

FORSCHUNGSZENTRUM DER LUFTFAHRTINDUSTRIE

Lehrschriften für die Berufsausbildung und Qualifizierung

Ing. Heinz Hauthal

ZERSTÖRUNGSFREIE WERKSTOFFPRÜFUNG

Als Manuskript gedruckt

Mit der Herausgabe beauftragt:

ZENTRALSTELLE FÜR LITERATUR UND LEHRMITTEL

Dresden 1961

Gutachter: Dipl.-Ing. Günter Arndt
Bearbeiter: Dipl.-Gwl. Rudolf Küster

Bestell-Nr. 7233

Als Manuskript gedruckt 1961

Nachdruck, Reproduktion und Nachbildung
— auch auszugsweise —
nur mit Genehmigung des Verfassers
und der Zentralstelle für Literatur und Lehrmittel
im Forschungszentrum der Luftfahrtindustrie
Dresden N 2, Postschließfach 40

III-9-266 IG 63 1161 25 1,5

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Eindringverfahren	2
1.1. Ölkochprobe	2
1.2. Farbdiffusionsprüfung	3
1.3. Fluoreszenzprüfung	3
2. Magnetpulverprüfung	4
2.1. Grundlagen	5
2.2. Magnetisierungsverfahren	6
2.2.1. Polmagnetisierung	6
2.2.2. Stromdurchflutung	7
2.2.3. Kombinierte Verfahren	10
2.3. Magnetpulver und Prüfüle	10
2.4. Durchführung der Prüfung	11
2.5. Entmagnetisierung	13
2.6. Prüfgeräte	14
2.7. Sonderverfahren	15
3. Prüfung mit Röntgen- und Gammastrahlen	16
3.1. Röntgendurchstrahlung	16
3.1.1. Wirkungsprinzip	16
3.1.2. Erzeugung der Röntgenstrahlen	16
3.1.3. Schwächung der Röntgenstrahlen	18
3.1.4. Streustrahlung und Streustrahlenfilter	20
3.1.5. Anfertigung von Röntgen-Filmaufnahmen	21
3.1.6. Erzielbare Bildgüte	24
3.1.7. Beurteilung der Bildgüte	26
3.1.8. Röntgendurchleuchtung	26
3.1.9. Röntgengeräte	28
3.1.10. Strahlenschutz	32
3.2. Gammadurchstrahlung	34
3.2.1. Strahlenquellen	34
3.2.2. Wesen und Herstellung radioaktiver Isotope	34
3.2.3. Arten radioaktiver Strahlen	35
3.2.4. Verhalten radioaktiver Strahlen beim Durchdringen von Körpern	35
3.2.5. Kenngrößen der Gammastrahler	36
3.2.6. Unterschied zwischen Röntgen- und Gammastrahlung	37
3.2.7. Strahlenquellen für die technische Gammadurchstrahlung	38
3.2.8. Aufnahmetechnik	39
3.2.9. Isotopen-Arbeitsbehälter	40
3.2.10. Vor- und Nachteile der Gammadurchstrahlung	42
3.2.11. Strahlenschutz	43
4. Ultraschallprüfung	44
4.1. Entwicklung	44
4.2. Grundlagen	44
4.2.1. Wesen des Ultraschalls	44
4.2.2. Reflexion und Durchlässigkeit	45

4.2.3.	Fehlererkennbarkeit	46
4.2.4.	Wellenarten	47
4.2.5.	Erzeugung des Ultraschalls	48
4.2.6.	Ausbreitung des Ultraschalls	49
4.2.7.	Ankopplung von Ultraschallschwingern	50
4.3.	Durchschallungsverfahren	50
4.3.1.	Piezoelektrische Intensitätsmessung	51
4.3.2.	Ultraschallsichtverfahren	55
4.4.	Impuls-Echo-Verfahren	59
4.4.1.	Wirkungsprinzip	59
4.4.2.	Fehlernachweisempfindlichkeit	60
4.4.3.	Oberflächenbeschaffenheit des Prüflings	61
4.4.4.	Wahl der Prüffrequenz	61
4.4.5.	Arbeitsweise von Impuls-Echo-Geräten	62
4.4.6.	Wahl des Meßbereichs	63
4.4.7.	Auftreten von Nebenechos	63
4.4.8.	Schrägeinstrahlung	64
4.4.9.	Schallgeschwindigkeitsmessung mit Interferometer	67
4.4.10.	Gerätetypen	68
4.4.11.	Magnetostriktive Anregung von Ultraschallimpulsen	70
4.4.12.	Schnittbildverfahren	71
4.4.13.	Qualifikation der Ultraschallprüfer	72
5.	Induktive Prüfverfahren	74
5.1.	Grundlagen	74
5.2.	Tastspulenverfahren	76
5.2.1.	Messung der elektrischen Leitfähigkeit	76
5.2.2.	Messung der Dicke von Korrosionsschutzschichten	76
5.3.	Durchlaufspulenverfahren	78
5.3.1.	Prüfung ferromagnetischer Werkstoffe	79
5.3.2.	Prüfung nichtferromagnetischer Werkstoffe	81
Literaturverzeichnis		84
Bildnachweis		85
Sachwörterverzeichnis		86
Veröffentlichungen		87

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Technik und der wachsenden Anwendungsbreite moderner technologischer Fertigungsverfahren werden die Anforderungen, die an die zur Verarbeitung kommenden Werkstoffe gestellt werden, immer größer. Das hat zur Folge, daß der Wunsch, Werkstoffe und Werkstücke zerstörungsfrei zu prüfen, mehr und mehr in den Vordergrund rückt. So ist es nicht verwunderlich, daß die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung in den letzten drei Jahrzehnten einen rapiden Aufschwung verzeichnen konnte und sich in der modernen industriellen Fertigung einen festen Platz erobert hat.

Die herkömmlichen Methoden der Werkstoffprüfung, die nach wie vor ihre Berechtigung behalten werden, geben mehr oder weniger direkt über Festigkeit, Härte, Zusammensetzung oder Gefügezustand eines Werkstoffs Auskunft. Bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung zieht man in der Regel aus dem Verhalten des Werkstoffs gegenüber physikalischen Einflüssen verschiedenster Art Rückschlüsse auf den Werkstoffzustand. Die Fortschritte in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wurden daher in der Hauptsache durch die Verfeinerung der physikalischen Meßtechnik ausgelöst. Abgesehen von den klassischen zerstörungsfreien Prüfmethoden - der Magnetpulverprüfung und der Röntgendurchstrahlung - wurden in letzter Zeit neue Verfahren, die vorwiegend auf akustischen, elektrischen und magnetischen Grundlagen beruhen, zur technischen Reife entwickelt und in die Fertigungstechnik eingeführt. Auch die in jüngster Zeit stark in den Vordergrund getretenen Verfahren zur technischen Gammadurchstrahlung von Werkstücken mit Hilfe radioaktiver Isotope sind in diesem Zusammenhang zu erwähnen.

Die vorliegende Schrift verfolgt die Absicht, die einzelnen Verfahrensarten im Zusammenhang so darzustellen, daß die Auswahl geeigneter Untersuchungsmethoden erleichtert wird. Sie soll dazu beitragen, der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung weitere Einsatzmöglichkeiten zu erschließen. Das ist in der Mehrzahl der Fälle mit einer Rationalisierung der Fertigung und einer Qualitätssteigerung des Enderzeugnisses verbunden. Die Ausarbeitung soll ferner häufig noch vorhandene Unklarheiten über den Anwendungsbereich und die Anwendungsgrenzen der einzelnen zerstörungsfreien Prüfverfahren beseitigen helfen.

1. Eindringverfahren

Der einwandfreie Nachweis von Oberflächenfehlern, wie Risse und Poren, durch die visuelle Betrachtung einer Werkstückoberfläche ist nur dann gewährleistet, wenn es sich um gröbere Fehler handelt. Feine Haarrisse und mikroporöse Stellen lassen sich selbst mit einer Lupe nur sehr schwer, meistens aber überhaupt nicht feststellen.

Für die Oberflächenprüfung magnetisierbarer Werkstücke wird bereits seit Jahrzehnten die **Magnetpulverprüfung** angewandt. Die zuverlässige und rationelle Prüfung nichtferromagnetischer Werkstoffe blieb jedoch längere Zeit ein nur unbefriedigend gelöstes Problem. Wohl stand die **Ölkochprobe** zur Verfügung, die aber wegen ihres beträchtlichen und zeitraubenden Aufwands nur ungern angewendet wurde.

Eine entscheidende Änderung brachte das Aufkommen moderner Eindringverfahren, die auch als Diffusions- oder Penetrierverfahren bezeichnet werden. Man unterscheidet im wesentlichen zwei Methoden:

- die **Farbdiffusionsprüfung** und
- die **Fluoreszenzprüfung**.

Die Eindringverfahren zeichnen sich durch vielfältige Anwendungsmöglichkeiten aus. So lassen sich mit ihrer Hilfe Schmiede- und Preßteile sowie Gußstücke und Schweißnähte vor oder nach der Bearbeitung auf Oberflächenfehler prüfen. Ihr Einsatz ist nicht von der Werkstoffart abhängig. Rißanfällige nichtmetallische Werkstücke, z.B. Keramiken, sind einer solchen Prüfung ebenso zugänglich wie ferromagnetische, bei denen wegen komplizierter Form oder anderer Schwierigkeiten die Magnetpulverprüfung nicht angewendet werden kann. Voraussetzung ist, daß die nachzuweisenden Fehler Hohlstellen - Risse, Poren usw. - sind, die mit der Oberfläche des Werkstücks in Verbindung stehen. Eindringverfahren können als selbständige Prüfmethoden oder ergänzend zu anderen Verfahrensarten der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt werden.

1.1. Ölkochprobe

Bei der Ölkochprobe, auch unter dem Namen **Kalkmilchprobe** bekannt, werden die zu prüfenden Teile 20 bis 30 min lang in Öl gekocht, das dabei in vorhandene Risse oder Poren eindringt. Danach werden die Prüflinge sauber abgewischt und durch Eintauchen in eine Schlammkreide-Spiritus-Aufschwemmung mit einer dünnen Schlammkreideschicht überzogen. In einem Ofen oder auf andere Art werden die Teile erwärmt, so daß der Spiritus verdampft und die Schlammkreide als weißer Überzug zurückbleibt. Gleichzeitig schwitzt das in die Fehlstellen eingedrungene Öl durch das Erwärmen aus und bildet auf der weißen Schlammkreideschicht, von der es aufgesogen wird, eine markante dunkle Fehleranzeige. Da sich das heraustretende Öl mit der Zeit ausbreitet, sind die Fehlstellen spätestens nach einstündiger Lagerung mit Farbstift einzukreisen.

Das Kochen in Öl und das Entfernen der Ölrückstände von der Werkstückoberfläche ist zeitraubend und unbequem, so daß dieses Verfahren heute nur noch von untergeordneter Bedeutung ist.

1.2. Farbdiffusionsprüfung

Bei diesem Verfahren wird eine rote Flüssigkeit mit einer außerordentlich geringen Oberflächenspannung, das Prüfröt, auf die zu prüfende Werkstückoberfläche mit einem Pinsel aufgetragen. Das Prüfröt dringt unter dem Einfluß der Kapillarkwirkung in vorhandene Risse oder Poren ein. Nach einer Einwirkzeit von etwa 10 min wird die Oberfläche des Prüflings von überschüssigem Farbstoff befreit und mit einem Entwickler bestrichen, der in der Regel aus der Aufschwemmung eines saugfähigen Pulvers - Kieselgur, Schlammkreide, Magnesiumoxyd o.ä. - in einer leicht flüchtigen Flüssigkeit besteht. Der Entwickler bildet nach dem Verdunsten der flüssigen Komponente eine dünne Pulverschicht, die das in die Oberflächenfehler eingedrungene Prüfröt wieder herausaugt und so den Verlauf vorhandener Fehler auf weißem Grund gut sichtbar darstellt. Die Wirkungsweise der Farbdiffusionsprüfung ist in Bild 1.1 schematisch dargestellt. Das Bild zeigt die Prüfstelle vor der Prüfung (a), nach dem Aufbringen der Prüfflüssigkeit (b), nach dem Entfernen überschüssiger Prüfflüssigkeit (c) und nach dem Auftragen des Entwicklers (d).

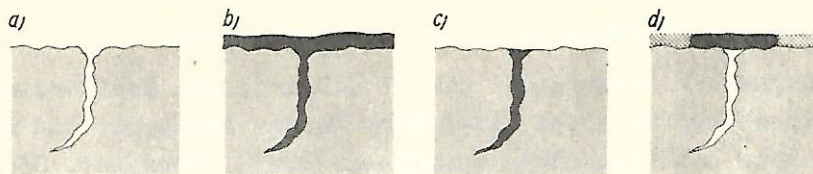


Bild 1.1 Farbdiffusionsprüfung

Das Farbdiffusionsverfahren ist in der Hauptsache zur Durchführung von Einzelprüfungen an rißverdächtigen Werkstücken geeignet. Es kann vorzüglich an eingebauten Teilen angewendet werden, soweit die zu prüfenden Flächen von außen zugänglich sind. Die Prüfmethode läßt bei einiger Übung des Prüfers an Hand der Breite des entstehenden Farbflecks, die von der aus den festgestellten Fehlern herausgesaugten Prüfflüssigkeitsmenge abhängig ist, eine grobe Abschätzung des Fehlervolumens zu. In Bild 1.2 (Seite 9) sind Risse an einem Nietloch abgebildet, die mit Hilfe der Farbdiffusionsprüfung sichtbar gemacht wurden.

1.3. Fluoreszenzprüfung

Das Wirkungsprinzip der Fluoreszenzprüfung ist dem der Farbdiffusionsmethode sehr ähnlich. Nur wird hier statt der Farblösung ein Prüfföl verwendet, das unter der Einwirkung ultraviolettten Lichts zum Fluoreszieren, d.h. zum Leuchten angeregt wird. Der Fluoreszenzeffekt wird entweder durch Beimischen fluoreszierender Farbstoffe zum Prüfföl erzielt oder durch Verwendung von Mineralölen, die von Natur aus eine Eigenfluoreszenz besitzen, wenn sie mit ultravioletttem Licht bestrahlt werden.

Das Prüfföl wird mit einem Pinsel auf die zu prüfende Werkstückoberfläche aufgetragen. Nach einer Einwirkzeit von etwa 10 bis 15 min ist die überschüssige Prüfflüssigkeit durch Abwischen zu entfernen und eine Entwicklerlösung aufzu-

tragen, die der bei der Farbdiffusionsmethode verwendeten entspricht. Die dünne Pulverschicht, die sich nach dem Verdunsten der Entwicklerflüssigkeit bildet, saugt das in die vorhandenen Oberflächenfehler eingedrungene Prüföl wieder heraus. Das Werkstück wird dann in einem verdunkelten Raum unter dem Ultraviolettlicht einer Quarz-Quecksilberdampflampe betrachtet. Der Lampe ist ein Schwarzfilter vorgeschaltet, das den gesamten sichtbaren Anteil des Lichts absorbiert und nur die UV-Strahlen passieren läßt. Die vom Entwicklerpulver aufgesogene Prüfölschicht beginnt hierbei intensiv zu leuchten, so daß sich die vorhandenen Fehlstellen markant von der dunklen Umgebung abheben. Bild 1.3 (Seite 9) zeigt einen Leichtmetallkolben, an dem mit Hilfe der Fluoreszenzprüfung Ermüdungsrisse festgestellt worden sind.

Bei der beschriebenen Handhabung des Verfahrens ist das Entfernen des überschüssigen Prüföls durch Abwischen recht umständlich. Das tritt besonders dann in Erscheinung, wenn eine Serienprüfung erfolgen soll oder die Werkstücke von komplizierter Form sind. Es ist daher nach Wegen gesucht worden, die Werkstückoberfläche auf einfachere Art von dem anhaftenden Prüföl zu befreien. Wird z.B. dem Prüföl ein Emulgator beigemischt, der es wasserlöslich macht, so kann das Werkstück mit Wasser abgespült werden. Bei der Verwendung solcher Prüföle spielt sich der Prüfungsvorgang in der Regel wie folgt ab:

Das zu prüfende Werkstück wird für 10 bis 15 min in einen Behälter mit Prüföl getaucht, nach dem Abtropfen unter fließendem Wasser abgespült und dadurch das an der Oberfläche der Werkstücke anhaftende Prüföl entfernt. Die in vorhandene Risse und Poren eingedrungene Prüfölschicht verbleibt darin, da das Wasser wegen seiner höheren Oberflächenspannung dort nicht eindringt. Das Entwicklerpulver wird bei dieser Verfahrensweise in Wasser aufgeschwemmt und der Prüfling unmittelbar nach dem Abspülen kurz in die Entwicklersuspension eingetaucht. Nach dem Trocknen in einer Trockenvorrichtung, am besten in einem Warmluftstrom, kann das Werkstück unter einer UV-Lampe betrachtet werden. Diese Art der Fluoreszenzprüfung eignet sich besonders gut zur Serienprüfung kleinerer Teile. Eine für diesen Zweck gebaute Prüfanlage ist in Bild 1.4 (Seite 9) dargestellt. Hier ist auf der linken Seite der Tauchbehälter mit dem Prüföl angeordnet. Rechts daneben befinden sich der Waschtrog und der Entwicklerbehälter. Hinter dem Waschtrog ist der elektrisch beheizte Trockenschrank zu erkennen, neben und über dem sich einige Abtropfstöße befinden. Das Prüfteil ganz rechts ist mit einer UV-Lampe und Vorhängen zum Abdunkeln ausgerüstet.

2. Magnetpulverprüfung

Die Magnetpulverprüfung beruht auf Arbeiten von W. E. HOOKE und A. V. DE FOREST, denen bereits im Jahre 1922 bzw. 1929 Patente auf entsprechende Verfahren erteilt wurden.

Die Magnetpulverprüfung eignet sich vorzüglich zum Nachweis von Oberflächenrissen, die beim Schleifen, beim Härten sowie bei Dauerbeanspruchung von ferromagnetischen Maschinenteilen entstehen können. Ebenso lassen sich Überschmiedungen, Schrumpfrisse in Stahl und Guß sowie andere bei der Herstellung

und Bearbeitung des Werkstoffs entstehende Werkstofftrennungen feststellen, soweit sie an oder dicht unter der Oberfläche liegen.

2.1. Grundlagen

Die Magnetpulverprüfung beruht darauf, daß die Homogenität eines in einem magnetisierbaren Werkstück erzeugten Magnetfelds durch Risse, Lunker usw. gestört wird. An der Fehlstelle entsteht ein Streufeld, das aus der Werkstückoberfläche heraustritt. Es hält Teilchen eines in einem dünnflüssigen Öl aufgeschwemmten magnetisierbaren Pulvers fest, mit dem das Werkstück überspült wird. Dadurch bildet sich eine Pulverraupe, die dem Verlauf der Werkstofftrennung folgt und sie somit sichtbar macht.

Die in einem ferromagnetischen Körper unter dem Einfluß einer magnetischen Feldstärke H erregte magnetische Induktion B folgt der Beziehung

$$B = \mu \cdot H .$$

B magnetische Induktion (Kraftliniendichte)	$\frac{Vs}{cm^2}$ $1 \text{ Gauß} = 1 \text{ G} = 10^{-8} \frac{Vs}{cm^2}$
H magnetische Feldstärke	$\frac{A}{cm} \quad \left(\frac{Aw}{cm} \right)$ $1 \text{ Oerstedt} = 1 \text{ Oe} = \frac{1}{1,256} \frac{A}{cm}$
μ Permeabilität (magnetische Durchlässigkeit)	$\frac{Vs}{A \cdot cm}$

Aus der Beziehung geht hervor, daß die magnetische Induktion bei konstanter erregender Feldstärke mit wachsender magnetischer Durchlässigkeit steigt. Mit anderen Worten: Die von einer gegebenen Feldstärke hervorgerufene magnetische Induktion ist in einem Körper hoher Permeabilität größer als in einem solchen geringerer Permeabilität. Das bedeutet, daß die magnetische Induktion in einem ferromagnetischen Werkstück an einer mit einem nichtferromagnetischen Medium - Luft, Schlacke usw. - ausgefüllten Werkstofftrennung gestört wird. Da die Permeabilität in nichtferromagnetischen Stoffen in der Regel gleich 1 und damit viel kleiner als in dem umgebenden Werkstoff ist, werden die Kraftlinien im Bereich des Fehlervolumens gleichsam verdrängt. Sie streuen um den Fehler herum und treten, sofern sich die Werkstofftrennung an oder dicht unter der Oberfläche befindet, aus dem Werkstück heraus. Die Streuung magnetischer Kraftlinien im Bereich von Fehlstellen an oder dicht unter der Oberfläche ferromagnetischer Werkstoffe zeigt Bild 2.1 (s.S.6)

- an einem Oberflächenriß, der senkrecht zur Richtung der Kraftlinien verläuft,
- an einem unter der Oberfläche liegenden Riß, der senkrecht zur Richtung der Kraftlinien verläuft,
- an einem unter der Oberfläche liegenden Riß, der parallel zur Richtung der Kraftlinien liegt.

Die Lage der nachzuweisenden Werkstofftrennungen zur Richtung der magnetischen Kraftlinien hat einen wesentlichen Einfluß auf die Ausbildung des

Streifelds. Das Streifeld tritt dann am stärksten in Erscheinung, wenn der Werkstofffehler die Kraftlinien im rechten Winkel schneidet. Liegt die Fehl-

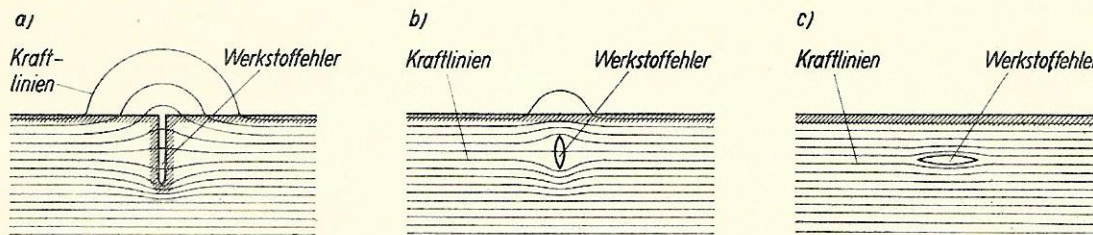


Bild 2.1 Streuung magnetischer Kraftlinien im Bereich von Fehlstellen

stelle parallel zur Kraftlinienrichtung, so wird das magnetische Feld kaum gestört. Die Werkstücke sind deshalb so zu magnetisieren, daß die induzierten Kraftlinien möglichst quer zur Richtung der zu erwartenden Werkstofffehler verlaufen.

2.2. Magnetisierungsverfahren

Für die Magnetisierung werden verschiedene Verfahren angewendet. Sie lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen:

die Polmagnetisierung und die Stromdurchflutung.

2.2.1. Polmagnetisierung

Bei der Polmagnetisierung treten magnetische Kraftlinien von außen in den Prüfkörper ein und aus ihm wieder heraus. Der Prüfling wird, bezogen auf die

Ein- und Austrittsstelle der Kraftlinien, in Längsrichtung magnetisiert, so daß sich diese Magnetisierungsart zum Nachweis von Querrissen eignet.

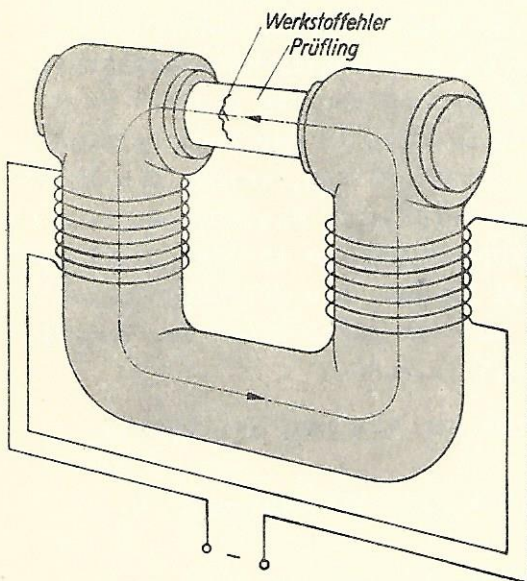


Bild 2.2 Jochmagnetisierung

Die verbreitetste Form der Polmagnetisierung ist die Jochmagnetisierung. Das Werkstück liegt zwischen den Polen eines Elektromagnets, dessen Spulen im allgemeinen mit Gleichstrom gespeist werden (Bild 2.2), und bildet einen Teil des magnetischen Kreises.

Die Anwendung der Jochmagnetisierung wird dann schwierig, wenn sich ein Werkstück wegen seiner Größe oder komplizierten Form nicht auf ein entsprechendes Prüfgerät als Joch eines Elek-

tromagnets aufbringen läßt. In solchen Fällen wendet man die S p u l e n - m a g n e t i s i e r u n g an, bei der eine mit Gleich- oder Wechselstrom gespeiste Spule über den Prüfling geschoben wird. Das Feld der Spule induziert im Werkstück einen magnetischen Fluß, dessen Kraftlinien in Richtung der Spulenachse verlaufen (Bild 2.3).

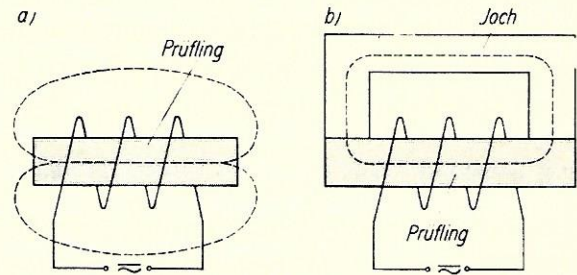


Bild 2.3 Spulenmagnetisierung

Im allgemeinen Fall sind die magnetischen Kraftlinien bei der Spulenmagnetisierung gezwungen, sich von den Enden des Werkstücks aus über die Luft zu schließen (a). Dabei entstehen starke Streufelder, die zu einer Verschlechterung der Fehleranzeige führen und somit den Wirkungsgrad des Verfahrens stark herabsetzen. Eine Verbesserung der Verhältnisse erzielt man, wenn der magnetische Kreis außerhalb der Spule über ein Joch geschlossen wird (b).

Die bei der Polmagnetisierung in einem Werkstück erregte magnetische Induktion, die maßgebend für die erzielte Fehlererkennbarkeit ist, hängt über die Permeabilität von der erregenden Feldstärke ab. Die Feldstärke \mathcal{H} einer Spule ist nun aber dem Produkt aus Windungszahl n und Strom I direkt proportional:

$$\mathcal{H} \sim n \cdot I .$$

Man beurteilt daher die Leistungsfähigkeit von Geräten, die der Polmagnetisierung von Werkstücken dienen, nach ihrer Ampèrewindungszahl (Aw), die bei modernen Geräten je nach Verwendungszweck in der Größenordnung von etwa 10 000 bis 20 000 Aw liegt.

Die Höhe der Ampèrewindungszahl, die für die Erregung der notwendigen Induktion im Werkstück aufgewendet werden muß, ist im praktischen Prüfbetrieb von mannigfaltigen Faktoren abhängig. Im wesentlichen sind es der Querschnitt, die Form und der Werkstoff des Prüflings sowie Erhöhungen des magnetischen Widerstands durch Luftspalte zwischen dem Werkstück und den Polen des Elektromagnets, die für die Wahl des Erregerstroms maßgebend sind. Es läßt sich daher nicht ohne weiteres vorausberechnen, welche Ampèrewindungszahl für die Magnetpulverprüfung eines gegebenen Werkstücks erforderlich ist. Neben der Erfahrung des Prüfers ist die mit Hilfe eines speziellen Testkörpers (vgl. Abschn. 2.4.) erzielte Anzeige für die Wahl des Erregerstroms maßgebend. Sehr verbreitet ist auch die "Büroklammerprobe", bei der die für die Prüfung erforderliche Induktion dann als erreicht betrachtet wird, wenn eine Büroklammer unter der Einwirkung der magnetischen Kräfte an dem Werkstück hängenbleibt.

2.2.2. Stromdurchflutung

Bei der Stromdurchflutung wird durch das Werkstück selbst ein starker Strom geschickt, der je nach Querschnitt des Prüflings bis zu mehreren tausend Ampère betragen kann. Es wird hierzu in der Regel Wechselstrom verwendet, der

sich in diesen hohen Stromstärken leicht mit Hilfe von Hochstromtransformatoren erzeugen läßt.

Um einen stromdurchflossenen Leiter bildet sich ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien den Leiter konzentrisch umgeben. Dieser Effekt wird bei der Stromdurchflutung, die in der beschriebenen Form auch *Selbstdurchflutung* genannt wird, zur Magnetisierung des zu prüfenden Werkstücks ausgenutzt. Die unter der Einwirkung des Stroms entstehenden, in sich geschlossenen Kraftlinien konzentrieren sich auf Grund der hohen Permeabilität ferromagnetischer Werkstoffe in der Hauptsache im Werkstück selbst und bewirken eine Magnetisierung, die quer zur Stromrichtung verläuft und somit den Nachweis von *Längsrisse*n gestattet (Bild 2.4).

Eine andere Magnetisierungsart, die ebenfalls zur Gruppe der Stromdurchflutung gehört, ist die *Hilfsdurchflutung*. Sie wird an Werkstücken angewendet, die die Form von Hohlzylindern besitzen. Bei diesem Verfahren wird ein Leiter, der zweckmäßigerweise aus einem Stück Rundkupfer besteht, durch das Werkstück hindurchgesteckt. Durch diesen Hilfsleiter wird ein hoher Wechselstrom geschickt, der ein konzentrisches Magnetfeld aufbaut, das sich vorzugsweise im Werkstück konzentriert. Mit dieser Prüfmethode lassen sich Längsrisse und außerdem radial verlaufende Fehler an der Stirnseite des Prüflings feststellen (Bild 2.5). Kurze Werkstücke können hintereinander auf den Hilfsleiter aufgereiht und gleichzeitig geprüft werden.

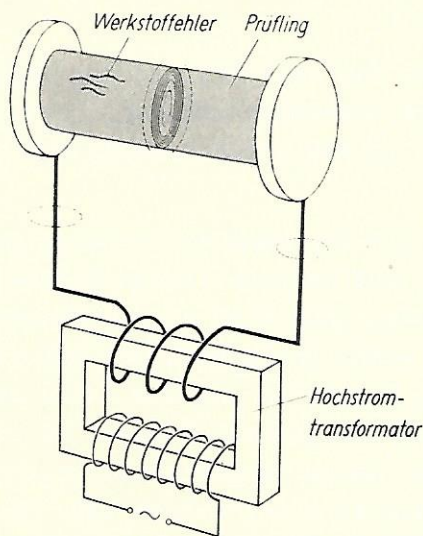


Bild 2.4 Selbstdurchflutung

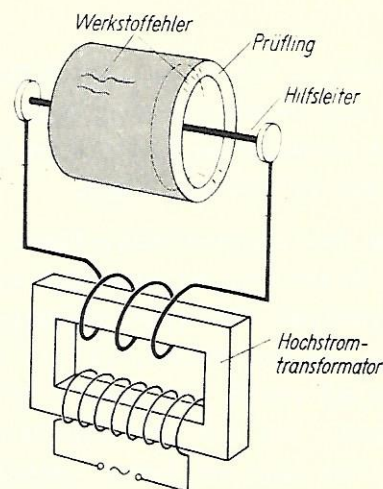


Bild 2.5 Hilfsdurchflutung

Bei der Stromdurchflutung läßt sich keine feste Abhängigkeit zwischen Prüfstrom und der im Werkstück erzielten Induktion angeben. Die günstigste Stromstärke muß mit Hilfe von Testkörpern oder der Büroklammerprobe ermittelt werden. Für die Prüfung zylindrischer Teile kann als grober Richtwert für die Höhe des Stroms I in Ampère der zehnfache Durchmesser D des Prüflings in mm angesehen werden:

$$I \approx 10 \cdot D .$$

Dieser Wert schwankt von Werkstoff zu Werkstoff und ist nur für die Verwen-

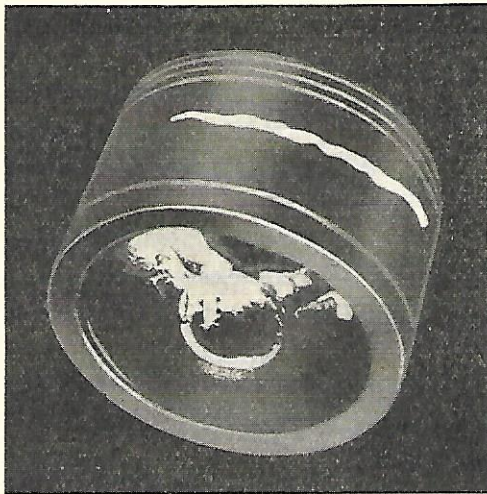


Bild 1.3 Ermüdungsrisse an einem Leichtmetallkolben

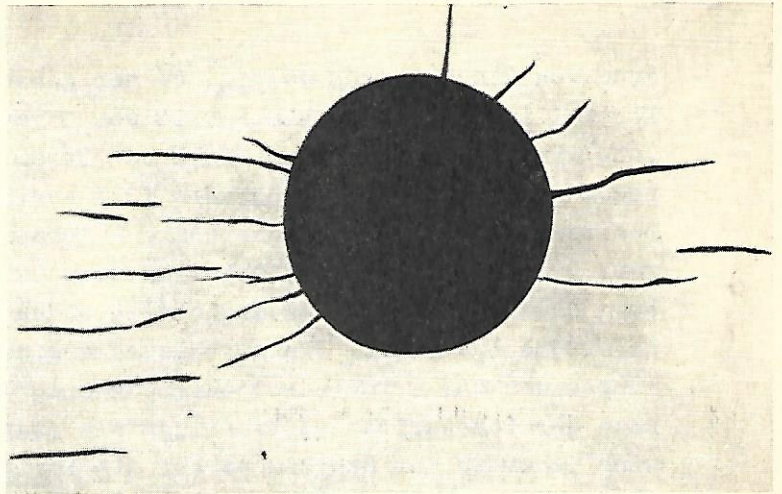


Bild 1.2 Risse an einem Nietloch



Bild 1.4 Anlage für das Fluoreszenzverfahren

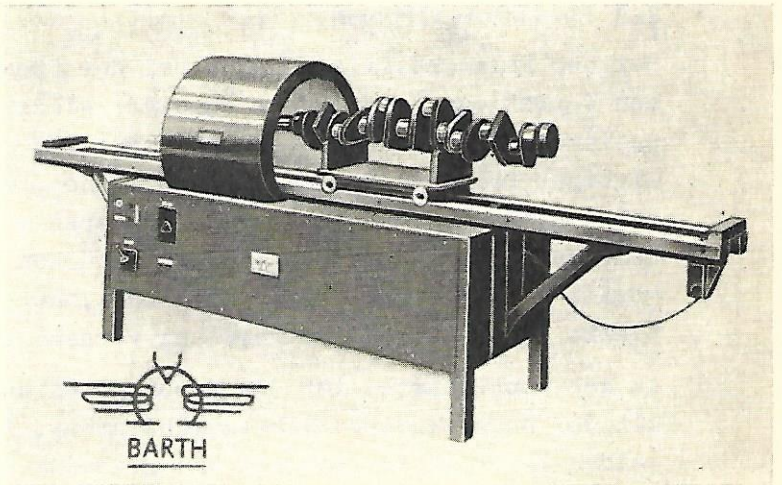


Bild 2.8 Entmagnetisierungsgerät
Elektro-Barth, Dresden-Hellerau



Bild 2.11 Fahrbares Rißprüfgerät Typ RGP
Elektro-Barth, Dresden-Hellerau

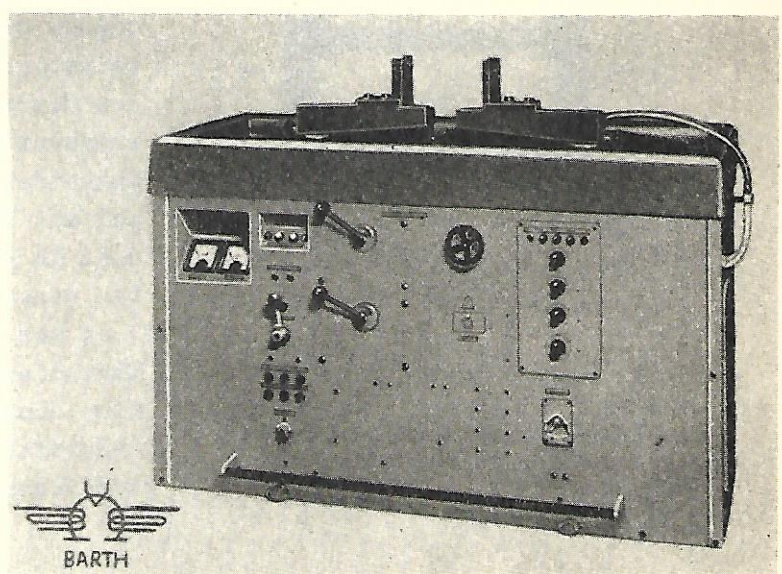


Bild 2.10 Rißprüfgerät Typ RG 57
Elektro-Barth, Dresden-Hellerau

dung von Wechselstrom gültig. An der genannten Beziehung fällt auf, daß der Strom I in linearer Abhängigkeit vom Durchmesser D des Werkstücks dargestellt ist, während doch im Normalfall der Strom auf den Querschnitt eines Leiters bezogen wird und das Verhältnis $I : D$ somit eigentlich quadratischen Charakter besitzen müßte. Dieser scheinbare Widerspruch läßt sich folgendermaßen erklären: Durch den hohen Wechselstrom wird im Werkstück ein starkes, seine Richtung dauernd wechselndes Magnetfeld erzeugt, das im Innern des Prüflings Wirbelströme induziert. Die Wirbelströme sind in der Umgebung der Werkstücklängsachse dem Primärstrom entgegengerichtet, so daß eine Stromverdrängung nach der Außenseite des Prüflings hin stattfindet. Der Prüfstrom konzentriert sich daher in der Hauptsache auf die Peripherie des Werkstücks, so daß man näherungsweise eine lineare Abhängigkeit zwischen Magnetisierungsstrom und Werkstückdurchmesser annehmen kann.

2.2.3. Kombinierte Verfahren

Bei der Polmagnetisierung und bei der Stromdurchflutung können die zu prüfenden Werkstücke jeweils nur in einer Richtung magnetisiert werden. Es sind also immer entweder nur Quer- oder nur Längsfehler nachweisbar. Um Fehler beliebiger Richtung feststellen zu können, müßten beide Verfahren nacheinander angewendet oder die Werkstücke umgespannt werden, wobei die Stromdurchflutung besonders bei langgestreckten Werkstücken Schwierigkeiten bereitet. Die Prüfgeräte sind daher meist so aufgebaut, daß man zu gleicher Zeit eine kombinierte Längs-Quer-Magnetisierung vornehmen kann.

Am gebräuchlichsten ist die Kombination der Gleichstrom-Jochmagnetisierung mit der Wechselstrom-Selbstdurchflutung. Bei einer passenden Erregung der beiden Einzelfelder pendelt die Richtung der magnetischen Kraftlinien im Rhythmus der Wechselstromfrequenz hin und her, so daß jeder Fehler in einer

bestimmten Phase in eine zu den Kraftlinien schräge oder auch senkrechte Lage kommt. Es lassen sich also mit einem Prüfgang Risse beliebiger Richtung erfassen. Entsprechend der Natur dieser kombinierten Magnetisierungsverfahren muß stets eines der beiden Magnetfelder ein Wechselfeld sein, d.h., es muß mit Hilfe von Wechselstrom erregt werden. In Bild 2.6 ist der schematische Aufbau eines solchen Geräts dargestellt. Das Joch des Elektromagnets ist zwischen den Einspeisungspunkten des Wechselstroms durch eine dünne Isolierschicht unterbrochen, da andernfalls die Sekundärwicklung des Hochstromtransformators kurzgeschlossen wäre.

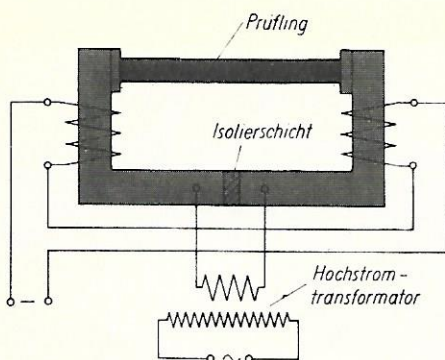


Bild 2.6 Kombinierte Gleichstrom-Jochmagnetisierung und Wechselstrom-Selbstdurchflutung

2.3. Magnetpulver und Prüföle

Bei der Durchführung der magnetischen Rißprüfung wurden zum Nachweis der auftretenden Streufelder ursprünglich Eisenfeilspäne verwendet. Zum Nachweis

feiner Risse sind jedoch Feilspäne zu grob, so daß man heute fast ausschließlich andere ferromagnetische Pulver benutzt. Es sind in der Hauptsache drei Pulverarten üblich:

1. reines Eisenpulver (Carbonyleisen), grau,
2. Eisen(II,III)-oxyd (Fe_3O_4), schwarz,
3. Eisen(III)-oxyd ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), rotbraun.

Die Auswahl der Pulver richtet sich nach der Oberflächenbeschaffenheit und -farbe der zu prüfenden Werkstücke. Die Farbe des Pulvers soll sich möglichst gut vom Untergrund abheben. Das ist bei der Prüfung von Teilen mit blanker Oberfläche einfach. Sind die Werkstücke jedoch mit einer Rost- oder Zunderschicht bedeckt, so ist es schwierig, einen brauchbaren Kontrast zwischen Pulver und Prüfling zu erzielen. Für solche Zwecke kann das Magnetpulver mit einem Farbstoff angefärbt werden. Das Anfärben ist in der Regel mit einer Verminderung der Fehleranzeigeempfindlichkeit verbunden, da die magnetischen Kräfte nur auf die Pulverteilchen wirken, nicht aber auf den angelagerten Farbstoff. Trotzdem lassen sich mit sachgemäß angefärbten Magnetpulvern gute Prüferfolge erzielen.

Mit Fluoreszenzstoffen präparierte Pulver geben bei Ultraviolettlicht eine intensiv leuchtende Fehleranzeige. Die Prüfergebnisse werden wie bei der Fluoreszenzprüfung in einem verdunkelten Raum unter der UV-Strahlung einer Quarz-Quecksilberdampf Lampe ausgewertet. Da die vorhandenen Pulverraupen hierbei intensiv zu leuchten beginnen, sind die Fehlstellen in jedem Fall gut erkennbar. Fluoreszierende Magnetpulver können daher ohne Rücksicht auf die Oberflächenbeschaffenheit der zu prüfenden Werkstücke eingesetzt werden.

Als Prüfüle kommen dünnflüssige Mineralöle in Frage, die bei 20°C eine Viskosität von etwa $1,2^\circ\text{E}$ besitzen sollen. Man verwendet häufig reines Petroleum, mit dem sich zwar sehr gute Prüfergebnisse erzielen lassen, das aber wegen seines niedrigen Flammpunkts relativ feuergefährlich ist. Geeignete Prüfüle sind unter der Bezeichnung *T r ä g e r ö l* im Handel erhältlich. Das günstigste Mischungsverhältnis liegt bei etwa 10 Gramm Magnetpulver auf 1 Liter Prüföl.

2.4. Durchführung der Prüfung

Bei der Magnetisierung der Werkstücke mit Hilfe der Stromdurchflutung ist auf guten, möglichst großflächigen Kontakt zwischen Stromzuführung und Prüfling zu achten. Das ist erforderlich, da andernfalls unzulässig hohe Übergangswiderstände auftreten können, die unter dem Einfluß des hohen Prüfstroms zu einer starken Erwärmung der Kontaktstellen führen. Das kann Brandstellen an den Prüflingen zur Folge haben und bei Verwendung von Petroleum das Magnetöl entzünden. Guten Kontakt erzielt man, wenn zwischen Werkstück und Einspannvorrichtung eine Zwischenlage aus Weichkupfer angeordnet wird.

Bei der Kombination der Stromdurchflutung mit der Polmagnetisierung erhöht die Kupferzwischenlage jedoch den Widerstand des magnetischen Kreises. Meistens sind aber die Prüfgeräte mit genügenden Reserven ausgelegt, so daß dieser erhöhte magnetische Widerstand durch eine Erhöhung des die Polmagnetisie-

rung bewirkenden Erregerstroms ausgeglichen werden kann, wenn die Kupfer - schicht nicht zu dick ist.

Nach dem Einschalten des Magnetisierungsstroms wird das Werkstück so gespült, daß der Ölstrahl die zu prüfende Stelle nicht unmittelbar trifft. Das Prüföl soll den Prüfling nur leicht überfließen, da sonst die auf die Pulverteilchen wirkenden Schwemmkräfte größer werden können als die von vorhandenen Streufeldern ausgeübten magnetischen Kräfte. Das Pulver würde vom Öl weggerissen und die Pulverraupe nicht einwandfrei ausgebildet. Der Magnetisierungsstrom wird grundsätzlich erst dann abgeschaltet, wenn der größte Teil des Prüföls vom Werkstück abgetropft ist, da sonst das Pulverbild leicht verlaufen kann. Vor dem Besspülen ist darauf zu achten, daß das Pulver durch Schütteln oder Umrühren des Magnetöls gut verteilt wird, sofern nicht im Prüfgerät selbst durch Rühr- oder Umlaufvorrichtungen für eine dauernde Bewegung des Ölvorrats gesorgt ist.

Für ein gegebenes Werkstück kann nicht ohne weiteres die Höhe des erforderlichen Magnetisierungsstroms errechnet werden. Es ist daher im allgemeinen zu empfehlen, den Erregerstrom solange zu erhöhen, bis eine Büroklammer unter dem Einfluß der magnetischen Kräfte festgehalten wird, wenn man sie mit der geraden Schmalseite an die untere Fläche des magnetisierten Werkstücks hält und dann losläßt. Diese etwas primitiv anmutende Methode hat sich in der Praxis gut bewährt.

Zur Bestimmung der für die Magnetpulverprüfung geeigneten Induktion des Prüflings werden auch besondere Testkörper verwendet. Bei dem im Bild 2.7 darge-

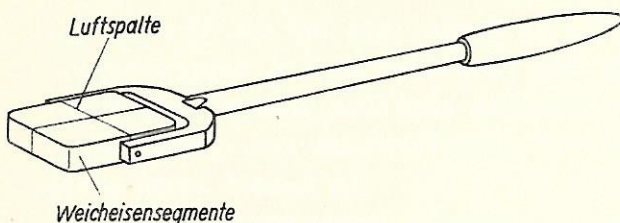


Bild 2.7 Testkörper zur Ermittlung des Erregerstroms

gestellten Gerät ist die beweglich angeordnete quadratische Testplatte aus vier Weicheisensegmenten so zusammengesetzt, daß sich ein sehr schmaler kreuzförmiger Luftspalt ergibt. Setzt man den Testkörper auf das zu prüfende Werkstück so auf, daß die Testplatte flach auf der Werkstückoberfläche aufliegt, so bilden die Weicheisensegmente einen ma-

gnetischen Nebenschluß und werden von einem Teil der Kraftlinien durchflossen. Dabei bilden sich je nach der Magnetisierungsrichtung an einem der beiden kreuzförmig angeordneten Luftspalte Streufelder, die beim Überspülen mit Magnetöl eine Fehleranzeige verursachen. Diese Fehleranzeige soll die Form einer feinen Pulverraupe haben, wenn die für die Prüfung optimalen Verhältnisse hergestellt sind. Ist die Pulverraupe zu breit, so muß der Magnetisierungsstrom verkleinert werden, da die Induktion zu hoch ist. Die kreuzförmige Anordnung der beiden Luftspalte ist sehr gut geeignet, um bei einer kombinierten Längs-Quer-Magnetisierung das richtige Verhältnis der beiden sich überlagernden Magnetfelder zueinander einzustellen.

Bei der Magnetpulverprüfung kompliziert geformter Teile bilden sich meist an Querschnittsübergängen Streufelder aus, die zu Pulveransammlungen führen. Es

ist daher bei der Beurteilung von Magnetpulverbildern darauf zu achten, daß diese Pulveransammlungen nicht als Werkstofffehler gedeutet werden. Ebenso können bei einer zu starken Induktion Gefügeinhomogenitäten, wie Seigerungen, Ferritzeilen usw., zu einer Pulveranzeige führen, obwohl sie auf die Verwendbarkeit des Werkstücks keinen nachteiligen Einfluß ausüben. Es ist in solchen Fällen der Erfahrung des Prüfers überlassen, das richtige Urteil über das geprüfte Werkstück zu fällen.

Bei einer scharf begrenzten Fehleranzeige kann auf Oberflächenrisse geschlossen werden. Unter der Oberfläche liegende Fehler verursachen meist eine breitere Pulveransammlung mit unscharfen Rändern. Werkstofftrennungen, die unter der Oberfläche des Prüflings liegen, sind je nach den Verhältnissen bis zu einer Tiefe von etwa 5 mm nachweisbar.

Ist ein Prüfdokument erforderlich, so kann man von vorhandenen Pulveranzeigen Abdrücke herstellen. Auf die Werkstückoberfläche wird ein saugfähiges Papier vorsichtig aufgedrückt, das die Pulveransammlung aufnimmt. Dabei entsteht ein seitenverkehrtes Bild in natürlicher Größe, das nach dem Trocknen des Papiers durch Überspritzen mit einem farblosen Lack fixiert werden kann. Seitenrichtige Bilder ergeben sich, wenn man dünnes, möglichst glattes Papier anfeuchtet und vor dem Bespülen ohne Bildung von Luftzwischenräumen auf die Oberfläche des Prüflings aufbringt. Das Magnetöl wird über das Papier gespült, so daß sich die Fehler seitenrichtig abzeichnen. Das Papierbild wird vom Werkstück abgezogen und kann mit farblosem Lack fixiert werden. Durch die Papierzwischenlage tritt allerdings eine geringe Verminderung der Anzeigeempfindlichkeit auf.

2.5. Entmagnetisierung

Aufmagnetisierte ferromagnetische Werkstoffe behalten nach dem Abschalten des erregenden Felds einen gewissen Restmagnetismus. Die Höhe dieses remanenten Magnetismus richtet sich nach der bei den einzelnen Werkstoffen unterschiedlichen m a g n e t i s c h e n H ä r t e .

Der nach der Magnetpulverprüfung im Werkstück verbleibende remanente Magnetismus kann, besonders wenn es sich um bewegte Maschinenteile handelt, zu Störungen führen. So besteht z.B. die Gefahr, daß feiner Metallabrieb in Lagerstellen festgehalten wird und ein Fressen der Lager verursacht, oder daß schnell rotierende, mit Restmagnetismus behaftete Teile in benachbarten Steuer- oder Regelleitungen Fremdspannungen induzieren, die u.U. gefährliche Betriebsstörungen auslösen können. Deshalb müssen Maschinenteile, die einer Magnetpulverprüfung unterzogen wurden, entmagnetisiert werden.

Mit Hilfe der Polmagnetisierung geprüfte Werkstücke sind auf jeden Fall zu entmagnetisieren, da bei ihnen das magnetische Restfeld stets nach außen tritt. Bei Teilen, an denen die Stromdurchflutung angewendet wurde, tritt das Feld im allgemeinen nicht in Erscheinung. Hier schließen sich die Kraftlinien im Eisen selbst. Lediglich bei Werkstücken, die keinen rotationssymmetrischen Aufbau besitzen, können Streufelder nach außen treten. Das kann bereits an einer Nut der Fall sein.

Die einfachste Art der Entmagnetisierung im Anschluß an die Prüfung ist eine Gegenmagnetisierung. Die Erregerwicklung des Prüfgeräts wird umgepolt und ein Magnetfeld erzeugt, das dem remanenten Feld entgegengerichtet ist. Die Schwierigkeiten bei dieser Methode bestehen darin, die erforderliche Intensität des Gegenfelds richtig zu bemessen und den Erregerstrom im geeigneten Moment abzuschalten. Diese Entmagnetisierungsart ist trotz des geräteseitigen Aufwands an Zeitgeberschaltungen und anderen Hilfsmitteln, die den richtigen Abschaltzeitpunkt garantieren sollen, nur für kleinere, geometrisch einfach geformte Werkstücke brauchbar.

Große und kompliziert geformte Teile führt man durch eine von Wechselstrom durchflossene Spule langsam hindurch. Erst bei Erreichen eines bestimmten Abstands von der Spule, wenn sich das Werkstück nicht mehr im Spulenfeld befindet, darf der Spulenstrom abgeschaltet werden. Bei dieser Entmagnetisierungsmethode tritt eine dauernde Ummagnetisierung des Werkstücks ein, die mit wachsender Entfernung von der Spule mit immer kleiner werdender Amplitude erfolgt, bis schließlich kein Restfeld mehr vorhanden ist. Ein solches Entmagnetisierungsgerät, bei dem das Werkstück auf einem Wagen langsam durch die Spule hindurchgefahren wird, zeigt Bild 2.8 (Seite 9). Das Gerät ist so eingerichtet, daß der Wagen beim Erreichen des rechten Anschlags der Laufschiene den Spulenstrom automatisch unterbricht. Die Entmagnetisierung kann mit einem elektronisch arbeitenden Restfeldprüfer kontrolliert werden, der magnetische Felder quantitativ unter Verwendung einer Tastsonde mißt. Da solche Geräte in der Praxis in den seltensten Fällen zur Verfügung stehen, hat sich eine andere Methode eingebürgert. Man bildet eine Kette von vier bis fünf Büroklammern und nähert diese in schwach pendelnder Bewegung von der Seite her langsam dem Werkstück. Bei ordnungsgemäßer Entmagnetisierung werden die Klammern vom Werkstück nicht angezogen.

2.6. Prüfgeräte

Für den ortsfesten Betrieb sind Geräte, die eine Kombination der Wechselstromdurchflutung und der Gleichstrom-Jochmagnetisierung gestatten, am weitesten

verbreitet. Dieser Gerätetyp ist in der Regel mit einer eingebauten Bespülungseinrichtung ausgerüstet, die aus einem Vorratsbehälter für das Prüföl, einer Pumpe für die Prüfölförderung und einer von der Hand des Prüfers geführten Bespülungsdüse besteht. Um stets eine gute Durchmischung des Prüföls und damit eine gleichmäßige Verteilung des Magnetpulvers zu gewährleisten, ist die Bespülungsvorrichtung meist so ausgebildet, daß sich das Prüföl in ständigem Umlauf befindet und somit ein Absetzen des Magnetpulvers mit Sicherheit vermieden wird (Bild 2.9). Unter der Einspannvorrichtung für die zu prüfenden Werkstücke befindet sich eine Wanne, die das vom Prüfling abtropfende Öl auffängt und dem Vorratsbehälter wieder zuführt.

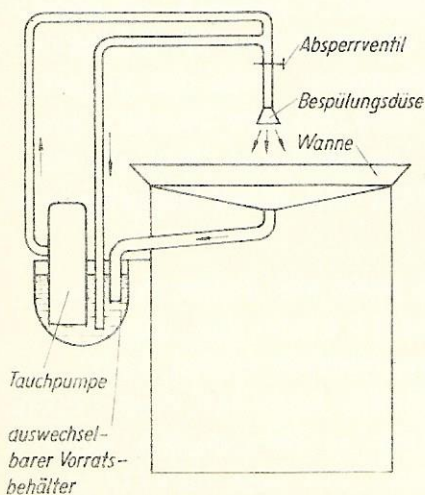


Bild 2.9 Bespülungsvorrichtung

Mit dem im Bild 2.10 (Seite 9) dargestellten Rißprüfgerät können die Wechselstromdurchflutung bis zu Stromstärken von 2500 Ampère und die Gleichstrom-Jochmagnetisierung bei einer Felderregung bis zu 16 000 Ampèrewindungen einzeln oder kombiniert angewandt und Werkstücke bis 1600 mm Länge und 150 mm Durchmesser geprüft werden. Das Gerät ist mit einer Entmagnetisierungseinrichtung ausgerüstet, die es in Verbindung mit einer in weiten Grenzen einstellbaren Zeitgeberschaltung ermöglicht, bei der Serienprüfung kleinerer, einfach geformter Teile den Restmagnetismus durch Gegenmagnetisierung in befriedigendem Maße zu beseitigen. Um auch solche Werkstücke, die wegen ihrer Größe oder ihrer komplizierten Form nicht auf das Prüfgerät gebracht werden können, einer Prüfung zugänglich zu machen, kann der Wechselstrom über Prüfkabel abgenommen werden. Das ermöglicht, Werkstücke der genannten Art außerhalb des Geräts mit Hilfe der Wechselstrom-Selbstdurchflutung oder -Spulenmagnetisierung zu prüfen.

Außer ortsfesten verwendet man auch transportable, meist nur für Wechselstrom ausgelegte Geräte, die an den Prüfort herangefahren werden können. Bild 2.11 (Seite 9) zeigt ein fahrbares Gerät, das in zwei Ausführungen - für 2500 und 3500 Ampère - gebaut wird.

2.7. Sonderverfahren

Bei den genannten Verfahren der Magnetpulverprüfung wurde vorausgesetzt, daß während des Prüfvorgangs der Magnetisierungsstrom eingeschaltet bleibt und das Magnetpulver in einer Ölsuspension über das Werkstück gespült wird. Einige andere Prüfmethode sollen der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Bei der **S t o ß m a g n e t i s i e r u n g** wird der remanente Magnetismus des Werkstücks zur Prüfung herangezogen. Für diese Verfahrensweise eignen sich nur kleinere Teile, deren Werkstoff eine genügende magnetische Härte besitzt. Die Magnetisierung, die im Prinzip meist einer Stromdurchflutung entspricht, erfolgt mit Hilfe eines sehr hohen und kurzen Stromstoßes, den man in der Regel einem speziellen Stoßmagnetisierungsgerät entnimmt. Ein solches Gerät besitzt eine Kondensatorenbatterie, die über das Werkstück entladen wird. Dieses Magnetisierungsverfahren gestattet die zeitliche Trennung von Magnetisierung und eigentlicher Prüfung. Das bringt besonders bei der Serienprüfung von Kleinteilen wirtschaftliche Vorteile.

Bei der **t r o c k e n e n P r ü f u n g** wird das Magnetpulver in trockenem Zustand auf das magnetisierte Werkstück aufgebracht. Man bestreut dabei im einfachsten Fall die Werkstückoberfläche mit Hilfe eines engmaschigen Siebes, oder man bringt das Pulver durch einen Zerstäuber in fein verteilter Form auf das zu prüfende Teil.

Beim **T a u c h v e r f a h r e n** wird das Werkstück in magnetisiertem Zustand in das Prüföl eingetaucht. Um die Schwemmkraft des Öls beim Herausheben des Werkstücks aus dem Ölbad nicht zu groß werden zu lassen, wird das Prüföl nach dem Einbringen des Werkstücks langsam aus der Prüfwanne abgelassen.

3. Prüfung mit Röntgen- und Gammastrahlen

3.1. Röntgendurchstrahlung

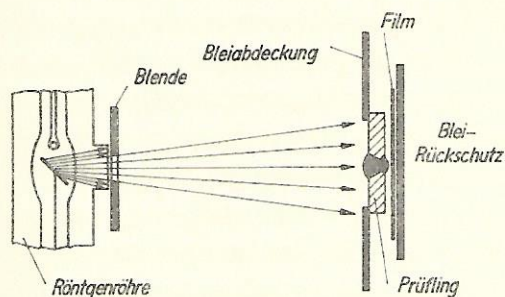
Im Jahre 1895 entdeckte Wilhelm Conrad RÖNTGEN bei der Durchführung von Hochspannungsversuchen an evakuierten Glasröhren eine bis dahin unbekannte Strahlenart, die die Eigenschaft besitzt, Materie zu durchdringen. Er gab der später nach ihm benannten Strahlung den Namen "X-Strahlung". 1912 konnten v. LAUE, FRIEDRICH und KNIPPING experimentell nachweisen, daß es sich bei der Röntgenstrahlung um eine elektromagnetische Wellenstrahlung handelt, die in vielerlei Beziehung ein dem Licht ähnliches Verhalten besitzt.

Im Zuge der Entwicklung der Technik ist die Röntgenstrahlung zu einem unentbehrlichen Helfer in der technischen Werkstoffuntersuchung geworden, so daß heute z.B. die zerstörungsfreie Kontrolle bestimmter technologischer Produktionsprozesse ohne die Röntgendurchstrahlung nicht mehr denkbar ist.

Die Röntgendurchstrahlung von Werkstücken dient dem Nachweis makroskopischer Werkstofffehler, wie Fremdeinschlüsse, Werkstofftrennungen usw. Sie wird in der Hauptsache für die Prüfung von Schweißnähten und Gußstücken angewendet. Man bezeichnet dieses Verfahren als Röntgen- G r o b s t r u k t u r prüfung im Unterschied zur Röntgen- F e i n s t r u k t u r untersuchung, die sich mit der Analyse des feinstrukturellen Aufbaus kristalliner Stoffe befaßt.

3.1.1. Wirkungsprinzip

Mit Hilfe der von der Röntgenröhre ausgehenden Strahlung (Bild 3.1) wird ein



Schattenbild des Prüfobjekts auf einen strahlenempfindlichen Empfänger, z.B. eine fotografische Schicht, projiziert. Fehlstellen, die sich im durchstrahlten Querschnitt befinden, verursachen Intensitätsunterschiede im Schattenbild, die nach der Entwicklung des Films als Stellen verschieden starker Schwärzung erkennbar sind. Die Schwächung der Röntgenstrahlen im Prüfling ist von dessen Dicke und Dichte abhängig.

Bild 3.1 Röntgendurchstrahlung

3.1.2. Erzeugung der Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen entstehen, wenn Elektronen mit hoher Geschwindigkeit auf einen festen Körper auftreffen und dabei abgebremst werden. Dieser Vorgang erfolgt in einer Röntgenröhre (Bild 3.2), die im wesentlichen aus einem hochevakuierten Glasgefäß besteht, in das zwei Elektroden eingeschmolzen sind: die Kathode (Minuspole) und die Anode (Pluspol). Die Kathode, eine heizbare Spirale aus Wolframdraht, ist die Elektronenquelle. Sie wird von einem Heiztransformator gespeist und zum Glühen gebracht (Glühkathode). Die unter dem Einfluß der Glühtemperatur von der Kathode ausgestrahlten (emittierten) negativ geladenen Elektronen werden durch eine zwischen Anode und

Kathode angelegte Hochspannung zur positiv geladenen Anode hin beschleunigt. Die Hochspannung kann eine Gleich- oder eine Wechselspannung sein und bis zu mehreren hunderttausend Volt betragen. Für den Fall, daß Wechselspannung verwendet wird, fließt der Röhrenstrom nur während der Halbwelle, in der die Anode ein positives Potential besitzt. Man spricht daher bei einer solchen Anordnung von einer Halbwellenschaltung, bei der die Röntgenröhre selbst die Gleichrichtung übernimmt.

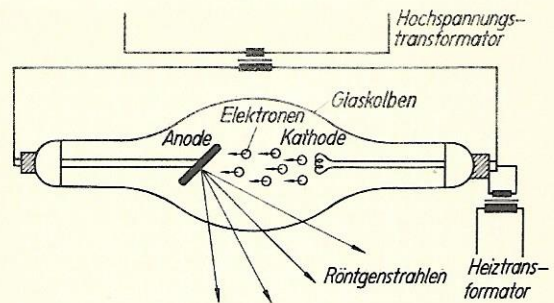


Bild 3.2 Röntgenröhre

Die durch die Hochspannung (Röhrenspannung) beschleunigten Elektronen prallen auf die Anode und werden von ihr abgebremst, wodurch die Röntgenstrahlung ausgelöst wird. Der Wirkungsgrad ist bei der Umwandlung der kinetischen Energie der Elektronen in Strahlungsenergie sehr schlecht, d.h., der größte Teil der kinetischen Energie wird in Wärme umgesetzt. Die Anode, eine schräg in den Elektronenfluß gestellte plattenförmige Elektrode, besteht wegen der hohen Temperaturen aus einem schwer schmelzbaren Metall, meistens Wolfram. Sie ist in der Regel hohl und wird durch Öl oder Wasser gekühlt. Ihrer physikalischen Natur nach sind Röntgenstrahlen elektromagnetische Schwingungen sehr kurzer Wellenlänge. Der Platz, den sie innerhalb der Skale der bekannten elektromagnetischen Wellenarten einnehmen, geht aus Bild 3.3 hervor. Die Wellenlänge der Röntgenstrahlen wird in Angström (Å) gemessen ($1\text{Å} = 10^{-8}\text{ cm}$).

Die entstehende Röntgenstrahlung ist um so kurzwelliger, je größer die Geschwindigkeit v ist, mit der die Elektronen auf die Anode prallen. Die Elektronengeschwindigkeit wächst mit der Röhrenspannung U . Für die Energie, die die Elektronen beim Auftreffen auf die Anode besitzen, gilt die Beziehung

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U.$$

Hierin ist m die Masse und e die Ladung eines Elektrons.

Wird diese Bewegungsenergie plötzlich und vollständig abgebremst, so entsteht eine Röntgenstrahlung mit der Wellenlänge in Angström:

$$\lambda_0 = \frac{12,4}{U}.$$

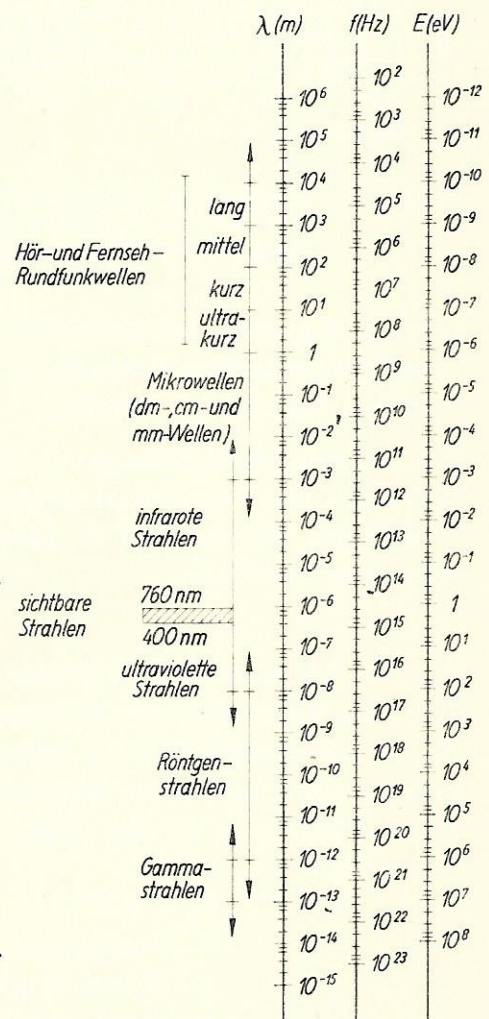


Bild 3.3 Skale der elektromagnetischen Wellen

Die Röhrenspannung U ist in kV einzusetzen. Da die Elektronen an der Anode jedoch nicht plötzlich, sondern in mehreren unregelmäßigen Stufen abgebremst werden, entsteht ein stufenloses Strahlungsgemisch der verschiedensten Wellenlängen, das Bremspektrum. Es besitzt in der Grenzwellenlänge λ_0 eine durch

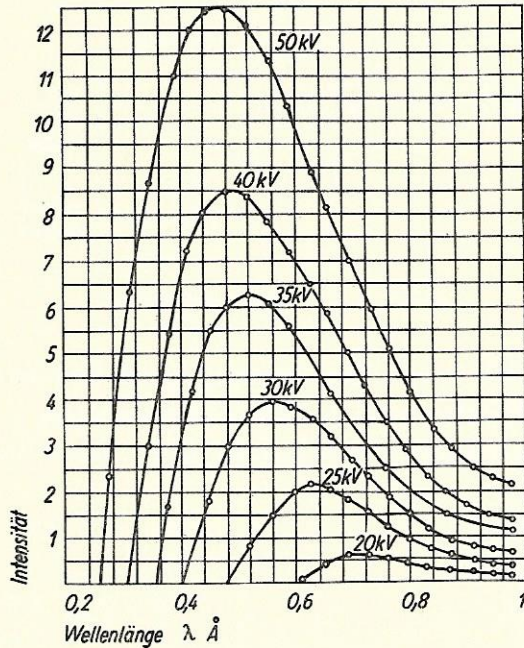


Bild 3.4. Spektrale Energieverteilung der Bremsstrahlung einer Röntgenröhre

die Röhrenspannung bestimmte scharfe Begrenzung nach der kurzwelligen Seite hin. In Bild 3.4 ist die spektrale Energieverteilung der Bremsstrahlung einer Röntgenröhre in Abhängigkeit von der Röhrenspannung dargestellt. Mit wachsender Röhrenspannung verschiebt sich sowohl die Grenzwellenlänge als auch das Intensitätsmaximum nach der kurzwelligen Seite. Gleichzeitig nimmt die Gesamtintensität der Strahlung, die durch die von der Kurve eingeschlossene Fläche charakterisiert wird, ungefähr mit dem Quadrat der Spannung zu.

Die bei einer gegebenen Röhrenspannung erzielbare Strahlungsintensität ist von der je Zeiteinheit abgebremsten Elektronenanzahl, d.h. von der Höhe des Röhrenstroms abhängig. Dieser wird, da sich bei verschiedenen Glühtemperaturen die Elektronenemission der Kathode ändert, durch Variieren des Heizstroms geregelt. Bei

einer Steigerung des Röhrenstroms ergibt sich ein Bremspektrum mit entsprechend vergrößerten Ordinaten, d.h., die Intensität aller Wellenlängen wird im gleichen Verhältnis erhöht.

Die Durchdringungsfähigkeit von Röntgenstrahlen wächst mit abnehmender Wellenlänge. Man bezeichnet daher kurzwellige Strahlen als *harte* Röntgenstrahlung, während man im langwelligeren Bereich von *weicher* Röntgenstrahlung spricht.

3.1.3. Schwächung der Röntgenstrahlen

Wird ein Werkstück von Röntgenstrahlen durchdrungen, so treten diese mit den Atomen des Werkstücks in Wechselwirkung und werden dabei geschwächt. Diese Schwächung folgt einem Exponentialgesetz. Ist die Intensität der Strahlung vor dem Eintritt in das Werkstück gleich I_0 und nach seinem Verlassen gleich I , so gilt

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

d Werkstoffdicke

μ Schwächungskoeffizient

e Basis der natürlichen Logarithmen ($\approx 2,718$)

Daraus folgt, daß die Röntgenstrahlen um so stärker geschwächt werden, je größer der Schwächungskoeffizient μ und die durchstrahlte Dicke d sind.

Befindet sich in dem Werkstück ein Hohlraum von der Dicke dx , so ist an dieser Stelle der Weg, den die Röntgenstrahlen im Werkstoff zurückzulegen haben, um dx geringer als in der Umgebung des Fehlers (Bild 3.5). Es ist also

$$I_2 = I_0 \cdot e^{-\mu(d-dx)}$$

und
$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Der Schwärzungsunterschied, den der Hohlraum dx gegenüber seiner Umgebung auf dem Röntgenfilm erzeugt, ist naturgemäß um so größer, je mehr sich die beiden Intensitäten I_1 und I_2 voneinander unterscheiden. Aus den beiden Gleichungen für I_2 und I_1 ergibt sich das Intensitätsverhältnis

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{\mu dx}$$

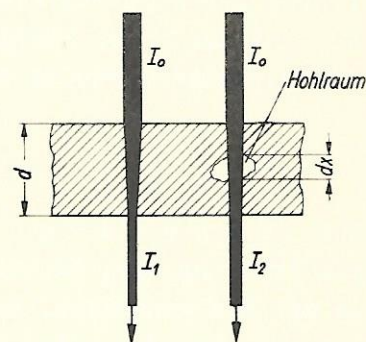


Bild 3.5 Schwächung der Röntgenstrahlen

Danach wächst der auf der Röntgenaufnahme erzielte Kontrast mit dem Schwächungskoeffizienten μ und der Fehlerausdehnung dx , bezogen auf die Einstrahlrichtung. Theoretisch geht die durchstrahlte Werkstückdicke d nicht mit in diese Beziehung ein. Man könnte also annehmen, daß z.B. eine kleine Gußblase gegebener Größe in einem dicken Stück ebensogut zu erkennen ist wie in einem dünnwandigen. Praktisch läßt jedoch die Fehlererkennbarkeit durch den Einfluß der Streustrahlung, die noch näher zu besprechen sein wird, mit wachsender Werkstückdicke erheblich nach. Im allgemeinen rechnet man damit, daß ein Fehler dann mit brauchbarem Kontrast auf dem Röntgenfilm abgebildet wird, wenn seine Ausdehnung dx , in Strahlungsrichtung gemessen, etwa 1,5 bis 2 Prozent der durchstrahlten Werkstoffdicke d beträgt. Daraus folgt für die Praxis, daß der Nachweis feiner Risse mit Hilfe einer Röntgenaufnahme nur dann gewährleistet ist, wenn die Risse annähernd in der Richtung der Einstrahlung liegen. Bereits 10° Abweichung von dieser Lage können dazu führen, daß die Risse im Röntgenbild nicht mehr zu erkennen sind. Dieser Umstand ist auch dafür verantwortlich zu machen, daß z.B. Werkstofftrennungen in Walz- oder Schmiedeteilen (Dopplungen, Überwalzungen, Überschmiedungen usw.) in der Regel durch eine Röntgenprüfung nicht festgestellt werden können, da ihre technologisch bedingte Lage in der Mehrzahl der Fälle quer zur möglichen Durchstrahlungsrichtung orientiert ist.

Die Größe des Schwächungskoeffizienten μ ist abhängig von der Wellenlänge der Röntgenstrahlung sowie von der chemischen Zusammensetzung und der Dichte des durchstrahlten Werkstoffs. Im Bereich der mit Hilfe normaler Röntgengeräte erzeugten Wellenlängen setzt sich der Schwächungskoeffizient μ aus zwei Komponenten zusammen: dem Absorptionskoeffizienten τ und dem Streukoeffizienten σ . Es ist

$$\mu = \tau + \sigma$$

Das ist dadurch bedingt, daß die Intensitätsschwächung der Röntgenstrahlen zum Teil durch reine Absorption und zum Teil durch Streuung hervorgerufen wird.

Bei der **A b s o r p t i o n** lösen die Röntgenstrahlen Elektronen aus dem

Atomverband des durchstrahlten Werkstoffs heraus: die Atome werden ionisiert. Hierbei wird die Energie des absorbierten Strahlenanteils in andere Energieformen, z.B. in Wärme oder Bewegungsenergie der ausgelösten Elektronen, überführt. Der Wert des Absorptionskoeffizienten τ ist in starkem Maße von der Wellenlänge λ der Röntgenstrahlung und der Ordnungszahl Z (Atomnummer) des durchstrahlten Stoffs abhängig. Es gilt angenähert

$$\tau \sim \lambda^3 Z^3.$$

Die **S t r e u u n g** stellt eine Richtungsänderung der einfallenden Röntgenstrahlung dar, hervorgerufen durch das Mitschwingen der Elektronen im Felde der Röntgenwellen. Man unterscheidet die **k l a s s i s c h e S t r e u u n g**, bei der keine Änderung der Strahlungsqualität zu verzeichnen ist, und die **C o m p t o n - S t r e u u n g**, die vorzugsweise bei härterer Strahlung auftritt und deren Streustrahlen langwelliger sind als die einfallenden Primärstrahlen. Der Compton-Effekt wird dadurch hervorgerufen, daß ein Teil der Strahlungsenergie für das Abspalten von Elektronen aus den Atomen des durchstrahlten Stoffs und deren Beschleunigung verbraucht wird. Das hat zur Folge, daß die bei diesem Prozeß gestreute Strahlung energieärmer, d.h. langwelliger wird. Die klassische Streuung und die Compton-Streuung können nebeneinander auftreten.

Der Streukoeffizient σ ändert sich nur wenig mit der Wellenlänge und der Ordnungszahl Z . Er ist in erster Näherung etwa der Dichte des durchstrahlten Werkstoffs proportional und, mit Ausnahme der leichtatomigen Elemente bis etwa $Z = 20$, wesentlich kleiner als der Absorptionskoeffizient τ . Man kann also in der Regel sagen, daß bei der Röntgen-Grobstrukturprüfung im normalen Wellenlängenbereich hauptsächlich die Absorption für die Intensitätsschwächung der Röntgenstrahlen verantwortlich zu machen ist.

3.1.4. Streustrahlung und Streustrahlenfilter

Die bei der Durchstrahlung eines Werkstücks entstehenden Streustrahlen, die sich von jeder Stelle des von der Röntgenstrahlung durchsetzten Werkstückvolumens aus nach allen Richtungen hin ausbreiten, bewirken eine mehr oder weniger starke Verschleierung des Röntgenfilms. Feine Schwärzungsunterschiede des von der direkten Strahlung erzeugten Schattenbilds sind deshalb u.U. nicht mehr zu erkennen. Da der Streustrahlenanteil einerseits mit der Größe des durchstrahlten Volumens zunimmt und andererseits mit zunehmender Strahlenhärte auf dem Weg vom Ort seiner Entstehung bis zur fotografischen Schicht weniger geschwächt wird, bewirkt die Streustrahlung besonders bei der Prüfung dicker Werkstücke eine wesentliche Verschlechterung der Fehlererkennbarkeit.

Der Bildverschleierung durch Streustrahlen kann entgegengewirkt werden, indem man

- a) die der Röntgenröhre zugewandte Seite des Werkstücks mit Blei so abdeckt, daß nur das notwendige Werkstückvolumen von der Röntgenstrahlung durchsetzt wird, oder,
- b) hauptsächlich bei der Durchstrahlung dickwandiger Werkstücke ein Streustrahlenfilter zwischen Prüfling und Film anordnet.

Ein solches Filter besteht in der Regel aus einem 1 bis 2 mm dicken Zinnblech, in dem die Streustrahlen stärker geschwächt werden als die direkten Strahlen. Dieser Effekt beruht darauf, daß die Streustrahlen größtenteils schräg durch die Zinnschicht hindurchtreten und deshalb einen größeren Absorptionsweg zu durchlaufen haben als die senkrecht einfallenden direkten Strahlen. Außerdem ist ein Teil der Streustrahlen durch den Compton-Effekt langwelliger und damit leichter absorbierbar geworden. Die Schwächung der direkten Strahlung im Filter kann im allgemeinen ohne Nachteile durch eine geringe Erhöhung der Röhrenspannung ausgeglichen werden.

Eine Luftblase von 5 mm Durchmesser kann man z.B. in einem 280 mm dicken Aluminiumblock bei einer Röhrenspannung von 200 kV noch nachweisen, wenn man ein Streustrahlenfilter von 1,5 mm Zinn verwendet. Ohne Filter, bei 170 kV und sonst gleichen Verhältnissen, liegt die Erkennbarkeitsgrenze in der Größenordnung von 10 mm Durchmesser.

3.1.5. Anfertigung von Röntgen-Filmaufnahmen

Röntgenfilme

.....

Die gebräuchlichste Anwendungsform der Röntgendurchstrahlung ist die Röntgenaufnahme. Bei ihr wird, wie das bereits in Bild 3.1 dargestellt wurde, für die Aufzeichnung des Röntgenschatenbilds ein fotografischer Film verwendet.

Die Verhältnisse, die bei der normalen optischen Fotografie herrschen, können nicht ohne weiteres auf die Röntgenfotografie übertragen werden. Deshalb verwendet man hier sogenannte Röntgenfilme, deren Eigenschaften auf die besonderen Gegebenheiten der Röntgen-Aufnahmetechnik abgestimmt sind.

Bei der Anfertigung einer Röntgenaufnahme ist man bemüht, auch kleine Werkstofffehler noch gut nachweisen zu können. Kleine Intensitätsunterschiede der Röntgenstrahlen sollen also mit einem möglichst großen Schwärzungsunterschied - Kontrast - auf dem Röntgenfilm abgebildet werden.

Für die Beurteilung einer fotografischen Emulsion ist deren Schwärzungskurve maßgebend, in der die erzielte Schwärzung S in Abhängigkeit von der Belichtung H aufgetragen ist.

Die S c h w ä r z u n g S wird ausgedrückt durch den dekadischen Logarithmus des Verhältnisses der auffallenden zur durchgelassenen Lichtintensität:

$$S = \lg \frac{i}{i'}$$

i Intensität des auffallenden Lichts

i' Intensität des durch den geschwärzten Film durchgehenden Lichts

Wird z.B. das gesamte auffallende Licht durchgelassen, so ist die Schwärzung

$$S = \lg 1 = 0.$$

Wird $1/10$ des auffallenden Lichts durchgelassen, so ist die Schwärzung

$$S = \lg 10 = 1.$$

Wird $1/100$ des auffallenden Lichts durchgelassen, so ist die Schwärzung

$$S = \lg 100 = 2 \quad \text{usw.}$$

Die **B e l i c h t u n g** H ist das Produkt aus der Strahlungsintensität I und der Belichtungszeit t :

$$H = I \cdot t.$$

Trägt man in einem Koordinatensystem als Abszisse den Logarithmus der Belichtung $H - \lg I \cdot t$ - und als Ordinate die Schwärzung S auf, so erhält man

gemäß Bild 3.6 die bereits erwähnte Schwärzungskurve.

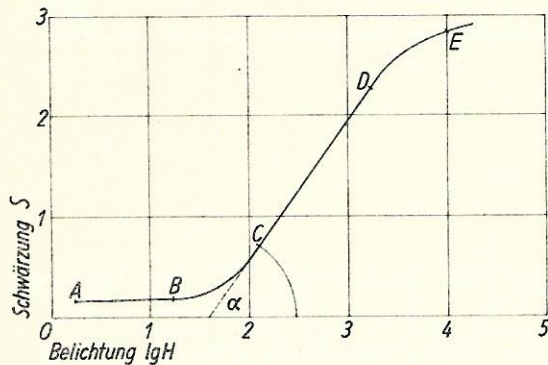


Bild 3.6 Schwärzungskurve einer fotografischen Schicht

Die Belichtung eines fotografischen Films ist dann richtig gewählt, wenn sich die erzielte Schwärzung innerhalb des von den Punkten C und D begrenzten geradlinigen Teils der Schwärzungskurve bewegt. Dieser geradlinige Kurvenabschnitt nimmt gegen die Abszisse den Winkel α ein, der je nach der Beschaffenheit der Emulsion verschiedene Werte annehmen kann. Ist α groß, so sagt man, der Film arbeitet **s t e i l** oder **h a r t**. Bei klei-

nem α spricht man von einer **f l a c h** oder **w e i c h** arbeitenden Emulsion. Als Maß für die Steilheit einer Schwärzungskurve gilt die Gradation γ , die den Tangens des Winkels α darstellt:

$$\gamma = \tan \alpha.$$

Nimmt die Schwärzungskurve z.B. einen Winkel von $\alpha = 45^\circ$ zur Abszisse ein, so ist die Gradation $\gamma = 1$.

Wendet man diese Grundlagen auf die bei einer Röntgenaufnahme erhobene Forderung nach gutem Kontrast an, so folgt daraus, daß man einen Film mit möglichst steiler Gradation verwenden muß, um Fehler geringer Tiefenausdehnung nachweisen zu können. Die im Handel befindlichen Röntgenfilme erreichen eine Gradation in der Größenordnung von $\gamma = 2,5$ bis 3.

Während Lichtstrahlen in einer fotografischen Schicht fast vollständig absorbiert werden, ist das bei den durchdringungsfähigen Röntgenstrahlen nur zum Teil der Fall. Da nur **d e r** Strahlenanteil zur Schwärzung des Films beiträgt, der in der Schicht absorbiert wird, ist man allgemein dazu übergegangen, Röntgenfilme doppelseitig zu begießen. Auf diese Weise wird die Strahlungsenergie für den Aufbau des Röntgenbilds besser ausgenutzt. Man erreicht eine Erhöhung der Schwärzung, eine Verbesserung des Kontrasts und eine Verkürzung der erforderlichen Belichtungszeit.

Röntgenaufnahmen werden in der Regel so belichtet, daß eine Schwärzung von $S = 0,8$ bis $1,2$ erreicht wird.

Verstärkerfolien

Die notwendige Schwärzung des Films wird durch eine bestimmte Belichtung $I \cdot t$ erzielt. Daraus folgt, daß beim Durchstrahlen größerer Werkstückdicken die Belichtungszeit t im gleichen Maße ansteigt wie die durch das Werkstück hindurchtretende Strahlungsintensität I abnimmt. Das führt bei großen Waddicken zu untragbar hohen Belichtungszeiten, die man durch Verwendung von Verstärkerfolien abkürzt. Verstärkerfolien sind einseitig mit einem Leuchtstoff (Kalziumwolframat) präparierte Kunststoffolien. Zwei dieser Folien, auch als Salzfolien bezeichnet, werden in einer Aufnahmekassette mit dem Röntgenfilm in direktem Kontakt so angeordnet, daß der Film zwischen ihnen liegt und die Leuchtstoffschicht der Folien die fotografischen Schichten des beiderseits begossenen Films ohne Luftzwischenraum berührt. Bei der Röntgenaufnahme beginnt das Kalziumwolframat unter der Einwirkung der Strahlung zu leuchten. Dabei entsteht ein blauvioletttes Fluoreszenzlicht, dessen Helligkeit mit der Intensität der anregenden Röntgenstrahlung steigt. Das sichtbare Licht wirkt neben den Röntgenstrahlen zusätzlich auf den Film und kürzt den Belichtungsvorgang beträchtlich ab. Bedingt durch die physikalischen Verhältnisse in der Leuchtstoffschicht der Verstärkerfolien tritt jedoch mit wachsendem Verstärkungsfaktor eine immer größer werdende Zeichenunschärfe in dem gewonnenen Schattenbild auf, die die Fehlererkennbarkeit verschlechtert. Es sind daher zwei verschiedene Arten von Verstärkerfolien gebräuchlich, die je nach der Werkstückdicke eingesetzt werden. Man unterscheidet scharfzeichnende und hochverstärkende Folien. Dem Einsatz mit oder ohne Verstärkerfolien entsprechend sind zwei verschiedene Filmsorten im Handel.

Der Agfa-Texo-S-Film spricht besonders auf reine Röntgenstrahlung an, während der Agfa-Texo-R-Film auf das blauviolette Licht der fluoreszierenden Salzfolien abgestimmt ist.

Für die Verwendung von Verstärkerfolien gelten im allgemeinen etwa die in der Tabelle angegebenen Richtwerte:

Werkstoff	durchstrahlbare Dicke		
	ohne Folie	mit scharfzeichnender Salzfolie	mit hochverstärkender Salzfolie
Eisen und Stahl	0 bis 12 mm	12 bis 36 mm	über 36 mm
Kupfer und Messing	0 bis 8 mm	8 bis 34 mm	über 34 mm
Al-Legierungen	0 bis 35 mm	35 bis 130 mm	über 130 mm
Mg-Legierungen	0 bis 70 mm	über 70 mm	-

Außer Salzfolien, deren Anwendung stets mit einer Verschlechterung der Bildqualität verbunden ist, benutzt man in letzter Zeit mehr und mehr Blei-Verstärkerfolien. Diese werden meist in Verbindung mit Feinkorn-Röntgenfilmen (Agfa-Texo-F-Film) hoher Zeichenschärfe eingesetzt. Ihre Verstärkerwirkung beruht darauf, daß die Röntgenstrahlen im Blei Sekundärelektronen auslösen, die im Röntgenfilm eine zusätzliche Schwärzung hervorrufen und dadurch den Belichtungsvorgang abkürzen. Bleifolien werden ebenso wie Salzfolien auf beiden Seiten des Films in direktem Kontakt mit der Schicht angeordnet. Die der

Röhre zugewandte Vorderfolie ist hierbei in der Regel 0,02 mm, die Hinterfolie 0,1 bis 0,2 mm dick.

Belichtungsdiagramme

Die richtige Wahl der Belichtungszeit kann aus Belichtungsdiagrammen entnommen werden, die den Röntengeräten vom Gerätehersteller beigegeben sind. In einem solchen Diagramm ist auf der Abszisse die zu durchstrahlende Werkstückdicke und auf der logarithmisch geteilten Ordinate die Belichtungsgröße aufgetragen. Die Belichtungsgröße stellt das Produkt aus Röhrenstrom und Belichtungszeit dar. Im Diagrammfeld ist eine Schar gegeneinander geneigter Geraden eingetragen, deren Parameter die Röhrenspannung ist.

Da die Intensität der Röntgenstrahlen mit dem Quadrat des Abstands von der Strahlenquelle abnimmt, sind Belichtungsdiagramme für eine feste Entfernung des Films von der Röntgenröhre aufgestellt. Als Bezugspunkt in der Röhre gilt hierbei die Stelle auf der Anode, die den Ausgangsort der Röntgenstrahlen darstellt. Man nennt diese Stelle Brennfleck oder Fokus und die Entfernung bis zum Film Fokus-Film-Abstand (FFA). Den üblichen Belichtungsdiagrammen, die selbstverständlich jeweils nur für eine bestimmte Werkstoffart Gültigkeit haben, liegt meist ein Fokus-Film-Abstand von 70 cm zugrunde. Ist man aus irgendwelchen Gründen gezwungen, eine andere Entfernung zu wählen, so ändert sich die Belichtungsgröße mit dem Quadrat des Abstands. Ist z.B. a_1 der

Fokus-Film-Abstand, für den das Belichtungsdiagramm gilt und a_2 der, bei dem die Aufnahme durchgeführt werden soll, so ist die aus dem Diagramm entnommene Belichtungsgröße mit dem Faktor k zu multiplizieren, der wie folgt zu errechnen ist:

$$k = \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 .$$

Bild 3.7 zeigt den Aufbau eines Belichtungsdiagramms für die Durchstrahlung von Aluminiumlegierungen ohne Verstärkerfolien bei einem Fokus-Film-Abstand von 70 cm mit dem Röntgen-Grobstrukturgerät Type "TuR" M 200.

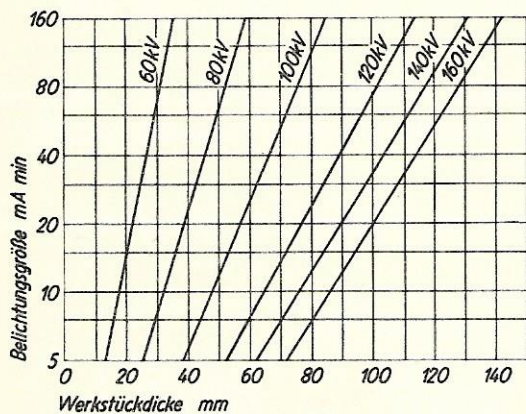


Bild 3.7 Belichtungsdiagramm für Aluminiumlegierungen

3.1.6. Erzielbare Bildgüte

Die Bildgüte einer Röntgenaufnahme, von der die zu erzielende Fehlererkennbarkeit in der Hauptsache abhängig ist, wird vom Kontrast und von der Zeichenschärfe bestimmt. Der Kontrast, den ein gegebener Werkstofffehler auf dem Röntgenfilm verursacht, ist im wesentlichen durch die Härte der verwendeten Röntgenstrahlung, durch Streustrahleneinflüsse und durch die Eigenschaften der fotografischen Schicht bedingt.

Die erzielbare Zeichenschärfe wird von der inneren Unschärfe der fotografischen Schicht U_i und der geometrischen oder Randunschärfe U_r bestimmt.

Die innere Unschärfe ist von der Körnigkeit des Filmmaterials, von Einflüssen der verwendeten Verstärkerfolien und von der Härte der Röntgenstrahlung abhängig. Sie beträgt

bei Aufnahmen ohne Folien bzw. mit Bleifolien auf Feinkornfilm etwa 0,1 bis 0,2 mm (je nach Strahlenhärte),

bei Aufnahmen mit scharfzeichnenden Folien etwa 0,3 mm,

bei Aufnahmen mit hochverstärkenden Folien etwa 0,4 mm.

Die geometrische oder Randunschärfe hängt ab von der Größe des Brennflecks (Fokus), der wegen der hohen thermischen Belastung der Anode nicht beliebig klein gemacht werden kann, und vom Abstand des Brennflecks vom Fehler. In normalen Röntgenröhren bewegt sich der Brennfleckdurchmesser ϕ in der Größenordnung von etwa 3 bis 4 mm. In Bild 3.8 sind die geometrischen Verhältnisse dargestellt, die die Entstehung der Randunschärfe bewirken.

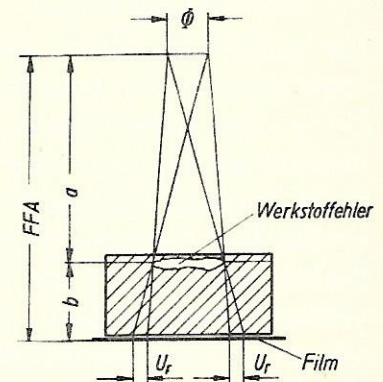


Bild 3.8 Entstehung der Randunschärfe

Die Randunschärfe, die einen Halbschatten darstellt, nimmt bei sonst gleichen geometrischen Verhältnissen mit wachsendem Abstand a des Brennflecks vom Fehler ab. Ein gegebener Fehler wird also um so schärfer, je größer der Fokus-Film-Abstand (FFA) gewählt wird. Andererseits nimmt jedoch die Strahlungsintensität mit dem Quadrat der Entfernung vom Brennfleck ab und damit die Belichtungszeit im gleichen Verhältnis zu. Man ist aus wirtschaftlichen Gründen bemüht, mit möglichst geringen Fokus-Film-Abständen zu arbeiten. Es muß also ein Kompromiß zwischen einer möglichst geringen Belichtungszeit und einer noch nicht störend in Erscheinung tretenden Randunschärfe geschlossen werden. Da es müßig wäre, einen Fehler schärfer abbilden zu wollen, als der Film ihn darzustellen vermag, herrschen optimale Verhältnisse, wenn der Fokus-Film-Abstand gerade so groß gewählt wird, daß die Randunschärfe gleich der zu erwartenden inneren Unschärfe ist. Man nennt diesen Abstand den optimalen Fokus-Film-Abstand FFA_{opt} . Er ergibt sich aus der Beziehung

$$FFA_{opt} = \frac{b (\phi + U_i)}{U_i}$$

b größtmöglicher Film-Fehler-Abstand (Entfernung zwischen der der Röntgenröhre zugewandten Seite des Werkstücks und dem Film)

Eine weitere Erhöhung des Fokus-Film-Abstands über FFA_{opt} hinaus bringt keinen Gewinn an Zeichenschärfe, sondern führt lediglich zu einer Verlängerung der Belichtungszeit. Eine Verringerung dagegen verschlechtert in jedem Fall die Zeichenschärfe.

Die Anwendung dieser theoretischen Überlegungen ist jedoch in der Prüfpraxis sehr umständlich. Das ist besonders dann der Fall, wenn Werkstücke mit verschiedenen Abmessungen in unregelmäßiger Folge zu prüfen sind. Es wäre mit

einem ungerechtfertigt hohen Zeitaufwand verbunden, wollte man für jede anzufertigende Röntgenaufnahme den optimalen Abstand errechnen. Man ist deshalb dazu übergegangen, im allgemeinen einen festen Fokus-Film-Abstand von 70 cm einzuhalten. Auf diese Entfernung sind auch in der Regel die Belichtungsdiagramme abgestimmt. Lediglich dann, wenn die zu prüfenden Werkstücke in der Einstrahlrichtung gemessen eine größere Ausdehnung besitzen, wie das mitunter bei hohlen Gußteilen der Fall sein kann, oder wenn man aus geometrischen Gründen den Film in einiger Entfernung hinter dem Prüfling anordnen muß, ist zu kontrollieren, ob der optimale Abstand nicht unterschritten wird.

3.1.7. Beurteilung der Bildgüte

Zur Kontrolle der bei einer Röntgenaufnahme erzielten Bildgüte bedient man sich sogenannter Drahtstege, die auf die filmferne Seite des Werkstücks aufgelegt und gemeinsam mit diesem auf dem Röntgenfilm abgebildet werden. Die Drahtstege bestehen aus sieben Drähten verschiedener Durchmesser, die in einem schwach absorbierenden Werkstoff - meist Gummi - eingebettet sind. Sie werden den verschiedenen Prüfaufgaben entsprechend aus Aluminium, Eisen oder Kupfer hergestellt und in vier Dickenabstufungen, je nach der zu durchstrahlenden Werkstoffdicke, angewendet. Man beurteilt die erzielte Bildgüte nach dem Verhältnis der Dicke des Werkstücks zu der des dünnsten auf dem Film noch zu erkennenden Drahts.

Das erhaltene Maß für die Bildgüte ist die Drahterkennbarkeit DE (in Prozent):

$$DE = \frac{\text{Durchmesser des kleinsten erkennbaren Drahts}}{\text{durchstrahlte Werkstoffdicke}} \cdot 100.$$

Die Richtlinien für die Beurteilung der Bildgüte von Röntgen- und Gamma-Filmaufnahmen mit Hilfe der genannten Drahtstege sind in DIN 54 110 festgelegt. Ein weiterer für die Röntgenprüfung wichtiger Standard ist DIN 54 111: Richtlinien für die Prüfung von Schweißverbindungen metallischer Werkstoffe mit Röntgen- und Gammastrahlen.

3.1.8. Röntgendurchleuchtung

Neben der zeitraubenden und teuren Röntgenfilmaufnahme hat sich schon sehr früh die Röntgendurchleuchtung durchgesetzt. Die Durchleuchtung kommt in der Hauptsache für Leichtmetallteile in Frage. Bei Stahl liegt die obere durchleuchtbare Grenze unter günstigen Verhältnissen bei einer Dicke von etwa 10 mm. An Stelle des Röntgenfilms wird als strahlenempfindlicher Indikator ein Leuchtschirm verwendet, der mit einer unter dem Einfluß der Röntgenstrahlung fluoreszierenden Schicht - meist Zinksulfid - präpariert ist. Das auf den Leuchtschirm projizierte Röntgen-Schattenbild erscheint im Unterschied zur Filmaufnahme als Positiv. Man erhält also, abgesehen von der Möglichkeit der Schirmbildfotografie, kein Prüfdokument. Ein Vorteil der Durchleuchtungsmethode besteht darin, daß man das Werkstück auf einem Drehtisch oder einer anderen Bewegungsvorrichtung anordnen kann. Damit erhält der Prüfer die Möglichkeit, den Prüfling während des Prüfvorgangs zu bewegen und von verschiedenen Seiten zu betrachten. Das gibt einen besseren Überblick über die räumliche Lage vorhandener Fehler als bei einer Röntgenaufnahme.

Das Durchleuchtungsverfahren hat jedoch eine Reihe erheblicher Nachteile. Die Helligkeit des Leuchtschirmbilds ist verhältnismäßig gering, so daß die Prüfung in einem völlig verdunkelten Raum bei dunkeladaptiertem, d.h. an die Dunkelheit angepaßtem Auge durchgeführt werden muß. Weiterhin ist die auf dem Leuchtschirm zu erzielende Zeichenschärfe wesentlich geringer als bei einer Filmaufnahme. Die innere Unschärfe von Zinksulfidschirmen liegt in der Größenordnung von 0,5 bis 0,7 mm. Allerdings kann man durch Vergrößerung des Abstands zwischen Werkstück und Leuchtschirm auch eine Vergrößerung des Schattenbilds auf das Vier- bis Sechsfache erreichen und damit die innere Unschärfe kompensieren. Zur Durchführung dieser Maßnahme ist eine besondere Feinfokusröhre erforderlich, die einen Brennfleck von 0,1 bis 0,2 mm Durchmesser besitzt, da andernfalls die geometrische Unschärfe unzulässig hohe Werte annimmt. Feinfokusröhren sind aber wegen ihres kleinen Brennflecks naturgemäß nur gering belastbar, was zu einer Herabsetzung der durchstrahlbaren Dicke und der Leuchtschirmhelligkeit führt.

Die bei der Anwendung des Durchleuchtungsverfahrens auftretenden Nachteile sind durch den Einsatz elektronischer Bildverstärker zu umgehen. Bild 3.9 zeigt das Wirkungsprinzip dieses Geräts.

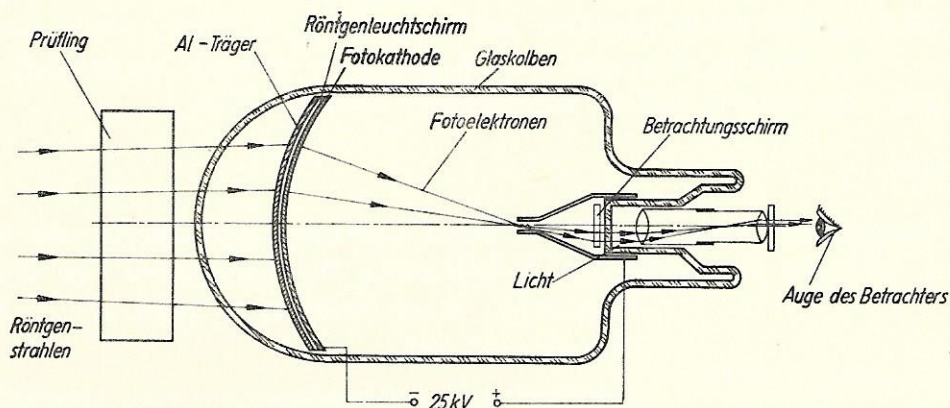


Bild 3.9 Elektronischer Röntgen-Bildverstärker

Elektronische Röntgen-Bildverstärker bestehen aus einem evakuierten Glasbehälter, in dem sich auf einem gewölbten Aluminiumträger ein Leuchtschirm befindet, der mit einer Fotokathodenschicht hinterlegt ist. Entsprechend dem Röntgen-Schattenbild auf diesem Leuchtschirm treten aus der Fotokathode Elektronen aus, deren Häufigkeitsverteilung den Helligkeitswerten des Schattenbilds entspricht. Die durch eine Spannung von etwa 25 kV beschleunigten Elektronen erzeugen beim Auftreffen auf einen kleinen Leuchtschirm ein verkleinertes scharfes Bild, dessen Leuchtdichte gegenüber einem normalen Schirmbild etwa um den Faktor 1000 verstärkt ist. Dieses verstärkte Bild wird durch eine binokulare, d.h. für das Sehen mit zwei Augen eingerichtete Optik betrachtet, die eine Vergrößerung der Darstellung auf die ursprünglichen Abmessungen bewirkt. Der Durchmesser des Röntgenleuchtschirms beträgt 135 mm, der des Beobachtungsschirms 14 mm. Die innere Unschärfe des betrachteten Bilds liegt bei 0,4 mm.

Mit Hilfe von elektronischen Bildverstärkern lassen sich unter Verwendung einer Feinfokusröhre bei einer Röhrenspannung von 150 kV Stahldicken bis zu 30 mm durchleuchten. Die Drahterkennbarkeit beträgt hierbei etwa 2,5 Prozent. Mit höher belastbaren Röhren kann die durchleuchtbare Stahldicke bei gleicher Röhrenspannung und einer Drahterkennbarkeit von etwa 4 Prozent bis auf 40 mm gesteigert werden. Die Durchleuchtung mit Bildverstärkern läßt sich auf Grund des außerordentlich hellen Schirmbilds bei Tageslicht oder im hell erleuchteten Raum mit helladaptiertem, d.h. an die Helligkeit angepaßtem Auge durchführen. Bild 3.10 (Seite 33) zeigt die technische Ausführung einer Bildverstärkeranlage.

3.1.9. Röntgengeräte

An die für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung eingesetzten Röntgengeräte werden hohe technische Anforderungen gestellt. Sie sollen bei einem weitestgehenden Hochspannungs- und Strahlenschutz eine hohe Durchstrahlungsleistung aufweisen und möglichst universelle Einsatzmöglichkeiten bieten. Das zieht die Forderung nach nicht zu hohem Gewicht, geringen Abmessungen und leichter Transportierbarkeit nach sich. Es ist unmöglich, all diese sich z.T. widersprechenden Forderungen in einer einzigen Geräteausführung zu vereinigen. Für die verschiedenen Einsatzgebiete haben sich daher verschiedene Ausführungsformen eingebürgert, die sich sowohl in ihrer äußeren Gestaltung als auch in ihrem technischen Aufbau voneinander unterscheiden.

Einpolanlagen

Einpol-Röntgenanlagen arbeiten in der Regel mit Röhrenspannungen bis zu 150 kV. Man bedient sich zur Erzeugung der Hochspannung im allgemeinen der VILLARD-Schaltung, deren Prinzip in Bild 3.11 schematisch dargestellt ist.

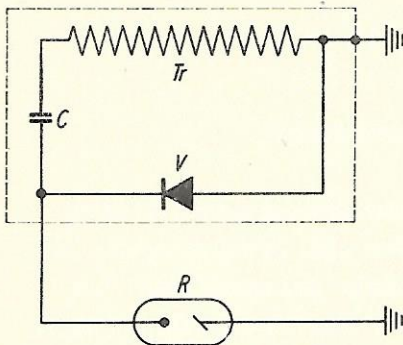


Bild 3.11 VILLARD-Schaltung

- C Hochspannungskondensator
- Tr Hochspannungstransformator
- V Gleichrichter
- R Röntgenröhre

Der Hochspannungskondensator wird während der ersten Halbperiode der Wechselspannung über den Gleichrichter - Glühventil oder Trockengleichrichter - auf die Spannung des Hochspannungstransformators aufgeladen. In der zweiten Halbperiode addiert sich dann die Spannung des Kondensators zur Transformatorspannung, so daß an der Röntgenröhre eine pulsierende Gleichspannung liegt, deren Wert im Rhythmus der Wechselstromfrequenz periodisch zwischen Null und der doppelten Transformatorspannung pendelt. Durch einen Glättungszusatz (Bild 3.12), bestehend aus einem zweiten Kondensator und einem zweiten, an den Hochspannungserzeuger angeschalteten Gleichrichter, kann man die pulsierende Gleichspannung in eine kontinuierlich konstante ("k.k.") Gleichspannung umwandeln. Das hat den Vorteil einer besseren Strahlenausbeute bei gleicher Röhrenspannung und ergibt damit kürzere Belichtungszeiten bzw. hellere und flimmerfreie Schirmbilder. Außer-

Man bedient sich zur Erzeugung der Hochspannung im allgemeinen der VILLARD-Schaltung, deren Prinzip in Bild 3.11 schematisch dargestellt ist.

dem ist die Anwendung der k.k. Gleichspannung mit einer Schonung der Hochspannungskabel verbunden. Bei Anlagen, die für k.k. Gleichspannung ausgelegt sind, ist die in Bild 3.12 dargestellte Schaltung in einem gemeinsamen Gehäuse vereinigt. Da die Schaltungsanordnung einseitig geerdet ist, wird nur die Kathode der Röntgenröhre mit dem Hochspannungspotential beaufschlagt, während die Anode auf Erdpotential liegt. Das ermöglicht, die Anode auf einfachste Weise durch Anschluß an die Wasserleitung zu kühlen.

Einpol-Röntgenanlagen eignen sich für die Durchstrahlung mittlerer Werkstückdicken bis zu etwa 55 mm Stahl. Sie werden weiterhin in Verbindung mit Feinfokusröhren für Durchleuchtungszwecke eingesetzt. Eine besondere Bedeutung kommt ihnen bei der Durchstrahlung von Hohlkörpern mit Hilfe von Hohlanodenröhren zu. Das sind Röntgenröhren, deren Anode aus einem 300 bis 1000 mm langen, mit dem Röhrenkolben vakuumdicht verbundenen Metallrohr besteht. Das freie Ende des Anodenrohrs ist mit einer meist kegelförmigen Kappe ebenfalls vakuumdicht verschlossen. Einen Querschnitt durch eine Hohlanodenröhre zeigt Bild 3.13.

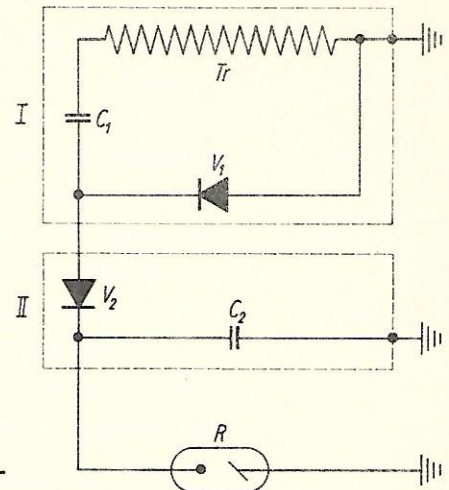


Bild 3.12 VILLARD-Schaltung mit Glättungszusatz

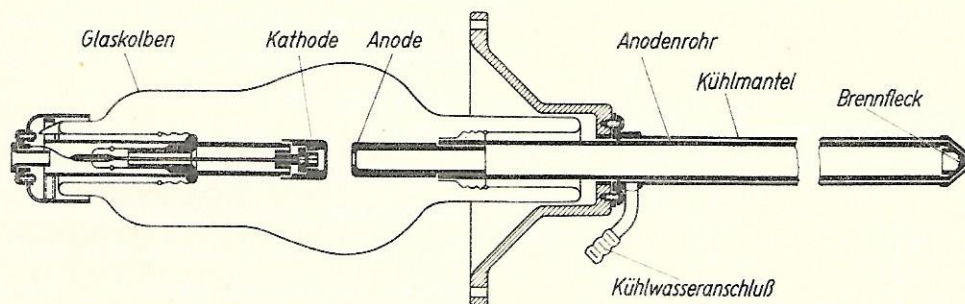


Bild 3.13 Hohlanodenröhre

Beim Betrieb der Hohlanodenröhre tritt das von der Kathode emittierte Elektronenbündel in das Anodenrohr ein und wird dort durch das magnetische Feld einer oder mehrerer von außen über das Rohr geschobener Sammelspulen -Striktionsspulen- so eingeschnürt, daß an dem kegelförmigen Rohrabschluß ein scharfer Brennfleck entsteht. Die dort entstehenden Röntgenstrahlen durchsetzen die Wand der Anode und treten innerhalb eines bis zu 270° großen Raumwinkels nach allen Richtungen hin aus (Bild 3.14a, Seite 30). Bei einer anderen Ausführung ist am inneren Rohrende eine plattenförmige Anode angebracht (Bild 3.14b, Seite 30). Hier entsteht ein ringförmiges Strahlenbündel. Schließlich kann man die Anode unter 45° zur Röhrenachse anbringen und so einen einseitigen Austritt des Strahlenbündels bewirken (Bild 3.14c, Seite 30). Die Anodenrohre von Hohlanodenröhren sind im allgemeinen mit einem Mantel umgeben, durch den Kühlwasser fließt.

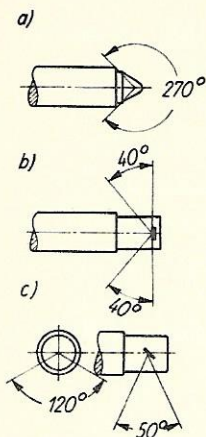


Bild 3.14
Anodenformen

Bei der Prüfung von Hohlkörpern wird das Anodenrohr in das Innere eingeführt und die Wand von innen nach außen durchstrahlt. Hierbei können z.B. Rundschweißnähte unter Verwendung von Rundstrahlern mit einer einzigen Aufnahme vollständig erfaßt werden. Bei der Serienprüfung von Leichtmetall-Gußteilen wendet man zum Zweck der rationelleren Prüfung mitunter auch eine Aufnahmetechnik an, deren Durchführung ebenfalls eine rundstrahlende Hohlanodenröhre voraussetzt. Es handelt sich um die Panorama-Aufnahme, auch Karussell-Aufnahme genannt, bei der um die Röhre herum mehrere gleichartige Prüflinge angeordnet und gleichzeitig durchstrahlt werden.

Bild 3.15 (Seite 33) zeigt die technische Ausführung einer Einpol-Röntgenanlage mit Hohlanodenröhre. Einpolanlagen lassen sich häufig zu Zweipolanlagen ergänzen.

Zweipolanlagen

Zweipolanlagen sind im allgemeinen Hochleistungsanlagen, die für Röhrenspannungen von 200 bis zu 400 kV gebaut werden. Zur Hochspannungserzeugung werden meist symmetrische Schaltungen verwendet, bei denen zwei Hochspannungserzeuger auf der Plus- und Minusseite der Röhre so angeordnet sind, daß jeder von ihnen die Hälfte der Röhrenspannung aufzubringen hat. Zweipolanlagen arbeiten in der Regel mit k.k. Gleichspannung, d.h., jeder der beiden Hochspannungserzeuger I und II entspricht einer VILLARD-Schaltung mit Glättungszusatz. Ein

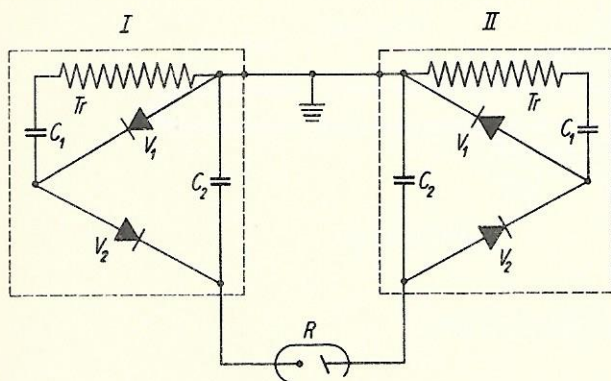


Bild 3.16 Schaltung einer Zweipolanlage

charakteristisches Schaltschema einer Zweipolanlage für k.k. Gleichspannung ist in Bild 3.16 dargestellt. Bei der Zweipolanlage liegen beide Elektroden der Röntgenröhre auf Hochspannungspotential. Die Röhre wird durch ein hochwertiges Isolieröl gekühlt. Das bedingt ein Ölkühlaggregat, in dem der Ölvorratsbehälter, eine Umlaufpumpe und eine Rückkühlvorrichtung vereinigt sind. Die Rückkühl-

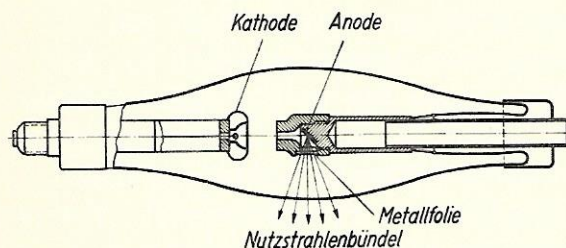


Bild 3.17 Grobstruktur-Röntgenröhre

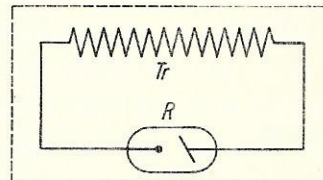
vorrichtung besteht meist aus einer Kühlschlange, die den Vorratsbehälter durchzieht und von Wasser durchflossen ist. Mit ihrer Hilfe kann die vom Kühlöl aufgenommene Verlustwärme der Röntgenröhre abgeführt werden. Eine Grobstruktur-Röntgenröhre für 200 kV zeigt Bild 3.17. Diese Röhren sind im allgemeinen hoch belastbar und gestatten die rentable Durchstrahlung auch größerer Werkstückdicken. Zweipol-Röntgenanlagen

sind universell einzusetzen und stellen den am meisten verbreiteten Gerätetyp dar. Ihr beweglicher Einsatz ist jedoch durch die starke Zergliederung in mehrere Bauteile verhältnismäßig umständlich. Bild 3.18 (Seite 33) zeigt eine Grobstruktur-Röntgenanlage, die sich im praktischen Einsatz sehr gut bewährt hat. Sie besteht aus den beiden Hochspannungserzeugern, dem Ölkühlaggregat, dem Schalterpult und dem Stativ mit der Röntgenröhre. Das Gerät ist für eine Röhrenspannung von 200 kV bei einem Röhrenstrom von 20 mA ausgelegt und arbeitet mit k.k. Gleichspannung. Die obere Grenze der Durchstrahlungsleistung liegt bei etwa 80 mm Stahl bzw. 350 mm Aluminium. Zweipol-Röntgenanlagen lassen sich mitunter auch als Einpolanlagen betreiben, indem nur einer der beiden Hochspannungserzeuger verwendet wird.

Eintankanlagen

Im Kessel- und Brückenbau, auf Schiffswerften und im Flugzeugbau ist es vielfach erforderlich, mit der Röntgenanlage an das zu prüfende Objekt heranzugehen und die benötigten Röntgenaufnahmen außerhalb des Röntgenraums anzufertigen. Für solche Fälle sind besonders leichte und handliche Röntgengeräte, sogenannte Eintankanlagen, mitunter auch Einkesselanlagen genannt, entwickelt worden.

Eintank-Röntgengeräte bestehen in der Regel nur aus zwei Teilen: dem Schaltkoffer und dem eigentlichen Röntgentank, in dem der Hochspannungstransformator und die Röntgenröhre zu einem Aggregat vereinigt sind. Im Interesse eines gedruckten und möglichst leichten Aufbaus wird bei Eintankanlagen auf eine Gleichrichtung der Hochspannung verzichtet. Die vom Hochspannungstransformator gelieferte Wechselspannung liegt direkt an der Röntgenröhre, die selbst als Ventil wirkt und nur jeweils die Halbwelle hindurchläßt, bei der die Kathode auf negativem und die Anode auf positivem Potential liegt. Man spricht von einer Halbwellenschaltung, deren Prinzip aus Bild 3.19 hervorgeht.



Das Gehäuse, in dem Transformator und Röhre untergebracht sind, ist zur Isolierung und Kühlung mit einem Isolieröl gefüllt. Das Öl wird von einer kleinen Pumpe umgewälzt und die aufgenommene Verlustwärme über die Gehäuseoberfläche abgestrahlt.

Bild 3.19 Halbwellenschaltung

Eintank-Röntgenanlagen werden in Ausführungen zwischen 100 und 250 kV Röhrenspannung gebaut. Je nach Fabrikat und Leistung der jeweiligen Eintankanlage liegt die Masse des Schaltkoffers, in dem sämtliche Bedienungs- und Kontrollorgane eingebaut sind, zwischen etwa 10 und 40 kg. Die Masse des Röntgentanks beträgt 20 bis 115 kg. Beide Bauteile sind in der Regel durch ein leichtes, biegsames Niederspannungskabel verbunden. Der Röntgentank kann somit auch an höher gelegenen Aufnahmeorten angeordnet werden, ohne daß herunterhängende Hochspannungskabel oder Kühlschläuche die Arbeit behindern. Die Größe der Röntgentanks ist meist so gehalten, daß sie sich durch genormte Mannlöcher in Kessel oder andere Behälter einbringen lassen.

Bei sinnvoller Anwendung der Röntgenprüfung mit Hilfe von Eintankanlagen lassen sich z.B. bei der turnusmäßigen Überprüfung von Flugzeugen erhebliche Kosten einsparen. Viele Teile, die zur Kontrolle bisher ausgebaut werden mußten, können mit großer Sicherheit auch im eingebauten Zustand geprüft werden. Bild 3.20 (Seite 33) zeigt die Tragflächendurchstrahlung mit Hilfe einer Eintankanlage.

Auch in der DDR hat man die Vorteile erkannt, die Eintankanlagen bei ortsveränderlichem Einsatz bieten. Im VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden ist unter der Bezeichnung Einkessel-Grobstruktur-Röntgengerät TuR M 100 eine Anlage, ausgelegt für eine Röhrenspannung von 100 kV, entwickelt worden. Bild 3.21 (Seite 33) zeigt die beiden Baueinheiten.

3.1.10. Strahlenschutz

Es ist allgemein bekannt, daß Röntgenstrahlen in größeren Dosen den menschlichen Organismus schädigen. Bei der Röntgen-Grobstrukturprüfung sind daher besondere Strahlenschutzmaßnahmen durchzuführen, die eine Gesundheitsschädigung mit Sicherheit ausschließen. Die gesetzliche Grundlage für die einzuhaltenden Maßnahmen ist die Arbeitsschutzanordnung 951: Anwendung von Röntgenstrahlen in nichtmedizinischen Betrieben. Darin ist im wesentlichen festgelegt, daß die mit der Röntgenprüfung beschäftigten Personen ausreichende Kenntnisse über Wesen und Gefahren der Röntgenstrahlung sowie über die erforderlichen Strahlenschutzmaßnahmen besitzen müssen. Nach Ablegen einer Prüfung vor der zuständigen Arbeitsschutzinspektion wird ein Befähigungsnachweis ausgestellt.

Röntgenanlagen sind zulassungs- und überwachungspflichtig. Sie müssen in Zeitabständen von zwei Jahren von einem prüfberechtigten Arbeitsschutzinspektor in elektrotechnischer und strahlenschutzmäßiger Hinsicht überprüft werden. Die zulässige Strahlendosis darf an allen Arbeits- und Aufenthaltsplätzen 0,3 r je Woche nicht überschreiten (r Röntgen: Maßeinheit für die Strahlendosis). Die mit der Röntgenprüfung beschäftigten Personen, die ein Mindestalter von 21 Jahren haben müssen, sind in Abständen von einem halben Jahr ärztlich zu untersuchen.

Ortsfest betriebene Röntgenanlagen müssen in Räumen aufgestellt werden, deren Wände und Türen einen genügenden Strahlenschutz bieten. Zur Isolierung der Wände benutzt man im allgemeinen ein als Putz aufgebrachtes oder in den Zwischenraum der doppelten Wand eingestampftes Schwerspat-Zement-Gemisch. Türen werden in der Regel mit Walzblei isoliert. Bei Arbeiten außerhalb des Röntgenraums ist ein genügender Abstand zum Röntgengerät, mindestens 10 m, zu wahren. Das Gelände um den Ort der Prüfung herum ist abzusperren und durch entsprechende Warnschilder zu sichern.

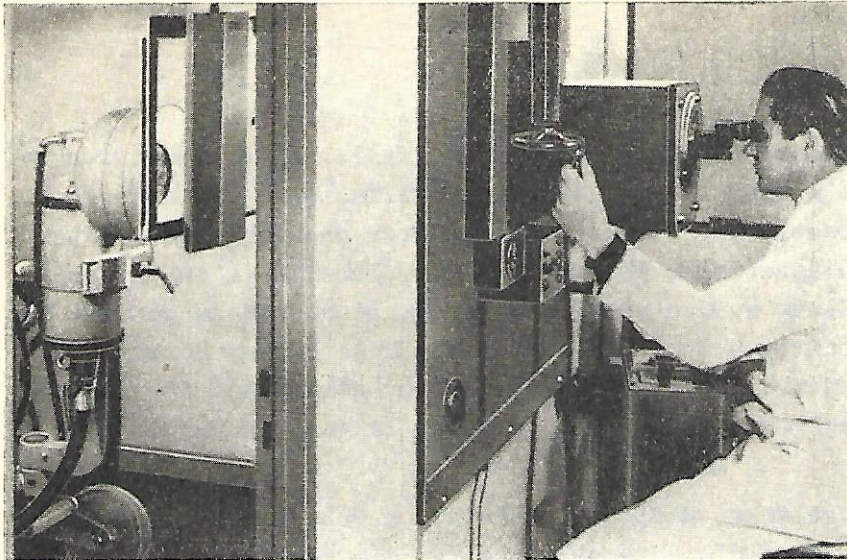


Bild 3.10 Röntgenbildverstärkeranlage

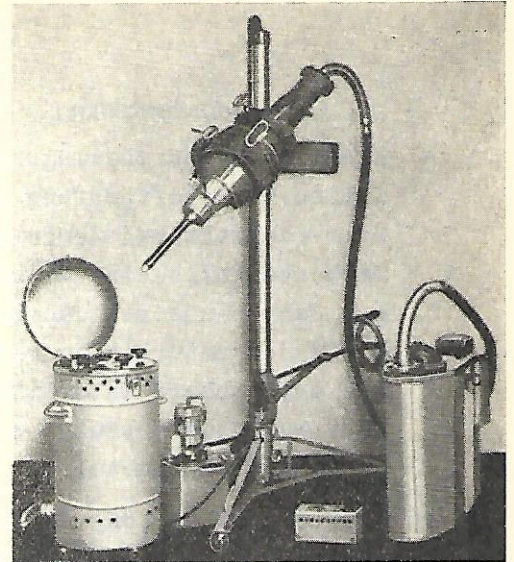


Bild 3.15 Einpol-Röntgenanlage Isolux 150 mit
Hohlanodenröhre
Rich. Seifert u. Co., Hamburg

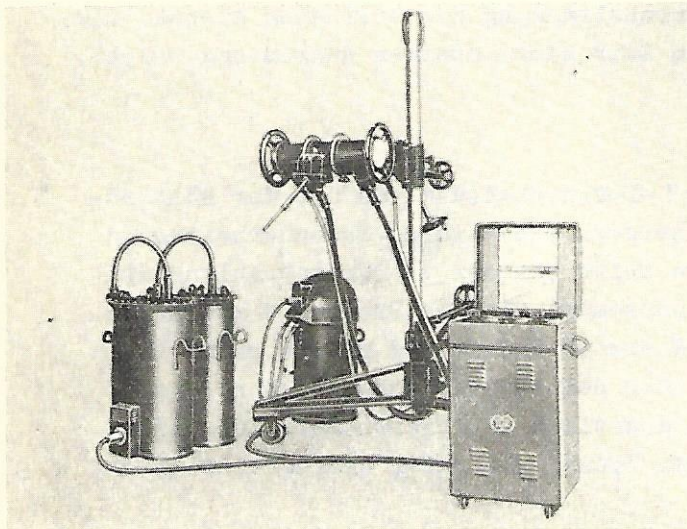


Bild 3.18 Zweipol-Röntgenanlage TuR M 200
VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden

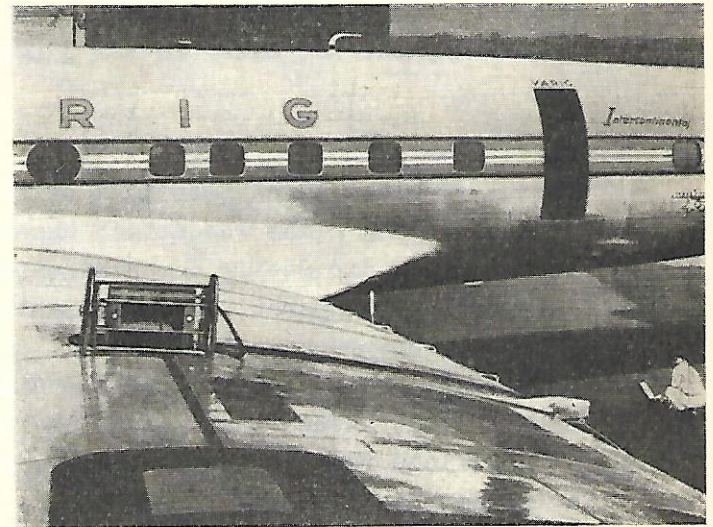


Bild 3.20 Durchstrahlung eines Tragflügels

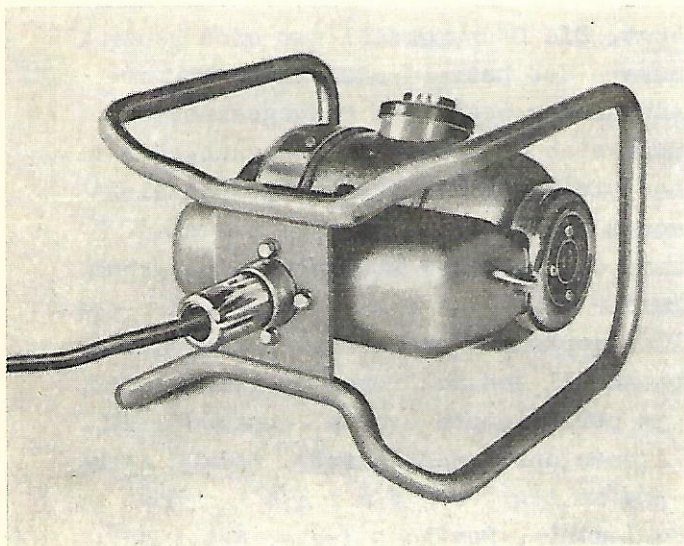
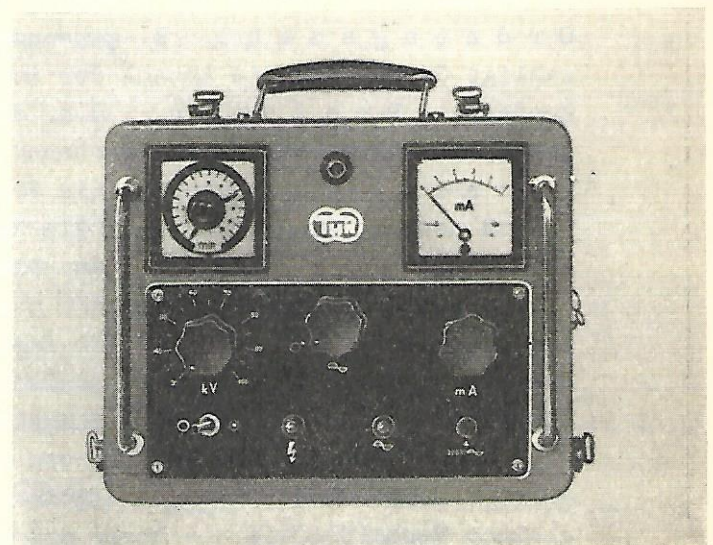


Bild 3.21 Einkessel-Grobstruktur-Röntgengerät
a) Röhrenschutzgehäuse mit Halterahmen
VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden



b) Schaltkoffer

3.2. Gammadurchstrahlung

Eine andere durchdringungsfähige Strahlenart, die ebenfalls in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung zum Einsatz kommt, ist die γ -Strahlung. Sie entsteht beim radioaktiven Zerfall bestimmter Stoffe und ist ihrer physikalischen Natur nach ebenfalls eine elektromagnetische Wellenstrahlung. Bereits in den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts wurden spezielle Werkstoffuntersuchungen mit Hilfe der natürlichen radioaktiven Strahler Radium und Mesothorium durchgeführt. Die erreichbare Intensität der Strahlung war jedoch sehr gering und die Präparate waren sehr teuer, so daß man dieses Prüfverfahren lange Zeit nur in Sonderfällen anwendete.

Erst die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität durch Frédéric und Irène JOLIOT-CURIE im Jahre 1934 schuf die Voraussetzung für die Herstellung leistungsfähiger Strahlenquellen. So hat die durch die Entwicklung der modernen Kerntechnik möglich gewordene künstliche Aktivierung der verschiedensten Elemente im Atomreaktor dazu geführt, daß heute eine ganze Reihe geeigneter radioaktiver Isotope für die technische γ -Durchstrahlung zur Verfügung stehen. Diese Prüfmethode hat daher in der jüngsten Zeit einen starken Aufschwung erlebt.

3.2.1. Strahlenquellen

Obwohl sich die Aufnahmetechnik bei der γ -Durchstrahlung von der der Röntgendurchstrahlung nicht wesentlich unterscheidet, sind einige Besonderheiten zu beachten. An die Stelle der Röntgenröhre tritt bei der γ -Durchstrahlung ein radioaktives Präparat, das γ -Strahlen aussendet. Solche Präparate können natürlichen Ursprungs sein, wie z.B. die Elemente Radium und Mesothorium. Die natürlichen radioaktiven Strahler sind aber selten und deswegen sehr teuer. Man verwendet heute fast ausschließlich künstlich aktivierte Strahlenquellen - künstliche radioaktive Isotope -, deren Preis weit unter dem der natürlich vorkommenden Strahler liegt.

3.2.2. Wesen und Herstellung radioaktiver Isotope

Im periodischen System der Elemente sind die vorkommenden Elemente durch ihre **O r d n u n g s z a h l** **Z** gekennzeichnet. Die Ordnungszahl ist eine ganzzahlige Größe, die die Anzahl der im Atomkern des betreffenden Elements vorhandenen **P r o t o n e n**, d.h. die Anzahl der positiven Ladungseinheiten des Kerns angibt. Neben den Protonen finden sich aber im Atomkern auch **N e u t r o n e n**, die ebenso wie die Protonen die Masse 1 besitzen, jedoch elektrisch neutral sind. Man sieht die Neutronen als den Sitz der **K e r n - b i n d u n g s k r ä f t e** an. Die Summe der in einem Atomkern vorhandenen Protonen und Neutronen bezeichnet man als die **M a s s e n z a h l** oder das **A t o m g e w i c h t** **A**. In fast allen vorkommenden Elementen finden sich nun aber Atome, die eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen besitzen, d.h., sie haben wohl die gleiche Ordnungszahl im periodischen System, unterscheiden sich aber durch ihr Atomgewicht von den Atomen des Grundelements. Solche Atomarten werden **I s o t o p e** genannt, sie zeigen **c h e m i s c h** das gleiche Verhalten wie die Atome des Grundelements. Das Wort Isotop ist aus

den griechischen Worten isos (gleich) und topos (Platz) zusammengesetzt und bedeutet, daß diese Atomarten auf Grund ihrer gleichen Ordnungszahl im periodischen System am gleichen Platz stehen. Die Atomkerne der natürlichen vorkommenden Isotope sind in der Regel stabil, d.h., sie verändern sich nicht.

Im Verlaufe der Forschungen auf dem Gebiet der Kernphysik ist es gelungen, Isotope künstlich zu erzeugen. Das geschieht im allgemeinen so, daß bestimmte Elemente im Kernreaktor dem Neutronenbeschuß ausgesetzt werden. Dabei werden von den Atomkernen des bestrahlten Elements Neutronen eingefangen. Die Atomkerne werden in einen angeregten Zustand versetzt. Die künstlichen Isotope sind aber im Gegensatz zu den natürlichen nicht stabil. Die angeregten Kerne zerfallen vielmehr wieder unter Abgabe von Energie, die in Form radioaktiver Strahlung ausgesandt (emittiert) wird. Eine andere Möglichkeit der Gewinnung radioaktiver Isotope besteht darin, daß bestimmte im Kernreaktor entstehende radioaktive Spaltprodukte des Urans nach der Entfernung der ausgebrannten Uranstäbe aus dem Reaktor isoliert werden. Man kann auf die genannten Arten mehr als 500 verschiedene radioaktive Isotope herstellen. Jedoch haben z.Z. auf Grund ihrer spezifischen Eigenschaften nur etwa 15 bis 20 technische Bedeutung.

3.2.3. Arten radioaktiver Strahlen

Der radioaktive Zerfall der Isotope kann entweder als α - oder als β -Zerfall erfolgen. Im erstgenannten Fall wird α -Strahlung emittiert. Es handelt sich dabei um eine Korpuskularstrahlung, die aus Kernen des Heliumatoms mit dem Atomgewicht 4 und einer doppelt positiven Ladung (2 Protonen + 2 Neutronen) besteht.

Der weitaus häufigere β -Zerfall erfolgt unter Aussendung der ebenfalls korpuskularen β - oder Elektronenstrahlung. Die abgestrahlten Korpuskeln sind Elektronen, d.h., sie besitzen eine negative Ladung und eine Masse von ungefähr $5,5 \cdot 10^{-4}$.

Beide Zerfallsarten sind meist von einer dritten Strahlenart, der γ -Strahlung begleitet, die eine elektromagnetische Wellenstrahlung darstellt und physikalisch der Röntgenstrahlung gleichzusetzen ist, nur daß die Röntgenstrahlung ihren Ursprung in der Elektronenhülle hat, während die γ -Strahlung aus dem Atomkern kommt und im allgemeinen eine höhere Energie besitzt.

3.2.4. Verhalten radioaktiver Strahlen beim Durchdringen von Körpern

Beim Durchdringen eines Körpers tritt die radioaktive Strahlung in Wechselwirkung mit den Atomen der durchstrahlten Materie und wird dabei geschwächt. Die Schwächung ist jedoch bei den einzelnen Strahlenarten sehr verschieden. Während α - und β -Strahlen nur eine geringe Eindringtiefe erreichen, ist die Durchdringungsfähigkeit bei der γ -Strahlung weitaus größer. In Bild 3.22 (Seite 36) sind die Verhältnisse dargestellt, die beim Durchstrahlen von Aluminium herrschen, wenn alle drei Strahlenarten die gleiche Strahlungsenergie von 1 MeV besitzen (auf den Begriff Strahlungsenergie wird später noch eingegangen).

Auf Grund dieser Verhältnisse ist für die Durchstrahlung von Werkstücken zum Zwecke der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung nur die γ -Strahlung geeignet, auf die sich daher die nachfolgenden Ausführungen ausschließlich beschränken.

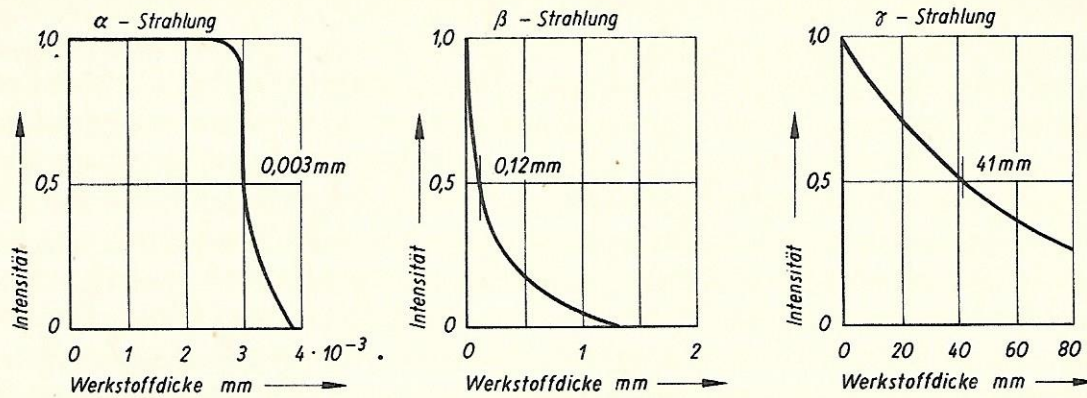


Bild 3.22 Schwächung von α -, β - und γ -Strahlung mit einer Energie von 1 MeV in Aluminium

3.2.5. Kenngrößen der Gammastrahler

Soll ein radioaktives Isotop, das γ -Strahlung emittiert, für die Werkstückdurchstrahlung verwendet werden, so sind in der Hauptsache vier wichtige Kenngrößen für die Brauchbarkeit des Präparats entscheidend:

1. die Energie der ausgesandten γ -Strahlung,
2. die Aktivität der Strahlenquelle,
3. die Halbwertszeit des Isotops und
4. die geometrischen Abmessungen des Strahlers.

Die Energie einer γ -Strahlung wird in Mega-Elektronenvolt (MeV) gemessen. 1 MeV entspricht vergleichsweise der Energie eines Elektrons, das durch eine Potentialdifferenz von 1 Million Volt beschleunigt wurde. Liegt z.B. an einer Röntgenröhre eine Spannung von 250 kV, so treffen die von der Kathode emittierten Elektronen mit einer Energie von 0,25 MeV auf die Anode der Röhre. Dieser Energie entspricht auch angenähert die unter den genannten Verhältnissen erzeugte Röntgenstrahlung. Mit wachsender Strahlungsenergie, oft auch als Strahlenhärte bezeichnet, wächst die Durchdringungsfähigkeit der γ -Strahlen.

Die Maßeinheit für die Aktivität einer Strahlenquelle ist das Curie (C). 1 C liegt dann vor, wenn in einem radioaktiven Präparat je Sekunde $3,7 \cdot 10^{10}$ Zerfallsakte stattfinden. Je höher die Aktivität eines Strahlers ist, um so größer ist die Intensität der emittierten Strahlung und um so wirtschaftlicher lassen sich die gegebenen Durchstrahlungsaufgaben durchführen, um so schwieriger ist es jedoch, die Forderungen des Strahlenschutzes zu erfüllen, über die später noch zu sprechen sein wird.

Als Halbwertszeit eines Isotops wird die Zeit bezeichnet, während der die Aktivität des Präparats auf die Hälfte abgeklungen ist. Eine Strahlenquelle ist also um so länger verwendbar, je größer ihre Halbwertszeit ist.

Die geometrischen Abmessungen einer Strahlenquelle, die für die Durchstrahlung von Werkstücken verwendet werden soll, sind in ihrer Wirkung auf die Brauchbarkeit des Strahlers mit der Brennfleckgröße einer Röntgenröhre vergleichbar. Es ist also aus Gründen der Strahlengeometrie ein Präparat mit möglichst kleinen Abmessungen zu verwenden. Die Maße eines Strahlers hängen aber von der spezifischen Aktivität des Isotops, gemessen in C/cm^3 oder C/g , ab. Diese wiederum läßt sich über einen gewissen, von den Reaktorverhältnissen abhängigen Wert (spezifische Sättigungsaktivität) hinaus nicht steigern.

3.2.6. Unterschied zwischen Röntgen- und Gammastrahlung

In den bisherigen Ausführungen wurde festgestellt, daß die γ -Strahlen ihrer physikalischen Natur nach den Röntgenstrahlen gleichen (elektromagnetische Wellenstrahlung) und die Strahlungsenergie einer γ -Strahlung angenähert der einer Röntgenstrahlung gleichkommt, die bei einer entsprechenden Röhrenspannung gewonnen wird. Das legt den Schluß nahe, daß beide Strahlenarten identisch sind. Es besteht jedoch zwischen der Röntgen- und der γ -Strahlung ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal in Form der spektralen Energieverteilung. Wie aus Bild 3.23 ersichtlich ist, besitzt die für die technische Durchstrahlung von Werkstücken verwendete Röntgenstrahlung ein kontinuierliches Bremspektrum (vgl. 3.1.2.), während die γ -Strahlung ein Linienspektrum aufweist, das in der Regel aus mehreren Linien diskreter Energie besteht.

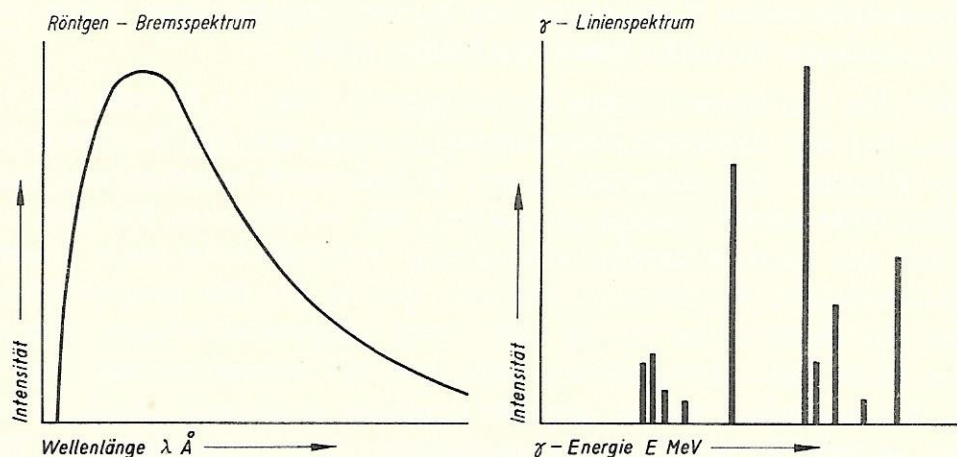


Bild 3.23 Spektrale Verteilung der Röntgen- und γ -Strahlung

In der gezeichneten Darstellung ist bei dem Röntgenspektrum auf der Abszisse die Wellenlänge λ (Å) aufgetragen, während bei dem γ -Spektrum die Energie E (MeV) als Abszissenwert erscheint. Das entspricht den in der Technik gebräuchlichen Maßeinheiten. Die Strahlungsenergie kann analog zu den Verhältnissen bei der Röntgenstrahlung (vgl. 3.1.2.) in die entsprechende Wellenlänge umgerechnet werden über die Beziehung

$$\lambda = \frac{12,4}{E} .$$

Hierin ist

λ Wellenlänge in Angström ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$)

E Strahlungsenergie in Kilo-Elektronenvolt ($1 \text{ keV} = 10^{-3} \text{ MeV}$).

3.2.7. Strahlenquellen für die technische Gammadurchstrahlung

Von den vielen künstlich aktivierten γ -Strahlenquellen haben sich wegen ihrer spezifischen Eigenschaften besonders vier für die technische γ -Durchstrahlung bewährt, die in der folgenden Übersicht genannt sind:

Isotop	Halbwertszeit	mittlere Strahlungs-Energie MeV	Anwendungsbereich mm Fe
Kobalt 60	5,26 Jahre	1,25	50...160
Caesium 137	33 Jahre	0,66	30...100
Iridium 192	74,5 Tage	0,45	8... 50
Thulium 170	127 Tage	0,084	... 10

Die Auswahl der anzuwendenden γ -Strahler richtet sich nach den zu lösenden Durchstrahlungsaufgaben. Neben technischen Gesichtspunkten spielen hierbei wegen der begrenzten Lebensdauer der Präparate und ihres beträchtlichen Preises auch ökonomische Erwägungen eine Rolle. So ist es z.B. wirtschaftlich kaum vertretbar, einen Strahler anzuschaffen, dessen Halbwertszeit nach Tagen zählt, wenn nur hin und wieder einmal ein Werkstück zu prüfen ist. Auch sollten für Prüfprobleme, die sich mit Hilfe der Röntgendurchstrahlung lösen lassen, im allgemeinen keine γ -Strahler zum Einsatz kommen, wenn nicht technische oder ökonomische Vorteile damit verbunden sind.

Die Aktivität der zum Einsatz kommenden Präparate liegt z.Z. zwischen etwa 1 und 10 Curie. Bei der Röntgendurchstrahlung rechnet man mit Belichtungszeiten von mehreren Minuten. Zur Anfertigung von γ -Aufnahmen benötigt man bei dem genannten Aktivitätsniveau Belichtungszeiten bis zu mehreren Stunden. Das hat zur Folge, daß die internationale Entwicklung auf Präparate immer höherer Aktivitäten hinausläuft. So ist z.B. bekannt, daß in den USA bereits Kobalt-60-Präparate mit Aktivitäten bis zu 2000 Curie eingesetzt werden. Das ermöglicht extrem kurze Belichtungszeiten, auch bei der Durchstrahlung sehr dicker Werkstücke. Die Anwendung derart starker Strahler erfordert jedoch einen beträchtlichen Aufwand an Strahlenschutzmaßnahmen, denn ebenso wie die Röntgenstrahlen sind auch die radioaktiven Strahlen für den menschlichen Organismus schädlich.

Um einen Eindruck von der Gestalt und der ungefähren Größe einer γ -Strahlenquelle zu vermitteln, soll noch erwähnt werden, daß die aktive Substanz in zylindrischer Form mit meist quadratischem Durchmesser-Längen-Verhältnis geliefert wird. Bei den gebräuchlichen Aktivitäten betragen die Abmessungen etwa $5 \times 5 \text{ mm}$; sie können bei stärkeren Präparaten bis zu etwa $15 \times 15 \text{ mm}$ anwachsen.

Die für die technische γ -Durchstrahlung bestimmten radioaktiven Isotope werden nur als "geschlossene Präparate" in den Handel gebracht. Die strahlende Substanz ist von einer dicht verlöteten Metallhülse allseitig umschlossen, damit kein aktives Material verlorengehen bzw. verschleppt werden kann.

3.2.8. Aufnahmetechnik

Die Anfertigung einer γ -Filmaufnahme unterscheidet sich im Prinzip sehr wenig von der einer Röntgenaufnahme. Die erzielten Schattenbilder sind wegen der im allgemeinen härteren Strahlung kontrastärmer als bei der Röntgenprüfung. Das hat den Vorteil, daß man mit Hilfe der γ -Durchstrahlung auch Aufnahmen von Werkstücken mit relativ großen Waddickenunterschieden ohne größere Schwierigkeiten anfertigen kann. Das ist bei der Röntgenprüfung nur mit Hilfe eines Dickenausgleichs durch geeignete Absorptionspasten möglich. Unter der Kontrastminderung leidet jedoch die Detailerkennbarkeit, so daß γ -Filmaufnahmen in der Regel eine geringere Bildgüte besitzen als Röntgenaufnahmen. Die Bildqualität wird außerdem dadurch vermindert, daß die innere Unschärfe von γ -Aufnahmen durch die Auslösung energiereicher Sekundärelektronen in der Schicht des Films größer ist als bei Röntgenaufnahmen. Trotz Verwendung von Feinkornfilmen in Verbindung mit Bleifolien erreicht man bei Kobalt-60-Aufnahmen nur eine innere Unschärfe von etwa 0,4 mm. Bei dem weicher strahlenden Iridium 192 dagegen lassen sich unter sonst gleichen Bedingungen Werte von etwa 0,2 mm erreichen. Bei der Benutzung von Salzfolien erreicht die innere Unschärfe Werte von 0,6 bis 0,7 mm, so daß sich diese Folienart für die γ -Durchstrahlung nicht eignet. Die hier eingesetzten Bleifolien haben meist eine Dicke von 0,15 mm sowohl für die Vorder- als auch für die Hinterfolie.

Da die Belichtungszeiten bei der Anfertigung von γ -Aufnahmen unter Verwendung von Präparaten der z.Z. üblichen Aktivitäten mehrere Stunden betragen können, hat sich aus wirtschaftlichen Gründen die Technik der Panoramaaufnahme durchgesetzt. Bei dieser werden mehrere Werkstücke kreisförmig um die Strahlenquelle herum angeordnet und gleichzeitig durchstrahlt (Bild 3.24, Seite 41). Als vorteilhaft ist dabei zu werten, daß die Aufnahme auch außerhalb der normalen Arbeitszeit ohne Beaufsichtigung durchlaufen kann, da die γ -Strahlung unabhängig von einer äußeren Energiezufuhr ist.

Die Belichtungszeiten werden aus Belichtungsdiagrammen gewonnen. Die Belichtungsgröße stellt das Produkt aus Aktivität des Präparats und Belichtungszeit dar ($mC \cdot h$) und ist auf der Ordinate in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Die Abszisse ist in mm Werkstoffdicke geteilt. Im Diagrammfeld befindet sich eine Schar paralleler Geraden, die als Parameter den Strahler-Film-Abstand haben. Als Beispiel ist in Bild 3.25 ein Belichtungs-

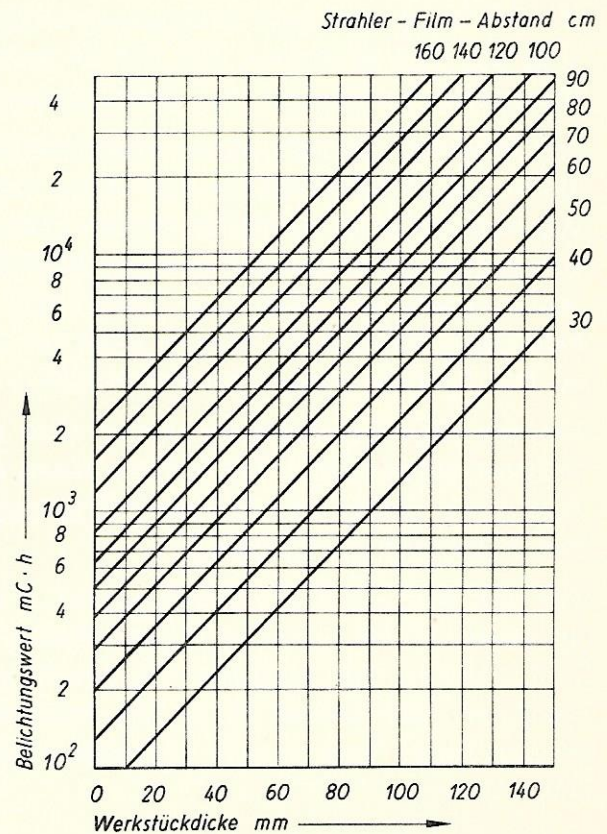


Bild 3.25 Belichtungsdiagramm für Kobalt-60-Aufnahmen an Stahl

diagramm für die Durchstrahlung von Stahl mittels Kobalt 60 bei Verwendung von Agfa-Texo-S-Film mit 0,15/0,15 mm Bleifolien dargestellt.

Für den zu wählenden Strahler-Film-Abstand gelten die gleichen Beziehungen, die im Abschnitt 3.1.6. für die Berechnung des optimalen Fokus-Film-Abstands bei der Röntgenprüfung angegeben sind. Es wird nur an Stelle des Brennfleckdurchmessers Φ die Abmessung des radioaktiven Präparats eingesetzt. Im Unterschied zur Röntgenprüfung, bei der aus Gründen der Wirtschaftlichkeit im allgemeinen mit einem festen Fokus-Film-Abstand von 70 cm gearbeitet wird, ist es bei der γ -Durchstrahlung üblich, auch in der Praxis den errechneten optimalen Abstand einzuhalten, da andernfalls unzuträglich hohe Belichtungszeiten erforderlich wären.

Die Anwendung der Durchleuchtungstechnik mit Hilfe von γ -Strahlern ist z.Z. noch nicht möglich.

3.29. Isotopen-Arbeitsbehälter

Wegen der starken Strahlengefährdung ist es natürlich nicht möglich, das γ -Präparat bei den Aufnahmevorbereitungen ungeschützt zu handhaben. Es sind deshalb Isotopen-Arbeitsbehälter entwickelt worden, in denen die Strahlenquelle untergebracht werden kann. In einem solchen Behälter kann der Prüfer das Präparat unter weitgehendem Strahlenschutz an den Aufnahmeort heranbringen und für die Aufnahme einrichten.

Bild 3.26 (Seite 41) zeigt einen vom VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden hergestellten Isotopen-Arbeitsbehälter, der unter der Typenbezeichnung MCo 1,3 im Handel ist und es gestattet, ein Kobalt-60-Präparat mit einer Aktivität von maximal 1,3 Curie aufzunehmen.

Der Behälter ist mit einer elektrischen Fernbedienung ausgerüstet, mit deren Hilfe die Strahlenquelle von einem Schaltkasten aus über ein langes Kabel in Aufnahmestellung gebracht werden kann. Hierbei bestehen je nach den geforderten Aufnahmebedingungen mehrere Möglichkeiten. In der ersten Schaltstellung öffnet sich, wie Bild 3.27 (Seite 41) zeigt, der Deckel des Behälters. Die Strahlung erfüllt in dieser Position einen Raumwinkel von 60° und gestattet so die Prüfung einzelner Werkstücke.

Bei der nächsten Schaltstellung wird das Präparat bis über den Rand des Behälters ausgefahren und erfaßt einen Strahlungswinkel von 180° , der gemäß Bild 3.24 (Seite 41) bei um 90° gekipptem Behälter die Anfertigung von Panoramaaufnahmen ermöglicht.

Für den Fall, daß die Strahlenquelle in ein hohles Werkstück eingebracht oder an einer schlecht zugänglichen Stelle angeordnet werden muß, besteht die Möglichkeit, in den Behälter von der Rückseite her einen Verlängerungsstab einzuführen, mit dessen Hilfe das Präparat bis zu 1 m aus dem Gerät ausgefahren werden kann. Eine solche Aufnahmeordnung ist in Bild 3.28 (Seite 41) dargestellt.

An einen Isotopen-Arbeitsbehälter sind im wesentlichen zwei Forderungen zu stellen. Er soll einerseits leicht und handlich sein und andererseits einen möglichst hohen Strahlenschutz bieten. Da diese beiden Forderungen jedoch ge-

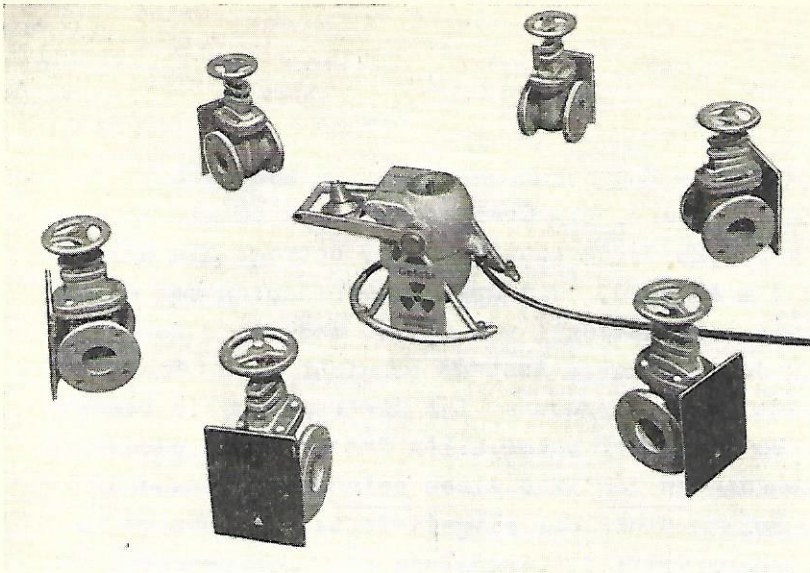


Bild 3.24 Panoramaaufnahme

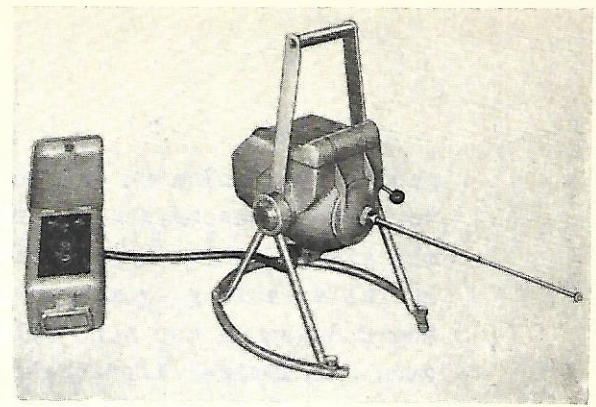


Bild 3.26 Isotopen-Arbeitsbehälter MCo 1,3
VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden

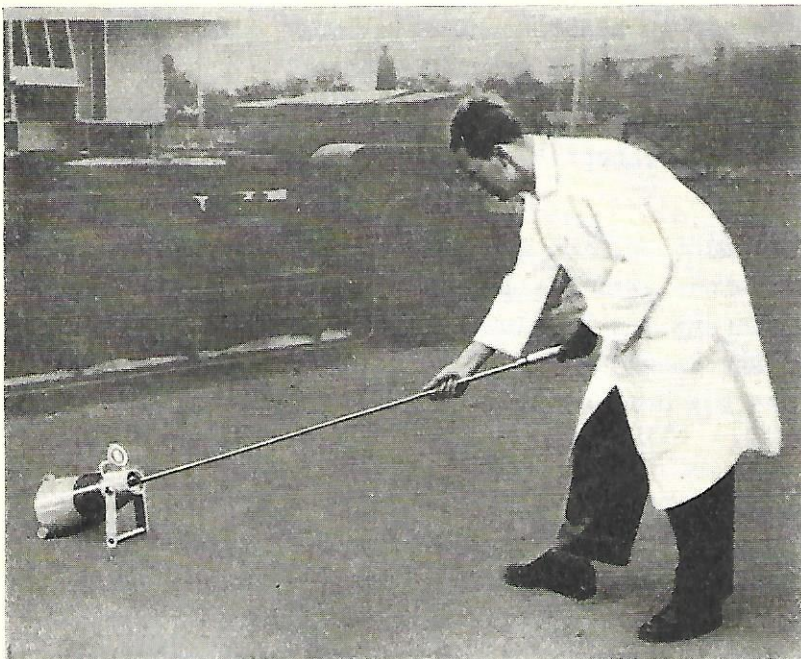


Bild 3.31 Entnahme des Präparats aus dem Transportbehälter

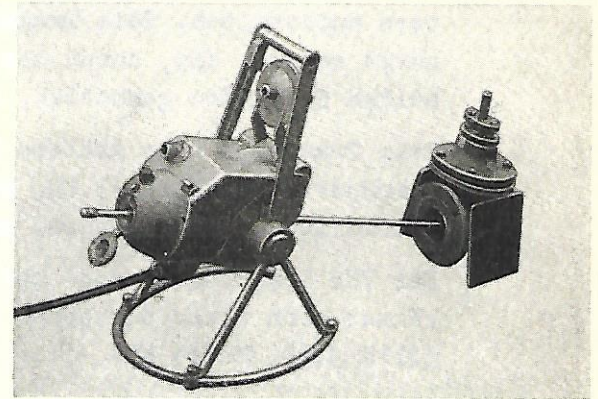


Bild 3.28 mit Verlängerungsstab in Aufnahmestellung

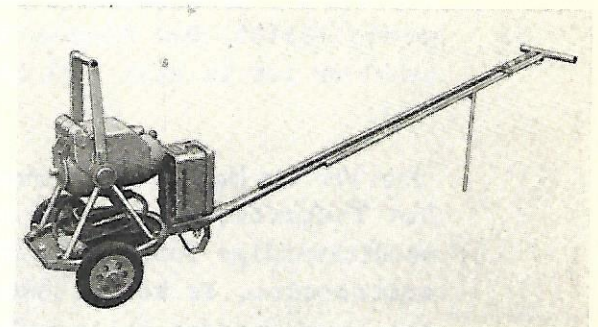


Bild 3.29 auf Transportwagen verladen

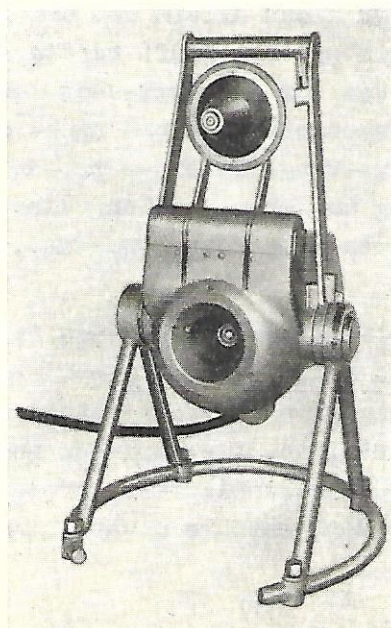


Bild 3.27 mit geöffnetem Verschlußdeckel

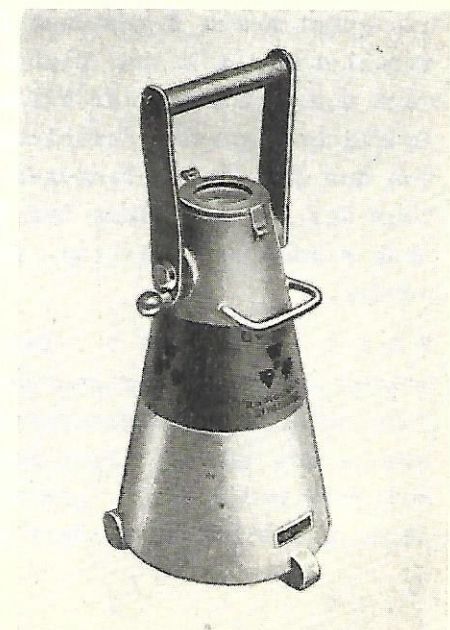


Bild 3.30 Isotopen-Transport- und Aufbewahrungsbehälter
für 1,3 Curie Kobalt 60
VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden

genläufige Tendenzen zeigen, muß eine Kompromißlösung geschaffen werden. Der vorstehend beschriebene Behälter hat z.B. ein Gewicht von etwa 50 kg. Wenn er mit einem Kobalt-60-Präparat von 1,25 Curie bestückt ist, beträgt die Hüllenausfallstrahlung, gemessen in 1 m Abstand, 14,4 mr/h. Das bedeutet bei einer Zugrundelegung der z.Z. zulässigen Wochendosis von 0,3 r, daß diese bei einem etwa 21stündigen Aufenthalt in dem genannten Abstand erreicht wird. Nach den neuen Empfehlungen (durchschnittlich 0,1 r/Woche) ist die Wochendosis bereits nach sieben Stunden erreicht. Es ist daher unter allen Umständen zu vermeiden, sich länger als unbedingt notwendig in der Nähe eines solchen Arbeitsbehälters aufzuhalten. Beim Tragen sollte stets die mitgelieferte Tragestange benutzt werden, die, durch den hohlen Griff des Behälters hindurchgesteckt, den beiden Tragenden gestattet, einen entsprechenden Abstand zu wahren.

Beim Transport über größere Entfernungen ist zweckmäßig der mitgelieferte Transportwagen (Bild 3.29, Seite 41) zu benutzen. Dessen lange Deichsel gewährleistet einen genügend großen Abstand vom Arbeitsbehälter.

Der VEB Transformatoren- und Röntgenwerk liefert zu dem genannten Arbeitsbehälter noch einen passenden Isotopen-Transport- und Aufbewahrungsbehälter (Bild 3.30, Seite 41).

Seine konstruktive Gestaltung erlaubt es, ihn in eine halb liegende Stellung zu bringen, die unter Benutzung einer etwa 2 m langen **I s o t o p e n - z a n g e** eine schnelle Überführung des Präparats in den Arbeitsbehälter gewährleistet. Der Vorgang der Entnahme der Strahlenquelle aus dem Transportbehälter ist in Bild 3.31 (Seite 41) dargestellt.

3.2.10. Vor- und Nachteile der Gammadurchstrahlung

Die γ -Durchstrahlung läßt sich in der Hauptsache dort vorteilhaft einsetzen, wo dickwandige Teile zu prüfen sind, wie z.B. im Schwermaschinen- und Schwerarmaturenbau. Es können jedoch auch in anderen Industriezweigen unter bestimmten Verhältnissen Fälle auftreten, die den Einsatz von γ -Strahlern geraten erscheinen lassen. Man kann also nicht von vornherein allgemeingültige Regeln darüber aufstellen, in welchen Fällen die Röntgen- oder die γ -Durchstrahlung die günstigeren Ergebnisse liefert. Das hängt nicht allein von der zu durchstrahlenden Dicke und Dichte des Werkstoffs ab, der geprüft werden soll, sondern u.a. auch von der Wirtschaftlichkeit, von der geometrischen Form des Prüflings, von den strahlenschutzmäßigen Voraussetzungen und nicht zuletzt von der jeweils vorhandenen apparativen Ausrüstung. Um einen groben Überblick über das Für und Wider der γ -Durchstrahlung zu geben, sollen nachstehend noch einmal kurz die Vor- und Nachteile dieser Prüftechnik zusammengefaßt werden.

V o r t e i l h a f t ist, daß die von γ -Strahlern ausgehende Strahlung keiner äußeren Energiezufuhr bedarf. Dadurch fällt die bei der Röntgenprüfung erforderliche Hochspannungserzeugung weg. Ein Versagen der Strahlenquelle ist während ihrer Lebensdauer nicht möglich. Die geringen Abmessungen radioaktiver Strahler gestatten auch die Prüfung kompliziert geformter Teile, deren geometrische Gestalt den Ansatz einer Röntgenröhre nicht erlaubt.

Mit Hilfe der γ -Strahlung können große Materialdichten und -dicken durchdrungen und große Dickenunterschiede ohne besonderen Dickenausgleich durchstrahlt werden.

Die radioaktive Strahlung breitet sich allseitig aus und erlaubt die gleichzeitige Durchstrahlung mehrerer Werkstücke in Panoramaaanordnung bzw. die Durchstrahlung von Rundnähten mit einer Aufnahme.

Die Anschaffungskosten von γ -Quellen sowie Aufbewahrungs- und Arbeitsbehältern sind im allgemeinen niedriger als die für eine Röntgenanlage. Außerdem fallen kaum Wartungskosten an.

Die Aufnahmen können in abgeschlossenen Räumen ohne Bedienung oder Überwachung auch außerhalb der normalen Arbeitszeit durchgeführt werden.

N a c h t e i l i g ist, daß die geringere Intensität der Strahlung und die geringere Absorption im Röntgenfilm eine wesentliche Erhöhung der Belichtungszeit bedingen und den Einsatz von Spezialfilmen und -folien notwendig machen, wenn optimale Ergebnisse erzielt werden sollen.

Der geringere Kontrast von γ -Aufnahmen ist im allgemeinen mit einer Herabsetzung der Fehlererkennbarkeit verbunden.

γ -Strahler strahlen auch bei Nichtbenutzung. Das bedingt besondere Schutzmaßnahmen für ihre strahlensichere Aufbewahrung. Der Aufwand für den Strahlenschutz ist wegen der im allgemeinen energiereicheren γ -Strahlung größer und somit kostspieliger als bei Röntgenstrahlen. Radioaktive Präparate müssen sehr sorgfältig behandelt werden, damit sie nicht beschädigt werden oder verloren gehen.

3.2.11. Strahlenschutz

Da bei einem unsachgemäßen Umgang mit radioaktiven Isotopen schwere gesundheitliche Schäden hervorgerufen werden können, ist jeder Verkehr mit strahlenden Präparaten nur mit Genehmigung des Amts für Kernforschung und Kerntechnik (AKK) gestattet. Eine solche Genehmigung wird grundsätzlich nur dann erteilt, wenn sich die durchzuführenden Aufgaben mit konventionellen Mitteln nicht oder nur mit wesentlich größerem Aufwand lösen lassen. In dem vom AKK herausgegebenen "Merkblatt über die Möglichkeiten und Voraussetzungen zum Arbeiten mit radioaktiven und stabilen Isotopen" heißt es hierzu wörtlich:

Vorbedingung für die Anwendung radioaktiver Isotope ist, daß die geplanten volkswirtschaftlich oder wissenschaftlich wichtigen Arbeiten auf andere Weise gar nicht oder nur unzulänglich bzw. nur mit wesentlich größerem Aufwand gelöst werden können. Die Anwendung radioaktiver Isotope darf n i c h t zum S e l b s t - z w e c k werden.

Diese Maßnahme läßt deutlich das Bemühen unserer Regierung erkennen, den Kreis der strahlenbelasteten Personen so klein wie möglich zu halten, um der Volksgesundheit keinen Schaden zuzufügen.

Die Genehmigung zum Verkehr mit radioaktiven Präparaten kann nur dann erteilt werden, wenn die personellen und strahlenschutztechnischen Vorausset-

zungen für ein gefahrloses Arbeiten gegeben sind. Das AKK gibt seine Zustimmung nur auf Grund einer Abnahme der betreffenden Räume oder Laboratorien. Es ist daher zu empfehlen, bereits während der Planungs- und Projektierungsarbeiten das Amt zu unterrichten und zur Beratung hinzuzuziehen.

Bei der Antragstellung ist der Nachweis über die Notwendigkeit der Anwendung von radioaktiven Isotopen sowie über die volkswirtschaftliche Dringlichkeit des Vorhabens durch eine entsprechende Stellungnahme des zuständigen übergeordneten Staatsorgans bzw. der VVB zu erbringen. Der Antrag muß ferner eine Beschreibung der geplanten Arbeitsweise sowie aller vorhandenen und geplanten Vorkehrungen enthalten, die für die Beurteilung der Gefährlichkeit und der notwendigen Strahlenschutzmaßnahmen erforderlich sind.

Erst wenn alle notwendigen Voraussetzungen erfüllt sind und die Genehmigung erteilt worden ist, kann eine Auslieferung der radioaktiven Präparate erfolgen. Es sei in diesem Zusammenhang darauf verwiesen, daß der Handel mit radioaktiven Isotopen ebenfalls in der Hand des AKK liegt.

4. Ultraschallprüfung

4.1. Entwicklung

Im Jahre 1929 entdeckte SOKOLOFF bei der Messung der Fortpflanzung von Ultraschallwellen in festen Körpern, daß Stoffe, die in ihrem Innern Risse aufweisen, eine wesentlich schlechtere Schalldurchlässigkeit zeigen als homogene. Er schlug als erster vor, diesen Effekt zum zerstörungsfreien Nachweis von Werkstofffehlern auszunutzen. Das erste Patent auf ein Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mittels Ultraschall wurde MÜHLHÄUSER im Jahre 1931 erteilt. Es gelang jedoch erst 1943, die Ultraschallprüfung in technisch brauchbarer Form dem praktischen Einsatz zuzuführen. Das Prüfverfahren wurde seitdem ständig weiterentwickelt und vervollkommenet. Es ist heute zu einem festen Bestandteil in der Reihe der zerstörungsfreien Prüfverfahren geworden.

4.2. Grundlagen

4.2.1. Wesen des Ultraschalls

Unter Ultraschall versteht man mechanische Schwingungen, deren Frequenz größer als 20 kHz ist, also Schallschwingungen mit Frequenzen oberhalb der Hörgrenze des menschlichen Ohrs. Mit modernen Mitteln können Ultraschallfrequenzen bis zu etwa 1000 MHz erzeugt werden. Für die Werkstoffprüfung verwendet man Frequenzen in der Größenordnung von 1 bis 10 MHz.

Hochfrequente Schallwellen pflanzen sich in festen Körpern gerichtet fort und werden an der Grenzfläche Festkörper - Luft fast vollständig reflektiert. Das bietet die Möglichkeit, Werkstofftrennungen, z.B. Risse, Lunker usw., mit Hilfe von Ultraschall festzustellen.

4.2.2. Reflexion und Durchlässigkeit

Die Reflexion von Ultraschallwellen an der Grenzfläche zweier schallführender Stoffe hängt von deren Schallwellenwiderständen ab. Der Schallwellenwiderstand Z ist das Produkt aus der Schallgeschwindigkeit v im betreffenden Stoff und dessen Dichte ρ :

$$Z = \rho \cdot v.$$

Der reflektierte Anteil der eingestrahlten Schallintensität ist um so größer, je mehr das Verhältnis m der Schallwellenwiderstände der aneinandergrenzenden Stoffe von 1 abweicht:

$$m = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2}.$$

Der Reflexionskoeffizient R , der das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Intensität angibt, ergibt sich unter der Voraussetzung des senkrechten Einfalls der Schallenergie auf die Grenzfläche aus der Beziehung

$$R = \left(\frac{m - 1}{m + 1} \right)^2.$$

Das bedeutet, daß sich R dem Wert 1, d.h. der hundertprozentigen Reflexion um so mehr nähert, je größer das Verhältnis m wird.

Der Durchlässigkeitskoeffizient D stellt das Verhältnis der durchgehenden zur einfallenden Intensität dar:

$$D = 1 - R = \frac{4m}{(m + 1)^2}.$$

Aus diesen Beziehungen ist zu ersehen, daß beim Übergang von Ultraschallwellen von einem Medium in ein anderes stets ein Teil der eingestrahlten Schallintensität an der Grenzfläche reflektiert wird, sofern sich die Wellenwiderstände der beiden Medien voneinander unterscheiden. Die genannten Gleichungen ändern sich nicht, wenn man m durch $1/m$ ersetzt, d.h., es ist gleichgültig, in welcher Richtung die Grenzfläche passiert wird.

Für den Übergang Flüssigkeit - Luft bzw. Festkörper - Luft oder umgekehrt ergibt sich stets ein Reflexionsgrad von fast 100 Prozent.

Den Zusammenhang zwischen dem Reflexions- bzw. Durchlässigkeitskoeffizienten und dem Verhältnis m bzw. $1/m$ der Schallwiderstände der aneinandergrenzenden Stoffe zeigt Bild 4.1.

Aus dem Verhältnis zwischen Reflexion und Durchlässigkeit von Ultraschallwellen an inneren Werkstofffehlern ergeben sich im Prinzip zwei Möglichkeiten für die Ultraschallprüfung. Man kann entweder die durch das

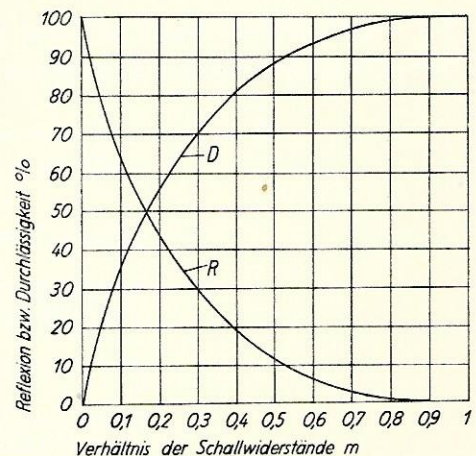


Bild 4.1 Reflexion und Durchlässigkeit

Werkstück hindurchgehende, durch Fehlstellen verminderte Schallintensität für die Beurteilung heranziehen oder den Prüfbefund auf die von Fehlstellen reflektierten Energieanteile zurückführen. Beide Möglichkeiten werden technisch genutzt, so daß sich im wesentlichen zwei Prüfverfahren unterscheiden lassen, die beide ihre besonderen Anwendungsgebiete haben:

das Durchschallungsverfahren und
das Impuls-Echo-Verfahren.

Beide Hauptgruppen können weiter unterteilt werden, wie Bild 4.2 zeigt.

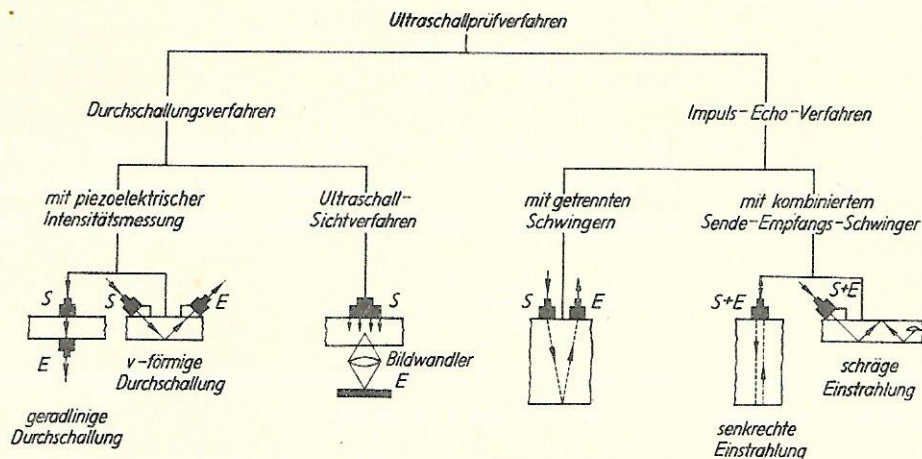


Bild 4.2 Ultraschallprüfverfahren

4.2.3. Fehlererkennbarkeit

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde angenommen, daß die aneinandergrenzenden Stoffe eine große Ausdehnung haben. Das gilt jedoch für die Verhältnisse bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung in der Regel nicht. Ein feiner Haarriß stellt z.B. in einem großen Werkstück aus Stahl nur eine sehr dünne Luftschicht dar, die der Ultraschall zu passieren hat. In diesen Fällen interessiert die kleinste Dicke dieser Luftschicht, die sich mit Hilfe der Ultraschallprüfung noch nachweisen läßt.

Bei senkrechter Einstrahlung auf den Luftspalt gilt für die Errechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten D die Beziehung

$$D = \frac{1}{1 + 0,25 (m - 1/m)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda_2}}$$

D Anteil der Schallintensität hinter dem Spalt

m Verhältnis der Schallwellenwiderstände
(bei Stahl - Luft = $1,1 \cdot 10^5$)

d Dicke des Luftspalts

λ_2 Schallwellenlänge im Luftspalt
(bei einer Frequenz von 2 MHz = 0,166 mm)

Nach dieser Beziehung erhält man für eine Spaltdicke von $1,6 \cdot 10^{-6}$ mm mit einer Ultraschallfrequenz von 2 MHz eine Durchlässigkeit von 10 Prozent. Das entspricht gemäß der Beziehung $R + D = 1$ einem Reflexionsgrad von 90 Prozent. Daraus geht hervor, daß man mit der Ultraschallprüfung Werkstofftrennungen in der Größenordnung von 10^{-6} mm, gemessen in Durchstrahlungsrichtung, noch einwandfrei nachweisen kann. Das Ultraschallverfahren ist in dieser Beziehung der Röntgendurchstrahlung, bei der ein Fehler eine Ausdehnung von 1,5 bis 2 Prozent der insgesamt zu durchstrahlenden Dicke haben muß, überlegen.

Die bisherigen Ausführungen über die Nachweisbarkeit von Werkstofffehlern bezogen sich auf deren Ausdehnung in Einstrahlrichtung. Es interessiert jedoch auch, welche kleinsten Abmessungen ein Fehler *q u e r* zur Schallrichtung haben darf, um noch nachgewiesen werden zu können. Abgesehen davon, daß beim Durchschallungsverfahren die Fehlererkennbarkeit durch Beugungseffekte an den Fehlerrändern mit wachsender Werkstückdicke schnell abnimmt, kann ein Fehler dann nicht mehr nachgewiesen werden, wenn seine Ausdehnung quer zur Einstrahlungsrichtung in den Bereich der verwendeten Schallwellenlänge kommt. Die Fehlererkennbarkeit liegt also in der Größenordnung der Wellenlänge. Da sich die Wellenlänge λ gemäß der Beziehung

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

aus der Schallgeschwindigkeit v und der Frequenz f ergibt, steigt die Nachweisempfindlichkeit mit wachsender Prüffrequenz. Bei 10 MHz beträgt z.B. die Wellenlänge in Metallen und gleichzeitig die Fehlererkennbarkeit, bezogen auf die Fehlerausdehnung quer zur Richtung des Schallwegs, etwa 0,5 mm.

Mit der Erhöhung der Frequenz wächst jedoch auch die Extinktion des Ultraschalls (Schwächung durch Absorption und Streuung) im Werkstück, so daß man unter bestimmten Voraussetzungen - langer Schallweg, grobes Gefüge, hohe Dämpfung - nicht in der Lage ist, mit hohen Frequenzen zu prüfen. In solchen Fällen muß eine niedrigere Frequenz gewählt werden. Die meisten heute im Handel befindlichen Prüfgeräte sind deshalb für mehrere Frequenzen ausgelegt

4.2.4. Wellenarten

In Gasen und Flüssigkeiten pflanzen sich Schallwellen nur als *L o n g i - t u d i n a l w e l l e n* - Druckwellen - fort, d.h., die Materieteilchen schwingen in Richtung der Schallausbreitung (Bild 4.3a). In festen Körpern können auch *T r a n s v e r s a l w e l l e n* auftreten, bei denen die Teilchen quer zur Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls schwingen (Bild 4.3b).

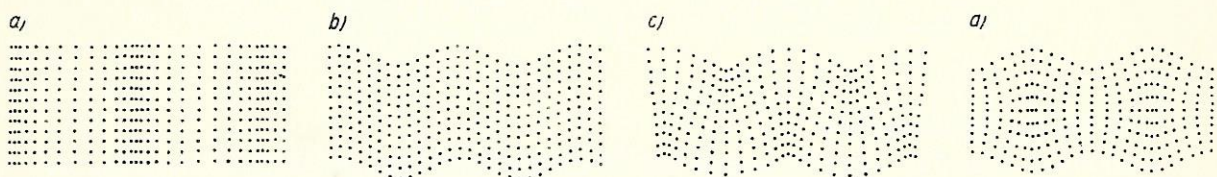


Bild 4.3 Wellenarten in Festkörpern

Beide Wellenarten, die bei Schallbrechungen und -reflexionen ineinander überführt werden können, zeichnen sich durch verschiedene Schallgeschwindigkeiten aus. Dabei ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle stets größer als die der Transversalwelle.

Pflanzt sich der Ultraschall in einem Körper fort, dessen Dicke geringer ist als die Wellenlänge, z.B. Blech, so können unter bestimmten Bedingungen auch *Biege wellen* (Bild 4.3c, Seite 47) oder *Dehnungswellen* (Bild 4.3d, Seite 47) auftreten, bei denen der ganze Querschnitt des schallführenden Mediums an der Schwingung beteiligt ist. Außerdem sind noch Oberflächenwellen - Rayleighwellen - möglich, die sich nur entlang der Oberfläche des Werkstücks fortpflanzen und transversalen Charakter besitzen.

Um einen Überblick über das Verhalten des Ultraschalls in den wichtigsten schallführenden Stoffen zu vermitteln, sind in der folgenden Tabelle deren Dichte ρ , die Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen v_l und der Transversalwellen v_t sowie der Schallwellenwiderstand $\rho \cdot v_l$ bei einer Temperatur von 20 °C angegeben:

Stoff	Dichte ρ g/cm ³	Schallgeschwindigkeit		Schallwellen- widerstand $\rho \cdot v_l \cdot 10^{-4}$ g/cm ² · s
		v_l m/s	v_t m/s	
Stahl	7,8	5850	3230	456
Aluminium	2,7	6260	3080	169
Kupfer	8,9	4700	2260	418
Messing	8,1	4430	2123	359
Plexiglas	1,18	2670	1121	32
Wasser	1,0	1483	-	15

Es ist zu erkennen, daß die Geschwindigkeit v_l der Longitudinalwellen etwa doppelt so groß ist wie die Geschwindigkeit v_t der Transversalwellen.

Für die wichtigsten Metalle ergeben sich bei verschiedenen Prüffrequenzen folgende Wellenlängen λ in mm:

Frequenz MHz	Stahl		Aluminium		Kupfer	
	λ_l	λ_t	λ_l	λ_t	λ_l	λ_t
1	5,85	3,23	6,26	3,08	4,70	2,26
2	2,93	1,62	3,13	1,54	2,35	1,13
4	1,46	0,81	1,57	0,77	1,18	0,57
6	0,98	0,54	1,04	0,51	0,78	0,38

4.2.5. Erzeugung des Ultraschalls

Ultraschall für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung wird fast ausschließlich durch piezoelektrische Schwinger erzeugt. Das sind Kristallplatten, die einen piezoelektrischen Effekt aufweisen.

Der piezoelektrische Effekt beruht auf der Eigenschaft mancher Kristalle (Quarz, Turmalin, Seignettesalz, Bariumtitanat u.a.), an den Oberflächen

elektrische Ladungen zu bilden, wenn sie eine mechanische Beanspruchung, z.B. durch auftreffende Ultraschallwellen, erfahren. Die entstehende elektrische Spannung kann nach entsprechender Verstärkung nachgewiesen werden. Leitet man umgekehrt dem Kristall über Elektroden eine Wechselspannung zu, so führt er im Rhythmus der Frequenz der angelegten Spannung mechanische Schwingungen aus, die sich auf andere Körper übertragen lassen. Diese Eigenschaften bieten die Möglichkeit, piezoelektrische Kristalle sowohl für die Erzeugung als auch für den Empfang von Ultraschallwellen einzusetzen.

Ultraschallschwinger werden in der Regel aus Quarz oder Bariumtitanat hergestellt. Sie besitzen die Form meist runder Platten mit einer Dicke im Bereich von etwa 0,2 bis 3 mm, je nach Prüffrequenz. Der Durchmesser der Schwinger liegt im Normalfall zwischen etwa 10 und 30 mm. Er ist in gewissen Grenzen ebenfalls durch die Prüffrequenz bedingt, da die Ausbreitungscharakteristik der abgestrahlten Ultraschallwellen von der Wellenlänge und dem Schwingerdurchmesser abhängt (vgl. 4.2.6.). Die Ultraschallschwinger werden durch Einhalten einer bestimmten Orientierung der Plattenebene zur Kristallstruktur so hergestellt, daß sie beim Anlegen der erregenden Wechselspannung periodische Dickenänderungen erfahren. Da diese Dickenschwingungen in Richtung der Schallabstrahlung erfolgen, erzeugen piezoelektrische Dickenschwinger Longitudinalwellen.

Die Schwinger sind bei ortsfesten Geräten fest in die Prüfapparatur eingebaut und bei transportablen Geräten in Prüfköpfen montiert, die über Kabel mit dem Prüfgerät verbunden werden.

4.2.6. Ausbreitung des Ultraschalls

Eingangs wurde festgestellt, daß sich der Ultraschall gerichtet fortpflanzt. Das vom Ultraschallgeber ausgehende Schallfeld hat jedoch keine parallele Begrenzung, sondern die Form eines Kegels, dessen Öffnungswinkel von der Wellenlänge und vom Durchmesser des Ultraschallschwingers abhängig ist (Bild 4.4). Der Sinus des halben Öffnungswinkels ϑ beträgt

$$\sin \vartheta = 1,22 \frac{\lambda}{D}$$

D Durchmesser des Ultraschallgebers

λ Wellenlänge

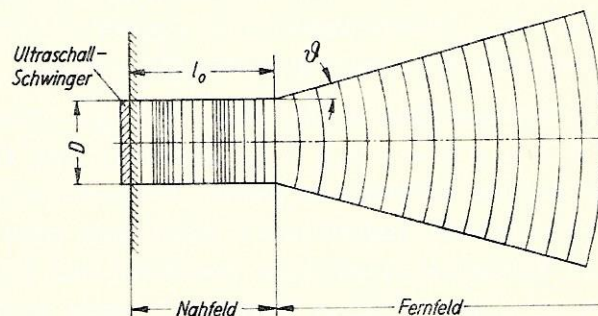


Bild 4.4 Form des Schallfelds

Das bedeutet für einen gegebenen Schwingerdurchmesser D, daß der Ultraschall um so stärker gebündelt wird, je kleiner die Wellenlänge λ ist, d.h., je höher die Prüffrequenz gewählt wird. Das gilt jedoch erst außerhalb einer bestimmten Entfernung l_0 vom Schallgeber. Innerhalb dieser als Nahfeld bezeichneten Entfernung breitet sich die Schallenergie angenähert in Form eines Zylinders aus, dessen Durchmesser dem des Ultraschallschwingers entspricht. Die

Länge l_0 des Nahfelds ergibt sich aus der Beziehung

$$l_0 = 0,25 \frac{D^2}{\lambda}.$$

Die Energieverteilung ist infolge von Interferenzerscheinungen im Bereich des Nahfelds nicht homogen, sondern weist mehrere unregelmäßige Minima und Maxima auf. In dem als Fernfeld bezeichneten kegelförmigen Teil des Schallfelds nimmt die Schallenergie in erster Näherung mit dem Quadrat der Entfernung vom Schallgeber ab. Die Kenntnis dieser Verhältnisse ist besonders für das Echoverfahren wichtig, da der von Werkstoffehlern reflektierte Energieanteil nicht für die Beurteilung der Fehlergröße herangezogen werden kann, wenn sich der reflektierende Fehler im Bereich des Nahfelds befindet.

4.2.7. Ankopplung von Ultraschallschwingern

Beim Einsatz der Ultraschallprüfverfahren bereitet die Übertragung der Schallenergie vom Ultraschallschwinger auf den Prüfling und umgekehrt Schwierigkeiten. Der unvermeidliche Luftspalt zwischen Schwinger und Werkstückoberfläche, dessen störender Einfluß mit zunehmender Oberflächenrauigkeit wächst, erschwert oder verhindert den Schallübergang. Die Ultraschallgeber und -empfänger müssen deshalb unter Zwischenschaltung einer Flüssigkeit an das zu prüfende Werkstück angekoppelt werden. Außerdem ist eine möglichst glatte Werkstückoberfläche anzustreben.

Im allgemeinen wird die Prüffläche vor dem Aufsetzen des Prüfkopfs mit der Koppelflüssigkeit - meist Öl, mitunter auch eine Spezialpaste - benetzt (K o n t a k t a n k o p p l u n g) .

Die Prüfung kann auch in einem Flüssigkeitsbad erfolgen, in dem sowohl das Werkstück als auch die Prüfköpfe angeordnet werden (I m m e r s i o n s - t e c h n i k) . Als Badflüssigkeit wird in der Regel Wasser verwendet, dem meist ein Benetzungsmittel zugesetzt wird. Für die Immersionstechnik werden spezielle Unterwasserprüfköpfe gebaut.

Bei automatisch arbeitenden Anlagen wird häufig die F l i e ß w a s s e r - a n k o p p l u n g eingesetzt, bei der dem Spezialschallgeber das als Koppelmedium verwendete Wasser kontinuierlich unter Druck zufließt. Es wird durch entsprechend angeordnete Bohrungen oder Düsen in den Spalt zwischen Prüfkopf und Werkstückoberfläche gedrückt und bildet hier ein Flüssigkeitspolster, das einen einwandfreien Schalldurchgang gestattet.

Die Auswirkung von Ankopplungseffekten auf das Prüfergebnis ist bei den einzelnen Prüfverfahren verschieden. Schwankungen in der Ankopplung wirken sich besonders beim Durchschallungsverfahren sehr störend aus. Auf die methodisch bedingten Ankopplungseinflüsse wird bei der Besprechung der einzelnen Ultraschallprüfverfahren näher eingegangen.

4.3. Durchschallungsverfahren

Das Durchschallungsverfahren ist das älteste der Ultraschallprüfverfahren.

Auf der einen Seite des Werkstücks, das möglichst eine planparallele Form be-

sitzen sollte, wird ein Schallgeber und auf der gegenüberliegenden Begrenzungsfläche ein Schallempfänger angeordnet. Der Schallempfänger kann ein piezoelektrischer Schwinger sein, der die durch das Werkstück hindurchtretende Schallintensität zu messen gestattet. Er kann auch aus einem Ultraschallbildwandler bestehen, der die Intensitätsverteilung des Ultraschalls über der Meßfläche in ein optisch wahrnehmbares Bild umsetzt (Ultraschallsichtverfahren).

4.3.1. Piezoelektrische Intensitätsmessung

Prüfanordnung

Bei dem Durchschallungsverfahren mit piezoelektrischer Intensitätsmessung verwendet man zwei Prüfköpfe, die in der Regel den gleichen Aufbau besitzen und untereinander austauschbar sind. Der eine wird als Sender, der andere als Empfänger geschaltet. Ordnet man die beiden Prüfköpfe an gegenüberliegenden Seiten des zu prüfenden Werkstücks an, so kann man die am Schwinger des Empfangskopfs durch die auftreffende Schallenergie erzeugte Piezospannung über einen Verstärker mit einem Meßinstrument messen (Bild 4.5).

Vor Beginn der Prüfung wird die an einer fehlerfreien Stelle des Werkstücks gemessene Schallintensität gleich 100 Prozent gesetzt und das Meßinstrument über einen Verstärkungsregler dementsprechend eingestellt. Fehlerhafte Stellen schatten einen Teil der einstrahlten Schallenergie ab, so daß sich die am Empfangskopf auftreffende Intensität verringert. Aus dem Grad der Intensitätsschwächung kann man auf die ungefähre Größe des Werkstofffehlers schließen, jedoch nicht auf seine Art oder Lage.

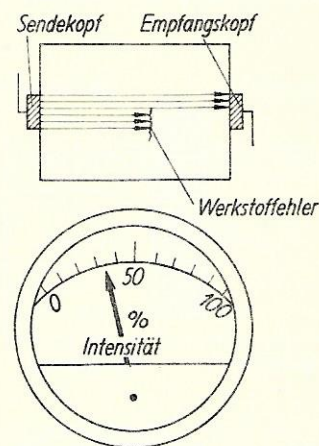


Bild 4.5 Piezoelektrische Messung der Schallintensität

Ist ein zu prüfendes Werkstück nur von einer Seite zugänglich, ordnet man beide Prüfköpfe auf dieser Seite an. Der Ultraschall wird schräg eingestrahlt, an der Rückseite des Prüflings reflektiert und nach Beschreibung eines v-förmigen Schallwegs vom Empfängerkopf registriert. Von Fehlern im Werkstoff vollständig oder teilweise reflektierte Schallwellen werden seitlich versetzt. Sie gelangen nicht zum Empfängerkopf, so daß die Anzeige gegenüber fehlerfreien Stellen des Werkstücks verändert wird (Bild 4.6).

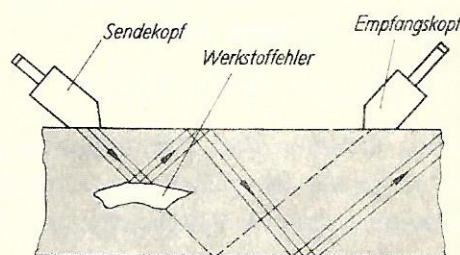


Bild 4.6 v-förmige Durchschallung

Bei der geraden und bei der v-förmigen Durchschallung ist eine einwandfreie Justierung der Schallköpfe unerlässlich. Sie müssen so eingestellt und in dieser Lage festgehalten werden, daß ihre Achse mit der des Schallbündels übereinstimmt. Zu diesem Zweck sind Spezialvorrichtungen entwickelt worden, meist zangenförmige Geräte, an deren Schenkeln die Prüfköpfe justierbar angeordnet sind.

Ankopplung

Beim Durchschallungsverfahren ist es äußerst schwierig, die Ankopplungsbedingungen während der Prüfung konstant zu halten, so daß die Schallenergie beim Passieren der beiden Koppelflächen Sender - Werkstück und Werkstück - Empfänger von Fall zu Fall verschieden stark geschwächt wird. Das verursacht bei Anwendung der Kontaktankopplung, bei der die Prüffläche vor der Prüfung mit der Koppelflüssigkeit benetzt wird, Schwankungen der auf der Empfängerseite gemessenen Schallintensität. In diesen Schwankungen können von kleinen Werkstoffehlern verursachte geringe Intensitätsverminderungen untergehen, da man nicht in der Lage ist, zu beurteilen, ob sie tatsächlich durch einen Fehler hervorgerufen werden, oder ob sie ihre Ursache in einer an dieser Stelle ungünstigen Ankopplung haben. Man verwendet daher die trockene Ankopplung beim Durchschallungsverfahren heute meist nur noch bei Kleinteilen, die in größeren Serien zu prüfen sind und immer gleiche Oberflächenverhältnisse aufweisen.

Nur hier ist gewährleistet, daß man von Werkstück zu Werkstück halbwegs definierte Ankopplungsbedingungen schaffen kann.

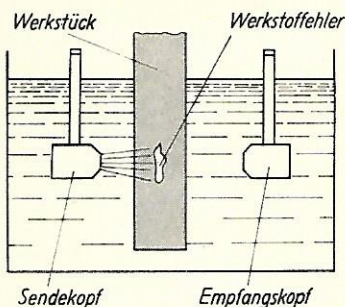


Bild 4.7 Durchschallung in Tauchtechnik

Bei der Anwendung des Durchschallungsverfahrens bedient man sich heute meist der Tauch- (Immersions-) technik. Die Schallköpfe und das zu prüfende Werkstück werden in einer meist mit Wasser gefüllten Prüfwanne untergebracht (Bild 4.7). Auf diese Art sind die Ankopplungsbedingungen so konstantzuhalten, daß kaum Schwankungen der Intensitätsanzeige auftreten, die nicht durch Werkstoffehler oder unterschiedliche Werkstoffgefüge hervorgerufen werden. Immersionsprüfanlagen sind ortsfest montierte Apparaturen, deren Prüfwanne mitunter beträchtliche Abmessungen (bis zu mehreren Metern Länge bzw. Breite) annehmen kann. Die Prüfköpfe sind meist in zueinander justierbaren Halterungen angeordnet, die sich in geeigneten Führungen mechanisch oder manuell bewegen lassen.

Prüfung mit Plattenwellen

Prüfung mit Plattenwellen

Beim Einsatz der Durchschallungsmethode ergeben sich Schwierigkeiten, wenn z.B. große Blechtafeln zu prüfen sind. Um die gesamte Fläche zu erfassen, müssen mehrere Prüfkopfpaare nebeneinander angeordnet werden, oder man muß

mit einem Prüfkopfpaar das Blech zeilenförmig abtasten. Da das sehr zeitraubend ist, durchschallt man die Bleche in Längsrichtung mit Plattenwellen. Das sind Biege- oder Dehnungswellen (vgl. Bild 4.3c und d, Seite 47), die dann auftreten können, wenn die Blechdicke klein gegenüber der Schallwellenlänge ist. Biegewellen werden auch als asymmetrische Plattenwellen, Dehnungswellen als symmetrische Plattenwellen bezeichnet (Bild 4.8).

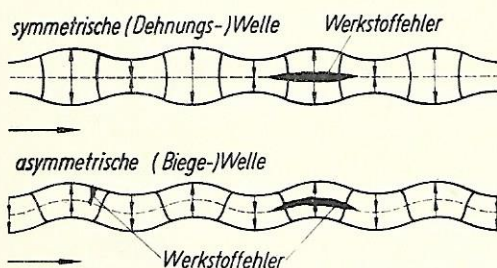


Bild 4.8 Symmetrische und asymmetrische Plattenwellen

Plattenwellen werden erzeugt, indem man den Ultraschall in einem bestimmten Winkel in das Blech einstrahlt, der von der Plattendicke, der Schallgeschwindigkeit in dem betreffenden Werkstoff und der Prüffrequenz abhängig ist. Die erforderliche Einstrahlrichtung kann mit Prüfköpfen eingestellt werden, bei denen vor dem Schwinger ein in weiten Winkelbereichen verstellbarer Kunststoffkeil angeordnet ist.

Plattenwellen stellen Resonanzerscheinungen dar und können daher als Grundwelle und als Oberschwingung auftreten. Bild 4.9 zeigt ein Plattenwellendiagramm, aus dem die Einstrahlwinkel für die verschiedenen Wellentypen in Abhängigkeit von der Frequenz und der Plattendicke hervorgehen. Das Diagramm gilt für Stahl als Werkstoff des Prüflings bei Verwendung von Trolitul für die Vorsatzkeile an den Prüfköpfen.

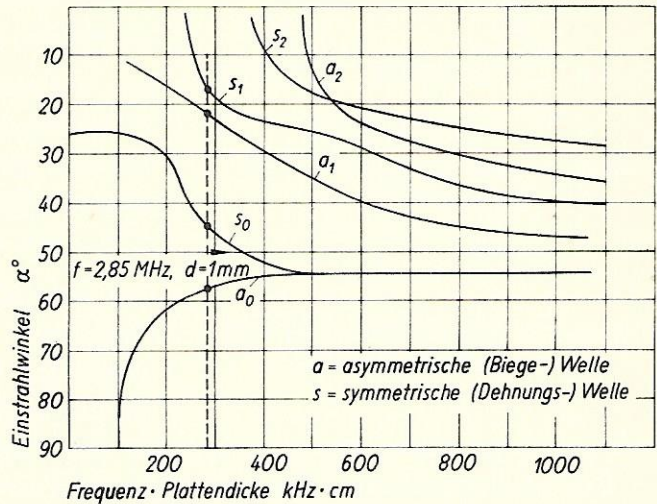


Bild 4.9 Plattenwellendiagramm für Stahl

Aus dem Schaubild kann z.B. für eine Prüffrequenz von $f = 2,85 \text{ MHz}$ und eine Plattendicke von $d = 1 \text{ mm}$ entnommen werden, daß bei Einstrahlwinkeln von 17° und 44° symmetrische und bei solchen von 22° und 56° asymmetrische Plattenwellen angeregt werden.

Beim Prüfen mit Plattenwellen schwingt der gesamte Blechquerschnitt und ist am Transport der Schallenergie beteiligt. Befindet sich im Blech ein Fehler, der aus einer Dopplung, einem Oberflächenriß oder aus einer Seigerungszone bestehen kann, so werden die Bedingungen für das Bestehen der Plattenwellen an dieser Stelle gestört. Das hat zur Folge, daß nur ein Teil der Schallenergie die Fehlstelle passiert, während der andere Teil von ihr reflektiert wird. Die symmetrischen Plattenwellen sprechen besonders auf Fehler an, die in Richtung der Blechebene orientiert sind (Dopplungen), der asymmetrische Wellentyp reagiert vornehmlich auf quer zur Blechausdehnung liegende Werkstofftrennungen.

Plattenwellen breiten sich in der Plattenebene vom Sendekopf ausgehend gerichtet in Form einer Strahlungskeule aus, deren Öffnungswinkel ähnlich dem des normalen Schallfelds von der Wellenlänge und den Abmessungen des Prüfkopfs abhängig ist (Bild 4.10). Der Sendekopf S befindet sich im Zentrum des eingezeichneten Polarkoordinatensystems. Ordnet man in der Achse der Strahlungskeule einen Empfangskopf E an, der die gleiche Winkeleinstellung zur Blechoberfläche wie der Sendekopf besitzt, so ist man in der Lage, die Schallin-

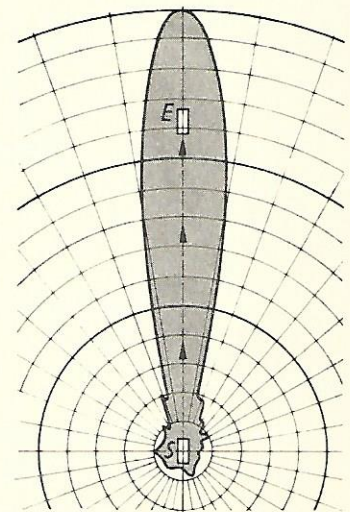


Bild 4.10 Ausbreitung von Plattenwellen

tensität an dieser Stelle zu messen und somit Intensitätsschwankungen infolge von Werkstoffehlern zu registrieren. Die Prüfanordnung ist in Bild 4.11 im

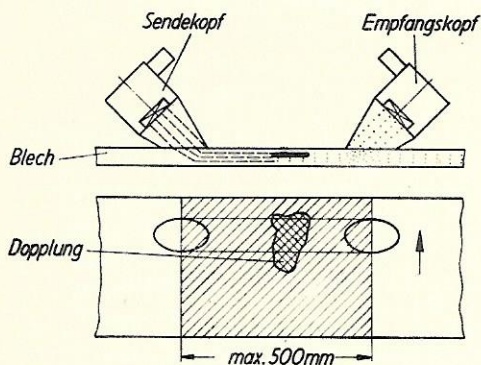


Bild 4.11 Durchschallung mit Plattenwellen

Querschnitt und in der Draufsicht dargestellt. Beide Prüfköpfe können einen Abstand bis zu 500 mm voneinander haben, d.h., man kann in einem Prüfgang eine Blechbreite bis zu 500 mm erfassen.

Dem Plattenwellenverfahren sind Bleche bis zu 20 mm Dicke zugänglich, wobei dickere Bleche mit geringeren Frequenzen geprüft werden müssen als dünne. Bei 20 mm Blechdicke ist z.B. eine Frequenz von 0,8 MHz erforderlich.

Die Ankopplung ist bei der Plattenwellenprüfung nicht so kritisch wie bei der Durchschallung mit Longitudinalwellen. Das ist darauf zurückzuführen, daß die Plattenwellen

gewissermaßen einen Resonanzzustand des Blechs darstellen, dessen Anregung von der eingestrahlten Sendeenergie nicht so stark abhängt, wie das bei der Erzeugung von Longitudinalwellen der Fall ist.

Die Durchschallung mit Plattenwellen läßt sich gut automatisieren. Bei der Prüfung von Blechen breiter als 500 mm werden mehrere Prüfstrecken hintereinander angeordnet, so daß man in einem Prüfgang die gesamte Blechbreite erfaßt. Automatisierte Anlagen mit Spezialprüfköpfen und Fließwasserankopplung ermöglichen Prüfungsgeschwindigkeiten bis zu 40 m/min. Bild 4.12 zeigt den Aufbau einer automatischen Prüfanlage für kaltgewalzte Bänder bis zu 500 mm Breite. Die Prüfköpfe befinden sich unmittelbar hinter dem letzten Walzenpaar, so daß keine zusätzliche Zeit für die Durchführung der Prüfung erforderlich ist.

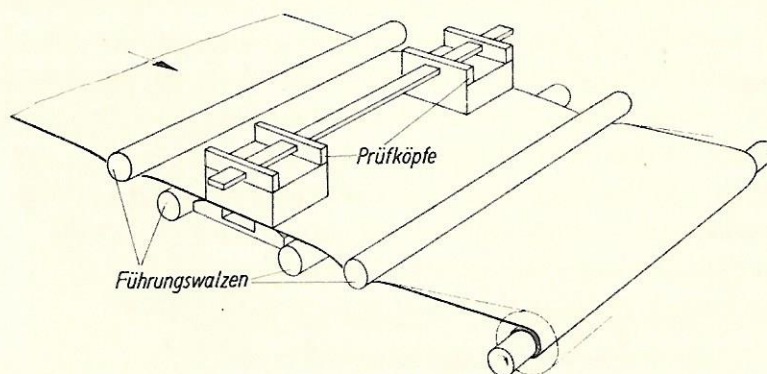


Bild 4.12 Automatische Plattenwellen-Prüfanlage

Geräte

Für das Durchschallungsverfahren mit piezoelektrischer Intensitätsmessung wird vorwiegend das von der Firma Dr. Lehfeldt und Co. hergestellte *S o - n o m e t e r* eingesetzt, dessen Aufbau im Bild 4.13 dargestellt ist. Das Gerät arbeitet in der Normalausführung mit einer festen Frequenz von 2,85 MHz.

Es kann für Prüfw Zwecke, bei denen ein besonders hohes Auflösungsvermögen gefordert wird, mit einer Prüffrequenz von 8,5 MHz ausgerüstet werden. Das Sonometer hat zwei Schallköpfe, die man mit Hilfe auswechselbarer Kunststofftastspitzen den jeweils vorliegenden Prüfproblemen anpassen kann. Es besitzt außer dem Meßinstrument ein Relais, das beim Unterschreiten einer bestimmten Schallintensität auf der Empfängerseite anspricht und Werkstofffehler über ein optisches oder akustisches Signal anzeigt

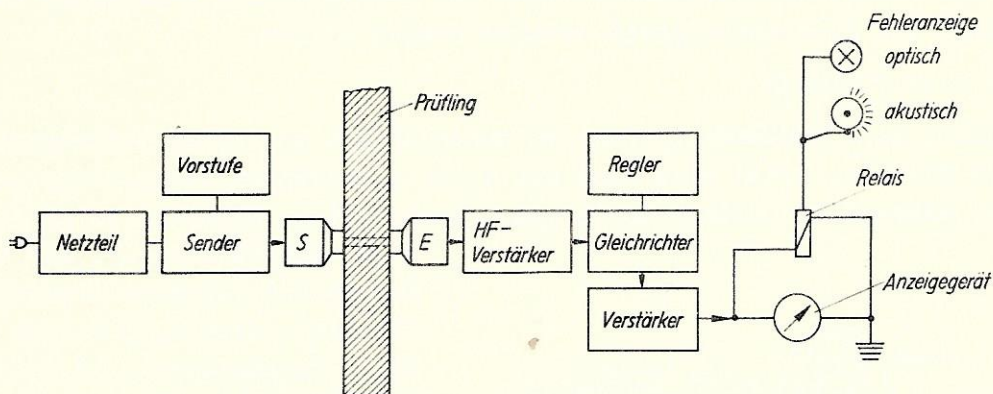


Bild 4.13 Aufbau des Ultraschall-Materialprüfgeräts Sonometer

Um das Auftreten stehender Wellen, die das Meßergebnis beeinträchtigen, zu verhindern, wird die Prüffrequenz gewobbelt, d.h., sie wird mit einer Modulationsfrequenz von 330 Hz um einen Betrag von ± 130 bzw. ± 200 kHz - je nach Geräteausführung - periodisch verändert.

Die Prüfköpfe sind in einer Aufnahmhülse gegen den Druck einer Feder längsverschiebbar angeordnet und werden mit konstantem Druck gegen die Werkstückoberfläche gedrückt. Für die Aufnahme und Justierung der Prüfköpfe sind verschiedene Vorrichtungen entwickelt worden (Bild 4.14, Seite 69). Die Universal- und Flachzange gestatten eine direkte geradlinige Durchschallung der Prüflinge. Der Schweißnahtprüfer ist für die v-förmige Durchschallung von einer Seite des Werkstücks aus geeignet. Das Sonometer hat sich wegen der Ankopplungsschwierigkeiten für die Durchschallung mit Kontaktankopplung nicht durchsetzen können. Es wird daher heute meist, in Verbindung mit speziellen Unterwasserschallköpfen, für die Tauchtechnik verwendet. Die automatisierten Prüfanlagen für die Blechprüfung mit Plattenwellen entsprechen in ihrem Funktionsprinzip ebenfalls dem Sonometer.

Für die Prüfung von Kleinteilen ist vom VEB Carl Zeiss Jena ein Durchschallungsgerät unter der Bezeichnung Kleinteilprüfgerät U s o m a t entwickelt worden (Bild 4.15, Seite 69). Es entspricht in seiner Wirkungsweise etwa dem Sonometer und wurde bisher mit Erfolg bei der Serienprüfung plattierter Kontakte erprobt.

4.3.2. Ultraschallsichtverfahren

Ultraschallsichtverfahren sind ebenfalls Durchschallungsverfahren. An Stelle des Empfangskopfs ist eine Bildwandleranordnung vorhanden, die die Verteilung

der Schallintensität sichtbar macht und somit die Größe und den Umriß vorhandener Fehler, ähnlich wie bei einem Röntgenbild, zu erkennen gestattet. Bei Ultraschallsichtgeräten wird stets das Tauchverfahren angewendet. Der Ultraschallgeber und der Bildwandler sind in zwei sich parallel gegenüberliegende Wandungen eines Wassertrogs eingebaut. Mit Hilfe der Ultraschallsichtverfahren lassen sich, wie beim Durchschallungsverfahren, alle Werkstofffehler nachweisen, die eine verminderte Schalldurchlässigkeit zur Folge haben. Die Wirkungsweise der Ultraschallbildwandler kann auf verschiedenen Prinzipien beruhen, von denen die drei wichtigsten erwähnt werden sollen.

Bildwandler nach POHLMANN

Der Bildwandler nach POHLMANN besteht im wesentlichen aus einer Flitterzelle. Das ist eine Küvette, deren eine Wand aus einer schalldurchlässigen Kupferfolie besteht, während die andere durch eine planparallele Glasscheibe gebildet

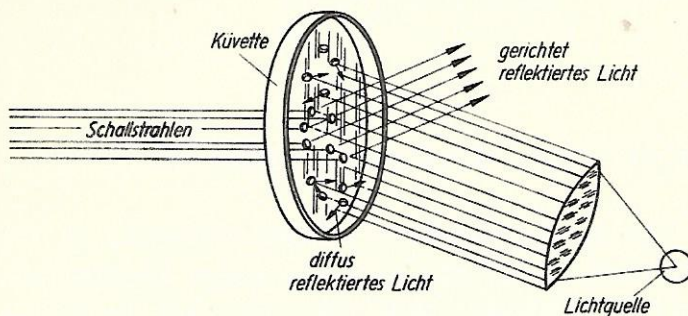


Bild 4.16 Ultraschall-Bildwandlerzelle

wird. Die Küvette ist mit einer Suspension feinsten Aluminiumflitter - etwa $1,5\mu\text{m}$ dick und $20\mu\text{m}$ Durchmesser - in Xylol gefüllt. Tritt ein Schallstrahlenbündel in die Zelle ein, so richten sich die Aluminiumflitter unter der Einwirkung des Schalldrucks parallel zur Wellenfront aus und reflektieren schräg einfallendes Licht gerichtet (Bild 4.16). Die nicht vom Schall getroffenen Teilchen befinden sich ungeordnet in der

Flüssigkeit und bewirken somit eine diffuse Reflexion des Lichts. Auf diese Weise wird ein Bild erzeugt, in dem sich die vom Ultraschall getroffenen Partien der Zelle je nach der Schallintensität mehr oder weniger hell von ihrer Umgebung abzeichnen. Um eine möglichst große Fläche zu erfassen, werden großflächige Schwinger mit 100 mm Durchmesser und größer zur Schallerzeugung verwendet. Vor der Bildwandlerzelle ist eine Kunststofflinse angeordnet. Sie gestattet es, analog zu den Verhältnissen in der Optik, vorhandene Fehler in der Bildwandlerebene scharf abzubilden. Bild 4.17 zeigt den Aufbau eines Ultraschallsichtgeräts, das mit einem Bildwandler nach POHLMANN ausgerüstet ist.

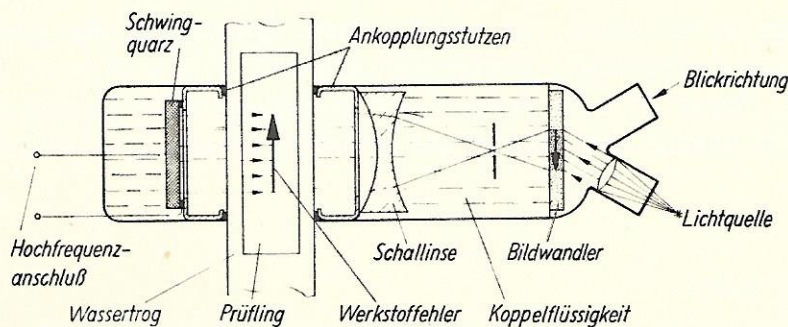


Bild 4.17 Ultraschallsichtgerät mit Bildwandler

Reliefbildverfahren nach SCHUSTER

Ein weiteres Ultraschallsichtverfahren ist unter dem Namen Reliefbildverfahren bekanntgeworden. Es beruht darauf, daß ein in einer Flüssigkeit senkrecht nach oben gerichtetes Ultraschallstrahlenbündel auf der Flüssigkeitsoberfläche eine leichte Erhebung verursacht. Dieser Effekt wird durch den Schallstrahlungsdruck erzielt. Er ist um so größer, je höher die Schallintensität ist. Somit ist es möglich, innerhalb der durch die Schnittebene zwischen Schallbündel und Flüssigkeitsoberfläche gebildeten Fläche ein Reliefbild zu erzeugen, das mit Hilfe einer lichtoptischen Schlierenanordnung auf einer Mattscheibe abgebildet werden kann. Es liegt im Wesen der Schlierenanordnung begründet, daß sich dabei nur die Abhänge des Reliefs abzeichnen. Beim Durchstrahlen eines Werkstücks, in dem ein schalldurchlässiger Bereich mit einem schallundurchlässigen zusammenstößt, wird deshalb nur die Grenzkontur abgebildet. Dieser Mangel des Verfahrens wird durch eine Interferenzanordnung beseitigt, die es gestattet, die schalldurchlässigen Bereiche von den undurchlässigen zu unterscheiden (Interferenz: Überlagerung von Schwingungen). Unterhalb des Reliefbilds befindet sich eine schräg gespannte dünne Folie. Der sich zwischen der Folie und der Flüssigkeitsoberfläche bildende Keil erzeugt an den Stellen, die vom Schall getroffen werden, parallele Interferenzstreifen, die eine Unterscheidung zwischen Gebieten mit Schalldurchlässigkeit und solchen, durch die infolge von Werkstoffehlern kein Schall hindurchtritt, ermöglichen. Bild 4.18 (Seite 69) zeigt eine Ultraschallaufnahme eines 3 mm dicken Stahlblechs mit Dopplungen, die nach dem beschriebenen Verfahren gewonnen wurde. Die Interferenzstreifen in den gesunden Zonen des Blechs sind deutlich zu sehen. Im Bereich der Dopplungen treten keine Streifen auf.

Auf dem Prinzip des Reliefbildverfahrens beruht das vom VEB Carl Zeiss Jena entwickelte Ultraschallsichtgerät, das für die Prüfung von Blechen entwickelt wurde (Bild 4.19, Seite 69). Es besteht aus dem Hochfrequenzgenerator, der Prüfwanne, der Ultraschallkamera und dem Bedienungspult. Der Generator speist einen in der Rückwand der Prüfwanne eingelassenen Quarzschwinger von 125 mm Durchmesser. Die Prüfwanne selbst ist etwa 6 m lang und besitzt eine Aufnahmeverrichtung für das Prüfobjekt. Mit deren Hilfe ist es möglich, das senkrecht aufgehängte Blech sowohl in der Höhe als auch nach der Seite zu bewegen. Dadurch kann jede beliebige Stelle des Blechs in den Strahlengang gebracht werden. Die Ultraschallkamera enthält sämtliche optischen Einrichtungen zur Erzeugung des Ultraschallbilds. Mit einer eingebauten Kleinbildkamera kann das auf dem Bildschirm sichtbare Bild fotografisch festgehalten werden. Vom Bedienungspult aus nimmt man alle zur Steuerung des gesamten Geräts erforderlichen Vorgänge von einer zentralen Stelle aus vor. Bild 4.20 (Seite 69) zeigt die Ultraschallkamera und das Bedienungspult. Der Strahlengang des Ultraschallsichtgeräts ist in Bild 4.21 (Seite 58) schematisch dargestellt.

Aus den Abbildungen geht der erhebliche Aufwand hervor, mit dem die Durchführung des Reliefbildverfahrens verbunden ist. Wegen der Größe des Geräts, des hohen Preises und der begrenzten Prüfgeschwindigkeit hat sich diese Anlage in der Industrie nicht durchsetzen können.

- 1 Ultraschall-Geber (Quarz)
- 2 Untersuchungsobjekt
- 3 Spiegel
- 4 Spiegel
- 5 Schalllinse
- 6 Schallsiegel
- 7 Folie für Interferenzzerzeugung; kipp- und drehbar
- 8 Wasseroberfläche
- 9 Lichtquelle
- 10 Kondensor
- 11 Blende
- 12 Spiegel
- 13 Objektiv
- 14 Winkelspiegel
- 15 Winkelspiegel
- 16 Abschlußplatte
- 17 Objektiv
- 18 Winkelspiegel
- 19 Schlierenblende, veränderlich
- 20 Spiegel (wegklappbar)
- 21 Objektiv
- 22 Filmebene
- 23 Objektiv (wegklappbar)
- 24 Spiegel
- 25 Mattscheibe

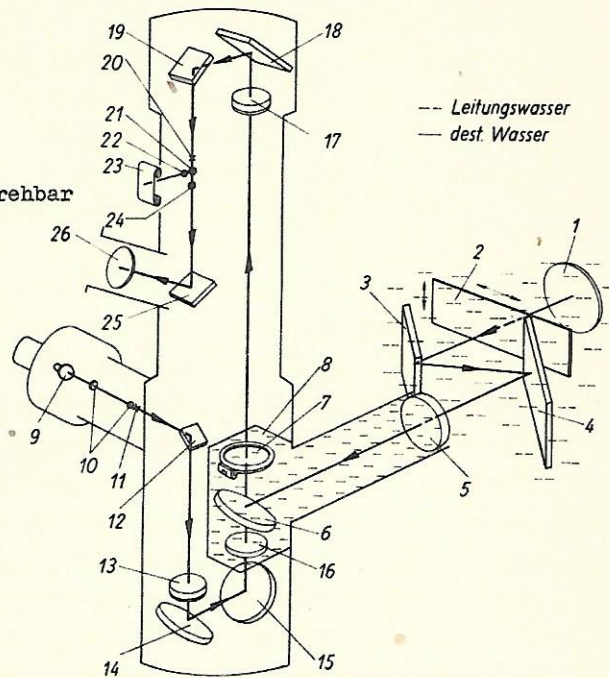


Bild 4.21 Ultraschallsichtgerät (Strahlengang)

Elektronischer Zeilenbildwandler

Ein drittes Ultraschallsichtverfahren, das auf einem Vorschlag von SOKOLOFF beruht, arbeitet mit einem elektronischen Zeilenbildwandler. Bei diesem Verfahren trifft der Schallstrahl nach dem Passieren des Prüflings auf eine Quarzplatte, die den Boden eines Kathodenstrahlrohrs bildet. In diesem **A b - t a s t r o h r** wird die unter dem Einfluß des Schalldrucks und des piezoelektrischen Effekts auf der Quarzplatte erzeugte Potentialverteilung durch einen Elektronenstrahl zeilenförmig abgetastet. Die so gewonnenen Signale werden mit den in der Fernsehtechnik üblichen Mitteln weiterverarbeitet und dienen dazu, auf dem Leuchtschirm einer Bildröhre ein Abbild der Potentialverteilung auf der Quarzplatte zu erzeugen. Damit erhält man eine bildliche Darstellung der Schallintensitätsverteilung. Das Prinzip eines im VEB Carl Zeiss Jena entwickelten Ultraschall-Zeilenbildwandlers zeigt Bild 4.22.

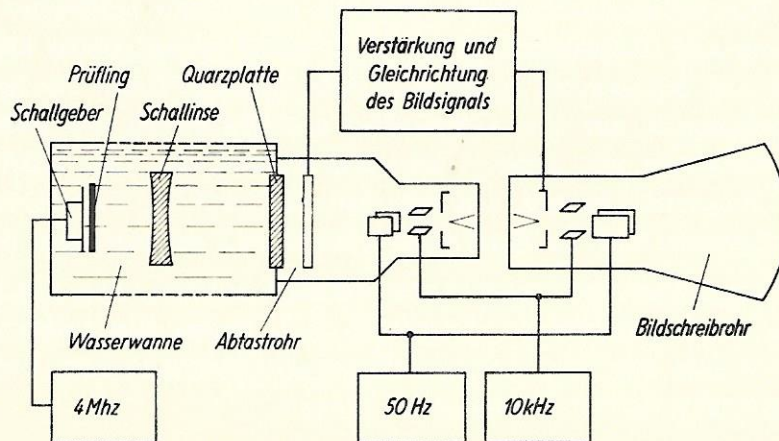


Bild 4.22 Elektronischer Zeilenbildwandler

Da das Verfahren bisher noch nicht im praktischen Einsatz erprobt werden konnte, ist z.Z. nicht abzusehen, ob bzw. mit welchem Erfolg eine Verwendung im Rahmen der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung möglich sein wird.

Sämtliche Ultraschallsichtverfahren haben sich im Rahmen der Werkstoffprüfung nicht recht behaupten können. Das hat^a seine Ursache darin, daß Ultraschallsichtgeräte einen erheblichen Aufwand erfordern, verhältnismäßig teuer und nur sehr begrenzt einsetzbar sind. Man kann nur Werkstücke erfassen, die bei geringer Dicke planparallele Flächen aufweisen. Auch die erzielbare Prüfungsschwindigkeit ist, besonders bei großflächigen Teilen, beschränkt. Nicht zuletzt hat das Aufkommen des Impuls-Echo-Verfahrens, das wegen seiner universellen Anwendbarkeit weit verbreitet ist, dazu beigetragen, daß die Ultraschallsichtverfahren stark an Bedeutung verloren haben

4.4. Impuls-Echo-Verfahren

Das Impuls-Echo-Verfahren hat sich wegen seiner spezifischen Vorteile für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mehr und mehr durchsetzen können. Das ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, daß sich diese Art der Ultraschallprüfung durch eine weitestgehend universelle Einsetzbarkeit auszeichnet. Die erforderlichen Geräte sind leicht und gut transportabel. Man kann sie praktisch an jedem beliebigen Prüfort anwenden, ohne das zu prüfende Werkstück an das Gerät heranbringen zu müssen. Schließlich bietet das Verfahren selbst wesentliche Vorteile gegenüber den bisher beschriebenen Methoden, in der Hauptsache in einer besseren Nachweisempfindlichkeit auch für kleinere Fehler und in der Möglichkeit, die Fehlerlage im Werkstoff zu bestimmen.

4.4.1. Wirkungsprinzip

Beim Impuls-Echo-Verfahren werden von einem Prüfkopf kurze Ultraschallimpulse in das zu prüfende Werkstück eingestrahlt. Die Impulse laufen in den Werkstoff hinein und werden von der gegenüberliegenden Seite des Prüfkörpers bzw. von vorhandenen Werkstofffehlern reflektiert. Sie kommen zum Prüfkopf zurück und können durch die am Schwinger erregte Piezospaltung nachgewiesen werden. Der gesamte Vorgang wird auf dem Bildschirm einer Braunschen Röhre zeitproportional dargestellt.

Beim Impuls-Echo-Verfahren wird in der Regel nur *e i n* Prüfkopf verwendet, dessen Schwinger sowohl die Funktion des Senders als auch die des Empfängers versieht. Der Prüfkopf ist über ein Kabel mit dem eigentlichen Ultraschallgerät verbunden und wird in der Regel von der Hand des Prüfers über die Werkstückoberfläche geführt.

Für die Darstellung des Prüfergebnisses auf dem Oszillographenschirm werden die am Prüfkopf auftretenden Impulse in ihrer zeitlichen Folge durch mehr oder weniger starke Auslenkungen einer waagrecht liegenden Zeitlinie kenntlich gemacht, wobei die Amplitude der Auslenkungen der Intensität der Impulse entspricht. Es werden also die Verhältnisse im Prüfling aufgezeichnet, die entlang des Schallwegs herrschen. Wegen der zackenartigen Auslenkung der Nulllinie

wird diese Art der Darstellung auch mit der Bezeichnung Zackenschrift belegt.

Das Prinzip der Zackenschriftanzeige ist in Bild 4.23 schematisch dargestellt. Die bei Null befindliche Auslenkung der Zeitlinie entspricht dem vom Prüfkopf ausgehenden Impuls. Die beiden anderen Zacken markieren die vom Fehler und von der Rückwand reflektierten Echos. Die Lage des Fehlerechos zwischen Eingangsimpuls und Rückwandecho ist der Lage des Fehlers zwischen Prüffläche und Rückwand des Werkstücks verhältnismäßig. Daraus resultiert die Möglichkeit, die Tiefenanlage der Fehler zu bestimmen.

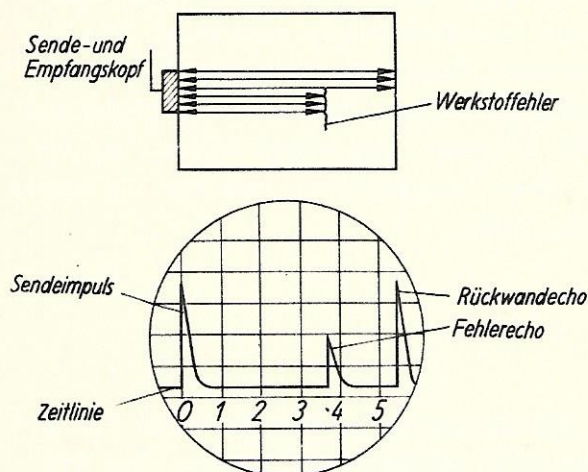


Bild 4.23 Zackenschriftanzeige

Ankopplungsfehler, die beim Durchschallungsverfahren eine Verfälschung des Meßergebnisses verursachen, sind beim Impuls-Echo-Verfahren von untergeordneter Bedeutung, da durch sie das Rückwandecho und das Fehlerecho in gleichem Verhältnis geschwächt werden. Außerdem ist bei der Verwendung eines kombinierten Sende-Empfangs-Prüfkopfs nur eine Koppelstelle vorhanden und braucht nur eine Seite des Werkstücks zugänglich zu sein.

4.4.2. Fehlernachweisempfindlichkeit

Die Fehlernachweisempfindlichkeit ist beim Impuls-Echo-Verfahren wesentlich größer als beim Durchschallungsverfahren. So kann z.B. eine Fehlstelle, die nur fünf Prozent der eingestrahlten Schallenergie reflektiert, noch einwandfrei nachgewiesen werden. Beim Durchschallungsverfahren würde ein solcher Fehler die am Empfangskopf ankommende Intensität von 100 auf 95 Prozent schwächen und somit eine Intensitätsänderung bewirken, die noch innerhalb der Ankopplungsschwankungen liegt und somit nicht als Fehleranzeige identifiziert werden kann. Während für die Durchschallung nur Werkstücke in Frage kommen, die parallele Begrenzungsflächen besitzen und nicht zu dick sind, ist die Meßlänge beim Impuls-Echo-Verfahren nur durch die Extinktion des Schalls im Werkstoff begrenzt. Es lassen sich mit normalen Prüffrequenzen bei feinkörnigen Werkstoffen mit geringer Dämpfung - z.B. Stahl - Schallwege bis zu etwa 10 m erreichen.

Ein Nachteil des Impuls-Echo-Verfahrens liegt darin, daß Fehler, die dicht unter der Werkstückoberfläche liegen, nicht oder nur durch Sekundäreffekte erkannt werden können. Das ist dadurch bedingt, daß die Laufzeit von Echos, die von dicht unter der Oberfläche liegenden Werkstofffehlern verursacht werden, so kurz ist, daß das auf dem Bildschirm erscheinende Fehlerecho im Sendepuls untergeht. Dieser Effekt wird noch dadurch unterstützt, daß die elektronische Umschaltung des Prüfkopfs von Senden auf Empfangen nicht völlig trägheitslos vor sich geht. Es verstreicht eine gewisse Zeit, bis der Schwin-

ger nach Abstrahlung des Sendeimpulses zum Empfang ankommender Echos bereit ist. Den unter der Oberfläche des Prüflings liegenden Bereich, in dem vorhandene Werkstofffehler nicht nachgewiesen werden können, nennt man tote Zone. Sie hat im allgemeinen, je nach der Konstruktion des Prüfgeräts, den Ankopplungsbedingungen und der verwendeten Prüffrequenz, eine Ausdehnung von 5 bis 10 mm. Das hat zur Folge, daß sich sehr dünne Teile im allgemeinen für die Prüfung nach dem Impuls-Echo-Verfahren nicht eignen. Mit der Durchschallungsmethode lassen sich hier meist bessere Ergebnisse erzielen. Bei der Prüfung dicker Werkstücke sind Fehler im Bereich der toten Zone mitunter dadurch zu erkennen, daß an diesen Stellen eine Verringerung der Amplitude des Rückwandechos zu verzeichnen ist, da die vom Fehler bereits reflektierte Energie für die Bildung des Rückwandechos verlorengeht.

4.4.3. Oberflächenbeschaffenheit des Prüflings

Bei nicht zu rauher Werkstückoberfläche wird die Ankopplung des Prüfkopfs im allgemeinen durch Benetzen der Prüffläche mit Öl vorgenommen. Lockerer Oberflächenbelag, Sand, Zunder usw., ist vor der Prüfung unbedingt zu entfernen. Dünne festhaftende Zunderschichten, z.B. Walzzunder, stören bei der Prüfung meist nur wenig. Auch Anstrichschichten können erhalten bleiben, soweit sie nicht zu dick sind, fest haften und nicht allzu hohe Anforderungen an die Prüfung gestellt werden.

Es hat sich im allgemeinen als zweckmäßig erwiesen, spanend zu bearbeitende Teile nach dem ersten zerspanenden Arbeitsgang zu prüfen. Die besten Prüfergebnisse werden erzielt, wenn eine blanke, feinbearbeitete Prüffläche zur Verfügung steht. Die Ein- und Austrittsverluste sind dann gering, so daß auch kleine Werkstofffehler gut zu erkennen sind.

Das metallische Werkstück bildet im Normalfall die Gegenelektrode des mit seiner Vorderfläche freiliegenden piezoelektrischen Ultraschallschwingers. Bei der Prüfung nichtmetallischer Werkstoffe sowie bei der Ankopplung auf Oberflächen mit nichtmetallischen Überzügen, etwa Anstrichen, muß ueshalb eine dünne, beiderseits mit dem Koppelmedium benetzte Metallfolie zwischen Prüfkopf und Werkstückoberfläche gelegt werden. Für raue Oberflächen benutzt man mit Vorteil geschützte Prüfköpfe, deren Schwinger mit einer Kunststoffolie abgedeckt ist, die ihn vor Verschleiß schützt. Die mit einer dünnen Metallfolie hinterlegte Kunststoffolie kann ausgewechselt werden, wenn sie verschlissen ist. Bei der Verwendung geschützter Prüfköpfe braucht man nicht zu berücksichtigen, ob die Prüffläche metallisch blank ist.

Neben Öl hat sich besonders bei rauhen Oberflächen Glyzerin als Koppelmedium bestens bewährt. Verschiedene Firmen bringen auch spezielle Koppelpasten in den Handel.

4.4.4. Wahl der Prüffrequenz

Wegen der besseren Auflösung und der stärkeren Bündelung des Schallstrahls ist man in der Regel bemüht, die Prüffrequenz möglichst hoch zu wählen. Dem wird jedoch durch die Extinktion des Schalls im Werkstoff eine Grenze gesetzt. Das gilt besonders für Werkstoffe, die entweder einen hohen Dämpfungs-

faktor besitzen oder sehr grobkörnig sind. Solche stark schallabsorbierenden Werkstoffe, wie z.B. Kunststoffe (hohe Dämpfung) und Grauguß (grobes Gefüge), lassen sich wegen der mit steigender Frequenz stark anwachsenden Schallschwächung meist nur mit niedrigeren Frequenzen prüfen. Die Ultraschallprüfung eignet sich daher in der Hauptsache für Werkstücke aus Stahl, Stahlguß und Aluminium (gegossen und gepreßt). Für Grauguß, Kupfer, Messing und Bronze werden auch mit geringen Frequenzen nur verhältnismäßig kurze Schallwege erreicht, so daß das Verfahren hier schnell seine Grenze findet.

Impuls-Echo-Geräte müssen also die Möglichkeit bieten, mit mehreren Prüffrequenzen zu arbeiten, damit sich der Prüfer den jeweiligen Verhältnissen anpassen kann. Der Frequenzbereich, den moderne Ultraschallgeräte überstreichen, liegt etwa zwischen 1 und 10 MHz. Hierbei sind für jede der verfügbaren Prüffrequenzen gesonderte Tastköpfe erforderlich, da der Schwinger auf die verwendete Schallfrequenz abgestimmt sein muß.

4.4.5. Arbeitsweise von Impuls-Echo-Geräten

Das Prinzipschaltbild eines Impuls-Echo-Geräts ist in Bild 4.24 dargestellt. Im Impulsgenerator werden die Hochfrequenzimpulse erzeugt, deren Frequenz man je nach den Prüfbedürfnissen umschalten kann. Die Breite eines solchen Impulses (Impulsdauer) ist meist veränderbar und im allgemeinen gleich der Zeit von einer Schwingung bis drei Schwingungen. Sie liegt also in der Größenordnung von Mikrosekunden. Die Aufeinanderfolge der einzelnen Impulse muß so gewählt werden, daß zwischen zwei Impulsen genügend Zeit für die Aufzeichnung der aus dem Werkstück kommenden Echos bleibt. Die Impulsfolgefrequenz liegt je nach eingeschaltetem Meßbereich zwischen 50 und 2000 Impulsen je Sekunde.

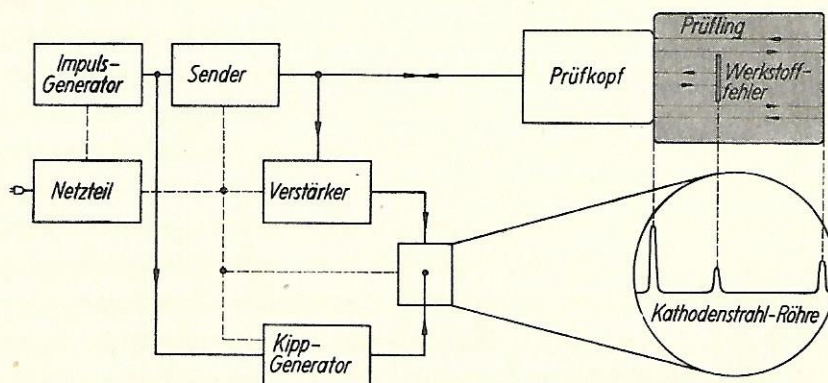


Bild 4.24 Impuls-Echo-Gerät (Prinzipschaltbild)

Die vom Impulsgenerator erzeugten Impulse werden im Senderteil verstärkt und dem Prüfkopf zugeleitet. Der Kippgenerator erzeugt die Spannung zur horizontalen Ablenkung des Elektronenstrahls. Die Geschwindigkeit der horizontalen Ablenkung bestimmt den Maßstab, in dem die Laufzeiten aufgezeichnet werden. Da die Laufzeiten der Weglänge im Prüfling proportional sind, werden bei niedriger Kippgeschwindigkeit lange, bei hoher Kippgeschwindigkeit kurze Strecken abgebildet. Eine Synchronisierungseinrichtung steuert die gesamten elektrischen Vorgänge so, daß die Zeilenfrequenz stets gleich der Impulsfolgefrequenz

ist. Dadurch ist gewährleistet, daß sich die mit der Impulsfolgefrequenz wiederholenden Einzelbilder decken und auf dem Bildschirm ein stehendes Bild erzeugt wird.

Sowohl der Sendeimpuls als auch die vom Prüfkopf kommenden Echoimpulse werden über einen Verstärker den vertikalen Ablenkplatten der Oszillographenröhre zugeführt und bewirken somit die vertikale Auslenkung der Zeitlinie.

Entsprechend der verschiedenen Schallwege, die bei der Prüfung unterschiedlicher Werkstücke zurückzulegen sind, können durch Umschalten der Zeilenfrequenz und damit der horizontalen Ablenkgeschwindigkeit verschiedene Prüfbereiche eingestellt werden. Hierbei beträgt der unterste Prüfbereich meist 10 cm, während der oberste in der Regel bei 10 m liegt. Innerhalb der einzelnen Prüfbereiche ist im allgemeinen noch eine stufenlose Feinregelung vorgesehen, die eine Anpassung an die von Werkstoff zu Werkstoff unterschiedliche Schallgeschwindigkeit zuläßt und die Angleichung des Abbildungsmaßstabs an die vor dem Bildschirm angebrachte Strichteilung gestattet.

4.4.6. Wahl des Meßbereichs

Der Meßbereich wird in der Regel so eingestellt, daß das erste Rückwandecho auf dem Bildschirm sichtbar ist und mit Hilfe der Schallgeschwindigkeits-eichung auf die der durchschallten Werkstückdicke entsprechende Stelle der vor dem Bildschirm liegenden Strichteilung gebracht werden kann. Die richtige Einstellung des Geräts bei der Prüfung eines in Schallrichtung 30 cm messenden Werkstücks im 50-cm-Prüfbereich zeigt Bild 4.25a. Wählt man bei der Prüfung des gleichen Stücks einen größeren Meßbereich, z.B. 100 cm, dann erscheinen auf dem Bildschirm mehrere Wiederholungsechos (Bild 4.25b). Diese kommen dadurch zustande, daß der eingestrahelte Schallimpuls im Werkstück mehrmals hin- und herläuft, bis seine Energie durch die Extinktion im Werkstoff aufgezehrt ist.

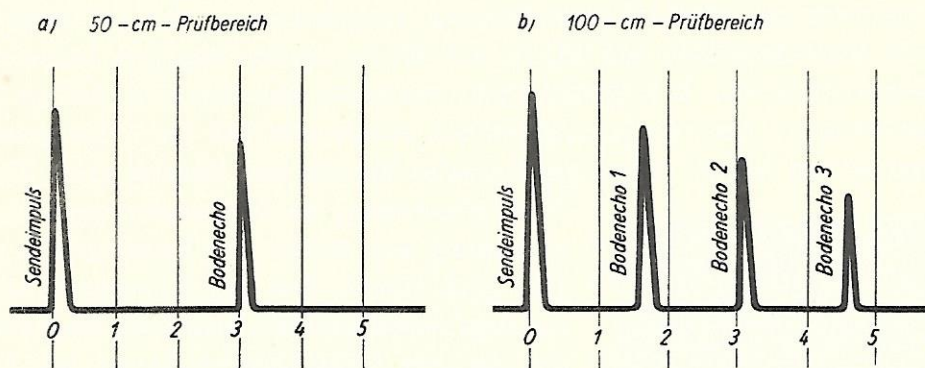


Bild 4.25 Schirmbild eines 30 cm dicken Werkstücks ohne Fehler

4.4.7. Auftreten von Nebenechos

Ebenso wie das Rückwandecho können natürlich auch Fehlerechos mehrfach auftreten. So zeigt das Oszillogramm eines 38 cm dicken Prüflings, der in 11 cm Tiefe einen kräftigen Fehler aufweist, im Meßbereich von 50 cm eine Folge

von vier Fehlerechos mit abklingender Amplitude (Bild 4.26). Hinter dem dritten Fehlerecho befindet sich das Rückwandecho und hinter dem vierten Fehlerecho der erste Impuls einer weiteren Fehlerechoserie. Dieses Beispiel veranschaulicht, daß das Schirmbild mitunter eine Fülle von Echozacken aufweisen kann. Bei der Prüfung kompliziert geformter Teile können noch weitere Nebenechos auftreten, verursacht durch Nuten, Vorsprünge und andere Unregelmäßigkeiten der Werkstückform, die die Deutung des Oszillogramms erschweren.

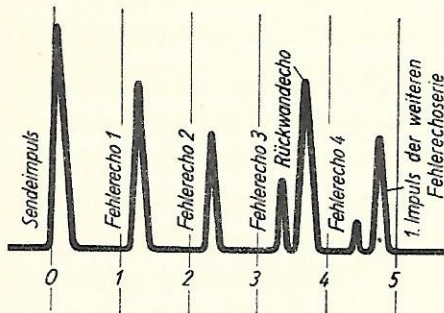


Bild 4.26 Wiederholung des Fehlerechos

Die eingestrahlte Longitudinalwelle kann sich außerdem, besonders bei der Längsprüfung stangenförmiger Werkstücke, in eine Transversalwelle umwandeln, die ebenfalls Störechos verursacht. Dieser Effekt tritt dann auf, wenn das kegelförmige Schallfeld die Mantelfläche der geprüften Stange schneidet. Bei dem streifenden Auftreffen der Longitudinalwelle auf die Werkstückbegrenzung findet eine Wellentransformation statt. Es entsteht eine Transversalwelle, die meist über verschiedene Zick-Zack-Reflexionen zum Prüfkopf zurückkommt. Die durch sie verursachten Störechos sind jedoch meist gut zu identifizieren, da sie wegen der geringeren Geschwindigkeit und des größeren Schallwegs der Transversalwelle stets hinter dem ersten Rückwandecho auftreten.

4.4.8. Schrägeinstrahlung

Abgesehen von der Plattenwellenmethode (Abschnitt 4.3.1.) werden bei sämtlichen bisher betrachteten Arten der Ultraschallprüfung Longitudinalwellen verwendet. Der Schall wird dabei, bis auf den Fall der v-förmigen Durchschallung (Bild 4.6), senkrecht zur Werkstückoberfläche eingestrahlt. Bei der Schrägeinstrahlung der Schallimpulse mit Hilfe von Winkelköpfen dagegen bedient man sich der Transversalwellen. Die Winkelköpfe bestehen aus einem normalen Ultraschall-Dickenschwinger, dem ein Plexiglaskeil vorgeschaltet ist. Sie gehören zur Standardausrüstung eines jeden Impuls-Echo-Geräts und lassen sich überall

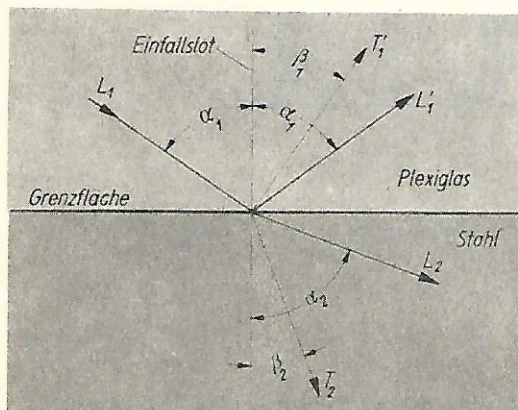


Bild 4.27 Brechungs- und Reflexionsverhältnisse an der Grenze zweier fester Stoffe

dort einsetzen, wo die senkrechte Einstrahlung mit Hilfe der Normalköpfe nicht zum Ziel führt. Das ist besonders bei der Prüfung kompliziert geformter Werkstücke und bei der Schweißnahtprüfung der Fall.

Schallbrechung und -reflexion

Bei der Prüfung mit Winkelköpfen wird eine Transversalwelle in den Werkstoff eingestrahlt. Bild 4.27 zeigt die beim Übergang des Schalls vom Plexiglaskeil auf das Werkstück herrschenden Brechungs- und Reflexionsverhältnisse. Die vom Schwinger abgestrahlte Longitudinalwelle L_1 trifft unter dem

Winkel α_1 auf die Grenzfläche. Im a l l g e m e i n e n Fall wird ein Teil der Schallenergie (L'_1) reflektiert, der Rest (L_2) tritt in das zu prüfende Werkstück ein. Der reflektierte sowie der die Grenzfläche unter Brechungerscheinungen passierenden Anteil werden in eine Longitudinal- (L'_1 bzw. L_2) und eine Transversalwelle (T'_1 bzw. T_2) aufgespalten. Die Winkel, die die einzelnen Wellenzüge zum Lot einnehmen, sind über das Snelliussche Brechungsgesetz miteinander verknüpft. Es gilt

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_{L'_1}} = \frac{\sin \beta_1}{v_{T'_1}} = \frac{\sin \alpha_2}{v_{L_2}} = \frac{\sin \beta_2}{v_{T_2}}$$

Der Sinus des Winkels, den jeder Wellenzug zum Lot einnimmt, ist also der Schallgeschwindigkeit in dem jeweiligen Stoff direkt proportional.

Im s p e z i e l l e n Fall der Werkstoffprüfung mit Winkelköpfen wird der an der Grenzfläche Plexiglas - Werkstück reflektierte Energieanteil durch eine geeignete Formgebung des Vorsatzkeils absorbiert und somit unwirksam gemacht. Es soll deshalb bei der folgenden Betrachtung nur auf d i e Ultraschallwellen eingegangen werden, die die Grenzfläche passiert haben.

Bei dem in den Werkstoff eingetretenen Anteil der Schallenergie ist das Bestehen von Transversal- u n d Longitudinalwellen für die Prüfung nicht erwünscht, da sie infolge ihrer verschiedenen Einstrahlwinkel und ihrer unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten keine eindeutige Schirmbildanzeige ermöglichen. Einer der beiden Wellenzüge muß deshalb ausgeschaltet werden. Durch entsprechende Ausbildung des Plexiglaskeils vergrößert man den Einfallswinkel von α_1 mindestens soweit, daß der Brechungswinkel α_2 der Longitudinalwellen (L_2) im Werkstück 90° , d.h. $\sin \alpha_2 = 1$ wird. Von diesem Grenzwinkel an tritt eine Totalreflexion der Longitudinalwelle auf, so daß nur noch die Transversalwelle in den zu prüfenden Werkstoff eintritt. Der Grenzwert für den Winkel α_1 , von dem an die Totalreflexion der Longitudinalwelle erfolgt, ist dann erreicht, wenn

$$\sin \alpha_1 = \frac{v_{L_1}}{v_{L_2}}$$

ist. Dieser Grenzwinkel liegt bei der Kombination Plexiglas - Stahl bei $27,6^\circ$. Hierbei beträgt der Einfallswinkel β_2 der Transversalwelle in das Werkstück etwa $33,2^\circ$. Diese Verhältnisse bedingen, daß bei keinem der im Handel befindlichen Impuls-Echo-Geräte Winkelköpfe vorhanden sind, deren Prüfwinkel, also der Einfallswinkel der Transversalwelle in den Prüfling, kleiner als 35° ist. Es sind für die verschiedenen Geräte Winkelköpfe lieferbar, die meist der Abstufung $35 - 45 - 60 - 70 - 80^\circ$ folgen, wobei der Winkel stets auf die Einstrahlung der Transversalwelle in Stahl bezogen ist. Bei der Prüfung anderer Werkstoffe weicht er natürlich entsprechend der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten von diesen Werten mehr oder weniger stark ab und muß von Fall zu Fall errechnet oder aus entsprechenden Tabellen entnommen werden.

Schweißnahtprüfung

Winkelköpfe werden außer für die Prüfung kompliziert geformter Werkstücke in der Hauptsache für die Schweißnahtprüfung eingesetzt. Hierbei sind einige Be-

sonderheiten zu beachten, die bei der Senkrechteinstrahlung nicht auftreten. Tritt ein Schallimpuls, wie in Bild 4.28 dargestellt, in einen parallelellflächigen Körper, z.B. ein Blech ein, so wird er sich in Zick-Zack-Form fort-

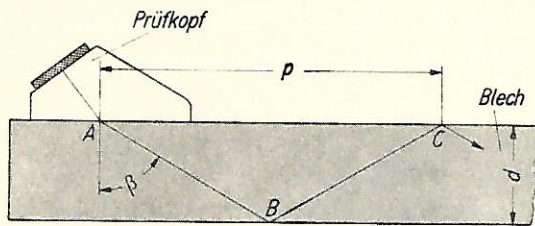


Bild 4.28 Schallweg bei Schrägeinstrahlung

pflanzen und in der Regel nicht zum Prüfkopf zurückkommen. Es fehlt hier also im allgemeinen das Rückwandecho. Der in der Abbildung am Punkt A unter dem Winkel β in das Werkstück eingestrahlte Impuls kommt nach Reflexion an der Stelle B der Rückwand bei C wieder an die Oberfläche zurück. Den Abstand A - C bezeichnet man mit Sprungabstand p:

$$p = d \cdot 2 \tan \beta$$

Den Wert $2 \tan \beta$ nennt man Sprungfaktor. Er ist meist auf den Winkelköpfen angegeben, so daß man zur Ermittlung des Sprungabstands lediglich die Werkstückdicke d mit ihm zu multiplizieren hat. Der auf den Köpfen angegebene Wert für den Sprungfaktor gilt nur für Stahl.

Die Kenntnis des Sprungabstands ist besonders bei der Schweißnahtprüfung wichtig. Der Prüfkopf muß nämlich parallel zur Schweißnaht mit ständig wechselnder Entfernung, begrenzt von dem halben und dem ganzen Sprungabstand zur Naht, geführt werden (Bild 4.29). Auf diese Weise wird nacheinander das gesamte Nahtvolumen erfaßt. An einwandfrei geschweißten Stellen erscheint auf dem Bildschirm des Geräts kein Echo. Schweißfehler zeichnen sich durch Echozacken ab, aus deren Entfernung vom Sendepuls man unter Berücksichtigung der Transversalwellengeschwindigkeit auf die Lage des Fehlers schließen kann. Die Auswertung des Echobilds erfordert viel Prüferfahrung und geometrisches Vorstellungsvermögen.

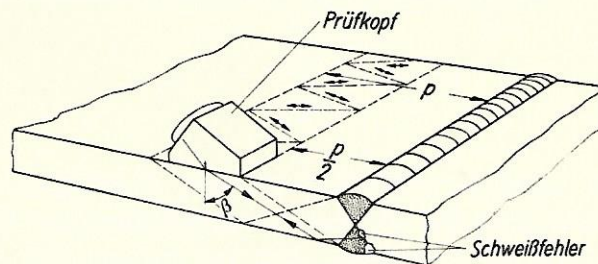


Bild 4.29 Schweißnahtprüfung mit einem Winkelkopf

Aus der Lage des georteten Fehlers können Rückschlüsse auf die Fehlerart gezogen werden. Die Form des Echoimpulses auf dem Bildschirm kann ebenfalls zur Fehleridentifizierung beitragen. Im großen und ganzen ist es jedoch mit Schwierigkeiten verbunden, eine konkrete Fehlerartbestimmung bei der Schweißnahtprüfung durchzuführen. Um trotz dieser Schwierigkeiten zu einwandfreien Aussagen zu gelangen und die Vorteile des Ultraschallverfahrens auch für die Abnahmeprüfung überwachungspflichtiger Bauwerke nutzen zu können, wird die Schweißnahtprüfung häufig kombiniert nach der Ultraschall- und der Röntgen-

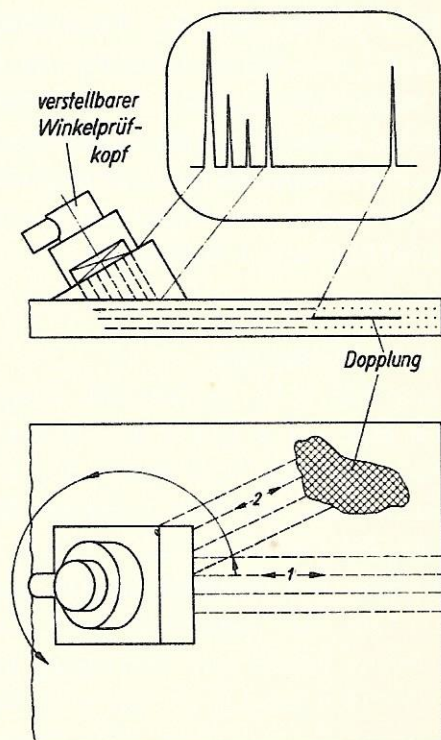
methode durchgeführt. Wenn sich nach der Vorprüfung mit Ultraschall keine Fehleranzeige einstellt, kann mit großer Sicherheit angenommen werden, daß die Naht in Ordnung ist, da sich das Verfahren durch eine sehr große Nachweisempfindlichkeit für Schweißfehler auszeichnet. Die bei der Ultraschallprüfung als fehlerfrei befundenen Nahtpartien werden daher keiner weiteren Kontrolle unterzogen, fehlerhafte Stellen jedoch zur genaueren Untersuchung der Fehlerart nachträglich geröntgt. Diese kombinierte Prüfmethode ist weit verbreitet.

Der Ultraschall-Schweißnahtprüfung sind Bleche von etwa 8 mm Dicke an zugänglich. Die Wahl des Einstrahlwinkels richtet sich nach der Blechdicke. Bei dünnen Blechen benutzt man große, bei dicken kleine Einstrahlwinkel. Zur besseren Fehlerortung bei der Schweißnahtprüfung werden auch Fehlerortungsstäbe verwendet, die an den Winkelkopf angesetzt werden und durch eine schematische Darstellung des geprüften Querschnitts und des Schallwegs eine einfachere Bestimmung der Fehlerlage gestatten.

Bei der Prüfung kompliziert geformter Teile mit Hilfe von Winkelköpfen richtet sich die Wahl der jeweils erforderlichen Einstrahlwinkel nach den geometrischen Verhältnissen. Der Geschicklichkeit und der Erfahrung des Prüfers bleibt es überlassen, in jedem einzelnen Fall die optimalen Prüfbedingungen zu schaffen.

Blechprüfung mit Plattenwellen

Bei der Blechprüfung mittels Plattenwellen (vgl. 4.3.1.) nach dem Impuls-Echo-Verfahren, die einen Sonderfall der Schrägeinstrahlung darstellt, wird ein verstellbarer Winkelprüfkopf verwendet. Zur Kontrolle des richtigen Einstrahlwinkels, der einem Plattenwellendiagramm (Bild 4.9) zu entnehmen ist, wird zunächst eine der Blechkanten rechtwinklig angestrahlt (Bild 4.30, Stellung 1) und der Winkelprüfkopf so lange verstellt, bis das Kantenecho eine maximale Amplitude besitzt. Das ist das Zeichen dafür, daß optimale Bedingungen für die Anregung der gewünschten Plattenwelle herrschen. Beim eigentlichen Prüfungsvorgang wird der Prüfkopf in der Blechmitte um seine eigene Achse gedreht, um die gesamte Fläche des Blechs zu erfassen. Trifft die Plattenwelle z.B. auf den Rand einer Dopplung, so wird von dort ein Teil der Energie reflektiert, läuft zum Prüfkopf zurück und macht sich auf dem Bildschirm durch eine Echozacke bemerkbar (Bild 4.30, Stellung 2). Da die Reflexion an der dem Prüfkopf zugewandten Begrenzung der Dopplung erfolgt, läßt sich deren Ausdehnung nur dann bestimmen, wenn man die Dopplung mit dem Prüfkopf von allen Seiten her einkreist.



4.4.9. Schallgeschwindigkeitsmessung mit Interferometer

Zur Ermittlung bestimmter Werkstoffeigenschaften ist mitunter die Kenntnis der Schallgeschwin-

Bild 4.30 Plattenwellenprüfung

digkeit in dem betreffenden Werkstoff wichtig. Sie kann nach dem Impuls-Echo-Verfahren mit einem Interferometer mit großer Genauigkeit gemessen werden. Das Interferometer besteht aus einer mit Wasser gefüllten Wanne, an deren Stirnseite ein normaler Prüfkopf eingesetzt ist, der in Richtung der Längsachse der Wanne abstrahlt (Bild 4.31, Seite 69). Quer zum Schallstrahl ist in der Wanne ein Reflektor angeordnet, dessen Abstand zum Prüfkopf durch eine Spindel verändert werden kann. Die Entfernung Prüfkopf - Reflektor kann man an einer Teilung, die ähnlich der einer Mikrometerschraube ausgebildet ist, ablesen. Zu dem in die Wanne eingesetzten Prüfkopf ist ein zweiter Prüfkopf elektrisch parallel geschaltet. Dieser wird auf den Werkstoff aufgesetzt, dessen Schallgeschwindigkeit zu bestimmen ist. Auf dem Bildschirm des Geräts erscheinen zwei Echozacken. Die eine stammt aus der Wasserstrecke, die andere stellt das Rückwandecho aus dem Werkstoff dar. Durch Verändern der Reflektorstellung in der Interferometerwanne bringt man die beiden Echos zur Deckung, so daß die Impulse im Wasser und im Werkstück die gleiche Laufzeit haben. Da die Schallgeschwindigkeit im Wasser bekannt ist, kann die Schallgeschwindigkeit im Werkstück aus

$$v_1 = \frac{v_2 \cdot l_1}{l_2}$$

v_1 Schallgeschwindigkeit im Werkstück

v_2 Schallgeschwindigkeit im Wasser

l_1 durchlaufene Schallstrecke im Werkstück

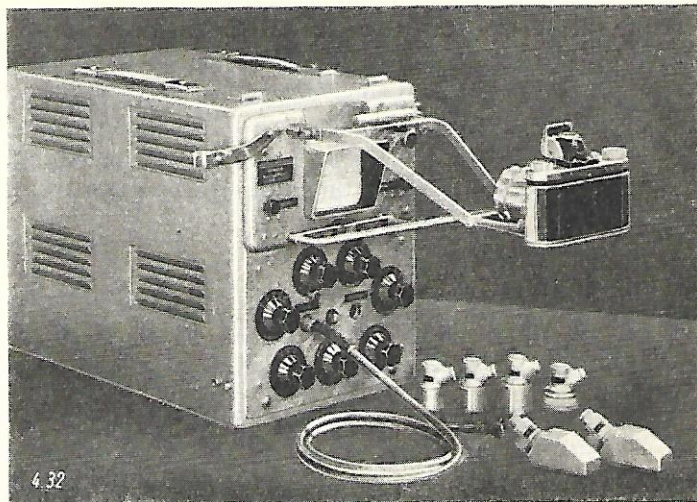
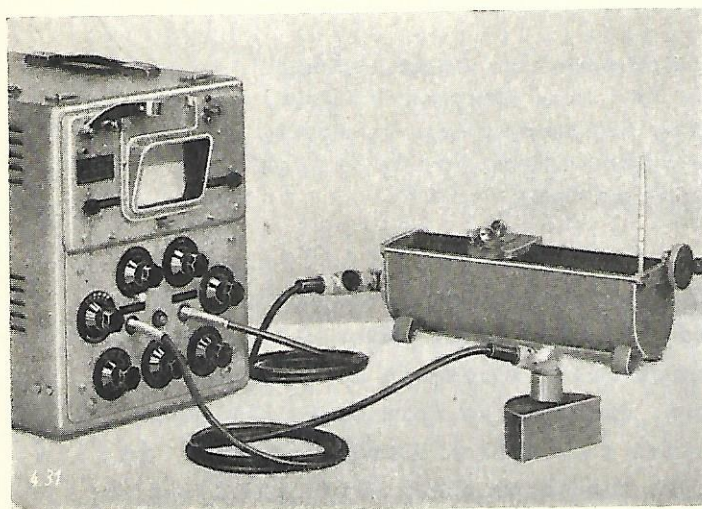
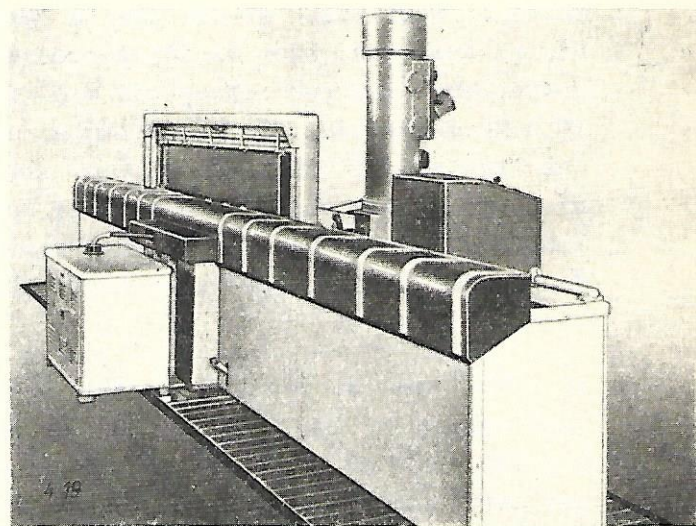
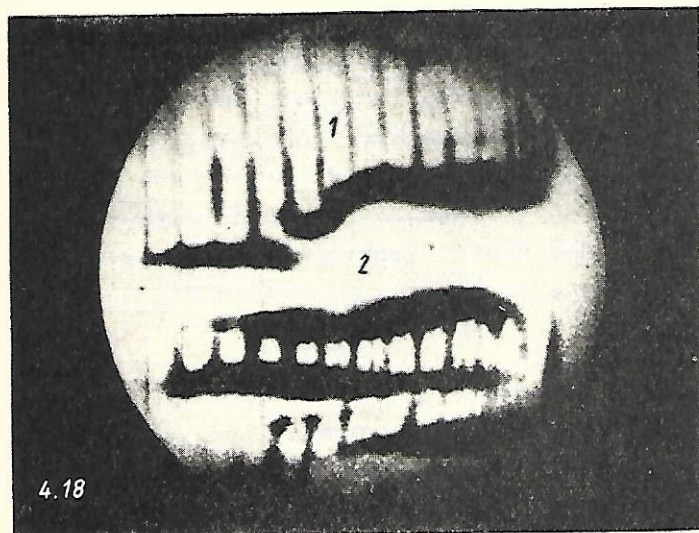
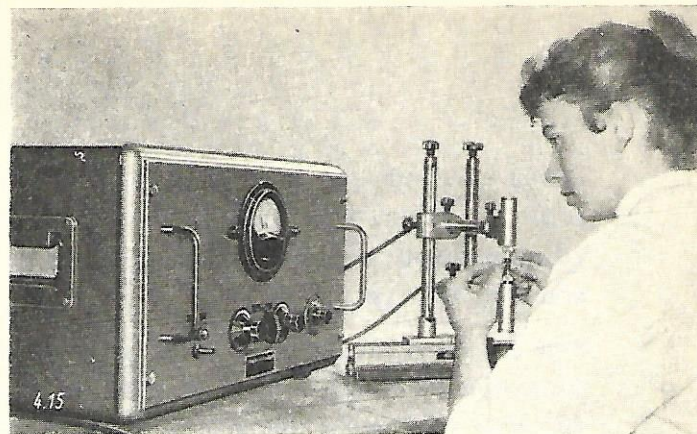
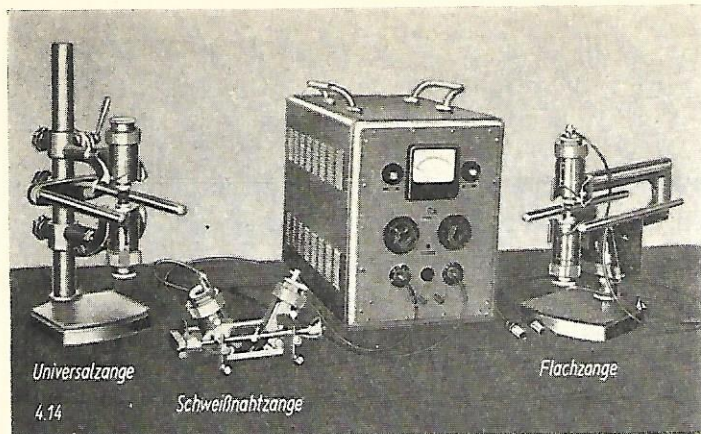
l_2 durchlaufene Schallstrecke im Wasser

ermittelt werden.

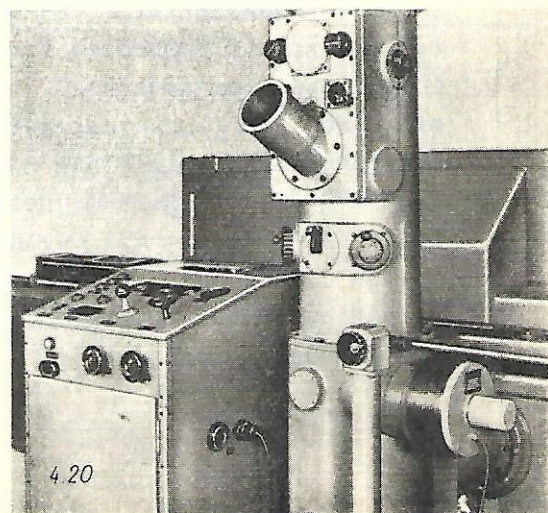
Benutzt man auf der Werkstoffseite statt des normalen Prüfkopfs einen Spezialkopf, der Transversalwellen abstrahlt, so läßt sich auch die Transversalwellengeschwindigkeit im Werkstoff messen. Die Meßunsicherheit beträgt bei der Schallgeschwindigkeitsmessung nach dieser Methode nur ± 1 Promille. Mit Hilfe der gemessenen Schallgeschwindigkeiten v_l und v_t lassen sich die elastischen Konstanten des Werkstoffs - Elastizitätsmodul, Schubmodul und Querkontraktionskoeffizient - errechnen.

4.4.10. Gerätetypen

Bei den z.Z. in der DDR eingesetzten Impuls-Echo-Geräten handelt es sich meist um das I m p u l s - S c n a l l - G e r ä t der Firma Dr. J. und H. Krautkrämer, Köln und das E c h o s k o p der Firma Dr. Lehfeldt & Co., Heppenheim. Ein vom VEB Funkwerk Erfurt entwickeltes Ultraschall-Materialprüfgerät mit der Bezeichnung T y p 9 0 2 4 steht den westdeutschen Fabrikaten in seiner Leistungsfähigkeit kaum nach, so daß erwartet werden kann, daß es sich in unserer Industrie bald in größerem Umfang einführen wird. Die für das Erfurter Gerät zur Verfügung stehende Auswahl an Tastköpfen und Zubehörteilen dürfte ausreichen, um alle wesentlichen Ultraschall-Prüfprobleme in unserer Industrie zu lösen. Das Gerät ist in Bild 4.32 (Seite 69) mit einer Reihe verschiedener Prüfköpfe und einer Fotoeinrichtung dargestellt. Es wiegt etwa 25 kp und ist für die Prüffrequenzen 0,5, 1, 2, 4 und 6 MHz ausgelegt. Die einstell-



- Bild 4.14 Vorrichtungen zum Sonometer
Dr. Leffeldt und Co. Heppenheim
- Bild 4.15 Ultraschall-Kleinteilprüfgerät Usomat
VEB Carl Zeiss Jena
- Bild 4.18 Ultraschallbild nach dem Reliefbildverfahren
1 schalldurchlässiger Bereich (gesundes Blech)
2 schallundurchlässiger Bereich (Dopplung)
- Bild 4.19 Ultraschallsichtgerät (Gesamtansicht)
VEB Carl Zeiss Jena
- Bild 4.20 Ultraschallsichtgerät (Teilansicht)
- Bild 4.31 Ultraschallprüfgerät mit Interferometerzusatz
VEB Funkwerk Erfurt
- Bild 4.32 Ultraschall-Materialprüfgerät Typ 9024
VEB Funkwerk Erfurt



baren Meßbereiche betragen 10, 25, 50, 100, 250 und 500 cm. In Sonderfällen läßt sich das Gerät beim Anschalten eines zweiten Prüfkopfs im Durchschallungsbetrieb einsetzen. Das gilt ganz allgemein auch für Impuls-Echo-Geräte anderer Fabrikate.

Von der gerätebauenden Industrie werden für die verschiedenen Impuls-Echo-Geräte eine Reihe von Zusatzgeräten und Spezialköpfen angeboten, auf die in dem zur Verfügung stehenden Raum nicht näher eingegangen werden kann. Es seien hier nur Signalgeräte (Monitoren) erwähnt, die beim Auftreten von Echos in bestimmten einstellbaren Bereichen ein optisches oder akustisches Signal auslösen, oder Wanddickenmeßgeräte, die unter Ausnutzung der Echofolgefrequenz eine Bestimmung von Wanddicken mit einer Meßunsicherheit von etwa $\pm 0,1$ mm gestatten. Das mag genügen, um zu zeigen, daß die Möglichkeiten, die das Impuls-Echo-Verfahren bietet, mit den angeführten Beispielen bei weitem nicht erschöpft sind. Auch ist die Entwicklung auf diesem Gebiet noch in vollem Gang, so daß damit gerechnet werden kann, daß diesem wertvollen Prüfverfahren noch eine ganze Reihe neuer Einsatzgebiete zugänglich gemacht wird.

4.4.11. Magnetostriktive Anregung von Ultraschallimpulsen

Eine außergewöhnliche Art der Anregung von Ultraschallimpulsen wird bei dem vom VEB Funkwerk Dresden gebauten Ultraschallgerät "MPG 1" angewendet. Dieses Gerät nutzt den bei ferromagnetischen Werkstoffen vorhandenen magnetostriktiven Effekt aus und ist in der Hauptsache für die Stangenprüfung einzusetzen.

Als Magnetostriktion bezeichnet man den von JOULE entdeckten Effekt, daß ein ferromagnetischer Körper in einem magnetischen Feld seine Abmessungen ändert. Die Veränderung besteht im wesentlichen in einer Verlängerung oder Verkürzung in der Magnetisierungsrichtung. Die erzielbaren Längenänderungen sind verhältnismäßig klein. Sie liegen bei Stäben in der Größenordnung von 10^{-6} .

Der vom Gerät erzeugte Hochfrequenzimpuls wird hier einer Prüfspule zugeführt, die über das Ende der zu prüfenden Stange geschoben wird. Unter dem Einfluß des in der Spule entstehenden hochfrequenten Felds werden in dem Stangenende periodische Zug-Druck-Spannungen ausgelöst, die sich in Form eines Ultraschallwellenzugs entlang der Stange fortsetzen und vom anderen Stangenende bzw. von vorhandenen Fehlern reflektiert werden. Die zurückkommenden Ultraschallimpulse erzeugen in der Prüfspule wiederum eine Spannung, die in der üblichen Zackschrift angezeigt wird. Da hier die Schallerzeugung im Werkstück selbst erfolgt, ist das Verfahren frei von störenden Ankopplungseffekten. Unter Verwendung dieses Geräts können automatisierte Stangenprüfanlagen gebaut werden, die eine hohe Prüfgeschwindigkeit zulassen. Eine solche Anlage ist längere Zeit mit gutem Erfolg in einem Ziehwerk der DDR erprobt worden. Es lassen sich mit dem "MPG 1" z.Z. ferromagnetische Stangen - nur solche weisen den magnetostriktiven Effekt auf - mit Durchmessern bis zu 30 mm prüfen. Der Prüfbereich soll jedoch noch nach oben hin erweitert werden. Auch ist nach den derzeitigen Informationen geplant, spezielle Prüfspulen zu entwickeln, die eine Blechprüfung ermöglichen sollen.

4.4.12. Schnittbildverfahren

Das Schnittbildverfahren stellt eine besondere Form des Impuls-Echo-Verfahrens dar und wurde in der nachstehend beschriebenen apparativen Ausführung vom VEB Carl Zeiss Jena entwickelt. Es beruht darauf, daß der Prüfkopf durch eine besondere mechanische Vorrichtung in eine schwingende oder rotierende Relativbewegung zu dem zu prüfenden Werkstück versetzt wird. Die Zeitlinie auf dem Bildschirm wird dabei synchron zu dieser Bewegung über die Bildfläche geführt, wobei sie normalerweise nicht sichtbar ist und nur dann, wenn am Prüfkopf ein Impuls auftritt, hellgesteuert wird. Auf diese Weise ist es möglich, eine bildmäßige Darstellung der Schnittfläche zu erzielen, die durch die Prüfkopfchse und das Werkstück gebildet wird. Der Bewegung des Prüfkopfs entsprechend sind zwei Arten dieses Verfahrens zu unterscheiden:

das Drehschnittbildverfahren und
das Schwingschnittbildverfahren.

Das **Drehschnittbildverfahren** ist für zylindrische Teile wie Rohre, Rundmaterial usw. gedacht. Sein Wirkungsprinzip geht aus Bild 4.33 hervor. Das Werkstück wird um seine Längsachse gedreht, während gleichzeitig der Prüfkopf langsam parallel zur Werkstückachse bewegt wird. Eine elektrische oder mechanische Kupplung sorgt dafür, daß die Zeitachse auf dem Bildschirm synchron mit dem Werkstück rotiert, so daß ein Polarkoordinatenbild entsteht, in dem der Umriß der Schnittfläche mit den in ihr vorhandenen Fehlern lagerichtig sichtbar ist.

Um das gesamte Schnittbild einheitlich darzustellen, wird sowohl hier als auch bei dem Schwingschnittbildverfahren eine Bildröhre mit nachleuchtendem Bildschirm verwendet. In Bild 4.34 (Seite 73) ist ein Drehschnittbild einer Leichtmetallrundstange von 160 mm Durchmesser abgebildet, die mit inneren Fehlern behaftet ist.

Das **Schwingschnittbildverfahren** wird vorzugsweise zur Prüfung von Werkstücken mit ebener Oberfläche eingesetzt. Seine Wirkungsweise geht aus Bild 4.35 hervor. Das Werkstück bleibt in Ruhe, während der Schallkopf über eine Strecke bis zu 200 mm, je nach Ausführung des Gebers, periodisch hin- und herbewegt wird. Synchron dazu wird die senkrechtstehende Zeitlinie auf dem Oszillographen-

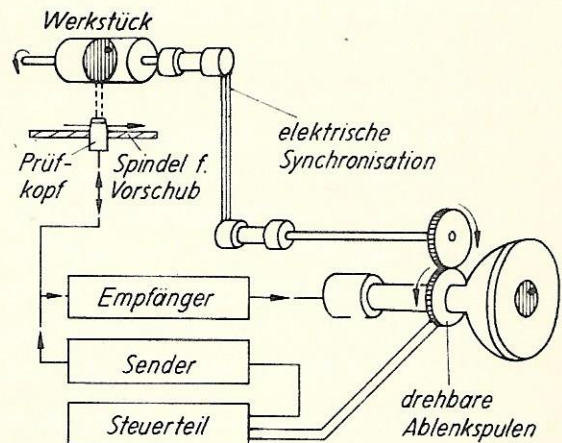


Bild 4.33 Drehschnittbildverfahren

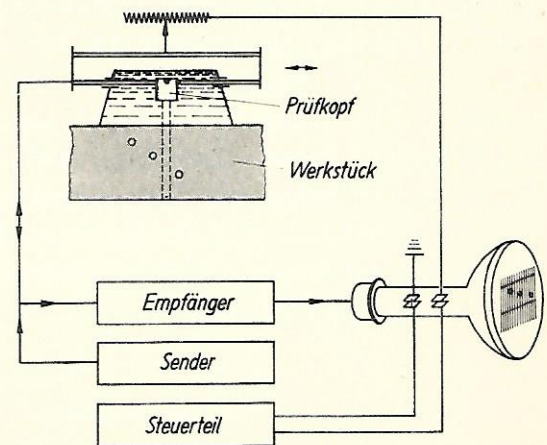


Bild 4.35 Schwingschnittbildverfahren

schirm in waagerechter Richtung verschoben, so daß der unter dem Prüfkopf liegende Querschnitt bildmäßig dargestellt wird. Bild 4.36 (Seite 73) zeigt ein nach dem Schwingschnittbildverfahren gewonnenes Schirmbild, das den Querschnitt einer planparallelen Platte zeigt, die mit einer Dopplung behaftet ist.

Im Unterschied zur Zackenschrift, die auch unter dem Namen A - B i l d bekannt ist, bezeichnet man die Schnittbildaufzeichnung als B - B i l d .

Die technische Ausführung des vom VEB Carl Zeiss Jena entwickelten Schnittbildgeräts Sonovisor I geht aus Bild 4.37 (Seite 73) hervor. Das Gerät ist für drei verschiedene Prüffrequenzen (2, 4 und 8 MHz) ausgelegt und gestattet wahlweise die Anwendung des Dreh- oder Schwingschnittbildverfahrens. Zur Dokumentation der Prüfergebnisse läßt sich mit Hilfe einer Zusatzvorrichtung eine Kleinbildkamera ansetzen, mit der die Schirmbilder fotografisch registriert werden können.

Einen Geber für das Schwingschnittbildverfahren, in dem der Prüfkopf einschließlich des Antriebs untergebracht ist, zeigt Bild 4.38 (Seite 73). Das Gehäuse des Gebers ist mit Öl gefüllt und nach unten hin durch eine dünne Kunststoffolie abgeschlossen, über die das zu prüfende Werkstück angekoppelt wird. Die Synchronisation der Prüfkopfbewegung mit der Ablenkung der Zeitlinie erfolgt auf elektrischem Weg.

Neben dem beschriebenen Gerät wurde vom gleichen Betrieb eine weitere Neukonstruktion unter dem Namen Sonovisor II entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein tragbares Gerät, das wahlweise als normales Impuls-Echo-Gerät mit Zackenschrift oder als Schwingschnittbildgerät eingesetzt werden kann. Es zeichnet sich neben der durch die Umschaltbarkeit auf A- und B-Bilddarstellung bedingte universelle Einsatzmöglichkeit besonders auch dadurch aus, daß der Stromversorgungsteil mit einigen Handgriffen ausgewechselt werden kann. Das Gerät läßt sich auf diese Weise sowohl netz- als auch batteriegespeist betreiben.

Die Schnittbildverfahren kommen durch ihre bildmäßige Darstellung des geprüften Querschnitts dem häufig geäußerten Wunsch nach einer leichteren Auswertbarkeit und einer anschaulicheren Darstellung des bei der Impuls-Echo-Methode gewonnenen Schirmbilds nach. Auch die oft gestellte Frage nach der Dokumentationsmöglichkeit bei der Ultraschallprüfung dürfte hier besser gelöst sein, als das bei der Zackenschrift der Fall ist. Zwar kann man auch dort das Schirmbild fotografieren, jedoch hat ein Zackendiagramm bei weitem nicht die Aussagekraft, die einem Schnittbild infolge seiner Anschaulichkeit eigen ist. All diese Gründe lassen erwarten, daß sich das Schnittbildverfahren einen festen Platz in der Reihe der Ultraschallprüfmethoden erobern wird, ohne daß die Impuls-Echo-Methode mit Zackenschriftanzeige an Bedeutung verliert. Beide Verfahren werden vielmehr gleichberechtigt nebeneinander bestehen und sich gegenseitig ergänzen können.

4.4.13. Qualifikation der Ultraschallprüfer

Der Erfolg der Ultraschallprüfung nach dem Impuls-Echo-Verfahren hängt, wie bereits mehrfach erwähnt wurde, in starkem Maß vom Können und von der Erfahrung des Prüfenden ab. Diese Prüfungen sollten daher nur von entsprechend

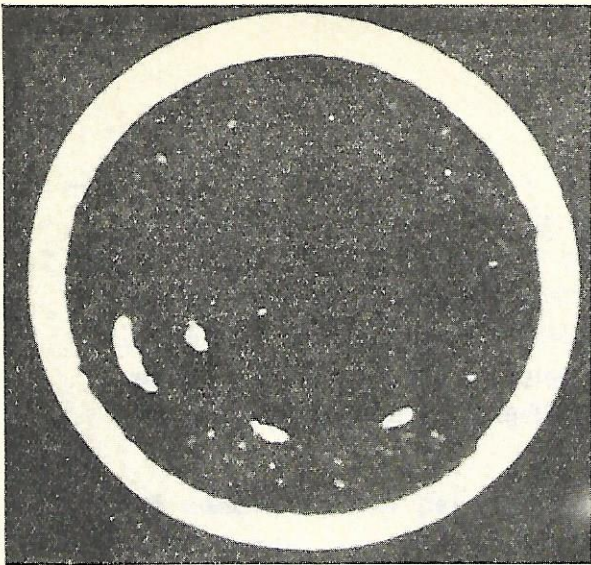


Bild 4.34 Drehschnittbild einer fehlerhaften Rundstange

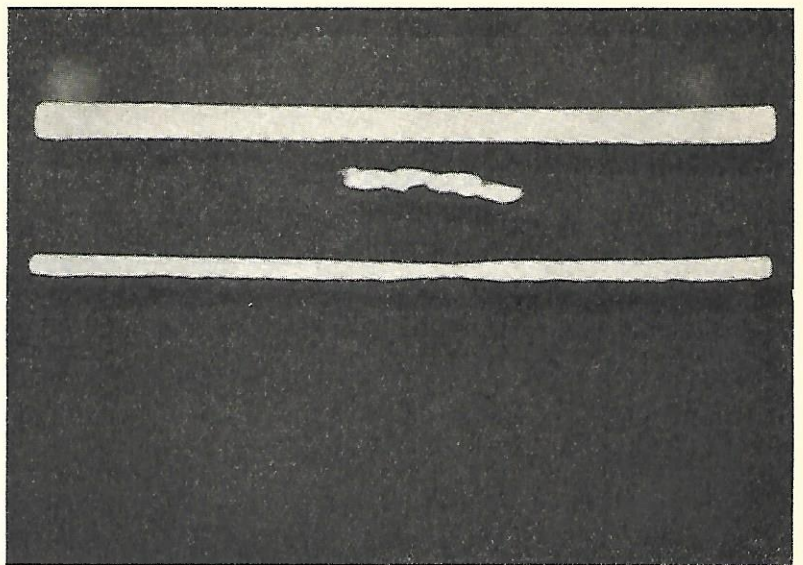


Bild 4.36 Schwingschnittbild einer planparallelen Platte

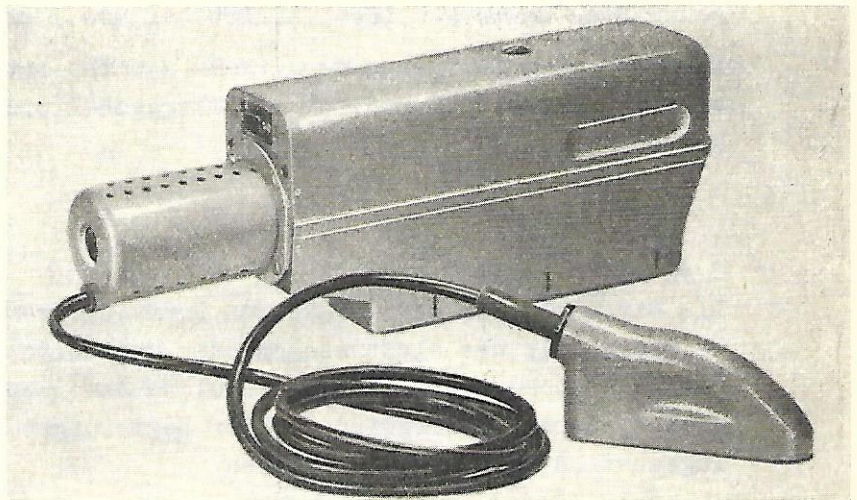
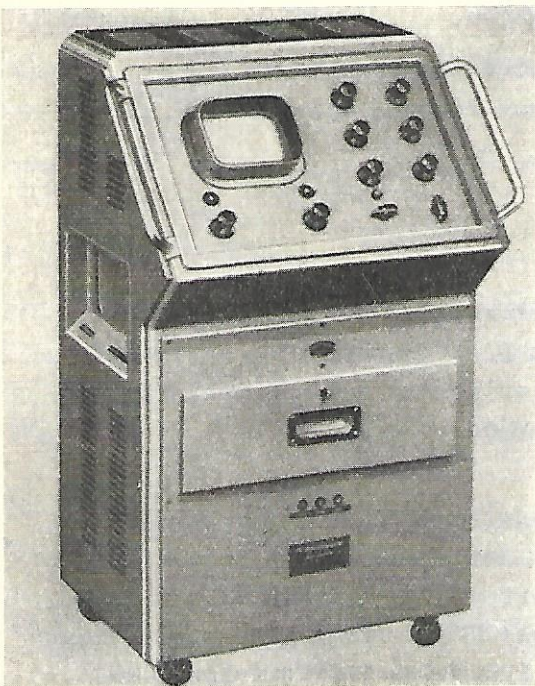


Bild 4.38 Schwingschnittgeber
VEB Carl Zeiss Jena

Bild 4.37 Schnittbildgerät Sonovisor I
VEB Carl Zeiss Jena

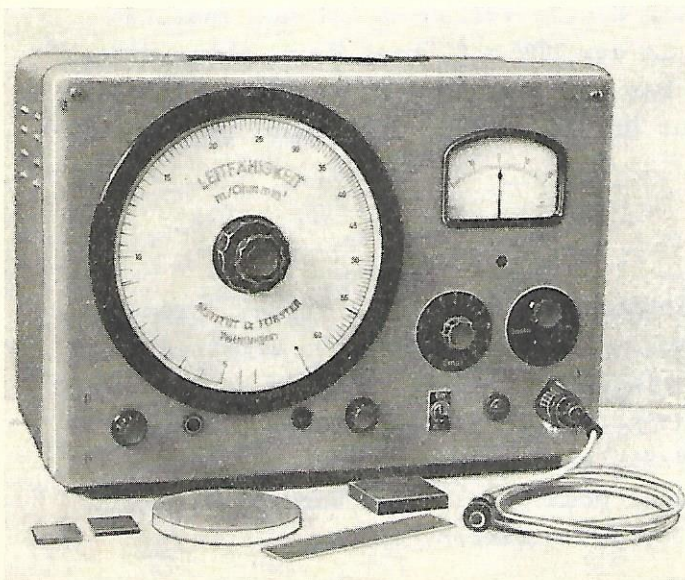


Bild 5.4 Leitfähigkeitsmeßgerät Sigmatest
Dr. Förster, Reutlingen

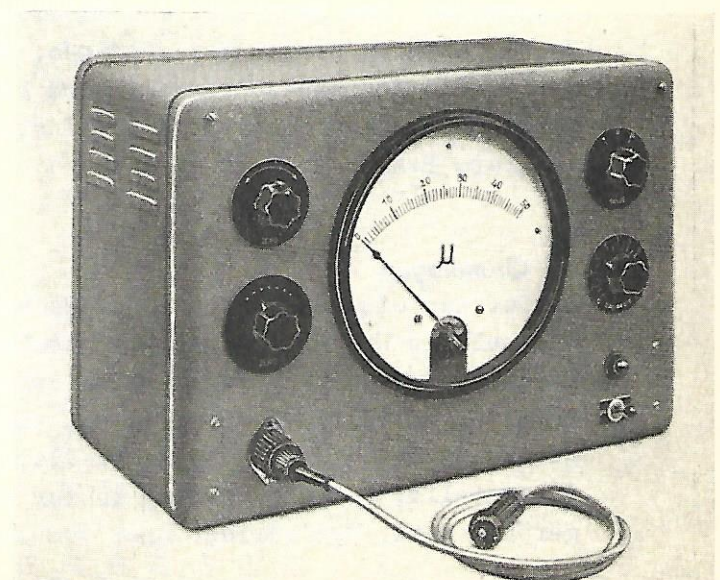


Bild 5.5 Schichtdickenmeßgerät Isometer
Dr. Förster, Reutlingen

ausgebildeten qualifizierten Fachkräften, in schwierigen Fällen von Ingenieuren, durchgeführt werden. Diese Forderung ist auch in Zusammenhang mit der Tatsache zu betrachten, daß man im allgemeinen kein Prüfdokument erhält, das nachträglich ausgewertet werden kann. Der Prüfende muß unmittelbar während des Prüfvorgangs das Urteil über das kontrollierte Werkstück fällen. Das ist ihm nur möglich, wenn er genügende Werkstoffkenntnisse und eine ausreichende Sicherheit bei der Anwendung der Ultraschallprüfung und der Auswertung der dabei erzielten Ergebnisse besitzt.

Geeignete Ausbildungskurse für Ultraschallprüfer werden von der Kammer der Technik in Verbindung mit dem Deutschen Amt für Material- und Warenprüfung, Magdeburg, durchgeführt. In Zusatzkursen, die vom Zentralinstitut für Schweißtechnik, Halle, veranstaltet werden, können die Teilnehmer durch Ablegen einer Abschlußprüfung die Berechtigung zur Durchführung von Abnahmeprüfungen an geschweißten Bauwerken (Kessel, Brücken usw.) erlangen.

Die genannten Lehrgänge vermitteln das theoretische und praktische Wissen, das ein Prüfer besitzen muß, um die Ultraschallprüfung richtig und sinnvoll einzusetzen.

5. Induktive Prüfverfahren

Die Wirkungsweise der induktiven Prüfverfahren beruht auf dem Nachweis von Abweichungen in der elektrischen oder magnetischen Leitfähigkeit der zu prüfenden Werkstücke oder Halbzeuge. Solche Abweichungen können z.B. durch Werkstofffehler, durch Unterschiede in der Legierungszusammensetzung oder durch den Gefügestand hervorgerufen werden.

Man bringt die zu prüfenden Werkstücke bei der Anwendung induktiver Verfahren in den Wirkungsbereich eines magnetischen Wechselfelds, das von einer Prüfspule erzeugt wird. Die dabei im Prüfkörper induzierten Wirbelströme wirken auf die elektrischen Daten der Prüfspule zurück. Diese Rückwirkung wird registriert und zur Beurteilung des Prüflings herangezogen. Induktive Prüfverfahren, auf Grund ihres Wirkungsprinzips auch oft als Wirbelstrom-Prüfverfahren bezeichnet, werden für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung erst seit etwa zehn Jahren angewendet. Den Hauptteil der Entwicklung dieser Verfahren hat das Institut Dr. Förster in Reutlingen getragen. Da in der DDR z.Z. noch keine entsprechenden Prüfgeräte gebaut werden, wird bei der Besprechung der einzelnen Wirbelstrom-Prüfverfahren auf die vom Institut Dr. Förster in den Handel gebrachten Apparate Bezug genommen.

5.1. Grundlagen

Speist man eine Spule mit einem Wechselstrom, so entsteht in ihr ein primäres Wechselfeld H_p . Bringt man ein metallisches Werkstück in seinen Wirkungsbereich, so werden in diesem Wirbelströme induziert, die ihrerseits ein sekundäres magnetisches Wechselfeld H_s aufbauen, das dem Spulenfeld H_p entgegengerichtet ist. In Bild 5.1 sind diese Verhältnisse schematisch für den Fall dargestellt, daß die Prüfung an der ebenen Oberfläche eines Werkstücks durchgeführt wird. Man spricht hier vom Tastspulenverfahren.

Sollen langgestreckte Werkstücke geprüft werden, so bedient man sich einer Durchlaufspule, durch deren Inneres das zu prüfende Teil hindurchgeführt wird (Bild 5.2).

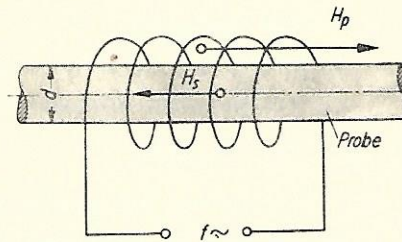
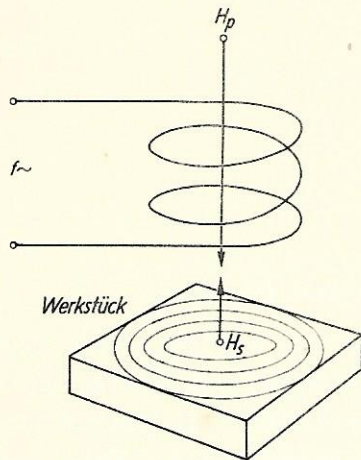


Bild 5.2 Durchlaufspule

◀ Bild 5.1 Tastspule

In beiden Fällen, bei der Tastspule und bei der Durchlaufspule, liegen je zwei magnetische Wechselfelder vor, das primäre Spulenfeld H_p und das sekundäre Feld H_s , das von den Wirbelströmen im Prüfling aufgebaut wird. Beide Felder überlagern sich, so daß die in der Spule herrschende Feldstärke beim Vorhandensein eines Prüfkörpers einen anderen Wert annimmt, als das ohne Prüfkörper der Fall ist.

Das elektrische Verhalten einer Spule wird im allgemeinen durch ihren Scheinwiderstand R_s charakterisiert. Er wird durch zwei elektrische Größen bestimmt:

1. den induktiven Widerstand ωL ($\omega = 2\pi f$, f = Frequenz des Wechselfelds, L = Selbstinduktion),
2. den Ohmschen Widerstand R .

Es gilt

$$R_s = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

Diese beiden Widerstandswerte können in einer Scheinwiderstandsebene grafisch dargestellt werden, indem man auf der Ordinate den induktiven Widerstand ωL und auf der Abszisse den Ohmschen Widerstand R aufträgt. Der Scheinwiderstand der Spule wird dann durch einen Punkt in dieser Scheinwiderstandsebene gekennzeichnet.

Eine Prüfspule möge ohne Prüfkörper den in Bild 5.3 durch den Punkt P_0 dargestellten Scheinwiderstand besitzen. Wird das zu prüfende Werkstück in das Spulenfeld gebracht, verändert sich dieses durch die Überlagerung mit dem Wirbelstromfeld. Die Veränderung des Spulenfelds ist gleichbedeutend mit einer Veränderung des Scheinwiderstands der Spule. In der Scheinwiderstandsebene verschiebt sich daher der Scheinwiderstand von P_0 auf P_1 . Größe und Richtung dieser Verschiebung sind von verschiedenen Faktoren abhängig, die durch die Eigenschaften des Prüflings und des Prüfgeräts

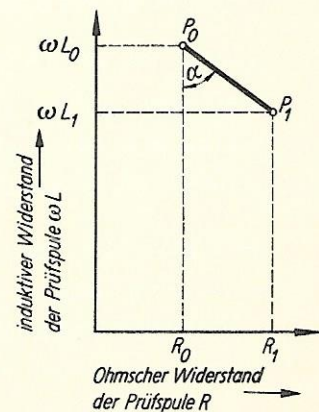


Bild 5.3 Scheinwiderstandsebene

selbst bedingt sind. Die Einflußfaktoren lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eigenschaften des Prüflings:

1. elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffs,
2. Abmessungen des Prüflings,
3. magnetische Permeabilität des Werkstoffs,
4. vorhandene Werkstofffehler.

Eigenschaften des Prüfgeräts:

1. Frequenz des Spulenfelds,
2. Größe und Form der Prüfspule,
3. Entfernung zwischen Prüfspule und Prüfling.

Durch systematische Erforschung der Abhängigkeit der verschiedenen Einflußfaktoren voneinander ist es gelungen, eine ganze Reihe von Prüfgeräten zu entwickeln, die es gestatten, ganz bestimmte Aussagen über die geprüften Werkstücke zu machen. Hierbei ist es möglich, durch entsprechende Wahl der Geräteeigenschaften, wie Meßfrequenz, Größe und Gestalt der Prüfspule, Art der Meßwertanzeige usw., das jeweilige Prüfverfahren so abzustimmen, daß nur die gewünschten speziellen Werkstoffeigenschaften angezeigt, unerwünschte Einflußfaktoren aber weitgehend unterdrückt werden. Die im folgenden beschriebenen Wirbelstrom-Prüfverfahren stellen nur eine Auswahl der wichtigsten und verbreitetsten Methoden dar. Die Möglichkeiten ihrer Anwendung sind derart vielfältig und teilweise sehr stark spezialisiert, daß es in dem verfügbaren Rahmen nicht möglich ist, sämtliche Anwendungsgebiete der induktiven Prüfverfahren zu behandeln.

5.2. Tastspulenverfahren

Das Tastspulen-Verfahren stellt das in der Industrie am häufigsten angewendete Wirbelstromverfahren dar, bei dem eine über ein Meßkabel mit dem eigentlichen Prüfgerät verbundene sehr kleine Tastspule auf die Werkstückoberfläche aufgesetzt wird. Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Messung:

1. kann man die unter dem Einfluß der elektrischen Leitfähigkeit des Prüflings auftretende Scheinwiderstandsänderung der Prüfspule,
2. die Einflüsse, die durch eine Abstandsänderung der Spule von der Werkstückoberfläche hervorgerufen werden,

für die Prüfung heranziehen.

Der erste Fall wird angewendet, wenn Aussagen über spezielle Werkstoffeigenschaften zu machen sind und der zweite zur Durchführung von Dickenmessungen organischer und anorganischer Korrosionsschutzüberzüge.

5.2.1. Messung der elektrischen Leitfähigkeit

Für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit nichtferromagnetischer Werkstoffe wird das Tastspulengerät *S i g m a t e s t* verwendet (Bild 5.4, Seite 73). Das Gerät besteht im wesentlichen aus einer Scheinwiderstands-Meßbrücke, die von einem stabilisierten Hochfrequenzsender gespeist wird. In dem einen Brückenweig liegt die Tastspule, während der zweite Brückenweig durch einen Vergleichskreis gebildet wird, dessen Scheinwiderstand auf den

des Spulenkreises abgestimmt werden kann. Das Abstimmorgan ist mit einer großen übersichtlichen Skale gekoppelt, auf der nach erfolgtem Brückenabgleich die Leitfähigkeit des Werkstoffs in Siemens-Einheiten ($\text{m}/\Omega \text{ mm}^2$) direkt abgelesen werden kann. Für die Durchführung der Messung ist eine ebene Aufsatzfläche von etwa 10 mm Durchmesser erforderlich. Von 1 mm Waddicke an ist das Meßergebnis unabhängig von der Werkstückdicke. Das Gerät ist so konstruiert, daß das Meßergebnis durch den Abstand der Spule vom Werkstück in bestimmten Grenzen nicht beeinflußt, also die Leitfähigkeitsanzeige durch Farb-, Oxyd- oder Schmutzschichten auf der Metalloberfläche nicht beeinträchtigt wird. Es kann im wesentlichen für folgende Zwecke eingesetzt werden:

Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit von Leiterwerkstoffen aus Cu, Al und deren Legierungen,

Bestimmung des Reinheitsgrads von Metallen,

indirekte Bestimmung der Härte (als Funktion der Leitfähigkeit) von Blechen, Profilen und Preßteilen aus kaltausgehärteten Leichtmetall-Legierungen (AlMgSi, AlCuMg, AlMgZn),

Sortierung verwechselter Legierungen,

Feststellung von Seigerungen und unterschiedlicher Porosität

sowie anderer Messungen, bei denen es darum geht, Werkstoffeigenschaften zu ermitteln, die auf das Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit zurückgeführt werden können.

5.2.2. Messung der Dicke von Korrosionsschutzschichten

Während das Leitfähigkeitsmeßgerät Sigmatest in seinem Verhalten so abgestimmt ist, daß geringe Abstandsänderungen von der Metalloberfläche das Meßergebnis möglichst wenig beeinflussen, ist bei dem Schichtdicken-Meßgerät I s o - m e t e r (Bild 5.5, Seite 73) gerade der Abstandseffekt besonders ausgeprägt. Es handelt sich um ein Tastspulengerät, das zur Dickenmessung isolierender Schichten auf nichtferromagnetischen metallischen Werkstoffen geeignet ist. Das Isometer hat sich besonders in der leichtmetallverarbeitenden Industrie zur Messung der Dicke von Eloxalschichten gut eingeführt. Es lassen sich jedoch auch sämtliche anderen nichtleitenden Schichten, wie Lack-, Farb-, Email- und keramische Schichten messen, soweit sie auf nichtmagnetisierbare metallische Werkstoffe aufgebracht sind.

Die Wirkungsweise des Geräts beruht darauf, daß das magnetische Feld der mit hochfrequentem Wechselstrom gespeisten Tastspule im Trägerwerkstoff Wirbelströme induziert, die eine Rückwirkung auf den Scheinwiderstand der Spule ausüben. Die Rückwirkung wird um so schwächer, je größer der Abstand Tastspule - Metalloberfläche, d.h., je größer die Dicke der nichtleitenden Schicht ist. Das Gerät besitzt ein großes übersichtliches Meßgerät, auf dem die Schichtdicke direkt in μm angezeigt wird. Zur Messung ist eine ebene Aufsatzfläche für die Tastspule erforderlich, die etwa die Abmessung 20 x 20 mm besitzen soll. Um Meßfehler durch die von Werkstoff zu Werkstoff unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit, von der die Ausbildung der Wirbelströme abhängig ist, zu vermeiden, muß das Gerät für jeden Werkstoff neu geeicht werden. Zur Eichung

wird eine Eichfolie bekannter Dicke zwischen Tastspule und unbeschichteter Werkstoffoberfläche angeordnet. Die drei im Handel befindlichen Gerätetypen unterscheiden sich durch ihren Meßbereich mit einem Endausschlag von 30, 50 oder 100 μm . Das Meßergebnis ist unabhängig von der chemischen oder physikalischen Beschaffenheit der zu messenden nichtleitenden Schicht.

Ein weiteres Schichtdicken-Meßgerät gestattet die Messung der Dicke nichtferromagnetischer metallischer und nichtmetallischer Schichten auf ferromagnetischer Unterlage, z.B. Chrom-, Zink-, Kupfer-, Lack- oder Emailsichten auf Stahl. Dieses Gerät ist unter der Bezeichnung **P r ä z i s i o n s - S c h i c h t m e s s e r** bekannt (Bild 5.6, Seite 83).

Seine Wirkungsweise beruht auf einer abstandsabhängigen Änderung des magnetischen Flusses in einem kleinen, nach unten hin offenen Magnetjoch. Das Magnetjoch ist in einen Handtaster eingebaut und trägt eine Primär- und eine Sekundärwicklung. Die Primärwicklung wird mit Wechselstrom (Netzfrequenz) gespeist. Dabei entsteht im Magnetjoch ein magnetischer Wechselfluß, der in der Sekundärwicklung eine Spannung induziert, die verstärkt und gemessen wird. Der Magnetfluß und damit die induzierte Sekundärspannung sind am größten, wenn das Joch durch Aufsetzen auf die Oberfläche eines ferromagnetischen Werkstoffs geschlossen wird, sie nehmen mit dem durch nichtferromagnetische Schichten bedingten Abstand von der Oberfläche des Grundwerkstoffs ab. Auf diese Weise kann die in der Sekundärwicklung des Meßtasters induzierte Spannung auf die Schichtdicke zurückgeführt werden. Auch bei diesem Schichtdicken-Meßgerät erfolgt die Meßwertanzeige auf einem direkt im μm geeichten übersichtlichen Meßinstrument. Es werden vier Geräte-Varianten angeboten, die einen Meßbereich von 100, 150, 800 μm oder 2 mm besitzen. Da der Meßwert von der magnetischen Permeabilität des Trägerwerkstoffs abhängig ist, muß auch der Präzisions-Schichtmesser für jeden Werkstoff mit Hilfe einer Eichfolie bekannter Dicke neu geeicht werden. Die Meßwertanzeige ist unabhängig von der chemischen oder physikalischen Beschaffenheit der nichtferromagnetischen Deckschicht.

Neben den beschriebenen Schichtdicken-Meßgeräten sind noch weitere ähnliche Geräte entwickelt worden. Sie gestatten die Messung nichtferromagnetischer metallischer Schichten auf nichtferromagnetischen metallischen Trägerwerkstoffen, soweit sich die elektrischen Leitfähigkeiten der Schicht- und Trägerwerkstoffe genügend stark voneinander unterscheiden, z.B. Silber oder Gold auf Neusilber oder Messing, Rein-Aluminium auf AlCuMg. Außerdem ist es möglich, die Dicke ferromagnetischer Schichten auf nichtferromagnetischen Unterlagen metallischer und nichtmetallischer Natur, wie z.B. Nickelschichten auf NE-Metallen, Kunststoffen oder Keramiken, zu messen.

5.3. Durchlaufspulenverfahren

Während die Tastspulenverfahren in der Hauptsache für Werkstücke mit ebenen Flächen eingesetzt werden, eignen sich die Durchlaufspulenverfahren zur Prüfung langgestreckter Teile, wie Wellen, Rohre, Bolzen, Stangen usw. Wegen der starken Unterschiedlichkeit der magnetischen Permeabilität unterscheidet man Meßgeräte zur Prüfung ferromagnetischer und nichtferromagnetischer Werkstoffe. Die im Handel befindlichen Durchlaufspulen-Geräte dienen entweder der Quali-

tätskontrolle oder dem Nachweis mechanischer Werkstofffehler. Die erstgenannte Kategorie ist so ausgelegt, daß besonders die Beeinflussung der Wirbelstromausbildung durch Gefügeunterschiedlichkeiten angezeigt wird, während die zweite Gruppe auf Risse, Fremdeinschlüsse und andere Werkstofftrennungen anspricht.

5.3.1. Prüfung ferromagnetischer Werkstoffe

Für die Prüfung ferromagnetischer Werkstoffe nach dem Durchlaufspulenverfahren sind vornehmlich zwei Geräte bekanntgeworden. Es handelt sich um das Magnetest Q zur Prüfung der Werkstoffqualität (Legierungszusammensetzung, Gefügestand, Härte usw.) und das Magnetest D zur Prüfung von Stangen und Rohren auf Risse.

Das Magnetest Q - Gerät (Bild 5.7, Seite 83) besitzt zwei Spulen, von denen die eine als Prüfspule und die andere als Vergleichsspule dient. Beide Spulen bestehen aus je einer Primär- und einer Sekundärwicklung, die gemäß Bild 5.8 geschaltet sind. Bei der Prüfung wird in die eine der beiden Spulen ein Exemplar der zu prüfenden gleichartigen Werkstücke eingeführt, das dem Sollzustand entspricht. Dieses als Vergleichsprobe dienende Teil verbleibt während der Prüfung aller anderen zu kontrollierenden Teile an seinem Ort. Entsprechen die geprüften Werkstücke, die nacheinander einzeln in die zweite Spule eingebracht werden, dem Zustand des Vergleichsstücks, so befindet sich die Anordnung im Gleichgewicht. Die nach dem Transformatorprinzip in den Sekundärwicklungen des Spulenpaares induzierten Spannungen sind gleich und heben sich, da die Sekundärspulen gegeneinandergeschaltet sind, auf. Weichen jedoch die durch die Werkstoffqualität bedingten magnetischen Eigenschaften zwischen Prüfling und Vergleichsprobe voneinander ab, so entsteht an den Enden der Sekundärwicklungen eine Differenzspannung, die verstärkt und gemessen werden kann.

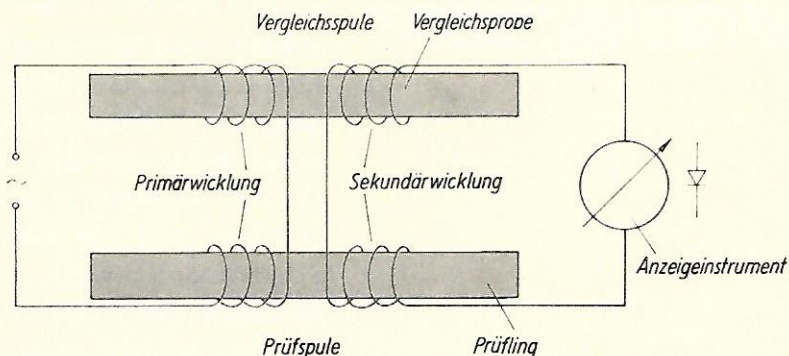


Bild 5.8 Schaltung des Magnetest Q

Die Primärwicklungen des Prüfspulenpaares werden mit einem Wechselstrom von 50 Hz gespeist, dessen Höhe sich je nach den Erfordernissen regeln läßt. Der Meßwert wird auf dem Bildschirm eines Oszillographen angezeigt. Das Gerät wird vor Beginn der Prüfung so eingeregelt, daß auf dem Bildschirm eine waagerechte gerade Linie geschrieben wird, wenn die in den Spulen befindlichen Werkstücke einander entsprechen.

Eine Abweichung der magnetischen Eigenschaften der beiden Teile voneinander wird durch eine nach Größe und Phasenlage der an den Sekundärspulen entstehenden Differenzspannung mehr oder weniger starke Verformung der auf dem Bildschirm sichtbaren Linie angezeigt. Die lichten Durchmesser der verschiedenen Prüfspulenpaare des Magnatest Q sind in 10 Stufen zwischen 2 und 300 mm abgestuft. Für die Prüfung von Flachmaterial und ähnlich geformten Teilen können Spulen mit rechteckigem Querschnitt (3 Größen) eingesetzt werden. Da bei Ferromagnetika eine Änderung des Werkstoffzustands in der Regel auch mit einer Änderung des magnetischen Verhaltens verbunden ist, läßt sich das Magnatest Q sehr vielseitig einsetzen. Es kann, um nur die wichtigsten Beispiele zu nennen, zur indirekten Messung des Gefügestands, der Festigkeit, der Härte, der Einsatttiefe, der Legierungszusammensetzung (Verwechslungsprüfung), der Randentkohlung und vieler anderer Werkstoffeigenschaften herangezogen werden. Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz dieses Geräts ist jedoch das Vorhandensein größerer Serien gleichartiger zu prüfender Teile, eine vor jeder Prüfung durchzuführende Ermittlung der günstigsten Geräteeinstellung und eine einwandfreie Eichung des Geräts. Hin- und wieder können auch Fälle auftreten, bei denen sich Einflüsse verschiedener Faktoren überlagern und dadurch eine Prüfung sehr erschwert wird.

Das beim Prüfgerät **M a g n a t e s t D** angewandte Meßprinzip ist dem des Magnatest Q sehr ähnlich. Auch hier besteht die Meßanordnung aus zwei Spulenkombinationen, die sich aus je einer Primär- und einer Sekundärwicklung aufbauen. Beide Prüfspulen sind hintereinander in einem gemeinsamen Spulengehäuse untergebracht. Das zu prüfende Werkstück durchläuft die bei-

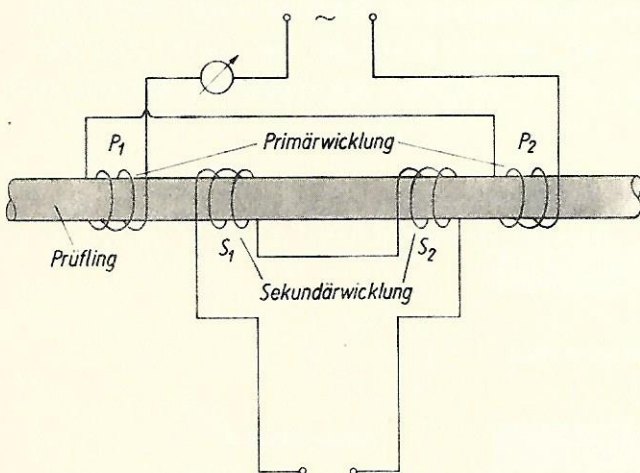


Bild 5.9 Schaltung des Magnatest D

den Spulen also nacheinander (Bild 5.9). Die Primärspulen werden mit einem Wechselstrom von 50 Hz gespeist. Die Sekundärspulen sind gegeneinandergeschaltet, so daß die Differenz der in ihnen induzierten Spannungen gemessen wird. Durch die besondere Anordnung der Prüfspulen werden hier nicht zwei verschiedene Werkstücke, sondern zwei benachbarte Zonen ein und desselben Teils miteinander verglichen. Die Möglichkeit des Rißnachweises beruht darauf, daß die Ausbildung der im Werkstück induzierten Wirbelströme

durch vorhandene Werkstofftrennungen gestört wird. Befindet sich z.B. in dem unter der Spule P_1-S_1 befindlichen Abschnitt des Prüflings ein Riß und ist im Bereich der Spule P_2-S_2 kein Fehler vorhanden, so weichen die in den beiden Sekundärwicklungen S_1 und S_2 induzierten Spannungen voneinander ab. Die Differenzspannung wird gemessen und zum Fehlernachweis herangezogen. Den Meßwert stellt man wie beim Magnatest Q auf einem Bildschirm dar, und zwar so, daß sich die vom Kathodenstrahl geschriebene Linie beim Auftreten von Werkstofffehlern verformt.

Die beschriebene Spulenanordnung hat sich bei der Prüfung stangenförmiger Teile gut bewährt. Sie hat jedoch den Nachteil, daß an den Sekundärspulen keine Differenzspannung auftritt, wenn die in den beiden Spulenkombinationen befindlichen Prüflingsabschnitte einander entsprechen. Dabei ist es gleichgültig, ob die miteinander verglichenen Abschnitte fehlerfrei sind oder einen gleichartigen Fehler - etwa einen sich über eine größere Länge erstreckenden Riß gleicher Tiefe - aufweisen. Einen solchen Fall zeigt Bild 5.10. S_1 und S_2 stellen die beiden Sekundärspulen dar, die von links nach rechts über das Werkstück geschoben werden. Der durch die schraffierte Fläche angedeutete Riß beginnt bei A und erreicht auf der Strecke A-D eine Tiefe von 30 Prozent des Stangendurchmessers. Er läuft rechts von D mit konstanter Tiefe weiter. Aus dem Bild ist ersichtlich, daß nur im Bereich des Rißbeginns eine Differenzspannung an den beiden Spulen auftritt, während im fehlerfreien Bereich und im Bereich gleicher Rißtiefe keine Fehleranzeige zu erwarten ist. Da die Rißtiefe jedoch in der Praxis kaum so gleichmäßig ist, wie in dem Beispiel angenommen wurde, sind auch Risse, die sich über längere Strecken hinziehen, nachzuweisen.

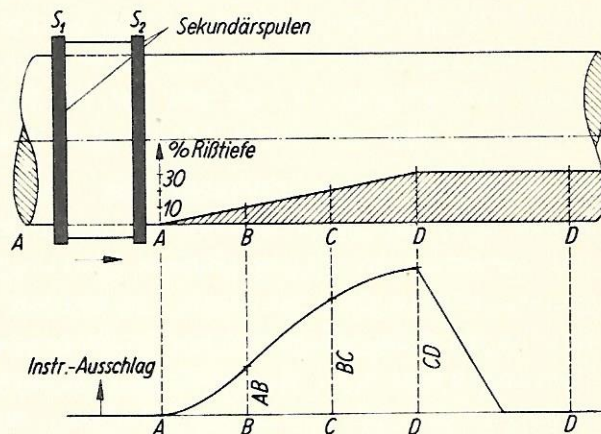


Bild 5.10 Differenzspannung bei Rissen gleicher Tiefe

Das Gerät kann mit Prüfspulen in den Durchmesserbereichen von 20 bis 100 mm verwendet werden. Voraussetzung für den Einsatz ist eine Rollbahn, mit deren Hilfe die Prüflinge durch die Prüfspule geführt werden können. Die optimale Prüfgeschwindigkeit liegt bei etwa 2 m/s. Eine Sonderausführung für die Prüfung von Drähten arbeitet mit einer Meßfrequenz von 400 Hz. Neben Rissen lassen sich auch Überwalzungen und Fremdeinschlüsse nachweisen. Der Einsatz eines solchen Prüfgeräts ist nur dann wirtschaftlich, wenn größere Posten (mehrere Tonnen) gleichartigen Materials hintereinander zu prüfen sind, da hierbei die einmal gewählte Geräteeinstellung beibehalten werden kann. Nach Angaben des Herstellers lassen sich Längsrisse mit einer Tiefe von 1 bis 3 Prozent des Prüflingsdurchmessers noch einwandfrei erfassen.

5.3.2 Prüfung nichtferromagnetischer Werkstoffe

Zur Prüfung nichtferromagnetischer Werkstoffe werden in der Hauptsache zwei Geräte verwendet: das Draht-Rißprüfgerät und das Stangen-Rißprüfgerät.

Das **D r a h t** - Rißprüfgerät (Bild 5.11, Seite 83) eignet sich zur Prüfung nichtferromagnetischer Drähte (Al-Legierungen, Kupfer, Bronze, Wolfram, Molybdän usw.) auf Risse, Einschlüsse und andere Werkstofffehler. Der erfaßbare Prüfdurchmesser liegt zwischen 0,3 und 12 mm. Die Prüfspule kann nicht ausgewechselt werden. Es gibt drei verschiedene Gerätetypen, die die Durchmesserbereiche 0,3 bis 0,8, 0,6 bis 3,0 und 3,0 bis 12,0 mm überstreichen.

Wie aus Bild 5.11 hervorgeht, ist die Prüfspule fest mit dem Gerätegehäuse verbunden. Der Spulenkasten enthält zwei Spulen in Differenzschaltung, eine Prüfspule und eine Vergleichsspule. In die Vergleichsspule wird bei der Eichung des Geräts ein Drahtstück eingeführt, das sowohl in seinem Durchmesser als auch in seiner Werkstoffeigenschaft dem Sollzustand entspricht. Durch die Prüfspule wird der zu prüfende Draht hindurchgeführt. Bei Fehlern im Prüfling ändert sich die Wirbelstromausbildung und damit der Scheinwiderstand der Prüfspule. An den beiden Spulen tritt dabei eine Spannungsdifferenz auf, die auf einem Bildschirm sichtbar gemacht wird.

In ähnlicher Weise arbeitet das *S t a n g e n* - Rißprüfgerät (Bild 5.12, Seite 83). Es besitzt zwei in einem durch Kabel mit dem eigentlichen Prüfgerät verbundenen Spulengehäuse hintereinander angeordnete Prüfspulen, die gegeneinandergeschaltet sind. Es werden also, wie beim Magnatest D, zwei benachbarte Stangenabschnitte miteinander verglichen. Durch Auswechseln der Spulengehäuse bzw. der Prüfspuleneinsätze lassen sich Stangen im Durchmesserbereich von 5,5 bis 80 mm erfassen. Für die Prüfung von Rohren stehen außerdem Rohrrinnenspulen in fünf Abstufungen zwischen 9 und 24 mm Durchmesser zur Verfügung. Auch hier werden die durch Fehler hervorgerufenen Störungen der Wirbelstromausbildung und die damit verbundenen Scheinwiderstandsänderungen der Prüfspulen zum Fehlernachweis herangezogen. Für den Nachweis von Rissen, die sich über größere Längen erstrecken, gelten etwa die gleichen Verhältnisse wie beim Magnatest D. Der Meßwert wird auf dem Schirm einer Braunschen Röhre angezeigt.

Ein drittes Gerät für die Prüfung nichtferromagnetischen Stangenmaterials ist unter dem Namen *S i g m a f l u x* bekannt. Es dient, wie das bereits beschriebene Sigmatest, zur Prüfung der Werkstoffqualität, soweit sie auf die elektrische Leitfähigkeit zurückgeführt werden kann. Der prinzipielle Unterschied der beiden Geräte besteht darin, daß das Sigmatest mit Hilfe einer Tastspule arbeitet, während das Sigmaflux mit einer Durchlaufspule ausgerüstet ist. Die Anwendungsmöglichkeiten sind im Prinzip die gleichen. Das Sigmaflux-Gerät arbeitet mit einer Absolutspule, deren Scheinwiderstandsänderung zur Meßwertbildung herangezogen wird. Es gestattet die Prüfung stangenförmiger Werkstoffe im Durchmesserbereich von 3 bis 80 mm. Der Meßwert wird auf dem Bildschirm eines Oszillographen angezeigt.

Bei allen drei beschriebenen Durchlaufspulen-Geräten für NE-Metalle wird zur Speisung der Prüfspulen hochfrequenter Wechselstrom verwendet. Die Meßwertanzeige erfolgt bei diesen Geräten nach der Ellipsen-Methode.

Diese Meßanordnung ist dadurch charakterisiert, daß Durchmesserschwankungen des Prüflings von Fehleranzeigen getrennt werden können. Dazu wird das Gerät bei der Eichung so eingestellt, daß bei Fehlerfreiheit und Solldurchmesser eine waagerechte gerade Linie auf dem Bildschirm sichtbar wird. Bei Durchmesserschwankungen neigt sich diese Linie, während beim Auftreten von Fehlern bzw. beim Abweichen der elektrischen Leitfähigkeit vom Sollwert (beim Sigmaflux-Gerät) eine Aufspaltung der Linie in eine Ellipse erfolgt. Bei den Rißprüfgeräten können außerdem aus der Form der Ellipse noch gewisse Rückschlüsse auf die Fehlerlage gezogen werden. Eine schematische Darstellung der

Bild 5.6 Präzisions-Schichtmesser
Dr. Förster, Reutlingen

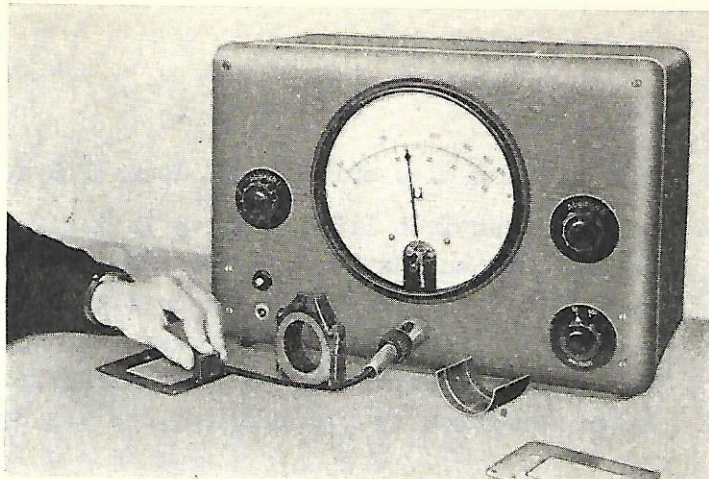


Bild 5.7 Durchlaufspulen-Meßgerät
Magnatest Q
Dr. Förster, Reutlingen

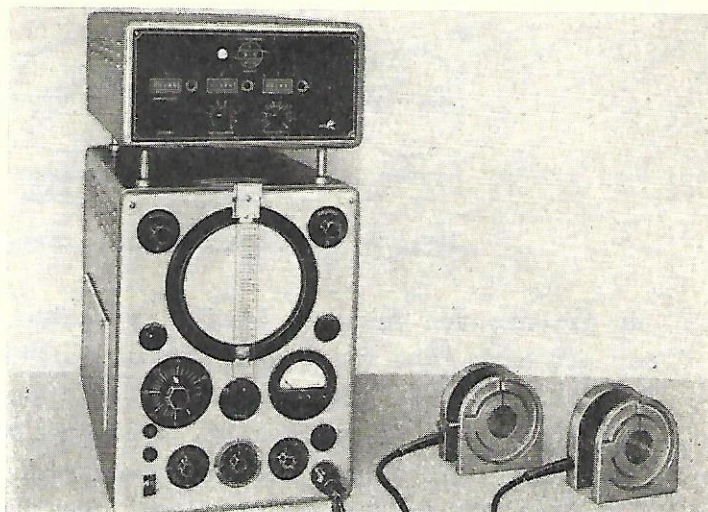


Bild 5.11 Draht-Rißprüfgerät für NE-Metalle
Dr. Förster, Reutlingen

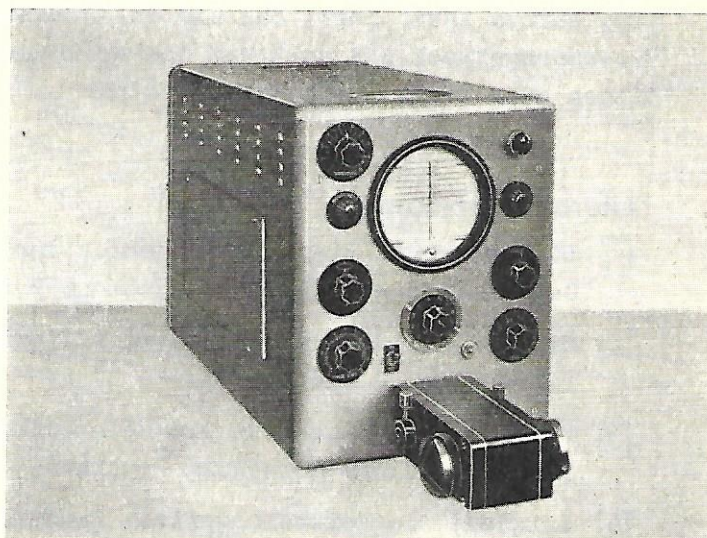
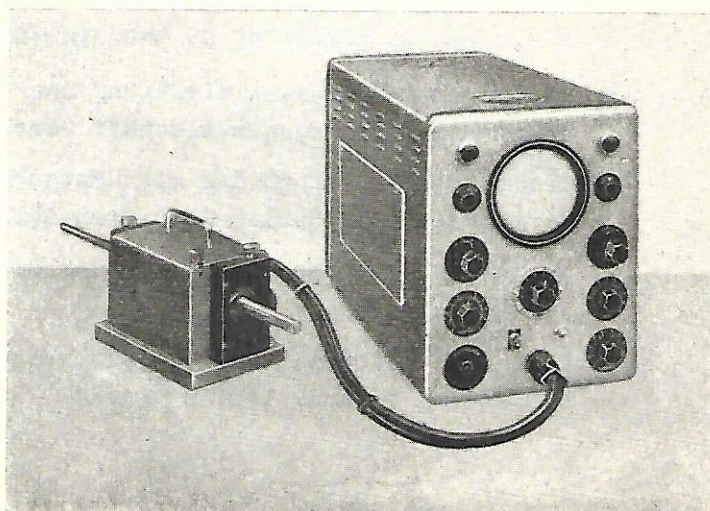


Bild 5.12 Stangen-Rißprüfgerät für NE-Metalle
Dr. Förster, Reutlingen



Schirmbildanzeige bei verschiedenen Prüfzuständen zeigt Bild 5.13.

Zu den induktiven Prüfverfahren in ihrer Gesamtheit ist abschließend noch einmal zu betonen, daß es sich hier ausschließlich um Verfahren handelt, bei denen elektrische oder magnetische Eigenschaften des Prüflings auf seinen Werkstoffzustand zurückgeführt werden. Wenn auch eingangs erwähnt wurde, daß durch entsprechende Wahl der Geräteeigenschaften die Möglichkeit besteht, die jeweiligen Verfahren so abzustimmen, daß das Schwergewicht der Meßwertanzeige auf

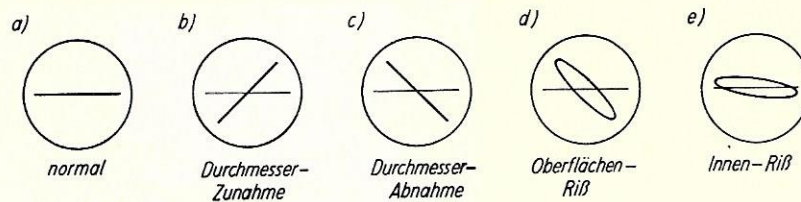


Bild 5.13 Schirmbilder verschiedener Prüfzustände

den gewünschten Faktoren liegt, so lassen sich doch Einflüsse nicht erwünschter Art kaum ganz vermeiden. Daraus folgt, daß man die induktiven Prüfverfahren nie kritiklos anwenden sollte. Ihr Einsatz ist in der Regel nur dann zu empfehlen, wenn es darum geht, Messungen an größeren Serien gleichartiger Werkstücke oder Werkstoffe durchzuführen. Für Einzelprüfungen sind induktive Prüfgeräte im allgemeinen nicht geeignet. Das ist eine Überlegung, die auch daraus resultiert, daß die entsprechenden Prüfgeräte sowohl auf ihren Verwendungszweck als auch auf die erfaßbaren Werkstoffe und Werkstückdimensionen sehr stark spezialisiert sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Lindemann und Pfender: Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Georg Siemens Verlagsbuchhandlung Berlin 1948
- [2] Siebel, E.: Handbuch der Werkstoffprüfung, 1. Band, Prüf- und Meßeinrichtungen, 2. Aufl.
- [3] Vaupel: Bild-Atlas für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung. Verlag Bild und Forschung Berlin 1954
- [4] Zbinden: Die zerstörungsfreie Prüfung von Aluminiumteilen durch fluoreszierende Penetrierverfahren. Aluminium 32 (1956) 9, S. 566 bis 569
- [5] Müller, E.A.W.: Materialprüfung nach dem Magnetpulver-Verfahren. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. Leipzig 1951
- [6] Glocker: Materialprüfung mit Röntgenstrahlen, 3. Aufl., Springer-Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg 1949
- [7] Malzew, M.W.: Röntgenographie der Metalle. VEB Verlag Technik Berlin 1955
- [8] Hart und Karstens: Radioaktive Isotope in der Dickenmessung. VEB Verlag Technik Berlin 1958

- [9] Rumjanzew, S.W., Grigorowitsch J.A.: Prüfung metallischer Werkstoffe mit Gammastrahlen. VEB Verlag Technik Berlin 1957
- [10] Schiebold und Becker: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit Hilfe radioaktiver Isotope. Die Technik 13 (1958) 5, S. 337 bis 343
- [11] Bergmann, L.: Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik, 6. Aufl., S. Hirzel Verlag Stuttgart 1954
- [12] Matauschek, J.: Einführung in die Ultraschalltechnik. VEB Verlag Technik Berlin 1957
- [13] Förster: Die zerstörungsfreie Prüfung von metallischen Werkstoffen mit elektromagnetischen Induktionsverfahren. Metall 11 (1957) 10, S. 837 bis 846

Bildnachweis

2.7, 2.8, 2.10, 2.11	Elektro-Barth, Dresden-Hellerau (Werkfotos)
5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.9, 5.11, 5.12	Institut Dr. Förster, Reutlingen (Werkfotos)
4.31, 4.32	VEB Funkwerk Erfurt (Werkfotos)
4.13, 4.14	Dr. Lehfeldt u. Co, Heppenheim (Werkfotos)
3.15	Richard Seifert u. Co. Hamburg
3.18, 3.21, 3.24, 3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31	VEB Transformatoren- und Röntgenwerk Dresden (Werkfotos)
4.15, 4.19, 4.20, 4.21, 4.37, 4.38	VEB Carl Zeiss, Jena (Werkfotos)
4.1, 4.17	Bergmann, L.: Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik, 6. Aufl., S. Hirzel Verlag Stuttgart 1954
3.2, 3.4	Malzew, M.W.: Röntgenographie der Metalle. VEB Verlag Technik Berlin 1955
4.6, 4.7, 4.13, 4.14	Matauschek, J.: Einführung in die Ultraschall- technik. VEB Verlag Technik Berlin 1957
2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.9	Müller, E.A.W.: Materialprüfung nach dem Magnet- pulver-Verfahren. Akademische Verlagsgesellschaft Geest u. Portig K.-G. Leipzig 1951
3.1, 3.5, 3.8, 3.9, 3.11, 3.12, 3.16, 3.17, 3.19, 4.3, 4.5, 4.16, 4.23, 5.1, 5.2, 5.3, 5.8, 5.13	Siebel, E.: Handbuch der Werkstoffprüfung, 1. Band, Prüf- und Meßeinrichtungen, 2. Aufl. Springer-Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg 1958
1.3, 1.4	Zbinden: Die zerstörungsfreie Prüfung von Alu- miniumteilen durch fluoreszierende Penetrier- verfahren. Aluminium <u>32</u> (1956) 9, S. 566 bis 569

Sachwörterverzeichnis

- A-Bild** 72
Absorptionskoeffizient 19
Ampèrewindungszahl 7,15
Anodenformen 29f.
Anzeigeempfindlichkeit 13
Atomgewicht 34
- B-Bild** 72
Belichtung 22
Belichtungs-größe 24
-diagramm
BiegeWellen 48
Bildwandler 55ff.
Bleifolien 23
Brechungsgesetz 65
Bremspektrum 18,37
Brennfleck 24
- Compton-Effekt 20
- Dehnungswellen 48
Draht-erkennbarkeit 26,28
-stege 26,28
Drehschnittbild-
verfahren 71ff.
Durchlässigkeit,
magnetische 5
Durchlässigkeits-
koeffizient 45
Durchlaufspule 75ff.
- Echoskop 68
Einpolanlage 28
Eintankanlage 31
- Fehler-echo 60ff.
-erkennbarkeit 47
Feinfokusröhre 27f.
Feinstrukturuntersuchung 16
Feldstärke, magnetische 5
Fließwasserankopplung 50
Flitterzelle 56
Fokus-Film-Abstand 24,40
- Gegenmagnetisierung 14
Glättungszusatz 28
Grenzwellenlänge 18
Grobstruktur-prüfung 16,20
-Röntgenröhre 30
- Halbwellenschaltung 17,31
Halbwertszeit 36
Härte, magnetische 13
Hilfsdurchflutung 8
Hilfsleiter 8
Hohlodenröhre 29
Immersionstechnik 50
Induktion, magnetische 5
Isometer 77
Isotope 34
Jochmagnetisierung 6,10
Kernbindungskraft 34
Kalkmilchprobe 2
Kontaktankopplung 50
Kontrast 24
Korpuskularstrahlung 35
Längsrisse 8,10
Linienpektrum 37
Longitudinalwellen 47
Magnatest 79ff.
Magnetostriktion 70
Magnetpulver 11
Massenzahl 34
Neutron 34
Ordnungszahl 34
Panorama-Aufnahme 30,39
Permeabilität 5
Piezoelektrischer Effekt 48
Plattenwellen 52
Präzisions-Schichtmesser 78
Proton 34
Prüf-rot 3
-dokument 13
Prüfung, trockene 15
Querrisse 6,10
Rayleighwellen 48
Reflexionskoeffizient 45
Reliefbildverfahren 57
Restmagnetismus 13
Rißprüfgerät 81ff.
Röntgen-Bildverstärker 27
-fotografie 21
-strahlung 18
Rückwandecho 60ff.
Rundstrahler 30
Salzfolien 23
Schallbrechung 64ff.
Schallfeld 49
-reflexion 64ff.
-wellenwiderstand 45,48
Schwächungskoeffizient
18ff.
Schwärzung 21
Schweißnahtprüfung 65
Schwingschnittbild 71ff.
Selbstdurchflutung 8,10
Sigmaflux 82
Sigmatest 76
Sonometer 54
Sonovisor 72
Sprung-abstand 66
-faktor 66
Spulenmagnetisierung 7
Stoßmagnetisierung 15
Strahlen-dosis
-schutz 32,43
Strahlungsintensität 18
Streu-feld 7,12,13
-koeffizient 19ff.
-strahlenfilter 20f.
-strahlung 19ff.
Streuung, klassische 20
Compton- 20
Tastspule 74ff.
Tauchverfahren 15
Testkörper 12
Trägeröl 11
Transversalwellen 47
Ultraschallbildwandler 51
Unschärfe, 24ff.
geometrische
innere
Rand-
Usomat 55
Verstärkerfolien 23
Villard-Schaltung 28ff.
Wellenstrahlung 35
Wirbelstromprüfung 74ff.
X-Strahlung 16
Zackenschrift 60
Zeichenschärfe 24
Zeilenbildwandler,
elektronischer 58
Zweipolanlage 30

Veröffentlichungen

Die Abteilung LIEFER- und BESTELLWESEN der HA Literatur im Zentralinstitut für Automatisierung bietet noch folgende Schriften an:

1. Allgemeine Schriften

Dipl.-Ing. Sternkopf:	Aluminium-Sinterwerkstoffe 1961: Bestell-Nr. 7050	ca. DM 1,50
Dipl.-Ing. Weller:	Aluminium und seine Legierungen 1961: Bestell-Nr. 7206	ca. DM 2,20
Ing. Zittlau, J. Lehmann:	Biegen/Abkanten 1961: Bestell-Nr. 7305	DM 1,00
J. Lehmann:	Nieten im Leichtbau 1961: Bestell-Nr. 7304a	DM 1,00

2. Schriften aus dem Flugzeugbau

B e r u f s a u s b i l d u n g u n d Q u a l i f i z i e r u n g

Dipl.-Ing. oec. Hehl, Dipl.-Ing. oec. Wintruff:	Bedeutung des Flugzeugs und Flugzeugbaus in unserer Zeit 1958: Bestell-Nr. 7201	DM 1,50
Dipl.-Ing. Berthold, Dipl.-Gwl. Günther:	Physikalische Grundlagen der Flugzeug- antriebe 1959: Bestell-Nr. 7219	DM 1,00
Dipl.-Ing. Kleiber:	Elektrische Ausrüstung im Flugzeug 1959: Bestell-Nr. 7229	DM 2,50
Ing. Römer:	Korrosion und Korrosionsschutz unter besonderer Berücksichtigung des Flugzeug- baus 1959: Bestell-Nr. 7213	DM 2,00
Dipl.-Ing. Richter:	Grundlagen der elektrischen Bordgeräte 1960: Bestell-Nr. 7227	DM 2,25
Ing. George:	Metallschweißen im Flugzeugbau 1960: Bestell-Nr. 7226	DM 2,50
Ing. Hückel, Dipl.-Gwl. Förster:	Stahl und Eisen unter besonderer Berück- sichtigung des Flugzeugbaus 1960: Bestell-Nr. 7202	DM 2,50
Dipl.-Ing. Hoffmann:	Aufbau des Tragflügels 1960: Bestell-Nr. 7208	DM 1,50

Dipl.-Ing. Hoffmann:	Aufbau des Rumpfes, Aufbau des Leitwerks, Aufbau der Steuerung 1961: Bestell-Nr. 7245	DM 2,25
Dipl.-Ing. Hoffmann:	Aufbau des Fahrwerks, Innenausstattung des Flugzeugs 1961: Bestell-Nr. 7246	DM 2,00
Obering. Haas:	Grundlagen der Flugzeughydraulik 1961: Bestell-Nr. 7234	DM 2,75
J. Lehmann:	Normalnieten 1960: Bestell-Nr. 7304	DM 1,00
A. Haak:	Bördeln 1961: Bestell-Nr. 7306	DM 1,00

V o r t r ä g e u n d A b h a n d l u n g e n

Obering. Strobels:	Neuzeitliche Konstruktionen und Bauweisen im Flugzeugbau 1957/59: Bestell-Nr. 7001	DM 1,25
Prof. Dr. phil. Cordes:	Das Strahltriebwerk als Flugzeugantrieb 1958/61: Bestell-Nr. 7002	DM 1,30
Prof. Dr.-Ing. Backhaus:	Einführung in Probleme der aerodynamischen Flugzeuggestaltung 1958/59: Bestell-Nr. 7003	DM 1,30
Dipl.-Ing. Schmitt:	Schwingungsprobleme im Flugzeugbau 1959: Bestell-Nr. 7006	DM 1,25
Dr.-Ing. Strauss:	Windkanäle als Arbeitsmittel für die Flugzeugentwicklung 1959: Bestell-Nr. 7007	DM 1,75
Obering. Griebisch:	Die Perspektiven der Flugzeugfertigung 1959: Bestell-Nr. 7008	DM 1,50
Dipl.-Ing. Günther:	Festigkeitsprobleme des modernen Flug- zeugbaus 1959: Bestell-Nr. 7009	DM 1,50
Dr.-Ing. Lehmann:	Einige aerodynamische und flugmechanische Probleme des Verkehrsflugzeugbaus 1959: Bestell-Nr. 7010	DM 1,25
Dr. rer. nat. Grochalski:	Ausnutzungsmöglichkeiten der Atomenergie für den Antrieb von Flugzeugen 1959: Bestell-Nr. 7011	DM 1,50
Dipl.-Ing. Jürgens:	Diesseits und jenseits der Schallmauer - Aerodynamische Vorgänge bei Unter- und Überschallgeschwindigkeit 1959: Bestell-Nr. 7012	DM 1,00

Ing. Hauthal:	Die technische Gamma-Durchstrahlung und die Perspektiven ihrer Anwendung in der Luftfahrtindustrie 1959: Bestell-Nr. 7013	DM 1,00
Prof. Dr.-Ing. Claussnitzer:	Flugzeuggeräte und elektrische Ausrüstung von Flugzeugen (ein Überblick) 1960: Bestell-Nr. 7015	DM 1,50
Obering. Haseloff, Ing. Kokoschke:	Druckkabinen und Klimaanlage 1960: Bestell-Nr. 7016	DM 1,25
Ing. Paasch:	Einführung in das Gebiet Festigkeitsvor- schriften für Flugzeuge 1960: Bestell-Nr. 7017	DM 1,00
Dr.-Ing. Mansfeld:	Organisation und Technik der Flugsicherung 1960: Bestell-Nr. 7019	DM 1,50

Ihre Bestellungen, möglichst Sammelbestellungen, richten Sie bitte an die
Hauptabteilung Literatur im Zentralinstitut für Automatisierung

Bestell- und Lieferwesen

D r e s d e n N 2 , Postfach 40.

Aluminium-Sinter- werkstoffe

Format: pdf, A5, Klammerheftung

Anzahl der Seiten: 57

Erscheinungsjahr: 1961

Autor: Dipl.-Ing. Joachim Sternkopf

Herausgeber: Forschungszentrum
der Luftfahrtindustrie

Besitzer des Dokuments:

Volker Schwerdt

Gescannt und bearbeitet:

Volker Schwerdt