlichen Größe eingestellt werden [28].

Abb. 35[3]) zeigt eine solche Hohlanoden- oder Fingerröhre im Schnitt und in Ansicht. *K* ist die Glühkathode mit dem einpoligen Hochspannungsanschluß links, *A* die Hohlanode, die nach außen rohrförmig verlängert und mit dem Kühlmantel *W* umgeben ist. Die Spitze *S* trägt innen einen Goldbelag *G*, auf den die Elektronen prallen und wegen dessen hoher Ordnungszahl eine intensive Röntgenstrahlung erzeugen. In der Ansicht sieht man die verstellbare Magnetspule über dem Rohr und die Kühlwasserschlüsse.

Wegen der Kegelform der Anodenspitze treten die Röntgenstrahlen pilzhutförmig über den ganzen Umfang nach außen, so daß man damit gleichzeitig einen großen Raum bestrahlen und in einer Aufnahme eine ganze Reihe von Prüfstücken untersuchen kann (Abb. 36).

Will man nur einen Teil des Strahlenkegels ausnutzen, so ist es aus Strahlenschutzgründen zweckmäßig, auf das Rohrende eine Kappe aus Schwermetall zu setzen, in die nur nach den gewünschten Richtungen, entweder nach vorn oder seitlich, ein oder mehrere Fenster eingearbeitet sind.

Durch die Einführung der magnetischen Linse und die direkte Wasserkühlung wurde es auch bei der ursprünglichen Einpolröhre möglich, Feinfokusröhren zu bauen mit fast punktförmigem Brennfleck von nur 0,2 mm Durchmesser bei hoher Strahlungsintensität. Hierdurch steigt die Fehlererkennbarkeit außerordentlich. Die Zeichenschärfe dieser neuen Röhren ist so groß, daß man sogar mit erheblicher Vergrößerung des Schattenbildes arbeiten kann, die durch starke Annäherung der Röhre an das Prüfstück bzw. Vergrößerung des Abstandes des Schirms oder Films erreicht wird.

Abb. 37 zeigt eine solche Feinfokusröhre[4]) ohne Haube. Die Belastbarkeit des Brennflecks, die bei den üblichen Röhren nur etwa 200 W/mm²/1 s beträgt, ist bei der Feinfokusröhre durch intensive Wasserkühlung erheblich höher gebracht, so daß trotz des winzigen Brennflecks und starker Vergrößerung (bis über 5 linear) noch ein helles Bild auf dem Schirm erhalten wird.

Durchführung und Leistungsfähigkeit der Röntgenprüfung

1. a) Durchleuchtung mit dem Röntgenschirm

Die Durchleuchtung ist die einfachste und rascheste Art der Röntgenprüfung, ergibt jedoch geringere Durchdringung und Fehlererkennbarkeit als die Röntgenaufnahme. Sie kommt daher in Frage für Massenprüfungen bei nicht zu hohen Anforderungen an kleinen oder mittleren Werkstücken geringerer Dichte (Leichtmetalle,

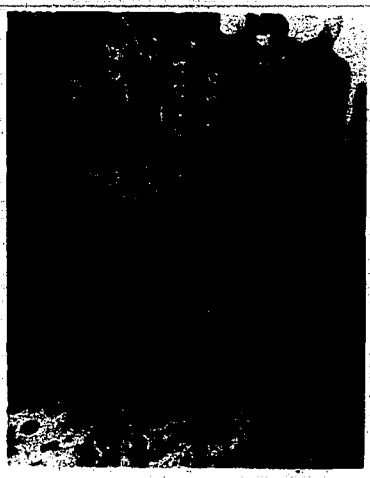


Abb. 36 Röntgenprüfung mehrerer Zylinderköpfe mit Hohlanodenröhre in einer Aufnahme (Karussel)

[2a]) C. H. F. Müller A.-G., Hamburg.

[3]) Hersteller: Siemens & Halske, Berlin.

[4]) Hersteller: Rich. Seifert & Co., Hamburg.

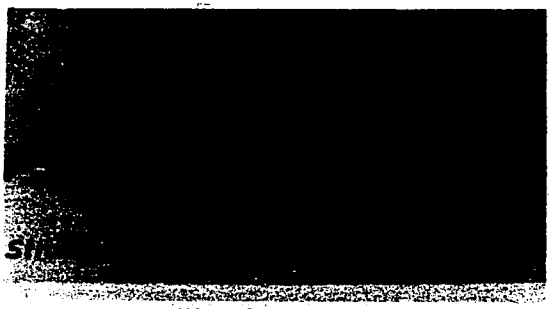


Abb. 37 Feinfokusröhre

Abb. 38 Durchleuchtungspult mit Hallestativ und Motorenantrieb für die Bewegungen des Prüfstückes

Holz, Kunststoffe und dergleichen) sowie für dünnwandige Teile aus Schwermetallen. Beim Absuchen auf Fehler sind die Prüfteile hinter dem Schirm nach allen Richtungen zu bewegen und zu drehen, damit man auch flächenhafte Fehler, wie größere Risse, Oxydhäute und dergleichen auffinden kann, die nur über die hohe Kante sichtbar werden. Bei großen Prüfstücken läßt sich eine derartige Gesamtdurchleuchtung kaum noch durchführen, zumal wegen des notwendigen Strahlenschutzes diese in geschlossenen, strahlengeschützten Schaupulten oder -schränken oder hinter durchgezogenen Wänden vorgenommen werden soll (Abb. 38)[8]. Auch eine Teildurchleuchtung im offenen Raum würde bei den entsprechend dickeren Wandstärken keine ausreichende Fehlererkennbarkeit mehr ergeben; es kommen also hier nur Aufnahmen in Frage.

Der Röntgenschirm besteht aus einer Papptafel mit einer sehr dünnen Schicht von bestimmten Salzen, die von den Röntgenstrahlen zum Aussenden sichtbaren Lichts angeregt werden (Fluoreszenz). Zum Schutze gegen die hindurchgehenden Röntgenstrahlen liegt der Schirm unter einer Bleiglasscheibe, deren Stärke der höchsten verwendeten Spannung angepaßt sein muß. Die bisher meist gebräuchlichen Leuchtmassen aus Zinksilikat und Kalzium- bzw. Kadmiumwolframat konnten in den letzten Jahren durch Verwendung von Zink- und Kadmiumsulfid sowie durch weitgehende Verfeinerung der Körnung in ihrer Leuchtstärke und damit in ihrer Fehlerwiedergabe bedeutend verbessert werden.

Die theoretische Güte der Schattenbilder wird bestimmt durch die Randschärfe, die geometrisch festgelegt ist durch Größe des Brennflecks und Abstand des Prüfstückes von Röhre und Schirm sowie durch die innere Unschärfe [29], die abhängt von der Größe des Korns und der Streuung der Fluoreszenzstrahlung in der Leuchtmasse. Berthold kommt zu der Feststellung, daß die beste Bildgüte erhalten wird, wenn durch entsprechende Wahl obiger geometrischer Bedingungen Randschärfe, innere Unschärfe und Fehlerbreite gleich werden. Er kommt so zu der Forderung von Röhren mit veränderlichem Brennfleck, die durch die heutige Entwicklung der Feinfokusröhre bereits erfüllt werden kann (vgl. auch später unter 1 b).

Die wirkliche Fehlererkennbarkeit bleibt hinter der theoretischen etwas zurück, da das menschliche Auge nicht alle Helligkeitsunterschiede gleich wahrnimmt, sondern von deren absoluter Größe, Störungen durch Blendung usw. abhängig ist; daher kann man durch Abdeckung der Umgebung verdächtiger Stellen auf dem Schirm eine erhebliche Schärfezunahme beobachten.

Allgemeingültige Angaben über die Fehlererkennbarkeit zu machen, ist kaum möglich, da diese zu sehr von den oben besprochenen Einflüssen abhängig ist. Um einen Anhalt zu geben, seien Angaben von Berthold in Abb. 39 wiedergegeben, die sich auf die Erkennbarkeit von dünnen Drähten aus Aluminium bzw. Stahl unter Aluminium- bzw. Stahlplatten verschiedener Stärke beziehen unter Verwendung von älteren (*A*) und neueren (*G*) Leuchtschirmen [30]. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt v. Eckartsberg [31], nach dem bei über 15 mm Stahlguß die Fehlererkennbarkeit wieder stark nachläßt. Feine Risse sind auf dem Leuchtschirm überhaupt nicht zu sehen.

Mit den neuen Feinfokusröhren läßt sich die Fehlererkennbarkeit noch weiter steigern, da die Randunschärfe verringert wird und Fehler, die unter der inneren Unschärfe des Schirmes liegen und somit nicht feststellbar sind, durch die mit dieser Röhre ermöglichte Vergrößerung über die Sichtbarkeitsgrenze gebracht werden können (vgl. die spätere Abb. 51).

Die von Berthold untersuchten oberen Plattenstärken entsprechen gleichzeitig ungefähr den mit noch ausreichender Zuverlässigkeit durchleuchtbaren Grenzdicken der beiden Metalle, die nicht mehr wesentlich erhöht

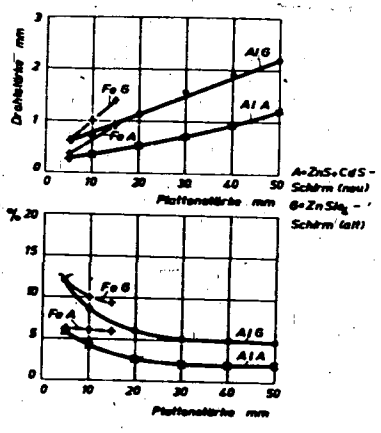


Abb. 39. Erkennbarkeit von Dickenunterschieden unter dem Leuchtschirm (Drähte) bei Aluminium und Stahl (nach Berthold)

[8]) Hersteller: Rich. Seifert & Co., Hamburg.

9678

werden können. Natürlich kann man noch durch größere Wandstärken den Schirm zum Aufleuchten bringen (bei Stahl bis etwa 40, bei Aluminium bis etwa 150 mm), es sind aber dann nur ganz grobe Lunker und dergleichen zu sehen; bei der in der Luftfahrt erforderlichen Sicherheit kommt die Durchleuchtung so starker Teile nicht mehr in Frage.

b) Röntgenphotographie

Ähnlich wie das Licht wirken auch die Röntgenstrahlen schwärzend auf die photographische Schicht. Da jedoch nur ein kleiner Teil der Strahlen für die Schwärzung ausgenutzt wird, hat man bald gesucht, diese zu erhöhen, indem man die Bromsilberschicht beiderseitig auftrug, und zwar auf einen dünnen Film. Glasplatten scheiden wegen ihrer Dicke aus, da beide Schichten dicht zusammenliegen müssen, um Unschärfen zu vermeiden. Der Film hat ferner den Vorteil, daß man ihn bei der Aufnahme einfach gekrümmter Flächen dicht an die Rundung anlegen und so einen größeren Bereich scharf abbilden kann.

Eine weitere Möglichkeit, die Röntgenstrahlung noch mehr zur Schichtschwärzung auszunutzen und so die Belichtungszeit abzukürzen, besteht in dem Anlegen von Fluoreszenzschirmen an die photographische Schicht. Diese wandeln einen größeren Teil der Röntgenstrahlen in chemisch wirksames Licht um, das auf die Bromsilberkörner zurückstrahlt und diese zusätzlich schwärzt.

Diese „Verstärkerfolien" sind den Leuchtschirmen ganz ähnlich; sie sind meist mit Kalziumwolframat belegt, dessen Sekundärstrahlen annähernd in das photographisch wirksamste Spektralgebiet fallen. Die Verstärkungswirkung solcher Folien, besonders wenn sie an beide Schichtseiten angelegt werden, ist außerordentlich hoch. Bei gleicher Schichtschwärzung kann die Belichtungszeit bis zu etwa ein Fünfzigstel der üblichen herabgesetzt werden, was die Wirtschaftlichkeit der Röntgenprüfung erheblich steigert, zumal auch die Lebensdauer der teuren Röntgenröhren durch die geringere Betriebszeit bedeutend erhöht wird.

Leider haben die Verstärkerfolien den Nachteil, daß die Sekundärstrahlen durch ihre Streuung eine Unschärfe des Films bewirken, die die Fehlererkennbarkeit stark verschlechtern kann. Man hat daher unter Verzicht auf einen Teil der Verstärkungswirkung schärfer zeichnende Folien entwickelt, deren innere Unschärfe erheblich heruntergesetzt ist durch feinste Körnung der Fluoreszenzträger, Einlagerung von lichtschluckenden Farbkörpern in die Lackgrundlage sowie durch dünnsten Aufstrich der Schicht. Solche „Präzisionsfolien" geben aber immer noch eine gewisse Verschlechterung des Fehlernachweises, so daß man Folien nur verwendet, wenn z. B. bei größeren Wandstärken die Belichtungszeit abgekürzt werden muß. Berthold [32] gibt an, daß man bei Stahl bis 12 mm am besten ohne Folie arbeitet, bis etwa 36 mm mit „scharfzeichnenden" und darüber mit hochverstärkenden Folien (vgl. Abb. 40).

Die Verstärkerfolien müssen bei der Aufnahme dicht an den Film angelegt werden, damit nicht weitere Unschärfen entstehen. Sehr zweckmäßig hierfür sind Gummikassetten, in die der Film mit der bzw. den Folien eingeführt wird. Dann wird die Luft aus der Kassette ausgepumpt, wodurch Film und Folien sich fest aufeinanderpressen. Die Gummikassetten haben noch den Vorteil, daß sie sich, ebenso wie die Papierkassetten, an gebogene Flächen gut anlegen lassen, wodurch ebenfalls die Schärfe der Aufnahme gegenüber Metallkassetten erhöht wird.

Für die Bildgüte der Aufnahme gelten die gleichen Vorbedingungen wie bei der Schirmdurchleuchtung; sie ist abhängig von der Randschärfe, der inneren Unschärfe von Film und Verstärkerfolien sowie der Streustrahlung des aufzunehmenden Gegenstandes.

Während erstere sich wesentlich auf die Zeichenschärfe auswirken, beeinträchtigen die Streustrahlen die Kontrastwirkung des Bildes. Sie entstehen innerhalb des Prüfstückes durch teilweise Umsetzung der Röntgenstrahlen in weichere Sekundärstrahlen (Comptoneffekt), die sich allseitig ausbreiten und eine allgemeine Verschleierung des Films bewirken. Die Streuung ist um so größer, je geringer die Dichte des durchstrahlten Werkstoffs und je härter die Strahlung, je höher also die angelegte Spannung ist.

Zur Verringerung der Streustrahlenwirkung auf dem Film hat man neben dem Abblenden des Primärstrahls auf eine möglichst kleine Fläche noch zwei weitere Hilfsmittel gefunden, nämlich Streustrahlenblenden und -filter.

Die Streustrahlenblenden, bekannt als Bucky- und Lysholmblenden, haben die größere Wirksamkeit; ihren Grundgedanken zeigt Abb. 41. Die Blenden bestehen aus sehr dicht nebeneinander liegenden, feinen Lamellen, abwechselnd aus Blei und leicht durchlässigem Füllstoff. Die parallel eintretenden Nutzstrahlen gehen fast ungehindert durch, während die schräg laufenden Streustrahlen an den Flanken der Lamellen absorbiert werden.

Wie weit die Feststellbarkeit von kleinen Fehlern durch Blenden verbessert werden kann, zeigen Zahlenangaben von Glocker [26] in Abb. 42.

Trotz sehr guter Wirkung, besonders bei dicken Stücken, haben sich die Lamellenblenden in der Röntgen-

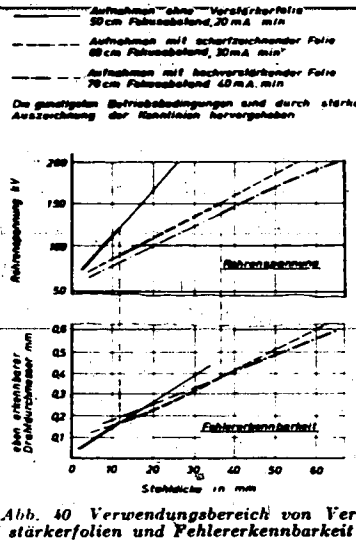


Abb. 40 Verwendungsbereich von Verstärkerfolien und Fehlererkennbarkeit

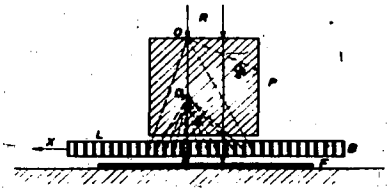


Abb. 41 Wirkung der Lamellenblenden

Werkstoff	Dicke bzw. Spannung	Fehlererkennbarkeit mit Blende	ohne Blende
Aluminium-Guß	100 mm 125 KV	0,3 mm • 0,3 %	1,2 mm • 1,2 %
Aluminium-Guß	200 mm 200 KV	0,6 mm • 0,3 %	2,0 mm • 1,0 %
Stahlguß	60 mm 230 KV	0,15 mm • 0,25 %	0,6 mm • 1,0 %

Abb. 42 Erkennbarkeit von Gußblasen bei Aufnahmen mit und ohne Streustrahlenblende

prüfung für die Luftfahrt kaum eingeführt. Die Gußquerschnitte sind hier meist so gering, daß die Fehlererkennbarkeit auch ohne Blende ausreichend ist; dickere Teile werden meist aus Schmiedestücken hergestellt, bei denen an sich nur geringere Fehler auftreten. Weiterhin lassen sich fast ebenso gute Wirkungen mit Streustrahlenfiltern erzielen, die viel einfacher und allgemeiner anwendbar sind.

Die Streustrahlenfilter bestehen aus dünnen Schwermetallblechen, die zwischen Prüfkörper und Film gelegt werden. Da die Streustrahlen weicher sind als die Primärstrahlen und auch infolge ihres schrägen Verlaufes größere Wege durch das Blech zurückzulegen haben, werden sie zum größten Teil von den Filtern verschluckt, während die Nutzstrahlen nur wenig geschwächt werden. Die Wirkung der Filter ist um so besser, je höher die Atomnummer des Metalles ist; empfohlen werden meist Bleche von 0,5 bis 2 mm starkem Zinn oder 0,3 bis 1 mm Blei. Bei Verwendung von letzterem muß noch ein dünnes Zinnfilter dahintergeschaltet werden, damit die im Blei sich bildende Eigenstrahlung von dem Film ferngehalten wird. Die Eigenstrahlung des Zinns braucht nicht abgefangen zu werden, da sie noch unter der Anregungsgrenze des Bromsilbers liegt.

Über die Verbesserung der Fehlererkennbarkeit durch Filter- und Blende hat Berthold eingehende Untersuchungen durchgeführt [33], aus denen die in Abb. 43 dargestellten Werte ausgezogen sind. Man ersieht daraus die höhere Wirksamkeit der beiden Hilfsmittel bei Leichtmetall wegen dessen größerer Streuung sowie die gegenüber dickeren Filtern nur noch schwache Überlegenheit der Lamellenblende.

In der Praxis werden häufiger Kupferfilter angewendet. Wenn auch ihre Wirkung geringer ist als bei Blei- und Zinnfiltern (nach Berthold Gütewert von 1 mm Cu $= \sim 1{,}2$), so haben sie doch den Vorteil größerer Steifheit, knicken nicht so leicht ein und werden sonst auch weniger beschädigt.

Dickenausgleich. Stücke mit sehr stark unterschiedlichen Wandstärken lassen sich mit einer Aufnahme nicht richtig belichten; die dünnen Stellen werden überstrahlt, während die dicken unterbelichtet bleiben. Hier kann man sich in verschiedener Weise helfen. Kleinere Teile kann man in eine stark absorbierende Flüssigkeit legen, wie Bleiazetat- oder Zinnchloridlösung, bei größeren die Hohlräume damit ausfüllen. Dies geht aber nur bei horizontaler Lage des Prüflings, wie auch das Ausfüllen mit kleinen Kugeln aus Schwermetall (< 0,5 mm Durchmesser). Man hat daher auch Pasten aus Wachs mit Wolframpulver in Anwendung gebracht, die aber leicht beim Ausschmieren Hohlräume übriglassen. Alle diese Mittel haben noch den Nachteil, zusätzliche Streustrahlen zu verursachen.

Einfacher läßt sich ein ausreichender Dickenausgleich mit stärkeren Metallfiltern erzielen, die zwar eine Erhöhung der Spannung bei der Aufnahme bedingen, aber gleichzeitig als Streustrahlenfänger wirken. Solche Filter können auch gelegentlich veränderliche Dicken erhalten, so haben sich Filterkeile bei Aufnahmen von Schweißnahtübergängen gut bewährt (DIN 1914).

Die Röntgenfilme sind natürlich in ihrem Aufbau den gestellten Anforderungen angepaßt. Sie müssen besonders feinkörnig sein und eine steile Gradation haben, damit sie bei möglichst kurzer Belichtung genügend geschwärzt werden. Man benutzt zweierlei Filme für die Bestrahlung ohne und mit Verstärkerfolien. Die Schichten der ersteren sind auf direkte Röntgenstrahlung sensibilisiert und sind dicker begossen, um diese besser auszunutzen; sie sind aber empfindlich gegen Druckstellen, die beim Entwickeln als helle Flecke erscheinen und Fehler vortäuschen können. Diese Filme werden deshalb meist einzeln verpackt in Papierkassetten geliefert. Die mit Folie zu benutzenden Filme sind dünner begossen und besonders auf Ausnutzung der von den Folien ausgehenden bläulichen Lichtstrahlen eingestellt. Weitere Filmsorten, etwa hart oder weich arbeitende, werden nicht hergestellt, um möglichst geringe Vorräte an Filmen halten zu müssen, deren Lagerbeständigkeit nur etwa 1 Jahr beträgt.

Röntgenpapiere statt der Filme werden neuerdings bei größeren Serienuntersuchungen gern verwendet, um die Aufnahmekosten herabzusetzen; man muß dabei allerdings eine geringere Fehlererkennbarkeit in Kauf nehmen. Die Papiere sind nur einseitig begossen und werden daher weniger geschwärzt, auch durch die Betrachtung in der Aufsicht statt der Durchsicht wird die Kontrastwirkung vermindert. Papieraufnahmen sind daher nur bei leicht durchstrahlbaren Stücken gerechtfertigt, wo es auf die Erkennung von Feinheiten nicht ankommt; sie nehmen somit eine Mittelstellung ein zwischen Schirmbeobachtung und Filmaufnahmen.

Die Belichtung der Filme, die nach dem Vorhergehenden von einer Reihe verschiedener Faktoren abhängig ist, erfordert vielseitige Erfahrungen. Um auch mit weniger durchgebildetem Personal auszukommen, hat man bald versucht, Tabellen und Schaubilder aufzustellen, aus denen die günstigsten Belichtungswerte einfach abzulesen sind. Hier sind besonders die Arbeiten von E. A. W. Müller zu erwähnen [34] und [35], auf die im folgenden kurz eingegangen wird.

Zunächst sei in Abb. 44 eine einfache Tabelle gezeigt, wie sie in der Praxis zuweilen benutzt wird. Hier geht man von einer feststehenden „Belichtungsgröße" aus (Stromstärke × Zeit) und ändert die Röhrenspannung, um für die zu untersuchenden mittleren Wandstärken die günstigste Fehlererkennbarkeit zu erhalten. Aus der Tabelle sind für eine Belichtungsgröße von 3000 mA · sec bei festgelegtem Fokusabstand und Schwärzungsgrad die einzustellenden Spannungen mit und ohne Verstärkerfolien zu entnehmen. Man erkennt auch aus dieser Zusammenstellung die Begrenzung der Folienanwendung auf bestimmte Wandstärken (vgl. Abb. 40).

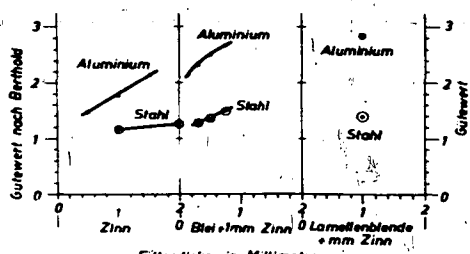


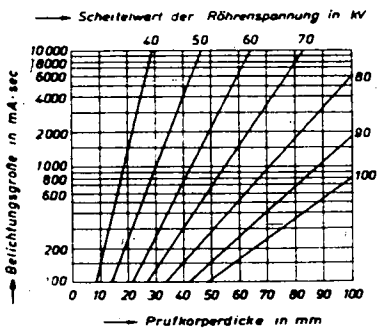
Abb. 43 Wirkung von Streustrahlenfängern auf Bildgüte bei Aluminium und Stahl

9680

Mittlere Wandstärke in mm			Röhrenspannung in kV
Ohne Folie	Scharfzeichnende Folie	Hochverstärkende Folie	
2			50
3			60
4			70
6			80
8	14		90
10	18		100
12	23		110
15	28		120
	33	37	130
	38	42	140
		52	160
		62	180
		72	200

Gültig für Fokusabstand = 50 cm, Schwärzungsgrad 1,0, Belichtungsgrösse 3000 mA sec (10 mA 5 min)

Abb. 44 Belichtungstabelle für Stahl



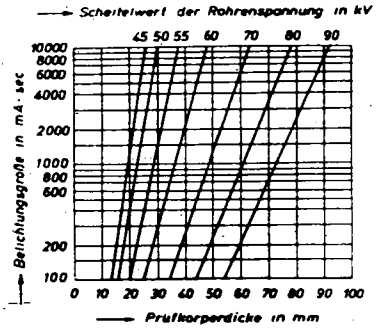


Abb. 45 Belichtungsgrößen für Reinaluminium
1. Gültig für Schwärzung S = 1,0, Sino-Film, Brennfleck — Filmabstand 50 cm
2. Wie 1., Agfa-SSS-Film zwischen hochverstärkenden Folien

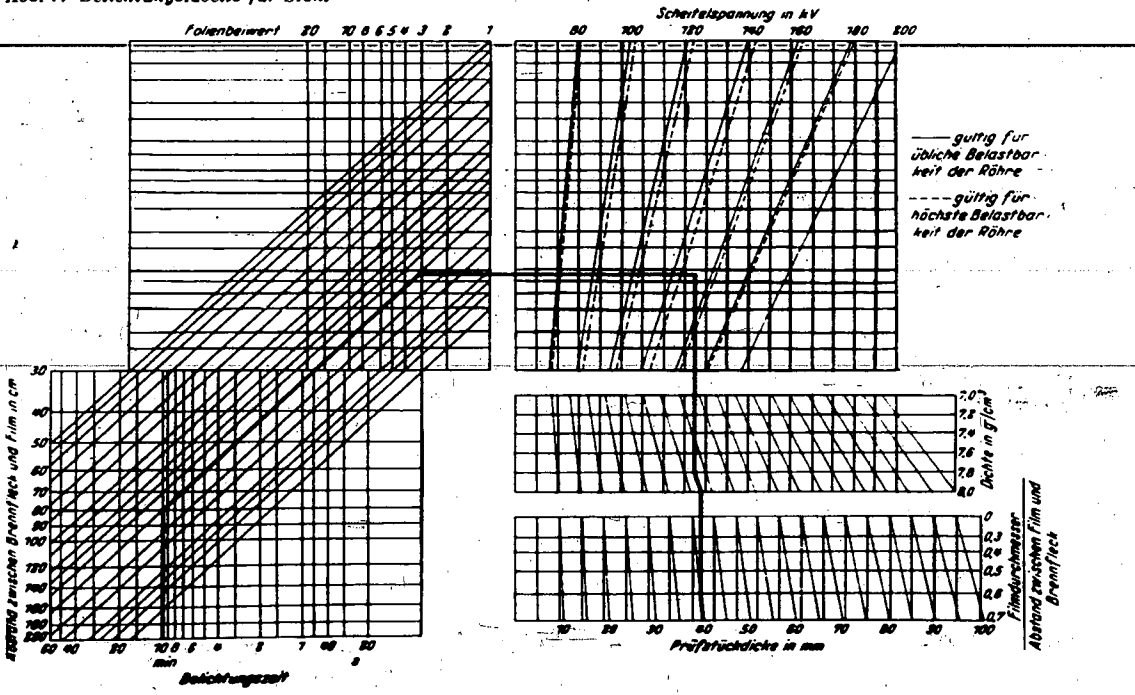


Abb. 46 Belichtungsschaubild für Stahl und Gußeisen

Abb. 45 zeigt ein Belichtungsschaubild für Aluminium ohne und mit Verstärkerfolie nach Müller [35], aus dem man für die verschiedenen Wandstärken die günstigsten Belichtungsgrößen entnehmen kann. Für Stahl und Gußeisen gibt Müller [34] das kombinierte Schaubild Abb. 46 an, in dem ein weiterer Teil der Veränderlichen mit aufgenommen ist, und zwar neben dem spezifischen Gewicht der Eisenkohlenstofflegierung noch der Verstärkungsbeiwert der Folie, der Abstand zwischen Brennfleck und Film sowie der wirksame Durchmesser des Strahlenkegels auf dem Film. Von letzterem hängt, wie bereits erwähnt, die Höhe des Streustrahlenzusatzes ab, die durch stärkeres Abblenden des Primärstrahlenbündels herabgesetzt wird.

Bei Benutzung des Schaubildes geht man von der mittleren Wandstärke des Prüfstücks aus, z. B. 40 mm (vgl. den stark eingezeichneten Liniengang), berücksichtigt das Verhältnis Filmdurchmesser (Strahlenkegeldurch-

9681

messer in Filmebene) zu -abstand vom Brennfleck (hier 0,8), sucht in dem darüberliegenden Feld die Dichte der betreffenden Legierung (hier 7,8), geht weiter nach oben in das Belastungsschaubild der Röhre (hier 150 kV und 12 mA), setzt dann in dem Feld links den Folienbeiwert ein (hier 3,2), und geht über den bereits festgelegten Abstand Brennfleck—Film nach unten, wobei man auf die zweckmäßige Belichtungszeit (hier 10 Minuten) kommt.

In ähnlicher Weise kann man auch für andere Werkstoffe Belichtungsschaubilder aufstellen, die das Erreichen von Aufnahmebestwerten sichern.

Sonderaufnahmeverfahren. Im Gegensatz zu der Schirmdurchleuchtung unter Drehen des Prüfstücks gibt die Röntgenaufnahme zunächst noch keine Auskunft über die Tiefenlage des Fehlers und seine räumliche Ausdehnung. Um diese abzuschätzen, macht man möglichst zwei Aufnahmen etwa senkrecht zueinander; eine nähere Bestimmung kann dann noch gegebenenfalls zeichnerisch durch entsprechende Projektion in einer Skizze erfolgen. Bei den in der Luftfahrttechnik vorkommenden geringen Wandstärken ist jedoch wegen deren hoher Belastung die Tiefenlage der Fehlstellen meist weniger von Bedeutung; Fehlstellen von einer gewissen Größe an ergeben so oder so Ausschuß. Aus diesen Gründen hat sich hier auch das „densographische Prüfverfahren" nicht eingeführt, daß z. B. bei Schweißungen starkwandiger Teile von der Reichsbahn erprobt wurde [36].

Sehr schön kann man die Fehler durch Stereoaufnahmen räumlich wiedergeben, wodurch auch die Erkennbarkeit der Feinheiten merklich steigt. Die Lage der Fehlstellen kann nach dem „röntgenstereometrischen Verfahren" zeichnerisch wiedergegeben werden, wie es ebenfalls von Kantner eingehend beschrieben wurde [36]. Leider ist auch dieses Verfahren für die laufende Kontrolle zu umständlich und zeitraubend, so daß es sich nur für Studienzwecke rechtfertigt.

Auch das in der Medizin eingeführte Schnittbildverfahren (Tomographie) [37] kann in Sonderfällen bei der Bauteilprüfung Anwendung finden, z. B. um den Verlauf komplizierter Kanäle in Gußstücken zu verfolgen; aber auch hier wird die Verwendbarkeit mehr auf Studienarbeiten beschränkt bleiben.

Schließlich ist noch die Schirmbildphotographie nach Prof. Janker zu erwähnen, die in neuester Zeit in der Heilkunde große Beachtung findet. Sie eignet sich besonders für Massenuntersuchungen, so daß ihre Anwendung in der Werkstoffprüfung naheliegt. Das Verfahren besteht darin, daß das Leuchtschirmbild mit einer Kleinbildkamera photographiert wird; die kleinen Aufnahmen, meist nur 24 × 24 mm, werden hernach mit der Lupe betrachtet oder durch Projektion vergrößert. Hierdurch kann außerordentlich an Aufnahmematerial gespart und für viele Teile die Massenprüfung erst ermöglicht werden. Voraussetzung ist ein gute Optik (Objektiv 1 : 1,5) und hohe Schirmhelligkeit, um kurze Belichtungszeiten zu erhalten; die Feinfokusröhre wäre also hierfür besonders geeignet. Die Prüfanordnung ergibt sich etwa nach der schematischen Abb. 47[6]), jedes Stück ist durch mitaufzunehmende Zahlen zu kennzeichnen. Die Bildgüte ist etwas höher als bei der Schirmbetrachtung, da der Film Schwärzungsunterschiede besser wiedergibt, sie steht aber natürlich hinter der üblichen Aufnahme zurück. Das Verfahren dürfte bei nicht zu hohen Ansprüchen an Fehlererkennbarkeit gute Zukunftsaussichten haben [38].

Die Entwicklung der Filme unterscheidet sich wenig von der üblichen. Der Entwickler soll kontrastreich arbeiten, Temperatur und Entwicklungsdauer immer möglichst gleich sein (18° C, 5 Minuten), um gute Ausentwicklung ohne Verschleierung zu erhalten. Wegen der Doppelschicht muß die Handhabung besonders vorsichtig geschehen. Die Beleuchtung kann heller als üblich sein, da die Röntgenfilme weniger rotempfindlich sind.

Die Betrachtung der Aufnahmen mit Ausnahme der Röntgenpapiere geschieht ausschließlich in der Durchsicht. Hierfür werden besondere Schaukästen mit diffusem Licht gebaut, die Einrichtungen besitzen zur Veränderung der Lichtstärke je nach der Dichte des Films sowie zum Ausblenden bestimmter Teile durch Abdecken der Randpartien.

Um die Kontraste bei der Betrachtung zu verstärken, ist man auf den Gedanken gekommen, das Licht statt einmal zweimal durch den Film gehen zu lassen, wobei sich durch die doppelte Schwächung des Lichts eine Verdopplung der Helligkeitsunterschiede ergibt [39]. Zur Durchführung dieses Gedankens benutzt man einen gelben Fluoreszenzschirm, der unter den Film gelegt wird, sowie ultraviolettes Licht, das von vorn durch den Film fällt und den Schirm zur Sekundärstrahlung anregt, die dann als sichtbares Licht durch den Film zurückgeht und ins Auge des Beobachters gelangt[7]). Das Verfahren eignet sich nur für Filme mit geringen Schwärzungsgraden, für dichte Filme reicht die bisher erzielbare Helligkeit des Fluoreszenzlichtes noch nicht aus. Es läßt sich also in erster Linie zur Auswertung unterbelichteter Filme verwenden, insbesondere Aufnahmen von Prüfteilen mit großen Querschnittsschwankungen, bei denen die dickeren Stellen in der Belichtung zurückgeblieben sind. Ferner gibt das Verfahren eine Möglichkeit, besonders bei sehr dicken Stücken, kürzer zu belichten, ohne an Fehlererkennbarkeit einzubüßen.

Die Fehlererkennbarkeit hängt nicht nur von der Größe der Fehlstellen, sondern auch von ihrem Schwächungsvermögen für Röntgenstrahlen ab, also in erster Linie von ihrer Dichte, z. T. aber auch von ihrer Form und Lage.

So sind Hohlräume, die leer sind oder Gase enthalten wie Grob- und Feinlunker oder Gasblasen, am besten zu sehen. Sind sie zum Teil oder ganz mit anderen festen Stoffen ausgefüllt, hängt die Erkennbarkeit von der Dichte des Inhalts ab. So wird z. B. bei Stahl mit Schlackeneinschlüssen oder mit Schmiederissen, die mit Zunder gefüllt sind, die Auffindbarkeit geringer. Sind die Dichten des Grundwerkstoffes und des Einschlusses ganz oder annähernd gleich, so ist gar nichts oder fast nichts zu entdecken. Man kann z. B. in stählernen Lagerschalen, die mit Bleibronze ausgegossen sind, Risse nicht immer feststellen, wenn diese mit Kupfer ausgelaufen sind; umgekehrt sind Bleiadern in der Bronze ausgezeichnet zu erkennen.

Ähnlich liegen die Dinge bei Seigerungen. Bei Stählen sind wegen der Ähnlichkeit in der Dichte der Legierungsbestandteile die Entmischungserscheinungen an

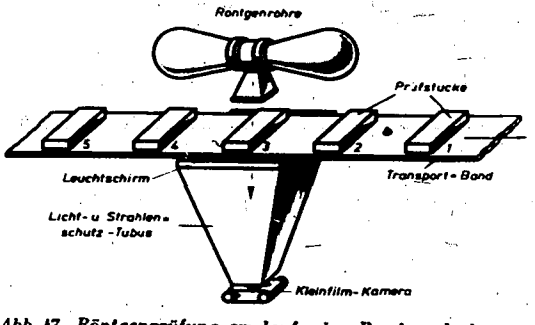


Abb. 47 Röntgenprüfung am laufenden Band nach dem Schirmbildaufnahmeverfahren

[6]) Vorschlag von Koch & Sterzel A.-G., Dresden.

[7]) „Auroskop", Hersteller: Auergesellschaft A.-G., Berlin.

9682

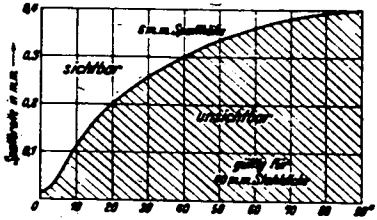


Abb. 48 Erkennbarkeit von Spalten in Abhängigkeit von deren Winkellage zum Röntgenstrahl

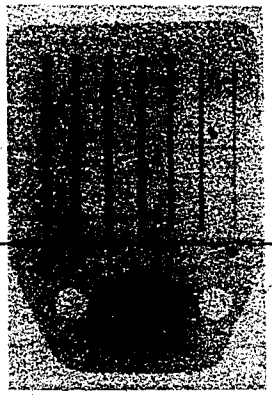


Abb. 49 Röntgenbild eines Drahtstegtestkörpers

sich gering und, wenn vorhanden, wegen der annähernd gleichen Durchlässigkeit auch kaum zu sehen. Anders ist es dagegen bei den Leichtmetallen, die wegen der meist aus Schwermetallen bestehenden Legierungszusätze stärker zur Seigerung neigen und diese deutlich erkennen lassen.

Form und Lage der Einschlüsse sind insofern von Einfluß auf die Erkennbarkeit, als rundliche in allen Lagen festgestellt werden können, flachere oder gar flächenhafte, wie Oxydhäute oder Risse, vorwiegend nur in den Richtungen ihrer größten Ausdehnung. Feine Risse, Bindefehler, Dopplungen und dergleichen sind daher, wenn sie annähernd senkrecht zum Röntgenstrahl liegen, überhaupt nicht zu finden. Berthold [40] hat die Erkennbarkeit von feinen Spalten näher untersucht und in Kurvenform dargestellt (s. Abb. 48).

Bei der großen Mannigfaltigkeit der auftretenden Fehler können somit allgemeingültige Zahlen über die Fehlererkennbarkeit nicht angegeben werden. Andererseits liegt ein praktisches Bedürfnis vor, irgendeinen Vergleichsmaßstab zu haben, um die Aufnahmen nach einheitlichen Gesichtspunkten auswerten zu können. Man ist daher zur Normung von sog. Testkörpern gekommen, die röhrennah auf die Stücke gelegt und mit aufgenommen werden.

Als Testkörper sind in Deutschland nach Vorschlägen von Berthold Drahtstege mit verschieden starken Drahteinlagen in einer Gummihülle unter DIN 1914 für Schweißnahtprüfung genormt [40] (Abb. 49). Ähnliche Vergleichskörper sind die Blechtreppe, bei der dünne, immer schmaler werdende Blechstreifen stufenweise übereinandergelegt werden, sowie die in Amerika genormte Filtertreppe, die aus einem dickeren Blech mit eingearbeiteten, in der Tiefe abgestuften Nuten besteht. Die Testkörper geben also in erster Linie Vergleichsmöglichkeiten für Dickenunterschiede. Um Hohlstellen, wie Gasporen und dergleichen, abschätzen zu können, hat man auch als Testkörper Lochplatten aus einer Lage dünner Bleche geschaffen, in die Löcher von 0,2 bis 2 mm gebohrt sind, deren Tiefe gleich ihrem Durchmesser ist.

Man nimmt nun an, daß die Größe der wahrzunehmenden Fehler der Stärke der eben noch zu erkennenden Drähte, Löcher oder Treppenstufen entspricht. Vergleichende Versuche mit solchen Testkörpern [41] haben jedoch ergeben, daß bei Verwendung der scharfkantigen Treppenkörper eine höhere Fehlererkennbarkeit vorgetäuscht wird als bei Drahtstegen und wiederum rundliche Hohlräume noch viel schlechter festzustellen sind. Abb. 50 zeigt diese Verhältnisse bei Stahl, man sieht auch, daß sich die Erkennbarkeit bei sehr geringen Wandungen stark verschlechtert, ebenso etwas mit zunehmender Wanddicke. In dem Bild ist weiter noch eine Kurve eingezeichnet für Lochplatten, deren Bohrungen ausgefüllt mit einem Stoff von der Dichte 4 g/cm³, entsprechend der Dichte von Schweißschlacke, woraus auf deren Erkennbarkeit in Stahl geschlossen werden kann.

Auch die Testkörper geben somit keinen absoluten Maßstab für die Fehlererkennbarkeit, sie lassen jedoch bei entsprechender Einarbeitung eine ausreichende Schätzung zu; vor allem sind sie aber zur Kontrolle der richtigen Aufnahmebedingungen unentbehrlich, so daß sich, trotz gewisser Unvollkommenheiten, besonders die handlichen Drahtstege allgemein eingebürgert haben, auch außerhalb des ursprünglich beschränkten Verwendungszwecks.

Die Kurven in Abb. 50 gelten für übliche Brennfleckgrößen von etwa 3 bis 4 mm; bei Verwendung von Feinfokusröhren wird die Fehlererkennbarkeit entsprechend günstiger. Wie bereits erwähnt, ergibt sich nach Berthold die geometrisch beste Bildgüte, wenn Randschärfe, innere Unschärfe und Fehlerabbildungsbreite gleich sind. Die dazugehörigen Voraussetzungen hat er in einem Schaubild zusammengestellt, das in Abb. 51 wiedergegeben ist [29]. Hat z. B. die Röhre einen Brennfleck von 5 mm Durchmesser, so wird bei Aufnahme ohne Verstärkerfolie eine Fehlerbreite von 0,2 mm bestenfalls erkennbar. Soll eine solche von 0,1 mm festzustellen sein, so darf der Brennfleck nur 0,2 mm betragen, wobei eine zweifache Vergrößerung anwendbar ist. Aus dem Schaubild ist auch noch einmal die bildverschlechternde Wirkung von Verstärkerfolien und Leuchtschirm mit deren steigender innerer Unschärfe u_i zu entnehmen. Man ersieht auch, daß beim Leuchtschirm die Fehlererkennbarkeit mit kleinerem Brennfleck besonders rasch steigt, so daß durch Einführung der Feinfokusröhre die großen Vorteile der Schirmdurchleuchtung weitgehend ausgenutzt werden können.

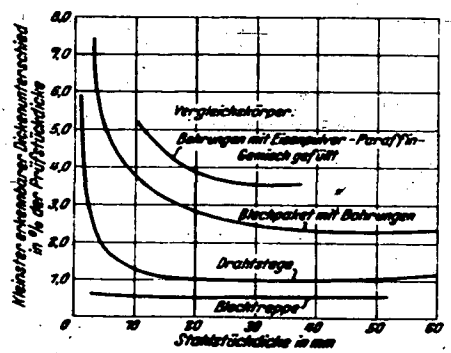


Abb. 50 Nachweis von Dickenunterschieden mit Testkörpern nach E. A. W. Müller (mit scharfzeichnenden Verstärkerfolien)

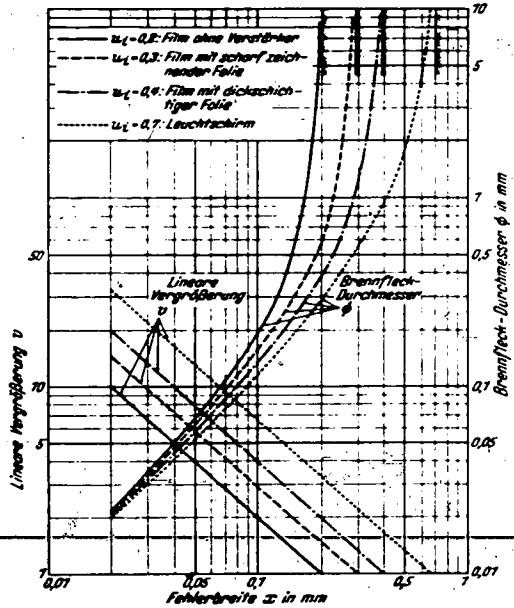


Abb. 51 Geometrische Grundlagen für die Erreichung bester Bildgüte nach Berthold

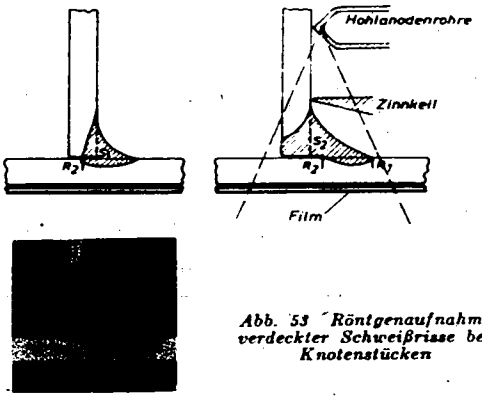


Abb. 53 Röntgenaufnahme verdeckter Schweißrisse bei Knotenstücken

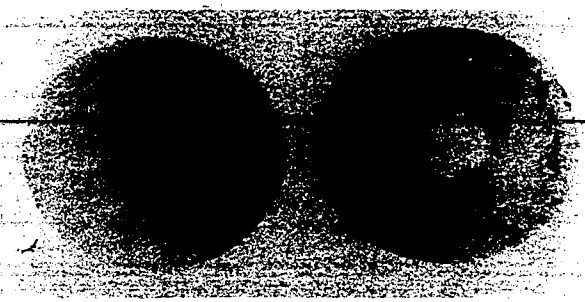


Abb. 54 Seigerungen in Aluminiumlegierungen

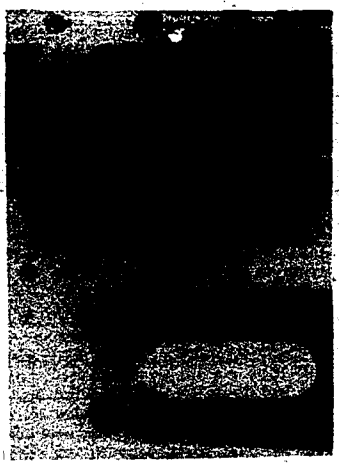


Abb. 52 Röntgenbilder fehlerhafter Nietungen

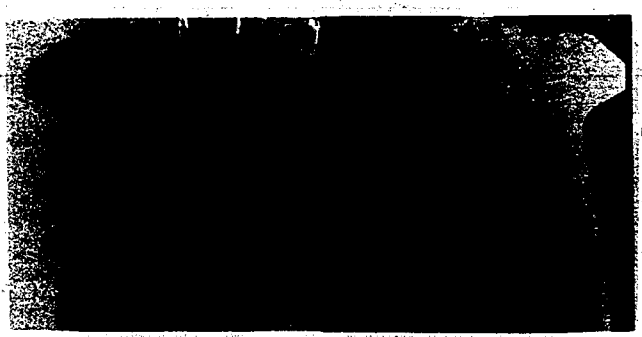


Abb. 55 Rißkegel in Schmiedestücken (Luftschraubenfuß)

Anwendungsbeispiele

Zur Erläuterung der vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten der Röntgenprüfung, aber auch ihrer Grenzen, auf dem Gebiete des Flugzeug- und -Motorenbaus mögen nur wenige Abbildungen dienen.

1. Flugzeugbau

Abb. 52 zeigt einige fehlerhafte Nietungen, oben eine Blecheckverbindung, unten einen Holmanschluß. Bei beiden sind einige Niete vorhanden, die die etwas zu groß gebohrten Nietlöcher beim Stauchen nicht ganz ausgefüllt haben, was an den hellen Ringen und Halbmonden zu erkennen ist.

Zur Untersuchung geschweißter Knotenstücke auf die häufiger auftretenden Schweißrisse hat sich die Röntgenprüfung leider nicht in dem Maße geeignet gezeigt, wie man gehofft hatte, zumal auch die magnetische Prüfung nach dem Pulververfahren hier sehr mangelhafte Ergebnisse liefert. Glücklicherweise sieht man die meisten Risse schon mit dem bloßen Auge, so daß nur die verdeckten schwer zu finden sind. Diese liegen meistens unter den verdickten Schweißraupen und in Richtungen, in denen man nur schlecht bestrahlen kann. Durch Benutzung der Hohlanodenröhre verbessern sich die Möglichkeiten, die Risse aufzudecken, jedoch sind häufig die Knotenstücke so kompliziert, daß man auch mit

9684

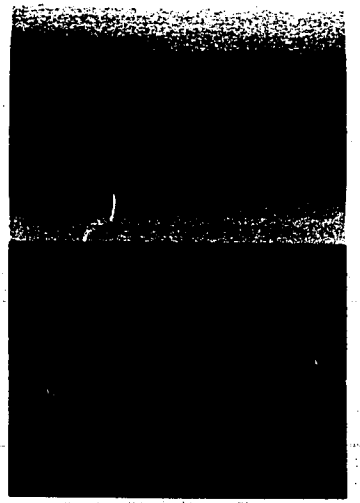


Abb. 56 Bildverbesserung durch Dickenausgleich und Streustrahlenblende (Walzknüppel)

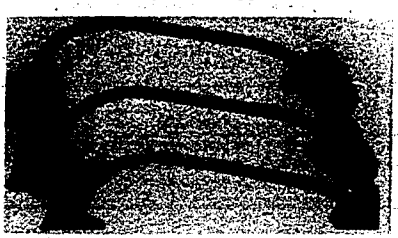


Abb. 57 Röntgenaufnahme einseitig gebohrter Düsenrohre

diesen nur beschränkt an die Fehlstellen herankommt. In Abb. 53 ist skizzenmäßig und im Schliff dargestellt, wo bei stärkeren Blechen, die schwer durchzuschweißen sind (über 2 mm), die Risse meist auftreten. Sie liegen am Rande des Einbrandes, bei $R\,1$ offen, bei $R\,2$ jedoch unter der Raupe und in für die Aufnahme ungünstiger Richtung. Lediglich bei der sehr schlechten Schweiße $S\,2$ besteht Aussicht, mit der Fingerröhre und Verwendung eines Zinnkeiles den Riß auf dem Film zu erkennen. Ein allgemeines Absuchen auf Risse, wie es bei Gußstücken unter dem Leuchtschirm erfolgt, ist für Knotenstücke praktisch erfolglos.

2. Flugzeugmotorenbau

Auf die Wiedergabe der bekannten Fehler in Gußstücken, wie Lunker, Kaltschweißen, Spannungsrisse und dergleichen sei hier verzichtet. Weniger bekannt ist, daß in Leichtmetallegierungen Seigerungen der zugesetzten Schwermetalle sehr gut festgestellt werden können.

Beispiel: Röntgenbild 54 zeigt links normale, innere Blockseigerung in einer Scheibe von gegossenen Knüppeln aus Aluminium-Eisenlegierung, rechts umgekehrte Seigerung in einer geschmiedeten Kolbenplatte aus Y-Legierung, deren Kupferaluminide sich außen angereichert haben.

Unter dem Einfluß zu heftiger Streckverformung bilden sich bisweilen in Schmiede- und Walzknüppeln sowie in gezogenen Stangen und Drähten innere Aufreißungen in Kegelform, wie sie Abb. 55 an einem Leichtmetallluftschraubenfuß im Röntgen- und Schnittbild zeigt. Zur Vermeidung der Randüberstrahlung an runden Querschnitten wurde hier ein Kupferfilter zwischengeschaltet; noch klarere Bilder ergeben sich nach Abb. 56 bei Einbettung in Dickenausgleichflüssigkeiten. Die obere Aufnahme ist ohne Hilfsmittel, die untere unter Bariumchloridlösung und außerdem mit Lysholmblende zur Verringerung der Streustrahlen gemacht worden; die Längsstreifung rührt von den feinen Bleilamellen der Blende her.

Auch hohlgebohrte Wellen, Rohre und dergleichen, bei denen die Bohrung gut zentrisch verlaufen muß, können oft mit Röntgenaufnahmen kontrolliert werden. Abb. 57 zeigt einige gebohrte und hernach gebogene Düsenrohre aus Stahl, die stark exzentrisch und daher Ausschuß geworden sind.

Die Massenkontrolle erfordert auch bei der Röntgenprüfung den Einsatz von mehr oder weniger automatischen Prüfvorrichtungen. So zeigt Abb. 58 eine Aufnahmevorrichtung für Ventilkegel, deren innere Kühlhohlräume auf gleichmäßige Wandstärke geröntgt werden sollen. Die Kegelschäfte stecken zum Dickenausgleich in viereckigen Hülsen aus Stahl, darunter ist der Film eingeschoben. Durch Umschalten des Hebels werden die Kegel nach der ersten Aufnahme in dem Führungsschlitten um 90° in die zweite Aufnahmestellung umgerollt, so daß die Bohrungen in zwei Projektionen dargestellt werden und außenmittige so zu finden sind.

Ferner wurden für die Durchstrahlung von Lagerschalen, insbesondere aus Bleibronze, Vorrichtungen geschaffen, die nur noch wenig Bedienung erfordern. Abb. 59 zeigt links zwei derartige von den Junkerswerken in Gemeinschaft mit der Firma Seifert entwickelte Geräte für die Laufflächenprüfung. Die Schalen werden um die vier oben liegenden, bleigeschützten Walzen gelegt, auf deren Umfang zunächst der Aufnahmefilm befestigt wurde. Von der unten liegenden Röntgenröhre fallen die Strahlen durch Schlitzblenden auf die Schalen. Mittels eines elektrischen Getriebes werden die Walzen gleichmäßig oder ruckweise umgedreht und belichtet.

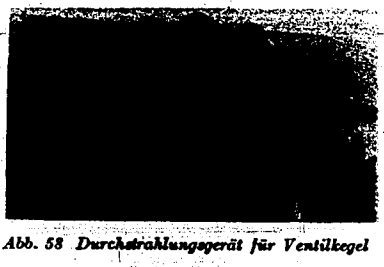


Abb. 58 Durchstrahlungsgerät für Ventilkegel

Abb. 59 Sondereinrichtungen für Lagerröntgenprüfung

Abb. 60 Röntgenbilder häufiger Fehler in Bleibronzelagern
a Feine Lunker und Seigerungen
b Grobe Lunker und Seigerungen (Wolken)
c Risse mit und ohne Bleiausfüllung
d Lötspannungsrisse in der Stahlschale

Auf der rechten Seite der Abb. 59 ist weiter eine Vorrichtung dargestellt, in der die Bunde von 12 Führungslagern gleichzeitig durchstrahlt werden. Die Filme werden zwischen Messingblechen, die gleichzeitig als Dickenausgleich und Filter dienen, unter den Lagern eingesetzt. Nach der Belichtung werden die Schalen umgewendet, die Filme etwas tiefer geschoben und die anderen Bunde ebenfalls bestrahlt. Typische Fehler in Bleibronzelagerschalen zeigen die Abb. 60 und 61.

Ein Gerät zur selbsttätigen Innendurchstrahlung von zylindrischen Hohlkörpern mit der Hohlanodenröhre ist noch in Abb. 62 wiedergegeben. Das Prüfstück ruht auf einem Schlitten, der es mittels Motor und Schraubenspindel gleichmäßig über die in der Mitte angeordnete Fingerröhre hinwegschiebt. Da diese über den ganzen Umfang strahlt, erübrigt sich eine Drehbewegung. Der Film wird außen herumgelegt und mit einem Bleischutzblech bedeckt. Auf der Abbildung wurde gerade nur an einer besonders verdächtigen Stelle eine Aufnahme gemacht, der größte Teil des Strahlenkegels wurde dabei innen mit einer Bleihaube an der Spitze der Hohlanode abgeschirmt.

1. c) Strahlenmessung mit Ionisationskammer und Zählrohr

Bei den Röntgenschattenbildverfahren wird die Energie der Nutzstrahlen erst umgesetzt in Fluoreszenz- bzw. photochemische Strahlung, während mit der Ionisationskammer und dem Zählrohr eine direkte Intensitätsmessung der durch den Prüfling gehenden Strahlen erfolgt. Die Größe der dabei auftretenden Schwächung gibt einen Maßstab für die Stärke der durchstrahlten Wandung in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Werkstoffs.

Da beide Geräte infolge ihrer Bauart bisher nur die Messung von Strahlenbündeln von nicht weniger als 1 bis 2 cm² gestatten und auch nur deren mittlere Intensität angeben, können sie nur für die Untersuchung größerer Flächen benutzt werden, in erster Linie zu Wandstärkenmessungen [42], [43].

Die Ionisationskammer besteht aus einem kugel- oder zylinderförmigen, gasgefüllten Hohlraum mit zwei Elektroden, zwischen denen die zu messende Röntgenstrahlung hindurchgeht (Abb. 63). Hierbei werden Ionen und Elektronen ausgelöst, die unter dem Einfluß einer an die Elektroden gelegten Spannung zu diesen hinwandern und sie aufladen. Dieser Ionenstrom ist abhängig von der Größe des bestrahlten Raumes, der Ordnungszahl des Füllgases sowie dessen Druck, ferner auch von dem Material der Kammerwand. Er kann gemessen werden durch Entladen oder Aufladen der Kammer sowie auch direkt über einen sehr hohen Widerstand als Spannungsabfall mit einem hochempfindlichen Elektrometer. Nach dem letzteren Prinzip ist das Wanddickenmeßgerät von Siemens*) aufgebaut, das in Abb. 64 wiedergegeben ist. Da die Ionisierungskammern nicht sehr empfindlich sind und die Meßdauer einige Minuten oder bestenfalls mehrere Sekunden beträgt, sind sie für laufende Untersuchungen zu träge. Hier hat sich das Zählrohr mit seiner großen Empfindlichkeit und raschen Anzeige als besser geeignet erwiesen.

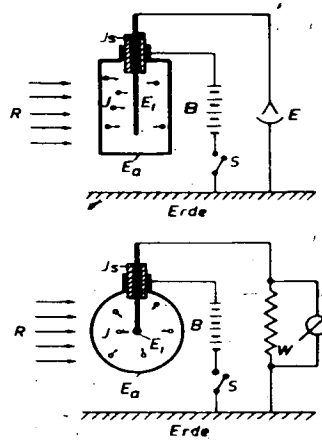
Das Zählrohr ist ähnlich wie die Kammer gebaut, wie Abb. 65 im Schema zeigt. In einem abgeschmolzenen Glasrohr liegt in der Mitte ein Draht als Anode, umgeben von einem Metallzylinder als Kathode. Die senkrecht zur Achse durchgeleitete Röntgenstrahlung löst in dem Zylinder Elektronen aus, die unter der angelegten Spannung zum Draht fliegen und sich dort zusammendrängen. Infolge der unter der hohen Spannung erreichten großen Geschwindigkeit lösen sie in den Gasmolekülen immer wieder neue Elektronen aus, deren

Abb. 61 Bundrisse in Bleibronzeschalen
Oben: Radialrisse
Unten: Riß am Umfang und Lunkerstelle

Abb. 62 Vorrichtung zur Innendurchstrahlung von Hohlkörpern

*) Hersteller: Siemens & Halske, Berlin.

9686



R = Röntgenstrahlen
E_a = Außen-Elektrode
E_i = Innen- " "
J = Jonen
Js = Isolator
B = Batterie
S = Schalter
E = Elektrometer
W = Widerstand
M = Meßinstrument

Abb. 63 Ionisationskammer, schematisch

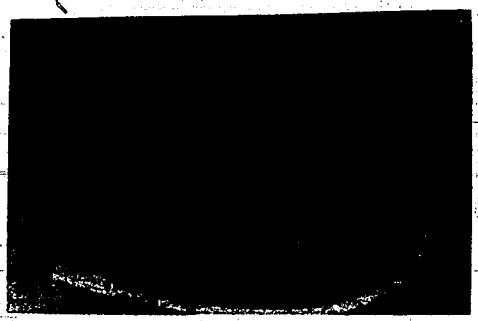


Abb. 64 Wanddickenmeßgerät von Siemens

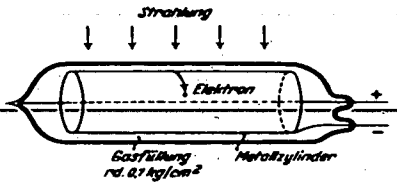
jedes eine Gasentladung bewirkt, die nach kurzer Zeit wieder abreißt. Die Zahl der hierbei erzeugten Stromstöße gibt ein Maß für die auf das Rohr fallende Strahlungsintensität. Ihre Registrierung erfolgt über einen Widerstand, dessen Spannungsabfall durch einen Kondensator gemittelt und über das Gitter einer Verstärkerröhre einem schnell anzeigenden Meßinstrument zugeführt wird. Da die Meßdauer des ursprünglichen Zählrohrs von Müller und Geiger [44] für die praktischen Bedürfnisse noch nicht gering genug war, wurden von A. Trost [45] die Rohre durch geeignete Anpassung von Abmessungen, Betriebsspannung und Gasfüllung so weit verbessert, daß ihre Anzeigedauer nur noch $^1/_{10}$ Sekunde beträgt. Abb. 66 zeigt ein derartiges Zählrohr in Schnitt und Ansicht, Abb. 67 das vollständige Meßgerät*). Ist die Voraussetzung für richtige Prüfergebnisse, absolut gleichbleibende Intensität der Röntgenstrahlung, nicht erfüllt, so ist noch ein Netzregler erforderlich, der in das Gerät mit eingebaut werden kann. Die Zählrohre werden in Durchmessern von 15 bis 35 mm gebaut mit verschiedenen Strahlungsmeßbereichen von 10^{-1} bis 10^{-4} röntg/s.

*) Hersteller: Dr. Reinhold Claren, Düsseldorf.

Anwendung und Leistungsfähigkeit

Die Ionisationskammer und besonders das Zählrohr bilden eine aussichtsreiche Ergänzung der Röntgenprüfung für die Massenuntersuchung einfach gestalteter, besonders rohrförmiger Körper auf richtige oder gleichmäßige Wandstärke. Hierbei können auch ausgedehntere Fehler, wie gröbere Lunker und Risse, Porositäten, Ziehfehler, Korrosionsnarben und andere Ungänzen aufgefunden werden, feinere Risse sowie Dopplungen und andere flachliegende Materialtrennungen jedoch nicht. Die Anordnung ist dabei zweckmäßig so, daß die Stücke mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bei festem Abstand vom Röntgenbrennfleck über die Zählkammer hinweggezogen werden; bei der Prüfung von Rohren, Gasflaschen oder ähnlichen Hohlkörpern bewegt man diese spiralig über das in der Mittelachse liegende Zählrohr fort. Für die lückenlose Untersuchung von 1 m² Oberfläche werden etwa 5 Minuten benötigt, unter der Annahme einer Meßfeldgröße am Zählrohr von 2 cm² und $^1/_{10}$ Sekunde Einstellzeit des Meßinstruments.

Das Zählrohr hat den großen Vorteil der direkten, zahlenmäßigen Wandstärkeanzeige mit der hohen Ge-



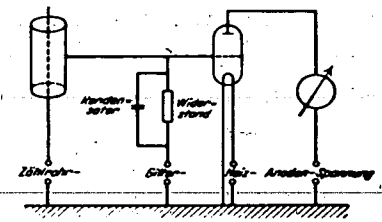
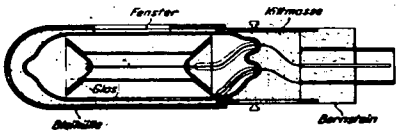


Abb. 67 Zählrohr und Schaltordnung schematisch



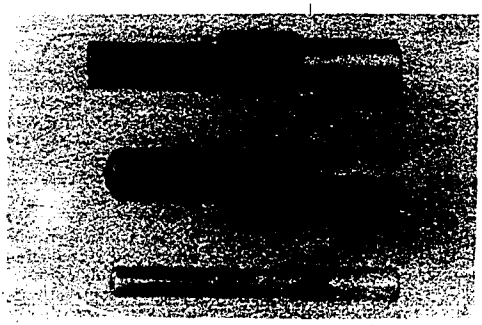


Abb. 66 Zählrohr. Schnitt und Ansicht

9687

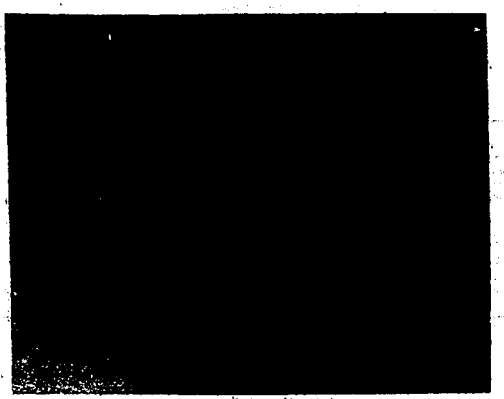


Abb. 67 Vollständiges Zählrohrmeßgerät

nauigkeit von etwa ± 0,5 vH bei etwa 30 mm Stahl, darüber und darunter etwas geringer; feine Folien von 0,01 mm können noch mit 1 vH Genauigkeit gemessen werden. Man kann auch große, einfachere Stücke vollkommen abtasten und braucht sich hier nicht nur auf örtliche Stichproben zu beschränken, wie bei den Schattenbildverfahren. Weiter erfolgt die Fehleranzeige sofort und ohne umständliche Nebenarbeiten, gegebenenfalls können die aufgefundenen Fehlstellen noch näher mittels der üblichen Röntgenaufnahme untersucht werden.

Weitere Anwendungsgebiete von Ionisitätskammer und Zählrohr sind die Nachprüfung von Röntgenschaupulten und -räumen auf Strahlendichtheit, sowie die laufende Überwachung des Personals auf etwaige Überschreitungen der zulässigen Strahlendosis durch Streustrahlen.

Neuerdings findet das Zählrohr auch Eingang in die Röntgenfeinstrukturmessung, bei der es zur Anzeige der Interferenzlinien benutzt wird [45].

2. Fehlerprüfung mit Gammastrahlen

Für die Durchstrahlung sehr dicker Wandstärken reichen die heutigen Röntgengeräte nicht mehr aus. Man hat wohl für medizinische und allgemeinwissenschaftliche Zwecke Anlagen für sehr harte Strahlen mit Spannungen von einer halben bis über eine Million Volt in Entwicklung, jedoch kommen solche für die praktische Werkstoffprüfung vorläufig nicht in Betracht. Aus Gründen der Beweglichkeit sind hier Geräte mit geerdeten Hochspannungskabeln notwendig, die sich wesentlich über 300 kV noch nicht herstellen lassen.

Hier bietet nun die kurzwellige, natürliche Gammastrahlung des Radiums bzw. radioaktiver Präparate mit ihrer außerordentlichen Durchdringungskraft die Möglichkeit, in einfachster Weise die Durchstrahlung dicker Prüfstücke zu erreichen. Zwar sind solche Strahler an sich recht kostbare Substanzen, ihr Preis fällt aber gegenüber den Kosten von stärkeren Röntgenanlagen nicht ins Gewicht, zumal man heute die Präparate auch leihweise erhalten kann; ferner sind sie jederzeit betriebsbereit und *erfordern keine Wartung*. Weitere Vorteile sind ihr geringer Raumbedarf (etwa 1 mm³), so daß sie eine recht scharfe Strahlenquelle ergeben, sowie deren allseitige Ausbreitung, die die gleichzeitige Prüfung von vielen Stücken ermöglicht. Die Präparate können wegen ihrer Kleinheit auch zur Durchstrahlung sehr enger Hohlräume benutzt werden, ohne durch zu geringen Abstand vom Aufnahmegegenstand unzulässige Unschärfen zu verursachen. Dem stehen als Nachteile gegenüber ihre geringe Intensität, die eine Leuchtschirmbetrachtung nicht zuläßt und auch bei der Aufnahme vielstündige Belichtungszeiten erfordert, sowie die geringe Schwärzungswirkung der harten γ-Strahlung auf den photographischen Film, die nur schwache Kontraste hervorruft.

Die Strahler, die technisch verwendet werden, sind meist keine Radiumpräparate, da deren Kosten zu hoch sind. An sich haben diese die längste Lebensdauer, da Radium erst in etwa 1600 Jahren auf die Hälfte seiner Strahlungsintensität durch natürlichen Zerfall herabsinkt (Halbwertszeit). Von diesen Zerfallprodukten findet gelegentlich die gasförmige Radiumemanation Anwendung, da sie sich, gebunden an aktive Kohle, hoch konzentrieren läßt zu sehr kleinen Strahlern; ihre Halbwertszeit beträgt jedoch nur vier Tage, so daß die Verwendung sofort nach der Herstellung geschehen muß.

In den meisten Fällen benutzt man Präparate von Mesothorsalzen, die billiger, in ihrer Insensität den Radiumstrahlern aber praktisch gleich sind. Sie haben eine Halbwertszeit von etwa 26 Jahren, wobei durch natürlichen Radiumgehalt des technischen Mesothoriums von etwa 30 vH in der ersten Zeit bis zu drei Jahren noch ein Anstieg der Intensität eintritt [46].

Die Präparate werden meist in Mengen von 20 bis 30 mg in der Form einer kleinen Kugel von etwa 1 mm Durchmesser in Glasröhrchen eingeschmolzen, damit die gasförmigen Zerfallsprodukte nicht entweichen können[36]). Für die Durchstrahlung sehr dicker Wände werden auch noch stärkere Strahler bis zu etwa 1000 mg Radiumgleichwert hergestellt.

Wegen der starken physiologischen Wirkung ihrer Strahler dürfen die Präparate nur mit der Zange angefaßt werden: nach Gebrauch sind sie in dicken Bleischutzbehältern aufzubewahren. Auch bei den Aufnahmen werden die Strahler zweckmäßig in geschützten Haltern verwendet. Die sorgfältigste Beachtung der Schutzvorschriften (s. DIN Rönt 8) ist bei allen Arbeiten mit Gammastrahlen unbedingt erforderlich [47].

Durchführung und Leistungsfähigkeit der Gammastrahlenprüfung

2. a) Schattenbildverfahren

Die Erzeugung der Schattenbilder geschieht, wie bei den Röntgenstrahlen, durch Schwächung der Intensität der Gammastrahlen beim Durchgang durch das Prüfstück. Während aber bei ersteren die Schwächung größtenteils durch Absorption erfolgt, fällt diese bei den kurzwelligen Gammastrahlen fast vollkommen fort, so daß praktisch die ganze Schwächung durch Streuvorgänge geschieht.

Die Streustrahlung ist also an sich größer und sollte daher eine starke Bildverschleierung verursachen. Sie wird aber dadurch gemildert, daß sich die Streuung der Gammastrahlen hauptsächlichlich in Richtung des Einfallstrahls vollzieht, während sich diese bei der Röntgenstrahlung viel mehr nach allen Seiten ausbreitet [46] (vgl. Abb. 68). Die Streuung trägt also bei der Gammadurchstrahlung wesentlich zur Bildzeichnung bei.

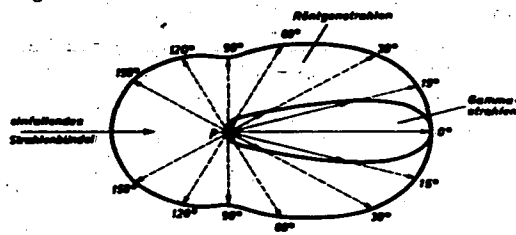


Abb. 68 Räumliche Intensitätsverteilung der Streustrahlen von Röntgen- und Gammastrahlung

[36]) Hersteller: Auergesellschaft A.-G., Berlin.

9688

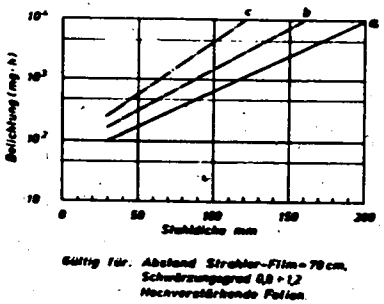


Abb. 69 Belichtungsgrößen für Stahl bei Gammadurchstrahlung

Die geometrischen Aufnahmebedingungen sind die gleichen, wie bei der Röntgenaufnahme; wegen der kleinen Strahlenquelle ist die äußere Unschärfe gering, man kann daher die Präparate allgemein näher an die Prüfstellen heranbringen (wie neuerdings auch bei der Feinfokusröhre).

Die Filmschwärzung ist entsprechend der großen Durchdringungskraft der Gammastrahlen gering, so daß nur schwache Kontraste auftreten. Um diese zu verstärken, verwendet man mitunter zwei doppelt begossene Filme übereinander, auch Verstärkerfolien kommen in Anwendung; durch beide Mittel nimmt natürlich die innere Unschärfe zu.

Die Verstärkerfolien bestehen meist aus dünnem Bleiblech von wenigen Zehntel Millimetern Stärke, in dem sich beim Durchgang der Gammastrahlen durch Comptonstreuung photochemisch wirksame Strahlen bilden. Mit 0,3 mm starken Bleifolien erreicht man 10fache Verstärkung bei einem Film mit beiderseitiger Belegung. Folien aus Kalziumwolframat geben zwar einen Verstärkungsfaktor von etwa 35, sie sollen aber nach Untersuchungen von Briggs [48] bei größeren Wandstärken geringere Zeichenschärfe und Kontraste und damit schlechtere Fehlererkennbarkeit ergeben.

Die Streustrahlenfilter zur Beseitigung des schädlichen Anteils der Streustrahlen bestehen wegen der großen Durchdringungskraft der Gammastrahlen aus Blei und werden entsprechend in größeren Stärken angewendet.

Dickenausgleich bei starken Querschnittsunterschieden ist wegen der geringen Kontrastwirkung der Gammastrahlen im allgemeinen nicht nötig; gegebenenfalls kann er mit ähnlichen Hilfsmitteln wie bei den Röntgenaufnahmen erfolgen.

Die Belichtung bei Gammadurchstrahlung muß wegen der geringen Strahlenintensität sehr lange ausgedehnt werden. Nach Berthold [49] ist die Belichtungsgröße: Milligramm Strahlenmenge mal Belichtungsstunden für Stahl auf Abb. 69 in Abhängigkeit von der Wandstärke dargestellt. Linie *c* gilt für den praktisch meist vorliegenden Fall eines großen Durchstrahlungsfeldes mit Streustrahlen, *b* für das gleiche mit teilweiser Abfilterung dieser durch 1 mm Blei, *c* für eng ausgeblendete Felder (ohne Streustrahlen). Abb. 70 gibt einen Vergleich der Belichtungszeiten für Stahl zwischen Röntgen- und Gammaaufnahmen nach Angaben von Berthold [49]. Die Belichtungsgrößen für andere Werkstoffe können aus den Tabellenwerten durch Umrechnung im Verhältnis der spezifischen Gewichte erhalten werden. Man ersieht daraus die z. T. außerordentlich langen erforderlichen Zeiten, die oft nur dadurch wirtschaftlich tragbar sind, daß sehr viele Prüfstücke gleichzeitig und ohne jede Wartung aufgenommen werden können.

Die Betrachtung der Filme erfolgt in gleicher Weise wie die der Röntgenfilme. Wegen der geringen Schwärzungsunterschiede der Gammaaufnahmen eignet sich dazu besonders das Auroskop[11]), das die Kontraste bei den üblichen doppelt begossenen Filmen zweifach, bei zwei übereinander gelegten vierfach verstärkt.

Die Fehlererkennbarkeit bei Gammadurchstrahlung ist bei kleineren und mittleren Wandstärken geringer als bei großen, wo sie der der Röntgenaufnahmen gleich kommt. Berthold hat unter Verwendung von Drahtstegen als Prüftest Vergleichsversuche durchgeführt, die in Abb. 71 wiedergegeben sind [49]. Für die Erkennbarkeit von Fehlern anderer Art, etwa wie in Abb. 50 verglichen, liegen zahlenmäßige Angaben noch nicht vor. Bei Rissen gelten für deren Auffindung die gleichen Voraussetzungen, wie früher ausgeführt (vgl. Abb. 48).

Anwendungsgebiete

In der Luftfahrttechnik kommen Gammadurchstrahlungen wohl sehr selten vor, da die Wandstärken der verwendeten Konstruktionsteile, z. B. bei den Stahlgußknotenstücken des Flugzeugbaus, meist so schwach sind, daß sie in das Gebiet geringer Fehlererkennbarkeit fallen und besser geröntgt werden, ganz abgesehen von den meist untragbaren Belichtungszeiten. Stärkere Leichtmetallteile, wie Luftschrauben und dergleichen, können ebenfalls noch bequem mit Röntgenstrahlen geprüft werden, so daß allenfalls dicke Schmiedestücke, wie Kurbelwellen, große Getrieberäder und dergleichen in Frage kämen. Bei diesen stark warmverformten Teilen sind aber die auftretenden Fehler so gering, daß sie ganz allgemein bei Durchstrahlungsprüfungen nicht erkannt werden können.

Stahldicke mm		50	75	100	125	150
Röntgen- Durchstrahlung	200 kV	0,5	10	600	—	—
	250 °	—	1,6	40	900	—
Minuten	300 °	—	0,5	8	140	2400
Gamma- Durchstrahlung	Stunden	250	700	1500	3500	6000
Gamma-Strahler Ir	Stunden	~ 6	~ 12	25	80	133

Gültig für: Abstand Strahler – Film = 70 cm, Schwärzungsgrad 0,8 ÷ 1,2, Hochverstärkende Folien, Röhrenstromstärke 10 mA, Strahler – Präparat filmig

Abb. 70 Belichtungszeiten für Stahl mit Röntgen- und Gammastrahlen

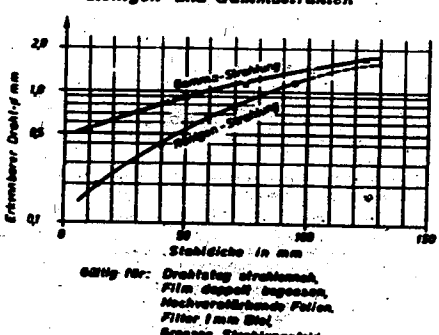


Abb. 71 Fehlererkennbarkeit bei Gammadurchstrahlung

[11]) Vgl. S. 24.

b) Zählrohrverfahren

Die bereits beschriebenen Zählrohre sind in ihrer neuen, verbesserten Ausführung auch für Messungen der Schwächung von Gammastrahlen genügend empfindlich. Hierdurch eröffnen sich neue Anwendungsgebiete der Strahler, besonders für Wandstärkenmessungen in engen Bohrungen, in die man mit der Hohlanodenröntgenröhre nicht hineinkommt. Geeignete Teile wären z. B. im Motorenbau längere Hohlwellen, die auf zentrischen Verlauf der Bohrung geprüft werden sollen, ebenso hohlgebohrte oder geschmiedete Ventilkegel während der Herstellung und fertige Ventile auf genügende Füllung mit Natrium u. a. m. Im Flugzeugbau kann man z. B. Veredelungsbäder, die durch das flüssige Salz allmählich angegriffen werden, bequem auf Wandstärkenveränderungen mit Gammastrahlern und Zählrohr laufend kontrollieren, sogar ohne das Salz auszuschöpfen; man braucht dazu nur den Strahler in ein unten geschlossenes Rohr zu bringen und damit im Bad die Wandungen abzutasten, während das Zählrohr entsprechend an der Außenwand geführt wird.

c) Andere Verfahren

In neuester Zeit ist man auf den Gedanken gekommen, in ähnlicher Weise wie bei der Ölkochprobe Oberflächenfehler durch Eindrücken von radioaktiven Lösungen oder Pasten aufzudecken, die nach Entfernung des Hilfsmittels von der übrigen Oberfläche mit Film oder Zählrohr festgelegt werden. Derartige Versuche haben bereits einige Erfolge gebracht [50], weitere Ergebnisse sind abzuwarten.

Zu b) Feinstrukturuntersuchungen

Während mit der Grobstrukturprüfung auf Grund der verschiedenen Schwächung der Röntgenstrahlen lediglich Dickenunterschiede (Hohlräume, Querschnittsänderungen) oder Dichtenunterschiede (Einschlüsse, Seigerungen) festgestellt werden können, vermag die Röntgenfeinstrukturprüfung über den Werkstoff selbst und seinen Zustand Näheres auszusagen. Man kann damit die chemische Zusammensetzung des Stoffes bestimmen, seinen atomaren Feinbau, Lage und Größe der ihn bildenden Kristallite, den Einfluß verschiedener Kalt- und Warmbehandlungen sowie auch an der Oberfläche des Werkstückes vorhandene Spannungen erster und zweiter Ordnung.

Zum Verständnis dieser vielseitigen Möglichkeiten ist ein kurzer Hinweis auf den inneren Feinbau der Stoffe, insbesondere der Metalle, erforderlich; bezüglich ausführlicherer Unterrichtung muß auf die Fachliteratur verwiesen werden [51], [26], [54].

1. Strukturforschung

Bekanntlich zeigen alle kristallisierbaren Körper, und damit auch die metallischen Werkstoffe, eine streng gesetzliche Anordnung ihrer Feinstbausteine, der Atome, in der Form von regelmäßigen Raumgittern, die auch bei den technischen Verarbeitungsvorgängen im wesentlichen erhalten bleiben bzw. sich zu neuen, gesetzmäßigen Anordnungen umbauen können.

Die Raumgitter der technischen Werkstoffe, besonders der Metalle, sind bereits gut bekannt. Dabei hat sich gezeigt, daß eine Reihe von Metallen nicht nur ein, sondern mehrere verschiedene Raumgitter haben können, die bei bestimmten Temperaturen sich, z. T. unter Platzwechsel der Atome innerhalb der Elementarzelle, ineinander umwandeln. Diese Erkenntnis hat große praktische Bedeutung für das Verständnis gewisser Warmbehandlungen der Metalle. Bei dem Umbau können sich innere Spannungen ausbilden, die die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe grundlegend ändern (Härten, Vergüten). Die bei diesen Umwandlungen auftretenden Änderungen der Netzebenenabstände geben eine Möglichkeit, mittels Röntgenstrahlen die richtige Durchführung solcher Warmbehandlungen nachzuprüfen sowie auch die Größen der dabei auftretenden inneren Spannungen (2ter Ordnung) festzustellen.

2. Spannungsmessung

Außer den „inneren" können auch „äußerlich" aufgebrachte, elastische Spannungen durch die dabei auftretenden Gitterveränderungen festgestellt und in ihrer Höhe gemessen werden. Über Grundlagen, Durchführung und Anwendungsbeispiele auf dem Luftfahrtgebiet vgl. R. Glocker, Röntgenographische Spannungsmessungen, Ringbuch II C 16.

3. Texturuntersuchungen

Werden die auf den Werkstoff aufgebrachten, äußeren Spannungen so hoch, daß sie die elastische Grenze überschreiten und bleibende Verformungen hervorrufen, so treten noch grundlegende Änderungen im Grob- und Feinbau dazu, die mit Feinstrukturuntersuchungen verfolgt werden können. Die Kristallite werden als ganze in der Richtung der Verformung bei Zugbeanspruchung ausgereckt, bei Druck gestaucht. Dabei verdreht sich ihr Raumgitter und lagert sich so um, daß die Kristallachsen sich mehr oder weniger in ganz bestimmte Lagen zur Verformungsrichtung einstellen. Hierdurch tritt eine faserige Anordnung der Kristallite ein, die, in Anklang an die Textilfasern, mit Textur bezeichnet wird und bei der Röntgenprüfung die sog. Texturdiagramme liefert.

Je nach Art der Kaltverformung ist die Ausrichtung der Kristallite verschieden. Während beim Ziehen von Draht und beim Strangpressen sich nur die Achsen der Kristallite gleichrichten, deren Flächen aber noch beliebig um diese herum gedreht liegen (Ziehtextur), stellen sich beim Walzen auch die Kristallflächen in bestimmte Lagen zur Walzebene ein (Walztextur).

Soweit die Verformung bei niederen Temperaturen vor sich geht, tritt durch die verbleibenden elastischen Verspannungen des Gitters (Gitterstörungen) eine allgemeine Verfestigung ein. Infolge der gerichteten Kristallitanordnung ist diese aber nicht gleichmäßig, sondern kann in verschiedenen Richtungen sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften zur Folge haben. Bei hohen Verformungstemperaturen sind die Vorgänge im Grunde gleich, ihre Wirkung wird aber sofort durch Rekristallisation (siehe später) mehr oder weniger aufgehoben; durch längeres Glühen tritt meist restlose Beseitigung der Verformungstextur ein. Es kommt aber auch vor, daß beim Glühen die Ausrichtung der Kristalle teilweise bestehen bleibt (z. B. beim Magnesium und Zink); bei sehr reinen Metallen kann sich sogar eine von der Walztextur unabhängige, neue Rekristallisationstextur bilden [26], S. 341).

Auch bei Gußstücken, besonders in Kokille gegossenen, können Texturen auftreten. Da die Wärme nach dem Guß senkrecht zur Oberfläche der Form abgeführt wird, wachsen die zuerst sich ausscheidenden Kristalle vorwiegend lotrecht nach innen, wodurch am Rand die sog. Stengelkristallisation entsteht. Diese kann die Festigkeit hochwertiger Gußstücke, besonders gegen Dauerbeanspruchungen, erheblich mindern, da an den langen, geraden Korngrenzen der Festigkeitsverband an sich geringer ist und durch hier sich leicht ausscheidende Verunreinigungen noch weiter gelockert wird; auch innerhalb der Stengelkristalle können gleichgerichtete Spaltflächen Brüche einleiten.

In ähnlicher Weise kann auch in galvanisch niedergeschlagenen Metallen Faserteatur mit ihren unangenehmen Folgen entstehen.

Die plastische Verformung, deren Aufklärung hauptsächlich der Röntenfeinstrukturforschung zu verdanken ist, geht zunächst so vor sich, daß sich einzelne Teilstücke der Kristallite in bestimmten Gleitebenen abschieben, meist in denjenigen Netzebenen, die

9690

die dichteste Atombesetzung haben (einfache Gleitung), ohne daß der Festigkeitsverband hierbei verlorengeht. Sind die Gleitmöglichkeiten in diesen Ebenen erschöpft, so treten weitere unter anderen Winkeln mit weniger dichter Atombesetzung hinzu, bis alle Gleitmöglichkeiten ausgenutzt sind und in den überanspruchten Gleitebenen feine Risse auftreten und der Bruch erfolgt.

Die meisten Gleitmöglichkeiten besitzen die kubischen Metalle, worauf deren gute Verformbarkeit beruht; hierbei zeichnen sich wiederum die mit dichtester Atomanordnung, also die flächenzentrierten, besonders aus. Die hexagonalen Kristalle haben weniger Gleitebenen, daher ist z. B. das Zink bei gewöhnlicher Temperatur nicht weitgehend verformbar. Ähnlich ist es beim Magnesium, das zwar zunächst sehr leicht parallel zur Basisebene abgleitet (daher die geringe Streckgrenze), nachher aber wenig neue Gleitebenen (nach der Pyramidenfläche) bildet und sich rasch verfestigt.

Bei einigen Metallen, besonders den hexagonalen, kommt zu dem Vorgang der einfachen Gleitung noch eine weitere Verformungsmöglichkeit hinzu, die „Zwillingsbildung" oder „Schiebung". Hierbei klappen Teile der Kristallite in eine zur bisherigen Stellung symmetrische Lage um. Die Möglichkeiten der Verformung der Zwillingsbildung sind aber geringer aus durch Gleitung.

Die Auslösung der Gleit- und Schiebevorgänge ist temperaturabhängig. Im allgemeinen wird ein Metall mit steigender Temperatur allmählich immer bildsamer; bei hexagonalen Metallen tritt dagegen oft ein scharfer Verformungssprung auf, wie z. B. beim Zink und beim Magnesium, die bei 90 bzw. 225° C plötzlich gut schmiedbar werden, da zur Basisgleitung noch die Pyramidengleitung hinzukommt. Auch durch Umwandlungsvorgänge bei erhöhter Temperatur kann die Verformung erleichtert werden, wie das Beispiel des Eisens zeigt, das bei 906° C vom kubisch-raumzentrierten α-Gitter in das flächenzentrierte γ-Gitter mit erhöhten Gleitmöglichkeiten übergeht.

Korngröße und Rekristallisation. Die Größe der Kristallite spielt für die Festigkeit der Werkstoffe insofern eine Rolle, als der Kristallverband an den Korngrenzen bei normaler Temperatur fester ist als innerhalb des Gitters. Ein feinkörniges Material hat daher im allgemeinen bessere Festigkeitseigenschaften als grobkörniges. Gegossene Metalle weisen meist ein weniger feines Korn auf als plastisch verformte, jedoch können auch die letzteren durch Warmbehandlungen wieder gröber gemacht werden, einmal durch Überhitzung und ferner durch Rekristallisation. Bei der Überhitzung wachsen die vorhandenen Kristallite in ihrer ursprünglichen Orientierung immer weiter, während sich bei der Rekristallisation neue Körner bilden mit gegenüber dem Ausgangszustand geänderter Gitterlage.

Rekristallisation findet statt beim Glühen kalt verformter Metalle, die also mit inneren Spannungen behaftet sind. Je nach der Höhe der vorangegangenen Verformung und der Glühtemperatur kann man entweder gröberes oder feineres Korn als im Ausgangszustand erhalten. Jedes Metall besitzt einen kritischen Verformungsgrad, bei dem die größten Kristalle entstehen, sowie eine kritische Temperatur, bei der die Rekristallisation einsetzt. Man kann hiernach Raumdiagramme [52] (Abb. 72) aufstellen, aus denen man die zur Erzielung eines feinen Korns einzuhaltenden Verformungsgrade und Glühtemperaturen entnehmen kann, oder aber, wenn aus besonderen Gründen grobes Korn gewünscht wird, die dazu nötige Behandlung. Auch hier bietet die Feinstrukturprüfung die Möglichkeit, die Größe des gebildeten Korns zu überwachen.

Durchführung der Feinstrukturprüfung

Die Röntgenfeinstrukturuntersuchungen sind zu den bedingt zerstörungsfreien Prüfverfahren zu rechnen. Es ist zwar in den meisten Fällen möglich, die betreffenden Werkstücke ohne Beeinträchtigung ihrer Verwendbarkeit mittels Rückstrahlverfahren zu untersuchen, jedoch muß man dazu häufig die zu bestrahlende Stelle der Oberfläche etwas abätzen (bis 0,2 mm), um die obersten, gestörten Kristallite zu entfernen. Zuweilen ist es auch nötig, z. B. bei Texturaufnahmen von Blechen und Drähten, ein kleines Stückchen Werkstoff abzuschneiden und hieran die Prüfung nach einem Durchstrahlverfahren vorzunehmen.

Die Aufnahmeverfahren sind zu unterteilen in solche mit mehr- und mit einwelligem Röntgenlicht. Ersteres wird bei den Laue-Aufnahmen verwendet [53], bei denen die Bremsstrahlung einer Wolframanode benutzt wird, die ein Gemisch verschiedener Wellenlängen darstellt. Das für Metalluntersuchungen am meisten angewandte Debye-Scherrer-Verfahren bedient sich der monochromatischen Eigenstrahlung verschiedener Anodenmetalle mit entsprechenden einheitlichen Wellenlängen, wobei gelegentlich jedoch auch Anoden verwendet werden, die daneben noch etwas „weißes" Röntgenlicht abgeben.

Es gibt noch eine Anzahl weiterer Verfahren für Feinstrukturaufnahmen, jedoch kommen diese in erster Linie bei allgemeinen wissenschaftlichen Arbeiten zur Anwendung und brauchen bei der praktischen Werkstoffprüfung nicht berücksichtigt zu werden [28], [55].

Je nach der Art des Verfahrens erzeugen die von den Kristallen abgebeugten Röntgenstrahlen auf den Aufnahmefilmen dunkle Flecken, Kreise oder Linien, die in bestimmten Lagen und Abständen auftreten und scharf oder verwaschen sein können. Aus ihren Abständen lassen sich die Gitterkonstanten und die zugehörigen Kristallsysteme errechnen, aus der Lage die Richtung der Kristallachsen im Probestück. Grobes Korn ergibt wenige, unzusammenhängende Reflexe, während sich diese mit steigender Kornfeinheit zu schärferen Linien zusammenziehen, die sich allerdings bei besonders feinem Korn (unter 10^{-4} mm) wieder etwas verbreitern. Verwaschene Reflexe deuten auf Gitterstörungen infolge innerer Spannungen, z. B. hervorgerufen durch Umwandlungsvorgänge oder durch Kaltverfestigung. Bei stärkerer Kaltverformung entstehen strahlen- oder sichelförmige Verzerrungen der Reflexe, die eine Folge der dabei eintretenden Ausrichtung der Kristalle sind (Texturbilder).

Wie schon vorher bemerkt, besitzt ein Metall nicht immer das gleiche Gitter, sondern kann mitunter verschiedene Atomanordnungen haben. Man kann also durch

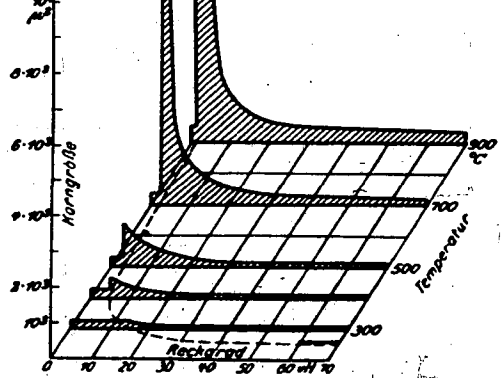


Abb. 72 Rekristallisationsschaubild von Kupfer (nach Hanemann)

Anode Metall	Anode intensivste Eigenstrahlung λ Å	Filter	zu prüfender Werkstoff	verwendet für
Kupfer	1,54	Nickel	Al u. Leg Mg u. Leg Cu u. Leg	alle Aufnahmeverfahren
Kobalt	1,78	Eisen	Fe u. Leg Al u. Leg Cu u. Leg	alle Verfahren Rückstr. Aufnahme
Eisen	1,93	Mangan	Fe u. Leg Cu u. Leg Mg u. Leg	Struktur-Aufn. Durchstrahl.-Aufn.
Chrom	2,29	Vanadin	Fe u. Leg	
Molybdän	0,71	Zirkon	Al u. Leg Fe u. Leg	Textur-Aufn.
Silber	0,56	Palladium	Fe u. Leg Cu u. Leg	Textur-Aufn.

Abb. 73 Wahl der Anoden für verschiedene Werkstoffe

Abb. 74 Feinstrukturröntgengerät

Messung der Gitterkonstanten leicht feststellen, ob der Werkstoff in dem vorgeschriebenen Zustand vorliegt. Weiter werden die Reflexbilder reiner Metalle verändert durch Zulegieren anderer Stoffe, und zwar in verschiedener Weise, je nachdem der Zusatzstoff in feste Lösung geht oder nicht, oder sich intermetallische Verbindungen bilden. So bleibt bei Mischkristallbildung die Anordnung der Linien gewahrt, es ändern sich nur ihre Abstände. Bei Unlöslichkeit treten die Linien beider Komponenten nebeneinander auf, und schließlich entsteht ein ganz neues Gitter bei Bildung einer Verbindung. Diese kann nun wieder, je nach ihrer Löslichkeit in der Grundmasse, deren ursprüngliches Gitter verändern, oder daneben selbständig bestehen bleiben. Aus dem Auftreten und der Intensität dieser zusätzlichen Linien, sowie der Beeinflussung des Ausgangsgitters, kann man also auf die Art und den Aufbau der betreffenden Legierung schließen.

Die Feinstrukturgeräte

Für die Strukturprüfung genügen kleinere Röntgenapparate mit niederen Spannungen bis höchstens 60 kV. Zwecks Vereinfachung ihres Aufbaus verwendet man gewöhnlich Wechselstromhalbwellengeräte ohne besonderen Gleichrichter. Um rasch zwischen mehrwelliger und monochromatischer Strahlung wechseln zu können, ist ein leichter Austausch von Röhren mit verschiedenen Anodenmetallen vorgesehen. Diese Röhren werden meist fertig abgeschmolzen verwendet, es gibt jedoch auch Konstruktionen, bei denen nur die Anode ausgewechselt wird (Seemann-Röhren); sie bedingen aber jedesmaliges Neuauspumpen, was besondere Übung in der Vakuumtechnik erfordert.

Für Laue-Aufnahmen werden neben Wolframanoden auch solche aus Silber oder Molybdän verwendet, die bei geringen Spannungen ebenfalls vorwiegend weißes Röntgenlicht ergeben.

Bei Debye-Scherrer-Aufnahmen muß man die Anoden auf den Werkstoff abstimmen; als Anhalt für die Auswahl geeigneter Anoden nebst Filtern bei der Prüfung verschiedener Werkstoffe möge die Tabelle Abb. 73 dienen.

Ein modernes Feinstrukturgerät für abgeschmolzene Rohren zeigt Abb. 74[12]), links der Schalttisch, rechts der Transformatorkasten mit eingesetzter Vollschutzeinpolröhre. Der Kasten wird stehend oder liegend verwendet; für Spannungsmessungen kann die Röhre herausgenommen und an einem längeren Kabel an das Prüfstück herangebracht werden.

Die Röhrenhaube besitzt vier Ansatzflächen für die Aufnahmekammern mit je einem Fenster, so daß vier Proben gleichzeitig bestrahlt werden können. Drei solcher Kammern für Debye-Scherrer-Aufnahmen zeigt Abb. 75, die obere für Durchstrahlung und Zylinderfilm, die mittlere für Rückstrahlaufnahmen auf schmalem Planfilm und die untere für das Kegelrückstrahlverfahren [54]. Der Filmhalter der Planfilmkammer kann

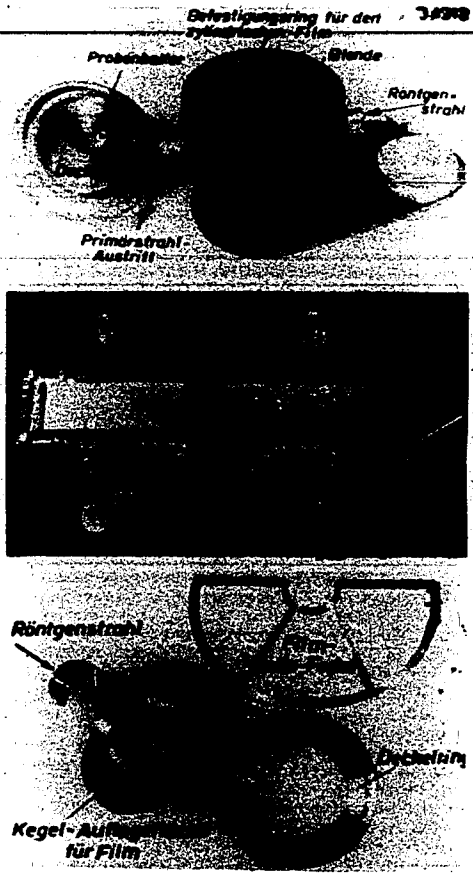


Abb. 75 Feinstrukturaufnahmekammern

[12]) Hersteller C. H. F. Müller A.-G., Hamburg.

9692

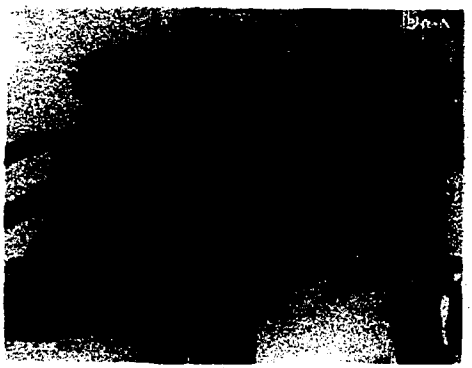


Abb. 76 Rückstrahlaufnahme an Luftschraube

mittels Motorantriebes geschwenkt werden, um mehr Reflexe aufzufangen und dadurch die Ringe genauer ausmessen zu können.

Als Beispiel für Feinstrukturbestimmungen an Bauteilen ist noch in Abb. 76 die Anordnung einer Rückstrahlaufnahme an einem Leichtmetallluftschraubenblatt gezeigt. Die (hier zweipolige) Röhre kann mittels einer Sonderaufhängung in beliebige Lage zum Bauteil gebracht werden; an ihr ist die Aufnahmekammer befestigt, deren Planfilm zur Erzielung zusammenhängender Kreise bei dem etwas grobkörnigen Werkstoff gedreht wird.

Um den ganzen umständlichen Prozeß der photographischen Aufnahme und der Reflexwinkelberechnung zu ersparen, kann man, in Vervollkommnung der bereits von Bragg angewandten Messung der Reflexe mit der Ionisationskammer, die abgebeugten Strahlen mit dem empfindlichen Zählrohr auffangen und damit nicht nur den Glanzwinkel, sondern auch die Intensität der Reflexe in einfachster Weise bestimmen [45]. Am leichtesten geschieht dies, wie aus Abb. 77 zu erkennen ist, indem man das auf die Probe als Mittelpunkt gerichtete Zählrohr um diese langsam herumschwenkt. Auf einer Kreisteilung kann man dann ablesen, wann ein Reflex in das Zählrohr gelangt und seine Intensität an der Höhe des erzeugten Stromstoßes erkennen. Es ist zu erwarten, daß diese neu aufgegriffene, sehr erhebliche Vereinfachung bald weiter ausgearbeitet und auch für die Rückstrahlmethode anwendbar gemacht wird.

Praktische Anwendung und Leistungsfähigkeit der Feinstrukturprüfung

Trotz sehr weiter Erkenntnisse für die betriebliche Beurteilung der Werkstoffe, die die Feinststrukturuntersuchung vermittelt [56], hat ihre praktische Verwendung noch nicht die Verbreitung gefunden, die ihr zukommt. Es liegt dies z. T. an der Neuheit des Verfahrens, teils aber auch an einer gewissen Scheu der Werkstoffprüfer vor den etwas trocken und schwierig erscheinenden kristallographischen Betrachtungsweisen, die ihnen meist ziemlich fern liegen.

Für die praktische Abnahme ist es jedoch selten erforderlich, umständliche Rechenarbeiten vorzunehmen; in den meisten Fällen genügt es, die gemachten Aufnahmen einfach zu vergleichen mit Normalbildern, die man sich von einwandfreien und fehlerhaften Werkstoffen seines Arbeitsgebietes anfertigen kann. Derartige Vergleichsaufnahmen sind auch bereits veröffentlicht [57], [58], ferner sind zahlreiche Bilder in den Metallfachzeitschriften zu finden (vgl. auch [59]); auch von den Firmen für Röntgengeräte sind entsprechende Aufnahmen leicht erhältlich[13]). Weiterhin sind die staatlichen Röntgeninstitute gern bereit, die Industrie bei der Durchführung der Prüfungen zu beraten[14]).

Natürlich muß der Werkstoffmann die wichtigsten Grundlagen der Feinstrukturprüfung kennen, um die Aufnahmen beurteilen und gegebenenfalls entsprechende Maßnahmen treffen zu können. Hierzu soll ihm die vorangegangene, aus obigen Gründen etwas eingehender gehaltene Einführung eine Hilfe sein.

Aus der Fülle der Anwendungsmöglichkeiten der Feinstrukturprüfung im Luftfahrzeugbau seien nur einige Beispiele angeführt, die meist ohne Probenahme und ohne Gitterberechnungen durchführbar sind. Zum Teil sind sie bereits in Gebrauch, z. T. laboratoriumsmäßig erprobt. Sie sind nicht nur in den wissenschaftlichen Abteilungen größerer Werke durchführbar, sondern lassen sich vielfach auch bereits in den Abnahmestellen verwenden. Oft kommt man auch mit anderen Prüfmethoden zum Ziel, vielleicht zunächst auch noch wirtschaftlicher. Es werden sich aber, wie bei allen neuen Verfahren, mit wachsender Anwendung und Vervollkommnung immer mehr Fälle finden, wo die röntgenographische Prüfung unersetzlich ist.

a) Strukturaufnahmen

1. Prüfung der Zusammensetzung

Zur Nachprüfung von angeliefertem Werkstoff sowie bei vorgekommenen Verwechslungen, kann an einer kleinen Probe in der Debye-Scherrer-Kammer, oder auch bei Bauteilen durch Rückstrahlaufnahmen, der Legierungstypus rascher festgestellt werden, als durch die chemische Prüfung.

Beispiele:

Unterscheidung von Halbzeug aus Aluminium und -legierungen, auch an Bauteilen, z. B. fertig bezogenen Brennstoffbehältern aus Reinaluminium, Pantal, Hydronalium oder dergleichen (Abb. 78).

Feststellung des Werkstoffes an Rohrleitungen: Kupfer, Bronzen oder verschiedenen Messingsorten (Abb. 79).

Weniger geeignet ist die Strukturprüfung zur Unterscheidung der technisch verwendeten unlegierten und legierten Baustähle, da durch den Einfluß der vielen, gleichzeitig vorhandenen Mischkristallbildner nicht ohne

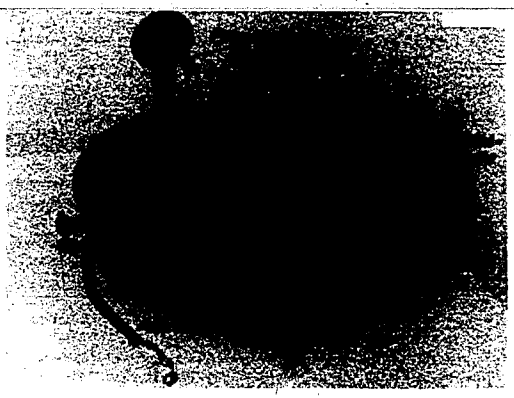


Abb. 77 Goniometer zur Bestimmung der Reflexwinkel mittels Zählrohr

[13]) Einige der beigefügten Aufnahmen verdanke ich der Freundlichkeit der Firma C. H. F. Müller, Berlin.

[14]) Einzelne Bilder hat dankenswerterweise Herr Prof. E. Schiebold, Mineralogisches Institut und Röntgenabteilung an der Universität Leipzig, zur Verfügung gestellt.

9693

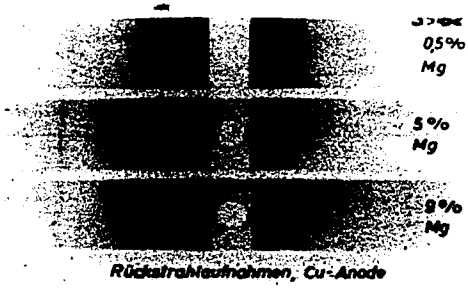


Abb. 78 Al Mg-Legierung, geglüht

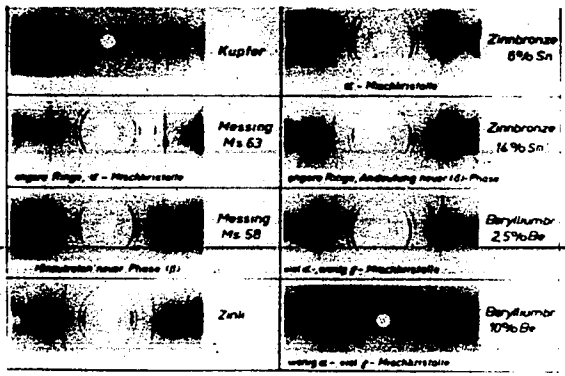


Abb. 79 Kupferlegierungen. Durchstrahlaufnahme, kreisförmig gebogener Film. Cu-Anode 40 kV, 6 mA. Belichtung 45 Minuten

weiteres aus der Gittergröße auf den gesuchten Zusatz geschlossen werden kann.

Trennung von hochlegierten ferritischen und halbferritischen Sonderstählen, austenitische kann man bereits mit dem Magneten erkennen.

Feststellung der Art von Fremdeinschlüssen an der Oberfläche (Schlacken, Lötflickstellen usw.), von stärkeren Seigerungen oder anderen örtlichen Gefügeänderungen (z. B. durch Temperaturschweißungen, Schleifbrand und dergleichen).

Prüfung von metallischen und anderen anorganischen Schutzüberzügen auf Art und Zusammensetzung.

Untersuchung von Korrosionsprodukten zur Klärung der Angriffsursachen.

2. Korngröße

Diese ist z. B. von Einfluß auf die Kaltverarbeitbarkeit (Ziehen, Treiben usw.), die möglichst feines Korn erfordert. Auch bei Bauteilen, die hoch auf Dauerfestigkeit beansprucht werden, setzt Grobkörnigkeit diese merklich herunter, ferner begünstigen oft große Kristalle die Korrosion.

Die Korngröße ist zwar einfacher durch Ätzung der Oberfläche festzustellen, jedoch werden manche Werkstoffe dabei beizspröde; außerdem kann die Dauerfestigkeit durch die Kerbwirkung der Beiznarben leiden. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich auch, bei etwaigem Anätzen von Bauteilen zur Vorbereitung von Feinstrukturaufnahmen diese Stellen nachher wieder fein zu polieren.

Beispiele:

Hauber, Kappen und dergleichen für den Flugzeugbau, die durch Tiefziehprozesse stark verformt werden sollen: Ausscheidung von grobkörnigem Material, entweder unter Entnahme einer kleinen Probe (Abb. 80), oder mittels Rückstrahlverfahren.

Feinkörnigkeitskontrolle von fertig bearbeiteten Schmiedestücken, insbesondere aus Leichtmetall, wie Luftschraubenwurzeln, hochbelastete Lagerbügel und dergleichen.

3. Warmbehandlungen

Hier liegt ein besonders großes Feld für die Strukturprüfung. Besonders bei den Leichtmetallen mit ihrer weitgehenden Beeinflußbarkeit der Festigkeitseigenschaften durch Glühen, Warm- und Kaltaushärten, Anlassen und dergleichen hat ja erst die Feinstrukturforschung Licht in den ursprünglichen Wirrwarr der Erscheinungen gebracht. Auch die Warmbehandlungen von Stählen und anderen Schwermetallen können durch Strukturprüfungen verfolgt werden.

Beispiele:

Überwachung von aushärtbaren Leicht- und Schwermetallegierungen (z. B. Duralumin, Elektron, Cuprodur, Berylliumbronze usw.) auf den vorgeschriebenen Vergütungszustand (Abb. 81, 82)[13]).

Untersuchung von Bauteilen, die durch betriebsmäßige oder zufällige Erhitzung geschädigt sein können, z. B. im Motorbetrieb zu hoch erwärmte Gußteile aus Silumin-Gamma; durch Vergaserbrand erhitzte Motorträger aus Duralumin; Hydronaliumteile, deren Korrosionsbeständigkeit durch Erwärmen gefährdet wurde usw.

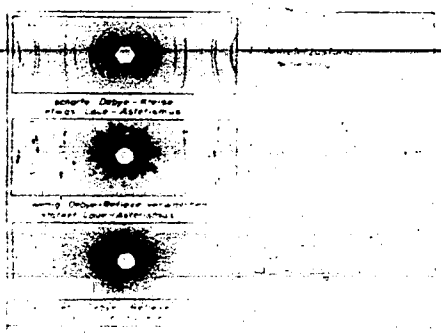


Abb. 80 Reinaluminium. Durchstrahlaufnahme, kreisförmig gebogener Film. Kombinationsdiagramme. Cu-Anode ohne Filter, 40 kV, 6 mA. 45 Minuten

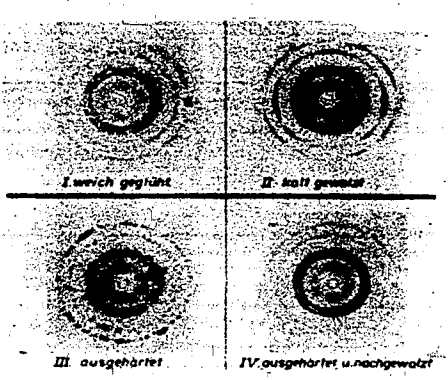


Abb. 81 Al-Mg-Si-Legierung, Flw. 3355. Durchstrahlmethode. Planfilm. Pantalblech nach verschiedener Vorbehandlung. Durchstrahlaufnahmen mit Cu-Anode 70 kV, 12 mA, 30 Minuten

[13]) Abb. 82 verdanke ich Herrn Dr. Siebel, I. G.-Bitterfeld, ferner die Photos zu Abb. 88 und 89.

9691

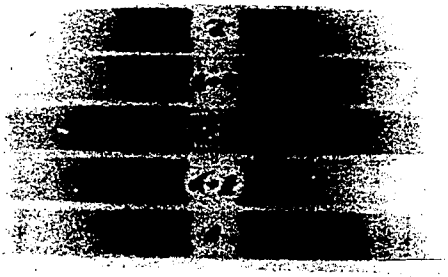


Abb. 82 Al-Mg-Legierung, Ausscheidungsvorgänge beim Anlassen. Rückstrahlaufnahme, Planfilm Al-Mg-Legierung 9,8 vH Mg

α	*homogenisiert:*	*α-Mischkristall*
$\alpha + \beta$	*angel. 4 Std. 218° C:*	*β-Phase tritt auf*
$\alpha + \beta$	*angel. 6 Std. 218° C:*	*α und β gleich stark*
$\alpha + \beta$	*angel. 7 Std. 218° C:*	*β stärker als α*
β	*angel. 24 Std. 218° C:*	*Stabile Endphase*

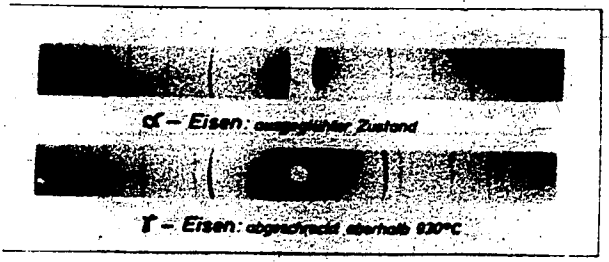


Abb. 83 Weicher Stahl, Linienunterschied zwischen α- und γ-Zustand. Durchstrahlaufnahme, kreisförmig gebogener Film

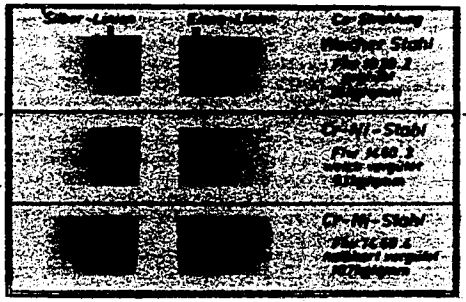


Abb. 84 Baustähle, geglüht und vergütet. Rückstrahlaufnahmen, Planfilm. Unlegierter und legierter Stahl nach verschiedener Warmbehandlung. Mit Eichstoff Silber aufgenommen

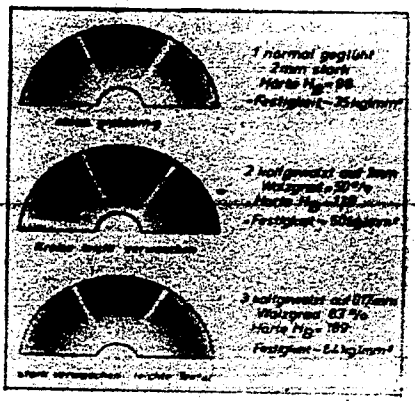


Abb. 85 Weicher Stahl, Einfluß des Kaltwalzens. Kegel-Rückstrahlaufnahmen Flw. 1030 Aufnahme Co-Strahlung

Nachprüfung fertiger Stahlteile, ob geglüht, vergütet oder gehärtet, soweit andere, einfachere Prüfmethoden (Härteprüfung) wegen Beschädigung der Oberfläche nicht angewendet werden können; Kontrolle von Schweißungen, ob nachgeglüht (Abb. 83). Feinere Unterschiede in der Warmbehandlung, besonders verschiedener Anlaßstufen, sind bei vergüteten Baustählen allerdings wegen Verwischens der Linien schlecht zu erkennen (Abb. 84).

4. Innere und äußere Spannungen.

Der Nachweis und die Messung von Spannungen in Werkstoffen und Bauteilen ist eines der wichtigsten Anwendungsgebiete der Röntgenfeinstrukturuntersuchungen geworden.

Die Grundlagen und die Durchführung des Verfahrens sind bereits ausführlich dargelegt von R. Glocker Stuttgart in Ringbuch II C 16 mit Beispielen über die Bestimmung von inneren Spannungen in Bauteilen. Über die Messung von zusätzlichen äußeren Spannungen mittels Röntgenstrahlen zur Nachprüfung von Bauteilen auf Belastbarkeit soll in vorliegender Arbeit unter Kapitel G. Elastische Prüfung, noch später gesprochen werden.

Einzugehen ist hier noch auf die Möglichkeiten der Überwachung der Werkstoffe selbst und ihrer Verarbeitung auf Grund der Beeinflussung der Gitter durch innere Spannungen.

Ihre Entstehung ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen; sie können bereits beim Gießen der Metalle auftreten, bei der Kalt- und z. T. auch bei der Warmverformung, bei den verschiedenen Warmbehandlungen und schließlich bei Zusammenfügungsarbeiten, wie Schweißen, Löten und dgl. Ihre Höhe wird mitunter so groß, daß die Stücke reißen oder doch Restspannungen verbleiben, die bei den Betriebsbeanspruchungen festigkeitsvermindernd wirken. Die Kenntnis der inneren Spannungen nach Größe und Richtung ist daher besonders wichtig bei den hochbeanspruchten Bauteilen der Luftfahrt. Man kann sogar die inneren Spannungen in Sonderfällen zur Festigkeitssteigerung ausnutzen, indem man künstliche Vorspannungen erzeugt, die entgegengesetzt zur Betriebsspannung gerichtet sind (z. B. durch Oberflächendrücken).

Die inneren Spannungen machen sich zunächst durch örtliche Gitterstörungen bemerkbar, die zu verwaschenen Linien führen, deren Breite z. B. qualitative Rückschlüsse auf die Höhe einer vorangegangenen Kaltverformung zulassen. Werden die Mikrospannungen sehr groß, so haben sie auch Makrospannungen zur Folge, die ganze Gitterebenen in ihrem Abstand beeinflussen und Durchmesseränderungen der Ringe bewirken, aus denen die Höhe dieser Spannungen zahlenmäßig berechnet werden kann.

Beispiele:

Nachprüfung bei Blechkonstruktionen, ob Ausgangsmaterial geglüht oder kaltverformt (Abb. 85).

Unterscheidung von schlußgehärteten und patentiert gezogenen Stahldrähten; erstere zeigen sehr stark verwaschene Ringe, letztere erheblich schärfere, bei denen auch Dubletts noch zu erkennen sind.

Aufdeckung von Schweißspannungen zur Klärung von Schweißrissen [Ringbuch II C 16], [54].

9695

Abb. 86 Al-Cu-Guß. ~ 12 vH Cu. ~ 0,5 vH Mg. Rest Al. Ungeordnete und Stengelkristallisation. Kegelrückstrahlaufnahme. Unterscheidung zwischen Sand- und Kokillenguß

Abb. 87 Reinaluminium, kalt verfestigt und geglüht

Feststellung von inneren Spannungen in vergüteten Bauteilen, z. B. bei Stählen, die nicht gleichmäßig durchhärten, sowie auch bei stärkeren Leichtmetallteilen.

So zeigten eigene röntgenographische Oberflächenuntersuchungen eines Duraluminluftschraubenflügels an der Wurzel im geglühten Zustand zunächst keine Eigenspannungen, während nach dem Vergüten Druckvorspannungen bis über 20 kg/qmm gefunden wurden.

Das absichtliche Aufbringen von Vorspannungen durch Oberflächenverfestigung kann ebenfalls an Linienverwaschungen und -verschiebungen erkannt werden.

b) Texturaufnahmen

1. Gußtextur

Gerichtete Kristalle an der Oberfläche können die Dauerbiegefestigkeit ungünstig beeinflussen.

Beispiele:

Texturkontrolle der Böden von Kokillengußkolben; diese sollen möglichst ungeordnete Kristallite aufweisen, da sie durch die rasch wechselnden Wärmestöße hoch beansprucht sind (Abb. 86).

2. Recktextur

Die Texturaufnahmen ermöglichen eine Abschätzung des Grades der Verfestigung durch stärkere Verformung und weisen auf unerwünschte Ordnung der Kristallite hin bei solchen Halbzeugen oder Bauteilen, die hoch in verschiedenen Richtungen beansprucht werden sollen. Bei vorwiegend in einer Richtung beanspruchtem Werkstoff kann die einseitige Verfestigung auch von Vorteil sein (z. B. Drähte, Profile, Luftschraubenblätter).

Beispiele:

Nachprüfung des Kaltverfestigungsgrades von Leichtmetall- und anderen Blechen, Stangen und Drähten (Abb. 87), Feststellung, ob Festigkeitssteigerung durch Kaltverformung oder Aushärtung erzielt wurde (Abb. 81).

Überwachung des Oberflächenrollens bei Bauteilen an Stellen hoher Beanspruchung; die dabei etwa auftretenden Texturflecken sind auch beim Nachschleifen noch bis zu einer gewissen Tiefe festzustellen [54].

Nach Regler [54, 60] sollen auch an bereits länger wechselnd belasteten Bauteilen Schaulinien durch überelastische Beanspruchungen erkennbar sein, die sich ebenfalls durch den beginnenden Übergang aus dem ungeordneten Kristallzustand in den geordneten bemerkbar machen. Eine Nachprüfung dieser Angaben wäre für die Überwachung höchst beanspruchter Flugzeug- und -Motorenteile nach längerem Betrieb von größter Bedeutung.

Besonders aufschlußreich sind Texturuntersuchungen bei den hexagonalen Metallen, wie Magnesium und Zink, bei denen wegen des stark anisotropen Verhaltens ihrer Kristallite sich deren Ausrichtung besonders ungünstig auf die Festigkeitseigenschaften in verschiedenen Richtungen auswirkt. Wegen der beschränkten Gleitmöglichkeiten verfestigen sich die hexagonalen Kristalle viel stärker und richten sich viel stärker aus, als die kubischen, und es treten daher bei geringer Verformung schon erhebliche Texturen auf. Dementsprechend sind hier auch die Kontrollmöglichkeiten auf die Verarbeitungsarten viel besser [61], [62], [63].

Abb. 88 zeigt z. B. solche Aufnahmen an Elektronmetall mit Preßtexturen[16]).

Das normal gepreßte Material hat wegen der starken Basisorientierung eine erheblich tiefere Quetschgrenze, (12 bis 14 kg/qmm) gegenüber der Streckgrenze (20 bis 22 kg/qmm). Um diesen Unterschied auszugleichen, können besondere Preßverfahren angewendet werden [61].

Bei gewalzten Blechen ist der Orientierungseffekt besonders groß, da sich die Kristallite mit ihrer Basis nicht nur in Walzrichtung, sondern auch noch parallel zur Blechoberfläche einstellen. Durch Glühen der Bleche tritt nur eine teilweise Aufhebung der Orientierung ein, so daß die Walztextur praktisch erhalten bleibt (Abb. 89)[17]); hierdurch treten recht unterschiedliche Festigkeitswerte zwischen Längs- und Querrichtung auf, die der Konstrukteur beachten muß.

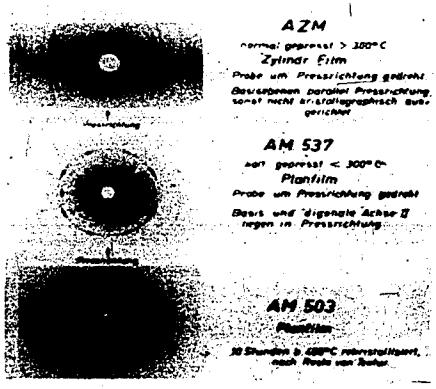


Abb. 88 Magnesiumlegierungen, Preßtexturen. Elektronpreßmaterial in verschiedenem Anlieferungszustand. Cu-Strahlung

[16]) Siehe Note [15]) S. 36.
[17]) Siehe Note [15]) S. 36.

9693

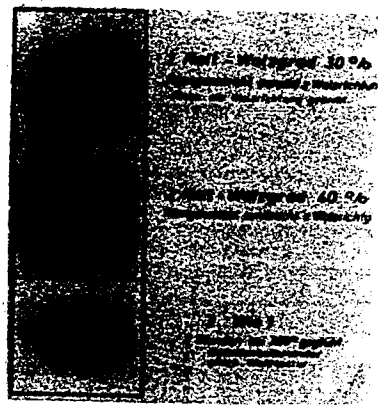


Abb. 89 Mg-Legierung Flw. 3501. Elektron AM 503. Walzblechtexturen. Kalt gewalzt und geglüht. Cu-Strahlung, Filmabstand 40 mm

Auch beim Schmieden von Magnesiumlegierungen stellen sich diese Richtungseffekte ein, so daß deren Einflüsse auf die Gütewerte ebenfalls zu berücksichtigen sind; ihre Kontrolle durch Texturaufnahmen trägt daher sehr zur Erhöhung der Sicherheit bei.

Schließlich kann die Feinstrukturprüfung noch bei nichtmetallischen, anorganischen Baustoffen, wie keramischen Produkten (z. B. Zündkerzenisolierungen) sowie bei organischen, wie Textilstoffen, Dichtungspapieren, Leder, Gummi, Kunstharzen usw., die ebenfalls im Luftfahrzeugbau Verwendung finden, wertvolle Vergleichsmöglichkeiten und Aufschlüsse geben, auf die aber hier nicht mehr eingegangen werden kann [64], [65].

Zusammenfassung

Der erste Teil der Folge „Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung" umfaßt die praktisch vollkommen zerstörfreien, physikalischen Prüfverfahren, die auch in weiteren Ingenieurkreisen unter diesem Namen bekannt sind und die wichtigsten Prüfverfahren für die Betriebe darstellen. Sie führen hauptsächlich zur Aufdeckung allgemeiner Fehler der Oberfläche und des Inneren an Halbzeugen und Bauteilen aus den verschiedensten Werkstoffen. Es sind dies: die optischen, akustischen, elektrischen, magnetischen und die Röntgenverfahren, für die z. T. Sondergeräte geschaffen wurden, um auch außerhalb des physikalischen Laboratoriums von angelernten Kräften Reihenuntersuchungen durchführen zu können.

Über die Kosten der zerstörungsfreien Prüfmethoden sei noch auf einen Aufsatz von W. E. Schmid hingewiesen [66].

Mit der in den ersten Teil mit einbezogenen Röntgenfeinstrukturprüfung beginnt der Übergang zu den Prüfverfahren, *mit denen die physikalischen und Struktureigenschaften der Werkstoffe selbst festgestellt werden*; allerdings sind diese nicht immer ganz zerstörungsfrei, die Prüfteile bleiben aber noch verwendbar.

In einer weiteren Folge sollen noch die physikalischen Prüfungen der Metalle auf ihre allgemeinen Festigkeits- und Gefügeeigenschaften durch bedingt zerstörungsfreie Verfahren behandelt werden sowie auch Spannungsmessungen an fertigen Bauteilen. Anschließen sollen sich dann die chemischen, ebenfalls nicht vollkommen zerstörungsfreien Prüfungen, soweit sie außerhalb des Laboratoriums durchgeführt werden können.

Wegen der derzeitigen Lage muß die Herausgabe dieser Teile noch verschoben werden, die vorliegenden Prüfmethoden geben aber einen gewissen Abschluß über die wichtigsten Verfahren für die Fabrikation, um bei den höchstwertigen Teilen des Luftfahrzeugbaus eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten.

Schrifttum

[1] K. Wernicke, Anforderungen an die Beleuchtung bei der Prüfung und Bearbeitung von Metallen. Metallwirtschaft, Bd. 16 (1937), Nr. 33, S. 818 bis 819.

[2] G. Schmaltz, Technische Oberflächenkunde. Verlag Springer, Berlin 1936.

[3] The Iron Age, 8. Dezember 1938, S. 30—35.

[4] E. Hiedemann, Verfahren und Ergebnisse der Ultraschallforschung. Z. VDI. (1936), S. 581—586. E. Hiedemann, Sichtbarmachung von Ultraschallwellen und Ultraschallstrahlen." Z. „Die Umschau" (1938), Heft 38, S. 859—863.

[5] G. Masing, Zur Frage des Automaten-Aluminiums. Z. f. Metallkunde (1936), S. 293—296.

[6] O. Mühlhäuser, Verfahren zur Zustandsbestimmung von Werkstoffen, besonders zur Ermittlung von Fehlern darin. DRP 569 598, Kl. 42 k, Gruppe 2003.

[7] L. Bergmann, Der Ultraschall. VDI.-Verlag 1937, S. 165.

[8] E. Meyer und G. Buchmann, Über einfache Werkstoffprüfungen mit magnetostriktiven Ultraschallgeräten. Akustische Zeitschrift (1938), Mai, S. 132 ff.

[9] F. Förster und W. Köster, Elastizitätsmodul und Dämpfung. Z. f. Metallkunde (1937), S. 109—123.

[10] F. Kruse, Zur Werkstückprüfung mittels Ultraschalls. Dissertation T. H. Hannover 1937, Verlag J. C. Erhardt, Springe.

[11] Nondestructive Testing. Trans. Am. Soc. for Steel Treating, Bd. 16 (1929), S. 771.

[12] R. W. Koch, Materialprüfstelle der U. S. Luftwaffe. Reviews American Physical Society, Bd. 17, 2, (1935), S. 326.

[13] R. M. und W. M. Thornton, Inst. Mech. Eng. (1939), s. a. Stahl und Eisen (1939), Heft 8, S. 225.

[14] Die Gießerei (1938), Heft 26, S. 675.

[15] H. Lange, Über ein magnetisches Verfahren zur Prüfung des Vergütungszustandes fertiger Werkstücke. Stahl und Eisen (1939), Heft 16, S. 493, und Mitteilungen Kaiser-Wilhelm-Institut für Eisenforschung, Bd. 21 (1939), Lfg. 6, S. 105—113.

[16] R. Berthold, Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren. Verlag J. A. Barth, Leipzig.

[17] R. Berthold und W. Schirp, Ein neuartiges Stoßgerät für Serienprüfung nach dem Magnetpulververfahren. Maschinenschaden, Bd. 15 (1938), S. 137—141.

[18] W. Schirp, Das Magnetpulververfahren und seine praktische Bedeutung. Deutsche Luftfahrtforschung, Z. W. B., *UM-Bericht Nr. 512.*

[19] H. Hänsel, Die Fehlererkennbarkeit bei der magnetischen zerstörungsfreien Prüfung. Archiv f. Eisenhüttenwesen, Bd. 11 (1937/38), Heft 10, S. 497 bis 502, Gruppe E, Nr. 653.

[20] E. A. W. Müller, Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung nach dem Magnetpulververfahren. Siemens-Zeitschrift, Bd. 18 (1938), Heft 5.

[21] J. Staebler, Untersuchung von Schweißnähten mittels der magnetischen Werkstoffprüfung. Autogene Metallbearbeitung, Bd. 31 (1938), Heft 24, S. 393—398.

9697

[22] W. Kolb, Ein Hilfsmittel zur Wiedergabe magnetischer Prüfbefunde. Der Maschinenschaden (1939), Nr. 1, S. 1–6.

[23] O. Holtschmidt, Eigenartige Erscheinungen bei der magnetischen Werkstoffprüfung. VDI-Zeitschrift, 17. Juli 1937, S. 882—884.

[24] E. Hemmerling, Bewährung und Grenzen der Magnetpulverprüfverfahren im Schiff- und Schiffsmaschinenbau. Stahl und Eisen (1939), Heft 33, S. 937—943.

[25] H. Schrader, Über praktische Erfahrungen in der Anwendung der Magnetpulververfahren zur Rißprüfung. Lilienthal-Gesellschaft f. Luftfahrtforschung, Bericht 116.

[26] R. Glocker, Materialprüfung mit Röntgenstrahlen. Verlag Springer, Berlin, 1936.

[27] DIN Rönt 5, 6 und 8.

[28] E. A. W. Müller, Hohlanode für die Röntgendurchstrahlung. Archiv f. Eisenhüttenwesen (1936/37), Heft 10, S. 481—483.

[29] R. Berthold, Der Einfluß geometrischer Bedingungen auf die Güte von Röntgenschattenbildern. Archiv f. Eisenhüttenwesen (1938), Heft 12, S. 597 bis 602.

[30] R. Berthold, Riehl und Vaupel, Untersuchungen an Röntgenleuchtschirmen. Z. f. Metallkunde (1935), Heft 3, S. 63—65.

[31] v. Eckartsberg, Juretzek und Mantel, Anwendungsbeispiele der Röntgendurchstrahlung aus dem Stahlgießereibetrieb. Archiv f. Eisenhüttenwesen (1938/39, Heft 11, S. 565—569.

[32] R. Berthold, Unterrichtsblatt der Reichs-Röntgenstelle Berlin-Dahlem.

[33] R. Berthold, Verbesserung der Aufnahmen mit Röntgen- und Gammastrahlen durch Schwermetallfilter. Archiv f. Eisenhüttenwesen (1934/35), Heft 1, S. 21—24.

[34] E. A. W. Müller, Zweckmäßige Aufnahmebedingungen bei der Röntgenprüfung. Archiv f. Eisenhüttenwesen (1936/37), Heft 6, S. 267—273.

[35] E. A. W. Müller, Belichtungsdiagramme für die Werkstoffdurchstrahlung und ihre Anwendung. Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen, Bd. 56 (1937), Heft 5.

[36] Kantner und Herr, Röntgenverfahren zur räumlichen Ausmessung von Fehlstellen in Werkstoffen. Z. VDI. (1929), Nr. 24, S. 811—816.

[37] H. W. Greenwood, Light Metal Tomographie. Light Metal, London (1938), Dezember, S. 390—393.

[38] W. Schmitz und W. Wiebe, Möglichkeiten der Leuchtschirmphotographie für die Röntgengrobgefügeuntersuchung. Stahl und Eisen (1940), Heft 20, S. 423—426.

[39] R. Berthold und N. Riehl, Über ein neues Verfahren zur Betrachtung von Röntgenaufnahmen. Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen, Bd. 54 (1936), Heft 4.

[40] R. Berthold, Die physikalischen Grundlagen der Röntgenprüfung. Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren. Verlag J. A. Barth, Leipzig.

[41] E. A. W. Müller und W. E. Schmid, Über die Fehlererkennbarkeit und die Aufstellung von Belichtungsschaubildern in der Materialdurchstrahlung mit Röntgenstrahlen. Z. techn. Physik (1936), Nr. 6, S. 190—197.

[42] A. Trost, Ionisationskammer und Zählrohr. Aus Berthold, Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren.

[43] A. Trost, Betriebsmäßige Wanddickenmessung mit Röntgenstrahlung und Zählrohr. Stahl und Eisen (1938), Heft 25, S. 668—670.

[44] W. Müller und H. Geiger, Phys. Z. (1928), S. 839.

[45] A. Trost, Technische Zählrohre für Grob- und Feinstrukturuntersuchungen. Metallwirtschaft (1939), Heft 32, S. 687—689.

[46] R. Berthold und N. Riehl, Grundlagen der Werkstoffprüfung mit Gammastrahlen. Z. VDI. (1932), Nr. 17, S. 401—406.

[47] W. Friedrich und W. Noethling, Die Verhütung von Strahlenschädigungen bei Werkstoffprüfungen mit Mesothor und Radium. Z. VDI. (1936), Nr. 15, S. 437.

[48] Briggs und Gezelius, Vortrag Am. Soc. Test. Mat. Referat H. Möller, Stahl und Eisen (1938), Nr. 40, S. 1096.

[49] R. Berthold, Die physikalischen Grundlagen der Gammadurchstrahlung. Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren.

[50] H. F. Kaiser, Verwendbarkeit radioaktiver Stoffe bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Am. Soc. Test. Mat., Oktober 1938. Referat H. Möller, Stahl und Eisen (1939), Nr. 6, S. 168.

[51] F. Rinne, Die Kristalle als Vorbilder des feinbaulichen Wesens der Materie. Verlag Gebr. Borntträger, Berlin 1921.

[52] P. Siebe, Rekristallisation des Kupfers. Werkstoff-Handbuch Nichteisenmetalle, D 10/11.

[53] E. Schiebold, Die Laue-Methode. Akad. Verlagsges., Leipzig 1932.

[54] F. Regler, Die Bedeutung der röntgenographischen Feinuntersuchungen für die Abnahme. Anzeiger für Maschinenbauwesen, Essen, Sonderteil „Die Abnahme" (1938), Nr. 7 und 8, (1939) Nr. 1.

[55] E. Schiebold, Röntgenoskopie difformer und disperser Systeme. Kolloid-Zeitschrift, Bd. 69, Heft 3, 1934.

[56] G. Sachs, Praktische Metallkunde, Bd. 1—3. Verlag Julius Spinger, Berlin 1935.

[57] J. D. Hanawalt, Chemical analyses by X-ray-diffraction. Industrial and Engineering Chemistry (Analytical Edition), Bd. 10 (1938), Nr. 9, S. 457 bis 512).

[58] E. Schiebold, Atlas für Feinstrukturaufnahmen. Nach persönl. Mitteilung. In Vorbereitung.

[59] G. Wassermann, Texturen metallischer Werkstoffe. Verlag Julius Spinger, Berlin 1939. Daselbst zahlreiche Literaturhinweise.

[60] R. Regler, Verformung und Ermüdung metallischer Werkstoffe im Röntgenbild. Forschungsarbeiten über Metallkunde und Röntgenmetallographie, Folge 26. Verlag Carl Hauser, München 22.

[61] G. Siebel und W. Schmid, Kristallstruktur und praktische Werkstoffgestaltung am Beispiel des Elektronmetalls. Z. Metallkunde (1933), Heft 10, S. 229—236.

[62] A. Beck, Magnesium und seine Legierungen. Verlag Julius Springer. Berlin 1939.

[63] Fr. Wohlbank, Verformungstexturen von Zinklegierungen und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Werkstücken. Z. Metallkunde (1939), Heft 8, S. 249—257.

[64] W. G. Burgers, Praktische Anwendung der Röntgenographischen Materialuntersuchungen. Philips technische Rundschau, Eindhoven (1936), Heft 1 bis 8 und 12, (1937), Heft 1, 3, 5, und 8.

[65] Strukturbericht Bd. I—III, 1913—1935. Z. f. Kristallographie, Akad. Verlagsges., Leipzig.

[66] E. Schmid, Kosten der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Maschinenbau (1937), S. 519—522.

Abgeschlossen am 30. November 1939.

9698